

第四章 反渗透和纳滤系统的预处理

为了保证反渗透和纳滤系统可以稳定运行，对给水的严格与处理就必不可少。预处理的目的是去除给水中会对反渗透和纳滤膜产生污染或导致劣化的物质。一旦预处理系统不能发挥作用，有污染物进入反渗透和纳滤系统，这些物质可能会在膜表面堆积，若给水中含有微生物，它的繁殖会导致更严重的后果。正确把握原水的特性，设计并选择合适的预处理工艺是非常重要的。

预处理系统的目的不外乎以下几点：

- 保证 SDI_{15} 最大不超过 5.0，争取低于 3.0；
- 保证浊度低于 1.0 NTU，争取小于 0.2 NTU；
- 保证没有余氯或类似氧化物，如：臭氧等；
- 保证没有其它可能导致膜污染或劣化的化学物质。

预处理一般可以分为传统预处理方法和膜法预处理。所谓传统预处理是对膜法预处理出现前反渗透预处理工艺的总称，包括：絮凝、沉淀、多介质过滤和活性炭过滤等。随着高分子分离膜技术的不断发展，微滤和超滤逐步出现在反渗透和纳滤的预处理系统中，并在部分案例中替代了传统预处理工艺。美国海德能公司提出的集成膜解决方案（**Integrated Membrane Solutions[®]**，缩写：**IMS[®]**）就是采用超滤技术作为反渗透于处理的集成膜工艺。表 4.1 对反渗透和纳滤系统的预处理作了简要的分类。

表 4.1 关于反渗透和纳滤预处理的分类

	名称	目的
去浊设备	絮凝、砂滤	悬浊物质的去除
	絮凝沉淀、砂滤	
	微滤/超滤	
	保安过滤器	异物去除
加注化学药品设备	消毒剂	铁、锰的氧化
	絮凝剂	悬浊物质的絮凝
	pH 值调整	确保最佳的絮凝 pH 值
	还原剂	防止反渗透和纳滤膜被氧化
	阻垢剂	防止发生结垢

针对预处理系统的目的，可以将预处理分为：防止结垢、防止胶体污染、防止微生物污染、防止有机物污染和防止膜劣化等几个方面。本章就针对不同的预处理目的

分别进行论述，帮助大家了解不同预处理工艺的特点。表 4.2 概括了不同指标的进水要求。

表 4.2 反渗透进水的水质允许值检查表

导致膜污染的指标		允许值	解决方法
悬浮物等	浊度	< 1 NTU	过滤，絮凝沉淀，微滤，超滤
	SDI ₁₅	< 5.0	N/A
	颗粒物	< 100 个/ml	过滤，絮凝沉淀，微滤，超滤
	微生物	< 1 个/ml	杀菌，微滤，超滤
金属氧化物	铁 ¹ , Fe ³⁺	< 50 µg/L	氧化+沉淀或过滤
	锰, Mn	< 50 µg/L	使用分散剂
结垢物质 ²	CaCO ₃	LSI < 0	回收率, pH 值, 阻垢剂
	CaSO ₄	< 230 %	回收率, 阻垢剂
	BaSO ₄	< 6 000 %	回收率, 阻垢剂
	SrSO ₄	< 800 %	回收率, 阻垢剂
	CaF ₂	浓水侧浓度 < 1.7 mg/L	回收率
	Ca ₃ (PO ₄) ₂	浓水侧浓度不能超过溶解度	回收率
	SiO ₂	< 100 %	回收率
有机物 ³	油	0	气浮、吸附
	TOC	< 10 mg/L	活性炭, 过滤, 吸附树脂
	COD	< 10 mg/L	活性炭, 过滤, 吸附树脂
	BOD	< 5 mg/L	活性炭, 过滤, 吸附树脂
导致膜劣化的指标		允许值	去除方法
pH 值 ⁴		3 – 10	加入酸或碱调节
温度		5 – 45 °C	换热器
氧化剂	余氯	< 0.1 mg/L	还原剂, 活性炭吸附
	臭氧	0	
	其他	0	
表面活性剂		选择阳离子或两性表面活性剂时要注意	
酒精		< 10%	N/A

