

■ 冯逸仙 编著

Water Treatment

反渗透水处理 系统工程



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

反渗透水处理 系统工程

■ 冯逸仙 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书详细阐述了反渗透水处理的基本原理,预处理,污染和结垢的控制,膜元件(组件)的选择,反渗透装置的设计、调试、运行、清洗、维护和系统诊断技术,后处理等。书中的大量实例和图表资料,为专业人员提供了翔实的工作依据。

本书可供电力、石化、电子、制药、食品、饮料、环保等行业的水处理专业技术人员和高等院校师生参考、使用,并可作为培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

反渗透水处理系统工程/冯逸仙编著. - 北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-2622-9

I. 反… II. 冯… III. 水处理 - 技术 IV. TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 138995 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

三河市宏达印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 2 月第一版 2005 年 2 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 10.875 印张 286 千字 1 插页

印数 0001—4000 册 定价 38.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



作者简介

冯逸仙 高级工程师,先后在(北京)华北电力设计院、深圳能源集团从事技术、管理工作。期间,以职业经理人的身份,分别出任环境工程有限公司(国营)、水处理技术公司(独资)的总经理。于1997年和2000年由中国电力出版社出版了专著《反渗透水处理》和《反渗透水处理工程》。

联系电话:13802256320

E-mail:robbiefeng@163.net



《反渗透水处理系统工程》是冯逸仙先生在推出其专著《反渗透水处理》和《反渗透水处理工程》之后的第三本专著。可以说，第一本专著《反渗透水处理》，使业界对冯逸仙先生本人有初步的了解，该书有力地推动了反渗透水处理技术在我国广泛应用；第二本专著《反渗透水处理工程》，扩大了冯逸仙先生在业界的影响；我相信冯逸仙先生的第三本专著《反渗透水处理系统工程》，将进一步促进我国反渗透水处理技术的发展和提高。

采用反渗透技术是纯水制备的发展方向，而冯逸仙先生是我国较早接触该技术并发表文章介绍该技术的应用专家之一。他不仅身体力行地实践反渗透应用技术，而且注重把反渗透技术的实践经验上升为理论总结，这也是前两部作品畅销的原因，我相信本书同样会深受有关技术人员的喜爱。

冯逸仙先生每隔几年推出一本专著，而每一本又比前一本有更多新的实践内容，此书介绍了近年来他成功地采用大型反渗透+EDI（电连续再生装置）这一先进水处理系统的实践经验。可以说，冯逸仙先生为推动先进的反渗透水处理工艺在我国的广泛应用做出了积极的贡献。

实践与理论的良好结合，是发展生产力的强大动力。冯逸仙先生从事过设计、运行、调试、安装、设备制造等水处理环节的各个方面的工作。他既深入地实践反渗透应用技术，又敢于实践一些新的水处理技术，对传统的离子交换水处理系统也有独到的见解，所有这些均可从本书中得到体现。因此，冯逸仙先生在水处理应用技术的实践和理论的结合方面是比较出色的年轻学者和应用专家之一。

冯逸仙先生不仅自己努力刻苦钻研技术，而且乐于培养新

人，所培养的新人已引起业界的关注。我认识冯逸仙先生多年，他在顺境中十分勤奋，在逆境中也十分努力。我十分高兴为冯逸仙先生的新著《反渗透水处理系统工程》作序，是因为我们的时代是人才辈出的时代，希望“长江后浪推前浪”，年轻一代更有作为，也希望有更多像冯逸仙先生这样的年轻学者和应用专家为推动高新水处理技术在我国的应用和发展贡献自己的才智。

中国工程院院士

高从堦

2004年10月8日



反渗透水处理技术是当代先进的水处理脱盐技术，其应用领域越来越广泛。它广泛应用于电力、化工、石油、饮料、钢铁、制药、电子、市政、环保等行业，既用于生产锅炉补给水和饮用水、淡化海水、制备电子级超纯水，也用于废水处理、物质回收与浓缩的分离过程等领域。

