

反渗透浓水在工业循环水中的回用技术研究

陈海娟

中化工程沧州冷却技术有限公司 河北 沧州 061000

摘要：本论文针对水资源短缺及工业用水需求增长的现状，深入研究反渗透浓水在工业循环水中的回用技术。通过分析反渗透浓水的水质特性，系统探讨其在工业循环水回用中的预处理技术、循环水系统运行优化策略及水质监测与控制方法。研究表明，采用合适的预处理工艺，如膜分离、化学沉淀、高级氧化等，结合循环水系统参数优化和精准水质监测，能够有效降低反渗透浓水对工业循环水系统的负面影响，实现反渗透浓水在工业循环水中的安全高效回用，为工业节水和可持续发展提供技术支持。同时，对当前技术存在的问题进行剖析，展望未来研究方向，助力该领域技术创新。

关键词：反渗透浓水；工业循环水；回用技术；预处理；水质监测

1 引言

随着全球工业化进程的加速，工业用水量急剧增加，水资源短缺问题日益严峻。据联合国水资源报告显示，全球约 40% 的人口面临水资源短缺，且这一比例在工业发达地区更高。反渗透技术作为一种高效的膜分离技术，凭借其分离效率高、能耗相对较低等优势，广泛应用于工业生产中的纯水制备、废水处理等领域。在电力、化工、电子等行业，反渗透技术已成为核心水处理工艺。然而，反渗过程会产生大量的浓水，其排放量通常占进水总量的 25% - 50%。反渗透浓水具有高盐度、高硬度、含有大量有机物和重金属离子等特点，如果直接排放，不仅会造成水资源的浪费，还会对环境造成严重污染。以某沿海化工园区为例，每日排放的反渗透浓水达数万吨，其中高盐废水导致周边海域盐度异常，影响海洋生态平衡。与此同时，工业循环水系统是工业用水的大户，占工业总用水量的 60% - 80%，将反渗透浓水回用于工业循环水系统，既能缓解水资源短缺的压力，又能减少浓水排放对环境的影响，具有显著的经济和环境效益。因此，开展反渗透浓水在工业循环水中的回用技术研究具有重要的现实意义。

2 反渗透浓水水质特性分析

2.1 盐类物质

反渗透浓水中含有大量的各种盐类物质，如氯化钠、硫酸钠、氯化钙、氯化镁等。这些盐类物质的浓度通常比原水高出数倍甚至数十倍。以某电子芯片制造企业为例，其反渗透浓水中氯化钠浓度可达原水的 5 - 8 倍，硫酸钠浓度为原水的 3 - 6 倍。过高的盐浓度会导致工业循环水系统中离子浓度升高，增加结垢和腐蚀的风险。例如，钙离子和碳酸根离子浓度过高时，容易生成碳酸钙沉淀，

附着在循环水系统的管道和设备表面，降低设备的传热效率，增加运行成本。研究数据表明，当循环水系统中碳酸钙垢层厚度达到 1mm 时，换热器的传热效率可下降 10% - 15%；氯离子浓度过高则会加速金属设备的腐蚀，缩短设备使用寿命。氯离子能够破坏金属表面的钝化膜，形成点蚀，某石化企业因循环水中氯离子超标，导致管道穿孔频率显著增加，维修成本大幅上升^[1]。

2.2 有机物

反渗透浓水中的有机物来源广泛，包括原水中未被完全去除的天然有机物、工业废水中的有机污染物等。这些有机物的成分复杂，包含腐殖酸、富里酸、碳水化合物、蛋白质以及各类工业有机污染物。在工业循环水系统中，一方面，这些有机物会成为微生物生长繁殖的营养源，促进微生物的滋生，形成生物黏泥，堵塞管道和设备。研究发现，当循环水中有有机物含量超过 5mg/L 时，微生物繁殖速度显著加快，生物黏泥的形成量增加 2 - 3 倍；另一方面，部分有机物在高温、高压和氧化性环境下，可能会发生化学反应，产生有害副产物，影响循环水水质和系统正常运行。例如，含氮有机物在氧化性环境下可能转化为亚硝酸盐等有害物质，对后续处理工艺和设备造成影响。

2.3 重金属离子

反渗透浓水中可能含有铅、汞、镉、铬等重金属离子，这些重金属离子具有毒性和生物累积性。以某电镀企业为例，其反渗透浓水中铬离子浓度可达 5 - 10mg/L，铅离子浓度为 1 - 3mg/L。若这些重金属离子进入工业循环水系统，不仅会对循环水系统的微生物群落产生毒害作用，影响微生物的正常代谢和功能，还可能随着循环水的排放进入自然环境，造成土壤和水体污染，危

