

工业废水中有毒重金属去除技术的优化与应用

俞展宏

洪江高新技术产业开发区（洪江区）管理委员会，湖南 怀化 418200

摘要： 工业化进程的推进，废水中有毒重金属污染问题严重性日增，环境与公共健康面临着巨大威胁。本研究关注于探讨优化有毒重金属在工业废水去除技术上，旨在提升处理效率、降低处理成本。对传统的沉淀法、吸附法和化学还原法的局限性进行了综述，分析了新兴的纳米材料技术、生物修复技术和电化学法的优势与改进策略。评估了技术的经济性与可持续性。废水中的有毒重金属，可以通过优化后的技术有效去除；处理效率和经济效益也显著提升，这为工业废水处理提供了强大技术支持。

关键词： 工业废水；有毒重金属；去除技术；技术优化

Optimization and Application of Toxic Heavy Metal Removal Technology in Industrial Wastewater

Yu Zhanhong

Management Committee of Hongjiang High-tech Industrial Development Zone (Hongjiang District), Huaihua, Hunan 418200

Abstract: With the advancement of industrialization, the problem of toxic heavy metal pollution in wastewater is increasing, and the environment and public health are facing great threat. This study focuses on the optimization of toxic heavy metal removal technology in industrial wastewater to improve treatment efficiency and reduce treatment costs. We review the limitations of traditional precipitation, adsorption and chemical reduction methods, and analyze the advantages and improvement strategies of emerging nanomaterials, bioremediation techniques and electrochemical methods. The economy and sustainability of the technology are evaluated. The toxic heavy metals in wastewater can be effectively removed by optimized technology; the treatment efficiency and economic benefits are also significantly improved, which provides strong technical support for industrial wastewater treatment.

Keywords: industrial wastewater; toxic heavy metals; removal technology; technology optimization

引言

加速的工业化进程带来了显著增加的工业废水中有毒重金属排放量，构成了严重的环境污染问题。而铅、镉、汞等高度毒性和累积性质的重金属对生态系统和人类健康已围绕着巨大威胁。水体充斥着这些有毒重金属尝试混入食物链，威胁生物的生长和繁殖并潜伏在健康问题之中。面对传统废水处理技术无法攻克挑战，新型去除技术开发与优化至关重要，寻求高效、经济且可持续的处理方案成为必须。

一、工业废水中有毒重金属的特性与污染现状

（一）有毒重金属的种类与来源

工业废水中常见的有毒重金属有铅（Pb）、镉（Cd）、汞（Hg）、铬（Cr）、铜（Cu）、锌（Zn）、砷（As）等。这些重金属在工业生产过程中通过不同途径释放到废水中^[1]。铅主要来源于电池制造、铅冶炼和涂料生产；镉常见于电镀、肥料生产及电池中；汞的主要排放源包括煤燃烧、化肥生产及某些制药行业；铬则多来自铬矿开采和电镀；铜和锌在电镀、矿石冶炼及农

作者简介：俞展宏（1995.11-），男，汉族，湖南怀化，助理工程师，本科，工业废水。

药中使用频繁；砷的来源则包括冶炼、杀虫剂及某些工业过程。各类工业活动通过排污管道或意外泄漏将这些有毒重金属释放到水体中，造成严重的水质污染。

（二）重金属对环境和健康的影响

有毒重金属铅、镉、汞等重金属能在土壤和水体中长期存在并积累，生态系统平衡遭受破坏^[2]。铅污染会导致水体中的微生物群落失衡，影响水生植物和动物的生长；镉对植物的根系和生长发育产生毒害，降低农作物的产量和品质。汞的生物富集效应极其严重，能够通过食物链传递，最终对顶级捕食者造成严重威

胁，包括人类。

在健康领域发现铅中毒产生的神经系统损害、认知能力下降和儿童发育迟缓。镉对于肾脏和骨骼造成严重损害，长期暴露可能遭受肺部疾病。汞中毒出现的情况包括神经系统严重伤害、震颤、失忆等，甚至影响到了肾功能和心血管系统。铬暴露与肺癌、皮肤癌等癌症相关。尽管微量铜和锌对人体有益，但超标则很有可能诱发中毒反应，出现胃肠问题以及神经系统困扰。砷的毒性则涉及皮肤病变、内脏损害及癌症风险。

（三）当前废水中重金属污染的现状与挑战

随着工业化和城镇化进程的推进，废水处理能力不足以及对重金属的监测和管理不到位，使得大量含有重金属的废水排入自然水体中。许多工业企业在生产过程中缺乏有效的废水处理设施，导致重金属直接排放。现有的废水处理技术在面对复杂的重金属污染时表现出一定的局限性^[3]。传统的沉淀法虽能够去除部分重金属，但处理后仍可能存在浓度超标的问题，且沉淀产生的污泥处理难度大。吸附法在处理特定金属离子时表现良好，但需要频繁更换吸附剂，增加了处理成本。化学还原法在去除某些重金属时效果显著，但产生的副产物和化学药剂的处理同样是一个挑战。

