

# 工业废水处理中重金属去除方法

孙安超<sup>1</sup> 王兴健<sup>1</sup> 陈义霞<sup>1</sup> 何文旭<sup>2</sup>

1. 中机中联工程有限公司 重庆 400039

2. 重庆长江电工工业集团有限公司 重庆 400039

**摘要:** 工业废水重金属污染问题严峻, 本文梳理了物理、化学、生物及联合去除方法。物理方法涵盖吸附、膜分离、蒸发结晶; 化学方法包括化学沉淀、氧化还原、电解; 生物方法涉及生物吸附、生物还原; 联合方法有物理-化学、物理-生物、化学-生物联合。详细阐述各类方法原理、操作要点及影响因素, 为工业废水重金属去除提供全面参考, 助力解决重金属污染难题, 实现废水达标排放与资源回收。

**关键词:** 工业废水; 重金属去除; 物理方法; 化学方法; 生物方法

引言: 工业快速发展带来大量工业废水, 其中重金属污染危害巨大, 不仅破坏生态环境, 还威胁人类健康。传统处理方法存在成本高、效率低、易二次污染等问题。随着环保要求提高, 探索高效、经济、环保的重金属去除方法愈发迫切。因此, 深入研究多种重金属去除方法, 综合利用各方法优势, 对工业废水处理具有重要意义。

## 1 物理去除方法

### 1.1 吸附法

吸附剂种类涵盖活性炭、活性氧化铝、树脂、表面活性剂改性废料、介孔二氧化硅、壳聚糖、沸石、赤泥等多种类型, 选择需综合考量去除效率、处理成本、污泥产出量及可回收性, 同时匹配废水体系中重金属离子的特性与浓度, 兼顾吸附剂的比表面积和表面化学基团丰富度<sup>[1]</sup>。吸附过程属于表面现象, 核心是重金属离子通过物理力或化学键附着于吸附剂表面, 主要分为物理吸附与化学吸附两类, 整个过程包含重金属离子从本体溶液向吸附剂表面传输、在颗粒表面吸附以及向吸附剂颗粒内部传输三个关键步骤。吸附操作的关键影响因素包括温度、吸附剂自身性质、废水体系pH值、重金属离子初始浓度、吸附接触时间及吸附剂粒径, 此外废水体系中悬浮颗粒、油类物质的存在会降低吸附效率, 需提前通过预过滤去除。

### 1.2 膜分离法

常用膜类型主要有微滤膜、超滤膜、反渗透膜、纳滤膜及电渗析用离子交换膜, 不同类型膜的孔径存在显著差异, 微滤膜孔径范围为0.02~10 $\mu\text{m}$ , 超滤膜为1~20nm, 反渗透膜为0.1~1nm, 纳滤膜介于超滤与反渗透之间, 离子交换膜则带有特定离子交换基团。重金属在水中存在溶解态和颗粒态, 微滤和超滤主要依靠物理筛分作用, 仅能去除经化学沉淀或混凝后形成的重金属悬浮

颗粒, 不能去除离子; 纳滤结合筛分与Donnan效应, 能高效截留二价及以上重金属离子, 是含重金属废水深度处理的优选技术; 反渗透基于溶解-扩散原理, 可近乎完全去除各类重金属离子, 适用于高标准回用, 但能耗较高且产生浓缩液需妥善处置。电渗析则利用电场驱动离子选择性迁移, 适用于特定高浓度重金属废水的资源化回收。膜操作过程需注重控制操作压力与流速, 采用切向流过滤方式减少滤饼形成, 降低过滤阻力, 同时需定期处理膜表面污染, 避免浓差极化现象加剧, 维持膜的分离性能, 延长膜的使用寿命。

### 1.3 蒸发结晶法

蒸发结晶的基本流程包括预处理、浓缩减量、蒸发结晶、固液分离及冷凝水回用, 预处理用于去除废水中悬浮物与部分杂质, 浓缩减量可通过膜分离技术实现, 蒸发结晶环节通过加热使水分蒸发, 待溶质浓度达到饱和后析出晶体, 最后通过离心或压滤完成固液分离。操作过程需严格控制加热温度与蒸发速率, 选用合适的蒸发设备以提高热能利用效率, 同时调节体系pH值, 避免重金属离子形成络合物影响结晶效果, 控制结晶环境减少晶体团聚, 保障结晶产物纯度。该工艺主要用于高浓度、水量小且成分相对单一的重金属废水的深度处理与零排放, 适用的重金属类型范围以高浓度重金属为主, 尤其适用于锌、铅、铜、镉、镍等常见重金属, 对垃圾焚烧电厂等产生的高盐废水中的重金属具有良好的处理效果, 可实现重金属的分离回收与废水零排放。但其难点在于高有机物与重金属共存时, 有机物在蒸发器内极易焦化、结垢, 导致系统瘫痪, 因此此类废水通常需先经过生化处理或高级氧化大幅降低COD后, 才能进入蒸发系统; 该方法特别适用于电镀行业单一镀种清洗水(如纯硫酸镍、纯氯化铜废水)的资源化回收, 或经深度预

