

反渗透和纳滤膜产品 技术手册

2026版



美国海德能
Solutions You Need, Technologies You Trust!

海德能™ (近)零排放解决方案

一种兼顾水资源高效利用和运行成本的废水管理模式



美国海德能(Hydranautics), 始终坚持膜产品的创新和发展, 专为应对各种高难度废水处理所研发的PRO系列膜元件, 能够为ZLD/MLD系统提供优质的膜技术解决方案, 为工业行业绿色转型及可持续发展提供可靠的技术支撑。

PRO系列膜元件产品型号

PRO系列膜元件可根据其产品特性应用于零排放系统的不同工艺阶段, 能够在达成废水浓缩减量、提高水回收率、分盐资源化的同时, 兼顾节能和控制成本的目的。



PRO-XR1高脱盐率抗污染RO膜

- 对抗污染, 经久耐用, 适用于更具挑战的水质条件



PRO-LF1抗污染高压RO膜

- 高盐度条件下, 超强对抗有机物污染, 高效耐用



PRO-XP1超高压RO膜

- 高倍浓缩, 减量蒸发



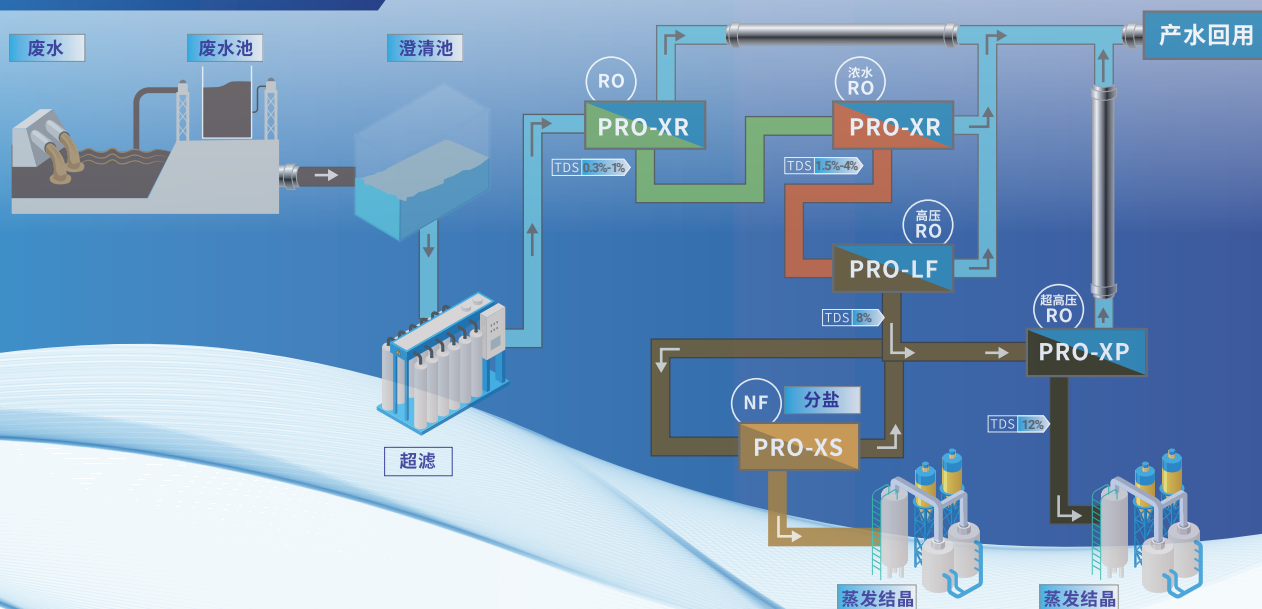
PRO-XS系列优异离子选择性NF膜

- 具有高离子选择性, 有效实现分盐资源化

主要特点:

- 耐用RO和NF膜元件, 抗污染、化学品耐受度好。清洗周期长, 使用寿命长;
- NF膜具有优异离子选择性, 分盐效果好;
- 超高压RO膜最高耐压可达12.4 MPa;
- 创新膜片, 减少有机物吸附;
- 34mil进水隔网, 防止胶体和颗粒物污堵;
- 专利快速排气端板, 防止启机时压力冲击。

废水(近)零排放系统工艺流程



PRO系列说明和性能参数

PRO-XR 高脱盐率抗污染RO膜

PRO-XR是结合高脱盐率、高产水量性能的低压抗污染RO膜。

「性能优势」

化学性好，使用寿命长
特殊进水格网，减少清洗频率和成本

PRO-XR1

产水量：	公称 (最低) 脱盐率：	最高进水压力：
11,500 gpd (43.5 m ³ /d)	99.8% (99.5%)	600 psi (4.14 MPa)

* 测试条件: 2,000ppm NaCl溶液, 压力1.55MPa, 温度25°C, 回收率15%, pH 6.5-7.0

PRO-LF 抗污染高压RO膜

PRO-LF是电中性、亲水性RO膜元件，在处理高含盐废水时可以降低有机污染，适合处理高污染的浓水水源。

「性能优势」

电中性、亲水性膜表面，有机物污染低
清洗周期长，清洗费用低，系统停机时间短

PRO-LF1

产水量：	公称 (最低) 脱盐率：	最高进水压力：
7,700 gpd (29.1 m ³ /d)	99.8% (99.7%)	1200 psi (8.27 MPa)

* 测试条件: 32,000ppm NaCl溶液, 压力5.5MPa, 温度25°C, 回收率10%, pH 6.5-7.0

PRO-XS 优异离子选择性NF膜

PRO-XS是离子选择性高的NF膜系列，用于盐分离、提纯和回收利用。

「性能优势」

多价阴离子脱除率高，如：SO₄²⁻、PO₄³⁻
硬度和有机物脱出率好
有低压和高压两种耐压等级可选，适用盐分范围宽

PRO-XS2

产水量：
11,000 gpd (41.6 m ³ /d)
公称 (最低) 脱盐率：
99.7% (99.6%)
最高进水压力：
600 psi (4.14 MPa)

PRO-XS5

产水量：
9,650 gpd (36.5 m ³ /d)
公称 (最低) 脱盐率：
99.8% (99.6%)
最高进水压力：
1,200 psi (8.27 MPa)

* 测试条件: 2,000ppm MgSO₄溶液, 压力0.76MPa, 温度25°C, 回收率15%, pH 6.5-7.0

PRO-XP 超高压RO膜

PRO-XP是超高压RO膜，最高耐压达12.4MPa (1800psi)，适用于高盐水的极限浓缩。

「性能优势」

提升RO膜法的盐分浓缩极限值
缩小下游蒸发器规模，降低投资和运行成本
提高ZLD / MLD系统的整体效率

PRO-XP1

产水量：	公称 (最低) 脱盐率：	最高进水压力：
8,000 gpd (30.3 m ³ /d)	99.8% (99.7%)	1,800 psi (12.4 MPa)@30°C

* 测试条件: 32,000ppm NaCl溶液, 压力5.5MPa, 温度25°C, 回收率10%, pH 6.5-7.0

主要细分市场和应用

煤化工



冶金



电力



市政



ZLD/MLD系统

循环排污水、脱硫废水

市政废水减量

分盐、回收

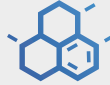
RO浓水减量



电镀



氯碱



印染



新能源

PRO-XS5 优异离子选择性纳滤膜

PRO-XS是离子选择性NF系列, 能实现不同价盐的有效分离, 适用于盐分离、提纯和回收利用



优异的离子选择性

能实现单价离子和二价离子的选择性分离



耐化学物质性能增强

pH耐受达到pH12



硬度脱除率高

通过膜技术改进实现更好的硬度去除效果, 适合精制分盐等应用领域



更高的耐压性能

最高耐压8.27MPa, 适应更宽泛的进水TDS

运行参数:



产水量

9,650 gpd



脱盐率

99.8%

* 测试条件: 2,000 ppm MgSO_4 溶液,
压力7.6 bar, 温度25°C, 回收率15%,
pH 6.5-7.0



北京

北京市朝阳区建国路79号华贸中心写字楼2号楼2107室
电话: 86-10-65900688 传真: 86-10-65900788

上海

上海市长宁区遵义路150号南丰城C座16楼
电话: 86-21-52082255 传真: 86-21-52081910



扫一扫关注公众号

Nitto

Innovation for Customers

HYDRANAUTICS



ESNA5-LD 节能型纳滤膜

低压大通量

市政饮用水提标改质的理想选择

ESNA5-LD纳滤膜元件可以在超低的操作压力下保持高产水量，同时高效去除水中的有机污染物，以及二价盐、硝酸盐等无机物质，从而降低能源消耗并优化制水成本。



产水量大&去除率高



运行能耗低



化学稳定性好



抗污染性能优

应用场景推荐



- ✓ 市政自来水的深度处理与提标处理
- ✓ 地下水的软化脱盐处理

HYDRANAUTICS 美国海德能

www.hydranautics.cn

北京

北京市朝阳区建国路79号华贸中心写字楼2号楼2107室
电话:86-10-65900688 传真:86-10-65900788

上海

上海市长宁区遵义路150号南丰城C座16楼
电话:86-21-52082255 传真:86-21-52081910



扫一扫关注公众号

Hydranautics品牌反渗透和纳滤膜元件 制造产地以及在国内技术支持的说明

美国海德能公司自 1996 年 3 月，在北京设立第一个常驻代表机构——美国海德能公司北京代表处以来，一直致力于国内反渗透、纳滤及超滤膜法水处理技术和市场的发展。十多年来，在广大用户的大力支持下，美国海德能公司在中国的业务得到不断的拓展，公司的品牌、产品和服务已深为广大用户所接受。

近年我们发现国内一些企业使用“海德能”作为商号，甚至作为反渗透膜元件及其相关产品的标识，这一行为已经给我公司用户造成了混淆。为了避免给用户带来不便，我们在此做出如下说明：

1

美国海德能公司迄今为止未在中国设立任何以“海德能”命名的企业和公司，例如 XX海德能科技有限公司，也未委托任何冠名“海德能”的公司或企业生产、代理或授权销售反渗透膜元件，未与该企业或公司进行任何形式的合作。

2

Hydranautics品牌的反渗透和纳滤膜元件仅在以下2个工厂生产：

- 美国：美国海德能公司总部，加利福尼亚州 Oceanside 市
- 日本：滋贺制造厂，滋贺县草津市。

3

2015年7月起日东(中国)新材料有限公司在北京、上海两个城市的销售和技术人员负责全部 Hydranautics品牌膜产品在国内的技术支持和服务，若您有任何有关品牌、产地以及技术信息的问题，敬请与我们联系，我们会详尽解答您的疑问。

我们对由此给各位尊贵用户带来的混淆和不便表示遗憾！对各位对我们长久以来的大力支持深表感谢！

美国海德能公司

品牌声明

美国海德能公司Hydranautics品牌的反渗透和纳滤膜产品声明

■ 全球目前仅设有2个制造生产工厂



日本滋贺工厂



美国Oceanside工厂

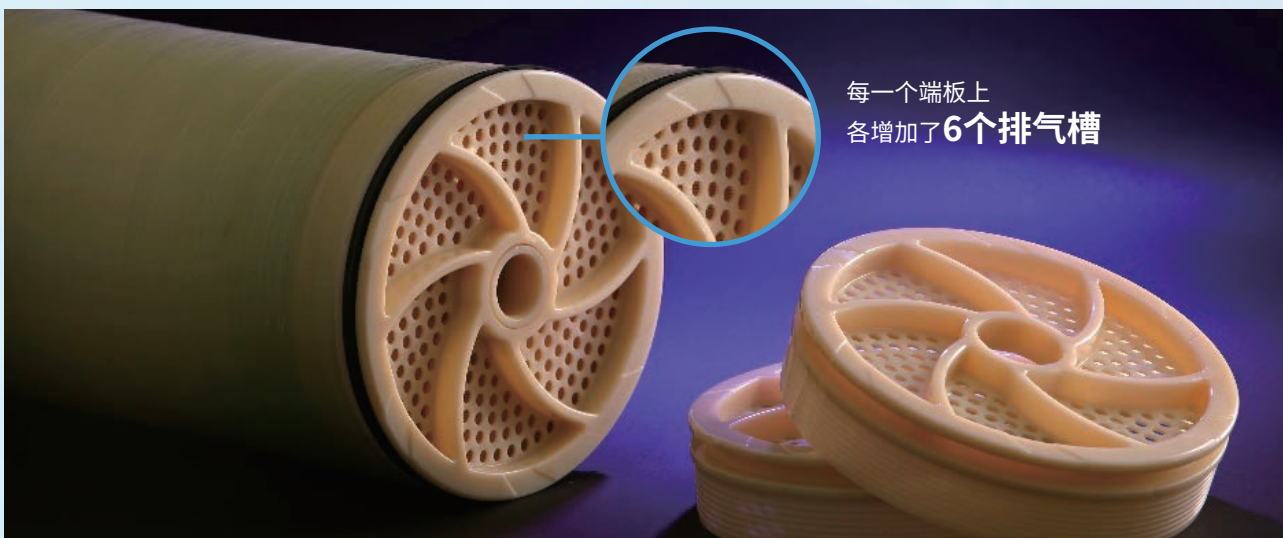
■ 敬请客户认清以下商标

Nitto
Innovation for Customers

HYDRANAUTICS

同时具有以上两个标识的反渗透、纳滤膜元件才是美国海德能公司的产品。

■ 膜元件端板快速排气技术



海德能™全系列8英寸膜元件均已采用该技术。

海德能™

日东集团旗下的全资子公司美国海德能公司为了保护知识产权、维护品牌形象，于2016年成功注册海德能™商标。

膜技术的知名企业——美国海德能公司于1996年进入中国成立美国海德能公司北京代表处，开拓Hydranautics品牌反渗透膜、纳滤膜、超微滤膜在中国的市场推广和应用。经过多年的创新和稳步发展，Hydranautics膜产品取得了用户的支持和信任，在各种水处理领域得到广泛应用。“海德能膜”也已成为水处理用户心目中的著名的膜品牌。

近年来一些国内企业和公司，例如XX海德能科技有限公司，生产和销售反渗透膜产品并以海德能大肆宣传，对一些用户造成了混淆，也一定程度影响了Hydranautics的品牌形象。而美国海德能公司并没有委托任何冠名“海德能”的公司或企业生产、代理或授权销售反渗透膜元件，未与该企业或公司进行任何形式的合作。

海德能™商标的成功注册，终于为“海德能膜”这一有口皆碑的膜品牌正名。美国海德能公司将继续通过创新为客户创造价值作贡献；同时保护品牌，打击假冒、侵权等行为。

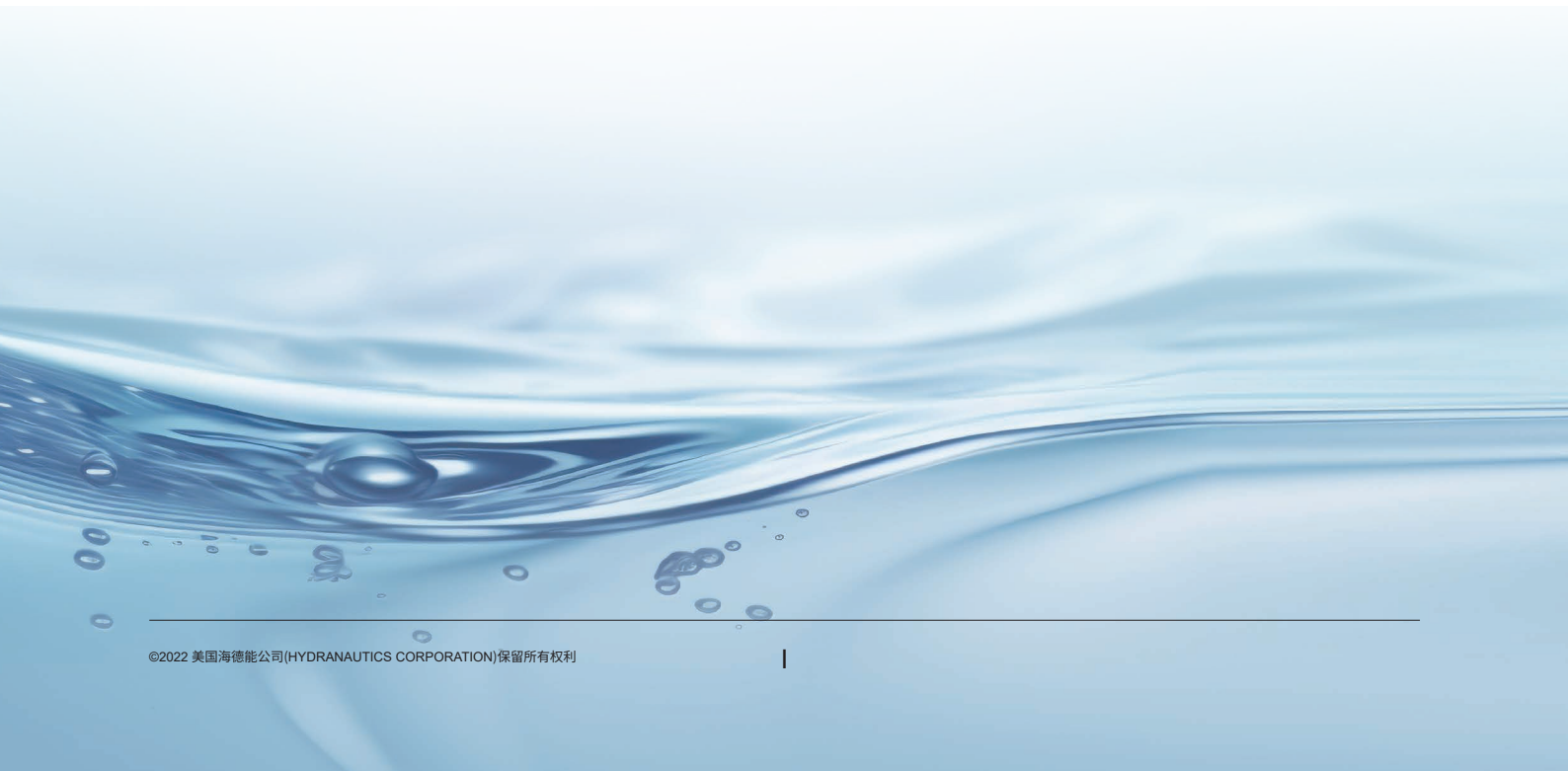
美国海德能公司



美国海德能

反渗透和纳滤膜产品技术手册

© Hydranautics - A Nitto Group Company



美国海德能 公司简介

美国海德能公司 (HYDRANAUTICS) 创立于1963年, 总部位于美国加利福尼亚州的Oceanside市, 拥有15 000平方米的研发和生产基地。自1970年开始步入反渗透水处理领域以来, 一贯坚持追求先进的制膜技术、较高的产品质量和完善的售后服务, 逐步成为世界反渗透和纳滤膜元件的重要供应商之一, 也是较早通过ISO 9001质量体系认证的膜生产企业。

美国海德能公司在全球设有3个分离膜产品制造厂, 分别是位于美国加利福尼亚州Oceanside市和日本滋贺县(Shiga)草津市(Kusatsu)的两个膜产品制造厂, 以及位于中国上海市松江工业区的反渗透膜元件组装厂。以迅捷的方式向客户提供种类繁多、相同品牌及同样品质的分离膜产品。同时, 在美国和日本的两个研发中心夜以继日地研究新的膜分离机理、新的膜材料及新的制膜工艺, 源源不断地推出新产品, 以满足客户的不同需求。

1987年美国海德能公司被日东电工集团收购, 成为日东全球膜事业部的一部分。2015年, 中国膜相关事业的机能被统一整合至日东(中国)新材料有限公司。日东(中国)新材料有限公司在中国北京、上海、天津、深圳等城市设有分公司或销售和技术人员, 向中国用户提供专业完备的技术支持和服务。



主要产品系列¹

- PRO系列零排放和工艺应用膜元件
- PROC™系列增强型抗污染高脱盐反渗透膜元件
- CPA™系列低压高脱盐反渗透膜元件
- ESPAT™系列超低压大通量反渗透膜元件
- LFC™系列抗污染高脱盐反渗透膜元件
- SWC™系列海水淡化反渗透膜元件
- ESNA™系列节能型纳滤膜元件
- HYDRACoRe™系列抗氧化脱色用纳滤膜元件
- DairyRO™系列乳制品浓缩分离反渗透膜元件
- SanRO™-HS系列卫生级反渗透膜元件
- NTU系列超纯水终端超滤膜组件

主要用途

- 海水淡化、苦咸水淡化
- 工业废水、市政污水及中水的深度处理回用、(近)零排放
- 工业纯水、锅炉补给水的制造
- 饮用纯净水的制造
- 市政给水的净化处理
- 食品、制药及各种工艺用水制备
- 半导体用超纯水的制造
- 地表水的除油
- 各种工艺废水的脱色
- 乳制品的浓缩分离

1. 另有适用于其他特殊用途的超滤、纳滤和反渗透膜产品。如有需要, 请与美国海德能公司驻华代表机构联络, 我们会尽可能为您提供帮助。

■ 联络我们

- 美国海德能公司总部：

地址：401 Jones Road, Oceanside, CA 92054

电话：1-800-CPA-PURE, 1-760-901-2500

传真：1-760-901-2578

- 北京代表处

地址：北京市朝阳区建国路79号华贸中心写字楼2号楼2107室

电话：86-10-6590-0688

传真：86-10-6590-0788

- 上海代表处

地址：上海市长宁区遵义路150号南丰城C座15-16F, 200051

电话：86-21-5208-2255

传真：86-21-5208-1910

网址：www.hydranautics.cn (中文)

www.membranes.com (英文)

邮箱：HYD-info@nitto.com

美国海德能IMSD云设计网站：www.imsdesign.com (全球)

www.imsdesign.cn (中国)

目 录

美国海德能公司简介	II
目录	V
第一部分反渗透和纳滤膜产品	1
第一章 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件的特点及优势	2
1.1 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件发展史	2
1.2 美国海德能公司反渗透膜和纳滤膜元件的特点	3
1.2.1 领先的平膜制备技术	3
1.2.2 精湛的膜元件卷制技术	5
1.2.3 LD 技术	5
1.2.4 独特的抗污染技术	6
1.2.5 膜元件端板快速排气专利技术	8
1.2.6 特种浓缩分离专用膜元件的特点	9
1.3 美国海德能公司膜元件在各应用领域中的主要应用业绩	10
第二章 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件的规格与性能	13
2.1 产品规格和参数	13
2.1.1 海德能™ PRO 系列零排放和工艺应用膜元件	13
2.1.2 PROC™ 系列增强型抗污染反渗透膜元件	14
2.1.3 CPA™ 系列低压反渗透膜元件	16
2.1.4 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件	17
2.1.5 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件	18
2.1.6 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件	19
2.1.7 ESNA™ 系列节能型聚酰胺纳滤膜元件	20
2.1.8 SanRO™-HS 系列卫生热消毒型反渗透膜元件	22
2.1.9 HYDRACoRe™ 系列高耐氯性脱色用纳滤膜元件	23
2.1.10 DairyRO™ 系列乳制品浓缩分离反渗透膜元件	24
2.2 产品的性能特点	25
2.2.1 增强型抗污染反渗透膜元件 PROC™ 系列	25
2.2.1.1 PROC™ 系列膜元件的特点	25
2.2.1.2 PROC10 反渗透膜元件的特点和测试参数	27
2.2.1.3 节能型 PROC20 反渗透膜元件的特点和测试参数	30
2.2.1.4 PROC30 反渗透膜元件的特点和测试参数	32
2.2.2 CPA™ 系列低压高脱盐反渗透膜元件	35

2.2.2.1 CPA™ 系列低压高脱盐反渗透膜元件的特点	35
2.2.2.2 CPA3-LD 低压反渗透膜元件的测试参数	35
2.2.2.3 CPA™ 系列膜元件的应用	37
2.2.3 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件	38
2.2.3.1 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的特点	38
2.2.3.2 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的测试参数	40
2.2.3.3 ESPA™ 系列超低压大通量反渗透膜元件的应用	44
2.2.4 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件	45
2.2.4.1 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件的特点	45
2.2.4.2 LFC3-LD 抗污染反渗透膜元件的测试参数	46
2.2.4.3 LFC™ 系列抗污染反渗透膜的应用	48
2.2.5 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件	49
2.2.5.1 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件的特点	49
2.2.5.2 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件的性能	49
2.2.6 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件	52
2.2.6.1 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件的特点	52
2.2.6.2 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件的应用	53
2.2.7 特种浓缩分离专用膜元件	55
2.2.7.1 HYDRACoRe™ 系列高耐氯脱色用纳滤膜	55
2.2.7.2 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件及应用	58
2.2.7.3 DairyRO™ 系列乳制品浓缩膜元件	59
2.2.8 海德能™ PRO 系列零排放和工艺应用膜元件	60
2.2.8.1 PRO-XR1 / PRO-LF1 膜元件的特点	60
2.2.8.2 PRO-XP1 膜元件的特点	62
2.2.8.3 PRO-XS 系列纳滤膜元件的特点	63

第二部分反渗透和纳滤系统的设计

第三章 反渗透和纳滤设计

3.1 反渗透和纳滤基础	66
3.1.1 膜与膜分离	66
3.1.2 反渗透和纳滤基本原理	67
3.1.3 影响膜性能的主要因素	72
3.1.3.1 操作压力的影响	72
3.1.3.2 给水流量的影响	73
3.1.3.3 给水含盐量的影响	73
3.1.3.4 温度的影响	73
3.1.3.5 回收率	74
3.1.3.6 pH 值的影响	74
3.2 水化学及水质分析	76
3.2.1 水化学	76
3.2.1.1 水温	76

3.2.1.2 pH 值	76
3.2.1.3 电导率.....	77
3.2.1.4 悬浮物.....	77
3.2.1.5 离子成分	77
3.2.1.6 金属成分	79
3.2.1.7 有机成分	79
3.2.1.8 表示单位	80
3.2.1.9 水的种类	81
3.2.2 水质分析	82
3.2.2.1 水温、pH 值和电导率	82
3.2.2.2 悬浮物.....	83
3.2.2.3 主要离子和金属	84
3.2.2.4 硅.....	84
3.2.2.5 有机成分	85
 第四章 反渗透和纳滤系统的预处理.....	 86
4.1 结垢的防止.....	88
4.1.1 结垢的原因	88
4.1.2 Langelier 指数和碳酸钙沉淀势 (CCPP)	88
4.1.3 阻垢剂.....	89
4.1.4 水的软化	90
4.1.5 回收率.....	90
4.2 胶体污染的防止	90
4.2.1 絮凝	91
4.2.2 介质过滤	91
4.2.3 活性炭.....	92
4.2.4 微滤和超滤	92
4.2.5 保安过滤器	92
4.2.6 除铁和除锰	93
4.3 生物污染的防止	93
4.3.1 微生物污染的特征.....	93
4.3.2 杀菌消毒	93
4.3.2.1 药品杀菌	93
4.3.2.2 紫外线杀菌	94
4.4 有机污染的防止	94
4.5 膜劣化的防止	94
4.5.1 物理劣化	94
4.5.2 化学劣化	94
 第五章 反渗透和纳滤系统的设计.....	 95
5.1 系统配置	95

5.1.1 概述	95
5.1.2 单元件系统	95
5.1.3 单段系统的排列	96
5.1.4 多段系统的排列	96
5.1.5 多级系统	98
5.1.6 采用批式操作的浓缩循环系统	98
5.2 系统设计步骤	99
5.2.1 水源	99
5.2.2 膜元件的选择	99
5.2.3 平均水通量和回收率的确定	99
5.2.4 理论膜元件数量	99
5.2.5 压力容器的数量	99
5.2.6 膜元件的排列——理论段数	100
5.2.7 系统的优化	100
5.2.8 系统的性能	100
5.2.8.1 压力和渗透压在系统中的变化	100
5.2.8.2 产水流量和产水水质在系统中的变化	101
5.2.8.3 回收率和进水流量的变化	101
5.3 海德能公司反渗透和纳滤膜元件设计指南	102
5.4 系统设计软件 IMSDesign 云的使用方法	102
5.4.1 IMSDesign 云使用说明	103
5.4.2 设计软件的其他附加功能	114
5.5 RODataXL 使用说明	115
5.5.1 RODataXL 介绍	115
5.5.2 新建项目	115
5.5.3 参考数据	116
5.5.4 标准化计算	118
5.5.5 图表	118
5.6 系统构成的要素	119
5.6.1 高压泵	119
5.6.2 管路要求	119
5.6.3 水箱	120
5.6.4 传感器	120
5.6.5 药剂	120
5.6.5.1 药剂注入点	120
5.6.5.2 药剂使用的注意事项	120
5.6.6 计量仪表	122
第三部分反渗透和纳滤系统的运行和维护	123
第六章 膜元件的安装和运行	124
6.1 膜元件的安装	124

6.1.1 膜元件安装前准备.....	124
6.1.2 膜元件的安装顺序.....	125
6.1.3 膜元件的拆卸.....	126
6.2 系统的运行及停止.....	127
6.2.1 初始运行前需确认事项.....	127
6.2.2 系统的日常启动.....	128
6.2.3 停止运行.....	128
6.2.4 注意事项.....	129
6.3 运行管理.....	129
6.3.1 反渗透系统的管理.....	129
6.3.2 反渗透系统运行数据的管理.....	129
6.3.2.1 反渗透膜运行数据管理的重要性.....	129
6.3.2.2 测定运行数据.....	130
6.3.2.3 运行数据整理.....	130
6.3.2.4 将数据图表化.....	131
6.3.3 反渗透系统的停运保护.....	131
6.4 膜元件的运输、保管和废弃.....	132
6.4.1 出厂状态.....	132
6.4.2 运输.....	132
6.4.3 出厂后的保管.....	133
6.4.4 更换准则.....	133
6.4.5 废弃.....	134
第七章 系统故障的诊断和排除.....	135
7.1 概述.....	135
7.2 故障诊断.....	135
7.2.1 系统的诊断.....	135
7.2.1.1 数据的记录和标准化.....	135
7.2.1.2 系统的诊断和原因的推定.....	135
7.2.2 各个压力容器的诊断.....	136
7.2.3 压力容器内各个膜元件的诊断.....	136
7.2.3.1 探针法的目的.....	136
7.2.3.2 探针法测定的位置.....	137
7.2.3.3 探针法的连接方式.....	137
7.2.3.4 探针法的实施方法.....	137
7.2.3.5 使用探针法的注意事项.....	138
7.3 故障现象、原因以及解决方法.....	138
7.4 膜元件的分析.....	138
7.4.1 外观和重量.....	139
7.4.2 膜元件性能检查.....	139
7.4.3 染色试验.....	140

7.4.4 膜元件的解体	140
7.4.5 FT-IR 分析	140
7.4.6 SEM 和 XMA 射线分析	140
7.4.7 化学清洗测试	141
7.4.8 各检测程序价格概述	141
第八章 反渗透和纳滤系统的清洗	143
8.1 膜污染简介	143
8.2 物理清洗（冲洗）	143
8.2.1 冲洗的作用	143
8.2.2 冲洗的要点	144
8.2.2.1 冲洗的流速	144
8.2.2.2 冲洗的压力	144
8.2.2.3 冲洗的频率	144
8.2.3 冲洗的步骤	145
8.2.4 注意事项	145
8.3 化学清洗	146
8.3.1 化学清洗的标准	146
8.3.2 化学清洗的频率	147
8.3.3 清洗药剂的选择	147
8.3.4 污染物的种类及其影响	148
8.3.5 海德能公司推荐的常规清洗液介绍	148
8.3.6 在线化学清洗	151
8.3.6.1 化学清洗设备	151
8.3.6.2 化学清洗系统规格和注意事项	153
8.3.7 离线清洗	154
8.3.8 膜元件反向清洗	154
8.3.9 系统消毒	156
8.3.10 药剂兼容性	158
第四部分应用问答及文献案例	159
第九章 常见问题应用问答	160
9.1 海德能公司(Hydranautics)、日东电工集团(Nitto Denko Corporation)、日东(中国)新材料有限公司是什么关系	160
9.2 海德能膜元件有哪些技术优势	160
9.3 海德能公司有哪些系列产品	160
9.4 海德能公司产品的的主要用途是	160
9.5 ESPA2-LD MAX 节能超低压、大产水量、抗污染 RO 膜有哪些特点	161
9.6 ESNA5-LD 节能型纳滤膜有哪些特点	161
9.7 ESNA5-LD 和 PRO-XS5 的区别	161

9.8 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件相比常规膜元件的优势是.....	161
9.9 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件的使用温度和常规膜元件有何区别	162
9.10 PRO 系列较常规抗污染膜有何特点	162
9.11 如何确定系统的回收率	162
9.12 膜元件的公称脱盐率、实际脱盐率与系统脱盐率有何不同.....	162
9.13 如何计算系统脱盐率	163
9.14 影响膜性能的主要因素有哪些	163
9.15 温度对膜元件性能有何影响	163
9.16 什么是浓差极化，有哪些危害	164
9.17 如何降低浓差极化的影响	164
9.18 什么是朗格利尔饱和指数 Langelier (LSI)	164
9.19 什么是 SDI15.....	165
9.20 反渗透对微生物的去除效果如何	165
9.21 常见的氧化剂有哪些，对膜有什么影响	165
9.22 反渗透膜元件常见的杀菌剂有哪些?	165
9.23 电导率与总溶解固体之间的关系	166
9.24 膜元件安装前应如何保存	166
9.25 安装于系统的膜元件如何停机保存.....	166
9.26 在设计膜系统前应做的水质分析项目有哪些	167
9.27 如何确定系统所需的理论膜元件数量	167
9.28 如何选择清洗泵	167
9.29 如何选择清洗水箱.....	168
9.30 如何使用海德能公司 IMSDesign 云计算软件.....	168
9.31 多段系统中如何解决前后段产水不均的问题	168
9.32 浓水回流的作用与风险.....	168
9.33 洗洁精、凡士林是否可以作为膜元件安装的润滑剂	169
9.34 膜元件安装前的清洁工作	169
9.35 膜元件的安装有方向么.....	169
9.36 膜元件安装需要哪些工具	169
9.37 膜元件安装时，记录膜元件在系统中的位置有什么好处	170
9.38 垫片的作用与安装的注意事项.....	170
9.39 止推环的作用与安装的注意事项	170
9.40 什么叫背压，产水背压会有什么不良后果.....	170
9.41 反渗透系统的运行需要哪些监测仪表，具体的作用是.....	170
9.42 反渗透系统初次启动与运行的注意事项	171
9.43 为什么刚开机时系统要低压冲洗	173
9.44 为什么要记录初始时的运行数据	173
9.45 如何获取标准化运行数据记录表	173
9.46 反渗透系统日常运行应记录哪些内容	173
9.47 膜系统的进水有哪些要求	174
9.48 ORP 控制建议如何	174
9.49 为什么二级反渗透系统给水会设计级间加碱工艺	175
9.50 什么时候需要对膜元件进行化学清洗，清洗药剂应如何选择	175

9.51 什么是离线清洗，有什么优点.....	175
9.52 什么是探针电导率测试.....	175
9.53 反向清洗的适用性与注意事项.....	175
9.54 不同品牌或型号膜元件是否可以混装.....	176
9.55 系统内膜元件是否可以部分更换.....	176
9.56 废旧膜元件的处理建议.....	176
 第十章 应用技术文献	 177
10.1 石油采出水回用 RO 性能.....	177
10.1.1 概述.....	177
10.1.2 介绍.....	177
10.1.3 RO 系统的预处理.....	178
10.1.4 RO 系统设计.....	179
10.1.5 RO 系统的性能.....	180
10.1.6 单支膜元件分析.....	181
10.1.7 总结.....	182
10.2 工业废水处理中采用超高压反渗透的效益.....	183
10.2.1 摘要.....	183
10.2.2 引言.....	183
10.2.3 超越标准 RO 的限制.....	183
10.2.4 用 UHPRO 替代工业生物反应器的效益.....	189
10.2.5 总结.....	190
10.3 PROC™ 在钢铁废水回用中的应用.....	191
10.3.1 概述.....	191
10.3.2 钢铁废水的分类和处理工艺.....	191
10.3.3 PROC10 在钢铁废水回用的应用.....	193
10.3.4 PROC30 在钢铁废水回用的应用.....	195
10.3.5 讨论.....	197
10.3.6 结论.....	198
10.4 通过创新膜技术提升零排放系统（ZLD）性能并优化成本.....	199
10.4.1 摘要.....	199
10.4.2 引言.....	199
10.4.3 方法与结果简述.....	200
10.4.4 结论.....	205
10.5 大型市政污水再生回用工程的节能路线.....	206
10.5.1 前言.....	206
10.5.2 市政污水回用项目背景.....	206
10.5.2.1 进水水质.....	206
10.5.2.2 预处理.....	207
10.5.3 现场试验、示范水厂和早期项目经验.....	208
10.5.3.1 OCWD 经验.....	208

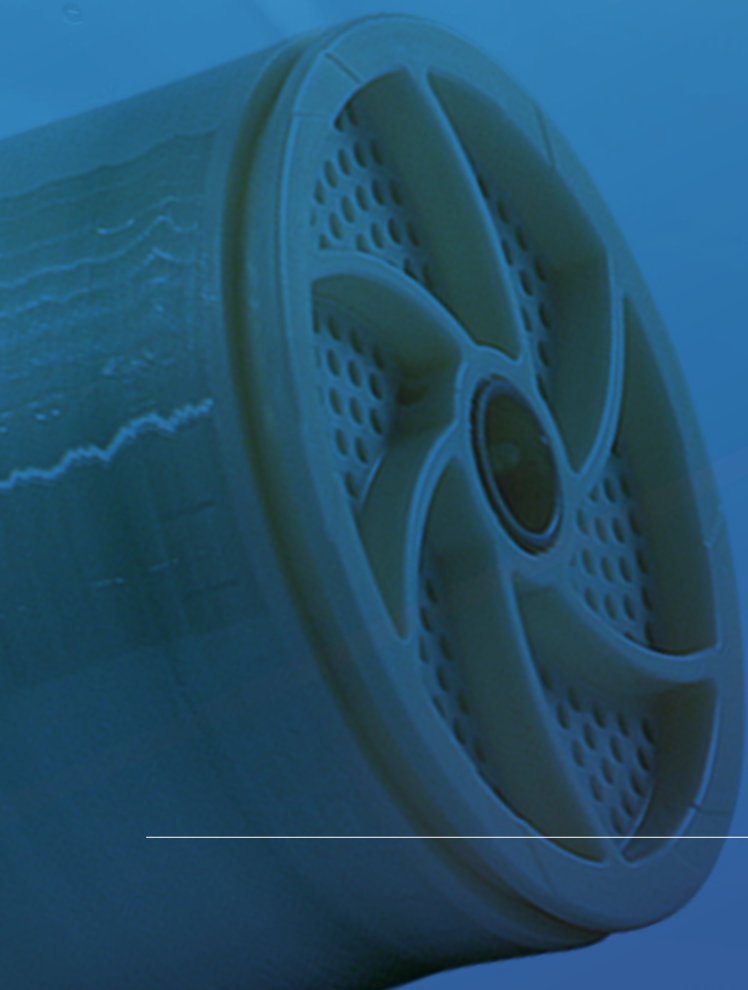
10.5.3.2 新加坡 Ulu Pandan 经验.....	210
10.5.4 污水回用厂系统设计和运行	212
10.5.5 结论	213
10.6 反渗透膜和纳滤膜对 PFAS 去除率的研究.....	214
10.6.1 PFAS 污染问题介绍.....	214
10.6.2 法规	215
10.6.3 水处理策略	216
10.6.4 用于处理 PFAS 的 NF 和 RO 膜系统	217
10.6.5 从摇篮到坟墓：PFAS 处理或处置方案.....	221
10.6.6 结论	222
10.7 贝尼厄普高级水回用厂——澳大利亚首个大型间接饮用回用厂	223
10.7.1 背景	223
10.7.2 引言	223
10.7.3 地下水补给试验（GWRT）	223
10.7.4 贝尼厄普一期.....	225
10.7.5 贝尼厄普二期.....	227
10.7.6 结论	228
10.8 膜技术的进步促进供水工艺的优化与成本的降低	229
10.8.1 引言	229
10.8.2 南加州的高级水处理	229
10.8.3 膜评估.....	231
10.8.4 测试结果	233
10.8.5 讨论	235
10.8.6 结论	238
10.9 海水淡化反渗透膜对硼和溴的脱除应用研究	239
10.9.1 前言	239
10.9.2 设计思路.....	239
10.9.3 研究数据和结果	245
10.9.4 结论	246

附录	247
-----------------	-----

附录 1 膜元件的一般选择方法及依据.....	248
附录 2 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件设计导则	250
附录 3 单位换算	252
附录 4 常见化合物在水中的溶度积（25 °C）	254
附录 5 反渗透和纳滤系统运行数据参考记录表	255
附录 6 膜元件及配件尺寸图	256
附录 7 符号表.....	258
附录 8 美国海德能公司主要反渗透和纳滤膜元件规格参数	259
附录 9 美国海德能标准工艺于材料保证书	294

第一部分

反渗透和纳滤膜产品



第一章 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件的特点及优势

1.1 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件发展史

美国海德能公司不断进行技术研发，持续推出新产品，完善产品系列，为不同需求的客户提供多样化性能的产品。

- 1963 年美国海德能公司在美国加利福尼亚州 Oceanside 市成立；
- 1970 年开始致力于反渗透膜元件的研发；
- 1989 年推出芳香聚酰胺复合膜 CPA 系列的第一支膜元件 CPA2；
- 1995 年推出超低压高水通量反渗透复合膜 ESPA™ 系列；
- 1996 年推出的 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件，可以在极低的压力下工作并脱除水中的硬度、铁、色度及三卤甲烷（THM）等有害物质；
- 2003 年，抗污染的电中性技术首次应用到 ESNA™ 系列纳滤膜元件上；
- 2003 – 2004 年推出海水淡化膜 SWC™ 系列三种新产品，适用于不同的应用范围；
- 2004 年，电中性抗污染 LFC™ 系列迎来了新的成员 LFC3-LD；
- 2006 年，美国海德能公司推出了增强型 PROC™ 系列反渗透膜元件家族的第一款抗污染反渗透膜元件 PROC10。该款膜元件具备高脱盐率，同时增加了端板排气结构并采用了新型隔网，这些专利技术的结合使该膜元件的耐污染以及易清洗性发挥得淋漓尽致。
- 2009 年，推出节能型抗污染反渗透膜 PROC20。该型号除了具有 PROC™ 系列的共同特性之外，通过结合独特的第三代平膜技术，可降低反渗透系统能耗高达 30%。
- 2010 年，随着膜卷制技术的提高，海德能率先推出膜面积高达 440ft² 的膜元件，将其命名为 MAX 技术，并成功应用于海水淡化膜元件，如 SWC5 MAX。MAX 技术后续逐步推广至海德能全系列产品。
- 2016 年推出 PROC30 和 ESPA2-LD MAX 膜元件。PROC30 实现了更高的产水量与脱盐率；ESPA2-LD MAX 采用 34mil 隔网，并实现 440ft² 膜面积。
- 2016 年 Hydranautics 品牌部分 RO 膜元件首次获得进口或国产涉及饮用水卫生安全产品卫生许可批件，并持续更新。
- 2016 年美国海德能公司在中国成功注册海德能™ 品牌。
- 2019 年美国海德能针对具有挑战性的工业废水与（近）零排放需求，推出了 PRO 系列。
- 2021-2024 年，美国海德能先后推出抗污染节能型纳滤复合膜 ESNA4-LD 与节能型纳滤膜 ESNA5-LD，分别应用于市政给水提质与污水处理的不同场景。
- 2025 年美国海德能推出最新的离子选择性纳滤膜 PRO-XS5，大幅度提升了分盐纳滤膜的耐化学性能，达到行业同类产品的领先水平。

1.2 美国海德能公司反渗透膜和纳滤膜元件的特点

1.2.1 领先的平膜制备技术

随着平膜技术的不断发展，美国海德能公司至今已成功推出三代膜片制备技术，始终引领行业前沿，见图 1.1。第一代膜片技术由于压力高、产水量低等性能的局限性几乎已退出高分子反渗透膜和纳滤膜市场。第二代和第三代膜片是对膜分离皮层表面微观形态进行控制的技术。分离皮层表面褶皱的增大，可提高有效分离皮层的比表面积，使单位有效膜面积下的微观表面积增大，在同等操作压力下提高产水量。实际使用时，制备相同产水量所需的操作压力下降，降低运行成本，达到节能的效果。美国海德能公司的节能型超低压大通量 ESPA 膜自 1995 年推出以来，已发展为美国海德能公司主要产品系列之一。

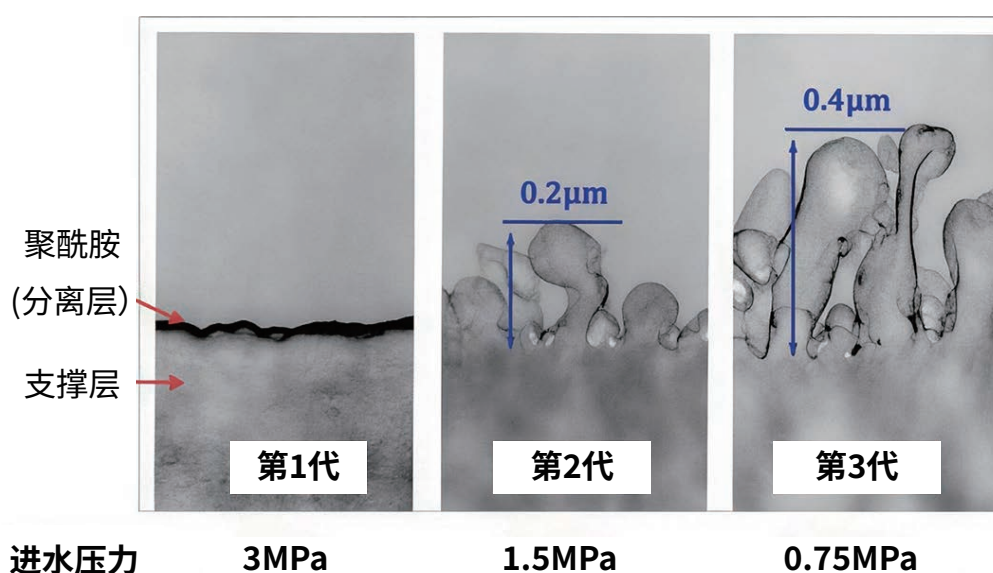


图 1.1 三代膜片断面透射电镜图像

分离皮层表面积的增加使得污染物仅堆积在分离皮层皱褶顶部表面。图 1.2 显示即使膜表面污染严重的膜元件，在电镜照片下能清晰地看出底部部位没有污染物堆积。平膜表面与污染物间缝隙的存在能减缓膜因受到污染所导致的产水量下降，并且便于通过冲洗或化学浸泡使污染物从膜表面剥离，提高清洗恢复率。

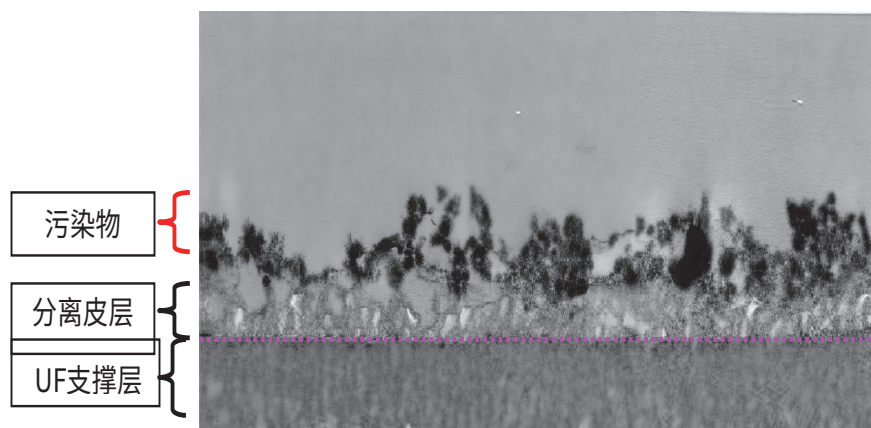


图 1.2 膜表面污染物堆积图

正是因为具备上述膜表面污染特征和清洗恢复性好的特点，ESPA2 膜在美国和新加坡的几个大型市政污水回用项目中表现出色，至今每天在世界各地处理大量的市政污水回用。

美国海德能公司通过先进高分子合成控制技术提升交联度，从而提高脱盐率（见图 1.3）。例如，美国海德能公司在 2006 年推出的 PROC10 膜元件采用海德能™ 独特配方，提高平膜分离层的致密度，实现了高脱盐率和高稳定性的有机结合。在 2016 年，公司通过创新研发和生产工艺的精准控制，推出了产水量和公称脱盐率同时达到 PROC 系列最高水平的 PROC30。

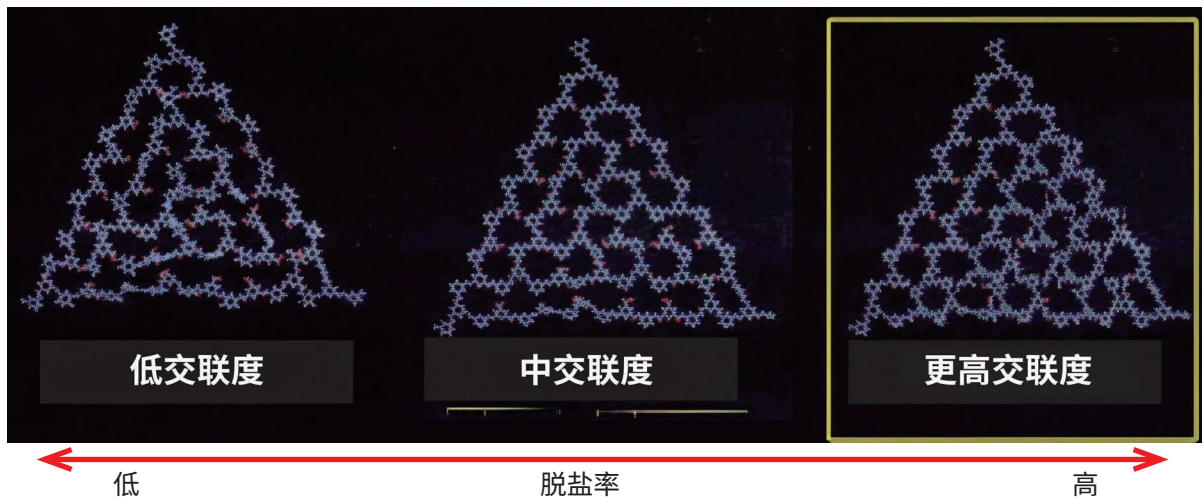


图 1.3 交联结构示意图

2016 年，为实现单支膜元件更大膜面积，美国海德能公司研发出全新的三层膜片结构（见图 1.4）。该结构在保持表面的聚酰胺分离层不变的基础上，将 UF 支撑层比传统膜片的支撑层设计得更薄，同时保证支撑强度不受影响。

膜片在制造过程中，采用表面检查装置进行监控，发现有缺陷，该处膜片不会用于膜元件的卷制。因此，每支膜元件上均无被修补的膜片。此外，公司对每支膜元件进行性能检测，确保合格产品方可出厂。

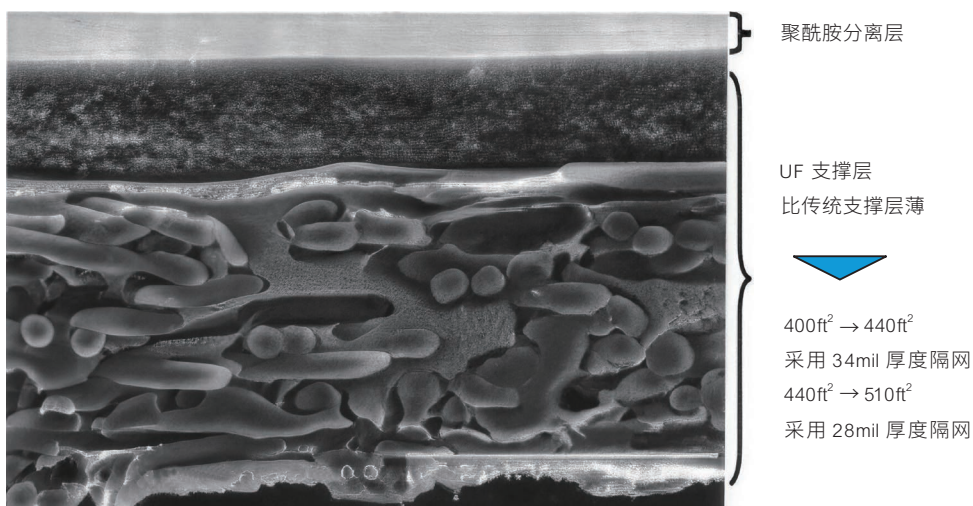


图 1.4 创新膜片结构实现大膜面积

1.2.2 精湛的膜元件卷制技术

膜元件的卷制技术一直在不断提高和优化，早期的卷制技术只能做到采用 28mil 隔网卷制 365ft² 的膜元件（见图 1.5）。2009 年，日本滋贺工厂的反渗透膜制造基地扩建投产，配备了全新优化设计的全自动化生产线，实现了对卷制工艺的精确控制。全自动化控制能使外型尺寸固定的膜元件提升更大的有效膜面积。因此，美国海德能公司不仅在超低压膜中有大膜面积 440ft²（40.9m²）的 ESPA2 MAX，2009 年还率先在海水淡化膜的全系列推出了 MAX 膜，即有效膜面积为 440ft²（40.9m²）的海水淡化膜。2016 年，通过采用创新膜片技术并结合精湛的全自动化卷制技术，美国海德能推出了拥有宽流道且膜面积达 440ft² 的 ESPA2-LD MAX。

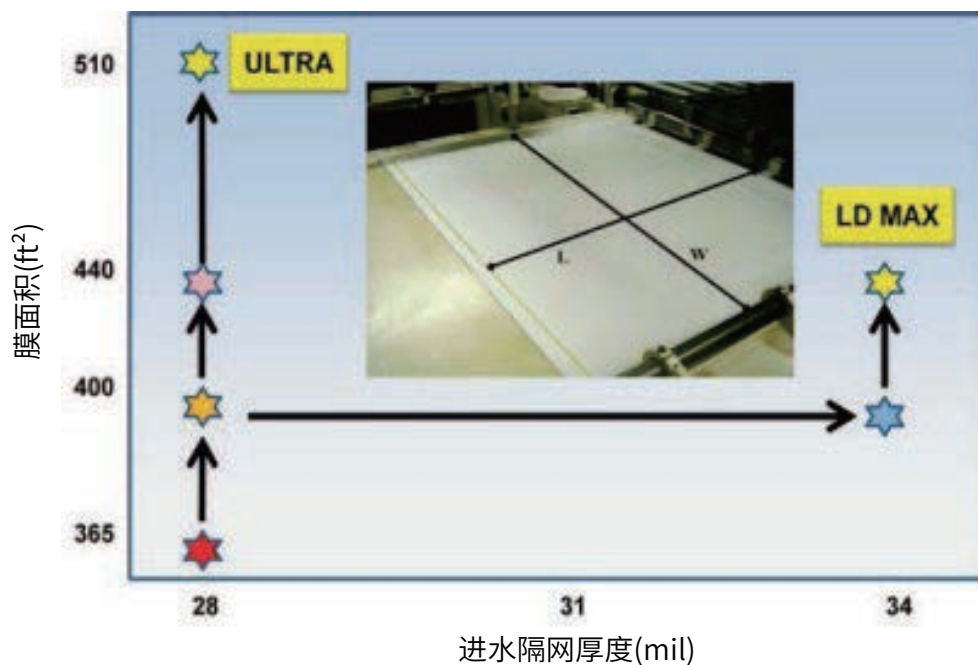


图 1.5 膜元件优化发展

1.2.3 LD 技术

进水隔网是反渗透膜元件结构中重要的组成部分。一般来说，进水隔网厚度经纬线的交叉角度和网格的大小、经纬线的横断面形状等特点影响到反渗透膜元件的性能。美国海德能公司2006年开发的34mil进水隔网，优化后的经纬线交叉角度及横断面形状，降低了膜元件压降，减少了污堵。LD技术主要特点：

- 特殊形状 34mil 隔网，降低阻力，减少胶体、颗粒物污堵。
- 结构设计降低系统压降，易清洗，产水通量分布均衡。

图 1.6 显示传统隔网和 LD 两种膜元件 8 个月的运行数据。采用传统隔网技术的膜元件在半年时间内进行了 6 次清洗；但采用 LD 技术的膜元件 8 个月之后一段压差仍保持在 0.1MPa，表明膜元件没有受到明显污染，说明 LD 技术可明显延长清洗周期。

综上所述，LD 技术可以确保系统运行更稳定，清洗周期延长和易清洗性能降低系统清洗费用，低压降减少能耗，从而降低系统总制水成本。

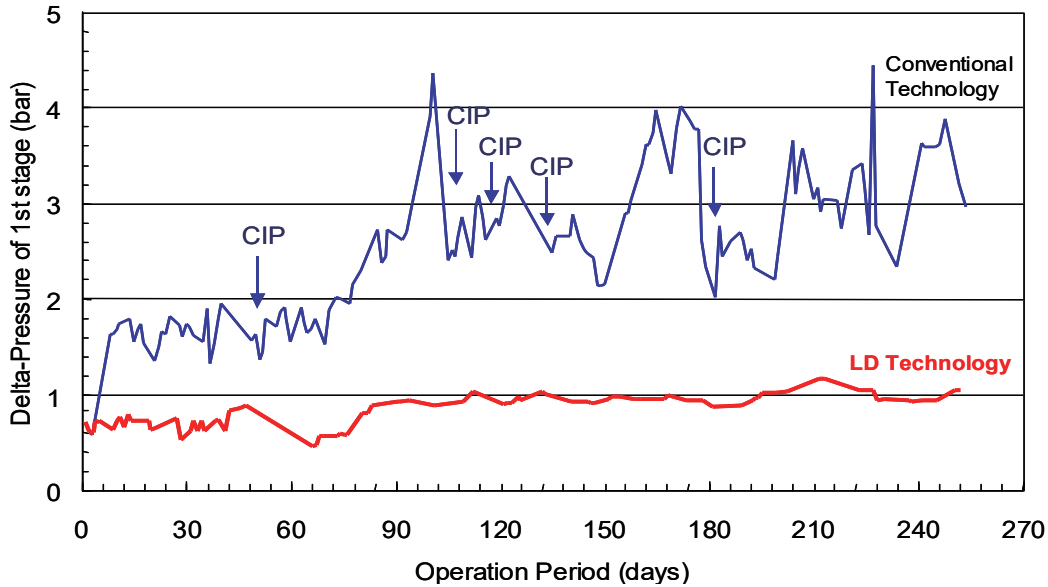


图 1.6 采用 LD 技术膜元件与传统膜元件对比运行数据

1.2.4 独特的抗污染技术

1997 年，美国海德能公司成功研发了抗污染反渗透膜元件 LFC™ 系列，并在新加坡 Newater 等大型项目中得到应用。目前反渗透和纳滤膜的抗污染技术，主要存在两种不同的技术手段：

- 针对平膜，采用膜表面电荷通过改性为电中性、并增强其亲水性；
- 针对膜元件，优化结构设计、宽进水隔网、耐 / 易清洗。

美国海德能公司的低污染纳滤（ESNA1-LF/LF2）、反渗透膜元件（PRO-XR1，PRO-LF1，LFC3-LD）在优化膜元件抗污染性结构的基础上，创新性的结合了电中性和亲水性耐污染理论，通过改变了膜表面的荷电性和亲水性（水与膜接触界面的接触角从 62° 降低到 47°），使得阳离子型和两性污染物不易与膜发生吸附，提升了耐有机物污染的能力，因此不会导致产水量和脱盐率下降，或者即使下降了，也可以通过清洗来恢复。图 1.7 为美国海德能公司抗污染膜元件 LFC™ 系列的膜表面改性示意图。图 1.8 比较了美国海德能公司不同型号反渗透膜元件及其他公司抗污染反渗透产品的膜表面荷电性示意图。

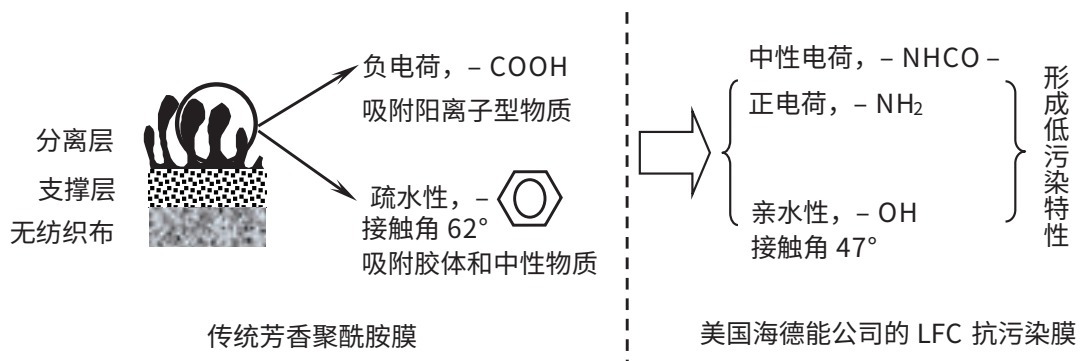


图 1.7 膜表面改性示意图

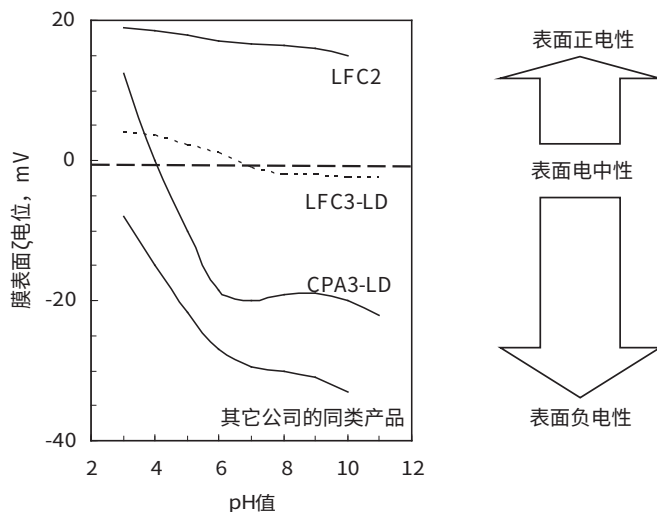


图 1.8 各类反渗透膜元件的表面电荷

为满足客户对抗污染反渗透膜元件的多样化需求，适应不同给水水质，并完善抗污染产品的系列，美国海德能公司于 2006 年推出了增强型反渗透膜元件 PROC™ 系列。该系列膜元件采用宽进水隔网，有效降低胶体污染，提高清洗恢复性。PROC10 做为该系列的第一款产品，具备了更宽的进水隔网、更低的压力损失以及更致密的芳香聚酰胺分离皮层，这些优点均使 PROC10 拥有高脱盐、低压降、少污染、易清洗、长寿命等优势。PROC10 的推出伴随着多个发明专利，无一不是美国海德能公司研发人员智慧的结晶，该款膜元件的特点涉及平膜制备以及膜元件卷制技术的革新，详细的技术说明，请参见第一部分第二章 2.2.1。

两类不同的抗污染膜元件使用户有了更广泛的选择空间，可以选择最恰当的膜元件满足生产的需要。表 1.2 对比了美国海德能公司两类抗污染膜的性能，并给出了选择的指导性建议。

表 1.2 美国海德能公司两类抗污染反渗透膜元件的特点以及适用范围

参数	LFC3-LD/PRO-XR1	PROC10
膜面积, ft ²	400	400
公称脱盐率, %	99.7/99.8	99.75
最低脱盐率, %	99.5	99.6
产水量, GPD	11 000/11500	10 500
进水隔网厚度, mil	34	34
膜表面电性	电中性	负电性
适用范围	含有两性的、阳离子型的表面活性剂或类似复杂化学物质的高难度工业废水或其他水源。	受到一般有机物污染的天然水体，比如污染严重的地表水或地下水；不含阳离子型物质的工业废水和市政污水。

1.2.5 膜元件端板快速排气专利技术

美国海德能公司目前已在全部 8 英寸膜元件上采用了端板快速排气专利技术。膜元件机械性能的损坏，主要是在系统启动时，膜元件内过大的水流流入，导致压力急速地上升，膜元件与膜壳之间的空气很难排放出去，膜元件内部和膜元件与膜壳间会产生压差，造成膜元件的膨胀，最终导致膜元件的破损。因此，2006 年 PROC™ 率先采用了美国海德能公司的发明专利，即改良型可快速排气的 ATD，如图 1.9 所示。该改良型端板的工作原理见图 1.10。改良型可快速排气端板可以在系统启机时，快速进行膜壳内和膜元件之间的气水交换，防止膜元件内、外部压差过大，有效缓解系统启动时对膜元件的冲击，避免膜元件 FRP 破损。

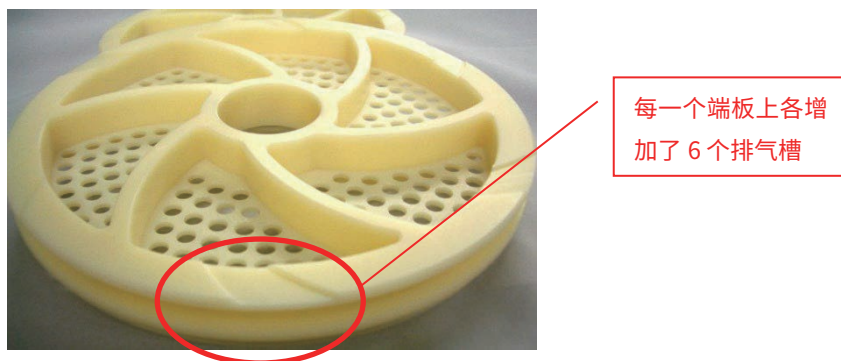


图 1.9 改良型可快速排气端板 (ATD)

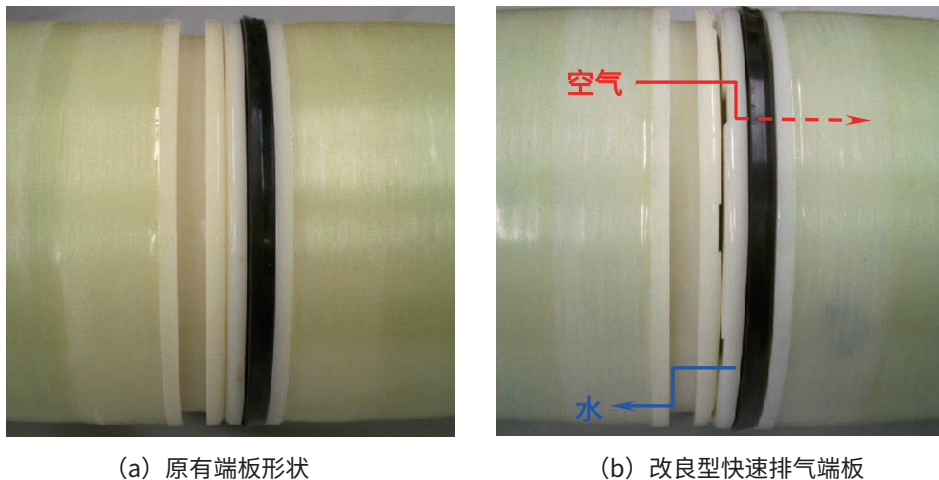


图 1.10 改良型可快速排气端板和原有端板的比较

端板快速排气专利技术（图 1.9、1.10）由我公司自主研发，已经在以下国家取得如下专利：

（我司持有专利权）

日本专利：第 4222279 号

日本专利：第 4237818 号

美国专利：7,172,697

美国专利：7,198,719

中国专利：100,553,750

可快速排气端板仍然具有切流式端板的优异性能：

- 更好的端面接触，使水力负荷分布得更加均匀；
- 保持了美国海德能公司原有端面多孔板的特点，可以保护膜元件免受因较大颗粒物撞击而造成的损坏；
- 切流式设计使得膜元件的进水从最内侧（中心管侧）到最外侧（玻璃钢侧）分布更加均匀，膜元件外部和中心管处所受压力更加平衡；
- 使得膜元件的每一个部位都在相似的条件工作，最大限度地保证了膜元件性能的均衡及更长的使用寿命¹。

目前海德能全线产品均采用切流式端板，见图 1.11。



图 1.11 改良型切流式端板

为了配合切流式端板，美国海德能公司同时推出了新型内连接适配器²（PN. 11518.0000），它既适用于切流式膜元件，也适用于传统的多孔直流式膜元件。该新型内连接适配器具有更多优点：

- 在负载和操作过程中不会脱离；
- 采用每侧双层 O 型圈连接，最大限度的降低泄漏风险；
- 在不影响强度的前提下，适配器的两端设计使得产水侧的阻力更小，从而使整个系统更加节能；
- 当系统进行探针法检测时，探针可以很容易的在中心管内伸展，到达每一个希望测试的位置（探针检测法请参见第三部分第七章 7.2.3）。

例如在一套 100 m³/h 的反渗透系统中，采用 108 支 8 英寸反渗透膜元件（第一段 12 支压力容器，第二段 6 支压力容器，每支压力容器装填 6 支膜元件）。在该系统内共有 90 个新型内连接适配器（PN. 11518.0000），存在 180 处产水侧管径变化，若采用传统适配器，由于管径骤变导致产水阻力升高，从而使得整个系统的能耗加大，但是当您采用美国海德能公司精心设计的新型内连接适配器时，由于 9° 倾角的存在，最大限度的减少了管径变化带来的能量损失，从而保证了系统的低能耗。另外，为了适应海水淡化用反渗透膜元件（SWC™ 系列）耐高压的需要，美国海德能公司同样开发了更耐压的海水淡化专用内连接适配器（PN. 11574.0000）。

1.2.6 特种浓缩分离专用膜元件的特点

浓缩分离是一个与传统水处理有所不同。传统水处理系统都是采用物理或 / 和化学的方法将水中的不纯物

¹ 指在满足其它要求的设计条件下，由于我们不能控制用户的使用条件，因此不能对实际使用年限做出规定。

² 该连接件以及海水淡化反渗透膜专用连接件（PN. 11574.0000）均包含在每一支膜元件的包装箱中，不需要另外购买。

质或污染物质去除，因此水处理是一个净化的过程。而在浓缩分离中，被分离的对象不一定是水溶液，目标产物也不一定是水。有时希望得到经过纯化，具有更高纯度的某些物质，有时甚至希望得到浓缩液，以获得更高浓度的产品，从实际应用的角度出发，浓缩分离通常包括：

- 乳制品的浓缩；
- 生物制剂和药物的分离、纯化及浓缩；
- 有价值物质的回收；
- 食品、饮料及医药制品的浓缩分离；
- 工艺废水的脱色。

为了满足市场对浓缩分离的不同需求，美国海德能公司先后推出了 DairyRO 系列乳制品浓缩反渗透膜元件和 HYDRACoRe™ 系列脱色纳滤膜元件，并已经取得了广泛的应用。

DairyRO 可以浓缩乳制品中的蛋白和乳糖成分，并降低排水中的生化耗氧量（BOD₅）含量，不但得到了经过浓缩的乳制品，而且还可以利用系统的产出水，这些水源于乳品本身。因此 Dairy 系列纳滤、反渗透膜元件的使用，不但提高了乳制品的品质，同时还减轻了企业的用水成本。

HYDRACoRe™ 系列脱色纳滤膜元件是美国海德能公司推出的脱色专用膜。最新型的膜元件是 HYDRACoRe 70pHT，图 1.12 为 HYDRACoRe 70pHT 的外观图。

- 全部配件采用聚砜材料制作，使膜元件可以适应更广泛的应用条件；
- 膜元件的外壳采用了全填充形式（Full-Fit 技术，请参见第一部分第二章 2.2.7.2），不易积存污染物；
- 膜元件的进水隔网进行了改进，降低了膜元件的阻力；
- 采用了更耐高温和溶剂的粘接剂。



图 1.12 HYDRACoRe 70pHT 的外观

在实际应用中，HYDRACoRe 70pHT 可以脱除废水中的色度，但保持含盐量（TDS）基本不变。因而使得运行的压力极低，在 0.6 – 0.7 MPa 的压力下就可以脱除 80 % 以上的色度。采用 HYDRACoRe™ 的系统对 TDS 的脱除率很低，并不是因为它本身不具备脱盐的性能，而是由于它的脱盐率随着 TDS 的升高而迅速下降，所以虽然每一支在系统中运行的膜元件均具有脱盐率，但由于系统中的给水随着流经膜元件的增多不断被浓缩，而使得实际产品水中的 TDS 接近进水中的数值。

1.3 美国海德能公司膜元件在各应用领域中的主要应用业绩

自从 1996 年在北京设立代表机构以来，美国海德能公司与中国水处理行业共同成长，至今已走过了三十年的历程。三十年来，美国海德能公司各类膜型号的产品在中国市场得到了广泛应用，助力行业技术进步。

在海德能最知名的抗污染型号 PROC10 基础上开发的节能型抗污染型号 PROC20，近年已在煤化工、工业园区综合治理以及半导体行业都取得了良好业绩；而另一款兼具高脱盐率、大产水量的 PROC30 在钢铁、石化及化工等领域取得广泛应用。

表 1.3 PROC20、PROC30 膜元件的主要业绩

用户	处理量, m ³ /d	膜元件型号
中煤山西某集团物资采购项目	9 600	PROC20
宁夏某工业园区循环综合利用项目	14 680	PROC20
广东某光电项目	51 840	PROC20
辽宁某钢铁	51 700	PROC30
中石油广西某炼化一体化项目	43 680	PROC30
天津某乙烯回用水项目	46 730	PROC30
内蒙古某能源项目	19 200	PROC30

自 2019 年推出 PRO 系列以来，海德能在工业废水近零排放领域取得显著成果，该产品系列已广泛应用于煤化工、焦化、电力、工业园区综合治理以及矿井水等行业，性能和使用体验受到了客户广泛的好评。

表 1.4 PRO 系列膜元件的主要业绩（部分）

用户	处理量, m ³ /d	膜元件型号
新疆某新材料羧酸及其下游产品一体化项目	12 000	PRO-XR1
内蒙古某热电	12 820	PRO-XR1
宁东某煤化工	67 200	PRO-XR1
内蒙古某焦化零排放项目	6 000	PRO-LF1
陕西某煤矿矿井水项目	4 200	PRO-LF1
安徽某煤化工	8 070	PRO-LF1
江苏某焦化	960	PRO-LF1
新疆某能源浓水回用项目	990	PRO-XP1
内蒙古某再生水项目	2 500	PRO-XP1
新疆某能源化工	1 160	PRO-XS2
山西某煤炭气化分质提盐系统项目	1 010	PRO-XS2
河北某玻璃能源改造项目	2 880	PRO-XS2
山西某能源零排系统项目	1 660	PRO-XS2
安徽某煤化工零排放系统	2 740	PRO-XS2
广东某印染废水处理厂	11 520	PRO-XS2
国电内蒙古某电厂	1 730	PRO-XS3
陕西某能源技改项目	1 200	PRO-XS3
安徽某煤化工零排放系统	940	PRO-XS5

此外，海德能 ESNA 系列的纳滤新产品 ESNA4-LD 和 ESNA5-LD 近年来在电厂排水再利用、市政供水、矿井水及污水提质等领域也取得了多点突破。

表 1.5 ESNA4-LD、ESNA5-LD 膜元件的主要业绩（部分）

用户	处理量, m ³ /d	膜元件型号
国能山东某电厂循环排污水达标排放改造项目	14 400	ESNA4-LD
甘肃某水厂	40 000	ESNA4-LD
内蒙古某煤矿矿井水处理	31 200	ESNA4-LD
江苏某水厂深度净化项目	75 000	ESNA5-LD
中节能山东某环保能源	1 370	ESNA5-LD
河北某管理区净水厂	1 830	ESNA5-LD

海德能各型号膜产品典型业绩：

- 国内大型海水淡化项目——天津大港新泉海水淡化厂（100 000 m³/d）全部采用了美国海德能公司的 SWC5 海水淡化膜元件。
- 国内较早的炼油废水纳滤膜处理回用系统，位于新疆维吾尔自治区的中石油克拉玛依炼油厂，全部采用美国海德能公司的纳滤膜元件 ESNA1 和 ESNA1-LF，该系统已经连续稳定运行近多年，充分说明了该纳滤膜元件的脱盐率的稳定性以及耐污染性。
- 国内较早的双水道饮用净水项目，2008 年北京奥林匹克运动会主体育场（鸟巢）、奥运村以及其他配套场馆，均采用美国海德能公司的超低压反渗透膜元件 ESPA2 和节能型纳滤膜元件 ESNA1-K1，每天为参加奥运会的运动员和观众提供安全的饮用水。

在全球范围，美国海德能公司同样在反渗透和纳滤市场占据了重要地位。目前，世界上多数大型反渗透系统均采用美国海德能公司的产品，尤其在海水淡化应用中 SWC™ 系列膜元件在全球大型海水淡化项目中有大量应用。在北非的阿尔及利亚（Algeria），Skikda 和 Beni Saf 的 300 000 m³/d 海水淡化产自于美国海德能公司的 26 250 支 SWC5 反渗透膜元件；在阿联酋（United Arab Emirates）的 Fujairah，170 000 m³/d 海水淡化系统全部采用了美国海德能公司的 SWC3 型反渗透膜元件。

在工业废水和市政污水回用领域，美国海德能公司的抗污染膜元件 LFC™ 系列和 PROC™ 系列以及超低压反渗透膜元件 ESPA™ 系列同样得到了广泛的应用。位于美国加利福尼亚州桔县（Orange County）的反渗透系统全部采用 ESPA2 超低压膜元件，总制水能力达 276 000 m³/d；在新加坡的 Newater 工厂 Ulu Pandan，9 100 支 ESPA2 MAX 大面积超低压反渗透膜元件被选用。国外大型市政污水处理厂没有采用低污染反渗透膜元件，而大量选择超低压反渗透膜元件 ESPA2/ESPA2 MAX，主要原因是这些污水处理厂考虑运行成本。工作压力更低的超低压反渗透膜元件在运行时，比抗污染膜元件的运行压力低大约 30 %，从而节约了成本。而低的制水成本使得水价降低，更有利于促进污水回用的发展。

在市政给水应用中，美国佛罗里达州 Boca Raton 日产 152 000m³ 的纳滤系统全部采用 ESNA1 节能型纳滤膜元件。

从饮用纯净水处理、苦咸水淡化、电厂锅炉补给水处理，到工业废水、市政污水回用和海水淡化，美国海德能公司的各种型号的反渗透和纳滤膜元件均取得了广泛的应用业绩。

第二章 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件的规格与性能

2.1 产品规格和参数

2.1.1 海德能™ PRO 系列零排放和工艺应用膜元件

海德能™ PRO 系列是专为零排放及工艺应用而设计开发的膜产品，适用于高难度工业废水处理。该系列融合了美国海德能公司多项抗污染技术和增强化膜元件结构设计，涵盖反渗透膜（RO）和纳滤膜（NF）产品线，可满足多样化的工艺需求。PRO-XS 是具有高选择性的分盐纳滤膜，能够高效分离一价和二价盐；PRO-XR、PRO-LF、PRO-XP 是覆盖不同压力等级的抗污染反渗透膜，可用于浓水减量和极限浓缩的工艺中。

表 2.1 PRO-XS 系列主要膜元件的性能参数

型号			PRO-XS2	PRO-XS5
类型	尺寸		8 英寸	
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料	
	有效膜面积	ft ²	400	
		m ²	37.2	
	进水隔网厚度, mil		34	
性能	脱盐率, %	平均	99.7	99.8
		最低	99.6	99.6
	产水量	gpd	11000	9650
		m ³ /d	41.6	36.5
测试条件	MgSO ₄ 浓度, mg/L		2000	
	压力, psi (MPa)		110(0.76)	
	温度, °C		25	
	回收率, %		15	
	pH 值		6.5-7.0	
使用条件	最高进水压力, psi(MPa)		600(4.14)	1200(8.27)
	最大进水流量, gpm(m ³ /h)		85(19.3)	
	最高进水温度, °C		45	
	进水 pH 范围		3.0 - 9.0	
	清洗 pH 范围		1 - 11.5	1 - 12
	最大进水浊度, NTU		1.0	
	最大进水 SDI ₁₅		<5.0	
	最大进水余氯浓度, mg/L		<0.1	
	最小浓水流量, gpm(m ³ /h)		12 (2.7)	
	单支元件最大压降, psi(MPa)		15(0.10)	

表 2.2 PRO-XR、PRO-LF、PRO-XP 系列主要膜元件性能参数

型号			PRO-XR1	PRO-LF1	PRO-XP1	PRO-LF1-4040
类型	尺寸		8 英寸			4 英寸
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料			
	有效膜面积	ft ²	400	400	365	80
		m ²	37.2	37.2	33.9	7.43
	进水隔网厚度, mil		34			
性能	脱盐率, %	平均	99.8	99.8	99.8	99.8
		最低	99.5	99.7	99.7	99.7
	产水量	gpd	11500	7700	8000	1370
		m ³ /d	43.5	29.1	30.3	5.2
测试条件	NaCl 浓度, mg/L		2000	32000	32000	32000
	压力, psi (MPa)		225(1.55)	800(5.5)	800(5.5)	800(5.5)
	温度, °C		25			
	回收率, %		15	10		
	pH 值		6.5-7.0			
使用条件	最高进水压力, psi(MPa)		600(4.14)	1200(8.27)	1800(12.4)	1200(8.27)
	最大进水流量 ,gpm(m³/h)		85(19.3)			16(3.6)
	最高进水温度, °C		45(*PRO-XP 与压力相关, 详见相应技术文件)			
	进水 pH 范围		2-11 T < 25°C 2-11 25°C≤ T < 35°C 3-10.5 35°C≤ T ≤ 45°C			
	清洗 pH 范围		1-13 T < 25°C 1-12 25°C≤ T < 35°C 2-11 35°C≤ T ≤ 45°C			
	最大进水浊度, NTU		1.0			
	最大进水 SDI ₁₅		<5			
	最大进水余氯浓度 , mg/L		<0.1			
	最小浓水流量 ,gpm(m³/h)		12(2.7)			3(0.7)
	单支元件最大压 ,psi(MPa)		15(0.10)			

2.1.2 PROC™ 系列增强型抗污染反渗透膜元件

PROC™ (Powerful RO Composite) 膜元件是美国海德能公司专为污水、废水和受污染地表水等复杂水源设计的增强型抗污染系列。平膜增强设计提高了化学品耐受性和性能稳定性；采用 34mil 特殊形状进水

隔网能降低压损、减少污堵、提高清洗恢复性；端板排气构造可缓解系统启动时对膜元件的冲击、降低破损率。PROC10 具有高脱盐率，能确保优质产水；PROC20 采用节能型设计，与低压膜相比可降低系统能耗约 30%；PROC30 兼具高产水量和高脱盐率，是结合性能和效率的上佳选择。

表 2.3 PROC™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			PROC30	PROC10	PROC20
类型	尺寸		8 英寸		
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料		
	有效膜面积	ft ²	400		
		m ²	37.2		
	进水隔网厚度, mil		34		
性能	脱盐率, %	平均	99.8	99.75	99.5
		最低	99.7	99.6	99.2
	产水量	gpd	11500	10500	
		m ³ /d	43.5	39.7	
测试条件	NaCl 溶液浓度, mg/L		2000		
	压力, psi (MPa)		225 (1.55)		150 (1.03)
	温度, °C		25		
	回收率, %		15		
	pH 值		6.5-7.0		
使用条件	最高进水压力, psi (MPa)		600 (4.14)		
	最大进水流量, gpm(m ³ /h)		90 (20)		
	最高进水温度, °C		45		
	进水 pH 范围		2-11		
	清洗 pH 范围		1-13		
	最大进水浊度 , NTU		1.0		
	最大进水 SDI15		< 5		
	最大进水余氯浓度, mg/L		< 0.1		
	最小浓水流量 ,gpm(m ³ /h)		12 (2.7)		
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)		

2.1.3 CPA™ 系列低压反渗透膜元件

CPA™ (Composite Polyamide) 系列膜元件是能在低压运行下兼顾高脱盐率和高透过水量的复合聚酰胺反渗透膜。因为 CPA 膜具有卓越的去除 SiO₂、TOC 的能力，因此适用于电子工业用超纯水、发电厂锅炉补给水等工业水处理中。CPA3-LD 是美国海德能公司在 CPA3 的基础上推出的升级产品。CPA3-LD 采用 34mil 进水隔网技术，能显著降低系统压差并提升耐污堵性能。

表 2.4 CPA™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			CPA3-LD	CPA7-LD-4040
类型	尺寸		8 英寸	4 英寸
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料	
	有效膜面积	ft²	400	80
		m²	37.2	7.43
	进水隔网厚度	mil	34	34
性能	脱盐率，%	平均	99.7	99.8
		最低	99.6	99.6
	产水量	gpd	11000	2300
		m³/d	41.6	8.71
测试条件	NaCl 溶液浓度，mg/L		1500	
	压力，psi (MPa)		225 (1.55)	
	温度，°C		25	
	回收率，%		15	
	pH 值		6.5-7.0	
使用条件	最高进水压力，psi (MPa)		600 (4.14)	600 (4.14)
	最大进水流量，gpm (m³/h)		85 (19.3)	16(3.6)
	最高进水温度，°C		45	
	进水 pH 范围		2-10.8	2-11
	清洗 pH 范围		1-12.5	1-13
	最大进水浊度，NTU		1	
	最大进水 SDI 15		< 5	
	最大进水余氯浓度，mg/L		< 0.1	
	最小浓水流量，gpm (m³/h)		12 (2.7)	3 (0.7)
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)	

2.1.4 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件

ESPA™ (Energy Saving Poly-Amide) 系列反渗透膜元件，是美国海德能公司于 1995 年 5 月在全球范围内率先推出的节能型超低压大通量复合反渗透膜。它具有超低的运行压力（比低压复合反渗透膜的运行压力降低约 25 – 40 %），能在保持高脱盐率的同时具有更高的水通量以及更宽的水质适用范围和压力适用范围。ESPA™ 系列膜元件高水通量、高脱盐率的特征，使得设备制造成本和系统运行费用大为降低，并且节约了大量能源，进而使得反渗透系统更加容易推广并被认可。

表 2.5 ESPA™ 系列主要 8 英寸膜元件的性能参数

型号			ESPA1	ESPA2-LD	ESPA2 MAX	ESPA2-LD MAX	ESPA4-LD	ESPA4 MAX
类型	尺寸		8 英寸					
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料					
	有效膜面积	ft²	400	400	440	440	400	440
		m²	37.2	37.2	40.9	40.9	37.2	40.9
	进水隔网厚度	mil	28	34	28	34	34	28
性能	脱盐率，%	平均	99.4	99.6	99.6	99.6	99.2	99.2
		最低	99.2	99.5	99.5	99.5	99.0	99.0
	产水量	gpd	12000	10000	12000	12000	12000	13200
		m³/d	45.4	37.9	45.4	45.4	45.4	50
测试条件	NaCl 溶液浓度，mg/L		1500				500	
	压力，psi (MPa)		150 (1.03)				100 (0.7)	
	温度，°C		25					
	回收率，%		15					
	pH 值		6.5-7.0					
使用条件	最高进水压力，psi (MPa)		600 (4.14)					
	最大进水流量，gpm (m³/h)		75	85 (19.3)	75 (17.0)	85 (19.3)	85 (19.3)	75 (17.0)
	最高进水温度，°C		45					
	进水 pH 范围		2-10	2-10.6	2-10.6	2-10.6	2-10	
	清洗 pH 范围		1-12	1-12	1-12	1-12	1-12	
	最大进水浊度，NTU		1.0					
	最大进水 SDI15		< 5					
	最大进水余氯浓度，mg/L		< 0.1					
	最小浓水流量，gpm (m³/h)		12 (2.7)					
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)					

表 2.6 ESPA™ 系列主要 4 英寸膜元件的性能参数

型号		ESPA1-LD-4040	ESPA2-LD-4040	ESPA4-LD-4040
类型	尺寸	4 英寸		
	膜材质	芳香族聚酰胺复合材料		
	有效膜面积	ft ²	80	80
		m ²	7.43	7.43
性能	脱盐率, %	平均	99.4	99.2
		最低	99.2	99.0
	产水量	gpd	2450	2350
		m ³ /d	9.27	8.90
测试条件	NaCl 溶液浓度, mg/L	1500		500
	压力, psi (MPa)	150 (1.05)		100 (0.7)
	温度, °C	25		
	单支膜元件回收率, %	15		
	测试液 pH	6.5-7.0		
使用条件	最高进水压力, psi (MPa)	600 (4.14)		
	最大进水流量, gpm (m ³ /h)	16 (3.6)		
	最高进水温度, °C	45		
	进水 pH 范围	2-10	2-10.6	2-10
	清洗 pH 范围	1-12	1-12	1-12
	最大进水浊度, NTU	1.0		
	最大进水 SDI 15	< 5.0		
	最大进水余氯浓度, mg/L	< 0.1		
	最小浓水流量, gpm(m ³ /h)	3 (0.7)		
	单支元件最大压降 psi(MPa)	15 (0.10)		

2.1.5 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件

LFC™ (Low Fouling Composite) 膜是美国海德能公司利用卓越的膜技术开发出的低压抗污染膜产品, 适用于工业废水、城市排水的深度脱盐回用处理。LFC3-LD 膜表面的电荷呈现中性, 导入亲水性官能团, 几乎不受表面活性剂等电荷物质吸附的影响。

表 2.7 LFC™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			LFC3-LD	LFC3-LD-4040
类型	尺寸		8 英寸	4 英寸
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料	
	有效膜面积	ft²	400	80
		m²	37.2	7.4
	进水隔网厚度，mil		34	34
性能	脱盐率，%	平均	99.7	99.7
		最低	99.5	99.5
	产水量	gpd	11000	2100
		m³/d	41.6	8.0
测试条件	NaCl 溶液浓度，mg/L		1500	
	压力，psi (MPa)		225 (1.55)	
	温度，°C		25	
	回收率，%		15	
	pH 值		6.5-7.0	
使用条件	最高进水压力，psi (MPa)		600 (4.14)	
	最大进水流量，gpm (m³/h)		85 (19.3)	16 (3.6)
	最高进水温度，°C		45	
	进水 pH 范围		2-10	
	清洗 pH 范围		1-12	
	最大进水浊度，NTU		1.0	
	最大进水 SDI15		< 5	
	最大进水余氯浓度，mg/L		< 0.1	
	最小浓水流量，gpm(m³/h)		12 (2.7)	3 (0.7)
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)	

2.1.6 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件

SWC™ (Sea-water Composite) 膜是美国海德能公司采用先进的高分子合成技术开发的海水淡化用的反渗透膜元件。SWC 膜利用丰富的海水资源生产出饮用水或其它工业、农业用水, 解决水资源短缺问题。美国海德能公司海水淡化膜产品系列全面: 适用性宽的 SWC5-LD、节能的 SWC6-LD、大膜面积的海水淡化 MAX 膜、可满足不同用户的需求。

表 2.8 SWC™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			SWC4-LD	SWC4 MAX	SWC5-LD	SWC5 MAX	SWC6-LD		SWC6 MAX		SWC5-LD-4040
类型	尺寸		8 英寸								4 英寸
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料								
	有效膜面积	ft²	400	440	400	440	400		440		80
		m²	37.2	40.9	37.2	40.9	37.2		40.9		7.43
	进水隔网厚度, mil		34	28	34	28	34		28		34
性能	脱盐率, %	平均	99.8	99.8	99.8	99.8	99.8	99.6	99.8	99.6	99.7
		最低	99.7	99.7	99.7	99.7	99.7	99.4	99.7	99.4	99.5
	产水量	gpd	6500	7200	9000	9000	12000	6000	13200	6600	1750
		m³/d	24.6	27.3	34.1	37.5	45.4	22.7	50	25	6.62
测试条件	NaCl 溶液浓度, mg/L		32000								
	压力, psi (MPa)		800 (5.5)				800(5.5)	600(4.1)	800(5.4)	600(4.1)	800(5.5)
	温度, °C		25								
	回收率, %		15								
	pH 值		6.5-7.0								
使用条件	最高进水压力, psi (MPa)		1200 (8.27)								
	最大进水流量, gpm (m³/h)		85 (19.3)	75(17.0)	85(19.3)	75(17.0)	85 (19.3)		75 (17.0)		16 (3.6)
	最高进水温度, °C		45								
	进水 pH 范围		2-11								
	清洗 pH 范围		1-13								
	最大进水浊度, NTU		1.0								
	最大进水 SDI15		< 5								
	最大进水余氯浓度, mg/L		< 0.1								
	最小浓水流量, gpm(m³/h)		12 (2.7)								3 (0.7)
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)								

2.1.7 ESNA™ 系列节能型聚酰胺纳滤膜元件

ESNA™ 系列是美国海德能公司生产的高性能纳滤膜，膜材质均为芳香族聚酰胺复合材料。ESNA 膜可用于脱除有机物、细菌和病毒，对硬度具有更高的脱除率。该系列膜可在超低运行压力下工作，实现节能、降低

设备投资和运行成本。ESNA4-LD 是 NaCl 脱除率较高的纳滤膜，适合含盐量较高的地下水制备安全饮用水，或矿井水处理等。ESNA5-LD 采用创新型膜片技术，在低操作压力下实现高通量、高脱盐率以及优异的有机物去除效果，有效降低能耗并优化制水成本。该产品能够在市政饮用水提质、市政污水处理及垃圾渗滤液等多种复杂水源条件下，保障系统长期安全稳定运行。

表 2.9 ESNA™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			ESNA1-LF-LD	ESNA1-LF2-LD	ESNA4-LD	ESNA5-LD
类型	尺寸		8 英寸			
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料			
	有效膜面积	ft ²	400			
		m ²	37.2			
	进水隔网厚度, mil		34			
性能	脱盐率, %	公称	93	91	-	-
		范围	88-97	86-96	≥99.0	≥99.0
	产水量	gpd	9500	12000	11500	11500
		m ³ /d	36	45.4	43.5	43.5
测试条件	溶液种类		CaCl ₂		MgSO ₄	
	溶液浓度, mg/L		500		2000	
	压力, psi (MPa)		75 (0.52)		100 (0.69)	70 (0.48)
	温度, °C		25			
	回收率, %		15			
	pH 值		6.5-7.5			
使用条件	最高进水压力, psi (MPa)		600 (4.14)			
	最大进水流量, gpm (m ³ /h)		85 (19.3)			
	最高进水温度, °C		45			
	进水 pH 范围		2-10			
	清洗 pH 范围		1-12			
	最大进水浊度, NTU		1.0			
	最大进水 SDI 15		< 5.0			
	最大进水余氯浓度, mg/L		< 0.1			
	最小浓水流量, gpm(m ³ /h)		12 (2.7)			
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)			

2.1.8 SanRO™-HS 系列卫生热消毒型反渗透膜元件

美国海德能公司凭借其在卷式膜生产领域中的卓越表现和技术实力，开发研制出 SanRO™-HS 卫生热消毒型卷式反渗透膜系列产品。该系列产品具有高脱盐率、大水通量、在运行过程中可进行热消毒、无过滤死角、安全可靠等特点。通过严格的生产和质量监控手段充分地保证了每一支膜元件都具有优良超群的性能特点。SanRO™-HS 系列产品已通过了美国食品与药品管理局 (FDA) 认证，使其在医药纯水及其它高纯水系统中得到了广泛应用。

表 2.11 SanRO™-HS 系列主要膜元件的性能参数

型号			SanRO-HS-8	SanRO-HS2-8	SanRO-HS-4	SanRO-HS2-4
类 型	尺寸		8 英寸		4 英寸	
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料			
	结构形式		卫生型 (全填充式)			
	有效膜面积	ft²	380	380	90	90
		m²	35.3	35.3	8.4	8.4
性 能	脱盐率，%	公称	99.7	99.6	99.7	99.6
		最低	99.4	99.4	99.4	99.4
	产水量	gpd	10000	14000	2200	3000
		m³/d	37.9	54.0	8.3	11.4
	测 试 条 件	NaCl 溶液浓度, mg/L		1500		
压力, psi (MPa)		225 (1.55)				
温度, °C		25				
回收率, %		15				
pH 值		6.5-7.0				
使 用 条 件	最高操作压力, psi (MPa)		600 (4.14)			
	进水最大余氯浓度, mg/L		< 0.1			
	最高操作温度, °C		55			
	最高消毒温度 / 压力, °C /MPa		85/0.17			
	进料 pH 范围		2-10			
	清洗 pH 范围		1-12			
	单支压力容器最大压力损失,psi (MPa)		60 (0.41)			

2.1.9 HYDRACoRe™ 系列高耐氯性脱色用纳滤膜元件

HYDRACoRe™ 高耐氯性脱色用纳滤膜的表面电荷为强负电性，膜表皮层的材质是磺化聚醚砜，厚度约为 0.3μm。该系列膜元件可在相当大的 pH 范围内 (2~12) 保持稳定的性能，并且可用于含自由氯浓度高的溶液中，具有很高的水通量和较高的透盐率。HYDRACoRe™ 系列有三种膜片，截留分子量分别为 3000、1000 和 720 道尔顿，适用于脱除色素和一些大分子有机物质。HYDRACoRe 70pHT 的操作温度、pH 值范围更宽，拓宽了脱色纳滤膜的适用性。

表 2.12 HYDRACoRe™ 系列主要膜元件的性能参数

型号			HYDRACoRe 10-LD	HYDRACoRe 50-LD	HYDRACoRe70p HT-8040-46	HYDRACoRe70p HT-4040-46
类型	尺寸		8 英寸			4 英寸
	膜材质		磺化聚醚砜材料			
	有效膜面积	ft ²	400		275	70
		m ²	37.2		25.5	6.5
	进水隔网厚度, mil		34		46	46
性能	脱盐率, %	平均	20	55	87	87
		最低	5-30	40-65	83	83
	产水量	gpd	16200	17200	4800	1220
		m³/d	61.3	65.1	18.2	4.6
测试条件	溶液种类		NaCl			
	溶液浓度, mg/L		2000		500	500
	压力, psi (MPa)		50 (0.34)	140 (0.97)	165 (1.13)	165 (1.13)
	温度, °C		25			
	回收率, %		20		15	15
	pH 值		6.5-7.0			
使用条件	最高进水压力, psi (MPa)		600 (4.14)			
	最大进水流量, gpm (m³/h)		75 (17.0)		80 (18.2)	30 (6.8)
	最高进水温度, °C		45		70	70
	进水 pH 范围		2-11		1-14	1-14
	清洗 pH 范围		1-12 (T<35°C)		1-14	1-14
	最大进水浊度 , NTU		1.0			
	最大进水 SDI ₁₅		< 5			
	最大进水余氯浓度, mg/L		< 10			
	最大清洗余氯浓度, mg/L		100			
	单支元件最大压降 psi (MPa)		15 (0.10)		13 (0.09)	15 (0.10)

2.1.10 DairyRO™ 系列乳制品浓缩分离反渗透膜元件

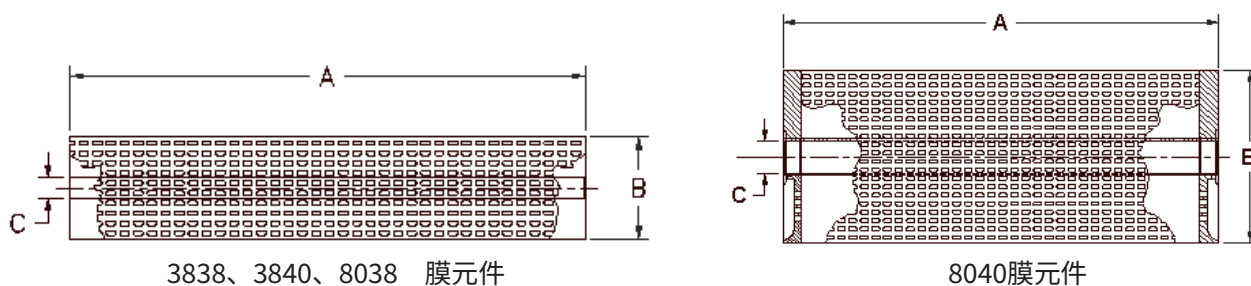
美国海德能公司凭借在卷式膜生产领域中的卓越成就和技术实力，开发研制的 DairyRO™ 反渗透膜系列产品，具有水通量大、BOD 去除率高、进料液适应范围广、使用安全可靠等特点。严格的生产和质量监控手段保证了每一支膜元件优良超群的性能。DairyRO™ 系列产品已通过美国食品与药品管理局 (FDA) 及美国农业部 (USDA) 认证，作为乳制品加工过程中的浓缩分离设备而得以广泛应用。

DairyRO™ 膜元件最适用于以下工艺过程：

- 牛奶或乳清的初级浓缩过程——可减少工厂设备投资、降低操作成本；
- 乳清超滤 (UF) 透过液的浓缩处理——可压缩排污量、节约排污费用；
- 处理牛奶或乳清的透过液——可循环使用，以节约水资源同时降低成本。

表 2.13 DairyRO™ 系列主要膜元件的性能参数

型号		Hydrapolish-8	8038-30	3838-30	3840-30	
类 型	尺寸		8 英寸		3.8 英寸	
	膜材质		芳香族聚酰胺复合材料			
	结构形式		卫生型 (全填充式)			
	有效膜面积	ft ²	360	385	80	80
		m ²	33	36	7.4	7.4
	进水隔网厚度, mil		30			
性能	最大进水流量, gpm(m ³ /h)		80 (18.2)	80 (18.2)	30 (6.8)	30 (6.8)
	单支膜元件最大压力损失, psi(MPa)		13 (0.09)	13 (0.09)	15 (0.1)	15 (0.1)
使 用 条 件	最高操作压力, psi (MPa)		1200 (8.27)	800 (5.52)		
	进水最大自由氯浓度, mg/L		< 0.1			
	最高操作温度, °C		50			
	进料 pH 范围		2-11			
	清洗 pH 范围		环境温度 1-11.5; 最高温度 1.8-11.0			
	单支压力容器最大压力损失, psi (MPa)		60 (0.41)			
尺寸	A, inch(cm)		40(101.6)	38(96.5)	38(96.5)	38.75(98.4)
	B, inch(cm)		7.9(20.1)	7.9(20.1)	3.78(9.6)	3.78(9.6)
	C, inch(cm)		1.125(2.86)	1.125(2.86)	0.83(2.11)	0.83(2.11)



2.2 产品的性能特点

2.2.1 增强型抗污染反渗透膜元件 PROC™ 系列

2.2.1.1 PROC™ 系列膜元件的特点

高品质的膜元件在制造过程中不外乎包含以下两个重要过程，这两个步骤中的任何一个存在缺陷，都将对膜元件的品质造成严重影响。

- 平膜的制备；
- 膜元件的卷制。

在平膜制备方面，美国海德能公司的科研人员通过不懈的努力，采用了新的制膜工艺，提高了全芳香族聚酰胺的交联度，从而使得膜元件耐碱清洗的性能大幅提高，保证膜性能长期稳定。图 2.1 显示了该膜元件在模拟碱清洗条件下，脱盐率的保持度。

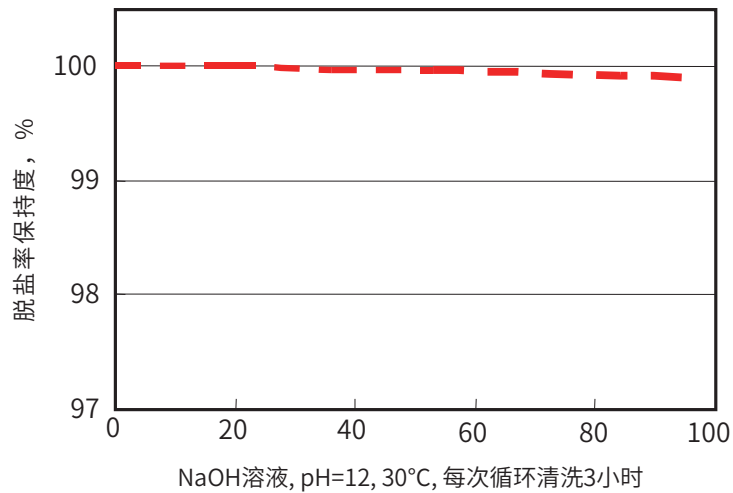


图 2.1 PROC™ 膜元件耐碱特性

膜元件污染物当中胶体以及微生物污染约占 75 %¹，这类污染是由于进水中含有的污染物流入膜元件中，造成了原水流道的堵塞，从而使系统压差上升、性能下降。开发及采用特殊形状 34 mil 的进水隔网，能够更有效的防止流道的堵塞。不仅增加了进水流道的厚度，同时隔网形状的精心设计对减轻和防止污染物的堵塞也起到了作用。在膜元件卷制方面，PROC™ 采用了 34 mil 的进水隔网（已申请发明专利）。由于美国海德能公司采用全自动的生产线来制造膜元件，从而可以更加准确地控制卷制过程，减少误差。在采用 34 mil 的进水隔网时，仍保证了 8 英寸膜元件的有效面积为 400 ft² (37.2 m²)。34 mil 的进水隔网可以使得反渗透膜元件的工作压力和压力降更低，不但节约能耗，更显著改善了系统前后段膜元件的产水平衡，有效的保护了反渗透膜元件，见图 2.2 和图 2.3。