4.1 结垢的防止

4.1.1 结垢的原因

起垢是难溶性的盐类在膜表面析出固体沉淀，防止结垢的方法是保证难溶解性盐类不超过饱和界限。结垢不仅会在膜表面发生，有时甚至在系统的管路内部也会发生。

在反渗透和纳滤系统中析出的垢主要是无机成分，以碳酸钙为主。碱性时会形成包括氢氧化镁在内的等的各种难溶解氢氧化物。在天然的水源中存有的主要难溶性盐类主要有：碳酸钙（CaCO₃）、硫酸钡（BaSO₄）、硫酸钙（CaSO₄）、氟化钙（CaF₂）、硫酸锶（SrSO₄）和二氧化硅（SiO₂）。一般来说，盐的溶解度受各种在

¹ 对 Fe²⁺ 可以允许的最高浓度为 3 mg/L，但需要注意的是由于经常在反渗透的预处理中投加氧化剂，这会使 Fe²⁺ 被氧化为 Fe³⁺。因此在使用氧化剂时，同样需要控制给水中的 Fe²⁺ 含量。

² 不同的浓度和 pH 值对不同难溶盐在水中析出沉淀有不同的影响。

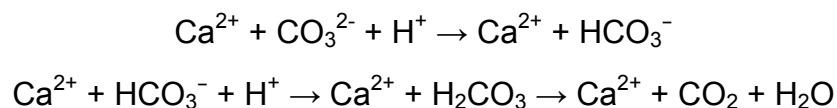
³ 有机物由于构成成分复杂，TOC、COD 和 BOD 三个指标仅作为参考。

⁴ 不同型号膜元件的进水允许 pH 值范围有所不同，同时进水温度对允许的 pH 值范围也有影响。

水中成分的浓度、pH 值、温度以及共存的其它盐分浓度影响，难溶盐的溶解度通常用溶度积 (K_{sp}) 来表示，溶度积越小溶解度就越低，部分难溶盐在 25 °C 时的溶度积请参见附录 6。在反渗透系统设计的时候特别有必要注意的是钡 (Ba^{2+}) 和锶 (Sr^{2+})。钡一般只存在天然的水中，在井水中的钡浓度在 0.05 – 0.2 mg/L 之间，钡的检出级别是 1 μ g/L。原水中钡的临界浓度在海水中是 15 μ g/L 以下，苦咸水中是 5 μ g/L 以下。当在原水中投加硫酸时，需注意在控制给水中钡的浓度在 2 μ g/L 以下。锶的分析必须检测到 1 mg/L 数量级。硫酸根浓度的增加以及水温的降低，会导致硫酸锶的溶解度下降。通常井水中的锶含量在 15 mg/L 以下。此外，一些天然水体中含量不高的无机物由于人为原因（如：加药等）会被带入给水中，例如：磷酸根、铁和铝，这些无机盐往往溶度积很低，极易发生结垢，因此当系统投加药剂（包括：絮凝剂、助凝剂、阻垢剂、酸和碱等）时，必须注意这些人为引入的离子成分的影响。有时甚至会出现投加的不同药剂发生相互作用导致难溶物质析出，进而污染膜元件的情况。因此在投加多种药剂时，应该注意这些药剂的成分，有条件的最好通过试验确认它们的兼容性。

4.1.2 Langelier 指数和 Stiff & Davis 指数

水溶解物质的能力根据水的 pH 值不同有很大变化。原水中的碳酸钙依据加酸量的不同，碳酸根会变成碳酸氢根或二氧化碳气体。下列化学反应式就描述了碳酸盐在水中的平衡。



根据以上平衡，调节 pH 值到酸性区域，可以起到防止碳酸钙析出的作用，从而避免结垢。

是否生成碳酸钙垢的表征指标可以用朗格利尔饱和指数 (LSI) 进行评价。

$$LSI = pH - pH_s \quad (TDS < 4\,000 \text{ mg/L}) \quad (4.1)$$

式中：pH_s —— 水中的碳酸钙饱和时的 pH 值；

pH —— 实际水溶液的浓水 pH 值。

在大多数反渗透系统中，浓水侧的 pH 值会高于进水的 pH 值，因此在考虑 LSI 时务必要考虑浓水侧的 pH 值。通常评判是否结垢的方法如下：

$LSI \leq 0 \rightarrow$ 不结垢

$LSI > 0 \rightarrow$ 会结垢

用已知的经验公式可以方便的算出 pH_s 和 pH 值。

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (4.2)$$

$$pH = \text{Log}_{10} \frac{[\text{碱度, 以 CaCO}_3 \text{ 计}]}{[\text{CO}_2]} + 6.3 \quad (4.3)$$