许多现有技术难以适应废水中重金属浓度变化大、组成复杂的情况。工业废水的重金属污染源头广泛，排放量大，导致处理过程中的成本和技术要求较高。开发高效、经济的重金属去除技术，尤其是针对不同污染物质的多重处理技术，成为亟待解决的难题。如何提高废水处理的综合性能和处理效率，是当前环境工程领域的重要研究方向。

二、有毒重金属去除技术的优化

（一）传统去除技术及其局限性

传统的重金属去除技术主要有沉淀法、吸附法和化学还原法。这些方法在处理工业废水中有毒重金属方面有一定的应用历史，但也存在诸多局限性^[4]。

化学反应通过沉淀法将水中的重金属去除，使其转化为不可溶性的沉淀物中的重金属。这种方式的优点是操作简单、成本较低，但在面对浓度较高或存在多种重金属成分的混合废水时，效果却十分有限。存在的主要问题是，沉淀物处理工艺复杂，在周边环境形成二次污染，可能存在沉淀物中重金属浓度超标的问题。

吸附法利用活性炭、天然矿物质等固体材料，将重金属离子高效地从废水中去除。这种方法虽然效率高，选择性好，但由于吸附剂需要经常更换，造成处理费用增加。选用适宜的吸附剂及处理条件，对浓度较高的废水处理极为关键；达到治理标准可能需要大量的吸附药物。弃置后如何处理吸附剂，这又是一个不小的考验。

化学还原法溶解的重金属离子变成不溶性的沉淀物，实现水中重金属的去除。这种方法在去除某些金属离子方面效果显著，但因反应条件严格、需使用强力还原剂，可能存在引发副反应和

二次污染的问题。

（二）新兴去除技术及其优化

新兴去除技术在处理有毒重金属废水中展现了较大的潜力，纳米材料技术利用纳米尺度的材料具有更大的比表面积和更强的反应活性，能够提高重金属的去除效率。常用的纳米材料有纳米零价铁、纳米碳材料和纳米氧化物。这些材料在重金属去除中表现出优异的性能，如纳米零价铁可通过还原反应将溶解的重金属转化为沉淀物，纳米碳材料则能通过物理吸附和化学反应去除水中的重金属。优化方面，可以通过改进纳米材料的合成方法和功能化处理，增强其去除能力和稳定性。生物修复技术利用微生物的代谢作用去除废水中的重金属。某些微生物（如某些细菌和真菌）能够通过生物吸附、还原和沉淀等途径去除重金属。生物修复技术的优化可以通过筛选具有高去除能力的微生物菌株、优化培养条件以及提高微生物的稳定性和适应性来实现。电化学法通过电极反应实现废水中重金属的去除。常见的电化学方法包括电解还原和电沉积^[5]。电化学法能够在较短时间内高效去除重金属，并且对多种重金属适用。优化策略包括改进电极材料，提高电极的电催化活性，优化反应条件（如电流密度、反应时间等），以及降低能耗和运行成本。

（三）技术优化策略

传统和新兴的去除技术是有限制的，技术优化策略中将工艺条件优化应用到提高去除效果的目的上。重金属的去除结果可以通过调节反应条件，如pH值、温度和反应时间等，得到明显的增强。在沉淀法上，pH值的优化可以帮助泥沙生成效率的提高；而吸附法，则是通过对反应时间、温度的调节，使吸附剂的使用效率得到提高。在优化重金属去除技术方面，改善催化剂和吸附剂的需求占据重要地位。可提高反应速率和选择性，提高处理效果的改性纳米材料和复合催化剂等新型催化剂。在吸附剂方面，其对重金属离子的选择性和容量可以借助改性处理、功能化设计以及材料组合等手段得到显著提升^[6]。综合处理技术目前在应用上有一个比较重要的动向。结合不同的处理技术，利用纳米材料技术进行生物修复和化学沉淀法、电化学法，在缓解单一处理技术可能存在的不足的同时，也会尽量发挥各种技术优势，从而促进整体处理效率和经济效益的提高。对复杂废水中的多种重金属，可以借助综合处理技术实现高效去除，使之治理效果更加优化。

三、有毒重金属去除技术的实际应用与案例分析

（一）工业应用实例

毒性重金属的去除技术现已广泛应用于镀金、矿山以及冶金和电池制造等领域^[7]。在具体实践中，某电镀厂利用纳米零价铁（nZVI）处理废水的铬（Cr）与镍（Ni）。在试验过程中有条件地投放不同数量的纳米零价铁进入含有铬和镍的废水内进行处置，此时该废水pH初始值为6.5，并持续消化了60分钟。