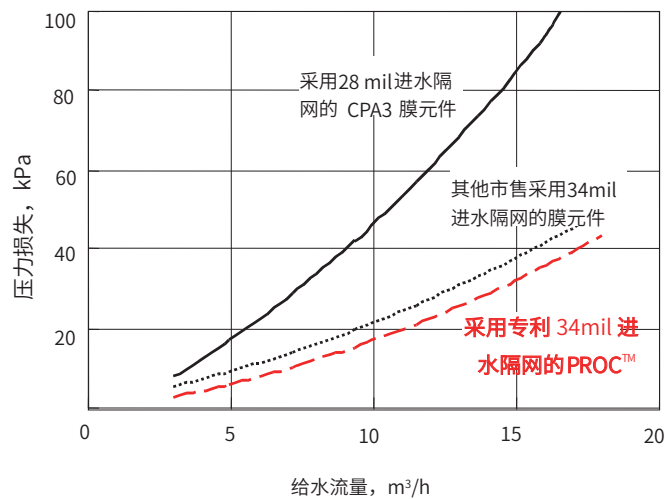


图 2.2 采用不同进水隔网的膜元件在不同给水流量下的压力损失曲线

¹ 基于有限的返品信息，不具备广泛的代表性，但仍说明有机污染尤其是微生物污染对反渗透是很严重的问题。

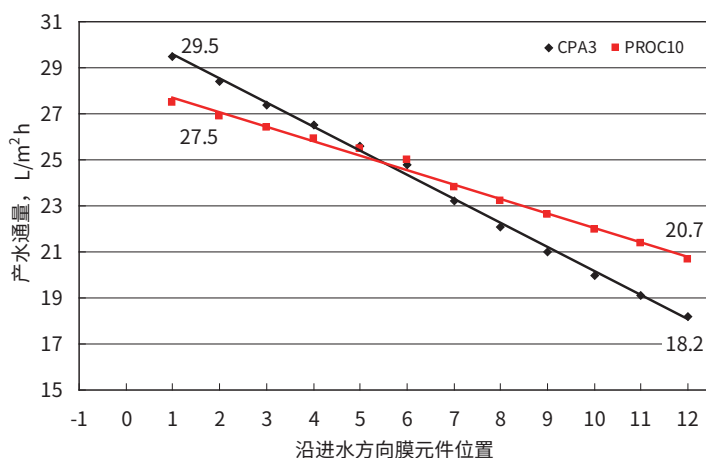


图 2.3 不同位置膜元件的产水通量分布比较

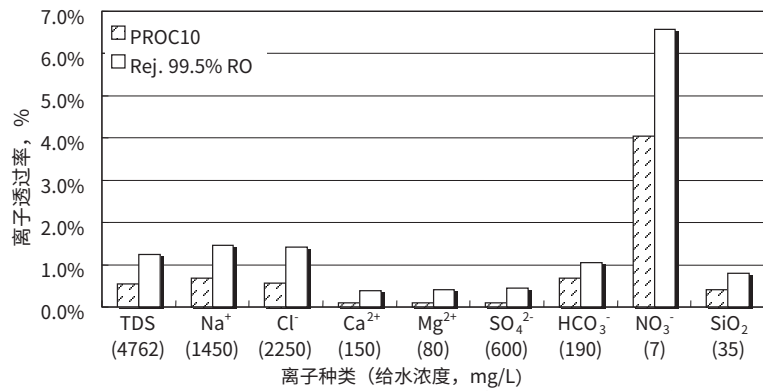
PROC™ 采用了美国海德能公司的端板快速排气发明专利，在系统启机时，可快速进行膜壳内和膜元件之间的气水交换，防止膜元件内、外部压差过大，有效缓解系统启动时对膜元件的冲击，避免膜元件 FRP 破损。

2.2.1.2 PROC10 反渗透膜元件的特点和测试参数

PROC10 膜元件于 2006 年 3 月份推出，是 PROC™（Powerful Reverse Osmosis Composite）增强型系列的第一款产品。本产品在以下两方面进行了研发和改进：

- 平膜构造工艺：利用先进的高分子合成技术提高了表面平膜分离层的致密度，实现了高脱盐率的低压反渗透膜元件：在标准测试条件下的脱盐率达到了 99.75 %，同时还保持了 10 500 GPD 的产水量。与市售的脱盐率为 99.5 % 的反渗透膜元件相比，不同盐分的透过率大幅降低，具体指标请参见图 2.4；
- 膜元件构造具有 PROC™ 的共同特点：一是采用特殊结构的给水隔网实现了低压差、少污堵、易清洗的目的；二是在切流式端板（ATD）增设排气构造，以缓解系统启动时对膜元件的冲击、降低膜元件的破损率。

考核反渗透膜的最重要的指标之一就是脱盐率。PROC10 的脱盐率高达 99.75 %，目前是低压复合膜中脱盐率较高的产品。反渗透膜的平膜是三维高分子链状结构。分子间交联度越好、断键越少，平膜的致密度就越好，脱盐率也就越高。该产品的平膜制造利用了本公司的高分子合成技术，改进了平膜配方，增加了膜表面分离皮层的交联度，从而提高了反渗透膜的脱盐率和稳定性。平膜分离皮层的致密度可以用对小分子有机物的分离效果来定量说明。小分子有机物和无机离子的特性不同，离子带有电荷性所以它的分离特性受到膜表面电荷的影响。但是许多有机物不带有电荷，它们的分离特性依赖于分子尺寸的大小。所以我们可以从小分子有机物来说明分子间的架桥结合成格子状的高分子网结构的致密度。PROC10 对小分子有机物脱除率如图 2.5 所示，明显高于其它品牌的同类产品。



进水: TDS = 4762 mg/L; 产水通量: 15 GFD; 回收率: 15%; pH = 7; 温度: 20 °C

图 2.4 PROC10 与其它品牌同类产品的透过率比较

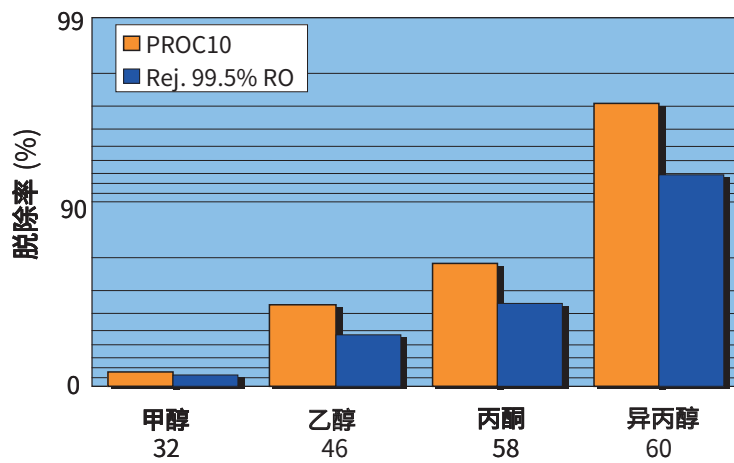
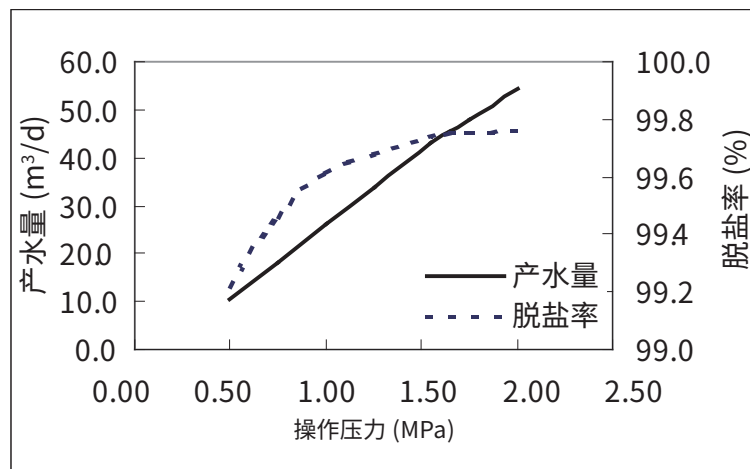


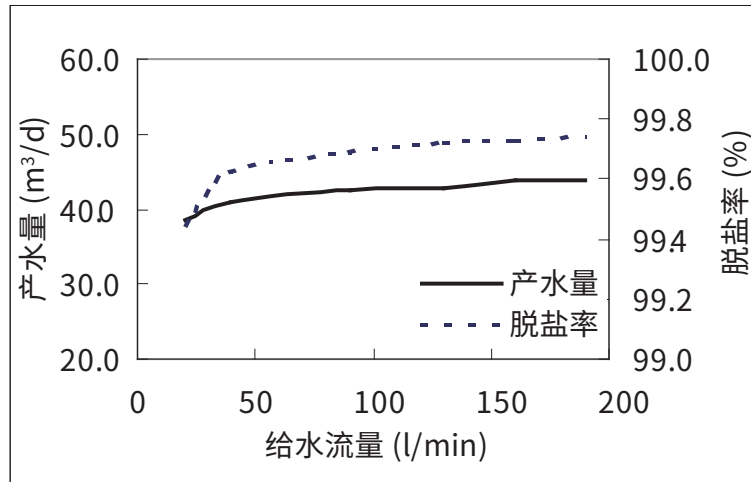
图 2.5 PROC10 对小分子有机物的脱除效果

在不同的给水条件和运行条件下, PROC10 的膜元件会发生相应的变化, 图 2.6-2.9 给出了 PROC10 膜元件的性能曲线。



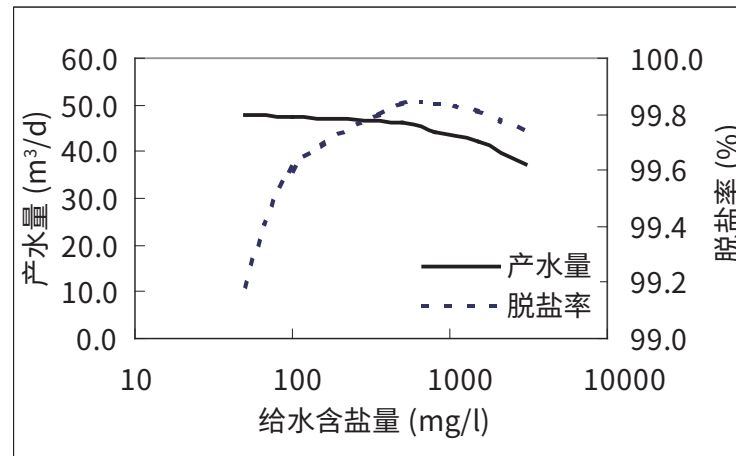
(回收率: 15%; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.6 采用 PROC10 膜元件时操作压力对产水量和脱盐率的影响



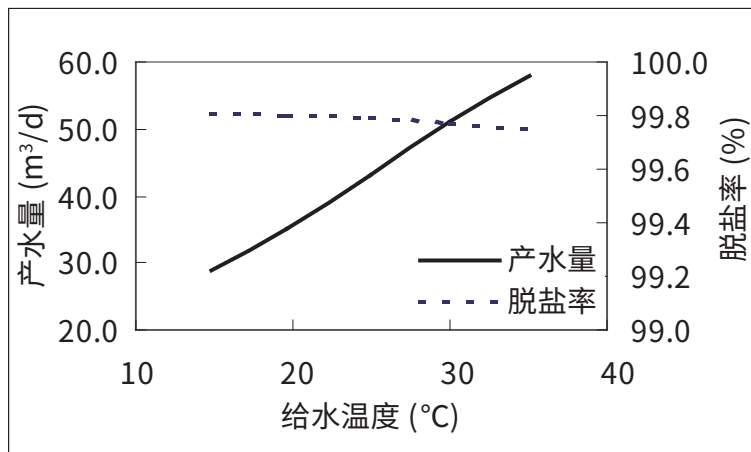
(操作压力: 1.55MPa; 给水含盐量: 2 000 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.7 采用 PROC10 膜元件时给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.8 采用 PROC10 膜元件时给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.9 采用 PROC10 膜元件时给水温度对产水量和脱盐率的影响

自从 2006 年 5 月河南新乡白鹭化纤集团有限责任公司成为 PROC10 在中国的首个用户以来，由于 PROC10 的产水水质、抗污染性和耐化学清洗性能都十分优越，使得 PROC10 迅速被中国客户认可，现今，已有近百万支 PROC10 膜元件在工业系统中投入使用。

2.2.1.3 节能型 PROC20 反渗透膜元件的特点和测试参数

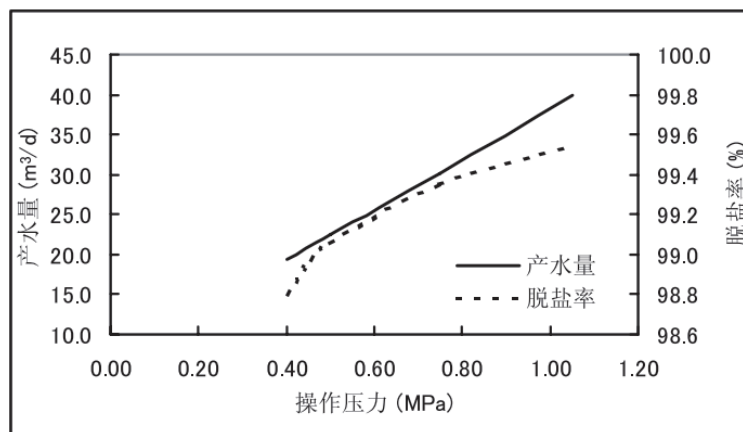
2009 年 4 月，美国海德能公司正式推出 PROC20 膜元件。PROC20 结合了 PROC™ 增强化技术与 ESPA™ 分离皮层表面构造控制技术，即海德能™ 第一支超低压等级的抗污染反渗透膜元件。

PROC20 除具有 PROC™ 系列抗污染能力强、耐化学清洗性能强等特点之外，节能效果最为突出，最多可降低高压泵能耗达 30%，从而明显降低制水成本。表 2.14 以一套 260m³/h 的 RO 系统为例进行模拟计算，以高压泵效率 65%，每年运行 8 000 小时，电费为 0.5 元 /kwh 等同样参数来比较，采用 PROC20 的系统比低压膜系统能耗低 30%，在三年的运行时间里可节省电费 46.2 万元。

表 2.14 PROC20 系统与低压膜系统同等条件下的能耗对比

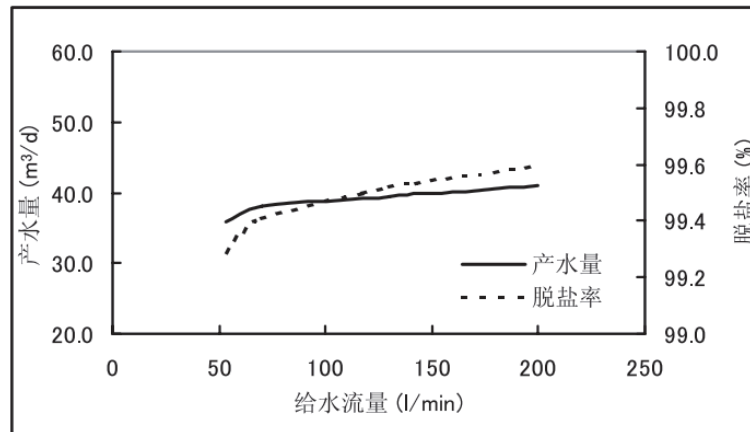
	PROC20 系统	低压膜系统	差值
平均功耗 (KW)	86.5	125	38.5
3 年累计耗电 (KWh)	2 076 000	3000 000	924 000
电费 (万元)	103.8	150	46.2

在不同的给水条件和运行条件下，PROC20 的膜元件会发生相应的变化，图 2.10-2.13 给出了 PROC20 膜元件的性能曲线。



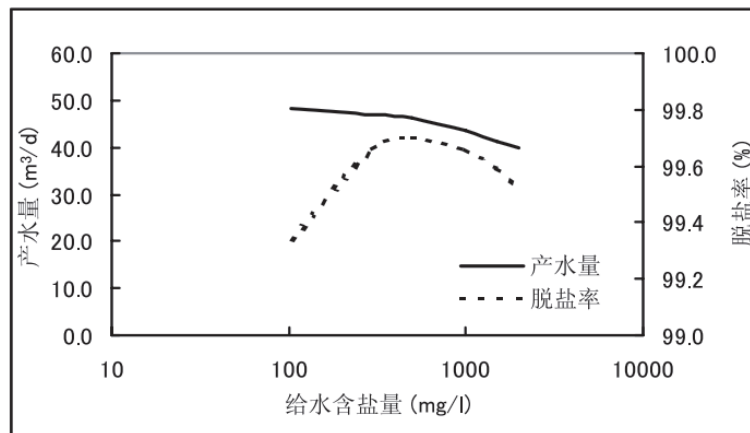
(回收率：15%；给水含盐量：2000 mg/L NaCl；温度：25℃；pH 值：6.5 – 7.0)

图 2.10 采用 PROC20 膜元件时操作压力对产水量和脱盐率的影响



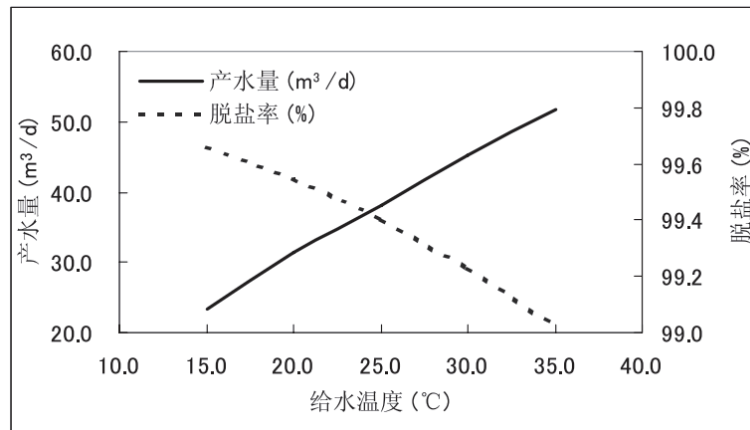
(操作压力: 1.05MPa; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.11 采用 PROC20 膜元件时给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05MPa; 回收率: 15%; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.12 采用 PROC20 膜元件时给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05MPa; 回收率: 15%; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.13 采用 PROC20 膜元件时给水温度对产水量和脱盐率的影响

PROC20 已在天野化工、华能沁北电厂等污水回用的项目中应用，能耗的降低、性能的稳定可以为各工业、市政领域的节能减排、废水再利用工程提供更优技术经济性。

2.2.1.4 PROC30 反渗透膜元件的特点和测试参数

2016 年 6 月，美国海德能公司宣布推出 PROC30 膜元件。PROC30 能同时提高产水量和脱盐率，将低压反渗透膜元件的技术参数提升到一个新高度。当进水水质差、但对产水水质要求高的系统中，PROC30 是结合性能和效率的上佳选择。PROC30 可降低 RO 系统能耗，抗生物和胶体污染性能可减少化学清洗次数，从而降低系统总运行成本。

PROC30 比 PROC10 和其它公司的部分同类型膜元件的脱盐率都高，表 2.15 是采用不同盐份和有机物测试的结果，图 2.14 是采用模拟水质进行测试的结果。

表 2.15 各膜元件对不同离子和有机物脱盐率对比

	PROC30	PROC10	B 公司
NaCl	99.8	99.75	99.6
MgSO ₄	99.96	99.83	99.94
Na ₂ SO ₄	99.96	99.92	99.95
MgCl ₂	99.91	99.89	99.84
CaCl ₂	99.9	99.75	99.84
NH ₄ NO ₃	98.4	98.2	93.9
乙醇	65	64	49
异丙醇	97.1	96.9	92.4
混合离子 (NaCl 2,000mg/L, +CaCl ₂ 1,400mg/L)	99.67	99.29	99
测试条件			
进水压力 [Mpa]	1.55		
溶液浓度 [mg/L]	2,000		
温度 [°C]	25±1°C		
pH[-]	6.5-7.0		

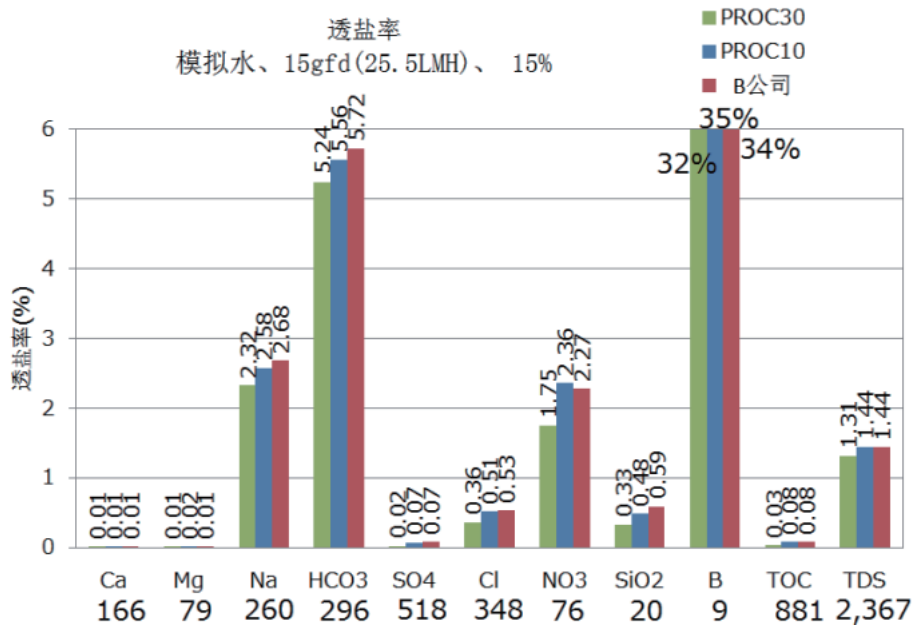
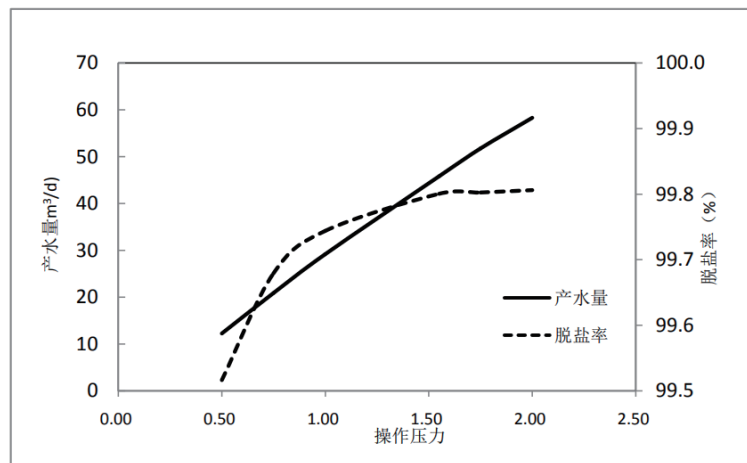


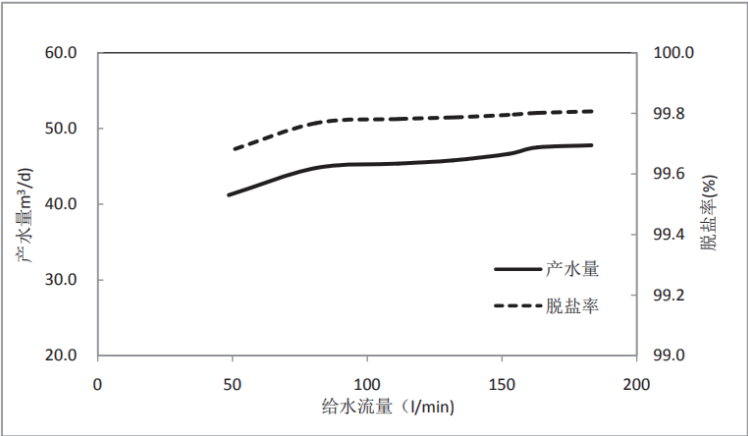
图 2.14 各膜元件在同样条件下透盐率对比

在不同的给水条件和运行条件下，PROC30 膜元件的产水量和脱盐率会发生变化，图 2.15-2.18 是 PROC30 的性能曲线。



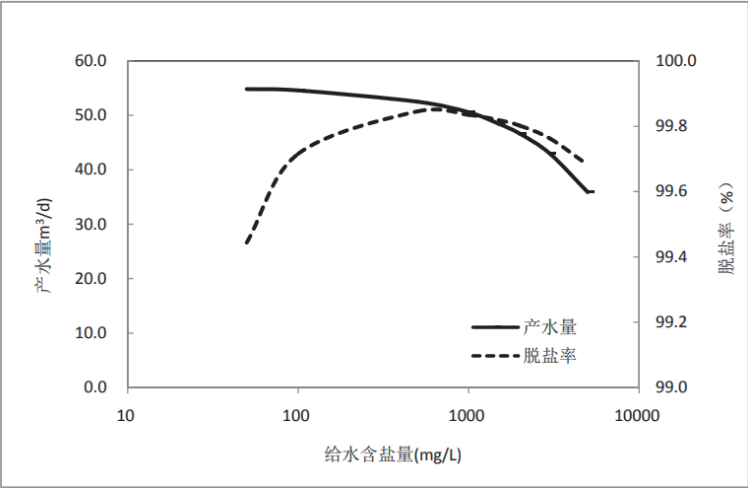
(回收率：15%；给水含盐量：2000 mg/L NaCl；温度：25°C；pH 值：6.5 – 7.0)

图 2.15 操作压力对 PROC30 膜元件产水量和脱盐率的影响



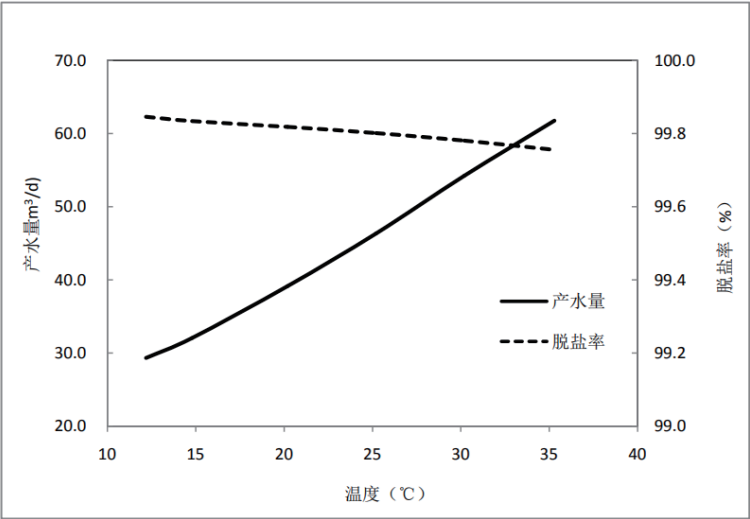
(操作压力: 1.55MPa; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.16 给水流量对 PROC30 膜元件产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.17 给水含盐量对 PROC30 膜元件产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 给水含盐量: 2000 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.18 温度对 PROC30 膜元件产水量和脱盐率的影响

2.2.2 CPA™ 系列低压高脱盐反渗透膜元件

在用于苦咸水脱盐的工业反渗透系统中，CPA™（Composite PolyAmide）系列低压高脱盐反渗透膜元件具有非常高的脱盐率。这是基于正在使用中的数百万支膜元件的实际性能所得出的结论。ISO 9001:2000 证书的获得保证我们生产出高质量的产品，以满足水处理工业对膜元件性能日益严格的要求。本部分主要向客户介绍 CPA™ 系列反渗透膜元件的特性，同时还对 CPA™ 系列的应用领域做了说明。

2.2.2.1 CPA™ 系列低压高脱盐反渗透膜元件的特点

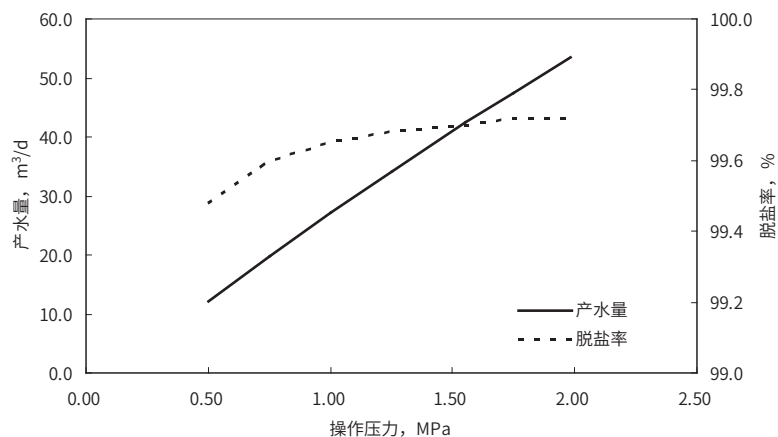
CPA™ 系列是低压高脱盐苦咸水淡化膜，材质为芳香聚酰胺，可在较低的操作压力下获得高水通量和脱盐率。CPA3-LD 膜元件的脱盐率为 99.7 %。

CPA™ 系列低压反渗透膜元件主要包括一种 8 英寸膜元件（CPA3-LD）和一种 4 英寸膜元件（CPA7-LD-4040），各种规格的膜元件除了能实现低压高产水量外，还可以满足客户对产水水质日益严格的要求。对于那些需要高产水量及脱盐率的深井水处理系统，CPA™ 系列是您最佳的选择。

需要特别提出的是，CPA3-LD 采用了改变形状和尺寸的 34mil 进水隔网，使得 CPA3-LD 的运行压力及压力损失均大幅下降；同时由于进水隔网的改变，CPA3-LD 膜元件的耐污染程度也大幅提高，降低了反渗透系统的清洗频率，延长了膜元件的使用寿命。

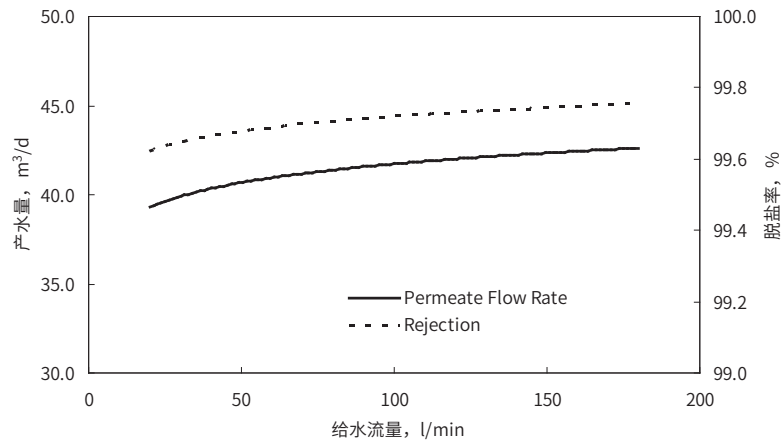
2.2.1.2 CPA3-LD 低压反渗透膜元件的测试参数

以 CPA3-LD 低压反渗透膜元件为例，介绍了运行压力、给水流量、给水含盐量以及给水温度对膜元件产水量和脱盐率的影响，见图 2.19 至 2.22。



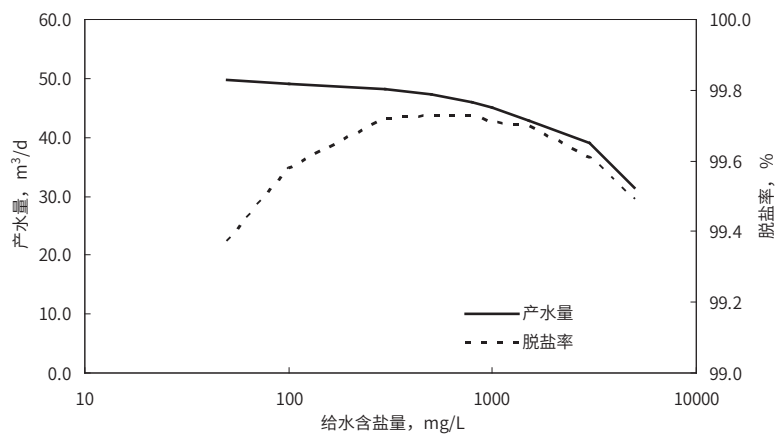
(回收率：15%；给水含盐量：1 500 mg/L NaCl；温度：25 °C；pH = 6.5 – 7.0)

图 2.19 操作压力对产水量和脱盐率的影响



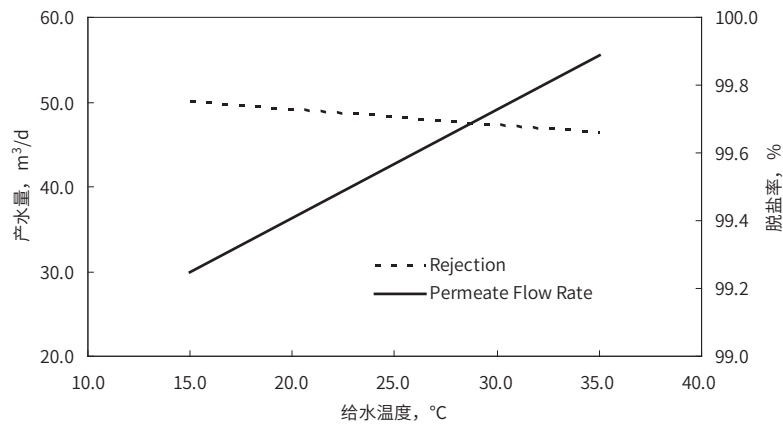
(操作压力: 1.55MPa; 给水含盐量: 1500 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.20 给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.21 给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 给水含盐量: 1500 mg/L NaCl; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.22 给水温度对产水量和脱盐率的影响

由图 2.19 至 2.22 可以看出以下趋势：

- 随着操作压力的升高，产水量和脱盐率均上升。在测试范围内，产水量与操作压力成线性关系，而脱盐率随着压力的不断升高，逐渐趋近一个定值；
- 在测试范围内，随着给水流量的增加，产水量和脱盐率逐渐上升，并且均趋近于一个定值；
- 随着给水含盐量的升高，产水量不断下降，而在测试范围内，脱盐率先是逐渐升高，但经过一个峰值后，则显著下降；
- 在测试范围内，随着给水温度的升高，产水量升高，而脱盐率下降，均呈线性关系。

总之，不同运行条件会造成反渗透膜元件脱盐率和产水量的不同变化。因此，采用美国海德能公司提供的专用设计软件（IMSDesign 云），软件的使用方法请参见第二部分第五章 5.4）对所需处理水质进行优化设计是十分必要的。

2.2.2.3 CPA™ 系列膜元件的应用

CPA™ 膜元件的常规使用包括井水、地表水除盐、饮用水净化、离子交换系统前的预脱盐、电厂锅炉补给水的制取以及半导体制造厂中所需要的超纯水制备等。

CPA™ 膜元件的耐久性很好，图 2.23 和 2.24 给出了 CPA3 膜元件的典型特性。图 2.23 为某一产水量为 160 m³/h，回收率为 83 % 的反渗透系统在四年中产水水质的变化情况，图 2.24 为该系统的压力在四年中的变化情况，数据表明 CPA3 膜元件的性能在长期运行中非常稳定。

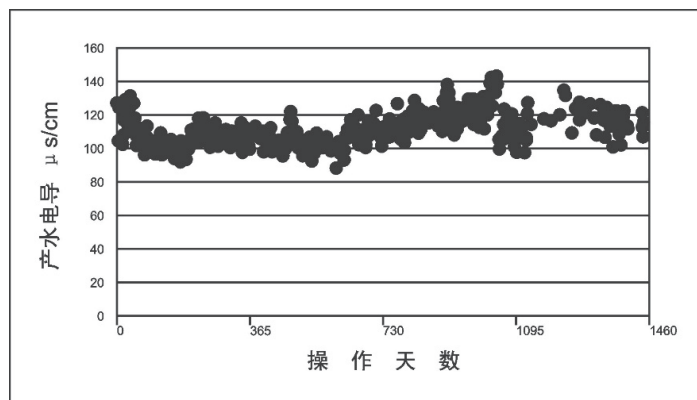


图 2.23 CPA3 膜元件产水电导率与时间的关系（四年）

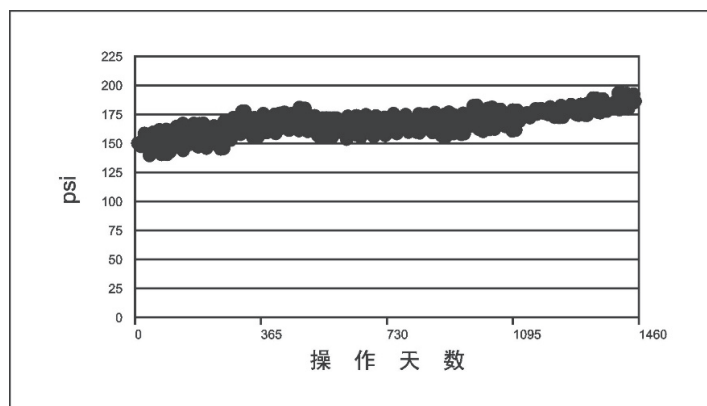


图 2.24 CPA3 膜元件给水压力与时间的关系（四年）

除了具有高的脱盐率，CPA™ 系列膜元件对二氧化硅（SiO₂）的去除也相当有效。SiO₂ 是很多苦咸水中都含有的成分，表 2.16 列出了在世界不同地区实测的 CPA2 反渗透系统对 SiO₂ 的脱除率。大多数系统对 SiO₂ 的脱除率介于 98~99.7 % 之间，在标准试验条件下 CPA™ 系列膜元件对 SiO₂ 的脱除率通常为 99.7 %。

表 2.16 不同地区二氧化硅脱除率

设备地点	给水 SiO ₂ , mg/L	产品水 SiO ₂ , mg/L	系统 SiO ₂ 脱盐率, %
A	27.7	0.52	98.1
B	41.1	0.26	99.4
C	10.2	0.16	98.4
D	40.0	0.30	99.2
E	64.0	0.53	99.2
F	44.0	0.45	99.0
G	3.6	0.06	98.3
H	2.6	0.010	99.6
I	2.9	0.008	99.7

2.2.3 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件

2.2.3.1 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的特点

由于反渗透膜在工作时需要克服渗透压，因此能耗较高一直是反渗透技术的弱点。若能够在较低的压力下制备出符合要求的脱盐水，就意味着节约反渗透膜系统的设备投资（水泵、阀门、管路以及压力容器）和运行费用（电能消耗及维护费）。

表 2.17 列出了 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的性能特点，以及与 CPA™ 系列低压反渗透膜元件的比较。表中的比水通量表示膜元件在单位压力、单位面积下、单位时间的产水量，这个参数使得不同的膜元件可以在同一条件下进行比较。因此可以看出：

- ESPA™ 系列比 CPA™ 系列具有更高的比水通量，其中 ESPA4-LD 达到 72.6 LMH/MPa，是目前世界上同类产品比水通量优异的反渗透膜元件之一；
- ESPA2 MAX 的膜面积增加了 10 %，达到了 440 ft²。这使得 ESPA2 MAX 在具有超低压系列最高脱盐率的同时，具备了高的产水量，其比水通量也达到了 44.0 LMH/MPa；

表 2.17 ESPA™ 系列超低压反渗透膜性能特点¹

膜元件	面积 ft ² /m ²	脱盐率 / %	产水量 GPD/m ³ /d	测试压力 psi/MPa	比水通量 ² GFD/psi/ LMH/MPa
ESPA1	400/37.2	99.4	12 000/45.4	150/1.03	0.20/49.3
ESPA2-LD	400/37.2	99.6	10 000/37.9	150/1.03	0.17/41.2
ESPA2 MAX	440/40.9	99.6	12 000/45.4	150/1.03	0.18/44.9
ESPA4-LD	400/37.2	99.2	12 000/45.4	100/0.70	0.30/72.6
CPA3-LD	400/37.2	99.7	11 000/41.6	225/1.55	0.12/30.0

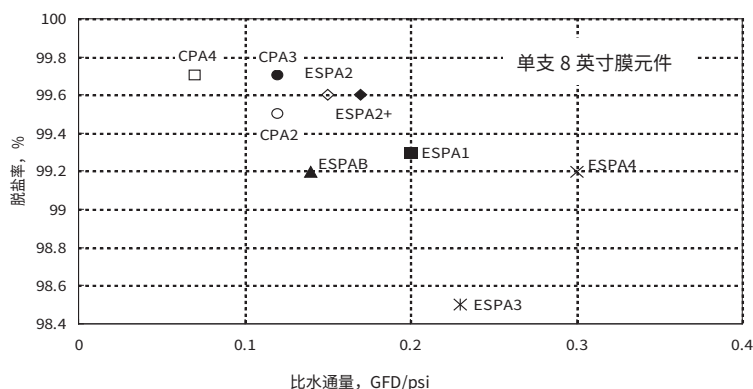
¹ 数据均在标准测试条件下得到，不代表全部使用条件。实际应用依据不同水质有所不同。

² 比水通量表示在单位压力下、单位膜面积单位时间的产水量。

1995 年推出的 ESPA1 比传统的低压反渗透膜元件 CPA3-LD 比水通量高 67 %。1998 年推出的 ESPA2 进一步完善了超低压产品系列且具有更高的脱盐率。2000 年，美国海德能公司又推出了 ESPA4，其在更低的压力（100 psi / 0.70 MPa）下运行，仍可以得到 99.2 % 的脱盐率。2004 年，在取得巨大成功的 ESPA2 的基础上，进行了新的工艺改进，推出了新型的超低压反渗透膜元件 ESPA2 MAX，将以往 ESPA™ 系列反渗透膜的面积提高了 10 %，达到 440 ft²，从而在保持 99.6 % 的脱盐率的情况下，使产水量从 ESPA2 的 9 000 GPD（34.1 m³/h）提高到 12 000 GPD（45.4 m³/h），增加了 33%。图 2.25 和 2.26 进一步直观的表明了 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜的性能特点及其与传统低压反渗透膜元件 CPA™ 系列的比较。

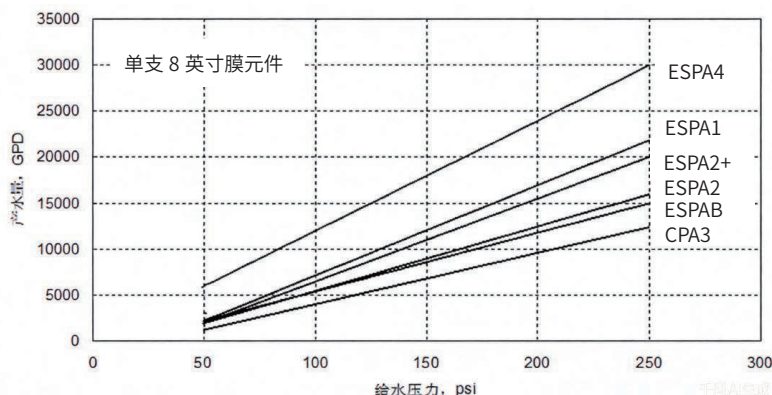
为了进一步直观地比较不同反渗透膜的脱盐率差异，我们使用美国海德能公司的反渗透设计软件 IMSDesign™ 对 ESPA™ 系列膜元件和 CPA3-LD 膜元件分别进行了分析，结果列于表 2.18。表中给出了三种进水含盐量（500、1 500 和 4 000 mg/L NaCl 溶液）条件下，各种膜元件在相同的产水量 15 GFD（25.5 LMH）时，所需的给水压力以及产水中的含盐量。表中数据均针对 8 英寸单支膜元件、水温 25℃、回收率 15 %。膜型号按进水压力从高到低排列。

表 2.18 所示的五种膜中，CPA3-LD 的产水水质最好，但所需压力也是最高的。ESPA™ 系列反渗透膜的给水压力均有明显降低，其中 ESPA4 的运行压力最低。在进水含盐量小于 1 500 mg/L 时，ESPA4 所需的进水压力仅为 CPA3-LD 的一半，是 ESPA2 MAX 的三分之二。



(测试条件: 1 500mg/L NaCl; 15 % 回收率; 25℃; ESPA4 为 500 mg/L NaCl)

图 2.25 ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件特性产水量与脱盐率的关系以及与 CPA™ 系列的比较



(测试条件: 1 500mg/L NaCl; 15 % 回收率; 25℃; ESPA4 为 500 mg/L NaCl)

图 2.26 不同压力下 ESPA™ 系列和 CPA3 产水量的比较

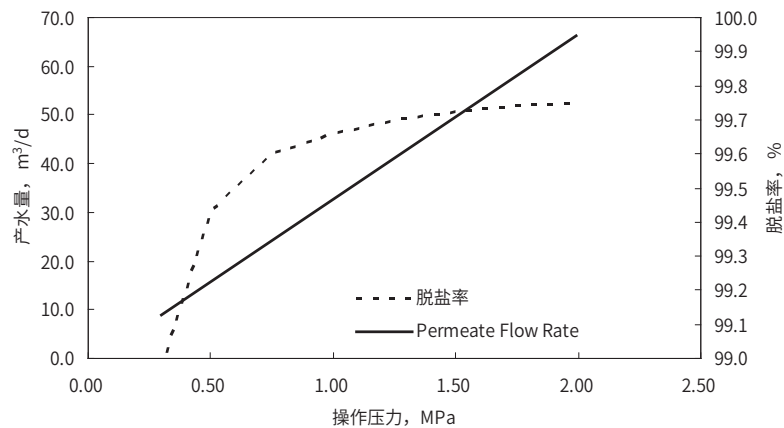
表 2.18 ESPA™ 系列及 CPA3-LD 工作压力和产水含盐量比较

膜型号	500 mg/L		1 500 mg/L		4 000 mg/L	
	给水压力 bar	产水含盐量 mg/L	给水压力 bar	产水含盐量 mg/L	给水压力 bar	产水含盐量 mg/L
CPA3-LD	8.1	2.2	9.0	8.7	11.4	38.4
ESPA2	6.3	2.3	7.3	9.1	9.6	40.0
ESPA2 MAX	5.8	2.8	6.7	10.7	9.0	47.1
ESPA1	4.9	9.8	5.8	29.5	8.0	112
ESPA4	4.0	7.7	4.5	29.9	6.7	131

2.2.3.2 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的测试参数

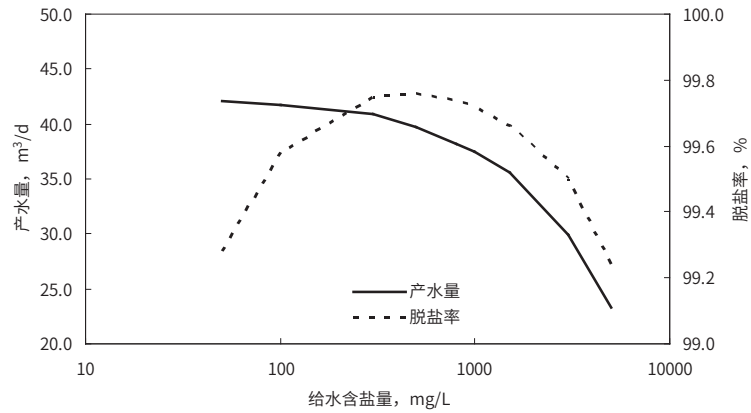
许多运行参数均对反渗透膜元件的产水量和脱盐率有很大的影响，例如：运行压力、给水流量、给水含盐量以及给水温度。为了更好地了解超低压反渗透膜元件在不同运行条件下的性能，美国海德能公司通过大量的试验，积累了丰富的数据。下面图表分别为 ESPA2 和 ESPA4、ESPA2-LD MAX 超低压反渗透膜元件（8 英寸）的性能曲线。

(1) ESPA2



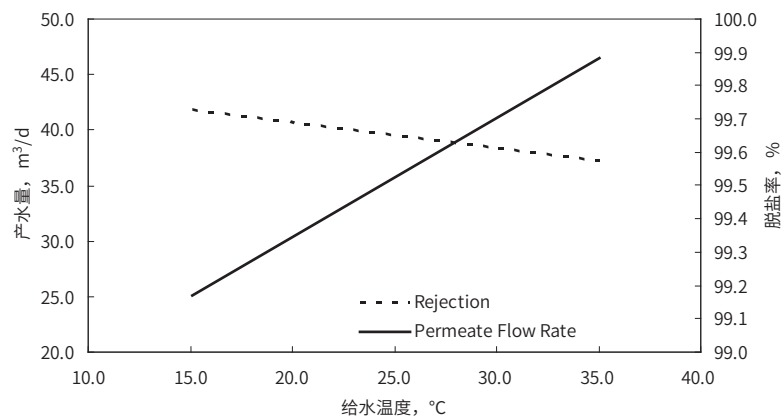
(回收率：15 %；给水含盐量：1 500 mg/L NaCl；温度：25°C；pH 值：6.5 – 7.0)

图 2.27 采用 ESPA2 膜元件时操作压力对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05 MPa; 回收率: 15 %; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

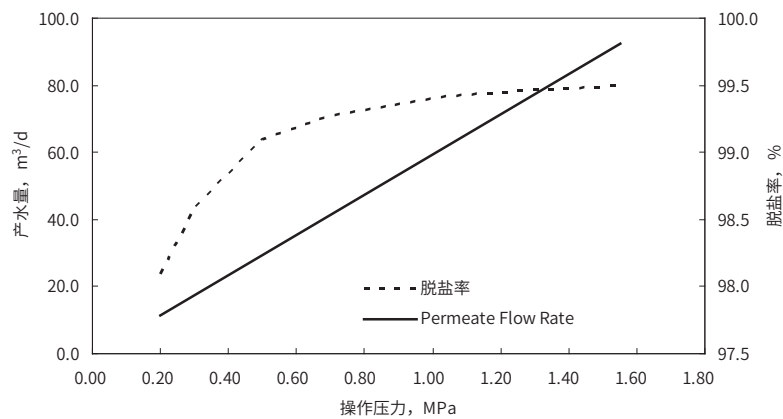
图 2.28 采用 ESPA2 膜元件时给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05 MPa; 回收率: 15 %; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

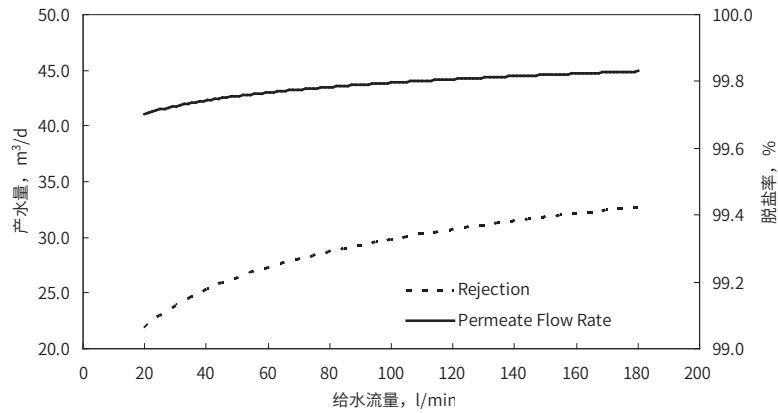
图 2.29 采用 ESPA2 膜元件时给水温度对产水量和脱盐率的影响

(2) ESPA4



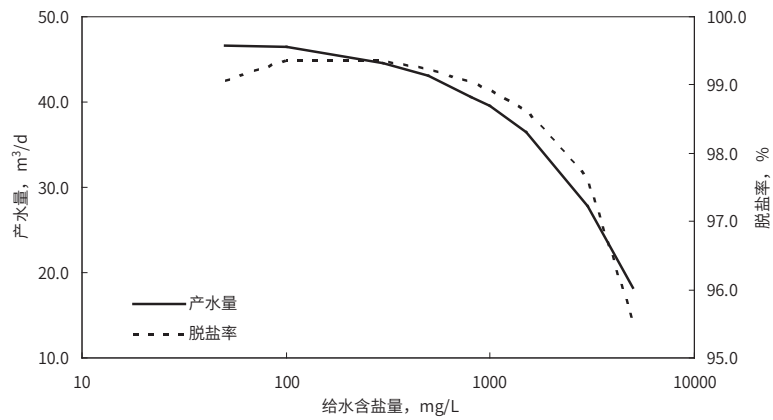
(回收率: 15 %; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.30 采用 ESPA4 膜元件时操作压力对产水量和脱盐率的影响



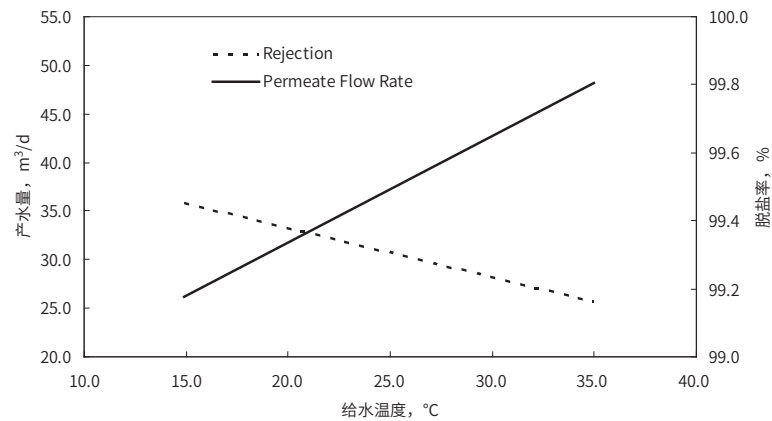
(操作压力: 1.05 MPa; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.31 采用 ESPA4 膜元件时给水流量对产水量和脱盐率的影响



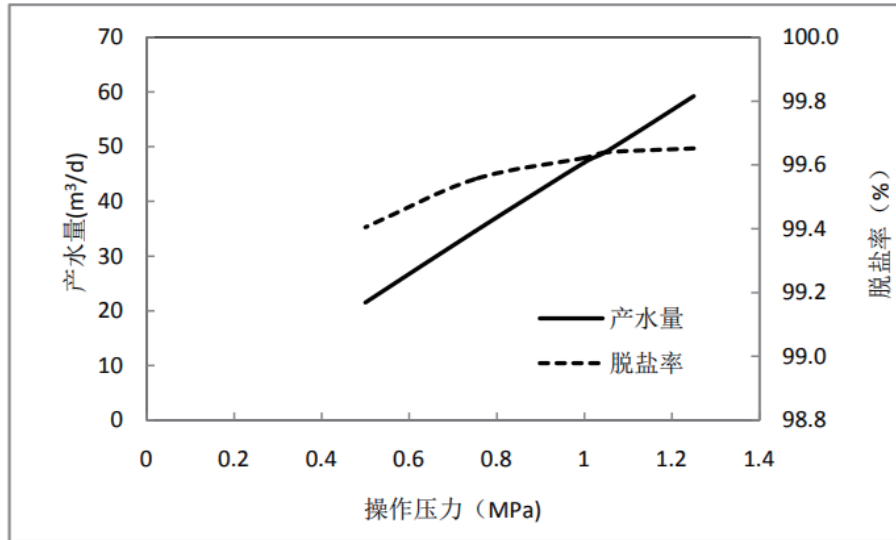
(操作压力: 1.05 MPa; 回收率: 15 %; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.32 采用 ESPA4 膜元件时给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



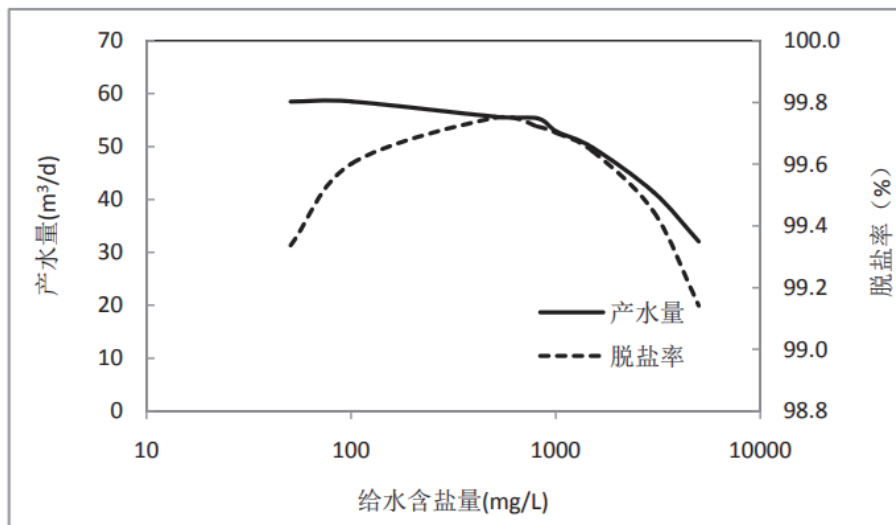
(操作压力: 1.05 MPa; 回收率: 15 %; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.33 采用 ESPA4 膜元件时给水温度对产水量和脱盐率的影响



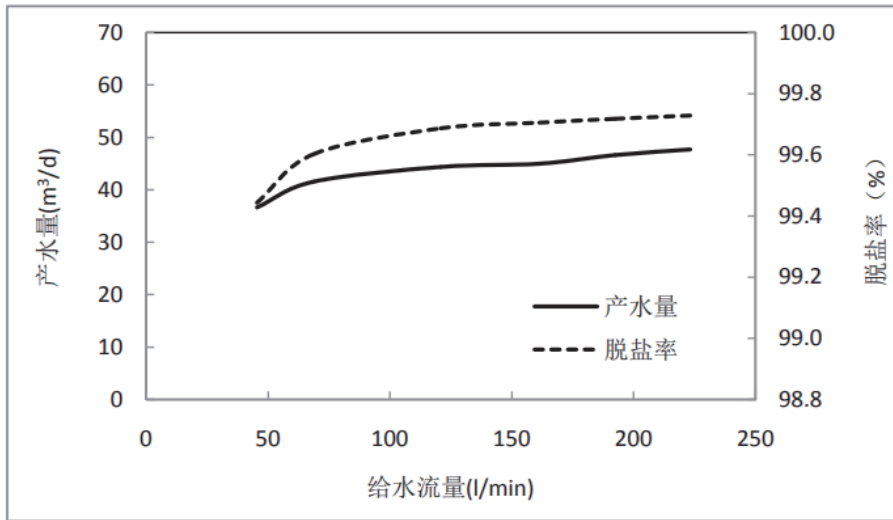
(回收率：15 %；给水含盐量：1 500 mg/L NaCl；温度：25℃；pH值：6.5 – 7.0)

图 2.34 采用 ESPA2-LD MAX 膜元件时操作压力对产水量和脱盐率的影响



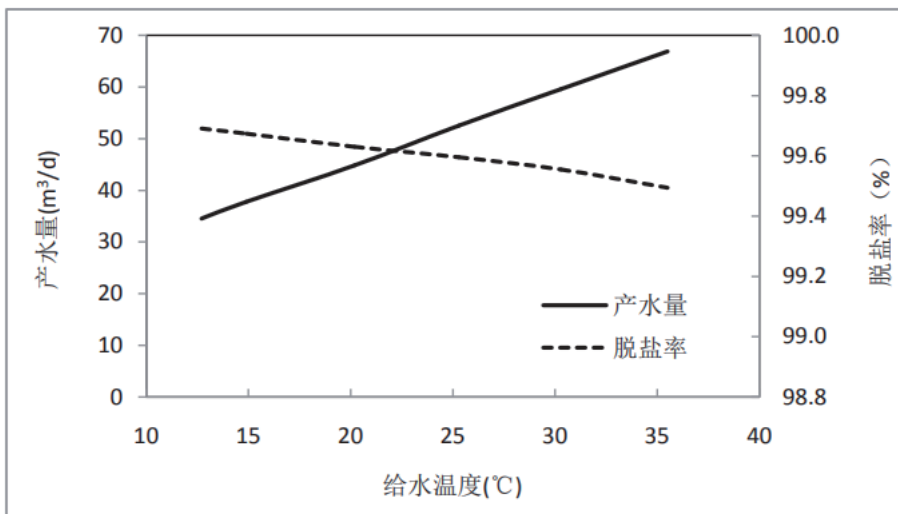
(操作压力：1.05 MPa；回收率：15 %；温度：25℃；pH 值：6.5 – 7.0)

图 2.35 采用 ESPA2-LD MAX 膜元件时给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05 MPa; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; 温度: 25°C; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.36 采用 ESPA2-LD MAX 膜元件时给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.05 MPa; 回收率: 15 %; 给水含盐量: 1 500 mg/L NaCl; pH 值: 6.5 – 7.0)

图 2.37 采用 ESPA2-LD MAX 膜元件时给水温度对产水量和脱盐率的影响

以上图表可以看出在测试范围内, 随着操作压力和给水流量的升高, 产水量和脱盐率均上升; 随着给水含盐量的升高, 产水量逐渐下降, 而脱盐率先是逐渐升高, 经过一个峰值后, 则显著下降; 随着给水温度的升高, 产水量升高, 而脱盐率下降, 均呈线性关系。

2.2.3.3 ESPA™ 系列超低压大通量反渗透膜元件的应用

ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件可应用于各种工业纯水、市政、轻工业以及饮用水领域, 甚至在市政污水深度处理回用中也取得了大量业绩。在电费较贵和给水温度较低条件下, ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件能表现出优异的性能。表 2.19 列出了各种 ESPA™ 膜元件的适用范围。

表 2.19 ESPA™ 系列超低压反渗透膜元件的适用范围

膜型号	特点及适用领域
ESPA1	标准超低压反渗透膜元件，适用于给水含盐量小于 1000 mg/L 的一般场合。
ESPA2-LD	高脱盐率超低压反渗透膜，适用于对产水水质要求高的场合。
ESPA2 MAX	高脱盐率、大面积、高产水量超低压反渗透膜元件，适用于双级反渗透系统的第二级。
ESPA4-LD	更低的运行压力、高产水量超低压反渗透膜元件，适用于双级反渗透膜系统的第二级。
ESPA4 MAX	本公司同系列产品，膜面积最大，产水量最高，适用于对节能要求较高的场景。

需要特别指出的是，由于人们对水质的要求越来越高，双级反渗透系统日益成为热点。第二级反渗透膜元件的选型越来越受到重视。由于第二级反渗透系统的给水是第一级反渗透的产水，水中的含盐量已经很低，因此在选择第二级的膜元件时，可以基本忽略浓差极化指数（ β ）和朗格利尔指数（Langelier Saturation Index，缩写：LSI）的影响，尽量选用超低压、高产水量的反渗透膜元件（ESPA™ 系列），以达到减少膜元件数量和降低运行压力的目的。美国海德能公司推荐在双级反渗透系统中的第二级选用 ESPA2 MAX 或 ESPA4-LD 两种超低压、高产水量的反渗透膜元件。其中，ESPA2 MAX 在对第二级产水水质要求高的场合更加适用，而 ESPA4-LD 在对产水量要求高，对产水水质要求不很高时适用。详细的关于双级反渗透的设计请参见第二部分第五章 5.1.5。

2.2.4 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件

2.2.4.1 LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件的特点

LFC™ (Low Fouling Composite) 系列代表着美国海德能公司在芳香聚酰胺复合膜制造领域又一新的突破。LFC™ 系列膜元件不仅具有复合膜的低压、高通量和高脱盐率等特点，而且还具有亲水性和电中性的特点。与带负电的传统反渗透复合膜元件相比，LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件的表面呈现电中性。

LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件之所以能够在耐污染方面取得突破性进展，主要得益于美国海德能公司的电中性理论（抗污染技术请参阅第一部分第一章 1.2.4）。通常某些废 / 污水中存在许多带有正电荷的物质，若与表面带负电的传统反渗透膜元件接触，则很容易吸附在膜表面上，对膜元件造成污染，从而导致反渗透膜系统的产水量和脱盐率的下降、增加系统的清洗频率、缩短反渗透膜元件的寿命。而采用 LFC™ 系列抗污染膜元件的反渗透系统则可以减少这类吸附现象的发生，从而起到抗污染的作用。

采用不同电荷的表面活性剂分别与带负电的传统芳香聚酰胺复合膜以及电中性的 LFC3-LD 接触，可以发现电中性的反渗透膜元件在不同的表面活性剂中均表现出稳定的水通量，如图 2.38 所示。而传统的带负电的反渗透膜的水通量在阳离子、两性和中性表面活性剂的溶液中显著下降。

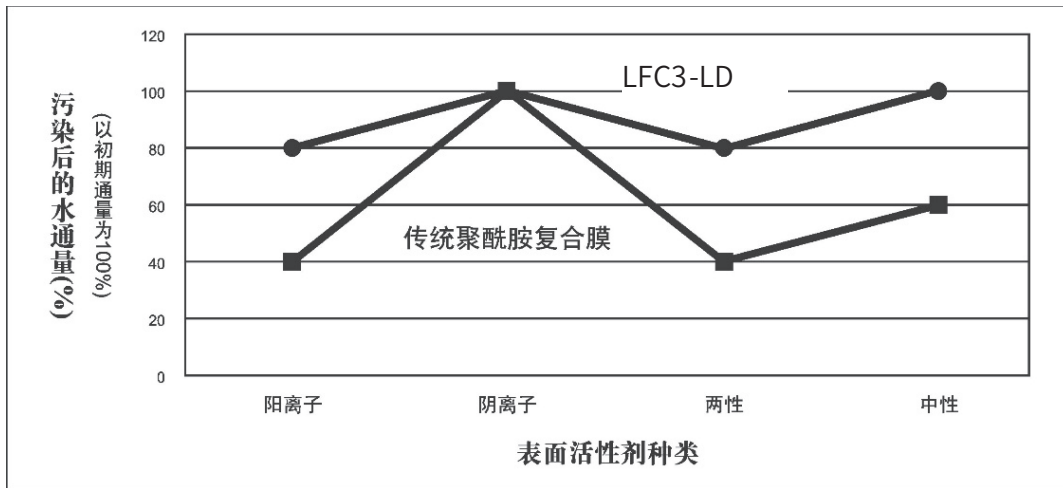


图 2.38 不同表面活性剂对电中性的 LFC™ 膜及传统复合膜的影响

目前，LFC™ 系列的 8 英寸产品有 LFC3-LD，4 英寸产品有 LFC3-LD-4040，可以满足不同的需要。LFC3-LD 采用 34mil 隔网技术，压降比其他品牌抗污染膜低。

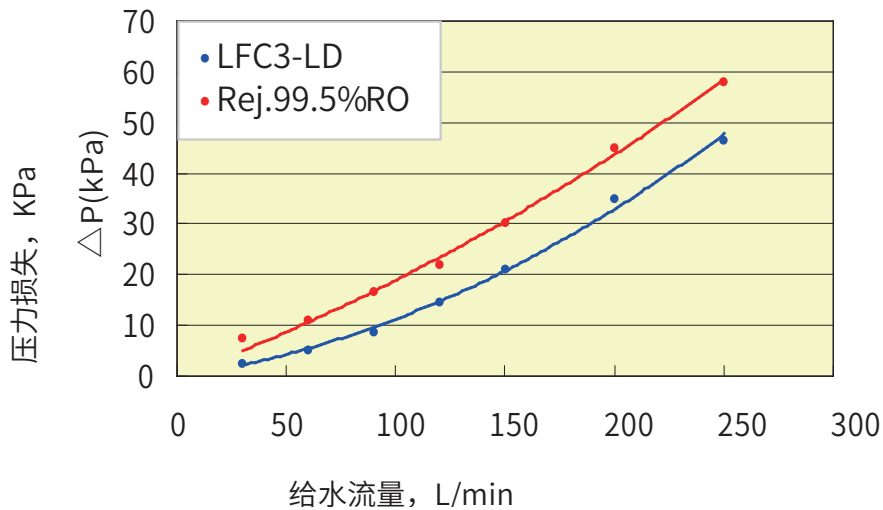
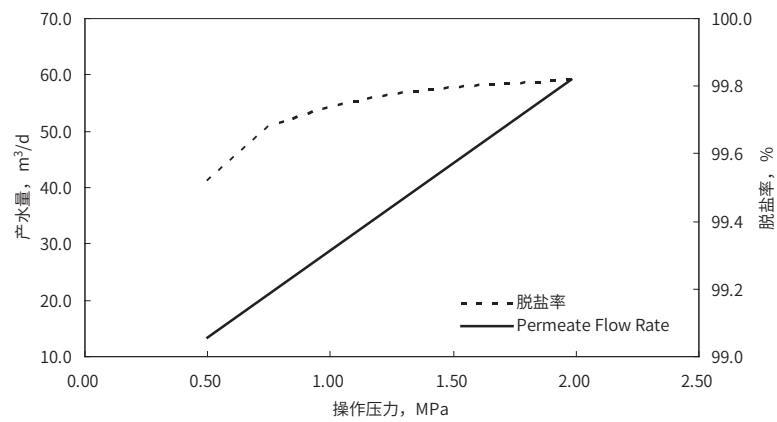


图 2.40 LFC3-LD 与其他品牌抗污染膜在相同工作条件下压力损失比较

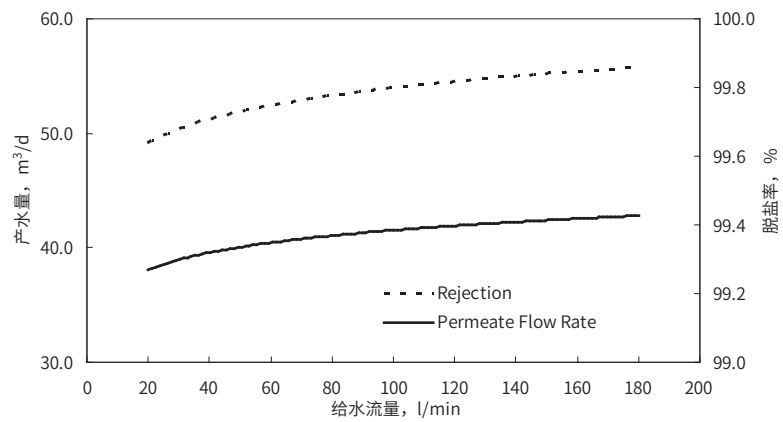
2.2.4.2 LFC3-LD 抗污染反渗透膜元件的测试参数

在不同的给水条件和运行条件下，LFC™ 系列抗污染反渗透膜元件同样会发生相应的变化。下面 4 图给出了 LFC3-LD 膜元件的性能曲线。



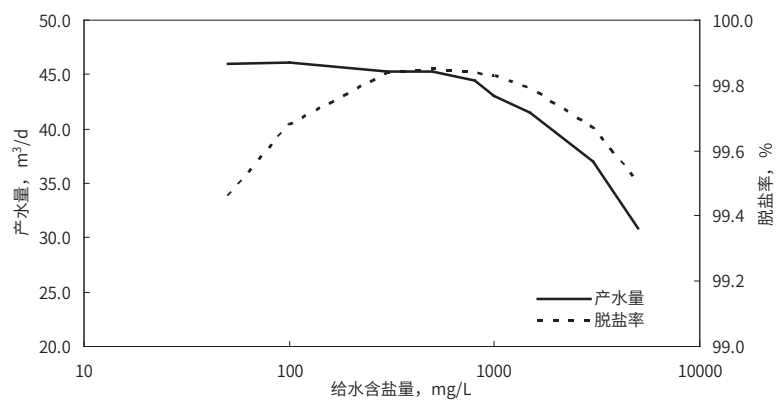
(回收率: 15%; 给水含盐量: 1500 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.41 操作压力对产水量和脱盐率的影响



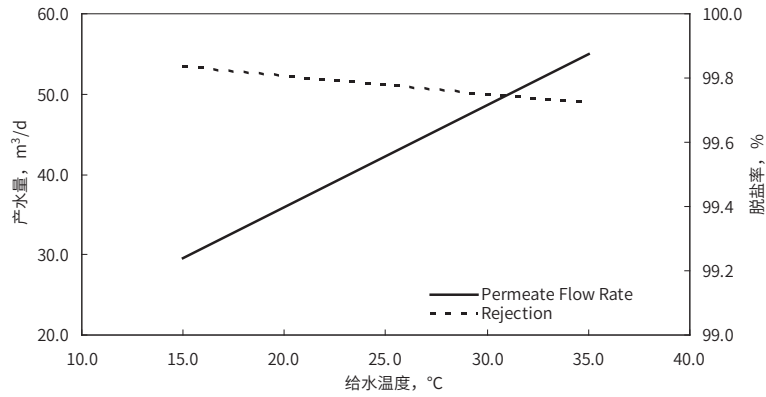
(操作压力: 1.55MPa; 给水含盐量: 1500 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.42 给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 1.55MPa; 回收率: 15%; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.43 给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力：1.55MPa；回收率：15%；给水含盐量：1 500 mg/L NaCl；pH = 6.5 – 7.0)

图 2.44 给水温度对产水量和脱盐率的影响

2.2.4.3 LFC™ 系列抗污染反渗透膜的应用

开发 LFC™ 抗污染系列膜元件的目的是为了尽量减少带正电荷和两性的有机污染物在膜表面吸附。为了验证其抗污染特性，把 LFC™ 抗污染膜和传统低压反渗透膜在同一使用条件下进行了对比，两种膜的进水均为中空纤维超滤膜处理后的市政排水，图 2.45 对比了两种不同类型的膜元件的给水压力及温度随时间的变化，结果表明在处理那些对传统膜元件容易产生污染的市政排水时，LFC™ 系列反渗透膜元件几乎不会被污染或者只有轻微污染，由于它在运行的 8 个月中性能稳定，因此一直没有进行过清洗。

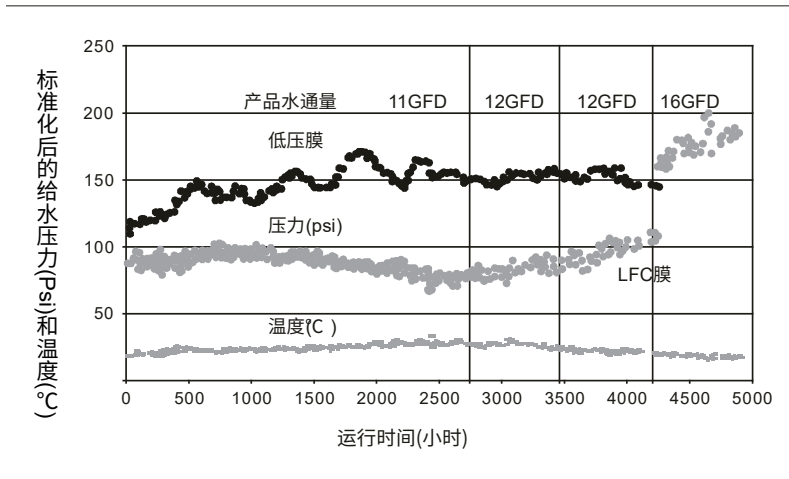


图 2.45 LFC™ 抗污染反渗透膜与传统低压反渗透膜用于中空超滤膜处理后的市政排水

目前 LFC™ 系列反渗透膜元件在全世界几百个大、中型项目中使用，最典型的是新加坡 Kranji 和 Bedok 城市污水回用项目（Newater）。在这两个项目中的 LFC1 膜元件自 2000 年 4 月投入运行以来，每天可从废水中制取 72 000 m³ 的新生水，LFC™ 系列反渗透膜元件主要适用于含有两性或阳离子型表面活性剂的工业废水和市政污水中。

2.2.5 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件

SWC™ (Sea Water Composite) 海水淡化反渗透膜元件可以从海水中制备淡水。美国海德能公司开发的海水淡化反渗透膜元件，采用了先进的高分子合成技术，使高脱盐率和大产水量得以同时实现，更高效地利用丰富的海水资源，生产饮用水或用于其他用途，以缓解水资源短缺这一全世界都面临的严峻课题。我国也启动了大量的海水淡化项目，比如：天津大港新泉海水淡化厂、浙江玉环电厂、广东平海电厂等。

2.2.5.1 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件的特点

美国海德能公司自 90 年代开发出第一支商品化的海水淡化膜 SWC1 以来，一直不断地提高海水淡化膜元件的性能。2004 年开发出了当时世界上产水量和脱盐率最高，运行压力较低的 SWC5 海水淡化反渗透膜元件（SWC 系列反渗透膜元件的规格和性能请参见表 2.6），在国内外的许多大型海水淡化项目中得到应用，并因为其代表最前沿科技进步水平和创新性在 20 000 个新产品中脱颖而出，SWC5-LD 荣获 2007 年《日本经济新闻》评选出来的“最优秀产品奖”。为了进一步丰富海水淡化系列膜元件，美国海德能公司还推出了高脱盐率的海水淡化复合膜 SWC4-LD 膜元件。在 2009 年，产水量达到 12 000gpd 的 SWC6 系列问世，进一步降低了海水淡化系统的能耗。美国海德能公司还利用全新的自动化卷膜技术，增大海水淡化膜元件的有效膜面积 10%，将海水淡化各型号膜做成 MAX 膜（有效膜面积 440ft²），为客户提供更好性价比的海水淡化产品。表 2.20 所示为美国海德能公司提供的新型海水淡化反渗透膜元件的性能。

表 2.20 新型海水淡化膜的性能¹

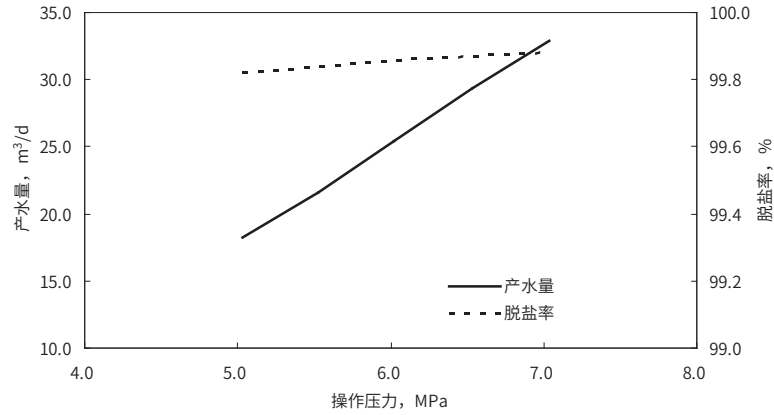
膜元件	膜面积, ft ²	产水量, GPD	公称脱盐率, %
SWC4-LD	400	6 500	99.8
SWC4 MAX	440	7 200	99.8
SWC5-LD	400	9 000	99.8
SWC5 MAX	440	9 900	99.8
SWC6-LD	400	12000 (800psi 压力下) 6000 (600psi 压力下)	99.8 (800psi 压力下) 99.6 (600psi 压力下)
SWC6 MAX	440	13200 (800psi 压力下) 6600 (600psi 压力下)	99.8 (800psi 压力下) 99.6 (600psi 压力下)

2.2.5.2 SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件的性能

为了帮助客户了解 SWC™ 系列膜元件在不同工作状态下的产水量及脱盐率，此部分主要列出了操作压力、给水流量、给水含盐量及给水温度对 SWC4 MAX 和 SWC5-LD 的影响。

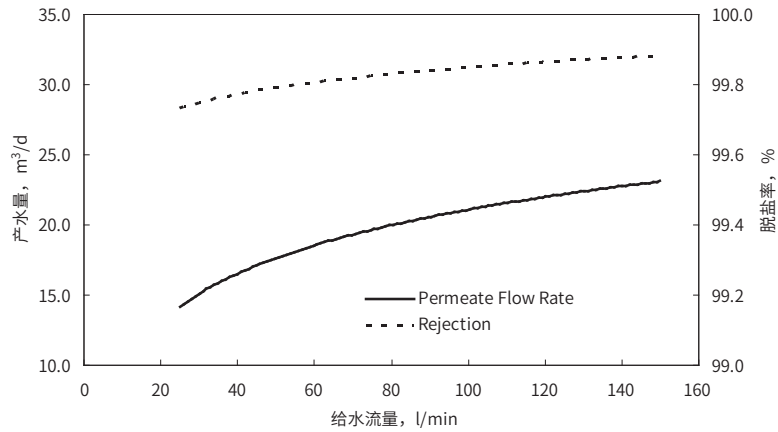
1. 测试条件为：进水含盐量 32 000 mg/L；压力 800 psi / 5.52 MPa；温度 25℃；回收率 10 %；pH 值 6.5-7.0。

(1) SWC4 MAX



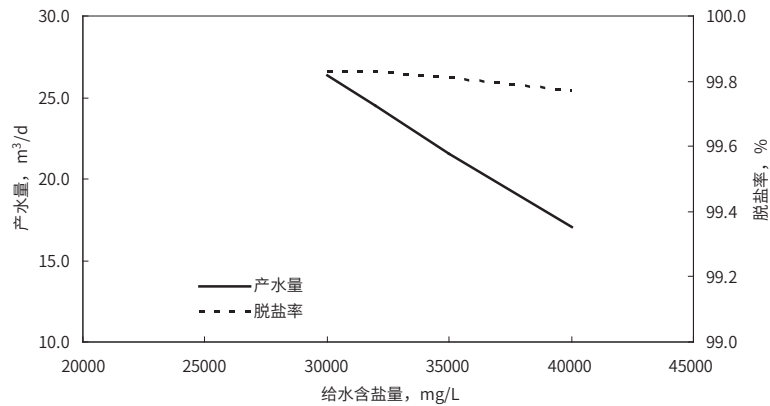
(回收率: 10 %; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.46 操作压力对产水量和脱盐率的影响



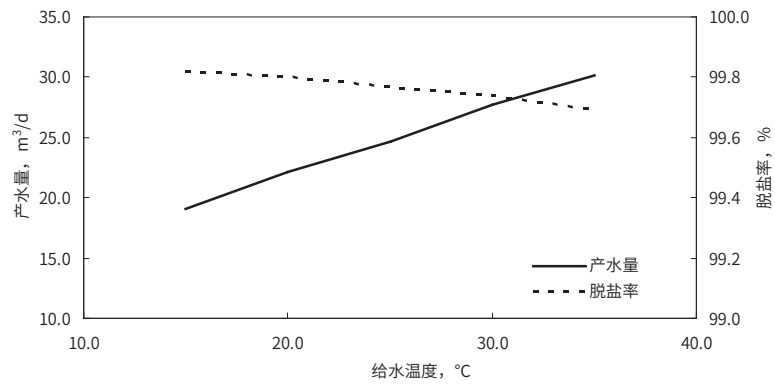
(操作压力: 5.52 MPa; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.47 给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 5.52 MPa; 回收率: 10 %; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

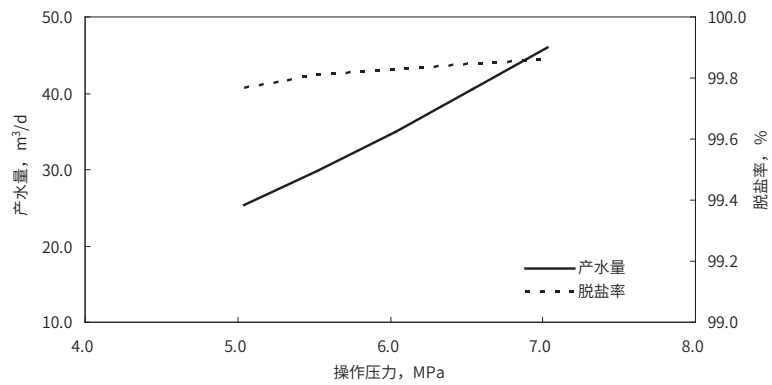
图 2.48 给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 5.52 MPa; 回收率: 10 %; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; pH = 6.5 – 7.0)

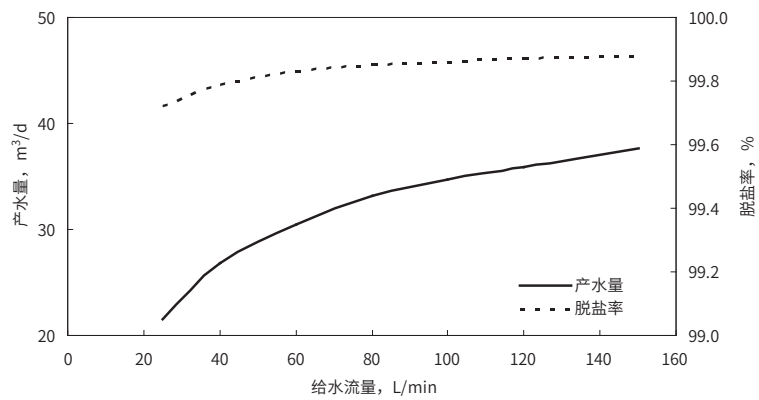
图 2.49 给水温度对产水量和脱盐率的影响

(2) SWC5-LD



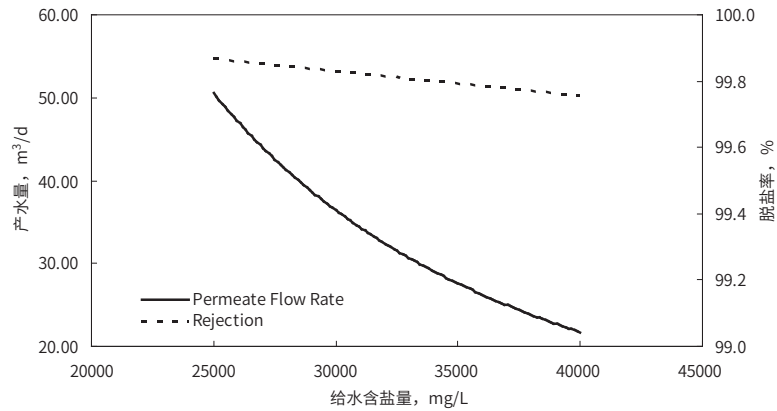
(回收率: 10 %; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.50 操作压力对产水量和脱盐率的影响



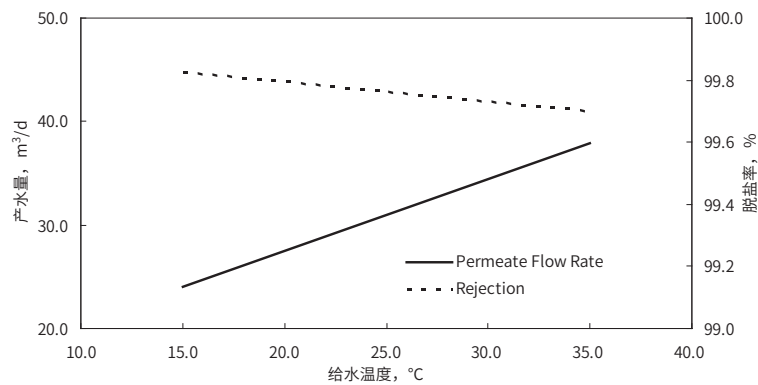
(操作压力: 5.52 MPa; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.51 给水流量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 5.52 MPa; 回收率: 10 %; 温度: 25 °C; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.52 给水含盐量对产水量和脱盐率的影响



(操作压力: 5.52 MPa; 回收率: 10 %; 给水含盐量: 32 000 mg/L NaCl; pH = 6.5 – 7.0)

图 2.53 给水温度对产水量和脱盐率的影响

2.2.6 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件

2.2.6.1 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件的特点

纳滤是一种类似于反渗透的膜分离技术，但是纳滤膜的分离层相比反渗透更加疏松。对一价离子，如 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 等的脱除率低，但是对硬度、铁、色度以及三卤甲烷（THM）等物质有相对高的去除率。基于产水侧和进水侧渗透压的抵消，ESNA™ (Energy-Saving Nanofiltration) 系列纳滤膜元件可以在很低的压力下，获得高的水通量。同时，在使用过程中由于很低的运行压力，可以明显的节省设备及运行费用。降低操作压力即意味着节省费用。因为低压操作时能耗低，而且相关的水泵、管路及压力容器等也更为便宜，ESNA™ 系列膜元件的这一优点使它日益受到广大用户的青睐。

2004 年，美国海德能公司将低污染膜技术与纳滤膜性能有机的结合起来，在原有的 ESNA1-K1 纳滤膜元件的基础上，开发出电中性的 ESNA1-LF 和 ESNA1-LF2。这两种纳滤膜可以在一些进水条件复杂的应用场合稳定的运行。

2022 年，美国海德能公司采用新型膜片技术研发出可在低操作压力条件下，兼顾大通量、较高的脱盐率及出色的有机物去除效果的 ESNA5-LD。该型号兼顾脱盐率、透水量、低压降三项重要指标，可对较高 TDS

的苦咸水进行低能耗软化处理，也可在不同类型的复杂水源条件下实现安全稳定的长期运行，是高品质饮用水提质处理的理想选择。

2.2.6.2 ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件的应用

ESNA™ 系列纳滤膜元件一般用于脱除低含盐量给水中的硬度及色度，该膜已在市政供水系统中得到了广泛应用，对于性能达到或超过预期值的已投运系统，该膜已被选用于今后的设备扩容。ESNA1 膜元件的优点之一是能有效脱除给水中含量相对较高的铁及三卤甲烷。一个水回收率为 85 % 的大系统的实例结果表明，当给水含铁量高达 4 mg/L¹ 时，其产水含铁量小于 0.10 mg/L。表 2.21 列出了该系统的正常运行数据。

表 2.21 ESNA1 纳滤膜系统运行使用数据²

分析项目	给水	产水	透盐率，%	标准化后透盐率（折算成 Cl ⁻ ）	脱盐率，%
pH	7.14	6.1	N/A	N/A	N/A
电导率	815 μs/cm	94 μs/cm	0.06	N/A	N/A
Ca ²⁺	107 mg/L	4.7 mg/L	0.02	0.28	97.8
Mg ²⁺	6 mg/L	0.31 mg/L	0.03	0.33	97.5
Na ⁺	49.3 mg/L	11.6 mg/L	0.12	1.49	88.4
总铁	2.6 mg/L	0.05 mg/L	0.01	0.12	99.1
SiO ₂	21.3 mg/L	2.9 mg/L	0.07	0.86	93.3
Cl ⁻	80 mg/L	12.6 mg/L	0.08	1.00	92.3
SO ₄ ²⁻	30 mg/L	0.8 mg/L	0.01	0.17	98.7
碱度	290 mg/L	25 mg/L	0.04	0.55	95.8
TDS	586.2 mg/L	58 mg/L	0.05	0.63	95.1

ESNA1 膜元件对三卤甲烷的脱除率也已从另一大系统的实测结果得到证实。该系统给水中三卤甲烷含量超过 750 μg/L，在系统回收率为 85 % 的情况下，其产水中三卤甲烷含量小于 25 μg/L。

美国海德能公司推出的 ESNA1-LF 和 ESNA1-LF2 抗污染纳滤膜除了分别具有 92% 和 90% 的公称脱盐率（500 mg/L CaCl₂）、可选择性的去除硬度，还可以稳定生产低 TDS 产品水，并因其同以往 ESNA1 膜元件相同的节能特点，可显著地降低设备及运行成本。同时，由于采用了抗污染技术，可以大大减少由频繁清洗带来的化学药剂消耗，从而降低运行成本。新型 ESNA1-LF 系列膜元件可广泛应用于软化、减低色度和消毒副产物（DBP）中，与标准的石灰软化工艺相比极具发展潜力。由于其抗污染技术，ESNA1-LF 可以独立的在水处理系统中应用，或用于膜集成（Integrated Membrane Solutions™）设计的一部分。

作为用于市政饮用水用途的苦咸水源的理想选择，美国海德能公司的 ESNA1-LF 系列膜元件为当今水处理市场提供了低压、高脱盐率和脱硬度各项性能完美结合的创新技术。图 2.54 所示为一个连续运行的 ESNA1-LF 系统与普通纳滤膜的对比数据。

¹ 纳滤膜可以有效去除铁胶体，但需要注意进水中不能含有任何氧化性物质，例如：余氯、臭氧和过氧化氢等，以防止铁加速氧化剂对膜的氧化。

² 产水量 1.0h 106GPD，回收率 85 %，给水不加酸。

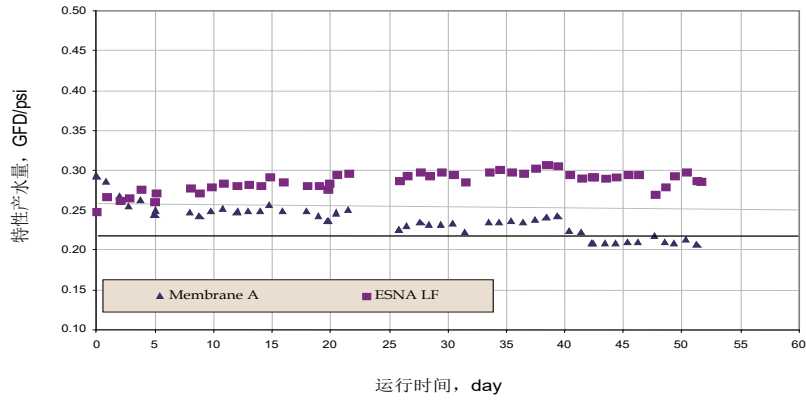


图 2.54 ESNA1-LF 和普通纳滤膜运行比较

2018 年美国海德能公司推出 ESNA4-LD 纳滤膜元件，该型号具有优异的离子分离效率，适用于高盐度高硬度高碱度的水源，有效去除水中超标的无机盐离子和污染物，实现对苦咸水的深度处理，可长期有效地提供安全的饮用水。

ESNA4-LD 可用于脱除市政供水中的特定污染物如硝酸盐、大分子有机物等，提供高品质产水；也可用于矿井水中去除硬度和硫酸盐。

2022 年美国海德能公司推出 ESNA5-LD 纳滤膜，该产品采用高通量新型聚酰胺复合膜片，具有更强的化学稳定性，透水特性较市场同类产品提高 15% 以上，在拥有高达 11500GPD 的产水量的同时，拥有 $\geq 99.0\%$ 的高脱盐率，见图 2.55；结合低压差给水隔网设计，运行时压差更加稳定，化学清洗恢复性能优异，能够保障在不同复杂水质条件下的长期稳定运行，相比常规纳滤膜元件更加高效、节能。

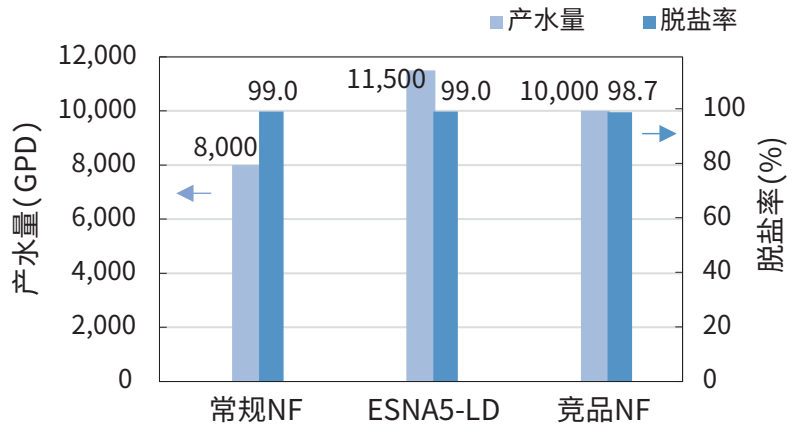
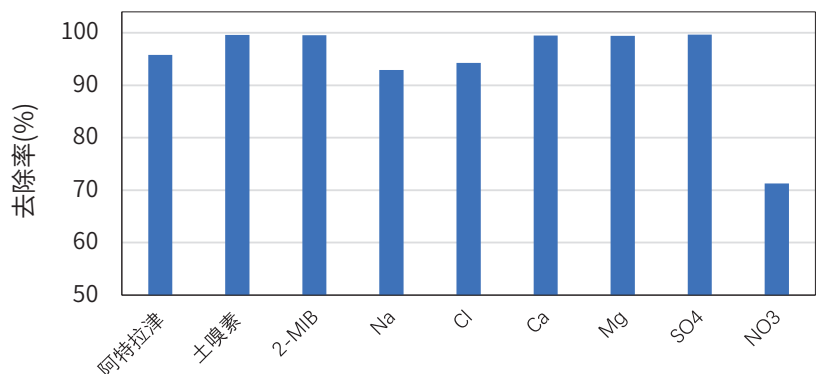


图 2.55 ESNA5-LD 和其他纳滤膜性能对比

ESNA5-LD 产品具有高去除率，可高效去除水中的硬度、硝酸根、碱度、有机物（除草剂等）；去除 NOM 消除消毒副产物（DBP）产生的风险；有效去除异味原因物质 2-MIB 和土霉素；高除草剂、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、氟、砷以及重金属去除率，请见图 2.56。

ESNA5-LD 产品采用高透水性膜和低压降给水隔网设计，可实现超低压运行，工作压力通常在 0.2-0.4MPa 范围内，降低系统运行能耗，同时具有抗污堵、易清洗、保证长期稳定运行。



有机物去除实验条件: 原水浓度 1ppm; 压力 0.48MPa; 温度 25°C;

离子去除实验条件: 原水 TDS 500ppm; 回收率 15%; 通量 12 gfd; 温度 25°C; pH 6.5-7.0。

图 2.56 ESNA5-LD 对不同物质 / 离子去除率参考

2.2.7 特种浓缩分离专用膜元件

2.2.7.1 HYDRACoRe™ 系列高耐氯脱色用纳滤膜

HYDRACoRe™ 脱色用纳滤膜的表面电荷为强负电性（图 2.58），分离皮层的材质是磺化聚醚砜（SPS）。可在相当大的 pH 值范围内（2 – 12）保持稳定的性能，可以应用于含高浓度余氯的溶液中，具有很高的水通量和较高的透盐率。HYDRACoRe™ 现有三种型号：HYDRACoRe-10-LD，HYDRACoRe-50-LD 和最新的 HYDRACoRe-70pHT，对 NaCl 的平均脱除率分别为 20 %、55 % 和 87 %。而 HYDRACoRe-70pHT 可以耐受 70 °C 的温度，可以在 pH 值 1.0 – 14 的范围内工作。

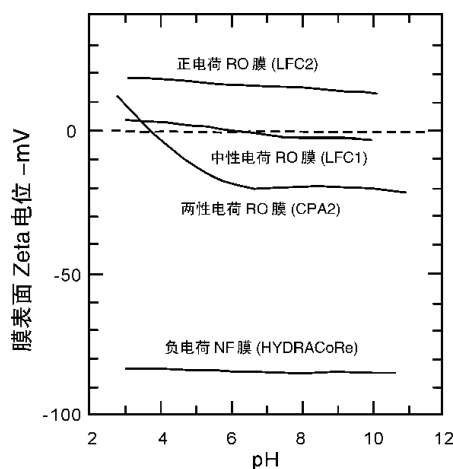


图 2.58 HYDRACoRe™ 膜表面 Zeta 电位与其它膜表面 Zeta 电位的比较

HYDRACoRe™ 对透过物的选择性相当特殊，二价离子的透过率要远高于—价离子的透过率，见表 2.22。膜对荷电粒子的截留率随溶液浓度的增加而减少，对中性粒子的截留率则与溶液浓度无关，两性电解质（如氨基酸）的截留率与 pH 密切相关，当 pH 在等电点以上时，其截留率大大上升，对负电荷溶质（如 ATP – 三磷酸腺苷）的截留率比较高。HYDRACoRe™ 系列的特点如下：

- 操作压力低、水通量高；
- 膜表面为强负电性；
- 耐余氯能力强，可长时期处理含余氯水质进水并可使用次氯酸钠等含氯化学药品清洗，能长期保持膜性能不变，见图 2.59 和表 2.23；
- 膜表面有聚合复合物表层，抗细菌侵蚀能力强；
- 可靠性高，适用范围广泛，如可用于活性染料的脱盐浓缩等。

表 2.22 HYDRACoRe™ 的分离性能——对无机化合物的截留率

HYDRACoRe10

阴离子 阳离子			A ⁻	A ²⁻
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
分子量			35	96
M ⁺	Na ⁺	23	10	15
M ²⁺	Mg ²⁺	24	2	4
	Ca ²⁺	40	1	N/A

HYDRACoRe50

阴离子 阳离子			A ⁻	A ²⁻
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
分子量			35	96
M ⁺	Na ⁺	23	50	90
M ²⁺	Mg ²⁺	24	20	35
	Ca ²⁺	40	12	N/A

HYDRACoRe 70-pHT

阴离子 阳离子			A	A2-
			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
分子量			35	96
M ⁺	Na ⁺	23	70	95
M ²⁺	Mg ²⁺	24	40	70
	Ca ²⁺	40	30	N/A

测试条件 ：
 样品 ：平板式膜片
 操作压力 ：1.0 MPa
 测试液浓度 ：0.2%NaCl
 测试液温度 ：25℃
 pH ：6.5

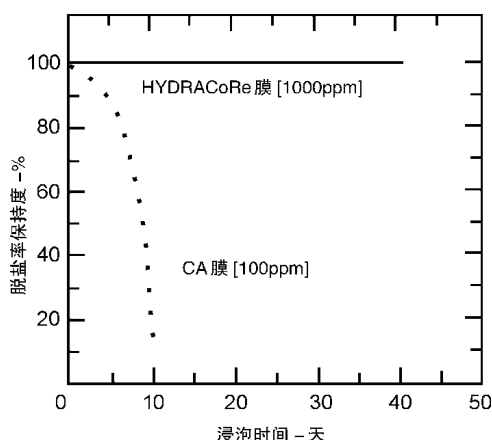


图 2.59 HYDRACoRe™ 与醋酸纤维素膜的比较——脱盐率与溶液自由氯浓度的关系

由于 HYDRACoRe™ 膜具有耐余氯浓度高的特点，所以 HYDRACoRe™ 膜最初主要是用在工业废水处理，如高色度的造纸废水处理，还有食品工业中糖的分离及酱油脱色。目前 HYDRACoRe™ 的应用已扩展到对低含盐量、高色度的地表水处理。美国加利福尼亚州 Irvine Ranch 于 2002 年初投运了一个 27 800 m³/d 的自来水厂。该厂水源为地表水，含盐量低（250 mg/L），但有机物含量高（TOC=10 mg/L）、色度高（200 CU）。该项目要求必须去除水中的色度和有机物而保留自来水中的离子成分。通过对不同厂家的八种类型的膜元件进行筛选试验，美国海德能公司的 HYDRACoRe50 作为最适合的膜元件被正式选用。该项目采用了 1 300 支 8 英寸的 HYDRACoRe50 膜元件。

表 2.23 HYDRACoRe™ 对各种化学溶液的耐受性

化学溶液	浓度	长期稳定性 ¹
硫酸	pH2	稳定
盐酸	pH2	稳定
硝酸	pH2	稳定
醋酸	1%	稳定
草酸	2%	稳定
柠檬酸	2%	稳定
乙二胺四乙酸二钠盐 (EDTA-Na)	2%	稳定
硫酸氢钠	2%	稳定
氢氧化钠	pH13	稳定
次氯酸钠	100 mg/L	稳定
过氧化氢	1%	不稳定
福尔马林	0.5%	稳定

¹ 在室温下浸泡一个月后的结果。

2.2.7.2 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件及应用

早期的卷式反渗透膜元件的应用还局限于水的净化。直到 19 世纪七十年代后期，才开始生产能够满足更高要求和多种用途的反渗透膜产品。例如：用于食品工艺和废水处理时要接触高温环境，乳品工业需要无滞留区的卫生级结构，海水淡化需要耐高压膜，还有耐酸碱和有机溶剂等化学浸蚀的特种膜等。随着膜工业的不断进步和成长，膜产品使用了新的结构、更多的特种聚合物材料和工程塑料，粘结剂和粘合技术也在不断进步。

卫生级反渗透膜元件是为了满足医药和食品工艺对于细菌和热原等卫生指标的严格要求而专门设计的一类产品，与普通反渗透膜元件的主要区别在于采用了无滞留区的完全填充设计（Full-Fit）。卫生级热消毒型可以使用热水进行淋洗和消毒处理，主要用于药用纯水的生产以及食品工业应用。

普通卷式反渗透膜元件的外部是一层缠绕玻璃钢材料（FRP），在膜元件的一端有一个浓水密封圈，这种结构会在膜元件和压力容器之间形成死水区（或称滞留区）。死水区的存在会为微生物的滋生繁殖提供理想的环境，此外膜元件保护液和清洗剂等化学品也可能残留在其中。无死水区是食品、饮料和医药工业等使用的卫生级产品的基本要求。为了完全消除死水区，卫生级膜元件采用了 Full-Fit 结构，去掉了 FRP 缠绕层和浓水密封圈，在膜元件的外部缠绕了类似于给水隔网的通透性材料。在液体处理的过程中，膜组件中所有间隙里的液体都处于流动状态。这种完全畅通的 Full-Fit 结构对于高生物量的易污染场合也非常有益，比如生物技术相关应用及废水处理等。

在热消毒过程中，普通的反渗透膜会发生退火现象，复合膜的基膜和复合膜都会发生一定范围的分子链排列构型的变化（结晶度的提高）。变化的结果导致产水量下降和脱盐率升高，类似于早期醋酸纤维素膜的热处理。因此，热消毒膜元件及复合膜需要特殊的技术来消除聚合物材料退火现象的影响。从图 2.60 和 2.61 中可以看出，经过多次反复消毒处理的热消毒型 SanRO-HS™ 膜元件的性能基本稳定，产水通量和脱盐率的变化不大。

热消毒膜元件在粘结剂的选择及粘结工艺方面也作了特殊处理，以保证温度变化时膜元件各部分的膨胀或收缩性一致，使膜元件不会发生开裂和变形。

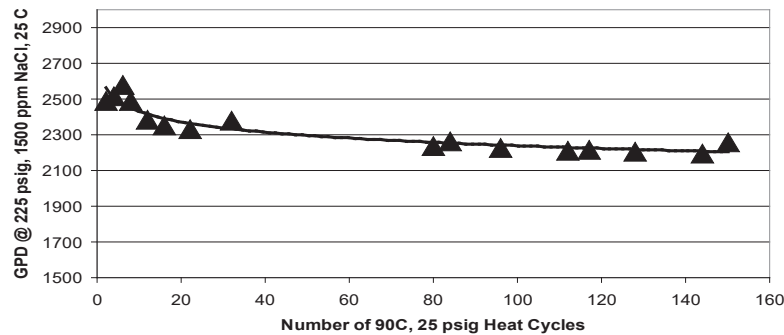


图 2.60 热消毒对 SanRO™-HS 元件产水通量的影响

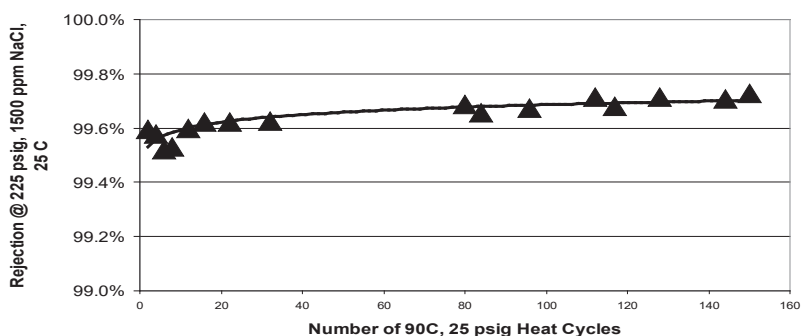


图 2.61 多次热消毒对 SanRO™-HS 型膜元件脱盐率的影响

美国海德能公司在出厂前对每一支膜元件都进行检验。热消毒型的 HS & HS2 膜元件在出厂前已经进行过以下处理：最终性能测试和检验（热消毒）纯水漂洗，预先去除 TOC。

