

工业领域再生水回用技术及应用前景

毛妙琳

(西安净水处理有限公司, 陕西 西安 710061)

摘要 在全球水资源短缺和环保政策日趋严格的背景下,在工业领域实行再生水回用成为解决水资源供需矛盾、推动制造业绿色发展之路。本文对工业再生水回用的主流技术类型进行了系统的阐述,主要包括物理处理、化学处理、生物处理等原理及特点,分析了电力、化工、冶金、电子等行业中再生水回用场景,并从具体的生产环节出发进行论述;最后结合智能化融合、资源化提高、低碳化提升这三个方面展望未来发展。研究结果表明,当前工业再生水深度回用的主要发展方向是组合处理技术,并且技术融合和价值链重构将会带动再生水回用产业由“成本中心”转变为“价值中心”。

关键词 工业再生水回用技术; 应用场景; 智能化; 资源化; 低碳化

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.021

0 引言

随着工业化进程加速,工业用水需求持续增长,但全球水资源分布不均,使工业可持续发展面临严峻挑战。我国人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4,北方地区水资源开发利用普遍超过 50%,存在严重超采问题。全国工业用水占总用水量的 16.4%,存在供需矛盾。再生水作为“第二水源”,就地取之、供给稳定,不随气候变化而改变,在工业规模化回用时可以减少新水的用量,降低污水排放,实现循环利用与环境效益的协同发展。因此,探讨工业再生水回用技术、分析应用场景、预测发展趋势,对于推进工业水资源循环利用、助力实现“双碳”目标具有重大意义。

1 工业领域再生水回用技术类型

1.1 物理处理技术

物理处理技术是工业再生水预处理或者深度处理的核心,依靠物理作用来分离水中浮游物等物质,不需要改变水质的化学性质,处理效果好、运行稳定、无二次污染。工业上使用最广的是膜分离技术,以及高效沉淀等预处理工艺。超滤截留胶体等,保证后续处理的稳定;纳滤适合于中高盐废水软化和部分脱盐;反渗透是高质量用水回用的重要技术手段。此外,在高盐工业废水回用中电渗析技术具有明显的优点,可以实现盐类的回收利用。不同的物理处理技术主要参数和适用范围有所不同^[1]。

1.2 化学处理技术

化学处理技术用于除去工业废水中难以采用物理方法分离出的物质,利用化学反应改变污染物的性质。工业再生水回用广泛地使用了化学处理的技术,如高级氧化、化学沉淀和消毒等。高级氧化技术产生强大的氧化性羟基自由基降解难降解有机物,非均相 Fenton 技术提高 COD 去除率并降低催化剂的可再生性;臭氧催化氧化技术具有脱色和除臭的作用。化学沉淀法去除重金属离子和磷,MAP 结晶法实现氨氮资源化回收,成本低。采用生成稳定的螯合物沉淀的方式,可以使重金属排放浓度达到《皂素工业水污染物排放标准》(GB 20425)的要求,该方式在电镀、冶金等工业中用于重金属废水的处理。

1.3 生物处理技术

生物处理技术利用微生物代谢分解水中的有机污染物,生成二氧化碳、水以及微生物菌体,具有成本低、环境友好等特点,是核心预处理或主体处理技术。随着技术的发展,传统活性污泥法发展成为生物膜法以及生物强化技术。

膜生物反应器(MBR)依靠生物降解和膜分离的技术,提高降解效率,水质稳定,产泥量减少,能耗低,可规模化应用。

厌氧氨氧化技术可以降低污水处理的碳排放,在石化、制药等行业中广泛使用;菌藻共生生态处理技术把污染物转化为有用的能源和原料;生物强化技术

作者简介:毛妙琳(1994-),女,本科,助理工程师,研究方向:污水处理、再生水利用。

可提高难降解有机物分解的效率,成本低,适用于复杂的工业废水;功能菌剂产业化利用能提升对各种复杂工业废水的适应能力^[2]。

2 工业领域再生水回用技术的主要应用场景

2.1 电力行业冷却用水

电力行业是工业用水的主要用户,在工业用水中,冷却用水所占的比例高达70%,水质对它而言最主要的在于控制悬浮物、硬度、氯离子等杂质,保证冷却系统的结垢、腐蚀及堵塞^[3]。再生水用于电力冷却用水时,必须有针对性地进行处理来降低悬浮物、硬度和微生物的含量,保证出水水质达到电导率 $\leq 3\ 000\ \mu\text{S}/\text{cm}$ 、硫酸根 $\leq 1\ 000\ \text{mg}/\text{L}$ 的标准。核心处理主要是利用物理和化学相结合的工艺,对预处理时使用的高效沉淀加超滤工艺进行去除悬浮物、胶体颗粒的处理,使得出水浊度 $\leq 0.1\ \text{NTU}$ 、 $\text{SDI} \leq 3$,为深度处理打下基础;再根据深度处理的情况,在化学软化或者纳滤软化的基础上减小钙镁离子含量,防止垢形成;最后采用消毒技术来保证出水的生物安全性,使其达到电力冷却用水水质的标准。以火力发电机组循环冷却用水回用为例,使用超滤+纳滤+消毒工艺处理市政再生水,超滤模块可以拦截掉水中的悬浮物、胶体和微生物,出水浊度在 $0.05\ \text{NTU}$ 以下;纳滤模块对于二价盐的脱盐率 $\geq 90\%$,可以将冷却系统中总硬度降低到 $450\ \text{mg}/\text{L}$ 以下,大大减少了冷却系统的结垢隐患;最后用紫外线消毒灯保证出来的细菌总数小于 $1\ 000\ \text{CFU}/\text{mL}$ 。该工艺的应用使再生水回用率达到了95%以上,既减少了新鲜水取水量,又降低了循环冷却系统的阻垢剂投加量,很大程度上节约了水资源费用和药剂费用。此外,部分电厂使用MBR和RO相结合的方式对自身的工业废水进行处理,出水水质比冷却用水高很多,达到废水循环回用的目的,并且提高了水资源的利用率。

