

QUANMO SHUICHULI JISHU

全膜水处理技术

周柏青 主编
ZHOUBAIQING ZHUBIAN



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

周柏青 主编

全膜水处理技术



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

· 内 容 提 要 ·

本书系统地介绍了微滤、超滤、反渗透和电除盐等四种膜分离技术。全书共十三章,内容包括微滤、超滤、反渗透的理论与应用技术、电除盐设备、电除盐系统的设计与运行等。为了方便读者了解电除盐的原理,书中还介绍了离子交换和电渗析的基本原理。

本书可供从事水处理系统设计、安装、调试、运行、维护的工程技术人员及管理人员阅读使用,也可作为现场运行、检修人员的培训教材,亦可供高等院校水质工程、环境工程、水务工程、给水排水等专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全膜水处理技术/周柏青主编. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3660-7

I. 全… II. 周… III. 工业用水—膜—分离—水处理 IV. TQ028.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 119462 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 460 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 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)



周柏青，任武汉大学教授，水质工程系主任，中国锅炉水处理协会副理事长和水处理技术杂志编

委等职。湖北省优秀教师和武汉大学优秀研究生导师。研究领域涉及膜分离、循环冷却水处理、离子交换除盐、炉水水质调节和除垢防垢。已出版《电厂化学》等科技著作3部，发表论文近50篇。



近年来,水处理应用技术取得了跨越式的发展,重要标志是膜技术的大量应用。膜技术用于水处理工程,工艺简单、运行维护方便、环境友好、产品水质量稳定可靠,受到了普遍欢迎。

微滤、超滤、反渗透和电除盐是目前水处理领域中最常用的四种膜分离技术,本书详细地介绍了它们的基本原理、特点、设备构造和工艺组成。与传统混凝、澄清、过滤、除盐技术相比,这四种膜分离技术可称之为新的水处理技术。技术就是生产力,膜技术的应用促进了水工业的发展;水处理中膜技术的应用,反过来为进一步完善膜分离技术积累了许多经验。经验教训是宝贵的,本书从用户的角度出发,试图全面总结这4种技术在工程实践中的经验教训,旨在提高从业人员的运行、维护水平。

目前,我国水污染问题十分突出,水处理对象千差万别。在实际工程中,仅用传统技术往往不能解决问题,需要与新的水处理技术结合使用。掌握膜分离技术,有助于我们设计出形式多样、日臻完美的水处理系统。

笔者将主要设备为膜分离装置的水处理系统称为全膜水处理系统,该系统所涉及到的膜技术称全膜水处理技术。值得指出的是,绝对的全膜水处理系统在生产中很难实现,水处理工艺发展的趋势是新老技术的交叉、融合,为的是扬长避短。因此,全膜水处理系统可以认为是以膜技术为主要水处理手段的一种水处理系统。

目前,有关电除盐设备内部的物理化学过程的研究并不充分,虽然可以把电除盐设备中的传质过程看成是离子交换过程和电迁移过程的叠加,但尚没有建立起将两者统一起来的成熟理论。为此,本书在第九章、第十章介绍了离子交换过程,第十一章介绍了电迁移过程。

本书由武汉大学周柏青主编并统稿,参加编写的有南阳理工学院周晓蔚(第一、七、八章)、海军工程大学王晓伟(第二、三、五章)、武汉大学的周柏青(第二、四~八、十一章)、武汉大学夏中明(第十、十二章)、武汉大学陈志和(第十章)、武汉艺达水处理有限公司邹向群(第十二、十三章)。

欧梅塞尔(北京)膜技术有限公司技术副总裁仝志明博士(第一~八章、第十一~十三章)、武汉大学钱达中教授(第九、十章)对本书进行了认真的审阅,并提出了不少宝贵的意见,在此谨表示诚挚的谢意!

本书涉及面较广,加之编者水平所限,错漏之处,敬请读者批评指正。

编 者

2005年3月



前言

第一章 除盐技术	1
第一节 除盐水	1
第二节 除盐技术	6
第三节 集成膜水处理技术	9
第二章 微滤	11
第一节 概述	11
第二节 微滤原理	12
第三节 微滤膜及组件	14
第四节 微滤在水处理中的应用	21
第三章 超滤	19
第一节 概述	29
第二节 超滤原理	30
第三节 超滤膜与超滤组件	34
第四节 超滤过程污染与控制对策	43
第五节 运行与维护	48
第六节 超滤工艺	52
第七节 超滤在水处理中的应用	54
第八节 MBR 及其应用	67
第四章 反渗透膜分离的技术基础	72
第一节 反渗透脱盐的基本原理	72
第二节 反渗透膜选择性透过原理	73
第五章 反渗透膜	85
第一节 反渗透膜的制作	85
第二节 反渗透膜的结构、分类	92
第三节 反渗透膜的商品牌号	95
第四节 反渗透膜的性能	97
第五节 膜污染	104