● 膜元件的消毒步骤为：

- ① 排放冲洗：排出系统中的工作溶液，用不含余氯的反渗透产水对系统进行低压冲洗；
- ② 低压循环：保持系统操作压力小于 25 psi (0.17 MPa)，用约 45 °C 的反渗透产水循环；
- ③ 升温：在必要时将系统温度升高到 85 °C，升温速度不要超过每分钟 4 °C；
- ④ 保温：保温 60 分钟便可达到系统彻底消毒；
- ⑤ 冷却：降温速度不要超过每分钟 7 °C，冷却至 ≤ 45°C；
- ⑥ 系统冲洗：用反渗透产水冲洗系统；
- ⑦ 调试好新膜系统前，不要将产水循环；
- ⑧ 在第一级系统调试好之前，不要启动第二级系统。

● 膜元件的消毒步骤为：

- ① 清洗液：< 0.1% 过氧化氢溶液；
- ② 清洗温度：< 25°C；
- ③ 循环：0.2 – 0.4 MPa 压力下循环 1 小时；
- ④ 冲洗：在重新启动系统之前用反渗透产水冲洗系统。

SanRO™-HS 系列产品已通过了美国食品与药品管理局（Food and Drug Administration）的认证，在医药纯水及其它高纯水系统中得到了广泛应用。采用卫生级反渗透膜元件生产的纯水能够达到美国药典规定的药用纯水指标。药用纯水是指制剂、制药、工艺、容器冲洗及化妆品配制用水。美国药典第 24 版对药用纯水的规定是：细菌，100 cfu/ml；内毒素，无；TOC，500 µg/L；电导率，0.6 – 4.7 µs/cm。卫生级膜元件主要在第二级使用，用来保证纯水装置最终产品水达到药典的要求。

卫生级反渗透膜元件还被广泛用于乳制品加工过程的分离和浓缩，典型的应用有牛奶或乳清的初级浓缩、乳清浓缩液的浓缩处理，可以减少工厂设备投资、降低操作成本，还可以压缩排污量、节约排污费用。处理牛奶和乳清所得到的透过液可以循环使用，节约水源、降低成本。

2.2.7.3 DairyRO™ 系列乳制品浓缩膜元件

DairyRO™ 系列乳制品专用浓缩反渗透、纳滤膜元件是在美国海德能公司长达 30 年的卷式膜元件研发制

造基础上开发的。DairyRO™ 同样采用了 Full-Fit 技术，在处理乳制品时可以减少蛋白等物质在系统死角中的沉积。DairyRO™ 可以尽量的截留水中的固形物和生化耗氧量（BOD），不但浓缩了乳制品中的有用成分，而且产出的透过液还可以作为冲洗水、景观水等。利用这些产品水可以帮助工厂减少市政自来水的用量，从而降低生产成本。

美国海德能公司制造的 DairyRO™ 系列膜元件达到了美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration）的卫生要求。可以为您提供安全、卫生和节能的乳制品浓缩方法。

目前，美国海德能公司的 DairyRO™ 有 3.8 英寸（3838 和 3840）和 8 英寸（8038 和 8040）两种规格供您选择。

2.2.8 海德能™ PRO 系列零排放和工艺应用膜元件

水安全已成为 21 世纪的重要挑战，工业领域不仅面临新鲜水用量的严格控制，还需应对日益严苛的排水法规。高效处理高污染废水、减少排放、降低环境污染，实现可持续发展，已成为行业发展的核心目标。

美国海德能公司专注于废水处理与管理，针对复杂废水处理需求，特别开发了海德能™ PRO 系列高性能膜元件。

海德能™ PRO 系列为 ZLD（零排放）/MLD（近零排放）系统提供创新、可持续、高性价比的解决方案。PRO 系列 经过针对性研发，技术性能明显提高。包括提高膜片表面的亲水性有效地减少有机污染物对膜表面的吸附性、提高化学品耐受性、离子选择性、增强机械强度等。目前 PRO 系列产品已广泛应用于煤化工、化工、钢铁、电力等大型行业的水处理系统中，并凭借卓越性赢得了用户的高度认可与信赖。

2.2.8.1 PRO-XR1 / PRO-LF1 膜元件的特点

PRO-XR1 / PRO-LF1 是美国海德能公司根据高盐、高 COD 的废水污染情况，有针对性地开发出的产品，兼具高脱盐率和低能耗，对 TOC、硼、硅、硝酸盐具有高脱除率。其膜表面呈电中性（见图 2.62）、亲水性，耐化学性好，使用寿命长。采用海德能专利隔网技术，降低清洗频率和成本。

高脱盐率抗污染反渗透膜 PRO-XR1（XR 代表 Extreme Rejection）兼具高脱盐率和高产水量，广泛适用于高污染浓盐水的初级浓缩以及工业污水、市政污水的回用处理等多种场景。

PRO-XR1 性能优势如下：

- 增强的膜化学技术，运行压力更低、产水量更大；
- 增强的化学耐药性，延长膜的使用寿命；
- 改良进水隔网设计，减少清洗频率和成本；
- 端板快速排气专利技术，缓解系统启动时对膜元件的冲击；
- 改性膜表面，有机物污染低。

高压抗污染反渗透膜 PRO-LF1（LF 代表 Low Fouling）具备高脱盐率和耐高压（最高运行压力达 8.27MPa）特点和海水淡化 RO 膜接近，多项改良特性使 PRO-LF1 成为处理 ZLD/MLD 高污染浓盐水的中高压浓缩的理想选择。

相比传统 SWRO 膜，PRO-LF1 性能优势包括：

- 在阳离子、非离子、两性表面活性剂情况下，抗污染性能优越；

- 减少清洗频率，降低化学药剂的消耗，延长清洗周期，系统停机时间短、开工率高。

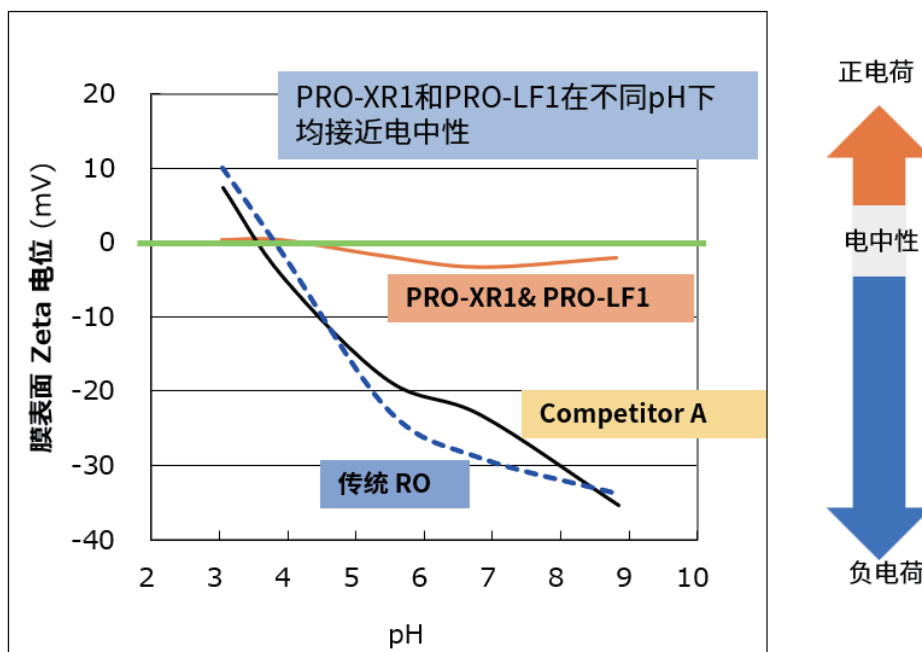


图 2.62 PRO-XR1&PRO-LF1 膜表面电性改进

大多数废水的 pH 值在 4-9 范围内，pH 由 3 增长到 9 的过程中，传统膜元件膜的 zeta 电位由正变为负，海德能™ 通过改变膜表面的电荷性质，PRO-XR1/PRO-LF1 在整个 pH 范围内显示出接近零的 zeta 电位。

膜表面零电位的特性可以带来如下两项优势：

- ① 不同电性表面活性剂下 RO 膜的产水量保持度更稳定，见图 2.63。

传统 RO 膜由于表面呈现负电性，更容易吸附带正电荷的表面活性剂，在正电及两性条件下产水量衰减了 50-60%。PRO-XR1 和 PRO-LF1 由于进行了表面改性，水通量更加稳定。针对进水复杂的高浓度工业废水，这一特性能够显著提升运行的稳定性。

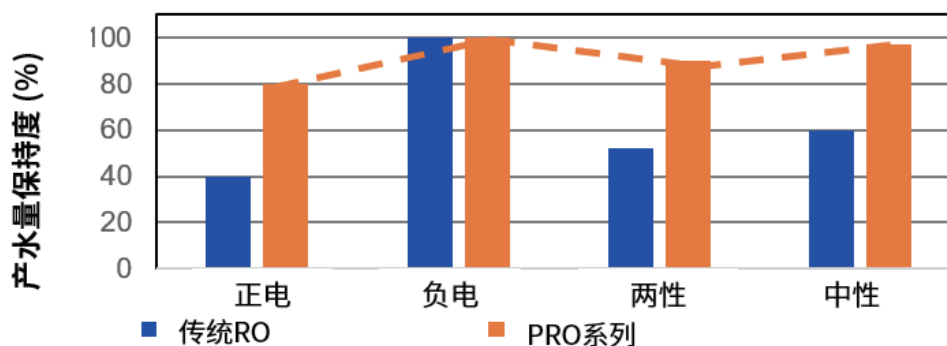


图 2.63 PRO-XR1&PRO-LF1 在不同表面活性剂下的表现

② COD 耐受度高，有机物和微生物污染低。

蛋白质吸附试验（见图 2.64），以蛋白质代表有机物和微生物，采用 AFM（原子力显微镜）观察不同膜表面对蛋白质的吸附情况，试验表明 PRO-XR1 和 PRO-LF1 对蛋白质吸附力更低，膜表面更不易受到有机物或微生物的污染。

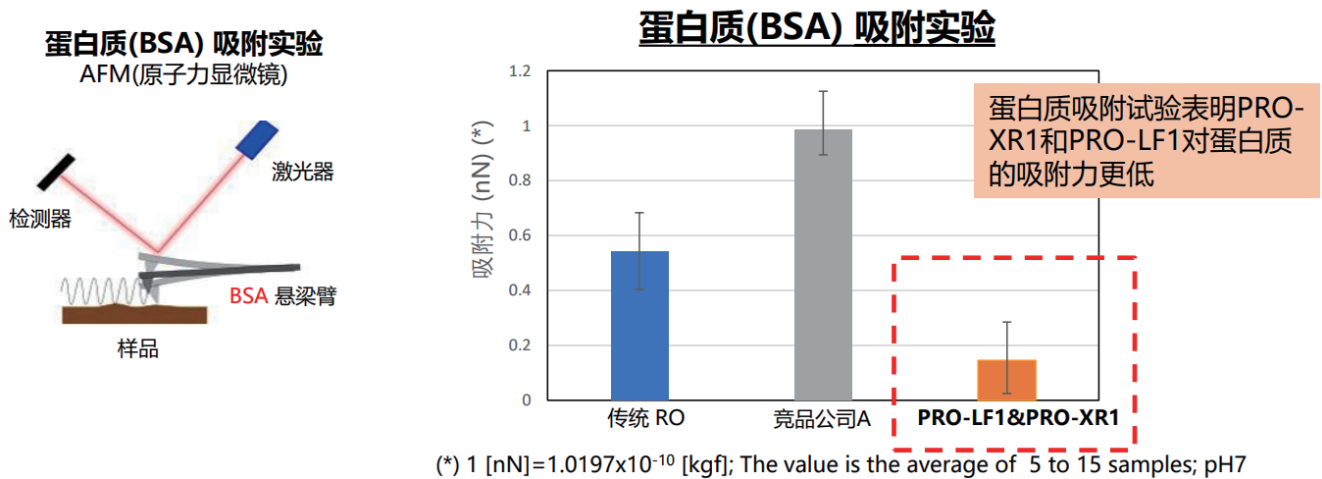


图 2.64 PRO-XR1&PRO-LF1 性能改进 -COD 耐受度

2.2.8.2 PRO-XP1 膜元件的特点

PRO-XP 为超高压抗污染反渗透膜（XP 代表 Extra Pressure），采用坚固的材料结构，最高运行压力可达 12.4MPa（1800psi），远超传统 RO 膜的极限值 8.27MPa（1200psi）。

超高压膜是为有挑战性的工业应用而特别开发的，由于其压力等级比原有高压膜提高近 50%，可进一步用膜法缩减浓水排放量约 50%，减少下游蒸发器的规模，降低投资和运行成本。该产品适用于浓盐水的极限浓缩、高价值物质的浓缩回收、热法浓缩的部分替代。

PRO-XP1 性能优势如下：

- 超出 SWRO 浓缩浓度约 50%，提高了溶液浓缩浓度，达到膜法浓缩极限；
- 减少下游工艺的设备规模，减少投资和运行成本；
- 最高耐压 12.4MPa（最高压力与温度相关，请见图 2.65、表 2.24）；
- 化学清洗耐受性好。

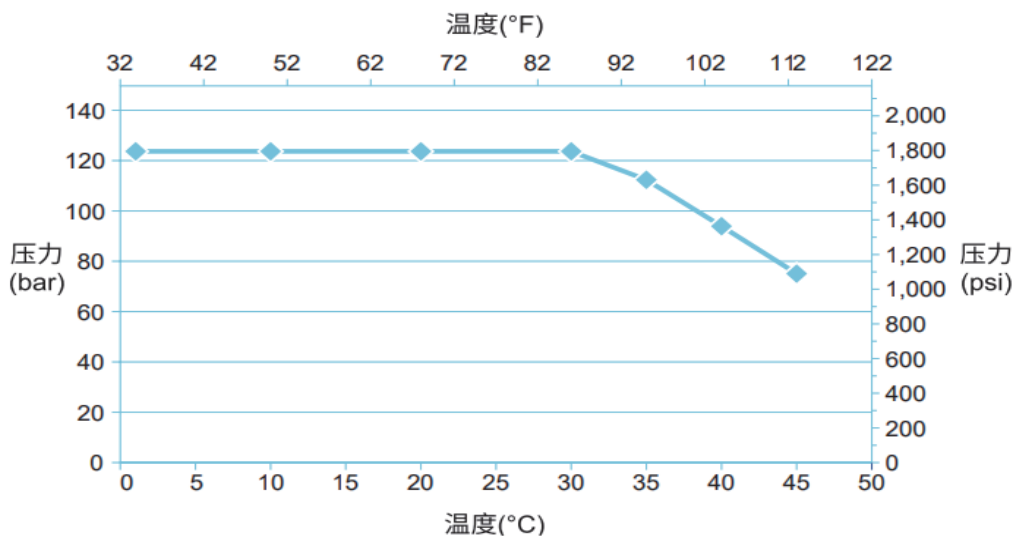


图 2.65 最高压力与温度曲线关系图

表 2.24 最大工作压力 Vs. 温度

PRO-XP 膜元件的最大工作压力和温度值		
°C	psi	bar
1	1800	124.1
10	1800	124.1
20	1800	124.1
30	1800	124.1
35	1635	112.7
40	1465	101.0
45	1300	89.6

2.2.8.3 PRO-XS 系列纳滤膜元件的特点

为了实现有价值盐或离子的分离，美国海德能公司开发了离子选择性抗污染分盐纳滤膜 PRO-XS 系列。PRO-XS 中的 XS 代表 Extra Selectivity——优异离子选择性。

PRO-XS 是离子选择性 NF 系列，用于盐分离、提纯和回收利用。PRO-XS 对二价盐脱除率高，一价盐脱盐率低，实现不同价盐的有效分离。用户可根据分盐浓度不同选择 PRO-XS 系列中相应的型号。

PRO-XS2 和 PRO-XS5 具有良好离子选择性， SO_4^{2-} 和 Cl^- 分离效果显著，分别按低压（耐压 4.14MPa）和高压膜（耐压 8.27MPa）方式进行卷制。

PRO-XS 系列纳滤膜元件应用广泛，ZLD/MLD 分盐、氯碱化工脱硝、脱硫废水、垃圾渗透液、印染废水中的硫酸钠回收利用，以及其他常规盐纯化和浓缩。见表 2.25。

表 2.25 PRO-XS 系列纳滤膜元件特点及优势

产品特点	优势
优异离子选择性	● 专门针对 SO_4^{2-} 脱除，可实现高浓度 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}$ 分离 ● 硬度和有机物脱除率好
抗污染性，采用宽进水隔网（34mil）	● 可以降低系统压差 ● 减少颗粒物污堵 ● 提高清洗效率
专利排气端板技术	● 快速排气降低膜元件破裂风险
PRO-XS5 清洗 pH 1-12 PRO-XS2 清洗 pH 1-11.5	● 提高膜性能保持度，延长使用寿命 ● 耐碱洗，系统恢复性好（见图 2.66）

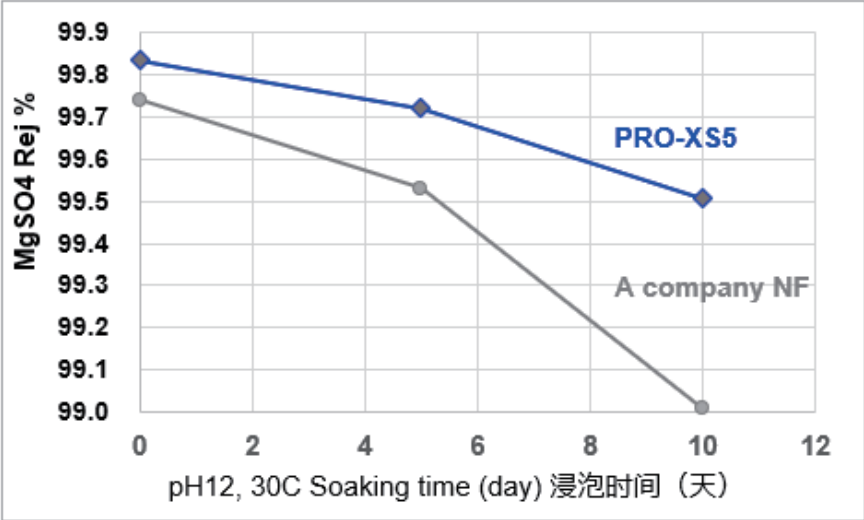


图 2.66 PRO-XS5 耐碱性能测试

第二部分

反渗透和纳滤系统的设计



第三章 反渗透和纳滤设计

3.1 反渗透和纳滤基础

3.1.1 膜与膜分离

膜在自然界中是广泛存在的，尤其是在生物体内。然而，人类首次关注由生物膜引起的渗透现象是在 1748 年。当时，法国学者 Abbe Nollet 很偶然的发现包裹在猪膀胱里的水可以自己扩散到膀胱外侧的酒精溶液中。法国植物学家 Henri Dutrochet 在 1827 年提出了 Osmosis（渗透）一词来定义 Abbe Nollet 发现的现象。但这一现象并未受到足够重视，直到 1854 年英国科学家 Thomas Graham 在实验中发现，放置在半透膜一侧的晶体会比胶体更快的扩散到另一侧，并提出了 Dialysis（透析）的概念。此后，人们才对半透膜产生了兴趣，并由德国生物化学家 Moritz Traube 在 1864 年制造出了人类历史上第一张人造膜——亚铁氰化铜膜。完整的渗透压理论直到 20 世纪才由荷兰物理化学家 Van't Hoff 提出。后来，随着各学科不断发展，膜分离现象也不断为人们发现并研究。1960 年，人类终于实现了从苦咸水中制取淡水的梦想。美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）的科学家 Sidney Loeb 和 Srinivasa Sourirajan 共同研制出世界第一张非对称醋酸纤维素反渗透膜。从那时起的近半个世纪以来，膜分离技术（包括反渗透和纳滤）在全球范围内得到了广泛的发展和应用。表 3.1 列出了膜分离技术发展简史。

表 3.1 膜分离技术发展史

年代	科学家	成就
1748	Abbe Nollet	发现渗透现象
1827	Henri Dutrochet	引入名词 Osmosis
1855	Fick	扩散定律
1864	Moritz Traube	第一张人造膜——亚铁氰化铜膜
1886	Preffer, Van't Hoff	渗透压力定律
1917	Kober	引入名词 Pervaporation（渗透汽化）
1920	Mangold, Michaels, Mobain	用赛璐珞和硝化纤维素膜观察到反渗透现象
1930	Teorell, Meyer, Sievers	膜电势——电渗析和膜电极的基础
1950	Juda, Mcrae	发明了电渗析
1960	Loeb, Sourirajan	相转化法制出反渗透非对称膜
1968	N.N.Li	发明液膜

随着膜材料、制膜工艺以及膜应用的不断发展，膜分离技术已逐渐成为分离技术领域中的重要成员。与传统的分离技术（例如：过滤、蒸馏、萃取、电泳和层析等）相比，膜分离技术的分离精度高、易于操作和管理、在应用中对环境造成的二次污染小等优点。正因如此，膜分离技术在短短的半个世纪中就发展成为一种重要的单元分离工艺，并且发展出若干具有不同特点和应用领域的膜分离过程。主要的膜分离过程包括：微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）、反渗透（RO）、透析（DA）、电渗析（ED）、电脱盐（EDI）、渗透汽化（PV）、膜萃取（ME）、膜蒸馏（MD）、液膜技术（LM）和气体分离（GS）等。表 3.2 将主要的膜分离过程做了分类和介绍。按照这些膜分离过程所能分离物质的不同物理尺寸，我们可以画出分离谱图，如图 3.1。

表 3.2 主要的膜分离过程

膜过程	驱动力	用途
微滤	压力差	分离液体中的大颗粒物质
超滤	压力差	分离液体中的颗粒和溶解的大分子物质
纳滤	压力差	脱除水中的硬度和小分子有机物
反渗透	压力差	脱除水中的盐分
透析	浓度差	脱除溶液中的盐分及小分子物质
电渗析	电位差	脱除水中的盐分
渗透汽化	分压差、浓度差	脱除液体中的有机物
气体分离	分压差	分离、制备高纯度气体

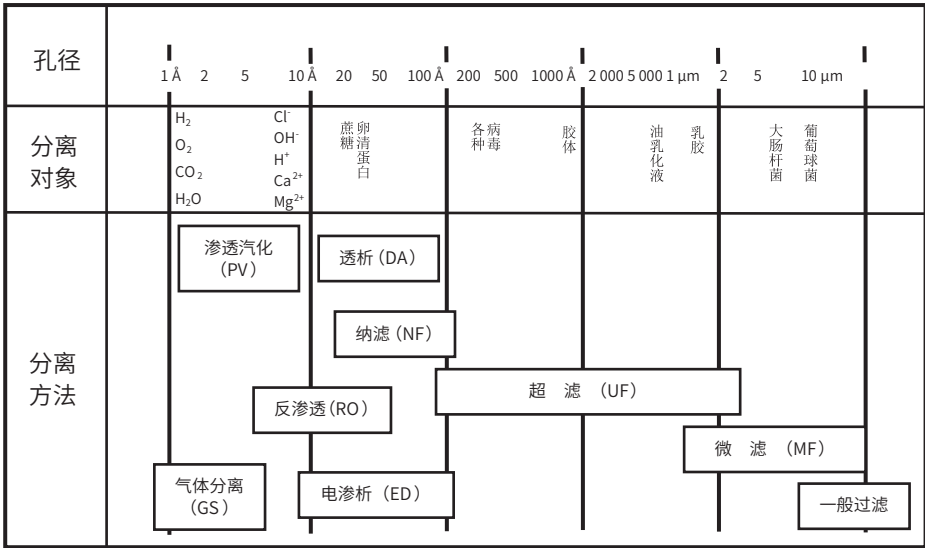


图 3.1 分离谱图

3.1.2 反渗透和纳滤基本原理

当一张半透膜隔开溶液与纯溶剂时，施加在溶液上的，并恰好能阻止纯溶剂进入溶液的额外压力称之为渗透压，通常，溶液中溶质的浓度越高，渗透压就越大。当溶液一侧没有加压时，纯溶剂会通过半透膜向溶液一侧扩散，这种现象称为渗透（Osmosis）。相反，如果溶液侧施加的压力超过渗透压，则溶液中的溶剂向纯溶

剂一侧流动，这一过程称为反渗透（Reverse Osmosis），如图 3.2 所示。反渗透膜分离技术就是利用这一原理来分离溶质和溶剂的方法。反渗透膜分离技术具有以下特点：

- 在常温且无相变化的条件下，可以对溶质和水进行分离，适用于对热敏感物质的分离、浓缩，并且与有相变化的分离方法相比，能耗较低；
- 杂质去除范围广，不仅可以去除溶解的无机盐类，而且还可以去除各类有机物杂质；
- 脱盐率高；
- 仅依靠压力作为膜分离的推动力，分离装置简单，操作、控制和维护方便；
- 反渗透膜对进水水质有一定的要求，如：浊度、污染密度指数（SDI₁₅，相关论述请参见第二部分第三章 3.2.2）和余氯等。

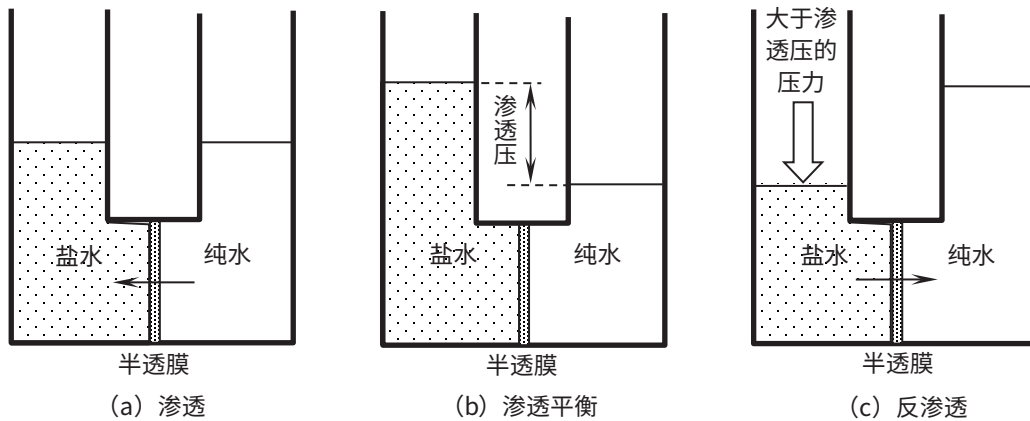


图 3.2 反渗透的原理

纳滤膜最早被称为“疏松反渗透”，其截留特性介于超滤与反渗透之间，截留分子量大约为 100 – 1 000 道尔顿（Daltons）。因此，纳滤膜对水中溶解的小分子有机物，例如：三卤甲烷（THM）有很高的脱除率；同时纳滤膜对水溶液中的离子也有一定的脱除率（一般在 10 – 90 % 之间）。

反渗透膜的发展经历了非对称膜和复合膜两个阶段。早期反渗透主要的膜材料为三醋酸纤维素（CA）。这种膜材料对进水 pH 值的要求比较严格（一般在 4 – 6 之间），工作压力相对较高且脱盐率相对较低，但是其具有耐生物污染和抗氧化性杀菌剂的优点。随着高分子材料科学的不断发展，脱盐率更高、水通量更大、工作压力更低的芳香族聚酰胺（结构见图 3.3）被用来制备反渗透膜。与 CA 非对称膜不同的是，芳香族聚酰胺反渗透膜是复合膜，即分离层与支撑层不是同一种材料，并且是通过界面聚合交联在一起的。图 3.4 显示了非对称膜和复合膜的区别。

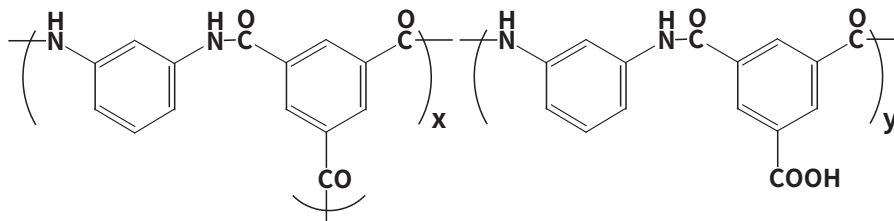


图 3.3 交链全芳香族聚酰胺结构

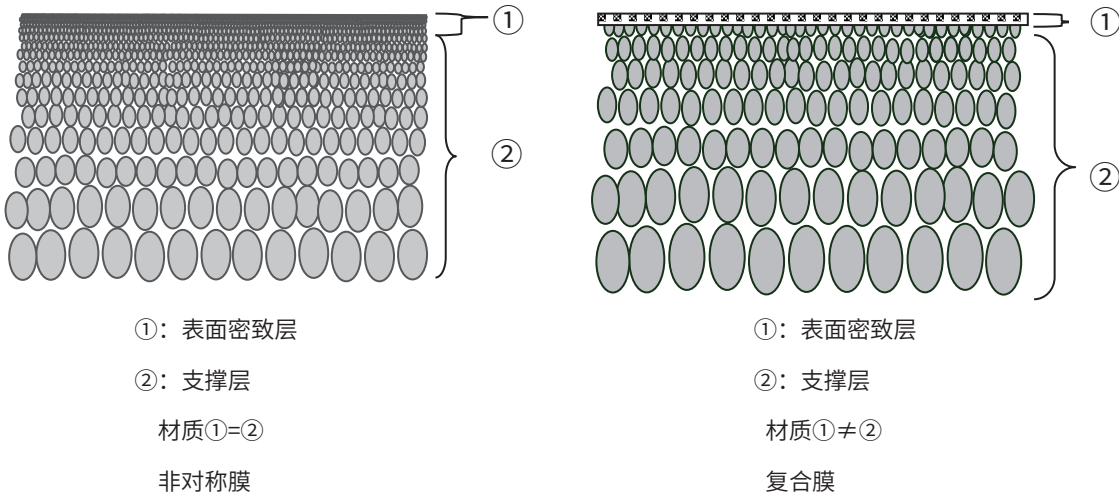


图 3.4 非对称膜与复合膜结构比较

芳香聚酰胺复合反渗透膜不仅具有高脱盐率、大水通量以及低运行压力等优点，由于其分离皮层是经过聚合而成，可以人为控制分离皮层的特征，从而达到制备不同用途反渗透膜的要求。实际上，纳滤膜也是在这种技术基础上发展出来的。

海德能公司制造的反渗透和纳滤膜（PRO，CPA，PROC™，ESPA™，SWC™ 和 ESNA™）均是复合膜。由于膜的制备工艺不同，从而制造出了不同分离特性的反渗透和纳滤膜元件。

那么，反渗透膜的工作原理到底是什么？如图 3.2 所示，克服渗透压是反渗透和纳滤膜元件工作的关键因素之一。渗透压的计算如公式（3.1）所示。一些典型物质的渗透压列于表 3.3。

$$\pi = cRT \tag{3.1}$$

- 式中：π —— 渗透压，KPa；
c —— 离子浓度，mol/L；
R —— 气体常数，8.314（L KPa） / （mol K） ；
T —— 热力学温度，K。

表 3.3 25 °C 下典型物质的渗透压数据

组分	浓度，mg/L	渗透压，MPa
NaCl	35 000	2.8
海水	32 000	2.4
苦咸水	5 000	0.28
Na ₂ SO ₄	1 000	0.042
MgSO ₄	1 000	0.025
MgCl ₂	1 000	0.068
CaCl ₂	1 000	0.009
蔗糖	1 000	0.00292
葡萄糖	1 000	0.0055

反渗透脱盐的机理到目前还没有一个公认的统一解释。目前存在两种主要理论：毛细孔流模型和溶解扩散模型。毛细孔流理论认为，水分子在膜表面形成纯水层，而膜上存在非常细小的孔，纯水可以通过这些孔透过膜；而溶解扩散理论认为，水分子可以通过膜中的分子节点扩散到另一侧。这两个理论都认为水分子在固液界面上被优先吸附并通过，而盐类和其他的物质被截留。水与膜表面之间有弱的化学结合力，使得水能够在膜的结构中扩散。膜的物理和化学性质决定了在传递过程中水比盐具有更快的扩散速率。水在膜中的透过量（即产水量）可以由式（3.2）确定。

$$Q_w = (\Delta P - \Delta \pi) \times K_w \times \frac{S}{d} \quad (3.2)$$

式中： Q_w —— 水的透过量；
 ΔP —— 膜两侧压力差；
 $\Delta \pi$ —— 膜两侧的渗透压差；
 K_w —— 膜的纯水渗透系数；
 S —— 膜面积；
 d —— 膜分离层的厚度。

式（3.2）通常可以被简化为：

$$Q_w = A \times (NDP) \quad (3.3)$$

式中：A —— 膜的水透过常数；
 NDP —— 净驱动力（Net Drive Pressure，缩写：NDP）。

式（3.2）和（3.3）中的 K_w 和 A 两个常数是与膜和温度相关的常数。同样，盐在反渗透和纳滤膜中也会有一部分透过膜，而盐在膜中的透过量可以使用式（3.4）来描述：

$$Q_s = \Delta C \times K_s \times \frac{S}{d} \quad (3.4)$$

式中： Q_s —— 膜的透盐量；
 K_s —— 膜的盐渗透系数；
 ΔC —— 膜两侧盐浓度差；
 S —— 为膜面积；
 d —— 为膜厚度。

该方程可简化为：

$$Q_s = B \times (\Delta C) \quad (3.5)$$

式中：B —— 膜的盐透过常数；
 ΔC —— 盐浓度差（盐的扩散驱动力）。

从式（3.4）和（3.5）可以看出，对于一个已知的平膜来说：

1. 膜的水通量与总驱动压力差成正比；
2. 膜的透盐量与膜两侧的浓度差成正比，与操作压力无关。

透过液的盐浓度， C_p ，取决于透过反渗透膜的盐量和水量的比，见公式（3.6）。

$$C_p = \frac{Q_s}{Q_w} \quad (3.6)$$

由于水分子和盐类物质在膜中的传质系数不同，从而达到了水与盐分离的目的。没有什么理想的膜具有对盐完全的脱除性能，实际上是传质速率的差别造就了脱盐率。公式（3.2）、（3.4）和（3.5）给出了设计反渗透系统必须考虑的一些主要因素。

通常反渗透膜不会百分之百的截留水中的溶解性物质，因此各种盐分均具有一定的透过率。原水中溶解性杂质透过膜的百分率可以采用下式计算：

$$SP = \frac{C_p}{C_{fm}} \times 100\% \quad (3.7)$$

式中：SP —— 透盐率（Salt Passage），%；

C_p —— 透过液盐浓度；

C_{fm} —— 料液的平均盐浓度。

将式（3.6）代入式（3.7），可得：

$$SP = \frac{Q_s}{Q_w C_{fm}} \times 100\% \quad (3.8)$$

进一步将式（3.2）和式（3.5）代入式（3.8），可以得到式（3.9）。

$$SP = \frac{B \Delta C}{A (NDP) C_{fm}} \times 100\% \quad (3.9)$$

由式（3.9）可以看出，净驱动力 NDP 的增加可以降低透盐率，这也就是为什么随着压力的升高，系统的脱盐率也升高的原因。

脱盐率（Rej.）是由式（3.10）计算得出的：

$$Rej. = 100\% - SP \quad (3.10)$$

式中：Rej. —— 脱盐率（Rejection），%。

除了上述几个对反渗透具有影响的参数以及公式外，还有一些必须了解的概念。比如：产水（透过液）、浓水（浓缩液）、回收率和浓差极化。下面就简单对回收率和浓差极化做一个说明。

通常，将回收率定义为：进水转化为产水的百分率。回收率是反渗透系统设计和运行的重要参数，其计算公式为：

$$Rec. = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100\% \quad (3.11)$$

其中：Rec. —— 回收率（Recovery），%；

Q_p —— 产水流量；

Q_f —— 进水流量。

回收率的高低直接影响透盐率和产水量。当回收率增加时，浓水侧的盐浓度上升更快，导致透盐率增加、渗透压上升，净驱动压力（NDP）降低、产水量减少。

浓差极化是指，当水透过膜并截留盐分时，在膜表面会形成一个流速非常低的边界层，该层中的盐浓度比进水本体溶液盐浓度高，这种膜面盐浓度升高的现象称为浓差极化。浓差极化会导致实际的产水通量和脱盐率低于理论计算值。浓差极化效应如下：

- 膜表面上的渗透压高于本体溶液，从而降低净驱动力 NDP；
降低水通量（ Q_w ）；
增加透盐量（ Q_s ）；
- 增加难溶盐的浓度，超过其溶度积并结垢。

浓差极化因子（ β ）被定义为膜表面盐浓度（ C_s ）与本体溶液盐浓度（ C_b ）的比值：

$$\beta = \frac{C_s}{C_b} \quad (3.12)$$

那么哪些参数会影响浓差极化因子（ β ）呢？通常产水通量的增加会增加边界层的盐浓度，从而增加 C_s ；而给水流量的增加会增大膜表面流速，削减边界层的厚度。因此 β 值与产水流量（ Q_p ）成正比，与平均进水流速（ Q_{fav} ）成反比：

$$\beta = K_p e^{\frac{Q_p}{Q_{fav}}} \quad (3.13)$$

式中： K_p —— 比例常数，其值取决于反渗透系统的构成方式。平均进水流速采用进水量和浓缩液流量的算术平均值， β 值可以进一步表达为膜元件透过液回收率的函数：

$$\beta = K_p e^{\frac{2Rec.}{2-Rec.}} \quad (3.14)$$

海德能公司推荐的一级反渗透系统浓差极化因子极限值为 1.20，对于一支 40 英寸长的膜元件来说，大约相当于 18 % 的回收率。对于双级反渗透系统的第二级，由于其进水含盐量已经显著降低，因此其 β 值可以适当放宽到 1.40，在某些情况下可以容忍到 1.70。

3.1.3 影响膜性能的主要因素

纳滤和反渗透膜的性能主要由水通量（透过速度）和脱盐率（分离效果）来决定。水通量和脱盐率受操作压力、浓度、温度、流量、pH 值以及回收率等因素的影响。在本小节就对这些影响因素进行简要说明。

3.1.3.1 操作压力的影响

水通量的增加与压力成正比。理论上，如果想在增加膜面积的情况下获得足够的产水量，只需提高进水压力即可。但在实际的运行中，这必然带来能源的大量消耗。因此，选择适当的膜元件数量（膜面积）才是经济的做法。

脱盐率同样与压力成正比，但不同用途的膜元件的脱盐率随压力的变化趋势是不同的。原则上说，膜元件的分离层越致密，脱盐率随操作压力的正比变化越不显著，这时脱盐率基本保持一个定值（例如：海水淡化反渗透膜元件 SWC™ 系列），当膜元件的分离层比较疏松时，操作压力对于脱盐率的影响较大（例如：节能型超低压反渗透膜元件 ESPA™ 系列）。从第 2 章中各膜元件相关测试参数图表中可以很容易的发现上述规律。

3.1.3.2 给水流量的影响

给水流量对产水量和脱盐率同样存在影响，只是这种影响比较缓和，并不剧烈。第 2 章中各膜元件相关测试参数图表中有为不同反渗透膜元件的脱盐率和水通量随给水流量的变化。随着给水流量的增加，膜表面的流速也增大了，这使得压力随之上升，同时由于流速的升高减少了膜表面的浓差极化，从而提高了脱盐率。

3.1.3.3 给水含盐量的影响

在第 2 章中各膜元件相关测试参数图表中有关于给水含盐量对脱盐率影响的介绍。在一定的压力下，当给水含盐量增高时产水量就会减少，这是因为给水的渗透压变高，净驱动压力（NDP）随之降低的缘故。脱盐率受含盐量影响也非常大，对于除海水淡化膜以外的反渗透膜来说，通常当含盐量增高时脱盐率会下降。当进水含盐量在非常低的一个范围时，随着含盐量的增加，脱盐率会稍许增加。海水淡化反渗透膜元件不同，由于海水淡化反渗透膜更加致密，在给水含盐量高时，脱盐率会下降得非常缓慢。

3.1.3.4 温度的影响

温度对脱盐率和产水量的影响非常大。对全部类型的反渗透膜元件来说，当温度升高时，由于水的粘度降低，产水量也随之增加。通常在相同的压力下，温度每上升或下降 1 °C，产水量可增大或降低 3 – 4 %。另一方面温度对于脱盐率的影响根据膜材质的不同而表现的大相径庭。一般来讲温度增高脱盐率降低。这是由于当温度上升时，盐的扩散速度就会增大。表 3.4 以 ESPA1 超低压反渗透膜元件为例，列出了温度校正系数。

表 3.4 ESPA1 超低压反渗透膜元件的温度校正系数

温度, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
5	1.919	1.912	1.906	1.899	1.892	1.886	1.879	1.873	1.866	1.860
6	1.853	1.847	1.841	1.834	1.828	1.822	1.815	1.809	1.803	1.797
7	1.790	1.784	1.778	1.772	1.766	1.760	1.754	1.748	1.742	1.736
8	1.730	1.724	1.718	1.712	1.707	1.701	1.695	1.689	1.683	1.678
9	1.672	1.666	1.661	1.655	1.650	1.644	1.638	1.633	1.627	1.622
10	1.616	1.611	1.606	1.600	1.595	1.589	1.584	1.579	1.573	1.566
11	1.563	1.558	1.553	1.547	1.542	1.537	1.532	1.527	1.522	1.517
12	1.512	1.507	1.502	1.497	1.492	1.487	1.482	1.477	1.472	1.467
13	1.436	1.458	1.453	1.448	1.443	1.439	1.434	1.429	1.425	1.420
14	1.415	1.411	1.406	1.401	1.397	1.392	1.388	1.383	1.379	1.374
15	1.370	1.365	1.361	1.356	1.352	1.348	1.343	1.339	1.335	1.330
16	1.326	1.322	1.317	1.313	1.309	1.305	1.301	1.296	1.292	1.288
17	1.284	1.280	1.276	1.272	1.266	1.264	1.260	1.255	1.251	1.247
18	1.244	1.240	1.236	1.232	1.228	1.224	1.220	1.216	1.212	1.208
19	1.205	1.201	1.197	1.193	1.189	1.186	1.182	1.178	1.175	1.171
20	1.167	1.164	1.160	1.156	1.153	1.149	1.145	1.142	1.138	1.135

21	1.131	1.128	1.124	1.121	1.117	1.114	1.110	1.107	1.103	1.100
22	1.097	1.093	1.090	1.086	1.083	1.080	1.076	1.073	1.070	1.066
23	1.063	1.060	1.057	1.053	1.050	1.047	1.044	1.040	1.037	1.034
24	1.031	1.028	1.025	1.0222	1.018	1.015	1.012	1.009	1.006	1.003
25	1.000	0.997	0.994	0.991	0.988	0.985	0.982	0.979	0.976	0.973
26	0.970	0.967	0.964	0.961	0.959	0.956	0.953	0.950	0.947	0.944
27	0.941	0.939	0.936	0.933	0.930	0.927	0.925	0.922	0.919	0.916
28	0.914	0.911	0.908	0.906	0.903	0.900	0.897	0.895	0.892	0.890
29	0.887	0.884	0.882	0.879	0.876	0.874	0.871	0.869	0.866	0.864
30	0.861	0.857	0.856	0.854	0.851	0.849	0.8486	0.844	0.841	0.839
31	0.836	0.834	0.831	0.829	0.827	0.824	0.822	0.819	0.817	0.815
32	0.812	0.810	0.808	0.805	0.803	0.801	0.798	0.796	0.794	0.791
33	0.789	0.787	0.785	0.782	0.780	0.778	0.776	0.773	0.771	0.769
34	0.767	0.765	0.762	0.760	0.758	0.756	0.754	0.752	0.749	0.747
35	0.745	0.743	0.741	0.739	0.737	0.735	0.733	0.730	0.728	0.726
36	0.724	0.722	0.720	0.718	0.716	0.714	0.712	0.710	0.708	0.706
37	0.704	0.702	0.700	0.698	0.696	0.694	0.692	0.690	0.689	0.687
38	0.685	0.683	0.681	0.679	0.677	0.675	0.673	0.672	0.670	0.668
39	0.666	0.664	0.662	0.660	0.659	0.659	0.655	0.653	0.651	0.650
40	0.648	0.646	0.644	0.642	0.641	0.639	0.637	0.635	0.634	0.632

3.1.3.5 回收率

回收率是指产水量和进水流量的比值。在压力一定时，回收率提高，膜表面的浓差极化现象也更加严重，有效压力则相对减小，这导致产水量下降，脱盐率降低。反渗透系统在设计和调试时，选择回收率的确定与原水水质密切相关。回收率增高，溶解于溶液中的盐会更加接近饱和状态，有可能析出后在膜表面沉淀并结垢，会对膜性能带来很大的危害。

3.1.3.6 pH 值的影响

pH 值对纳滤和反渗透膜元件的影响有两个方面：① 正常运行时对脱盐率的影响；② 清洗时不同 pH 值的清洗效果以及清洗时 pH 值的范围。

对第一点来说，正常运行时的 pH 值应该接近中性，即 pH 值 7 左右。这是由两个因素决定的：

- ① 反渗透膜在 pH 值 7.5 – 7.8 时脱盐率最高，图 3.5 所示为透盐率随 pH 值的变化曲线。透盐率 (SP) 与脱盐率 (Rej.) 的关系请参见下式：

$$\begin{aligned}
 \text{Rej.} &= \frac{\text{TDS}_{\text{Feed}} - \text{TDS}_{\text{Perm}}}{\text{TDS}_{\text{Feed}}} \\
 &= 1 - \frac{\text{TDS}_{\text{Perm}}}{\text{TDS}_{\text{Feed}}} \\
 &= 1 - \text{SP} \\
 \text{SP} &= 1 - \text{Rej.}
 \end{aligned}
 \tag{3.15}$$

② 碳酸盐体系的平衡关系。我们都知道在水溶液中，碳酸根 (CO_3^{2-})、碳酸氢根 (HCO_3^-) 和二氧化碳 (CO_2) 存在如下的平衡：



这个平衡随着 pH 值变化而移动，如图 3.6 所示。当 pH 值小于 8 时，水中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 开始部分转化为 CO_2 ，当 pH 值小于 4 时，水中全部 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 都转化为 CO_2 。反渗透膜元件对溶解在水中的 CO_2 是不能脱除的，这些 CO_2 透过膜元件到达产水侧后，会重新在水中转化为 HCO_3^- ，使得产水电导率升高，因此反渗透膜元件在低 pH 值条件下运行时表现出的脱盐率不高。但是，也不能为了排除 CO_2 的干扰而不加限制地提高 pH 值，这是因为 pH 值的升高会降低碳酸盐的溶解度，导致结垢。因此控制适当的 pH 值范围才能确保反渗透和纳滤膜元件的正常运行。

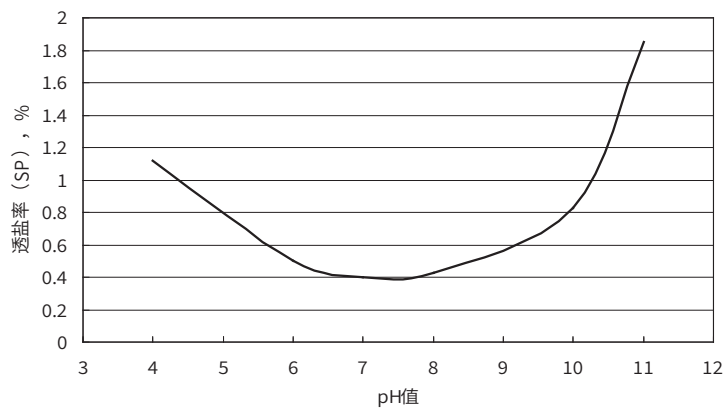


图 3.5 透盐率随 pH 值的变化曲线

从第二点来说，在清洗时反渗透膜元件常规的耐受 pH 值范围在 2.0 – 12.0。通常采用酸性溶液来清洗无机盐垢，采用碱性溶液清洗有机污染。当然反渗透膜元件除了分离皮层以外还有很多组成部分，比如：进水隔网、产水隔网、无纺布、粘接剂等，在清洗过程中，除了要考虑清洗剂对反渗透膜分离层的影响，还要考虑其对这些辅助材料的影响。在清洗中，反渗透膜元件所能耐受的 pH 值范围还和温度有关，相关的论述以及数据请参见第三部分第八章 8.3.5。总之，过高或过低的 pH 值会加速膜元件分离层的老化，降低膜元件的寿命。

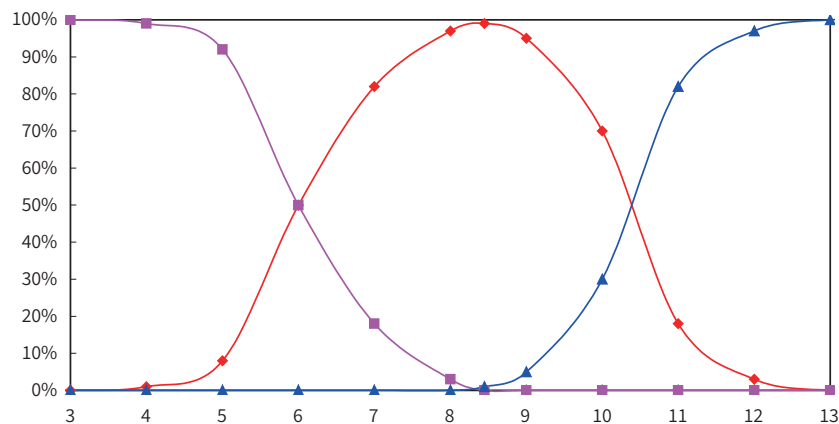


图 3.6 水溶液中的碳酸盐体系的平衡关系

3.2 水化学及水质分析

3.2.1 水化学

在膜法水处理中，水所具有的种种性质和状态会对膜的分离特性产生影响，因此为了得到稳定的、符合要求的产水水质，被处理原水的水质特性就成为必不可少的条件。表征酸碱性的 pH 值、离子成分和有机物等代表水特性和状态的指标都和膜法处理紧密相关。表 3.5 列出了常规水源需要的水质分析指标，在设计反渗透系统前应该取得这些数据，这样可以使得系统设计更加合理、准确。对于特殊水源还需要其它项目的分析数据，例如海水需要 Cu、废水需要知道油类、重金属、表面活性剂或其它可能对膜系统运行有影响的项目。

表 3.5 在设计反渗透系统前应做的水质分析项目

阳离子, mg/L	Ca ²⁺	其它检测项目	pH 值
	Mg ²⁺		水温, °C
	Na ⁺		总铁 (TFe), mg/L
	K ⁺		锰 (Mn), mg/L
	NH ₄ ⁺		硼 (B), mg/L
	Ba ²⁺		胶体硅, mg/L
	Sr ²⁺		活性硅, mg/L
阴离子, mg/L	HCO ₃ ⁻		总硬度, mg/L CaCO ₃
	CO ₃ ²⁻		总碱度, mg/L CaCO ₃
	Cl ⁻		总溶解固体 (TDS), mg/L
	SO ₄ ²⁻		悬浮物, mg/L
	NO ₃ ⁻		浊度, NTU
	F ⁻		COD, mg/L
	PO ₄ ³⁻		油, mg/L

3.2.1.1 水温

随着温度升高，水的粘度（粘性系数）则降低。在相同操作压力下，水温每相差 1°C，产水量就会有 3-4 % 左右的波动。由此可以看出，在为了确保稳定的产水量，系统运行温度非常重要。在处理硅和难溶解硫酸盐含量较高的水体时，由于温度降低可以导致这些无机物的溶解度降低。在冬季低温运行时，如果不对温度进行控制，就会更容易导致硅和 / 或难溶解硫酸盐结垢。在这种情况下，可以采用热交换器升高水温。同时需要采取加入阻垢剂（具体投加量需咨询药剂厂家）或者适当降低回收率的方法来调整系统的运行。水温较高时，离子透过膜的动能增加，系统脱盐率会有所下降。膜系统长期在超高温下运行，会加速膜元件老化速度。

3.2.1.2 pH 值

给水的 pH 值定义了它的酸碱性。pH 值为 7 时是中性；0-7 时呈酸性；7-14 时呈碱性。在分析化学中，pH 值是氢离子浓度负对数。在水化学中，pH 值可定义出二氧化碳、碳酸氢根、碳酸根、氢氧根离子的碱度平衡。浓水的 pH 值一般比给水 pH 值高，这是由于碳酸氢根、碳酸根离子浓度高于二氧化碳浓度。IMSDesign 软件允许用户用盐酸或硫酸调节给水的 pH 值，加酸可降低给水 pH 值且降低 LSI（朗格里尔）指数，降低碳酸钙结垢的可能。给水与浓水的 pH 值也影响着硅、铝、有机物与油脂的溶解度与污染程度。给水 pH 值还会影响

部分离子的脱除率，pH 值下降时膜元件对于氟、硼、硅的脱除率随之下降。

3.2.1.3 电导率

电导率是表示水中溶解离子导电能力的指标。电导率用电导率仪测量，其单位为微西门子 / 厘米 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)。电导率也是测量水中离子浓度的简便方法，但不能精确反映离子种类。离子构成不同，电导率值也不同；但电导率的数值随离子浓度增加而增加。电导率测定可以在现场进行，比总溶解固体的测定简单很多，因此电导率经常被用来替代总溶解固体表征反渗透和纳滤系统的脱盐性能。在大多数情况下，采用电导率计算的系统脱盐率要低于采用总溶解固体计算的系统脱盐率。硅离子对电导率变化不产生影响。

3.2.1.4 悬浮物

水中的悬浮物，就是指在水滤过的同时，在过滤材料表面残留下的物质，以粒子成分为主体。悬浮物含量高会导致反渗透和纳滤系统很快发生严重的堵塞，影响系统的产水量和产水水质。悬浮物测量较为复杂，膜系统中一般采用浊度和 SDI 值来表示水中悬浮、胶体类物质。

1) 浊度：是经光线或者激光的散射原理来定量计算的，浊度既可以取样在实验室分析，也可以在现场进行在线监控。反渗透和纳滤系统要求进水浊度不大于 1.0NTU，但如果系统在 >0.2NTU 的情况下长期运行，清洗频率会较高。

2) SDI (污染指数)：是针对膜系统而检测给水中悬浮物与胶体粒子堵塞 0.45 微米孔径滤纸的速度数据。该试验的主要数据是保持 30psi 给水压力状态下在 5、10、15 分钟内过滤的水量，并经公式计算出 SDI 值。反渗透和纳滤系统的极限 $\text{SDI}_{15}=5$ ，如果水质很差只能进行 5 分钟或 10 分钟的测试，说明该水质对膜系统的污染将是十分严重。一般来说， SDI_{15} 小于 3 时可使膜系统不发生颗粒物污堵。

3.2.1.5 离子成分

存在于自然界的水一般含有钠离子 (Na^+)、钾离子 (K^+)、钙离子 (Ca^{2+})、镁离子 (Mg^{2+})、氯离子 (Cl^-)、硫酸根 (SO_4^{2-})、碳酸氢根 (HCO_3^-)、硅 (Si) 以及少量其它离子。水中的总阳离子和总阴离子的摩尔浓度应该相等。如果水质分析报告中，阳离子和阴离子的摩尔浓度不能平衡，说明这份水质分析报告不准确或不全面，有可能对系统的设计和运行带来影响。下面一些名词被用来描述水体中离子的含量或状态：

1) 总溶解性固体 (TDS)：在水处理工艺中，TDS 是滤除悬浮物与胶体并蒸发掉全部水分后的剩余无机物。TDS 以 mg/l 为单位，在 IMSdesign 软件中 TDS 是全部阴、阳离子与可溶性二氧化硅的合计。在现场也可以用电导率仪水中电导度，电导率仪测量水的电导率并乘以转换因子即得出已知参考溶液（如氯化钠、氯化钾）的 TDS 值。值得注意的是：通过电导率数值间接测出的各类离子混合而成水溶液的 TDS 值，与通过各离子浓度相加得出的 TDS 值并不相同。一个粗略算法是：对于氯化钠（单价阴、阳离子组成的盐分）参考溶液，每 1 mg/L 的 TDS 值对应 $2\mu\text{S}/\text{cm}$ 的电导率。

2) 硬度：在水处理工艺中，把钙、镁离子的合计量换算成与之对应的碳酸钙来表示的量叫做硬度。硬度分为碳酸盐硬度和非碳酸盐硬度。如果钙硬度很高，需注意控制系统的结垢风险。

3) 碱度：是中和溶解在水中的 OH^- 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 所需要的酸的量。pH 值在 8.3 以下时，采用甲基橙作为指示剂并用酸中和至 pH 值 4.2 时，需要的酸的量称为甲基橙碱度；pH 在 8.3 以上时，采用酚酞作为指示剂并用酸中和至 pH 值 8.2 时，需要的酸的量被称为酚酞碱度。在天然水体中，碱度主要是由 HCO_3^- 盐类组成。

4) 钙离子 (Ca^{2+})：钙盐是水中主要的硬度组成部分，某些钙盐的溶解度较低，需注意其结垢风险。在使

用阻垢剂时，钙盐可达到过饱和状态而不沉淀下来，其中硫酸钙（ CaSO_4 ）的饱和度可达 230%，表征碳酸钙结垢倾向的 LSI（朗格里尔指数）值可达 1.8 ~ 2.5。- 需要考虑硫酸钙、氟化钙、磷酸钙等难溶钙盐的影响。

5) 镁离子 (Mg^{2+}): 苦咸水中镁约占三分之一硬度，但在海水中镁含量约比钙高出五倍。镁盐的溶解度较高，在 RO 系统中通常不会造成结垢问题。

6) 钠离子 (Na^+): 钠离子溶解度很高，不会在 RO 系统中造成结垢。在 IMSDesign 软件的水质分析中，当总阳离子比总阴离子低 10% 以上且选择自动平衡时，系统会增加钠离子浓度来使阴、阳离子摩尔浓度相等。

7) 钾离子 (K^+): 在水中钾的含量较钠低得多，且溶解度很高，不会造成 RO 结垢。

8) 钡离子 (Ba^{2+}): 硫酸钡的溶解度很低，可能在膜系统的浓水侧造成结垢。温度降低与硫酸盐浓度增高会使硫酸钡的溶解度下降。钡一般出现在井水中，浓度范围一般在 0.05 ~ 0.2 mg/L。钡的检测精度须为 0.01mg/L (10 PPb)。使用阻垢剂时，硫酸钡饱和度可达 6000%。

9) 锶离子 (Sr^{2+}): 硫酸锶的溶解度很低，可能在膜系统的浓水侧造成结垢。温度降低与硫酸盐浓度增高会使硫酸锶的溶解度下降。通常，铅矿附近的井水中含有小于 15mg/L 浓度的锶。使用阻垢剂时，硫酸锶饱和度可达 800%。

10) 碳酸氢根 (HCO_3^-): 碳酸氢钙的溶解度很低，能够在膜系统的浓水侧结垢。碳酸氢钙的溶解度测量单位，对苦咸水应该用 LSI（朗格里尔饱和指数），对海水应该用史蒂夫戴维斯指数。温度升高、pH 值增加均使碳酸氢钙的溶解度下降。碳酸氢根是碱性物，pH 值在 4.4-8.2 之间时它与二氧化碳相平衡，pH 值在 8.2-9.6 之间时它与碳酸盐相平衡。

11) 碳酸根 (CO_3^{2-}): 碳酸钙的溶解度很低，可在膜系统浓水侧结垢。其溶解度对苦咸水用 LSI（朗格里尔饱和指数），对海水用 SDSI（史蒂夫戴维斯指数）表示。温度上升或 pH 值增高均使其溶解度下降。碳酸根是碱性成分，pH 值在 8.2-9.6 之间时，其浓度与碳酸氢根平衡。pH 值大于 9.6 时，不存在二氧化碳与碳酸氢根，全部碱性物均为碳酸根。

12) 硫酸根 (SO_4^{2-}): 硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶的溶解度较低，且随温度降低而降低。

13) 硝酸根 (NO_3^-): 硝酸盐具有高溶解度，不会造成 RO 系统结垢问题。在水质分析中，通常将硝酸根含量表示为氮的 mg/L 值，而不是膜系统所需要的硝酸根的 mg/L 值。将 N 值转化为 NO_3 值，需乘以 4.43。

14) 氯离子 (Cl^-): 氯盐的溶解度很高，在 RO 系统中不会造成结垢。在 IMSDesign 软件的水质分析中，当总阳离子比总阴离子低 10% 以上时且选择自动平衡时，系统会增加氯离子浓度来使阴、阳离子摩尔浓度相等。

15) 氟离子 (F^-): 自然水体中氟较低，在某些地区的井水中会有超出饮用水标准的氟含量。膜系统中氟的脱除率取决于给水的 pH 值。pH 值显碱性时，氟以盐的形式存在，聚酰胺膜脱氟率可达 99% 以上；pH 值显酸性时，由于氟以酸的形式存在，氟脱除率可降至 50% 左右。

16) 硼离子 (B^{3+}): 硼一般存在于海水中，其含量可达 5mg/L。内陆咸水湖中含量更低。硼不是污染源，但由于在某些使用环境中会造成不利影响，因此在电子工业中必须去除。硼的化学性质类似于硅，pH 值高于 10 状态下，它以单价硼酸根阴离子形式存在，pH 值低于 10 状态下，它以非离子化的硼酸 $\text{B}(\text{OH})_3$ 形式存在，硼酸盐的去除率与 pH 值有关，pH 值高时，去除率也高。

17) 二氧化硅 (SiO_2): 二氧化硅在某种情况下是一个阴离子。它的化学性质很复杂，甚至是不可预测的。TOC（以碳计）表示有机物总量而未指明有机物的构成，同样，硅浓度仅表示了硅的总浓度，但没有指明硅的各种构成的浓度。水中的硅总量中包括活性硅与胶体硅。活性硅是可溶硅，它被弱电离且未聚成长链。活性硅是 RO 与离子交换工艺中希望的形式，也是 IMSDesign 软件所使用的二氧化硅的形式。虽然活性二氧化硅有阴离子特性，但在水质分析中它未以阴离子方式计入阴阳离子平衡，却以盐的形式计入 TDS。胶体硅是聚

合硅或胶体状，就其性质而言更接近固体。胶体硅可以被 RO 系统去除，但可能在 RO 前端造成胶体污染。胶体硅的直径可小到 0.008 微米，但只有大于或等于 0.45 微米的部分才能用 SDI 来测量。粘土、淤泥、沙石等微粒状的硅混合物一般有 1 微米或更大的直径，可用 SDI 仪测量。在使用硅分散剂条件下，活性硅的溶解度限值为 100-150%。温度的升高、pH 值在 7.0 以下或 7.8 以上均会使硅的溶解度上升，对硅聚合起催化作用的铁离子存在时，活性硅溶解度下降。在 RO 系统中，硅的脱除率与原水 pH 值密切相关，随 pH 值的增加，该脱除率也增加，这是因为活性硅更多的是以盐的形式存在，而不是酸的形式。

18) 二氧化碳 (CO₂): 二氧化碳为气体，当溶于水时与水反应生成弱碳酸 (H₂CO₃)。如纯水中二氧化碳处于饱和状态，其浓度约为 1600mg/L，pH 值约为 4.0。自然界水体中二氧化碳的来源是基于 pH 值的碳酸氢根平衡。水体中的二氧化碳浓度间接的决定于 pH 值与碳酸氢根浓度的对应关系。二氧化碳与碳酸氢根离子在 pH 值的 4.4-8.2 区间保持平衡。pH 值为 4.4 时均为二氧化碳，pH 值为 8.2 时均为碳酸氢根。IMSDesign 程序运用碳酸氢根浓度与 pH 值计算水中二氧化碳浓度。由于二氧化碳为气体，RO 膜对其不具有脱除或浓缩作用，其浓度在给、产水与浓水中相同。在给水中加酸将碳酸氢根化为二氧化碳，故而 pH 值下降。

19) 硫化氢 (H₂S): 硫化氢呈气态，使给水中含有臭蛋气味。其 0.1mg/L 浓度是异味的临界值，在 3-5mg/L 浓度时，具有强烈的异味。硫化氢易于被空气、氯及高锰酸钾等氧化剂氧化成硫。硫的作用类似于胶体污染，用传统的介质过滤器不能去除。在系统设计中，建议将硫化氢保留为气态，使其穿过 RO 系统进入产水，再对产水进行处理并去除。

3.2.1.6 金属成分

铁、锰、铜、镍、锌等金属物质在水中的含量虽然很少，但是作为可能导致氧化反应进而造成膜性能劣化的催化剂，也是需要注意的成分。特别需要指出的是，具有催化机能的胶体状不溶解物质是无法用分析可溶性离子的方法检出的。因此铁、锰等具有催化氧化的金属物质必须在预处理过程中尽量去除。特别是在使用次氯酸钠之类的强氧化剂时，就必须更加严格地限制给水中铁锰等过渡金属的含量，通常我们希望给水中的具有氧化性的三价铁 (Fe³⁺) 的浓度不高于 20 µg/L，在特殊的场合也应尽量避免超过 0.1 mg/L。有时我们进行原水水质分析时，并未发现过量的铁和锰，但是反渗透膜元件却发生了劣化，这时往往都是由于预处理系统采用了投加絮凝剂的工艺，过量的含铁絮凝剂会在水中残留，进而进入反渗透系统破坏膜元件。这时就必须对加药系统进行调整，控制加药量避免过量的铁进入反渗透系统。类似的事情还经常发生在投加含铝絮凝剂时，铝是一种两性金属，在碱性条件下以氢氧化物的形式存在，氢氧化铝不易溶于水，这时残留在原水中的铝就会污染反渗透膜元件。因此不论加入何种絮凝剂，都必须结合进水的水质严格控制加药量，以免人为带入对反渗透和纳滤膜有影响的化学物质。

3.2.1.7 有机成分

水体中的有机成分主要有：细菌、油脂、腐殖酸、表面活性剂、农药或 / 和其它人为排放出的化学物质。通常用 TOC (总有机碳)、BOD 和 COD 等指标对有机物成分进行表征。反渗透膜系统可以有效的去除有机物，分子量大于 200 的有机物可去除 99% 以上，小于 200 的依分子量、形状、带电的不同，其去除率也不同。由于每个水质中有机物成分复杂、分子量大小不同，海德能公司设计导则中只给出大致范围的定量指导值。针对废水回用的项目，当系统进水中有机物含量超出设计导则范围时，可能会加速系统污染，缩短化学清洗周期。 - 增加 TOC BOD COD 等指标解释

① TOC (总有机碳; Total Organic Carbon)

总有机碳是指水中可以酸化的有机物总量，用有机物中主要成分碳的含量来表示。它不包括水中无机盐中的碳含量。水中的 TOC 可以采用红外吸收法测定。

② BOD（生化耗氧量；Biochemical Oxygen Demand）

BOD 是在水中存在的有机物，根据微生物的种类不同在好氧条件下将其分解并达到完全氧化时所需氧的数量。因为是采用微生物做分析，所以通常情况下需要五天进行微生物培养，测定的 BOD 值被标记为 BOD₅。因为能被微生物分解的有机物有限，所以 BOD 通常用来表征排水和河水中的有机物含量，在膜法水处理的设计和管理中也经常会使用到。

③ COD（化学耗氧量；Chemical Oxygen Demand）

COD 是采用高锰酸钾（KMnO₄）或重铬酸钾（K₂CrO₄）对水中组分进行氧化时所消耗的氧的数量，采用不同的氧化剂用不同的下标区分，例如：COD_{Mn} 和 COD_{Cr}。它是表示水中还原性物质多少的指标。用加热后的滴定法能在短时间内测定，但氯离子的存在会对测定结果有影响，针对氯的抑制方法以及数据校正比较繁琐。在膜法水处理中 COD 与 BOD 一样，往往在废水处理系统的设计和管理上对其有比较多的限定。

由于影响 COD 的化学成分过多，COD 的数值很难作为反渗透进水考察的定量指标。目前海德能公司推荐的反渗透进水最大 COD 值为 15 mg/L，这并不表示 COD 大于 15 mg/L 的给水就不能进入反渗透系统，同样也不能说明 COD 小于 15 mg/L 的水源就一定不存在对反渗透系统的有机污染。从工程经验来看，的确有一些 COD 很高的，甚至达到 1 000 mg/L 的给水，反渗透系统的运行仍很稳定，相反有些 COD 很低的系统，却因为有机污染严重而影响了运行。这都是由于构成 COD 成分过于复杂造成的。因此 COD 只能作为一个参考指标，必须结合水源的实际情况作出综合评判。

3.2.1.8 表示单位

水中所含物质的量通常用以下的单位进行表示。

1) 质量浓度

水中物质的成分含量一般用单位体积的重量（mg/L，μg/L）来表示。

2) 比率

重量 / 重量或体积 / 体积表示时，因为分母和分子的单位相同可以约去，就能表示成重量比或者体积比。百万分之一（ppm：parts per million）在表示水的成分浓度时经常被使用。溶液和溶质的重量比在比重看作是 1 的稀溶液中，浓度单位使用 ppm 或者 mg/L 表示，代表的是一样的值，但是在溶质浓度比较大，比重不能看作 1 的时候，就必须把 ppm 和 mg/L 区别使用了。

成分的浓度要在更低的数量级时，可以用十亿分之一（ppb：parts per billion），一兆分之一（ppt：parts per trillion）来表示，一般的水处理中用 ppm 级就足够了，半导体生产线上被使用的超纯水的水中成分都达到了 ppt 数量级。

需要注意的是，ppm、ppb 和 ppt 均不是国际单位制，在正式的文件、报告以及论文中不能使用，可以采用质量浓度来替代。例如：采用 mg/L 替代 ppm，采用 μg/L 替代 ppb。

3) 当量和摩尔浓度

在水质分析报告中，这种方法往往在不需要考虑离子平衡或碱度等指标时使用，单位为 meq/L（当量浓度）和 mol/L（摩尔浓度）表示。

4) 代用单位

硬度和碱度单位经常采用以碳酸钙计的质量浓度表示 (mg/L 以计 CaCO_3 计)。

以上是部分常用的表征浓度或含量的单位，在不同机构提供的水质分析报告中，可能采用了不同的单位体系，这时在向计算软件中输入数据时，就必须考虑不同单位之间的换算关系，以避免计算的错误。

3.2.1.9 水的种类

膜法水处理的给水千差万别，正确理解不同水源的水质特点就显得尤为重要。

1) 河川水

由于降雨而落在地表的水，通过地表或者经由地下汇入河流。流经地表的水通常含有较多的悬浊物质；而流经地下的水则含有较多的溶解性无机盐。特别是大雨过后，大量的水流入河流时，河水中的悬浊物质会变得非常多。到了雨少的季节就会变得相对清澈。河水中的悬浊物质变化幅度非常之大。河水的温度随季节变化也十分的明显。由于水生生物的存在，因此河流中的有机物含量也很多。这些污染物都会对反渗透和纳滤系统造成污染。

当河流被市政污水 / 或工业废水污染时，其含有的污染物成分就更为复杂。这时需要对水质进行足够的调查，更要对于处理系统的设计做必要的考虑。

2) 湖泊水和水库水

河川水在湖泊或者水库中发生长时间的滞留后悬浊物质因为沉降其含量会变少，但一方面又容易受微生物的影响。湖泊水和水库水容易发生富营养化，致使藻类过度繁殖，有时可能会造成反渗透预处理系统的堵塞。通常会因为消耗水中的溶解二氧化碳，造成湖水的 pH 值升高。

湖泊内部形成水的分层时，水的底层由于处于缺氧的状态会形成厌氧氛围，还有硫化氢的生成、包括引起铁、锰的再溶解等等。由此，在引用湖泊或者水库水作为原水的时候，必须深入调查水质状况并对预处理方式慎重选择。

3) 地下水

地下水在地层内的流速极为缓慢，由于自然的滤过作用，在水中几乎不含有悬浊物质，但受流经地层的影响十分明显。比如，流经石灰盐带的水中钙的浓度就非常高，通过火山地带的地下水中，硅的浓度也会变高。通常地下水由于含氧量不足，略显还原性，地层的影响可能还会导致硫化氢、钡和锶等成分的变化。

地下水的悬浊物质较少，全年的水温也比较稳定，作为反渗透系统的原水时，须考虑在前处理中除去硬度和硅等物质。

4) 市政给水

自来水厂经过处理产出的用于饮用的自来水，会因为自来水厂的水源不同、采取的处理工艺不同，水质状况也会有所不同。有时由于自来水厂在原水中添加部分絮凝或助凝药剂，导致反渗透系统发生污染。此外，市政管网的材质也可能对原水造成二次污染。因此不能因为反渗透或纳滤的给水是市政自来水，就放松对预处理的要求。

还需要注意的是，芳香族聚酰胺反渗透膜的耐氯性有限，虽然美国海德能公司的技术文件公布的耐受余氯上限为 $500 - 1\,000 \text{ mg/L} \cdot \text{h}$ （耐受余氯的表征单位通常采用浓度和时间的乘积），但是这并不表明芳香族聚酰胺反渗透膜元件可以接触大量的余氯或类似氧化剂。为了保证市政供水不会在管网中被细菌和微生物污染，通常要求自来水管网的末梢要保持一定的余氯浓度，这些氧化性物质会对芳香族聚酰胺反渗透和纳滤膜元件造成不可恢复的伤害。在预处理中必须采用活性炭或者亚硫酸氢钠（SBS）对残余的氧化性物质进行去除。

5) 海水

标准海水中 NaCl 的含量在 3.5% 左右，还含有镁、钙、钾、硫酸、碳酸、溴、硼和氟等盐分。不同区域的海水含盐量由于入海口、降水、潮汐和水温影响有所不同。表 3.6 列出了不同海域海水的典型含盐量数据。中国是海洋大国，海域面积约为 473 万平方千米，分布着 5 400 多个岛屿，海岸线总长约 3.2 万千米，其中大陆海岸线长约 1.8 万千米。这些数据表明，在中国不同海域的海水水质有很大的不同。目前我国大陆已经建成投运的大型海水淡化工厂给水的含盐量主要集中在 25 000 – 35 000 mg/L 范围内，低于外海的平均含盐量，这主要是由于很多取水点离河流入海口较近，河水将近海的海水稀释了。从一些角度来说，这是有利的，比如我们可以用更低的能耗获取淡水、海水淡化系统的回收率也可以适当提高，这些都可以降低海水淡化的成本。但是河流在稀释海水的同时会带入大量的泥沙，这对海水淡化的预处理系统的要求就更加严格。

表 3.6 不同海域的海水典型含盐量

海域	大西洋	太平洋	地中海	红海	波斯湾
取样地区	加纳利群岛	加利福尼亚	塞浦路斯	沙特阿拉伯	阿联酋
含盐量, mg/L	38 500	34 000	40 500	41 000	43 000
平均水温, °C	20 – 23	12 – 28	18 – 28	20 – 28	22 – 36

海域	渤海	黄海	东海	南海	
含盐量, mg/L	30000	31300	34000	34500	
平均水温, °C	0 – 21	15 – 27	6 – 28	25 – 28	

6) 市政污水和工业废水

市政污水和工业废水等伴随生产、生活产生的排水越来越多的成为膜法水处理的给水，这是受全球水资源短缺的大趋势影响的。在反渗透和纳滤系统的预处理中去除污染物是一个严峻的课题。某些工业废水中甚至含有导致膜材料降解的化学成分。膜法水处理，包括微滤、超滤、纳滤和反渗透，并不是包治百病的良药，并不是所有的水源水质都可以直接采用膜法进行处理。当进水水源是市政污水和 / 或工业废水时，应该对水质成分有详细的分析，并进行恰当的预处理。即使这样也不是所有的工业废水可以采用反渗透或纳滤来脱盐。

3.2.2 水质分析

水质全分析作为分析手段已经被确立，日本的 JIS (Japanese Industrial Standard) K0101 和美国的 ASTM (American Society for Test and Materials) 和 Standard Methods (by APHA, AWWA, WPCF) 已被作为公认的标准测定方法。在本小节中介绍部分分析方法及其注意事项。加上以及国标检测标准；

3.2.2.1 水温、pH 值和电导率

这三个指标若在取样后停留一段时间再测量，会产生很大的误差。因此水温、pH 值和电导率这三个参数最好能在取样现场马上测定。目前各类便携式仪器很多，完全可以满足现场测定这三个参数的需要。由于电导率的数值受温度影响，因此推荐采用带有温度补偿的电导率仪来测定。pH 测定仪的电极和电导率测定仪的探头容易变脏，需要定期进行冲洗并同时用标准溶液进行校对。

需要注意的是，电导率和总溶解固体之间没有固定的换算关系，但不同离子成分的浓度和其对应电导率可以采用换算因子估算，表 3.7 中列出了常见离子浓度与电导率的换算因子，采用离子的浓度乘以换算因子就可以估算出 25 °C 时的电导率数据。

表 3.7 不同离子的浓度和电导率的换算因子

阳离子	换算因子	阴离子	换算因子
Ca ²⁺	3.0	OH ⁻	42
Mg ²⁺	4.4	CO ₃ ²⁻	2.4
Na ⁺	2.2	HCO ₃ ⁻	0.7
K ⁺	1.9	SO ₄ ²⁻	1.7
NH ₄ ⁺	4.3	Cl ⁻	2.2
H ⁺	350	NO ₃ ⁻	1.2

3.2.2.2 悬浮物

悬浮物是指在水中不溶解的固体成分。它的数量可以通过滤纸过滤前后的重量变化得到。使用这种重量法的操作重点在于使用前后的滤纸必须保持十分干燥并经过恒重。称量所使用的天秤最好是高精度类型，并需要定期校正。

反渗透给水要求中的 SDI 值是评价不溶解物质的量的另一个方法。SDI 的测定方法是依据 ASTM D4189-95，采用直径 47 毫米，过滤孔径 0.45 微米的微滤膜片，在 0.21 MPa 的恒压下进行的。如图 3.7 所示。测定时，将过滤出第一个 500 毫升所需的时间记为 T_0 ，过滤 15 分钟后，再测定一个过滤 500 毫升所需时间，记为 T_{15} 。最后按照公式 (3.16) 即可求出 SDI_{15} 的数值。 SDI_{15} 的下标数字 15 是表示该 SDI 值是在过滤 15 分钟后测定的结果。有时由于给水水质恶劣、污染成分多，导致在过滤 15 分钟后过滤速度极慢，甚至已经停止，这时 SDI_{15} 的数值就无法计算。遇到这样的情况，说明该水源不具备直接进入反渗透或纳滤系统的条件，需要进行严格的预处理。

$$SDI_{15} = \frac{1 - (T_0/T_{15})}{15} \times 100 \quad (3.16)$$

从公式 (3.16) 可以看出， SDI_{15} 存在一个最大值，即当 T_0/T_{15} 趋近于零时， SDI_{15} 最大，约等于 6.67。反渗透系统允许的最大进水 SDI_{15} 为 5.0，从实际工程经验出发， SDI_{15} 小于 3.0 可以更好地保证反渗透系统的运行。当然控制水质的指标很多，SDI 并不能涵盖全部问题。国内外也经常发现 SDI_{15} 数值低于 5.0，甚至 3.0，但是反渗透系统运行仍不稳定的实例。况且 SDI 本身还有很多不准确的因素，比如表 3.8 列出的数据。

表 3.8 不同 SDI 数值的比较

	T_0 , s	T_{15} , s	SDI_{15}
例一	20	40	3.33
例二	20	30	2.22
例三	100	200	3.33
例四	110	120	0.56

从表中我们可以看到，例一和例二基本正常，说明了 15 分钟后过滤 500 毫升水所需时间越短， SDI_{15} 的数值就越小。但是观察例三就会发现，它的 SDI_{15} 数值与例一一样，都是 3.33，而 T_0 却相差很大，从正常的理解可以知道 T_0 和 T_{15} 数值越大，说明水中的污染物越多。因此例三中的给水水质一定不如例一的给水，可是它们的 SDI_{15} 却相等。进而观察例四，我们首先可以看到它的 SDI_{15} 最小，只有 0.56，但它的 T_0 却最大，从 SDI_{15} 的角度说，它的给水水质最好，但是从接取 500 毫升水所需时间来说，它的给水水质最差。这就有了矛盾，这是由 SDI_{15} 的计算方法决定的。将 SDI 数值作为一个有价值的参考是可以的，但不能迷信 SDI_{15} 数值。从实际经验出发，我们发现 T_0 的数值高于 60 秒时， SDI_{15} 的计算就失去了普遍意义，这说明即使很小的 SDI_{15} 数值也不能说明给水水质良好。

浊度也是表征水中悬浮物多少的指标，ASTM 定义的浊度单位是 NTU (Nephelometric Turbidity Unit)。反渗透对进水的浊度要求是小于 1.0 NTU。使用浊度计可以进行高精度的测定浊度。过去用的大多是钨光源散射浊度计。目前市场上已经有用 He – Ne 激光或者半导体激光类型的高精度浊度计，可以在短时间内测定悬浊物质的等级。不仅可以用于测定供给水，也可以用于超滤和反渗透系统的除浊性能的在线监视。

3.2.2.3 主要离子和金属

钠、钾、钙、镁等阳离子和硅、金属成分除了用化学分析以外，还可以用高频电感耦合等离子法 (Inductively Coupled Plasma, 缩写: ICP) 或者原子分光光度法、离子层析等定量分析。氯离子、硫酸根、硝酸根等阴离子除了化学分析以外，也可以根据离子层析定量分析。需要注意的是碳酸盐的结垢倾向经常用 Langelier 指数和 Stiff & Davis 指数表示。碳酸钙在自然界基本上是以饱和状态存在的。升高 pH 值，碳酸钙的溶解度会降低导致结垢。一般在苦咸水中使用朗格利尔饱和指数 (Langelier Saturation Index, 缩写: LSI)，在海水中使用 Stiff & Davis 饱和指数 (Stiff & Davis Saturation Index, 缩写: SDSI)。以上两种饱和指数的计算方法，以及对结垢趋势的影响请参见第二部分第四章 4.1.2 和 4.1.3。

3.2.2.4 硅

硅垢是反渗透膜污染的主要成因之一。因此反渗透给水水中的硅含量必须准确测定。硅的分析可以根据钼蓝法用比色确定，也可以用 ICP 或者原子分光光度法进行分析。

溶于水的硅被浓缩并超过其溶解度后会析出形成硅垢。硅的溶解度随水温降低而降低，因此在同样的回收率条件下，在冬季比较容易出现硅结垢的问题。

此外，除了溶于水中的硅，还有胶体硅也和垢体的生成有关联。发生这种情况的话，不仅是反渗透系统，就连预处理系统也会因为硅结垢的问题造成产水量下降。

在常规的分析中仅能发现离子态的硅（活性硅），但为了将胶体硅也分析出来，可以加碳酸钠进行蒸发，测定全硅。全硅与活性硅的差就是胶体硅的含量。

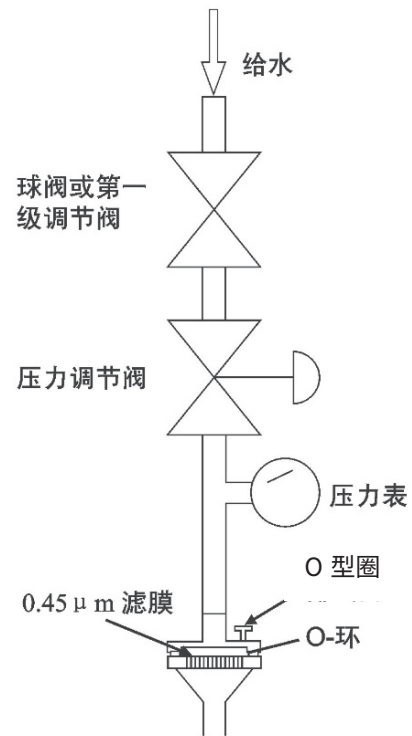


图 3.7 SDI 测试仪器

3.2.2.5 有机成分

由有机物造成的反渗透系统故障占全部系统故障的 60 – 80 %。微生物及其代谢产物是有机污染的主要原因之一。有时虽然原水中的细菌数量不多，但膜表面被截留的有机物或无机物成为它们繁殖的营养源，导致微生物大量繁殖。发生有机污染时，系统不仅表现为水通量下降，而且会发生给水隔网堵塞，进而造成过大的压力损失。严重的时候会导致膜元件发生机械损伤。

除微生物污染以外的其它有机污染物，不仅可以充当微生物的营养源，还会在膜表面形成污染层，导致运行压力升高，或造成反渗透系统的脱盐率下降。因此，了解反渗透给水中的有机成分也是十分必要的，通常在水质分析中以下三个指标被用来表征有机污染物的含量。

① TOC（总有机碳；Total Organic Carbon）

总有机碳是指水中可以酸化的有机物总量，用有机物中主要成分碳的含量来表示。它不包括水中无机盐中的碳含量。水中的 TOC 可以采用红外吸收法测定。

② BOD（生化耗氧量；Biochemical Oxygen Demand）

BOD 是在水中存在的有机物，根据微生物的种类不同在好氧条件下将其分解并达到完全氧化时所需氧的数量。因为是采用微生物做分析，所以通常情况下需要五天进行微生物培养，测定的 BOD 值被标记为 BOD₅。因为能被微生物分解的有机物有限，所以 BOD 通常用来表征排水和河水中的有机物含量，在膜法水处理的设计和管理中也经常会使用到。

③ COD（化学耗氧量；Chemical Oxygen Demand）

COD 是采用高锰酸钾（KMnO₄）或重铬酸钾（K₂CrO₄）对水中组分进行氧化时所消耗的氧的数量，采用不同的氧化剂用不同的下标区分，例如：COD_{Mn} 和 COD_{Cr}。它是表示水中还原性物质多少的指标。用加热后的滴定法能在短时间内测定，但氯离子的存在会对测定结果有影响，针对氯的抑制方法以及数据校正比较繁琐。在膜法水处理中 COD 与 BOD 一样，往往在废水处理系统的设计和管理上对其有比较多的限定。

由于影响 COD 的化学成分过多，COD 的数值很难作为反渗透进水考察的定量指标。目前美国海德能公司推荐的反渗透进水最大 COD 值为 15 mg/L，这并不表示 COD 大于 15 mg/L 的给水就不能进入反渗透系统，同样也不能说明 COD 小于 15 mg/L 的水源就一定不存在对反渗透系统的有机污染。从工程经验来看，的确有一些 COD 很高的，甚至达到 1 000 mg/L 的给水，反渗透系统的运行仍很稳定，相反有些 COD 很低的系统，却因为有机污染严重而影响了运行。这都是由于构成 COD 成分过于复杂造成的。因此 COD 只能作为一个参考指标，必须结合水源的实际情况作出综合评判。

第四章 反渗透和纳滤系统的预处理

为了保证反渗透和纳滤系统可以稳定运行，对给水的严格预处理就必不可少。预处理的目的是去除给水中会对反渗透和纳滤膜产生污染或导致劣化的物质。一旦预处理系统不能发挥作用，有污染物进入反渗透和纳滤系统，这些物质可能会在膜表面堆积，若给水中含有微生物，它的繁殖会导致更严重的后果。正确把握原水的特性，设计并选择合适的预处理工艺是非常重要的。

预处理系统的目的不外乎以下几点：

- 保证 SDI_{15} 最大不超过 5.0，争取低于 3.0；
- 保证浊度低于 1.0 NTU，争取小于 0.2 NTU；
- 保证没有余氯或类似氧化物，如：臭氧等；
- 保证没有其它可能导致膜污染或劣化的化学物质；
- 保证难溶盐结垢（例如高氟化物、高硅等水质情况）在可控水平；

预处理一般可以分为传统预处理方法和膜法预处理。所谓传统预处理是对膜法预处理出现前反渗透预处理工艺的总称，包括：絮凝、沉淀、多介质过滤和活性炭过滤等。随着高分子分离膜技术的不断发展，微滤和超滤逐步出现在反渗透和纳滤的预处理系统中，并在新项目中替代了传统预处理工艺。海德能公司提出的集成膜解决方案 (Integrated Membrane Solutions™, 缩写: IMS™) 就是采用超滤技术作为反渗透预处理的集成膜工艺。表 4.1 对反渗透和纳滤系统的预处理作了简要的分类。

表 4.1 关于反渗透和纳滤预处理的分类

	名称	目的
除浊设备	絮凝、砂滤	悬浊物质的去除
	絮凝沉淀、砂滤	
	微滤 / 超滤	
	保安过滤器	异物去除
加注化学药品设备	杀菌剂	防止微生物污染
	絮凝剂	悬浊物质的絮凝
	pH 值调整	确保最佳的絮凝 pH 值
	还原剂	防止反渗透和纳滤膜被氧化
	阻垢剂	防止发生结垢

针对预处理系统的目的，可以将预处理分为：防止结垢、防止胶体污染、防止微生物污染、防止有机物污染和防止膜劣化等几个方面。本章就针对不同的预处理目的分别进行论述，帮助大家了解不同预处理工艺的特点。表 4.2 概括了不同指标的进水要求。

表 4.2 反渗透进水的水质允许值检查表

导致膜污染的指标		允许值	解决方法
悬浮物等	浊度	< 1 NTU	过滤，絮凝沉淀，微滤，超滤
	SDI ₁₅	< 5.0	过滤，絮凝沉淀，微滤，超滤
	颗粒物	<100 个 /ml	过滤，絮凝沉淀，微滤，超滤
	微生物	< 1 个 /ml	杀菌，微滤，超滤
金属氧化物	铁 ¹ ，Fe ³⁺	< 50 μg/L	氧化 + 沉淀或过滤
	锰，Mn	< 50 μg/L	氧化 + 沉淀或过滤
	铝 ,Al	<50μg/L	沉淀或过滤
结垢物质 ² （均为系统浓水侧浓度）	CaCO ₃	LSI<2.5	回收率 ,pH 值，阻垢剂
		CCPP<850mg/L	
	CaSO ₄	<400%	回收率，阻垢剂
	BaSO ₄	<10000%	回收率，阻垢剂
	SrSO ₄	<1200%	回收率，阻垢剂
	CaF ₂	<50000%	回收率，阻垢剂
	Ca ₃ (PO ₄) ₂	<2.4	回收率，阻垢剂
	SiO ₂	<140%	回收率，阻垢剂
有机物 ³	油	0	气浮、吸附
	TOC(以 C 计)	<5mg/L	活性炭，过滤，吸附树脂
	COD(以 O ₂ 计)	<15mg/L	活性炭，过滤，吸附树脂
	BOD(以 O ₂ 计)	<10mg/L	活性炭，过滤，吸附树脂
导致膜劣化的指标		允许值	去除方法
pH 值 ⁴		2-10	加入酸或碱调节
温度		5-45℃	换热器
氧化剂	余氯	0	还原剂，活性炭吸附
	臭氧	0	
	其他	0	
表面活性剂		选择阳离子或两性表面活性剂时要注意	
酒精		<10%	N/A
有机溶剂如二甲基甲酰胺；苯类；混合物如柴油、汽油等		0	N/A，遇到复杂给水物质时，请向海德能公司咨询，或通过现场试验确定兼容性。

1 对 Fe²⁺ 可以允许的最高浓度为 0.3 mg/L(pH<7 时), 但需要注意的是由于经常在反渗透的预处理中投加氧化剂, 这会使 Fe²⁺ 被氧化为 Fe³⁺。因此在使用氧化剂时, 同样需要控制给水中的 Fe²⁺ 含量。

4.1 结垢的防止

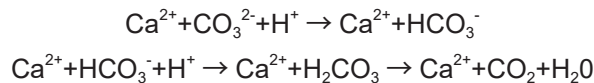
4.1.1 结垢的原因

结垢是难溶性的盐类在膜表面析出固体沉淀，防止结垢的方法是保证难溶解性盐类不超过饱和界限。结垢不仅会在膜表面发生，有时甚至在系统的管路内部也会发生。

在反渗透和纳滤系统中析出的垢主要是无机成分，以碳酸钙为主。碱性时会形成包括氢氧化镁等在内的各种难溶解氢氧化物。在天然的水源中存在的难溶性盐类主要有：碳酸钙（ CaCO_3 ）、硫酸钡（ BaSO_4 ）、硫酸钙（ CaSO_4 ）、氟化钙（ CaF_2 ）、硫酸锶（ SrSO_4 ）和二氧化硅（ SiO_2 ）。一般来说，盐的溶解度受各种在水中成分的浓度、pH 值、温度以及共存的其它盐分浓度影响，难溶盐的溶解度通常用溶度积（ K_{sp} ）来表示，溶度积越小溶解度就越低，部分难溶盐在 25 °C 时的溶度积请参见附录 6。在反渗透系统设计的时候特别有必要注意的是钡（ Ba^{2+} ）和锶（ Sr^{2+} ）。钡一般只存在于天然的水中，在井水中的钡浓度在 0.05 – 0.2 mg/L 之间，钡的检出级别是 1 $\mu\text{g/L}$ 。原水中钡的临界浓度在海水中是 15 $\mu\text{g/L}$ 以下，苦咸水中是 5 $\mu\text{g/L}$ 以下。当在原水中投加硫酸时，需注意在控制给水中钡的浓度在 2 $\mu\text{g/L}$ 以下。锶的分析必须检测到 1 $\mu\text{g/L}$ 数量级。硫酸根浓度的增加以及水温的降低，会导致硫酸锶的溶解度下降。通常井水中的锶含量在 15 mg/L 以下。此外，一些天然水体中含量不高的无机物由于人为原因（如：加药等）会被带入给水中，例如：磷酸根、铁和铝，这些无机盐往往溶度积很低，极易发生结垢，因此当系统投加药剂（包括：絮凝剂、助凝剂、阻垢剂、酸和碱等）时，必须注意这些人为引入的离子成分的影响。有时甚至会出现投加的不同药剂发生相互作用导致难溶物质析出，进而污染膜元件的情况。因此在投加多种药剂时，应该注意这些药剂的成分，有条件的最好通过试验确认它们的兼容性。

4.1.2 Langelier 指数和碳酸钙沉淀势（CCPP）

水溶解物质的能力根据水的 pH 值不同有很大变化。原水中的碳酸钙依据加酸量的不同，碳酸根会变成碳酸氢根或二氧化碳气体。下列化学反应式就描述了碳酸盐在水中的平衡。



根据以上平衡，调节 pH 值到酸性区域，可以起到防止碳酸钙析出的作用，从而避免结垢。

是否生成碳酸钙垢的表征指标可以用朗格利尔饱和指数 (LSI) 进行评价。

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (4.1)$$

式中： pH_s ——水中的碳酸钙饱和时的 pH 值；

pH——实际水溶液的浓水 pH 值。

在大多数反渗透系统中，浓水侧的 pH 值会高于进水的 pH 值，因此在考虑 LSI 时务必要考虑浓水侧的 pH 值。通常判断是否结垢的方法如下：

$$\text{LSI} \leq 0 \rightarrow \text{不结垢}$$

$$\text{LSI} > 0 \rightarrow \text{会结垢}$$

用已知的经验公式可以方便的算出 pH_s 和 pH 值。

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (4.2)$$

$$pH = \log_{10} \frac{[\text{碱度, 以 CaCO}_3 \text{ 计}]}{[\text{CO}_2]} + 6.3 \quad (4.3)$$

$$\text{式中: } A = \frac{\log_{10} [\text{TDS}_{\text{浓水}} - 1]}{10}$$

$$B = -13.12 \times \log_{10} (t + 273.15) + 34.55, \text{ 式中: } t \text{ —— 水温, } ^\circ\text{C}$$

$$C = \log_{10} [\text{Ca}^{2+}_{\text{浓水}}, \text{以 CaCO}_3 \text{ 计}] - 0.4$$

$$D = \log_{10} [\text{碱度}_{\text{浓水}}, \text{以 CaCO}_3 \text{ 计}]$$

我们通过一个例子来说明以上的计算方法。

例：某个水源设定回收率为 70 %，pH = 8.0，Ca²⁺：35 mg/L（以 CaCO₃ 计），碱度：140 mg/L（以 CaCO₃ 计），TDS：500 mg/L，温度：18 °C。

解：浓缩倍率 = 100 % ÷ (100 % - Rec.) = 100 % ÷ (100 % - 70 %) = 3.33

$$A = [\log_{10} (500 \times 3.33) - 1] \div 10 = 0.32$$

$$B = -13.12 \times \log_{10} (18 + 273.15) + 34.55 = 2.22$$

$$C = \log_{10} (35 \times 3.33) - 0.4 = 1.67$$

$$D = \log_{10} (140 \times 3.33) = 2.67$$

$$pH_s = (9.3 + 0.32 + 2.22) - (1.67 + 2.67) = 7.50$$

为了算出浓水中的 pH 值，需要知道原水中的 CO₂ 浓度，把公式 (4.3) 变换一下，可算出原水中的 CO₂ 的浓度。

$$[\text{CO}_2] = 140 \div 10^{8-6.3} = 2.79$$

浓水侧 pH 值可通过下式计算：

$$pH = \log_{10} (140 \times 3.33) / 2.79 + 6.3 = 8.52$$

$$LSI = pH - pH_s = 8.52 - 7.50 = 1.02$$

于是我们可以得到计算结果 LSI 等于 1.02。因为大于 0，因此该系统会发生结垢现象。

CCPP 指碳酸钙沉淀势，它与其它饱和指数如 Langelier, Stiff&Davis 和 Ryzner 等不同，只表明 CaCO₃ 的沉积或溶解。它不能表明 CaCO₃ 多少含量时会沉积或溶解。它表示水中 CaCO₃ 沉积或溶解的趋势。这种方法更关注 CaCO₃ 沉积和溶解的水质问题。

CCPP 是指。它以 mg/LCaCO₃ 为单位。在平衡状态下，水中 CaCO₃ 饱和，CCPP 值是 0。如果水中 CaCO₃ 过饱和，CCPP 是正值；如果是不饱和的，CCPP 是负值。

如果没加阻垢剂，RO 浓水中的 CCPP 应该是负值。加合适阻垢剂后可以允许更高值。

海德能模拟软件 IMSDesign 中，CCPP 的高限值为 850 mg/LCaCO₃。

4.1.3 阻垢剂

有许多厂商在供应各种各样用于反渗透和纳滤系统性能改善的阻垢剂和分散剂。阻垢剂是一系列用于阻

止结晶矿物盐的沉淀和结垢形成的化学药剂。大多数阻垢剂是一些专用有机合成聚合物（比如聚丙烯酸、羧酸、聚马来酸、有机金属磷酸盐、聚膦酸盐、膦酸盐、阴离子聚合物等），这些聚合物的分子量在 2,000 – 10,000 道尔顿不等。

选择阻垢剂时，要确认其与反渗透膜是兼容的，不兼容药剂会造成膜的不可逆损坏。

阻垢剂阻碍了 RO 进水和浓水中盐结晶的生长，因而可以容许难溶盐超过饱和溶解度。阻垢剂的使用可代替加酸，也可以配合加酸使用防止碳酸钙垢。

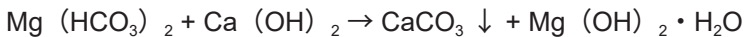
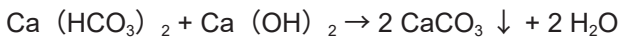
除碳酸盐以外，很多其他无机盐同样具有较低的饱和溶解度。在反渗透系统中经常遇到的有：硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶、一些磷酸盐以及部分金属的氢氧化物，甚至还有硅。这些物质需要有针对性采用不同的专用阻垢剂。

注意：4.1.3 部分对阻垢剂的描述仅供参考，由于实际工程中给水水质复杂、工程设计以及配置不同，选择阻垢剂的依据也会有所不同。强烈建议在选择阻垢剂前与药剂制造商联络，并提供水质数据、反渗透设计方案和所选择的膜型号，通过药剂制造商提供的软件计算以获得恰当的阻垢剂类型以及投加剂量。

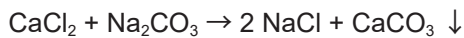
4.1.4 水的软化

含有钙、镁等硬度成分的水作为锅炉或者冷却水使用时，硬度成分会在传热面或管线内侧沉淀。可以采用絮凝、沉淀、过滤、化学软化或者离子交换等方法对水进行软化。

石灰软化法是通过添加氢氧化钙而起到降低硬度的目的。



非碳酸硬度通过添加碳酸钠可以起到降低的作用：



石灰软化工艺还可以降低硅的浓度。添加铝酸或者三氯化铁，在沉淀物中会含有碳酸钙、硅酸、氧化铝和铁的混合物。采用 60 – 70 °C 的高温石灰脱硅酸工艺，加入石灰和氧化镁，可以把硅酸浓度降低到 1 mg/L 以下。而且通过石灰软化处理还可以明显的降低钡、锶以及部分有机物。

4.1.5 回收率

反渗透以及纳滤系统的回收率和原水中溶解物质的浓缩倍率有直接关系，回收率 50% 的系统，浓缩倍数是 2 倍；回收率 75 % 时，浓缩 4 倍；回收率 80 % 时，则浓缩 5 倍；回收率达到 90 % 时，相当于浓缩 10 倍。膜系统内由于浓差极化现象的存在，膜表面的料液含盐量会变得更高。因此，原水由于被浓缩，膜表面的污染会比想象中发生的更快，一般回收率在反渗透 / 纳滤工艺中设在 50 – 90 % 的左右。系统的运行条件、原水的特性状态等因素会影响回收率的确定，一旦选择过高的回收率，就会面临结垢的形成和急速的污染的风险。

4.2 胶体污染的防止

胶体是具有 1 纳米 (nm) 到 1 微米 (µm) 粒径，像粘土一样很难自然沉降的微粒子。在水中通常带负电。

因此胶体粒子间由于静电斥力的作用，不会发生聚合。

4.2.1 絮凝

絮凝是加入絮凝剂中和胶体粒子表面的电荷，使得胶体粒子间的排斥力变弱，最终导致微粒子之间变的更容易聚集。絮凝通过以下三个方式起作用：（1）胶体间的引力和反作用力；（2）粒子和粒子的接触、冲撞；（3）化学作用（金属氢氧化物的溶解度）。多数常用絮凝剂（如表 4.4 所示）与水中的碱成分反应易生成金属氢氧化物，如果加入絮凝剂的量过多，会导致生成的氢氧化物析出并对膜元件造成污染。

表 4.4 絮凝剂的种类以及添加 1mg/L 引起的水质变化

化学药剂名	分子量	有效 pH 值范围	氢氧化物的产生量, mg/L
硫酸铝 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, (8% as Al_2O_3)	666	6.0 – 8.5	0.234
三氯化铁 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, (38% as FeCl_3)	207.5	3.5 – 11.0	0.250
硫酸铁 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, (11% as Fe^{3+})	400	4.0 – 11.0	0.532
聚合氯化铝 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n \cdot \text{Cl}_{6-n}]_m$, (n = 5)	$174.5 \times m$	6.0 – 8.5	0.894

影响絮凝的因素，除了絮凝剂的注入量以外，还有 pH 值、搅拌条件、共存离子以及水温等。在实际设计中，必须预先对这些絮凝条件进行预测。最适合的条件要用测试器进行测试，由生成的絮凝体特性状态决定设计条件，当然最终还需要用实际的溶液来决定确切的絮凝条件。

4.2.2 介质过滤

按照过滤的速度可分为缓速过滤和急速过滤两大类，表 4.5 列出了不同过滤方式的不同特征。

表 4.5 介质过滤的特征

过滤的种类	缓速过滤	急速过滤
目的	去除细小的难溶物质	适合去除粒径为 0.1-50 微米的颗粒物
过滤速度	约 5 米 / 天	8-15 米 / 小时
过滤材料的层高	约 0.7-1.0 米	约 0.6-1.2 米
滤料的粒径	0.30-0.45 毫米	0.45-8 毫米
均等系数	<2.0	<1.7
过滤层的再生	阻力增加时，将表层取出进行清洗	反洗

介质过滤可以有效地去除反渗透和纳滤给水中的悬浮物，降低浊度和 SDI 值。仅靠絮凝、砂滤无法把原水中的粒子有效捕捉时，还可以配合使用絮凝沉淀和气浮组合。但是，添加过滤辅助药剂或者絮凝剂，有可能会对反渗透和纳滤膜污染。因此需要做相关实验，以评估药剂的添加是否对反渗透和纳滤系统有影响。

在选择滤速时，依据原水水质的不同可以有所变化。通常对于地下水水源，由于水中的胶体、悬浮物含量较少，可以选择较高的滤速；对于污染较严重的地表水，滤速的设定一定不能太高，以免对反渗透和纳滤系统造成严重污染（通过多年的实际经验，对于受污染的地表水，过滤速度应尽量小于 8 米 / 小时，有条件的可以接近 6 米 / 小时，最高也不要超过 10 米 / 小时）。

4.2.3 活性炭

活性炭可以用来吸附溶解性有机物以及游离氯和臭氧等氧化剂，用活性炭作为反渗透和纳滤膜系统的预处理已经被广泛使用。通常被采用的活性炭有两种类型：颗粒活性炭（Granular Activated Carbon，缩写：GAC）和粉末活性炭（Powdered Activated Carbon，缩写：PAC），它们各自的特征如下。

表 4.6 活性炭的特征

活性炭的种类	颗粒活性炭	粉末活性炭
使用方法	和介质过滤一样	添加到搅拌槽中与水混合
使用中的特点	可以再生，可长期连续运行	一次性投加不能再生，可随时改变加药量和品牌
经济上的特点	设备投入较大	设备简单，但须对废炭进行处理，长期连续运行成本较大

4.2.4 微滤和超滤

微滤（MF）和超滤（UF）是大规模应用的反渗透和纳滤预处理工艺。同絮凝、沉淀以及砂滤比较，其过滤的水质稳定、设备管理比较简单，也不会产生过滤残渣或絮凝污泥等废弃物。

