

膜技术 在水和废水处理中的应用

Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment

● [英] P.希利斯 编

● 刘广立 赵广英 译

 化学工业出版社
环境科学与工程出版中心

膜技术在水和废水处理中的应用

Membrane Technology in Water
and Wastewater Treatment

[英] P. 希利斯 编
刘广立 赵广英 译

化学工业出版社
环境科学与工程出版中心
· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

膜技术在水和废水处理中的应用/(英)P. 希利斯编;
刘广立, 赵广英译. —北京: 化学工业出版社, 2003.7
书名原文: Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment
ISBN 7-5025-4704-5

I. 膜… II. ①希…②刘…③赵… III. ①薄膜
技术-应用-水处理②薄膜技术-应用-废水处理
IV. ①TU991.2②X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059900 号

Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment/[英]P. Hillis
ISBN 0-85404-800-6

Copyright © 2000 by The Royal Society of Chemistry. All Rights Reserved.
本书中文简体版由 The Royal Society of Chemistry 授权, 由化学工业出版社
独家出版发行。
北京市版权局著作权合同登记号: 01-2002-3665

膜技术在水和废水处理中的应用

Membrane Technology in Water and Wastewater Treatment

[英] P. 希利斯 编

刘广立 赵广英 译

责任编辑: 陈 丽 董 琳

责任校对: 顾淑云

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行

环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787 毫米×960 毫米 1/16 印张 13 字数 266 千字

2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4704-5/X·322

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译 序

膜分离技术被誉为 21 世纪的技术，它必将在分离领域引起一场革命。随着环境污染的加剧和资源的枯竭，人们对水的循环再利用以及深度处理的呼声和要求越来越高。如何将膜技术成功地应用于水处理和水回用的工艺之中，成为广大技术人员、膜制造商、水处理工作者和用户关注的焦点之一。近年来，我国的膜技术在水处理领域中发展迅速，膜法水处理技术已经越来越为人们所接受，但是有关能够反映当代世界上膜技术应用现状和进展的中文书籍还不多。有鉴于此，我们翻译了本书。

2000 年 3 月，水和废水膜技术处理国际会议在英国兰开斯特大学举行。会议主题涉及到膜技术在水和废水应用中的所有方面，包括地下水、地表水、反冲/回用水、海水以及工业废水和城市污水的处理等。本书收录了大会的部分论文，从饮用水处理、膜污染清洗、污水回用和工业水处理方面，详细介绍了当代世界在建的或者已运行的大规模膜法水处理厂的设计和管理经验，列举了在工业废水处理和回用以及城市污水中水回用中部分成功应用的实例，分析了膜技术在实际应用中所遇到的难点或难题，指出了有关问题的应对策略和解决办法，并对膜技术的发展前景从应用角度提出了发人深省的看法。我们认为该原著堪称当代世界有关膜技术在水处理应用中的实践集成，融原理、设计、运行和管理于一体，相信从事膜应用领域的有关研究人员乃至制造厂商都能从中受益。

本书第一、二章由刘广立翻译，第三、四、五章由刘广立、赵广英翻译，第六章由樊青娟翻译，全书由刘广立统校。鉴于我们的能力有限，译不达意乃至错误之处恐在所难免，诚望读者不吝指正。

译者

2003 年 5 月

前 言

本书所有论文都是 2000 年 3 月在英国兰开斯特大学举行的水和废水膜技术处理国际会议所收录的。会议是由英国皇家化学协会水化学论坛、欧洲脱盐协会和 SCI 的分离科学和技术组织、化学工程学院、水和环境管理高等研究院以及英国饮用水检查署共同组织和赞助的。会议的目的是为了把世界各地的膜技术专家聚集在英国，共同讨论并分享膜技术在水工业持续发展的经验，以促进和提高膜技术包括 MF、UF、NF 和 RO 在水处理中的应用。

会议成员包括：

- 水公司
- 工业化运行者
- 工业化设计者和顾问
- 研究和发展组织
- 膜制造商
- 化学品供应商
- 立法机关

本会议涉及到膜技术在水和废水应用中的所有方面，它包括地下水、地表水、反冲/回用水、海水以及工业废水和城市污水的处理。这本书对于 20 世纪末膜技术的现状以及 21 世纪膜技术的发展前景而言，实为不可多得的参考资料。

