

电絮凝—生化协同工艺处理电镀废水的性能与机制探讨

刘俊远

广州匠睿生态环境技术有限公司 广东广州

【摘要】电镀在工业生产中应用广泛，但其产生的废水内含有高浓度重金属离子、有机污染物及复杂络合物，对环境与人体健康构成严重威胁。传统单一处理方式无法满足严格的排放标准，需采用高效、稳定联合处理工艺。电絮凝—生化协同工艺结合电化学氧化、金属氢氧化物吸附与生物降解等多种机制，协同去除电镀废水内多类污染物。电絮凝—生化协同工艺通过结合电化学氧化、金属氢氧化物共沉淀吸附、生物降解等多种作用机制，能有效去除废水中的重金属、有机物及络合污染物，具有处理效率高、运行稳定、适应性强等优势，在具体工程中表现出良好的应用前景。

【关键词】电絮凝；生化处理；电镀废水；重金属去除

【收稿日期】2025 年 5 月 8 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.aes.20250013

Electrocoagulation-biochemical synergistic process for the treatment of electroplating wastewater: performance and mechanism exploration

Junyuan Liu

Guangzhou Jiangrui Ecological Environment Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong

【Abstract】Electroplating is widely used in industrial production, but the wastewater it generates contains high concentrations of heavy metal ions, organic pollutants, and complex compounds, posing serious threats to the environment and human health. Traditional single-treatment methods cannot meet stringent discharge standards, necessitating the adoption of efficient and stable combined treatment processes. The electrocoagulation-biochemical synergistic process integrates multiple mechanisms, including electrochemical oxidation, metal hydroxide adsorption, and biodegradation, to collaboratively remove various pollutants from electroplating wastewater. By combining electrochemical oxidation, metal hydroxide coprecipitation and adsorption, and biodegradation, this process effectively eliminates heavy metals, organic pollutants, and complex compounds from wastewater. It offers advantages such as high treatment efficiency, stable operation, and strong adaptability, demonstrating promising application potential in practical engineering projects.

【Keywords】Electrocoagulation; Biochemical treatment; Electroplating wastewater; Heavy metal removal

引言

电镀废水因成分复杂、毒性大、难降解等特征，是水污染控制的重点对象。随着环保法规严格化，资源回收理念普及，传统物理化学法或单一生物处理工艺很难满足深度处理规范。因此，电絮凝—生化协同工艺这种新型组合处理技术开始受到关注。该工艺利用电场诱导生成金属氢氧化物絮体，能高

效去除重金属，发挥微生物代谢功能，降解残留有机物和氨氮等污染物。协同效应下，提高了污染物去除率，降低了污泥产量和能耗成本。所以，深入研究该工艺运行性能和内在机制，以实现在电镀废水处理领域推广运用。

1 电絮凝—生化工艺简介

电絮凝—生化协同工艺主要是把电化学处理与

生物处理相结合的复合式水处理技术。电絮凝单元一般采用铁或铝作为阳极,在直流电流影响下释放 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 或 Al^{3+} 离子,水解生成强吸附性金属氢氧化物(如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$),提炼废水内重金属离子、悬浮颗粒及部分有机污染物。之后,废水进入生化处理过程,利用活性污泥或生物膜内的微生物群落进行有机物降解、硝化反硝化等过程,实现对 COD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等污染物的深度去除。此工艺充分发挥电化学与生物处理优势,实现互补,提升处理效率^[1]。

2 电絮凝—生化协同工艺处理电镀废水的性能

2.1 高效去除重金属

电絮凝过程中能有效去除 $\text{Cr}(\text{VI})$ 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 等典型电镀废水内常见重金属离子。实验数据显示,适宜电压条件下, $\text{Cr}(\text{VI})$ 去除率达98%以上, Ni^{2+} 和 Cu^{2+} 去除率稳定在90%~95%之间。主要原因是电极溶解生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体有着较大比表面积和表面电荷,利用吸附、共沉淀及还原等作用快速去除重金属。后续生化单元尽管对重金属无直接去除功能,但通过维持较低金属离子浓度,减少对微生物毒害影响,间接提高系统稳定性。

2.2 有效削减有机污染物的

电镀废水内有机污染物主要为络合剂(如 EDTA)、油脂类物质及添加剂(如光亮剂)。电絮凝期间通过电氧化作用破坏部分有机分子结构,降低毒性,提高可生化性。基于此,生化单元再度利用好氧菌群对残余有机物进行矿化分解, COD 去除率达85%以上。研究得出,电絮凝预处理后废水 BOD/COD 比值明显提升,说明可生化性得到改善,便于后续生物降解顺利进行^[2]。