作为预处理，微滤和超滤膜的使用几乎可以完全去除不溶解的物质，降低颗粒物的污染风险，使得反渗透的设计水通量可以适当增加约 10 – 20 %。但是微滤和超滤也不能包治百病，并非采用了微滤和超滤就可以排除所有对反渗透和纳滤产生污染的物质。这一方面是由于微滤以及用于反渗透和纳滤预处理的超滤膜都属于筛分过滤¹，过滤孔径大约在 0.01 – 0.1 微米之间，虽然大部分不溶解的物质都会被截留，但是很多溶解在水中的有机物同样会对反渗透和纳滤系统产生污染，而这恰恰是微滤和超滤预处理不能解决的。另一方面，微滤和超滤预处理系统经常要伴随着药剂的加入，例如：絮凝剂、助凝剂、氧化剂、酸和碱等，这些化学物质有可能在微滤和超滤的产水中存留，进而导致反渗透和纳滤膜的污染和劣化。其中尤其要注意的是絮凝剂和氧化剂，从目前大量的双膜法（MF/UF+RO）案例来看，大多数微滤和超滤系统会在线投加絮凝剂，种类以铁盐和铝盐为主，这是为了在原水中造成微絮凝以提高微滤和超滤的产水水质，部分絮凝剂未能充分反应并透过微滤和超滤膜进入产水侧，由于在产水水箱中有一定的停留时间，导致这些透过的絮凝剂发生二次絮凝，这对反渗透和纳滤膜会造成严重的污染。氧化剂的投加主要是为了杀灭水中的微生物，在微滤和超滤的反洗步骤中也经常使用，但是残留的氧化剂如果没有充分的还原，就会造成反渗透和纳滤膜的氧化，导致不可恢复的破坏。因此，在选择微滤和超滤作为预处理时，一定要严格控制药剂的投加量、严格按照微滤和超滤制造商提供的设计参数设计，虽然微滤和超滤系统自动化程度高、运行操作简单，但也同样要做好维护工作，确保系统稳定的运行。

4.2.5 保安过滤器

通过预处理的水在进入反渗透和纳滤系统之前通常会设置 5 μm 左右的保安过滤器，这是为了防止管路和中间水箱带入污染物。需要注意的是保安过滤器可能会成为微生物污染的发生源，保安过滤器滤芯需要根据给水及出水水质情况及时更换。

1 超滤的分离范围很宽，其截留分子量一般从 1 000 到 500 000 Daltons。用于反渗透和纳滤预处理的超滤的截留分子量一般为 100 000 – 500 000 Daltons，对应的孔径约为 0.02 – 0.05 μm。这样的精度可以去除水中全部不溶解的颗粒物和胶体物质，但很多溶解态的有机物可以透过这些超滤膜，从而到达产水侧对反渗透和纳滤膜产生污染。采用更小截留分子量的超滤膜虽然可以避免这些问题，但是由于减小截留分子量会导致产水通量下降，从而增加成本，在经济上尚不可行。超滤的截留分子量等概念以及分离机理相对于微滤更加复杂一些，相关论述请有兴趣的读者参阅相关书籍。

4.2.6 除铁和除锰

在有的井水中含有还原态的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。这种水在氧化后或者当水中的氢氧根超过 5 mg/L 时, Fe^{2+} 会转变为 Fe^{3+} , 生成胶体的氢氧化物。



铁比锰更容易造成反渗透和纳滤膜的污染。用反渗透系统来处理这样的水时, 重要的是不要接触空气。在进入反渗透装置前对原水进行氧化, 然后使用过滤器脱除, 也可以防止铁和锰带来的污染。对铁和锰的进水要求请参见表 4.2 的注 1。

4.3 生物污染的防止

4.3.1 微生物污染的特征

反渗透和纳滤系统给水中的微生物会在膜表面沉降、凝结形成一层生物膜。一般来说生物膜的厚度若超过了一定的限度就会形成生物污染。使得原水侧的通道阻力增大, 原水和浓水之间的压差增加。同时, 由于微生物膜阻挡, 系统运行的有效压力也会减少, 从而导致系统脱盐率的下降。以下这些消毒方法均含有氧化性物质, 适用于反渗透和纳滤系统前面的设备和管道。采用这些方法消毒后, 必须清洗干净所有管路, 确保没有氧化性物质之后, 给水才能流入反渗透和纳滤系统。

4.3.2 杀菌消毒

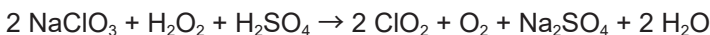
4.3.2.1 药品杀菌

① 氯消毒¹

用氯消毒的方式确实能起到效果, 在处理上也很容易实现, 对效果的确认可以用余氯残留量或者浓度测定。因为易于管理而被广泛运用。但氯会和黑腐质等溶解性有机物发生反应, 产生三卤代烷烃 (THM) 等对人体有害的副产物, 目前已经有了许多替代氯的消毒剂。

② 二氧化氯消毒

二氧化氯 (ClO_2) 作为消毒剂使用越来越广泛, 由于其物理、化学性质上的不稳定性使其无法贮藏, 因此都在现场通过反应生成 ClO_2 并直接使用, 反应大都遵循以下方程式。



通常 ClO_2 的注入量约在 0.6 – 2.0 mg/L 以下。和氯的使用相比, ClO_2 的消毒效果是氯的 1/10 – 1/2 左右。

③ 氯氨消毒

氯氨在市场上没有单独销售, 一般采用在原水中同时注入氨氮和氯, 在某些氨氮含量较高的水体中可以直注入氯, 生成氯氨。用氯氨消毒时, 不会生成过多的类似于 THM 的有害物质, 比较安全。

④ 臭氧消毒

被臭氧 (O_3) 处理过的水, 如果含有溴化物则会生成次溴酸根离子 (BrO^-), 进而生成溴酸离子根 (BrO_3^-)。

¹ 这里的氯是指余氯, 也就是游离氯或自由氯, 通常为 +1 价。它不同于氯离子 (Cl^-) 中 -1 价的氯。 Cl^- 没有氧化性。余氯则不同, 它具有很强的氧化性, 当芳香聚酰胺反渗透和纳滤膜的给水中含有它时, 会不可恢复的破坏分离层, 这时必须在反渗透纳滤系统前投加还原剂, 最常见的还原剂是亚硫酸氢钠 (SBS)。

BrO_3^- 被确认有致癌性，为回避风险不推荐使用臭氧杀菌¹。

4.3.2.2 紫外线杀菌

和使用氯等的药剂杀菌不同，采用紫外线杀菌完全没有药剂残留，也没有副产物的生成。消毒效果会依据作用对象的不同而不同。采用 $\text{UV}_{253.7}$ 在 $1 - 21 \text{ mJ/cm}^2$ 的照射剂量下可以进行细菌消毒²（90 % 不活化）。

4.4 有机污染的防止

芳香族聚酰胺反渗透复合膜是含有苯环的有机物，通常显负电性。带正电荷的有机物即使在低浓度时，也会吸附在膜的表面造成水通量的急剧下降³。有机物污染的特征一般用肉眼很难判断。用高感度的傅立叶红外光谱（FT - IR）分析难以判断时，可以采用 Zeta 电位测试法帮助判断膜表面吸附情况。表面活性剂中的非离子型和两性的物质对膜性能的影响也非常严重。通常的药剂清洗很难使膜性能恢复。平常使用的家用洗洁剂因含有表面活性剂，在装填膜元件时禁止作为润滑剂使用。油脂类物质、部分天然有机物等也会对膜元件造成严重的污染，需在反渗透和纳滤系统的预处理过程中尽量去除干净。

4.5 膜劣化的防止

膜的劣化，主要是受物理或化学作用发生不可逆的细微构造或分子构造变化，导致膜性能下降的现象。

4.5.1 物理劣化

已知物理劣化的显著事例是从水泵发出的超声波会造成膜破损（脱盐率下降），超过允许的压力或超过上限温度（45 °C）的运行，也都会造成膜劣化导致膜性能下降。

4.5.2 化学劣化

化学劣化就是指反渗透和纳滤膜受氧化剂影响，芳香族聚酰胺的聚合链被切断，或者因过量酸、碱等药剂清洗，导致膜分离性能的衰减。运行时应禁止氧化剂进入膜系统，并注意清洗 pH 值不超过该膜元件规定的范围。

1 只有在水中存在溴化物时才会出现这类问题，通常在反渗透和纳滤的产水中投加 O_3 不会造成这类风险或风险很小。

2 炭疽菌的芽孢为例外，剂量应为 55 mJ/cm^2 。

3 这时应该采用美国海德能公司制造的 LFC® 系列电中性反渗透膜元件，避免这类吸附污染。

第五章 反渗透和纳滤系统的设计

反渗透和纳滤系统通常包含预处理设备、反渗透 / 纳滤设备和后处理设备。设置预处理部分的目的是调整原水的水质使其符合反渗透和纳滤系统的进水水质要求。后处理工序的目的有两个，一是调节反渗透和纳滤的产水成分使其符合使用目的，二是使浓水符合排放标准。

在设计反渗透和纳滤系统时，正确掌握原水水质和对产水的要求是最基本的要素。对各个装置的设计进行优化组合是保证系统的正常运行必不可少的重要环节。本章针对反渗透和纳滤系统的设计进行论述。

5.1 系统配置

5.1.1 概述

在反渗透和纳滤系统的设计中，（1）膜元件型号的选择；（2）水通量选择（单位膜面积的产水量，GFD 或 LMH）；以及（3）回收率，都是重要的事项。一般尽可能设计高的回收率，这样可以降低供给水的量，减少预处理的成本。但是，系统的回收率设计高时会有以下的不利因素需要考虑。

- 结垢的风险增大，需要添加阻垢剂；
- 产水的水质下降；
- 运行操作压力增高，泵和相关设备的费用增加。

产水量和回收率的设计一定要符合安全标准。一般建议要有一定的设计弹性。使用海德能公司的膜元件时，请参看附录 3 海德能公司反渗透和纳滤膜元件设计导则。

系统的运行方式一般分为连续操作和批式操作两种。批式处理是指储存一定量的进水，一定期间内处理产水和浓水，一般在小规模浓缩工程和水量小或连续供水不足场合被采用。连续操作是设定一定的回收率和产水量，基本上以一定的操作压力进行连续地分离处理产水和浓水，大规模的反渗透和纳滤装置都采用连续过滤。

5.1.2 单元件系统

单元件系统是最小的反渗透或纳滤系统，虽然只包含一支膜元件，但是配套设备却很完整。因此熟悉了解单元件系统的结构和设计，对理解大系统的设计是十分有帮助的。图 5.1 所示为一个单一膜元件的系统。控制适当的给水范围（最大给水流量和最小浓水流量），防止由于浓差极化所引起的水通量减少和膜污染非常重要。由于该系统仅采用一支膜元件，而设计要求单支 40 英寸长的膜元件浓水排放量与产水量比的最小值为 5:1（约相当于 16.7% 的回收率），因此单一膜元件系统很难达到较高的系统回收率。为了提高回收率，系统流出的浓水的一部分可以返回到给水处，如图 5.1 中的第 5 点位置。采用部分浓水回流的方式可以增加回收率（一般可增加到 50 %），但是由于有部分浓水返回到进水，会导致产水的水质下降。

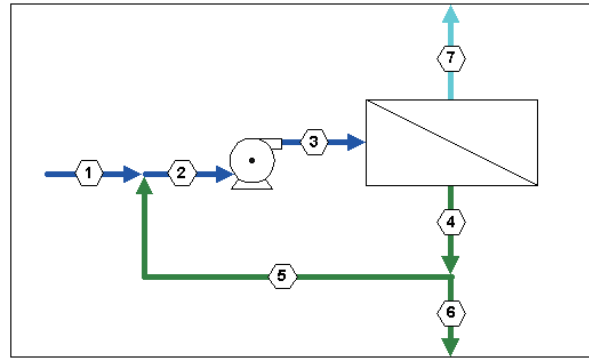


图 5.1 单元件系统部分浓水循环示意图

5.1.3 单段系统的排列

把单支膜元件并联起来排列就形成了单段式系统。单段系统中包含两个以上的膜元件。单段系统排列如图 5.2。单段系统的排列和单元件系统的排列意义相同，系统的回收率一般在 15 – 50 % 之间。为了提高回收率，可以在每一个压力容器内串联更多的膜元件。表 5.1 中显示串连膜元件的数量和回收率之间的关系。

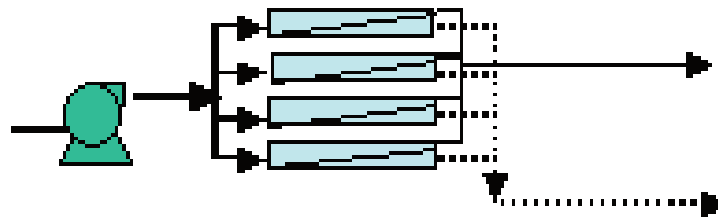


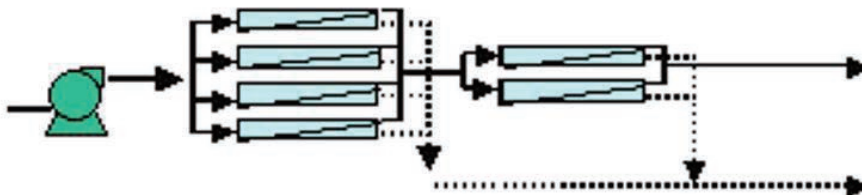
图 5.2 单段系统排列示意图

表 5.1 膜元件串连数与系统回收率

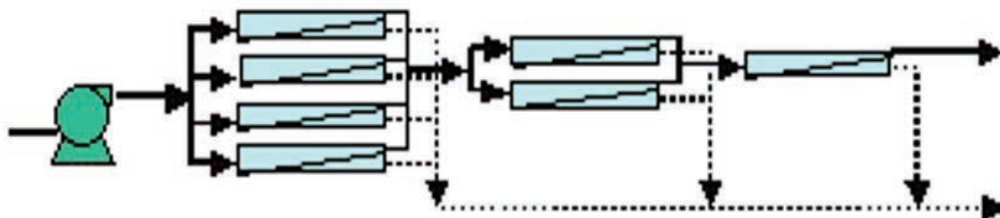
膜元件串连数量	1	2	4	6	8	12	18
回收率, %	18	29	46	59	68	80	90

5.1.4 多段系统的排列

当要求系统的回收率高于 50 % 时，可以采用多段系统。多段系统是指第一段的浓水作为第二段的进水，



第二段的浓水作为第三段的进水，以此类推。每段的进水一部分变成产水，后一段的进水流量会减少，含盐量会升高，所以后段的膜元件数量要比上一段的膜元件数量少，以保证正常的进水流量。一般的排列方式是 2:1 或 4:2:1。通常，两段系统可以把回收率做到 50 – 75 %，三段系统回收率做到 75 – 90 %¹。



二段排列：回收率 50 – 75%

三段排列：回收率 75 – 90%

图 5.3 多段系统排列示意图

在多段系统中，浓水侧的渗透压力不断升高，有时会发生净驱动力（NDP）不足的现象。造成前段产水和后段产水不均衡。这时有三个解决方法：

- 在每个段间加增压泵，以提高后段的驱动力；
- 在第一、第二段产水侧设置节流阀门，如图 5.4 所示。通过增加产水压力的方式，降低前段产水量，保持整体有效压力（NDP）的均衡。采用这个方法时，系统停止运行时有可能造成背压（产水侧压力 > 进水侧压力）。在设计以及操作时必须谨慎处理；
- 前后各段采用不同特性水通量的膜元件。前段采用特性水通量小的膜元件，例如：PROC10 或 CPA3-LD，甚至 SWC™ 系列海水淡化膜元件，人为降低前段的产水量，后段采用特性水通量比较高的膜元件，例如：ESPA™ 系列，以保证产水量。

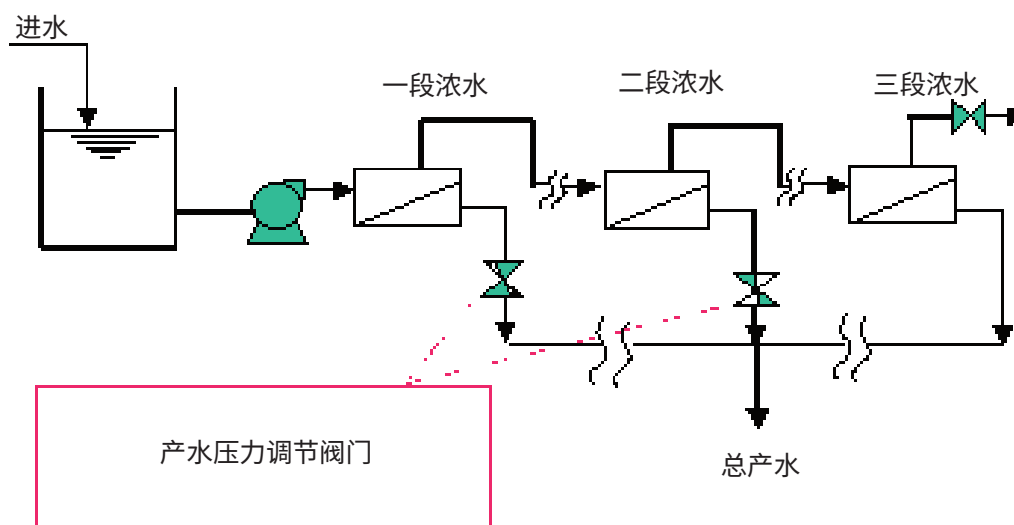


图 5.4 多段系统示意图

¹ 系统的回收率还与给水水质以及给水温度有关，这里提到的回收率数据必须与给水水质和水温综合考虑，以免发生膜污染。

5.1.5 多级系统

在一些应用中，单级反渗透的产水水质无法满足用水的要求，为了尽可能的降低产水含盐量，前一级反渗透的产水作为下一级反渗透的进水被称为多级反渗透系统。设计多级反渗透系统时，根据产水水质的要求可以考虑第一级的产水全部进入第二级或部分进入第二级反渗透系统。如图 5.5 所示的海水淡化系统中，第一级中采用海水淡化反渗透膜元件 SWC® 系列，后端高浓度的产水作为第二级低压型 ESPA® 膜的进水，经过二级处理的产水和第一级前段低浓度的产水进行混合。第二级反渗透的浓水可以循环回第一级反渗透系统进水中。第二级反渗透浓水中的含盐量通常比第一级进水的含盐量还要低，所以将第二级浓水返回到第一级进水会降低进水含盐量，增加整体的回收率。这就是分流式部分二级设计¹。

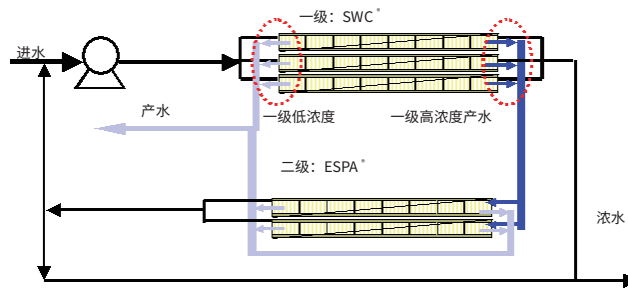


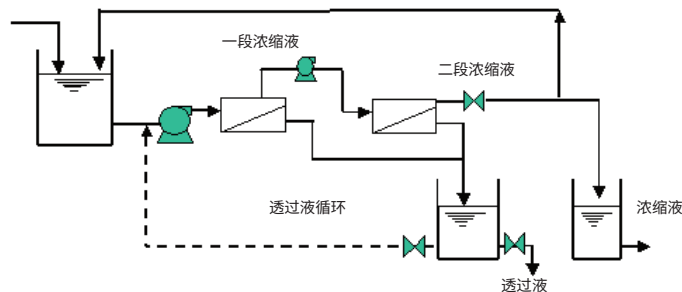
图 5.5 双级海水淡化处理系统示意图

与第一级不同，在第二级反渗透系统的设计中，还应该注意以下几点：

- 选择大通量的超低压反渗透膜元件，如：ESPA2 和 ESPA2 MAX；
- 第二级反渗透在设计时可以选择更高的水通量，一般一支 8 英寸的膜元件可以设计产水 1.5 – 2.0 m³/h，即：40 – 54 LMH；
- 在第二级反渗透中，浓差极化指数 (β) 最高可以达到 1.70；
- 第二级反渗透系统的排列最好接近 3:1；
- 回收率应大于等于 85 %，最好能达到 90 %。

5.1.6 采用批式操作的浓缩循环系统

茶叶、果汁和制药等工业，常以浓缩为目的。在设计反渗透和纳滤系统时，要考虑处理量 and 处理时间问题。如图 5.6 所示，以浓缩为目的的系统，批式处理比连续处理要多。采用批式处理时，被处理液的浓水以一定的流量循环回原液槽中，循环一定时间后，原液中的浓度会上升，随着浓缩倍率的增大，渗透压也会显著的上升。所以要掌握压力的调整和膜污染的情况。设计时要考虑原液温度的控制、腐蚀以及清洗杀菌的方法等。



¹ 分流式部分二级设计是海德能公司的专利，如需采用请联络海德能公司驻华代表机构。

5.2 系统设计步骤

为了有效发挥反渗透系统的性能，需要准确了解给水水质、用水点对产水水质和水量的要求，参考预处理和后处理工艺，以达到设计上的最优化。下面讲述的反渗透系统设计建立在进水水质符合反渗透系统进水要求的前提下。

5.2.1 水源

掌握水源的种类和水质情况以及水质变动的情况。水源大致可分为地表水（河川、湖泊和水库），地下水（井水），废水（工业废水和市政污水）和海水（直接取水和打井取水）。

5.2.2 膜元件的选择

根据原水的含盐量、进水水质的情况和对产水水质的要求，一般将膜元件分为五大类。苦咸水脱盐、超低压、抗污染、纳滤和海水淡化。如何选择膜元件请参见附录 2 膜元件的选择方法和依据。

5.2.3 平均水通量和回收率的确定

根据进水水质和对产水水质的不同要求，决定单位面积的产水通量 J （单位：GFD 或 LMH）和回收率（Rec.）。产水通量可以参照海德能公司设计导则（请参见附录 3）。回收率的设定要考虑原水中含有的难溶盐的析出极限值（溶度积请参见附录 5）。通常，单位面积产水量 J 和回收率 Rec. 设计的过高，发生膜污染的可能性会大大增加，造成产水量下降，清洗膜系统的频率增多，维护系统正常运行的费用增加。所以，进行设计系统时，在可能的条件下，希望采用有余量的产水通量和回收率。

5.2.4 理论膜元件数量

当确定了设计产水通量 J 和产水量 Q_p 值时，所需理论膜元件数量 N_e 可以按公式（5.1）计算。

$$N_e = \frac{Q_p}{J \times S} \quad (5.1)$$

式中： Q_p —— 产水量， m^3/h ；
 J —— 单位面积产水通量，LMH；
 S —— 膜元件面积， m^2 ；
 N_e —— 理论膜元件数，支。

5.2.5 压力容器的数量

决定了每支压力容器可装填膜元件的数量（ V_e ）后，通过膜元件的数量 N_e 除以 V_e 就可以得到所需压力容器的数量（ N_v ）。

$$N_v = \frac{N_e}{V_e} \quad (5.2)$$

5.2.6 膜元件的排列——理论段数

根据设计的回收率按前节中介绍的内容（请参见 5.1.3 和 5.1.4）设定理论段数和每段的压力容器排列。通常反渗透系统排列方式以 2:1 的近似比例多为。让我们通过下面的例子来熟悉一下计算的方式。

例：产水水量为 100 m³/h，设计通量为 22 LMH，膜元件面积为 37.2 m²，问需要如何排列反渗透系统。

解：按公式（5.1）计算理论膜元件数量

$$\text{理论膜元件数量, } N_e = \frac{100 \times 10^3}{22 \times 37.2} = 122.2 \approx 123$$

$$\text{压力容器数量（按标准 6 芯装膜壳计算）, } N_v = \frac{123}{6} = 20.5 \approx 21$$

各段压力容器的数量的决定，反渗透系统以 2:1 方式排列时， $\frac{21}{2+1} = 7$ ，膜元件以 14:7 的方式排列。每个压力容器 6 支 8 英寸膜元件，总数量为 126 支。

若反渗透系统以 4:2:1 方式排列，则 $\frac{21}{4+2+1} = 3$ ，取整则可以排列为 12:6:3，每个压力容器 6 支 8 英寸膜元件，总数量为 126 支。

以上的初步计算结果可以输入设计软件 IMSDesign® 进行验证和评估。

5.2.7 系统的优化

根据设定的单位面积产水通量、回收率、水温变动范围、研究讨论膜组件的排列方式，设计计算压力、流量。这时使用海德能公司提供的反渗透云设计软件 IMSDesign® (<https://www.imsdesign.com/>) 可以很方便的帮助客户完成这个任务。

5.2.8 系统的性能

5.2.8.1 压力和渗透压在系统中的变化

原水通过高压泵进入膜系统，会有压力损失，进水操作压力 P_f 随着水流的方向不断降低。同时原水透过膜元件不断有产水产出，进水被浓缩，原水浓度不断升高，产水侧的渗透压不断增大，净驱动力（NDP）降低。

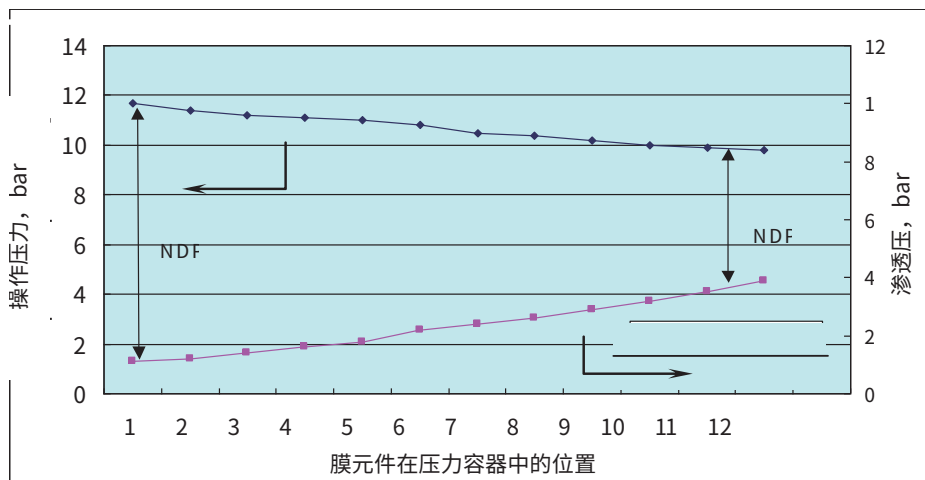


图 5.7 膜元件在压力容器中的位置与进水操作压力和渗透压的变化示意图

5.2.8.2 产水流量和产水水质在系统中的变化

压力容器中的每支膜元件的性能由于所在位置的不同变化很大。如图 5.8 显示两段排列每支压力容器装有 6 支膜元件的情况，压力容器中膜元件的位置与产水量和产水水质变化的示意图。原水进入膜系统，原水透过膜元件不断有产水产出。进水被浓缩，原水浓度不断升高、渗透压增大、有效压力降低，膜元件的产水量沿着进水侧到浓水侧的顺序变小。由于原水浓度升高，产水中含盐的浓度也随之升高。

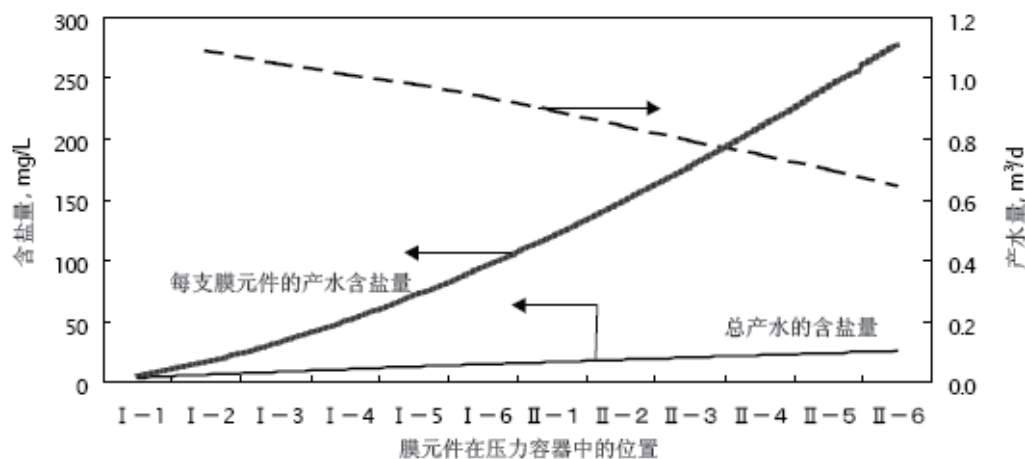


图 5.8 膜元件在压力容器中的位置与产水量和产水水质的相关示意图

5.2.8.3 回收率和进水流量的变化

膜元件的位置与进水流量和回收率的变化示意图显示在图 5.9 中。前一支膜元件的浓水作为下一支膜元件的进水，水量不断减少，回收率不断增加，设计计算时一定要注意每段最后一支膜元件的回收率不要超过规定回收率的极限值和不要低于最小浓水流量。

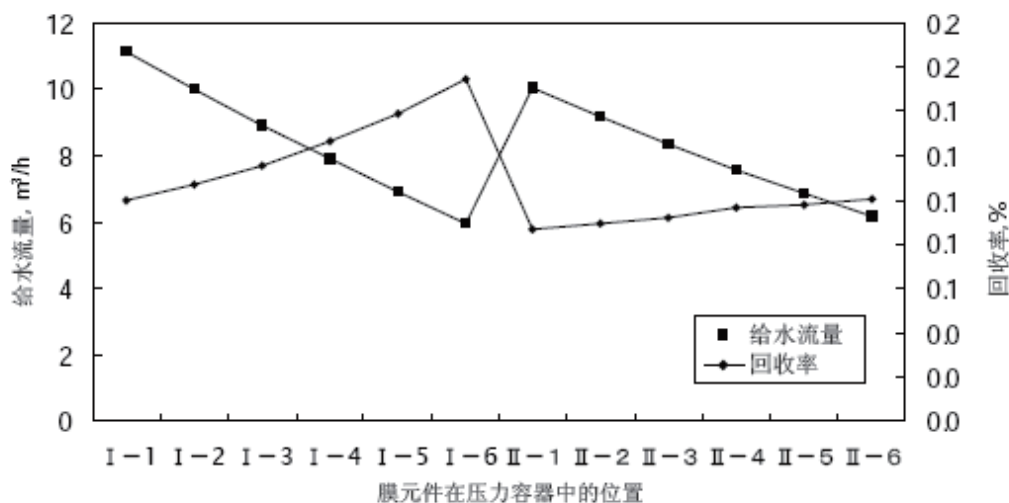


图 5.9 膜元件在压力容器中的位置与原水流量和回收率的相关示意图

5.3 海德能公司反渗透和纳滤膜元件设计指南

在使用海德能公司的膜元件设计反渗透系统时，一般应遵循以下建议的简明导则，如需要在超过本导则规定的情况下设计和使用时，请与海德能公司驻华代表机构联络以便提供特殊性建议。具体产品的详细设计导则请参看附录 3。

表 5.2 系统设计部分参数以及允许值¹

原水水源	RO 产水	地下水 (软化)	地表水 (MF/UF)	深井海水 (MF/UF)	表面海水 (传统)	废水 (MF/UF)
系统平均产水通量 GFD/LHM	21/36	16/27	16/27	10/17	8/14	12/20
首支膜最大产水通量 GFD/LHM	33/56	27/46	21/36	25/42	20/34	16/27
产水通量年衰减率, %	5	5	7	5	7	12
产水脱盐率年增加率, %	5	7	7	7	10	10
单支膜最大 β 值	1.50	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
单只压力容器 最大进水流量, m ³ /h	4"	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
	8"	17.0-20.0	17.0-20.0	17.0-20.0	17.0-20.0	17.0-20.0
单只压力容器 最低浓水流量, m ³ /h	4"	0.45	0.68	0.68	0.68	0.68
	8"	1.4	2.7	2.7	2.7	2.7
膜元件最大压力损失, MPa	每支 40 英寸长的膜元件为 0.07					

表 5.3 浓水中难溶盐的饱和极限表

难溶盐	饱和值 %
CaSO ₄	230
SrSO ₄	800
BaSO ₄	6 000
SiO ₂	100

表 5.4 饱和指数极限值

LSI 或 SDSI 值	条件
< - 0.2	不添加阻垢剂
- 0.2	添加六聚磷酸钠
+ 0.5 - + 1.8	添加有机阻垢剂
> 1.8	加酸使 pH 值小于 1.8 后再添加阻垢剂

5.4 系统设计软件 IMSDesign 云的使用方法

早在 2015 年，海德能公司推出了关于 NF 和 RO 膜的桌面版系统设计软件 IMSDesign™，而到现在该软件已全面被云版 IMSDesign 所替代。云版采用浏览器端访问模式，无需本地安装部署，可以全面兼容多操作系统与移动设备，打破了设备、地域的限制，满足了随时随地设计操作的需求，大幅降低软件使用与跨端部署的门槛。

¹ 这里只列出部分设计参数，全部的设计依据请参见附录 4。

另外 IMSDesign 云依托云端集中化维护与管理体制，可完成膜元件数据库、工艺模拟算法、功能模块的自动实时更新，确保用户始终使用最新版本，可以更精准适配新工艺、新膜型的设计需求，为用户提供更高效、安全、专业的一体化设计解决方案。

IMSDesign 云计算的主要功能：

- 采用用户友好界面，简单易学
- 可运行以前版本的设计文件，并保存在云里
- 可以从不同设备中进入到您的设计文件，无论是 Windows、macOS 、Android 操作系统
- RO、NF 集成技术设计文件
- 可输入进水压力来预测运行参数
- 支持七种语言：英语、汉语、日语、法语、西班牙语、葡萄牙语、俄语

当您要分享一个设计时，请勾选该设计文件，并用“分享”或“电邮”图标来发送。

以下对使用本软件的方法做简单介绍。



5.4.1 IMSDesign 云使用说明

①用户可通过 <http://www.hydranautics.cn/> 访问海德能公司官网，之后通过依次点击“解决方案 - 设计软件 - 访问 IMSD 云”进入设计软件界面，或直接登陆 www.imsdesign.com。



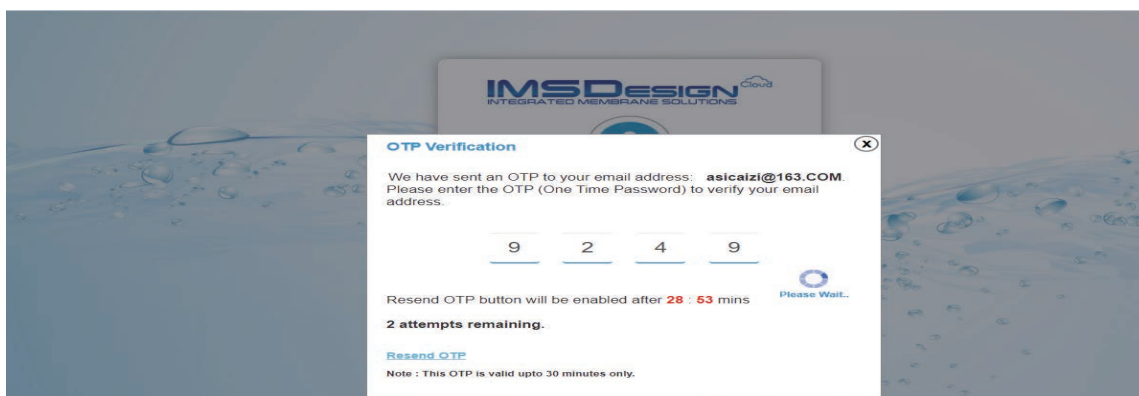
② 登录网址，先填入邮箱地址，再点击 Register Now。



③在弹出的对话框中选择 No。



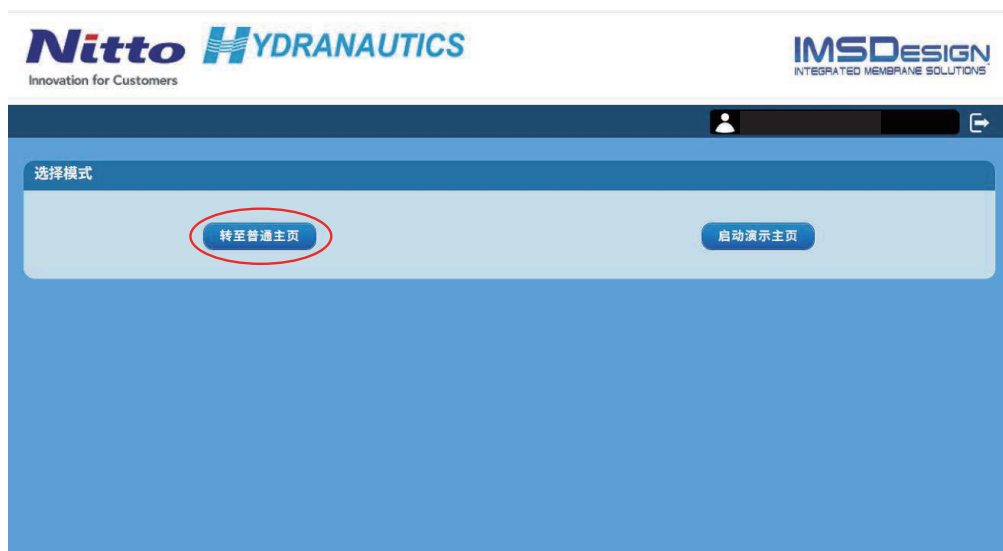
④填写注册用邮箱收到的验证码



⑤根据引导填写带“*”的信息完成注册流程。

Registration form for Nitto HYDRANAUTICS. The form includes fields for Email (yanhtsky@163.com), Program Name (Integrated Membrane Solution Design), Registration Key (ABAB6C8D-1A99-436B-8FEE-8C939EA83I), Password, Confirm Password, Name, Address, City, Industry (Electronics, LCD), and Position (Engineer). It also includes a Password Recovery Security Question section with four questions and answers. Red asterisks indicate required fields.

⑥注册成功后，回到登陆界面进行登陆，之后选择“转至普通主页”。



⑦首先在功能区点击“设置”中的“全球设定”。



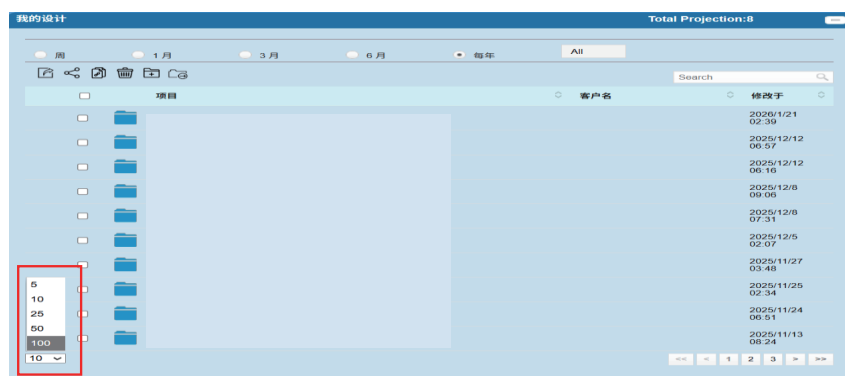
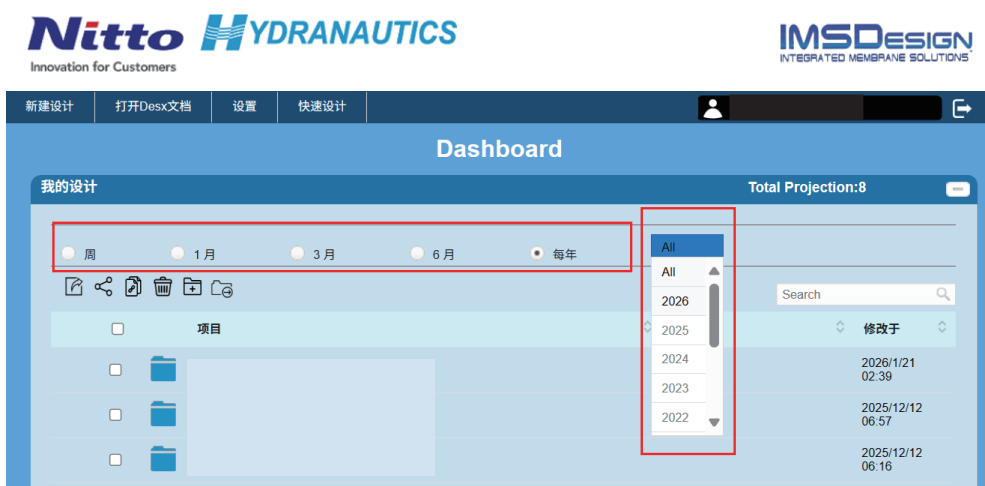
⑧选择默认语言和默认单位。



海德能公司目前已经提供具有七种语言的版本, 包括: 英语、中文、西班牙语、葡萄牙语、日语、法语和俄语。在这个界面请选择您需要的语言。在这里, 可以选择默认单位为公制或美制, 选择货币单位, 然后点击继续。以下的演示和介绍将采用中文版。

⑨在欢迎界面中, 可以点击“新建设计”开始进行新项目设计; 或者点击项目记录来打开一个原有项目设计。在本界面还可以根据项目创建时间进行筛选, 单页最多可显示 100 个文件。





⑩需要说明的是外部人员仅具有 RO 设计权限，下面让我们在“新建设计”中点击“RO”新建一个项目，最先出现的是水质分析输入界面。开始新设计时，输入项目名称、设计者、温度、水源种类等信息。

分析设计计算后处理

版本 : 239.95.1.3.\$

新建保存Custom Ions多重分析打开anax文件打开分析记录重置打印全屏

项目另存为保存分析结果

项目文件选择一个选择一个

项目 : Abu Dhabi 客户名 : 3rd RO 设计者 : Hydranautics 温度 : 35.0 ° C 水类型 : RO产水 预处理 : 传统 日期 : 12/12/2025

pH 6.13 CO2 0.532 mg/l NH3 0.00 mg/l 电导率 56.7 µS/cm @ 25.0 C 浊度 1.0 NTU Feed Softener

阳离子

	mg/l	mg/l CaCO3
Ca	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00
Na	5.91	12.85
K	0.00	0.00
NH4	0.00	0.00
Ba	0.000	0.00
Sr	0.000	0.00

总,meq/l 0.26

阴离子

	mg/l	mg/l CaCO3
CO3	0.000	0.000
HCO3	0.50	0.41
SO4	0.00	0.00
Cl	20.00	28.21
F	0.00	0.00
NO3	0.00	0.00
PO4	0.00	0.00
SiO2	0.00	
B	0.00	

总,meq/l 0.57

饱和度

计算的TDS	26.4 mg/l	CaSO4	0.0 %
渗透压	0.0 bar	BaSO4	0.0 %
Ca3(PO4)2 SI	0.00	SrSO4	0.0 %
CCPP	0.00 mg/l CaCO3	CaF2	0.0 %
LSI	0.0	SiO2	0.0 %

警告:

54% 阴阳离子不平衡, 超过10%极限。调整浓度, 或点击带下划线的离子来自动平衡。

按表中各项输入已知进水水质, 包括 pH 值, 各项阳、阴离子浓度。阴离子 CO_3^{2-} 和气体 CO_2 不需要输入, 当输入 HCO_3^- 和 pH 值后软件会自动根据平衡计算出两者的数值。表格中的阳、阴离子各项代表了绝大多数自然水体中的成分, 但系统还是允许分析报告中阴、阳离子有 10% 的差别。当输入的阴、阳离子毫克当量浓度 (meq/L) 差别大于 10% 时, 需要进行离子平衡。可用于平衡的阳离子有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ , 阴离子有 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。点击有下划线的相应离子, 系统会自动进行平衡。在实际应用时, 设计者应对水质中应该含有的成分有一定认知, 例如当采用生活饮用水标准的水质报告时, 可能没有 HCO_3^- 的分析, 此时如果阴离子少时应手动加入 HCO_3^- 以达到阳、阴离子的平衡, 以便于更接近真实的水质情况。

如果水质报告输入后阳、阴离子是平衡的, 或者是经过自动平衡后, 软件会自动计算出含盐量 TDS、总阳阴离子当量浓度、电导率、 CO_3^{2-} 、 CO_2 、各种难溶盐饱和度, LSI 指数、离子强度和渗透压等数据。

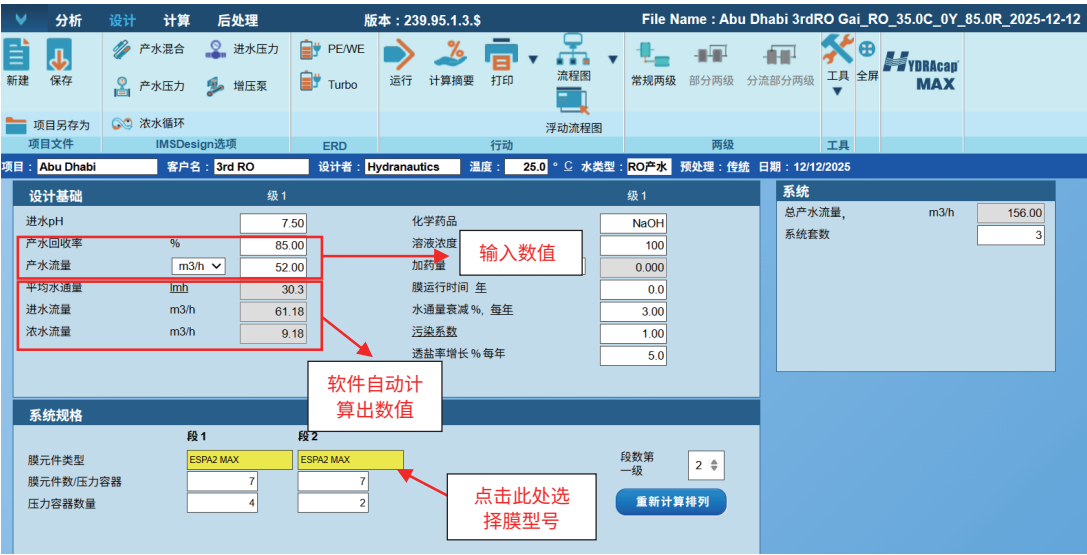


设计软件中允许输入自定义离子。当点击“自定义离子”后，可以输入一些其它离子浓度。18个阳离子备选，分别为 Ra^{2+} 、 U^{6+} 、 Cr^{3+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 As^{5+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mo^{2+} 、 Ag^{+} 、 Al^{3+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Li^{+} ，最多可以选3个；3个阴离子 Br^{-} 、 I^{-} 、 S^{2-} 中最多可以选2个。



软件增加了混合水质的功能。点击“多重分析”后，可以加入其它保存过的水质分析，然后输入各股水的流量，系统可以自动计算出混合水流的水质。

⑪点击“设计”菜单，进入以下所示的反渗透设计界面。项目、设计者、日期、pH 值、温度等信息自动出现在本页面中，需要手动选择水源类型和预处理方式。水通量衰减率、透盐率年增长率、污染系数等数值是软件默认值，无需改动。当遇到特殊项目需要输入非默认数值时，请向海德能公司技术人员进行咨询。



按照项目情况输入系统回收率和单套反渗透 / 纳滤系统产水量。因为反渗透 / 纳滤系统一般采用单元制，输入单套系统产水量可以直观确定相应高压泵参数。此时软件会自动计算出进水流量和浓水流量。根据项目要求选择段数、级数，然后点击“膜元件类型”。

在跳出的膜元件选择窗口选取合适的膜元件型号，并点击“确定”键。一般地，根据进水水源种类、产水水质要求等进行膜元件选型，请参见附录 2：膜元件的选择方法及依据。

系统会列出一些膜元件型号供选择，也可以点击“显示所有”或型号系列来进行筛选。每个膜型号后均会显示其公称产水量、脱盐率、尺寸、膜面积、进水格网厚度、测试压力等，帮助用户选定合适的膜型号。

膜选型

ESPA Membrane												Compare
	膜名称	公称产水量 (gpd)	脱盐率 (%)	描述	尺寸 (in X in)	膜面积 (Sq.Ft)	进水隔网厚度 (mil)	Test 压力 (psi)	进水 压力 (bar)	产水 TDS (mg/l)	Spec Sheet PDF	
C	ESPA2-4040	1900	99.6 BWRO Low Pressure High Rejection		4 X 40	85	28	150				
C	ESPA4-4040	2500	99.2 BWRO Lowest Pressure		4 X 40	85	28	100				
C	ESPA4-LD-4040	2350	99.2 BWRO Lowest Pressure		4 X 40	80	34	100				
C	YQS-4040	3000	99.0 BWRO Low Pressure		4 X 40	77	28	100				
C	ESPA1	12000	99.4 BWRO Low Pressure		8 X 40	400	31	150				
C	ESPA2	9000	99.6 BWRO Low Pressure High Rejection		8 X 40	400	31	150				
C	ESPA2 MAX	12000	99.6 BWRO Low Pressure High Rejection		8 X 40	440	28	150				
C	ESPA2-LD	10000	99.6 BWRO Low Pressure High Rejection Low		8 X 40	400	34	150				
C	ESPA2-LD MAX	12000	99.6 BWRO Low Pressure High Rejection Low		8 X 40	440	34	150				
C	ESPA4 MAX	13200	99.2 BWRO Lowest Pressure		8 X 40	440	28	100				
S	ESPA8	8600	99.4 BWRO Low Pressure Boron Removal		8 X 40	400	31	150				
C	PROC20	10500	99.5 BWRO Low Pressure High Rejection		8 X 40	400	34	150				

☐ Hybrid

重置 显示所有 4 Inch ESPA CPA ESNA SWC LFC PRO SANRO 确定

用户在选定膜型号并输入膜元件数 / 压力容器和压力容器数量后会自动计算出平均水通量数值。设计人员对膜系统排列可以进行多次调整，至达到预定的水通量数值为止。

设计基础

级 1		级 1	
进水pH	7.50	化学药品	NaOH
产水回收率 %	85.00	溶液浓度	100
产水流量 m ³ /h	52.00	加药量 mg/l	0.000
平均水通量 l/mh	30.3	膜运行时间 年	0.0
进水量 m ³ /h	61.18	水通量衰减 % 每年	3.00
浓水流量 m ³ /h	9.18	污染系数	1.00
		透盐率增长 % 每年	5.0

系统规格

	段 1	段 2
膜元件类型	ESPA2 MAX	ESPA2 MAX
膜元件数/压力容器	7	7
压力容器数量	4	2

根据系统规格自动计算出的平均水通量

重新计算排列

⑫点击“运行”按钮，会显示下面的计算结果界面。设计者可根据项目要求输入不同运行时间或不同温度，来模拟出不同运行条件下的系统情况。譬如，在“膜运行时间”中分别输入 1 年和 3 年，软件会根据水通量衰减率和透盐率年增长率自动计算出结果。输入不同温度时，产水量相同的情况下所需运行压力不同。一般地，可根据最恶劣运行条件为高压泵扬程提供参考。

计算结果

排列	压力容器数量	进水 (bar)	浓水 (bar)	进水 (m ³ /h)	浓水 (m ³ /h)	水通量 (l/mh)	最大水通量 (l/mh)	最大β值
1 - 1	4	8.1	5.4	15.29	5.51	34.1	41.4	1.19
1 - 2	2	5.4	3.6	11.03	4.58	22.6	27.3	1.16

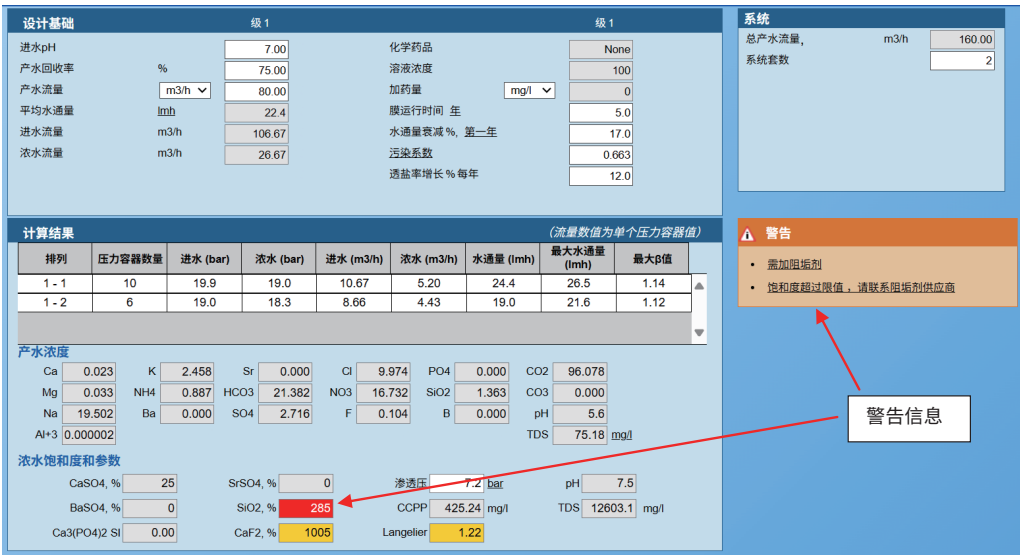
产水浓度

Ca	K	Sr	Cl	PO4	CO2
0.000	0.000	0.000	0.571	0.000	0.028
Mg	NH4	HCO3	NO3	SiO2	CO3
0.000	0.000	0.029	0.000	0.000	0.000
Na	Ba	SO4	F	B	pH
0.381	0.000	0.000	0.000	0.000	6.2
					TDS
					0.98 mg/l

当输入的条件和参数不符合要求时，系统参数栏会提供棕色或红色警告信息。表 5.5 中列出常见错误信息的原因和纠正方法。

表 5.5 常见的错误信息的原因和纠正方法

设计参数	错误原因	纠正方法
平均水通量	超过正常设计范围	增加膜元件数量
单支压力容器进水流量	超过正常进水流量范围	增加该段排列数量
单支压力容器浓水流量	低于最小浓水流量	减少该段排列数量
进水压力	进水压力过高	增加膜元件数量或改变膜型号
浓差极化因子 β 值	一级超过 1.20 或二级超过 1.70	调整排列方式或降低回收率
难溶性盐含量	难溶性盐含量超过溶解度饱和极限值	降低回收率或添加阻垢剂
LSI 或 CCP	超过极限值有结垢的风险	加酸调节 pH 值或添加阻垢剂



⑬软件还设有一些其它模拟功能，适合多样工艺设计。在需要输入数值的位置，会有红色闪烁几秒钟，提示进行相应输入。选择“产水混合”，输入一定混合流量，可以实现产水和进水勾兑；选择“产水压力”，输入产水压力值，可以模拟出产水有一定压力时系统参数；选择“浓水循环”，输入循环流量，可以将浓水循环回到进水，用于提高膜表面流速、降低膜回收率；选择“增压泵”，输入增压压力，可以改善高盐进水系统前后段产水通量分布不均问题。



⑭如果需要做两级系统设计，点击“常规两级”处，即可进行两级系统的模拟计算。第二级设计方式与第一级基本一致。如果需要做部分两级计算，在第二级产水流量处输入新数值，启动“部分两级”设计。在“部分两级”基础之上，点击“分流部分两级”，可以把第一级产水进行分流，让含盐量高的部分产水进入第二级处理，从而提高产水水质或降低第二级系统规模。软件默认为第二级浓水直接回流至第一级进水处。

⑮点击“流程图”或“打印”旁边的▼时，可以选择不同的离子出现在设计结果和流程图中。系统默认流程图在计算结果后面一起打印出来。



⑯保存设计文件时，点击“保存”，会出现一个建议的文件名：名字_温度_年限_回收率_日期。需要再次打开此设计文件时，只要双击该文档图标，即可自动打开该设计文件。

5.4.2 设计软件的其他附加功能

这部分功能包括：产水的后处理、能耗的计算、制水成本的估算、以及不同运行参数下的运行结果计算摘要。这些辅助功能可以帮助用户获取更多的有用信息。如有关于软件使用的任何疑问，请向海德能公司技术人员进行咨询。

5.5 RODataXL 使用说明

5.5.1 RODataXL 介绍

海德能公司提供反渗透系统运行数据管理和标准化程序。我们推荐您“标准化”您录入的运行数据来确定您的系统是否存在问题。“标准化”的电脑程序，如 RODataXL，可以用图表来表示标准化的产水量、脱盐率和从进水到浓水的压差。这些标准化的参数是某特定一天运行数据与第一天运行数据对比后计算出的。当主要的运行工况比如温度、进水 TDS、回收率和压力等有改变时可以做出调整。利用这种方法，可以甄别并解决与运行参数有关的性能衰减。

本标准化程序遵守 ASTM 标准 D4516-19 “反渗透性能数据标准化的标准实施规程”。

备注：准确的标准化数据可以通过以下方式获得：（1）使实际的系统操作数据的条件尽可能地与系统参考数据的条件接近；（2）采集准确数据，包括合适校正后采集数据。标准化数据的值并不由一套数据计算得出，而是在能反映一段时间内污染对系统造成的影响的趋势下分析得出的。

大部分情况下，如果 RO 系统在运行参数不变，不发生污堵，膜不受损的情况下可以稳定运行很长的时间。然而实际情况是，运行参数（比如温度、进水 TDS、产水流量、回收率）等会改变，而且膜元件进水通道的污堵也会发生。通常进水不仅是一个运行参数改变，因此确定 RO 膜系统是否按预期那样运行的情况更复杂。标准化程序的价值在于它可以重新计算系统在某一时间点时的即时表现并与参考数据比较。

标准化软件可以免费授权给用户使用，可以免费复制和分发给他人。但是本软件受版权保护，程序和源代码为海德能公司所有。

5.5.2 新建项目

当你第一次打开 RODataXL Excel 文档时，你需要：

- 选择显示单位为美制单位还是公制单位。显示单位之后不可以修改，所以请保存好原始数据。以下表格列出了公称单位：

参数	美制单位	公制单位
压力 (Pressure)	psi	bar
温度 (Temperature)	°C	°C
含盐量 (Salinity)	ppm	µS/cm
流量 (Flow)	gpm	m³/h
膜元件产水量	gpd	m³/d

- 选择语言 (Language)
- 选择系统的套数或段 (Trains or stages)
- 选择日期格式 (月 / 日 / 年 或者 日 / 月 / 年) Date Format
- 点击应用 (Apply)

Setup

Welcome to Hydranautics ROData Normalization Program for Reverse Osmosis Systems

HYDRANAUTICS
Nitto Group Company

Pressure: bar
Temperature: C
Salinity: uS
Flow: m3/h
Language: Chinese
Trains or Stages: 1
Date Format: 08/23/18

Apply

Version 8

5.5.3 参考数据

这将打开新建项目的系统参考数据的输入界面。一个项目的一套或一段只允许设置一套系统参考数据。

备注：该界面键入的数据对于计算标准化数据非常的重要，因为键入数据将作为未来参考数据的基准。

RO 系统应参照设计值达到一个稳定的操作水平，这一般在启动后的一到两天可以实现。

ROData

项目名称: Sample

列: 1 日期: 23-Aug-2018 时间: 8

参考数据

给水温度: 25 C
给水含盐量: 1500 uS
产水含盐量: 6 uS
产水背压: 1 bar

运行数据

浓水流量: 35.4 m3/h
产水流量: 6.3 m3/h
给水压力: 150 bar
浓水压力: 145.7 bar

Optional Data

给水pH: 7
SDI (15): 2
Turbidity: .03 NTU

膜元件选择

膜元件选择: CPA3-LD
膜元件数量 / 每支压力容器: 6
压力容器数量: 12

标准测试条件

膜面积(ft 2): 400
给水TDS(ppm): 1500
流量(gpd): 11000

脱盐率(%) : 99.7
温度校正: 2700
净驱动压: 206

加入数据

列：用数字区分套或段。你可以为项目设置任意数字的套或段，且每套或段都有自己的系统参考数据。

日期：利用下拉菜单键入数据或者手动输入。

时间：用 24 小时制输入数据录入开始的时间。

备注：下列参考数据的部分所列项目可以用来计算系统标准化产水量，标准化脱盐率，和标准化压差。在参考数据部分之后列出的元件部分的项目用于计算水传递系数和盐的传递系数。标准化产水量和标准化透盐率在大多数情况下是更好反映真实系统运行的指数，因为它们是基于现场真实的膜元件初始运行数据。

给水温度：输入 RO 进水的温度。允许的温度范围是 1-45°C。

备注：正确的进水温度对于生成有意义的标准化数据绝对是必要的，因为它对进水压力和产水水质有很大影响。

给水含盐量：输入 RO 进水含盐量。进水 TDS 以 mg/l 或 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 来表示。

产水含盐量：输入 RO 产水的含盐量。测量 RO 产水水质，以 mg/l 或 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 表示。产水含盐量的值必须比进水含盐量低。

产水压力：输入产水离开 RO 膜时的压力。美制单位是 psi 和公制单位是 bar。

备注：产水压力的读数很重要，因为它是需要从进水压力和浓水压力的差值中减去除来计算净驱动力的。净驱动力是克服渗透压和产水压力后使水透过膜的净进水压力。

浓水流量：输入 RO 的浓水流量。美制单位为 gpm，公制单位 m^3/h 。

产水流量：输入 RO 的产水流量。美制单位为 gpm，公制单位 m^3/h 。

备注：本程序进水流量是将浓水流量和产水流量加起来得出的。

进水压力：输入进入第一段 RO 膜的进水压力。美制单位为 psi，公制单位 bar。

浓水压力：输入浓水离开最后一段 RO 膜时的浓水压力。美制单位为 psi，公制单位 bar。

备注：在本程序中进水压力减去浓水压力可以得到压差 (ΔP)。在用户用压差测量仪来监控进水到浓水的压差时，建议输入进水压力测量仪读数，然后进水压力减去压差表读数得到的浓水压力可以由操作员输入。计算出的压差值增加说明进水隔网有污堵现象。

Optional Data(备选数据)：进水 pH、SDI、浊度为备选数据。这些数据并不会用在标准化计算里，但是，出于将来故障处理目的最好记录这些数据。

进水 pH：输入进入第一段 RO 的进水 pH。允许的 pH 值范围为 1 到 14。

SDI_{15} ：输入 RO 进水的 SDI_{15} 值。

浊度：输入浊度值，单位 NTU。

膜元件选择：从下拉菜单中选取膜型号。一旦膜元件被选中标准测试条件页面将自动填充。选中膜元件的标准测试条件不能改变。

膜元件数量 / 每支压力容器：输入每个膜壳的膜数量。通常一个膜壳最多可以装 8 支膜。

压力容器数量：输入整套或段的膜壳数量。系统会根据每个膜壳的膜元件数量、膜壳数量、单支膜的有效膜面积来计算系统水通量。

加入数据：通过点击加入数据选项，系统参考数据将被记录并且该项目新的套 / 段数据将被建立。一旦参考数据录入用户可继续输入系统运行数据。

继续添加数据可点击界面左上角的数据 entry 选项 (A1 格)。

5.5.4 标准化计算

计算单位：一旦某个参数的单位被选定，比如°C，那么为了得到正确的结果只能使用°C这个单位。当存在两种单位时，比如 gpm 或 m³/h，那么美制或者公制单位只能选择一种。

海德能 RODataXL 标准化程序的计算值在被检查之后就可以利用了。但是，用户应该意识到真正的标准化值并不是由一套数据计算得来的，而是从一段时间的标准化数据的趋势中分析得到的。

5.5.5 图表

用户可以选择阅览一系列的系统操作数据和标准化数据的图表。这些图表是按时间点自动生成的。如果某一天有超过一组数据，那么有最早时间值的一组数据将用于做图表。图表的数据点之间用直线连接。

图表类型包括：

- 产水 - 时间图：绘制了实际的产水流量，单位为 gpm 或 m³/h。
- 进水压力 - 时间图：绘制了实际的 RO 进水压力，单位为 psi 或 bar。
- 产水含盐量 - 时间图：绘制了实时的产水含盐量，单位为 mg/l 或 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。
- 透盐率 - 时间图：绘制了整个系统的透盐率百分比。计算值是用实际的产水含盐量除以进水和浓水的平均含盐量。平均进水含盐量可以根据系统的回收率估算出浓水含盐量并计算出进水和产水含盐量的算数平均数。

备注：此处的透盐率 % 不是简单的用产水含盐量除以进水含盐量。

- 标准化透盐率 - 时间图：绘制了标准化透盐率百分比相对于初始的系统参考值。
- 标准化产水流量 - 时间图：绘制了标准化产水流量（单位 gpm 或 m³/h）相对于初始的系统参考值。
- 标准化压差 - 时间图：绘制了标准进水 - 浓水的压差相对于初始的系统参考数据。标准化压差值反映了对于不同的进水和浓水量的压差改变的调整。
- 盐传质系数 - 时间图：该指标的核心意义在于量化盐分透过反渗透膜的速率，单位为 m/sec。作为膜元件的固有性能参数，其可实现不同应用场景下膜性能的标准化对比，有效规避现场实际操作条件差异带来的影响。进水的离子组成会对该系数产生显著影响，例如进水中二价离子（如硬度离子、硫酸根离子）含量升高时，盐传质系数会相应降低。
- 水传质系数 - 时间图：该指标的核心意义在于量化水透过膜的传递速率，以 m/sec-kPa 来表示。这一数值可实现不同应用场景下膜性能的标准化对比，不受现场实际操作条件差异的影响。

免责声明

海德能公司对 IMSDesign、RODataXL 程序及其配套说明参考资料，均不作出任何明示或默示的陈述与担保，包括但不限于默示的适销性及针对特定用途的适用性担保。在任何情况下，公司均不对因本软件、手册存在的错误或疏漏，服务中断，商业利润或预期利润损失，以及因使用本资料所引发的设备、性能相关直接损失与附带损失，承担任何责任。

5.6 系统构成的要素

5.6.1 高压泵

为了维持产水量、控制操作压力不超过允许极限值，就必须控制高压泵的出口压力。海德能公司的膜元件允许最大操作压力：PRO 系列的运行压力有三个等级，PRO-XR1 低压膜元件和 PRO-LF1 高压膜元件分别为 4.14MPa 和 8.27MPa，而 PRO-XP1 超高压膜元件的最大工作压力为 12.4MPa；ESPA™、CPA™、PRO™ 和 LFC™ 系列膜元件是 4.14MPa；SWC™ 系列是 8.27MPa。以下对使用的离心泵和高压柱塞泵的异同以及使用时的注意点作简要说明。

① 离心泵

离心泵适用于要求较低压力和较高流量的系统。2.0 Mpa 以下的低操作压力反渗透系统一般采用高压泵。使用具有恒转速电机的泵时，常在泵的出口管线上设置节流阀控制出口的流量和压力。对于进水温度变化显著的反渗透和纳滤系统，建议使用可变频调节电机转速的泵，以减少不必要的能量消耗。但是变频泵的价格要高一些。

② 高压柱塞泵

高压柱塞泵的动作原理是依靠固体壁的移动挤压方式，适用于需要高压、小流量的系统。5.0 Mpa 左右的海水淡化系统常采用这种类型的泵。由于柱塞泵的吐出压力过高，不能使用节流阀控制柱塞泵出口的流量和压力。压力和流量的调节依靠泵出口处设置的背压防止阀。一般柱塞泵自身设有背压防止阀，但是泵自身的防止阀按泵本身的压力设定的，一般要远远高于膜元件允许的最高压力。在泵的出口处安装安全泄压阀以防止过剩压力冲击反渗透膜。此外，如果泵本身没有安装压力缓冲装置，应该在出口处安装缓冲装置降低压力脉冲。

5.6.2 管路要求

① 材质和强度

管路要求选择耐腐蚀性强，可以承受阀门关闭时系统压力的材料。管路的设计压力 > 阀门关闭时系统压力 > 操作压力。一般的低压反渗透系统使用 SUS 304 以上规格的不锈钢。产水等低压管路一般使用 UPVC/PVC 材质。

② 管径

管路的直径大小的选择一定要避免在系统流量范围内产生过大压力损失。尤其是产水的管路直径大小更重要，产水管路过细，容易产生产水背压损坏膜元件。流量和最大流速与管路内径的关系列于表 5.6。

表 5.6 流量和最大流速与管路内径的关系

流量, GPM	管路内径, 英寸	最大线速度, m/s
0 - 4	1/2	1.98
4 - 10	3/4	2.19
10 - 20	1	2.50
20 - 50	1-1/2	2.77
50 - 100	2	3.11
100 - 175	2-1/2	3.47
175 - 300	3	4.15

5.6.3 水箱

为了防止水在水箱中有积留现象，要考虑水箱入口和出口的位置。小型水箱不用考虑强度问题，可以使用聚乙烯 (PE) 和玻璃钢 (FRP) 等耐腐蚀的塑料材质。水箱设置在室外时，有必要考虑水箱内微生物滋生等二次污染问题，建议选用遮光材质。大型水箱必须考虑强度问题，一般选用金属材质。

5.6.4 传感器

为了保护反渗透系统以及膜元件，通常采用各种类型的传感器。比如：

- 给水箱液位传感器：为了防止给水泵空转，给水水箱要设置液位计量开关，当液面过低时，给水泵会自动停止。
- 压力传感器：为了防止异常高压对膜元件的伤害，设置压力传感器，当进水压力过高时高压泵停止工作。
- PH 值传感器：为了防止结垢，设置进水 PH 值传感器。

5.6.5 药剂

5.6.5.1 药剂注入点

药剂注入点的位置一般选在泵的入口等混合效果较好的地方。需投加多种药剂时，注入点间隔最小应在一米以上。为了加强药剂的混合，可以设置混合器。

5.6.5.2 药剂使用的注意事项

① 阻垢剂、分散剂

采用聚丙烯酸类阻垢剂时要特别小心，在铁含量较高时可能会引起膜污染。这种污染会增加膜的操作压力，遇到这类污染要进行酸洗。如果在预处理中使用了阳离子混凝剂或助凝剂，在使用阴离子性阻垢剂时要特别注意。两者会产生一种粘稠的粘性污染物，污染会造成操作压力增加，而且这种污染物清洗非常困难。过量投加阻垢剂 / 分散剂会导致在膜面上形成沉积，造成新的污染问题。在设备停机时一定要将阻垢剂或分散剂彻底冲洗出来，否则会留在膜上产生污染问题。在用 RO 进水进行低压冲洗时要停止向系统注入阻垢剂或分散剂。

注入阻垢剂 / 分散剂的加药泵要调到较高注入频率，建议最少 5 秒钟一次。阻垢剂 / 分散剂的典型添加量为 2-5mg/L。为了让加药泵以适宜工况工作，需要对药剂进行稀释。每次配制的阻垢剂稀释液使用量建议为 7 — 10 天左右。

② 亚硫酸氢钠 (SBS)

亚硫酸氢钠 (SBS) 或焦亚硫酸钠是反渗透和纳滤系统常用的还原剂。市售 SBS 和焦亚硫酸钠一般为固体粉末，配制时有一定刺激气味。SBS 溶液在空气中不稳定，会与氧气发生反应，所以推荐 2% 的溶液的使用期为 3-7 天，10% 以下的溶液使用期为 7-14 天。理论上，1.4mg/L 的 SBS (或 0.7mg/L 焦亚硫酸钠) 能够还原 1.0mg/L 的活性氯。设计时考虑到安全系数，设定为每 1.0mg/L 余氯投加 1.8-3.0mg/L SBS。当系统既注入酸，也注入 SBS 时，SBS 的注入点应该位于加酸点之后。这是因为如果在加入 SBS 加入酸，会产生亚硫酸气体。

SBS 的溶解度随温度降低而降低。如图 5.10 所示，当 SBS 浓度为 34% 时，如果温度低于 12°C 会结晶；

而 SBS 浓度为 11% 时, 即使在 0℃ 也不会结晶。因此在低温时需将 SBS 稀释到不至于结晶的浓度, 以避免 SBS 在加药泵和加药管路内部结晶而堵塞, 使实际加药量降低。

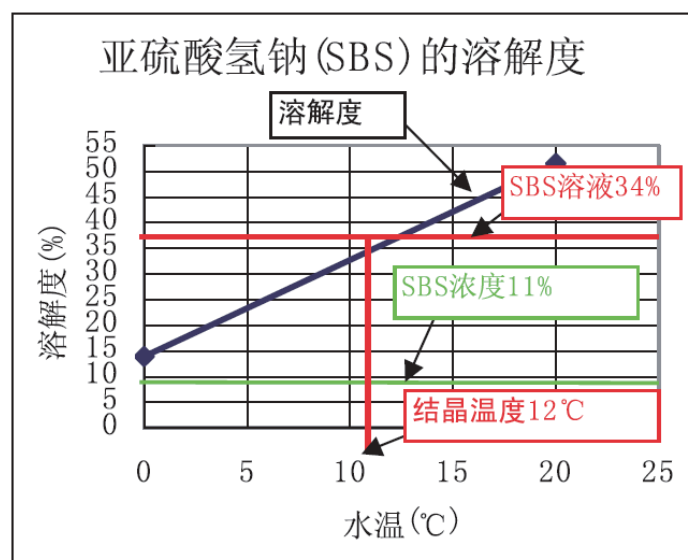


图 5.10 亚硫酸氢钠的溶解度和温度的关系

有研究表明过量投加 SBS 能导致聚酰胺膜氧化。Sommariva et al. 曾报告某厂使用 SBS 来还原氧化物质时聚酰胺膜元件发生了氧化 (Sommariva, C., et al. (2012). IDA J. 脱盐与水回用 4(2), 40-44)。他们得出过量投加 SBS 会导致膜元件快速氧化且脱盐率降低的结论。特别地, 他们发现除了过量的 SBS 之外, 还有高 pH 值和过渡金属的存在。因此, 用户应注意投加足够 SBS 来防止膜元件氧化, 但不能过量投加 SBS。

③ 次氯酸钠 (NaClO)

反渗透和纳滤进水中不能含有游离氯或其它氧化剂。即使很低的余氯或其它氧化剂浓度也会造成膜元件不可修复的氧化损坏。因此, 运行人员必须确保没有任何氧化剂进入 RO 系统。为避免膜元件被氧化, 海德能公司建议在 RO/NF 系统的进水处安装有 ORP 表计, 以便于随时监测氧化性物质的浓度。除了废水回用的项目中采用不高于 5mg/L 氯胺之外, ORP 的读数应一直低于 300mV; 或者为了保持稳定运行, 应在现场测试并确定没有氧化性物质的最高 ORP 值。如果 ORP 高于报警设定值, 运行人员应该接到报警信号, 并采取相应措施, 例如投加 SBS (亚硫酸氢钠) 或增加 SBS 的投加浓度。海德能推荐测试残余 SBS, 以确认没有余氯且减少 SBS 过量投加, 残余 SBS 目标值为 1-2mg/L。如果 ORP 超过最高点, 系统应立即停机, 直到 ORP 降至安全值以下后才能重新运行。请向系统集成商咨询其它去除膜系统进水中游离氯的方法。

根据进水种类和 pH 值的不同, ORP 值会变化, 例如下图。不同水在同样 pH 值时, ORP 值也可能不同。例如海水 pH 值 7 时, ORP 为 200 mV; 但 RO 产水 ORP 为 400 mV。在 pH5 时, 两种水的 ORP 值都更高。在现场设定 ORP 报警值时, 建议先验证余氯为 0 时的 ORP 值。

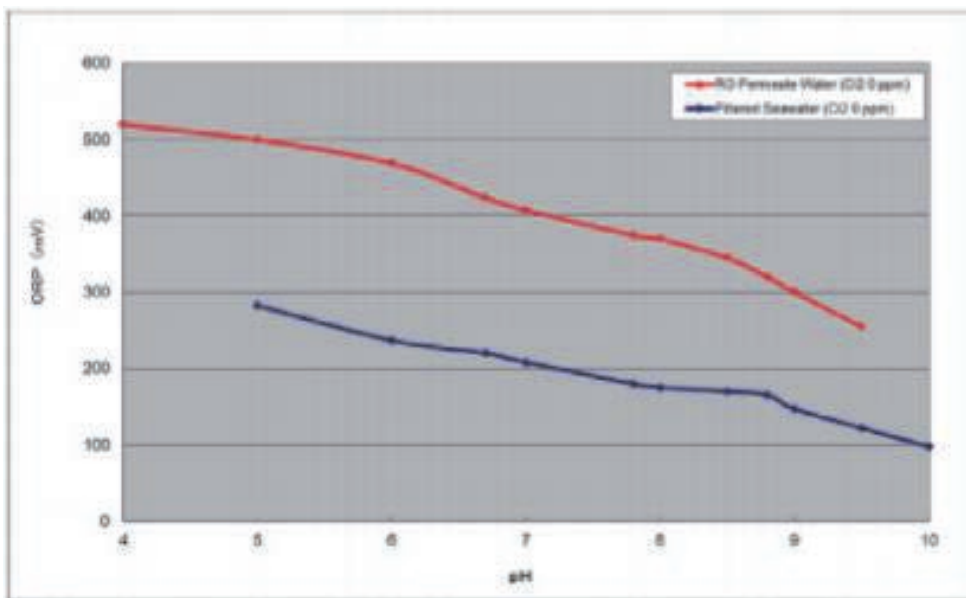


图 5.11 无余氯时 RO 产水和过滤后海水的 pH 与 ORP 值关系图

5.6.6 计量仪表

- 压力表：进水、段间、浓水、产水侧分别配置压力表；
- 流量计：产水和浓水处设置流量计，可以计算进水流量（进水 = 浓水 + 产水）；
- 温度计：进水压力容器入口处设置；
- 进水 PH 计；
- 进水、产水电导率表；
- 进水 ORP 表（氧化——还原电位表）。

第三部分

反渗透和纳滤系统的运行和维护

第六章 膜元件的安装和运行

6.1 膜元件的安装

膜元件的安装有以下注意事项。若不严格遵守这些事项，可能会对膜元件或操作人员造成不同程度的损伤，不能充分发挥膜元件性能或导致人员受伤。故此请在运行前务必确认以下注意事项并严格遵守。

表 6.1 膜元件安装注意事项

No.	注意事项	原因	影响程度
1	从包装袋中取出膜元件，使用剪刀或美工刀时注意不要划伤膜元件表面和手。	使用剪刀或美工刀切开包装袋时，若插入袋中太深，可能会伤及膜表面，用力过大可能导致割伤皮肤。	很高
2	包装袋中填装了作为保护液的 1% 浓度的亚硫酸氢钠，请务必佩戴保护眼镜及手套 ¹ 。	由于使用作为保护液的 1% 浓度的亚硫酸氢钠，故请在通风良好的地方打开包装。同时开包装时务必佩戴眼镜和保护手套。万一药品不慎流入眼中，请立即用清水清洗，并及时看医生。若药品溅在身体及衣服上，请立即用清水清洗。	对膜性能无影响，但对人身体有一定危险。
3	连接部位密封圈用清洁水或甘油沾湿。不要使用任何润滑剂（石油类、润滑脂、凡士林及洗涤剂或洗洁精），汽油，稀释剂等。	集水管等材质是塑料，若在其上涂用了石油、润滑脂、凡士林及洗涤剂或洗洁精会导致集水管在短时间内裂化。同时严禁使用汽油类及稀释剂。否则可能会导致膜性能的严重下降。在往膜壳中安装膜元件时，使用清洁水或甘油将连接部位和密封圈沾湿以便安装。	极高
4	小心拿放膜元件。禁止乱扔，摔落膜元件。	乱扔、乱放膜元件而对其造成的损伤会对膜元件性能造成影响。	很高
5	禁止使用锤子敲打野蛮安装。	这样会导致玻璃钢外壳破裂，故严禁用锤子敲打膜元件，野蛮安装。此种情况下，难以保证膜元件性能。	很高
6	保持现场环境清洁	膜元件拆封后，应避免接触油污、粉尘、焊渣等污染物，以免对膜元件性能造成影响。	高

6.1.1 膜元件安装前准备

- ① 冲洗系统管路：如果系统是全新的，在安装膜之前需充分冲洗系统管路，以避免碎片、溶剂、或余氯等与膜元件接触。
- ② 清洁压力容器：在安装膜元件之前需清洁压力容器的内部，防止污垢或碎片沉积在膜元件外表面。建议用海绵球浸入 50% 的甘油溶液后，采用合适的工具在膜壳内部来回擦洗，将膜壳内壁清洁干净。在清洁过程中，请注意不要让工具划伤膜壳内表面。

¹ 系统运行启动后，由于产水及浓缩水中含有亚硫酸氢钠，在生产饮料水及食品用水时，请务必确认产水是否符合使用标准后，再使用。

6.1.2 膜元件的安装顺序

请将膜元件务必安装在其对应压力容器中。

- ① 通常膜元件置于 1% 浓度的亚硫酸氢钠溶液中保存，首先应用纯水充分冲洗。
- ② 如图 6.1 所示，膜元件的给水侧有一个浓水密封圈、注意密封圈的安装方向是口朝上游张开。浓水密封圈的功能是保证原水全部流到膜元件内不发生旁流。原水自身流速会使浓水密封圈的开口朝压力容器内壁紧压密封。若密封圈的安装方向相反，原水不能密闭，造成一部分原水流到膜元件外侧，使膜表面流速降低，导致产生结垢，从而缩短膜的使用寿命。
- ③ 确认 O 型圈安装在连接配件指定位置上。安装时要注意 O 型圈及连接件表面没有划伤或附着物。注意不要将 O 型圈扭曲安装。若连接件发生泄漏，原水就会进入到产水中，会导致产水水质下降。安装在集水管上时，O 型圈和集水管的表面用纯水、蒸馏水或甘油沾湿以便于安装。
- ④ 卸下压力容器两侧的端板安装膜元件。将适配器安装在第一支膜元件的集水管浓水侧（下游）。然后将膜元件沿原水水流方向推进，装入压力容器内。

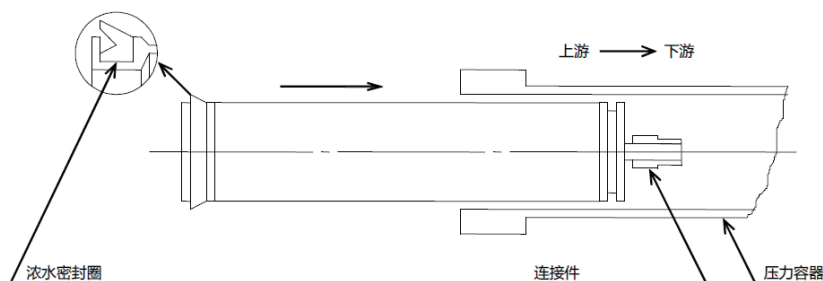


图 6.1 安装一支膜元件图例

数支膜元件连续安装时，前一支膜元件完全进入膜壳之前，就要准备下一支膜元件与连接件连接。同时要注意不要让膜元件与压力容器边缘接触，以防产生擦伤，尽量平行推入压力容器中。

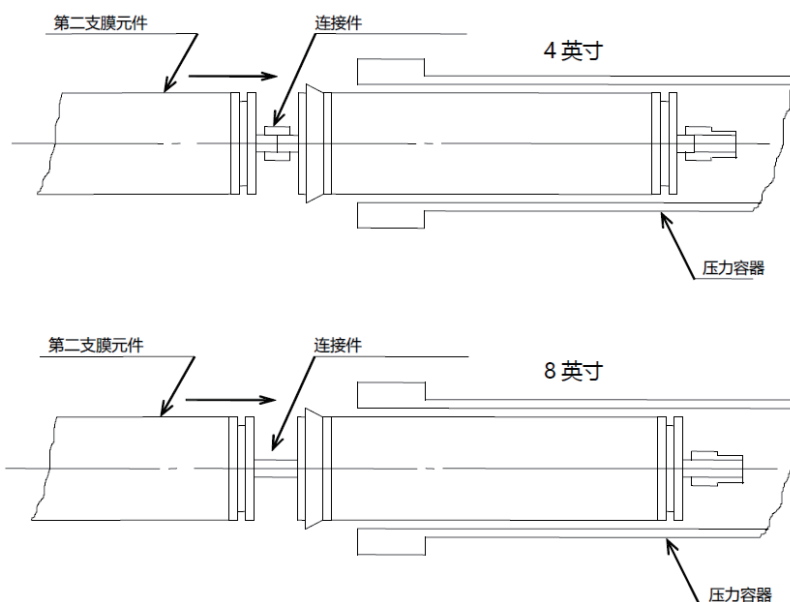


图 6.2 数支膜元件并列安装图例¹

¹ 8 英寸和 4 英寸膜元件的连接件外形不同，8 英寸是内插式，4 英寸是外接式。

- ⑤ 确认压力容器的适配器连接后，将浓水侧端板与膜壳连接（注：不要漏装浓水止推环）。端板的连接方法请参照压力容器生产厂的使用说明书。
- ⑥ 完成浓水侧端板的安装后，应再次从进水侧向浓水侧推动膜元件，保证其完全紧密连接。然后再进行进水侧端板的安装，安装进水侧端板时应注意测量端板与适配器之间的间隙。如果有间隙，安装内径大于适配器外径的厚度为 2mm-5mm 的塑料（或其它合适材料）垫片，直至使端板不能完全安装到位，此时取下一支垫片后再安装好端板即可。端板的连接方法请参照膜壳生产厂的使用说明书。

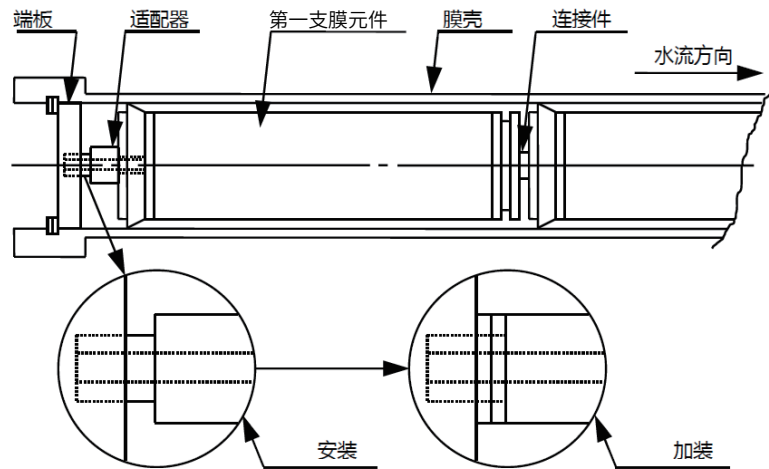


图 6.3 安装间隙调整垫片

6.1.3 膜元件的拆卸

- ① 拆下压力容器周围的管道，卸下压力容器两端的端板。
- ② 从原水入口处将膜元件朝下游推出，在浓水出口侧将膜元件一支接一支的取出。膜元件推出时请不要使用坚硬的工具。
- ③ 膜元件的保存方法如表 6.2 所示。若不严格遵守，可能会导致膜性能发生变化，请充分留意。

表 6.2 保存膜元件的注意事项

No.	注意事项	理由	影响程度
1	用水充分清洗膜元件后，将其密闭浸泡在含有 1% 亚硫酸氢钠的塑料袋中。	若将膜元件在污染状态下保存或使用后将其干燥，都会影响膜元件再次使用的性能。	高
2	保存在 5–35℃ 室内阴暗处。	保存温度超出 5–35℃ 范围外、会影响膜元件性能。此种情况不保证其性能。	高
3	尽量避免 5℃ 以下保存，严禁膜元件结冰。	一旦结冰会影响膜元件性能。此种情况不保证其性能。	非常高

6.2 系统的运行及停止

6.2.1 初始运行前需确认事项

① 保安过滤器 (< 5 μm)

为防止金属屑、异物、沙子和纤维等物质进入到膜元件内，请在原水泵后安装保安过滤器 (< 5 μm)。在运行开始前，请确认滤芯已正确安装，且保安过滤器已调试好。

② 进水的 SDI_{15} 值

预处理产水的 SDI_{15} 值要做到 5.0 以下。要定期检测 SDI_{15} 值，发现超出正常值后要修正预处理的配置和运行参数。

③ 进水的残余氯

通常要求运行时进水的余氯含量为 0 mg/L。进水中残余氯浓度若超出此要求会造成膜元件脱盐率下降。若进水中有余氯，请用亚硫酸氢钠 (SBS) 中和。若残留量为 1 mg/L，对应则需要 SBS 1.8 – 3 mg/L。

余氯采用 ORP 表在线监测，或是比色法测定。

注意：过渡金属如铁、锰等，将加剧余氯对膜元件的氧化。因此进水中含有过渡金属时，应确保进水中没有余氯存在。

④ 进水的残余 SBS (亚硫酸氢钠)

当采用 SBS 中和时，海德能公司也推荐采用简易滴定法测 SBS 浓度，以确保余氯全部被还原。因为在有些废水中，余氯或 ORP 测定会受到干扰而不准确，SBS 残余量为 1-2 mg/L 时可确保余氯全部被还原。SBS 溶液相关内容请参见第二部分第五章 5.6.5.2。

⑤ 进水油类

油脂严禁进入反渗透系统，必须在预处理中脱除掉。

⑥ 进水 pH 值

进水 pH 值若超出膜元件规定范围，可能会导致膜元件性能下降。

⑦ 进水温度

运行时进水温度应在 40°C 以下 (最高不能超过 45°C)。若进水温度超出此范围，可能会引起膜性能下降¹。40°C 以上运行时请向海德能公司技术人员咨询安全运行条件。

⑧ 低溶解度盐类

为防止膜表面盐类结垢，可以采用调节 pH 值、进行软化处理、添加阻垢剂等方法解决。

⑨ 硅酸类 (二氧化硅)

为防止膜表面二氧化硅结垢，通过预处理去除二氧化硅以及通过调整 pH 值、温度等防止在浓水侧产生结垢。

⑩ 确认预处理各步骤已调试好；高压泵正确安装并调试好；系统上各类表计已正确安装并校准好；系统启停机阀门和水泵动作正确；各类药剂和加药泵已准备和调试好；在膜已正确安装的情况下，可以启动系统。

¹ 主要是由于粘接剂在高温下的粘接性能下降，当然水温过高时也会对膜元件的分离皮层带来损伤。可以进行热消毒的卫生级膜元件 SanRO-HSTM 的粘接剂是特殊类型，不受影响。

6.2.2 系统的日常启动

- ① 全部开启浓水及产水阀门
- ② 反渗透系统的冲洗

供水时以低压、低流量的给水排出残留在膜元件及压力容器中的空气。给水泵启动后慢慢打开给水阀门调节流量。浓水管出口或流量计处不再有气泡冒出时将流量升高，冲洗 30 分钟左右。在冲洗过程中要检查阀门管道是否有泄漏。冲洗过程中浓水及产水应全部排放。冲洗过程中不要添加阻垢剂等药品。但若给水中有余氯则要充分添加 SBS。

在冲洗步骤中，要注意以下的运行条件：

- 压力： $< 0.4 \text{ MPa}$ ；冲洗时最大压差以 6-7 芯装系统设计，不应超过 0.35 MPa 。
- 单支压力容器的冲洗流量：
8 英寸（8040）膜元件： $\leq 10.9 \text{ m}^3/\text{h}$ （28mil）或 $12.1 \text{ m}^3/\text{h}$ （34mil）
4 英寸（4040）膜元件： $\leq 2.7 \text{ m}^3/\text{h}$

③ 高压泵启动前，通过调节高压泵和反渗透系统间的阀门控制好流量，否则瞬间的高流量和高压力可能会损伤膜元件。

④ 启动高压泵后必须使升压速度在任何时候不能超过 0.07 MPa/秒 。压力上升速度过快可能会导致膜元件机械损伤，包括轴向压力过大使膜元件产生望远镜现象，或导致 FRP 裂纹甚至严重到破损。将给水阀门缓慢开启，使浓水流量达到设计值。

⑤ 一边调节高压泵出口的给水阀门，一边慢慢关小浓水阀门。在保持浓水流量的同时，要注意产水流量的上升，并随时调节使其达到设计产水量。添加阻垢剂等药品的泵要在关小浓水阀门的同时开启，确认添加药品流速并测定进水 pH 值。

- ⑥ 一小时连续运行后测定产水电导、分析水质，并将产水引入产品水箱。
- ⑦ 记录运行初期数据，数据记录格式请参见附录 5 反渗透和纳滤系统运行数据参考记录表格。

6.2.3 停止运行

- ① 停止高压泵。如果高压泵采用变频控制，可使高压泵逐渐减速至停止。

② 冲洗。浓水侧阀门全部打开，并确认产水阀门也全部打开。启动冲洗水泵，调节冲洗进水阀门至合适冲洗流量，运行 5-15 分钟冲洗。

- ③ 停止冲洗。停止冲洗水泵，关闭各阀门。

停机冲洗水源应该是 RO/NF 产水、软化水或脱盐水。这些水的水质比进水好，且应不含污染物如硬度、铁、锰、有机物等，或其浓度不至于污染膜。另外当进水在膜系统内停留一段时间不会使膜元件污染或结垢时，可以采用进水为水源。冲洗水的 pH 值应在膜元件的常规运行 pH 值范围内，停机冲洗不应加阻垢剂。可根据实际情况进行冲洗回路设定，可用化学清洗系统作低压冲洗。

注：设备长时间停止运行时，请参见第三部分第六章 6.3.3 反渗透系统的停运保护。

6.2.4 注意事项

① 启动和停止时，流量和压力会有波动。过大流量和压力波动可能会导致膜元件破裂。故在启动和停止操作时需缓慢增加或降低压力和流量，升、降压速度不应超过 0.07MPa/ 秒。

② 给水中的残余氯必须为 0 mg/L 时设备才能运行。给水中残余氯会破坏膜元件的分离皮层，所以必须要用 SBS 来还原。

③ 产水侧压力（背压）。产水侧压力高于给水侧压力 0.035MPa 以上时，膜片会受到物理性损伤。背压通常发生在反渗透设备阀门开闭的瞬间。例如，系统停止运行时，关闭原水泵前，产水侧阀门还在关闭状态时通常会发生背压现象。充分确认阀门的开和关及压力的变动，保证运行过程杜绝背压现象发生。产水管道若高于膜架中最下部膜壳 3.5 米以上时，系统停止时产水侧的静压头（0.035MPa）会从产水侧施力给进水侧，即发生背压现象，导致膜受到损伤。因此要务必注意进水管是否高于产水管道，同时要注意产水管道在膜壳上部的高度。

6.3 运行管理

6.3.1 反渗透系统的管理

反渗透预处理主要是去除对反渗透有危害的污染物。预处理做得不充分时会影响到反渗透系统的运行。因此每天的运行管理十分重要。监测预处理系统产水（反渗透的给水）的浊度及 SDI_{15} 。若所测指标远远大于日常测定值，则可证明预处理出现异常。必须要对预处理系统进行检查，必要时可以采取清洗等措施使其恢复状态。

表 6.3 反渗透系统的管理

项目	现象	采取措施
残余氯浓度	大于 0 mg/L	加入 SBS
SDI_{15} 值	大于 5	导致膜元件迅速污堵，调整预处理工艺参数
pH 值	在允许范围外	脱盐率下降，产生结垢可能性很大，调整加药泵
保安过滤器压差	压差急剧上升	可能是预处理效果不好，检查预处理
流量平衡	回收率及产水量不正常	发生结垢及膜堵塞可能性很大，需调整流量平衡

6.3.2 反渗透系统运行数据的管理

为了使膜性能最大程度地得到发挥，并保持长期稳定运行，关键在于保持其适当的运行条件，及时记录每天的运行数据。及时确认并坚持正确的运行管理能够延长膜元件的使用寿命。在本小节中以一般性制水设备为例，着重介绍运行数据的记录方法。

6.3.2.1 反渗透膜运行数据管理的重要性

反渗透膜制水装置在运行管理时要注意以下几点：

- 不要超出规定以上的回收率和运行压力；
- 要充分保证浓水流量；

- 禁止异物、污染物和氧化剂流入；
- 定期物理冲洗和化学清洗。

6.3.2.2 测定运行数据

产水量、脱盐率和压差是作为反渗透膜性能管理的重要指标。每天记录运行数据，就能及时发现这些性能管理指标的异常。此外，作为查明异常原因的补充项目还要记录回收率、运行压力、pH 值、浓水流量和温度等。

表 6.4 反渗透和纳滤装置运行日常管理用检测项目

No.	测定项目	记号	单位
1	产水流量	Q_p	m^3/h 、L/min、gal/min
2	浓水流量	Q_b	
3	第一段压力	P_1	kgf/cm^2 、bar、MPa
4	第二段压力	P_2	
5	浓水侧压力	P_3	
6	产水压力	P_4	
7	进水电导率	EC_f	$\mu S/cm$ 、 ms/cm
8	浓水电导率	EC_b	
9	产水电导率	EC_p	
10	进水温度	T_f	$^{\circ}C$
11	进水 pH 值	pH_f	N/A
12	进水 ORP	ORP	mV
13	保安过滤器入口压力	PF_1	kgf/cm^2 、bar、MPa
14	保安过滤器出口压力	PF_2	

6.3.2.3 运行数据整理

对记录的数据进行整理十分重要。表 6.5 对记录数据进行分析。

① 标准化产水量。反渗透膜的产水量会根据操作压力、温度等发生变化。因此比较每天的运行数据记录可以补正其效果达到标准化。通常，25 $^{\circ}C$ 时压力为 0.1MPa 得到的产水为标准、可以确认其变化。

② 进水平均浓度。由于反渗透系统的给水含盐量（电导率）随着水流的流动是变化的，这导致位于不同位置的反渗透膜元件接触的给水电导率不同，所以在计算脱盐率，或采用电导率的阻止率替代脱盐率时，给水的浓度就十分重要，而不能简单地用进水电导率替代。通常有两个方法来计算相对准确的给水电导率：

- 算术平均电导率 = $(EC_f + EC_b) / 2$
式中： EC_f —— 进水的电导率， $\mu S/cm$ ；
 EC_b —— 浓水的电导率， $\mu S/cm$ 。
- 对数平均电导率 = $EC_f \times \ln [Rec. / (1 - Rec.)]$
式中：Rec. —— 系统的回收率。

在一般情况下应该采用算术平均给水电导率来计算系统的实际脱盐率（这里的脱盐率并非真实的脱盐率，而是采用电导率的脱除率表征的脱盐率），但是当系统的回收率大于 85 % 时，就应该使用对数平均进水电导

率来计算脱盐率，这样才能得到更为准确的系统脱盐率。

表 6.5 反渗透装置运行管理用计算项目

No.	计算项目	记号	单位	计算公式
1	第一段压差	dP_1	kgf/cm ² 、bar、MPa	$P_1 - P_2$
2	第二段压差	dP_2		$P_2 - P_3$
3	全体平均压力	P_{av}		$(P_1 + P_2 + P_3) / 3$
4	全体有效压力	P_n		$P_{av} - P_4$
5	温度校正系数	TCF	N/A	$\exp \{ 2700 \times [1 / (273 + T) - 1/298] \}$
6	标准化产水量	J	m ³ / (h·MPa)	$Q_p / P_n \times TCF$
7	电导率的脱除率	Rej.	%	$(1 - EC_p / \text{进水平均电导率}) \times 100 \%$
8	回收率	Rec.	%	$Q_p / (Q_p + Q_b) \times 100 \%$
9	预处理过滤器压差	dP_{pr}	kgf/cm ² 、bar、MPa	$PF_1 - PF_2$

6.3.2.4 将数据图表化

表 6.4 和 6.5 中的各项用 Excel 软件记录后，可以作成图表以便一目了然地掌握运行状况的变化，尽早采取应对措施。通过确认标准化产水量、电导率的阻止率和压差这三项数据表变化，可以分析出系统运行情况。这三项性能管理指标以外的测定值及计算值也是探究膜性能发生变化的重要数据。

6.3.3 反渗透系统的停运保护

① 短期保存

短期保存方法适用于那些停止运行 5-30 天的膜系统。此时膜元件仍安装在系统的压力容器内。保存操作的具体步骤如下：

- 进水冲洗膜系统 10min 以上，同时注意将气体从系统中完全排除。采用膜系统产水冲洗膜系统会有助于防止污染；
- 将压力容器及相关管路充满水后，关闭相关阀门，防止气体进入系统；
- 每隔 5 天按上述方法冲洗一次。

② 长期停用保存

长期停用保护方法适用于停止使用 30 天以上，膜元件仍安装在系统的压力容器内。这方法可保存 6 个月，取决于保存温度和保护液种类，保存的具体步骤如下：

- 对膜元件进行化学清洗；
- 采用膜系统产水配制合适的亚硫酸氢钠溶液（请参见第八章 8.3.9，或向海德能公司相关人员咨询可替代的保护液）；
- 保护液充满膜系统后，关闭阀门和泵使保护液保留于膜系统中，此时应确认系统完全充满；
- 如果温度低于 27°C，应每隔 90 天用新的保护液进行 2-3 步操作；如果温度高于 27°C，则应每隔 30

天更换一次保护液；

- 每 15 天检测一次 pH 和 TDS，以便确定是否需要换新保护液；
- 如果膜系统有水或溶液泄漏、阀门关闭不严，亚硫酸氢钠溶液的 pH 可能会降到 3 以下。此时需要排掉现有保护液，并重新充入新 SBS 溶液。
- 检查膜架顶层及疑似渗漏膜壳，便于判断内部保护液状态，各膜壳药液降解情况各不相同。
- 确认膜系统管路中没有死角，不影响保护液的有效性。
- 在膜系统重新投入使用前，用低压给水冲洗系统 30-60 分钟，然后再用高压给水冲洗系统 30-60 分钟。无论低压冲洗还是高压冲洗时，系统的产水排放阀均应全部打开。在恢复系统至正常操作前，应检查并确认产品水中不含有任何保护液。

6.4 膜元件的运输、保管和废弃

6.4.1 出厂状态

4 英寸和 8 英寸的膜元件的包装如图 6.4 所示。所有的膜元件在包装时都采用塑料袋包装，在包装箱内用缓冲材料固定。运送以及保管时主要的注意事项为：

- 放在室内温度 5 – 35°C 的干燥通风处；
- 禁止阳光直射；
- 搬运时需轻拿轻放，禁止粗暴的搬运行为，如：投抛、从高处丢落等；



图 6.4 海德能公司反渗透和纳滤膜元件的包装

膜元件批量出厂时采用托盘包装，4 英寸膜 80 支，8 英寸膜 25 支。当现场存放空间不足时，膜元件在以整个托盘保存时，最多可以叠放两层托盘。

膜元件的保护液，原则上是亚硫酸氢钠溶液。在膜元件开封时，需注意防护。如果药品溅入眼睛，请立即用大量的水进行冲洗，严重时请遵医嘱。药品溅到身体或者衣服上，请马上用水冲洗。

6.4.2 运输

本部分提到的都是运输途中的注意事项，如果不加以遵守，很可能导致膜元件的损伤。

表 6.6 运输中的注意事项

No.	注意事项	理由	影响程度
1	放在室内 5 – 35°C 的干燥通风、无阳光直射处保管。	保管温度超出范围，产品的性能可能无法保证，这种情况，我公司不提供对该产品的性能担保，敬请谅解。	高
2	保管温度不能低于 5°C 以下，绝对不能使膜元件受冻。	受到冰冻会使膜受到影响，可能无法发挥膜的原有性能。这种情况，我公司不提供对该产品的性能担保，敬请谅解。	非常高
3	搬运途中不要粗暴的操作，投掷或者使包装摔落。	本产品的保护液用的是浓度 1 % 的亚硫酸氢钠。包装箱内的塑料袋若发生破损，保护液则会流出，失去对膜元件的保护效果，并会润湿外包装箱，造成包装箱的强度降低。因此在运输途中应避免野蛮操作且不能拆散已固定好的大包装，请不要使用可能会导致包装破损的设备。	高
4	请勿用锐利物诸如美工刀等把包装箱损坏。		
5	请勿把包装箱浸泡在水中。		

6.4.3 出厂后的保管

出厂后的保管注意事项如表 6.7 所示。若有不遵守之处，可能会导致膜元件的产品性能下降，在使用过程中需注意。

表 6.7 膜元件出厂后的保管注意事项

No.	注意事项	理由	影响程度
1	放在室内 5 – 35°C 的干燥通风、无阳光直射处保管。	保管温度超出范围，产品的性能可能无法保证，这种情况，我公司不提供对该产品的性能担保，敬请谅解。	高
2	保管温度不能低于 5°C 以下，绝对不能使膜元件受冻。	受到冰冻会使膜受到影响，可能无法发挥膜的原有性能。这种情况，我公司不提供对该产品的性能担保，敬请谅解。	非常高
3	搬运途中不要粗暴的操作，投掷或者使包装摔落。	本产品的保护液用的是浓度 1 % 的亚硫酸氢钠。包装箱内的塑料袋若发生破损，保护液则会流出，失去对膜元件的保护效果，并会润湿外包装箱，造成包装箱的强度降低。因此在运输途中应避免野蛮操作且不能拆散已固定好的大包装，请不要使用可能会导致包装破损的设备。	高
4	请勿把包装箱浸泡在水中。		
5	即使膜元件内封有保护液，仍请尽早使用膜产品。建议膜产品在购买一年内使用。	本产品自购买之日起请尽早使用。如果在使用之前经过了长时间的保存，保护液可能会发生分解导致性能变化。如果膜元件内的保护液已经完全挥发，则应该重新调配保护液并加入到膜元件的包装中。对于不进行如此操作的长期库存备用产品，我公司将不提供相应的性能保证，敬请谅解 ¹ 。	高

6.4.4 更换准则

RO 膜元件如果在最佳条件下运行，可以有很长寿命，某些情况下能超过 10 年。预处理好、保守设计和有经验操作人员等都可以延长 RO 膜使用寿命。但是最终，膜元件还是需要更换。何时需要更换膜元件取决于不同现场的要求。做更换决定需要检查的参数如下所示。

1. 产水水质

最常见的更换 RO 膜元件的理由是产水水质不再满足要求。这个水质要求取决于具体系统。产水水质受进水含盐量、产水通量、温度、回收率、污染、膜元件使用年限和很多其它因素的影响。改变其中一个因素，就会导致产水水质的上升或下降。例如，当膜元件受到污染时产水水质变差，但经过清洗后又会使水质变好。另

