

反 渗 透 水 处 理 工 程

冯逸仙 杨世纯 编著



A0939887



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,膜和元(组)件的选择,反渗透装置的设计、调试、运行和清洗、维护、系统诊断技术等。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。

本书可供火力发电、电子、饮料、化工环保等行业的水处理专业人员参考、使用,也可作为反渗透水处理专业的培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

反渗透水处理工程/冯逸仙,杨世纯编著.-北京:中国电力出版社,2000

ISBN 7-5083-0380-6

I.反... II.①冯...②杨... III.锅炉用水-水处理-方法 IV.TK223.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第37189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>)

三河实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000年8月第一版 2000年8月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 9.75印张 242千字

印数0001—5000册 定价32.00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

反渗透水处理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、制药、电子等行业，既用于生产除盐水、饮用水，也用于废水处理、物质回收与浓缩等领域。

反渗透水处理技术成功地应用于各领域，在很大程度上是由于其操作的简单性和运行的经济性。它与许多高科技产品一样，技术含量高，科技附加值高，使用方法易于掌握。对水质有严格要求的应用领域，如电子、电力 [大容量、高参数机组的锅炉补给水要求电导率小于 $0.2\mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C)，二氧化硅小于 $0.02\text{mg}/\text{L}$]，反渗透设备可作为预脱盐装置。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。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。

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、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 $100\text{mg}/\text{L}$ 的原水（DL/T5068—1996《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),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,让人们对抗渗透装置的内在质量要求与外观要求和谐、统一起来。

本书的出版,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。

深圳电视台李嘉斌工程师(部分电气内容)、天津军粮城电厂吴健濮高工(部分预处理及实例内容)参加部分内容的有关工作。在编写过程中,还得到北京菲迪有限责任公司郭学工先生、美国 DOW 公司上海办事处的大力支持。尤其荣幸的是,水处理领域的唯一一位中国工程院院士高从培先生亲自为本书作序。在此一并表示深深的谢意。

限于水平,书中有错漏和不足之处,希望读者给予指正。

编著者

2000年6月5日

反渗透原理

一、基本原理

渗透是水从稀溶液一侧通过半透膜向浓溶液一侧自发流动的过程。半透膜只允许水通过，而阻止溶解固形物（盐）的通过，见图 1-1 (a)。

浓溶液随着水的流入而不断被稀释。当水向浓溶液流动而产生的压力 p 足够用来阻止水继续净流入时，渗透处于平衡状态，见图 1-1 (b)。平衡时，水通过半透膜从任一边向另一边流入的数量相等，即处于动态平衡状态，而此时压力 p 称为溶液的渗透压（注意：半透膜一边是纯水，另一边是盐溶液）。

当在浓溶液上外加压力，且该压力大于渗透压时，浓溶液中的水就会通过半透膜流向稀溶液，使得浓溶液的浓度更大，这一过程就是渗透的相反过程，称为反渗透，见图 1-1 (c)。

渗透是自发过程，而反渗透则是非自发过程。反渗透同样可视为因溶液中水的化学势不同引起的水的移动过程。利用热力学原理说明如下：

若溶液中水的化学势 μ 为温度 T 、压力 p 及浓度 c 的函数，即

$$\mu = f(T, p, c)$$

上式可写成全微分形式：

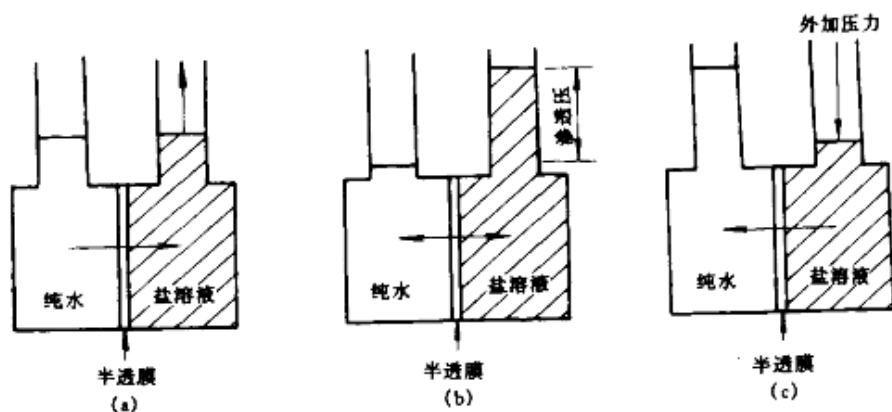


图 1-1 反渗透原理

(a) 渗透; (b) 渗透平衡; (c) 反渗透

$$d\mu = \left(\frac{\partial\mu}{\partial T}\right)_{p,c} dT + \left(\frac{\partial\mu}{\partial p}\right)_{T,c} dp + \left(\frac{\partial\mu}{\partial c}\right)_{p,T} dc$$

