

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2025.01.002

引用格式: 邵立南. 我国有色金属行业重金属废水处理技术研究现状和发展趋势[J]. 矿冶, 2025, 34(1): 12-18.

SHAO Linan. Current situation and development tendency of non-ferrous metal heavy metal wastewater treatment in China[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(1): 12-18.

我国有色金属行业重金属废水处理技术研究现状和发展趋势

邵立南

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 基于我国有色金属行业重金属废水污染源特征与处理技术需求的系统解析, 通过对主流处理技术进行效能分析。结果表明, 现行技术体系主要包括 7 类典型工艺: 中和沉淀法(石灰-铁盐共沉淀工艺)、硫化沉淀法、电化学法、吸附法、离子交换法、膜分离法及生物处理法。阐明了行业技术发展趋势: ①环保标准趋严驱动技术升级: 推动废水处理技术向痕量重金属深度净化方向发展; ②资源化技术方向转型: 传统中和/硫化工艺存在化学污泥产生量高、二次污染风险及有价金属回收率低等瓶颈, 倒逼技术范式向“污染物去除-有价资源回收”协同方向发展; ③智能化治理模式创新: 基于云端智控系统, 正推动重金属废水处理向无人值守智慧化模式转型。

关键词: 有色金属; 重金属废水; 废水处理; 废水处理技术; 深度治理; 资源化; 无人值守; 治理模式

中图分类号: X752 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2025)01-0012-08

Current situation and development tendency of non-ferrous metal heavy metal wastewater treatment in China

SHAO Linan

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: Based on a systematic analysis of the characteristics of heavy metal wastewater pollution sources and the demand for treatment technologies in China's non-ferrous metal industry, an efficacy analysis of mainstream treatment technologies was conducted. The results indicate that the current technological system primarily includes seven typical processes: neutralization precipitation (lime-iron salt co-precipitation process), sulfide precipitation, electrochemical methods, adsorption, ion exchange, membrane separation, and biological treatment. The industry's technological development trends are clarified as follows: ① Stricter environmental standards are driving technological upgrades, pushing wastewater treatment technologies towards the deep purification of trace heavy metals; ② A direction shift in resource recovery technologies: traditional neutralization/sulfide processes face bottlenecks such as high chemical sludge production, risks of secondary pollution, and low recovery rates of valuable metals, forcing the technological paradigm to shift towards the synergistic direction of “pollutant removal and valuable resources recovery”; ③ Innovation in intelligent governance models: Cloud intelligent control system are promoting the transformation of heavy metal wastewater treatment towards an unattended intelligent mode.

Key words: non-ferrous metal; heavy metal wastewater; wastewater treatment; wastewater treatment technologies; deep purification; resource recovery; unattended operation; management model

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3904001)

作者简介: 邵立南, 正高级工程师, 主要从事环境工程等方面的研究和工程设计工作。E-mail: 13651315636@163.com

有色金属作为关键战略基础材料，在国民经济体系、国防科技工业及战略性新兴产业发展中具有不可替代的支撑作用。我国作为全球最大的铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)等主要有色金属生产与消费国，2023年十种有色金属总产量达 7.47×10^7 t(同比+7.1%)，首次突破七千万吨量级(国家统计局，2024^[1])。然而，伴随产业规模扩张，环境问题日益凸显：据《中国生态环境统计年报》(2023)显示，2022年重点行业废水重金属排放总量为48.1 t，其中重有色金属矿采选与冶炼行业贡献率超65%^[2]，且矿山酸性废水(AMD)与冶炼废水中典型污染物(As、Cd、Pb等)的浓度普遍高于常规工业废水。尽管《关于进一步加强重金属污染防治的意见》(环固体(2022)17号)已实施严格管控，但行业仍面临如污染源复杂性、技术适配性不足、环境风险累积等多重治理挑战^[3, 4]。本文

针对有色金属行业重金属废水的水质特点和排放特征，系统总结了我国有色金属行业重金属废水处理的研究现状，在此基础上，阐明了其发展的趋势，以期对我国有色金属行业重金属废水处理起到借鉴作用。

1 有色金属行业重金属废水的来源、特征和处理要求

1.1 有色金属行业重金属废水的来源和特征

有色金属行业重金属废水主要来源于采矿、选矿和冶炼过程，其中，采矿废水主要指矿坑(井)涌水及因降水形成的排土场、废石场淋滤水等；选矿废水主要指选矿过程产生的废水、尾矿库溢流水、选矿厂地面冲洗水、初期雨水等；冶炼废水主要指硫酸废水、含重金属的生产废水、初期雨水、一般生产废水等。具体来源和特征见表1。