¹ 遇到此类问题时，请及时与海德能公司驻华代表机构联络，以得到详细的建议及帮助。

外，在更高水通量、更低温度、或更低回收率下运行会使产水水质更好。但更高水通量会导致污染加速、更低回收率会降低系统产水率。通常来说，当膜污染后通过清洗都不能恢复产水水质到可接受情况时，可以考虑更换膜元件。

产水水质也受 O 型圈泄漏和胶线受损等机械因素的影响。对压力容器进行探针法检测可以帮助确定 O 型圈泄漏或有问题的膜所在的位置。单支膜元件可以通过真空保持度测试来确定膜元件机械完整性情况。多数情况下，更换 O 型圈或有机械损伤的膜元件之后，产水水质会恢复。请注意如果膜元件胶线处受损，需调查原因。仅更换膜元件不能解决根本问题，同样的问题还会发生在已更换的膜元件上。

2. 进水压力限值

随着膜元件使用年限和污染的逐步增长，RO 系统的压力可能会提高。很多情况下，受高压泵扬程所限进水压力调到很高也不能保持设计产水量。此时需要进行有效的清洗恢复。当压差（进水压力与浓水压力之差）或进水压力不能下降时，膜元件可能需要进行更换。有时用户可以避免更换全部膜元件。确定膜元件污染所在之处可以帮助确定哪些膜元件需要更换。我们建议拆卸系统中首末支膜元件，静置 20 分钟以上后进行称重。如果末支膜元件重量明显比首支膜元件重，最有可能是结垢。首支膜元件更重一般表明有生物、胶体或颗粒物污染。对全部膜元件进行称重，可以帮助确定多少支膜元件需要更换。

3. 膜元件全部更换和部分更换对比

根据具体情况，决定同时更换所有系统中的膜元件；或一次只更换其中一套；或者只更换每个压力容器中的部分膜元件。很多大型水厂运行管理细致，要求每年更换每个压力容器中的 1 支或 2 支膜元件。如果压力容器中的膜元件仅部分更换，记录新旧膜元件的位置非常重要。新膜元件应该安装在压力容器的后端位置，从而避免新膜元件水通量大且过早污染。被更换的膜元件通常是前端膜元件，因为它们在最高水通量下运行，很多情况下也是污染最严重的。这种更换需要拆掉全部膜元件重新安装膜元件；或者小心地拆下前端膜元件，然后缓慢推动其它膜元件向前，注意推动过程中不能使浓水密封圈窜动和翻转，造成膜元件卡塞。

6.4.5 废弃

膜元件是用各种高分子有机材质制造的，海德能卷式膜元件的组成及重量见表 6.8。用过的旧膜因不含超过监管门槛的游离液体和有害物质，通常可当成生活垃圾来进行废弃。当需要把膜元件废弃的时候，用户必须遵照相关国家和地区的法律或条令，进行适当处理。

表 6.8 海德能卷式膜元件的组成及重量

材料	重量 (kg)
聚砜	0.88
聚酯	5.59
聚丙烯	1.58
聚氨酯 (2 处)	2.17
环氧树脂 (2 处)	0.75
“E” 玻璃束	1.28
ABS	1.15
聚酰胺	0.05
改性聚苯醚	0.04
ERP(乙丙橡胶)	0.032
重金属	-

* 重量为近似值，实际值可能会有 ±10% 偏差。

** 重量是以标准 8 英寸 (8040) 卷式膜元件计的。

第七章 系统故障的诊断和排除

7.1 概述

膜元件的故障通常表现为膜性能的下降、物理破损和化学劣化等现象。比较具有代表性的现象是膜元件的脱盐率下降（产水电导率上升）、产水量的变化（运行压力的增加或者减少）和压力损失（压差）的增加等。

膜元件自身以外的原因表现出的故障症状往往也会呈现在膜元件上。因此调查原因时，可以把注意力集中在对膜性能分析上。在发现膜系统发生故障时，通过对运行记录的查阅和原水水质的分析，对取得正确判断是不可缺少的。

对故障的诊断可以按照下列顺序进行：

- ① 查阅运行记录。在有日常运行数据记录被保存的前提下，对系统运行状况、条件进行确认，调查是否有异常的运行条件；
- ② 追加必要的信息。把握系统是整体性能下降还是部分性能下降。若是系统部分性能下降，可以拆卸发生问题的膜元件，检查其外观及连接件的密封圈等状况；
- ③ 原水的特性状态调查和分析；
- ④ 对装置卸下的膜元件进行性能检测，膜元件解体检查（膜片的分析、清洗测试）。

7.2 故障诊断

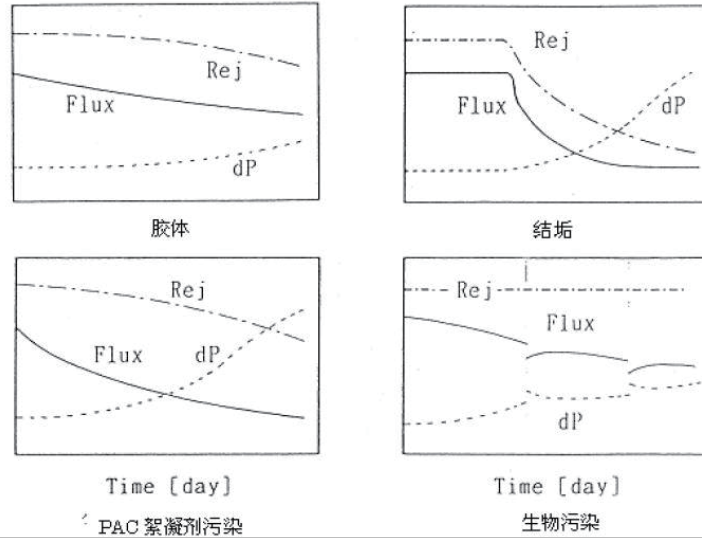
7.2.1 系统的诊断

7.2.1.1 数据的记录和标准化

系统整体的故障由于故障原因的不同，表征出来的现象也不尽相同。当出现性能下降的征兆时，迅速及时的采取对策尤为关键，这样可以避免故障扩大。因此在膜系统的日常运行中，通过记录数据，用图表的形式将参数标准化，会起到事半功倍的效果，至于标准化方式则由各个反渗透厂家提出（海德能公司提供标准化软件ROData 供用户免费下载，详情请登录 www.hydrationautics.cn 或者 www.membranes.com）。

7.2.1.2 系统的诊断和原因的推定

膜元件的故障原因多种多样，比较具有代表性的是膜劣化和污染。图 7.1 为污染物质的种类不同造成系统性能变化的一般模型图例。



Rej:脱盐率(原水浓度-产水浓度)/(原水浓度); Flux:产水量; dP:膜组件的压力损

图 7.1 污染物质的种类不同造成系统性能变化

7.2.2 各个压力容器的诊断

观察每支压力容器的性能数据，对于探明系统故障原因是非常重要的。连接件和密封圈的密封不良或者膜元件的破损等故障都会造成该压力容器的性能下降。系统在第一段和第二段的膜元件是否有类似的性能下降也说明不同的故障原因。由于膜劣化或者污染的原因引起的故障也是可能的。若无法分段取得性能数据，则对每个压力容器进行测试。通常是测试每个压力容器中的产水电导。取样时要注意调查配管设置方法，被测定的压力容器的产水是否受到其他的压力容器的产水影响。一般对每个压力容器测量其产水水量是非常困难的。

7.2.3 压力容器内各个膜元件的诊断

检查各个压力容器内填装的膜元件的哪个部分发生了脱盐率下降的情况，可以采用探针法（在线检测）或抽出检测法（离线检测）。这里我们将着重介绍探针法的使用。

7.2.3.1 探针法的目的

探针法是采用塑料管插入中心集水管且贯穿全长进行测试不同位置膜元件产水电导率的方法，如图 7.2 所示。被采样的产水来自软管前端位置上游的产水，表示软管前端位置的水质。

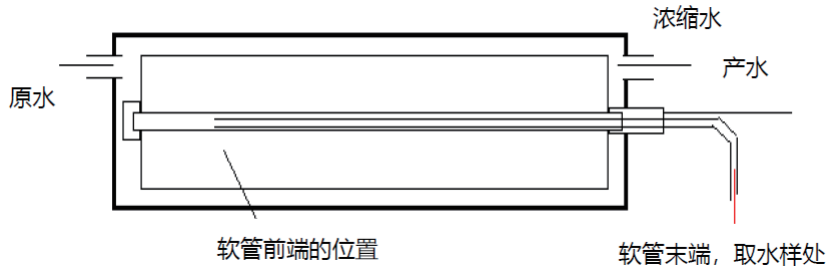


图 7.2 探针法示意图

7.2.3.2 探针法测定的位置

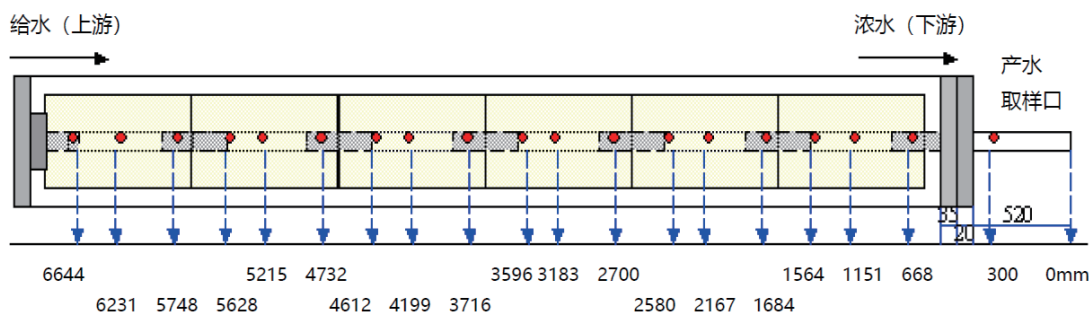


图 7.3 六芯装压力容器探针测试的位置

图 7.3 展示了六芯装压力容器内，探针插入至各取样点的长度值。各个膜元件性能的测定和连接管密封处是否有泄漏的检测点的位置如下：

- 膜元件进水端：连接管密封处的确认。
- 膜元件中央：膜元件性能测定。
- 膜元件浓水端：连接管密封处的确认。

7.2.3.3 探针法的连接方式

探针法使用的测试工具如图 7.4 所示，由端板连接部分（①）和插入用软管部分（②）这两部分组成。在连接端板和产水出口之间安装 T 型三通（T 字 A），使不经由软管流过的产水回流至原水水箱。

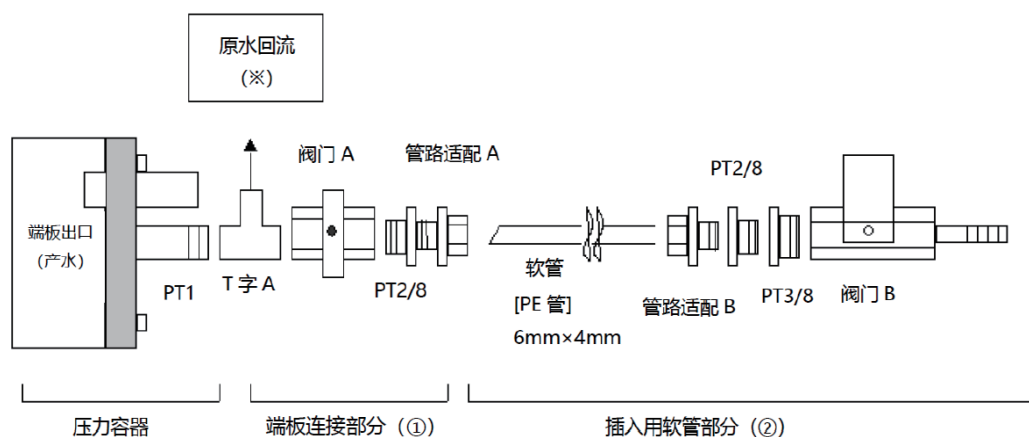


图 7.4 探针法连接方式

7.2.3.4 探针法的实施方法

① 端板连接部分（①）的管线安装并固定在产水出口上（端板连接部分和集水管必须保持在一水平线上）。端板连接部和产水集水管之间加入 T 型三通（T 字 A），为了使不从探针法软管中通过的产水回流至原水水箱。

② 把插入用的软管部分从软管适配器 A 处插入，并打开阀门 A。

③ 把软管插入集水管内部深处。

④ 软管遇到阻碍，无法再向前的地方就停住。遇到阻碍的位置就是软管和保护帽的接头处（集水管的最前端），可以把那里作为起点（标记为 0 毫米）。建议在进行测试前把软管插入，以事先确认软管前端到保护帽位置的长度位置。

⑤ 在起点位置，把阀门 B 打开，开始采样。采样前需要把软管内已有的液体置换出来，因此在先排出 300 毫升左右的水样后开始采样。

⑥ 在采样结束后，把软管向外拉出一定间隔，继续下一个位置的采样。若事先能在软管上注上间隔标记，则采样时更易操作。

⑦ 对压力容器内的膜元件按照一定间隔对全长度取样直至结束。一支膜元件的长度是 1016 毫米。

7.2.3.5 使用探针法的注意事项

① 被抽样的产水水质是采集测量点上游产水的平均值，无法直接表示测量点产水的水质性能。

② 掉换膜元件的方向，进行正、反两方向的测试，对于测量点（采样位置）的产水性能可以做到更准确的掌握。

③ 压力容器中若是单支膜或者是多支膜的情况，对测量点的选择是不一样的，对这一点需要注意。

7.3 故障现象、原因以及解决方法

查看运行条件以及数据，若发现系统已超出可运行范围，应向用户提出改善要求。表 7.1 是按照故障现象不同，分别就原因和解决方法进行的归纳与总结。

表 7.1 故障现象和原因推断总结

现象			原因	解决方法
脱盐率	水通量	压差		
↓	↗	→	氧化：氯、臭氧	换膜，前处理改善
↓	↗	→	膜元件破损：背压，水锤	换膜
↓	↗	→	连接件密封不严	更换
↘	↓	↗	胶体吸附	前处理改善，清洗
↘	↓	↗	结垢生成 CaCO_3 ， SiO_2 垢等	pH 值、回收率调整，清洗
→	↓	↗	微生物污染	定期杀菌、清洗
→	↓	→	吸附：表面活性剂、油	避免原水中混有该类物质
→	↗↘	→	温度高	在允许范围以内进行管理
→	↗↘	→	压力高	在允许范围以内进行管理

7.4 膜元件的分析

确认好系统的运行条件和运行记录后，为了使分析更明确，可以进一步对膜元件进行分析。观察性能下降的现象，明确污染物究竟是何种物质，就性能下降的原因寻找对策、确立清洗方法。膜元件性能下降以及污染物的确认方法请参照表 7.2。

按照表 7.2 列出的测试项目中的分析方法，通过组合分析，可得出较为综合的判断结果，其中又以用膜元件的性能检查、附着物的外观、SEM-XMA / FT-IR 的组合分析，可以做出更为准确的判断。

需要分析时，将膜元件从设备上取下，须对膜元件的安装位置和压力容器中的膜元件的特定位置进行记录并在返回的样品上标注（希望用户在取下膜元件的同时记录它们的位置）。

对原水的检测要把会对膜性能产生影响的物质尽量分析出来，关于 SS 或者微粒子、结垢物质（钙、硅、重碳酸根和硫酸根离子等）包括氧化剂等等项目，请事先和设备厂商或者膜元件厂商商量以后决定。

表 7.2 性能下降以及污染物质确认方法¹

确认方法	劣化	滤饼层	垢层	吸着层	堵塞	流路堵塞
膜元件的外观，重量测试	×	○	○	×	○	○
膜元件的染色测试	○	×	×	×	×	×
膜的观察（目视、显微镜）	○	○	○	△	○	○
原水的调查，分析	○	○	○	○	×	×
膜元件的性能检查	○	△	△	△	○	○
附着物的定量分析	×	○	○	×	×	○
扫描型电子显微镜，SEM	○	○	○	×	○	○
X 射线分析，XMA	×	○	○	×	○	○
X 射线衍射分析	×	×	○	×	○	○
傅立叶红外分析，FT-IR	○	○	○	○	×	×
化学清洗测试	×	○	○	×	×	×

7.4.1 外观和重量

可以通过对外观的观察，确认膜元件是否有物理破损或者存在有机物附着。测量膜元件的重量就可以对污染物的量做出大致判断。但仅仅通过一个重量指标是无法得出最终结论的。

7.4.2 膜元件性能检查

膜元件性能的复查只能在膜元件解体前实施。即使在已经确认有污染成分时，也应该先测试膜元件的性能，然后再解剖膜元件，分析污染物的组成，但是复测性能时可能导致污染物发生变化影响分析结果。因此我们希望能确保有两支样品，一支用于性能检查，另一支直接解体。

膜元件的性能测试中包含以下检测项目：

- 真空保持检查和水密检测，可以确定平膜的破损和破损位置；
- 用标准测试条件复测膜元件，对比脱盐率、产水量、压差的变化，可以判断膜破损、膜性能劣化、污染、流路堵塞和连接件是否接触不良。

以上的性能检测数据和出厂数据进行对比以确认性能变化状况。在压差的测定中使用压差检测计，测试中要达到 0.001 MPa 的精度。

¹ ○表示适用；△表示基本适用；×表示不适用。

7.4.3 染色试验

想确定膜的性能是否发生劣化或者想发现膜元件出现破损的位置时，可以进行染色测试。若要同时进行污染物分析的话，最好用另外样品进行，以免染色试验影响污染物分析的准确性。

通常使用染料 Direct Blue（分子量约 1000 Daltons）或者 Ultra Violet（分子量约 300 Daltons）在膜元件的标准测试条件下加压约 10 分钟。染色后，对膜元件进行解体就可以确定膜的破损和膜元件密封泄漏等缺陷的位置。

7.4.4 膜元件的解体

一般按以下步骤进行：

- ① 拍摄膜元件的外观照片（全体和两个端面的特写），并标记好原水侧及浓缩侧的位置；
- ② 取下两端的端板，清晰的注明原水流动的方向；
- ③ 把外层的玻璃钢取下；
- ④ 把膜组件打开，调查每片膜叶，对膜叶的全体或者必要的部分进行拍照。
- ⑤ 有大量的附着物时，需要采集附着物样本。

为了分析膜表面的状况并满足 FT-IR 的分析条件，最少需取 40 × 20 毫米的平膜样本。

7.4.5 FT-IR 分析

依据 FT-IR 分析所提供的信息，可以对以下问题作出判断：

- ① 由于化学变化而造成的膜性能劣化情况。根据与新膜之间的差别，若膜的官能团有减少的情况，那么可以判明存在化学反应的影响，但是当有较多的污染物附着在膜表面时则无法进行判定。
- ② 膜片上附着物的鉴别。根据和新膜的差谱分析，测定附着物的吸收曲线可以推测出主要成分。与标准物质的吸收光谱作比较可以得出污染物大致所含的组分。若附着物可以采集的话，建议直接用 FT-IR 对这些附着物进行测试，也可以判断出附着物的成分。
- ③ 可以就附着物的成分进行判断，是污染物（金属氧化物、微生物污染和絮凝剂）或结垢物质（碳酸钙、硅和硫酸钡等）。
- ④ 吸附层一般很薄，由于 FT-IR 的分析深度是 100 微米，因此对很薄的吸附层显得精度不足。此时可以用大量的超纯水对这些吸附物进行抽取，然后降压浓缩后再用 FT-IR 测试。关于吸附物质的判定请咨询仪器分析专家。
- ⑤ 仅用 FT-IR 是无法单独判别详细的成分构成的，必须结合 XMA 等其它测试才能对附着物进行更详细的判断。

7.4.6 SEM 和 XMA 射线分析

通过 SEM 和 XMA 分析，可以得到以下信息：

- ① 用 SEM 可以观察膜片表面外观，判断膜表面的破损状况，推测附着物的大小和类型。判断附着物是属于结晶性或非结晶性物质。还可以观察膜表面的污染程度。但 SEM 只能对非常窄小的部分进行观察，因此需

要选取多个样品才可以做出判断。

② 用 XMA 可以对污染物的无机元素进行推断。

附着的元素和用 FT-IR 所得的化合物吸收曲线进行组合分析，可以推断出附着物。例如通过 XMA，看出有 Si、Fe 的附着，SEM 发现藻类物质，用 FT-IR 发现有 Si、Fe 和藻类的吸收光谱，参考标准的频谱，可以判定有 Si、Fe 和藻类污染的存在。如图 7.5 和 7.6 所示。

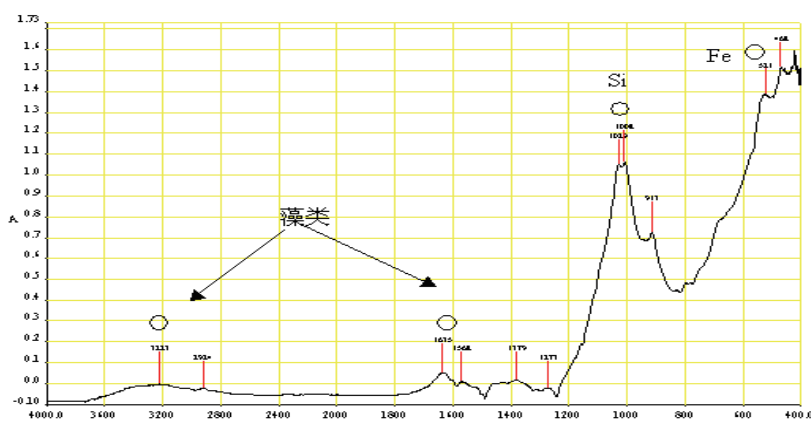


图 7.5 FT-IR 分析示意图

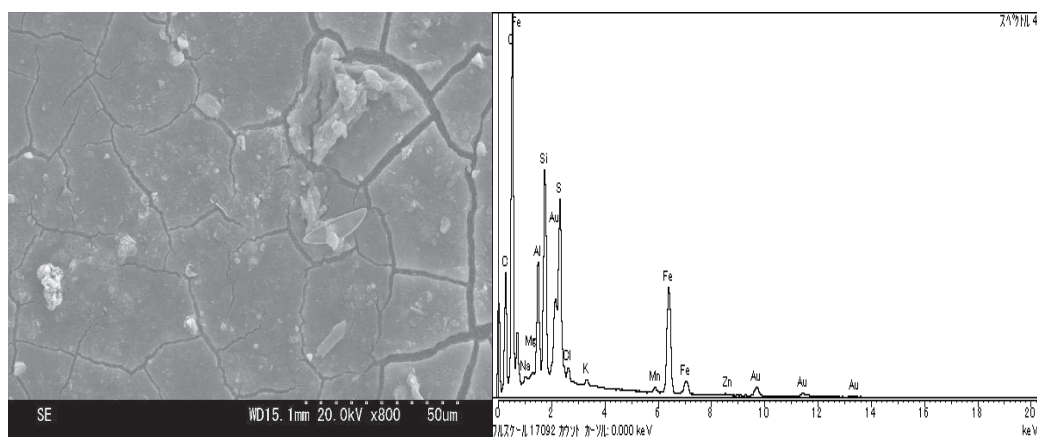


图 7.6 SEM 和 XMA 射线分析结果示意图

7.4.7 化学清洗测试

为了对污染物质进行推断并判断膜劣化的程度，需要进行化学清洗测试。从化学清洗的效果可以反推出污垢的种类（详细论述请参见第四部分第八章 8.3）。为了选择恰当的化学药品，可以解体膜元件，取平膜样品进行化学清洗测试。膜解体后的平膜样品可以做成 $\Phi 75$ 毫米的样品，用化学试剂在常温下浸泡 8 小时，再和空白样品（纯水浸泡的膜片）一起进行平膜性能测试来判断化学清洗的效果，最终确定有效的化学试剂，从而大致推断污染物的种类，进而可以指导被污染膜元件的清洗工作。

7.4.8 各检测程序价格概述

海德能具备以上提及的膜元件分析方法所必要的检测设备及技术人员，RGA 相关内容及费用请参见技术

文件 TSB116，具体内容请联系对应区域的 RGA 负责人进行确认。

表 7.3 部分检测项目参考价目

程序	膜元件种类 / 膜组件	价格
外观检查和性能再测试	4” 膜元件	200 美金 / 支
	8” 膜元件	400 美金 / 支
	16” 膜元件	1600 美金 / 支
	超滤膜组件	第 1 支 900 美金, +500 美金 / 支
整体解剖	除 16” 和超滤之外的膜元件	2000 美金 / 支
	16” 膜元件	4000 美金 / 支
	超滤膜组件	第 1 支 2200 美金, +1500 美金 / 支
局部解体	除 16” 和超滤之外的膜元件	300 美金 / 支
	16” 膜元件	1200 美金 / 支
	超滤膜组件	700 美金 / 支
外壳重做	4” 膜元件	250 美金 / 支
	8” 膜元件	500 美金 / 支
	16” 膜元件	2000 美金 / 支
清洗	4” 膜元件	600 美元 / 每支 / 每次清洗
	8” 膜元件	800 美元 / 每支 / 每次清洗
	16” 膜元件	3200 美元 / 每支 / 每次清洗
	超滤膜组件	1800 美元 / 每支 / 每次清洗
染色试验	全部膜元件和膜组件	300 美金 / 支
试验室检验	膜元件种类 / 膜组件	价格
光学显微镜	全部膜元件和膜组件	100 美金 / 个样品
SEM + EDAX	全部膜元件和膜组件	1000 美金 / 支
平膜试验	全部膜元件	200 美金 / 支
碳化试验	全部膜元件	100 美金 / 支
Fujiwara 试验	全部膜元件	300 美金 / 支
灼烧减量	全部膜元件	300 美金 / 支
物理强度	全部膜元件和膜组件	500 美金 / 支
水样分析	通常为膜元件	300 美金 / 项目, 全部 2000 美金
污染物样品	通常为膜组件	300 美金 / 支
清洗液样品	通常为膜组件	300 美金 / 支

第八章 反渗透和纳滤系统的清洗

8.1 膜污染简介

反渗透系统运行时，进水中含有的悬浮物质，溶解物质以及微生物繁殖等原因都会造成膜元件污染。反渗透系统的预处理应尽可能的除去这些污染物质，尽量降低膜元件污染的可能性。污染物的种类、发生原因及处理方法请参见表 8.1。通常，造成膜污染的原因主要有以下几种：

- 新装置管道中含有油类物质和焊接管道时的残留物，以及灰尘等污染物质在装膜前未清洗干净；
- 预处理装置设计不合理；
- 添加化学药品的量发生错误或设备发生故障；
- 人为操作失误；
- 停止运行时未作低压冲洗或冲洗条件控制得不正确；
- 给水水源或水质发生变化。

表 8.1 反渗透膜污染的种类、原因及处理方法

污染物种类	原因	对应方法
堆积物	胶体和悬浮粒子等膜面上的堆积	提高预处理的精度或采用 UF/MF
结垢	由于回收率过高导致无机盐析出	调整回收率，加阻垢剂
生物污染	微生物吸附以及繁殖	定期杀菌处理
有机物的吸附	荷电性 / 疏水性有机物和膜之间的相互作用	膜种类的选择需正确

污染物的累积情况可以通过日常数据记录中的操作压力、压差上升、脱盐率变化等参数得知。膜元件受到污染时，可以通过清洗来恢复膜元件的性能。清洗的方式一般有两种，物理清洗（冲洗）和化学清洗（药品清洗）。物理清洗（冲洗）是不改变污染物的性质，用低压大流量水冲洗掉膜元件中的污染物，恢复膜元件的性能。化学清洗是使用相应的化学药剂，改变污染物的组成或属性，恢复膜元件的性能。吸附性低的粒子状污染物，可以通过冲洗（物理清洗）的方式达到一定的效果，但是像生物污染这种对膜的吸附性强的污染物使用冲洗的方法很难达到预期效果。使用物理清洗的方法很难除去的污染应采用化学清洗。为了提高化学清洗的效果，清洗前，有必要通过对污染状况进行分析，确定污染的种类（请参见第三部分第七章 7.4）。在了解了污染物种类后，选择合适的清洗药剂就可以适当的恢复膜元件的性能。

8.2 物理清洗（冲洗）

8.2.1 冲洗的作用

冲洗是采用低压大流量的进水冲洗膜元件，冲洗掉附着在膜表面的污染物或堆积物。冲洗时膜元件膜面的状态，如图 8.1 所示。

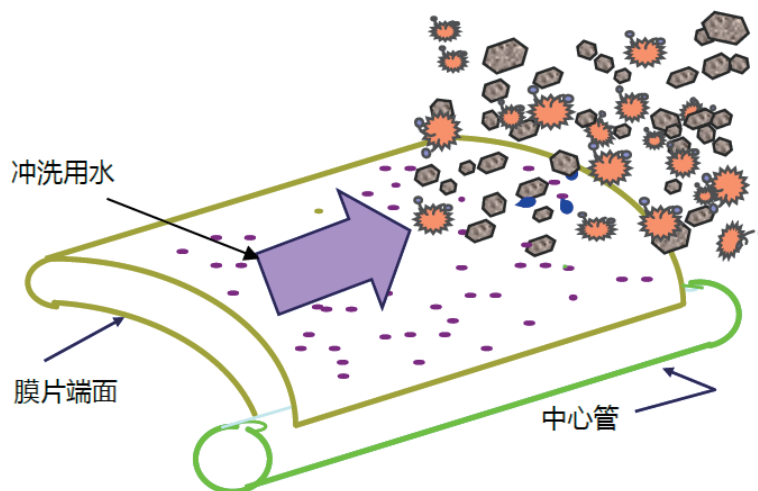


图 8.1 冲洗时膜面的状态示意图

8.2.2 冲洗的要点

8.2.2.1 冲洗的流速

装置运行时，颗粒污染物逐渐堆积在膜的表面。如果冲洗时的流速和制水时的流速相等或略低，则很难把污染物从膜元件中冲出来。因此，冲洗时要使用比正常运行时更高的流速。通常，单支压力容器内的冲洗流速为：

- 8 英寸膜元件：≤ 10.9m³/h(28mil) 或 12.1m³/h(34mil)；
- 4 英寸膜元件：≤ 2.7m³/h。

8.2.2.2 冲洗的压力

正常高压运行时，污染物被压向膜表面造成污染。所以在冲洗时，如果采用同样的高压，污染物仍会被压在膜表面上，清洗的效果不会理想。因此在冲洗时，应尽可能的通过低压、高流速的方式，增加水平方向的剪切力，把污染物冲出膜元件。一般进水压力不能大于 0.4 MPa。

8.2.2.3 冲洗的频率

条件允许的情况下，建议经常对系统进行冲洗。增加冲洗的次数比进行一次化学清洗更有效果。一般冲洗的频率推荐以一天一次为好。根据具体的情况，用户可以自行控制冲洗的频率。

表 8.2 冲洗的条件¹

膜尺寸	流量, m³/h	压力, MPa	频度, 次 / 日	时间, 分钟
8 英寸	≤ 10.9m³/h(28mil) 或 12.1m³/h(34mil)	< 0.4	> 1	10 — 15
4 英寸	≤ 2.7m³/h	< 0.4	> 1	10 — 15

¹ 冲洗所采用的水最好是反渗透系统的产水，这是由于反渗透的产水对污染物的溶解性更好。若系统由于设计原因无法采用反渗透的产水进行冲洗时，请采用反渗透系统的给水（经过预处理系统后的给水）进行系统冲洗。

8.2.3 冲洗的步骤

① 停止反渗透系统的运行。缓慢地降低操作压力并停止装置。如果快速停止装置，压力会急速下降，这可能会对管道、压力容器以及膜元件造成损坏。

② 调节阀门：

- 全开浓水阀门；
- 关闭进水阀门；
- 全开产水阀门（如果运行时产水阀门没有全开的情况）。

如果错误地关闭产水阀门，压力容器中的后半部的膜元件可能发生产水背压，造成膜元件破损。

③ 冲洗作业：

- 启动低压冲洗泵；
- 在缓慢打开进水泵的同时，查看浓缩水流量计的流量；
- 调节进水阀门，调节流量和压力达到标准值；
- 10 – 15 分钟后慢慢地关闭进水阀门，停止进水泵。

④ 恢复正常运行。按日常启动程序启动系统。

8.2.4 注意事项

① 进水水泵需要满足正常运行时的进水流量（进水流量 = 产水流量 + 浓缩水流量），同时必须考虑满足冲洗流量的要求。

② 浓缩水管路和阀门的选择也要考虑冲洗时的大流量。制水时，因为回收率高，浓缩水流量相对很小。冲洗作业时，要求低压高流量，几乎所有的进水都从浓水管路排出，所以设计浓水管路和阀门时不仅要考虑制水时的流量也要考虑符合冲洗时的流量需要。如果仅仅考虑制水时的流量来设计管路和阀门，则在冲洗时浓水管路以及浓水阀门处的压降升高，有可能达不到要求的流量或超过冲洗要求压力。当然，也可以考虑另外设置冲洗专用管路。

③ 选定流量计时要考虑到可以读取冲洗时的最大流量。

④ 对于多段反渗透系统，如图 8.2 所示，为了能够更有效的冲洗膜元件，系统的设计有必要按可以分段冲洗进行设计。

- 如果进行全段冲洗，前段的冲洗水和污染物会一起流入后一段中，容易造成后段的堵塞。
- 段数的增加同时也意味着冲洗水流经的膜元件数量增加。为了能够达到流量要求，需要加大进水压力。有可能会超过冲洗压力的允许值，导致膜表面的压力升高，降低冲洗的效果。
- 进行第一段冲洗时，全开第一段冲洗浓水排水管路的阀门，关闭第一段浓水和第二段进水间阀门、第二段和第三段的进水冲洗阀门。
- 进行第二段冲洗时，全开第二段冲洗浓水排水管路的阀门，关闭第一段，第三段的进水冲洗阀门，关闭第一段浓水和第二段进水间阀门，关闭第二段浓水和第三段进水间阀门。
- 进行第三段冲洗时，全开第三段冲洗浓水排水管路的阀门，关闭第一段，第二段的进水冲洗阀门，关闭第二段浓水和第三段进水间阀门。

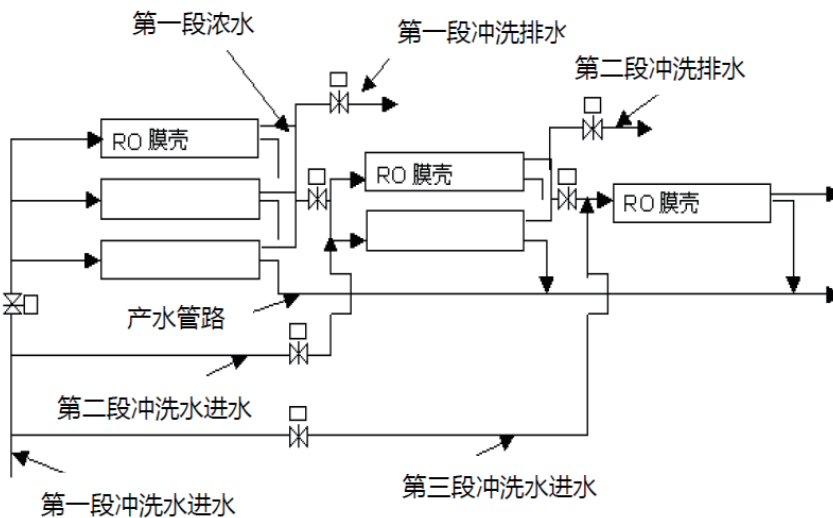


图 8.2 可分段冲洗系统

8.3 化学清洗

8.3.1 化学清洗的标准

污染性质和污染速度取决于各种因素，如进水水质和系统回收率。通常污染是渐进发展的，如不尽早控制，污染将会在相对较短的时间内影响膜元件性能。当膜元件有受到污染现象，或是在长期停机之前，亦或是作为定期日常维护需要时，应对膜元件进行化学清洗。膜元件应该在较干净的状态下运行。一般情况下，标准化后数据在达到表 8.3 中“典型”值时需进行化学清洗。但某些特定情况下，例如应用在工业污水或市政污水时，污染会更严重，可根据需要在标准化后数据达到表 8.3 中“高污染”数值时进行清洗。此种情况下，标准化数据的基准值应该是运行稳定后的值，可能是运行一周后。

表 8.3 污染数值变化

	典型	高污染
标准化后的产水量下降	10%	20%
标准化后的产水水质下降	10%	20%
标准化后的压差增加	15%	30%

清洗应该在上述数值达到之前进行，从而维持膜元件在比较干净的状态。当标准化后的运行数据恢复到系统初始运行值时，表明化学清洗有效。在运行数据未标准化的情况下，如果关键运行参数没有改变，上述清洗原则仍适用。

有研究表明，当进水中可溶性有机物含量高时，标准化后的流量和透盐率会在初期有明显下降，在 2-4 周运行期间下降 10-20%。研究表明这种初期下降是有机物在膜表面发生了吸附¹。当膜表面单层有机物层饱和后，

¹ 污水处理厂 RO 污染研究，Craig Batels, Rich Franks, AWWA/AMTA 膜技术会议，Glendale, AZ, 2012。

这种现象不会再明显影响系统性能。强烈化学清洗可以恢复大部分损失，但研究也表明这种恢复一般是短暂的，系统很快又回到其之前的性能。因此，化学清洗决定应建立在系统初期稳定运行之后的数据上。

8.3.2 化学清洗的频率

膜的清洗周期根据现场实际污染情况而定。正常的清洗周期是每 3-12 个月一次。如果在 1 个月内清洗一次以上，则需要改善预处理，例如追加投资或重新设计膜系统；如果清洗周期在 1-3 个月一次，应侧重于调整和优化现有系统的运行参数。即使系统长期没有发生污染，为了能够更好的保证系统正常运行，一般可考虑每 6 个月进行 1 次化学清洗。

当预处理工艺中采用了无机絮凝剂，经常会有反应不完全的无机盐没有形成可过滤掉的絮凝体。用户应确保没有过量的絮凝剂进入到膜系统中。过量的絮凝剂能通过 SDI 测试装置测定出来，例如 SDI 膜片上的铁为 $3\mu\text{g}/\text{片}$ ，任何时候不应超过 $5\mu\text{g}/\text{片}$ 。

除了采用浊度和 SDI 测定之外，颗粒计数器也可以精确衡量 RO/NF 进水是否合格。粒径大于 $2\mu\text{m}$ 的颗粒物应 <100 个 /ml。

8.3.3 清洗药剂的选择

不同污染物应采用不同的清洗药剂。污染发生时通常不是只有一种污染物，因此常规化学清洗需要包括高 pH 值清洗和低 pH 值清洗两大步骤。可以使用的常规化学清洗药剂请参见表 8.4。选用哪个清洗剂进行化学清洗，可以按以下方法判断：

- 按反渗透进水水质判断；
- 进行全系统膜元件清洗之前，可以从系统中取出一、两支膜元件，通过进行清洗试验，选择最佳的清洗药品。

表 8.4 污染物质和推荐的清洗溶液

污染物	常规化学清洗	增强化学清洗
碳酸钙垢	1	4
硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶垢	2	4
金属氧化物、金属氢氧化物	1	5
无机胶体污染	1	4
无机有机混合胶体污染	2	6
聚合硅垢	无	7
生物污染	2 或 3	6
天然有机污染物	2 或 3	6

一般来说，应先采用高 pH 清洗液清洗油类和微生物污染，然后采用低 pH 清洗液清洗无机垢类或金属氧化物污染。有时也先酸洗后碱洗，或者只采用一种药剂清洗，例如地下水源的铁污染，采用简单的低 pH 清洗即可。有时清洗液中加入洗涤剂以便去除微生物和有机污染物；有些加入螯合剂如 EDTA，以便更好地去除胶体、有机物、微生物和硫酸盐垢。如果选择清洗剂不当，或清洗顺序不当，可能会使污染恶化。

8.3.4 污染物的种类及其影响

污染物的种类以及发生污染时系统运行的变化列在表 8.5 中。

表 8.5 污染的种类和系统显示现象

故障类型	可能发生的位置	系统压降	进水压力	透盐率
金属氧化物污染 (如 Fe、Mn、Cu、Ni、Zn 等)	首段, 前端膜	迅速增加	迅速增加	迅速增加
胶体污染 (有机和 / 或无机混合物)	首段, 前端膜	逐渐增加	逐渐增加	轻微增加
无机盐结垢 (如 Ca、Mg、Ba、Sr)	末段, 末端膜	中度增加	轻微增加	明显增加
聚合硅垢	末段, 末端膜	正常到增加	增加	正常到增加
生物污染	任何位置 / 通常前端膜	明显增加	明显增加	正常到增加
有机物污染 (溶解性天然有机物)	所有段	逐渐增加	增加	降低
阻垢剂污染	末段最严重	正常到增加	增加	正常到增加
膜氧化 (如 Cl_2 、 O_3 、 KMnO_4)	首段最严重	正常到降低	降低	增加
膜水解 (超出 pH 使用范围)	所有段	正常到降低	降低	增加
膜面磨损 (活性炭粉等)	首段最严重	正常到降低	降低	增加
O 型圈泄漏 (内连接管或适配器)	无规则 / 通常进水端适配器	正常到降低	正常到降低	增加
膜元件泄漏 (运行或备用时的产水背压)	末段最严重	正常到降低	正常到降低	增加
膜元件泄漏 (清洗或冲洗时产水阀关闭)	靠近产水阀膜元件	增加 (有污染且 压降高时)	增加 (有污染且 压降高时)	增加

8.3.5 海德能公司推荐的常规清洗液介绍

① 溶液 1: 2.0% (W) 柠檬酸 ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) 的低 pH 清洗液。对于去除无机盐垢 (如碳酸钙垢、硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶垢等), 金属氧化物或氢氧化物 (铁、锰、铜、镍、锌等), 及无机胶体十分有效。市售柠檬酸为粉末固体。

② 溶液 2: 2.0% (W) STPP (三聚磷酸钠 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) 和 0.8% (W) 的 Na-EDTA 混合的高 pH (pH 值为 10) 清洗液。它专用于去除硫酸钙垢和轻微至中等程度的天然有机污染物。STPP 具有无机螯合剂和洗涤剂的作用。Na-EDTA 是一个具有螯合性的有机螯合清洗剂, 可有效去除二价和三价阳离子和金属离子。市售 STPP 和 Na-EDTA 均为粉末固体。

③ 溶液 3: 2.0% (W) STPP (三聚磷酸钠 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) 和 0.25% (W) 的 Na-DDBS [十二烷基苯磺酸钠, $\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_2)_{12}\text{-SO}_3\text{Na}$] 混合的 pH 值为 10 的溶液。该清洗液用于去除重度的天然有机物 (NOM) 污染。STPP 具有无机螯合剂和洗涤剂的作用, Na-DDBS 则为阴离子洗涤剂。

④ 溶液 4: 0.5% (W) 盐酸低 pH 清洗液 (pH 为 2.5) , 主要用于去除无机物垢 (如碳酸钙垢等) , 金属氧化物 / 氢氧化物 (铁、锰、铜、镍、铝等) , 及无机胶体。这种清洗液比溶液 1 要强烈, 盐酸是强酸溶液, 配制时需遵守相关注意事项。

⑤ 溶液 5: 1.0% (W) 连二亚硫酸钠 ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) 低 pH 清洗液 (pH=4-6) 。它用于去除金属氧化物和氢氧化物。连二亚硫酸钠是强还原剂, 本溶液有强烈气味需保持良好通风环境。连二亚硫酸钠为粉末固体。

⑥ 溶液 6: 0.1% (W) 氢氧化钠和 0.03% (W) SDS (十二烷基磺酸钠) 高 pH 混合液 (pH 为 11.5) 。它用于去除天然有机污染物、无机 / 有机胶体混合污染物和微生物 (菌素、藻类、霉菌、真菌) 污染。SDS 是会产生一些泡沫的阴离子表面活性剂型的洗涤剂。请注意采用此清洗液时不能超过最高 pH 值与温度极限 (具体请参见表 8.8) 。

⑦ 溶液 7: 0.1% (W) 氢氧化钠高 pH 清洗液 (pH 为 11.5) 。用于去除聚合硅垢, 这是一种较为强烈的碱性清洗液。请注意采用此清洗液时不能超过最高 pH 值与温度极限 (具体请参见表 8.8) 。

重要提示: 建议从化学品供应商处得到化学药剂的性能参数、操作指南和 safety 注意事项, 并且在处理和保存所有化学药品时严格按照 MSDS 说明书要求执行。

表 8.6 提供的清洗溶液配方是将一定重量 (或体积) 的化学药品加入到 100 加仑 (379 升) 的配制水中。清洗溶液是按所用化学药品量和水量的比例配置的。配置用水应为 RO 产品水或除盐水, 且不含游离氯和硬度 (具体请参见表 8.7) 。清洗液进入膜元件之前, 要求彻底混合均匀, 并按照目标值调节 pH、温度。除非其它说明, 清洗设计参数是基于用化学清洗溶液循环清洗一小时并浸泡一小时而设定的。

表 8.6 海德能公司清洗液配方 [以加入到 100 加仑 (379 升) 水中计]

编号	药品	药剂用量	pH 目标值	温度目标值
1	柠檬酸 (100% 粉末)	7.7 公斤	无需调整 pH	40°C
2	三聚磷酸钠 (STTP) (100% 粉末) Na-EDTA (100% 粉末)	7.7 公斤 3.18 公斤	用硫酸或盐酸调节 pH=10.0	40°C
3	三聚磷酸钠 (STTP) (100% 粉末) 十二烷基苯磺酸钠 (Na-DBS) (100% 粉末)	7.7 公斤 0.1 公斤	用硫酸或盐酸调节 pH=10.0	40°C
4	盐酸 (36% HCl 溶液)	1.78 升	用盐酸或氢氧化钠 缓慢调节 pH=2.5	35°C
5	连二亚硫酸钠 (100% 粉末)	3.86 公斤	无需调整 pH	35°C
6	氢氧化钠 (100% 粉末) (50% 溶液) 十二烷基磺酸钠 (SDS) (100% 粉末)	0.38 公斤 0.49 升 0.11 公斤	用氢氧化钠或盐酸 缓慢调节 pH=11.5	30°C
7	氢氧化钠 (100% 粉末) (50% 溶液)	0.38 公斤 0.49 升	用氢氧化钠或盐酸 缓慢调节 pH=11.5	30°C

备注: pH 和温度目标值仅为推荐值。具体膜元件的 pH 值范围和最高温度极限值, 请参见表 8.8

表 8.7 清洗和冲洗用水要求

参数		数值
活性氯		0 mg/L
pH		6.5-7.5
硬度	RO 产水、脱盐水、软化水	< 30 mg/L 以 CaCO ₃ 计
	钙 (Ca)	< 5 mg/L
铁 (Fe)		< 0.05 mg/L
锰 (Mn)		< 0.02 mg/L
铝 (Al)		< 0.05 mg/L
铜 (Cu)		< 0.01 mg/L
钴 (Co)		< 0.01 mg/L
二氧化硅 (SiO ₂)	溶解硅	< 10 mg/L
	胶体硅	< 0.1 mg/L
颗粒物		< 5 μm
浊度		< 0.5 NTU
SDI ₁₅		< 1
TOC		< 1 mg/L
油、脂类		0 mg/L

表 8.8 给出了具体膜元件的最大 pH 和温度极限值，超出这极限值会造成不可恢复的膜元件损坏。海德能公司建议的最低清洗温度是 21°C，但在更高温度下清洗药剂的溶解性和清洗效果会明显提高。

表 8.8a 常规膜元件 pH 值和水温极限的关系

膜型号	连续运行 pH 值		清洗 pH 值		
	< 45°C	≤ 35°C	≤ 45°C	≤ 35°C	≤ 25°C
ESNA™ 系列	3-9.5	2-10	2-10.5	1-11	1-12
ESPA™ 系列	3-10	2-10.6	2-10.5	1-11	1-12
ESPAB™ 系列	3-10.5	2-11	2-11	1-11.5	1-12.5
LFC™ 系列	3-9.5	2-10	2-10.5	1-11	1-12
CPA™ 系列	3-10.5	2-11	2-11.5	1-12	1-13
PROC™ 系列	3-10.5	2-11	2-11.5	1-12	1-13
SWC™ 系列	3-10.5	2-11	2-11	1-12	1-13

注意：本表列出的是不同 pH 范围对应的最高温度。在极限条件下清洗效果会更好，但可能会因为水解缩短膜的使用寿命。海德能公司建议在确定有效清洗的前提下，采用相对温和的清洗方式或控制好药液与膜元件的接触时间。进水和清洗液 pH 值应密切监测并控制。pH 表计应定期校准以确保其读数精准。通常清洗时药液循环 1 小时。在上述 pH 极限清洗时，温度低于 40°C 时循环不能超过 60 分钟。超过 40°C 时循环不能超过 30 分钟。浸泡是可以的，但溶液 pH 值需更温和。更多内容请参见后面清洗方法和步骤相关内容。

表 8.8b PRO 系列膜元件 pH 值和水温极限的关系

膜型号	连续运行 pH 值		清洗 pH 值		
	< 45°C	≤ 35°C	≤ 45°C	≤ 35°C	≤ 25°C
PRO-XS	3-8.5	3-9	2-11	1-10.5	1-12
PRO-XR	3-10.5	2-11	2-11	1-12	1-13
PRO-LF	3-10.5	2-11	2-11	1-12	1-13
PRO-XP	3-10.5	2-11	2-11	1-12	1-13

注意：本表列出的是不同 pH 范围对应的最高温度。在极限条件下清洗效果会更好，但可能会因为水解缩短膜的使用寿命。海德能公司建议在确定有效清洗的前提下，采用相对温和的清洗方式或控制好药液与膜元件的接触时间。进水和清洗液 pH 值应密切监测并控制。pH 表计应定期校准以确保其读数精准。通常清洗时药液循环 1 小时。在上述 pH 极限清洗时，温度低于 40°C 时循环不能超过 60 分钟。超过 40°C 时循环不能超过 30 分钟。浸泡是可以的，但溶液 pH 值需更温和。更多内容请参见后面清洗方法和步骤相关内容。

8.3.6 在线化学清洗

8.3.6.1 化学清洗设备

RO 系统在线清洗需要良好设计的清洗装置。对于多段系统，建议采用单段清洗来优化清洗错流流速。用于配制清洗的溶液应是 RO 产水或脱盐水，不含硬度、过渡金属（例如：铁）、游离氯。设备必须没有腐蚀。主要清洗系统包括：

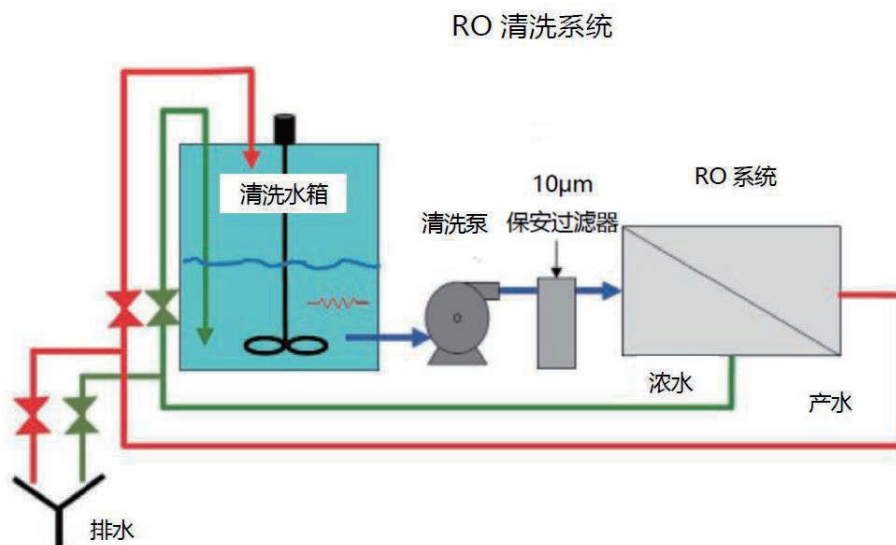


图 8.3 化学清洗装置示意图

- 清洗水箱：水箱体积应该能容纳膜元件、管道、软管的水替换出来。表 8.10 中列出单支 RO 膜元件所需要的清洗液溶液量。水箱设计时应考虑 100% 排放，方便投加药品和混合，清洗泵循环管路，合适排气口和溢流口，循环回路应接近于底部以减少采用表面活性剂的泡沫。
- 清洗泵：清洗泵需要设计达到足够冲刷膜元件的错流流速的流量。RO 系统入口的清洗压力最高是 0.4MPa，尽可能减少清洗过程中的产水量，降低对流防止污染物再重新沉积到膜表面。单支膜壳清洗流量范围请参见表 8.9。高压泵不能用于清洗。
- 清洗保安过滤器：通常选择 5-10 μ m，过滤洗下来的污染物。
- 水箱加热（换热）器：最高温度是 45°C。请注意在清洗泵循环时会产生并传导热量。也可以考虑在清洗泵排出口加个回路到清洗水箱，管路垂直到水箱底部，以减少泡沫和空气混入。
- 混合器：建议用混合器来达到最佳药液混合效果。有些设计仅靠自动清洗泵使药液回流到水箱来混合。
- 表计：清洗系统表计需要包括能监测流量、压力、温度、水箱液位的表计。
- 取样点：在清洗泵出口和清洗液循环回流管路上应有取样阀门，可以取样测试 pH 和 TDS。
- 产水回流管路：少量清洗液能透过膜，因此设计产水回流管路是必要的。产水回流管路不应与浓水回流管路连在一起。如果产水回流管路与浓水管路连在一起，膜产水侧和产水管路可能被清洗液污染。产水回流管路终端应高于清洗液位，避免膜产水侧或产水管路被清洗液污染。
- 浓水回流管路：浓水回流管路的终端应接近于清洗水箱的底部，避免空气混入造成的泡沫。

重要提示：在清洗和冲洗过程中，产水管路和产水阀门必须保持全开，至大气压；否则可能会损坏膜元件。如果产水管路关闭，会产生产水压力且高于末端膜元件的进水压力。膜元件的背压（产水静压超出进水压力值）在任何时候都不能超过 0.035Ma。

表 8.9 单只 RO 压力容器清洗和冲洗流量（压力容器入口压力不要超过 0.4Mpa）

膜元件直径	单位 GPM	单位 LPM	单位 m ³ /h
4 英寸 – 非 34mil 隔网	9-12	34-45	2.0-2.7
4 英寸 – 34mil 隔网	10-13	38-49	2.3-2.9
8 英寸 – 非 34mil 隔网	36-48	136-182	8.2-10.9
8 英寸 – 34mil 隔网	40-53	151-201	9.1-12.1

注意：当膜元件压差特别高时，清洗开始时流量应限制在常规清洗流量的 1/3，以便避免膜元件叠缩错位（望远现象）和隔网窜动。当污染物脱除后，流量可以缓慢提升至正常清洗流量。化学清洗前和后的冲洗，应为表 8.9 中数值的一半。

表 8.10 单只 RO 膜元件所需清洗液量（不包括保安过滤器、管路和初始 20% 排放所需的清洗液量）

膜元件	所需清洗液量（最小值）*
8040	34L
4040	9.5L

(*) 上述仅为最小值。当污染很严重时，可能需要更换清洗溶液，实际清洗液量更大。

8.3.6.2 化学清洗系统规格和注意事项

RO 膜元件保留在压力容器中，通过低压和相对高流量来循环清洗。RO 清洗程序取决于现场情况。单段清洗需要 4-8 小时。建议分别记录清洗前和清洗后的标准化数据，以评估清洗效果。在第一次清洗（碱洗或酸洗）后运行一下系统并记录数据，有助于评估每个化学清洗步骤。

常规清洗步骤如下：

注意：在清洗或冲洗过程中，产水阀门始终保持开启。如果产水阀门关闭，产水侧压力会与进水压力相同。这样产水压力可能会高于浓水压力，即产水压力高于末端膜元件的进水压力，可能会造成膜片分层影响性能。

- ① 在 < 0.4MPa 压力下进行低压冲洗，即从清洗水箱中（或合适的水源）向压力容器中注入冲洗水，把膜元件中原有的进水 / 浓水冲掉排放。冲洗水应是 RO 产水或脱盐水，不含硬度、过渡金属和游离氯。冲洗流量一般应为表 8.9 中清洗流量的一半。
- ② 在清洗水箱中配置选定的清洗溶液。配置用水必须是不含硬度、过渡金属和活性氯的 RO 产水或脱盐水。将清洗液的温度和 pH 调到目标值。检查并记录清洗液的 pH、温度、电导率、浊度和铁浓度。
- ③ 开始按设定时间循环。循环初始阶段，先排放系统内滞留的水以免稀释清洗溶液，然后再排掉约 20% 的带下来污染物的清洗液，之后再将清洗液回流至清洗水箱中。在开始循环 5 分钟内，缓慢地将流量调节到最大清洗流量的 1/3，以避免进水通道被大量洗下来的污染物污堵；之后增加流量至最大流量的 2/3 循环 5 分钟，最后再增加流量至最大清洗流量值。如果需要，当 pH 的变化大于 0.5，就要重新添加药品调节至目标 pH 值。清洗液温度在整个循环过程中都需要控制在最高允许范围内。每个循环步骤后，都需检测清洗液的电导率、浊度、铁含量等。如果这些数值明显高于初始值，清洗液应该排掉并更换成新的，以便提高清洗效果。

注意：不要超过表 8.8 中具体膜型号的最高 pH 值和温度极限值。

- ④ 清洗时通常交替采用循环清洗和浸泡程序。浸泡时间可根据制造商或化学品供应商的建议选择 0.5-8 小时。典型的清洗周期包括循环 30 分钟，浸泡 30 分钟。在整个清洗过程中要保持合适的温度和 pH 值，因为浸泡增加了膜元件与化学药品的接触时间。

注意：不要超过表 8.8 中具体膜型号的最高 pH 值和温度极限值。

- ⑤ 采用一种药剂清洗结束后，要用清洁水（不含硬度、过渡金属和游离氯的 RO 产水或脱盐水）进行低压冲洗作为漂洗，冲洗掉 RO 系统和清洗系统中的残留化学药剂。排放并冲洗清洗水箱，然后再用清洁水完全注满清洗水箱。将清洗水箱中的清洁水全部注入压力容器进行冲洗并排放掉，有必要时再重复冲洗一次。漂洗流量一般应为表 8.9 中清洗流量的一半。
- ⑥ 采用清洁水彻底冲洗后，就可用经过预处理的进水进行最后的低压冲洗，产水排放。进水压力应低于 0.4MPa，最终冲洗持续进行直至冲洗水干净，且不含任何泡沫和清洗剂残余物。通常这需要 15-60 分钟。运行人员可用干净的烧杯取冲洗排放水样并摇动，通过没有泡沫来判断清洗液是否已冲干净。可测试冲洗排放液的电导率，当排放水电导率与进水电导率的差值在 10-20% 以内，则可认为已冲洗干净；pH 表也可用来做冲洗水与进水 pH 值的比较。

当各段都清洗结束，且药剂都冲干净后，RO 系统可以重新开始运行，但初始的产水要进行排放并监测，直至 RO 产水可满足工艺要求（电导率、pH 值等）后方可真正产水。有时需要从几小时到几天，才得到稳定的 RO 产水水质，尤其是在经过高 pH 清洗后。

8.3.7 离线清洗

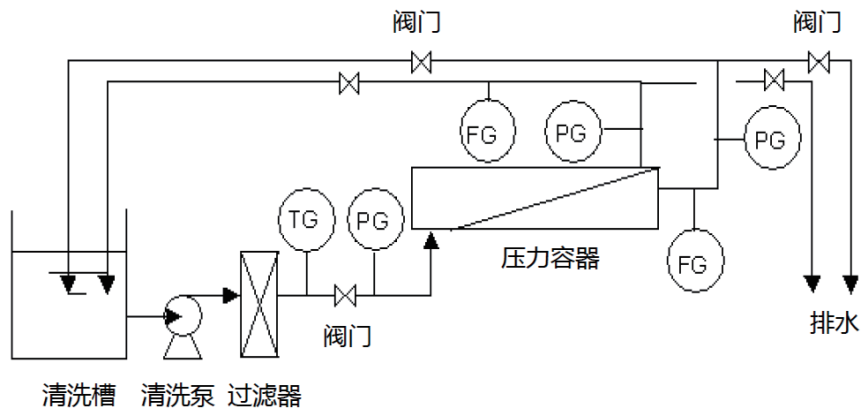


图 8.4 离线清洗系统示意图

离线清洗是指从大系统中取出一支膜元件，用特定的清洗装置进行化学清洗。离线清洗主要有三个优点：

- 对系统中出现问题的膜元件进行有针对性的检测；
- 对大系统进行清洗前，检验单支膜元件的清洗效果试验；
- 用于小系统清洗，单支膜的清洗方式可以增加清洗的效果。

单支膜元件的清洗系统示意图显示在图 8.4 中。离线清洗的步骤和方法请参见第三部分第八章 8.3.6。

8.3.8 膜元件反向清洗

化学清洗系统设计是清洗液从压力容器进水端流入，经过膜元件后从压力容器浓水端流出。这个流向与 RO 系统正常运行时是一样的。这种清洗方式通常是常见且有效的。但是在某些项目清洗时发现反向清洗更加有效。当有严重的生物、胶体、颗粒污染时，污染物会在进水端的首支膜上大量富集。要使这些污染物破碎并流过压力容器中的全部膜元件是非常难的。多数情况下，清洗液从反向流入能更容易洗脱污染物（请参见图 8.5）。下面指出反向清洗的一些注意事项。

- ① 去除末端结垢：如果有结垢存在，建议采用常规（正向）方向清洗。当难溶盐析出并沉积在膜系统末端时，就会产生结垢。在做反向清洗前，这些盐必须被去除掉。结垢的盐晶体边缘非常锋利，会损伤膜表面。因此如果晶体没有先去除，反向清洗可能比常规清洗造成更严重的损害。
- ② 清洗流量限值：在常规方向清洗时，末端 RO 膜元件受到止推环的支撑保护，不会受到挤压变形。但是反向清洗时首支膜不会有止推环的保护。因此，清洗时需限制清洗流量。我们建议反向清洗流量限制在常规清洗流量的 2/3。如果压差很高污染很严重时，清洗流量降至 1/3 来降低膜元件变形的可能性。单支 RO 压力容器常规（正向）清洗和冲洗流量，请参见表 8.11。单支 RO 压力容器反向清洗和冲洗流量，请参见表 8.12。污染严重时单支 RO 压力容器反向清洗和冲洗流量，请参见表 8.13。开始清洗时应先采用较低流量，然后根据实际压差值再缓慢提高。当污染物脱除且压差降低时，流量才能缓慢提高，然后在常规流量下进行反向清洗是最后一步。

表 8.11 单支 RO 压力容器常规（正向）清洗和冲洗流量（压力容器入口压力不要超过 4bar）

膜元件直径	单位 GPM	单位 LPM	单位 m ³ /h
8 英寸 - 非 34mil 隔网	36-48	136-182	8.2-10.9
8 英寸 -34mil 隔网	40-53	151-201	9.1-12.1

表 8.12 单支 RO 压力容器反向清洗和冲洗流量（压力容器入口压力不要超过 4bar）

膜元件直径	单位 GPM	单位 LPM	单位 m ³ /h
8 英寸 - 非 34mil 隔网	24-32	91-121	5.5-7.3
8 英寸 -34mil 隔网	27-36	101-135	6.1-8.1

表 8.13 污染严重时单支 RO 压力容器反向清洗和冲洗流量（压力容器入口压力不要超过 4bar）

膜元件直径	单位 GPM	单位 LPM	单位 m ³ /h
8 英寸 - 非 34mil 隔网	12-16	45-61	2.7-3.7
8 英寸 -34mil 隔网	13-18	50-67	3.0-4.0

注意：任何时候都不能从产水侧清洗膜元件。这会造成膜元件背压，使膜元件受到不可逆转的损害。

不是所有 RO 膜系统都可以简单地改造成可以反向清洗的。最好的方案是在系统建造时，就设计成可以任意方向清洗。请注意要求的是双向清洗，不能仅设计成反向清洗系统。

第二个方案是设计系统可以进行反向（浓水到进水）的冲洗。虽然不如反向清洗有效，但这也有助于去除 RO 系统前端的污染物。第三个方案是拆掉污染严重的首支膜，拆掉浓水密封圈，换膜方向，然后把浓水密封圈装入另一端（之前的浓水端）。这样严重污染可以更容易地通过常规正向清洗去除，在很多情况下以这种方式的运行也能帮助去除污染物。

反向清洗时所有清洗液浓度、pH 值、温度等限值与常规清洗一样。

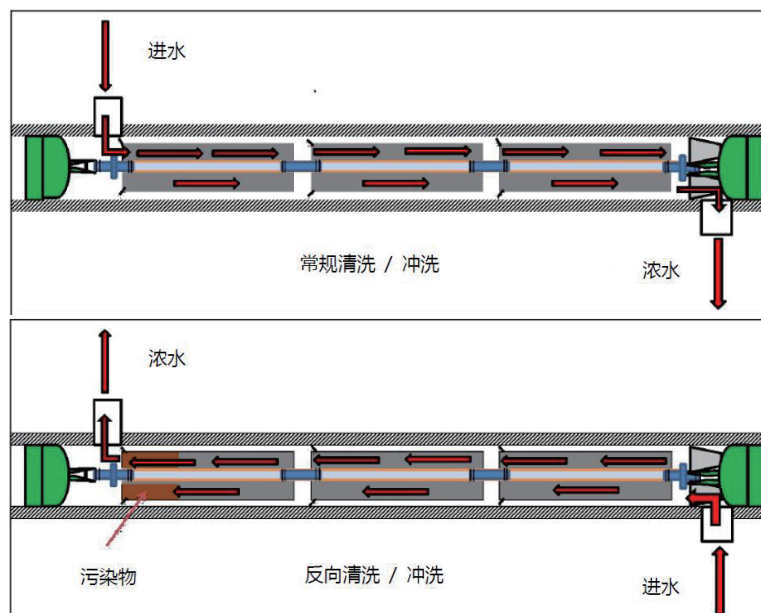


图 8.5 正向清洗和反向清洗示意图

8.3.9 系统消毒

在消毒膜元件之前，运行人员应确定系统中膜元件的材料类型，以确保采用合适的杀菌剂。

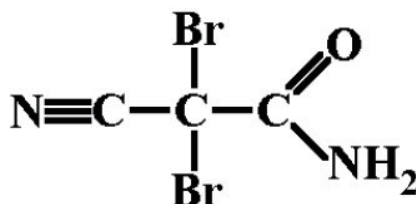
下述信息都是建立在采用通用化学品的研究基础上。海德能公司不证明具体药品品牌的合格性。化学品提供商应对其药品与膜产品的适用性负责。

如果不确定膜元件的材料类型，请向海德能公司的技术人员咨询确认。

警告：下面所列的某些杀菌剂对人体有害。请充分冲洗系统以便在系统投入运行前彻底清除残余杀菌剂。海德能公司对错误使用下面所列的化学品不承担任何责任，全部安全责任由消毒或保存的操作方承担。请向化学品生产厂商咨询下列化学品的正确使用和排放方法。

1. DBNPA

膜行业都知道聚酰胺膜元件对于游离氯基的氧化剂耐受能力非常有限。因此，在对于 RO/NF 系统进行杀菌或防止微生物滋生 / 污染时，可选其它安全性高的化学品。其中一个化学品是 DBNPA (2,2- 二溴 -3- 次氮基丙酰胺)，是反应快速的非氧化性杀菌剂。采用低浓度的 DBNPA 即可以有效控制好氧菌、厌氧菌、真菌和藻类的生长。DBNPA 的结构式是



DBNPA 是有优势的杀菌剂，因其在水相环境中可快速分解为二氧化碳、铵和溴离子。即使在敏感水体也可以安全排放。它可以通过水、亲核反应、紫外线等来分解，速度取决于 pH 值和温度。DBNPA 的半衰期估计为 24 小时 @pH7、2 小时 @pH8、15 分钟 @pH9。绝大多数微生物在与其接触 5-10 分钟后被杀死。

产品：用于 RO/NF 系统的市售 DBNPA 一般为 5-20% 的溶液，或白色结晶固体。

推荐使用方法：

冲击投加时，推荐每 5 天加入 30 分钟至 3 小时，投加浓度为 10-30mg/L 活性成分。冲击投加可以采用化学清洗系统在系统运行或低压冲洗时进行。即使低压膜对 DBNPA 的脱除率估计超过 98%，海水淡化膜则超过 99.5%，某些现场仍会要求投加药剂时排放 RO/NF 产水。对于进水中菌落数超过 100CFU/ml、或已形成生物膜的 RO/NF 系统，推荐采用 30mg/L 活性成分投加 3 小时。如果产水是用于饮用水，投加时产水应排放。

连续投加时，应加入 0.5-2mg/L 活性成分的 DBNPA。连续投加成本会比较高，请根据现场情况确认是否采用这种方式。

还原剂会使 DBNPA 钝化，如果进水中还有还原剂（例如 SBS），DBNPA 浓度应更高。如果运行或冲洗时进水中加有亚硫酸氢钠（SBS），则 1mg/L 的 SBS 需投加 1-1.3mg/L 的 DBNPA 应对钝化反应，另外多投加的浓度才会有杀菌作用。

虽然 DBNPA 不具有氧化性，当其浓度为 0.5-3mg/L 时，ORP 值约为 400mv。（1mg/L 余氯时，ORP 读数约为 700mv）。

作为化学清洗用时，建议 30-50mg/L 的 DBNPA 溶液循环 1 小时。对于严重生物污染系统，之后应进行碱洗。化学药剂商有相应测试装置，可以确认 DBNPA 的浓度以及是否完全从系统中冲洗掉。

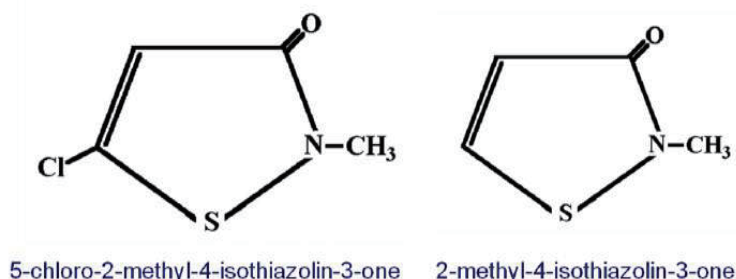
注意：

- DBNPA 对金属有腐蚀性，保存时应采用塑料桶，且采用加药泵投加。
- DBNPA 毒性极低，但是供应商推荐在冲击投加时产水进行排放。饮用水应用时，仅在非产水运行时使用。
- DBNPA 是弱致敏物。请按化学品安全说明书（MSDS）注意事项，适当使用和储存。
- DBNPA 不适用于膜元件的长期保存。

重要：用户应审阅全部技术文件且与供应商沟通，确保 DBNPA 使用的安全注意事项信息是更新且准确的。

2. 异噻唑啉

异噻唑啉是另一种非氧化性广谱杀菌剂，用于控制好氧菌、厌氧菌、真菌和藻类等。其常见形式为：



异噻唑啉杀菌速度比 DBNPA 慢很多。冲击投加时一般为 50-100mg/L（1.5% 有效成分溶液），时间为 4 小时。

高有机物含量进水中，异噻唑啉比 DBNPA 更有效。使用时 pH 范围应为 6-9。可以在运行时连续以 10-20mg/L 的低浓度投加。连续投加异噻唑啉是阻止生物生长，应尽量在系统上游来使用，以便控制整个系统工艺中的微生物滋生。在使用异噻唑啉前，建议先清洗 RO/NF 系统中的污染物，特别是天然有机物。

异噻唑啉可用作系统停运保护期间的保护液。长期保护时浓度为 500-1000mg/L，时间不超过 6 个月。

注意：

- 供应商推荐在冲击投加时产水进行排放。饮用水应用时，仅在非产水运行时使用。
- 异噻唑啉是致敏物。请按化学品安全说明书（MSDS）注意事项，适当使用和储存。

重要：用户应审阅全部技术文件且与供应商沟通，确保异噻唑啉使用的安全注意事项信息是更新且准确的。

3. 亚硫酸氢钠

亚硫酸氢钠（SBS）在较高浓度投加时能抑制微生物生长，特别是针对好氧菌。投加较高浓度 SBS 时具有抑制微生物生长的生物静电特性，去除好氧菌需要的氧气，创造不利于细菌、藻类和真菌生长的环境。采用 SBS 控制微生物时，每天加入 500mg/L 的亚硫酸氢钠溶液 30-60 分钟。

长期保存时可采用 1% 的亚硫酸氢钠保护液。膜元件采用 1% SBS 溶液保护在膜壳内时，需每月检查一次。如果溶液因空气氧化 pH 值降到 3 以下时，保护液必须进行更换。

4. 甲醛

浓度为 0.1–1.0% 的甲醛溶液适用于系统消毒或长期保存使用，至少应在膜元件使用 24 小时后才可与甲醛接触。

5. 戊二醛

浓度为 0.1–1.0% 的戊二醛溶液适用于系统消毒或长期保存使用，至少应在膜元件使用 24 小时后才可与戊二醛接触。

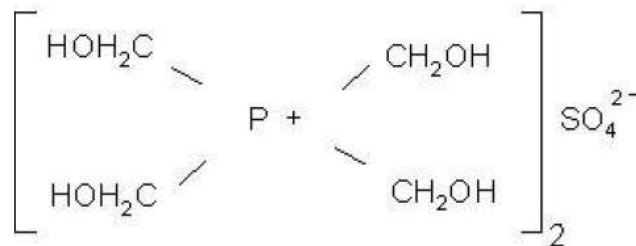
注意：对新膜元件使用甲醛或戊二醛可能会导致水通量下降 10-50%，因此应至少在膜元件使用 24 小时以后才允许与上述杀菌剂接触。无论如何，第一次与甲醛或戊二醛接触可能会造成水通量永久性降低；接下来继续使用这两种杀菌剂会导致水通量的暂时性降低，需要充分将残余杀菌剂冲洗干净至系统恢复到使用前的水通量为止。

6. 过氧化氢

如果进水中含有硫化氢或溶解的铁、锰等，不能使用过氧化氢。过氧化氢或含过氧乙酸的过氧化氢溶液可用来消毒。在采用过氧化氢杀菌时，必须确保配制溶液的水中没有过渡金属（铁、锰等），以免催化氧化而损坏膜元件。过氧化氢的浓度不应超过 0.2%，且温度不应超过 25°C。过氧化氢不能做为膜长期停运的保护液。

7. 四羟甲基硫酸磷

四羟甲基硫酸磷在钻井平台的膜系统中，用于控制硫酸盐还原菌（SRB）。有报告表明四羟甲基硫酸磷是环境友好型杀菌剂，对 SRB 很有效。



四羟甲基硫酸磷在酸性非生物条件下是稳定的。当 pH 高于 8 时，它在一周内会分解。分解产物是三羟甲基磷（THP）和三羟甲基氧化磷（THPO）。冲击投加时浓度为 50-100mg/L。连续投加时浓度为 10-20mg/L。用作钻井平台上的 RO/NF 系统长期保护液时，浓度为 600-1000mg/L。加药后会导致 25-30% 的通量下降。有研究表明可通过碱洗或某些表面活性剂清洗来恢复水通量。

8.3.10 药剂兼容性

海德能作为 RO、NF 和 UF 膜技术的领先供应商，已经提供了适用于海德能膜的通用化学品类别的参考资料。这些化学药剂类可参考相关技术内容。

关于有品牌的药剂，海德能认为化学品供应商负责确认其产品与海德能膜元件的兼容性。因此，如果有涉及到财物或其它负面影响，化学药剂商负有唯一责任。

海德能建议并向化学药剂厂家提供测试方法，以便他们去验证其化学药剂是否与海德能膜兼容。化学药剂供应商采取的测试方法，需验证对膜元件没有危害。

当测试药剂用在采用海德能膜元件的全尺寸或中试系统中时，我们建议采集和分析至少 12 个月运行数据，以确认化学药剂对膜没有危害。所有的运行数据应被准确记录，并用标准化程序对数据标准化，例如可采用 www.hydranautics.cn 官网上的海德能 RO 标准化数据程序 ROData。

另一个方法是采用通用膜兼容协议程序（UMCPP）。UMCPP 是一个正式的、标准化的、实验室流程，为了验证化学药剂是否与膜元件兼容。UMCPP 是一项得到工业认证的测试方法，适用于化学药剂厂家去验证膜的适用性。您可通过联系海德能得到一份关于 UMCPP 资料。

海德能不保证任何药剂的功效，对任何可能与海德能膜接触的药剂使用、合适剂量、药剂应用等不负任何相关责任。任何产品对海德能膜的正常运行造成间接影响的，都不属于海德能的责任。

海德能建议化学药剂生产商提供其药剂使用和排放说明书。海德能关注运行和维护人员的健康和安全，强烈建议在使用化学药品时，全程佩戴合适的个人防护用具。

第四部分

应用问答及文献案例

第九章 常见问题应用问答

9.1 海德能公司(Hydranautics)、日东电工集团(Nitto Denko Corporation)、日东(中国)新材料有限公司是什么关系

海德能公司 (HYDRANAUTICS CORPORATION) 创立于 1963 年，总部位于美国加利福尼亚州的 Oceanside 市。1987 年海德能公司被日东电工集团收购，成为日东全球膜事业部的一部分。日东（中国）新材料有限公司作为日东电工集团在华的销售公司，分离膜团队负责全部 Hydranautics 品牌膜产品在国内的技术支持与销售。若您有任何有关品牌、产地以及技术信息的问题，敬请与我们联系，我们会详尽解答您的疑问。

9.2 海德能膜元件有哪些技术优势

可以概括为：领先的膜片制备技术、精湛的膜元件卷制技术、LD 技术、独特的抗污染技术以及膜元件端板快速排气专利技术。详见第一章，1.2 海德能公司反渗透膜和纳滤膜元件的特点。

9.3 海德能公司有哪些系列产品

- 海德能™PRO 系列零排放和工艺应用膜元件
- PROC™ 系列增强型抗污染反渗透膜元件
- CPA™ 系列低压高脱盐反渗透膜元件
- ESPA™ 系列节能型超低压反渗透膜元件
- LFC™ 系列抗污染高脱盐反渗透膜元件
- SWC™ 系列海水淡化反渗透膜元件
- ESNA™ 系列节能型纳滤膜元件
- HYDRAcoRe™ 系列耐氧化脱色纳滤膜元件
- DairyRO™ 系列乳制品浓缩分离反渗透膜元件
- SanRO™-HS 系列卫生级反渗透膜元件
- NTU 系列超纯水终端超滤膜组件

9.4 海德能公司产品的主要用途是

- 海水淡化、苦咸水淡化
- 市政污水及中水回用
- 工业废水的深度处理及（近）零排放

- 工业纯水、锅炉补给水的制造
- 饮用纯净水的制造
- 市政给水净化处理
- 食品、制药及各种工艺用水制备
- 半导体用超纯水的制造
- 各种工艺废水脱色
- 乳制品的浓缩分离

9.5 ESPA2-LD MAX 节能超低压、大产水量、抗污染 RO 膜有哪些特点

ESPA (Energy Saving Polyamide) 节能型超低压膜元件可以在超低的进水压力条件下实现高产水量、高脱盐率。ESPA2-LD MAX 同时采用“MAX” & “LD 技术™”。“MAX”代表大膜面积 (440ft²/40.9m²)。“LD 技术™”代表膜元件采用宽进水隔网 (34mil)。采用 ESPA 膜元件的节能技术与低胶体污染的 LD 技术™相结合，ESPA2-LD MAX 膜元件提供优化性能，节能效果更好！

9.6 ESNA5-LD 节能型纳滤膜有哪些特点

ESNA5-LD 纳滤膜元件可以在超低的操作压力下保持高产水量，并高效去除水中的有机物，以及二价盐、硝酸盐等无机物，从而降低能耗并优化制水成本。同时宽泛的 pH 范围及“LD”技术使得膜元件有突出的化学稳定性和抗污染性能。是地下水软化脱盐及市政饮用水提标改质的理想选择。

9.7 ESNA5-LD 和 PRO-XS5 的区别

部分脱盐纳滤膜 ESNA5-LD 常用于地表水、地下水的净化，也可用于高盐废水的部分脱盐，以其优异的节能特性高效去除水中有机物、二价盐、硝酸盐等无机物，最大操作压力 4.14MPa。

选择性脱盐纳滤膜 PRO-XS5 用于处理高污染、高 TDS、或对分盐有要求的工业水源，可实现高水平的 SO₄²⁻/Cl⁻ 分离，最大操作压力 8.27MPa。

9.8 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件相比常规膜元件的优势是

卫生级反渗透膜元件是为了满足医药和食品工艺对于细菌和热原等卫生指标的严格要求而专门设计的一类产品，与普通反渗透膜元件的主要区别在于采用了无滞留区的完全填充设计 (Full-Fit)。卫生级热消毒型可以使用热水进行淋洗和消毒处理，主要用于药用纯水的生产以及食品工业应用。

9.9 SanRO™ 系列卫生级热消毒型反渗透膜元件的使用温度和常规膜元件有何区别

常规产品最高 45°C，SanRO™ 系列热消毒膜元件的最高操作温度升高至 55°C，其粘接剂是特殊类型，相比普通膜元件可承受更高的进水温度。

9.10 PRO 系列较常规抗污染膜有何特点

为应对各种高难度废水处理，海德能（Hydranautics）研发了 PRO 系列膜元件，可根据其产品特性应用于零排放系统的不同工艺阶段，能够在达成工业废水浓缩减量、提高回用率、分盐资源化的同时，兼顾节能和控制成本的目的。系列产品具备以下特点：

- 耐用 RO 和 NF 膜元件，抗污染、化学品耐受度好。清洗周期长，使用寿命长；
- NF 膜具有优异离子选择性，分盐效果好；
- 超高压 RO 膜最高耐压可达 12.4MPa；
- 创新膜片，减少有机物吸附；
- 34mil 进水隔网，防止胶体和颗粒物污堵；
- 专利快速排气端板，防止启机时压力冲击。

9.11 如何确定系统的回收率

工业用大型反渗透装置由于膜元件的数量多、给水流程长，实际系统回收率一般均在 75% 以上，有时甚至可以达到 90%。对于小型反渗透装置也要求较高的系统回收率，以免造成水资源的浪费。

主要根据以下两点来确定系统的回收率：

1. 根据膜元件串联的长度；
2. 根据是否有浓水循环以及循环流量的大小。

在系统没有浓水循环时，一般按照以下规则确定膜元件和系统回收率：

膜元件串连数与系统回收率

膜元件串联数量	1	2	4	6	8	12	18
最大系统回收率 %	18	29	46	59	68	80	90

9.12 膜元件的公称脱盐率、实际脱盐率与系统脱盐率有何不同

膜元件标准脱盐率为膜元件生产厂家在标准条件下所测得的脱盐率，以海德能公司的增强型抗污染系列产品为例，PROC10 在标准条件下的最低脱盐率为 99.6%（公称脱盐率为 99.75%），PROC30 标准条件下的最

低脱盐率为 99.7%（公称脱盐率为 99.8%）。

膜元件实际脱盐率为膜元件在实际使用时所表现出来的脱盐率，实际脱盐率有时会比标准脱盐率高，但更多情况下要比标准脱盐率低，这是由于标准测试条件与实际使用条件完全不同。在标准测试条件下，其标准测试溶液为氯化钠溶液，膜元件标准脱盐率表现为对氯化钠的脱除率。在实际使用条件下，由于水中各种离子成分不同，温度、平均水通量选取值、系统回收率等均不同于标准测试条件，而这些因素均会影响到膜元件的脱盐率。

系统脱盐率为整套反渗透装置所表现出来的脱盐率，同样由于使用条件与标准条件不同，系统脱盐率有别于标准脱盐率，同时由于反渗透装置一般均串联多根膜元件，而装置中每根膜元件的实际使用条件均不同，故系统脱盐率也有别于膜元件实际脱盐率，对于只有 1 支膜元件的装置，系统脱盐率才等于膜元件实际脱盐率。

要预测系统脱盐率的最简单的办法就是通过膜元件生产厂家的计算软件进行实际计算。

了解了膜元件标准脱盐率、实际脱盐率与系统脱盐率之间的关系之后，在设计反渗透装置、给用户提系统性能担保、验收反渗透装置或者评定膜元件性能时，一定要根据系统实际脱盐率来进行，而不能以膜元件标准脱盐率来进行。

9.13 如何计算系统脱盐率

系统脱盐率是反渗透系统对盐的整体脱除率，它受到温度、离子种类、回收率、膜种类以及其他各种设计因素的影响，因而不同的反渗透系统的系统脱盐率是不一样的，其计算公式为：

$$\text{系统脱盐率} = \frac{\text{总的给水含盐量} - \text{总的产水含盐量}}{\text{总的给水含盐量}} \times 100\%$$

有时出于方便的原因，也可以用下列公式来近似估算系统脱盐率：

$$\text{系统脱盐率} = \frac{\text{总的给水电导率} - \text{总的产水电导率}}{\text{总的给水电导率}} \times 100\%$$

值得注意的是，以此近似估算得到的系统脱盐率往往低于实际系统脱盐率。

9.14 影响膜性能的主要因素有哪些

纳滤和反渗透膜的性能主要由水通量（透过速度）和脱盐率（分离效果）来决定。水通量和脱盐率受操作压力、浓度、温度、流量、pH 值以及回收率等因素的影响。详见第三章，3.1.3 影响膜性能的主要因素。

9.15 温度对膜元件性能有何影响

温度对脱盐率和产水量的影响非常大。对全部类型的反渗透膜元件来说，当温度升高时，由于水的粘度降

低，产水量也随之增加。通常在相同的压力下，温度每上升或下降 1℃，产水量可增大或降低 3 — 4%。另一方面温度对于脱盐率的影响根据膜材质的不同而表现的大相径庭。一般来讲温度增高脱盐率降低。这是由于当温度上升时，盐的扩散速度就会增大。

9.16 什么是浓差极化，有哪些危害

反渗透膜分离过程中，水分子透过以后，膜界面中含盐量增大，形成较高的浓水层，此层与给水水流的浓度形成很大的浓度梯度，这种现象称为膜的浓差极化。浓差极化会使得运行能耗增加、污染风险增加，产水水质变差。

9.17 如何降低浓差极化的影响

- 严格控制膜的水通量。
- 严格控制回收率。
- 严格按照膜生产厂家的设计导则指导系统运行。

制造厂家对回收率的要求考虑了膜表面冲洗的流速，卷式膜流速不低于 0.1m/s，对水通量的规定中是考虑了膜表面浓缩盐分避免达到临界浓度，一般定量地规定浓差极化因子 $\beta < 1.2$ 。膜与膜之间设计了浓水隔网是为了增加浓水流动的紊流程度。

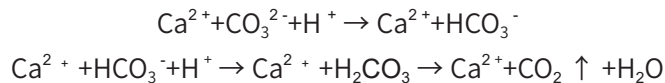
对于溶质来说，绝大部分无法通过而被截留在膜的表面上积累，造成由膜表面到主体溶液之间的浓度梯度，从而引起溶质从膜表面通过边界层，向主体流扩散。

减少浓差极化的另一办法是增加浓水流道的紊流，这在卷式反渗透元件设计中浓水隔网的设计已给予了考虑。

9.18 什么是朗格利尔饱和指数 Langelier (LSI)

朗格利尔饱和指数，是判断苦咸水是否倾向于结垢的核心水质指标。

水溶解物质的能力根据水的 pH 值不同有很大变化。原水中的碳酸钙依据加酸量的不同，碳酸根会变成碳酸氢根或二氧化碳气体。下列化学反应式就描述了碳酸盐在水中的平衡：



根据以上平衡，调节 pH 值到酸性区域，可以起到防止碳酸钙析出的作用，从而避免结垢。

是否生成碳酸钙垢的表征指标可以用朗格利尔饱和指数 (LSI) 进行评价：

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s$$

式中：pH_s——水中的碳酸钙饱和时的 pH 值；

pH —— 实际水溶液的浓水 pH 值。

在大多数反渗透系统中，浓水侧的 pH 值会高于进水的 pH 值，因此在考虑 LSI 时务必考虑浓水侧的 pH 值。不添加阻垢剂的情况下，通常评判是否结垢的方法如下：

$LSI \leq 0 \rightarrow$ 不结垢

$LSI > 0 \rightarrow$ 会结垢

9.19 什么是 SDI_{15}

污染指数 SDI 是表征反渗透系统进水水质的重要指标。SDI 的测定方法是依据 ASTM D4189-95，采用直径 47 毫米，过滤孔径 0.45 微米的微滤膜片，在 0.21MPa 的恒压下进行的。测定时，将过滤出第一个 500 毫升所需的时间记为 T_0 ，过滤 15 分钟后，再测定一个过滤 500 毫升所需时间，记为 T_{15} 。最后按照公式：

$$SDI_{15} = \frac{1 - (T_0 / T_{15})}{15} \times 100\%$$

即可求出 SDI_{15} 的数值。 SDI_{15} 的下标数字 15 是表示该 SDI 值是在过滤 15 分钟后测定的结果。有时由于给水水质恶劣、污染成分多，导致在过滤 15 分钟后过滤速度极慢，甚至已经停止，这时 SDI_{15} 的数值就无法计算。遇到这样的情况，说明该水源不具备直接进入反渗透或纳滤系统的条件，需要进行严格的预处理。

9.20 反渗透对微生物的去除效果如何

涵盖了多款海德能低压苦咸水膜产品的试验结果显示，当受到 MS-2 噬菌体等微生物挑战时，反渗透膜的去除率持续超过 4 个数量级 (>99.99%)。

研究表明，病原微生物的穿透主要源于受污染进水绕过反渗透膜屏障，例如压力容器适配器松动、O 型圈损坏、胶线泄漏或背压损坏等情况，均会导致受污染进水直接穿过膜屏障。氧化作用或轻微颗粒造成的膜损伤可能会使盐通过率上升，但通常不会导致病原微生物穿透。聚酰胺反渗透膜层由聚砜支撑层提供支撑，该支撑层同样具备病原微生物拦截能力。当盐通过率显著上升时，应及时排查，以确保未发生病原微生物泄漏。

9.21 常见的氧化剂有哪些，对膜有什么影响

余氯、臭氧、二氧化氯、高锰酸钾、过氧化氢、过氧乙酸是给水中常见的氧化物。不同氧化物与芳香聚酰胺膜的反应机理不同，但都会破坏芳香聚酰胺的结构，长此以往会使得膜元件脱盐性能发生不可逆的下降。因此我们建议使用适当过量的还原剂进行还原，以确保没有氧化剂进入膜系统。

9.22 反渗透膜元件常见的杀菌剂有哪些？

DBNPA、异噻唑啉酮、亚硫酸氢钠、甲醛、戊二醛等。不过对新膜元件使用甲醛或戊二醛可能会导致水通量下降 10-50%，因此应至少在膜元件使用 24 小时以后才允许与上述杀菌剂接触。无论如何，第一次与甲醛或戊二醛接触可能会造成水通量永久性降低；接下来继续使用这两种杀菌剂会导致水通量的暂时性降低，需要充分将残余杀菌剂冲洗干净至系统恢复到使用前的水通量为止。详见海德能技术服务公告 -TSB110 反渗透和纳滤膜元件消毒和保存的杀菌剂

9.23 电导率与总溶解固体之间的关系

电导率和总溶解固体之间没有固定的换算关系，但不同离子成分的浓度和其对应电导率可以采用换算因子估算，下表中列出了常见离子浓度与电导率的换算因子，采用离子的浓度乘以换算因子就可以估算出 25°C 时的电导率数据。

不同离子的浓度和电导率的换算因子

阳离子	换算因子	阴离子	换算因子
Ca^{2+}	3	OH^-	42
Mg^{2+}	4.4	CO_3^{2-}	2.4
Na^+	2.2	HCO_3^-	0.7
K^+	1.9	SO_4^{2-}	1.7
NH_4^+	4.3	Cl^-	2.2
H^+	350	NO_3^-	1.2

9.24 膜元件安装前应如何保存

存放于通风、干燥、避免阳光直射的室内，建议环境温度 4-35°C，最高 2 托盘叠放。详见海德能技术服务公告 -TSB108 反渗透和纳滤膜元件保存。

9.25 安装于系统的膜元件如何停机保存

安装于系统的膜元件的停机保护，受停机时间、环境温度的不同而不同。详见海德能技术服务公告 -TSB108 反渗透和纳滤膜元件保存。

9.26 在设计膜系统前应做的水质分析项目有哪些

水质分析项目

阳离子, mg/L	Ca^{2+}	其它检测项目	pH 值
	Mg^{2+}		水温, °C
	Na^{+}		总铁 (TFe), mg/L
	K^{+}		锰 (Mn), mg/L
	NH_4^{+}		硼 (B), mg/L
	Ba^{2+}		胶体硅, mg/L
	Sr^{2+}		活性硅, mg/L
阴离子, mg/L	HCO_3^{-}		总硬度, mg/L CaCO_3
	CO_3^{2-}		总碱度, mg/L CaCO_3
	Cl^{-}		总溶解固体 (TDS), mg/L
	SO_4^{2-}		悬浮物, mg/L
	NO_3^{-}		浊度, NTU
	F^{-}		COD, mg/L
	PO_4^{3-}		油, mg/L

9.27 如何确定系统所需的理论膜元件数量

当确定了设计产水通量 J (参照海德能公司设计导则) 和产水量 Q_p 值时, 所需理论膜元件数量 N_e 可以按以下公式计算:

$$N_e = Q_p \div (J \times S)$$

式中:

N_e ——理论膜元件数, 单位是支;

Q_p ——产水量, 单位是 m^3/h ;

J ——单位面积产水通量, 单位是 LMH;

S ——单支膜元件面积, 单位是 m^2 。

获得理论膜元件数量后, 建议使用海德能云计算软件 IMSDesign 进行复核。

9.28 如何选择清洗泵

反渗透系统运行一段时间后都会发生各种各样的污染, 为了防止反渗透膜元件的过分污染, 保证反渗透系统的正常运行, 必须设置反渗透清洗系统, 利用该系统来恢复已经污染的膜元件。

反渗透清洗系统应该包括精密过滤器、清洗泵、清洗水箱等。由于清洗的药剂既有碱性的, 也有酸性的, 所以整个清洗系统应该采用防腐材料, 在选用清洗泵时, 其流量范围为 $8.2 \sim 12.1 (\text{m}^3/\text{h}) \times \text{压力容器数量}$, 即每支压力容器的清洗流量应该大于 $8.2 \text{ m}^3/\text{h}$, 清洗应该分段清洗, 所以应该按照第一段压力容器的数量来考

虑流量。对于清洗泵的压力一般按照 $P=3 \sim 4\text{bar}$ 来选择。

9.29 如何选择清洗水箱

水箱体积应能容纳膜元件、管道、软管中的水替换出来。下表列出单支 RO 膜元件所需要的清洗溶液量。水箱设计时应考虑 100% 排放，方便投加药品和混合，清洗泵循环管路，合适排气口和溢流口，循环回路应接近于底部以便减少采用表面活性剂时的泡沫。

单支 RO 膜元件所需清洗液量
(不包括保安过滤器、管路和初始 20% 排放所需的清洗液量)

膜元件	所需清洗液量 (最小值) *
8040	34L
4040	9.5L

(*) 上述仅为最小值。当污染很严重时，可能需要更换清洗溶液，实际清洗液量更大。

9.30 如何使用海德能公司 IMSDesign 云计算软件

请登陆网址 www.imsdesign.com (全球) 或 www.imsdesign.cn (中国) 进行注册 IMSD 云软件。注册成功并进入您的帐号后，请选择“转至普通主页”模式，在导航条“新建设计”下拉条中点击“RO”，进行模拟计算。使用方法详见第五章 5.4 系统设计软件 IMSDesign 云的使用方法。

9.31 多段系统中如何解决前后段产水不均的问题

在多段系统中，浓水侧的渗透压力不断升高，有时会发生净驱动力 (NDP) 不足的现象。造成前后段产水不均衡的问题。这时有三个解决方法：

- 在每个段间加增压泵，以提高后段的驱动力；
- 在第一、第二段产水侧设置节流阀门。通过增加产水背压的方式，降低前段产水量，保持整体有效压力 (NDP) 的均衡。采用这个方法时，系统停止运行时有可能造成背压 (产水侧压力 > 进水侧压力)。在设计以及操作时必须谨慎处理；
- 前后各段采用不同过滤阻力的膜元件。前段采用阻力大的膜元件，例如：PROC10 或 CPA3-LD，甚至 SWC™ 系列海水淡化膜元件，人为降低前段的产水量，后段采用阻力小的膜元件，例如：ESPA™ 系列，以保证产水量。

9.32 浓水回流的作用与风险

小型系统或对回收率有更高要求的场合，系统浓水的一部分可以返回到高压泵前，一方面可以在系统不增

加原水量的情况下提供更多的进水，另一方面可以维持单支膜壳的最低浓水流量。但这样做将导致系统的进水含盐量增加，并最终导致系统产水水质变差以及更高的系统能耗。

9.33 洗洁精、凡士林是否可以作为膜元件安装的润滑剂

不可以。不恰当的润滑剂不仅会造成膜元件短暂或永久的通量损失，还可能导致膜元件中心管的破裂。

任何时候不允许使用石油类（如化学溶剂、凡士林、润滑油及润滑脂等）的润滑剂用于润滑 O 形密封圈、连接管、接头密封圈及浓水密封圈。允许使用的润滑剂只有硅基胶、丙三醇（甘油）或合格的水。

9.34 膜元件安装前的清洁工作

冲洗系统管路：如果系统是全新的，在安装膜之前需充分冲洗系统管路，以避免碎片、溶剂、余氯等与膜元件接触。

清洁压力容器：在安装膜元件之前需清洁压力容器的内部，防止污垢或碎片沉积在膜元件外表面。建议用海绵球浸入 50% 的甘油溶液后，采用合适的工具在膜壳内部来回擦洗，将膜壳内壁清洗干净。在清洁过程中，请注意不让工具划伤膜壳内表面。

9.35 膜元件的安装有方向么

有。膜元件的给水侧有一个浓水密封圈，注意密封圈的安装方向是口朝上游张开。浓水密封圈的功能是保证原水全部流到膜元件内不发生旁流。原水自身流速会使浓水密封圈的开口朝压力容器内壁紧压密封。若密封圈的安装方向相反，原水不能密闭，造成一部分原水流到膜元件外侧，使膜表面流速降低，导致污染加剧，从而缩短膜的使用寿命。

9.36 膜元件安装需要哪些工具

- 甘油
- 纯硅润滑剂（Molykote111 或 ParkerSuperO-Lube）
- 产水或清水
- PVC 管或绳 - 长度取决于压力容器长度
- 海绵球（将固定在 PVC 管或绳的一端）
- 毛巾或棉布
- 6" PVC 帽（当安装 8" 压力容器时）
- 垫片（建议厚度为 1mm、2mm、2.5mm、5mm 等）
- 浓水密封圈润滑时用刷子或涂抹工具
- 压力容器厂家建议拆卸和安装压力容器端盖所需要的工具

- 端板备件（例如 O 形圈、锁环、卡箍、螺钉、螺母）
- 人员防护用具（手套、眼镜、鞋、安全帽）

安装相关内容，详情请查看海德能技术服务公告 -TSB122 膜安装导则

9.37 膜元件安装时，记录膜元件在系统中的位置有什么好处

性能相同的膜元件安装于同一系统中，持续运行后不同位置的膜元件性能受污染、结垢、氧化、背压的影响而不同，记录膜元件在系统中的位置不仅可以快速准确的判断故障，而且可以经济高效的选择性能良好的膜元件留作备用，便于精细化管理。

9.38 垫片的作用与安装的注意事项

所有压力容器都容许一定长度的偏差，以适用膜元件长度的偏差。在系统运行时，压力容器的长度也会因膨胀而略有变化。因此，需要通过加装垫片来填充间隙，这样不仅可以防止系统启停时膜元件的窜动，也避免了 O 形圈磨损导致的泄露。垫片需安装在膜壳进水端。

9.39 止推环的作用与安装的注意事项

止推环的作用是限制膜元件轴向位移，分散水力冲击，避免膜元件出现“望远镜”现象。止推环需安装在每个膜壳的浓水端，且必须承压大头朝向膜元件安装。

9.40 什么叫背压，产水背压会有什么不良后果

在反渗透水处理领域，背压指的是产水侧的压力大于给水侧的压力的情况。卷式膜元件类似一个长信封状的膜袋，开口的一边粘接在含有开孔的产水中心管上。将多个膜袋卷绕到同一个产水中心管上，使给水水流从膜的外侧流过，在给水压力下，使产水通过膜进入膜袋后汇流入产水中心管内。

为了便于产水在膜袋内流动，在信封状的膜袋内夹有一层产水导流的织物支撑层。为了使给水均匀流过膜袋表面并给水流以扰动，在膜袋与膜袋之间的给水通道中夹有隔网层。

膜袋的三面是用粘结剂粘接在一起的，如果产水侧的压力大于给水侧的压力，那么这些粘接线就会破裂而导致膜元件脱盐率的丧失或者明显降低。因此，反渗透系统不能够存在背压。

由于反渗透膜过滤是通过压力驱动的，在正常运行时是不会存在背压的，但是如果系统正常或者故障停机，阀门设置或者开闭不当，那么就有可能存在背压，因此必须避免背压的发生。

9.41 反渗透系统的运行需要哪些监测仪表，具体的作用是

为了使反渗透装置能够安全可靠地运行，便于运行过程中的监控，应该安装必要的仪表和控制设备。一般需要装设的表计有浊度和 SDI 检测仪表，温度表、压力表、流量计、电导率表、pH 表、氧化还原电位表和余氯表。

1. 浊度和 SDI 检测仪表

反渗透系统要求的最大给水浊度为 1NTU、最大给水 SDI_{15} 为 5。若有超滤作预处理，给水浊度往往可以 $< 0.2NTU$ ， SDI_{15} 可以 < 3 。

2. 温度表

因产水量和脱盐率均与温度有关，所以需要监测以便求出标准化后的产水量和脱盐率。大型设备应进行记录，另外，温度超过 $45^{\circ}C$ 会损坏膜元件，所以对原水加热器系统应设超限报警、超温水自动排放和停运反渗透的保护。

3. 压力表

给水压力表、段间压力表、浓水压力表用于计算每一段的压降（也可装设压差表）并用于对产水量和脱盐率进行标准化。产水量、脱盐率和压差用于反渗透性能问题的分析。

保安过滤器要安装进出口压力表（也可装设压差表），建议当压差达到 0.1MPa 时更换滤芯。

给水泵进出口压力表用于监测给水泵进出口压力，进出口压力开关用于在进口压力低报警、停泵，出口压力高（延时，以防慢开门未打开）报警、停泵。

4. 流量计

产水流量计在运行中监测产水量，每段应单独装设，以便于标准化反渗透性能数据。产水流量应有指示、累计和记录，浓水流量计在运行中监测排水量，应有指示、累计和记录。

从各段产水流量和浓水流量可计算出各段的给水量、回收率和整个反渗透系统回收率，给水流量计主要用于反渗透系统加药量的自动调节（加酸、加阻垢剂、加还原剂），除支持累计外还要给出信号用于比例调节。

5. 电导率表

给水电导率表、产水电导率表指示、记录水的电导率，可设置报警，从给水电导率和产水电导率可估算出反渗透系统的脱盐率。

6. pH 表

当给水需加酸防止生成 $CaCO_3$ 垢时，加酸后的给水需装 pH 表。另外系统脱盐率也会受给水 pH 的影响。除指示、记录、设超限报警外，还可以自动控制不合格给水排放，并停运 RO。还可以与流量计配合对加酸系统进行比例积分调节。

7. 氧化还原电位表和余氯表

经加还原剂消除余氯的给水应装设氧化还原电位表，应有指示、记录、超限报警；

使用芳香聚酰胺膜元件时，不允许有余氯进入膜系统。故应装设余氯表，以指示、记录、和超越报警。

9.42 反渗透系统初次启动与运行的注意事项

1. 对给水加药系统核查

- ① 所有管道和装置必须都是防腐材料制作的。
- ② 核查系统中使用的所有管道对压力和 pH 值的适合性。
- ③ 检查加药系统包括：所加药品之间要兼容；加药管线上的逆止阀安装方向正确；药品与给水充分混合所有化学药品纯度符合要求。

- ④ 检查所有仪表是否已经过校准，保证加药系统的正确运行和准确监测。
- ⑤ 检查报警和安全阀设置正确与否。

2. 对反渗透系统检查

- ① 检查 5 微米保安过滤器是否能起到保护高压泵和反渗透膜元件的作用。
- ② 在将反渗透组件连接到管路上之前，吹扫并冲洗管路，包括反渗透给水母管。
- ③ 在 RO 装置启动之前，记录好每套 RO 中所有压力容器的系列号和所装膜元件的序列号。画一张图表明各压力容器在滑架上的位置。
- ④ 检查反渗透压力容器的管道是否连接无误（正常运行和清洗操作）。
- ⑤ 检查反渗透的压力表、流量计、电导率表安装正确与否。
- ⑥ 保证给水、一段浓水、排水、一段和二段产品水以及总产品水的取样点有代表性。
- ⑦ 如果产品水管上装设了关断阀，则要安装压力释放保护装置，如爆破膜。
- ⑧ 确认 RO 高压泵已经可以立即运行，检查一下泵的转动以及润滑情况。
- ⑨ 保证所有管线都采用防腐管道。
- ⑩ 核对每一段的给水、产水和浓水以及混合后的产水都装有采样装置。
- ⑪ 审查系统中所有管道对压力和 pH 值的适合性。
- ⑫ 核对泵与液位接触的部件是否由防腐材料制作。
- ⑬ 检查所有仪表是否已经过校准，保证反渗透系统的正确运行和准确监测。
- ⑭ 核对联锁、报警、安全网和延时继电器已经过正确的鉴定。检查管件、压力容器应严密不漏。
- ⑮ 核对产水管路是通畅的，当系统没加压力时，产水侧没有压力。
- ⑯ 保证浓水调节阀处于开启状态，可能需要人工调整开度。
- ⑰ 核对产品水流向排水沟。
- ⑱ 保证泵的节流控制阀的开度使初始的给水压力低于 50% 的运行压力。
- ⑲ 保证任何时候产水压力均小于给水压力，并正确设置了泄压装置。
- ⑳ 检查反渗透/压力容器固定在滑架上的 U 形螺栓不要拧得太紧，否则会使玻璃钢外壳翘曲。