第六章 反渗透装置	108
第一节 膜元件(膜组件)	108
第二节 卷式反渗透膜元件	110
第三节 中空纤维膜组件	117
第四节 板式反渗透膜组件	119
第五节 管式膜组件	120
第六节 膜组件的排列形式	123
第七章 反渗透水处理系统	126
第一节 反渗透系统中的预处理	126
第二节 反渗透本体系统	138
第三节 反渗透后处理	149
第八章 反渗透的应用技术	156
第一节 反渗透装置的运行	156
第二节 反渗透装置的维护	158
第三节 反渗透技术在脱盐领域的应用	167
第四节 反渗透系统故障举例	187
第九章 离子交换原理	190
第一节 离子交换树脂	190
第二节 树脂的物理与化学性能	194
第三节 离子交换平衡	199
第四节 离子交换动力学	204
第十章 离子交换除盐	207
第一节 动态离子交换过程	207
第二节 水的阳离子交换处理	211
第三节 复床除盐	215
第四节 水的脱气处理	221
第五节 混合床除盐	224
第十一章 电渗析技术	228
第一节 离子交换膜	233
第二节 电渗析理论	233
第三节 电渗析的物理化学过程	237
第四节 电渗析装置	241
第五节 预处理工艺	245

第六节 电渗析系统的运行与管理	247
第十二章 EDI 装置	251
第一节 EDI 模块的分类	251
第二节 EDI 模块的结构特点	257
第三节 EDI 装置的设计	260
第四节 EDI 装置的辅助系统	273
第五节 EDI 装置的控制系统	274
第十三章 EDI 的应用技术	276
第一节 RO 与 EDI 装置的联合应用	276
第二节 EDI 装置的运行	279
第三节 影响 EDI 装置运行效果的因素	282
第四节 EDI 装置的维护	285
第五节 EDI 装置的清洗与消毒	286
第六节 EDI 模块的再生	288
第七节 EDI 工程应用实例	289
参考文献	294

第一节 除盐水

一、除盐水

除盐水是指利用各种水处理工艺，除去悬浮物、胶体和无机的阳离子、阴离子等水中杂质后，所得到的成品水。除盐水并不意味着水中盐类被全部去除干净，由于技术方面的原因以及制水成本上的考虑，根据不同用途，允许除盐水含有微量杂质。除盐水中杂质越少，水的纯度越高。生产实践中，人们从除盐水的概念出发，使用了不同称呼以区分除盐水的纯度差异。例如锅炉给水处理中，通常将电导率小于 $3\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C) 的水称为蒸馏水，将电导率小于 $5\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)、 SiO_2 含量小于 $100\mu\text{g}/\text{L}$ 的水称为一级除盐水，电导率小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)、 SiO_2 含量小于 $20\mu\text{g}/\text{L}$ 的水称为二级除盐水，电导率小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)， Cu 、 Fe 、 Na 含量小于 $3\mu\text{g}/\text{L}$ ， SiO_2 含量小于 $3\mu\text{g}/\text{L}$ 的水称为高纯水或超纯水。

水中含盐是水导电的原因。水的含盐量越大，电阻越小，导电能力越强，或者说，水导电能力的强弱正是水含盐量高低的必然反映。水的导电能力很容易用电导率仪测定。可以用水的电导率衡量水的纯度。因为水温对电导率的影响比较大，一般水温每增加 1°C ，电导率增加 2% 左右，所以电导率应注明水温。各种离子导电能力有差异，故电导率相同的水，杂质种类及其含量也可能不同。 25°C 时仅由水电离的 H^+ 和 OH^- 所产生的电导率为 $0.055\mu\text{S}/\text{cm}$ ，此值是除盐水纯度的理论极限。电导率与电阻率互为倒数，即电导率 = $1/\text{电阻率}$ ，例如， $0.2\mu\text{S}/\text{cm} = 5\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

上述有关除盐水的定义以及水质标准目前尚未完全统一，尤其是不同行业间差别明显。例如，有的行业将电导率小于 $0.1\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)、 pH 值为 $6.8 \sim 7.0$ 及去除其他杂质和细菌的水称为高纯水。在某些行业，除盐水又称为纯水、脱盐水、无盐水和纯化水。