式中: $A = \frac{\text{Log}_{10}[\text{TDS}_{\text{浓水}} - 1]}{10}$

$B = -13.12 \times \text{Log}_{10} (t + 273.15) + 34.55$, 式中: t —— 水温, °C

$C = \text{Log}_{10} [\text{Ca}^{2+}_{\text{浓水}}, \text{以 CaCO}_3 \text{ 计}] - 0.4$

$D = \text{Log}_{10} [\text{碱度}_{\text{浓水}}, \text{以 CaCO}_3 \text{ 计}]$

我们通过一个例子来说明以上的计算方法。

例: 某个水源设定回收率为 70 %, $pH = 8.0$, Ca^{2+} : 35 mg/L (以 CaCO_3 计), 碱度: 140 mg/L (以 CaCO_3 计), TDS: 500 mg/L, 温度: 18 °C。

解: 浓缩倍率 = $100 \% \div (100 \% - \text{Rec.}) = 100 \% \div (100 \% - 70 \%) = 3.33$

$A = [\text{Log}_{10} (500 \times 3.33) - 1] \div 10 = 0.32$

$B = -13.12 \times \text{Log}_{10} (18 + 273.15) + 34.55 = 2.22$

$C = \text{Log}_{10} (35 \times 3.33) - 0.4 = 1.67$

$D = \text{Log}_{10} (140 \times 3.33) = 2.67$

$pH_s = (9.3 + 0.32 + 2.22) - (1.67 + 2.67) = 7.50$

为了算出浓缩水中的 pH 值, 需要知道原水中的 CO_2 浓度, 把公式 (4.3) 变换一下, 可算出原水中的 CO_2 的浓度。

$$[\text{CO}_2] = 140 \div 10^{8-6.3} = 2.79$$

浓水侧 pH 值可通过下式计算:

$$pH = \text{Log}_{10} (140 \times 3.33) / 2.79 + 6.3 = 8.52$$

$$LSI = pH - pH_s = 8.52 - 7.50 = 1.02$$

于是我们可以得到计算结果 LSI 等于 1.02。因为大于 0, 因此该系统会发生结垢现象。

当原水中的含盐量过高时, LSI 就不适用了, 这时需要用 Stiff & Davis 指数 (SDSI) 进行评价。

$$\text{SDSI} = \text{pH} - \text{pCa} - \text{pAlk} - K \quad (\text{TDS} > 4\,000 \text{ mg/L}) \quad (4.4)$$

式中：pCa —— 钙浓度的负对数值；

pAlk —— 碱度的负对数值；

K —— 系数，和水温和离子强度互有关。

4.1.3 阻垢剂

当通过计算或者软件模拟发现反渗透浓水的 LSI 或 SDSI 指数大于 0 时、或其他难溶盐超过其溶度积时，为了防止无机盐结垢，可以在原水中加入阻垢剂。

4.1.3.1 碳酸钙结垢

碳酸钙结垢可以用 LSI（当 TDS < 4 000 mg/L 时）或 SDSI（当 TDS > 4 000 mg/L 时）进行估算。表 4.3 给出了不同 LSI 或 SDSI 值所对应的处理方法。

表 4.3 碳酸钙结垢与 LSI 和 SDSI 的关系以及处理方法

LSI 或 SDSI	对应办法
< -0.2	可以不添加阻垢剂
-0.2 - +0.5	添加六聚磷酸钠 (SHMP)
+0.5 - +1.8	添加有机系阻垢剂
> +1.8	加酸调整小于 +1.8 后再添加阻垢剂