P. 希利斯
大会主席及编者

内 容 提 要

本书共分六章，分别介绍了膜技术应用实例、膜技术在提高供水水质中的应用、膜污染和清洗、水的回用、工业应用、其他研究和应用方面。本书汇集水和废水膜技术处理国际会议论文，能够反映当代世界上膜技术应用现状和进展。

本书可供水处理工作者，膜生产商以及从事相关研究的技术人员参考，也可供高等院校相关专业师生学习参考。

目 录

第一章 膜技术应用实例	1
第一节 膜技术应用研究的历史、现状和发展前景.....	1
第二节 海水的反渗透处理——英国水工业中最大的水厂应用实例	20
第三节 科威特的饮用水来源分析	26
第四节 纳滤对色度的处理——苏格兰地区七年的运行经验总结	33
第五节 超滤对饮用水中隐孢子虫和贾第鞭毛虫的去除	39
第六节 新一代微滤工艺在大规模的水和废水处理中的应用	45
第二章 膜技术在提高供水水质中的应用	53
第一节 英国饮用水处理药剂的审批系统	53
第二节 浸没式膜工艺处理生活饮用水	56
第三节 微滤对地表水中磷和铁的去除	61
第四节 过滤反冲水回用——超滤处理厂的中试运行	66
第五节 采用混合颗粒预处理提高饮用水微过滤的性能	73
第六节 特伦特河的饮用水处理——传统工艺和膜处理工艺的比较	77
第七节 电渗析在阿姆斯特丹供水中的应用	84
第八节 电渗析技术在地下水处理中的应用	91
第九节 纳滤处理台湾富营养化湖泊水的中试研究	99
第三章 膜污染和清洗	107
第一节 膜和微生物——污染与清洗.....	107
第二节 膜运行操作优化——实践经验.....	115
第三节 膜生物反应器中膜过滤过程的污染特征.....	122
第四节 在水和废水应用过程中膜的清洗.....	128
第四章 水的回用	134
第一节 新世纪水的回用——在世纪穹顶内的膜处理技术.....	134
第二节 废水回用实例研究——外部采办膜系统的优点.....	141
第三节 由外向内过滤的微滤/超滤系统的比较	145
第五章 工业应用	153
第一节 膜技术去除硫酸盐——在贾尼斯油田的应用.....	153
第二节 在脱盐和处理酸性矿井废水及灰渣水方面 SASOL 公司的经验	160
第三节 膜生物反应器技术结合两段反渗透膜进行羊毛洗涤废水的回收.....	166

第四节	ZenoGem® MBR 处理实际工业废水	171
第五节	膜技术在木材、制浆和造纸工业中的应用	177
第六节	石化、能源和造纸工业的水回用实例研究	184
第六章	其他研究和应用方面	190
第一节	膜生物反应器处理废水的应用实例——半错流式超滤装置	190
第二节	高色度废水处理——设计新方法及其应用	191
第三节	采用膜生物反应器处理垃圾渗滤液	192
第四节	木浆废水零排放处理厂的运行	193
第五节	将运行和维护综合于反渗透膜系统设计之中	194
第六节	对 Knostrop 废水的微滤和反渗透的研究	195
第七节	中空纤维膜系统模拟的新方法	196
第八节	低温、低硬度和含腐殖酸的水纳滤处理中的化学预处理方法比较	197
第九节	卷式膜组件污染与清洗过程中的在线超声波检测	198
第十节	采用纳滤和吸附处理印染废水的新方法	200

第一章 膜技术应用实例

第一节 膜技术应用研究的历史、现状和发展前景

J. S. Taylor, Ph. D., P. E.
Alex Alexander Professor of Engineering
Civil and Environmental Engineering Department
University of Central Florida
Orlando, FL 32816
USA

S. J. Duranceau, Ph. D., P. E.
Dir. of Water Quality and Treatment
Boyle Engineering Corporation
320 East South Street
Orlando, FL 32801
USA

一、简介

膜应用研究在膜技术处理饮用水发展过程中起着重要的作用。由于对水质的要求以及消费者的审美观点越来越严格和苛刻,促使水务公司不断寻求新的技术以满足这些需要。在水质法律法规中最重要的是对消毒、消毒副产物和腐蚀的规定。而消费者对公共媒体发布的违例消息中,对饮用水的表观、味道和异味更为关心。在需要采用高级技术以满足更严格的水质标准之前,已经有了完整设计、建设和运行传统水厂的经验,并不需要实例研究。但是今天这种情况已发生了变化。高级处理工艺的建设和运行中供水能力、水质控制和费用估算等问题正是所有发达国家应用技术研究的热点。