二、电力工业对除盐水的水质要求

在电力行业，除盐水主要用于发电厂的锅炉补给水。此外，除盐水还可作为发电机冷却水、空冷机组冷却水和化验室用水。

1. 工业锅炉补给水水质

原水经过各种方法净化处理后，用来补充火电厂汽水损失的水，称为锅炉补给水。锅炉补给水按其处理方法的不同，又可分为软化水、蒸馏水和除盐水等。这里，原水又称生水，是指未经任何处理的天然水（如江河水、湖水、地下水等）。为了防止发电厂水汽系统（如锅炉、过热器、汽轮机、高压及低压加热器等）结垢、腐蚀和积盐，锅炉补给水应以不影响给水质量为标准。锅炉对给水水质要求与锅炉压力有关，压力越高，对水质要求越严。

(1) 给水的电导率、硬度、溶解氧、铁、铜、钠和二氧化硅，应符合 GB/T 12145—1999《火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量》所规定的锅炉给水质量标准，见表 1-1。液态排渣

炉和原设计为燃油的锅炉，其给水的硬度、铁和铜的含量，应符合比其压力高一级锅炉的规定。对于蒸汽中二氧化硅含量的要求：压力在 3.8~18.3MPa 的锅炉，应不超过 20 $\mu\text{g/L}$ ；压力在 18.4~25.0MPa 的直流炉，应小于 15 $\mu\text{g/L}$ ，期望小于 10 $\mu\text{g/L}$ 。

(2) 给水的 pH 值、联氨和油，应符合 GB/T 12145—1999 的规定，见表 1-2。另外，对于压力在 3.8~5.8MPa 的机组，加热器为钢管，其给水 pH 值可控制在 8.8~9.5；对于以“石灰 $\rightarrow$ 钠离子交换”水为补给水的锅炉，应改为控制汽轮机凝结水的 pH 值，最大不超过 9.0；对于压力大于 12.7MPa 的锅炉，其给水的总碳酸盐(以二氧化碳计算)应小于或等于 1mg/L。

(3) 直流炉加氧处理的给水 pH 值、电导率、溶解氧和油，应符合 GB/T 12145—1999 的规定，见表 1-3。

表 1-1 锅炉给水质量标准

炉型	锅炉过热蒸汽压力 (MPa)	电导率(氢离子交换后, 25℃, $\mu\text{S/cm}$)		硬度 ($\mu\text{mol/L}$)	溶解氧 ($\mu\text{g/L}$)	铁 ($\mu\text{g/L}$)	铜 ($\mu\text{g/L}$)		钠 ($\mu\text{g/L}$)		二氧化硅 ($\mu\text{g/L}$)	
		标准值	期望值	标准值	标准值	标准值	标准值	期望值	标准值	期望值	标准值	期望值
汽包炉	3.8~5.8	—	—	≤ 2.0	≤ 15	≤ 50	≤ 10	—	—	—	应保证蒸汽中二氧化硅符合标准	
	5.9~12.6	—	—	≤ 2.0	≤ 7	≤ 30	≤ 5	—	—	—		
	12.7~15.6	≤ 0.30	—	≤ 1.0	≤ 7	≤ 20	≤ 5	—	—	—		
	15.7~18.3	≤ 0.30	≤ 0.20	≈ 0	≤ 7	≤ 20	≤ 5	—	—	—		
直流炉	5.9~18.3	≤ 0.30	≤ 0.20	≈ 0	≤ 7	≤ 10	≤ 5	≤ 3	≤ 10	≤ 5	≤ 20	—
	18.4~25.0	≤ 0.20	≤ 0.15	≈ 0	≤ 7	≤ 10	≤ 5	≤ 3	≤ 5	—	≤ 15	≤ 10

表 1-2 给水 pH 值、联氨和油的标准

炉型	锅炉过热蒸汽压力 (MPa)	pH 值 (25℃)	联氨 ($\mu\text{g/L}$)	油 (mg/L)
汽包炉	3.8~5.8	8.8~9.2	—	< 1.0
	5.9~12.6	8.8~9.3 (有铜系统) 或 9.0~9.5 (无铜系统)	10~50 或 10~30 (挥发性处理)	≤ 0.3
	12.7~15.6			
	15.7~18.3			
直流炉	5.9~18.3	9.0~9.5 (无铜系统)	20~50	< 0.1
	18.4~25.0			

表 1-3 给水 pH 值、电导率、溶解氧和油的标准

处理方式	pH 值 (25℃)	电导率 (氢离子交换后, 25℃, $\mu\text{S/cm}$)		溶解氧 ($\mu\text{g/L}$)	油 (mg/L)	
		标准值	期望值			
中性处理	7.0~8.0 (无铜系统)	≤ 0.20	≤ 0.15	50~250	≈ 0	
联合处理	8.5~9.0 (有铜系统)			30~200		
	8.0~9.0 (无铜系统)					

