

熊建华. “双碳”目标下化学镍废水处理技术研究进展及展望[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 32-42.

XIONG J H. Research progress and prospects of chemical nickel wastewater treatment technology under the “dual carbon” target[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 32-42.

“双碳”目标下化学镍废水处理技术研究进展及展望

熊建华*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】我国作为全球最大的化学镀镍生产和消费国,化学镍废水年产量巨大。镍的毒性严重威胁生态环境和人体健康。但其作为重要资源,在合金、电池、电子、化工、军工、航天等多个领域中广泛应用,预计未来需求持续攀升。在“双碳”目标背景下,化学镍废水的处理和处置需从全流程污染防治角度出发,综合考虑镍污染预防、污染物去除及资源回收等。【方法】文章对化学镍废水的来源和性质进行归纳,分析了企业化学镀镍清洁生产的改进方向;在化学镍废水处理上,系统分析了传统技术、新型技术及组合技术的机理和应用,并对这些技术在应用上的优缺点等进行了归纳总结;在化学镍废水资源回收上,系统地分析介绍了磷资源、镍资源和水资源的回收技术机理及应用,并对不同镍浓度废水的回收技术进行了分类说明。【结果】明确企业化学镀镍清洁生产的改进路径,包括提升镍的使用率、减少镍的排放量及应用智能化技术等;总结出化学镍废水处理各技术在应用中的优缺点,发现新型技术及组合技术可显著提升处理效果与效率;梳理出不同镍浓度废水对应的资源回收技术,为工程应用提供参考。【结论】通过对化学镍废水处理与资源回收的多方面研究,为“双碳”目标下化学镍废水处理和资源回收提供了借鉴与指导,同时对未来化学镍废水处理的发展进行展望,推动相关技术的进一步优化与应用。

关键词 “双碳”目标 化学镍废水 清洁生产 镍回收 零排放

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0032-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.004

Research Progress and Prospects of Chemical Nickel Wastewater Treatment Technology under the “Dual Carbon” Target

XIONG Jianhua*

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] As the world's largest producer and consumer of chemical nickel plating, China generates a massive annual volume of chemical nickel plating wastewater. The toxicity of nickel poses significant threats to ecological environments and human health. However, as an important resource, nickel is widely used in various fields such as alloys, batteries, electronics, chemicals, military, and aerospace, and the demand for nickel is expected to grow continuously in the future. In the context of the “dual carbon” goal, the treatment and disposal of chemical nickel wastewater needs to be considered from the perspective of total process pollution prevention and control, taking into account nickel pollution prevention, pollutant removal and resource recovery. [Methods] This paper summarizes the sources and characteristics of chemical nickel plating wastewater, analyzes the improvement directions of clean production in chemical nickel plating enterprises. In the chemical nickel wastewater treatment, this paper systematically analyzes the mechanism and application of traditional technology, new technology and combined technology, and summarizes the advantages and disadvantages of these technologies in application. In the resource recovery of chemical nickel wastewater, this paper systematically analyzes and introduces the recovery technology mechanism and application of phosphorus resources, nickel resources and water resources, and classifies and explains the recovery technology of wastewater with different nickel concentrations. [Results] The improvement paths for clean production of chemical nickel plating in enterprises are clarified, including improving the utilization rate of

[收稿日期] 2024-11-02

[通信作者] 熊建华,男,硕士研究生,研究方向为污染控制与资源化利用技术,E-mail:418449440@qq.com。

nickel, reducing nickel emissions, and applying intelligent technologies. The advantages and disadvantages of various technologies in the treatment of chemical nickel plating wastewater are summarized, and it is found that new and combined technologies can significantly improve treatment efficiency and effectiveness. Different resource recovery technologies for wastewater with different nickel concentrations are sorted out, providing references for engineering applications. [**Conclusion**] Through multi-faceted research on the treatment and resource recovery of chemical nickel plating wastewater, this paper provides references and guidance for the treatment and resource recovery of chemical nickel plating wastewater under the "dual carbon" goals, and looks forward to the future development of chemical nickel plating wastewater treatment, promoting the further optimization and application of related technologies.

Keywords "dual carbon" target chemical nickel wastewater clean production nickel recovery zero discharge

化学镀镍是一种重要的镀镍处理工艺,因其能提升镀件的品质而备受青睐。近年来,随着经济的快速发展,我国已经是世界上最大的化学镀镍生产和消费国,也是化学镍废水排放大国。镍具有毒性,能在土壤和生物体内累积,导致生物体内部系统紊乱,引起人类各种疾病,甚至增加致癌风险。因此,严格控制镍排放,对生态环境和人体健康具有重大意义。在新时代“双碳”目标战略发展的背景下,国家制定了严格的生态保护措施及法律法规,这些措施及法律法规在不断地完善与加强。例如,针对总镍的排放,国家制定了严格的排放标准。《电镀污染物排放标准》(GB 21900—2008)中规定,排放废水中总镍的排放限值为 0.1 mg/L。镍是一种重要资源,在合金、电池、电子、化工、军工、航天等多个领域中广泛应用,未来镍的需求将会暴发式增长^[1]。然而,我国属于镍资源短缺国家,大量依赖进口。为此,国家已经提出了资源回收的政策,推动企业在化学镀镍的清洁生产技术上进行创新和实践。这就要求企业加强管理,提升化学镀镍生产的清洁生产技术,同时在废水处理过程中不仅要注重去除效率,还需考虑资源化回收,以实现经济环境的统一,推动可持续发展。

1 化学镍废水的来源及性质

1.1 化学镍废水的来源

化学镍废水主要来自电镀、金属表面处理、合金制造等生产过程。在这些过程中,所使用的镍盐、有机溶剂以及其他化学试剂会产生大量废水,成为环境污染的重要源头。化学镀镍生产工艺主要由3部分构成:镀前处理、化学镀阶段以及镀后处理。化学镍废水的主要来源包括前处理、化学镀、镀件的漂洗和后处理^[2]。

(1)化学镀镍前处理阶段:这一阶段为镀件的预处理,主要包括除油和除锈等操作,该阶段产生的

废水呈酸性,主要含有油类、重金属离子和少量有机化合物。

(2)化学镀阶段:该阶段主要分为预镀、化学镀、镀件漂洗3个子阶段。镀镍漂洗水是化学镍废水污染因子的主要来源,重金属污染物主要为镍盐,少量为其他金属盐。此外,废水中还含有大量的磷酸盐、次磷酸盐或硼氢化物及络合剂等。