二、膜过程综述

对膜技术的理解应建立在对饮用水膜工艺特性理解的基础之上。反渗透(RO)、纳滤(NF)、电渗析(EDR)、超滤(UF)和微滤(MF)都是应用于饮用水处理的膜过程。这些膜过程以及其他过程共同组成了一个完整的膜系统。尽管传统的NF过程包括NF之前的预处理和之后的后处理过程,可以称之为一个统一体,但是我们还是认为这是常规的工艺。微滤和纳滤或者混凝、沉淀和过滤与纳滤结合我们都可以称之为膜工艺系统。表1-1给出了这些过程的各自特点。尽管许多因素影响这些过程对溶液的分离,但是可以通过控制污染和膜过程截留溶液中的小尺寸溶质来满足饮用水的一般要求。

三、水质标准

膜的选择必须满足美国的水质标准的要求。许多饮用水标准与水厂出水中无机物、有机物或者致病溶质的控制有关。表1-2简单给出了在饮用水处理中膜过程应用的适宜

范围。“Yes”表示膜过程能够去除绝大部分标准所规定的特定污染物；“No”则表明膜过程不能够去除所要控制的污染物。

表 1-1 膜过程的特性

膜 过 程	机 理	分 离 下 限	能分离的溶质		
			致 病 菌	有 机 物	无 机 物
电 渗 析	C	0.0001μm	无	无	全部
反 渗 透	S,D	0.0001μm	C,B,V	DBPs,SOCs	全部
纳 滤	S,D	0.001μm	C,B,V	DBPs,SOCs	全部
超 滤	S	0.001μm	C,B,V	无	无
微 滤	S	0.01μm	C,B	无	无

- 注：1. 机理中 C=荷电；S=筛分；D=扩散。
2. 致病菌中 C=贾第虫卵胞；B=细菌；V=病毒。
3. 有机物中 DBPs=消毒副产物先质；SOCs=合成有机物。

表 1-2 膜过程应用于饮用水范围一览表

美国水质标准	膜 过 程				
	电 渗 析	反 渗 透	纳 滤	超 滤	微 滤
SWTR/ESWTR	No	Yes	Yes	Yes	Yes
CR	No	Yes	Yes	Yes	Yes
LCR	No	Yes	Yes	No	No
IOC	Yes	Yes	Yes	No	No
SOC	No	Yes	Yes	Yes	Yes
放射性核素	Yes(-Rn)	Yes(-Rn)	Yes(-Rn)	No	No
DBPR	No	Yes	Yes	No	No
GWDR	No	Yes	Yes	Yes	Yes
砷	Yes	Yes	Yes	No	No
硫酸盐	Yes	Yes	Yes	No	No

- 注：SWTR——地表水处理标准；
ESWTR——强化地表水处理标准；
CR——大肠细菌执行标准；
LCR——铅和铜执行标准；
IOC——无机物执行标准（条款 I、II、IIA、V）；
SOC——合成有机化学物质（基本中性物和抽提物）；
DBPR——消毒副产物执行标准；
GWDR——地下水消毒标准。

水质的感官指标有总硬度、味道或臭味以及色度。一些水质感官指标可以看成是较低的标准或者是那些不影响饮用者健康的标准。表 1-3 给出了常见的居民饮用水感官指标。一旦确定了处理的目标，就可以选择可以满足这些要求的相应的膜系统。根据目前的研究结果可以得到如下一般性结论。

(1) 扩散控制膜——反渗透或纳滤（RO&NF）可以去除无机污染物如总溶解性固体（TDS），总硬度（TH），氯化物等以及消毒副产物先质；

表 1-3 饮用水感官指标膜过程处理一览表

项 目	膜 过 程				
	电 渗 析	反 渗 透	纳 滤	超 滤	微 滤
总溶解性固体	Yes	Yes	Yes	No	No
TH	Yes	Yes	Yes	No	No
T&O	No	Yes	Yes	No	No
TOC	No	Yes	Yes	No	No
色度	No	Yes	Yes	No	No
Fe&Mn	No	Yes	Yes	No	No

