

反渗透水处理

冯逸仙 杨世纯 编著



中国电力出版社

468035

反渗透水处理

冯逸仙 杨世纯 编著



中国电力出版社

EA 13 / 13
内 容 提 要

本书主要从设计、调试和运行的角度，详细阐述了反渗透水处理系统的特点。书中的大量资料和实例为专业人员提供了详实的工作依据和具有指导作用的故障诊断技术。

本书可供火力发电、电子、饮料、化工等工业和环保部门的水处理专业人员参考、使用，也可作为该专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

反渗透水处理/冯逸仙,杨世纯编著. -北京:中国电力出版社, 1997

ISBN 7-80125-388-4

I. 反… I. ①冯… ②杨… III. 补给水处理, 反渗透 N. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 11269 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 7 月第一版 1997 年 7 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 5.375 印张 139 千字
印数 0001—2850 册 定价 11.00 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)

前 言

水处理的高科技设备——反渗透除盐装置自 80 年代中期起在我国火力发电厂中得到越来越广泛的应用。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。火力发电厂大容量、高参数机组的使用，对水质提出了更严格的要求，使用的水几乎是纯水 [如要求电导率小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)，二氧化硅小于 $0.02\text{mg}/\text{L}$]。对高含盐量的水，单独采用离子交换工艺，频繁的再生使得运行人员不堪重负，因此预脱盐装置如反渗透的使用十分必要。它不仅可大大地降低运行人员的劳动强度，而且有利于进一步地提高整个水处理工艺的运行水平和自动化程度。反渗透除盐较其它预除盐装置，如蒸发器、电渗析等，有着独到的特点和优势，这是有目共睹的。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（组件）方面，国产品无论是在脱盐率上，还是在透水量上，比起当今世界先进的膜（组件）均有一定的差距。反渗透低压膜的使用，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 $350\text{mg}/\text{L}$ 的原水，采用反渗透作为预除盐也是经济合理的。

然而，值得指出的是，目前一些反渗透系统生产厂家不但关键部件如反渗透膜元件（组件）进口，而且其配套设备、部件如保安过滤器、反渗透高压泵、加药计量泵、控制仪表等，也采用进口的，经如此方式组装成的反渗透装置（系统）与国产的同类产品相比较，不但具有较强的竞争力，而且质量更为优良可靠。

反渗透装置要长期安全的运行，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）及其数量的合理选择、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。

本书分两篇，共十二章。第一篇主要论述反渗透预处理的一般原则，水的混凝、沉淀处理，水的过滤处理及反渗透所必需的水的加药处理，该部分共五章；第二篇为水的反渗透处理，重点阐述反渗透的基本原理，反渗透装置（系统）的设计以及反渗透的清洗、维护、运行和工程中的应用，该部分共七章。本书力求从理论上论述清楚，同时对反渗透装置在工程中的应用有较强的针对性。本书的出版，作为抛砖引玉，希望有助于工程技术人员业务水平的提高，并加深他们对反渗透技术的理解，有助于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，得到了电力工业部政策法规体制司邹持家副司长的亲切关怀和大力支持，全书由华北电力科学研究院窦照英、劳启楠审定，半岛水处理有限公司王建新校核。此外，天津军粮城电厂吴健濮工程师提供了反渗透装置在该厂应用的材料。在此，一并表示深深的感谢。

限于水平，书中有错漏和不足之处，希望读者给予指正。

编著者

1997.1.20

目 录

前 言

第一篇 反 渗 透 预 处 理

第一章 反渗透预处理的一般原则	1
一、反渗透进水水质	1
二、反渗透的水源	3
三、预处理一般原则的制定	5
第二章 水的混凝、沉淀	7
一、水的混凝处理的目的	7
二、水中胶体颗粒带电的原因	7
三、双电层理论介绍	9
四、胶体颗粒具有稳定性的原因	11
五、水中胶体颗粒失稳的几种方式	12
六、影响混凝效果的因素	15
七、混凝效果的控制技术	15
八、常用的混凝剂和助凝剂	17
九、常用的（沉淀）澄清设备	22
第三章 水的过滤	23
一、粒状滤料过滤	23
二、滤芯滤料过滤	34
第四章 水中铁的去 除	42
一、混凝法	42
二、曝气法	42
三、锰砂过滤法	43