(3)镀镍后处理阶段:该阶段主要是退镀和钝化等过程,产生的废水呈酸性或碱性,含有镍等重金属离子和各种有机化合物。

1.2 化学镍废水的性质

化学镍废水因生产工艺、原料及镀镍液的成分等因素而异,但整体表现出以下特征。

(1)污染物因子复杂。化学镍废水通常呈酸性或碱性,主要污染因子包括镍、氨氮及大量的难降解有机物(如稳定剂、络合剂、加速剂等)和无机物(如硫酸盐、亚磷酸盐等)^[3],污染因子种类繁多,不同生产工艺所排放的废水污染因子差异显著,水质波动性强。

(2)污染物浓度高。废水中的主要污染物包括镍、有机物、总氮、总磷等,其浓度普遍较高。对国内多个电镀园区碱性含镍废水水质进行的研究^[4]表明,其COD最大的超过9 000 mg/L,络合态镍最大的超过150 mg/L,总氮最大的超过1 500 mg/L,其中有机氮超过1 400 mg/L。鉴于不同的生产工艺条件,化学镍废水内的污染物浓度波动幅度较大,但整体来看,化学镍废水的污染物浓度始终维持在较高水平。

(3)废水处理难度大。废水中络合剂能与镍离子形成稳定的络合物,导致其难以通过调节pH沉淀、使用重捕剂或硫化钠等方法去除镍离子。此外,次磷酸根和亚磷酸根离子使用石灰沉淀无法有效去除,需将次磷酸根彻底氧化为正磷酸根,才能实现后

续有效去除。

(4) 毒性强, 危害性大。废水中镍对生态环境和人类健康构成严重威胁, 大量氮、磷和有机物可能导致水体污染和富营养化, 威胁水生生物的生存和人类健康。

2 “双碳”目标下化学镍废水处理的新要求及难点

2.1 处理新要求

“双碳”目标对化学镍废水的处理提出了新要求并带来了新挑战和提升机遇。“双碳”目标下化学镍废水处理不仅需考虑达标排放, 降低对环境的负荷, 还需考虑资源的回收利用, 实现可持续发展。因此, 化学镍废水的处理需要“源头控制”和“废水处理及资源回收”两手抓的策略, 不仅要降低化学镍废水对环境的影响, 还要通过系统的管理和科学的技术应用, 实现可持续的环境保护目标。

“源头控制”需要生产企业加强清洁生产技术, 例如: (1) 优化生产工艺, 研究和实施先进的生产工艺, 如采用新的清洗技术, 减少废水的排放量和排放浓度, 提高镍的使用效率, 减少废水中镍的排放浓度; (2) 应用智能化技术, 对生产流程进行实时监测和调整, 减少废水的排放; (3) 资源回收与循环利用, 在化学镀镍过程中, 探索高效的镍回收技术, 减少对新资源的需求, 降低生产成本, 减少废物排放, 降低对环境的影响; (4) 绿色化学原料的使用, 如寻找低毒或无毒的还原剂, 尽量减少生产过程中的有害物质释放。

2.2 处理的难点

(1) 管理难度。一些电镀产业园管理相对粗放, 分类收集和处理措施不到位, 导致化学镍废水水质波动大, 且可能与其他废水混合, 影响整体处理效果。化学镍废水处理系统的操作需要严格控制各项参数, 以保证处理效果, 操作人员必须具备一定的专业知识, 否则容易发生意外, 导致安全隐患。

(2) 化学镍废水处理的复杂性、针对性、综合性。化学镍废水成分复杂, 且生产过程中所用药剂的不同, 废水排放的特性也不同, 需要根据具体的废水排放情况综合考虑处理工艺。

(3) 设备投资和运行成本高。建设、运行和维护化学镍废水处理系统需要投入大量资金, 特别是当前的回收技术, 其投资和运营成本较高, 限制了资

源的回收利用。

(4) 副产物和二次污染。在化学镍废水处理过程中, 生成的沉淀、污泥或其他副产物处置不当, 可能导致二次污染。同时, 某些化学药剂对环境可能造成潜在的危害, 处理不当会对水体、土壤和空气造成污染。

(5) 废水回收资源性。化学镍废水中镍浓度相对较低, 在实际工程应用中, 这些镍主要以沉淀物的形式转化到污泥中, 目前的回收技术在成本上未能覆盖回收的经济效益。

3 化学镍废水处理技术进展

3.1 化学镍废水处理传统方法

化学镍废水处理传统方法有化学沉淀法、吸附法、氧化还原法、离子交换法等。

化学沉淀法通过向化学镍废水中投加一定量的药剂, 如石灰、氢氧化钠、硫化物、螯合剂等, 使镍与药剂生成不溶的沉淀物而被去除。化学沉淀法具有工艺简单, 对运行要求环境不高, 操作简单等优点, 在工程上被广泛应用, 但也有投药量大、沉淀污泥多、易造成二次污染等问题。

吸附法是利用物理或化学相互作用力, 将水中的污染物(镍离子)吸附到固体材料的表面, 从而降低水中污染物的浓度。常用于吸附剂有活性炭、膨润土、改性蒙脱土、废弃物(如红泥、农业废弃物等)等。吸附法处理化学镍废水时, 同时受到废水中其他物质的干扰, 影响其吸附效率, 吸附剂吸附饱和后需要更换、补充或再生。吸附法通常用于中低浓度的化学镍废水处理, 在工程中用在化学镍废水处理末端, 保证出水水质。

氧化还原法是指采用如 NaClO 、 $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ 等氧化剂进行氧化, 降低废水的化学需氧量(COD), 将氨氮氧化去除, 次磷酸盐、亚磷酸盐氧化为磷酸盐, 使络合态的镍游离出来成为镍离子, 进而通过沉淀被去除。在工程中, 相较于氧化还原法, 因有更高效和经济的氧化技术可供选择, 实际应用中更倾向于采用高级氧化法, 以获得更好的处理效果和经济效益。

离子交换法是利用离子交换剂对镍离子的选择性吸收去除废水中的镍, 从而达到处理要求。离子交换剂一般为一些合成树脂或天然矿物材料, 比如 Na 型或 H 型沸石、粉煤灰、某些特定的阳离子交换

树脂^[5]。废水中的悬浮物、有机物等可以阻碍镍离子与交换剂的反应,使用时需预先对这些物质进行处理。同时,离子交换法可以通过吸附镍离子而达到浓缩一定浓度镍的效果,为镍的回收提供良好的前提。工程中离子交换法常用作镍资源回收或作为化学镍废水处理末端保护措施,保障出水水质。

