

# 基于多技术联用的重金属混合生活污水处理及成本分析

杨苏鑫 (哈尔滨飞机工业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150066)

**摘要:** 伴随着工业与生活一体化的趋势, 含有重金属的生活污水排放量日益增加, 而仅靠单一方法难以实现重金属的彻底去除及排放达标。文章针对含重金属混合生活污水处理问题, 首先研究了含重金属混合生活污水的水质特征, 在此基础上提出多技术联用的处理思路, 涵盖预处理、主体处理、深度处理、污泥处理等全过程联合处理手段, 随后对所提处理系统的经济性进行分析, 希望为含重金属混合生活污水处理技术的应用与改进提供参考。

**关键词:** 多技术联用; 重金属; 生活污水; 污水处理技术

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0061-03

## Treatment of Heavy Metal Mixed Domestic Wastewater Based on Multi-Technology Integration and Cost Analysis

Yang Su Xin (Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin Heilongjiang 150066, China)

**Abstract:** With the trend of integration of industry and life, the discharge volume of domestic wastewater containing heavy metals is increasing day by day. It is difficult to achieve complete removal of heavy metals and meet discharge standards solely by using a single method. This article addresses the problem of treating mixed domestic wastewater containing heavy metals. Firstly, it studies the water quality characteristics of such wastewater. On this basis, it proposes a treatment concept using multiple technologies in a combined manner, covering pre-treatment, main treatment, deep treatment, and sludge treatment, etc. Then, it analyzes the economic feasibility of the proposed treatment system, hoping to provide a reference for the application and improvement of heavy metal-containing mixed domestic wastewater treatment technologies.

**Keywords:** Multi-technology integration; Heavy metals; Domestic wastewater; Wastewater treatment technology

重金属具有毒性大、不易分解、易富集的特点, 进入水体后会通过食物链积累, 威胁人类健康及整个生态环境安全。当前, 生活中重金属污染源日益增多, 既包括日常生活接触的含重金属洗涤剂、化妆品等, 也涵盖部分小型工厂偷排、混排形成的复杂重金属混合生活污水。现有生活污水处理工艺对重金属的去除效果较差, 且单一重金属去除方法普遍存在去除效率低、易造成二次污染、应用范围窄等问题。因此, 研究多技术协同配合的处理方式, 实现各方法优势互补, 是解决重金属混合生活污水处理难题的有效路径之一。

### 1 重金属混合生活污水的水质特性

重金属混合生活污水水质受污染源类型、排放量及地区生活方式等多种因素制约, 具有以下特征: ①重金属种类多样、形态繁杂。污染混合污水中往往共存铅、镉、汞、铬、铜、锌等多种重金属元素, 且部分金属以离子型、络合态、悬浮型等形式存在, 大幅增加了除污难度; ②浓度波动幅度大。受人类生活节奏及部分企业间歇排污影响, 污水中重金属污染物浓度随时间变化差异显著, 不利于污水处理设施持续稳定运行; ③基质干扰程度高。生活废水中含有的丰富有机物、氮、磷等营养元素及悬浮物质, 会与重金

属发生吸附竞争或形成复合物, 降低重金属去除率;

④pH值不稳定。污水pH值通常在6至9之间波动, 而pH值对重金属形态及处理药剂活性具有显著影响; ⑤有毒物质协同作用。多种重金属共存于环境中时, 其毒性并非简单叠加, 而是相互强化, 对生物体造成更严重的危害<sup>[1]</sup>。