反渗透水处理技术成功应用于各领域，在很大程度上是由于其操作简单和运行经济。它与许多高科技产品一样，技术含量高，科技附加值高，但其使用易于掌握。对水质有严格要求的应用领域，如电子（超大规模集成电路用水水质要求电阻率大于 $17\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ；总有机碳含量 TOC 小于 1mg/L ，甚至小于 0.5mg/L ）、电力 [大容量高参数机组的锅炉补给水要求电导率小于 $0.2\ \mu\text{S/cm}$ (25°C)，二氧化硅小于 0.02mg/L]，反渗透设备可作为预脱盐装置。反渗透除盐较其他预除盐装置，如蒸发器、电渗析等，有着独到的特点和优势。它的使用，极大地延长了传统的离子交换设备的再生周期，减少了酸碱的排放量，有利于当地的环境保护。它既可大大降低运行人员的劳动强度，又可进一步提高整个水处理工艺的运行水平和自动化程度。在进水水质和当地条件许可的情况下，采用“超滤 + 反渗透 + 电去离子装置 (EDI)”系统可告别酸碱，工艺更符合环保要求。应该指出，反渗透技术用于海水淡化有着不可替代的优势，它在国外已得到广泛的采用，在我国也已起步。具有一定规模的海水淡化系统的制水成本已大幅度地下降，反渗透技术在海水淡化方面必将有更大的作为，特别是沿海缺水地区。

随着反渗透技术应用的增多，反渗透国产化工作日益得到重视，国产化率越来越高，但是在反渗透除盐的关键部件——反渗

透膜元件方面，国产产品无论是在脱盐率、透水量上，还是在稳定性、使用寿命上，比起当今世界先进的膜元件均有一定的差距。反渗透低压膜、超低压膜（或抗污染膜）的使用，大大地降低了运行成本，尤其是电力费用，并更新了人们的观念，以至于认为对水中含盐量超过 100mg/L 的原水采用反渗透作为预除盐也是经济合理的（DL/T 5068《火力发电厂化学设计技术规程》条文说明中指出，在美国的价格条件下，原水总溶解固形物大于 75mg/L 时，采用反渗透除盐是经济的）。

反渗透装置要长期安全运行，一是必须重视预处理，使预处理出水满足反渗透进水的要求；二是重视反渗透装置的内在质量，如膜元件（组件）及数量的合理选择、膜组件的合理排列组合等。在此基础上，出色的反渗透装置制造厂家需要考虑装置的顺畅、美观，让人们对象反渗透装置的内在质量要求与外观要求和谐、统一起来。

在现实社会中，反渗透装置及其水处理工程不成功的例子时有发生，这就提醒用户选择合作伙伴——水处理工程公司时，既要看其业绩、一般技术、质量、服务、价格，更要看其有无处理个案问题的能力，标志就是有无具有实力的技术带头人。在货比三家时，既要考虑一次投资，又要考虑维修费用、运行费用。选择经济、安全的水处理工艺，可为用户持续创造价值。

本书是在《反渗透水处理》和《反渗透水处理工程》的基础上，进一步充实了新的实践内容和应用技术，使之更贴近实践，因而起名《反渗透水处理系统工程》。《反渗透水处理》和《反渗透水处理工程》两本书出版后，很快脱销，这成为本人编著《反渗透水处理系统工程》的动力，因为把最新应用技术介绍给读者和推动最新技术的应用是本人的追求。本书的出版，希望有助于进一步提高工程技术人员业务水平，并加深他们对反渗透技术的理解，有助于进一步推动反渗透技术在我国水处理行业的广泛应用。

本书在编写过程中，得到李嘉斌工程师、吴健濮高工和北京

恒新创源水处理公司有关的大力支持。尤其荣幸的是，膜法水处理领域的惟一一位中国工程院院士高从堦先生亲自为本书作序。在此一并表示深深的谢意。

限于水平，书中疏漏和不足之处在所难免，希望读者给予指正。

冯远仙

2004年5月8日



序
前言

第一章 反渗透预处理	1
一、反渗透预处理的必要性	1
二、反渗透的水源	2
三、反渗透进水水质	8
四、衡量反渗透进水水质的重要指 标 SDI 值	9
五、反渗透预处理一般原则的制定	11
第二章 反渗透水处理原理	14
一、反渗透基本原理	14
二、渗透压	16
三、反渗透系统中水的流量和物料平衡	17
第三章 反渗透膜元件的选择	21
一、反渗透与其他膜过滤	21
二、膜的构型	24
三、膜元件（组件）的性能参数	29
四、影响膜元件（组件）性能参数的因素	38
五、膜的特性	41
六、膜的透过机理	47
七、膜元件的选择	48

第四章 反渗透设备本体的设计	57
一、装置设计时应考虑的因素	57
二、膜组件的选用	57
三、RO 本体框架	64
四、压力管路	66
五、高压泵	67
六、系统电气	70
七、系统控制	70
八、膜组件的排列组合	75
九、系统运行压力的计算	103
十、系统渗透水质量的估算	106
第五章 防止反渗透膜污染	107
一、水的混凝与沉淀处理	107
二、水的过滤处理	126
三、水的氯化处理	146
四、水中铁的去 除	152
五、微滤 (MF) 和超滤 (UF)	155
六、海水预处理	157
第六章 控制反渗透膜结垢	162
一、膜的兼容性	162
二、给水的加酸处理	163
三、给水的加阻垢剂处理	181
四、硅垢的确定	190
五、反渗透预处理小结	193
第七章 反渗透膜的清洗	196
一、清洗的必要性	196