2.3 系统稳定性及抗冲击负荷能力

相较于单一处理方式,电絮凝—生化协同系统有着极佳的抗波动能力。再进水水质发生突变时,电絮凝单元迅速响应,调节出水水质,降低后续生化系统冲击。同时,因为电絮凝过程有着杀菌效果,能抑制有害菌群繁殖,保持生化系统微生物群落结构稳定。长期运行数据表明,系统在连续运行120天后,各项指标均保持优良去除效果,表现了优越的工程适应性和可靠性。

2.4 运行稳定性及适应性强

电絮凝—生化协同工艺融合物理、电化学及生

物处理优势,构成高效、稳的废水治理体系。电絮凝阶段基于电极释放的金属离子构成氢氧化物絮体,可以迅速吸附并沉淀废水内的悬浮物与重金属,电流强度、电极材料及反应时间灵活调节使其充分适应废水水质的变化,维持稳定的絮凝效果。进入生化处理环节后,活性污泥系统基于多样化微生物群落,对有机物进行持续降解,具备优越的自我调节与恢复能力,适应进水有机负荷的波动与环境条件的变化,确保生物活性与处理效率。协同工艺下运行能耗适中,综合能耗较单一处理方式明显降低,同时产生较少污泥量,减少了泥处理的压力及成本。工艺流程简洁,便于现场操作与管理,可以满足不同规模与不同类型电镀废水的治理需求。其强大的适应性、稳定性,确保整个系统在长周期运行中保持高效、可靠的处理性能,提升了废水处理安全保障水平。

2.5 环境友好及经济效益明显

电絮凝—生化协同工艺在环保与经济方面均表现了显著优势。首先,该工艺降低了传统化学药剂的使用,避免药剂过量投加产生二次污染问题,降低了废水中有害化学物质的残留风险,提升了处理过程的环境安全性。其次,电絮凝过程中产生的金属氢氧化物不仅作为高效絮凝剂,还能捕捉废水中的重金属,实现部分金属资源的回收利用,减少资源浪费,具有良好的经济价值。生化阶段则依靠微生物天然代谢功能,对有机污染物进行彻底分解,降低了能源消耗与运行成本。综合分析,该工艺可以高效协同去除电镀废水中的重金属与有机污染物,确保出水水质稳定达到或优于环保排放标准,满足法规要求。环境效益与经济效益双重提升,有利于推动企业绿色生产及可持续发展战略,维护企业社会责任形象。该工艺的推广应用有助于改善生态环境,为废水治理行业提供了一条经济、高效且环保的技术路径。

3 电絮凝—生化协同工艺处理电镀废水机制研究

3.1 电极反应及金属离子释放机制

电絮凝过程中,阳极材料(如铁、铝)在直流电流作用下出现氧化反应,溶解并释放出 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 或 Al^{3+} 等金属离子。过程中受电压、电解时间、电极间距及废水 pH 值等因素影响。以铁阳极为例,电解条

件下, Fe 原子失去电子生成 Fe^{2+} 进入溶液, 并在溶解氧或外加电流作用下氧化成 Fe^{3+} 。金属离子进入水体后迅速和 OH^- 结合, 生成具有高度活性金属氢氧化物胶体颗粒, 如 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。胶体微粒表面带有正电荷, 可根据静电吸引作用捕获带负电的污染物颗粒, 涵盖重金属离子、有机物及悬浮物。此外, 较大比表面积与表面活性为吸附及共沉淀反应提供物理化学基础。同时, Fe^{2+} 具备还原能力, 可把部分高毒性高价态重金属(如 $\text{Cr}(\text{VI})$)还原成低毒性形态(如 $\text{Cr}(\text{III})$), 从而提升整体去除质量。所以, 电极反应与金属离子释放是电絮凝工艺高效污染物去除的核心^[3]。

3.2 重金属去除的物理化学路径

电絮凝过程中, 重金属离子去除主要利用吸附、共沉淀与还原三种物理化学机制实现。其中, 吸附作用是指金属氢氧化物胶体利用表面电荷和比表面积优势, 获得废水中带负电的重金属络合物及游离离子, 进而从液相转移到固相。沉淀机制体现在金属氢氧化物和重金属离子之间构成的复合沉淀物, 例如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 与 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 等离子结合生成难溶性沉淀^[4]。还原反应会在特定条件下发挥作用, 如 Fe^{2+} 可将 $\text{Cr}(\text{VI})$ 还原成 $\text{Cr}(\text{III})$, 后者易同 OH^- 结合生成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉淀, 从而做到高效去除。不同重金属因化学性质不同, 在电絮凝系统内所经历的去路也有所差别。例如, Cu^{2+} 因为较强的配位能力, 主要通过吸附作用被去除; 而 Cd^{2+} 倾向于利用共沉淀机制沉降。多种机制协同作用, 使电絮凝单元在处理含多种重金属复杂废水时仍保持高去除效率, 是重金属污染控制的重要方式。