表1 有色金属行业重金属废水的来源和特征

Table 1 Sources and characteristics of heavy metal wastewater in non-ferrous metal industry

项目	废水来源	水质特征
采矿废水	矿坑(井)涌水 排土场、废石场淋滤水	少量的重金属污染物，部分为酸性矿井水 大部分酸性较高，含较高浓度的重金属污染物
选矿废水	设备和地面的冲洗水 选矿过程中的尾矿废水、精矿浓密池溢流水等 初期雨水	含有一定浓度的重金属污染物 含有一定浓度的重金属 含少量的重金属污染物
冶炼废水	酸性废水，包括硫酸、硫酸电除雾的冷凝液和冲洗液、 电解酸雾的冷凝液、吸收液等 冲渣水 烟气净化废水 车间冲洗废水 初期雨水	酸度高，含有高浓度的重金属污染物 含少量重金属污染物 含有大量重金属污染物 含重金属污染物 含少量的重金属污染物

1.2 有色金属行业重金属废水的处理要求

近年来，国家出台和修订了一系列标准规范，对重金属废水治理要求日益提高，环境容量低的地区甚至要求达到地表水环境质量标准Ⅲ级要求。有色金属行业重金属废水的处理要求见表2。

2 有色金属行业重金属废水处理技术研究进展

近年来，国内外研究机构针对有色金属行业重金属废水处理技术开展了系统研究，在污染物去除效率提升和工艺优化方面取得显著进展。本文依据技术原理将现有处理技术归纳为化学法、物理法和生化法三大类，并对典型技术的研究成果进行系统梳理。

2.1 化学处理技术

2.1.1 中和和沉淀法

该技术通过pH值调节促使重金属离子形成氢氧

化物沉淀。陈希飞等^[5, 6]采用中和—铁氧体法处理低浓度含 Co^{2+} 废水，发现该法对 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 4种离子去除效果较好，但 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子共存会抑制 Co^{2+} 去除(去除率下降5%~15%)。彭映林等^[7]开发两级NaOH中和— FeSO_4 沉淀工艺，实现As去除率99.99%(出水浓度 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，显著优于GB 8978—1996标准限值。徐加兴等^[8]通过高密度泥浆法底泥回流优化发现，在固含量2%、絮凝剂 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下，总铜去除率提升23%且沉降速率提高1.8倍。

2.1.2 硫化沉淀法

硫化法通过生成难溶硫化物实现重金属去除。胡建龙等^[9]采用硫化—吸附组合工艺使铊(Tl)浓度降至 $2.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。李亚林等^[10]研究了硫化钠和重金属捕集剂协同治理含镉废水的处理效果，发现处理出水中镉的浓度降低至 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，满足国家排放标准要求。宋博宇等^[11]采用中和—硫化—混凝工

表2 有色金属行业重金属废水处理要求

Table 2 Requirements for the treatment of heavy metal wastewater in non-ferrous metals industry

重金属污染物种类	标准限值/(mg·L ⁻¹)				
	污水综合排放标准 (GB 8978—1996)	铜镍钴工业污染物排放标准 (GB 25467—2010)	铅锌工业污染物排放标准 (GB 25466—2010)	锡锑汞工业污染物排放标准 (GB 30770—2014)	地表水环境质量标准Ⅲ类水体 (GB 3838—2002)
总汞	0.05	0.05(0.01)	0.03(0.01)	0.005(0.005)	0.000 1
总镉	0.1	0.1(0.02)	0.05(0.02)	0.02(0.02)	0.005
总铅	1.0	0.5(0.2)	0.5(0.2)	0.2(0.2)	0.05
总铊	—	—	0.017(0.005 ^②)	0.015(0.005 ^②)	0.000 1 ^①
总砷	0.5	0.5(0.1)	0.3(0.1)	0.1(0.1)	0.05
总锑	—	—	—	0.3(0.3)	0.005 ^①
总锌	2 ^③	1.5(1.0)	1.5(1.0)	1.0(1.0)	1.0
总铜	0.5 ^③	0.5(0.2)	0.5(0.2)	0.2(0.2)	1.0
总镍	1.0	0.5(0.5)	0.5(0.5)	—	0.02 ^①
总钴	—	1.0(1.0)	—	—	1.0 ^①
总铬	1.5	—	1.5(1.5)	—	—
总锡	—	—	—	2.0(2.0)	—
六价铬	0.5	—	—	0.2(0.2)	0.05