二、清洗条件	196
三、常见的膜污染物与清洗药剂	197
四、清洗系统的设计	202
五、清洗要求	204
六、清洗液的配制	205
第八章 反渗透系统的调试、运行与维护	206
一、反渗透装置的调试	206
二、反渗透装置的运行	208
三、影响反渗透装置运行的因素	211
四、反渗透装置的维护	215
第九章 反渗透系统的诊断技术	229
一、标准系统脱盐率下降的原因	229
二、标准系统压差增加的主要原因	237
三、标准系统脱盐率下降的工况	239
四、标准渗透水流量下降的工况	241
第十章 反渗透后处理	243
一、完全除盐	243
二、pH值的调节	256
三、减轻腐蚀	258
四、消毒杀菌	260
五、EDI技术	264
六、其他处理方法	268
第十一章 反渗透水处理的应用	269
一、在火力发电厂中的应用	269
二、在饮料行业中的应用	287
三、预处理 + RO + 阳床、阴床、混床的	

典型工艺系统应用	293
四、预处理 + RO + EDI 工艺系统的应用	302
附录	309
附录一 国家生活饮用水水质标准 (摘自 GB 5749—1985)	309
附录二 生活饮用水水源水质标准 (摘自 CJ 3020—1993)	310
附录三 国家瓶装饮用纯净水 (水质) 标准 (摘自 GB 17323—1998)	312
附录四 国家瓶装饮用纯净水卫生标准 (摘自 GB 17324—1998)	313
附录五 国家饮用天然矿泉水 (水质) 标准 (摘自 GB 8537—1995)	314
附录六 常用元素的原子序数及原子量	317
附录七 有关单位的换算	318
附录八 常用药剂的性能	321
附录九 常用溶液的密度	323
附录十 一些溶液的浓度与其电导率的关系	325
附录十一 一些溶液的浓度与其渗透压的关系	328
附录十二 电子和半导体行业的用水要求 (ASTMD 5127—1999)	329
附录十三 一些难溶盐的溶度积	331
附录十四 水处理用 001×7 强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂 (氢型) / (钠型) 技术要求 (摘自 DL/T519—2004)	332
附录十五 水处理用 201×7 强碱性苯乙烯系阴离子交换树脂 (氢氧型) / (氯型) 技术要求 (摘自 DL/T519—2004)	333
参考文献	335

第一章

反渗透预处理

反渗透 (reverse osmosis, RO) 系统包括水的预处理、反渗透装置处理、反渗透出水的进一步处理 (简称后处理) 三部分。反渗透系统选择与其他水处理工艺选择一样, 是需要考虑诸多因素的一个过程, 所不同的是, 反渗透装置对水的预处理有其特定的要求, 对后处理也根据反渗透装置出水的特点进行考虑。

反渗透系统选择就是对于指定的水源, 在最有竞争力造价下, 选择可满足所需水质的水处理工艺。该水处理流程的选择应考虑下列因素: 水源质量; 希望的产品水质量; 工艺设备的可靠性; 运行要求和人员素质; 适应水质改变和设备故障的能力; 处理设备的备用情况; 废液的处置与排放; 投资和运行费用; 具有可靠的监测手段。

反渗透系统是一个整体, 每一个处理工艺都是互相联系的, 一环扣一环。前一个处理工艺的效果可能影响下一个处理工艺, 甚至整个处理工艺的最终水质。例如, 化学药品混合得好坏和水的混凝效果会影响过滤效果。

整个水处理系统可以根据水处理流程中所承担的功能进行分组, 明确每个单元处理工艺的水质目标, 从而达到整个系统的最终水质要求。

一、反渗透预处理的必要性

合适的预处理, 对反渗透装置长期安全运行是十分重要的。有了满足反渗透进水水质要求的预处理, 就可以确保: 产品水 (渗透水) 流量维持稳定; 脱盐率维持在某一值上的时间较长; 产品水回收率可以不变; 运行费用做到最低; 膜使用寿命较长等。

具体来说，反渗透预处理是为了做到：

(1) 防止膜表面上污染，指防止悬浮杂质、微生物、胶体物质等附着在膜表面上或污堵膜元件水流通道的。

(2) 防止膜表面上结垢，因为反渗透装置运行中，由于水的浓缩，有一些难溶盐如 CaCO_3 、 CaSO_4 、 BaSO_4 、 SrSO_4 、 CaF_2 等沉积在膜表面上。