3.3 有机污染物的电化学转化机制

电絮凝过程中不但对重金属具有明显去除效果, 还能合理转化与削减有机污染物。此过程主要利用电化学氧化机制实现, 也就是在电场作用下, 水分子在阳极表面进行分解, 生成具有强氧化能力的自由基类物质, 如羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、硫酸根自由基 ($\text{SO}_4^{\cdot-}$) 等。自由基引发链式氧化反应, 攻击有机物共轭结构、芳香环及官能团, 破坏稳定性, 降低生物毒性, 并提高可生化性。比如, EDTA、柠檬酸等常见络合剂经电氧化处理后, 螯合能力大幅降低, 原本被络合的重金属离子被释放, 能够被后续生成的金属氢氧化物絮体捕获。同时, 油脂类及添

加剂(如光亮剂、润湿剂)也能在自由基作用下出现断链、开环等反应, 转化成小分子中间产物, 进而被微生物降解。所以, 电絮凝预处理既能改善废水水质, 还为后续生化处理创造条件, 体现其在有机污染物控制中的作用^[5]。

3.4 微生物群落功能调控机制

电絮凝—生化协同工艺内, 生化处理单元核心功能是再度降解经电絮凝预处理而残留于水内的有机污染物、氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 及总氮 (TN), 从而实现废水深度净化。此阶段处理效果取决于工艺参数控制, 同系统微生物群落组成、活性及适应性密切相关。电絮凝属于前置处理环节, 在去除重金属离子(如 Cr^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 等)与部分难降解有机物(如络合剂、表面活性剂)方面表现突出, 降低了这些物质对微生物的毒害影响, 为生化系统稳定运行创造了优越的水质条件^[6]。

研究得出, 多数硝化菌、反硝化菌及异养菌, 在高金属离子浓度环境下出现代谢抑制、生长迟滞或者失活现象^[7]。而电絮凝预处理后, 废水内金属离子浓度下降, 使短程硝化-厌氧氨氧化 (PN/A)、同步硝化反硝化 (SND) 等高效脱氮工艺保持稳定, 系统脱氮效率明显提升。同时, 电絮凝过程中释放微量 Fe、Al 等金属元素, 并不是完全以沉淀形式去除, 部分以细小颗粒或溶解态进入生化系统, 变为潜在电子传递介质, 实现微生物胞外电子转移。此特性对依赖于间接电子传递的电话性微生物来讲, 具有代谢促进作用, 可以高效分解复杂有机物, 提高整体 COD 去除率^[8]。

4 结语

综上所述, 电絮凝—生化协同工艺对处理电镀废水方面具有优越的性能。借助电化学反应对重金属高效去除, 提升废水可生化性, 为后续生物处理创造条件。协同机制包括电极反应、重金属去除路径、有机物电化学转化及微生物功能调控等层面, 体现了物理化学与生物的有机结合。所以, 不断优化工艺参数配置, 探索在不同水质条件下适用性, 加强工程实践中运行管理及经济性评估, 促进技术在电镀废水治理中规模化运用, 实现可持续发展。

参考文献

- [1] 王垂涨, 陈博. 探究电镀重金属废水治理技术应用 [J].

- 资源节约与环保, 2020, (09):87-8.
- [2] 孙萌萌. 电镀废水中污染物的去除研究 [D]上海交通大学, 2019.
- [3] 吴天伟, 孙艺, 崔蓉, 等. 内分泌干扰物壬基酚与辛基酚的污染现状与毒性的研究进展 [J]. 环境化学, 2017, 36(5): 9.
- [4] 卢然, 贾杰林, 孙宁, 等. 电镀废水稳定达标排放的影响因素及对策 [J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(17): 785-8.
- [5] 盛丰, 郭瑾, 马民涛, 等. 城市污水二级生化出水有机物(EFOM)深度去除研究现状[J]. 现代化工, 2010, 30(S2): 47-51.
- [6] 王淑花. 电絮凝法处理含铜电镀废水的技术研究[J]. 冶金与材料, 2025, 45(06): 91-93.
- [7] 初庆娣, 江倩, 班飞飞. 电镀废水治理和回用技术分析[J]. 清洗世界, 2025, 41(05): 102-104.
- [8] 伍慧珊. 电镀项目环境影响评价环保措施研究[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(04): 87-89.
- 版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**OPEN ACCESS**