(2) 荷电控制膜——电渗板 (EDR) 可以去除 TDS、TH、氯化物等;

(3) 筛分控制膜——UF/MF 可以去除颗粒, 浊度和贾第虫卵胞。

四、应用研究的要求

1. 资料的搜集

应用研究包括在特定目标下考虑生产能力、水质和费用对单个或联合过程的调研。预测并报告生产时的产量和水质则需要项目有关的准确资料。实验室的资料应当和质量控制以及监测的变化结合起来, 确定简洁、准确的实验模型对于合理地解释判断结果是非常重要的。项目文档或工程报告中应当涉及或参考已有的样本分析资料, 运行和采样记录对于现场工作更是有用。运行记录应当有这些条目如运行状况、机械维修等与工厂系统运行相关的活动。采样记录不同于运行记录, 它包括一些特定的数据。现场的数据一般都应包括 pH 值、压力、流量和温度。

2. 生产能力

生产能力对于任何一个水处理工厂都是至关重要的, 它与膜工艺的设计和膜的污染有关系。设计者可以根据不同的处理要求选择不同的膜。一旦确定, 设计者就可以选择合适的膜工艺的运行条件。首先应当考虑的是膜污染对生产能力的影响, 膜污染的机理有沉积、堵塞、吸附和微生物繁殖。表 1-4 给出了根据这些污染机理应采取的一般方法和单元操作。按照预处理的一般要求, 可以得出如下结论。

表 1-4 控制膜污染的预处理方法

污 染 机 理	预 处 理 方 法				
	A/AS	MF/UF	CSF	NH ₄ Cl	去除 AOC
沉积	+	-	-	-	-
堵塞	-	+	+	-	-
吸附	-	+	+	-	-
生物污染	-	-	-	+	+

注: A/AS——加酸或者清洗剂;

MF/UF——微滤或者超滤;

CSF——传统的混凝沉淀工艺;

NH₄Cl——氯化氨;

AOC——可同化有机碳。

(1) 控制污染物沉积对于所有的反渗透/纳滤系统，不管它们是处理地下水或是地表水都是必须的。通常是采用加酸或是清洗剂进行控制。

(2) 控制污染物堵塞对于所有的反渗透/纳滤系统都是必须的，不管它们是处理地下水或是地表水。通常是控制进水浊度小于 0.2NTU，SDI 小于 2。

(3) 控制微生物繁殖对于处理有氧的地表水或地下水都是必须加以考虑的。通常是加入氯化亚氨 (NH_2Cl) 或者是其他灭菌剂。

(4) 当地表水中的 $\text{TOC} > 3 \sim 6 \text{mg/L}$ 时有机污染常常发生，通常通过混凝、沉淀和过滤加以控制。但是有机污染的影响现在还不清楚。

五、膜系统的评价

膜组件的性能可以 (a) 小单元；(b) 台式组件；(c) 工厂生产的形式通过调试膜系统在实验室内或现场测定。小的膜单元过去常常用于测试膜的特性，它并不能反映实际的生产情况。现已有小的膜单元测试结果公开发表。这些结果表明，两段膜过程可以去除大约 4/5 水样中的消毒副产物先质，出人意料的是膜的通量下降速率很高，DOC 受扩散控制。尽管可以将去除消毒副产物先质的实验结果与以往的研究相对比，但是膜的生产能力无法相比较。这些实验结果表明，小的膜单元适宜于膜的分离性能研究，但不适用于评价膜的生产能力。

膜制造商常采用 4 英寸 $\times$ 40 英寸 (101.6mm $\times$ 1016mm) 单元面积、2.5 英寸 $\times$ 40 英寸 (63.5mm $\times$ 1016mm) 单元面积、或者 2.5 英寸 $\times$ 20 英寸 (63.5mm $\times$ 508mm) 单元面积的膜组件用于大规模生产的现场实验。1999 年在美国坦帕市召开的 WQTC 会议上公布了由信息收集系统得到的初步结果。在全美国大概有超过 40 个膜研究实例是按照信息收集系统的要求完成的。这些研究内容包括平板膜实验研究、单个膜组件的现场实验、多级实验工厂以及真实的工厂生产资料。研究表明，无论是一段或是两段膜工艺对消毒副产物先质去除效果均超过了对卤乙酸的去除效果，但是 95% 的 THM (浓度 $40 \mu\text{g/L}$) 可以透过两段膜过程。更高的 THM 浓度则是由于高的溴化物浓度引起的，膜对溴化物的截留率在 0~70% 之间。