3. RO 系统的试运行

在将给水送入 RO 系统之前，预处理系统必须工作正常，给水水质满足 RO 给水要求。具体操作如下：

- ① 在低压力下将系统中的空气赶出
- ② 检查并消除系统的泄漏
- ③ 用低压水将膜元件的保护液从系统冲出（开浓水排放阀）
- ④ 将产品水排向地沟
- ⑤ 打开浓水减压阀
- ⑥ 高压泵出口节流阀的开度调整到其初始压力的 50%
- ⑦ 启动高压泵继续低压冲洗
- ⑧ 关闭浓水排放阀，调节浓水调节阀，调节给水泵出口节流阀，打开产品水出口阀，关闭产品水排放阀，直至达到设计的产水流量和系统回收率
- ⑨ 试运行 72 小时
- ⑩ 做好运行记录包括试验用仪器药品清单；试验方法；预处理系统；原水加热自动控制；凝聚烧杯试验；余氯残留量测定；出水浊度测定，SDI 测定。

9.43 为什么刚开机时系统要低压冲洗

反渗透系统在停止运行后，一般都要自动冲洗一段时间，然后根据停运时间的长短，决定是否需要采取停用保护措施或者采取什么样的停用保护措施。在反渗透系统再次开机时，对于已经采取添加停用保护药剂的系统，应该将这些保护药剂排放出来，然后再通过低压冲洗把这些保护药剂冲洗干净，最后再启动系统。对于没有采取添加停用保护药剂的系统，低压冲洗系统内的死水或可能漏入的空气也是必要的。如果不排净空气，就容易产生“水锤”现象而损坏膜元件。

9.44 为什么要记录初始时的运行数据

在运行过程中，系统的运行条件，如压力、温度、系统回收率和给水浓度可能发生变化而引起产水流量和质量的变化。为了有效地评价系统的性能，需要在相同的条件下比较产品水流量和质量数据，因为不可能总是在相同条件下获得这些数据，因此需要将实际运行状况下的 RO 性能数据按照恒定的运行条件进行标准化，以便评价 RO 膜的性能。标准化包括产品水流量的标准化和盐透过率的标准化。

如果系统运行条件与初投运时相同，现在理论上所能达到的流量，称标准化的流量。现在理论上所能达到的脱盐率称标准化的脱盐率。

从上述定义可以知道，标准化的参考点是初始投运（稳定运行或经过 24 小时）的运行数据，此时反渗透膜基本上没有受到任何污染，今后要判断膜元件是否存在污染以及是否需要清洗，都需要以初始投运的数据来判断，因此，初始投运的数据尤其重要，必须进行记录。

9.45 如何获取标准化运行数据记录表

您可登录官网 <http://www.hydranautics.cn> 在解决方案→设计软件页面免费下载，也可直接联系我们。

9.46 反渗透系统日常运行应记录哪些内容

1. 启动记录

RO 装置的性能必须从一开始就记录，启动报告应包括完整的装置说明。所有仪表和表计必须按照厂家的建议进行校准并做记录。

2. RO 运行数据

运行数据可以说明 RO 系统的性能，在整个 RO 使用期所有的数据都要收集和记录，这些数据与定期的水质分析一起为评价 RO 装置的性能提供依据。

- ① 流量（各段产水和浓水流量）；
- ② 压力（各段给水、浓水、产水）；
- ③ 温度（给水）；

- ④ pH 值（给水、产水、浓水）；
- ⑤ 电导率／TDS（给水，产水）；
- ⑥ SDI_{15} ；
- ⑦ 最后一段浓水的 LSI；
- ⑧ 运行小时数；
- ⑨ 偶然事件（ SDI_{15} 、pH 值和压力失常、停运等）；
- ⑩ 所有仪表和表计的校准，必须按照制造商的建议方法和周期进行，但是 3 个月至少要校准 1 次；
- ⑪ 流量、压力、温度、pH 值、电导率、 SDI_{15} ，每班一次；
- ⑫ 每一段给水，浓水，产品水的 TDS 每月分析一次；
- ⑬ 余氯、电导率每天一次；
- ⑭ 浓水 LSI 每星期一次；
- ⑮ 偶然事件发生时记录下来。

3. 加药运行数据

- ① 加酸前后 SDI 每天一次；
- ② 5 微米过滤器进出口压力每班一次；
- ③ 酸耗量每天一次；
- ④ $NaClO$ 耗量每天一次；
- ⑤ 所有仪表和表计的校准按制造商的建议和方法，但至少 3 个月校准 1 次。

4. 维修日志

必须进行维修记录，它们可以提供关于渗透器和机械设备性能的更进一步的资料，包括以下内容。

- ① 日常维护；
- ② 机械故障 / 更换；
- ③ 反渗透 / 压力容器 / 膜元件的更换；
- ④ 清洗（清洗剂和清洗情况）；
- ⑤ 更换 5 微米过滤器滤芯；
- ⑥ 仪表和表计的校准。

9.47 膜系统的进水有哪些要求

详见第四章，表 4.2 反渗透进水的水质允许值检查表。

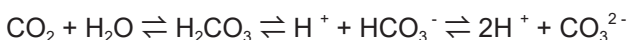
9.48 ORP 控制建议如何

为避免膜元件被氧化，海德能公司建议在 RO/NF 系统的进水处安装 ORP 表，以便于随时监测氧化性物质的浓度。除了废水回用的项目中采用不高于 5mg/L 氯胺之外，ORP 的读数应一直低于 300mV；或者为了保持稳定运行，应在现场测试并确定没有氧化性物质的最高 ORP 值。如果 ORP 高于报警设定值，运行人员应该接到报警信号，并采取相应措施，例如投加 SBS(亚硫酸氢钠)或增加 SBS 的投加浓度。海德能推荐测试残

余SBS，以确认没有余氯且减少SBS过量投加，残余SBS目标值为1-2mg/L。如果ORP超过最高点，系统应立即停机，直到ORP降至安全值以下后才能重新运行。

9.49 为什么二级反渗透系统给水会设计级间加碱工艺

我们都知道在水溶液中，碳酸根（ CO_3^{2-} ）、碳酸氢根（ HCO_3^- ）和二氧化碳（ CO_2 ）存在如下的平衡：



这个平衡随着pH值的变化而移动，当pH值小于8时，水中的 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 开始部分转化为 CO_2 ，当pH值小于4时，水中全部 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 都转化为 CO_2 。反渗透膜元件对溶解在水中的 CO_2 是不能脱除的， CO_2 透过膜元件到达产水侧后，会重新在水中转化为 HCO_3^- ，使得产水电导率升高。

特别是二级反渗透，因其给水pH值往往 < 6 ，水中 CO_2 的影响更为明显。因此设计级间加碱工艺来提高二级系统的脱盐率。

9.50 什么时候需要对膜元件进行化学清洗，清洗药剂应如何选择

化学清洗启动的时机及清洗药剂的选择，详见海德能技术服务公告TSB107 聚酰胺反渗透和纳滤膜的污染和清洗。

9.51 什么是离线清洗，有什么优点

离线清洗是指从大系统中取出一支膜元件，用特定的清洗装置进行化学清洗。离线清洗主要有以下优点：

- 对系统中出现问题的膜元件进行有针对性的检测；
- 对大系统进行清洗前，检验单支膜元件的清洗效果；
- 用于小系统清洗，单支膜的清洗方式可以增加清洗的效果。

9.52 什么是探针电导率测试

检查各个压力容器内填装的哪部分膜元件脱盐率异常，可以采用探针法（在线检测）或抽出检测法（离线检测）。探针法是采用塑料管插入中心集水管且贯穿全长进行测试不同位置膜元件产水电导率的方法。操作方法详见海德能公司技术服务公告TSB114 探针法诊断。

9.53 反向清洗的适用性与注意事项

化学清洗系统设计是清洗液从压力容器进水端流入，经过膜元件后从压力容器浓水端流出，这个流向与RO系统正常运行时是一样的。这种清洗方式是常见且有效的。当有严重的生物、胶体、颗粒污染时，污染物

会在进水端的首支膜上大量富集，使这些污染物破碎并流过压力容器中的全部膜元件后进入清洗水箱是非常困难的，此种情况下反向清洗是有益的。但需要注意：

- 如果有结垢存在，建议常规（正向）清洗；
- 反向清洗时由于给水端没有止推环的支撑，清洗流量下降至正常建议值的 2/3；
- 任何时候都不能从产水侧清洗膜元件。这会造成膜元件背压，使膜元件受到不可逆的损害；
- 不是所有 RO 膜系统都可以简单地改造后进行反向清洗。最好的方案是在系统建造时，就设计成可以从任意方向清洗。请注意要求的是双向清洗，不能仅设计成反向清洗系统。

9.54 不同品牌或型号膜元件是否可以混装

我们不建议混装，除非是经过验证或有意设计的。不同品牌或型号的膜元件通量往往存在差异，随意混装会导致有些位置的膜元件通量大、污染快，有些位置的膜元件通量小、未发挥其应有的性能，难以保证膜系统的稳定运行。

前文 9.30 就介绍了为了避免多段系统通量不均的混装设计。前后各段采用不同过滤阻力的膜元件。

9.55 系统内膜元件是否可以部分更换

可以，但需要精细化的管理与操作。

很多大型水厂要求每年更换每个压力容器中的 1 支或 2 支膜元件。如果压力容器中的膜元件仅部分更换，记录新旧膜元件的位置非常重要。新膜元件应该安装在压力容器的后端位置，从而避免新膜元件水通量过大且过早污染。被更换的膜元件通常是前端膜元件，因为它们在最高水通量下运行，很多情况下也是受污染最严重的。这种更换需要拆掉全部膜元件并重新安装膜元件；或者小心地拆下前端膜元件，然后缓慢推动其它膜元件向前，注意推动过程中不能使浓水密封圈窜动和翻转，造成膜元件卡塞。

9.56 废旧膜元件的处理建议

膜元件是用各种高分子有机材料制造的。用过的旧膜因不含超过监管部门监管的游离液体和有害物质，通常可当成一般垃圾来进行废弃。当需要把膜元件废弃的时候，用户必须遵照相关国家和地区的法律或条令，进行适当处理。

第十章 应用技术文献

10.1 石油采出水回用 RO 性能

10.1.1 概述

反渗透被用做继脱除石油、油脂、固体颗粒物、硬度和 pH 值提高后的最终处理步骤之一。在石油采出水回用项目中，设计 RO 系统的目的，是去除残余的溶解性盐类和有机物，包括钠、氯化物、二氧化硅、硼、苯和二甲苯。提高 pH 值后处理采出水的 RO 膜性能明显区别于常规中性 pH 值进水时的 RO 膜性能。这种不寻常的条件要求对透盐率、流量、高 pH 值与高温环境下膜的耐久性有更好的理解，因为运行条件与采出水的处理工艺有关。本文的目的是评估处理高 pH 值与高温采出水的 RO 膜运行第一年的性能。评估是基于对实际现场的运行性能，以及对现场取出膜元件的分析。

刚启动时，RO 系统的整体性能符合预期。二氧化硅和硼都能如期被脱除，甚至效果更好。但是，钠离子的透过率比预期要高。与理论预测相比，产水的 pH 值也得到了不同的结果。进水 pH 值为中性的 RO 系统，典型情况是产水 pH 值比进水低；而此项目中，RO 产水 pH 值比进水 pH 值高。

除了更好地理解采出水对膜渗透性和透盐率的影响，我们对膜的耐久性也做了分析。在高 pH 值与高温下运行会负面影响膜的完整性和膜元件的结构。为此，在运行六个月后，我们从系统中取出了一支膜元件，发现膜元件的支撑与胶线强度已经减弱。然而，膜元件的完整性仍保持完好，膜的高分子聚酰胺分离层也没有降解迹象，并且透盐率没有显著升高。

10.1.2 介绍

反渗透是在市政和工业废水的脱盐、制备饮用水等领域已应用几十年的成熟技术，现在还应用于石油工业难处理废水的再利用。具体来说，石油工业经常将蒸汽注入油层以降低石油的粘度，以便于提取石油。当蒸汽冷却凝结后，就产生了副产物——水。通用术语“采出水”就是指从石油和天然气的提取过程中注入蒸汽产生的副产物。

采出水是石油和天然气提取工艺中产生的副产物。蒸汽被注入油层以提高温度和降低石油粘性，从而提高石油的产量。采出水中含有高浓度的溶解性盐、有机酸，以及其它有机与无机污染物。由于地质构成的自然变异，以及产出石油基础产品的种类不同，这些污染物的浓度有显著的不同。不仅是由于水质差，而且处理量巨大，导致如何处置采出水成为一项挑战。采出水的容积可以达到提取石油量的十倍。

一个处理采出水的方法是将这些水回注到油层中。一部分采出水被回注到产油层，通过水或蒸汽的溢出提高油回收率。另一部分采出水做深井注入处理。深井注入受到注入井的容纳能力限制，转而限制油田产量，导致收益降低。早在上世纪 90 年代，采出水的再生及再利用工艺就被人们研究与试验。这些工艺虽已被证明有效，但却从没有被广泛使用，因为相对于石油开采的低成本，该工艺的成本高。然而，由于近年来石油价格的上涨，在 2008 年每桶石油超过 150 美元，再生与再利用采出水的兴趣重新恢复，于是增加了石油产量。自 20 世纪 90 年代以来，工艺技术发生了改进，使得处理采出水更具经济吸引力。在这些技术中，近年来能够看到显著改进的是反渗透除盐。本文将论证加州中部油田使用反渗透膜技术处理采出水的案例。RO 系统作为最后一步

流程，在脱除石油、油脂、固体颗粒与硬度的流程之后。采用聚酰胺膜，RO 工艺设计为高 pH 值下运行，用以去除可溶性盐和有机物，例如：钠离子、二氧化硅、硼和 TOC，处理后的水再利用于环境改善的目的。

10.1.3 RO 系统的预处理

由于采出水原水不符合反渗透膜的进水水质要求，在 RO 系统之前引入了下面的工艺，用以降低或消除有问题的油和油脂、硬度、金属、高温以及悬浮颗粒物。广泛的预处理措施确保了 RO 系统至少 18 个月的稳定运行。

1. 采用加气浮选（IGF）和核桃壳过滤器降低浮油的浓度，可以从 100ppm 降到 1.0ppm 量级以下。
2. 化学软化/沉淀或离子交换软化用于软化水，使得在 RO 之前硬度等级实现低于 0.1ppm（以 CaCO_3 计）。钙浓度降到 0.08ppm（以 CaCO_3 计），镁浓度降到 0.02ppm（以 CaCO_3 计）左右。为避免碳酸钙结垢，有必要添加阻垢剂并确保朗格里尔饱和指数（LSI）低于 1.8。
3. 热交换器用于降低温度。高于 80°C 的高温采出水在进入 RO 之前，温度必须降低到 40°C 以下。
4. 多介质过滤器是用来减少悬浮固体的浓度，从大于 20ppm 降低到 0.5ppm 以下。为确保 RO 的稳定性，污染密度指数（SDI）应降低到 4.0 以下。运行一年后，发现 RO 进水的 SDI 均值维持在 3-4 之间（图 10.1.1）。

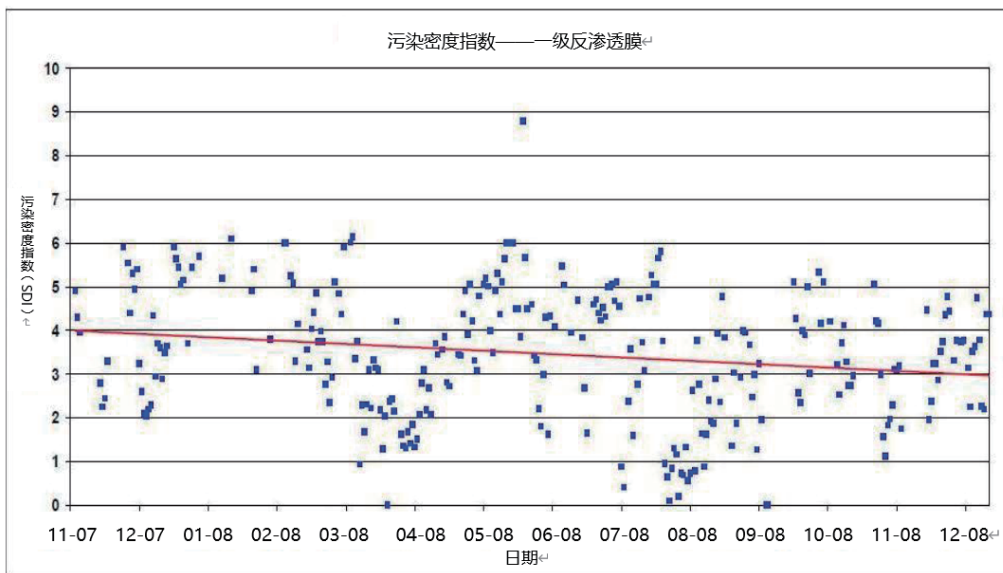


图 10.1.1 RO 进水的污染密度指数 (SDI)

除了上述的预处理工艺之外，采出水的 pH 值在到达 RO 前由 7.5 提高到 10.7。提高 pH 值既影响水的化学性质又影响 RO 膜的特性。改变水的化学性质是因为提高 pH 值影响了进水中特定成分的电荷、颗粒大小或溶解性，如硼、二氧化硅和溶解性有机物。提高 pH 值也可以影响 RO 膜的电荷，打开形成聚酰胺结垢的高度交联分子。一份 RO 膜性能的分析证明了这些水的化学性质及膜特性的改变提高了一些离子的脱除率，允许更高的回收率，实现更稳定的运行。

表 10.1.1 采出水原液与 RO 进水水质 (预处理工艺对水质的影响标注在最后一列)

	原液	进水	注解
pH	7.5	10.7	加碱提高 pH
温度 (°C)	80	35	热交换器降低温度
钙 (ppm)	80	<0.1	化学和离子交换软化降低硬度
镁 (ppm)	10	<0.1	
钠 (ppm)	2,300	2,300	无变化
钾 (ppm)	39	39	无变化
锶 (ppm)	1.0	1.0	无变化
碳酸氢根 (ppm)	696	119	由于 pH 变化, 两者分布发生转换
碳酸根 (ppm)	2.2	604	
硫酸根 (ppm)	133	133	无变化
氯化物 (ppm)	3,400	3,400	无变化
二氧化硅 (ppm)	160	90	通过澄清降低了一些
硼 (ppm)	26	26	无变化
总溶解性固体 (TDS)	5,500-7,500	5,500-7,000	无变化
总悬浮固体 (TSS)	20	<0.1	多介质过滤去除 TSS
TOC (ppm)	80	60	有机物的浓度通过加气浮选和核桃壳过滤器发生了降低
苯 (ppb)	6.4	6.4	
甲苯 (ppb)	11	11	
二甲苯 (ppb)	28	28	
总石油和油脂 (ppm)	53	38	
游离油 (ppm)	17	<1.0	

第一年的运行期间, RO 进水含盐量从 5700ppm 开始, 攀升到 7000ppm。采出水的硼浓度高达 26ppm, 二氧化硅浓度高达 160ppm。还有一些有问题的成分, 例如石油、油脂和特定的烃类化合物, 这些成分会损坏 RO 膜。浮油, 指的是直径大于或等于 150 微米的油液滴, 在采出水中的浓度为 17mg/L。芳香烃是潜在的损坏膜聚砜支撑层的物质, 如: 苯、甲苯和二甲苯, 这些物质在采出水中也有 6-28ppb 的低浓度。表 10.1.1 列出了预处理前采出水原液中的各种成分, 以及预处理后到达 RO 膜的进水中含有的各种成分; 从采出水原液到 RO 进水的过程中存在浓度发生变化的成分; 以及预处理工艺的效果。

10.1.4 RO 系统设计

采出水 RO 系统设计为两段系统。由于二级进水的水质较好, 本研究只针对运行挑战性较高的第一级系统。我们设计的一级 RO 系统要利用软化水与高 pH 值的条件来调节具有挑战性的采出水。

一级 RO 分为两段排列, 产水量为 688 gpm。所有 RO 膜元件组合起来使用能够实现 11 gfd 的系统平均水通量。选择这个水通量值是为了减少膜表面的颗粒物污染, 保持稳定的性能, 并且减少需要清洗的次数。由

于进水含盐量高、回收率高，且膜的渗透性相对较高，所以第一段有比第二段水通量大很多的倾向。因此，我们给第一段 120 psi 背压来改善两段之间的水通量平衡。

第一段回收率为 85%。如前所述，设计高回收率的原因是去除硬度和金属与提高 pH 值的组合措施。由于预处理消除了 CaCO_3 和 SiO_2 的潜在结垢风险，回收率只受渗透压的限制。

膜的选择是基于对高含盐量进水的最大脱除率，包括脱除二氧化硅和硼。设计 RO 系统时，最高脱盐率的苦咸水膜能够达到在标准测试下 225 psi 的压力和 1500ppm NaCl 浓液下，99.7% 的氯化钠脱盐率与 6500gpd 的流量。膜元件采用 31mil 进水隔网，比许多标准苦咸水膜 28mil 隔网相比，可以增加 25% 的流道高度，更厚进水隔网能使粒子更容易通过而不被网眼截留。使用厚隔网是更趋向于降低系统进水与末段浓水间的压力损失。厚隔网还可能减少清洗的次数，同时提高每次清洗的效果。

10.1.5 RO 系统的性能

2007 年秋季启动时，进水温度是 35°C ，进水电导率为 $12,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，进水压力为 407psi，非常接近预设计算值 400psi。高温、高 pH 值下系统透盐率为 3.4%（脱盐率 96.6%），产水电导率为 $1,100 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。自运行起的 12 个月，膜透盐率仅增加了 7%（图 10.1.2）。

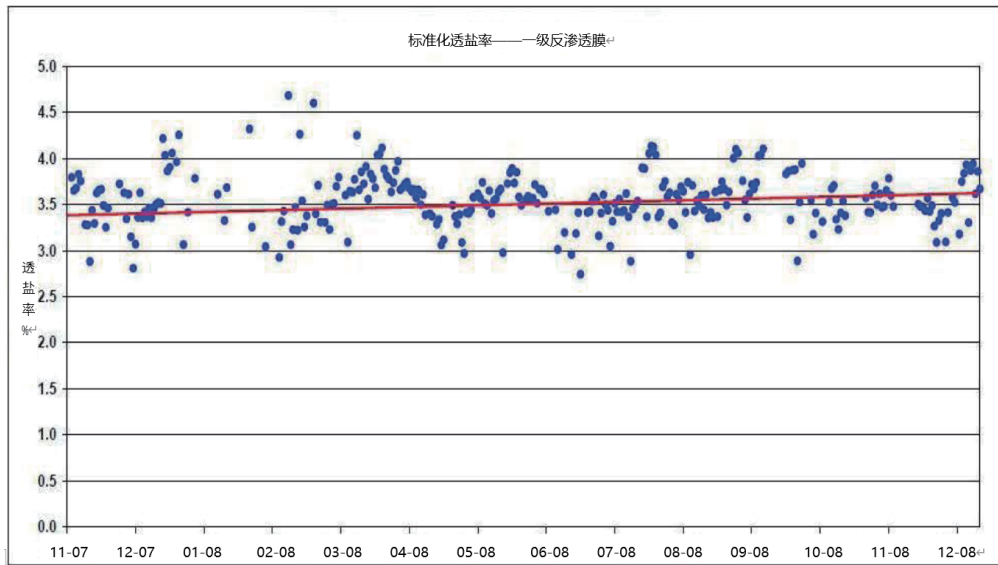


图 10.1.2 处理采出水的一级标准化透盐率

大多数离子的透过率与预期一样低，或者低于预期。虽然大多数离子符合预期，整体产水水质较好，但是钠离子透过率比预期高。一份对进水、产水和浓水的分析（表 10.1.2）展示了处理采出水时膜的一些独特的反应。如前所述，尽管二氧化硅浓度高，进水 pH 值 10.75 允许高回收率。浓水中的二氧化硅浓度为 541ppm，比中性环境下典型的浓度值高两倍以上。类似地，二氧化硅的脱除率为 99.8%，远高于中性环境下 99.0% 的脱除率。二氧化硅的溶解性增加与脱除率升高归因于高 pH 值下活性二氧化硅的离子化。活性二氧化硅是单体结构的，包含一个硅原子。活性二氧化硅又称为单硅酸，它在中性 pH 值仅轻微离子化。当 pH 值为 8.5 时，10% 的活性二氧化硅发生离子化，随 pH 值上升到 10，多过 50% 的活性二氧化硅变成了离子形态。这种在高 pH 值下发生高度离子化的特性具有防止二氧化硅聚合的效益，因而减少结垢的趋势，同时因膜表面带负电荷而增加二氧化硅的脱除率。硼的脱除率为 96%，这对于苦咸水膜来说是不错的。

表 10.1.2 处理采出水的一级 RO 产水水质分析

	进水	产水	浓水	脱除率 %
pH	10.75	11.5	10.3	—
Na (mg/L)	2,180	127	12,800	98.3
Cl (mg/L)	2,223	53.3	14,890	99.4
SiO ₂ (mg/L)	92	0.528	541	99.8
B (mg/L)	22.3	2.68	118	96.2

还值得注意的是，产水的 pH 值比进水升高得多。在一个典型的 RO 系统中，进水 pH 值中性时，产水 pH 值比进水低 1-2 个单位，这是因为二氧化碳（CO₂）的原因，它是一种能够自由透过膜的气体，而碳酸氢根（HCO₃⁻）则会被阻挡。维持二氧化碳浓度不变的同时，降低了 HCO₃⁻ 浓度，从而导致 pH 下降。而在采出水通过 RO 处理时，pH 值发生了相反的变化：进水 pH 值高达 10.75，产水 pH 值更高，达到 11.5。这一现象可能是由于随着 pH 升高，氢氧根离子（OH⁻）浓度上升所致。OH⁻ 浓度随 pH 升高而升高，膜表面带负电荷的羧基受到排斥，或者说是打开了通道，使膜发生了“膨胀”。这种“膨胀”效应增加了某些离子的透过率，包括 OH⁻。OH⁻ 比 Cl⁻ 更容易透过膜。OH⁻ 的高透过率就需要另一种相反电荷离子的高透过率以维持电中性。这就解释了为何钠离子（Na⁺）的透过率会高于预期。在此系统中，Na⁺ 的透过率几乎是 Cl⁻ 的六倍，而通常情况下两者应相近。

10.1.6 单支膜元件分析

对于 RO 膜元件的长期性能和完整性来说，采出水作为 RO 进水是一个挑战。高 pH 值与高温结合会降低膜的胶线和支撑层强度。同样，芳香烃的存在也能削弱膜的支撑层。为确定采出水作为进水对 RO 膜的影响，运行六个月后从 RO 系统中取出首支膜进行详细分析。首先对该膜元件进行了标准条件的测试：压力 225 psi、回收率 15%、1500 ppm NaCl 溶液、温度 25°C。测试结果如下表 10.1.3 所示，并与新膜出厂测试数据进行了对比。测试的结果表明，该膜元件的产水流量仅下降了 16%，透盐率仅上升了 5%。该膜元件性能的变化与系统整体透盐率仅增加 7% 的运行情况相吻合。膜元件进水端与浓水端的压差明显升高。考虑到该膜位于系统最前端，压差升高属预料之中。

表 10.1.3 进水为 pH 10.7、温度 35°C 采出水的 RO 膜运行六个月前后标准性能测试结果对比

出厂测试结果			运行六个月后测试结果			变化率 %		
脱盐率 %	流量 GPD	压差 Psi	脱盐率 %	流量 GPD	压差 Psi	脱盐率	流量	压差
99.80	4,887	1.5	99.79	4,113	3.9	+5%	16%	+160%

另外，我们还从膜元件中提取了膜片样品进行更多测试，以确定暴露在采出水中膜片的支撑强度与胶合强度。为确定膜片的强度，我们从整张平膜的不同位置裁剪出四片尺寸为 25mm×130mm 大小的条状膜片样品，用张力计进行测试。结果显示，暴露于高 pH 值、高温（35°C）采出水进水中六个月的膜片，比新膜片降低了 35% 的拉伸强度。

表 10.1.4 新膜和旧膜（在采出水进水中运行 6 个月，pH=10.7，温度 35°C）的拉伸强度

	断裂张力 kg 样品 1A	断裂张力 kg 样品 1B	断裂张力 kg 样品 3A	断裂张力 kg 样品 3B	断裂张力 kg 平均值
新膜片	18.5	18.6	12.5	11.6	15.3
运行 6 个月后	10.1	10.2	10.5	8.8	9.9

胶水把一张张 RO 膜片密封在一起，形成收集产水的口袋，是膜元件的重要组成部分。如果胶线有问题，膜元件的完整性就会遭到破坏，进水的水流能够混到产水的水流中去。我们用张力计测试返回膜元件胶线的剥离强度。设定张力计每分钟 10 英寸的拉动速度。图 10.1.3 显示了新膜的剥离强度（A）和在采出水中运行六个月的旧膜的剥离强度（B）的差异。旧膜胶水的最大剥离强度为 0.9 kg，低于新膜胶水最大剥离强度 2 kg 的一半。

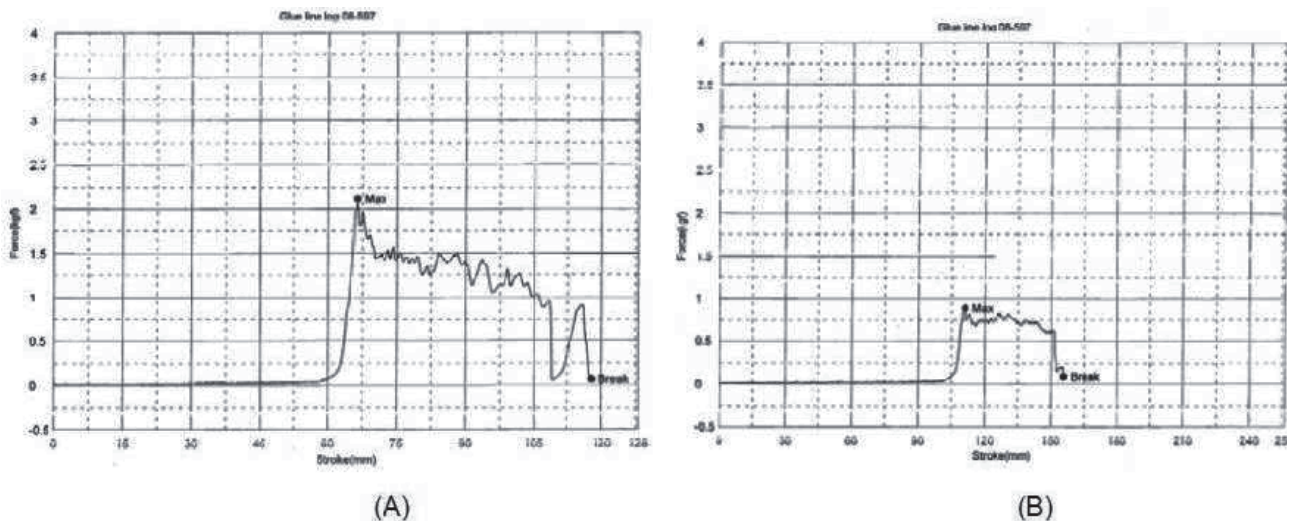


图 10.1.3 (A) 新膜与 (B) 采出水运行六个月旧膜 (pH=10.7, T=35°C) 的胶水剥离强度

10.1.7 总结

反渗透膜已被成功用作石油和天然气开采过程中产生的采出水处理流程中的最终步骤之一。由于预处理有效且 RO 膜本身具备良好的耐久性，反渗透系统可实现超过一年的稳定运行。一级 RO 系统的运行证明了：

1. 在本应用的极端条件下，大多数离子（包括硼、二氧化硅和氯离子）的脱除率均达到或高于预期。然而，高 pH 值、高温和高进水含盐量导致钠离子的透过率比预期高出六倍以上。
2. 在具有挑战性的采出水进水中运行六个月后，从系统中取出首支膜进行再测试，证实了膜具有稳定的渗透性和透盐率。
3. RO 膜成功地运行于高 pH 值（10.7）与高回收率（85%）条件下，且几乎没有污染。基于二氧化硅的溶解度曲线，浓水中 SiO_2 浓度在 pH=11.2 时保持在 600 ppm 以下，有机物浓度也维持在较低水平。
4. 进水 pH 为 10.7，温度为 35°C，且存在烃类化合物。这使得膜支撑和胶线强度减弱。但是，膜的完整性仍然保持完好，聚酰胺分离层没有降解迹象，透盐率也没有大幅上升。

10.2 工业废水处理中采用超高压反渗透的效益

10.2.1 摘要

由于水资源成本上升及短缺影响，工业领域对水回用的需求日益增加。此外，随着废水法规的出台和环保意识的增强，各种工业应用开始寻找创新方法来减少污染排放量与环境影响。

反渗透 (RO) 制造商发现，若工厂采用超高压 RO 膜元件和系统来替代传统废水处理方案，可以显著降低能耗和废弃物排放量。一家生产含有高浓度二甲基甲酰胺 (DMF) 废料的工业制造厂，最初是使用生物反应器来进行废水处理。由于城市对排放浓度限制的收紧以及维护老化系统存在困难，该现场认为有必要更换其生物反应器系统。由 Saltworks 设计并配备海德能 PRO-XP1 膜的超高压反渗透 (UHPRO) 系统被认定为合适的替代方案。经过 8 个月的运行，该工业制造厂的 DMF 处理系统电力成本降低了 72%，系统总回收率达到 83%。

10.2.2 引言

全球水资源短缺问题日益加剧，而水资源需求仍在持续激增。根据联合国经济和社会事务部的数据，预计到 2025 年，将有超过 18 亿人生活在水资源严重短缺的地区，另外世界总人口的三分之二将生活在水资源紧张的地区。尽管气候变化确实影响着世界日益严重的水资源短缺，但废水处理和再利用的不足进一步加剧了这一问题。据估计，全球每年产生的废水总量达 3590 亿立方米，但其中仅有 11% 得到再利用。

新加坡是一个天然淡水资源匮乏的国家（新加坡国家水务局，2022 年）。过去，新加坡严重依赖从马来西亚进口淡水。21 世纪初，新加坡推出了 NEWater 废水处理工艺，该工艺利用膜技术将废水处理为饮用水。根据新加坡国家水务局（2022 年）的数据，再生水已满足新加坡 40% 的用水需求，预计到 2060 年，将提升至 55%。在美国南加州，桔县地下水补给系统 (GWRS) 会对城市生活污水进行深度处理，之后将处理后的回水注到地下含水层（桔县水务区，2022 年）。该系统每天可为该市回收多达 38 万立方米的淡水。过去，从高度污染的工业废水中回用水由于多重因素而受到限制或未实施，其中一些因素包括：水回用成本与城市水价的对比、现有处理技术的局限性以及相对宽松的废水处理法规要求。当前的情况迫使上述影响工业废水回用的因素发生了转变：水资源短缺导致供水成本上涨，部分工业污染物的处置要求也更为严格。反渗透 (RO) 膜技术的创新突破，使超高压运行成为可能，为工业废水的回用提供了一个可行的解决方案。

10.2.3 超越标准 RO 的限制

1. 现有高压 RO 的局限性

反渗透系统的最大回收率取决于两个因素：待处理水的结垢倾向，和 RO 膜元件的最大操作压力。RO 系统的回收率是将产水的流量除以进水流量再乘以百分之一百计算（图 10.2.1）。随着系统回收率的增加，要处理的进水流量会减少，浓水的总溶解固体 (TDS) 则会增加。浓水的 TDS 含量越高，所需的操作压力就越大，以此来克服进水和浓水之间的平均渗透压。

$$\text{产水回收率}\% = \frac{\text{产水流量}}{\text{进水流量}} \times 100\%$$

图 10.2.1 计算 RO 系统百分比回收率的方法

常规海水反渗透 (SWRO) 膜元件在 35° C 及以下温度的条件下，最大操作进水压力约为 83 bar(1,200 psi)。当处理海水或某些工业废水这样的高 TDS 进水时，系统最大回收率主要受限于常规 SWRO 膜元件的最大操作压力。

2. UHPRO 元件 PRO-XP1 的性能

海德能 PRO-XP1 是一种能耐受超高压的卷式 RO 膜元件，其设计最大操作压力可达 124 bar(1,800 psi)。该膜元件的性能通过两个中试测试来验证：中试测试 #1 和中试测试 #2。两个测试均采用单支 4 英寸直径的 PRO-XP1 膜元件，在 120 bar 恒压闭环系统中运行。

中试测试 #1 处理了进水 TDS 浓度为 66,000 mg/L 的 NaCl 溶液。浓水经循环回流（图 10.2.2），直至最终浓水 TDS 浓度达约 126,000 mg/L。在测试期间定期收集 4 英寸 PRO-XP1 元件的性能数据。进水 TDS 浓度升高时，膜元件的通量和产水水质的变化情况如图 10.2.3 所示。正如本文前面所解释的，进水 TDS 浓度越高，渗透压越大，产水所需的进水压力相应也越大。由于在 TDS 浓度增加的同时压力保持恒定，渗透通量随之下降。随着进水盐度升高，产水盐度也有所上升，这符合预期，因为膜的截留率与总盐度相关。

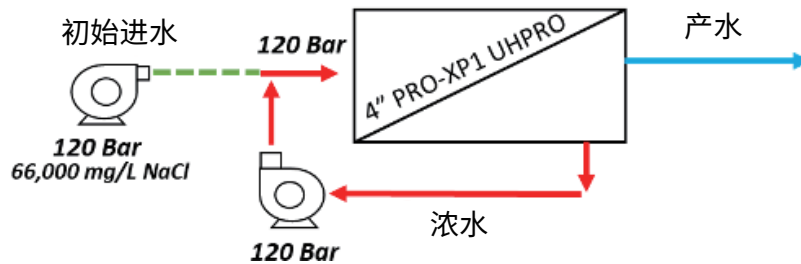


图 10.2.2 中试测试 #1 的工艺流程图

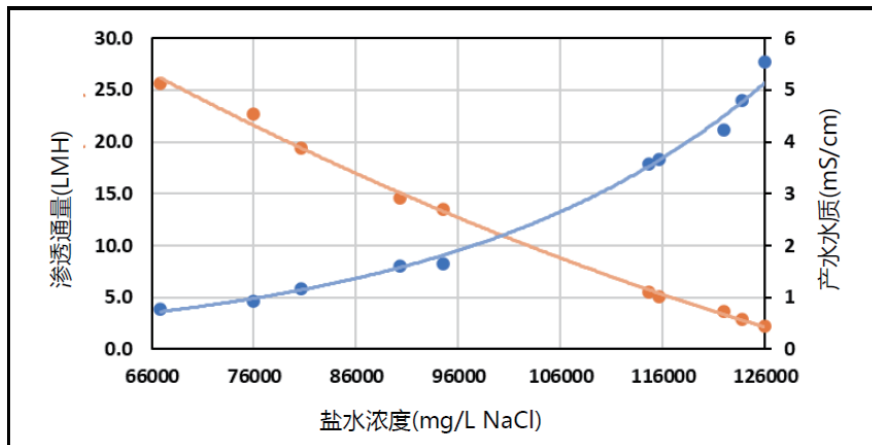


图 10.2.3 PRO-XP1 4 英寸膜元件处理不同盐度的 NaCl 溶液时，渗透通量和产水水质的变化情况。（从中试测试 #1 的结果中总结）

中试测试 #2 处理了从现场收集的水样，其 TDS 浓度约为 65,000 mg/L。浓水经循环回流（图 10.2.4），直到最终浓水的 TDS 浓度达到约 145,000 mg/L。在测试期间定期收集 4 英寸 PRO-XP1 元件的性能数据。进水 TDS 浓度升高时的膜元件的通量和产水水质的变化情况（如图 10.2.5）。尽管中试测试 #2 以更高的 TDS 浓水结束，但其最终通量却高于中试测试 #1。这是由于现场收集的水样含

较多硫酸根离子，导致 145,000 mg/L TDS 时的渗透压低于 126,000 mg/L TDS NaCl 溶液的渗透压。

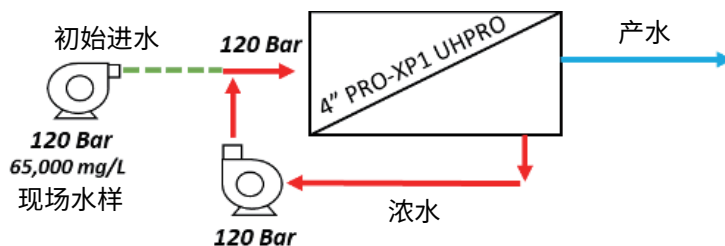


图 10.2.4 中试测试 #2 的工艺流程图

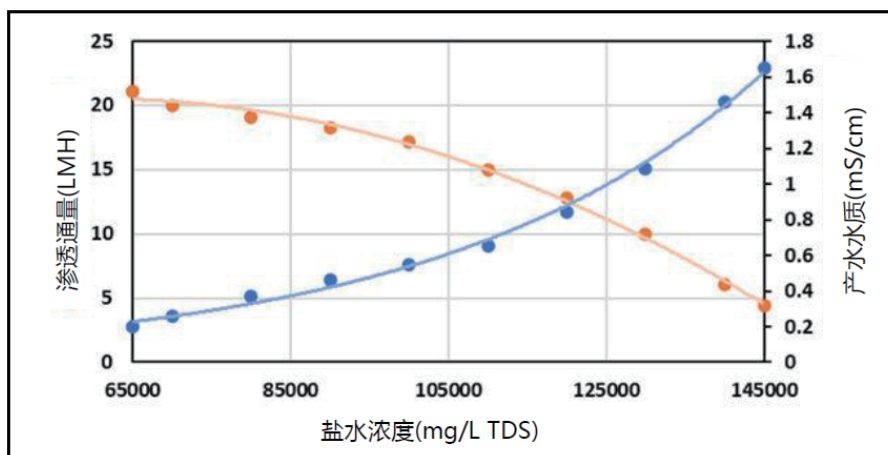


图 10.2.5 4 英寸 PRO-XP1 膜元件处理不同盐度现场水样时，渗透通量和产水电导率的变化情况。（从中试测试 #2 的结果中总结）

若能有效控制膜的结垢与污染情况，采用 8 英寸直径 PRO-XP1 UHPRO 膜元件的系统能够将氯化钠浓缩至 TDS 浓度 130,000 mg/L。显著高于传统 SWRO 膜元件约 80,000 mg/L TDS NaCl 的水平。

3. UHPRO PRO-XP1 的可靠性和稳定性

由于在超高压下处理高盐度进水时存在的压力变化性，对 PRO-XP1 元件的性能需具体分析。然而，由于 PRO-XP1 元件结构的稳定性，制造商已经研发出一个压缩因子，使设计人员可根据进水离子组成、产水回收率和系统最高温度来计算所需压力、产水电导率和预期通量。这个压缩因子已集成到膜制造商的预测软件中。压缩因子受系统最高温度的影响最大，因此建议 UHPRO 系统配备可靠的温控装置。

当 PRO-XP1 元件首次装入新系统时，初始通量较高，随后会逐渐下降，然后在 1 到 3 天内稳定到预期通量的水平（如图 10.2.6）。PRO-XP1 元件的初始通量常比稳定后的通量高 25%-45%，这一现象属于正常情况。

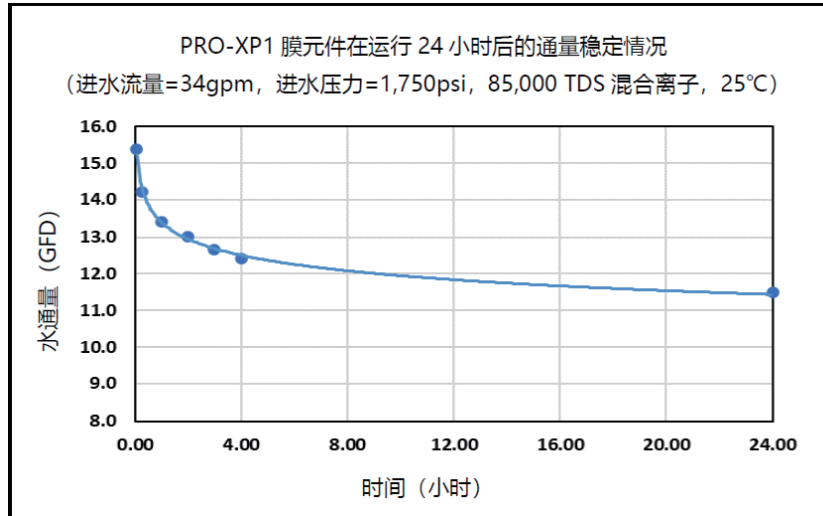


图 10.2.6 PRO-XP1 膜元件在运行 24 小时后的通量稳定情况

PRO-XP1 即使在极端条件下也表现出稳定的性能。一套处理高 TDS、高 COD 工业废水的 PRO-XP1 中试装置在 8 个月的运行期间，即便每两周进行一次严苛的 CIP 清洗，仍保持了稳定的脱盐率及透盐率（图 10.2.7、图 10.2.8）。对于处理高有机物进水的系统而言，中试装置在运行的首月出现了进水压力上升的情况，然后趋于稳定（图 10.2.9）。

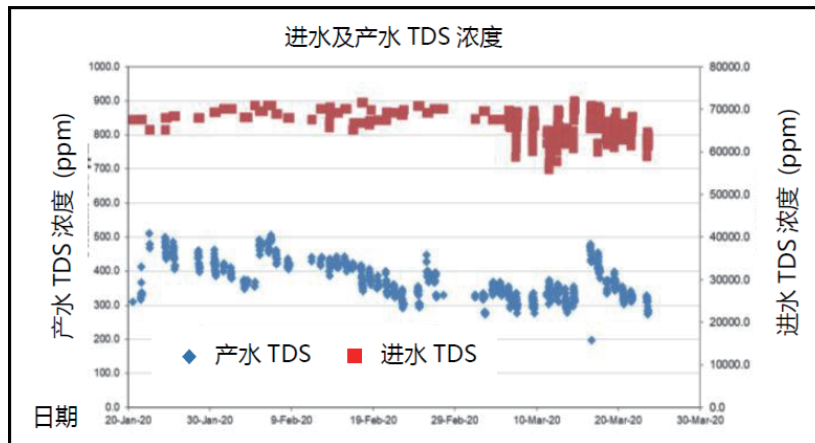


图 10.2.7 前三个月运行时的产水和进水浓度

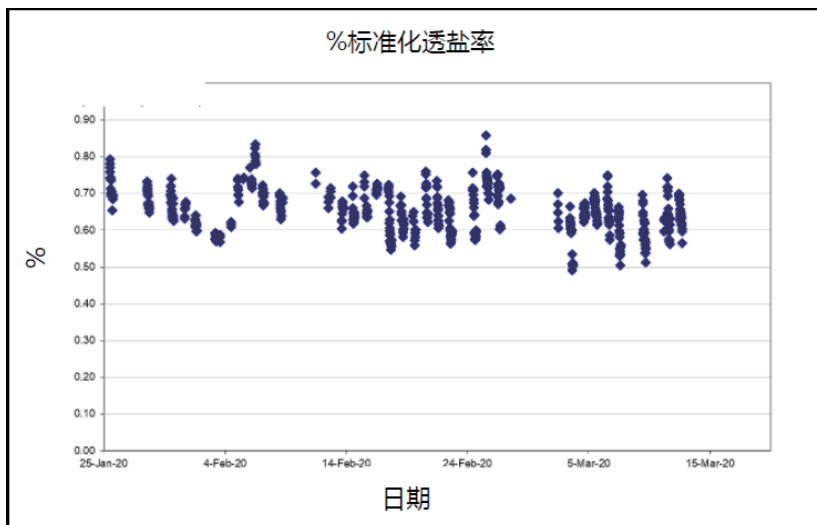


图 10.2.8 前三个月运行时的标准化透盐率

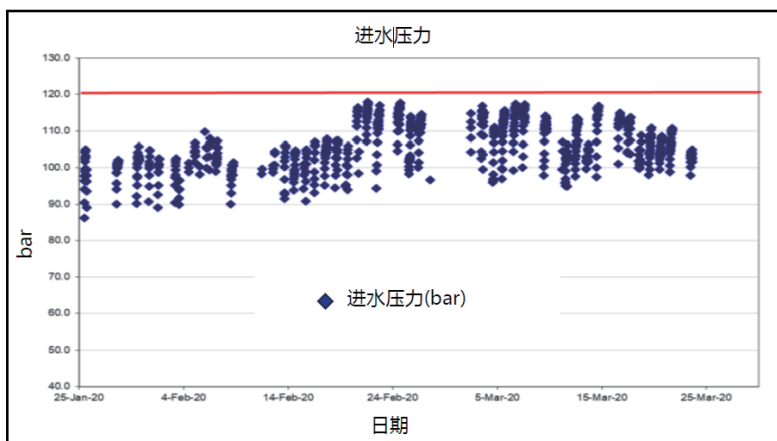


图 10.2.9 前三个月运行时的进水压力

4. UHPRO PRO-XP1 的局限性

如前一小节所述，PRO-XP1 元件的性能取决于膜层在系统独特运行参数下所承受的压缩程度变化。在高于海水 RO 限制的压力下运行时，PRO-XP1 对任何温度升高将更加敏感。膜压缩是一个不可逆的过程。一旦 PRO-XP1 膜元件在高于其先前最高温度的温度下运行，其性能将发生变化。

由于这种温度敏感性，如果 PRO-XP1 系统的最高操作温度超过 30° C，其允许最高进水压力将相应降低。最高操作进水压力随温度降低的速率如图 10.2.10 和表 10.2.1 所示。

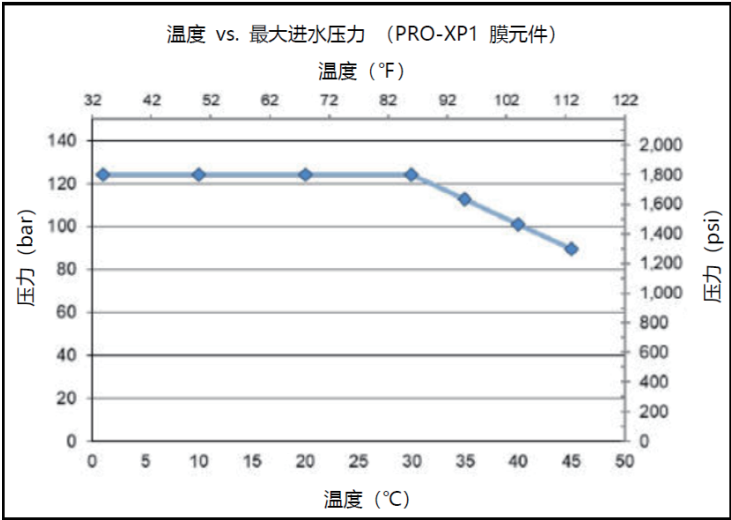


图 10.2.10 PRO-XP1 元件的最高温度与最高进水压力的关系

表 10.2.1 PRO-XP1 元件的最高温度与最高进水压力限制

°F	°C	psi	bar
33.8	1	1,800	124.1
50	10	1,800	124.1
68	20	1,800	124.1
86	30	1,800	124.1
95	35	1,635	112.7
104	40	1,465	101.0
113	45	1,300	89.6

尽管在较高温度下 PRO-XP1 的操作压力限值较低，但在所有温度范围内，其压力限值性能仍优于传统膜元件（图 10.2.11）。

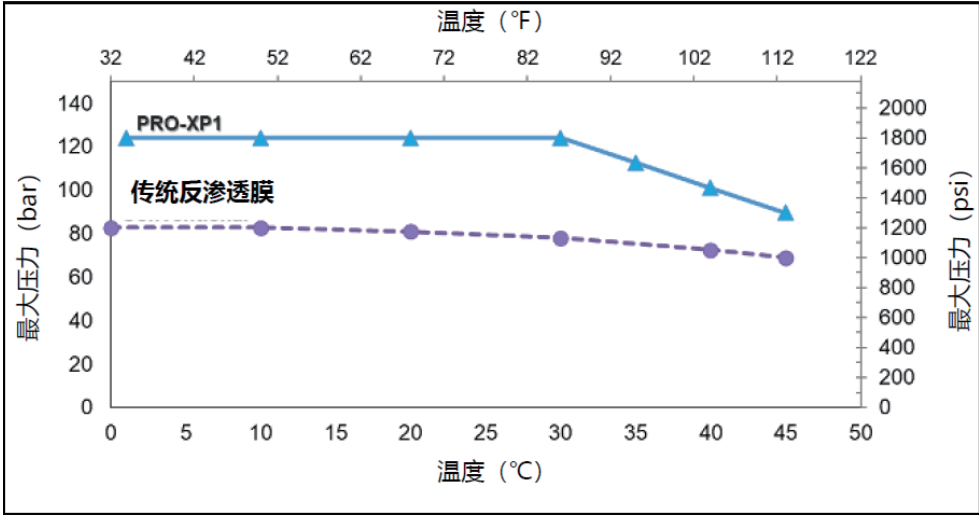


图 10.2.11 PRO-XP1 和传统 RO 元件在不同操作温度范围内的最高操作压力比较

10.2.4 用 UHPRO 替代工业生物反应器的效益

一家工业制造厂（工厂 A）生产所产生的废水中含有有机溶剂二甲基甲酰胺 (DMF)。2019 年，工厂 A 准备增加其生产量，但受到其废水排放的限制。在扩建规划阶段，工厂 A 发现其现有的生物反应器处理能力已无法满足当前的城市废水排放标准，且该系统已老化，亟需更换。因此，工厂 A 考虑了多种处理替代方案来取代原有的生物反应器。主要的两个选项为新建生物反应器或高回收率 RO 系统。最终，工厂 A 选择了多级 RO 工艺对有机废水进行超浓缩处理。该工艺的核心部分采用了由 Saltworks 和 Hydranautics（海德能）联合设计的新型 RO 浓缩系统，该系统基于海德能 SWC5-LD 和 PRO-XP1 膜元件。所提议的浓缩系统（图 10.2.12）为两级 RO 结构：第一级运行压力为 62 bar，配置六支 SWC5-LD 海水 RO 膜元件，第二级运行压力为 110 bar，配置六支 PRO-XP1 UHPRO 膜元件（图 10.2.13）。整套处理系统（包括 UHPRO 系统）的项目投资成本较新建生物反应器系统低 24%（表 10.2.2）。

表 10.2.2 新建生物反应器系统与新 UHPRO 系统的投资成本和年运营成本比较

	新生物反应器	新 UHPRO
总计估计资本成本	X	76% * X
估计年度运营成本	~\$ 800,000/ 年	~\$675,000/ 年

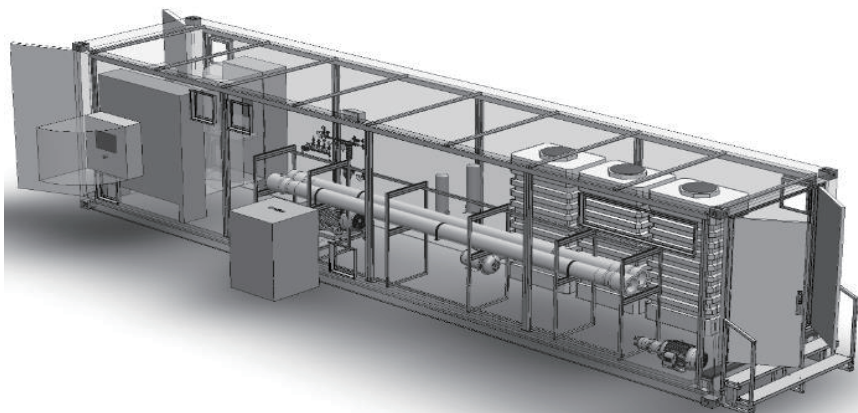


图 10.2.12 工厂 A 废水浓缩 RO 系统的 3D 图示

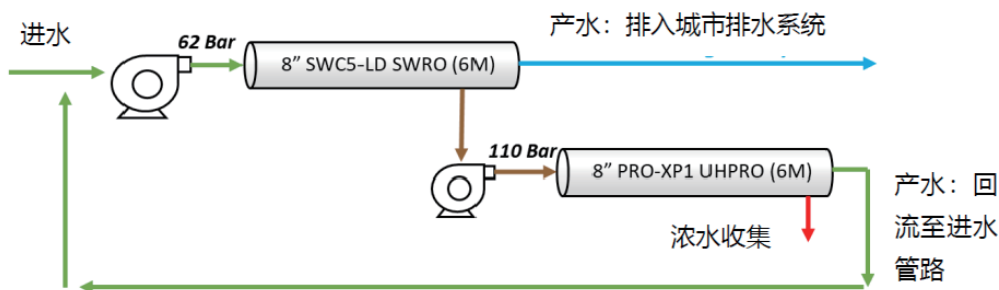


图 10.2.13 工厂 A 废料浓缩 RO 系统的工艺流程图

工厂 A 的废水浓缩 RO 系统建设始于 2020 年 10 月，并于 2021 年 3 月全面投产。该系统在目标压力下运行时，原预计回收率只能达到 60%；然而，在一年的运行后，总系统回收率达到了 83%。系统整体水回收

率更是超过 95%。系统产生的少量浓缩废液被储存起来，并由合格的废液处理机构外运处置。该浓缩液中的 DMF 浓度是进水的 11.9 倍。而排放至城市排水管网中的产水，DMF 未检出或低于检测限值。

运行一年后，工厂 A 对该废水浓缩 RO 系统的成本进行复盘，发现以下效益：该系统的实际年度运营成本比初始估算低 14%（见表 10.2.3），且工厂每月减少了约 154,000 kWh 的电力消耗。

表 10.2.3 工厂 A 废水浓缩 RO 系统的年度运行成本：估算值与实际值对比

	年度运营成本
估算值	~\$ 675,000
实际值	~\$ 583,000

10.2.5 总结

膜制造商通过创新的 RO 膜元件设计，以允许特殊产品在超高压下运行。海德能的 UHPRO PRO-XP1 膜元件性能已被证实，对氯化钠溶液的浓缩倍数达到传统海淡膜元件的 1.6 倍。严格的实验室和现场测试表明，PRO-XP1 膜元件能够承受工业和高盐度水处理所需的苛刻条件且运行稳定可靠。UHPRO 的能耗显著低于生物反应器等其他依赖热力的废水处理工艺。在采用 UHPRO 系统替代其旧的生物反应器废水处理系统后，南加州的这家工业制造厂（工厂 A）运营成本显著降低，总计每年节省约 597,000 美元。凭借当前已实现的成本节约，再加上产能提升带来的收入增长，预计工厂 A 将在一年内实现投资回报。

10.3 PROC™ 在钢铁废水回用中的应用

10.3.1 概述

据相关主管部门统计数据，截至 2024 年底，我国粗钢年产量达 10.5 亿吨，占全球粗钢总产量的 53.3%，稳居全球第一。但该产量同比下降 1.7%，是自 2021 年达到 10.65 亿吨历史峰值后，连续第四年实现同比下滑。在“碳达峰、碳中和”战略目标引领下，钢铁行业已从规模扩张阶段迈向质量效益型发展新阶段，产量精准调控、产业结构优化、绿色低碳转型成为当前行业发展的核心主线。其中，废水回用是钢铁行业实现节能降碳、提质增效与绿色转型的关键路径，通过技术创新、管理模式优化与政策引导，其功能已从单一污染治理手段，升级为资源循环利用与价值创造的核心引擎。而膜分离技术作为资源循环体系的核心枢纽与低碳转型的关键赋能技术，不仅能有效降低钢铁企业新鲜水消耗量、缓解水资源约束压力，还可大幅减少废水排放对生态环境的影响，为钢铁行业绿色发展提供坚实技术支撑。

从国际对标视角看，我国钢铁行业用水效率与发达国家仍存在明显差距。以日本为例，其吨钢取水量长期稳定在 1m³/吨以下，我国 2024 年吨钢取水量则为 2.33m³/吨，这表明我国钢铁行业在吨钢耗水量优化方面仍具备巨大提升潜力。当前国内大型钢铁企业已普遍采用新水多级串联利用工艺，水资源再利用率已达 98%。但随着循环利用率持续提升，水中溶解性总固体及各类难溶盐浓度呈倍数增长，导致设备腐蚀与结垢风险显著加剧。此类物质的持续累积，已成为制约行业进一步降低吨钢耗水量的核心瓶颈之一。因此，为突破该瓶颈、提升水资源重复利用率，需对现有排放废水实施深度处理以满足回用标准，进而减少新鲜水用量。

反渗透技术已经是废水回用深度处理的主流工艺，国内许多大型钢铁厂已经建设和使用该技术。在使用过程中也发现了许多问题。本文介绍了海德能公司 PROC™ 抗污染膜元件在钢厂的废水实际工程运行情况。通过实际运行数据分析证明了该系列膜产品拥有优异的抗污染性能、稳定的化学耐受性以及高效的水处理能力，更适用于钢铁废水的深度处理，为行业水资源循环利用提供了可靠的技术保障。在膜分离技术应用领域，海德能凭借卓越的产品品质与持续创新能力，长期为钢铁行业提供高品质膜产品及配套技术支持。旗下 PROC™ 系列与 PRO 系列抗污染膜元件，凭借优异的抗污染性能、稳定的化学耐受性及高效的水处理能力，在钢铁行业赢得广泛认可，为行业水资源循环利用提供了可靠技术保障。

10.3.2 钢铁废水的分类和处理工艺

1) 分类

钢铁厂废水主要包括：采矿、烧结、炼铁、炼钢（连铸）、轧钢等工艺产生的废水，还有一些来自辅助工艺的废水，像焦化和自备电厂等。

表 10.3.1 钢铁废水的来源和特点

工艺废水	特点
选矿废水	呈酸性，悬浮物、金属离子和选矿剂等污染物含量高；
烧结废水	除尘水和冲洗水悬浮物含量高；冷却水温度高；
炼铁废水	高炉煤气洗涤水和冲渣废水的水温高、悬浮物含量大；
炼钢废水	设备冷却水含有大量氧化铁和少量油脂；冲渣废水含有大量悬浮物；

轧钢废水	热轧废水含有大量氧化铁和油脂；冷轧废水含有油脂、乳化液和酸、碱；
焦化废水	焦化废水含有芳香族化合物和杂环化合物，还含有硫化物和氨盐等；

选矿厂多在山区，水循环系统自成体系。选矿废水又称尾矿水，废水进入尾矿坝后沉淀澄清，可以去除悬浮物，同样对重金属和浮选药剂也有一定的去除。尾矿坝的溢流水可以循环使用，水的循环利用率可以达到80%以上。尾矿水不经处理就排放或流失会严重污染水源和土壤，对周边居民的生产、生活造成严重影响。国内某钢铁企业曾尝试采用石灰法和反渗透对尾矿渗漏水进行处理。通过两个月的中试，反渗透系统的产水量、产水水质和运行压力等参数都很稳定。目前制约尾矿水深度处理的因素，主要因选矿厂的位置偏僻，导致反渗透的产水没有用户。

对于其它来源的废水，多数钢铁企业是将主要的生产废水汇总到总排车间统一处理排放，其中轧钢废水和焦化废水通常经过单独处理后再汇入总排系统。钢铁废水的深度处理在某种程度上可以说是钢铁总排废水的深度处理。

我国南北方钢铁总排废水深度处理工艺是有差异的，南方水资源丰富，取新水成本较低，如果采用深度处理工艺，例如：反渗透，经济效益通常不够理想，但在节能减排的今天社会效益仍很显著。此外，南方水系中溶解性总固体少，废水深度处理的目的主要是除油、除浊和去除重金属氧化物，提高水的循环利用率。相对于南方而言，北方地区严重缺水，新水的取水成本高，这时采用反渗透作为深度处理工艺，就具有相当可观的经济效益和社会效益。

2) 处理工艺

钢铁行业废水深度处理的主要目的是减少新水用量，深度处理后的产品水可以大致分为三个使用目的：（1）作为循环冷却水的补给水，提高循环利用率，减轻了主体设备腐蚀；（2）供给锅炉作为补给水；（3）高端设备的冷却循环水。

传统钢铁废水总排处理系统包括：高密度澄清、混凝澄清、曝气生物滤池、深度氧化、快速过滤等。钢铁废水经过总排处理工艺后的特点为：

- ① 水温高（轧钢废水的温度可以达到 70℃），夏天的水温多在 30℃左右，即使是寒冷的北方地区，冬天水温也都保持在 15℃以上。
- ② 溶解性总固体高，在新水含盐量较高的北方地区，总排废水的溶解性总固体都在 1500mg/L 以上；
- ③ 油含量 2mg/L 左右，轧钢厂在设备检修时，才有一定的油泄漏到废水中；
- ④ COD 保持在 30mg/L 以上，COD 的主要贡献是焦化废水，焦化废水中含有大量的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、苯酚，并入总排废水后 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量维持在 30mg/L 左右；如果能将焦化废水单独处理，不并入深度处理的反渗透系统，将会大幅度的提高反渗透系统的清洗周期；
- ⑤ 重金属 Fe、Mn 含量高，冶炼和轧钢废水的铁离子含量 2-10mg/L，通过曝气、混凝沉淀等工艺，总排废水的铁锰离子含量都能控制在 1mg/L 以下；
- ⑥ 悬浮物、浊度高，通过各分厂混凝沉淀处理后的废水，悬浮物含量都在 200mg/L 以上，通过总排废水处理悬浮物含量稳定在 30mg/L 左右。

为了降低钢铁废水中的溶解性总固体以及其他影响其回用的污染物，使得钢铁废水可以进一步回用，膜法水处理技术就不可或缺。作为以脱盐为目的的单元分离工艺，反渗透技术以其性能稳定、占地面积小、运行费用低、管理简单等特点，被广泛应用于钢铁废水回用领域。

通过不同组合完成总排废水的处理工艺+双膜工艺（超滤+反渗透）。还有一些项目是采用多介质过滤+活性炭+反渗透的工艺路线。两种工艺路线的主要区别是超滤和活性炭。超滤主要去除水中非溶解性的杂质，在钢铁废水中，超滤能够很好地去除废水中的总铁，超滤出水的总铁都能保证在 0.1mg/L 以下；当入水水质发生波动时，超滤产水水质也能保证在稳定的水平。超滤产水的浊度 <1NTU，SDI₁₅<3。活性炭工艺可以吸附一些油类和小分子有机物，从某钢铁企业的废水深度处理的数据得知，活性炭对 UV₂₅₄ 的去除率是超滤膜的 4 倍。反渗透膜能够有效去除悬浮固体、盐类和小分子有机物，是一种以压力为驱动力的脱盐装置，在反渗透使用过程中最困扰的问题就是膜污染，膜污染的种类主要分为：颗粒污染、胶体污染、难溶盐析出和生物污染。所有的工程公司（OEM）在系统集成时，都会加强预处理，减轻膜污染，而所有的膜制造厂又以抗污染膜为研发的主要方向。

钢铁总排废水深度处理的核心部分就是反渗透系统，反渗透系统运行的好坏，主要评价于三个方面：脱盐率、产水量和系统压差，海德能公司 PROC™ 系列的反渗透膜产品在这三个方面都有优越的表现。

10.3.3 PROC10 在钢铁废水回用的应用

1) 设计信息

某钢铁企业采用综合废水作为水源，经过预处理和深度处理使废水达到回用标准，现就该反渗透系统的实际运行做一案例分析。

反渗透设计出力：3×200 m³/h

单套排列方式：30:15（6 芯膜壳）

设计回收率：75%

设计膜通量：19.9L/m²·h

反渗透膜选用海德能公司的增强型抗污染反渗透膜 PROC10。

表 10.3.2 PROC10 的产品规格与性能

标准脱盐率, %	99.75
最低脱盐率, %	99.6
产水量, GPD(m ³ /d)	10500(39.8)
给水格网厚度（专利隔网结构）, mil/mm	34(0.86)
有效膜面积, ft ² (m ²)	400(37.2)
测试条件：2000mg/L 的 NaCl 溶液；测试压力：1.55MPa；温度：25℃；回收率 15%；pH:6- 7；	

2) 标准化分析

反渗透系统投运 6 个月内没有经过任何化学清洗，由于原水含盐量、温度变化，系统的操作压力和产水量也随之变化。为了能够准确的把握反渗透系统的运行状况，我们对实际运行数据进行标准化分析，经过标准化后的系统运行数据，可以消除系统运行温度以及操作压力对产水量和产水水质对的影响，能够真实反应反渗透系统的运行状况。

1. 标准化下的产水量：

$$Q_{P, \text{标准化值}} = Q_{P, \text{当前实测值}} \times \frac{NDP_{r, \text{初期有效压力}}}{NDP_{\text{当前实测值}}} \times \frac{TCF_{\text{当前温度校正}}}{TCF_{r, \text{初期温度校正}}}$$

Q_p : 产水量 (m^3/hr)

NDP: 净推动压力 (bar)

TCF: 温度校正系数

2. 标准化透盐率:

$$SP_{\text{标准化值}} = SP_{\text{当前实测值}} \times \frac{Q_{P, \text{当前实测值}}}{Q_{Pr, \text{初期产水量}}} \times \frac{TCF_{\text{当前温度校正}}}{TCF_{r, \text{初期温度校正}}}$$

SP: 透盐率 (%)

Q_p : 产水量 (m^3/hr)

TCF: 温度校正系数

3) 产水量稳定性

标准化下的产水量运行数据表示在图 10.3.1 中。反渗透的进水压力是实测值，反渗透系统是冬天投运的，随着水温的逐步回升，操作压力也逐渐降低，冬季系统运行压力保持在 1.1MPa，夏季系统压力 0.92MPa。标准化产水量是消除温度、压力影响后的计算值。从图中我们看到，初始产水量在 140-150 m^3/h 之间，半年左右的运行数据显示，产水量一直稳定在 170 m^3/h 左右，说明 PROC10 这款膜元件的耐污染性能强。

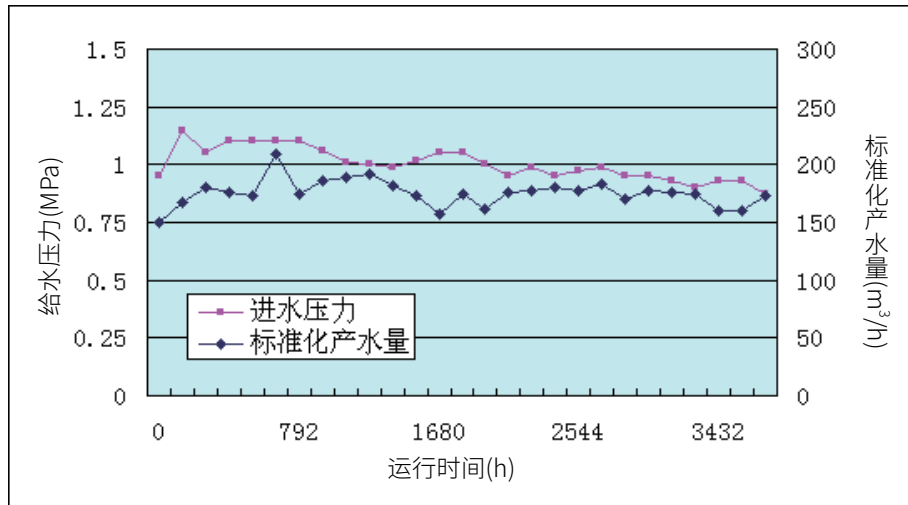


图 10.3.1 反渗透系统产水量的标准化曲线

4) 透盐率稳定性

图 10.3.2 可以看到，反渗透系统的透盐率在 1-2% 之间（透盐率是指盐的透过率，它是 100% 减去脱盐率

得出的)。影响反渗透系统透盐率的主要因素是给水温度和给水水质。随着给水温度升高,透盐率增加;给水水质发生变化时,透盐率也会发生相应的变化,变化的趋势依具体情况判定。钢铁总排废水的水质和温度每天都会发生波动,反渗透系统的透盐率也会相应的变化。系统在多数运行时间的透盐率均为 1%,由于给水水质的波动,透盐率在某一时间段出现起伏,但未影响反渗透膜的性能,期间没有经过化学清洗。

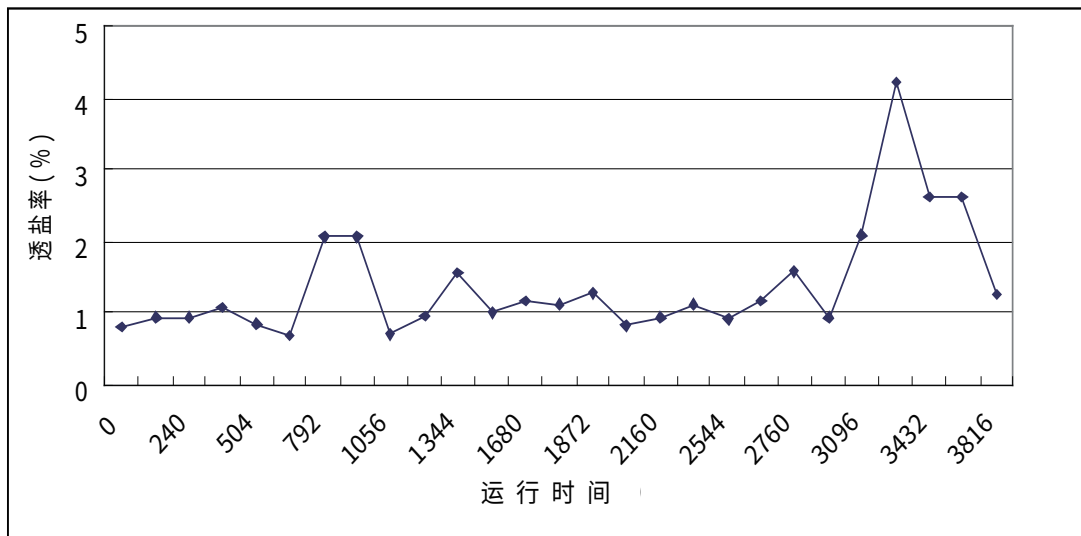


图 10.3.2 反渗透系统透盐率变化

5) 系统压差稳定性

图 10.3.3 看到,反渗透系统在整个运行期间,总系统压差都保持在 0.1MPa 左右,两段压差都在 0.05MPa。如果系统压差出现上升的趋势,则说明污染物在膜表面积聚,其速度会随着污染的加重而加快,系统压差会在很短的时间内达到设计极限值(单支膜元件的承受最大压差 0.1MPa)。系统压差的变化是反渗透受污染程度的一个重要的指标,该套系统的压差没有出现上升的趋势,在某种程度上可以说明膜表面没有发生污染,体现了专利隔网结构的宽通道抗污染膜元件的优势。

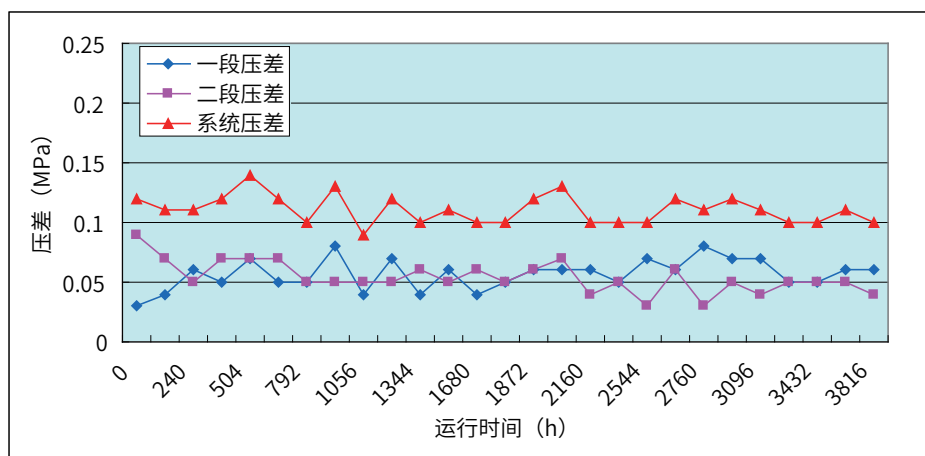


图 10.3.3 各段压差和系统压差的变化

10.3.4 PROC30 在钢铁废水回用的应用

1) 设计信息

北方某大型国有钢厂通过气浮除油 + 双膜法的处理工艺，将厂区综合废水处理后回用。现就该项目反渗透系统的实际运行做一案例分析。

反渗透设计出力：140m³/h

单套排列方式：26：13（6 芯膜壳）

设计回收率：70%

设计膜通量：16L/m²·h

反渗透膜选用海德能公司的增强型抗污染反渗透膜 PROC30。PROC30 发布于 2016 年，它在 PROC10 的基础上同时提高了产水量和脱盐率，将低压反渗透膜元件的技术参数提升到了一个新高度。其产品规格与性能，请参见表 10.3.3。

表 10.3.3 PROC30 的产品规格与性能

标准脱盐率,%	99.8
最低脱盐率,%	99.7
产水量,GPD(m ³ /d)	11500(39.8)
给水格网厚度（专利隔网结构）,mil/mm	34(0.86)
有效膜面积,ft ² (m ²)	400(37.2)
测试条件：2000mg/L 的 NaCl 溶液；测试压力：1.55MPa；温度：25℃；回收率 15%；pH:6-7；	

2) 项目问题及数据分析

本钢铁厂项目厂区划分为老区与新区两大功能区块。前期在厂区老区反渗透（RO）系统一段、二段各选取 1 支膜壳，开展海德能增强型抗污染反渗透膜 PROC30 的小试验证，在获取优异运行数据（含脱盐率、通量稳定性等关键指标）后，后续将厂区 10 套 RO 系统的膜元件全面更换为该型号产品。

由图 10.3.4 可知，厂区老区 RO 系统在换膜前，产水电导率均值约为 100μs/cm，更换成 PROC30 膜元件后，系统产水电导率实现精准管控，稳定控制在 50μs/cm 以下，脱盐性能提升显著，为后续工序用水水质提供可靠保障。

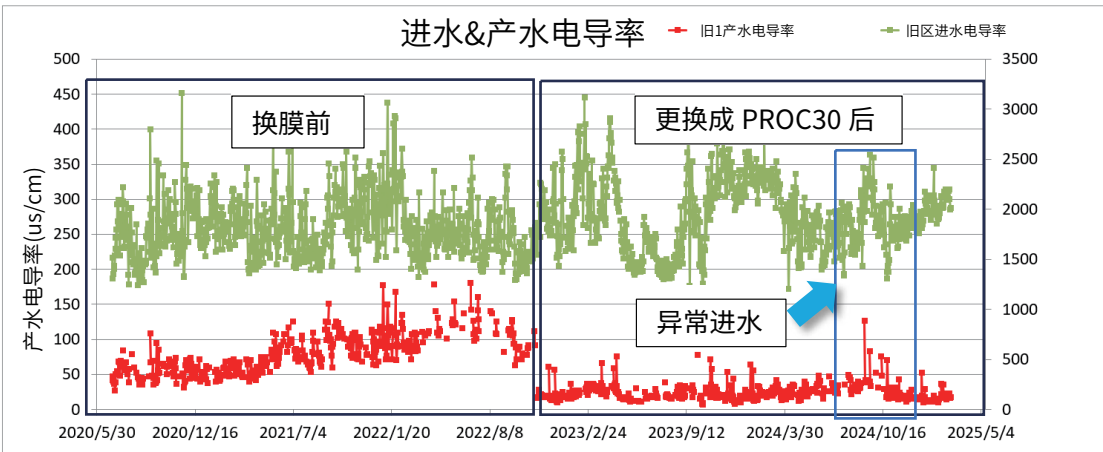


图 10.3.4 旧区换膜前后进水 & 产水电导率数据

项目现场水源存在焦化废水突发排放风险，该类突发情况会导致 RO 系统进水水质（含 COD、浊度、特征污染物浓度等）剧烈波动，进而破坏产水水质稳定性。当产水水质出现明显异常时，现场技术团队立即对进水水质开展应急检测，检出脂肪烃类有机污染物及双酚 A 组分，明确污染诱因。随后对 RO 膜系统实施紧急化学清洗（CIP），处理后系统产水水质快速恢复至合格标准，并持续稳定运行。该实践充分验证了 PROC30 膜元件优异的抗污染性能，以及在污染后通过化学清洗快速恢复性能的能力，为复杂水源条件下的 RO 系统稳定运行提供了技术支撑。

10.3.5 讨论

海德能公司的增强型抗污染反渗透复合膜 PROC™ 系列能在众多项目上获得成功，与业主和工程公司的设计、施工和管理密不可分。就该系统的设计、选型、设备管理等方面的内容，提出以下几点供大家探讨。

1) 膜通量

膜污堵的速率和膜通量有直接的关系，通量越高，就会加快污染物向膜表面迁移的速度，污染物积聚在膜表面的情况就会加剧。污染物的聚积会改变水在膜表面的流动状态，流动状态的改变又是其它难溶盐和胶体物质析出的诱因。膜污染和膜表面流动状态的变化互为因果、相互影响。在反渗透系统设计时，膜通量的选取至关重要，废水处理中膜通量的经验数值是 $17 - 20\text{L/m}^2\cdot\text{h}$ 。

2) 给水隔网结构

给水隔网的厚度决定了膜元件的压差大小。对于给水隔网来说，通常被关注的是它的厚度，即人们通常说的 28mil、31mil 和 34mil。膜元件的压差降低与隔网的厚度成反比。在正常的给水流量范围内，34mil 厚度的给水隔网比 28mil 厚度的给水隔网的膜元件的单只膜的压降降低 50% 以上。但这仅仅是描述给水隔网性能的众多参数之一，其他的参数还包括：隔网经纬线的截面形状，经纬线夹角角度等。因此，同为 34mil 厚度的给水隔网在实际工作中表现的性能也不相同。PROC™ 系列膜元件采用了海德能公司的专利隔网，从而大幅度降低了系统的运行压力损失。由于压力损失的减小，延长了反渗透系统压差到达上限值的周期，并且宽通道膜元件在化学清洗时，污染物也能比较顺畅的排出系统，清洗效果优于其它膜元件。给水隔网的厚度对单只膜系统压差的影响表示在图 10.3.5 中。

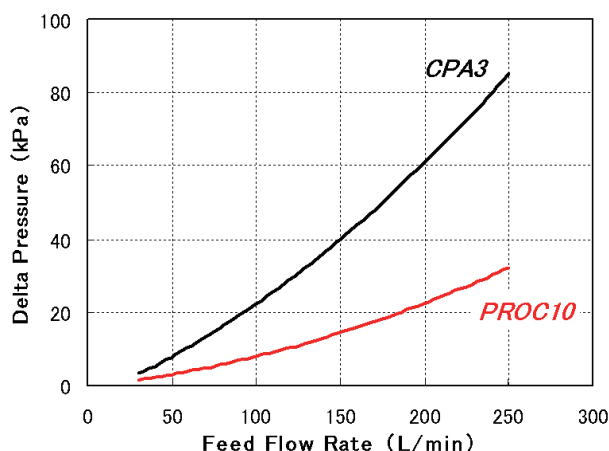


图 10.3.5 给水隔网的厚度对单只膜系统压差的影响

3) 浓水流量

在反渗透系统计算报告中，都会出现一个 β 值即浓差极化因子，一级反渗透系统的允许的最大浓差极化因子为 1.20。浓差极化因子越大，发生膜污染的可能性就越大。增加膜系统给水侧的切向流速是降低系统污染的有效方法之一。在其它条件（产水量、回收率、膜通量）不变的情况下，浓差极化因子的大小取决排列方式，选用膜面积大的膜元件，能够减小用膜数量，增大浓水流量，减小 β 值。同样，选择 7 芯装压力容器，也可以增大浓水流量。所以，很多钢铁废水回用项目上都采用 400ft² 的反渗透膜并选用 7 芯装压力容器，目的就是增大浓水流量，加大反渗透膜表面的切向流速，减缓污染物富集。此外，还可以通过增加浓水循环来降低 β 值，但这样能耗会略有增加，在给水条件很恶劣情况下，也可以考虑采用浓水循环。

4) 膜元件机械破损

膜元件外壳的玻璃钢（FRP）与压力容器之间有一定的间隙，没有端面排气构造的膜元件，间隙里是充满空气的。反渗透系统在启动过程中，膜元件外壳与压力容器内壁间的压力差很大，可达 1MPa 以上。FRP 受力膨胀变形，易造成 FRP 疲劳破裂。尤其是在污水系统中，污染物富集迅速、压差大，FRP 破裂几率更大。FRP 破裂会造成膜元件性能下降（主要影响脱盐率），在系统选膜时，应当予以考虑。PROC™ 系列反渗透膜采用专利技术排出间隙中的空气，可减少 FRP 的破损率。

5) 药剂投加

钢铁废水深度处理工艺中有很多加药点，常规的加药点有：酸、碱投加（调节 pH）、混凝剂投加、氧化型杀菌剂投加、还原剂投加、阻垢剂投加等。加药设备和药剂的选型、投加、计量在这里不做讨论，只想强调这些药剂投加对反渗透系统的影响都非常大，酸、碱投加可以影响反渗透系统脱盐率和碳酸盐结垢倾向。过量投加混凝剂会造成反渗透系统污堵，可以适当放宽混凝沉淀、快速过滤等设备的出水指标，混凝剂投加应当和反渗透的污堵挂钩。杀菌剂、还原剂和阻垢剂对反渗透膜系统的稳定运行非常重要，如果这三种药剂在系统运行过程中出现故障，可能会对膜元件性能造成不可逆的破坏，对这三种药剂投加的运行管理，要做到每天校核投加计量。设备制造时也应该考虑有一些方便校核的计量装置。

6) 数据纪录与分析

反渗透系统一定要有完整的运行数据纪录：给水压力、中间压力、浓水压力、给水流量、浓水流量、给水电导率（或者是 TDS）、产水电导率、浓水电导率（或者是 TDS）、给水 pH、给水温度、给水 ORP。将每天的运行数据录入反渗透的标准化软件，标准化软件能以图形的方式将系统运行的情况体现出来，方便管理人员判断系统是否出现异常情况，及时检查设备、调整参数，避免事故发生。

10.3.6 结论

PROC™ 系列增强型抗污染反渗透复合膜具有：高脱盐、宽通道、耐清洗、膜面积大、机械破损率低等性能优点。以上系统的脱盐率，压差以及产水量表现稳定，实例表明，PROC™ 系列反渗透膜适用于钢铁废水深度处理，证明了反渗透膜法水处理技术适用于钢铁废水的深度处理。

当然，反渗透系统的设计、制造、运行维护对于整个系统的稳定性同样至关重要，必须给予高度重视。

10.4 通过创新膜技术提升零排放系统（ZLD）性能并优化成本

10.4.1 摘要

工业废水的典型特征是有机物含量高，其来源包括工业生产过程中使用或产生的溶剂、油类、脂肪、润滑脂、盐分及其他物质。这类废水还可能含有多种溶解盐和金属离子，这些成分会引发结垢、污堵和高渗透压等问题，从而增加废水处理难度。然而，在水资源极度匮乏的地区，过去仅对废水进行最低限度处理后即排放的企业，现在被迫采用膜技术实现 100% 的废水回收与再利用。大多数企业面临二选一的局面：要么实现零排放（ZLD），要么停止运营。实现零排放通常依赖成本高昂的热法工艺。要降低 ZLD 工艺的整体成本，就必须引入更为先进的技术。当前面临的主要挑战包括：膜元件更换频繁，固体废弃物处置困难，以及在热法工艺中实现 ZLD 所需的高能耗问题。新型膜技术正是为解决 ZLD 过程中的这些问题而开发，旨在提升系统性能，优化成本，并实现“变废为宝”。

10.4.2 引言

典型的零排放（ZLD）处理工艺包括颗粒过滤技术、软化、反渗透（RO）、蒸发和结晶等。然而，完整的工艺过程往往极为复杂，且蒸发和结晶环节成本极高。此外，最终产生的固体废弃物会含有混合盐类，难以直接填埋处置。

反渗透系统会浓缩盐分和溶解性有机污染物，这些污染物会与膜表面相互作用，导致污堵和结垢，从而影响膜性能并缩短其使用寿命。这些相互作用与膜表面的亲水性、电荷性和粗糙度密切相关。因此，常采用膜表面改性技术来改善 RO 膜的抗污染特性，以减轻污染问题。PRO-XR1 和 PRO-LF1 型号膜元件均具备抗污染特性。PRO-XR1 适用于苦咸水级别含盐量的废水处理，而 PRO-LF1 则适用于海水级别含盐量的废水处理。这两种膜与常规膜相比，均具有更高的亲水性，中性电荷和更光滑的表面，从而增强了抗污染性能。

在 ZLD 过程中，最终蒸发结晶工艺需要花费极高的运营和维护成本。遗憾的是，目前在蒸发器前对反渗透浓水进行末端处理的技术有限，成本高昂，且维护需求高。为此，基于常规反渗透技术研发的一种更高效的高压反渗透（PRO-XP1）方案，旨在填补现有常规反渗透技术与最终蒸发结晶工艺处理工序之间的技术空白。

从蒸发器回收的固体因色度高、含有混合盐类及其他污染物质，需要采用安全填埋方式处理。污泥处置的成本极高。若采用纳滤膜（PRO-XS 系列）对盐类进行回收，并将浓水回用，或把分离出的盐类作为原料供应给其他行业，就能最大限度降低蒸发器的处理负荷。

美国海德能膜元件数据表及其在标准测试条件下的性能，请参见表 10.4.1。

表 10.4.1 膜元件数据表及其在标准测试条件下的性能

参数	低污染高压 RO (PRO-LF1)	超高压 RO (PRO-XP1)	高选择性纳滤膜 (PRO-XS)
标称脱盐率	99.80%	99.80%	99.80%
标称产水量	29.1m³/d	30.3m³/d	32.2m³/d
材料	复合聚酰胺	复合聚酰胺	复合聚酰胺
膜表面电荷	中性	负电荷	负电荷

有效膜面积	37.2m ²	33.9m ²	37.2m ²
结构与尺寸	8 英寸螺旋卷式	8 英寸螺旋卷式	8 英寸螺旋卷式
最大压力	8.27Mpa	12.4Mpa	8.27Mpa
制造商	日东海德能	日东海德能	日东海德能
测试条件	32000mg/L NaCl 溶液; 5.5Mpa; 25° C; 10% 回收率		2000ppm MgSO ₄ ; 0.76Mpa; 25° C; 15% 回收率

10.4.3 方法与结果简述

新型的创新膜已在纺织和制革行业废水处理中得到运用，并对其性能进行了评估。低污染特性膜和超高压膜运用于制革和纺织行业共用废水处理厂（CETP），相关的运行性能数据已完成评估。

制革行业零排放装置通常采用 2~3 级反渗透系统，配置常规反渗透膜，进水总溶解固体（TDS）为 15,000~23,000 ppm，化学需氧量（COD）为 4,000~5,000 ppm。废水依次经过初级澄清、缺氧处理、好氧处理、除硬以及双介质过滤，随后进入超滤（UF）系统。经上述处理后，进入 RO 系统的进水 COD 仍处于 500 至 1,000 ppm 范围内，该水质对 RO 膜仍具有较高的污染倾向，需每周进行一次化学清洗，膜元件平均更换周期为 2 年，运行成本也随之增加。为评估 RO 膜的抗污染性能，客户在一段 RO 系统中，更换了两套现有的 RO 膜，一套更换为 PRO-LF1，另一套则使用 SWC5-LD。两套膜组在相同进水水质和相同时间段内运行。一段 RO 系统由 2 个压力容器组成，每个容器内装有 6 支膜元件，设计进水流量为 13 m³/h。

该系统连续运行三个月，以研究 PRO-LF1 和 SWC5-LD 的性能差异。两套膜组同步运行，监测膜性能变化，并根据清洗频率评估污染速率。初始阶段对两套系统均进行了清洗以确定其初始性能，结果发现清洗后 PRO-LF1 的产水量（见图 10.4.1）优于 SWC5-LD，这表明使用相同的清洗药剂浓度和清洗时间，PRO-LF1 的清洗效果更好。随后根据产水量下降情况决定清洗频率，观察到 SWC5-LD 的产水流量衰减速度比 PRO-LF1 更快。两者的盐透过率变化曲线基本相同（见图 10.4.2）。因此，尽管每周进行一次化学清洗，但由于 PRO-LF1 膜表面抗污染性能强，其产水流量并未低于设定值。

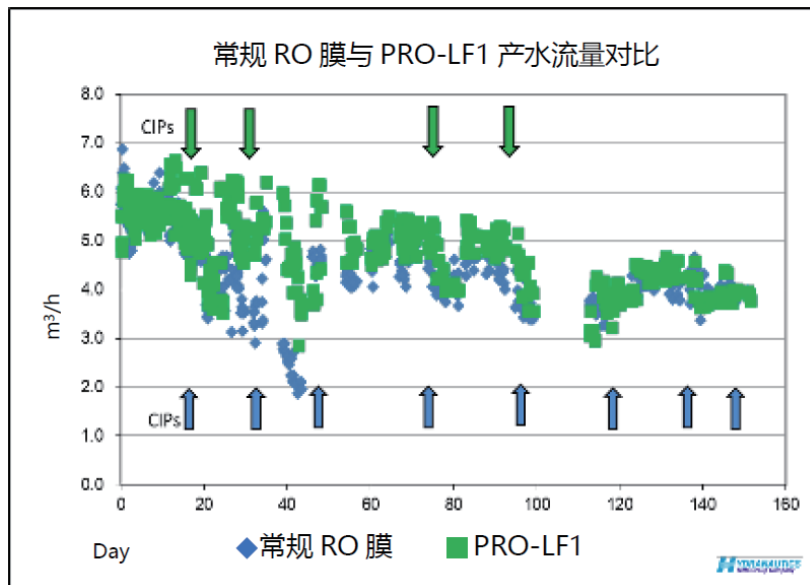


图 10.4.1 常规 RO 膜与 PRO-LF1 产水流量对比

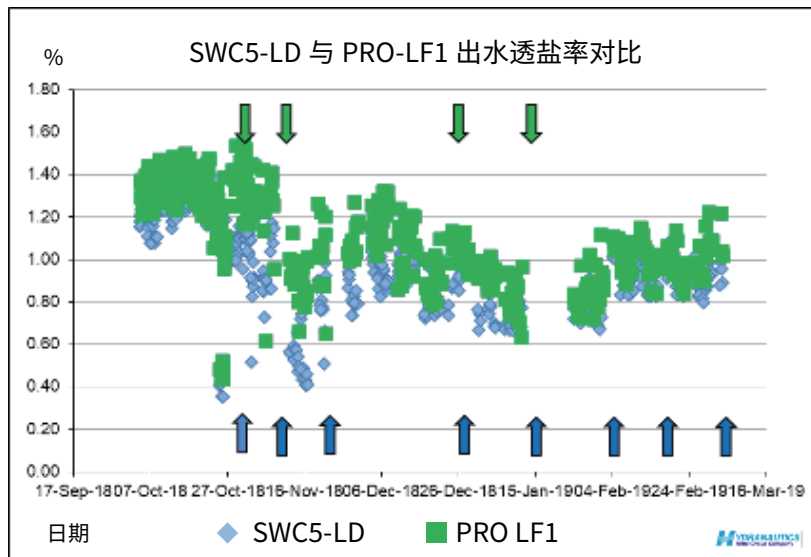


图 10.4.2 SWC5-LD 与 PRO-LF1 出水透盐率对比

根据两套膜系统同时运行期间的数据来看，与现有的常规 SWC5-LD 相比，PRO-LF1 的化学清洗频率降低了 50% 至 75%，因此系统运行时长提高了 8%，能够处理更多废水，同时化学清洗药剂成本也有所降低（见表 10.4.2）。此外，由于接触化学药剂较少且膜表面受固体颗粒磨损较小，PRO-LF1 膜的使用寿命将比常规 RO 膜更长。

表 10.4.2 使用 SWC5-LD 和 PRO-LF1 膜成本对比

PRO-LF1: 价值优势			
1 MLD 工厂 -90 支膜	SWC5-LD	PRO-LF1	备注
CIP 频率 (每月进行 CIP 次数)	2	1	PRO-LF1 每三周 1 次
每年进行 CIP 次数	24	12	
每次 CIP 药剂成本 (美元)	150	150	
每年 CIP 成本 (美元)	3600	1800	
CIP 期间停机时间 (h)	8	8	
每年 CIP 总停机时间 (h)	192	96	
每小时产水流量 (m³/h)	41.67	41.67	1000 m³/ 天
因污染导致的平均产量损失 (m³/h)	4		5%-15%
年总产水量 (m³)	321,326	361,029	
产水单价 (美元 /m³)	1.00	1.00	
年产水收入 (美元)	317,726	359,229	
年节约成本 (美元)	41,503		

现有 RO 系统产生的浓水通常需要通过蒸发和结晶工艺进行减量化处理。即使这些工艺成本极高，近年来超高压反渗透技术 (UHPRO) 的应用日益广泛，该技术可突破传统海水淡化膜 83 bar (1200 psi) 的运行压力限制，最高可达 120 bar (1750 psi)。

超高压 RO 膜 (PRO-XP1) 已应用于某纺织行业综合废水处理厂，用于处理第五段反渗透产生的浓水。该 UHPRO 系统包含 3 个压力容器，每个容器装有 6 支膜元件。设计最大运行压力为 100 bar，根据进水温度和进水总溶解固体 (TDS) 浓度，实际运行压力为 80 bar (见图 10.4.3)。进水温度为 43°C，进水 TDS 为 100,000~110,000 mg/L，COD 为 2,850 mg/L。运行期间系统性能稳定，每日进行冲洗，每 5~8 周进行一次在线清洗 (CIP)。出水 TDS 稳定降至 300~450 mg/L (见图 10.4.4)。

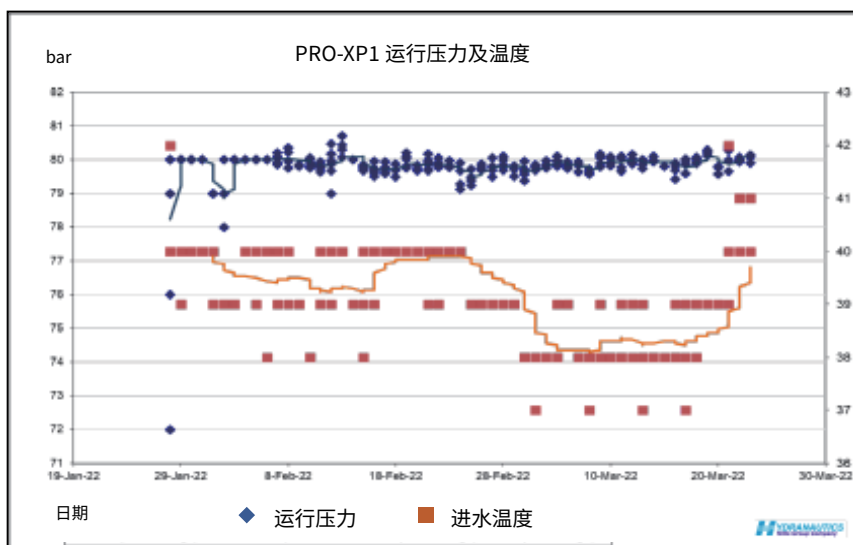


图 10.4.3 PRO-XP1 运行压力及温度

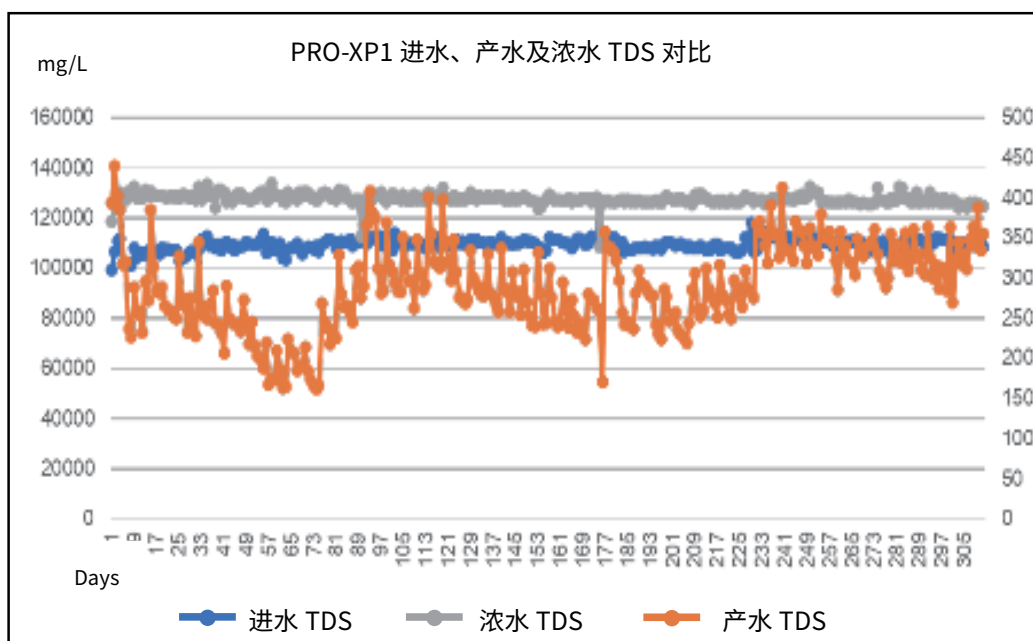


图 10.4.4 PRO-XP1 进水、产水及浓水 TDS 对比

由于高能耗和维护需求，蒸发系统的运行成本非常高，而超高压反渗透（UHPRO）的能耗仅为 8 kWh/m^3 ，投资回报期在四个月以内。因此，采用 UHPRO 可提高整体回收率，为 ZLD 系统实现了显著的成本节约（见表 10.4.3，图 10.4.5）。

表 10.4.3 MEE 系统与 UHPRO+MEE 系统能耗对比表

多效蒸发工艺 (MEE)			UHPRO+MEE		
描述	数值	单位	描述	数值	单位
HPRO 浓水流量	30	m^3/h	HPRO 浓水流量	30	m^3/h
			UHPRO 进水流量	30	m^3/d
			UHPRO 产水流量	12	m^3/h
进入蒸发器流量	30	m^3/h	进入蒸发器流量	18	m^3/h
			UHPRO 能耗	8	kWh/m^3
			UHPRO 每小时能耗	96	kWh
蒸发器能耗	25	kWh/m^3	蒸发器能耗	25	kWh/m^3
蒸发器每小时能耗	750	kWh	蒸发器每小时能耗	450	kWh
总能耗	750	kWh	总能耗	546	kWh

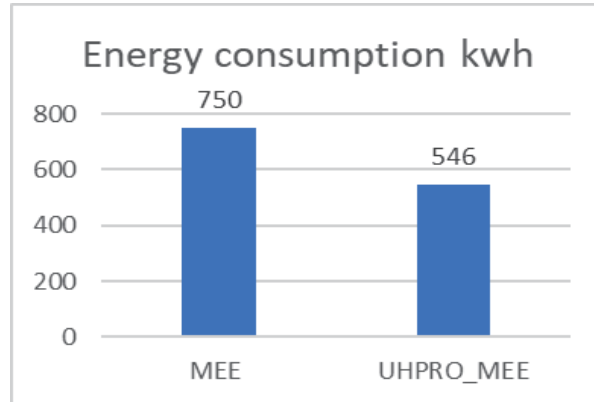


图 10.4.5 两套系统的能耗对比

从蒸发器中回收的盐需进行安全填埋处置，费用十分昂贵。纺织行业在染色工艺中通常使用硫酸钠或氯化钠，因此废水中含有高浓度的硫酸钠或氯化钠。

某纺织厂安装了纳滤膜（PRO-XS）以回收硫酸钠，纳滤膜安装于第五段，配置为 3 个压力容器，每个容器内装有 5 支膜元件。配套进水泵设计流量为 20 m³/h，最大运行压力为 25 bar。

该系统单段排列，在 50% 的回收率下运行，纳滤浓水 TDS 达到 95,000 mg/L，其中硫酸盐占比超过 95%。染色工艺需使用浓度为 140,000 mg/L 的盐溶液以实现更好的上色效果，因此将纳滤浓水送入多效蒸发器（MEE）系统进一步浓缩以满足染色回用要求，最终该工艺处理成本较以往降低了约 20%。

通过设置浓水循环管路，验证了 PRO-XS 系统可在 75% 回收率下运行。在该回收率条件下，原 TDS 浓度为 65,000mg/L 的 RO 浓水被浓缩至 157,000mg/L（见表 10.4.4），建议增设第二段纳滤系统以实现连续运行，通过减少蒸发器运行时长，同时回用盐溶液，以减少购买工业盐的原材料成本，可节省现有处理成本的 85%（见表 10.4.5，图 10.4.6）

表 10.4.4 PRO-XS 在 75% 回收率条件下的运行情况

PRO-XS 在 75% 回收率条件下的运行情况			
【ppm】	进水	产水	浓水
TDS	65.4k	22.2k	157g/l
TH	140	8	560
Cl-	8,933	9,926	4,963
SO ₄ ²⁻	31,860	2,400	96g/l
COD	2,620	400	9,600

表 10.4.5 使用 PRO-XS 的成本节约效益

系统	参数	案例 1 (HPRO+DTRO+MEE)	案例 2 (NF-50%+MEE)	案例 3 (NF-75%+MEE)
5 stages	进水流量 (m ³ /h)	20	20	20
RO/NF	回收率 (%)	30	50	75
	进水压力 (bar)	49.3	32.8	30 (第一级) 70 (第二级)