2. 水内冷发电机的冷却水水质

这里所述的冷却水是指冷却发电机空芯铜导线的水, 因为这部分水在导线空芯中流动, 故又称内冷水, 它包括发电机定子绕组内冷水和发电机转子绕组内冷水。为了防止铜导线腐蚀和结垢, 避免空芯铜导线堵塞, 保证内冷却水系统的绝缘性能, 内冷水必须用除盐水, 其水质要求见 GB/T12145—1999 中的水内冷发电机的冷却水质量标准。

(1) 双水内冷和转子独立循环的冷却水质量, 应符合表 1-4 的规定。

表 1-4 给水 pH 值、联氨和油的标准

电导率 (25℃, $\mu\text{S}/\text{cm}$)	铜 ($\mu\text{g}/\text{L}$)	pH 值 (25℃)
≤ 5	≤ 40	> 6.8

(2) 内冷水的硬度按汽轮发电机的功率控制, 即单机容量 200MW 以下不大于 $10\mu\text{mol}/\text{L}$, 200MW 以上不大于 $20\mu\text{mol}/\text{L}$ 。

(3) 汽轮发电机定子绕组采用独立密闭循环水系统时, 其冷却水的电导率应小于 $2\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

3. 常规除盐系统

常规水处理除盐系统的出水水质和适用对象见表 1-5。习惯上将表 1-5 中系统 1 的产品水称为一级除盐水, 系统 2 的产品水为二级除盐水。

表 1-5 常规除盐系统的产品水质量和适用对象

序号	系统组成	产品质量		适用对象
		电导率 (25℃, $\mu\text{S}/\text{cm}$)	二氧化硅 (mg/L)	
1	$\text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH}$	< 5	< 0.1	中压锅炉
2	$\text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.2	< 0.02	高压及以上汽包锅炉和直流炉
3	$\text{H}_w \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.2	< 0.02	高压及以上汽包锅炉和直流炉; 进水碱度大于 $4\text{mmol}/\text{L}$, 过剩碱度较低
4	$\text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$ 或 $\text{H} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.2	< 0.01	高压及以上汽包锅炉和直流炉; 进水有机物含量高, 强酸阴离子含量大于 $2\text{mmol}/\text{L}$
5	$\text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{H/OH}$ 或 $\text{H} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.5	< 0.02	进水强酸阴离子含量高且二氧化硅含量低
6	$\text{H}_w \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$ 或 $\text{H}_w \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{OH}_w \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.2	< 0.02	进水碱度和强酸阴离子含量高; 高压及以上汽包锅炉和直流炉
7	$\text{MSF} \rightarrow \text{H/OH}$	$0.1 \sim 1.0$	< 0.02	适合于高含盐量的水源
8	$\text{RO} \rightarrow \text{EDI}$	< 0.2	< 0.02	适合于较高含盐量的水源
9	$\text{RO} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.1	< 0.02	适合于较高含盐量的水源
10	$\text{RO} \rightarrow \text{H} \rightarrow \text{D} \rightarrow \text{OH} \rightarrow \text{H/OH}$	< 0.1	< 0.02	适合于高含盐量的水源和苦咸水

注 H—强酸性氢离子交换器; H_w —弱酸性氢离子交换器; D—除碳器; OH—强碱性氢氧离子交换器; OH_w —弱碱性氢氧离子交换器; H/OH—混合离子交换器; MSF—多级闪蒸装置; EDI—电除盐装置; RO—反渗透装置。

三、电子工业对除盐水的水质要求

电子工业中，一些精密元件的制造过程中，零件清洗和药液的配制，都需要高纯水，这种高纯水又称电子级水。电子级水分4个级别：Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级。Ⅰ级~Ⅳ级电子级水依次记作EW-Ⅰ、EW-Ⅱ、EW-Ⅲ和EW-Ⅳ，电子级水质量应符合GB/T 11446.1—1997《电子级水》的规定，见表1-6。

随着集成电路工业的迅速发展，对工艺用水的要求越来越高，美国ASTM D 5127—1999规定了电子工业和半导体工业冲洗用超纯水，表1-7是三种电子级水的质量标准。

