

工业废水深度处理与回用技术

孙凤婷

通辽市生态环境局综合保障中心开发区分中心

DOI:10.32629/eep.v9i6.3232

[摘要] 工业废水深度处理与回用是缓解水资源短缺、降低企业排污压力的重要途径。本文系统分析工业废水深度处理的主要技术路径,包括混凝沉淀、膜分离、高级氧化、离子交换等单元技术,探讨不同水质条件下技术的适用性、处理效果及运行成本。重点分析膜分离技术在回用系统中的核心地位及膜污染控制策略,讨论浓盐水的处置与资源化途径。针对典型工业行业的水质特征,提出技术集成与系统优化方案,并对未来发展方向进行展望。

[关键词] 工业废水; 深度处理; 回用技术; 膜分离; 高级氧化

中图分类号: S141.8 文献标识码: A

Advanced treatment and reuse technology for industrial wastewater

Fengting Sun

Tongliao City Ecological Environment Bureau Comprehensive Support Center Development Zone Center

[Abstract] Industrial wastewater deep treatment and reuse is an important approach to alleviate water resource shortage and reduce pollutant discharge pressure. This paper systematically analyzes the main technical routes for industrial wastewater deep treatment, including coagulation sedimentation, membrane separation, advanced oxidation, and ion exchange. The applicability, treatment efficiency, and operating costs of these technologies under different water quality conditions are discussed. The core role of membrane separation technology in reuse systems and membrane fouling control strategies are emphatically analyzed, and the disposal and resource utilization of concentrated brine are also discussed. According to the water quality characteristics of typical industrial sectors, technology integration and system optimization schemes are proposed, and future development directions are prospected.

[Key words] industrial wastewater; deep treatment; reuse technology; membrane separation; advanced oxidation

工业废水经常规二级生化处理后,还含有一定的悬浮物、溶解性有机物、硬度离子、盐分等,直接排放会对受纳水体造成累积性污染,也会造成水资源的浪费。由于水资源供需矛盾日益突出以及环保排放标准不断提高,工业废水深度处理与回用已经成为企业节水减排的必然选择。深度处理目标就是把生化出水提高到循环冷却水补充水、工艺用水甚至是锅炉补给水的水质标准,实现水资源梯级利用和循环利用。本文从技术体系、关键单元、系统集成、运行维护四个方面对工业废水深度处理及回用技术路线进行论述,并提出相应的优化措施。

1 工业废水深度处理的主要技术单元

1.1 混凝沉淀与过滤技术

混凝沉淀属于深度处理的预处理单元,主要用来去除废水中的悬浮颗粒和胶体物质。采用铝盐、铁盐等混凝剂和聚丙烯酰胺等助凝剂,使微小颗粒聚沉成大颗粒絮体,在沉淀池中去除。经过混凝沉淀之后,废水的浊度明显下降,给后续的膜处理

创造了有利的条件。过滤技术一般在混凝沉淀之后使用砂滤、多介质滤或者纤维滤池,以截留残留絮体和悬浮物。水质较好的工业废水经过滤后可以直接用于对水质要求不高的冷却塔补水或者场地冲洗。该技术成熟可靠、运行成本低,但是去除溶解性污染物的能力小,需要和其他深度处理技术联合使用^[1]。

1.2 膜分离技术

膜分离是工业废水回用处理的主要方法,主要有微滤、超滤、纳滤、反渗透。微滤、超滤用来去除悬浮物、胶体、细菌,产水浊度可达到很低的程度,用作反渗透的预处理单元。纳滤可以截留二价离子和分子量小的有机物,适合于部分软化脱盐。反渗透是目前应用最广的脱盐技术,可以截留绝大部分溶解性盐分和有机物,产水电导率低、水质稳定,可以直接回用到生产工艺中。不同的膜技术组合使用,例如超滤和反渗透的双膜法,已经成为工业废水回用的标准工艺。膜分离技术出水水质好、自动化程度高,但是存在膜污染、浓水排放两大瓶颈问题。

1.3 高级氧化技术

高级氧化技术用来降解废水中的难生物降解溶解性有机物,是提高出水水质的重要方法之一。常用的高级氧化方法有臭氧氧化、芬顿氧化、光催化氧化、电化学氧化等。臭氧氧化对有机物的去除有选择性,常常和活性炭或者过氧化氢联合使用来提高氧化能力。芬顿氧化利用亚铁离子催化过氧化氢产生羟基自由基,氧化能力强,适合于处理高浓度有机废水,但是会产生含铁污泥。光催化、电化学氧化技术清洁高效,但是设备投资大、运行能耗高。高级氧化一般在膜处理之前或者之后进行,具体位置由水质目标决定,在膜前可以减轻有机物对膜的污染,膜后可以提高产水水质以达到更高的回用标准。