害生态环境和人体健康。研究表明,重金属离子会抑制微生物的酶活性,导致微生物的硝化、反硝化等代谢过程受阻,影响循环水系统的生物处理效果。

3 反渗透浓水回用于工业循环水的预处理技术

3.1 膜分离技术

膜分离技术在反渗透浓水预处理中具有重要应用,常见的有纳滤(NF)、超滤(UF)和微滤(MF)等。纳滤膜能够截留大部分二价及以上的离子,对单价离子也有一定的截留效果,可有效降低反渗透浓水中的硬度和部分盐浓度,减少结垢物质的含量。其截留原理基于膜的孔径筛分效应和电荷排斥效应,对于二价离子的截留率通常可达80%–90%。超滤和微滤则主要用于去除浓水中的悬浮物、胶体和大分子有机物,降低水的浊度和污染指数,提高后续处理工艺的稳定性 and 处理效果。例如,某工业企业采用“超滤–纳滤”组合工艺对反渗透浓水进行预处理,经过处理后,浓水中的悬浮物含量显著降低,从初始的50mg/L降至5mg/L以下,硬度去除率达到60%以上,有效减轻了后续工业循环水系统的结垢和污染问题。近年来,新型膜材料如石墨烯改性膜、纳米复合膜等不断涌现,这些膜材料具有更高的截留效率和抗污染性能,为膜分离技术在反渗透浓水预处理中的应用提供了新的发展方向^[4]。

3.2 化学沉淀技术

化学沉淀技术是通过向反渗透浓水中投加化学药剂,使水中的某些离子与药剂发生化学反应,生成难溶性沉淀物,从而去除水中的杂质。常用的化学沉淀剂有石灰、碳酸钠、氢氧化钠等。例如,向含有大量钙离子和镁离子的反渗透浓水中投加石灰和碳酸钠,钙离子和镁离子会分别与碳酸根离子反应生成碳酸钙和碳酸镁沉淀,从而降低浓水的硬度。其反应过程遵循溶度积原理,当溶液中离子浓度乘积超过溶度积常数时,就会形成沉淀。化学沉淀技术操作简单、成本较低,但会产生大量的污泥,需要进行妥善处理,以避免二次污染。目前,污泥减量技术如污泥厌氧消化、污泥热解等逐渐应用于化学沉淀污泥处理,可有效减少污泥体积,提高污泥处置效率^[2]。

3.3 高级氧化技术

高级氧化技术能够产生具有强氧化性的羟基自由基($\cdot\text{OH}$),可以将反渗透浓水中的难降解有机物氧化分解为二氧化碳、水和小分子有机物,降低有机物的含量和毒性。常见的高级氧化技术包括芬顿氧化、臭氧氧化、光催化氧化等。以芬顿氧化技术为例,其原理是利用亚铁离子和过氧化氢反应产生羟基自由基,反应过程

中,亚铁离子作为催化剂,促使过氧化氢分解产生具有强氧化性的羟基自由基,攻击有机物分子,使其氧化分解。在合适的硫酸亚铁和过氧化氢投加量、pH值和反应时间条件下,有机物的去除率可达70%以上,有效改善了浓水的可生化性和水质。近年来,非均相芬顿氧化技术、臭氧–紫外联合氧化技术等新型高级氧化技术不断发展,这些技术具有氧化效率高、适用范围广、二次污染小等优点,为反渗透浓水有机物处理提供了更高效的解决方案。

4 工业循环水系统运行优化策略

4.1 水质参数控制

在将反渗透浓水回用于工业循环水系统时,需要严格控制循环水的水质参数,如pH值、硬度、碱度、电导率等。合理控制pH值在7.5–8.5之间,能够有效抑制金属的腐蚀和结垢。当pH值低于7.5时,酸性环境会加速金属的腐蚀;当pH值高于8.5时,碱性环境容易促进碳酸钙等垢类物质的生成。根据循环水的浓缩倍数和水质情况,控制硬度和碱度在合适的范围内,防止碳酸钙、磷酸钙等垢类物质的生成。通过定期监测循环水的电导率,判断水中盐类物质的浓度变化,及时采取排污和补水措施,维持循环水水质的稳定。例如,当电导率超过设定阈值时,增加排污量并补充新鲜水,以降低水中盐浓度。目前,智能化水质调控系统逐渐应用于工业循环水系统,该系统通过传感器实时监测水质参数,并根据预设程序自动调节加药量、排污量等,实现水质的精准控制。

4.2 微生物控制

为了防止微生物在工业循环水系统中滋生和繁殖,需要采取有效的微生物控制措施。常用的方法包括投加杀生剂和采用物理杀菌技术。杀生剂可分为氧化性杀生剂(如氯气、次氯酸钠等)和非氧化性杀生剂(如季铵盐类等),根据循环水系统的实际情况合理选择和投加杀生剂,能够有效杀灭微生物,抑制生物黏泥的形成。氧化性杀生剂通过氧化微生物细胞内的酶和蛋白质等生物大分子,破坏微生物的生理活性;非氧化性杀生剂则通过改变微生物细胞膜的通透性,使细胞内物质泄漏,从而达到杀菌目的。此外,紫外线杀菌、超声波杀菌等物理杀菌技术也具有无二次污染、杀菌效率高等优点,可以作为辅助手段应用于循环水系统的微生物控制。例如,某制药企业在工业循环水系统中采用紫外线杀菌与季铵盐类杀生剂联合使用的方式,微生物数量得到有效控制,生物黏泥量减少了70%以上。