四、石灰碱化法	43
第五章 水的加药处理	44
一、水的氯化	44
二、水的酸化	49
三、水中加阻垢剂	64

第二篇 水的反渗透处理

第六章 反渗透的原理	70
一、反渗透的基本原理	70
二、渗透压	71
三、反渗透系统中水的流量和物料平衡	72
第七章 反渗透膜元件的设计选择	75
一、膜的构型	75
二、膜元件(组件)的性能参数	79
三、影响膜元件(组件)性能参数的因素	83
四、膜的特性	84
五、膜的透过机理	85
六、膜元件的选择	86
第八章 膜组件的排列组合	92
一、膜元件(组件)透水量的确定	92
二、系统回收率的确定	94
三、膜组件的排列组合	96
第九章 反渗透除盐系统的设计	102
一、反渗透预处理方案的确定	102
二、反渗透除盐装置的设计	102
三、反渗透后处理的常用方法	105
第十章 反渗透装置的调试、运行与诊断技术	113
一、反渗透装置的调试	113
二、反渗透装置的运行	115
三、影响反渗透运行的因素	117

四、反渗透装置的诊断技术	122
第十一章 反渗透装置的清洗	124
一、清洗的必要性	124
二、清洗条件	124
三、膜污染的原因与清洗药剂的选择	124
四、清洗系统设计的选择	125
五、清洗要求	127
六、清洗液的配制	128
第十二章 反渗透装置的应用	129
一、在火力发电厂中的应用	129
二、在饮料行业中的应用	148
附录一 常用元素的原子量和当量	155
附录二 有关单位的换算	156
附录三 常用药剂的性能	159
附录四 常用溶液的密度	161
主要参考文献	163

第一篇 反渗透预处理

第一章 反渗透预处理的一般原则

反渗透系统包括水的预处理、反渗透装置处理、水的后处理三部分。反渗透系统选择与其它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它特定的要求，对后处理也应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：①水源质量；②希望的产品水质量；③工艺设备的可靠性；④运行要求和人员素质；⑤适应水质改变和设备故障的能力；⑥处理设备的备用情况；⑦废液的处置与排放；⑧投资和运行费用；⑨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，明确每个单元的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、反渗透进水水质

(1) 卷式醋酸纤维素膜对反渗透进水水质的要求，如表 1-1 所

示。

表 1-1 卷式醋酸纤维素膜对进水水质的要求

项 目	标 准 值	最 大 值
SDI ₁₅	<4	4
浊度 (FTU)	<0.2	1
含铁量 (mg/L)	<0.1	0.1
游离氯 (mg/L)	0.2~1	1
水温 (°C)	25	40
水压 (MPa)	2.5~3.0	4.1
pH 值	5~6	6.5

(2) 卷式复合膜对反渗透进水水质的要求如表 1-2 所示。

表 1-2 卷式复合膜对进水水质的要求

项 目	标 准 值	最 大 值
SDI ₁₅	<4	5
浊度 (FTU)	<0.2	1
含铁量 (mg/L)	<0.1	0.1
游离氯 (mg/L)	0	0.1
水温 (°C)	25	45
水压 (MPa)	1.3~1.6	4.1
pH 值	2~11	11

(3) 中空纤维式聚酰胺膜对反渗透进水水质的要求如表 1-3 所示。

表 1-3

中空纤维式聚酰胺膜对进水水质的要求

项 目	标 准 值	最 大 值
SDI ₁₅	3	3
浊度 (FTU)	0.2	0.5
含铁量 (mg/L)	<0.1	0.1
游离氯 (mg/L)	0	0.1
水温 (°C)	25	40
水压 (MPa)	2.4~2.8	2.8
pH 值	4~11	11

二、反 渗 透 的 水 源

1. 水源的分类

地球的总面积约为五亿一千万平方公里，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 km³，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，存在于土壤和岩层内。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 1-4。

3. 水源的选择

当地表水和地下水均可作为反渗透的水源时，就存在水源的选择问题。水源的选择就是对两种可供水源及其相应特性进行核查，以便选择更经济可行的水源。

表 1-4

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 (10^9m^3)	百分比 (%)	
空气中水汽		12, 900	0. 001	
地表水	江河, 湖泊	230, 000	0. 017	100~500*
	冰 川	29, 120, 000	2. 157	
	海 洋	1, 318, 720, 000	97. 2	28, 000~35, 000
地下水		8, 616, 600	0. 625	300~10, 000
合 计		1, 356, 699, 500	100. 00	

* 部分雨水稀少地区, 地表水含盐量可达 1000~5000mg/L。某些内陆湖水含盐量可高达 40, 000mg/L 以上。

选择水源时应考虑下列因素: ①取水点的安全性; ②水量是否充足; ③水源质量; ④取水要求 (如考虑取水口构造、取水井深度等); ⑤处理要求 (含废液处置的成本和灵活性); ⑥水源输送和水源布点要求。