膜的应用研究也需要对水和溶质透过膜的质量传输过程进行定量描述。描述单个膜组件流动方程可见式 (1-1) ~ 式 (1-7)。图 1-1 为膜单元计算的参考图。

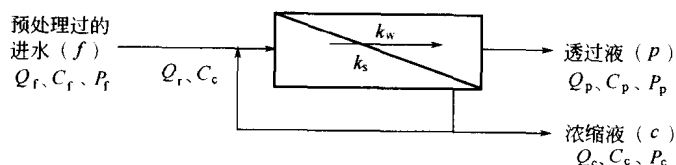


图 1-1 膜单元计算参考图

$$F_w = K_w(\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (1-1)$$

$$F_s = K_s \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (1-2)$$

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (1-3)$$

$$Q_f = Q_c + Q_p \quad (1-4)$$

$$Q_f C_f = Q_c C_c + Q_p C_p \quad (1-5)$$

$$\left[\frac{C_s - C_p}{C_f - C_p} \right] = e^{\frac{F_w}{k}} \quad (1-6)$$

$$r = \frac{Q_r}{Q_f} \quad (1-7)$$

$$C_p = \frac{K_s C_f e^{\frac{F_w}{k}}}{F_w \left[\frac{(1-r)(2-2R)}{2+2r-R} \right] + K_s e^{\frac{F_w}{k}}} \quad (1-8)$$

$$C_p = \Phi C_c \quad (1-9)$$

式中 C —— 浓度梯度, m^3/L , $\Delta C = \frac{C_f + C_c}{2} - C_p$;

C_f —— 进水溶液浓度, m^3/L ;

C_c —— 浓缩液浓度, m^3/L ;

C_p —— 透过液浓度, m^3/L ;

C_s —— 膜面溶质浓度, m^3/L ;

K —— 从膜面到溶液主体的扩散系数, $\text{L}^3/(\text{L}^2 \cdot \text{h})$;

ΔP —— 压差, $\frac{P_f + P_c}{2} - P_p$;

$\Delta \pi$ —— 渗透压, $\frac{\pi_f + \pi_c}{2} - \pi$;

K_w —— 溶质传质系数, $\text{L}^2 \cdot \text{h}/\text{M}$;

F_w —— 清水通量, $\text{L}^3/(\text{L}^2 \cdot \text{h})$;

F_s —— 溶质通量, $\text{M}/(\text{L}^2 \cdot \text{h})$;

K_s —— 溶质质量转移系数, L/h ;

Q_f —— 进水流量, L^3/h ;

Q_c —— 浓缩液流量, L^3/h ;

Q_p —— 透过液流量, L^3/h ;

R —— 回收率;

A —— 膜面面积, L^2 ;

r —— 回流比;

Φ ——筛分系数。

压力驱动膜的质量传输包括对流和扩散两部分。几位研究者给出了膜系统质量传输的模型。这些方程可以用来预测一个膜系统的透过液中水质的变化。虽然已经发现通过膜过滤得到的水已经满足了绝大多数标准的要求,但是根据工厂的资料按照式(1-8)或式(1-9)计算,对于预测膜系统的运行费用还是很有用的。式(1-8)是描述受扩散控制的质量传输过程,它包括无机物如碱度、硬度、TDS、钠盐、氯化物等。式(1-9)用于描述筛分控制的质量传输过程,它包括 TOC、消毒副产物先质,大部分 SOC 和其他有机物。

但是,在坦帕市的地表水处理中对于 CA 和 CTF 膜而言,TOC 表现为受扩散控制。CTF 膜的过滤液中 TOC 很低,膜通量不会受 TOC 的影响,但膜通量的恢复受消毒副产物先质控制;对 CA 膜而言,膜通量和膜的恢复与 TOC 的截留几乎没有关系。

现有的研究清楚地表明连续运行和浓缩液的处理是膜系统的限制性因素。浓缩液的处理实质上是一个法律制度问题,但连续运行是一个研究发展问题。有关处理中等有机物浓度地表水的膜污染资料还是非常不充分的。