	泵比能耗 (kWh/m ³)	5.69	2.27	2.08 (第一级) 4.85 (第二级)
	每日电费 (美元)	81.99	54.55	108.10
	第五级系统每日成本 (美元)	90.52	69.41	134.30
DTRO	进水流量 (m ³ /h)	14		
	回收率 (%)	35		
	进水压力 (bar)	80		
	泵比能耗, kWh/m ³	7.92		
	每日电费 (美元)	79.83		
	每日成本 (美元)	132.43		
MEE	平均能耗 (kWh/m ³)	25.0	25.0	
	进水流量 (m ³ /h)	9.8	10.0	
	每日成本 (美元)	588.0	600.0	0.0
总计	系统每日总成本 (美元)	810.95	669.41	134.3

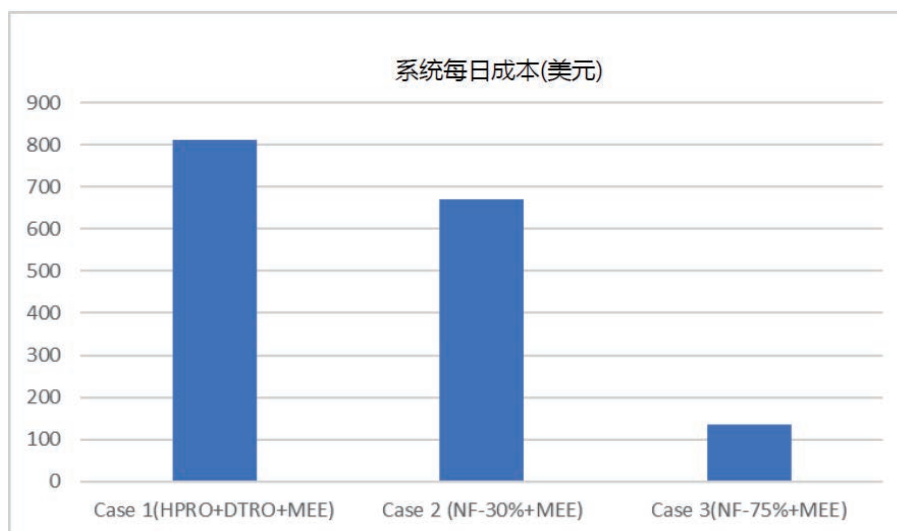


图 10.4.6 三种案例系统每日总成本对比

10.4.4 结论

新型创新膜集成技术表明,通过使用抗污染膜 (PRO-LF1) 延长膜寿命,采用超高压反渗透 (PRO-XP1) 提高回收率以及利用高选择性盐分离纳滤膜 (PRO-XS) 实现分盐回收,可有效降低 ZLD 的整体成本。采用这些先进的膜技术后, ZLD 的整体成本预计可降低 40% 至 65%。

10.5 大型市政污水再生回用工程的节能路线

10.5.1 前言

市政污水再生回用是解决我国水资源供需矛盾的手段之一。近年来，城市污水处理回用于城市绿化、农业灌溉、工业冷却以及生活非饮用水等方面。北京市以奥运为契机，提出了以再生水为“第二水源”，率先在北小河等污水处理厂建成了膜法再生水回用工程，将膜技术引入了大型市政污水回用领域。

反渗透膜、超/微滤膜、MBR 等膜技术在国内的饮用纯净水、工业纯水、海水淡化、废水回用处理等方面已有不同程度的应用经验。再生水回用工程中，因回用目的不同，采取的工艺组合会有较大区别。反渗透膜因其良好的脱除水中溶解性物质的能力，适用于生产高品质的回用水。

在大型市政污水回用方面，美国已有 40 余年的应用历史，并经历了多轮技术升级。以全球污水回用领域的技术先锋——美国的 21 世纪水厂为例，从上个世纪 70 年代起，即采用传统的混凝澄清与醋酸纤维素膜的组合工艺进行市政污水的回用处理。后来随着膜技术的不断发展，在 90 年代以后进行了多年的不同膜种类和工艺的现场试验，最终确定了采用以微滤、超低压反渗透膜、UV 为核心技术的方案。2004 年建成了 18,900m³/d 的一期工程，节能型超低压反渗透膜 ESPA2 在几年的稳定运行中证明了其抗污染性能良好、节能效果明显等特点。2007 年，该厂二期扩建成为 265,000m³/d 的污水回用规模。

20 世纪初，一些缺水国家和地区，如中东、新加坡等，在市政污水回用领域也得到了快速发展。新加坡水土资源有限，需从邻国马来西亚买水以满足约 450 万居民的用水需求。新加坡公用事务局（PUB）为了保证有限的水资源用于饮用，决定采用膜集成技术（超/微滤 + 反渗透）回用再生污水，即 NEWater 项目，主要用于半岛体行业或其它工业用途。Bedok 示范水厂于 2000 年 4 月投入运行，2002 年建成投产的 Bedok 32,000m³/d 和 Kranji 40,000m³/d 的两个 NEWater 项目，均采用电中性低污染膜 LFC1。2007 年建成投产的新加坡最大的 NEWater 项目之一——Ulu Pandan 污水处理厂吸收了美国大型市政污水项目的经验，采用了升级型超低压大通量节能膜元件 ESPA2 MAX。

10.5.2 市政污水回用项目背景

美国桔县面临地下水过渡开采问题，地下水水位的下降导致太平洋海水倒灌，桔县水务局（以下简称 OCWD）决定建设地下水补充系统以提高地下水水位。OCWD 和新加坡 Ulu Panda（以下简称 UP）污水回用项目的设计和运行是建立在现场试验、示范水厂或早期项目得到的经验基础上，在满足出水水质要求下进一步优化了系统的设计并降低了运行费用。这些经验的一个重要发现是当处理市政二级排放水时，节能型膜元件可以代替低污染膜元件。采用节能型膜元件，再结合其它的节能技术，如能量回收装置、优化预处理等使运行费用大幅降低。

10.5.2.1 进水水质

OCWD 和 UP 的 RO 系统水源均为市场污水厂的二沉池排放水。UP 的水 TDS 677mg/L、PO₄ 15 mg/L、TOC 12mg/L。OCWD 水源的 TOC 含量差不多，但 TDS 更高一些。OCWD 的产水水质要求是 TOC<0.5 mg/L、总氮（以 N 计）<5 mg/L；UP 的产水水质要求为 TOC<0.1 mg/L、氨氮（以 N 计）<1 mg/L。下表比较出两个项目的进水水质，水温和 PO₄ 含量的不同导致两者不同的设计。虽然 OCWD 的 Ca 含量是 UP 的两倍，但 UP

的 PO_4 含量却是 OCWD 的 5 倍，UP 的水温较高使 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的溶解度降低，因此 UP 采用 80% 回收率，但 OCWD 的回收率为 85%。

表 10.5.1 两个污水回用系统进水水质

参数	单位	UP	OCWD
进水 pH 值		6.7	6
氯胺	Mg/L	2-3	2-3
温度	°C	28-32	19-27
SDI	Mg/L	< 3	< 3
浊度	Mg/L	0.1-0.5	0.1-0.5
Ca	Mg/L	36	77
Mg	Mg/L	5	23
Na	Mg/L	170	213
NH_4	Mg/L	8	20.1
PO_4	Mg/L	15	2.7
碱度	Mg/L CaCO_3	72	264
Cl	Mg/L	271	219
F	Mg/L	0.6	1.1
SO_4	Mg/L	70	254
NO_3	Mg/L	43	4
SiO_2	Mg/L	8.4	21.9
TOC	Mg/L	12	10.5
Fe^{2+}	Mg/L	N/A	0.22
Mn	Mg/L	N/A	0.05
TDS	Mg/L	677	1167

10.5.2.2 预处理

OCWD 和 UP 两个项目 RO 系统前面均采用微滤技术，确保 RO 进水 $\text{SDI}<3$ ，且去除掉绝大部分可能造成 RO 污堵的有机或无机胶体类物质。MF 进水处投加活性氯以确保 2-3 mg/L 的氯胺进入到 RO 系统，从而控制 RO 膜表面和给水通道的生物污染。

污水回用系统中还容易有硅、碳酸钙或磷酸钙结垢。控制硅和碳酸钙垢类相对简单，磷酸钙垢控制较难。 PO_4 是三价阴离子，在污水中一般含量为 3-15mg/L。当 PO_4 与水中 Ca 结合，形成 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 溶解度非常低，很容易形成沉淀。有研究表明当 $\text{pH}>7$ 时，单纯投加阻垢剂无法阻止磷酸钙结垢。OCWD 进水的 Ca 较高且回收率高达 85%，因此 RO 进水 pH 值调节至 6，以防止钙垢。OCWD 曾做过 7 种不同阻垢剂试验，其中一种阻垢剂可以在 $\text{pH}=7$ 的条件下运行且没有 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 结垢。该阻垢剂本身价格较低、且可节约加酸用量，使 RO 药剂费用节省 62%。

市政二沉池排放水中有机物和细菌含量较高，使 RO 系统需要控制生物污染，OCWD 和 UP 采用氯胺来

控制微生物生长，通过在上游中加入活性氯和 3-5mg/L 的氨来形成氯胺，使 RO 进水中保持 2-3mg/L 氯胺。活性氯对聚酰胺膜元件破坏性强，但聚酰胺 RO 膜元件耐氯胺能力达 100,000 ppm-h。

10.5.3 现场试验、示范水厂和早期项目经验

自 90 年代起，OCWD 和新加坡得到许多采用聚酰胺 RO 膜元件回用市政污水的经验。至少三个 RO 膜制造商提供的几个膜元件参与了试验、示范水厂或早期项目。表 10.5.2 列出曾参与这两个项目中试验膜的概况。

表 10.5.2 试验用膜元件性能参数

膜型号	膜厂商	膜种类	膜面积 (m ²)	产水量 (m ³ /h)	NaCl 脱盐率 (%)	测试压力 (MPa)	测试 NaCl 浓度 (mg/L)
TFC-HR	Koch	低压	37.2	42.4	99.5	1.55	2000
BW30-400FR	Dow	低污染	37.2	39.7	99.5	1.55	2000
XLE-440	Dow	超低压	40.9	48.1	99.0	0.70	500
LFC1	Hydranautics	低污染	37.2	41.6	99.5	1.55	1500
LFC3	Hydranautics	低污染	37.2	36.0	99.7	1.55	1500
ESPA2	Hydranautics	超低压	37.2	34.1	99.6	1.05	1500
ESPA2 MAX	Hydranautics	超低压	40.9	45.4	99.6	1.05	1500

10.5.3.1 OCWD 经验

OCWD 的大量试验是在 2001-2002 年期间完成，采用 3 套试验装置，5 种不同膜型号。其中，ESPA2 膜试验时采用 6:4:2 三段排列方式，7 芯装。在调试初期遇到结垢现象，发现是磷酸钙垢后将进水 pH 值调至 6-6.5，回收率从 87% 降低至 85%，之后试验稳定运行 5000 个小时。

OCWD 现场试验除了确定运行参数之外，另一项重要目的是确定膜元件型号。虽然都是聚酰胺材料，但膜表面电荷、亲水性和粗糙度等都会影响膜表面的污染程度。OCWD 测试的膜元件种类有超低压和低污染两种。低污染膜是电中性、亲水性强和表面光滑，在某些特定废水方面会表现出强抗污染能力。但是在 OCWD 的试验中，两种膜在达到稳定运行之前水通量都下降了 25% 左右。这是因为有机物在膜表面的沉积，一旦有机物的污染层形成，之后的污染速度就降低了。在 OCWD 的试验现场表明，阳离子和阴离子污染物的区别可以忽略不计，且超低压膜的稳定比水通量比低污染膜高 30%。

2004 年 4 月，OCWD 建成了 1,9000 m³/d 的示范水厂，此水厂的运行积累了很多宝贵经验。在最初运行的 4 个月期间，膜系统受到微生物污染导致比水通量下降 40%、压差上升 30%，见图 10.5.1、10.5.2。

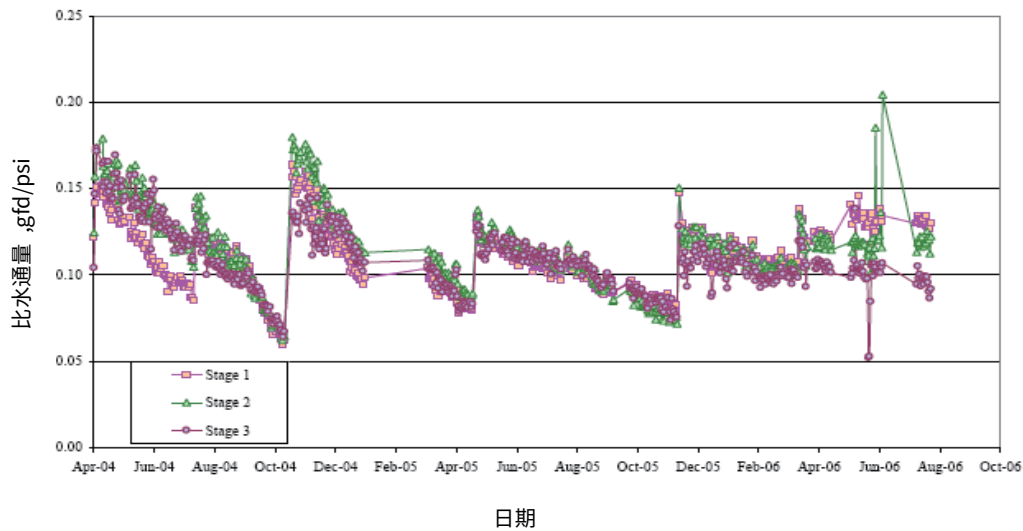


图 10.5.1 OCWD 示范水厂运行数据 - 比水通量

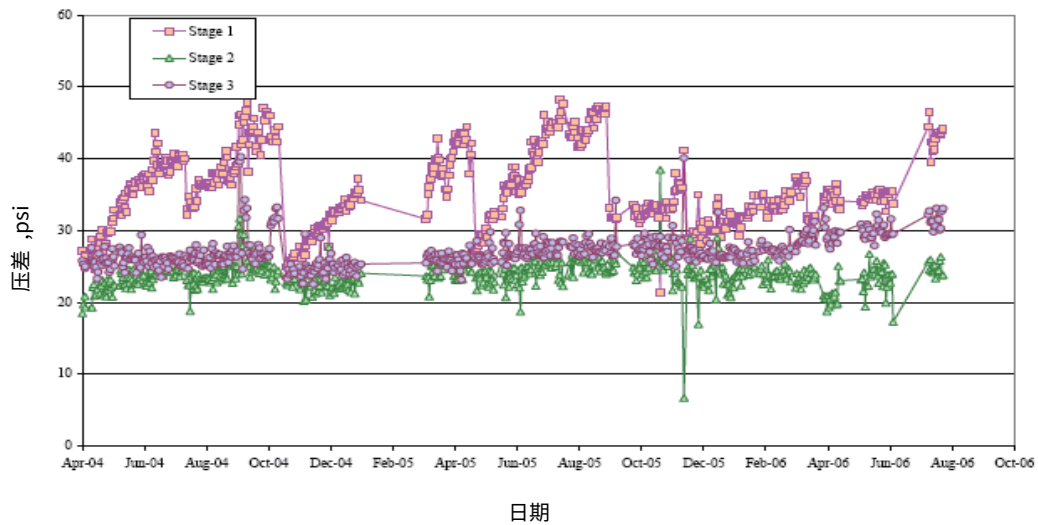


图 10.5.2 OCWD 示范水厂运行数据 - 压差

2005-2006 年, 该系统进行了一系列整改。首先消除了 MF 和 RO 之间的开放水池。水池内一些碎片进入到 RO 系统中, 堵塞了 RO 系统中前面的膜元件。对首支膜解剖分析能明显看出进水端面 and 膜叶之间的污染物, 见图 10.5.3、10.5.4。泵站湿井也进行了清洗和杀菌。在杀菌前, 进水的细菌数为 500-1000 个 /ml。加氯装置也进行修整且加强了监控。到了 2006 年 8 月, 现场运行恢复稳定且达到与试验期间相似的运行参数。



图 10.5.3 首支膜元件进水端板处污染物



图 10.5.4 首支膜膜叶间污染物

10.5.3.2 新加坡 Ulu Pandan 经验

新加坡 Bedok 示范水厂，设计时采用三段排列、85% 回收率，发生磷酸钙结垢现象。在前 10 天的运行中，第三段出现明显的水通量下降和透盐率上升现象。回收率降至 75-80%，且采用了新的阻垢剂之后，系统开始稳定运行。RO 系统的第一段和第二段每年清洗两次，第三段需每年清洗 3-4 次。此水厂的运行经验使 UP 在设计时决定采用两段排列，7 芯装，回收率 80%，且 pH 值调至 6.8。

UP 污水回用项目确定采用 ESPA2 MAX 来做现场试验，模拟项目的实际工况进行。但与实际系统有所不同，试验装置没有采用增压泵，而是在第一段节流约 0.2MPa 来模拟增压泵。图 10.5.5、10.5.6 分别列出了试验 7 个月的比水通量与压差的数据。与 RO 处理二沉池排放水的典型经验一样，第一段水通量在最初的两个月内降低 20% 之后达到平稳。

试验第一个月，数据均保持平稳。后来由于停止加入氯胺，导致第一段的压差在 20 天内上升了一倍。在重新加入氯胺后，第一段压差下降了 50% 但仍然高于初始压差 $1.7\text{kg}/\text{cm}^2$ 。说明氯胺只能抑制生物膜的继续生长，不能将生物膜污染完全消除。第二段的压差在试验四个月后上升，表明有结垢现象。在 8 月初进行常规的酸、碱化学清洗，接下来 3 个月的试验数据表明系统一直稳定运行。

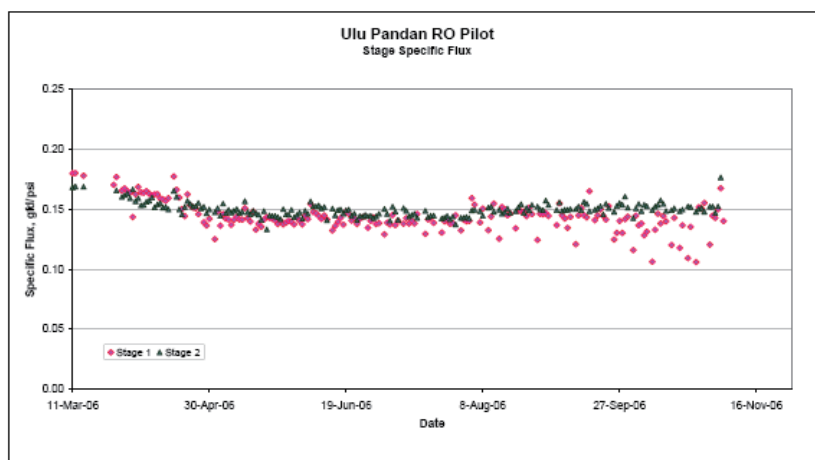


图 10.5.5 UP 比水通量试验数据

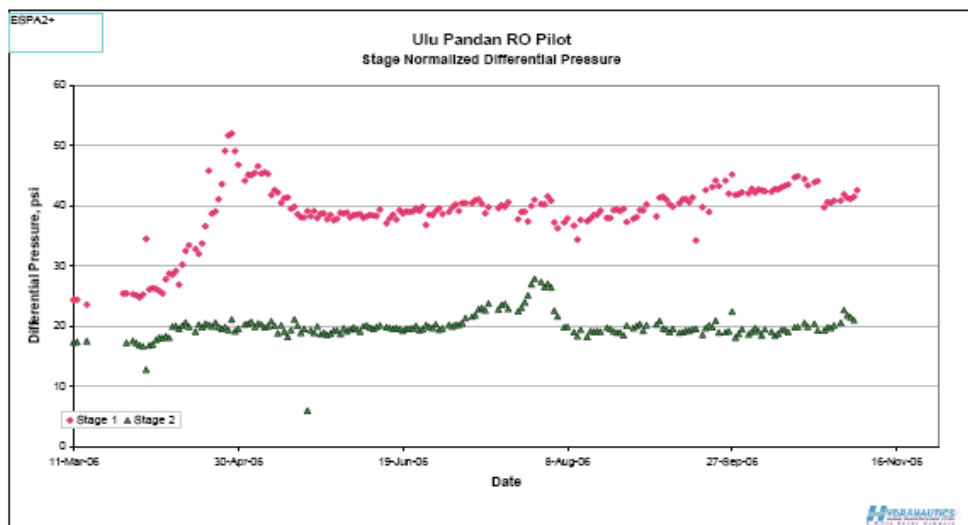


图 10.5.6 UP 压差试验数据

8 个月现场试验之后，取回两支膜元件进行测试，分别是第一段首支膜和第二段末支膜。在标准测试条件下对两支膜进行了复测，首支膜的透盐率增加 57%，导致了两段膜在 8 个月的试验期间总透盐率增加 25%。通过测试，表明膜元件表面没有受到氧化性物质损伤。两支膜的压差均比新膜出厂的压差有不同程度的提高，说明膜元件受到污染。

复测之后，两支膜解剖检查。膜表面发现有黄褐色长条带颗粒薄膜，是由有机物、膜表面粘附着的细菌分泌的多聚糖和颗粒污染物组合而成的。污染物灼烧减量表明膜表面污染物质中 96-97% 为有机物。

图 10.5.7、10.5.8、10.5.9 为新膜、首支膜、末支膜表面的电镜扫描放大 3000 倍照片。首支膜表面有一层厚的、非结晶状的污染层，而未支膜上只有部分膜表面被污染物覆盖。图 10.5.10 表明首支膜表面还有大量的细菌；图 10.5.11 还表明首支膜上有直径 $>40\mu\text{m}$ 的颗粒污染物，导致了膜元件脱盐率的下降。

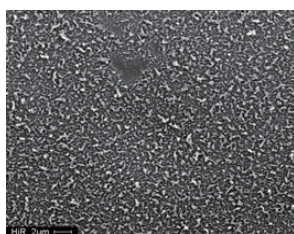


图 10.5.7 新膜

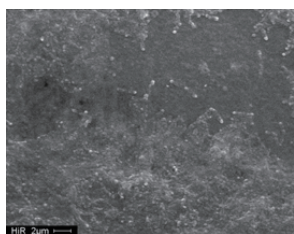


图 10.5.8 首支膜

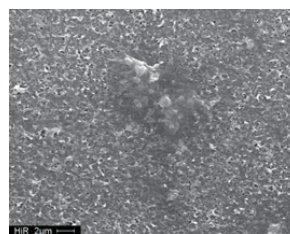


图 10.5.9 末支膜

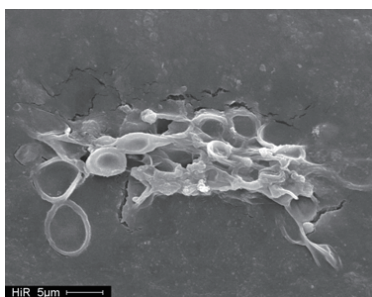
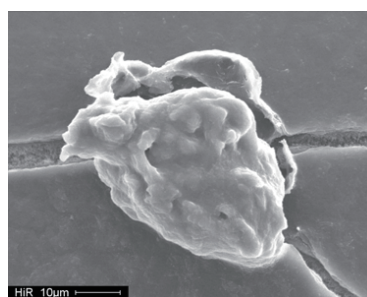


图 10.5.10 首支膜放大 2000 倍照片

图 10.5.11 首支膜放大 1250 倍,直径 $>40\mu\text{m}$ 颗粒

对两支膜进行 EDAX 表面物质分析，发现其污染物成分非常相似：主要成分是 C、N、O，三种成分占了污染物重量的 87-92%，这也与灼烧减量分析的结果相符。两支膜都有一些磷酸钙垢，末支膜由于浓缩倍率较高，铁污染重量比占到 3%。

10.5.4 污水回用厂系统设计和运行

UP 有 13 套 RO 装置，其中 12 套运行，1 套备用。每套产水量 12,300m³/d，共计 148,000m³/d。平均水通量为 18lmh，系统回收率 80%，每套 RO 的排列是 (64:36)*7。两段之间装有涡轮增压器，将第二段浓水的能量直接交换到第二段进水处。涡轮增压器可平衡前后段水通量、提高产水水质、降低能量消耗。增压器有一个旁路，当浓水流量超过增压所需流量时启动旁路。

OCWD 有 15 套 RO 装置，其中 14 套运行，1 套备用。每套产水量 18,900m³/d，共计 265,000m³/d。平均水通量 20.4lmh，系统回收率 85%，每套 RO 的排列是 (78:48:24)*7。

两个污水回用项目的不同设计可比较出废水回用 RO 设计降低初始投资和运行成本的发展趋势。UP 的两段设计比三段设计节省了管道和膜壳，且带有涡轮增压的两段设计使系统水通量分布更均匀。

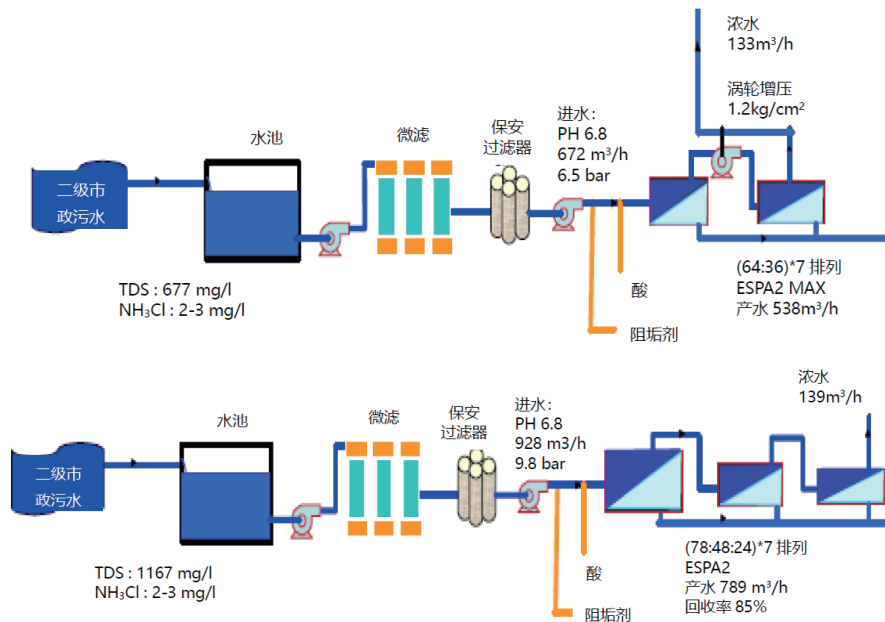


图 10.5.12 两个水厂系统流程图

两个厂均采用美国海德能公司的节能型超低压膜元件，分别是 ESPA2 和 ESPA2 MAX。ESPA2 膜面积为 37.2 m²，在标准测试条件下的产水量为 34.1m³/d，而 ESPA2 MAX 的膜面积为 40.9m²，在标准测试条件下的产水量为 45.4m³/d。ESPA2 MAX 的膜面积比 ESPA2 增大 10%，产水量增大 33%，意味着 ESPA2 MAX 更节能。为了便于直观理解不同膜元件和不同设计对能耗的影响，表 10.5.3 对比了两个项目实际设计和假设设计的各项参数。

表 10.5.3 两个污水回用厂实际和模拟设计对比

系统设计	1 OCWD ESPA2 (实际设计)	2 OCWD ESPA2 MAX (模拟设计)	3 UP 涡轮增压 (实际设计)	4 UP 普通增压 (模拟设计)
产水量 (m ³ /d)	18900	18900	12900	12900
进水 TDS (mg/l)	1167	1167	677	677
平均水通量 (lmh)	20.4	18.4	18.8	18.8
回收率 (%)	85	85	80	80
进水压力 (bar)	9.8	8.3	6.5	6.5
浓水压力 (bar)	4.7	3.7	4.8	4.8
泵效率 (%)	83	83	83	83
电机效率 (%)	93	93	93	93
段间增压 (bar)	0	0	1.2	1.2
能量回收效率 (%)	N/A	N/A	58	N/A
吨水能耗 (kwh/m ³)	0.41	0.35	0.29	0.31

在 OCWD 项目中,如果采用同样数量的 ESPA2 MAX 膜,水通量从 20.4lmh 降至 18.4lmh;进水压力从 9.8bar 降至 8.3bar,能耗降低 15%。该项目如果采用同样水通量设计,采用 ESPA2 MAX 则可减少膜元件和膜壳用量 9%,即 1470 支膜元件和 210 支膜壳。

UP 项目的另一个节能特点是采用了能量回收装置,其吨水能耗比采用相同膜排列设计但采用普通增压泵的能耗低 0.02 kwh/m³,降低 6.5%。对于运营期为 20 年污水回用厂,所带来的长期经济效益十分可观。

能量回收装置的一个缺点是达到最大效率时的运行参数范围很窄,与普通泵一样,能量回收装置也是设计了一个优化的流量/压力点。而对于污水回用的 RO 系统来说,很难在其整个运行生命期间内都保持稳定的流量/压力比值。因此,在采用能量回收装置时,不必强求时刻都达到其最大效率,而是尽可能优化系统设计,在大多数时间里使其发挥高效率。

10.5.5 结论

两个大型市政污水回用项目根据水质、预处理和产水要求等采用了不同的设计,从其中的现场试验和运行数据,总结出以下的一些经验:

1. 节能型超低压膜在处理经 UF/MF 预处理的市政污水时,其抗污染能力某些情况下比低污染膜还好。采用节能型膜元件可降低初始投资(膜元件价格低)和运行费用(低运行压力)。
2. 采用大膜面积的 ESPA2 MAX 可比同样膜数量的 ESPA2 降低运行压力 15%。如果采用同样水通量设计,采用大膜面积的 ESPA2 MAX 可以需要更少膜数量、膜壳;从而降低初始投资和运行费用。
3. 在两个项目的现场试验中,都发生过磷酸钙结垢现象。因为结垢导致了回收率比预期低、加药量比预期高。当采用合适的阻磷酸钙垢的阻垢剂,RO 系统也可以进一步进行优化。
4. UP 进水中的 PO₄ 高达 15mg/L, pH=6.8, 回收率设计为 80%;但 OCWD 的进水 pH 调节至 6,其运行回收率为 85%。
5. 在 UP 项目中,采用涡轮增压比普通增压泵节约泵能耗 6.5%。

10.6 反渗透膜和纳滤膜对 PFAS 去除率的研究

10.6.1 PFAS 污染问题介绍

全氟和多氟烷基物质 (PFAS) 是一类包含数千种 (约 5000 至 10000 种或更多) 含氟化学物质的总称。该类物质具有极强的碳 - 氟键, 使其能够防水防油并耐受高温。PFAS 化合物在环境中广泛存在, 并可在生物体内累积。这些化合物最早发明于 20 世纪 30 年代, 并在二战后实现商业化。由于它们在水中的溶解性及在自然条件下难以降解的特性, 又被称为“永久性化学品”, 已被广泛应用于各行各业。其常见用途包括: 织物和地毯的防水防污处理 (如思高洁品牌)、不粘炊具涂层 (如特氟龙)、防水服装、披萨盒的防油耐热涂层、微波爆米花容器、汉堡包装纸、润滑剂、表面活性剂、化妆品以及专用于扑灭剧烈油类火灾的 AFFF 消防泡沫。

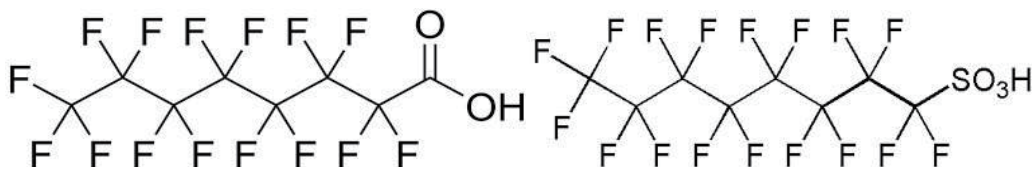


图 10.6.1 八个碳链的 PFOA 和 PFOS

世界正逐渐发现这些曾改善了我们的生活品质的 PFAS 产品有其“黑暗”的一面, 并且寻找安全、有效且合适的替代品是一个非常现实的挑战。它们不易被自然过程降解, 并且在动物和人类以及水、土壤和空气中有令人担忧的生物累积趋势。接触 PFAS 可能导致不良健康影响, 为此致使世界各地的地方政府、州政府和联邦政府纷纷颁布了严格至在 PPT (万亿分之几 PPT 或 ng/L) 级别的法规, 以保护生命和环境。有研究试图确定 PFAS 在全世界人类中普遍程度, 研究人员不得不使用朝鲜战争前的存档血液来寻找不含 PFAS 的样本。

水体中的 PFAS 污染已成为日益严峻的问题, 因为 PFAS 有较强迁移性并易于在地下水中累积的特性。美国国家环境保护局 (EPA) 在 2017 年为饮用水中的 PFOS 和 PFOA 总浓度设定的 HAL (健康咨询限值) 为 70ppt。2022 年 6 月 15 日, EPA 更新 HAL 值, 为 PFBS 设立了新的 HAL 为 2,000ppt, 为 GenX 设立了 10ppt 的 HAL, 并将 PFOA 修订为 0.004ppt, PFOS 修订为 0.02ppt, 这些值已低于 (当前) 最复杂的实验室的检测限。

PFAS 的循环图示 (图 10.6.2) 形象的说明了 PFAS 在我们环境中的持久性与潜在危害性。PFAS 是一种人造污染物, 主要通过我们的市政与工业废水进入环境, 并最终被引入地下水或地表水, 并且基本上不会被降解。

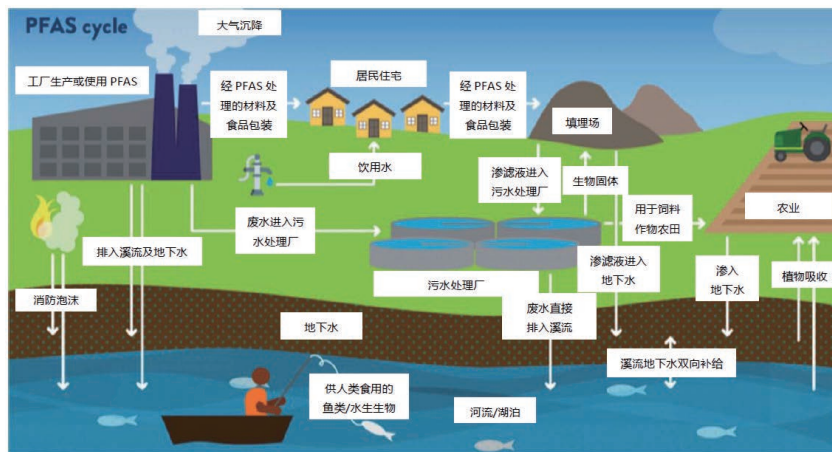


图 10.6.2 由明尼苏达州污染控制局提供

10.6.2 法规

对水处理行业而言，最富挑战性的环节之一或许是需要及时跟进不断出台和更新的法规及其生效时间。截至 2022 年 12 月，美国 EPA 尚未针对任何特定的 PFAS 化合物发布国家一级饮用水强制监管限值。2012 年，公共供水系统被要求根据第 3 版《未受管制污染物监测规则》（UCMR）对表 10.6.1 中所列注明的六种 PFAS 化合物进行监测。EPA 在 2019 年还增加了另外两种短链 PFAS 化合物至监测列表，即 GenX 和 PFBA。尽管这些短链 PFAS 本应具有更短的半衰期，并且是其所替代的长链 PFAS 的理论上的危险性较低的替代品，但现在有人担心短链 PFAS 在植物中生物累积的可能性增加，并且现有与长链 PFAS 相比，传统水处理技术对它们的去除效果往往不佳。

EPA 于 2021 年 12 月发布了第 5 版 UCMR，将总共监测 29 种 PFAS。如表 10.6.1 所示，PFAS 按碳原子数递增，并按分子量排序。

表 10.6.1 截至 2021 年 12 月 EPA 发布的第 5 版 UCMR 所监测的 PFAS

PFAS	分子量	碳原子数	UCMR
PFBA	214	4	5
PFMPA	230	4	5
PFBS	300	4	3&5
PFEESA	316	4	5
PFPeA	264	5	5
PFMBA	280	5	5
NFDHA	296	5	5
PFPeS	349	5	5
PFHxA	314	6	5
4:2 FTS	328	6	5
HFPO-DA (Gen-X)	330	6	5
PFHxS	400	6	3&5
PFHpA	364	7	3&5
ADONA	377	7	5
PFHpS	488	7	5
PFOA	414	8	3&5
6:2 FTS	450	8	5
PFOS	500	8	3&5
9Cl-PF3ONS	571	8	5
PFNA	464	9	3&5
PFDA	514	10	5
N-EtFOSA(N-EtFOSAA)	527	10	5
8:2 FTS	550	10	5
11Cl-PF3OUdS	632	10	5
PFUnDA or PFUnA	564	11	5
N-MeFOSAA	571	11	5
PFDaA	614	12	5
PFTTrDA	664	13	5
PFTA	714	14	5

除了对饮用水的监管加强外，EPA 还于 2021 年 9 月 8 日宣布了其新的关键工业废水法规制定计划（“Preliminary Effluent Guidelines Program Plan 15”），其中即包括 PFAS 的排放限值。该计划的实施可能迫使工业（企业）在源头处理 PFAS，并对工厂可排放的 PFAS 水平有严格限制。

使 PFAS 标准和限值进一步复杂化的因素是，它们因进水水源和用途以及管辖级别（州级还是联邦级）而有巨大差异，主要涉及：

- 饮用水
- 地下水，例如水井
- 地表水，例如湖泊或河流
- 市政废水排放及其去向
- 工业废水排放及其去向
- 垃圾填埋场渗滤液

10.6.3 水处理策略

值得庆幸的是，我们拥有从水中去除 PFAS 的技术。然而坏消息是，一旦我们收集并浓缩了这些有毒化合物，如何最终处置 PFAS 成为核心挑战。本文的第一部分将讨论如何将水中 PFAS 净化至饮用水标准和废水排放标准的不同方法。本文的最后部分将总结用于处理浓缩 PFAS（废液）或对吸附了 PFAS 的介质或固体 PFAS 化合物进行彻底解毒的各种 PFAS 破坏技术。

没有单一的完美技术可以去除 PFAS。关键问题是：

- 该技术是否能充分去除不同碳链长度和分子尺寸的 PFAS 化合物以达到严格的出水要求？
- 这是一个短期应急还是长期可持续的解决方案？
- 建设成本与运营成本分别是多少？
- 如何最终处置浓缩后的 PFAS？

现有许多处理工艺可以选择，表 10.6.2 列举了其中部分可行的工艺。不同工艺，如 NF/RO 膜、GAC、IX（树脂）和某些新型吸附介质，在去除短链和长链碳 PFAS 化合物方面具有显著不同的效果。然而，所有这些工艺都会导致 PFAS 被浓缩到更小的废物流中或吸附到固体介质上。目前，大多数受 PFAS 污染的介质被封装后送往垃圾填埋场或焚烧处置，但这并不是一个理想的长期解决方案。

表 10.6.2 一些工业 PFAS 去除方案

RO/NF 膜	能有效去除短链和长链碳。缺点是高运营成本和资本成本以及浓缩液处置。
IX 阴离子交换	能有效去除长链碳，但对短链效果存疑。缺点是处理再生废物和废树脂处置。
GAC 颗粒活性炭	能有效去除长链碳，但对短链效果存疑。缺点是处理进水有机物导致的耗尽以及再生废物和废活性炭处置。
新型吸附剂	基础材料可以是玉米、粘土、聚合物等。效果已显示出前景，但需要进一步研究。
电凝 / 泡沫分选	作为表面活性剂在空气 - 水泡沫界面去除 PFAS 显示出前景，但需要进一步研究。

本文还将报告通过孔径逐渐减小、材质更致密的 NF 和 RO 膜进行的 PFAS 截留率研究。研究评估了 3 种不同的水源，包括 TOC 浓度为 534ppm、PFAS 浓度为 8481ppt 的俄亥俄州垃圾填埋场渗滤液；TOC 浓度为 10ppm、PFAS 浓度为 100ppt 的加利福尼亚州饮用水 RO 厂的浓缩液；低 TOC、实验室配制并添加 PFAS 至 1109ppt 合成的进水。本文将讨论特定 PFAS 化合物的截留率可能因碳链长度、其酸或盐形式、pH 值而异，并且可能因不同地点的进水水源中有机物和无机物组分不同而发生变化。

表 10.6.3 按技术划分的 PFAS 去除率的比较
(基于 AWWA 2020 年 9 月 21 日报告的 EPA 饮用水可处理性数据库)

PFAS	分子量	碳原子数	GAC 去除率	IX 阴离子去除率
PFBA	214	4	99%	97%
PFBS	300	4	98%	98%
PFHxS	400	6	90%	99%
PFHpA	364	6	90%	94%
PFOA	414	8	40-99%	77-97%
PFOS	500	8	18-98%	90-99%
PFNA	464	9	93%	98%

颗粒活性炭 (GAC) 处理 PFAS 技术: GAC 通过颗粒活性炭的空隙和表面可有效吸附有机物 PFAS。因此，当需要快速解决方案时 GAC 技术很受欢迎。通常，GAC 对磺酸盐基和较长链 PFAS 的去除率最高。然而，活性炭对进水中所有的有机物（吸附）容量有限，约为每立方英尺 GAC 0.2-0.3 磅。这意味着，活性炭不仅吸附 PFAS，还吸附所有其他 TOC，因此可能很快饱和。例如，在处理 100gpm（流量）和 10ppm TOC 的进水条件下，每天需要消耗 40-60 立方英尺的 GAC，约可去除 12 磅 TOC。另一个重要的问题是，目前没有可靠的在线自动测量监测器来检测出水中是否含有剩余的 PFAS。运行必须依赖（过量）投加足够的 GAC 来保证结果。一旦活性炭吸附饱和，通常必须使用高温蒸汽在场外再生，此过程可能导致 PFAS 释放到大气中，或者将活性炭运至垃圾填埋场进行最终处置。

离子交换 (IX) 处理 PFAS 技术: IX 使用特定的强碱阴离子树脂，可优先去除 PFAS 而非其它无机阴离子。其作用机制是：带正电荷的树脂（官能团）吸引 PFAS 的带负电性头部，并将其疏水性非离子尾部吸附到树脂珠的非电荷聚苯乙烯或“塑料”部分。该技术在低 TOC 进水中效果最佳，且需要对可能堵塞或遮蔽树脂的污染物进行预处理。与 GAC 一样，没有用于 PFAS 的在线自动测量设备，只能依赖处理体积来预测树脂是否耗尽。树脂再生是专有工艺，通常可能可以使用 NaCl 溶液去除离子型 PFAS，并使用有机溶剂或表面活性剂处理 PFAS 的疏水部分。产生的再生废物必须通过另一个现场系统进行进一步浓缩，然后将超浓缩废物运至危险废物填埋场或焚烧处置。

10.6.4 用于处理 PFAS 的 NF 和 RO 膜系统

1. 垃圾填埋场渗滤液膜研究

2020 年 6 月，日东实验室使用 NF 和 RO 膜，对从宾夕法尼亚州切斯特县垃圾填埋场获取的渗滤液进行

了研究。选用的海德能 NF 膜，型号为 PRO-XS2，在 110psi 的额定压力下产水量为 11,000gpd，对 2,000 ppm MgSO₄ 测试溶液的截留率为 99.7%。选用的 RO 膜是更致密的膜，型号为 ESPA2-LD，在 150psi 压力下的额定产水量为 10,000gpd，对 1,500ppm NaCl 测试溶液的截留率为 99.6%。该垃圾填埋场渗滤液的 TDS 含量很高，为 12,100 ppm，TOC 含量也很高，为 534ppm。NF 的 TOC 截留率 >95%，RO 的 TOC 截留率 >99%。

表 10.6.4 显示了 2012 年美国 EPA 最初发布的 UCMR3 未受管制污染物监测规则列表中的六种 PFAS 化合物。理论上认为（尚需证明），切斯特县垃圾填埋场渗滤液相对于日东实验室配置试验进水（由蒸馏水和有机物配制），膜系统对 PFAS 的截留率更高。是因为有机物不可逆地吸附到膜表面，会使膜变得更致密。有机物吸附使膜变得更致密的理论已在市政污水处理厂 TOC>5ppm 的高浓度有机物水，以及佛罗里达州苦咸水厂 TOC 高达 20ppm 的情况下得到验证。可以观察到，碳链越长，PFAS 截留率越高，但这可能因与化合物相关的官能团类型（例如羧酸盐、磺酸盐等）而异。

表 10.6.4 垃圾填埋场渗滤液与日东实验室按照 UCMR 3 配置进水的 PFAS 截留率比较

			切斯特	切斯特	日东	日东	日东
			10.3gfd	10.0gfd	20gfd	20gfd	20gfd
			66%Rec	62% Rec	50% Rec	50% Rec	50% Rec
			PRO-XS2	ESPA2	PRO-XS2	ESPA2	CPA7
PFAS	分子量	碳原子数					
PFBS	300	4	93.6%	99.7%	71%	82%	82%
PFHxS	400	6	97.2%	99.2%	65%	87%	88%
PFHpA	364	7	98.0%	99.4%	75%	87%	87%
PFOA	414	8	98.6%	99.5%	78%	93%	90%
PFOS	500	8	98.7%	98.5%	87%	97%	95%
PFNA	464	9	98.3%	96.4%	86%	96%	95%

2. NF 和 RO 对 UCMR5 所列 PFAS 的截留率

采用日东配置的 PFAS 实验室标准水样对纳滤膜 PRO-XS2、反渗透膜 ESPA2-LD 和反渗透膜 PROC30 进行了实验室测试。水通量为 20gfd，回收率为 50%。

表 10.6.5 实验室按照 UCMR5 配置水样中 PFAS 截留率

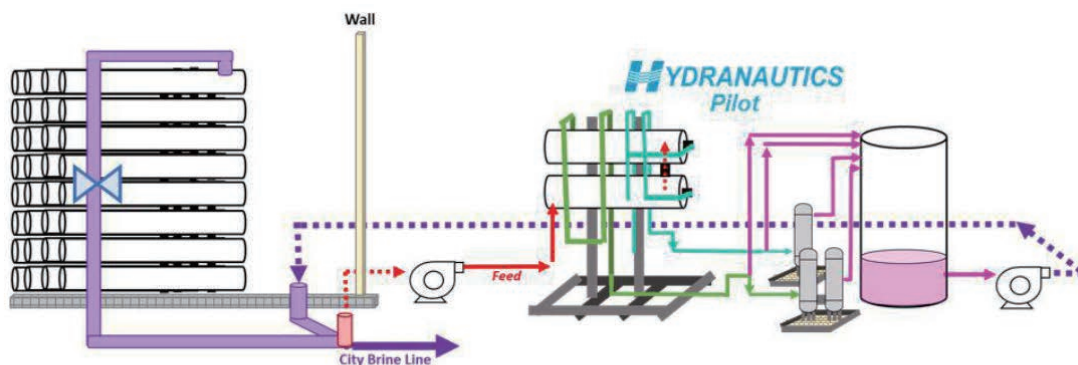
PFAS			PRO-XS2 NF	ESPA2-LD RO	PROC30 RO
在 UCMR 5 列表中	分子量	碳原子数	% 截留率	% 截留率	% 截留率
PFBA	214	4	71%	83%	81%
PFPeA	264	5	69%	82%	80%
PFPeS	349	5	72%	86%	84%
PFHxA	314	6	77%	87%	85%
HFPO-DA (Gen-X)	330	6	71%	83%	81%
4:2 FTS	350	6	70%	81%	83%
ADONA	377	7	77%	89%	87%
PFHpS	488	7	75%	94%	94%
6:2 FTS	450	8	79%	90%	90%
9CI-PF3ONS	571	8	89%	100%	100%

PFDA	514	10	87%	97%	96%
N-EtFOSA (N-EtFOSAA)	527	10	100%	100%	100%
8:2 FTS	550	10	90%	98%	100%
11CI-PF3OUdS	632	10	100%	100%	100%
PfUnDA or PFUna	564	11	95%	97%	100%
PFDaA	614	12	100%	100%	100%
PFTTrDA	664	13	100%	100%	100%
PFTA	714	14	100%	100%	100%
PFOSA	499	8	97%	98%	100%
PFNS	567	9	92%	100%	100%
PFDS	600	10	100%	100%	100%
N-MeFOSA	557	11	100%	100%	100%
N-MeFOSE	564	11	100%	100%	100%
MeFOSAA	571	11	94%	100%	100%
N-EtFOSE	580	12	100%	100%	100%
EtFOSAA	590	12	100%	100%	100%
PFDoS	699	12	100%	100%	100%

对表 10.6.5 所示的结果进行分析，截留率首先按碳链数量排序，然后按分子量排序。可见，在几乎所有情况下，膜的截留率都显著依照这种模式，即随碳链长度和分子量增加而提高。此外，当碳链大于 8 时，截留率变得非常好，普遍接近 100%。

3. NF 和 RO 对井水中 PFAS 去除中试

该中试于 2022 年运行，其用于处理加利福尼亚州奥申赛德一个市政井水处理设施内现有 RO 系统的浓缩液，该设施位于彭德尔顿营军事基地以南。中试目的是进一步浓缩当前 RO 浓缩液。该现有 RO 系统处理 21.3°C 的地下水，以 85% 的回收率运行，其产生的浓缩液送至中试装置。此中试装置所处理的当前 RO 浓缩液，其 TDS 为 7147ppm，TOC 为 12.3ppm，PFAS 总浓度为 100-115ppb。该中试装置采用 1x1-1M 排列，其运行参数约为 17gfd 的水通量，17% 回收率，产水流量 7.2gpm 和浓水流量 36gpm。中试测试了七种不同的苦咸水膜，包括 3 种 NF 膜和 3 种 RO 膜，以及一种具有 NF 级别进水压力和 RO 级别截留率特性的膜 (ESPA4-LD)。每种膜运行一到两周。



PFAS NF-RO 中试系统

进水 TDS	进水 TOC	进水总 PFAS	温度	通量	回收率%
9,000 ppm	10 ppm	100 to 115 ppt	21.3 °C	17 GFD	17 %

图 10.6.3 市政井水处理设施流程图

表 10.6.6 是中试进水中 10 种可测量 PFAS 化合物的总结，总计约 100ppb，以及潜在来源。

表 10.6.6 井水中试 PFAS 总结

PFAS	分子量	碳原子数	UCMR	浓度	潜在来源
PFBS	300	4	3&5	17.5ppt	工业表面活性剂。织物、地毯、纸张中的防水防污涂层。
PFPeA	264	5	5	5.1ppt	从用于储存农药等的氟化 HDPE 容器中浸出。
PFPeS	349	5	5	7.1ppt	索尔维公司。用于纺织品、油漆、污渍等大量材料的耐油 / 耐水性。
PFHxA	314	6	5	6.7ppt	从用于储存农药等的氟化 HDPE 容器中浸出。防油食品接触材料、防污性中的分解化学物。
PFHxS	400	6	3&5	28.6ppt	消防泡沫。防污织物。食品包装。3M 公司于 2002 年逐步淘汰。
PFHpA	364	7	3&5	3.1ppt	从用于储存农药等的氟化 HDPE 容器中浸出。
PFHpS	488	7	5	1ppt	不确定。可能与 GenX 有关。
PFOA	414	8	3&5	10.1ppt	从用于储存农药等的氟化 HDPE 容器中浸出。杜邦 C8 和特氟龙。
PFECHS	461	8	无	5.2ppt	自 1940 年代起用于飞机液压油。替代 3M 的 PFOS。
PFOS	500	8	3&5	14.3ppt	防污 3M Scotchgard, 福莱斯特号航空母舰火灾后的消防泡沫，食品包装。
PFNA	464	9	3&5	1.1ppt	从用于储存农药等的氟化 HDPE 容器中浸出。
进水中总 PFAS:				99.8ppt	

表 10.6.7 井水中试膜结果

膜型号	类型	进水压力	盐透过率	TOC 透过率	PFAS 透过率
PRO-XS2	NF	122psi	35.00%	3.50%	2.20%
ESNA1-LF2-LD	NF	112psi	8.80%	0.80%	0.50%
ESNA1-LF-LD	NF	120psi	5.30%	0.50%	0.50%
ESPA4-LD	RO-NF	135psi	1.10%	<0.4%	0.50%
ESPA2-LDMAX	RO	151psi	0.40%	<0.4%	0.60%
PRO-XR1	RO	203psi	0.20%	<0.4%	0.60%
PROC 30	RO	208psi	0.20%	<0.4%	0.60%

表 10.6.8 是 PFAS 数据，显示了四种 RO 膜的中试 RO 进水、产水和浓缩液浓度。请注意，产水的最低检测

水平为 0.05ppt。当产水读数为 ND（未检出）时，透过率用红色突出显示，表明透过率是低于报告值的某个值。PFAS 化合物的透过率是产水水平除以进水 - 浓缩液算术平均值。

表 10.6.8 井水中试 PFAS 数据

ESNA1-LF-LD	浓度 (ppt)											
	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFECHS	Total
进水	16.9	5.7	33	0.7	13.3	6	7.4	3.3	9.6	1.1	3.5	101
产水	0.08	0.05	0.11	0.05	0.13	0.08	0.06	0.05	0.08	0.05	0.05	0.79
浓水	20.6	6.9	40.5	0.7	16.1	7.2	8.3	4.1	11.7	1.4	4.7	122
% 透过率	0.4%	0.8%	0.3%	7.1%	0.9%	1.2%	0.8%	1.4%	0.8%	3.9%	1.2%	0.7%
ESPA4-LD	浓度 (ppt)											
	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFECHS	Total
进水	16.5	6.9	32.8	0.8	13.8	6.5	7.5	3.5	12.2	1.2	4.7	106
产水	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.05	0.05	0.63
浓水	20.7	8.6	39.8	1.1	16.8	7.5	8.9	4.8	14.8	1.4	5.6	130
% 透过率	0.3%	0.6%	0.1%	5.2%	0.4%	0.9%	0.7%	1.6%	0.6%	3.8%	1.0%	0.5%
ESPA2-LD MAX	浓度 (ppt)											
	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFECHS	Total
进水	16.6	7	30.9	0.9	15.2	6.4	7.4	4.8	11.7	1	5.5	107
产水	0.05	0.05	0.05	0.05	0.16	0.06	0.05	0.07	0.08	0.05	0.05	0.71
浓水	20.4	8.9	40.5	1	16.7	7.6	9	5.5	14.5	1.3	5.5	131
% 透过率	0.3%	0.6%	0.1%	5.4%	1.0%	0.8%	0.6%	1.3%	0.6%	4.3%	0.9%	0.6%
PRO-XR1	浓度 (ppt)											
	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFECHS	Total
进水	16.5	6.8	32.9	1	18.1	6.5	7.6	4.3	13	1.4	6.4	114
产水	0.05	0.05	0.05	0.05	0.09	0.05	0.06	0.11	0.09	0.05	0.05	0.69
浓水	20.1	8.1	37.8	1	15.7	7.7	9.3	4.8	14.2	1.4	5	125
% 透过率	0.3%	0.7%	0.1%	5.0%	0.5%	0.7%	0.7%	2.4%	0.7%	3.7%	0.9%	0.6%
PROC30	浓度 (ppt)											
	PFBS	PFPeS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFECHS	Total
进水	17.3	6.9	32	0.8	13.5	6.8	7.5	3.3	12.2	1.1	4.5	106
产水	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.05	0.05	0.11	0.05	0.05	0.68
浓水	20.4	8.6	38.4	1	16.6	8	8.9	4	13.9	1.4	5.3	127
% 透过率	0.3%	0.6%	0.1%	5.7%	0.3%	1.6%	0.6%	1.4%	0.8%	3.9%	1.0%	0.6%

10.6.5 从摇篮到坟墓：PFAS 处理或处置方案

解决 PFAS 问题的关键是，在一旦我们处理了一个水体并浓缩了 PFAS 之后，那么我们该如何处理浓缩的 PFAS 废液？尽管有许多技术正在探索中，但都需要进一步被证明是实用和有效的。以下为简要的列举：

- 机械化学降解 MCD：MCD 是使用高能球磨设备破坏固体 PFAS 盐的机制。该方法不需要高温焚烧来对 PFAS 盐进行处理。

- 超临界水氧化 SCWO：当水达到其超临界状态（高于 705° F 和 218 个大气压）时，浓缩的 PFAS 被完

全分解（矿化）形成水、氮气和二氧化碳。

- The Elemental™：是 Claros 公司的专有光化学工艺，其声称在环境温度和压力条件下，1-3 小时内可破坏 97-100% 的所有 PFAS 化合物，副产物为游离氟化物和二氧化碳。

- 焚烧：虽然焚烧法已被提及，但其环境安全性引发了许多问题。若不完全焚烧可能会在其排放物中产生有毒的碳氟化合物气体。因此，伊利诺伊州和纽约州等已禁止使用该方法处置 PFAS。

其他探索中技术包括：

- 垃圾填埋
- 深井注入
- 臭氧氧化
- 生物法
- 等离子体法
- 电化学氧化
- 声化学处理
- 电子束

10.6.6 结论

本文综述了 PFAS 在我们环境中的严重性和普遍性，以及全球范围内正在引入的法规进展来保护环境和公众健康。研究及实践表明，尽管从水中净化 PFAS 是完全可以实现的，但没有一种完美的单一的水处理策略来净化我们的水资源。其中，GAC 和 IX 技术是良好的过渡性方案。而 RO 和 NF 在满足及其严格的水净化要求方面非常有效，但它们需要与同样良好且成熟的 PFAS 处理和处置技术相结合，以解决浓缩液问题，然而这些技术尚未完全确立和规模化应用。

10.7 贝尼厄普高级水回用厂——澳大利亚首个大型间接饮用回用厂

10.7.1 背景

2016 年，贝尼厄普水厂投产，成为澳大利亚首个采用高纯度再生水进行地下水补给的大型水厂。废水回收利用，尤其是间接饮用水回用（IPR），在澳大利亚长期存在争议。尽管新加坡等国已证实其安全性，部分澳大利亚民众仍持反对态度。贝尼厄普水厂建成前，法规将任何经深度处理的水（即使达到高纯度标准）仍定义为“废水”。多个政府机构协同制定了“地下水补给试验”（GWRT）所需的监管框架。GWRT 指水厂建设前的试验阶段。

本文重点讨论 GWRT 项目中的反渗透（RO）系统及示范期间遇到的问题与解决方案。此外，还将介绍该厂的规模化运行情况（贝尼厄普一期及 2019 年投入运行的二期扩建工程），并探讨两座水厂的部分独特设计。

10.7.2 引言

过去几十年，西澳大利亚西南部降雨量持续减少，加之人口增长，导致首府珀斯（澳大利亚第四大城市，大珀斯地区人口超 200 万）供水紧张。尽管珀斯已于 2006 年建成一座大型海水淡化厂（2013 年又建成一座更大规模），仍需寻求其他水源以满足居民、企业和农业用水需求。海水淡化能耗高、成本高，但更易被民众接受；澳大利亚所有主要首府城市均至少建有一座大型海水淡化厂。

西澳大利亚的政府所有企业“水务公司”（Water Corporation）负责供水、污水处理及排水基础设施。2003 年，该公司曾与加州桔县水区（Orange County Water District）讨论利用高纯度再生水进行地下水补给。桔县在该领域经验丰富，但主要目的是为近海注入点供水以防止海水入侵。

经过多年科学研究和监管框架讨论，各方同意开展示范试验，评估在珀斯地区利用高纯度再生水补充地下蓄水层的可行性。珀斯主要地下水储存地“格纳加拉丘”（Gnangara mound）水位持续下降，导致树木枯萎、居民需不断降低水泵进水口才能取水。

GWRT 于 2009—2012 年实施，旨在确定先进水回用厂（AWRP）的技术可行性，以及保障其安全与社会认可所需的政策与法规。

10.7.3 地下水补给试验（GWRT）

GWRT 于 2009 年启动，AWRP 于 2010 年 11 月投运，产水注入利德维尔含水层至 2012 年 12 月。

该厂进水为经预处理、一级处理和二级处理的市政污水。预处理包括格栅（去除大块杂物）和沉砂池（去除砂砾）。一级处理采用沉淀池或澄清池，使重质有机固体沉降，同时去除油脂、油类及漂浮物。二级处理旨在去除一级处理未能去除的溶解性有机物，采用活性污泥法、滴滤池、澄清池等生物工艺。经预处理、一级、二级处理后的水称为二级出水，通常排入海洋。

AWRP 取用原本排海的二级出水，通过三步处理至高纯度：①超滤（UF）——去除悬浮物、原生动物、细菌及部分病毒；②反渗透（RO）——去除大部分溶解性盐类、有机化学品、病毒及药物残留；③紫外线（UV）——最终消毒，破坏低分子量有机化合物（包括需降至万亿分之一浓度的污染物）。

GWRT 的 RO 系统为两套并行系统：一级 15 个压力容器，二级 8 个压力容器，每容器装 7 支膜元件。

初始安装其他品牌 RO 膜，18 个月后更换为 Hydranautics ESPA2-LD。预处理采用 UF 膜系统，设计回收率 75%，后处理为紫外线 UV。因废水中氨含量较高，投加次氯酸钠后生成氯胺，再生水厂通常维持 2–3 ppm 氯胺以控制生物污染。

• 试验期间遇到的问题

试验期间遇到的主要问题之一是前端膜元件严重生物污染。尽管每两周进行一次高强度化学清洗（pH 13，40° C），仍无法恢复压差（dP，衡量进水流动堵塞程度），且无效清洗缩短膜寿命。18 个月后更换膜元件，同时尝试不同清洗方法。

首先，将严重污染的前端膜元件翻转 180°（移动浓水密封圈至另一端），并置于压力容器尾端，使原本积聚在前端的污染物移至尾端。移动前后分别排空称重，运行数天后再次称重，所有移动过的膜元件重量显著下降，表明水流“冲刷”掉了污染物。

此方法虽有效，但人力成本高，不适合常态化运行。水务公司随后在试验架上测试不同清洗方式，包括“反向清洗”（从浓水端向进水端清洗，与常规正向清洗相反）。反向清洗被证明最有效，因为污染物主要积聚在前端进水端。研究表明，仅用水反向清洗（尤其较高流速下）效果优于化学正向清洗（图 1）。根据测试结果，RO 系统改造为支持反向清洗并取得成功。因此，规模化工厂明确要求清洗系统同时支持正向和反向清洗。

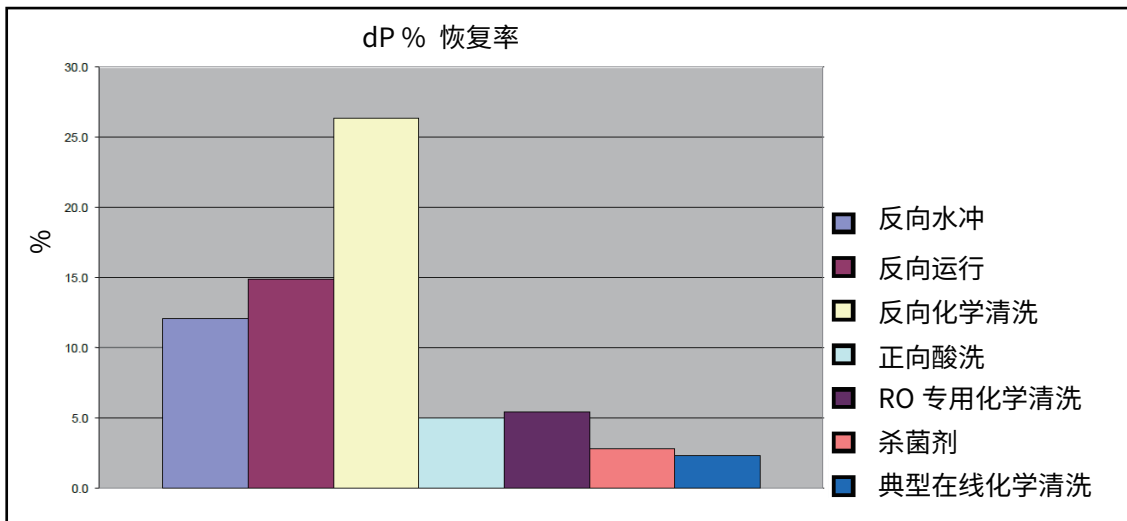


图 1CIP 清洗研究结果

水务公司委托澳大利亚 Aquatis 公司研究生物污染的根本原因。研究发现，主要问题在于系统中生成的并非强抑菌的单氯胺，而是杀菌效果极弱的有机氯胺。有机氮导致单氯胺逐渐转化为二氯胺（有机氯胺）： NH_2Cl 水解生成 HOCl ， HOCl 进一步反应生成更多有机氯胺，持续降低杀菌效果。缓解方法之一是提高氨浓度，抑制氯胺水解和有机氯胺生成，同时减少氯需求量。此外，RO 进水罐延长了水力停留时间，使少量单氯胺降解为有机氯胺，加剧污染。常用氯胺检测方法无法区分单氯胺与有机氯胺，增加了管理难度。

研究团队现场测试氯氨最优配比，确定两种方案可有效维持 RO 前单氯胺浓度 2–3 ppm：①氯：氨 = 4:1，氨 3 mg/L；②氯：氨 = 6:1，氨 2 mg/L（用于进水 NH_3 浓度异常时）。最佳投加点为 UF 之后、RO 之前，可最大化单氯胺占比。UF 膜耐氯，可通过定期氯反冲洗保持清洁；但 RO 膜对氯极为敏感。氯胺预生成在单独混合罐中进行（氯化铵或硫酸铵 + 次氯酸钠），避免氨、氯与水中其他成分的竞争反应，精准控制单氯胺生成。实施上述改进后，清洗间隔从 GWRT 期间的每两周延长至每三个月（GWRT 期间未预先形成氯胺）。

10.7.4 贝尼厄普一期

GWRT 成功后，水务公司邀请两个团队针对三种处理规模进行初步设计与成本核算。2013 年 11 月，CH2M Hill 与 Thiess 的合资企业（CHTJV）中标，负责设计、建造和调试年产 14 亿升（14 GL/ 年）的贝尼厄普 AWRP。该厂于 2016 年投运，配备 9 套 UF 装置（照片 1），运行回收率 92%，最大通量 49 LMH。调试期间对 5 个 UF 模块进行 MS2 病毒挑战测试（要求 ≥ 3 -log 去除率），所有组件均轻松达标，MS2 去除率优于 5-log。

RO 系统包含四套处理单元，每套第一段 70 个压力容器、第二段 35 个压力容器（照片 2）。每容器装 7 支 Hydranautics ESPA2-LD 膜元件，设计回收率 75%，通量 19.2 LMH，配备 FEDCO 能量回收装置提升第二段运行压力。所有 RO 膜元件在工厂进行湿态测试，并通过真空测试（ASTM D3923-08）。RO 系统需实现病毒、细菌、原生动物 3-log 去除率。其中一套单元进行了罗丹明 WT 挑战测试（ASTM D6908-06）（图 2），证实 RO 系统轻松满足 3-log 去除要求。西澳大利亚卫生部要求每年重复 UF 与 RO 挑战测试。

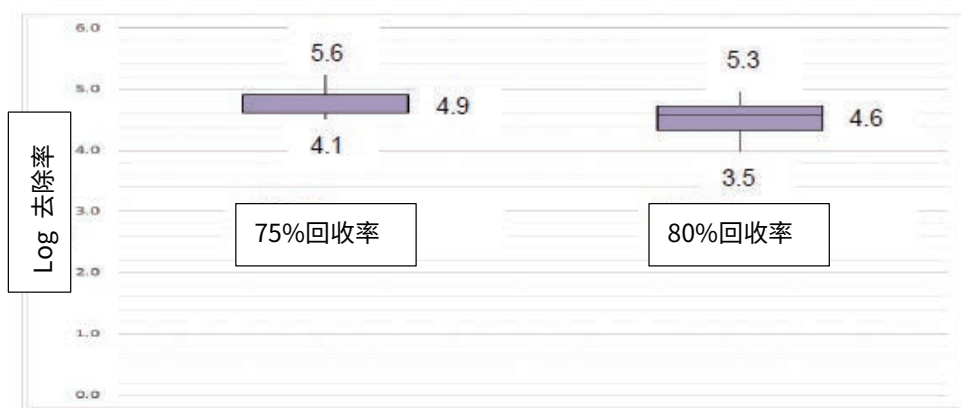


图 2 罗丹明 WT 挑战测试结果（由 Jacobs Solutions 公司 Jim Lozier 提供）

压力容器由 Protec Arisawa 制造，内置自动垫片装置，可从外部调整膜元件垫片。紫外线消毒系统含两套 Calgon Sentinel 单元，核心要求实现 4-log 病毒灭活。

该厂稳定运行近六年，始终满足产水质量规格。前端生物污染仍存在，但较 GWRT 显著改善。标准化数据（图 3）显示第一段压差上升；标准化产水流量显示清洗后渗透性能可恢复至基准；标准化盐透过率在六年内从略低于 2% 缓慢上升至略高于 3%，这是 RO 膜长期暴露于 2–3 ppm 氯胺的预期现象。聚酰胺复合 RO 膜在无过渡金属（如铁、锰）时可耐受约 200,000 ppm·h 氯胺暴露，之后盐透过率翻倍；存在过渡金属时耐受能力降至约 20,000 ppm·h。清洗周期约每三个月一次，采用溴类非氧化杀菌剂（pH 11）和柠檬酸（pH 3–4）。

工厂已采购全套海德能 ESPA2-LD RO 膜替换元件，计划于 2023 年初更换，主要原因为六年来盐透过率逐步上升。

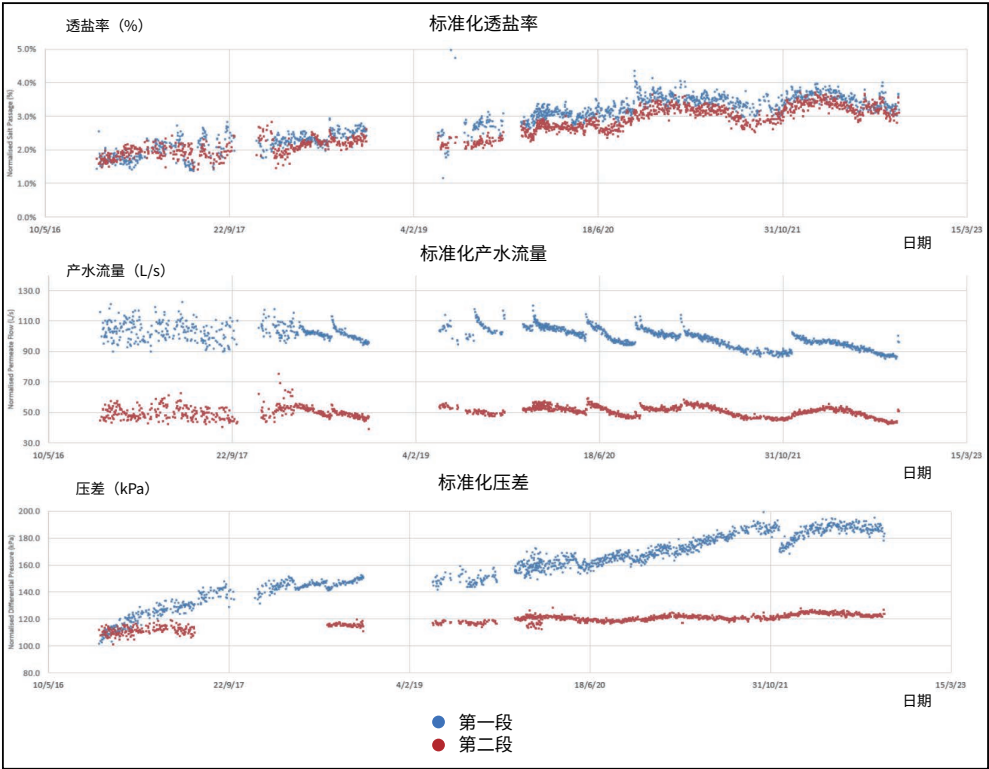


图 3 贝尼厄普一期标准化数据



照片 1 超滤预处理



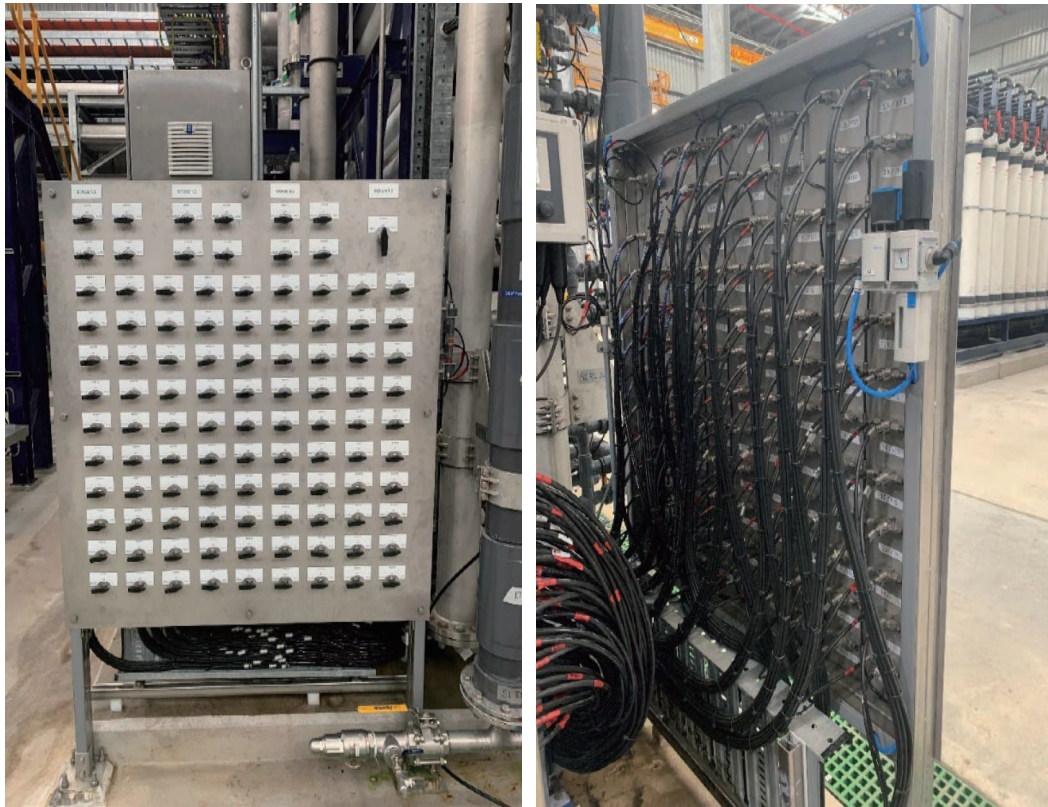
照片 2 贝尼厄普反渗透生产线

10.7.5 贝尼厄普二期

第二座AWRP由Clough与Suez联合体承建,紧邻一期工厂。二期与一期高度相似,但增加了一项独特功能。

在AWRP中,产水电导率是评估膜元件性能的核心指标。电导率反映水的导电能力,含盐量越高则电导率越高。低电导率意味着水中盐含量极低,因而体积大得多的细菌、病毒等污染物进入产水的概率也极低。原理在于:如果比细菌和病毒小得多的盐离子无法穿透膜元件或通过O型圈/密封件进入产水,则更大尺寸的微生物更不可能进入。

大多数工厂持续监测电导率,但通常监测多个压力容器的汇总数据。例如,第一段75个压力容器的产水电导率由SCADA系统连续测量,但当大量压力容器的产水汇合后,单个压力容器的泄漏几乎无法察觉。为解决此隐患,二期安装了一套水样采集面板(照片4、5),配备多个微型阀门,可持续切换不同压力容器的产水至电导率仪,实现对各压力容器性能的高频监测。每个压力容器的产水电导率每5分钟测量一次,数据传至SCADA并记录,并设置报警机制:电导率超标时立即报警。若某压力容器电导率偏高,可将管子插入容器中心,沿膜长度方向逐点测量产水电导率,以定位故障(如某支RO膜元件或连接器故障),便于及时维修或更换。这一设计为再生水安全性与可靠性树立了新的行业标准。



照片 4&5 连续电导率监测面板——正面与背面

10.7.6 结论

贝尼厄普高级废水回用厂已成功为珀斯补充供水近六年。示范厂试运行期间发现的主要问题为严重生物污染，通过改进氯胺的生成与投加方式得以解决。全规模工厂增加了多项独特功能，包括反向清洗和单个压力容器电导率持续监测。水务公司为间接饮用水回用的安全应用奠定了基础，预计未来几年将建设更多类似贝尼厄普的工厂。

10.8 膜技术的进步促进供水工艺的优化与成本的降低

10.8.1 引言

美国西南部长年干旱，加州过去五年的水资源供应已处于历史性紧张状态。传统供水方式（地表水、地下水）的可持续性持续下降，南加州供水机构被迫寻求替代水源。在此背景下，饮用水回用——将市政废水回收后补充至供水系统——正成为供水规划的关键组成部分。饮用水回用分为两类：间接饮用水回用（IPR）和直接饮用水回用（DPR）。IPR 将处理后废水排入环境缓冲区（如湖泊、水库）后再进入供水系统；DPR 则将处理后废水直接送入供水管网。两类回用均需整合多种技术形成高级水处理工艺（AWT），其核心技术是去除溶解性物质与新兴污染物。反渗透（RO）因能达到监管机构要求的去除率，常被纳入 AWT 设计。无论 IPR 还是 DPR，反渗透膜技术的进步都将为 AWT 整体工艺带来多项运行优化。

10.8.2 南加州的高级水处理

近四十年前，OCWD 通过启用 Water Factory21（图 1）首次证实了大规模反渗透处理市政废水的可行性。此后，南加州其他水务机构（如水资源补给区，WRD）也采用反渗透技术为海水入侵屏障提供水源。反渗透已成为本地化、可持续水资源管理策略中的重要技术选项。

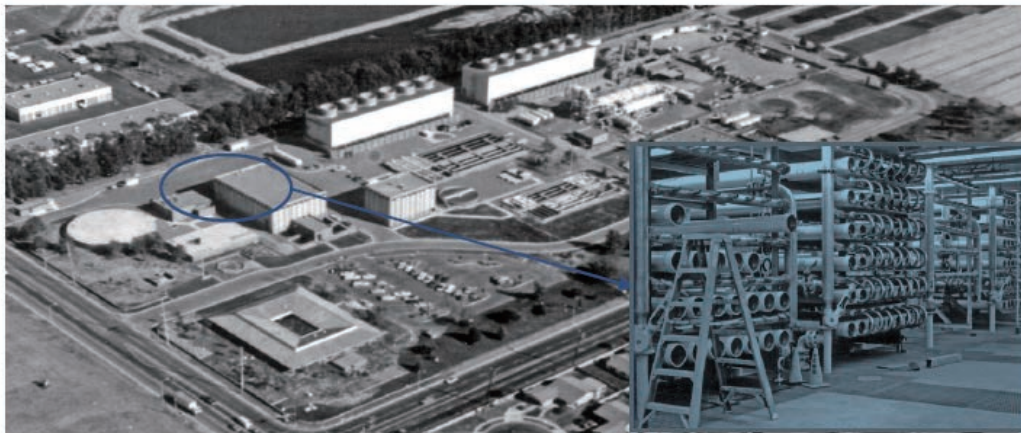


图 1. 2004 年 OCWD Water Factory21

WaterFactory21 拆除后，OCWD 在过去八年中成功运营了地下水补给系统（GWRS）——一个日处理能力 1 亿加仑（mgd）的高级水处理设施（AWTF），以反渗透为核心技术（图 2）。该设施位于加州喷泉谷，产水用于地下水补给及海水入侵屏障维护。GWRS 的进水为桔县卫生区提供的二级市政废水，主要处理工艺包括：微滤（MF）、反渗透（RO）和高级氧化（紫外线 + 过氧化氢）。GWRS 被公认为 IPR 设施的标杆，不仅验证了以 RO 为核心的 AWT 可行性，也为南加州其他大型项目奠定了基础，例如大都会水区与洛杉矶县卫生区拟在卡森市联合建设的 150 mgd AWTF。



图 2.OCWD 地下水补给系统

后来，WRD 制定了覆盖其南加州 420 平方英里服务区的综合水资源可持续性方案。作为“即刻水资源独立”行动计划的核心，地下水可靠性改善项目（GRIP）AWTF 于 2018 年在皮科里维拉市建成。GRIP 每年可生产 10,000 英亩英尺的高纯度水，通过地表扩散与注入方式补给当地地下水含水层。该 IPR 项目采用完整的高级处理（FAT）技术，包括超滤（UF）、反渗透（RO）和高级氧化，进水为洛杉矶县卫生区圣何塞溪水回用厂提供的三级出水。



图 3.WRD 地下水可靠性改善项目

当前 AWTF 项目（如 GRIP）与十多年前设计 GWRS 类似，均采用最新且经过验证的膜技术，以提供安全、可靠且经济高效的水资源。然而，AWTF 建设成本极高。例如，最初的 70 mgd GWRS 及其 2015 年 30 mgd 扩建项目，总成本接近 6.24 亿美元。水务机构面临的核心挑战是：在如此巨大的资本投入下，所选技术能否在未来 25~30 年内持续满足处理目标与要求。对于采用低压 MF 或 UF 的 AWTF 流程，行业标准化的缺失使得系统选型尤为困难——系统不仅需满足当前稳定运行，还需在未来长期保持竞争力。鉴于这一现状，理想的选型应优先考虑系统可改造性：即仅需最小基础设施改动，无需额外巨额投资。

相比之下，反渗透技术更为成熟，多年来已基本实现标准化。但近年来，行业出现了多种新型系统配置，旨在解决传统 RO 设计中的低效率问题，最大化产能。例如，GRIP 的 RO 系统将传统三级单元拆分为两个独立单元：一个主单元（两级）和一个副单元（单级），从而提升整体性能与回收率。尽管系统配置不断演变，膜元件始终是核心。同时，RO 膜化学配方与元件结构的技术进步——如提高渗透性能、减少污染结垢、延长膜寿命——能够逐步降低资本支出（CAPEX）与运营支出（OPEX）。

10.8.3 膜评估

为持续评估新型 RO 膜技术并优化 GWRS 运营，OCWD 推行全面的采购计划，确保膜更换时有可行的备选方案。鉴于新一代 RO 膜元件的潜在价值，工作人员在 GWRS 设施中采用全尺寸 RO 测试容器进行了中试。

1) 膜元件

螺旋卷式膜元件于 20 世纪 70 年代开发，旨在将 RO 膜材料封装为紧凑、高效、实用的功能单元。GWRS 及大多数 AWTf 采用的膜元件尺寸已标准化：直径 8 英寸、长度 40 英寸。如图 4 所示，螺旋膜元件由多个关键部件组成，包括多组膜片 (a)，每组膜片的产水隔网 (b)，浓水隔网 (c)。产水最终汇集至中心管。多个膜元件通过对接各自的中心管，串联安装于单个压力容器内。

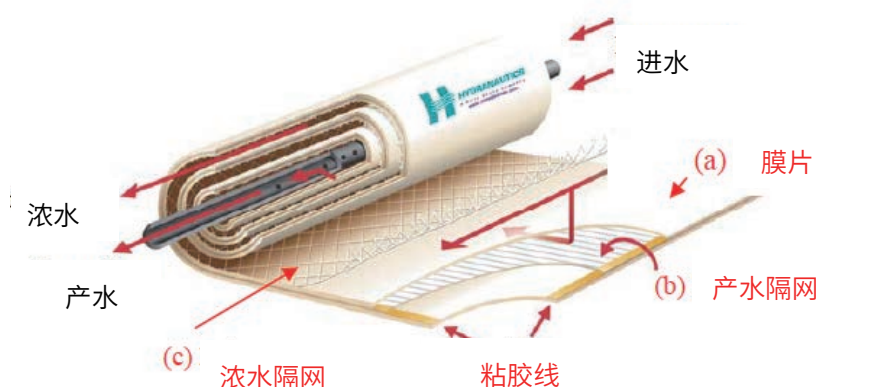


图 4. 标准螺旋卷式反渗透膜元件及其组件

上述膜片、产水隔网、浓水隔网各有厚度，分别占据卷式膜元件内部可用空间的一定比例（见表 1）。

表 1. 卷式反渗透膜元件组件

膜元件层	厚度 (mil)	占元件体积比例 (%)
膜片	6	12
产水导流网	10	20
浓水隔网	34	68

GWRS 等 AWTf 中使用的标准 RO 膜元件有效面积通常为 400 平方英尺。制造商不断尝试在标准尺寸内增加膜面积，但需减少其他某层厚度。目前已有 440 平方英尺的高性能膜元件上市，但为达到这一面积，通常需将占体积最大的浓水隔网厚度减至 26mil（原为 34mil）。减薄隔网的缺点是增加压差损失、加快膜污染速率，导致运营支出（OPEX）上升，且污染后更难清洗。因此，多数 RO 系统设计者宁愿放弃额外膜面积，以规避污染风险。另一方面，选择更大有效面积的膜元件可减少所需元件总数，从而降低资本支出（CAPEX）。

近期，膜材料与膜元件结构的创新催生了一款新型 RO 膜元件，有效面积达 440 平方英尺，且无需牺牲浓水隔网厚度（仍为 34mil）。其技术参数见下表，同时列出 GWRS 中标准 400 平方英尺膜元件作为对照。鉴于新一代膜元件有望带来显著运行效益，GWRS 的 RO 设施开展了专项测试，以验证大有效面积膜元件的应用价值。

制造商	型号	分类	活性膜面积（平方英尺）*	脱盐率（%）*	产水量（GPD）*	隔网厚度（mil）*
海德能	ESPA2-LD MAX	淡水	440	99.6（最小 99.5）	12,000	34
海德能	ESPA2-LD	淡水	400	99.6（最小 99.5）	10,000	34

信息来自制造商规格表

该测试用新一代 RO 膜元件通过优化结构，在保持 34mil 浓水隔网的同时实现了更大有效膜面积。

2) 测试系统

将测试用全尺寸压力容器连接至 GWRS 内 6 套全尺寸 RO 单元的一级系统进水端。每个压力容器内装 7 支 8×40 英寸膜元件，与该厂一级系统所用规格一致。容器设计有产水与浓水的取样及容器的化学清洗功能，用于数据采集与化学清洗。容器通常在通量 14.8 加仑每平方英尺每天（gfd）、回收率 55% 运行，以模拟 5 mgd RO 单元的一级工况。由于测试膜元件的有效面积比标准膜元件多 10%（表 2），有两种运行方案：①保持通量固定，产水量提高 10%；②通量降低 10%（从 14.8 gfd 降至 13.3 gfd），产水量不变。水质、流量与压力数据每日记录。测试容器配置见图 5，实物安装见图 6。

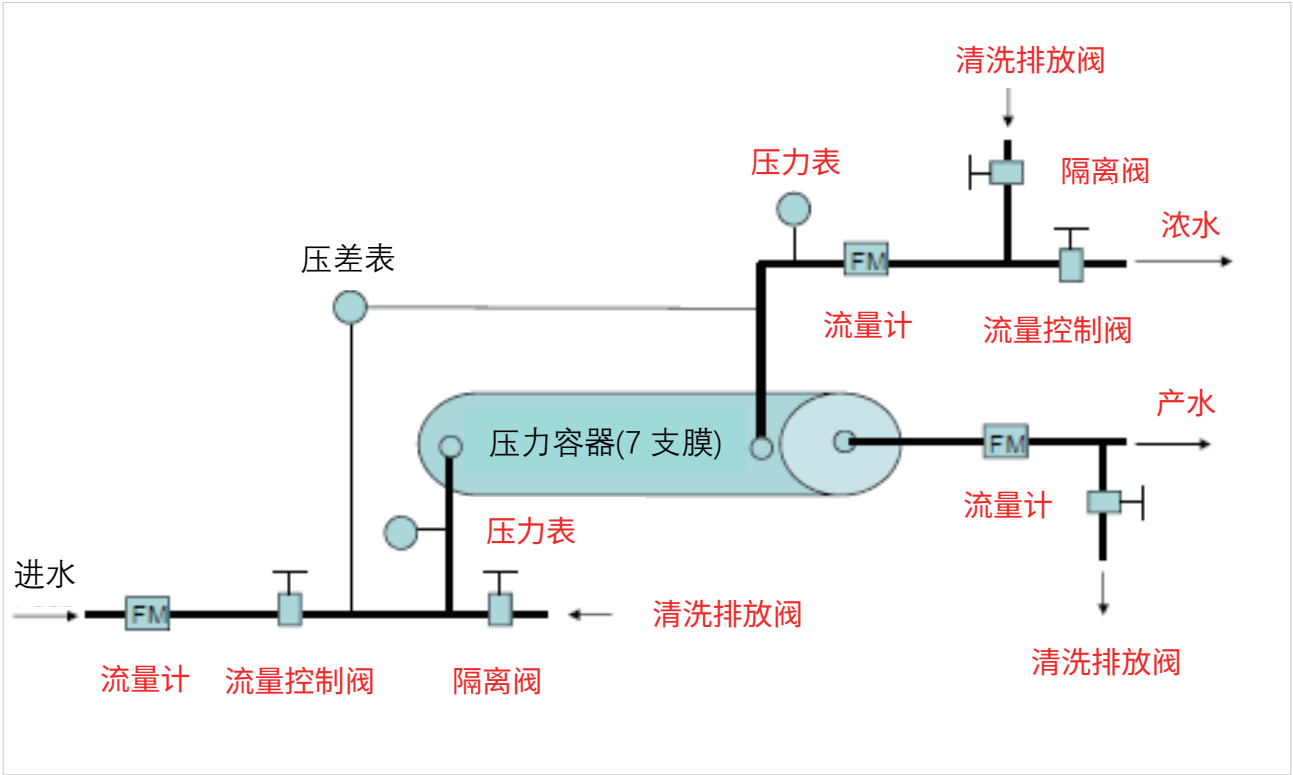


图 5. 反渗透测试容器示意图



图 6. 安装在 GWRS5mgd 反渗透单元顶部的测试容器

10.8.4 测试结果

1) 运行摘要

测试于 2016 年 3 月启动，持续 225 天（5,400 小时）。期间，海德能膜元件在两种条件下评估：①按 GWRS 一级系统常规通量运行（产水量提升 10%）；②通量降低 10%，产水量与现有一级系统持平。研究重点关注通量切换过程中的性能变化（表 3）。运行 70 天后进行了化学清洗，以评估膜耐用性与渗透性能恢复能力。核心验证问题包括：膜元件是否出现不可逆的盐分透过率显著持续上升且无法恢复？脱盐性能是否基本恢复到初始稳定值？

表 3. 反渗透测试膜元件运行条件

持续时间 (天)	运行通量 (gfd)	回收率 (%)	测试容器流量 (gpm)	
			产水	浓水
50	14.8	55	31.7	25.9
51- 至今	13.3	55	29.0	23.5

2) 运行性能

监测比通量变化可评估膜污染倾向及产水所需压力（即能耗）。标准化比通量：在单位压力（25° C 标准温度下）单位膜面积产水量，单位为 gfd/psi。OCWD 历史数据显示，试验期间比通量应稳定在 0.085 gfd/psi 以上。为准确评估，通常要求测试时长超过 5,000 小时。

海德能膜元件的比通量数据见图 7a。整个试验期间，比通量始终高于 0.085 gfd/psi，第一周稳定后平均为 0.144 gfd/psi。标准化压差见图 7b：第 50 天切换通量前一周平均压差 21.8 psi；切换后一周降至 17.4 psi，降幅 20%，原因是进水流量降低。采用较低通量时，进水压力较 14.8 gfd 工况降低约 8.9%（图 7c）。膜脱盐率在整个试验期间平均 99.3%，第 50 天通量切换前后一周均保持在 99.4%（图 7d）。

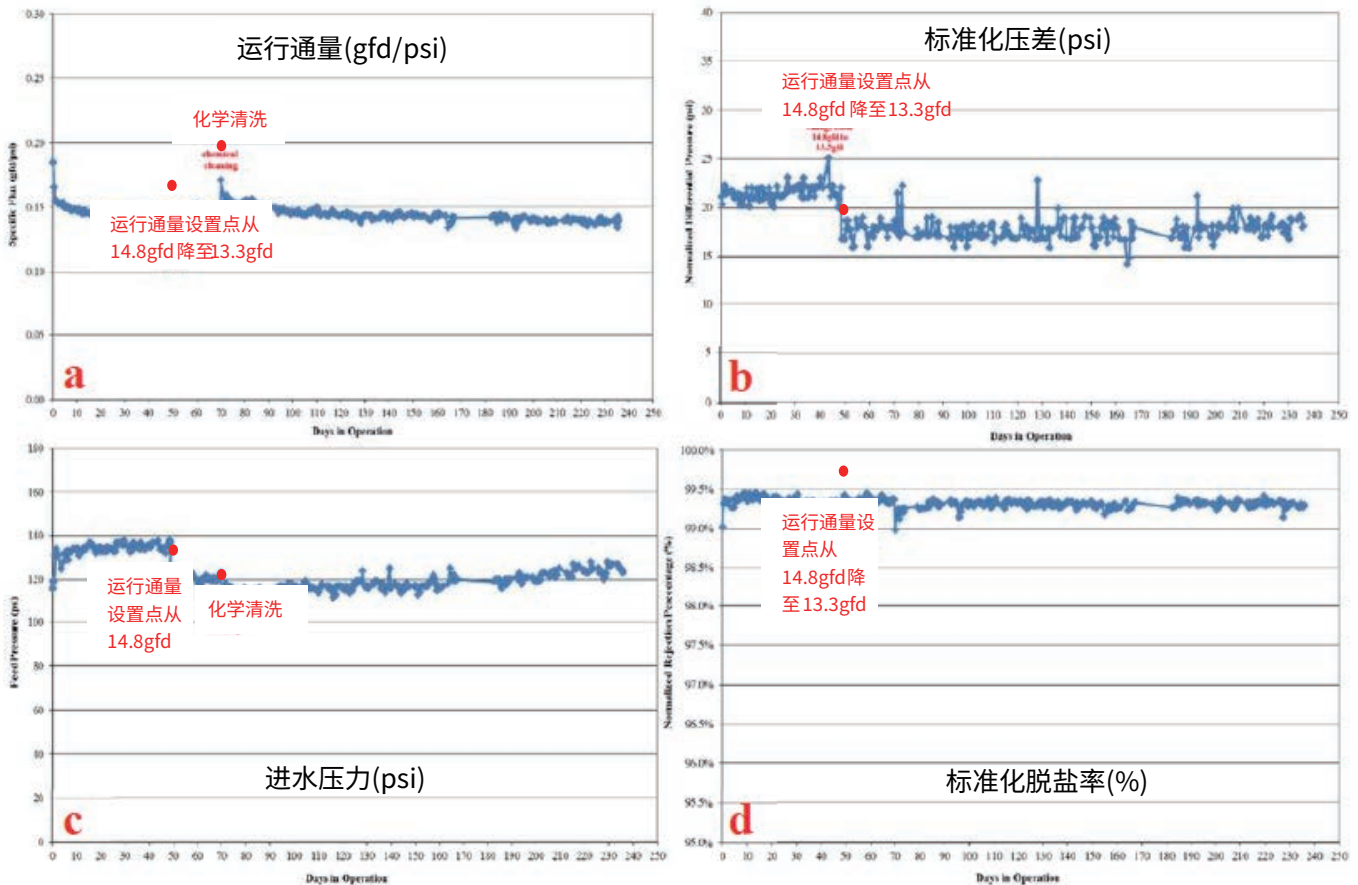


图 7. 运行性能数据，包括 a. 通量；b. 标准化压差；c. 进水压力和 d. 标准化脱盐率

除监测产水电导率外，还临时采用在线总有机碳（TOC）分析仪测量产水 TOC 浓度，重点监测第 50 天通量切换期间的变化。第 47~52 天，渗透液 TOC 浓度为 42~70 ppb，平均 52.1 ppb（图 8）。通量切换未引起 TOC 浓度的可观测变化，且该浓度远低于 AWTF 设定的 500 ppb 限值。

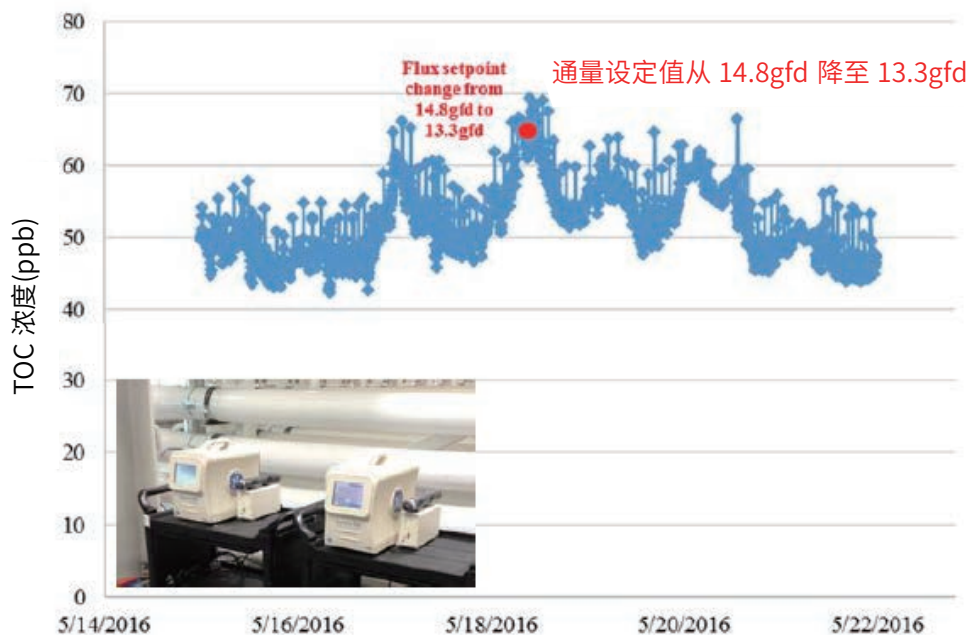


图 8. 连接到反渗透测试容器渗透水采样口的在线 TOC 分析仪

3) 特定组分去除率

为全面了解测试膜元件的截留能力及通量变化的影响，分别在 14.8 gfd 和降至 13.3 gfd 两种通量下采集水样。无机与有机成分分析结果见表 4、表 5。与前期测试一致，各特定组分的去除率基本保持不变。

10.8.5 讨论

在许多进水水质较高的 RO 应用中，使用更大有效面积的膜元件较为常见。但在 AWTF 中，440 平方英尺膜元件未获广泛接受，主要担忧其通常采用的较薄隔网。此外，人们也担心面积增加引起的流体动力学变化影响系统性能。而新型薄型膜片在实现 440 平方英尺有效面积的同时保持 34mil 隔网厚度，因此替换传统 400 平方英尺膜时，系统流体动力学特性与污染倾向几乎不变。从 RO 工艺段整体看，更换为新型膜元件后，进出水量不变；单支卷式膜元件本身的进出水量也保持不变。为对比两种膜元件，表 6 模拟了两套 GWRS 工艺段性能（分别安装两种膜元件），均以 5 mgd 产水量、85% 回收率运行。有效面积差异导致通量不同，进而影响进水压力与渗透液 TDS。进水压力降低幅度与测试容器中切换至较低通量时的观测值相当（图 7c），从而可通过降低能耗提升运行效率。由于两种膜元件隔网厚度相同，进出压力容器的水量一致，因此各工艺段的压差损失相同。

表 4. 在不同通量速率下特定（无机）成分的去除率

无机成分	检测限	去除率（14.8gfd）	去除率（13.3gfd）
亚硝酸盐氮	0.002mg/L	>99.2	98.3
二氧化硅	1mg/L	>95.1	>95
总有机碳（未过滤）	0.05mg/L	99.4	99.4
溴化物	0.1mg/L	>61.5	>41.2
氯化物	0.5mg/L	99.4	99.5
硝酸盐氮	0.1mg/L	97.7	97.1
硫酸盐	0.5mg/L	>99.7	>99.7

总凯氏氮	0.2mg/L	>87.5	88.9
硼	0.1mg/L	54.5	50
钙	0.1mg/L	>99.4	>99.4
铁	1μg/L	>98.6	>98.7
钾	0.1mg/L	>97.1	>97.1
镁	0.1mg/L	>97.8	>97.8
钠	0.1mg/L	98.5	98.3
总硬度 (以 CaCO ₃ 计)	1mg/L	>99.6	>99.6
银	1μg/L	-	>95.0
铝	1μg/L	>68.7	>70.6
钡	1μg/L	>96.8	>97.1
铜	1μg/L	>83.6	>79.2
钒	10ng/L	>88.9	>78.1
锰	1μg/L	>96.6	>97.0
镍	1μg/L	>67.7	>84.4
硒	1μg/L	-	>23.1
钒	1μg/L	-	>23.1
锌	1μg/L	>94.6	77.2
磷酸盐磷 (正磷酸盐)	0.01mg/L	>95.7	>95.8
总溶解固体	1mg/L	98.5	98.9
电导率	1μS	98.9	98.8
总碱度 (以 CaCO ₃ 计)	1mg/L	97.1	97.3
碳酸氢盐 (以 CaCO ₃ 计)	1mg/L	97.1	97.3
氨氮	0.1mg/L	84.0	81.8

表 5. 不同通量下特定（有机）组分的去除率

有机组分	检测限	去除率 (14.8gfd)	去除率 (13.3gfd)
对乙酰氨基酚	5ng/L	>87.4	>90.5
阿替洛尔	5ng/L	>98.5	>98.6
阿奇霉素	10ng/L	>93.5	>98.4
咖啡因	3ng/L	>99.8	>99.5
卡马西平	1ng/L	>99.5	>99.6
氯仿	0.5μg/L	81.5	59.4
N,N- 二乙基 -m- 甲苯胺	1ng/L	>99.5	99.7
双氯芬酸	5ng/L	>97.6	>97.8
苯妥英钠	10ng/L	>92.9	>92.3
1,4- 二恶烷	1μg/L	>65.5	>44.4
磺酰脲	0.005μg/L	>88.1	>94.5
红霉素	1ng/L	>96.8	>96.9
氟西汀	5ng/L	>70.6	>67.7
吉非贝齐	1ng/L	>99.6	>99.7
对氯苯磺酸	200ng/L	-	-
布洛芬	1ng/L	>99.6	>99.4
碘海醇	20ng/L	>99.7	99.8
碘普罗胺	10ng/L	-	>82.3
美普拉宗	5ng/L	>99.1	>98.7
萘普生	5ng/L	>99.1	>98.8
NDMA	2ng/L	75.2	83.1
NDMAFP	2ng/L	98.8	99.5
新霉素	10ng/L	-	-
苯巴比妥	1ng/L	>94.6	>98.9
西玛津	0.005μg/L	-	-
糖精	100ng/L	>99.8	>99.8

磺胺甲恶唑	1ng/L	>99.9	>99.9
三氯乙基磷酸酯	5ng/L	>98.5	>98.4
甲氧苄啶	5ng/L	>98.5	>98.5
总三卤甲烷	0.5µg/L	70.0	65.1

表 6 比较装载了两种不同类型元件的相同 GWRS 装置的性能。差异部分以红色标出

	ESPA2-LD	ESPA2-LD MAX
表面积 (ft ²)	400	440
隔网厚度 (mil)	34	34
系统通量 (gfd)	11.9	10.8
渗透水流 (mgd)	5	5
每个容器的进料流量 (gpm)	52.4	52.4
每个容器的浓缩液流量 (gpm)	25.4	25.4
进料压力 (psi)	115.9	106.4
压差 (psi)	43.2	43.2
渗透水 TDS (mg/L)	39.7	43.7
回收率 (%)	85	85
排列方式	(78+48+24)x7M	(78+48+24)x7M

理解两种膜元件的流体动力学差异，需关注进水通道内的变化。440 平方英尺膜元件通过增加膜片数量扩大有效面积，在保持通道高度不变的前提下增大了进水通道横截面积，导致每个通道内流量减少，横流速度降低。比例上，10% 的有效面积增加对应横截面积增加 10%，速度降低 10%。

以单个压力容器为例，进水流量 52.4 gpm 时，安装 400 平方英尺膜元件（34mil 隔网）的通道横截面积为 164 cm²，平均速度 0.202 m/s；安装 440 平方英尺膜元件时，横截面积增至 180 cm²，速度降至 0.183 m/s（降低近 10%）。

对于 5 mgd、含 7 支膜元件压力容器、回收率 85% 的 RO 系统，维持最佳水力条件对减少污染（包括矿物结垢）至关重要。横流速度降低对性能及污染的影响，可通过浓差极化与雷诺数分析来理解。

当水透过膜而盐类被截留时，膜表面附近形成边界层，表面盐浓度（Cs）高于主体溶液盐浓度（Cb），此现象称为浓差极化，会导致产水流量下降和脱盐率降低。浓差极化因子（CPF）= Cs/Cb。该比值与平均进水 / 浓水流速及渗透液流速成正比。两种膜元件的上述流速完全相同，仅通道内及膜表面流速存在差异。通道流速降低会减弱流体混合，使表面盐层增厚；但渗透液流速降低会减少离子向膜表面的输送，反而降低表面盐浓度。比较两种膜元件的通道流速与渗透液流速之比，两者完全一致（表 7），因此浓差极化因子相同。

	ESPA2-LD(400ft ²)	ESPA2-LD MAX(440ft ²)
通道流速 (m/s)	0.202	0.183
产水流量 (m/d)	0.48	0.44
比值（通道流速与产水流量）	0.42	0.42

由于两种膜元件的进水 / 浓水通道内的水流速度不同，雷诺数（Re）的差异可以反映污染倾向的不同。雷诺数的标准计算公式如下：

$$Re = \text{动态压力} / \text{剪切应力} = (\rho v L) / \mu$$

其中： ρ = 水的密度 (997kg/m³)

v = 通道内的速度 (m/s)

L = 特征通道长度 (0.001123m)

μ = 水的动态粘度 (0.001002kg/m/s)

在水流通道高度均为 34mil 的相同流道内，两种膜元件的水流速度对应的雷诺数分别为：标准膜元件 225.2，新型膜元件 204.8。这两个雷诺数都处于层流范围内。两者差异相对于湍流临界雷诺数 ($\sim 10^5$) 可忽略不计。因此，这种极小的雷诺数差异对两种膜元件的污染速率几乎不会产生实质性影响。