阻垢剂的添加量

- SHMP：浓水中的 SHMP 的浓度一般控制在 20 – 40 mg/L，根据回收率调节添加浓度，在反渗透系统的进水处注入。
- 有机系阻垢剂：根据阻垢剂制造厂的计算机软件决定加入量。

4.1.3.2 其他无机盐结垢

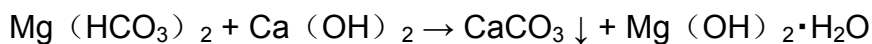
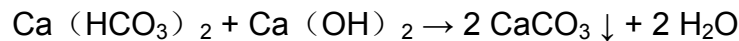
除碳酸盐以外，很多其他无机盐同样具有较低的饱和溶解度。在反渗透系统中经常遇到的有：硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶、一些磷酸盐以及部分金属的氢氧化物，甚至还有硅。这些物质需要有针对性采用不同的专用阻垢剂。

注意：4.1.3 部分对阻垢剂的描述仅供参考，由于实际工程中给水水质复杂、工程设计以及配置不同，选择阻垢剂的依据也会有所不同。强烈建议在选择阻垢剂前与药剂制造商联络，并提供水质数据、反渗透设计方案和所选择的膜型号，通过药剂制造商提供的软件计算以获得恰当的阻垢剂类型以及投加剂量。

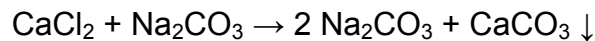
4.1.4 水的软化

含有钙、镁等硬度成分的水作为锅炉或者冷却水使用时，硬度成分会在传热面或管线内侧沉淀。可以采用絮凝、沉淀、过滤、化学软化或者离子交换等方法对水进行软化。

石灰软化法是通过添加氢氧化钙而起到降低硬度的目的。



非碳酸硬度通过添加碳酸钠可以起到降低的作用：



石灰软化工艺还可以降低硅的浓度。添加铝酸或者二氯化铁，在沉淀物中会含有碳酸钙、硅酸、氧化铝和铁的混合物。采用 60 – 70 °C 的高温石灰脱硅酸工艺，加入石灰和氧化镁，可以把硅酸浓度降低到 1 mg/L 以下。而且通过石灰软化处理还可以明显的降低钡、锶以及部分有机物。

4.1.5 回收率

反渗透以及纳滤系统的回收率和原水中溶解物质的浓缩倍率有直接关系，回收率 50% 的系统，浓缩倍数是 2 倍；回收率 75 % 时，浓缩 4 倍；回收率 80 % 时，则浓缩 5 倍；回收率达到 90 % 时，相当于浓缩 10 倍。膜系统内由于浓差极化现象的存在，膜表面的料液含盐量会变得更高。因此，原水由于被浓缩，膜表面的污染会比想象中发生的更快，一般回收率在苦咸水脱盐处理中设在 50 – 80 % 的左右。系统的运行条件、原水的特性状态等因素会影响回收率的确定，一旦选择过高的回收率，就会面临结垢的形成和急速的污染的风险。

由此，按照实际情况适当的设定回收率就显得尤为重要。基于原水的水质分析数据结合把握其四季变动范围，考虑前处理和产水的回收率、运行温度等相关的反渗透系统设计方式，设定运行条件。

4.2 胶体污染的防治

胶体是具有 1 纳米 (nm) 到 1 微米 (µm) 粒径，像粘土一样很难自然沉降的微粒。在水中通常带负电。因此胶体粒子间由于静电斥力的作用，不会发生聚合。

4.2.1 絮凝

絮凝是加入絮凝剂中和胶体粒子表面的电荷，使得胶体粒子间的排斥力变弱，最终导致微粒子之间变的更容易聚集。絮凝通过以下三个方式起作用：（1）胶体间的引力和反作用力；（2）粒子和粒子的接触、冲撞；（3）化学作用（金属氢氧化物的溶解度）。多数常用絮凝剂（如表 4.4 所示）与水中的碱成分反应易生成金属氢氧化物，如果加入絮凝剂的量过多，会导致生成的氢氧化物析出并对膜元件造成污染。