表 1-6 电子级水的质量标准

指标		EW-Ⅰ	EW-Ⅱ	EW-Ⅲ	EW-Ⅳ
电阻率 (25℃, MΩ·cm)		≥18 (95%时间不低于17)	≥15 (95%时间不低于13)	≥12.0	≥0.5
全硅 (μg/L)	≦	2	10	50	1000
>1μm的微粒数 (个/ml)	≦	0.1	5	10	500
细菌个数 (个/ml)	≦	0.01	0.1	10	100
铜 (μg/L)	≦	0.2	1	2	500
锌 (μg/L)	≦	0.2	1	5	500
镍 (μg/L)	≦	0.1	1	2	500
钠 (μg/L)	≦	0.5	2	5	1000
钾 (μg/L)	≦	0.5	2	5	500
氯 (μg/L)	≦	1	1	10	1000
硝酸根 (μg/L)	≦	1	1	5	500
磷酸根 (μg/L)	≦	1	1	5	500
硫酸根 (μg/L)	≦	1	1	5	500
总有机碳 (μg/L)	≦	20	100	200	1000

表 1-7 美国公布的电子级水水质

指标		E-1	E-1.1	E-1.2	指标		E-1	E-1.1	E-1.2
电阻率 (MΩ·cm)		18.2	18.2	18.2	离子和金属 (ng/L)	NO ₃ ⁻	100	50	20
TOC (μg/L)		5	2	1		SO ₄ ²⁻	100	50	20
DO (μg/L)		1	1	1		Al	50	20	5
微粒数 (个/L)	0.05~0.1μm	500	500	100		B	50	20	5
	0.1~0.2μm	300	300	50		Ca ²⁺	50	20	2
	0.2~0.3μm	50	50	20		Cr	50	20	2
	0.3~0.5μm	20	20	10		Cu	50	20	2
	0.5~1μm	4	4	1		Fe	50	20	2

续表

指标			E-1	E-1.1	E-1.2	指标			E-1	E-1.1	E-1.2
溶解性 二氧化硅 (ng/L)			1000	100	50	离子和金属 (ng/L)	Mg ²⁺		50	20	2
离子和金属 (ng/L)	NH ₄ ⁺		100	100	50		Na ⁺		50	20	5
	Cl ⁻		100	50	20		K ⁺		50	20	5
	F		100	50	30		Zn		50	20	2

四、医药卫生行业对除盐水的水质要求

1. 纯化水

中国药典 2000 年二部规定, 纯化水为蒸馏法、离子交换法、反渗透法或其他适宜的方法制得供药用的水, 不含任何附加剂, 用作溶剂和稀释剂, 性状为无色的澄清液体, 无臭、无味。药典对纯化水的酸碱度、氯化物、硫酸盐、钙盐、硝酸盐、亚硝酸盐、氨、二氧化碳、易氧化物、不挥发物、重金属等作了严格规定, 例如, 亚硝酸盐不得超过 0.000002%, 重金属不得超过 0.00005%。

2. 注射用水

中国药典 2000 年二部规定, 注射用水为纯化水经蒸馏提所得的水, 用于配制注射剂用的溶剂, 性状为无色的澄清液体, 无臭、无味, pH 值为 5.0~7.0, 氨小于 0.00002%, 细菌内毒素小于 0.25EU/mL, 氯化物、硫酸盐、钙盐、硝酸盐、亚硝酸盐、二氧化碳、易氧化物、不挥发物、重金属等指标同纯化水。

3. 灭菌注射用水

中国药典 2000 年二部规定, 灭菌注射用水由注射剂生产工艺制备。用于注射灭菌粉末的溶剂、注射液的稀释剂和泌尿外科内腔镜手术冲洗剂, 性状为无色的澄清液体, 无臭、无味, pH 值为 5.0~7.0, 其中细菌内毒素、氯化物、硫酸盐、钙盐、硝酸盐、亚硝酸盐、氨、二氧化碳、易氧化物、不挥发物、重金属等指标同注射用水。

表 1-8 是美国药典 (USP) 公布的纯化水 (PW) 和灭菌注射用水 (WFI) 的水质标准。

表 1-8 美国药典 (USP) 公布的纯化水 (PW) 和灭菌注射用水 (WFI)

指标	纯化水	灭菌注射用水	指标	纯化水	灭菌注射用水
pH 值	5.0~7.0	5.0~7.0	细菌	100cfu/mL	10cfu/100mL
电导率 (25℃, $\mu\text{S}/\text{cm}$)	<1.3	<1.3	内毒素 (EU/mL)	—	0.25
TOC ($\mu\text{g}/\text{L}$)	500	500			