注: ①取自地表水环境质量标准(GB 3838—2002)集中式生活饮用水地表水源地特定项目标准限值。②适用于采矿或选矿生产单元废水单独排放的情形。新建企业和特别排放限值总铊指标要求相同。括号内为特别排放限值要求。③为污水综合排放标准中的一级标准。

艺对含重金属酸性废水进行处理,发现处理出水中重金属污染物也可以达到行业废水排放标准。何绪文等^[12]处理含Pb废水取得99.60%去除率(出水Pb 0.13 mg·L⁻¹)。袁翠玉等^[13]开发的氧化一中和一硫化协同工艺对As和Tl的去除率均达99.96%,突破传统工艺对分散金属的处理瓶颈。

2.1.3 电化学法

电化学技术通过可溶性阳极铝、铁形成金属阳离子与溶液中的OH结合生成的高活性的絮凝基团,对重金属离子吸附絮凝去除。黄太彪等^[14]构建的气浮-芬顿-电絮凝组合系统实现重金属浓度<0.5 mg·L⁻¹。熊江磊团队^[15]制备PPy修饰阳极,在30 mA·cm⁻²条件下Cu、Cr去除率分别达99.9%和84.1%。杨国超等^[16]采用电絮凝法,发现在pH值为10.0、通电时间10 min、极板间距1 cm、电流密度6.25 mA·cm⁻²的条件下,锰和铊去除率分别可达到98.86%和95.21%,处理后废水水质达到GB 31573—2015排放要求。刘兴等^[17]优化电絮凝参数后Cd²⁺去除率>99.99%(出水5 μg·L⁻¹),满足GB 5749—2006饮用水标准。

2.2 物理分离技术

2.2.1 吸附法

采用新型吸附材料进行吸附去除是当前的研究热点。段翠清等^[18]研究了纳米氧化石墨烯复合材料对溶液中Cd²⁺吸附的效果,发现该材料可把溶液中95.3%的Cd吸附掉,吸附容量可达45.8 mg·g⁻¹,且材料经过多次使用后仍具有良好的吸附性能。杨

毅等^[19]以电厂粉煤灰、炉渣和脱水污泥为原料制备陶粒吸附剂吸附废水中的铅,铅的去除率可达93.70%。李超等^[20]利用高硅尾渣合成13X分子筛,并研究所制备分子筛对Pb²⁺、Zn²⁺、Cu²⁺的吸附,发现对Pb²⁺、Zn²⁺、Cu²⁺的吸附率均可达到99%,Pb²⁺、Zn²⁺、Cu²⁺的饱和吸附量可分别达到35.82、49.18、41.19 mg·g⁻¹。崔国居等^[21]采用制备的空心类水滑石(LDHs-H)吸附溶液中的铜、铅、锌和镍,发现吸附机理是LDHs-H上的羟基与重金属离子发生了作用。吴权佳等^[22]以剩余污泥裂解灰为原料制备陶粒,并研究了所制备陶粒对Zn²⁺、Cu²⁺、Pb²⁺去除效果,结果表明Zn²⁺、Cu²⁺、Pb²⁺的去除率可分别达到99.2%、85.1%、96.27%。邵立南等^[23]利用开发的多孔二氧化锰材料,利用水合二氧化锰表面的羟基,通过化学吸附作用,实现了深度除铊的效果,铊的浓度稳定低于DB 43/968—2014标准限值。

2.2.2 离子交换技术

覃朝科等^[24]采用强酸阳离子交换纤维对铅锌矿重金属废水进行处理,结果表明处理出水中镉、锌浓度均可达到地表水Ⅲ类水质标准。陈广源等^[25]制备得到偕胺脒吡啶螯合树脂(APO),研究了APO树脂对Cu(Ⅱ)的吸附性能,发现APO树脂主要是通过吡啶N原子和脒基中的O原子对Cu(Ⅱ)进行螯合去除,且具有较好的抗盐和抗酸特性。韦蒙蒙等^[26]采用亚氨基二乙酸螯合树脂D463吸附废水中的铜和镍,发现在高氨条件下,镍离子和铜离子的穿透点分别为260 BV和520 BV。李雅等^[27]研究发现,KLNi-01树