表 4.4 絮凝剂的种类以及添加 1mg/L 引起的水质变化

化学药剂名	分子量	有效 pH 值范围	氢氧化物的产生量, mg/L
硫酸铝 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, (8% as Al_2O_3)	666	6.0 – 8.5	0.234
三氯化铁 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, (38% as FeCl_3)	207.5	3.5 – 11.0	0.250
硫酸铁 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, (11% as Fe^{3+})	400	4.0 – 11.0	0.532
聚合氯化铝 $[\text{Al}_2(\text{OH})_n \cdot \text{Cl}_{6-n}]_m$, (n = 5)	174.5×m	6.0 – 8.5	0.894

影响絮凝的因素，除了絮凝剂的注入量以外，还有 pH 值、搅拌条件、共存离子以及水温等。在实际设计中，必须预先对这些絮凝条件进行预测。最适合的条件要用测试器进行测试，由生成的絮凝体特性状态决定设计条件，当然最终还需要用实际的溶液来决定确切的絮凝条件。

4.2.2 介质过滤

按照过滤的速度可分为缓速过滤和急速过滤两个大类，表 4.5 列出了不同过滤方式的不同特征。

表 4.5 介质过滤的特征

过滤的种类	缓速过滤	急速过滤
过滤速度	约 5 米/天	4 – 10 米/小时
过滤材料的层高	约 0.7 – 1.0 米	约 0.6 – 0.9 米
有效过滤直径	0.30 – 0.45 毫米	0.45 – 0.70 毫米
均等系数	< 2.0	< 1.7
过滤层的再生	阻力增加时，将表层取出进行清洗	反洗
目的	去除细小的难溶物质	适合去处于粒径为 0.1 – 50 微米的颗粒物

介质过滤可以有效的去除反渗透和纳滤给水中的悬浮物，降低浊度和 SDI 值。仅靠絮凝、砂滤无法把原水中的粒子有效捕捉时，还可以配合使用絮凝沉淀和气浮组合。但是，添加过滤辅助药剂或者絮凝剂，有可能导致反渗透和纳滤膜污染。因此需要做小型烧杯实验，以确认药剂的添加是否对反渗透和纳滤系统有影响。

在选择滤速时，依据原水水质的不同可以有所变化。通常对于地下水水源，由于水中的胶体、悬浮物含量较少，可以选择较高的滤速；对于污染较严重的地表水，滤

速的设定一定不能太高，以免对反渗透和纳滤系统造成严重污染（通过多年的实际经验，对于受污染的地表水，过滤速度应尽量小于 8 米/小时，有条件的可以接近 6 米/小时，最高也不要超过 10 米/小时）。

4.2.3 活性炭

活性炭可以用来吸附溶解性有机物以及游离氯和臭氧等氧化剂，用活性炭作为反渗透和纳滤膜系统的预处理已经被广泛使用。通常被采用的活性炭有两种类型：颗粒活性炭（**Granular Activated Carbon**，缩写：**GAC**）和粉末活性炭（**Powdered Activated Carbon**，缩写：**PAC**），它们各自的特征如下。

表 4.6 活性炭的特征

活性炭的种类	颗粒活性炭	粉末活性炭
使用方法	和介质过滤一样	添加到搅拌槽中与水混合
使用中的特点	可以再生，可长期连续运行	一次性投加不能再生，可随时改变加药量和品牌
经济上的特点	设备投入较大	设备简单，但须对废炭进行处理，长期连续运行成本较大

4.2.4 微滤和超滤

微滤（**MF**）和超滤（**UF**）是近几年才大规模应用的反渗透和纳滤预处理工艺。同絮凝、沉淀以及砂滤比较，其过滤的水质稳定、设备管理比较简单，也不会产生过滤残渣或絮凝污泥等废弃物。

作为预处理，微滤和超滤膜的使用可以完全去除不溶解的物质，降低颗粒物的污染风险，使得反渗透的设计水通量可以适当增加约 10 – 20 %。但是微滤和超滤也不能包治百病，并非采用了微滤和超滤就可以排除一切对反渗透和纳滤产生污染的物质。这一方面是由于微滤以及用于反渗透和纳滤预处理的超滤膜都属于筛分过滤⁵，过滤孔径大约在 0.02 – 0.05 微米之间，虽然大部分不溶解的物质都会被截留，但是很多溶解在水中的有机物同样会对反渗透和纳滤系统产生污染，而这恰恰是微滤和超滤预处理不能解决的。另一方面，微滤和超滤预处理系统经常要伴随着药剂的加入，例如：絮凝剂、阻凝剂、氧化剂、酸和碱等，这些化学物质有可能在微滤和超滤的产水中存留，进而导致反渗透和纳滤膜的污染和劣化。其中尤其要注意的是絮凝剂和氧