处理后的垃圾渗滤液浓缩液处理；对于成分复杂的混合重金属废水，直接蒸发结晶往往产生无价值的危废杂盐，经济性较差。

## 2 化学去除方法

### 2.1 化学沉淀法

沉淀剂种类主要包括氢氧化物、硫化物、碳酸盐及磷酸盐，氢氧化物通过提供氢氧根离子与重金属离子结合，硫化物依靠硫离子与重金属离子形成难溶性硫化物，碳酸盐通过碳酸根离子实现沉淀，磷酸盐则与重金属离子生成稳定的磷酸盐沉淀，不同沉淀剂的作用方式围绕离子结合与难溶物生成展开<sup>[2]</sup>。沉淀反应的基本原理是利用重金属离子与沉淀剂解离出的阴离子发生化学反应，生成溶解度极低的沉淀物，通过后续固液分离操作将沉淀物去除，从而实现废水重金属净化，反应遵循溶度积原理，当离子浓度乘积超过溶度积常数时，沉淀物开始析出。反应过程的影响因素主要包括废水体系pH值，不同重金属离子形成稳定沉淀所需pH范围存在差异，需精准调控以确保沉淀完全；沉淀剂投加量需合理把控，投加不足会导致去除不彻底，投加过量易造成二次污染；反应温度会影响沉淀反应速率与沉淀物稳定性，需控制在适宜范围。

### 2.2 氧化还原法

氧化剂与还原剂选择需结合重金属离子价态及处理目标，常用氧化剂包括高锰酸钾、过氧化氢、次氯酸钠、臭氧等，适用于将低价态有毒重金属离子氧化为高价态低毒或易沉淀形态；常用还原剂有亚硫酸钠、硫酸亚铁、铁粉等，用于将高价态重金属离子还原为单质或低价态沉淀物，选择时需兼顾处理效率、成本及无二次污染要求。氧化还原反应的作用机制是通过电子转移改变重金属离子的价态，破坏其在废水中的稳定存在形态，使高价态重金属离子获得电子被还原，低价态重金属离子失去电子被氧化，转化为易分离、低毒性的物质，从而达到去除目的。反应条件的控制要点包括体系pH值，酸碱度会影响氧化还原剂活性及反应速率，不同氧化还原反应需匹配对应pH环境；反应时间需充足，确保氧化还原反应充分进行，避免未反应的重金属离子残留；反应温度需合理调节，温度过高可能导致氧化还原剂分解，温度过低则会降低反应效率。

### 2.3 电解法

电解反应的基本原理是在外部电场作用下，利用电极反应使废水中的重金属离子在阴极获得电子被还原为单质或低价态化合物，沉积于阴极表面，同时阳极发生氧化反应，生成具有氧化性的物质辅助重金属离子去除，

整个过程依托电化学作用实现重金属的分离与回收。电极材料的选择要求需满足导电性优良、耐腐蚀性能强，能够适应废水的酸碱环境及电解过程中的氧化还原反应，不易发生损耗；阴极材料需具备良好的催化活性，促进重金属离子还原沉积，常用阴极材料有铜、铁、石墨等，阳极材料多选用钛基涂层电极、石墨电极等。电解操作的关键参数包括电流密度，合理的电流密度可保证重金属离子高效还原沉积，过高易导致能耗增加及电极损耗，过低则会延长处理时间；电解时间需根据废水重金属浓度调整，确保重金属离子充分沉积；废水体系pH值需控制在适宜范围，避免影响电极反应效率及沉淀物形态。

## 3 生物去除方法

### 3.1 生物吸附法

生物吸附法利用微生物细胞或其代谢产物作为吸附介质，实现对废水中重金属离子的高效去除。常见生物吸附剂包括细菌、真菌及藻类，不同类型吸附剂具有独特表面结构和化学组成。细菌类吸附剂通常具有较大比表面积和丰富官能团，真菌类吸附剂因细胞壁多糖结构展现出较强整合能力，藻类吸附剂则凭借多孔结构提供更多吸附位点<sup>[3]</sup>。生物吸附作用机制涉及物理吸附与化学吸附协同作用，物理吸附依赖范德华力实现快速结合，化学吸附通过离子交换、络合反应形成稳定结合物。吸附过程受多重因素调控，温度变化影响吸附剂表面活性位点数量，过高或过低温度均会降低吸附效率；pH值通过改变重金属离子形态和吸附剂表面电荷分布影响吸附效果，通常在弱酸性至中性条件下吸附效果最佳；共存离子与目标重金属离子竞争吸附位点，阳离子浓度升高会抑制吸附过程，需通过预处理降低共存离子干扰。

### 3.2 生物还原法

功能微生物是生物还原法的核心，包括硫酸盐还原菌、铁还原菌等。筛选功能微生物需考量耐重金属毒性、还原效率及生长适应性，通过驯化培养提升微生物对目标重金属的还原能力。生物还原反应原理是功能微生物利用代谢活动产生还原酶，借助酶催化作用将电子转移给重金属离子，改变其价态，使有毒高价态重金属离子转化为低毒低价态或单质，降低环境危害。微生物生长控制条件涉及营养物质、pH值、溶解氧及温度。需为微生物提供充足碳源、氮源及微量元素，维持正常生长代谢。pH值需控制在适宜范围，避免抑制微生物活性。溶解氧含量依微生物类型调整，厌氧微生物需严格控制溶解氧，好氧微生物则需保证充足供氧。温度需稳定在微生物适宜生长区间，保障代谢活动正常进行。