所选择的水源保证可连续供应的水量和稳定的水质。在制定用水系统的主要计划中, 取水点的安全性和水质应与水量预测统筹兼顾。

水质将影响水处理工艺的选择和水处理成本。两种水源的评估不仅应包括水处理成本分析, 而且应包括取水、水源输送和水源点的分布的成本分析。水源地点以及水厂和用户地点都将影响供水的成本。

4. 水源的管理

水源的质量管理是保障水处理工艺安全经济运行的第一步。加强水源管理和水质监测, 有利于发现由于水源水质的变化对水处理工艺造成的影响, 以便及时发现问题, 解决问题。

水源质量管理指保护当前和将来生产饮用水和工业用水所需的地表水和地下水的科学实践行为。水源质量管理提供这样手段, 即确定自然因素和人类活动对水源的影响, 评估短期和长期的影

响效果，防止供水系统中问题的发生，而这些问题的纠正可能是困难的或需要付出昂贵的代价。

因此，水源质量的科学管理应作为水处理的重要一环加以重视。

三、预处理一般原则的制定

1. 预处理的目標

总的来说，预处理目标就是去除原水中悬浮物和胶体杂质，当水经过反渗透器前面的处理工艺—— $5\mu\text{m}$ 保安过滤器后，其出水污染指数SDI对卷式醋酸纤维素膜、复合膜小于4，对中空纤维式芳香族聚酰胺膜小于3。

为达到这一目标，要求澄清器、过滤器出水水质如下：

(1) 澄清器出水浊度小于1FTU，最好小于0.5FTU。

(2) 过滤器（除特别说明外，指一般常规过滤如重力式滤池或压力式过滤器，不同）的出水浊度小于0.5FTU， COD_{Mn} 小于1.5mg/L，含铁量小于0.05mg/L（以Fe表示）。

经常规定，若过滤后的水流经 $5\mu\text{m}$ 过滤器后，其出水仍无法满足对其SDI要求时，则应根据具体情况，考虑增设处理工艺。例如，保安过滤器前增设滤料粒径比常规过滤更小的过滤器；又如含铁量过高，则在预处理中考虑除铁工艺。

2. 预处理的一般原则

地表水中悬浮物、胶体杂质较多，预处理主要去除这些杂质，而地下水中悬浮物、胶体杂质较少，但二价铁离子普遍含量较高。

根据水源特点，预处理的一般原则可确定如下：

(1) 地面水悬浮物含量小于50mg/L时，可采用直流混凝过滤方法；

(2) 地面水悬浮物含量大于50mg/L时，可采用混凝、澄清、过滤方法；

(3) 地下水含铁量小于0.3mg/L，悬浮物含量小于20mg/L

时，可采用直接过滤法；

(4) 地下水含铁量小于 0.3mg/L ，悬浮物含量大于 20mg/L 时，可采用直流混凝过滤法；

(5) 地下水含铁量大于 0.3mg/L 时，应考虑除铁，再考虑采用直接过滤工艺或直流混凝过滤法。

此外，当原水有机物含量较高时，可采用加氯、混凝、澄清、过滤处理。当采用这种处理仍不能满足要求时，可同时采用活性炭过滤法除去有机物。当原水碳酸盐硬度较高，经加药处理仍会造成 CaCO_3 在反渗透膜上沉淀时，可采用石灰处理。当原水硅酸盐含量较高时，可投加石灰、氧化镁（或白云粉）进行处理。

第二章 水的混凝、沉淀

一、水的混凝处理的目的

水中的悬浮物和胶体物质的粒径不同，它们的沉降速度相差很大。大颗粒悬浮物在重力作用下容易沉降，而微小粒径的悬浮物以及胶体杂质能在水中长期保持分散悬浮状态（称胶体的稳定性），为了除去水中这些微小粒径的悬浮物以及胶体杂质，需要进行混凝处理，使这些微小杂质聚结成较大的颗粒，迅速沉降下来，从而使水得到澄清。

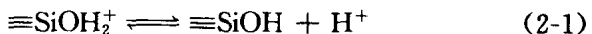
天然水中胶体和悬浮物是按杂质颗粒大小进行大致分类的，而实际上胶体和悬浮物之间没有一个明显的界限。悬浮物颗粒愈小，胶体性质就愈明显，因此，讨论胶体物质时，也包含了微小的悬浮物。