实验结果表明，随着纳米零价铁剂量的增加，铬和镍的去除率显著提高。在投加0.5 g/L的纳米零价铁时，铬的去除率达到了85.2%，镍的去除率为78.6%；当剂量增加至1.0 g/L时，铬的去

除率进一步提升至95.3%，而镍的去除率达到91.4%。如表1：纳米零价铁处理电镀废水中铬和镍的去除效果所示。

表1：纳米零价铁处理电镀废水中铬和镍的去除效果

技术类型	单位处理成本（元/吨）	可再生性	环境影响
纳米零价铁技术	30-50	较低	较低
生物修复技术	20-30	较高	较低
化学沉淀法	15-25	较低	较高
物理吸附法	20-35	较低	中等

纳米零价铁在处理电镀废水中的铬和镍时具有良好的效果，且处理效率随剂量的增加而提高。

（二）技术应用中的问题与解决方案

纳米材料技术的实际应用中，主要面临的技术问题包括稳定性不足的去除效率、需重新利用的材料以及需要处理的副产物^[8]。尽管在实验室环境下，这些技术展现出了优异的去除效果，但其在工业化应用时却可能因为水质条件或污染物浓度变动等情况变得不太稳定。针对纳米材料技术的优化，解决这些问题的筹措可从材料改性和工艺改进两个方面开始。在纳米材料表面修饰功能性基团能增强材料稳定性和吸附性能。生物修复技术的应用过程中，废水组成的变动会对微生物适应性及处理能力产生影响，可能使实际处理效果与预期产生偏差^[9]。为应对这些问题，可以采用复合菌种的形式，用不同菌种的协同作用提高对多种重金属的处理能力。另一个改进方向是在生物修复技术中加入预处理步骤，使用化学沉淀或吸附法先去除部分重金属，从而减轻生物处理的负担，提升整体处理效果。

（三）经济性与可持续性分析

对于重金属去除技术的经济性分析，必须从处理成本、设备投资、材料消耗以及废物处理费用等多角度进行综合考虑。纳米零价铁技术即便在实验室条件下展现出优良的去除效率，其高昂的材料成本和再生困难也不能忽视，这些都构成了推广应用之道上的主要阻碍。对实际应用数据进行估算可知，每吨废水需要花费约50元才能使用纳米零价铁进行处理；而若引入材料再生技术，治理一吨废水的成本有可能降至30元。

对于生物修复技术来说，由于培养微生物的成本较低，且能在合适的环境条件下自行繁殖，降低了运行费用进行后续处理其经济性较为理想^[10]。生物修复的处理速度较慢，在高流量废水处理中的应用受到一定程度的限制，通常需要较长的反应时间。与化学、物理处理技术相配合，使整体工时缩短，经济效率提高。

四、结语

本文主要对工业废水中有毒重金属的去除技术进行了研讨，并对传统方法的局限性以及新兴技术的优势及优化策略进行了深入剖析，通过运用实际应用实例和实验资料加以验证，优化后的纳米材料技术和生物修复技术在处理废水中的重金属方面表现出较高的效率及可行性，在综合技术的应用中有效地提高处理效果，并通过降低成本来促进环境保护工作的开展。以材料再生及环境可持续性为重点来研究高效环保的废水处理方案，以促进工业废水中有毒重金属的治理工作取得进一步成效，以利于环境与经济的可持续发展。

参考文献

- [1] 韩利军. 半导体工业废水中砷等有毒重金属元素有效去除的研究 [D]. 山东：青岛大学，2004.
- [2] 于晓丹，吴哲坤. 工业废水中重金属的去除技术研究进展 [J]. 中国资源综合利用，2016,34(11):46-48.
- [3] 江澜，闵燕，叶便达，等. 利用潜在生物吸附剂从水体系统中去除有毒重金属 [J]. 应用化工，2021,50(1):194-199,203.
- [4] 塔里克. 新型离子液体的合成及对工业废水中重金属离子的萃取实验研究 [D]. 中国矿业大学，2021.
- [5] 郑刘春，党志，曹威，等. 基于改性农业废弃物的矿山废水中重金属吸附去除技术及应用 [J]. 华南师范大学学报（自然科学版），2015(1):1-12.
- [6] 被聚合物增效的超滤工艺用于从工业废水中去除重金属 [J]. 水处理信息报导，2014,0(5):42-43.
- [7] 许莹莹. 工业废水重金属去除技术进展 [J]. 低碳世界，2015(18):10-11.
- [8] 顾祝禹. 污泥中重金属的去除与资源化研究 [D]. 新疆：新疆农业大学，2015. DOI:10.7666/d.Y2886791.
- [9] 马洋. 乌焦废水处理系统中污染物去除规律及削减技术研究 [D]. 北京：北京交通大学，2014.
- [10] 秦笑梅，杨世豪，王恒栋. 聚合物基复合材料去除水中重金属污染的研究进展 [J]. 工业水处理，2021,41(11):16-22.