在恒温条件下, $dT=0$, 上式可写为:

$$d\mu = \left(\frac{\partial\mu}{\partial p}\right)_{T,c} dp + \left(\frac{\partial\mu}{\partial c}\right)_{p,T} dc \quad (1-1)$$

假定反渗透半透膜两边的稀溶液和浓溶液化学势分别为 μ_1 和 μ_2 , 浓度分别为 c_1 和 c_2 , 压力分别为 p_1 和 p_2 , 渗透压分别为 Π_1 和 Π_2 , 把式 (1-1) 积分如下:

$$\int_{\mu_1}^{\mu_2} d\mu = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial\mu}{\partial p}\right)_{T,c} dp + \int_{c_1}^{c_2} \left(\frac{\partial\mu}{\partial c}\right)_{p,T} dc \quad (1-2)$$

知道水的偏摩尔体积 $\bar{V}_m = \left(\frac{\partial\mu}{\partial p}\right)_{T,c}$, 而在反渗过程中, 水的偏摩尔体积 \bar{V}_m 近似为常数, 浓稀两溶液中水的化学势之差 $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_1$, 压力之差 $\Delta p = p_2 - p_1$, 式 (1-2) 可改写为:

$$\Delta\mu = \bar{V}_m \Delta p + \int_{c_1}^{c_2} \left(\frac{\partial\mu}{\partial c}\right)_{p,T} dc \quad (1-3)$$

当 $\Delta\mu=0$ 时, 两溶液中水的渗透处于动态平衡状态, 两溶液的压差 Δp 等于两溶液的渗透压差 $\Delta\Pi$, 式 (1-3) 可改写为:

$$\int_{c_1}^{c_2} \left(\frac{\partial \mu}{\partial c} \right)_{p,T} dc = - \bar{V}_m \Delta \Pi \quad (1-4)$$

把式 (1-4) 代入式 (1-3), 可得

$$\Delta \mu = \bar{V}_m (\Delta p - \Delta \Pi) \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可知, 当两溶液的压力差大于其渗透压差时, 即 $\Delta \mu > 0$ 时, 水的流动可实现非自发过程——反渗透过程, 也就是水可以由浓溶液一侧流入稀溶液一侧。

二、渗透压

渗透压是溶液的一种特性, 它随溶液浓度的增加而增大, 一般是以 NaCl 溶液为基础进行估算的, 即每增加 1 mg/L NaCl 约增加渗透压为 69Pa, 这可用于大多数天然水的估算。然而, 应注意到高分子的有机物产生渗透压要低很多 (如蔗糖 1 mg/L 约为 6.9Pa)。一些溶液渗透压值见表 1-1。

表 1-1 一些溶液的典型渗透压 (25°C)

化 合 物	浓度 (mg/L)	摩尔浓度 (mol/L)	渗透压 (psi ^①)
NaCl	35000	0.6	398
NaCl	1000	0.0171	11.4
NaHCO ₃	1000	0.0119	12.8
Na ₂ SO ₄	1000	0.00705	6
MgSO ₄	1000	0.00831	3.6
MgCl ₂	1000	0.0105	9.7
CaCl ₂	1000	0.009	8.3
蔗糖	1000	0.00292	1.05
葡萄糖	1000	0.00555	2.0

① 1psi = 6.89Pa。

渗透压可按下式进行测算：

$$\Pi = RT\Sigma c_i$$

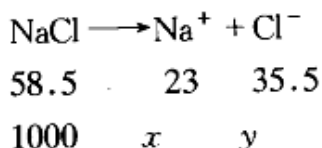
式中 R ——常数，取 $0.082\text{atm}\cdot\text{L}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ；

Σc_i ——各离子浓度总和， mol/L ；

T ——热力学温度， K 。

如 25°C 时， 1000mg/L NaCl 溶液的渗透压可计算如下：

设电离出 x (mg/L) Na^+ ， y (mg/L) Cl^- 。



由上式得 $x = 393.2\text{mg/L}$

$$y = 606.8\text{mg/L}$$

$$c(\text{Na}^+) = \frac{393.2}{23 \times 1000} = 0.0171 (\text{mol/L})$$

$$c(\text{Cl}^-) = \frac{606.8}{35.5 \times 1000} = 0.0171 (\text{mol/L})$$

$$\Sigma c_i = 0.0342 (\text{mol/L})$$

$$\Pi = 0.082 \times (273 + 25) \times 0.0342$$

$$= 0.836\text{atm}$$

$$= 84.7\text{Pa}$$

此值与表 1-1 中的值大致接近。

三、反渗透系统中水的流量和物料平衡

反渗透处理水的简单流程图见图 1-2。

给水通过泵升至一定压力，不断送至反渗透装置的进口，产品水（即反渗透水）和浓水不断地被引走。溶解固形物由反渗透膜截留在浓水中，含盐量很低的产品水则有各种用途。通过浓水管道上的阀门调节浓水流量的大小，控制浓水和产品水的比例。