⁵ 超滤的分离范围很宽，其截留分子量一般从 1 000 到 500 000 Daltons。用于反渗透和纳滤预处理的超滤的截留分子量一般为 100 000 – 500 000 Daltons，对应的孔径约为 0.02 – 0.05 μm。这样的精度可以去除水中全部不溶解的颗粒物和胶体物质，但很多溶解态的有机物可以透过这些超滤膜，从而到达产水侧对反渗透和纳滤膜产生污染。采用更小截留分子量的超滤膜虽然可以避免这些问题，但是由于减小截留分子量会导致产水通量下降，从而增加成本，在经济上尚不可行。超滤的截留分子量等概念以及分离机理相对于微滤更加复杂一些，相关论述请有兴趣的读者参阅相关书籍。

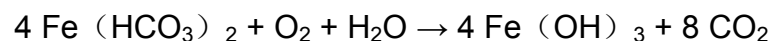
化剂，从目前大量的双膜法（MF/UF+RO）案例来看，大多数微滤和超滤系统会在线投加絮凝剂，种类以铁盐和铝盐为主，这是为了在原水中造成微絮凝以提高微滤和超滤的产水水质，部分絮凝剂未能充分反应并透过微滤和超滤膜进入产水侧，由于在产水水箱中有一定的停留时间，导致这些透过的絮凝剂发生二次絮凝，这对反渗透和纳滤膜会造成严重的污染。氧化剂的投加主要是为了杀灭水中的微生物，在微滤和超滤的反洗步骤中也经常使用，但是残留的氧化剂如果没有充分的还原，就会造成反渗透和纳滤膜的氧化，导致不可恢复的破坏。因此，在选择微滤和超滤作为预处理时，一定要严格控制药剂的投加量、严格按照微滤和超滤制造商提供的设计参数设计，虽然微滤和超滤系统自动化程度高、运行操作简单，但也同样要做好维护工作，确保系统稳定的运行。

4.2.5 保安过滤器

通过预处理的水在进入反渗透和纳滤系统之前通常会设置 5 μm 左右的保安过滤器，这是为了防止管路和中间水箱带入污染物。需要注意的是保安过滤器可能会成为微生物污染的发生源，保安过滤器同样需要定期清洗和杀菌。

4.2.6 除铁和除锰

在有的井水中含有还原态的 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 。这种水在氧化后或者当水中的氢氧根超过 5 mg/L 时， Fe^{2+} 会转变为 Fe^{3+} ，生成胶体的氢氧化物。



铁比锰更容易造成反渗透和纳滤膜的污染。用反渗透系统来处理这样的水时，重要的是不要接触空气。在进入反渗透装置前对原水进行氧化，然后使用过滤器脱除，也可以防止铁和锰带来的污染。对铁和锰的进水要求请参见表 4.2 的注 1。

4.3 生物污染的防治

4.3.1 微生物污染的特征

反渗透和纳滤系统给水中的微生物会在膜表面沉降、凝结形成一层生物膜。一般来说生物膜的厚度若超过了一定的限度就会形成生物污染。使得原水侧的通路阻力增大，原水和浓缩水之间的压力差增加。同时，由于微生物膜阻挡，系统运行的有效压力也会减少，从而导致系统脱盐率的下降。

4.3.2 杀菌消毒

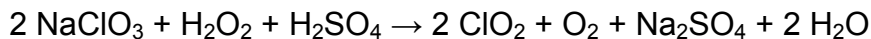
4.3.2.1 药品杀菌

① 氯消毒⁶

用氯消毒的方式能确实的起到效果，在处理上也很容易实现，对效果的确认可以用余氯残留量或者浓度测定。因为易于管理而被广泛运用。但氯会和黑腐质等溶解性有机物发生反应，产生三卤代烷烃（THM）等对人体有害的副产物，目前已经有了许多替代氯的消毒剂被采用了。