1.4 离子交换与电吸附技术

离子交换技术用来去除水中的残余硬度离子和微量溶解性盐分。经过反渗透处理之后,产水中的残余硬度已经大大降低,但是对于锅炉补给水等高标准回用场合,还需要进行软化。离子交换树脂利用交换作用吸附钙镁离子,出水硬度可达到很低。电吸附技术依靠电场作用把离子吸附到电极表面,适合于低盐度水的深度脱盐。与反渗透相比,电吸附回收率高、不需要高压泵,但是处理能力小。离子交换树脂要定期再生,产生再生废液,必须妥善处理^[2]。

2 废水回用系统设计与技术集成

2.1 废水水质分析与回用目标确定

工业废水深度处理工艺的选择要根据原水水质特征以及回用要求来定。不同的行业废水水质差别较大,钢铁工业废水含油、含悬浮物多,化工工业废水成分复杂、有机物含量高,电子工业废水含重金属、络合剂等。对原水进行全面检测分析,检测项目有悬浮物、浊度、化学需氧量、总有机碳、硬度、碱度、电导率、特定离子浓度等。回用目标决定处理深度,用作循环冷却水补充水时,主要控制浊度、硬度和腐蚀性离子;用作工艺用水时,还要控制有机物和微生物;用作锅炉补给水时,对电导率和二氧化硅有严格要求。明确的回用目的才是工艺设计的出发点。

2.2 典型工艺路线与集成方案

根据进水水质和回用要求,工业废水深度处理有若干种典型的工艺路线。对于水质较好的废水,可以采用混凝沉淀、过滤、消毒的简单流程,出水用作冲洗、绿化等低要求用途。对于需要脱盐回用的废水,一般采用超滤和反渗透双膜法工艺,超滤保证反渗透进水安全,反渗透实现高效脱盐。对有机物含量高的废水,在膜处理之前要设置一个高级氧化单元,形成一个由高级氧化、超滤和反渗透组成的工艺。对于回用标准要求高的场合,在反渗透之后可以增加离子交换或者电去离子单元,得到高纯水。工艺集成时要注意各个单元之间水质的匹配以及流量的平衡,防止某个单元处理能力不足造成整个系统的效率降低^[3]。

2.3 膜污染控制与清洗策略

膜污染属于膜分离技术运行过程中的一大难题,会直接导致系统的稳定以及运行费用的增加。膜污染主要有有机物吸附

污染、无机物结垢污染、微生物滋生污染。控制膜污染的方法有预处理加强、运行参数改善以及定时化学清洗。预处理时利用混凝沉淀、过滤等方法尽量除去污染物,减小膜的负担。运行时控制好错流流速,防止颗粒物在膜表面积聚。当膜压差达到设定值的时候,需要做化学清洗,常用的清洗剂有酸液、碱液和表面活性剂。清洗周期的确定要权衡清洗效果对膜寿命的影响,过于频繁的清洗会加快膜的老化,清洗间隔太长会造成不可逆的污染。

2.4 浓盐水处置与资源化

反渗透、纳滤工艺会产生浓缩盐水,浓盐水量占进水量的25%~30%,含盐量高、成分复杂,直接排放会带来土壤、地下水的盐渍化风险。浓盐水处理的主要方式有三种,分别是蒸发结晶、深井灌注、资源化利用。蒸发结晶利用多效蒸发或者机械蒸汽再压缩技术,把浓盐水浓缩到过饱和状态之后结晶分离,得到混合盐或者分质盐,达到零液体排放的目的。深井灌注要具备合适的地质条件,把浓盐水注入到深层地下咸水层中。资源化利用方向有回收工业盐、提取钾、锂、溴等有用元素,但是受制于技术经济性,目前只在少数高浓度的废水中得到应用^[4]。对绝大多数企业来说,浓盐水减量后达标排放或者委托专业机构处理是可行的选择。

3 典型行业废水深度处理案例分析

3.1 钢铁行业废水处理与回用

钢铁行业的废水主要是由轧钢、炼铁、焦化等工序产生的,水量大、含油、含悬浮物高。深度处理工艺一般有隔油、气浮、混凝沉淀、过滤、反渗透。某钢铁企业用超滤和反渗透联合处理循环水排污水,产水回用到循环冷却系统补充水,系统回收率比较高。运行中主要问题就是膜污染,有机物、铁离子是主要的污染物。加强预处理除油除铁,改进清洗方案,系统运行稳定性提高。浓盐水用作高炉冲渣或者烧结配料,达到水的梯级利用和零排放的目的。

3.2 化工行业废水深度处理

化工行业的废水成分比较复杂,含有许多难降解的有机物以及盐分。常规生化处理后化学需氧量仍不能稳定达到要求,必须采用高级氧化和膜技术相结合的工艺。某化工园区废水处理厂采用臭氧催化氧化、曝气生物滤池、超滤、反渗透工艺,出水达到工业循环冷却水标准回用到园区企业。臭氧催化氧化将大分子有机物断链成小分子,提高可生化性,之后曝气生物滤池继续降解有机物。双膜法脱盐后产水总硬度、氯离子等指标达到循环水的要求。该工艺较好地解决了化工废水难降解、盐分累积的问题。