脂对镍的吸附容量为 $27.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.2.3 膜分离技术

膜技术在水质深度净化方面表现突出。李福勤等^[28]通过普通均相阳离子交换膜(CEM)进行改性,制备出了单价选择性阳离子交换膜,并利用改性的交换膜吸附酸性重金属废水,结果发现淡水室中 H^+ 透过率可达到80%,且 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的泄漏率分别仅为7.13%与7.23%。可实现 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 截留率>92%。李子梦等^[29]提出了一种膜分离和电吸附耦合的导电复合膜工艺,开展了对含 $\text{Cu}(\text{II})$ 废水的处理试验,结果表明 $\text{Cu}(\text{II})$ 浓度越高,TDS去除率越小,吸附量越大。武

延坤等^[30]开发的陶瓷膜短流程工艺在 $80 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 通量下, Cr^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 浓缩倍数分别达92、80、42倍。田晓媛等^[31]证实反渗透膜对 Cr^{3+} 截留率达99.8%。

2.3 生化处理技术

生化法投资、运行成本低。毛轩雯等^[32]构建的白腐真菌固定化体系经7次循环后仍保持>90%的 Pb^{2+} 去除率。焦晓斌等^[33]通过生物制剂协同工艺实现TI和多金属同步达标排放。张晶然等^[34]研发的 KMnO_4 改性污泥生物炭(KBC)对 Cd^{2+} 去除率达90.34%。

几种重金属处理方法的处理原则、方法特点、适用范围和存在的问题总结见表3。

表3 重金属水治理方法对比

Table 3 Comparison of wastewater treatment methods for heavy metals

处理方法	处理原则	试剂/材料	特征	适用范围	存在的问题	
化学法	化学沉淀法	通过投加石灰/硫化剂等药剂使重金属生成沉淀,再结合铁/铝盐混凝沉淀,经固液分离后将重金属去除	石灰、硫化剂、铁/铝盐	处理工艺流程简单,投资较少,达到处理效果,需大量过量投加药剂	适用于高浓度重金属废水的预处理,对低浓度重金属废水的去除效率低	会产生大量废渣,易造成二次污染问题
	电化学法	以铝、铁等金属为阳极,在电流作用下,铝、铁等金属离子进入水中与水电解产生的氢氧根形成氢氧化物,氢氧化物絮凝将重金属吸附,生成絮状物,从而使水得到净化	铁板/铝板	设备构造简单、占地面积小、不需要使用药剂,操作管理方便,能够同时去除多种污染物	适用于处理中低浓度重金属废水	阳极需要定期更换、运行成本高、电极钝化影响电絮凝处理效率
物理法	吸附法、离子交换法	利用能够吸附重金属的某种自然或合成产物,使重金属从水中去除	活性炭、沸石、离子交换树脂等	处理效果好,适用于深度处理	适用于低浓度重金属废水的深度处理,可选择性的去除特定的重金属或同时去除多种重金属,但废水盐度较高时,对处理效果有影响	常规的吸附剂和离子交换树脂的选择性不高;在复杂水质条件下吸附容量低,需高频率再生或更换
	膜法	利用膜的选择性分离对料液中的不同组分进行分离、纯化、浓缩	膜材料	具有分离过程中物质不发生相变、分离效果好、操作简便、无化学副作用、无二次污染、分离产物易于回收等优点	适用于废水中有价金属回收,同时使出水中重金属离子浓度显著降低,可实现废水高质量回用	进水水质有严格要求,需要配套完备的预处理工序;废水中主要污染物全部去除,无选择性;浓水处理难度大,若蒸盐处理后,废盐难以消纳;投资高,运行成本偏高
生化法	利用某些植物/微生物能够吸收重金属的功能,降低重金属的浓度	植物/微生物	投资、运行成本低	适用于重金属浓度不高,含有一定有机物的废水处理	水质、水量的冲击负荷对出水水质影响较大,吸附重金属后的植物/微生物仍需处置,以避免二次污染	

上述研究表明,通过工艺参数优化、材料改性和技术集成,现有重金属废水处理技术已能有效满足排放标准要求。未来研究应重点关注复杂体系下金属深度去除机制、副产物资源化利用及处理成本控制等关键问题。

