

水处理系统反渗透膜污堵分析及清洗方法浅析

张跃鑫 史云

中国医学科学院医学生物学研究所

摘要: 反渗透膜（即 Reverse Osmosis Membrane，简称 RO 膜）在运行一段时间后，会因微量有机物和无机物的污染而受到影响。当 RO 膜受到污染时，会引起产水流量下降、水质电导率上升，甚至会影响膜的使用寿命。RO 膜的污染主要包括无机盐垢（如 CaCO_3 ）、硫酸盐垢（如 CaSO_4 、 BaSO_4 ）、金属氧化物沉积（如铁）、无机胶体（如淤泥）、微生物和有机物污染等。本文主要介绍了生物制品行业水处理系统中 RO 膜的化学清洗方法，结合水处理系统的运行参数和水质状况，有针对性地选取清洗试剂，对反渗透膜进行化学清洗。清洗后，反渗透膜的产水量显著提高、电导率明显下降。

关键词: 反渗透膜；化学清洗；产水量；电导率

1 概述

生物制品行业在生产纯化水和注射用水时，一般采用反渗透技术。纯化水（PW）以饮用水为原料，首先通过多介质过滤器去除悬浮物、有机物、胶质颗粒和微生物等杂质。随后，利用活性炭过滤器进一步去除原水中的余氯、有机物和铁氧化物。软化器则负责去除原水中的钙、镁等离子，从而降低水的硬度。最终，经过一、二级反渗透膜和 EDI 处理，获得高品质的纯化水。注射用水（WFI）以纯化水为原料，通过工业蒸汽对它进行多效蒸馏处理。最终，生成的纯蒸汽经冷凝后，得到温度介于 $80 \sim 105^\circ\text{C}$ 的注射用水。

针对不同的污染物选用不同的化学溶液进行化学清洗，能及时清除附着在反渗透膜表面的污染物，对反渗透膜的各项性能、稳定运行和使用寿命等具

有重要价值。满足以下任一条件时，需要对反渗透膜进行化学清洗，清洗方式分为碱洗和酸洗（以某疫苗生产企业纯化水制备一级反渗透陶式 BW30-400-DRY 膜为参考）。

1.1 水量条件

当反渗透产水流量比正常产水量下降 $10\% \sim 15\%$ 时，且在满足产水电导率的前提下减小一级浓水排放流量后，反渗透产水流量仍低于正常产水量的 $10\% \sim 15\%$ 时，需要对一级反渗透膜进行化学清洗。

1.2 电导率条件

如果反渗透产水的电导率超过 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，且在确保产水量的条件下，通过增加一级浓水排放流量，或对多介质过滤器、活性炭过滤器进行手动冲洗，以及软化器的手动冲洗再生后，电导率依然高于 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，则必须对一级反渗透膜进行化学清洗。

设置了多重保护措施，以控制预处理水的各项指标，从而确保其工作效率并延长使用寿命。例如，介质过滤器（填料为石英砂、无烟煤等）能有效滤除原水中的悬浮物、有机物、胶质颗粒和微生物等杂质。活性炭过滤器（使用椰壳或果壳活性炭）则能吸附水中的有机物、铁氧化物和余氯，从而提高出水水质，保护反渗透膜。软化器（树脂）能够去除原水中的钙、镁等离子，降低水质硬度，实现软化水质的目标。然而，随着使用时间的增加，多介质过滤器的效率、活性炭的吸附能力以及树脂的再生能力都会不同程度地减弱或失效，导致污染物逐渐附着在反渗透膜表面，造成 RO 膜不同程度的堵塞。若不能及时有效地清除这些污染物，将导致 RO 膜性能下降甚至损毁，如图 1 所示。

2.1 微生物污染及控制

微生物污染主要由细菌、真菌等引起，这种污染物较难去除，为避免微生物滋生，对系统的控制尤为重要。一方面需控制进水的细菌总数（TBC）和

2 反渗透膜污染物分析与控制

尽管反渗透膜在运行过程中前端

作者简介：张跃鑫，工程师，主要从事生物制药行业设备运维管理工作。



图1 附着污染物的反渗透膜

营养物质（TOC、COD、游离氯）。进水须经脱氯处理后才能进入一级反渗透膜，脱氯可通过活性炭过滤吸附或添加还原剂（如亚硫酸氢钠）实现。建议先使用活性炭降低原水中的游离氯，净化水质，再在活性炭后端增加余氯检测装置和还原剂（如亚硫酸氢钠）添加口，确保给水中游离氯含量达到反渗透膜的进水指标，保障反渗透膜的使用安全。另一方面定期对活性炭过滤器罐进行冲洗，并对进水管、进水储罐和活性炭过滤器罐进行定期消毒。建议设备运行10～15 h后进行一次冲洗，每3个月进行一次消毒，采用通过换热器将原水加热至80℃并保持该温度循环60 min的方法。通过上述控制措施能够显著降低反渗透膜的微生物污染。