其他传统处理化学镍废水的方法还有生物法、萃取法等。这些方法由于自身的局限及使用条件限制,在实际工程上应用不多。

3.2 化学镍废水新型处理方法

为了提高化学镍废水处理效率、降低处理成本以及提升处理稳定性,各种新技术不断涌现,比如 Fenton 氧化及类 Fenton 氧化法、臭氧氧化法、电催化氧化法、过硫酸钠氧化法、膜系统法、蒸发法等。

3.2.1 Fenton 氧化及类 Fenton 氧化法

Fenton 氧化法通过 H_2O_2 和催化剂 Fe^{2+} 在酸性条件下产生高活性的羟基自由基($\cdot OH$), $\cdot OH$ 具有极强的氧化性,能将废水中的有机物矿化或转化为易于降解的小分子物质^[6-7],同时破坏络合态的镍,将其转化为游离态的镍^[8],将次磷酸盐、亚磷酸盐氧化为磷酸盐^[9]。Fenton 氧化法能相对高效地去除络合镍^[10]和其他污染物^[11],适用范围广,操作相对简单可控,是常用的处理方法。Fenton 法存在对 pH 敏感、药剂成本较高、可能产生二次污染等缺点。

为了优化 Fenton 法处理效果,提高 Fenton 氧化效率,在 Fenton 氧化技术上进行了改进和扩展,有通过引入光源、电场、超声等手段来增强反应效果,也有针对各种催化体系(如铁基催化剂、非铁基催化剂、双金属催化剂、非金属催化剂等)来替代 Fe^{2+} 给 $\cdot OH$ 提供催化作用。在 Fenton 氧化体系中引入紫外光来提高 H_2O_2 的分解效率,从而有效减少 Fe^{2+} 的用量,促进 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 的转化,加速 H_2O_2 分解,提高 H_2O_2 利用率,进而使有机物矿化更彻底^[12]。梁慧宇^[13]用 $CuO-CeO_2-Co_3O_4$ 复合催化剂氧化处理化学镍废水,最终废水中 Ni^{2+} 去除率达 99.9%,剩余 Ni^{2+} 含量为 0.034 mg/L。

类 Fenton 法可以提高 H_2O_2 的使用效率,降低药剂使用量,同时使用时需考虑运行稳定性、运行成本和催化剂的回收利用等因素。

3.2.2 臭氧氧化法

臭氧在水中的氧化还原电位能够达到 2.07 V,

其氧化处理废水的主要原理是通过臭氧与污染物直接或间接反应将其氧化分解。在直接氧化过程中,臭氧分子与水中的有机污染物直接发生反应,这种反应主要包括亲电取代反应和偶极加成反应。间接氧化是通过生成 $\cdot OH$ 来实现的,在这一过程中,臭氧首先被分解成氧气和 $\cdot OH$, $\cdot OH$ 能够迅速氧化甚至矿化水中的有机物。

张耀辉等^[14]采用臭氧催化氧化工艺处理化学镍废水,以 $Fe_2O_3-TiO_2-MnO_2/Al_2O_3$ 作为臭氧催化剂,经臭氧催化氧化后,水中的苯环类物质和共轭结构被破坏,出水可生化性指标(BOD_5/COD)由原来的 0.12 提高到 0.36,生化性提高,为后续进一步生化处理提供了条件。王延梅^[15]采用臭氧+紫外线+ $Ca(OH)_2$ 法处理含镍废水,处理后镍离子质量浓度为 0.086 5 mg/L,达标排放。

臭氧技术具有高效和环保的优点,但其臭氧利用率低、运行成本高(臭氧生成和催化剂更换的成本),目前臭氧氧化处理化学镍废水的技术进展主要集中在提高处理效率、降低成本以及优化催化剂体系上。

3.2.3 电催化氧化法

电催化氧化法是一种利用电能驱动的高级氧化技术,通过电化学反应生成具有强氧化性的 $\cdot OH$ 或其他氧化剂(如 H_2O_2)^[16],降解水中的污染物。李明等^[17]采用电催化氧化法处理化学镀镍高氨氮废水,在最优试验条件下进行反应后,出水氨氮 ≤ 8 mg/L、镍 ≤ 0.1 mg/L,可以稳定达到排放标准。电催化氧化法一直在改进,目前主要集中在以下几个方面:电极材料和结构的优化、电化学反应器的设计与改进、开发更高效的催化剂、与其他处理方法的联用。赵鑫等^[18]对比研究了 $Ti/SnO-Sb$ 、 $Ti/SnO-Sm-Sb$ 、 $Ti/SnO-La-Sb$ 电极对乙二胺四乙酸合镍(EDTA-Ni)废水中络合态镍的去除能力,研究表明,具有较高析氧电位的 $Ti/SnO-Sm-Sb$ 、 $Ti/SnO-La-Sb$ 电极电解 30 min 即可去除 90% 以上的络合态镍,降解反应速率是 $Ti/SnO-Sb$ 电极的 1.35、1.17 倍。

电催化氧化法利用电极产生活性氧化物直接或间接降解污染物,易于控制、处理效率高、适用范围广、无二次污染,正在逐步应用到工程中。然而其也存在一些局限性,如能耗、设备成本、处理效率受多种因素影响等。开发更高效、成本更低的电极和开发高效的三维电极电催化氧化是目前研究的热点。

3.2.4 过硫酸盐氧化法

过硫酸盐氧化法是一种高级氧化技术,利用过硫酸钠作为氧化剂,通过不同的活化方式产生硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$), $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 具有高强氧化性,大多数的有机污染物可以被快速降解矿化为 CO_2 和无机酸。用过硫酸盐氧化法处理化学镍废水,能快速有效地氧化废水中有机物、偏磷酸、氨氮,并且彻底地破络,让络合镍变成镍离子,后续能有效地沉淀去除。过硫酸钠在水中能够电离产生硫酸根离子($\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$) (强氧化性),该过程在常温下反应速率低,不能满足生产活动的需求,需要一定的活化方式,让其快速地产生氧化性更高的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 。常见的活化方式主要有热、光(紫外线)、过渡金属离子(Fe^{2+} 、 Ag^+ 、 Ce^{2+} 、 Co^{2+} 等),以及碱活化和碱热活化等^[19]。孙超等^[20]通过光触媒二氧化钛/过硫酸钠+氢氧化钠法处理含镍废

水,废水流量为99.8 mL/min,过硫酸钠溶液流量为2.5 mL/min,氢氧化钠溶液流量为0.2 mL/min时,处理后镍质量浓度为0.086 mg/L,满足排放要求。

过硫酸盐氧化法表现出强氧化性的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$,在试验中取得了良好的效果,但受制于反应条件、操作复杂、运行成本,目前在工程实践中应用还较少。