3 我国有色金属行业重金属废水处理发展趋势

随着有色金属行业重金属废水治理研究的持续深化,该领域近年来呈现出显著的阶段性发展特征。

3.1 环保标准升级驱动处理技术向深度化转型

在国家生态文明建设战略框架下,环保监管部

门相继颁布了《铅、锌工业污染物排放标准》(GB 25466—2010)等多项强制性标准,部分环境容量低的地区甚至被要求达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水体指标。这种政策导向促使生产企业将污染治理重心向深度处理转型。

在此背景下,作者团队通过系统解析典型有色金属采选及冶炼废水的组分特征,创新性地开发了基于界面修饰技术的纳米复合吸附材料。该成果通过离子吸附-化学沉淀法在多孔介质表面原位负载水合氧化铁纳米颗粒(粒径 $20\sim 100 \text{ nm}$)处理出水砷的浓度达到地表水环境质量Ⅲ级标准。此项技术在多家矿山企业成功进行了工程应用,经第三方检测数据显

示, 达标率 100%。

3.2 资源化技术突破传统治理瓶颈

现行主流重金属废水处理技术(如硫化法、石灰铁盐法)虽可实现污染物相态转变, 但存在显著缺陷: 1) 危废渣产生量大, 需按《危险废物贮存污染控制标准》(GB 18597—2023)建设专用贮存设施; 2) 资源利用率低, 造成硫酸、有价金属如 Cu^{2+} 等有效成分流失。

对此, 胡泽亚^[35]研发的“硫化—多效蒸发—电渗析耦合”工艺实现了锌冶炼污酸全组分回收: 水回用率 $\geq 95\%$, 硫酸回收纯度达 92.6% (ICP-MS 分析), 氟、氯元素以 CaF_2 (纯度 98.3%)和 CaCl_2 (食品级)形式资源化。该技术在某企业建成 $3\ 000\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 示范工程, 年减危废量达 $1.2 \times 10^4\ \text{t}$, 较传统工艺节约处理成本 41.7%。

针对反渗透浓盐水资源化难题, 本文作者团队开发的“吸附软化—膜集成”技术(处理干盐量 $5\ \text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$), 通过双极膜电渗析实现酸碱联产($\text{HCl}\ 6.8\% \sim 7.2\%$, $\text{NaOH}\ 5.3\% \sim 5.7\%$), 较热法蒸发处理成本降低 50% 以上。

3.3 智能无人值守系统重构治理模式

充分利用处理场地条件, 实现无动力或数字化远端操控条件下的无人值守污染治理, 将成为未来的发展方向。针对废弃矿山特殊工况(无电力供应、地形落差 $>20\ \text{m}$), 本文作者团队研发的重力驱动除重金属系统创新性采用: ① 自清洁吸附柱(通量 $\geq 3\ \text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$); ② 虹吸反冲装置(触发压差 $\leq 0.017\ \text{MPa}$)。工程应用显示(处理规模 $720\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), 出水总砷浓度稳定达到地表水环境质量Ⅲ级标准。

本文作者团队开发的云端智控系统集成: ① 模糊 PID 控制系统(控制精度 $\pm 0.1\%$); ② 5G 物联网传输模块(数据传输延迟 $<50\ \text{ms}$); ③ 数字孪生预警平台(故障预测准确率 $\geq 95\%$)。在 $80\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 处理规模的含砷矿井水治理中, 系统实现全年无人值守运行。

4 结论与展望

当前有色金属行业重金属废水处理技术体系主要涵盖中和沉淀(石灰—铁盐法)、硫化沉淀、电氧化、吸附分离、离子交换、膜分离及生物处理等七类核心工艺。处理技术逐渐呈现: 深度治理技术迭代加速、资源化技术突破瓶颈和智能化的明显特征。在《关于进一步加强重金属污染防治的意见》的政策驱动下, 以纳米吸附为代表的深度处理技术快速发

展, 推动污染物去除率提升。针对传统中和法产生的危废渣量高、有价金属回收率低等瓶颈, 以多效蒸发—电渗析耦合、双极膜酸碱联产为代表的资源化技术显著降低危废量, 同时实现硫酸、金属盐等副产物生产, 推动行业向“处理—回用—收益”闭环模式转型。基于物联网与数字孪生技术的无人值守系统, 通过无电力重力驱动与云端智控等方式实现稳定达标运行, 运维成本降低, 为复杂地形矿区污染治理提供创新解决方案。未来研究需重点关注开发兼具高选择性与抗污染性的新型复合材料、构建水—盐—酸—金属多相资源协同回收工艺链、深化 AI 算法在复杂水质动态处理调控中的应用和完善“深度净化—资源回收—智能管控”技术标准体系。