10.8.6 结论

反渗透技术在开发以往未被充分利用的替代水源中发挥着关键作用。与其他技术结合，RO 构成了众多高级水处理设施 (AWTF) 的核心，为构建安全、可靠且经济高效的本地可持续供水系统提供了可行路径。RO 膜仍是实现水质标准与产水目标的核心组件。自 20 世纪 70 年代问世以来，螺旋卷式结构基本未变，但膜材料与设计的技术进步为系统运行带来了逐步而显著的改进。如今，设计者可选用兼具更大有效膜面积与充足隔网厚度的膜元件，无需在二者间妥协。在 GWRS 等设施中，RO 通常是能耗最高的环节。因此，此类新型膜元件为拓展与优化 AWTF 系统运行提供了重要选择。

10.9 海水淡化反渗透膜对硼和溴的脱除应用研究

10.9.1 前言

利用反渗透（RO）技术进行海水淡化，用于生活饮用水或农业灌溉时，需确保水质达标。过去，RO 海水淡化产水常与其他水源混合（如中东地区与热法海淡产水混合）以满足水质要求。随着 RO 成为最经济的海水淡化工艺并被广泛采用，技术革新的重点转向如何以最小投入优化膜元件与系统，以满足用户水质标准。

美国海德能公司的海水淡化膜元件全球供应量约 100 万 m³/d。海水总溶解固体（TDS）从墨西哥湾的 30,000 mg/L 到波斯湾的 45,000 mg/L 不等。TDS 中主要成分为钠、氯及其他单价和两价离子，均较易被 RO 膜脱除。但约 5 mg/L 的硼因其水合离子尺寸及电荷特性而难以脱除。脱硼率与 pH 相关：pH 从 8 提高到 10 时，第二级 RO 产水的硼透过率降低 70%。某些情况下，一级 RO 产水中其他离子已满足生活或灌溉需求，第二级 RO 仅用于脱硼，从而增加了系统投资与运行成本。一种替代方案是在第一级海水 RO 中调节 pH：当 pH 从 8.1 提高到 8.6 时，透硼率降低 40%，适用于产水硼要求低于 1 mg/L 的项目。这虽可缩小第二级 RO 规模，但第二级仍需加碱以提高脱硼率。

本文对比不同设计对脱硼成本的影响，重点比较第一级海水 RO 与第二级 RO 加碱的经济性。海水加碱的优势在于：采用高脱盐率海水淡化膜时，若产水 TDS 已达标，则可省去第二级 RO 系统；即使 TDS 未达标，也可降低第二级 RO 的加碱量。优化设计主要受脱硼率影响。目前大多数海水淡化膜脱硼率为 90–93%，海德能新推出的 SWC 系列在标准测试条件下脱硼率最高达 95%。

海水淡化 RO 技术改进的另一重点是脱溴率。海水中溴离子含量较低（50–100 mg/L），通常不影响健康。但溴离子可与臭氧反应生成溴酸盐——一种潜在致癌物。此外，当海水 RO 产水与含氯胺的饮用水混合时，研究发现溴离子超过 0.2 mg/L 会导致氯胺不稳定，因为溴化物与氯胺反应生成溴胺（更强的氧化剂且衰减更快）。因此，膜技术发展也致力于提高脱溴率。本文列举实际水厂数据，表明高温下脱溴率可达 99.3%。

10.9.2 设计思路

1) 降低硼含量

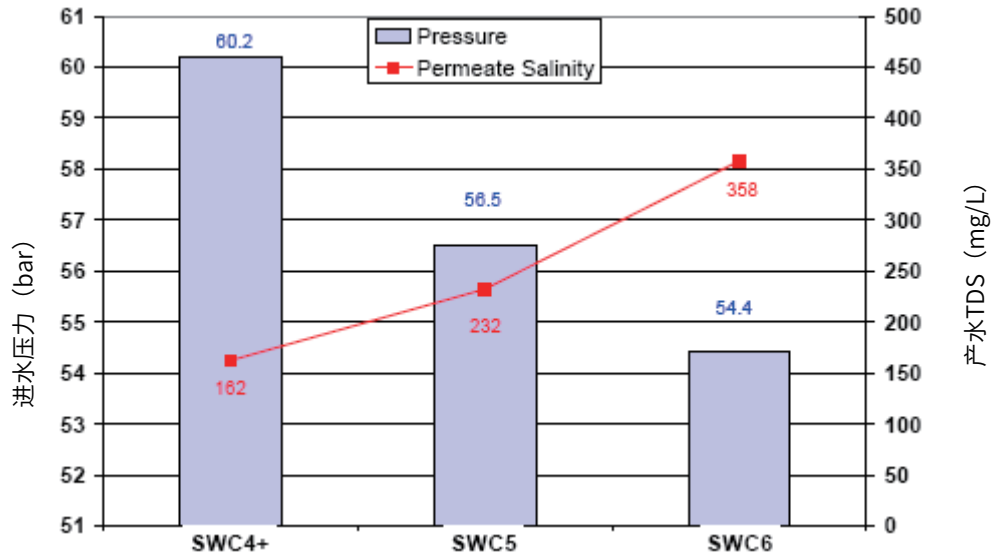
海水淡化 RO 系统的设计取决于进水含盐量、进水温度范围、产水要求等因素。目前海水淡化 RO 膜有很多型号，有些侧重于高脱盐率，有些是侧重于高产水量，设计人员可根据不同项目的情况进行膜选型。表 10.9.1 列出美国海德能公司提供的部分海水淡化 RO 膜。

表 10.9.1 美国海德能公司海水淡化膜元件在标准测试条件下的性能参数

膜特点	膜型号	膜面积， ft ² / m ²	标准产水量，gpd/ (m ³ /d)	公称脱盐率，%	脱硼率，%
高脱盐率	SWC4 MAX	440/40.9	7200/ 27.3	99.8	93
高产水量	SWC5-LD	400/37.2	9000/34.1	99.8	92
极高产水量	SWC6-LD	400/37.2	12000/45.4	99.8	91

设计者应注意，表 10.9.1 中的性能参数均在相同条件下测得。当膜元件在相同产水量但不同压力下运行

时，产水水质会有所不同。图 10.9.1 显示，在相同产水量、排列、回收率及温度条件下运行时，极高产水量的 SWC6-LD 膜元件产水水质比 SWC4 MAX（文中简称 SWC4+）高出 120%，但操作压力低 0.5 MPa。SWC5-LD 的运行压力介于两者之间，产水水质比 SWC4+ 高出 43%。因此，SWC6-LD 通常适用于低含盐量和低温运行。



(运行条件：进水 TDS 40000mg/L，产水量 925m³/h，45%回收率，25℃，7 芯装)

图 10.9.1 不同膜元件在同样运行条件下的进水压力和产水水质图

为更好地理解优化工艺的影响因素，进行了运行温度 15–35℃ 的海水淡化系统案例研究。模拟基础参数见表 10.9.2。系统产水目标：运行 3 年后，产水 TDS ≤ 200 mg/L，硼 (B) ≤ 0.75 mg/L。当一级 RO 不达标时，采用两级 RO。两级 RO 系统采用海德能专利“分流式部分两级”设计：一级产水从膜壳两端引出，低含盐量直接进入产水箱，高含盐量部分进入第二级。第二级全部采用大膜面积 ESPA MAX，其膜数量根据最高温度下满足产水水质要求确定。

表 10.9.2 模拟计算运行条件

参数	数值	参数	数值
进水 TDS (mg/L)	39000	产水 TDS (mg/L)	200
进水 B (mg/L)	5.3	产水 B (mg/L)	0.75
产水量 (m³/d)	22000	回收率 (%)	一级 50；二级 90
膜运行时间 (年)	3	膜元件数 / 膜壳	7
泵效率 (%)	83	电机效率 (%)	93
能量回收装置效率 (%)	97		
一级水通量 (lmh)	13.8	二级水通量 (lmh)	34
碱价格 (\$/kg)	0.616	电费 (\$/kwhr)	0.06

所有计算均考虑能量回收装置，采用 IMSDesign 模拟，设定最大压差 1 bar、泄漏率 1%、混合比 6%，导致进水 TDS 从 38,000 mg/L 升至 39,000 mg/L。模拟计算结果如图 10.9.2 所示。

Hydranautics Membrane Solutions Design Software, v. 2009

12/6/2000

SPLIT PARTIAL TWO PASS WITH Pressure/Work Exchanger

RO program licensed to:
Calculation created by:
Project name: Med Water
HP Pump flow: 1862.5 62.5 m3/hr

Blended flow: 22200.0 m3/d
Permeate flow: 22350.00 1350.00 m3/d
Raw water flow: 44550.0 m3/d

Feed pressure: 66.3 13.8 bar
Feedwater Temperature: 15.0 C(59F)
Feed water pH: 8.0 10.5
Chem dose, ppm, ppm 0.0 9.3

Permeate recovery: 50.0 90.0 %
Total system recovery: 49.8 %
Element age: 3.0 years
Flux decline % per year: 7.0 5.0
Salt passage increase, %/yr: 10.0 5.0

Average flux rate: 13.9 32.8 lm2hr Feed type: Seawater - well

Stage	Perm. Flow m3/hr	Flow/Vessel Feed m3/hr Conc m3/hr	Flux l/m2-hr	Beta	Conc.&Throt. Pressures bar bar	Element Type	Elem. No.	Array
1-1	931.2	7.2 3.6	13.9	1.02	65.4 0.0	SWC5	1806	258x7
2-1	42.8	15.6 4.9	37.4	1.24	11.1 0.0	ESPA2+	28	4x7
2-2	13.5	9.9 3.1	23.5	1.19	9.6 0.0	ESPA2+	14	2x7

	Raw water	Adjusted Water	Feed water	Permeate	Concentrate	ERD Reject
Ion	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Ca	410.0	408.7	421.5	0.458	842.5	816.8
Mg	1337.0	1332.7	1374.5	1.493	2747.3	2663.5
Na	12000.0	11966.5	12340.6	64.714	24603.8	23855.2
K	229.0	228.4	235.5	1.546	469.2	454.9
NH4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0
CO3	15.5	15.6	16.1	0.008	32.2	31.2
HCO3	150.0	149.6	154.2	1.211	306.9	297.6
SO4	2802.0	2793.1	2880.8	3.132	5757.6	5582.0
Cl	21000.0	20944.0	21599.1	94.469	43074.9	41763.6
F	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
NO3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0
B	5.30	5.36	5.50	0.751	10.10	9.8
SiO2	4.0	4.0	4.1	0.01	8.2	8.0
CO2	0.93	0.94	0.94	0.89	0.00	0.94
TDS	37952.8	37847.9	39032.1	167.79	77852.5	75482.5
pH	8.0	8.0	8.0	8.7	8.6	

	Raw water	Feed water	Concentrate
CaSO4 / Ksp * 100:	22%	23%	55%
SrSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
BaSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
SiO2 saturation:	3%	3%	7%
Langelier Saturation Index	0.93	0.95	2.12
Stiff & Davis Saturation Index	0.03	0.05	1.14
Ionic strength	0.75	0.77	1.54
Osmotic pressure	27.0 bar	27.7 bar	55.3 bar

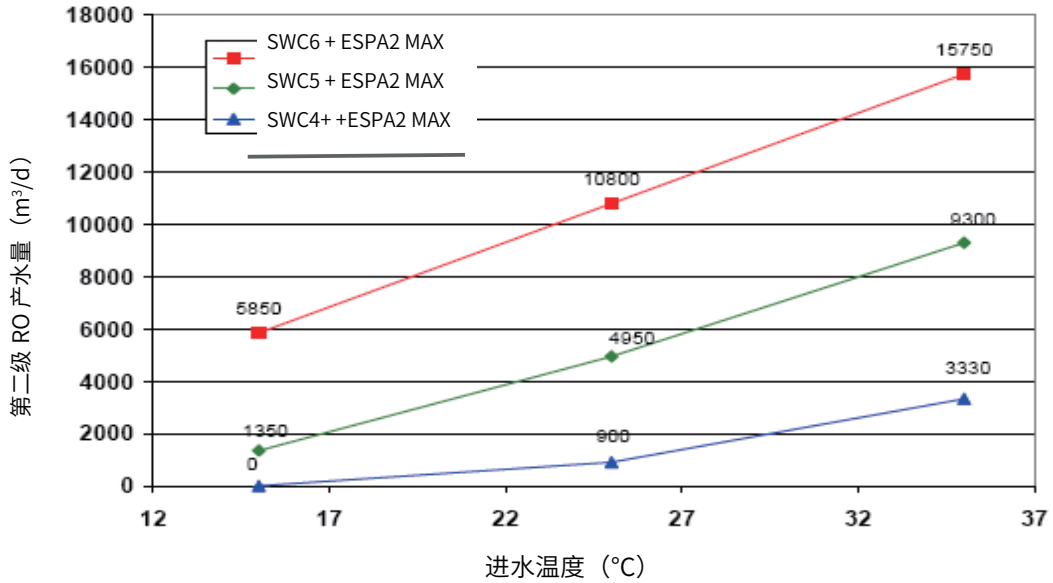
H.P. Differential of Pressure/Work Exchanger: 1.0 bar
Pressure/Work Exchanger Pump Boost Pressure: 2.0 bar

Pressure/Work Exchanger Leakage: 1 %
Volumetric Mixing: 6 %

图 10.9.2 模拟计算结果

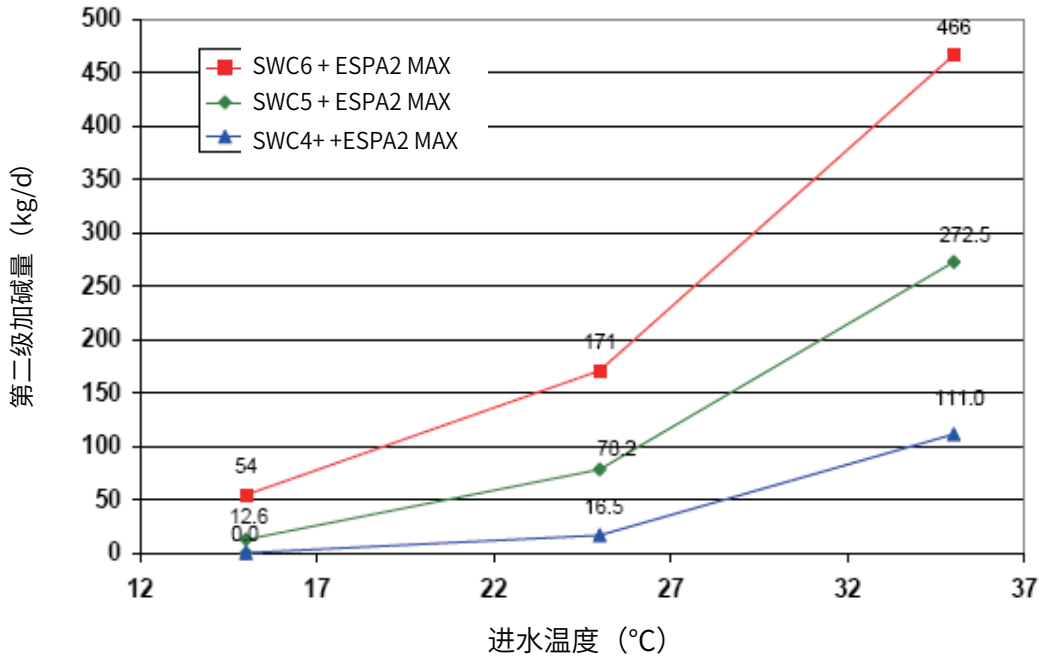
为优化膜选型，分析了硼脱除情况，既考虑传统第二级加碱，也考虑第一级加碱。计算结果见图 10.9.3–10.9.7。

首先按传统方式（仅第二级加碱），见图 10.9.3。采用 SWC4+ 时，所需第二级产水量远小于 SWC6-LD：15℃时无需第二级 RO；25℃时仅需 900 m³/d，此时其他离子已达标，第二级仅用于脱硼。图 10.9.4 显示为达到产水硼目标所需的第二级加碱量。



(进水 TDS 39000mg/L, 总产水量 22000m³/d, 50% 回收率, 产水 TDS 200mg/L, B 0.75mg/L)

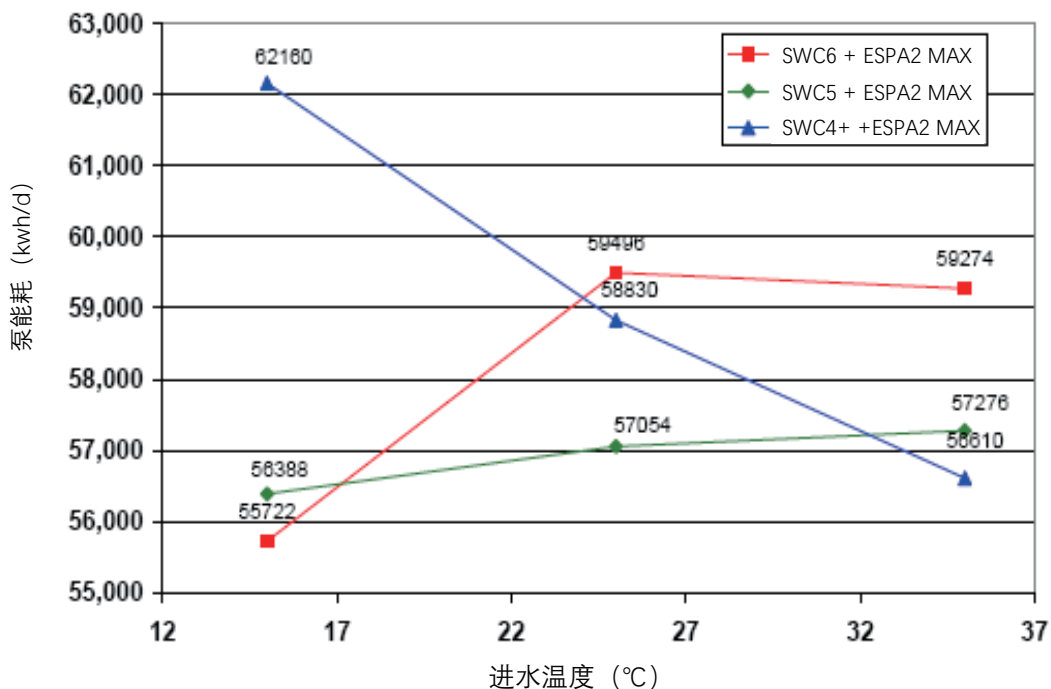
图 10.9.3 膜型号和温度对第二级系统产水量的影响



(进水 TDS 39000mg/L, 总产水量 22000m³/d, 50% 回收率, 产水 TDS 200mg/L, B 0.75mg/L)

图 10.9.4 膜型号和温度对第二级系统加碱量的影响

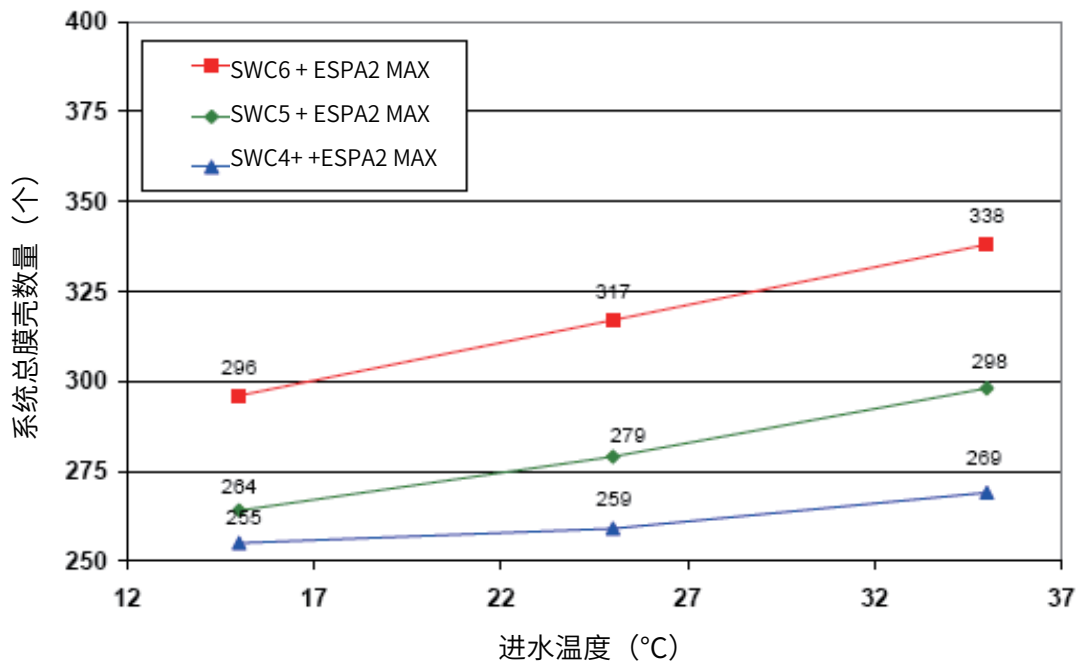
采用极高产水量 SWC6-LD 的优势见图 10.9.5。15°C 时, SWC6-LD+ESPA2 MAX 两级系统的泵能耗最低; SWC4+ 与 ESPA2 MAX 能耗最高, 低温运行不经济。SWC5-LD+ESPA2 MAX 低温时能耗略高于 SWC6-LD 系统, 因其高脱盐率降低了二级产水量需求, 部分弥补了一级能耗劣势。25°C 时能耗差距缩小; 35°C 时三种系统能耗非常接近, 原因有二: ①温度升高使所需二级产水量增大; ②系统整体回收率降低, 一级产水量需增加。SWC6-LD 系统因二级产水量大, 需 338 个压力容器, 而 SWC4+ 仅需 269 个 (图 10.9.6)。



(进水 TDS 39000mg/L, 总产水量 22000m³/d, 50% 回收率, 产水 TDS 200mg/L, B 0.75mg/L)

图 10.9.5 膜型号和温度对泵能耗的影响

第二级系统投资成本可从膜元件与压力容器数量判断。35°C时, SWC6-LD 需 338 支膜壳, SWC5-LD 需 298 支, SWC4+ 需 269 支。尽管 SWC4+ 所需压力更高, 但其二级产水量最低, 总投资最低。综合考虑, SWC4+ 在 15°C 和 35°C 时投资最低; 但若最高运行温度为 25°C, 高产水量膜的技术经济性更优。



(进水 TDS 39000mg/L, 总产水量 22000m³/d, 50% 回收率, 产水 TDS 200mg/L, B 0.75mg/L)

图 10.9.6 膜型号和温度对系统总膜壳数量的影响

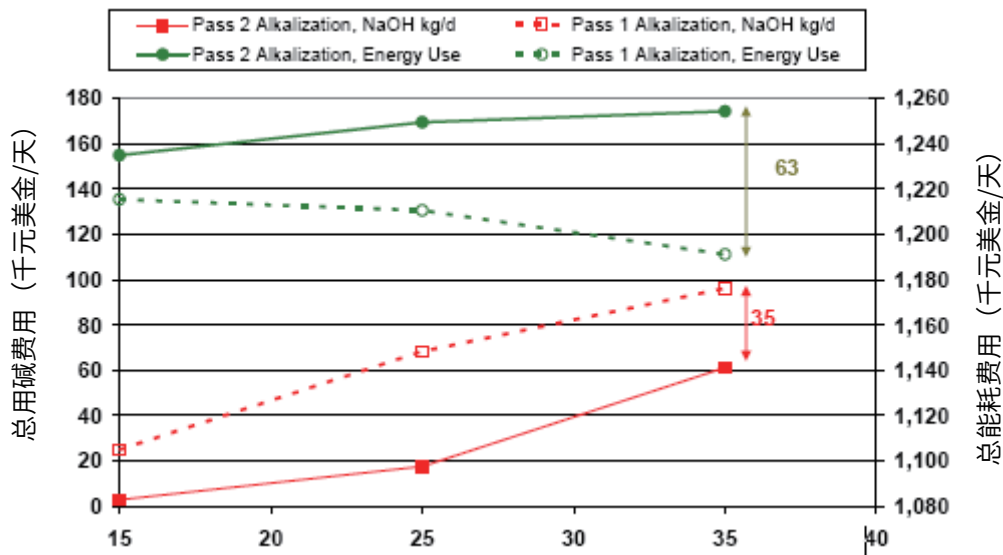
另一方案是加碱提高脱硼率。某些项目中一级海水产水其他指标已达标，第二级仅用于脱硼。若在一级加碱，可仅用一级系统使硼达标。采用 SWC5-LD 在 15°C、25°C、35°C 下对比第一级加碱与第二级加碱，结果见图 10.9.7。第一级加碱量比第二级高约 4 倍，导致碱药剂费用在 25°C 每年多 55,000 美元，35°C 每年多 35,000 美元。第二级加碱需调至 pH≈10.5，第一级仅需 pH≈8.5，但第一级产水量大，总耗碱量更高。虽有研究指出该 pH 下无需阻垢剂，但大型项目试验仍采用阻垢剂（费用 0.12 美元 / 天·m³）。

然而总费用计算显示第一级加碱更经济：25°C 每年节省能耗费用 39,000 美元，35°C 节省 63,000 美元。若水厂主要在高温下运行，第一级加碱更优；低温运行时第二级加碱总运行成本更低（见表 10.9.3）。若水厂运行时间分布为：15°C 占 25%、25°C 占 50%、35°C 占 25%，则两种加碱方式运行成本几乎相同。

投资成本方面，第一级加碱在 35°C 时可节省 9% 的膜元件与膜壳数量，25°C 时节省 5%。综合来看，第一级加碱性价比最高，尤其在高运行温度下，且更节能。本案例中，若采用第二级加碱，一级产水量需多 600 m³/d，二级产水量需多 6,000 m³/d。

表 10.9.3 一级加碱各项费用对比二级加碱费用值

进水温度 (°C)	碱液费用 (千元美金 / 天) - 对比第二级加碱	能耗费用 (千元美金 / 天) - 对比第二级加碱	运行费用 (千元美金 / 天) - 对比第二级加碱
15	22.1	-19.4	2.7
25	50.7	-38.9	11.8
35	35.0	-63.2	-28.3



(进水 TDS 39000mg/L，总产水量 22000m³/d，50% 回收率，产水 TDS 200mg/L，B 0.75mg/L)

图 10.9.7 不同加碱方式对能耗的碱液费用的影响

2) 脱溴

典型海水溴含量约 65 mg/L，以溴离子或有机溴形式存在。溴引起关注是因为它影响水的可饮用性。许多情况下，海水淡化产水需加氯胺消毒后供给用户。但当水中溴、氯、氨共存时，会形成溴胺而非氯胺。溴胺不稳定，残余量难以维持。此外，溴化物和溴胺会促进三卤甲烷（THMs）生成。分析表明，97% 以上的 THMs 含溴。世界卫生组织（WHO）对饮用水中 THMs 的限值为：溴二氯甲烷 60 µg/L，三溴甲烷 100 µg/L，三氯

甲烷 200 µg/L，溴酸盐 10 µg/L。另有研究发现，饮用水中溴含量超过 20 µg/L 可能增加孕妇产下缺陷婴儿的风险。

溴化物无法通过过滤有效去除，因此 RO 成为降低溴含量、防止淡化海水加氯消毒时产生消毒副产物的关键工艺。目前部分城市要求水中溴含量低于 60 µg/L，以确保含溴消毒副产物不超标。

10.9.3 研究数据和结果

在现存海水淡化厂和试验装置上分别进行过新型海水淡化膜的测试。其中一个试验是在太平洋海域，采用高脱盐率的 SWC4 MAX。试验条件见表 10.9.4。

表 10.9.4 试验运行条件

参数	数值	参数	数值
进水 TDS(mg/L)	34,000	回收率 (%)	49
进水 B(mg/L)	4.95	产水流量 (m ³ /h)	3.8
进水 Br(mg/L)	71	膜元件数量 / 膜壳	6
进水压力 (MPa)	6.48	水通量 (lmh)	15.1
进水 pH	7.9	进水温度 (°C)	20

表 10.9.5 中表明各项离子在进水、产水、浓水中含量，以及计算的脱除率。从中可以看出，对于氯离子和溴离子的脱除率约为 99.8%

硼从进水 5mg/L 降低至 0.7mg/L，脱硼率约为 90%。此计算脱硼率是按进水 / 浓水平均浓度值计算的，与表 10.9 中所列的值有所不同。主要是两个原因，一方面是本测试温度为 20°C，而标准测试条件为 25°C；另一方面测试时水通量为 15.3lmh，而标准测试条件时是 27.6lmh。两方面原因造成本测试结果与标准测试时结果不同，但如果换算到标准测试条件下，还是相符的。

表 10.9.5 采用 SWC4 MAX 测试的水质分析

水样	pH	Na,mg/L	Mg,mg/L	Ca,mg/L	Cl,mg/L	Br,mg/L	SO ₄ ,mg/L	B,mg/L
产水		34.2	0.14	0.043	54.5	0.255	0.275	0.701
进水	7.9	10200	1250	384	19074	70.9	2497	4.95
浓水		23500	2550	788	39353	156	5187	8.80
脱盐率, %		99.8	99.99	99.99	99.81	99.78	99.99	89.80

我们也做了第一级加碱的试验。在试验中，其它运行条件都一样，只是进行加碱调节 pH 值，结果见表 10.9.6。从表中可以看出，对于太平洋海水，pH 值从 8.14 提高到 9.14 时可降低产水硼 62%；对于中东地区海水，pH 值从 7 提高到 8.6 时，可降低产水硼含量 54%。

表 10.9.6 第一级加碱对于产水 B 的影响

进水 pH 值	海水来源	进水温度 (°C)	产水 B (mg/L)	产水 B 降低率 (%)
8.14	太平洋	23	1.27	基准点
9.24	太平洋	23	0.48	62
7.0	地中海		1.3	基准点
8.1	地中海		0.96	26
8.6	地中海		0.60	54

采用 SWC5 膜元件在某海水淡化厂的运行数据如表 10.9.7，各项离子成分见表 10.9.8。水通量为 13lmh，比标准测试水通量低很多，但却是许多大型海水淡化厂的典型应用水通量。

表 10.9.7 太平洋海水采用 SWC5 的数据

参数	数值	参数	数值
进水量 (m ³ /h)	1589	产水量 (m ³ /h)	716
进水压力 (bar)	50.65	产水压力 (bar)	0.45
进水温度 (°C)	25.1	回收率 (%)	45
进水 TDS(mg/L)	35,309	水通量 (lmh)	13
浓水压力 (bar)	49.7	压差 (bar)	0.95

表 10.9.8 采用 SWC5 的水质分析

水样	pH	Na,mg/L	Mg,mg/L	Ca,mg/L	Cl,mg/L	Br,mg/L	SO ₄ ,mg/L	B,mg/L
产水		92.9	0.577	1.05	144	0.683	1.05	1.75
进水	8.0	10500	1300	395	19925	64.4	2596	5.78
脱盐率, %		99.45	99.84	99.97	99.55	99.34	99.97	81.21

对比各水厂数据可知，SWC5-LD 脱盐率低于 SWC4 MAX，原因有二：①两种膜在标准测试条件下脱盐率相同但产水量不同，导致实际运行脱盐率差异；② SWC5-LD 运行压力仅 50.65 bar，而 SWC4 MAX 高达 64.8 bar，且 SWC4 MAX 水通量更高、回收率更高、温度更低。

10.9.4 结论

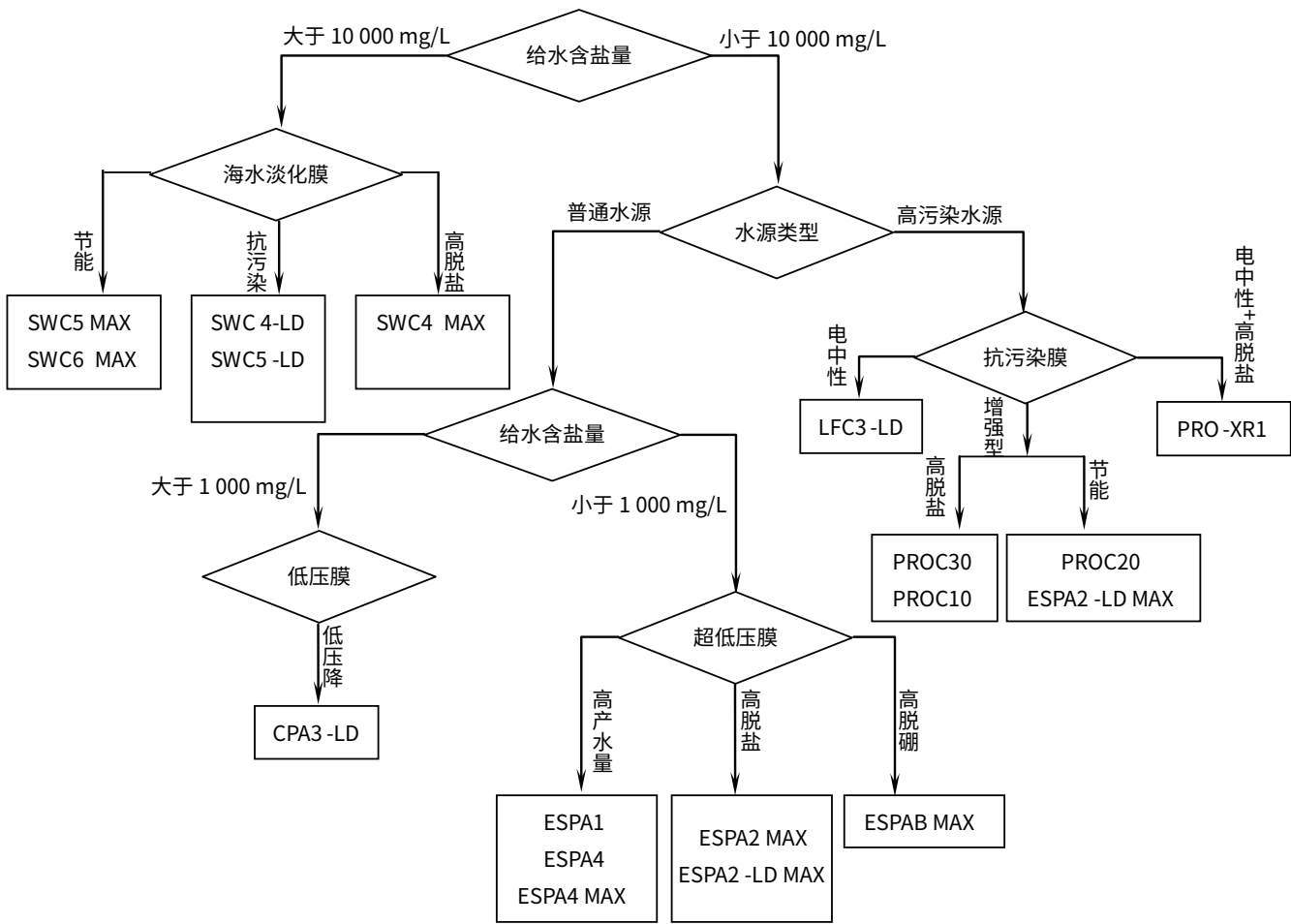
对于饮用水或农业灌溉应用，海水淡化系统设计时仅考虑 TDS 和氯离子含量是不够的，还需关注产水的硼和溴含量。采用合理的工艺组合可在满足产水水质的前提下，尽可能降低投资与运行费用。在较低温度和低含盐量条件下，SWC5-LD 和 SWC6-LD 较为适用。但不代表一定不适用 SWC4 MAX，SWC4 MAX 在某些情况下仍有应用价值：根据图 10.9.3，在 15°C 时可不用第二级，在 25°C 和 35°C 时仍需第二级但规模较小。膜元件的选型需综合温度、能耗、药耗等因素。

SWC4 MAX 和 SWC5-LD 的现场数据表明，其脱盐率与预期相符。脱溴率非常高，但略低于脱氯率。SWC4 MAX 的透溴率比透氯率高 16%，SWC5-LD 则高 45%，这可能归因于海水中氯含量远高于溴含量。两级产水中的溴含量可满足要求。

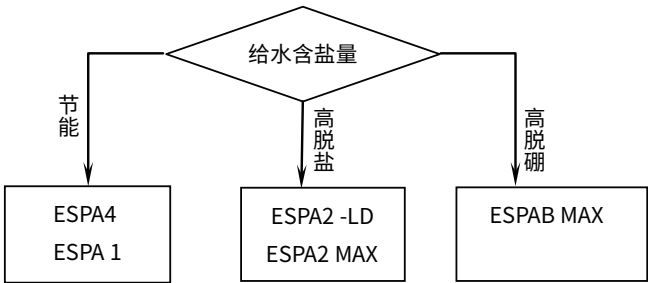
附录

附录 1 膜元件的一般选择方法及依据

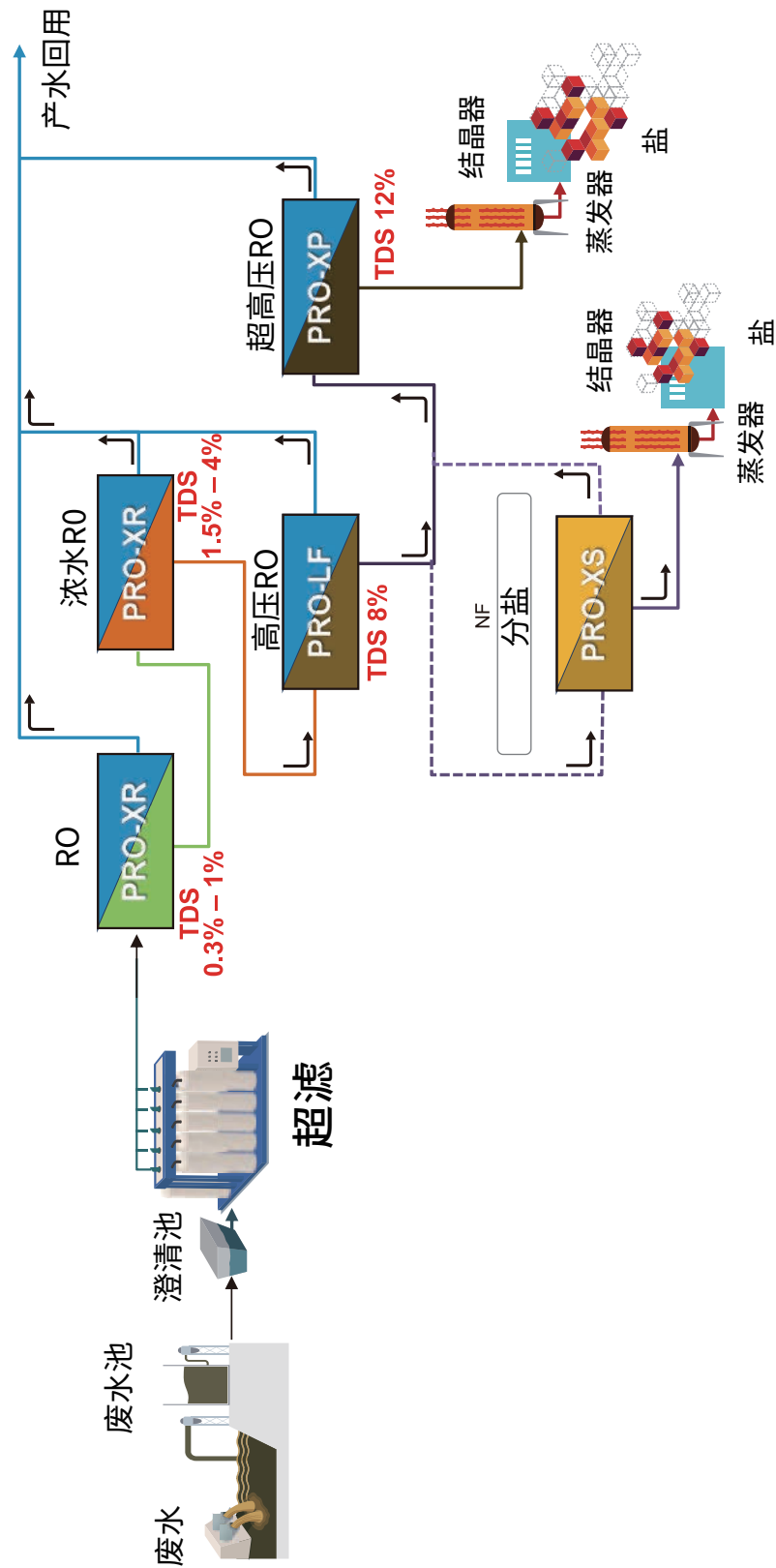
第一级反渗透系统膜元件的选择



第二级反渗透系统膜元件的选择



零排放 / 近零排放系统膜元件的选择



附录 2 美国海德能公司反渗透和纳滤膜元件设计导则

原水水源		RO 产水	地下水		地表水		海水			工业废水 / 市政污水	
预处理方式	RO	无污染	高污染	传统	MF/UF	地下	地表传统	地表 MF/UF	传统	MF/UF	
	进水 SDI 值	常规值	< 3	< 3	< 5	< 2.5	< 3	< 4	< 4	< 2.5	< 2.5
系统平均水通量 GFD/LMH	进水浊度, NTU	常规值	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1
	保守值	18/31	14/24	11/19	10/17	14/24	8/14	7/12	8/14	7/12	8/14
首支膜最大水通量 GFD/LMH	常规值	21/36	16/27	13/22	12/20	16/27	10/17	8/14	10/17	10/17	12/20
	激进值	25/43	20/34	15/26	14/24	18/31	12/20	10/17	12/20	12/20	14/24
β 值	保守值	29/49	24/41	16/27	15/26	18/31	19/32	17/29	19/32	11/19	12/20
	常规值	33/56	27/46	19/32	18/31	21/36	25/42	20/34	25/42	15/26	16/27
全填充膜元件	激进值	35/60	30/50	21/36	21/36	24/41	31/52	24/41	31/52	18/31	19/32
	保守值	1.30	1.18								
水通量的 年衰减率, %	常规值	1.50	1.20								
	激进值	1.70	1.20								
透盐率的 年增加率, %	保守值	2.00	1.20								
	常规值	2.20	1.50								
水通量的 年衰减率, %	激进值	2.20	1.50								
	保守值	7	10	10	10	10	10	10	10	18	15
透盐率的 年增加率, %	常规值	3	5	7	7	7	5	7	5	15	12
	激进值	0	3	5	5	5	3	5	3	10	7
透盐率的 年增加率, %	保守值	7	10	10	15	10	10	15	10	18	15
	常规值	5	7	7	10	7	7	10	7	12	10
透盐率的 年增加率, %	激进值	3	5	5	8	5	5	8	5	10	8

原水水源		RO产水	地下水		地表水		海水			工业废水 / 市政污水		
预处理方式		RO	无污染	高污染	传统	MF/UF	地下	地表传统	地表MF/UF	传统	MF/UF	
进水SDI值		常规值	< 1	< 3	< 3	< 5	< 2.5	< 3	< 4	< 2.5	< 2.5	
进水浊度, NTU		常规值	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.1	
每支压力容器 最大给水流量 GPM/m ³ /h	4英寸	常规值	16/3.6									
	8英寸	保守值	75/17	75/17	65/15	75/17	65/15	60/14	75/17	60/14	75/17	
		常规值	75/17									
每支压力容器 最小浓水流量 GPM/m ² /h	4英寸	常规值	2/0.45	3/0.68							4/0.80	3/0.68
	4英寸全填充	常规值	5/1.1	6/1.4							7/1.6	6/1.4
	8英寸	常规值	6/1.4	12.2.7							14/3.2	12/2.7
	8英寸全填充	常规值	17/3.8	25/5.7							29/6.6	25/5.7
最大压力损失, Mpa	6芯装压力容器	0.35										
	单支膜元件	0.07										
投加阻垢剂后各种难溶盐的饱和度限制	LSI	常规值	2.5									
	CaSO ₄ , %	常规值	400									
	SrSO ₄ , %	常规值	1200									
	BaSO ₄ , %	常规值	10000									
	Ca ₃ (PO ₄) ₂ (SI)	常规值	1.0									
	SiO ₂ , %	常规值	140									
	CaF ₂ , %	常规值	5000									

附录 3 单位换算

压力

	atm	mmHg	psi	kg/cm ²	MPa	bar
atm	1	760	14.696	1.0332	0.1013	1.0133
mmHg	1.316×10^{-3}	1	1.934×10^{-2}	1.360×10^{-3}	1.333×10^{-4}	1.333×10^{-3}
psi	6.805×10^{-2}	51.715	1	7.031×10^{-2}	6.895×10^{-3}	6.895×10^{-2}
kg/cm ²	0.9679	735.58	14.224	1	9.807×10^{-2}	0.9807
MPa	9.8692	7500.8	145.04	10.197	1	10.00
bar	0.9869	750.00	14.503	1.0197	0.1000	1

流量

	L/m ² h	GFD	cm ³ /cm ² s	m ³ /m ² d	L/m ² d
L/m ² h	1	0.59	2.780×10^{-5}	2.400×10^{-2}	24
GFD	1.70	1	4.720×10^{-4}	4.070×10^{-2}	40.730
cm ³ /cm ² /	36000	21200	1	864	8.640×10^5
m ³ /m ² d	41.667	24.550	1.157×10^{-3}	1	1×10^3
L/m ² d	4.167×10^{-2}	2.455×10^{-2}	1.157×10^{-6}	1×10^{-3}	1

功率

	尔格	焦耳	卡	英国热量单位	马力	千瓦时
尔格	1	1×10^{-7}	2.390×10^{-8}	9.48×10^{-11}	3.73×10^{-14}	2.78×10^{-14}
焦耳	1×10^7	1	0.2390	9.478×10^{-4}	3.73×10^{-7}	2.778×10^{-7}
卡	4.184×10^7	4.1840	1	3.966×10^{-3}	1.559×10^{-6}	1.162×10^{-6}
英国热量单位	1.06×10^{10}	1055.0	252.16	1	3.93×10^{-4}	2.931×10^{-4}
马力	2.69×10^{13}	2.685×10^6	6.416×10^5	2544.5	1	0.7457
千瓦时	3.60×10^{13}	3.600×10^6	8.604×10^5	3412.2	1.3410	1

长度

	米	厘米	英寸	英尺	码
米	1	100	39.370	3.2808	1.0936
厘米	1×10^{-2}	1	0.3970	3.281×10^{-2}	1.094×10^{-2}
英寸	2.54×10^{-2}	2.5188	1	8.333×10^{-2}	2.78×10^{-2}
英尺	0.3048	30.480	12	1	0.3333
码	0.9144	91.440	36	3	1

面积

	平方米	平方厘米	亩	平方英寸	平方英尺
平方米	1	10000	1×10^{-2}	1550	10.764
平方厘米	1×10^{-4}	1	1×10^{-6}	0.1550	1.0764×10^{-3}
亩	100	1×10^6	1	1.5500×10^5	1076.4
平方英寸	6.4516×10^{-4}	6.4516	6.4516×10^{-6}	1	6.9444×10^{-3}
平方英尺	9.2903×10^{-2}	929.03	9.2903×10^{-4}	144	1

体积

	立方米	升	立方英寸	立方英尺	美加仑
立方米	1	1000	61024	35.315	264.17
升	1×10^{-3}	1	61.024	3.5315×10^{-2}	0.2642
立方英寸	1.6387×10^{-5}	1.639×10^{-2}	1	5.7871×10^{-4}	4.3290×10^{-3}
立方英尺	2.8317×10^{-2}	28.317	1728.0	1	7.4805
美加仑	3.7854×10^{-3}	3.7854	231.00	0.1337	1

质量

	千克	克	盎司	磅	美吨
千克	1	1000	35.274	2.2046	1.1023×10^{-3}
克	1×10^{-3}	1	3.5270×10^{-2}	2.2046×10^{-3}	1.1023×10^{-6}
盎司	2.8349×10^{-2}	28.352	1	6.2500×10^{-2}	3.1250×10^{-5}
磅	0.4536	453.59	16	1	5.0000×10^{-4}
美吨	907.19	9.0719×10^5	32000	2000	1

附录 4 常见化合物在水中的溶度积 (25 °C)

化合物	K_{sp} , 25 °C	化合物	K_{sp} , 25 °C
AgCl	1.8×10^{-10}	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	2.0×10^{-29}
Ag_2CO_3	8.1×10^{-12}	CaSO_4	9.1×10^{-6}
AgOH	2.0×10^{-8}	CuCl	1.2×10^{-6}
Ag_3PO_4	1.4×10^{-16}	CuCO_3	1.4×10^{-10}
Ag_2SO_4	1.4×10^{-5}	$\text{Cu}(\text{OH})_2$	2.2×10^{-20}
$\text{Al}(\text{OH})_3$	1.3×10^{-33}	$\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$	1.3×10^{-37}
AlPO_4	6.3×10^{-19}	FeCO_3	3.2×10^{-11}
Al_2S_3	2.0×10^{-7}	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	8.0×10^{-16}
AuCl_3	3.2×10^{-25}	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$	3.3×10^{-41}
BaCO_3	5.1×10^{-9}	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	4.0×10^{-38}
BaF_2	1.0×10^{-6}	FeS	6.3×10^{-18}
$\text{Ba}(\text{OH})_2$	5.0×10^{-3}	MgCO_3	3.5×10^{-8}
$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	4.5×10^{-3}	MgF_2	6.5×10^{-9}
BaHPO_4	3.2×10^{-7}	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1.8×10^{-11}
$\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$	3.4×10^{-23}	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	$10^{-23} - 10^{-27}$
BaSO_4	1.1×10^{-10}	MnCO_3	1.8×10^{-11}
BaSO_3	8.0×10^{-7}	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	1.9×10^{-13}
CaCO_3	2.8×10^{-9}	SrCO_3	1.1×10^{-10}
CaF_2	5.3×10^{-9}	SrSO_4	3.2×10^{-7}
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	5.5×10^{-6}	ZnCO_3	1.4×10^{-11}
CaHPO_4	1.0×10^{-7}	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	1.2×10^{-17}

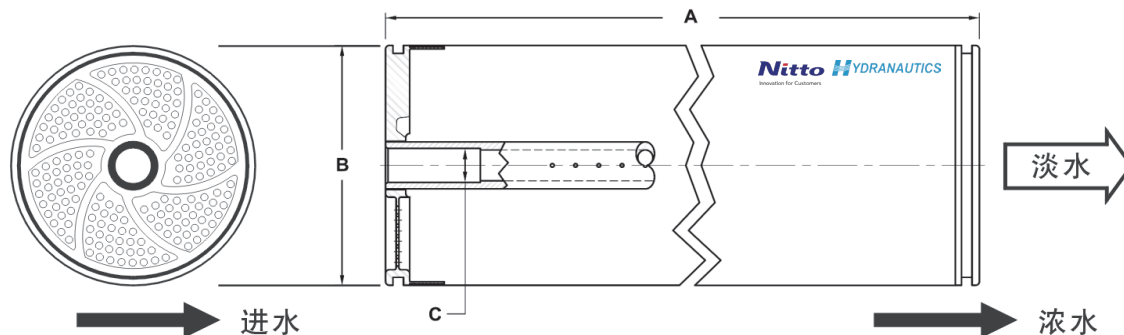
附录 5 反渗透和纳滤系统运行数据参考记录表

日期	时间	记录数据										
		Q _p	Q _b	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	EC _f	EC _b	EC _p	T _f	pH _f
年 月 日	h	m ³ /h	m ³ /h	bar	bar	bar	bar	μs/cm	μs/cm	μs/cm	°C	—

计算数据										
△ P ₁	△ P ₂	P _{pr}	P _{av}	EC _{fav}	Rec.	TCF	SS _{pn}	QS _{pn}	△ P _n	WTC _n
bar	bar	bar	bar	μm/cm	%	—	%	m ³ /h @ 25°C	bar	LMH/bar

附录 6 膜元件及配件尺寸图

8 英寸反渗透和纳滤膜元件尺寸图：

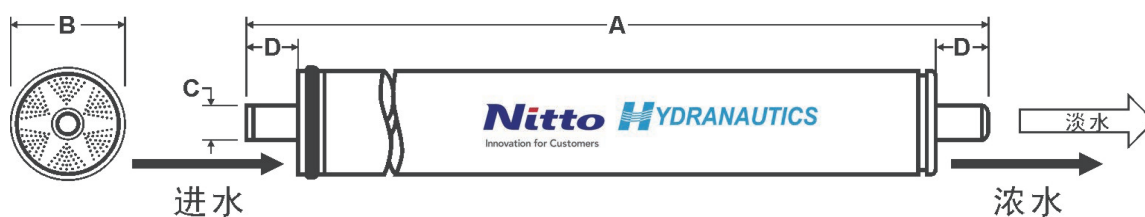


A = 40.0 inches = 1 016 mm

B = 7.89 inches = 200 mm

C = 1.125 inches = 28.6 mm

4 英寸反渗透和纳滤膜元件尺寸图（适用于 CPA、ESPA[®]、LFC[®]、SWC[®] ESNA[®] 系列和 YQS）：



A = 40.0 inches = 1 016 mm

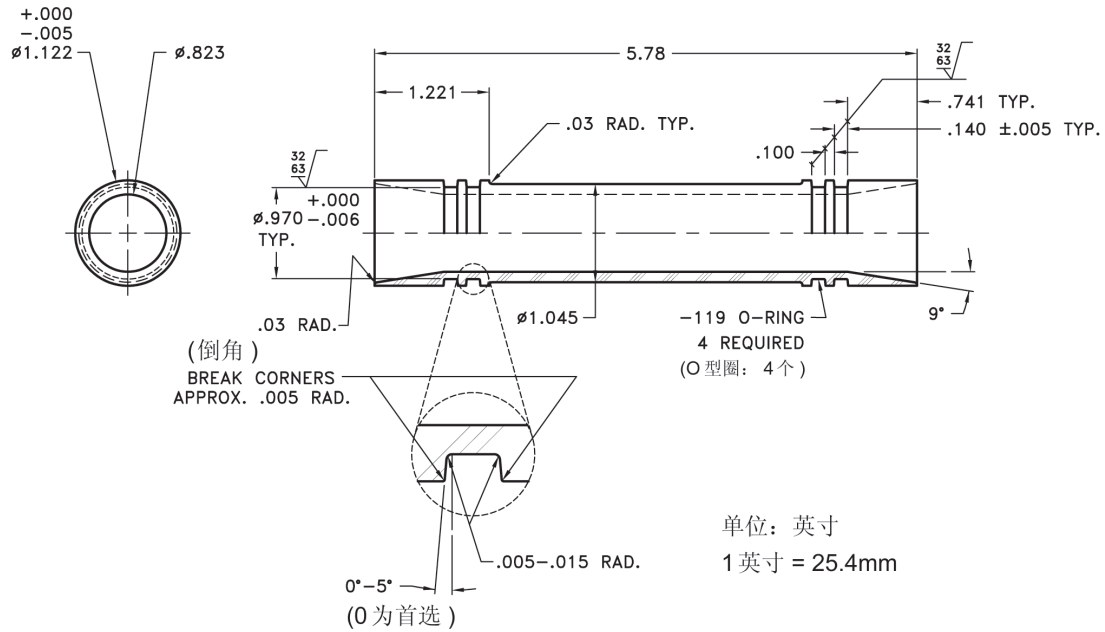
B = 3.95 inches = 100.3 mm

C = 0.75 inch = 19.1 mm

D = 1.05 inches = 26.7 mm

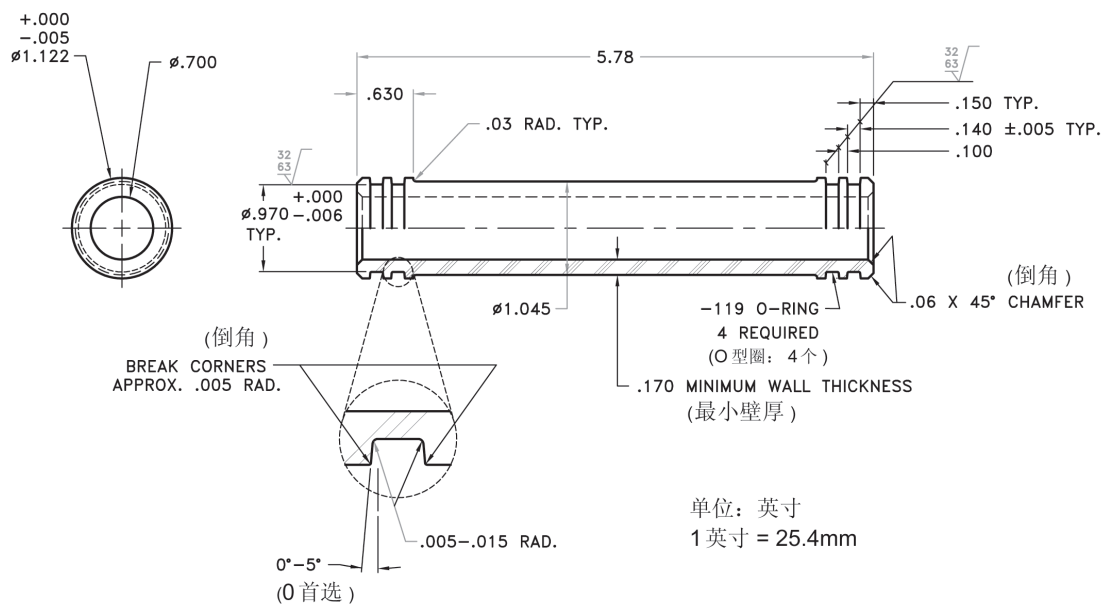
8 英寸反渗透和纳滤膜元件内插式连接管尺寸图（适用于耐压 $\leq 4.14\text{MPa}$ 的膜元件）：

8 英寸膜元件内插式连接管
(零件号 :11518.0000)



8 英寸反渗透和纳滤膜元件内插式连接管尺寸图（适用于耐压 $> 4.14\text{MPa}$ 的膜元件）：

8 英寸膜元件内插式连接管
(零件号 :11574.000)



附录 7 符号表

c	离子浓度	C_s	膜表面盐浓度
R	气体常数	C_b	本体溶液盐浓度
T	热力学温度	TDS	含盐量
Q_w	水的透过量	K_p	比例常数
ΔP	压力差	Q_{favg}	平均给水流量
K_w	膜的纯水渗透系数	T	时间
S	膜面积	J	水通量
d	膜的分离层厚度	N_e	理论膜元件数
A	膜的膜渗透常数	N_v	压力容器数
NDP	净驱动力	V_e	每支压力容器中装填的膜元件数量
Q_s	膜的透盐量	t	温度
K_s	膜的盐渗透系数	P_f	给水压力
Δc	膜两侧盐浓度差	EC_f	给水电导率
B	膜的盐透过常数	EC_b	浓水电导率
C_p	透过液盐浓度	TCF	温度校正系数
SP	透盐率		
C_{fm}	料液的平均盐浓度	希腊字母	
Rej.	脱盐率	β	浓差极化指数
Rec.	回收率	π	渗透压
Q_p	产水流量	$\Delta\pi$	渗透压差
Q_f	给水流量	ζ	电位

附录 8 美国海德能公司主要反渗透和纳滤膜元件规格参数

离子选择性纳滤膜——PRO-XS2

海德能™ PRO-XS 是为有挑战性的工业应用开发的抗污染系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别改进，用于处理高污染、高 TDS、或对分盐有要求的工业水源。

性能参数 *

产水量：	11000 gpd (41.6m ³ /d)
脱除率： 平均	99.7%
最低	99.6%
测试条件：溶液	2000 mg/L MgSO ₄
压力	110psi (0.76 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0
模拟水质性能 +：	
SO ₄ 脱除率：	99.8%
Cl 脱除率：	<10%

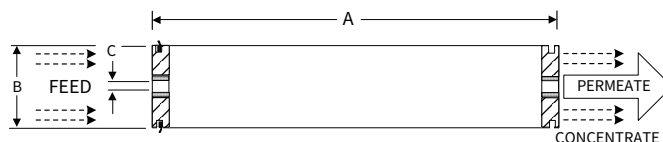
* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±20% 之内。

+ 模拟水质测试条件：10000mg/L NaCl + 10000mg/L Na₂SO₄，水通量 15LMH，温度 25°C，回收率 15%，pH 6.5-7.0

通用产品描述 **

结构：	卷式
膜材料：	聚酰胺复合材料
有效膜面积 **：	400 ft ² (37.2 m ²)
给水隔网厚度：	34mil(0.86mm)

包装：每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并含有 2% Safeguard®100 保护液，然后包装在纸箱中。Safeguard®100 保护液冲洗相关说明，请参见 TSB118。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力：	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度：	< 0.1 mg/L
最高进水温度：	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围：	3.0-9.0
清洗 PH 范围：	1.0 - 11.5
最大进水浊度：	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ ：	5.0
最大进水流量：	85gpm (19.3m ³ /h)
最小浓水流量：	12gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降：	15psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2021 年 12 月 9 日版

离子选择性纳滤——PRO-XS5

海德能™ PRO-XS 是为有挑战性的工业应用开发的抗污染系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别改进，用于处理高污染、高 TDS、或对分盐有要求的工业水源。

性能参数 *

产水量:	9,650 gpd (36.5 m³/d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.6%
测试条件: 溶液	2000 ppm MgSO ₄
压力	110 psig (0.76 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0
模拟水质性能 **: SO ₄ 脱盐率:	99.8%
Cl 脱盐率:	≤ 10%

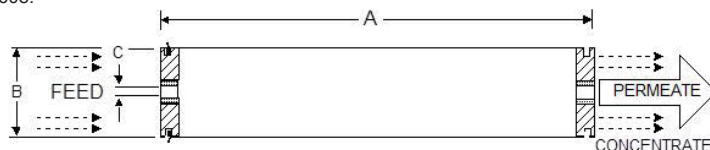
* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±20% 之内。

** 模拟水质测试条件: 10000mg/L NaCl + 10000mg/L Na₂SO₄，水通量 15LMH 温度 25°C，回收率 15%，pH 6.5-7.0

通用产品描述 ***

结构:	卷式
膜材料:	聚酰胺复合材料
有效膜面积 ***:	400 ft² (37.2 m²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并含有浓度不大于 2% 的 Safeguard® 100 和少量 NaCl 残液作为保护液，然后包装在纸箱中。Safeguard® 100 保护液冲洗的相关说明，请参见 TSB 118. 关于更多的储存和运输说明，包括存放温度的限制，请参见 TSB 608.



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

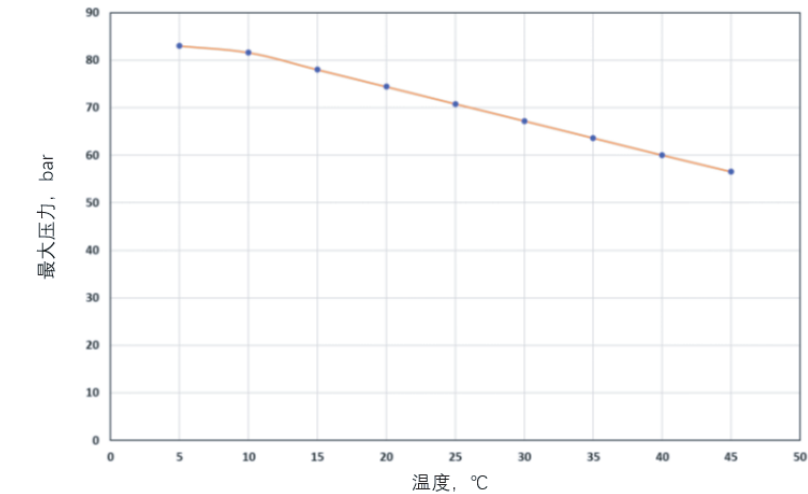
最大运行压力:	1200 psig (8.27 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 ppm
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围 (清洗):	3.0 - 9.0 (1.0 - 12.0)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m³/h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m³/h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。最大建议运行压力是基于进水温度给出的。更多有关最大进水压力和温度关系的信息，请参阅第 3 页。

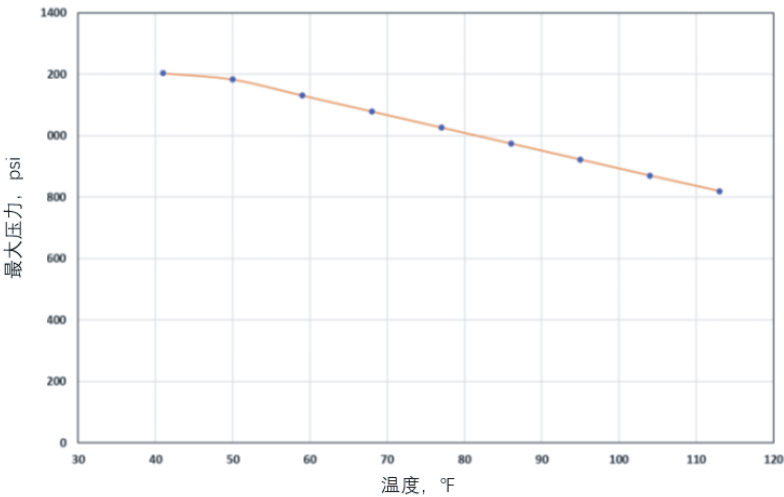
最大运行压力 *

温度, °C	温度, °F	压力, psi	压力, bar
5	41	1204	83
10	50	1183	82
20	68	1079	74
30	86	974	67
40	104	870	60
45	113	819	57

最大膜元件进水压力 vs 温度
运行曲线



最大膜元件进水压力 vs 温度
运行曲线



免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2025 年 7 月 10 日版

抗污染反渗透膜——PRO-XR1

海德能™ PRO-XR 是为有挑战性的工业应用开发的抗污染系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别改进，用于处理高污染、或对离子有特殊浓缩要求等工业水源。

性能参数 *

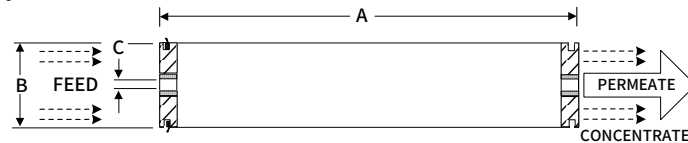
产水量:	11,500 gpd (43.5 m³/d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	2000 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft² (37.2 m²)
进水隔网:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器和配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
pH 范围, 连续 (清洗):	2-11 (1-13) at T < 25°C 2-11 (1-12) at T = 25 to < 35°C 3-10.5 (2-11) at T = 35 to 45°C
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m³/h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)
最小浓水流量:	12 gpm (2.7 m³/h)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2022 年 6 月 14 日版

抗污染高压反渗透膜——PRO-LF1

海德能™ PRO-LF 是为有挑战性的工业应用开发的抗污染系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别改进，用于处理高污染、高 TDS、或高化学侵蚀性等工业水源。

性能参数 *

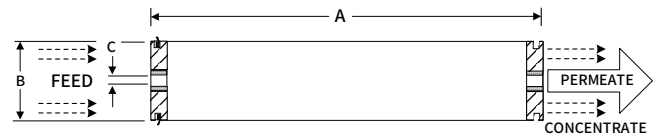
产水量：	7,700 gpd (29.1 m³/d)
脱盐率： 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件：溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800 psi (5.5 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构：	抗污染卷式
膜材料：	芳香聚酰胺
有效膜面积 **：	400 ft² (37.2 m²)
进水隔网：	34mil(0.86mm)

包装： 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器和配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力：	1200 psig (8.27 MPa)
最大进水余氯浓度：	< 0.1 mg/L
最高进水温度：	113 °F (45 °C)
运行 (清洗) pH 范围：	2-11 (1-13) at T ≤ 25°C 2-11 (1-12) at T > 25 to ≤ 35°C 3-10.5 (2-11) at T > 35 to ≤ 45°C
最大进水浊度：	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ ：	5.0
最大进水流量：	85 gpm (19.3m³/h)
单支膜元件最大压降：	15 psi (0.10 MPa)
最小浓水流量：	12gpm(2.7m³/h)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明： 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2024 年 6 月 3 日

PRO-LF1-4040

PRO-LF1 是为有挑战性的工业应用开发的抗污染系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别改进，用于处理高污染、高 TDS 的工业水源。

性能参数 *

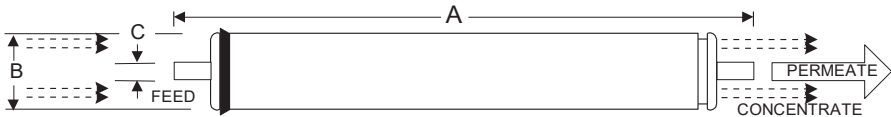
产水量:	1,480 gpd (5.6 m³/d)
脱盐率:	≥ 99.7%
测试条件: 溶液	32,000 mg/L NaCl
压力	800 psi (5.52 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15% 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	复合聚酰胺 电中性膜表面
有效膜面积:	77 ft² (7.2 m²)
给水隔网厚度:	34 mil (0.86 mm)

包装：每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为：1.05" (26.7 mm)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1,200 psig (8.27 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围 (清洗):	2-11 (1-13) at T ≤ 25 °C 2-11 (1-12) at T > 25 °C to ≤ 35 °C 3-10.5 (2-11) at T > 35 °C to ≤ 45 °C
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6 m³/h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m³/h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2024 年 6 月 3 日版

超高压反渗透膜——PRO-XP1

海德能™ PRO-XP 是为有挑战性的工业应用（例如浓水减量）开发的超高压系列膜元件，在美国海德能高性能的膜产品基础上进行特别设计，用于处理高污染、高 TDS、或高化学侵蚀性等工业水源。

性能参数 *

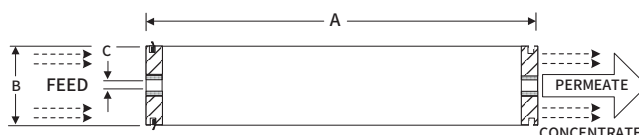
产水量：	8,000 gpd (30.3 m ³ /d)
脱盐率： 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件：溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800 psi (5.5 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15% - +25% 之内。运行在接近高压极限时，水通量可能下降 25% - 45%。

通用产品描述 **

结构：	卷式
膜材料：	芳香聚酰胺
有效膜面积 **：	365 ft ² (33.9m ²)
进水隔网：	34 mil (0.86 mm)

包装：每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力：	1800 psig (12.4MPa) @30°C (参见图 1)
最大进水余氯浓度：	< 0.1 mg/L
最高进水温度：	与压力相关 (参见图 1)
运行 (清洗) pH 范围：	2-11 (1-13) at T < 25°C 2-11 (1-12) at T = 25 to < 35°C 3-10.5 (2-11) at T = 35 to 45°C
最大进水浊度：	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ ：	5.0
最大进水流量：	85 gpm (19.3m ³ /h)
最小浓水流量：	12gpm(2.7m ³ /h)
单支膜元件最大压降：	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

图 1 最高压力与温度曲线关系图

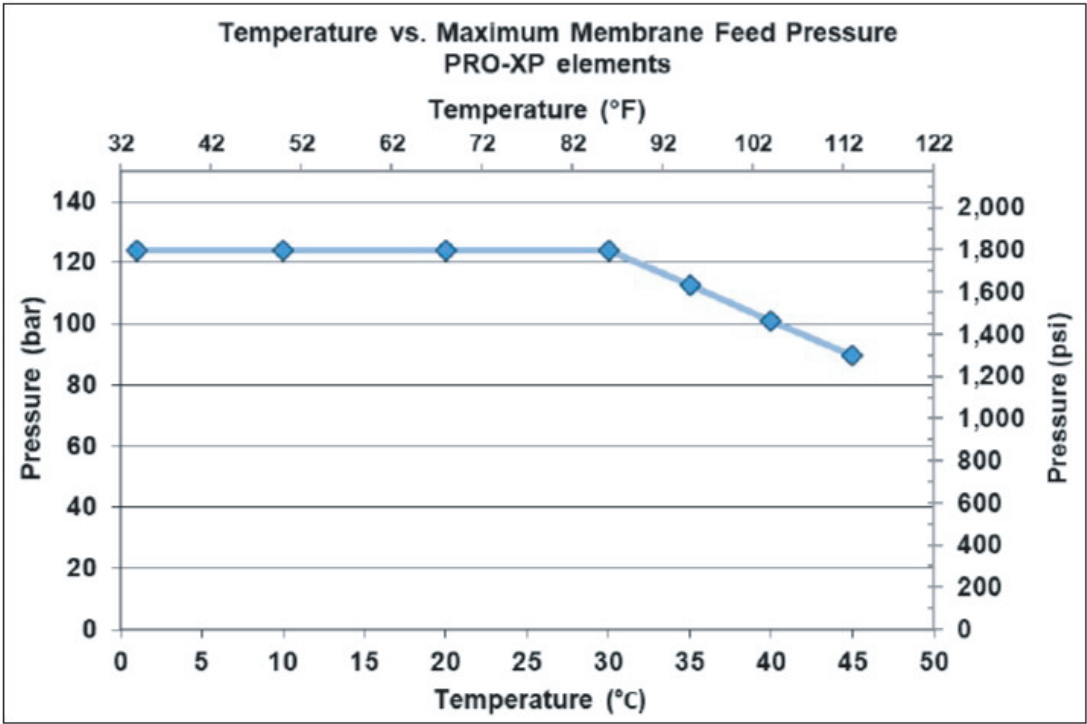


表 1 最大压力 Vs. 温度

PRO-XP 膜元件的最大压力和温度值		
°C	psi	bar
1	1800	124.1
10	1800	124.1
20	1800	124.1
30	1800	124.1
35	1635	112.7
40	1465	101.0
45	1300	89.6

免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2021 年 10 月 20 日版

增强型抗污染反渗透复合膜——PROC10

性能参数 *

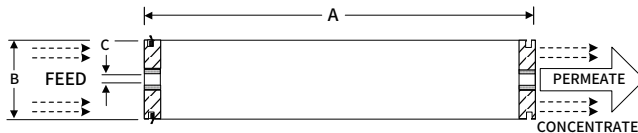
产水量:	10,500 gpd (39.7 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.75%
最低	99.6%
测试条件: 溶液	2000 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	90 gpm (20 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

节能型抗污染反渗透复合膜——PROC20

性能参数 *

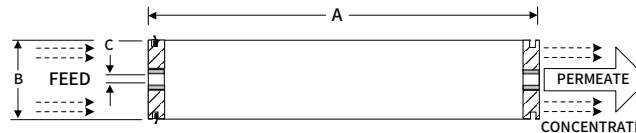
产水量:	10,500 gpd (39.7 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.5%
最低	99.2%
测试条件: 溶液	2000 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.03MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	90 gpm (20 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

增强型抗污染反渗透复合膜——PROC30

性能参数 *

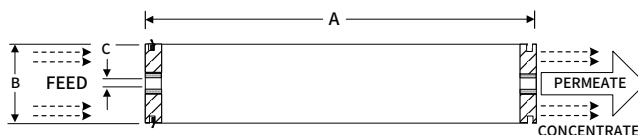
产水量:	11,500 gpd (43.5m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件: 溶液	2000 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	90 gpm (20 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

低压高脱盐反渗透复合膜——CPA3-LD

性能参数 *

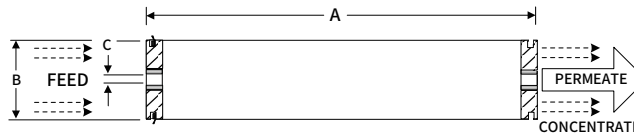
产水量:	11,000 gpd (41.6 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.7%
最低	99.6%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
给水隔网厚度:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10.8
清洗 pH 范围:	1-12.5
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m ³ /h) ³
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2021 年 4 月 1 日版

增强型抗污染反渗透复合膜——CPA7-LD-4040

性能参数 *

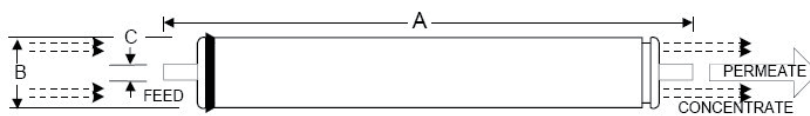
产水量:	2,300 gpd (8.71 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.6%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	225 psig (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 +25/-15% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	聚酰胺复合材料
有效膜面积 **:	80 ft ² (7.43 m ²)
给水隔网厚度:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0% 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05inches (26.7mm)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围 (清洗):	2 - 11 (1 - 13)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6 m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2022 年 8 月 22 日版

节能型超低压反渗透复合膜——ESPA1

性能参数 *

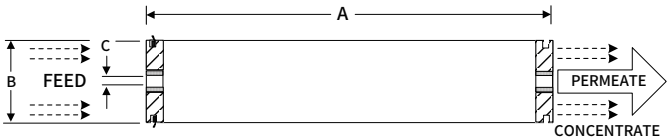
产水量:	12,000 gpd (45.4 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.4%
最低	99.2%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.03 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 17 日版

节能型超低压反渗透复合膜——ESPA1-LD-4040

性能参数 *

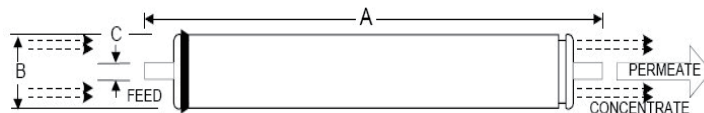
产水量:	2,450 gpd (9.27m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.4%
最低	99.2%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.05MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	80 ft ² (7.43 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05 inches/26.7mm

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2022 年 8 月 22 日版

节能型超低压大膜面积反渗透复合膜——ESPA2 MAX

性能参数 *

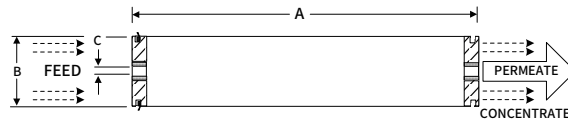
产水量:	12,000 gpd (45.4 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.6%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.03 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (40.9 m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10.6
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

ESPA2-LD

性能参数 *

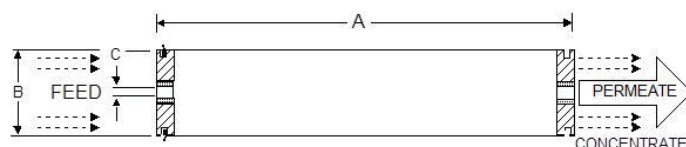
产水量:	10,000 gpd (37.9 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.6%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	1500 ppm NaCl
压力	150 psig (1.03 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15% 之内。

通用产品描述 ***

结构:	抗污染卷式膜
膜材料:	复合聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
给水隔网厚度:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

*** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 ppm
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围 (清洗):	2-10.6 (1-12)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适用性。

2022 年 9 月 14 日版

节能型超低压宽通道大膜面积反渗透膜——ESPA2-LD MAX

性能参数 *

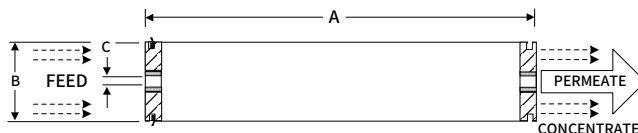
产水量:	12,000 gpd (45.4 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.6%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.03 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	440 ft ² (40.9 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10.6
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

节能型超低压反渗透复合膜——ESPA2-LD-4040

性能参数 *

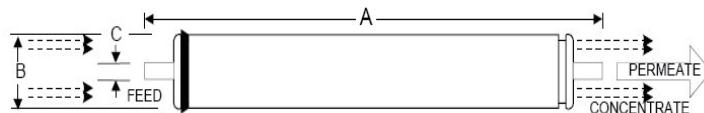
产水量:	2,000 gpd (9.27m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.6%
最低	99.4%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	150 psi (1.03MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±20% 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	80 ft ² (7.43 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05inches/26.7mm

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10.6
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2022 年 8 月 22 日版

节能型超低压反渗透复合膜——ESPA4 MAX

性能参数 *

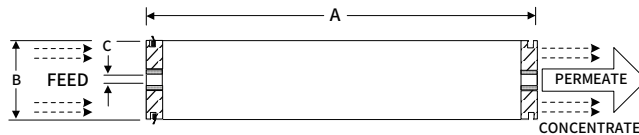
产水量:	13,200 gpd (50m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.2%
最低	99.0%
测试条件: 溶液	500 mg/L NaCl
压力	100psi (0.7 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 ***

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	440 ft ² (40.9 m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 19 日版

ESPA4-LD

性能参数 *

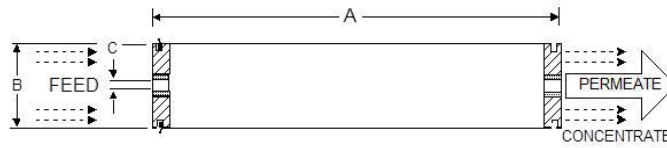
产水量:	12,000 gpd (45.4 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.2%
最低	99.0%
测试条件: 溶液	500 mg/L NaCl
压力	100 psig (0.7 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15% 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	复合聚酰胺
有效膜面积 **:	400ft ² (37.2 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2025 年 7 月 17 日

节能型超低压反渗透复合膜——ESPA4-LD-4040

性能参数 *

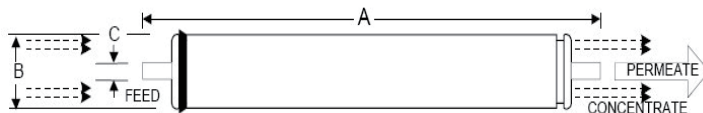
产水量:	2,350 gpd (8.90m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.2%
最低	99.0%
测试条件: 溶液	500 mg/L NaCl
压力	100psi (0.7 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15% 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	80 ft ² (7.43 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05inches/26.7mm

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2022 年 8 月 22 日版

电中性抗污染反渗透复合膜——LFC3-LD

性能参数 *

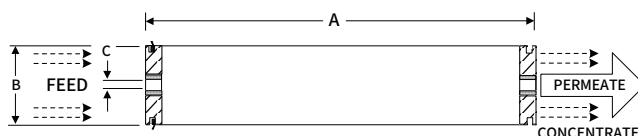
产水量:	11,000 gpd (41.6 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.7%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
膜表面荷电性:	电中性
进水隔网:	34mil (0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 18 日版

电中性抗污染反渗透复合膜——LFC3-LD-4040

性能参数 *

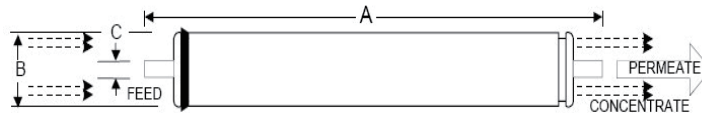
产水量:	2,100 gpd (7.95m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.7%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	1500 mg/L NaCl
压力	225 psi (1.55 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	80ft ² (7.43m ²)
膜表面荷电性:	电中性
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05inches/26.7mm

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适用性。

2018 年 12 月 4 日版

高脱盐率大膜面积海水淡化反渗透复合膜——SWC4 MAX

性能参数 *

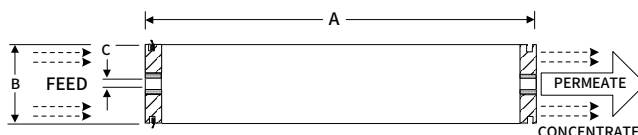
产水量:	7,200 gpd (27.3 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件: 溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800psi (5.5MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	440 ft ² (40.9m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17.0m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

高脱盐率海水淡化反渗透复合膜——SWC4-LD

性能参数 *

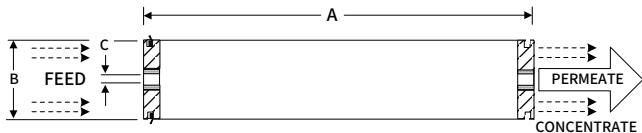
产水量:	6,500 gpd (24.6m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件: 溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800psi (5.5MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2 m ²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	<0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

大膜面积海水淡化反渗透复合膜——SWC5 MAX

性能参数 *

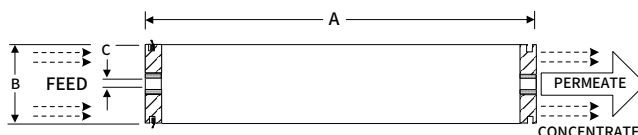
产水量:	9,900 gpd (37.5m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件: 溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800psi (5.5MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	440 ft ² (40.9m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17.0m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

海水淡化反渗透复合膜——SWC5-LD

性能参数 *

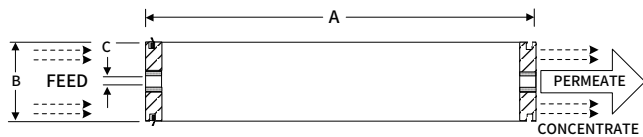
产水量:	9,000 gpd (34.1m³/d)
脱盐率: 公称	99.8%
最低	99.7%
测试条件: 溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800psi (5.5 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±15 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft² (37.2m²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装：每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3m³/h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m³/h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

海水淡化反渗透复合膜——SWC5-LD-4040

性能参数 *

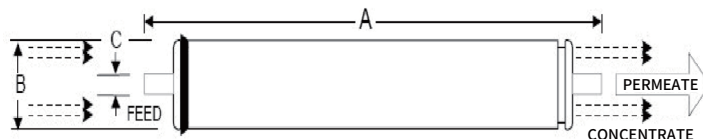
产水量:	1,750 gpd (6.62 m ³ /d)
脱盐率: 公称	99.7%
最低	99.5%
测试条件: 溶液	32000 mg/L NaCl
压力	800 psi (5.5MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	10%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	80 ft ² (7.43 m ²)
进水隔网:	34 mil (0.86 mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	3.95 (100.3)	0.75 (19.1)

中心管突出部分长度为: 1.05inches/26.7mm

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	<0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	16 gpm (3.6m ³ /h)
最低浓水流量:	3 gpm (0.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2018 年 12 月 5 日版

高产水量大膜面积海水淡化反渗透复合膜——SWC6 MAX

性能参数 *

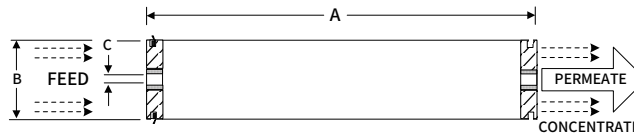
产水量:	低压力	高产水量
脱盐率: 公称	6,600 gpd (25m ³ /d)	13,200gpd (50m ³ /d)
最低	99.6%	99.8%
测试条件: 溶液	99.4%	99.7%
压力	32000 mg/L NaCl	
温度	600psi (4.1MPa)	800psi (5.5MPa)
回收率	77 °F (25 °C)	
pH	10%	
	6.5 - 7.0	

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	440 ft ² (40.9m ²)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	75 gpm (17m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

高产水量海水淡化反渗透复合膜——SWC6-LD

性能参数 *

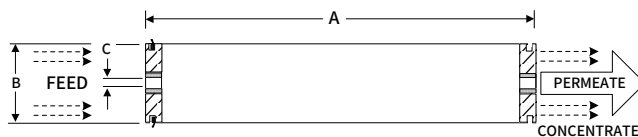
产水量:	低压力	高产水量
脱盐率: 公称	6,000 gpd (22.7m³/d)	12,000gpd (45.4 m³/d)
最低	99.6%	99.8%
测试条件: 溶液	99.4%	99.7%
压力	32000 mg/L NaCl	
温度	600psi (4.1MPa)	800psi (5.5MPa)
回收率	77 °F (25 °C)	
pH	10%	
	6.5 - 7.0	

* 性能参数是在系统稳定运行 30 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -15-+25 % 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft² (37.2 m²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	1200 psig (8.27MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-11
清洗 pH 范围:	1-13
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3m³/h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m³/h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 30 日版

抗污染节能型纳滤复合膜——ESNA1-LF2-LD

性能参数 *

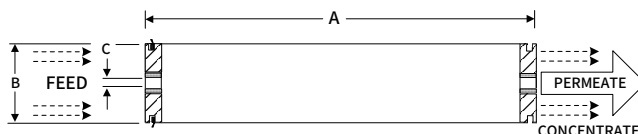
产水量:	12,000 gpd (45.4m ³ /d)
脱盐率: 平均	91%
范围	80—96%
* 对于典型 500mg/L 地下水, 运行温度 25°C, 水通量 22LMH, 估计钙离子脱除率为 93%。	
测试条件: 溶液	500 mg/L CaCl ₂
压力	75psi (0.52 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 - 20- +34% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2m ²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0% 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 PH 范围:	1-12 (25°C, 30 分钟)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85gpm (19.3m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2020 年 1 月 7 日版

抗污染节能型纳滤复合膜——ESNA1-LF-LD

性能参数 *

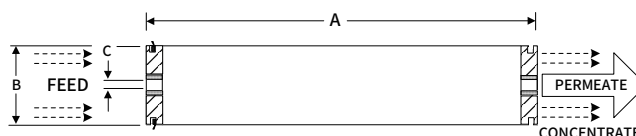
产水量:	9,500 gpd (36.0m ³ /d)
脱盐率: 平均	93%
范围	88—97%
* 对于典型 500mg/L 地下水源, 运行温度 25°C, 水通量 22LMH, 估计钙离子脱除率为 96%。	
测试条件: 溶液	500 mg/L CaCl ₂
压力	75psi (0.52 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同, 这种情况下, 性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 -20-+25% 之内。

通用产品描述 **

结构:	卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2m ²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液, 然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的, 非指定。更详细的参数, 请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 PH 范围:	1-12 (25°C, 30 分钟)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85gpm (19.3m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目, 更保守的运行参数可以确保更好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证, 包括特定用途的适销性和适合性的保证, 在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2019 年 1 月 29 日版

ESNA4-LD

性能参数 *

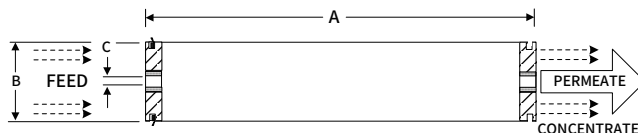
产水量:	11,500 gpd (43.5m ³ /d)
脱盐率:	≥ 99.0%
测试条件: 溶液	2,000 mg/L MgSO ₄
压力	100psi (0.69MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	7.0-7.5

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±20% 之内。

通用产品描述 **

结构:	抗污染卷式
膜材料:	芳香聚酰胺
有效膜面积 **:	400 ft ² (37.2m ²)
给水隔网厚度:	34mil(0.86mm)

包装: 每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚硫酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psig (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围:	2-10
清洗 pH 范围:	1-12 (@ 25 °C, 30 分钟)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3m ³ /h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
单支膜元件最大压降:	15 psi (0.10MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明: 这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2021 年 9 月 15 日版

ESNA5-LD

性能参数 *

产水量:	12,000 gpd (45.4m³/d)
脱盐率:	≥ 97.0%
测试条件: 溶液	500 mg/L NaCl
压力	70 psi (0.48 MPa)
温度	77 °F (25 °C)
回收率	15%
pH	6.5 - 7.0

* 性能参数是在系统稳定运行 10 分钟取得的。实际测试条件可能与上述数据不完全相同，这种情况下，性能参数是根据标准条件进行标准化后的数据。产水量偏差范围在 ±20% 之内。

参考测试性能 **

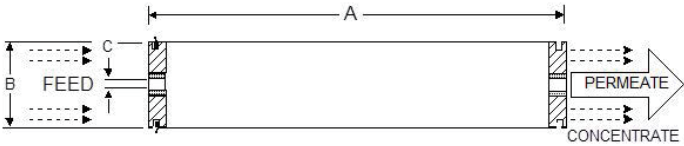
产水量:	11,500 gpd (43.5 m³/d)
脱盐率:	≥ 99.0%

** 参考测试条件 : 2,000 mg/L MgSO4 溶液 , 压力 70 psi (0.48 MPa), 温度 77 °F (25 °C), 回收率 15%, pH 6.5 - 7.0。

通用产品描述 ***

结构:	抗污染卷式
膜材料:	复合聚酰胺
有效膜面积:	400 ft² (37.2 m²)
给水隔网厚度:	34 mil (0.86 mm)

包装：每一支膜元件在出厂时均包含一个浓水密封圈、一个连接适配器以及配套的 O 型圈。膜元件密封在聚乙烯塑料袋中并添加浓度不大于 1.0 % 的亚酸氢钠溶液作为保护液，然后包装在纸箱中。



膜元件尺寸 **

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

*** 此处数值是指示性的，非指定。更详细的参数，请参见美国海德能相关技术文件或与美国海德能技术人员联系。

产品使用和限制 ^

最大运行压力:	600 psi (4.14 MPa)
最大进水余氯浓度:	< 0.1 mg/L
最高进水温度:	113 °F (45 °C)
运行 pH 范围 (清洗):	2-10 (1-12)
最大进水浊度:	1.0 NTU
最大进水 SDI ₁₅ :	5.0
最大进水流量:	85 gpm (19.3 m³/h)
最低浓水流量:	12 gpm (2.7 m³/h)
单只膜元件最大压降:	15 psi (0.10 MPa)

^ 此处仅为通用限制条件。对于具体项目，更保守的运行参数可以确保最好的性能和更长的使用寿命。详情请参见美国海德能相关技术资料。

免责声明：这里提供的信息和数据是出于诚意并代替一切保证。所有明示或暗示的保证，包括特定用途的适销性和适合性的保证，在此全部否认和排除。我们产品的使用条件和方法超出我们的控制范围。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的结果或损害。用户有责任自行确定美国海德能公司的产品对其特定用途的适合性。

2024 年 5 月 16 日版

附录 9 美国海德能标准工艺于材料保证书

HYDRANAUTICS STANDARD MATERIALS AND WORKMANSHIP WARRANTY

HYDRANAUTICS 标准材料和工艺保证

AP FM 5001 Rev. E (DCR #24101) (01/09/25)

This Materials and Workmanship Warranty (the “Warranty”) is made by HYDRANAUTICS (“Hydranautics”), a California corporation, and its Affiliates in connection with the Buyer’s purchase of a Hydranautics product and the component parts thereof, as more fully described and defined in that certain purchase order from the Buyer (“Order”) incorporated by reference herein and of even date herewith (the “Covered Product”). An “Affiliate” shall mean any person or entity that controls (i.e., possesses the power to direct or cause the direction of the management and policies of an entity, whether through ownership of voting securities, by contract, or otherwise), is controlled by, or is under common control with, a shared ownership of such a person or entity, or operates under a shared ownership or control by another entity. This Warranty constitutes the entire agreement between Hydranautics and the Buyer as to any warranty provided by Hydranautics to the Buyer on the Covered Product and supersedes all agreements, understandings or discussions, whether oral or written, entered into prior to or contemporaneously herewith. This Warranty may not be modified or amended except in writing and signed by the Buyer and Hydranautics.

本材料与工艺保证（下称“保证”）由日东集团 / 美国海德能公司 (“Hydranautics") 及其关联方制定，适用于买方购买海德能产品及其零部件的交易（具体产品定义详见买方采购订单，该订单通过引用方式并入本条款并与本条款同时生效，所涉产品下称“受保产品”）。" 关联方 " 系指通过表决权股份持有、合约或其他方式实际控制（即具备主导或影响企业管理及决策的权力）、受共同控制、或存在共同所有权关系的任何个人或实体，或在其他实体共同所有权或控制下运营的实体。本保证构成海德能就受保产品向买方提供保修服务的完整协议，取代此前或同时达成的所有口头或书面协议、谅解及讨论。本保证的修订须经买卖双方书面签署方为有效。

I.ACKNOWLEDGEMENTS OF BUYER 买方确认事项

By accepting this Warranty, the Buyer acknowledges the following:

买方接受本保证条款即确认以下事项：

A. That the Buyer has read and understands the terms and limitations of this Warranty;

买方已阅读并理解本保证条款的各项条款及限制；

B. That the Buyer has been provided sufficient opportunity to consult with independent legal counsel regarding this Warranty and the limitations hereof, and that the Buyer has not relied upon any statements or representations of Hydranautics for the Buyer’s understanding or interpretation of any provision hereof.

买方已获得充分机会就本保证条款及其限制咨询独立法律顾问，且买方对本保证条款任何规定的理解或解释，均未曾依赖海德能公司的任何陈述或说明。

II.LIMITED WARRANTY ON MATERIALS AND WORKMANSHIP 材料与工艺有限保修

Hydranautics warrants to the Buyer that the Covered Product and components thereof are free from defects in materials and workmanship for a “Warranty Period” period not to exceed twelve (12) months from the date of delivery when the Covered Product is shipped from Hydranautics’ and/or its Affiliates manufacturing site and/or warehouse of finished goods (“Shipping Point”), provided however, as a condition precedent to enforcement of this Warranty, the Buyer demonstrates to the reasonable satisfaction of Hydranautics that the Covered Product and components thereof are used and maintained in accordance with the Product Specification Sheets, product use and restrictions, all Hydranautics published specifications and specified engineering, operating, storage, shipment, and returned goods authorization (“RGA”) procedures, as set forth in the Technical Service Bulletins (“TSBs”) relevant to the Covered Product, posted at <http://www.membranes.com>, (“Website”), and hereby incorporated by reference. Buyer agrees to review such TSBs and to periodically review the website, no less frequently than quarterly, for updates or supplements to the relevant TSBs. The date on which the Warranty Period begins is the “Warranty Start Date.”

海德能公司特此向买方保证，自产品从海德能公司和 / 或其关联方的制造工厂和 / 或成品仓库（“发货点”）发运之日起，在不超过十二（12）个月的“保修期”内，该产品及其零部件不存在材料或工艺缺陷。但，作为执行本保修的前提条件，买方须向海德能公司合理和充分的证明，该产品及其零部件系根据产品规格说明书、产品使用与限制说明、所有海德能公司公布的技术规格以及指定的工程、操作、存储、运输和退货授权（“RGA”）程序进行使用和维护，前述各项规定详见发布于 <http://www.membranes.com>（“美国海德能网”）并通过引用方式并入本条款的与产品相关的《技术服务公告》（“TSBs”）。买方同意审阅此类 TSBs 并定期（频率不低于每季度一次）查阅网站，以获取相关 TSBs 的更新或补充信息。保修期开始之日为“保修起始日”。

III.OTHER WARRANTY CONDITIONS AND LIMITATIONS ON HYDRANAUTICS LIABILITY 其他保修条件及海德能责任限制

A.Should any element(s) of the Covered Product not meet this Warranty, and the Buyer notifies Hydranautics of such deficiency pursuant to the RGA Procedures and the terms and conditions of this Warranty, the sole and exclusive remedy of the Buyer and the sole and exclusive obligation of Hydranautics is limited to and is fully discharged by Hydranautics upon its written confirmation to the Buyer of the deficiency, and Hydranautics’ election, in its sole discretion and within a reasonable time, to do one of the following: (i) to repair defective Covered Product, (ii) to replace defective Covered Product, or (iii) to refund the Buyer a pro-rated amount of the amount paid for defective Covered Product based on the months left under the Warranty Period in Section II,.

若产品的任何部件不符合本保修条款，且买方依据 RGA 程序及本保修条款的条款和条件将上述缺陷通知海德能公司，则买方的唯一且排他性补救以及海德能公司的唯一且排他性义务仅限于以下范围，并在海德能公司履行下述任一选择后即完全履行：海德能公司在收到通知后，应于合理时间内全权酌情决定，并以书面形式向买方确认缺陷后，采取以下任一措施：(i) 修理存在缺陷的产品；(ii) 更换存在缺陷的产品；或 (iii) 根据

第二节规定的保修期剩余月份，按比例向买方退还其为存在缺陷的产品所支付的款项。

B. The Buyer shall follow good engineering practices and Hydranautics' recommendations as listed in the Product Specification Sheet and TSBs on our Website at www.membranes.com.

买方应遵循良好的工程实践以及海德能公司在产品规格说明书和发布于 www.membranes.com 网站的 TSBs 中所列的建议。

C. The Buyer's remedies expressly set forth in this Warranty are the Buyer's exclusive remedies in connection herewith. The Buyer waives all other remedies, statutory or otherwise including, without limitation, the remedies of specific performance or replevin.

买方在本保修条款项下的补救措施明确限定为唯一补救。买方特此放弃所有其他补救途径(无论法定或其他)，包括但不限于实际履行或返还财产之诉等补救权利。

D. All claims by the Buyer under this Warranty ("Claims") shall be deemed "Waived" unless made in writing to Hydranautics within thirty (30) days of when the Buyer learns or reasonably should have learned about the Claim, and notifies Hydranautics pursuant to the RGA Procedures and in accordance with the terms and conditions of this Warranty.

买方依本保修条款提出的所有索赔(“索赔”)若未满足以下条件即视为自动放弃：i) 于买方发现或理应发现索赔事由后三十(30)日内以书面形式通知海德能公司；ii) 严格遵循 RGA 程序及本保修条款的通知流程。

E. Hydranautics' maximum, aggregate, and total liability under this Warranty, whether in contract, tort, or otherwise, shall not exceed the the amount paid for defective Covered Product.

海德能公司在本保修条款项下的最高责任限额(无论基于合同、侵权或其他诉因)均不得超过买方就缺陷产品实际支付的金额。

F. EXCEPT FOR GROSSLY NEGLIGENT OR WILFUL MISCONDUCT, IN NO EVENT WILL HYDRANAUTICS OR ITS AFFILIATES BE LIABLE FOR ANY CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, OR SPECIAL DAMAGES (INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, LOSS OF REVENUES OR PROFITS, LOSS OF USE, COST OF REPLACEMENT, COST OF CAPITAL AND CLAIMS OF CUSTOMERS, INTEREST CHARGES, OR ANY INCREASED COSTS) WHICH ARISE IN CONNECTION WITH THIS WARRANTY. IN NO EVENT SHALL HYDRANAUTICS OR ITS AFFILIATES BE LIABLE FOR PROSPECTIVE PROFITS OR SPECIAL, INDIRECT, CONSEQUENTIAL OR INCIDENTAL DAMAGES, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, LOST TIME, LOST PROFITS, LOST SALES, OPERATING COSTS, PLANT DOWNTIME, OR DAMAGES RESULTING FROM DELAYED SHIPMENT OR MAILING OR THIRD PARTY CLAIMS, ARISING FROM A WARRANTY CLAIM, SALE OF A COVERED PRODUCT, OR FOR ANY DELAY OR FAILURE TO PERFORM DUE TO CAUSES BEYOND ITS REASONABLE CONTROL.

责任排除条款：重大过失或故意不当行为外，海德能公司及其关联方概不承担因本保修引起的任何间接、附带或特殊损害（包括但不限于）：

- 收入 / 利润损失、使用损失、重置成本、资本成本；
- 客户索赔、利息支出、成本增加。

无论何种情况，海德能公司及其关联方均不承担：

- 预期利润损失；
- 特殊 / 间接 / 后果性 / 附带损害（含停工损失、销售损失、运营成本）；
- 因延迟交货、第三方索赔或超出其合理控制范围的原因导致的履约延迟 / 失败所致损害。

G. This Warranty shall not be assigned or transferred by the Buyer without the prior written approval of Hydranautics.

未经海德能公司事先书面同意，买方不得转让或转移本保修条款项下权利。

H. This Warranty shall be governed by and construed according to the laws of the State of California, U.S.A.

本保修条款受美国加利福尼亚州法律管辖并据其解释。

IV.WARRANTY DISCLAIMERS 保修免责声明

A.THIS WARRANTY SUPERSEDES AND REPLACES ANY PREVIOUS WARRANTY MADE OR OFFERED TO THE BUYER BY HYDRANAUTICS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY SET FORTH IN ANY OTHER AGREEMENT BETWEEN THE PARTIES HERETO.

本保修条款取代并废止海德能公司此前向买方作出的任何保修承诺（包括但不限于双方其他协议中规定的任何保修条款）。

B. THIS WARRANTY IS EXCLUSIVE AND IN LIEU OF ANY AND ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND ANY AND ALL SUCH OTHER WARRANTIES ARE HEREBY DISCLAIMED AND EXCLUDED. FURTHERMORE, NO AFFIRMATION OF FACT OR PROMISE MADE BY HYDRANAUTICS, BY WORD OR BY ACTION, SHALL CONSTITUTE A WARRANTY. HYDRANAUTICS' WARRANTY AS SET FORTH HEREIN SHALL NOT BE ENLARGED, DIMINISHED, OR OTHERWISE AFFECTED BY, NOR SHALL ANY OBLIGATION OR LIABILITY ARISE OUT OF HYDRANAUTICS OR ITS AFFILIATES RENDERING TECHNICAL ADVICE OR SERVICE IN CONNECTION WITH THE COVERED PRODUCT SUPPLIED TO THE BUYER.

本保修具有排他性，且替代所有其他明示或默示担保（包括但不限于适销性担保、特定用途适用性担保），特此声明排除并放弃所有此类担保。此外，海德能公司通过言辞或行为作出的任何事实陈述或承诺均不构成担保。本保修条款规定的海德能担保责任不因其关联方向买方提供与产品相关的技术建议或服务而扩大、减

轻或受影响，海德能公司及其关联方亦不因此承担任何责任。

C. EXCEPT FOR THE PROVISIONS SET FORTH IN THIS WARRANTY, NO AGENT, EMPLOYEE, OR REPRESENTATIVE OF HYDRANAUTICS HAS ANY AUTHORITY TO BIND HYDRANAUTICS TO ANY OTHER AFFIRMATION, REPRESENTATION, OR WARRANTY CONCERNING THE PRODUCT SOLD TO THE BUYER. UNLESS AN AFFIRMATION, REPRESENTATION OR WARRANTY IS SPECIFICALLY INCLUDED IN THIS WARRANTY, IT SHALL NOT BE ENFORCEABLE BY THE BUYER.

除本保修条款明确规定外，海德能公司的任何代理、员工或代表均无权就售予买方的产品作出其他承诺、陈述或担保。除非某项承诺、陈述或担保明确载入本保修条款，否则买方无权主张其效力。



△美国海德能公司确信我们提供的信息和数据都是准确和有用的,但由于我们无法控制用户的使用方法和使用条件,因而这里提供的信息和数据仅是出于友好目的,不作为保证值。美国海德能公司不承担由于使用这些信息和数据而产生的后果或损害,用户应自己确认海德能产品对于其特定用途的适应性。

联系我们

上海办事处

电话:(021) 5208 2255

传真:(021) 5208 1910

北京办事处

电话:(010) 6590 0688

传真:(010) 6590 07



关注海德能