### 2 基于多技术联用的重金属混合生活污水处理策略

#### 2.1 预处理——物理化学协同去除技术

为减轻后续处理单元负荷, 保障重金属混合生活污水处理系统稳定高效运行, 预处理工序需采用物化联合去除法构建多重屏障, 通过系统化工艺集成, 实现悬浮物质、胶体粒子及部分重金属离子的有效清除。首先, 应配置粗格栅与细格栅组成的分步拦截装置, 科学设定格栅间距: 粗格栅栅间距设计为10~20mm, 用于过滤大粒径悬浮杂质; 细格栅栅距取值3~5mm, 用于拦截细小悬浮杂质。同时, 需定期清洁格栅, 防止栅渣堵塞影响过流性能。经格栅处理后的污水进入沉淀池进行重力沉降, 根据进水悬浮物质浓度, 将沉淀区停留时间调整为1.5~2.5h; 通过改良池体构造提升沉降效率, 沉淀污泥需及时排放, 避免沉积重金属重新溶解造成二次污染。在此基础上, 可

根据水质需求投加混凝剂、助凝剂强化化学去除效果：混凝剂宜选用聚合氯化铝或聚合硫酸铁，投加量根据进水水质检测结果动态调整；助凝剂可采用聚丙烯酰胺，通过优化投加比提升絮凝效果，使污水中胶体物质及部分络合态重金属聚结成致密絮团<sup>[2]</sup>。

预处理阶段还需注重 pH 值调控，根据废水中重金属种类精确调整 pH 值区间：含铅、镉等重金属离子较多的废水，将 pH 值调节至 8.5 ~ 9.0，使其形成氢氧化物沉淀；含铬、铜等重金属的废水，将 pH 值控制在 7.5 ~ 8.0，以保障去除效果。为提升协同处理效率，混凝反应池应配备搅拌设施，控制搅拌速度与时间：初期采用快搅确保药剂与废水充分混合，后期采用慢搅促进絮体聚集长大。

此外，需建立健全预处理水质监控体系，实时监测排水浊度、重金属浓度、pH 值等关键指标，根据监测结果动态调整工艺参数，确保预处理出水水质达标，满足后续主体处理单元的进水要求，为整个处理系统稳定运行提供保障。

## 2.2 核心处理——吸附 - 高级氧化联用技术

针对重金属混入生活污水后溶解态、络合态重金属占比高，单一方法难以有效去除的问题，核心处理单元宜采用吸附 - 高级氧化联合工艺，通过吸附浓缩与氧化解络协同作用，提升重金属去除效率。首先，可采用改性活性炭、生物活性炭或沸石分子筛等高性能吸附介质构建固定床吸附装置：吸附介质粒径控制在 0.5 ~ 2.0mm，保障污水与介质充分接触；设定固定床空床停留时间为 30 ~ 60min，通过调节流速强化系统吸附性能。固定床运行过程中，需对吸附介质进行预处理（如酸碱活化、负载金属氧化物等），提升介质表面活性基团活性，增强对重金属离子的选择性吸附能力；同时，定期置换填料，避免吸附饱和导致系统净化效果下降。对于吸附后残留的稳定络合态重金属，需采用芬顿氧化或臭氧氧化法破解，利用高级氧化产生的羟基自由基切断重金属与有机配体的络合键<sup>[3]</sup>。

在采用芬顿氧化法时，需精准控制亚铁离子与过氧化氢的投加比例，结合重金属络合物含量调整药剂投加量；将反应装置 pH 值调节至 2.5 ~ 3.5，维持良好氧化状态；反应时间控制在 60 ~ 90min。采用臭氧氧化法时，需合理把控臭氧投加量及接触时间：臭氧投加量控制在 50 ~ 100mg/L，接触时间不低于 30min；同时，设置臭氧尾气处理设备，防止臭氧外泄造成二次污染。解络反应完成后，污水返回吸附单元进行二次吸附，通过两级吸附系统实现析出重金属离子的有效去除。核心处理全过程需建立实时检测与