2.2 金属氧化物沉积、结垢及控制

原水中低溶解度盐类如碳酸钙、硫酸钙、硫酸钡、硫酸锶、氟化钙及二氧化硅，在预处理系统中不能完全被除去，进入反渗透膜后因超过其饱和浓度而析出，形成沉积物并在膜表面及进水通道内结垢。常见的金属氧化物沉积主要包括氢氧化铁和氢氧化铝，主要来源于水源中的铁铝腐蚀产物及反渗透系统中的腐蚀产物。

处理这类污染物的最有效方法是加强预处理系统日常运行状态监测，在原水进口添加杀菌剂（如次氯酸钠溶液），在活性炭过滤器进口添加还原剂

（如亚硫酸氢钠），并定期更换预处理系统滤料（石英、活性炭、树脂）及精密过滤器滤芯（防止5 μs以上的颗粒进入反渗透膜）。经过上述控制措施，能显著降低反渗透膜的金属氧化物沉积和结垢。

2.3 悬浮物、胶体污染及控制

当精密过滤器存在缺陷，造成过滤介质、腐蚀碎片及异物等发生泄漏，或反渗透冲洗不彻底时，膜元件可能会受到污染，进而形成非晶体沉淀。膜表面生成胶体沉淀的原因是反渗透进水中含有表面带电荷的胶体颗粒，这一现象通常通过预处理污染指数（SDI）来评估。

预处理污染指数（SDI）表征了水

中颗粒、胶体和其他能阻塞各种纯化设备的物质的含量。在反渗透水处理过程中，SDI是衡量反渗透进水质量的重要指标，也是检验预处理系统出水是否达到反渗透膜进水要求的主要参数。SDI值越低，表明进水对反渗透膜的污染和阻塞趋势越小。标准要求SDI值小于5.0，建议每周至少进行一次检测。

3 反渗透膜化学清洗方法及步骤

3.1 化学清洗溶液选择分析

针对膜的不同污染物，我们需选用相应的化学清洗液。只有针对性地清洗污染物，才能保证清洗效果，并最大程度地降低化学清洗对膜的损害。表1列出几种常见的化学清洗溶液。通过分析表1，选择适宜的清洗化学试剂。

3.2 反渗透膜表面污染物种类分析

为精准识别污染物类型，需从源头到终端进行综合分析：

- （1）分析进水组成，查阅原水水质报告；
- （2）分析测定SDI微孔滤膜表面截留物；
- （3）分析精密过滤器滤芯上的沉积物成分；
- （4）检查反渗透膜外壳进水管内

表1 反渗透膜化学清洗液与反渗透膜污染物对照表

清洗液	0.1%(W)NaOH 或 1.0%(W) Na ₄ EDTA pH12/30℃ (最大值)	0.1%(W)NaOH 或 0.025%(W)Na-SDS pH12/30℃ (最大值)	0.2% (W) HCl 盐酸	1.0% (W) Na ₂ S ₂ O ₄ 硫酸钠	2.0% (W) 柠檬酸
无机盐垢 (如CaCO ₃)	/	/	最好	可以	可以
硫酸盐垢 (CaSO ₄ 、BaSO ₄)	最好	可以	/	/	/
金属氧化物 (如铁)	/	/	/	最好	可以
无机胶体 (淤泥)	/	最好	/	/	/
微生物膜	可以	最好	/	/	/
有机物	可以	好	最好	/	/

注：1.(W)表示有效成分的重量百分含量；2.按顺序，污染物化学式符号为：CaCO₃表示碳酸钙，CaSO₄表示硫酸钙，BaSO₄表示硫酸钡；3.按顺序，清洗化学品符号为：NaOH表示氢氧化钠，Na₄EDTA表示乙二胺四乙酸四钠，Na-SDS表示十二烷基硫酸钠盐（又名月桂酸钠），HCl表示盐酸，Na₂S₂O₄表示连二亚硫酸钠。