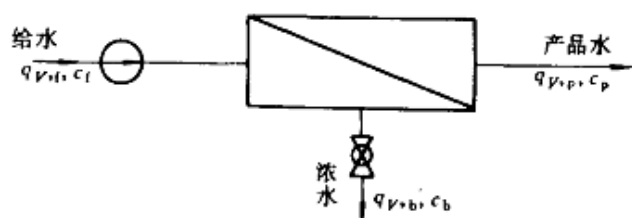


图 1-2 反渗透的简单流程图

从图 1-2 可得到两个基本的平衡式：

1. 流量平衡公式

给水流量等于产品水流量和浓水流量之和。

$$q_{V,f} = q_{V,p} + q_{V,b} \quad (1-6)$$

式中 $q_{V,f}$ ——给水流量， m^3/h ；

$q_{V,p}$ ——产品水流量， m^3/h ；

$q_{V,b}$ ——浓水流量， m^3/h ；

从有关流量值可得到反渗透装置重要指标水的回收率 Y (以%表示)：

$$Y = \frac{q_{V,p}}{q_{V,f}} \times 100\% \quad (1-7)$$

2. 物料平衡公式

给水溶质含量等于产品水和浓水溶质含量之和。

$$q_{V,f}c_f = q_{V,p}c_p + q_{V,b}c_b \quad (1-8)$$

式中 c_f, c_p, c_b ——分别为给水、产品水和浓水的浓度， mol/L 。

从有关水的浓度值，可得到反渗透装置另一个重要指标——水的脱盐率 SR (以%表示)：

$$SR = \frac{c_f - c_p}{c_f} \times 100\% \quad (1-9)$$

或

$$SR = \frac{c_{fA} - c_p}{c_{fA}} \times 100\% \quad (1-10)$$

$$c_{fA} = \frac{c_f + c_b}{2}$$

式中 c_{fA} 为平均给水浓度。

反渗透装置盐的透过率 SP (%)，简称透盐率，可用下式表示：

$$SP = \frac{c_p}{c_f} \times 100\% \quad (1-11)$$

或
$$SP = \frac{c_p}{c_{fA}} \times 100\% \quad (1-12)$$

$$SR \text{ 与 } SP \text{ 的关系为: } SR = 1 - SP \quad (1-13)$$

3. 浓水浓度和产品水浓度的估算

在反渗透装置处理水的过程中，给水不断被浓缩了，假定各离子透过膜进入产品水的浓度为零，则水的浓缩系数 CF 可用下式表示：

$$CF = \frac{1}{1 - Y} \quad (1-14)$$

(1) 浓水浓度的估算 有时为了估算浓水的浓度（如为计算难溶盐的结垢倾向），可以假定产品水浓度为零（实际上，在水处理中，一般要求脱盐率在 95% 以上，因而这种假定是可以允许的），则由式 (1-8) 可得：

$$\begin{aligned} q_{V,f}c_f &= q_{V,b}c_b \\ c_b &= c_f \frac{q_{V,f}}{q_{V,b}} = c_f \frac{q_{V,f}}{q_{V,f} - q_{V,p}} = c_f \frac{1}{1 - q_{V,p}/q_{V,f}} \\ c_b &= c_f \frac{1}{1 - Y} \end{aligned} \quad (1-15)$$

(2) 产品水浓度的估算 由于在系统中，水从一个膜元件（组件）流向另一个膜元件（组件）的处理过程中，给水浓度不断增加。为计算产品水浓度 c_p 可使用平均给水浓度 c_{fA} 来估算：

$$c_p = SP \cdot c_{fA} \quad (1-16)$$

式中
$$c_{fA} = \frac{c_f + c_f CF}{2} \quad (1-17)$$

把式 (1-14) 代入式 (1-17), 把式 (1-17) 代入式 (1-16) 可得:

$$c_p = SP \frac{c_f(2 - Y)}{2(1 - Y)} \quad (1-18)$$

若知道膜对各种离子的透过率, 并已知给水中各离子的浓度, 则可从式 (1-18) 粗略计算出产品水中该离子的浓度。

4. 两个基本公式

对反渗透工艺来说, 透过膜的水量 $q_{V,w}$ (简称透水量, L/h) 与作用膜的压力成比例, 即

$$q_{V,w} = K_w(\Delta p - \Delta \Pi) \cdot \frac{S}{\delta} \quad (1-19)$$

式中 K_w ——膜对水的特性常数;