五、生活用水对除盐水的水质要求

生活用除盐水习惯称之为纯净水, 按其储运方式分为瓶装纯净水、桶装纯净水和管道直饮纯净水。GB/T 17324—2003《瓶(桶)装纯净水卫生标准》的规定, 瓶(桶)装纯净水是以符合生活饮用水卫生标准的水为水源, 通过电渗析法、离子交换法、反渗透法、蒸馏法及其他适当的加工方法制得的, 密封于容器中且不含任何添加物可直接饮用的水。纯净水质量标准见表 1-9。

表 1-9 纯净水质量标准

序号	项目	要求	序号	项目	要求
1	色度/度	≤ 5, 并不得呈现其他异色	12	As/mg · L ⁻¹ ≤	0.01
2	感官指标	浊度/NTU ≤ 1	13	Cu/mg · L ⁻¹ ≤	1.0
3	臭和味	不得有异臭、异味	14	砷化物/mg · L ⁻¹ ≤	0.002
4	肉眼可见物	不得检出	15	挥发性酚 (以苯酚计) /mg · L ⁻¹ ≤	0.002
5	pH 值	5.1 ~ 7.0	16	三氯甲烷/mg · L ⁻¹ ≤	0.02
6	电导率 (25 ± 1℃) / μS · cm ⁻¹ ≤	10	17	游离氯/mg · L ⁻¹ ≤	0.005
7	COD _{mn} /mg(O ₂) · L ⁻¹ ≤	1.0	18	菌落总数/cfu · mL ⁻¹ ≤	20
8	Cl ⁻ /mg · L ⁻¹ ≤	6.0	19	微生物指标	大肠菌群/MPN · (100mL) ⁻¹ ≤ 3
9	NO ₂ ⁻ /mg · L ⁻¹ ≤	0.002	20	霉菌和酵母/cfu · mL ⁻¹	不得检出
10	四氯化碳/mg · L ⁻¹ ≤	0.001	21	致病菌 (沙门氏菌、志贺氏菌、金黄色葡萄球菌)	不得检出
11	Pb/mg · L ⁻¹ ≤	0.01			

第二节 除 盐 技 术

这里以反渗透法首次应用的时间为界，将其以前开发出来的除盐技术称之为传统除盐技术，之后的除盐技术称之为新兴除盐技术。传统除盐技术成熟，使用广泛，经验丰富，主要方法有蒸馏法、离子交换法和电渗析法，但是，这些技术存在工艺复杂、运行维护工作量大和污染环境等缺点，正逐步被新兴除盐技术所替代。新兴除盐技术工艺简单、运行维护方便、环境友好，主要方法有反渗透法和电除盐法。

一、传统除盐技术

1. 蒸馏法除盐

蒸馏法除盐又称蒸发法除盐，是人们最早应用的除盐技术。根据蒸馏工艺，蒸馏法可分为单级闪蒸 (SSF)、多级闪蒸 (MSF)、压汽蒸馏 (VC)、垂直管蒸发 (VTE)、横管蒸发 (HTE)、浸没管蒸发 (ST) 和多效闪蒸 (MED) 等。MSF 最常用，约占蒸发用户总数的 50%，产水总量的 90%。

加热盐水，产生蒸汽，此过程称为蒸发。冷却蒸汽，蒸汽凝结成水，这就是蒸馏水。蒸发过程中，水分子获得热能，逃离盐水溶液，变成蒸汽，而盐继续保留在溶液中，因此，通过蒸馏可以实现盐与水的分离。虽然盐不蒸发，但是蒸汽在逃离溶液时，会携带盐水液滴，因此，蒸馏水中含有少量盐分。

蒸发器是蒸馏的主要设备之一。蒸发器类似锅炉，盐水的加热和蒸汽的形成在此设备中进行。只有将盐水加热至沸腾，才能产生大量蒸汽。在沸腾状态下，盐类急剧蒸发浓缩，很快达到过饱和状态而生成水垢。为了减缓水垢生成速度，可将加热和蒸发两个过程分开，先

将盐水在一定压力下加热到某一温度（此温度低于该压力下水的饱和温度，因此盐水尚未沸腾），然后引入一个压力较低的容器（称之为第一级蒸发器）中，这时由于盐水温度明显高于此压力下水的饱和温度，故在该容器中盐水剧烈沸腾，急速汽化变成蒸汽，这就是闪蒸。随着蒸发进行，盐水温度下降，蒸发速度随之下降。若将剩余盐水又引入压力更低的另一容器（称之为第二级蒸发器）中，与第一级蒸发器一样，盐水将再次急速汽化变成蒸汽。依此进行，可让盐水通过几十级压力递减的蒸发器，从而得到更多的淡水，这就是 MSF 技术。由于在闪蒸过程中，盐水被加热时不汽化浓缩，而蒸发时又不受热升温，故结垢量大大减少。