污染指数可以用来间接地估计膜系统预处理的要求。一些研究表明在受扩散控制的膜系统中,污染指数并不与膜通量减少的速率成统计性相关。尽管如此,污染指数可以用来得到膜系统预处理要求的大致估算。式(1-10)、式(1-11)和式(1-12)定义了污染密度指数、修正的污染指数和微堵塞因子指数。

$$SDI = \frac{100 \left(1 - \frac{t_i}{t_f} \right)}{T} \quad (1-10)$$

$$MFI = (QV)^{-1} \quad (1-11)$$

$$MPFI = \frac{Q}{t} \quad (1-12)$$

式中 t_i ——从开始到滤出 500ml 时的时间;

t_f ——在结束前滤出 500ml 时的时间;

T —— t_i 和 t_f 之间的时间间隔 (设定 15min);

Q ——流量;

V ——体积。

这些指数可以用于预测 RO 和 NF 膜过程所需要的预处理程度。它们可由在 30psi (1psi = 689Pa) 的恒压下, 0.45 μ m 滤膜透过液对时间的变化而求得。表 1-5 给出了 RO 和 NF 的污染指数的平均值。

这些指数与膜运行过程中的通量或质量传输的减少并没有统计上的相关性,但可作为膜前处理的指导。搜集这些对于估计预处理程度的资料很容易而且花费不大,但可提供与不同水质预处理要求相关的信息。

表 1-5 原水水质

参 数	TWD	BG	MELB	ESL	FM
UV-254/cm ⁻¹	0.8895	0.209	N/A	0.2	0.5
色度/CPU	188	56	480	20	200
TOC/(mg/L)	19.3	6.6	47	4	20
SDS-TOX/(μg/L)	922	310	9000	NA	NA
SDS-TTHM/(μg/L)	1426	253	1866	200	>1000
SDS-HAA6/(μg/L)	2032	234	3561	100	>800
碱度/(以 CaCO ₃ 计,mg/L)	67	148	110	120	100
总硬度/(以 CaCO ₃ 计,mg/L)	90	215	150	120	150
TSS/(mg/L)	4.7	41	N/A	10	5
TDS/(mg/L)	151	332	430	300	400
菌落/(CFU/100ml)	1816	ND	ND	ND	ND
二甲基异茨醇/(ng/L)	<2.0	ND	ND	ND	ND
土味素/(ng/L)	8.4	ND	ND	ND	ND
铁/(mg/L)	0.35	0.0317	0.82	0.3	0.3
Br ⁻ /(mg/L)	0.063	0.07	ND	<0.1	<0.1
Mn/(mg/L)	0.029	<0.002	N/A	ND	ND
Cl ⁻ /(mg/L)	11.6	33.5	100	80	40
硫酸盐/(mg/L)	11.8	60.5	2	80	20
硅/(mg/L)	10.4	6.3	ND	15	15
硝酸盐/(mg/L)	0.16	15.3	N/A	<5	<1
杀虫剂/(g/L)	<1	4.7	N/A	N/A	N/A

连续运行对于膜的成功应用而言是至关重要的。可根据单元运行时间的 K_w 和式 (1-13) 所给出的相关斜率导出的膜生产能力减小的速率来确定膜的生产率。如果操作压力保持不变,膜的生产率可以根据通量随时间的变化计算出来。根据 K_w 随时间的变化,并将由压力确定的膜通量归一化,就可以得到对膜产率的较为真实的评价。由工厂运行数据得到的 K_w 随时间的变化曲线,采用式 (1-13) 或式 (1-14) 可预测膜的清洗频率或周期。上述两种方法的结果都令人满意。图 1-2 给出了这样一条曲线,这是佛罗里达州一个工厂的实际运行数据。以产率或 K_w 下降 10% 为依据,由该曲线确定出膜的清洗频率。

$$K_w = \frac{F_w}{\Delta P - \Delta \pi}, \quad K_w = K_{w_0} - mt \quad (1-13)$$

$$\frac{1}{K_w} = \mu \left[\frac{\Delta P}{F_w} + Et \right] = \frac{1}{K_{w_0}} + A_2 t \quad (1-14)$$

图 1-2 所示的曲线段是从初始时刻起至清洗前的某一运行时刻之间的 MTC 曲线,采用式 (1-13) 按照如下步骤就可以容易地预测它的清洗频率。曲线的斜率即为在生产过程中 MTC 减少的速率。上述数据可以从任一个实验/生产中获得,然后可根据所要