3.2.5 膜分离法

膜系统处理法是一种利用膜作为分离介质,通过物质在膜上的选择性透过性来分离和去除溶液中目标成分(如重金属离子、溶解盐等)的技术。

一种是物理膜,通常包括微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、反渗透(RO)等工艺。膜分离法能够高效去除高浓度的镍离子及其他重金属,尤其是NF膜和RO膜。各种膜的性能技术分析如表1所示。

表1 各种膜性能技术分析

Tab. 1 Technical Analysis of Various Kinds of Membrane Properties

| 膜类型 | 原理 | 孔径大小 | 产率 | 去除能力 | 优点 | 缺点 |
|-----|----------|------------------------|------|----------------------------|------------------|------------------------------|
| MF | 物理筛分 | 0.1~10.0 μm | 高 | 主要去除废水中悬浮物、非溶解态的镍及部分大颗粒和胶体 | 设备投资较少,运行简单,能耗低 | 对溶解性物质几乎没有去除能力,膜污染较快 |
| UF | 物理筛分 | 1~100 nm | 较高 | 主要去除废水中细小的镍沉淀物和部分有机物 | 能去除较小颗粒;可用于浓缩和净化 | 膜污染相对较快,需定期清洗;对小分子和单价离子去除效果差 |
| NF | 物理筛分+电排斥 | 1~10 nm | 较高 | 主要去除废水中镍离子、其他大部分二价和多价离子 | 对小分子有很好的去除效果 | 设备成本较高;需要较高的操作压力,膜受到一定的污染 |
| RO | 溶解压差 | 0.1~1.0 nm | 低至中等 | 去除镍废水中几乎所有的溶解盐、重金属、有机物 | 净化能力强,适用于各种水脱盐处理 | 操作压力高,能耗大;膜污染严重,清洗复杂 |

另一种膜分离技术是电渗析法,在处理化学镍废水时,在外加直流电场作用下,利用离子交换膜的选择透过性,电解质的阴、阳离子发生定向迁移,不仅去除镍等污染因子,还能在一定程度上回收镍和磷等^[21]。Yan等^[22]构建了以石墨为第三电极的三维电渗析系统去除化学镍废水中的镍、磷和COD,去除效率明显高于传统的二维电渗析系统,镍离子、总磷和COD的去除率分别为95.8%、97.7%和91.8%。

膜处理法能够针对特定污染物进行分离,操作过程较为灵活,透过液经过处理可以达到回用标准,但膜系统的初始投资成本和维护成本高,能耗高(特别是RO系统)。在工程中常将NF膜系统和RO膜系统用在后端保护处理或回用处理。

3.2.6 蒸发法

蒸发法是一种利用热能将液体转化为蒸气,从而分离出水分和溶解物质的技术。在处理化学镍废

水时,在一定温度下,废水中的水分蒸发成水蒸气,溶解在水中的固体成分(如镍离子和其他污染物)由于其较高的沸点而留在液相中,从而实现了分离。蒸发法对化学镍废水具有良好的去除效率,可以显著降低废水中重金属的浓度,可实现水资源的回收与再利用,减轻环境负担。常用的蒸发系统有低温蒸发系统、常规蒸发系统、真空蒸发系统、多效蒸发系统,各系统的技术分析如表2所示。

苏州园区某企业对喷涂废水采取树脂回收和机械蒸汽再压缩(MVR)蒸发工艺,对废水中的氨氮和镍进行有效彻底去除^[23]。东莞某共性园区含镍废水采用预处理+双膜法+MVR蒸发器实现零排放,其余各类废水经过预处理后汇集至综合废水,经芬顿氧化/混凝沉淀/厌氧-缺氧-好氧(AAO)/膜生物反应器(MBR)等工艺深度处理后,出水达到广东省《电镀水污染物排放标准》(DB44/1597—2015)中

表 2 蒸发系统分析

Tab. 2 Analysis of Evaporation System

| 项目 | 低温蒸发系统 | 常规蒸发系统 | 真空蒸发系统 | 多效蒸发系统 |
|--------|----------------------|-------------|--------------------|---------------|
| 优点 | 低能耗、温和操作、更高的选择性 | 操作简单、高处理能力 | 低温高效、产品质量高、较好的浓缩效率 | 能量回收、高效能、适应性强 |
| 缺点 | 处理速度较慢、设备复杂、污染物浓缩效率低 | 能耗高、热敏感成分降解 | 设备成本高、系统复杂 | 投资成本高、规划设计复杂 |
| 适合应用场合 | 适合热敏感的小水量的镍废水 | 适合大流量的镍废水 | 适合热敏感的小水量的镍废水 | 适合大流量的镍废水 |

的表 3 标准后排放,该工艺系统运行稳定,有效地实现了废水的达标排放与中水回用^[24]。

相比较其他的处理方法,蒸发法能耗高、设备投资成本大,操作维护要求高,适用于小水量且成分复杂的含镍废水处理,特别是零排放要求的废水处理。

3.2.7 组合工艺

单一的处理方法各有其独特的优点,但同时也面临着局限性(表 3),面对复杂的化学镍废水时,仅依赖一种技术往往难以达到理想的处理效果。组合法的出现为提高废水处理效率提供了新的思路。组合法结合了多种技术和方法,通过充分发挥各自的

优势,形成协同效应,旨在高效去除废水中的镍离子和其他污染物。

刘静静等^[25]以初始镍质量浓度为 50 mg/L 的柠檬酸镍废水为研究对象,第一段采用芬顿法进行破络,第二段采用“O₃/Fe²⁺”组合工艺进一步处理,在 2 段工艺的最佳条件下,柠檬酸镍废水中约 99.8% 的柠檬酸镍得以去除,出水镍浓度达到国家排放标准。李姗婷等^[26]采用氢氧化钙初步中和联合次氯酸钙深度氧化工艺处理化学镍废水,在优化工艺条件下,出水镍、总磷和氨氮质量浓度分别为 0.04、0.48 mg/L 和 0.93 mg/L,均满足排放要求。