动态调节机制，实时监测重金属浓度变化，根据检测指标及时校正吸附剂更新频率、高级氧化药剂投加参数等，确保核心处理出水重金属含量满足后续深度处理进水要求。

## 2.3 深度处理——膜分离 - 离子交换精制技术

核心处理后污水仍残留一定量重金属及少量污染物，且随着水资源循环利用需求提升，深度处理阶段需采用膜分离 - 离子交换精制联合工艺，通过多级精制实现污水深度净化与资源合理利用。该阶段首先采用超滤技术对核心处理出水进行初筛：超滤膜孔径设定为 0.01 ~ 0.1 μm，利用过滤作用截留污水中悬浮微粒、胶体及部分大分子物质；超滤装置操作压力控制在 0.1 ~ 0.3MPa，需定期对膜组件进行冲洗清洁——反冲洗间隔控制在 30 ~ 60min，根据膜污染程度定期开展化学清洗，保障超滤膜透气性能。超滤出水进入纳滤或反渗透单元进行截留处理：纳滤膜对二价金属离子截留效果优异，反渗透膜可有效去除一价金属离子，可根据出水水质要求选择膜类型；控制系统回收率在 70% ~ 80%，确保污水净化效果。

膜处理后需增设离子交换精制工艺，去除微量重金属离子。离子交换树脂宜选用螯合类树脂，根据废水中重金属种类选择对应官能团树脂：例如，处理含汞废水可选用硫脲型螯合树脂，处理含铬废水可选用氨基膦酸型螯合树脂。

离子交换塔需保障废水与树脂充分接触，停留时间控制在 40 ~ 60min；建立健全树脂再生程序，树脂达到吸附饱和状态时，及时采用对应再生剂处理——阳离子交换树脂可选用盐酸或硫酸再生，阴离子交换树脂可选用氢氧化钠再生，再生后树脂循环使用，降低运行成本。深度处理阶段需加强膜组件与树脂的维护管理，实时监测出水水质变化，及时调节工艺参数，确保最终出水满足再生水回用指标，提升水资源利用率<sup>[4]</sup>。

## 2.4 污泥处置——固化稳定化 - 资源化协同技术

随着重金属混合生活污水处理规模扩大，处理过程中产生的含重金属污泥量急剧增加。污泥安全处置是防范二次污染的关键，需采用固化稳定化 - 资源化联合技术，实现污泥减量化、无害化与资源化。固化稳定化环节，需根据污泥类型及重金属浓度选择适宜固化材料：针对重金属浓度较高的污泥，采用水泥 - 磷酸盐复合固化法，水泥投加比例为污泥干重的 30% ~ 50%，磷酸盐投加比例为污泥干重的 5% ~ 10%，借助磷酸盐与重金属的化学反应生成稳定磷酸盐沉淀，利用水泥胶凝作用使污泥固化成型；针对有机物含量高的污泥，先进行脱水预处理，将污泥含水量降

至 60% 以下,再投加石灰-粉煤灰复合固化,石灰投加量为污泥干重的 20% ~ 30%,粉煤灰投加量为污泥干重的 15% ~ 25%,提升固化体强度与抗渗性。

固化稳定化处理后,推进污泥资源化利用:达到强度要求的固化体可作为路基材料或制砖原料——作为路基材料时,固化体抗压强度需  $\geq 1.5\text{MPa}$ ,同时定期监测路基周边土壤及地下水,防止重金属泄漏;用于制砖时,需将固化体粉碎至适宜粒径,与黏土等材料按比例混合均匀,经成型、焙烧工艺加工为建筑用砖,焙烧温度控制在  $800\text{℃} \sim 1000\text{℃}$ ,提升砖体硬度与耐久性。对于无法直接资源化的固化污泥,采用卫生填埋处置:填埋场需配备防渗、渗滤液收集等环保设施,防渗系统采用厚度  $\geq 1.5\text{mm}$  的 HDPE 薄膜,渗滤液收集系统需确保渗滤液及时收集处理。全过程实行全流程质量监控,严格检测固化体稳定性及资源化产品质量,确保污泥处置符合环保标准,实现生态保护与经济效益双赢<sup>[5]</sup>。