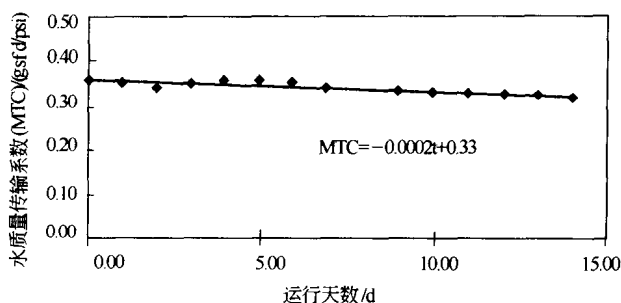


图 1-2 水质量传输系数 (MTC, gsf/d/psi) 随运行时间的变化

求的水质按照信息收集制度的规定确定测定方法，如下所示：

$$K_{w_0} = 0.0317 \frac{\text{gsfd}}{\text{psi}}$$

$$10\% \text{ 的减少量} = 0.1 \times K_{w_0} = 0.03317 \frac{\text{gsfd}}{\text{psi}}$$

$$K_w \text{ 减少的速率} = 0.0002 \frac{\text{gsfd}}{\text{psi} \cdot \text{d}}$$

$$\text{膜清洗频率} = \frac{0.03317 \frac{\text{gsfd}}{\text{psi}}}{0.0002 \frac{\text{gsfd}}{\text{psi} \cdot \text{d}}} = 158\text{d}$$

六、研究实例

所列出的地点均是实际研究项目中涉及到的。所有的研究实例都可称之为整体膜系统的研究，但是在每个整体膜系统中采用的膜的资料可以用于为达到相似水质而进行的单个膜组件的选择。表 1-6 给出了各地的原水水质。

表 1-6 RO/NF 的污染指数范围

污染指数	范围	应用范围	污染指数	范围	应用范围
MFI	0~2	反渗透	SDI	0~2	反渗透
	0~10	纳滤			
MPFI	$0 \sim 3 \times 10^{-5}$	反渗透		0~3	纳滤
	$0 \sim 1.5 \times 10^{-4}$	纳滤			

各地的处理要求与当地的原水水质及相应的规章制度限制有关（见表 1-7）。各地的水源均为地表水。所有的 RO/NF 膜都需要控制堵塞、沉淀或结垢。除了生产性研究之外，还没有合适的可以分别评价分析每个污染机理的方法，来确定有机或生物污染。表 1-8 为各地的研究实例。虽然完全消除某种污染机理是几乎不可能的，但是可以大幅度降低某种污染机理的发生。各地膜污染控制引起的生产能力降低的相互比较为评价各个污染机理提供了帮助。

表 1-7 各地的处理目标

地 区	处 理 目 标							
	胞虫	消毒副产物	TOC	硝酸盐	合成有机物	硬度	色度	浊度
BG	×	×	×	×	×	×	×	×
TWD	×	×	×				×	×
MELB	×	×	×				×	×
ESL	×	×	×				×	×
FM	×	×	×			×	×	×

注：BG——俄亥俄州鲍林格林市；

TWD——佛罗里达州坦帕市；

MELB——佛罗里达州墨尔本市；

ESL——伊利诺斯州东圣路易斯市；

FM——佛罗里达州迈尔斯堡市。

表 1-8 预处理和纳滤

地 点	预 处 理											
	A/AS	CSF	CS	ILC	GF	UF	MF	NH ₄ Cl	BAC	TFC1	TFC2	CA
BG-1	×	×								×		
BG-2	×					×				×		
BG-3	×						×			×		
BG-4	×			×		×				×		
BG-5	×		×			×				×		
TWG-1	×	×								×		
TWG-2	×	×						×		×		
TWG-3	×	×										
TWG-4	×	×						×				×
TWG-5	×						×			×		×
TWG-6	×						×	×		×		
TWG-7	×						×					×
TWG-8	×						×	×				×
TWG-9	×			×			×			×		
TWG-10	×			×			×	×		×		
TWG-11		×		×			×	×				×
ESL-1	×	×						×		×		
ESL-2	×	×						×			×	
ESL-3	×	×						×				×
MELB-1	×	×								×		
MELB-2	×	×									×	
MELB-3	×						×			×		
MELB-4	×							×	×	×		
MELB-5	×							×	×		×	
FM	×				×					×		