② 二氧化氯消毒

二氧化氯（ClO₂）作为消毒剂使用越来越广泛，由于其物理、化学性质上的不稳定性使其无法贮藏，因此都在现场通过反应生成 ClO₂ 并直接使用，反应大都遵循以下方程式。



通常 ClO₂ 的注入量约在 0.6 – 2.0 mg/L 以下。和氯的使用相比，ClO₂ 的消毒效果是氯的 1/10 – 1/2 左右。有关 ClO₂ 的详细使用问题请参见第四部分第十章 10.10。

③ 氯氨消毒

氯氨在市场上没有单独销售，一般采用在原水中同时注入氨氮和氯，在某些氨氮含量较高的水体中可以直注入氯，生成氯氨。用氯氨消毒时，不会生成过多的类似于 THM 的有害物质，比较安全。

④ 臭氧消毒

被臭氧（O₃）处理过的水，如果含有溴化物则会生成次溴酸根离子（BrO⁻），进而生成溴酸离子根（BrO₃⁻）。BrO₃⁻ 被确认有致癌性，为回避风险不推荐使用臭氧杀菌⁷。

⁶ 这里的氯是指余氯，也就是游离氯或自由氯，通常为+1价。它不同于氯离子（Cl⁻）中-1价的氯。Cl⁻没有氧化性。余氯则不同，它具有很强的氧化性，当芳香聚酰胺反渗透和纳滤膜的给水中含有它时，会不可恢复的破坏分离层，这时必须在反渗透纳滤系统前投加还原剂，最常见的还原剂是亚硫酸氢钠（SBS）。

⁷ 只有在水中存在溴化物时才会出现这类问题，通常在反渗透和纳滤的产水中投加 O₃ 不会造成这类风险或风险很小。

4.3.2.2 紫外线杀菌

和使用氯等的药剂杀菌不同，采用紫外线杀菌完全没有药剂残留，也没有副产物的生成。消毒效果会依据作用对象的不同而不同。采用 $UV_{253.7}$ 在 $1 - 21 \text{ mJ/cm}^2$ 的照射剂量下可以进行细菌消毒⁸（90 %不活化）。

4.4 有机污染的防治

芳香族聚酰胺反渗透复合膜是含有苯环的有机物，通常显负电性。带正电荷的有机物即使在低浓度时，也会吸附在膜的表面造成水通量的急剧下降⁹。有机物污染的特征一般用肉眼很难判断。用高感度的傅立叶红外光谱（FT - IR）分析难以判断时，可以采用 Zeta 电位测试法帮助判断膜表面吸附情况。表面活性剂中的非离子型和两性的物质对膜性能的影响也非常严重。通常的药剂清洗很难使膜性能恢复。平常使用的家用洗洁剂因含有表面活性剂，在装填膜元件时禁止作为润滑剂使用。

4.5 膜劣化的防止

膜的劣化，主要是受物理或化学作用发生不可逆的细微构造或分子构造变化，导致膜性能下降的现象。

4.5.1 物理劣化

已知物理劣化的显著事例是从水泵发出的超声波会造成膜破损（脱盐率下降），超过允许的压力或超过上限温度（ $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ）的运行，也都会造成膜劣化导致水通量下降。

4.5.2 化学劣化

化学劣化就是指反渗透和纳滤膜受氧化剂影响，芳香族聚酰胺的聚合链被切断，或者因过量酸、碱等药剂清洗，导致膜分离性能的衰减。

醋酸纤维素反渗透膜会受到来自细菌分解影响导致高分子聚合链断裂，进而导致脱盐率下降。醋酸纤维素作为反渗透膜的材料，目前仅有日本东洋纺公司（Toyobo）制造的中空纤维反渗透膜还在采用。

⁸ 炭疽菌的芽孢为例外，剂量应为 55 mJ/cm^2 。

⁹ 这时应该采用美国海德能公司制造的 LFC® 系列电中性反渗透膜元件，避免这类吸附污染。