表 3 化学镍废水处理方法比较

Tab. 3 Comparison of Chemical Nickel Wastewater Treatment Methods

| 处理方法 | 优点 | 缺点 | 镍的去除率 | 参考文献 |
|-----------|---|---|-----------|------|
| 化学沉淀法 | 工艺成熟,操作简单,成本较低 | 对络合态镍处理水质难以达标排放,污泥量大,易造成二次污染,对镍以外的污染物去除率低 | 可达 99.91% | [27] |
| 吸附法 | 操作简单,pH 适用范围广,常用在末端保证出水水质 | 选择性低,产生二次废物,对镍以外的污染物去除率低 | 可达 97% | [28] |
| 氧化还原法 | 操作简单,可破络、氧化氨氮、氧化次磷酸根和亚磷酸根 | 对某些络合态镍氧化效率低,出水难以达标,成本较高 | 可达 99.97% | [29] |
| 离子交换法 | 能耗低,可回收镍 | 易被污染,造成再生效率差;再生需化学试剂,易造成二次污染,对镍以外的污染物去除率低 | 可达 95% | [30] |
| Fenton 氧化 | 工艺成熟,氧化效率较高,可破络、氧化氨氮、氧化次磷酸根和亚磷酸根 | 药剂使用量大,成本较高,污泥量大,易造成二次污染 | 可达 99.88% | [8] |
| 生物法 | 成本低,适合大水量处理 | 需特定生物菌种及特定反应条件,实际应用较少 | 可达 90% | [31] |
| 萃取法 | 可提取分离回收废水中镍 | 成本高、操作复杂、易受环境影响,对镍以外的污染物去除率低 | 可达 94.1% | [32] |
| 臭氧氧化法 | 氧化力强,可破络,氧化氨氮、次磷酸根和亚磷酸根 | 需特定的催化剂或辅助条件来提高臭氧利用率,运行成本高 | 可达 99.71% | [15] |
| 电催化氧化法 | 氧化效率较高,可破络,氧化氨氮、次磷酸根和亚磷酸根,化学试剂用量少,污泥量少,成本较低 | 能耗高,设备投资成本较大 | 可达 99.94% | [17] |
| 过硫酸钠氧化法 | 氧化力强,可破络,氧化氨氮、次磷酸根和亚磷酸根 | 易受制于反应条件,操作复杂,运行成本高 | 可达 99.78% | [20] |
| 膜系统法 | 分离效果好,出水水质好,可回用,设备占地面积少 | 能耗高,对进膜水质有要求,否则膜易污染,设备投资成本较大 | 可达 100% | [33] |
| 蒸发法 | 可实现废水的零排放,适合浓缩后的废水蒸发处理 | 能耗高、设备投资成本大,设备易结垢,操作维护要求高 | 可达 100% | [23] |

其他一些常见的组合处理工艺如下。

(1) Fenton 氧化-化学沉淀-螯合沉淀工艺

(图 1),在保证出水水质的情况下,操作相对简单可控。

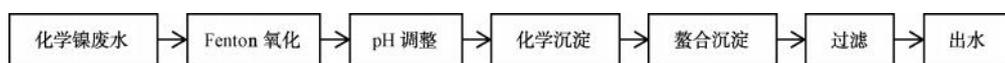


图 1 Fenton 氧化-化学沉淀-螯合沉淀工艺

Fig. 1 Fenton Oxidation-Chemical Sedimentation-Chelating Sedimentation Process

(2) 化学沉淀-膜系统处理工艺(图 2),不仅可以保证出水水质,膜系统的产水可用于生产回用,投资及运营成本大。

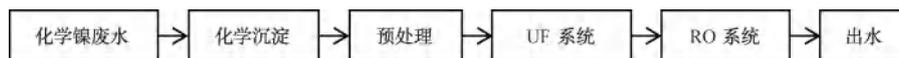


图 2 化学沉淀-膜系统处理工艺

Fig. 2 Treatment Process of Chemical Sedimentation-Membrane System

(3) 化学沉淀-膜系统-蒸发系统工艺(图 3),该工艺可以实现废水的零排放,投资及运管成本大,操作要求高。

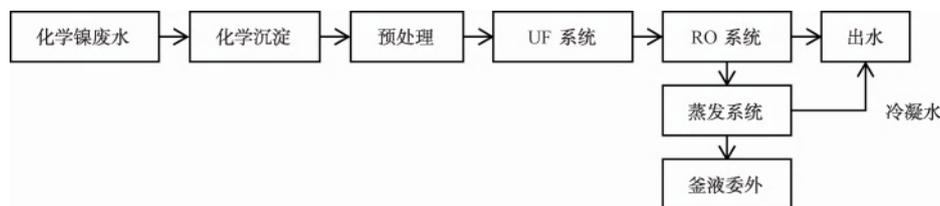


图 3 化学沉淀-膜系统-蒸发系统工艺

Fig. 3 Chemical Sedimentation-Membrane System-Evaporation System Process

组合法不仅能够充分发挥各类处理技术的优势,同时也为应对复杂污染提供了灵活的解决方案,将是未来研究的重点和方向。

3.3 化学镍废水资源回收技术

随着“双碳”目标的提出,企业面临着既要控制污染又要进行资源有效利用的双重压力。化学镍废水因其丰富的镍、磷酸盐和水资源而备受关注,成为资源回收的重要领域。镍作为一种重要的金属材料,2024 年镍的价格高达 12 万元/t(120 元/kg)以上,2024 年磷酸铁的价格也高达 1 万元/t,这些为化学镍废水的资源回收提供了可观的经济驱动力。化学镍废水的资源回收是当前的重要课题,尤其是在环保压力和资源紧缺的背景下,其意义愈发凸显。选择合适的回收技术(主要化学镍废水回收技术总结如表 4 所示),将极大降低成本,带来经济效益。

3.3.1 磷资源的回收

化学镍废水中还有高浓度的磷,这些磷有不同的价态,将其氧化转化成磷酸盐,通过化学沉淀将磷资源固化在沉淀物中,然后加以回收利用。赵榕焯等^[34]用破络-Fenton 法处理化学镍废水并回收水中

的磷酸盐,用 CaO 破络吸附联合 Fenton 氧化的多级物化技术去除废液中的镍离子和磷酸盐,镍离子和总磷均达到国家排放标准,产生的高纯度磷酸铁可直接回收,实现了资源化的处理目的。

3.3.2 镍资源的回收

化学镍废水及污泥中的镍资源根据不同的情况灵活地选择合适工艺对镍进行处理浓缩,进而回收镍资源。

离子交换工艺回收镍资源,通过离子交换吸附水中的镍离子,从而达到镍的回收。迟浩远^[35]用 Fe 基超稳矿化材料(CaFe-LDH)处理含镍废水,使用 1 g/L 的 CaFe-LDH 可对 300 mg/L 的镍离子水溶液中实现高达 99.5% 以上的矿化去除,其矿化产物 NiCaFe-LDH 电催化分解水产氧(OER)性能,其优于商用 RuO₂ 和 Ni(OH)₂。特别是一些高浓度含镍废水通过离子交换工艺更能取得较高的经济效益,某汽车制品有限公司使用一套离子交换技术为主的含镍废水现场回收设备,每年回收硫酸镍 40.2 t,以当时的镍价计算,每年回收硫酸镍价值 136 万元,节约废水、污泥处理成本 13 万元,每年净收益为 112