4.3 设备维护与管理

加强工业循环水系统设备的维护与管理,定期对管

道、换热器、冷却塔等设备进行清洗和检查,及时清除设备表面的污垢和腐蚀产物,确保设备的正常运行和传热效率。清洗方法包括物理清洗(如高压水射流清洗、机械刮除等)和化学清洗(如酸洗、碱洗等)。同时,合理安排设备的运行时间和负荷,避免设备长期在超负荷或恶劣工况下运行,延长设备的使用寿命。例如,采用定期轮换运行设备的方式,使各设备得到充分休息和维护。此外,设备状态监测技术如振动监测、红外热成像监测等可实时监测设备运行状态,提前发现设备故障隐患,实现设备的预防性维护。

5 水质监测与控制

5.1 在线监测技术

采用先进的在线监测技术,对工业循环水系统的水质参数进行实时监测,如 pH 值、电导率、浊度、溶解氧、余氯等。通过在线监测仪器将监测数据实时传输到控制系统,一旦发现水质参数超出设定范围,系统自动发出报警信号,并采取相应的调节措施,如调整加药量、排污量等,确保循环水水质稳定。目前,在线监测技术不断发展,新型传感器如光纤传感器、生物传感器等具有更高的灵敏度和准确性,能够实现对微量污染物的快速检测。例如,基于光纤传感器的浊度监测仪,检测精度可达 0.01NTU,能够及时准确地反映循环水的浊度变化^[3]。

5.2 水质预警与调控

建立完善的水质预警系统,根据历史水质数据和运行经验,设定合理的水质预警阈值。当监测数据接近预警阈值时,系统提前发出预警信息,提醒操作人员采取预防措施,避免水质恶化和系统故障的发生。同时,通过数据分析和模型预测,优化水质调控策略,提高循环水系统的运行效率和稳定性。例如,利用机器学习算法对水质数据进行分析,建立水质变化预测模型,提前预测水质变化趋势,为水质调控提供决策支持。目前,大数据和人工智能技术在水质预警与调控中的应用日益广泛,能够实现更精准的水质管理^[5]。

6 案例分析

某化工企业在生产过程中产生大量的反渗透浓水,原浓水直接排放不仅造成水资源浪费,还增加了环保压力。该企业采用“超滤-纳滤-芬顿氧化”组合预处理工艺对反渗透浓水进行处理,然后将处理后的浓水回用于工业循环水系统。在预处理阶段,超滤膜去除浓水中

的悬浮物和大分子有机物,纳滤膜进一步降低浓水的硬度和盐浓度,芬顿氧化技术则深度降解难降解有机物。经过一段时间的运行实践,结果表明,预处理后的浓水水质得到显著改善,悬浮物含量低于 5mg/L,硬度降低了 65%,有机物去除率达到 75%。在工业循环水系统运行过程中,通过严格控制水质参数、加强微生物控制和设备维护管理,循环水系统运行稳定,未出现明显的结垢和腐蚀问题,设备的传热效率保持良好。与回用前相比,该企业每年可节约工业用水约 50 万吨,减少污水处理费用约 200 万元,同时减少了浓水排放对环境的污染,取得了显著的经济和环境效益。此外,该企业还建立了智能化水质监测与调控系统,通过实时监测和自动调控,进一步提高了循环水系统的运行效率和稳定性。

结束语

反渗透浓水在工业循环水中的回用是解决水资源短缺和减少环境污染的有效途径。通过对反渗透浓水水质特性的深入分析,采用合适的预处理技术,如膜分离、化学沉淀、高级氧化等,结合工业循环水系统运行优化策略和精准的水质监测与控制方法,能够实现反渗透浓水在工业循环水中的安全高效回用。然而,目前反渗透浓水回用技术仍存在问题,如预处理成本较高、污泥处理困难、部分污染物去除效果不理想等。未来,需要进一步加强相关技术的研发和创新,开发新型高效的预处理工艺和设备,降低处理成本;研究更有效的污泥处理和资源化利用技术,减少二次污染;探索多种技术的联合应用,提高对复杂污染物的去除能力。同时,加强智能化监测与调控技术的应用,实现反渗透浓水回用系统的自动化、智能化运行,为工业节水和环境保护提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 张洪亮,李进.反渗透浓水回用技术研究进展[J]. 水处理技术,2020,46(5): 1-6.
- [2] 王坤,赵源.工业循环水系统结垢与腐蚀控制技术[M]. 北京: 化学工业出版社,2019: 56-89.
- [3] 陈东明.工业循环水水质监测与控制技术研究[J]. 工业水处理,2021,41(3): 12-17.
- [4] 王亮,陈慧良.新型膜材料在反渗透浓水预处理中的应用[J]. 膜科学与技术,2022,42(4): 110-116.
- [5] 李远.工业循环水智能化水质调控系统研究[J]. 自动化仪表,2023,44(6): 85-90.