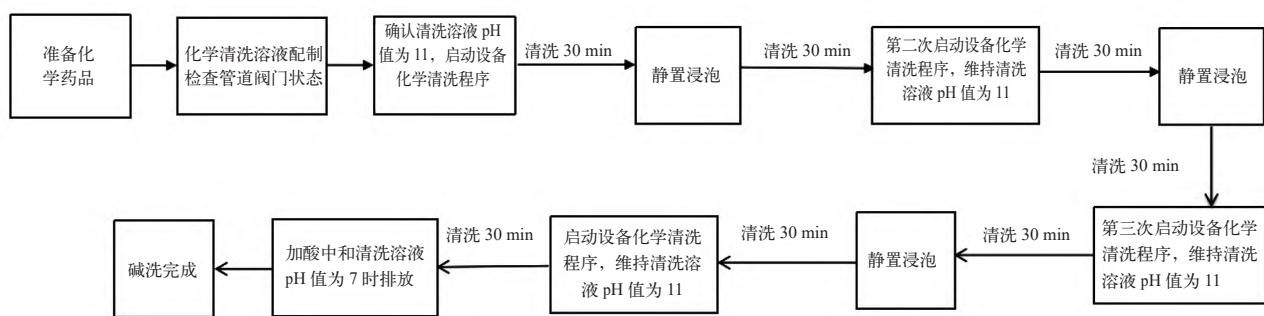


图2 碱洗流程图

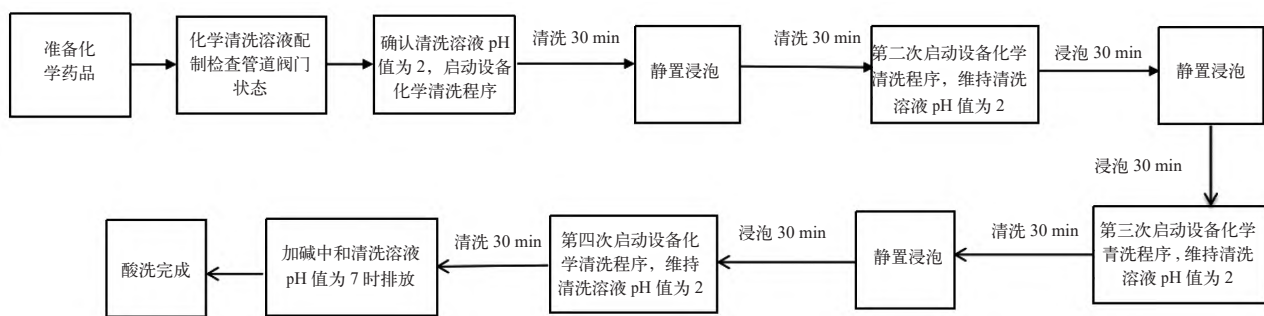


图3 酸洗流程图

表面及反渗透膜元件的进出水端面，若呈红棕色，则可能已发生铁污染；若有泥状或胶状沉积物，通常表明存在微生物或有机物污染。

3.3 反渗透膜化学清洗步骤

反渗透膜化学清洗所遵循的标准流程如下所示：

(1) 清洗前准备：准备好工具（如一次性手套、口罩、护目镜、pH试纸、称量设备等）、清洗溶液配制原料、化学清洗操作记录纸等，并安排好操作人员；

(2) 记录：化学清洗前记录一级反渗透产水电导率、产水流量、pH值、排水流量，确认中间水罐液位能满足化学清洗剂配制需求，检查各阀门、管道连接部件是否有滴漏情况；

(3) 系统操作：停止纯化水机工作，关断预处理与反渗透膜的连接管路，关断反渗透膜与纯化水罐的连接管路；

(4) 管路操作：切换一级反渗透膜与二级反渗透膜之间的连接管路，建立一级反渗透膜正向冲洗至中间水罐的通路；

(5) 化学清洗溶液配制：根据污染物分析结果，依据表1，针对特定污染物配制相应的化学清洗溶液并注入中间水罐。一般流程为首先进行碱洗，随后进行酸洗，最后用清水冲洗。

3.4 反渗透膜碱液、酸液清洗流程图

为确保清洗过程的可控性与一致性，图2和图3分别展示了碱洗和酸洗的流程示意图。

4 结论

通过上述措施，完全可以保证反渗透膜长期、稳定运行，从而有效控制企业生产成本、降低质量风险，实现节能减排。作者基于长期一线实践工作，得出以下结论：化学清洗操作时，如果一次清洗效果不佳，可在清洗过程中适当延长碱液、酸液的浸泡及清洗循环时间，或在清洗完成后直接进行第二次化学清洗，以确保将反渗透膜内的污染物彻底清除。在日常使用过程中，应加强反渗透监测和设备维护，密切关注进水水质变化情况。通过有效措施对预处理进行管理，保证预处理设备正常运行，

尽可能减少对反渗透膜的污堵。另一方面，通过日常监控数据分析，随时掌握反渗透膜的运行情况，一旦发生污染堵塞，应及时采用合理的化学清洗方法，保证膜的产水量、电导率等参数指标保持在受控范围内。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国卫生部. 药品生产质量管理规范（2010年修订）[S]. 卫生部令第79号. 2011.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典：三部[M]. 2015年版. 北京：中国医药科技出版社，2015.
- [3] 王琪琨. 深度处理制药废水中活性炭吸附及再生研究[D]. 郑州：郑州大学，2021.
- [4] 沈继武，王明恩，郭佩超，等. 注射用水系统预处理滤料更换管理研究[J]. 化工与医药工程，2021，42（02）：28-32.