## 4 联合去除方法

#### 4.1 物理-化学联合法

常见组合方式以物理预处理搭配化学深度处理为主,主要有吸附-化学沉淀、膜分离-氧化还原、蒸发浓缩-电解等搭配形式。适配场景根据废水重金属浓度、污染物组成及处理达标要求划分,低浓度复杂废水多采用吸附-化学沉淀组合,高盐高浓度废水不宜直接选用膜分离-电解组合,应优先采用化学沉淀或蒸发结晶进行减量化和金属回收,产生的低浓度冷凝水或上清液再进入膜系统进行深度处理和回用,含难降解重金属络合物的废水适合膜分离-氧化还原组合<sup>[4]</sup>。因络合物通常分子量较小且带电,极易穿透纳滤/反渗透膜,或在膜表面形成严重的有机污堵,导致膜通量急剧下降甚至报废,必须先进行化学破络(氧化或酸化),再进行沉淀或后续处理,最后对上清液进行膜过滤。联合处理的操作流程需遵循预处理-主处理-深度处理的逻辑,先通过物理方法去除废水中悬浮物、胶体及部分易分离重金属,降低后续化学处理负荷,再通过化学方法破坏重金属稳定形态、形成易分离产物,最后经固液分离完成净化,部分场景可增加深度处理环节保障出水达标。各环节的协同作用要点在于物理预处理需为化学处理创造适宜环境,降低干扰物质影响,提升化学试剂利用效率;化学处理需弥补物理方法去除不彻底的短板,实现低浓度重金属深度去除,同时减少物理处理过程中二次污染风险,两者衔接需控制好处理参数,保障整体处理效果稳定。

#### 4.2 物理-生物联合法

典型组合形式包括吸附-生物吸附、膜分离-生物还原、蒸发浓缩-生物处理,应用前提需满足废水无强毒性物质、温度与pH值适配生物生长需求,且重金属浓度处于生物处理耐受范围内,同时物理处理环节不会产生抑制生物活性的副产物。联合处理的作用机制是物理方法快速分离废水中部分重金属,降低水体中重金属浓度,为生物处理创造温和环境,减少重金属对生物的毒性抑制;生物方法则对物理处理后残留的低浓度重金属进行深度去除,同时降解废水中可能存在的有机污染物,实现重金属与有机污染物协同去除。操作过程中的协同控制需重点调节物理处理参数,避免物理处理后水体环境超出生物生长适宜范围,同时控制生物处理条件,提升生物对重金属的吸附或还原能力,定期调控各环节处理

节奏,避免前序环节处理不充分影响后续效果,保障物理与生物作用协同发挥。

#### 4.3 化学-生物联合法

常用组合方式有化学沉淀-生物吸附、氧化还原-生物还原、电解-生物处理,适用范围覆盖中低浓度重金属废水、含重金属络合物废水及重金属污染区域修复,其中化学沉淀-生物吸附适配多类型重金属混合废水,氧化还原-生物还原适合高价态有毒重金属处理,电解-生物处理多用于重金属污染水体原位修复。联合处理的反应协同原理是化学方法通过化学反应改变重金属价态或存在形态,将难生物降解、高毒性的重金属转化为易被生物吸收、低毒性的形态,为生物处理提供便利;生物方法则通过吸附、还原等作用,深度去除化学处理后残留的重金属,同时降解化学试剂残留,降低二次污染风险,实现优势互补。各步骤的操作控制要点包括化学处理环节需控制试剂投加量,避免过量试剂抑制生物活性,调节反应条件确保重金属形态转化充分;生物处理环节需保障营养供给与生长环境稳定,提升生物活性,同时控制处理时间,确保生物作用充分发挥,各步骤衔接需做好参数匹配,保障整体处理效率与稳定性。

#### 结束语

工业废水重金属去除方法多样,物理、化学、生物及联合方法各有特点。物理方法处理效率高但成本可能较高;化学方法操作简单但易产生二次污染;生物方法绿色环保但处理周期长。联合方法能综合各方法优势,提高处理效果与稳定性。实际应用中,需根据废水特性、处理要求及成本等因素,合理选择与组合去除方法,以实现工业废水重金属高效去除,保障生态环境安全。

#### 参考文献

- [1]曹文庚,王妍妍,张栋,等.工业废水去除重金属技术的研究现状与进展[J].中国地质,2023,50(3):756-776.
- [2]张甜,陈萌萌,张思晗,等.工业废水重金属污染现状及去除技术进展[J].河南科技,2025,52(10):92-96.
- [3]肖雨洪.工业废水中重金属离子处理方法研究进展[J].浙江化工,2023,54(5):38-44.
- [4]林美琪.工业废水中重金属去除法研究综述[J].环境保护前沿,2024,14(4):791-800.