万元^[36]。离子交换还可以与其他技术联合使用,达到更高的回收效果。例如离子交换-电沉积组合工艺,利用离子交换树脂对废水中的镍离子进行吸附,再对树脂的再生液进行电解电沉积回收。刘永胜^[37]用改性氯球树脂对电镀废水中镍离子进行吸附,然后再对树脂再生液用电沉积回收镍,镍的回收率在80%左右。离子交换-膜法组合工艺使用膜系统分离水和污染物,从而达到资源的回收和废水的回用。赵瑾等^[38]以福建某电镀企业废水为处理对象,开发了以离子交换和铁基催化氧化为核心的含镍电镀废水处理集成技术,并用膜过滤在线循环处理的工艺模式,回收的硫酸镍质量浓度达41.6 g/L可直接回用于镀槽,处理后的水质达到回用标准,可用于电镀生产线,该工程直接运行费用为12.38元/m³,具有较高的经济效益。

电化学工艺回收镍资源,电化学法是利用废液通电后发生一系列的氧化还原反应,分离回收镍。

电化学法包括电解、电絮凝、电催化氧化、电渗析、电去离等处理方法。徐智超^[39]先用电解法处理化学镍废液,在阴极泡沫镍上可以得到用于HER的镍催化剂(Ni-NF),回收镍资源,电解后低浓度的废水用重金属离子捕获剂进行处理,镍离子质量浓度远小于0.1 mg/L。晋瑞杰^[40]用电解-电渗析-电去离子联合工艺可以从含镍废水中回收99%以上的镍,经测算,处理1 000 t/d含镍500 mg/L的废水,通过回收镍,每年经济收益约为几百万元,具有可观的经济效益。

化学镍污泥中镍资源的回收,化学镍废水中的污泥含有一定浓度的镍,镍资源可通过火法熔炼、湿法提炼及二者的混合工艺等技术加以回收^[41]。某电镀园区对于品位较好的含镍泥渣,经纯水洗涤后电解提纯硫酸镍,其纯度可以直接补充电镀镍槽液需要,处理1 t的含镍泥渣能产生的收益约为896元,不仅实现了污泥的无害化处理,还具有一定的经济效益^[42]。

表4 化学镍废水回收主要技术总结

Tab. 4 Main Technology Summary of Chemical Nickel Wastewater Reclamation

| 回收对象 | 适用对象 | 参考回收技术 | 技术说明 | 参考文献 |
|------|-----------|-----------------------|--|---------|
| 磷 | 含磷高废水 | 破络-氧化-沉淀 | 破络氧化,将次磷酸根和亚磷酸根氧化成磷酸根,然后沉淀回收 | [34] |
| | 含镍浓度高废水 | 电解 | 通过电极通电,让废水中的镍在阴极电沉积回收镍 | [39-40] |
| | | 离子交换 | 对进水水质有要求,需有机物含量低、悬浮物低等条件,可回收硫酸镍,如络合态镍含量高,需先破络或者选择配位数大的离子交换材料 | [36] |
| 镍 | 含镍浓度较高的废水 | 电渗析 | 对进水水质有要求,需有机物含量低、悬浮物低等条件,经电渗析处理,淡水回用,浓水中镍资源回收 | [40] |
| | | 离子交换 | 离子交换树脂对废水中镍进行吸附浓缩,对镍进行回收 | [35,37] |
| | 含镍浓度低废水 | 电去离 | 对进水有严格要求,电去离子(EDI)对废水进一步处理,淡水回用,浓水中镍资源回收 | [40] |
| | 含镍污泥 | 酸浸-电解 | 酸浸溶解,电解去除其他杂质,可以回收一定浓度的硫酸镍 | [42] |
| 水 | 化镍废水 | 氧化破络-化学沉淀-生化-膜系统-蒸发系统 | 氧化破络、化学沉淀和生化,除去废水中大部分污染物,减轻膜处理负担,膜系统处理后的水回用,滤液浓缩蒸发 | [43] |

3.3.3 水资源的回收

化学镍废水还有丰富的水资源,通过膜处理-蒸发处理工艺,废水经过膜系统过滤,处理后的水质达到回用标准回用,浓缩液再经过蒸发,蒸发釜液可委外处理,实现废水的零排放并回用水资源。某电镀公司对含镍、含铬及综合电镀废水采用海水淡化反渗透膜(SWRO)+膜化学反应器(MCR)膜系统和蒸发系统处理,出水水质满足《城市污水再生利用

工业用水水质》(GB/T 19923—2024)标准中的相关要求,出水可全部回用于工业用水及杂用水,处理后干污泥及蒸发釜液则委外处置,实现了废水的零排放^[43]。某新建电镀园含镍废水以NF-RO-蒸发为主体工艺,RO产水回用,日产水量约为154 m³,满足车间用水要求,日蒸发结晶约为2 m³委外处理,系统基本实现零排放^[44]。

4 “双碳”目标下化学镍废水处理前景展望

(1) 化学镍废水中的磷和镍等都具有回收价值,做好清洁生产,开发先进的化学镀镍工艺,减少污染因子和污染量,降低后续废水处理压力。

(2) 开发镍废水处理新技术,同步提高废水处理有效性、出水水质稳定性以及资源回收循环利用,降低废水处理成本,降低副产物和二次污染物。从目前的工程应用来看,多种技术的联合应用取得了一定进展和良好的效果。