2.2 化工行业工艺用水

化工行业工艺用水涉及反应、洗涤、稀释等环节,各个工艺的水质要求不同。基础化工工艺用水要求 $\text{COD} \leq 50\ \text{mg}/\text{L}$ 、氨氮 $\leq 5\ \text{mg}/\text{L}$ 、总磷 $\leq 0.5\ \text{mg}/\text{L}$ 。精细化工工艺用水对水质的要求更高,需要严格控制重金属离子的含量和难降解的有机物浓度。化工废水的组成复杂,含有大量的难降解有机物、重金属离子以及有毒有害物质,因此要采用深度组合的处理技术来达到污染物的有效去除和水质精确提标的目的。例如:在石油化工行业中催化裂化工艺用水回用中,采用“外源生物菌剂强化处理、非均相芬顿高级氧化、反渗透”组合工艺进行处理。生物强化单元投加高效降解菌剂,提

高石油类有机物的分解率达40%,达到COD去除率60%以上;非均相芬顿单元降低难降解的有机物,COD下降到 $50\ \text{mg}/\text{L}$ 以下;反渗透单元高效除盐,出水电导率 $\leq 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$,满足催化裂化工艺用水的要求。该工艺炼化废水回用率可以达到90%以上,减轻了水资源紧张的压力,也减少了废水对环境的污染。精细化工行业用“菌藻共生生态处理—臭氧催化氧化—超滤”相结合的工艺来处理农药废水。菌藻共生单元依靠藻类和微生物的共同作用来降低有机物含量、去除氮磷;臭氧催化氧化单元对有毒有害物质进行降解;超滤单元保证出水悬浮物合格,进而输出到农药合成工艺洗涤用水。

2.3 钯行业洗涤用水

冶金行业的洗涤用水适用于原料洗涤、设备清洗、产品冷却洗涤等。水质的主要要求是控制悬浮物、铁、锰离子的含量,防止因原料纯度不高、设备精度不高或产品质量受到影响,标准为悬浮物小于 $10\ \text{mg}/\text{L}$ 、铁小于 $0.3\ \text{mg}/\text{L}$ 、锰小于 $0.1\ \text{mg}/\text{L}$ 。冶金行业的废水中含有大量悬浮物、重金属离子以及一些微生物等,在进行再生水回用的时候,不能只去除浮游物质和重金属离子,还需保证水的硬度可以稳定控制在工艺设计规定的范围之内,并且能起到保护设备免受腐蚀的效果。处理工艺以物理处理为主、化学处理为辅,预处理通过沉淀和过滤去除大量悬浮物,核心处理采用化学沉淀或者吸附法去除重金属离子,末端使用消毒来保证出水生物安全^[4]。

以钢铁行业高炉煤气洗涤用水回用为例,采用高效沉淀、过滤、化学除铁锰、消毒为一整套的工艺处理方式,有效降低高炉煤气洗涤废水悬浮物含量达到95%以上,出水悬浮物 $\leq 50\ \text{mg}/\text{L}$;除去溶于废水中的浮游物,出水悬浮物 $\leq 10\ \text{mg}/\text{L}$;再加入氧化剂和絮凝剂来完成铁、锰等杂质的吸附与沉淀分离,达到铁、锰离子沉降分离的目标后,接入次氯酸钠进行消毒,保证出水细菌数小于 $2\ \text{个}/\text{mL}$ 。该工艺处理后的再生水完全替代了新鲜水供给高炉煤气洗涤,回用水率可以达到90%以上,大大降低了新鲜水的消耗量。在金属冶炼行业,采用电渗析法和化学沉淀法联合处理冶金废水,电渗析器可以实现盐类的回收及水的初步净化,化学沉淀剂可以去除残余的重金属离子,处理后的出水用于冶炼设备的冷却洗涤用水,从而达到废水资源化的目的。