蒸馏除盐法具有以下特点：

(1) 水与盐分离的推动力为热能。

(2) 适合于利用工业余热制水，例如利用化工厂中需要冷却的高温工艺介质、地热水、汽轮的低压抽汽加热盐水，往往可以获得较好的经济效益。

(3) 容易制造成简易的小型蒸馏设备，只要有电即可生产除盐水，因此，该技术常用于实验室。

(4) 加热是很好的杀菌方法，所以蒸馏法目前被广泛用于医药卫生行业，制造医用无菌除盐水。

(5) 除盐的彻底性不如离子交换法，不适合除盐水的精制。

(6) 对于含盐量高的水源（如海水、苦咸水），经济性不如反渗透法；对于含盐量低的水源（如江河水、大多数水库水），经济性不如离子交换法。因此，在许多情况下蒸发除盐法不是人们的首选方法。

(7) 用蒸馏法淡化海水的水利用率为 25% ~ 40%。

(8) 已与膜技术结合形成一项新的除盐技术，即膜蒸馏（MD）技术。该技术与常规蒸馏相比，蒸馏效率高，与反渗透相比，操作压力低。膜蒸馏在常压和低于沸点的温度条件（40 ~ 50℃）下进行，太阳能可能成为理想热源。

2. 离子交换法除盐

离子交换法除盐是目前应用最广泛的传统除盐技术，起源于 20 世纪 40 年代。该技术的核心是利用了两类离子交换树脂（简称树脂），一类是阳离子交换树脂（简称阳树脂），另一类是阴离子交换树脂（简称阴树脂）。树脂为不溶于水的高分子粒状材料，内部含有大量能与水中离子起交换反应的物质（称之为可交换离子），阳树脂中可交换离子为 H^+ ，阴树脂中可交换离子为 OH^- ，所以盐水依次通过阳树脂层和阴树脂层后，盐水中的阳离子和阴离子依次交换成 H^+ 和 OH^- ， H^+ 与 OH^- 进一步结合成纯水。由于受离子交换反应平衡的制约，盐水经过上述处理后，仍残留少量盐分。盐水通过树脂层，不断地消耗掉树脂中的 H^+ 和 OH^- ，树脂最终失去交换能力。丧失交换能力的树脂通常用酸碱再生，即用一定浓度的 HCl 或 H_2SO_4 水溶液与阳树脂接触，用一定浓度的 $NaOH$ 水溶液与阴树脂接触，以恢复它们的交换能力，此过程称为再生。树脂的可再生特性决定了它可以重复使用。离子交换技术的基本原理详见第九章和第十章。

离子交换除盐法具有以下特点：

(1) 水与盐分离的推动力为化学能，即依赖于离子交换反应。

(2) 适用于含盐量低于 500mg/L 的水源，对于含盐量更高的水源，一般先用反渗透法除去 95% 以上盐类后，再用离子交换法深度除盐。

(3) 它是目前除盐最彻底的水处理技术, 除盐率可达到 99.99%, 因此, 它常作为生产纯水、超纯水、电子级水的终端除盐技术

(4) 有较多的酸碱废水排放。

(5) 水利用率人约为 90%。

(6) 已与电渗析结合形成一项新的除盐技术, 即电除盐 (EDI) 技术。

3. 电渗析法除盐

电渗析法除盐从 20 世纪 70 年代至今得到了较多的应用。该技术的核心是利用了两种离子交换膜, 一种是阳离子交换膜 (简称阳膜), 另一种是阴离子交换膜 (简称阴膜), 在直流电场作用下, 盐水中的阳离子和阴离子分别选择性透过阳膜和阴膜, 从盐水中迁移出去, 剩下的即为除盐水。电渗析技术的基本原理详见第十一章。

电渗析法除盐具有以下特点:

(1) 水与盐分离的推动力为直流电场。

(2) 适用于含盐量为 1000 ~ 5000mg/L 的水源。

(3) 除盐率一般为 50% ~ 90%, 明显不如离子交换法, 因此, 它常用于高含盐量水源的初步除盐, 例如, 将苦咸水淡化成含盐量小于 500mg/L 的饮用水, 或作为离子交换法的前置脱盐。