(3) 确保膜免受机械和化学损伤，以使膜有良好的性能和足够长的使用寿命。

也就是说，反渗透系统的效率和寿命与原水的预处理效果密切相关。预处理就是要把进水对膜的污染、结垢、损伤降到最低，从而使反渗透系统的产水量、脱盐率、回收率、运行成本达到最优。

二、反渗透的水源

1. 水源的分类

地球的总面积约为 5.1 亿 km^2 ，其中海洋面积占 70.8%，海洋的平均深度约为 3800m，海水的总体积约为 13 亿 km^3 ，海水占地球总水量的 97% 以上，其余约 3% 的水量分布在空气、江河、湖泊、冰川及地下。

反渗透水源一般有地表水和地下水两种。地表水包括的范围很广，诸如江河、湖泊、水库、海洋等，而地下水则是由雨水和地表水经过地层的渗流而形成的，存在于土壤和岩石内。地表水和地下水统称为天然水。

2. 水源的质量

地球上的水源分布及水质情况见表 1-1。

反渗透系统水回收率、渗透水质量以及设备维护要求，在很大程度上取决于水源的质量。了解水源质量的变化有助于成功地设计反渗透预处理和反渗透本体系统。

标准的海水水质分析见表 1-2。含盐量为 35000mg/L 的海水称为标准海水，全世界范围大多数海水成分几乎均与表列相似，



表 1-1 地球上的水源分布及水质情况

水 源 分 布		水 量		水质 (含盐量, mg/L)
		体积 ($\times 10^9 \text{ m}^3$)	百分比 (%)	
空气中水汽		12900	0.001	—
地 表 水	江河, 湖泊	230000	0.017	100 ~ 500 ^①
	冰 川	29120000	2.157	—
	海 洋	1318720000	97.2	28000 ~ 35000
地下水		8616600	0.625	300 ~ 10000
合计		1356699500	100.00	—

①部分雨水稀少地区, 地表水含量可达 1000 ~ 5000mg/L, 某些内陆湖水含盐量可高达 40000mg/L 以上。

表 1-2 标准海水化学成分 mg/L

阳离子		阴离子	
名称	含量	名称	含量
Ca^{2+}	410	硅	0.04 ~ 0.08
Mg^{2+}	1310	Cl^-	19700
Na^+	10900	SO_4^{2-}	2740
K^+	390	F^-	1.4
Ba^{2+}	0.05	Br^-	65
Sr^{2+}	13	NO_3^-	< 0.7
Fe	< 0.02	HCO_3^-	152
Mn^{2+}	< 0.01	TDS	35000
		pH	8.1

但 TDS 值变化范围较大。如 TDS 值可由波罗的海的 7000mg/L 到红海和阿拉伯海湾的 45000mg/L, 它的海水实际化学成分均可由表 1-2 所列的成分按比例估算出来。这就是说海水相对组成具有恒定性, 这是海水性质的重要规律。

某地表水水质分析见表 1-3 和表 1-4。



表 1-3

新疆某地表水水质

mg/L

阴离子		阳离子	
名称	含量	名称	含量
SO ₄ ²⁻	209	Ca ²⁺	72.3
Cl ⁻	151.5	Mg ²⁺	59.2
HCO ₃ ⁻	305	Na ⁺	138
NO ₃ ⁻	3.5	K ⁺	7.4
F ⁻	0.16	Sr ²⁺	0.76
NO ₂ ⁻	< 0.2	Ba ²⁺	0.068
可溶硅	6.36	Al ³⁺	0.33
胶硅	< 0.5	NH ₄ ⁺	< 0.2
COD _{Cr}	42.3	铁	0.038
pH	7.36	铜	0.01
电导率 (μS/cm)	1367		

表 1-4

山东某地水质全分析表

工程名称		山东某热电厂							
原水类型		地下水							
取样位置	取样深度		取样时间	2002.4	取样水温	20℃	样品外观	透明	
数量 项目	单位	mg/L	mg/L (CaCO ₃)	mmol/L	数量 项目	单位	mg/L	mg/L (CaCO ₃)	mmol/L
		阳离子	K ⁺	2.12				0.054	
	Na ⁺	359.96		15.657	总溶解固体 TDS				
	Mg ²⁺	75.49		6.212	悬浮固体	8NTU			
	Ca ²⁺	68.77		3.434	电导率 (25℃, μS/cm)				
	Fe ²⁺	0.48		0.0256					
	Fe ³⁺				总硬度		482.62		
	Ba ²⁺				碳酸盐硬度		408.66		
	Sr ²⁺	1.85			非碳酸盐硬度		73.96		