2.4 电子行业超纯水制备

电子行业超纯水用作电子元件清洗、半导体制造等,对水质的要求很高,需要严格控制离子、悬浮物的颗粒

度以及微生物含量,标准为电阻率 $\geq 1 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 、颗粒度($\geq 0.5 \mu\text{m}$) ≤ 10 个/mL、细菌总数 $\leq 1\ 000$ CFU/mL,某些高端制造更严格,电阻率必须大于 $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 才能满足要求。电子行业再生水回用的核心在于深度净化水质,除去微量离子、悬浮物、微生物及有机物,在一定的技术体系下形成多级分层处理工艺。

级反渗透—EDI—终端过滤法,预处理过程中用活性炭除去水中的有机物和余氯,防止后面膜组件被污染;超滤部分去除水中的悬浮物和胶体颗粒,出水电阻率 $> 10 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$;一级反渗透器脱盐率 $\geq 98\%$,对水中的大部分离子进行脱除,并且达到 $24 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上的出水电阻率;二级反渗透器进一步提高脱盐效率,出水电阻率超过 $24 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上;EDI部分依靠电迁移的作用来除去残留的微量离子以保证出水电阻率在 $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 以上。该工艺可以将再生水变成超纯水,完全取代新鲜水作为半导体芯片清洗的手段,回用率较高,达到 85% 以上,在很大程度上减少了用水量和废水排放量,并且符合国家循环经济政策的要求。

3 工业领域再生水回用技术的应用前景

3.1 智能化技术融合深化

智能化技术与再生水回用工艺深度融合是未来工业再生水回用的核心趋势。依靠 AIoT、数字孪生技术对设备精准监测、智能控制以及高效地运维。AIoT 监测系统中放置传感器来采集参数,再传送到云端进行分析,可以预警水质异常、调整处理工艺、预测性维护,从而大幅度降低设备故障率,达到 70% 以上。利用数字孪生技术建立虚拟模型,模拟优化的执行状况,并把工艺优化周期由原来的月中减少到一小时内,提高运行效率和稳定性。智能投加系统精确计算药剂的用量,减少净水剂的投入量大约 $10\% \sim 15\%$,智能清洗系统自动选择合适的清洗方案和周期,使膜通量恢复率大于 90% ,从而延长膜组件使用寿命达 30% 以上^[5]。未来,随着 5G、物联网等技术的发展,智能系统的全域协同监控可以提高工作效率和经济效益。

3.2 资源化利用深度拓展

工业再生水回用向着“水资源+资源回收”多元化的方向发展,促进产业由“成本中心”转变为“价值中心”。稀缺金属回收、离子印迹等技术在电镀领域得到应用,并且预测到 2030 年规模会达到大约 8 亿。在盐类回收方面,采用“膜浓缩+蒸发结晶”工艺回收高盐废水中的盐,实现资源化,高盐废水零排放系统会规模化地回收盐。能源回收过程中,将厌氧消化、

光伏驱动技术和回用工艺相结合,厌氧沼气可以发电供热,光伏驱动可降低能耗成本。

3.3 低碳化技术路线升级

在“双碳”背景下,工业再生水回用技术向着低碳化发展。节能技术以高耗能单元为主,曝气系统采用新技术来减少能耗超过 35% ,膜分离技术降低 RO 单元能耗 $20\% \sim 30\%$,MBR 技术能耗降到 $0.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以内。在清洁能源替代方面,光伏、风电逐渐被其他的能源所取代,“零碳水厂”已经建成,在缺水地区采用光伏驱动系统来降低碳排放。除此之外,低碳生物处理技术得到大规模应用,厌氧氨氧化技术减少碳排放达到 60% 以上,已经得到广泛推广。未来,低碳化技术将成为选型的主要导向,推动产业绿色低碳的发展。

4 结束语

工业领域再生水回用技术是破解水资源供需矛盾、促进制造业绿色转型的重要途径,已经形成为以物理、化学、生物以及组合处理技术为核心的技术体系,在多个行业得到规模化应用。膜分离、高级氧化、MBR 和生物强化等技术是当前主要的方法,能够满足各个行业的用水需求。但是,工业领域再生水回用技术仍存在核心膜材料依赖进口、高盐废水处理成本高的问题,需要从技术研发、商业模式创新、标准体系建设等多方面入手来提升技术的升级和规模化推广,以应对时代的发展需求。未来,工业再生水回用会向着智能化、资源化、低碳化的方向发展,依靠 AIoT、数字孪生来进行智能管控,在资源配置上利用资源回收促进产业价值的提升,从碳排放角度看则依赖低碳技术来减碳促产,为工业持续健康发展打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 寇嘉玮,徐卓立,张高峰,等.黄河上中游地区再生水利用现状与创新途径研究[J].人民黄河,2025,47(S2):44-45.
- [2] 俞祎波,姚俊,周宏伟,等.基于节水减排价值的再生水利用经济效益研究[J].水利规划与设计,2024(04):43-46.
- [3] 邱敏,魏豪,兰永龙.再生水回用于火电厂循环水系统工程改造技术的研究与应用[J].节能与环保,2023(09):72-75.
- [4] 朱仁仁.再生水回用工程若干问题思考[J].工程与建设,2023,37(02):429-432.
- [5] 杨赛国,谷康辉.浅谈某城市再生水回用的现状及进展[J].广东化工,2024,51(06):104-107.