(4) 既有淡化功能又有浓缩功能, 因此, 可利用淡化功能制造除盐水, 利用浓缩功能生产食盐。

(5) 必须不断排放相当多的极水和浓水, 故水的利用率较低, 浓水直排时水的利用率约为 40%, 浓水循环时水的利用率为 70% ~ 80%。

(6) 容易极化、结垢, 电耗高, 现已基本为反渗透法所替代。

(7) 与离子交换法结合使用后获得了新生, 已形成 EDI 技术。

二、新兴除盐技术

1. 反渗透法除盐

反渗透 (RO) 法除盐是目前普及速度最快的新兴除盐技术, 起源于 20 世纪 60 年代。该技术的核心是利用了反渗透膜, 这种膜具有透水而难透盐的特性, 在压力推动力下, 盐水中水分子透过膜成为除盐水, 盐分继续保留在原水中而被浓缩。反渗透技术的基本原理详见第四章 ~ 第八章。

反渗透法除盐具有以下特点:

(1) 水与盐分离的推动力为压力。

(2) 可适用于各种含盐量的水源, 但用于含盐量大致在 300mg/L 以上的水源经济性更好, 已广泛用于生产饮用纯净水、医用纯化水、电子级水和高压及以上锅炉的补给水。

(3) 除盐率一般为 99%, 高于电渗析, 低于离子交换法, 故一般用于高含盐量水源的初步除盐, 或作为离子交换法的前置除盐技术, 不作为生产超纯水的终端除盐手段

(4) 化学药品用量少, 没有酸碱废水排放。

(5) 必须不断排放一部分浓水。对于苦咸水和含盐量不高的天然水, 水的利用率一般为 75% ~ 85%; 对于海水, 水的利用率一般为 30% ~ 50%。

2. 电除盐技术

电除盐技术的应用源于 20 世纪 90 年代。该技术的核心是以离子交换树脂作为离子迁移

的载体,以阳膜和阴膜作为鉴别阳离子和阴离子通过的关卡,在直流电场推动下,实现盐与水的分离。EDI装置的构造类似于电渗析器,所不同的是在淡水室中充填有阴树脂与阳树脂,该室相当于混合离子交换器(简称混床)。EDI除盐是离子交换除盐和电渗析除盐两个过程的叠加,即在化学位差作用下的离子交换和在直流电场作用下的离子选择性定向迁移的叠加。与此同时,由于浓差极化迫使 H_2O 发生电离,所产生的 H^+ 和 OH^- 保证阳树脂和阴树脂一直不失效。电除盐技术的基本原理详见第十二章~第十三章。

电除盐技术具有以下特点:

- (1) 水与盐分离的推动力为直流电场。
- (2) 适用于电导率低于 $40\mu\text{S}/\text{cm}$ 的水源的深度除盐,用于生产纯水、锅炉补给水和电子级水。
- (3) 除盐非常彻底,除盐率与离子交换法基本相同,故它常作为生产除盐水的终端除盐技术。
- (4) 生产除盐水只需电能,不用酸碱,一般只用少量的 NaCl 。
- (5) 必须不断排放极水和部分浓水,水的利用率一般为80%~95%。
- (6) EDI装置普遍采用模块化设计,便于维修和扩容。
- (7) 具有替代混合离子交换除盐技术的发展前景。

第三节 集成集水处理技术

实际工程中仅用某一种膜技术往往不能解决水处理问题,需要将不同的膜技术与其他水处理技术结合使用。随着膜技术的成熟与应用,水处理工艺更加丰富多彩,即使解决同一问题,无论是采用单项技术,还是采用多项技术的组合,都有更多的选择空间。目前,水处理技术的发展方向,是各种膜技术的相互配合使用,膜技术与其他常规技术联合使用,组成新的水处理工艺。

一、集成膜技术

针对某一具体分离对象,综合几个膜过程或与其他水处理方法相结合,使之各尽所长,取得最佳分离效果和最佳经济效益,这种过程称为集成膜过程,记作IMP(integrated membrane process)。它所涉及到的有关技术就是集成膜技术,记作IMT(integrated membrane technology)。

集成膜技术需要具备两个方面的条件:

- (1) 硬件。必须具有成熟的膜组件及成套设备、常规水处理设备,包括仪表、控制设备,掌握这些设备的特性,包括性能、使用条件、尺寸、故障诊断和维护方法等。
- (2) 软件。应该根据处理对象和用户要求,熟悉各种技术组合的原则和经验,以实现这些技术的完美组合,即所组合的工艺技术最佳、经济性最好。

二、集成膜水处理技术

集成膜水处理技术就是以膜法水处理技术为核心,并融合其他水处理技术,使它们达到最佳匹配。

(1) 膜技术与离子交换技术的集成。例如,用频繁倒极电渗析技术(EDR)或反渗透技术与离子交换技术(IX)组合成“EDR $\rightarrow$ IX”或“RO $\rightarrow$ IX”。与单独使用IX相比,再