3.3 电子行业超纯水制备与废水回用

电子行业对水质要求很高,芯片制造等工序需要超纯水。超纯水制备工艺有多种,多介质过滤、活性炭过滤、反渗透、电去离子、紫外线杀菌等。电子行业会产生大量的含氟、含氮氨的清洗废水,需要经过处理达到排放或者回用的标准。某电子企业对生产废水经过化学沉淀除氟、生物脱氮、超滤、反渗透处理

后, 产水回用于冷却塔及一般清洗工序, 减少新鲜水取用量。含氟污泥经过脱水之后外运处理。本项目达到废水减排和资源回收的效果。

4 技术优化与运行管理策略

4.1 工艺参数优化与节能降耗

深度处理系统运行成本主要是电耗、药剂消耗。工艺参数的优化可以从以下几个方面入手。在混凝沉淀单元中用烧杯试验来确定最佳的混凝剂投加量以及pH条件, 防止过量投加。在膜处理单元中, 对运行通量、反洗频率进行优化, 使产水水量达到最优的同时, 降低能耗。用变频调速控制水泵的运行, 根据实际需要水量调节输出。对高压反渗透系统可以设置能量回收装置, 把浓水的压力能转化成动力源, 驱动高压泵, 从而大大降低电耗。系统运行数据的累积与剖析是持续改良的前提, 应当建立运行台账并定时对各个单元的性能指标展开评价^[5]。

4.2 自动控制与在线监测

自动化控制系统是保证深度处理系统稳定运行的保证。系统应该配置在线监测仪表, 流量计、压力表、电导率仪、浊度仪、pH计、氧化还原电位计等, 对各个单元的运行情况进行实时监测。程序控制器按照设定的参数自动启停水泵、调节阀门、控制反洗和化学清洗的过程。在线仪表检测出异常值的时候, 系统发出报警并且自动切换到备用模式或者停机保护。对高级氧化单元来说, 要控制氧化剂的投加量, 防止过量投加造成药剂浪费或者残余氧化剂损害后续膜元件。自动控制系统的设计要兼顾可靠性、可维护性, 重要的仪表应有两路或者三路供电。

4.3 运行维护与故障诊断

定期维护属于延长设备寿命、保证处理效果的必然要求。对混凝沉淀单元要定期排泥、清理池底积泥、校正加药泵。对过滤设备进行定期的更换滤料或者清洗滤芯。对膜系统要按照设备说明书定期进行巡检、记录运行参数、检查管路有无泄漏。当产水水质下降或者压差增大时, 就应立即对故障原因进行诊断, 膜污染、密封损坏、仪表失准等均有可能。创建故障案例库、诊断流程图, 可以加快运维人员对问题的定位速度。对大型系统应设专人负责设备的保养、备件更新。

4.4 经济性分析与成本控制

深度处理系统建设和运行费用属于企业在作出决策的时候需要考量的重要因素。投资成本包含设备购置费、土建工程费、

安装调试费等, 运行成本包含电费、药剂费、膜更换费、人工费、维修费等。不同的技术经济性差别很大, 混凝沉淀投资小、运行成本低, 但是处理深度小; 反渗透投资大、运行成本中等, 但是出水水质好; 高级氧化投资和运行成本都高, 适合于处理难降解有机物。方案比选时要综合考虑处理效果、回用收益和环境效益, 做全生命周期成本分析。对有条件的项目可以实行合同节水管理, 由专业的公司投资建设并分享节水收益, 减少企业的初始投入。

5 结束语

工业废水深度处理和回用属于提高水资源利用率、削减污染的重要技术途径。混凝沉淀、膜分离、高级氧化、离子交换等单元技术各有所长、各有所短, 工艺集成是否合理决定着系统综合性能的好坏。膜分离技术在深度处理中起着核心作用, 膜污染控制、浓盐水资源化是膜分离技术发展的两个主要问题。未来要发展抗污染膜材料, 降低处理能耗, 实现浓盐水分质结晶。企业根据自身的水质情况和回用要求, 合理选择技术路线, 加强运行维护及精细化管理, 促使工业废水处理由达标排放转向资源回收, 为工业绿色发展与水环境改善提供强有力的支撑。

参考文献

- [1]石习成.工业废水深度处理与回用技术应用研究[C]//江西省汽车工程学会.第二届工程技术与新能源经济学术研讨会论文集(第二册),2026:321-323.
- [2]谢春林.工业废水深度处理中生态净化技术的应用及创新实践[J].资源节约与环保,2025,(12):67-70.
- [3]付亚赫,袁乙冰.工业废水深度处理中新型膜材料的性能及应用效果分析[J].生态与资源,2025,(12):136-138.
- [4]潘剑伟.工业废水深度处理中膜分离技术的优化与应用研究[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(四),2025:104-111.
- [5]陈文超,李勇超,杨昕旻,等.多行业污泥生物炭特性及深度处理工业废水行为研究[J].工业水处理,2024,44(8):70-80.

作者简介:

孙凤婷(1984--),女,蒙古族,内蒙古人,硕士研究生,工程师,研究方向:环境保护。