二、水中胶体颗粒带电的原因

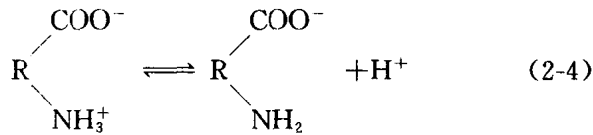
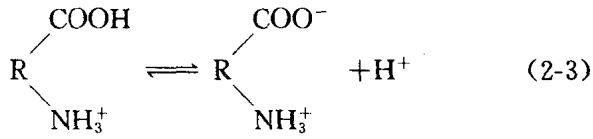
天然水中的胶体是某些低分子物质的聚合物，它具有较小的粒径和较大的比表面积。胶体颗粒的表面通常带有负电荷。

现将胶体带电的几种情况讨论如下：

(1) 固体的表面基团可以与水反应，接受或献出氢离子。例如，硅的氧化物含有硅醇基团（ $\equiv\text{SiOH}$ ），反应式如下：



有机物可能含有羧基和氨基，反应式如下：



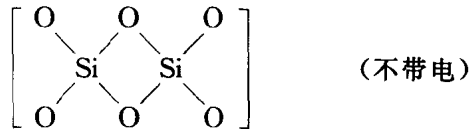
在这些反应中，固体颗粒表面带电与水中氢离子浓度或 pH 值大小有关。当 pH 值增大（氢离子浓度降低）时，反应式（2-1）~式（2-4）向右移动，而带负电的颗粒增多。pH 值大于 2 时，硅在水中常带负电。蛋白质是含有羧基和氨基的混合物，pH 值大于 4 时，通常带负电。

（2）表面基团能与水中溶质（非氢离子）反应。以硅的氧化物为例，说明如下：

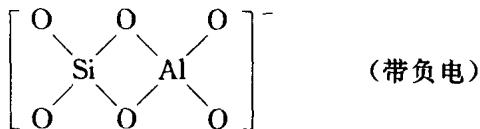


反应式（2-5）、（2-6）是固体表面化学基团（如硅醇基团）和吸附溶质（如磷酸离子）之间的特定反应。固体颗粒表面带电也与溶液中的化学性质有关。

（3）表面带电由于颗粒表面结构的不完整而引起的，称为同形置换，这是许多粘土矿物质带电的原因之一。粘土有多层结构，硅四面体（基本成分是 SiO_2 ）结构示意图如下：



如果在上述 SiO_2 结构形成期间，Al 原子取代了 Si 原子，则该结构带负电：



同样，二价阳离子 Mg^{2+} 或 Fe^{2+} 可以取代八面体氧化铝结构中的 Al 原子，相应产生负电。

三、双电层理论介绍

胶体带电结构由胶核、固定层和扩散层三部分组成。固定层和扩散层称为双电层。胶核即胶体的核心部分，是由许多紧密吸附在一起的分子和离子组成的。靠近胶核的异电离子（又称反离子）同胶核紧密吸附，形成包围胶核的固定层。固定层之外的一层即为扩散层，扩散层外边缘之内的电荷互相平衡，使整个胶团呈中性，见图 2-1。固定层和胶核所构成的胶粒是带电的，其极性与胶核所带电荷的极性相同。当胶核运动时，固定层中异电离子

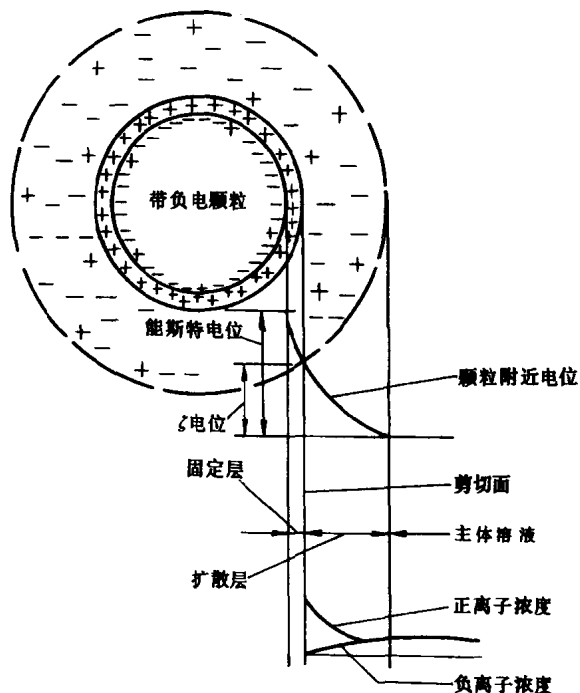


图 2-1 负电颗粒的双电层和 ζ 电位