(3) 开发智能化监测与控制技术,引入物联网和人工智能技术,对处理过程进行实时监测和优化控制,提高处理系统的自动化水平和稳定性。

(4) 出台相应政策法规,鼓励镍资源回收。各级政府鼓励和奖励实施资源回收的企业,并引导先进清洁生产技术、处理技术和回收技术开发应用。

参考文献

- [1] 陈志勇,朱清,邹谢华,等. “双碳”背景下镍资源产业链发展趋势研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(10): 54-63.
CHEN Z Y, ZHU Q, ZOU X H, et al. Research on the development trend of nickel resources industry chain under the background of " dual carbon" [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(10): 54-63.
- [2] 姜承志,李飞飞,孙许可,等. 镀镍废水处理技术的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2015, 37(9):5.
JIANG C Z, LI F F, SUN X K, et al. Researching progress on wastewater treatment of nickel plating[J]. Plating & Finishing, 2015, 37(9):5.
- [3] 张洪亮. 基于电化学的化学镀镍废水处理实验研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2016.
ZHANG H L. Study of electrochemistry methods on electroless nickel plating wastewater treatment [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2016.
- [4] 毋浪鹏,李梦洋,郑元武,等. 碱性络合态锌镍废水的水质分析[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(5): 146-152.
WU L P, LI M Y, ZHENG Y W, et al. Water quality analysis on alkaline complexed zinc- and nickel-containing wastewater [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43(5): 146-152.
- [5] 甘雪慧,彭志业. 离子交换法深度净化电镀含镍废水[J]. 山东化工, 2021, 50(23): 221-223, 230.
GAN X H, PENG Z Y. Experimental deep purification of nickel-containing electroplating wastewater by ion exchange method[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(23): 221-223, 230.
- [6] JULIO M D, JULIO T S D, BERNARDO L D. Fe^{2+} and H_2O_2 synergic effect on fentons reaction applied in drinking water treatment with humic substances [J]. Engenharia Ambiental; Pesquisea Tecnologia, 2009(3).
- [7] LONG T R, et al. The effect and its influence factors of the fenton process on the old landfill leachate[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7(5): 724-727.
- [8] 李洋,陈忠平,孙萌萌,等. 化学镀镍废水中磷和镍的同步去除[J]. 环境工程学报, 2020, 14(1): 96-102.
LI Y, CHEN Z P, SUN M M, et al. Simultaneous removal of phosphorus and nickel from electroless nickel plating wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(1): 96-102.
- [9] 王成刚,陈铭,赵德忠,等. 芬顿氧化工艺处理化学镀镍废水中的总镍[J]. 山东化工, 2020, 49(7): 261-262.
WANG C G, CHEN M, ZHAO D Z, et al. Removal of total nickel in electroless nickel plating wastewater by Fenton oxidation process[J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(7): 261-262.
- [10] CAI W L, XIE Y Y. Treatment of heavy metal nickel in electroplating wastewater with Fenton oxidation and coagulation precipitation[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2020, 40(4): 106-109.
- [11] 章龚鸿,殷若愚. 芬顿氧化法预处理化学镀镍废水影响因素研究[J]. 山东化工, 2020, 49(16): 250-251, 253.
ZHANG G H, YIN R Y. Study on the factors affecting the pretreatment of electroless nickel plating wastewater by fenton oxidation [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49(16): 250-251, 253.
- [12] BARRY S,汪永,郭佳琦,等. UV-Fenton 工艺的研究进展及其在水环境微污染处理领域的应用[J]. 净水技术, 2023, 42(5): 21-28, 43.
BARRY S, WANG Y, GUO J Q, et al. Research progress in UV-Fenton process and the application of micropollution control in water environment [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(5): 21-28, 43.
- [13] 梁慧宇. 非均相类 Fenton 法催化氧化处理化学镀镍废水研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2019.
LIANG H Y. Catalytic oxidation of chemical nickel plating wastewater by non-homogeneous fenton method [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019.
- [14] 张耀辉,高柳,徐军,等. 臭氧催化氧化处理化学镀镍废水[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 342-348.
ZHANG Y H, GAO L, XU J, et al. Treatment of electroless nickel-plating wastewater by ozone catalytic oxidation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 342-348.
- [15] 王延梅. 臭氧法处理电镀含镍废水工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 45-49.
WANG Y M. Study on treatment of electroplating wastewater containing nickel by ozone [J]. Plating & Finishing, 2022, 44(1): 45-49.

- [16] 杨爽, 王雪峰, 范雪健, 等. 高级氧化技术的研究现状及发展展望[J]. 工业催化, 2024, 32(2): 26-33.
YANG S, WANG X F, FAN X J, et al. Research status and development prospect of advanced oxidation technology [J]. Industrial Catalysis, 2024, 32(2): 26-33.
- [17] 李明, 唐益洲, 汪鑫龙. 电催化氧化处理化学镀镍高氨氮废水[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 101-105.
LI M, TANG Y Z, WANG X L. Electro-catalytic oxidation treatment of high ammonia nitrogen wastewater from electroless nickel plating[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 101-105.
- [18] 赵鑫, 马桂敏, 尹娟, 等. 改性Ti/SnO₂-Sb电极降解EDTA-Ni电镀废水的试验及机理[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 183-188, 280.
ZHAO X, MA G M, YIN J, et al. Mechanism and experiment of degradation of EDTA-Ni electroplating wastewater by modified Ti/SnO₂-Sb electrode[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 183-188, 280.
- [19] FENG K. A review on activated sodium persulfate oxidation technology[J]. Environmental Science and Technology, 2017, 30(5): 6-9.
- [20] 孙超, 王德强, 李晓艺. 过硫酸钠氧化法处理电镀含镍废水工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(7): 101-107.
SUN C, WANG D Q, LI X Y. Study on treatment of nickel containing electroplating wastewater by sodium persulfate oxidation[J]. Plating & Finishing, 2023, 45(7): 101-107.
- [21] 赵雨. 化学镀镍废液再生的电渗析法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
ZHAO Y. Research on electrodialysis method for regeneration of chemical nickel plating waste liquid [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011.
- [22] YAN Y, SHU W, MAO J, et al. Efficient simultaneous removal of nickel, phosphorus and COD from electroless nickel plating wastewater by three dimensional electrodialytic system [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 345: 127417. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.127417.
- [23] 赵博. 树脂回用+MVR蒸发工艺处理喷涂废水中镍的工程应用[J]. 绿色科技, 2020(2): 90-92, 94.
ZHAO B. Engineering application of resin reuse + MVR evaporation process for treatment of nickel in spraying wastewater [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(2): 90-92, 94.
- [24] 薛永杰, 蔡卓弟. 共性园区阳极氧化废水处理及回用工程实践[J]. 广东化工, 2023, 50(18): 103-105.
XUE Y J, CAI Z D. Engineering practice of anodic oxidation wastewater treatment and reuse in common park[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(18): 103-105.
- [25] 刘静静, 徐小凤, 卓琼芳, 等. 芬顿-臭氧组合处理柠檬酸镍废水的实验研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(4): 35-40, 56.
LIU J J, XU X F, ZHUO Q F, et al. Combined fenton-ozone treatment technology for Ni(II)-citrate wastewater[J]. Journal of University of South China (Science & Technology), 2022, 36(4): 35-40, 56.
- [26] 李姗婷, 徐文彬, 肖勇俊, 等. 化学镀镍废水中镍、总磷和氨氮协同处理[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 31-33.
LI S T, XU W B, XIAO Y J, et al. Co-processing of nickel, total phosphorus and ammonia nitrogen in electroless nickel plating wastewater[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(16): 31-33.
- [27] 崔丽娜. 化学镀铜镍废水的处理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
CUI L N. Study on treatment of electroless copper and nickel plating wastewater [D]. Qingdao: Qingdao Technology University, 2019.
- [28] XU P, GAO P, CHEN Q, et al. Study on adsorption effect of modified montmorillonite on Ni(II) in wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(12): 3088-3094.
- [29] 毋浪鹏, 许海亮, 郑元武, 等. 次氯酸钠氧化法处理含镍电镀废水的应用研究[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(1): 144-149.
WU L P, XU H L, ZHENG Y W, et al. Study on treatment of nickel-containing electroplating wastewater by oxidation with sodium hypochlorite [J]. Electroplating & Finishing, 2024, 43(1): 144-149.
- [30] 郑利祥. 离子交换法处理含镍电镀废水的工程应用[J]. 工业水处理, 2015, 35(10): 87-90.
ZHENG L X. Engineering application of ion-exchange method to the treatment of nickel-containing electroplating wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(10): 87-90.
- [31] CASES L, ADLER P, PELISSIER F, et al. New biomaterials for Ni biosorption turned into catalysts for Suzuki-Miyaura cross coupling of aryl iodides in green conditions[J]. RSC Advances, 2021, 11: 28085. DOI: 10.1039/d1ra04478h.
- [32] 余静, 邱海浪, 卢腾飞, 等. 萃取净化电镀含镍废水研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(4): 43-46.
YU J, QIU H L, LU T F, et al. Extraction of nickel from electroplating wastewater [J]. Water Treatment Technology, 2014, 40(4): 43-46.
- [33] 巫世文, 邓家发, 林敏. PCB线路板含镍废水处理工艺的探索与运用[J]. 绿色环保建材, 2017(1): 157-158, 160.
WU S W, DENG J F, LIN M. Exploration and application of nickel-containing wastewater treatment process for PCB circuit boards[J]. Green Environmental Protection Building Materials, 2017(1): 157-158, 160.
- [34] 赵榕焯, 谷麟, 闻海峰, 等. 破络-Fenton法处理化学镀镍废水并回收水中的磷酸盐[J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2097-2102.