S ——膜的面积;

δ ——膜的厚度;

Δp ——膜两侧的压力差;

$\Delta \Pi$ ——膜两侧的渗透压差。

若以 $A = K_w \cdot \frac{S}{\delta}$, 净驱动 $p_N = \Delta p - \Delta \Pi$ 表示, 则式 (1-19) 可改写为:

$$q_{V,w} = A \cdot p_N \quad (1-20)$$

透过膜的盐量 $q_{m,s}$ (简称透盐量, mg/h) 与膜的两侧的浓度差 Δc 成正比, 即

$$q_{m,s} = K_s \cdot \Delta c \cdot \frac{S}{\delta} \quad (1-21)$$

若以 $B = K_s \cdot \frac{S}{\delta}$ 表示, 则式 (1-21) 可改写为:

$$q_{m,s} = B \cdot \Delta c \quad (1-22)$$

从式 (1-19) 和式 (1-22) 可知, p_N 越大, 则 $q_{V,w}$ 越大;
 $q_{m,s}$ 与 Δc 成正比, 而与压力无关。

渗透水浓度也可表示为下式:

$$c_p = q_{m,s} / q_{V,w} \quad (\text{mg/L})$$

从上述可知, 系统水的回收率影响透盐率 SP 和产水量。当回收率增加时, 膜侧的给水—浓水浓度增加, 由式 (1-22) 可知, 引起透盐量 $q_{m,s}$ 增加, 同时, 给水—浓水浓度增加, 还会引起渗透压增加, 从而减少 p_N 值, 由式 (1-20) 可知, 相应地降低透水量 $q_{V,w}$ 。要维持相同的透水量, 必须增加运行压力。

第三章

反渗透预处理

反渗透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。与其它水处理工艺选择一样，反渗透系统选择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，对后处理也需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。其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、预处理的重要性

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，即防止悬浮杂质、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。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，因此要防止这些难溶盐生成。

(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。

二、反渗透的水源

1. 分类

地球的总面积约为 $5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$ ，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. 质量

地球上的水源分布及水质情况见表 2-1。

表 2-1 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*
	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	

* 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。

反渗透系统水回收率、渗透水质量以及设备维护要求, 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 2-2。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。但 TDS 值变化范围较大。如 TDS 值可由波罗的海 7000mg/L 到红海和阿拉伯海湾 45000mg/L。它的海水实际化学成分均可由表 2-2 所列的成分按比例估算出来。这就是海水性质的重要规律——相对组成具有恒定性。

表 2-2 标准海水化学成分

阳离子		阴离子		阳离子		阴离子	
名称	mg/L	名称	mg/L	名称	mg/L	名称	mg/L
Ca ²⁺	410	硅	0.04~0.08	Sr ²⁺	13	NO ₃ ⁻	<0.7
Mg ²⁺	1310	Cl ⁻	19700	Fe	<0.02	HCO ₃ ⁻	152
Na ⁺	10900	SO ₄ ²⁻	2740	Mn ²⁺	<0.01	TDS	35000
K ⁺	390	F ⁻	1.4			pH 值	8.1
Ba ²⁺	0.05	Br ⁻	65				

某地表水水质分析见表 2-3。

表 2-3 某地表水水质

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

3. 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。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。

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。

选择的水源要保证可连续供应所需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、水源输送和水源地分布的成本分析。水源地点以及水厂和用户地点都将影响供水的成本。

4. 管理

水源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，防止供水系统发生问题，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。

5. 水质全分析

反渗透系统对水质全分析项目有特定的要求，以满足水源预处理的需要。水质全分析项目见表 2-4。

表 2-4 反渗透系统 (RO) 水质全分析

工程名称											
原水类型		1. 地表水 2. 地下水 3. 自来水 4. 其它									
取样位置		取样深度		取样时间		取样水温		样品外观			
项目	单位	mg/L	mg/L (CaCO ₃)	mmol/L	数量	单位	mg/L	mg/L (CaCO ₃)	mmol/L		
										项目	
阳 离 子	K ⁺										
	Na ⁺					总溶解固体 TDS					
	Mg ²⁺					悬浮固体					
	Ca ²⁺					电导率 (25℃, μS/cm)					
	Fe ²⁺										
	Fe ³⁺					总硬度					
	Be ²⁺					碳酸盐硬度					
	Sr ²⁺					非碳酸盐硬度					