### 3 经济成本分析

#### 3.1 建设投资费用分析

综合效益成本分析需考虑项目的经济成本及对环境、社会产生的效益,通过成本效益比衡量项目的可行性与持续性。在经济效益方面,一方面可通过再生水回用获得直接收益,经深度处理的再生水可用于工业冷却、市政绿化等领域;另一方面,污泥资源化可节约处置成本,固化污泥可用于制砖或道路路基等,同时还能获得一定的资源化收入。在环境效益方面,可减少重金属污水排放,规避水体修复成本,同时降低重金属污染通过食物链危害人体所产生的隐性支出。在社会效益方面,该项目可提升区域内水资源利用效率,缓解缺水压力,为周边居民提供就业岗位,并改善整个地区的环境面貌。加之相关政策的补助等扶持力度,项目可取得较好的综合效益,具有一定推广价值。

#### 3.2 运维费用分析

工程运行维护费用是长期运营的主要开支,主要由耗材费、动力费、设备维修费及人力成本四部分构成,且与处理水量、水质变化密切相关。耗材费包括混凝剂、助凝剂、氧化剂、离子交换树脂再生剂、污泥固化药剂等,其中高级氧化剂和螯合剂树脂单价较高,占耗材费的主要部分。动力费主要用于驱动各类泵体、搅拌机、膜系统冲洗装置、污泥干燥机等设备,亦是运行费用中的大额开支。设备维修费主要包括膜系统的清洗更换、吸附剂的再生置换、泵机械密封的替换等,其中膜系统更换价格最高,占设备维护费用的主要部分。人力资源消耗主要用于监测水质、操作

机械设备及巡视检查,需根据项目规模配置相应工作人员,保障工程长期顺利运行。

#### 3.3 综合性效益成本分析

综合效益成本分析既要考虑项目的经济成本,也要兼顾其环境、社会效益,通过成本效益比衡量项目的可行性与经济可持续性。在经济效益方面,一方面可通过中水回用获取直接收入,经充分处理的中水可应用于工业冷却用水、市政用水等多种用途;另一方面,通过污泥资源回收利用可减少废弃物处理成本,固化污泥还可用于制砖或道路基层填料等,同时可获得少量资源回收费用。在环境效益方面,可避免重金属废水直接排放对水环境造成的治理费用,以及重金属进入食物链间接损害人体所产生的隐性代价。在社会效益方面,本工程可提高区域内水资源循环再利用,缓解水资源紧缺问题,同时为周边居民提供就业机会,提升当地生态环境质量。

### 4 结束语

重金属混合生活污水治理难度大,单一处理方法难以达到治理目标。本研究提出的预处理-物理化学协同去除、吸附-高级氧化联用、膜分离-离子交换精制、污泥固化稳定化-资源化协同处理的多技术联用方案,可实现各技术优势互补,显著提升重金属去除率,有效解决污泥处置难题。经济成本核算表明,该系统虽投资及运行费用偏高,但通过合理设计与规范运营,可提升成本收益比,兼具显著社会效益与环境效益。未来,应加强高效处理材料与设备研发,优化多技术组合工艺,提升工艺成熟度、可靠性与经济性,推动该技术在重金属混合生活污水处理领域的广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] 时艳婷. 深度处理技术在城市生活污水处理中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(14): 211-213.
- [2] 时瑞. 城市生活污水处理中深度处理工艺研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(04): 133-135.
- [3] 姚潇涵. 西南某工业园区配套污水处理厂工艺设计与运行研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2024.
- [4] 黄东, 郑亚楠, 邢志林, 等. 外加固体碳源强化生活污水处理研究进展与展望 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(06): 298-304.
- [5] 李鹏程, 刘成, 武海霞, 等. 城镇污水厂典型重金属去除研究进展 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(08): 40-46.

#### 作者简介:

杨苏鑫 (1999-), 女, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 污水处理。