- ZHAO R Y, GU L, WEN H F, et al. Combined complex-breaking and Fenton oxidation for electroless nickel plating wastewater and reclamation of phosphate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2097-2102.
- [35] 迟浩远. Fe 基超稳矿化材料的设计及其处理含镍废水和资源回收再利用的探索[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- CHI H Y. Design of Fe-based superstable mineralization materials and exploration on treatment of nickel-containing wastewater and recycling of resources [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [36] 付丹,程象. 电镀含镍废水现场回收技术[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(1): 22-26.
- FU D, CHENG X. On-site recovery technology of nickel containing electroplating wastewater [J]. Plating & Finishing, 2018, 40(1): 22-26.
- [37] 刘永胜. 改性氯球树脂对电镀废水中镍离子的吸附及电沉积回收镍的研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2023.
- LIU Y S. Adsorption of nickel ions from electroplating wastewater by modified chlorine ball resin and recovery of nickel by electrodeposition [D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2023.
- [38] 赵瑾, 曹军瑞, 谢宝龙, 等. 含镍电镀废水在线循环处理工程实例[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 116-119.
- ZHAO J, CAO J R, XIE B L, et al. Engineering example of nickel-containing electroplating wastewater treatment by online circulation[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 116-119.
- [39] 徐智超. 化学镀镍废水中镍离子的回收及其在电催化析氢中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- XU Z C. Treatment of nickel ion from electroless nickel plating wastewater and its application in electrocatalytic hydrogenation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [40] 晋瑞杰. 电化学联合工艺实现含镍废水的资源化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- JIN R J. Recovery of nickel and water from nickel containing wastewater using electrochemical combination process [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [41] 王望龙. 含铜含镍污泥资源化利用技术研究[J]. 中国高科技, 2023(18): 95-97.
- WANG W L. Research on the resource utilization technology of copper and nickel containing sludge[J]. Zhong Guo Gao Xin Ke Ji, 2023(18): 95-97.
- [42] 刘玉兵, 蒋小友. 从电镀含镍污泥中回收硫酸镍的工艺[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(13): 720-723.
- LIU Y B, JIANG X Y. Process for reclaiming nickel sulfate from nickel-containing electroplating sludge [J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(13): 720-723.
- [43] 程韧. SWRO+MCR 工艺处理电镀废水零排放工程研究[J]. 绿色科技, 2024, 26(4): 166-171.
- CHENG R. Study on zero discharge engineering of electroplating wastewater treated by SWRO+MCR process[J]. Journal of Green Science and Technology, 2024, 26(4): 166-171.
- [44] 张汝嘉. 微滤-反渗透-蒸发集成设备处理电镀园含镍废水的工程实例[J]. 节能与环保, 2020(6): 54-55.
- ZHANG R J. Engineering example of nickel wastewater treatment in electroplating park by integrated microfiltration reverse osmosis evaporation equipment [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2020(6): 54-55.

(上接第 22 页)

- [66] 李晓昕, 李绍生. 除磷工艺优化的 BioWin 数值模拟研究——以不同加药点的铁盐除磷为例[J]. 四川环境, 2023, 42(3): 21-27.
- LI X X, LI S S. Research on phosphorus removal process based on BioWin numerical simulation taking the removal of phosphorus with ferric salt at different dosing scenarios as an example[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(3): 21-27.
- [67] 王骞, 邓巧斯, 吴畏, 等. 基于机理模型的永川污水处理厂运行诊断与碳源优化[J]. 环境工程, 2022, 40(6): 219-225.
- WANG Q, DENG Q S, WU W, et al. Operation diagnosis and carbon source optimization of Yongchuan wastewater treatment plant using process modeling[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(6): 219-225.
- [68] TOLENTINO A C, CHENG H, LIN C, et al. Optimization of step-feed anoxic-oxic-membrane bioreactor (AO-MBR) with methanol addition for biological nitrogen removal in wastewater using BioWin and response surface methodology (RSM) [J]. E3S Web of Conferences, 2024, 514: 1002. DOI: 10.1051/e3sconf/202451401002.
- [69] JOHNSON B R, CULP G, NEETHLING J, et al. Use of dynamic modeling for wastewater treatment plant acceptance testing [C]//New Orleans: Proceedings of the Water Environment Federation, 2013.
- [70] DEVILLERS J, PANDARD P, RICHARD B. External validation of structure-biodegradation relationship (SBR) models for predicting the biodegradability of xenobiotics [J]. SAR and QSAR Environmental Research, 2013, 24(12): 979-993.