参考文献

- [1] 国家工业和信息化部原材料工业司. 2023年有色金属行业运行情况[EB/OL]. (2024-02-07). https://wap.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/yclgy/ys/art/2024/art_6d4792354c2745e0a2574bf3955b2b9f.html. Department of Raw Materials Industry. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. The operation of the non-ferrous metal industry in 2023[EB/OL]. (2024-02-07). https://wap.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/yclgy/ys/art/2024/art_6d4792354c2745e0a2574bf3955b2b9f.html.
- [2] 国家生态环境部. 2022年中国生态环境统计年报[EB/OL]. (2023-12-29). <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb>. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Statistical Annual Report on Ecology and Environment in 2022[EB/OL]. (2023-12-29). <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtnb>.
- [3] 张群丽, 谢海云, 晋艳玲, 等. 铜矿选矿废水处理技术研究现状与展望[J]. 矿冶, 2023, 32(2): 117-124. ZHANG Q L, XIE H Y, JIN Y L, et al. Research status and prospect of copper ore beneficiation wastewater treatment[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(2): 117-124.
- [4] 张德超, 潘力, 曹瀚文, 等. 有色金属冶炼高含砷污酸除砷技术研究进展[J]. 矿冶, 2022, 31(3): 85-95. ZHANG D C, PAN L, CAO H W, et al. A review of arsenic removal technology from non-ferrous metal smelting wastewater with high arsenic content[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(3): 85-95.
- [5] 陈希飞, 吴雨乔, 李心倩, 等. 中和铁氧体法净化低浓

- 度 Co^{2+} 废水的工艺研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 689-693.
- CHEN X F, WU Y Q, LI X Q, et al. Purification process of wastewater containing low concentration of Co^{2+} by neutralized ferrite method[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 39(6): 689-693.
- [6] 邓立聪, 张亦飞, 陈芳芳, 等. 石灰乳中和模拟酸性废水形成的二水硫酸钙的晶粒形貌与粒度分布[J]. 过程工程学报, 2012, 12(2): 259-264.
- DENG L C, ZHANG Y F, CHEN F F, et al. Morphology and size distribution of calcium sulfate dihydrate crystals precipitated from simulated acidic wastewater by lime[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2012, 12(2): 259-264.
- [7] 彭映林, 肖斌. 两级中和-铁盐沉淀法处理高砷废水[J]. 工业水处理, 2016, 36(6): 64-68.
- PENG Y L, XIAO B. Treatment of high arsenic content wastewater by two-step neutralization-iron salt precipitation[J]. Industrial Water Treatment, 2016, 36(6): 64-68.
- [8] 徐加兴, 沈贤德, 邱县金, 等. 矿山酸性废水处理高密度泥浆法及辅助沉降协同试验研究[J]. 矿冶, 2019, 28(6): 88-91.
- XU J X, SHEN X D, QIU X J, et al. Synergistic study on high density sludge process and auxiliary settlement method in treatment of acid mine drainage[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(6): 88-91.
- [9] 胡建龙, 吕齐, 邵立南, 等. 硫化沉淀与粉末吸附剂耦合处理高浓度含Tl废水效能研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(7): 120-124.
- HU J L, LV Q, SHAO L N, et al. The Efficiency of combined process of sulfide precipitation and powdered adsorbent for highly Tl contaminated wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(7): 120-124.
- [10] 李亚林, 刘蕾, 叶庆, 等. 冶金酸性含镉废水的复合硫化法处理研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(3): 83-87.
- LI Y L, LIU L, YE Q, et al. Study on the composite sulphuration treatment of metallurgical acidic wastewater containing cadmium[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(3): 83-87.
- [11] 宋博宇, 何连生, 席北斗, 等. 中和-硫化-混凝工艺处理含重金属酸性废水的试验研究[J]. 工业水处理, 2013, 33(6): 29-32.
- SONG B Y, HE L S, XI B D, et al. Experimental research on neutralization-vulcanization-coagulation process for the treatment of acidic wastewater containing heavy metals[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(6): 29-32.
- [12] 何绪文, 胡建龙, 李静文, 等. 硫化物沉淀法处理含铅废水[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1394-1398.
- HE X W, HU J L, LI J W, et al. Treatment of wastewater containing lead by sodium sulfide precipitation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1394-1398.
- [13] 袁翠玉, 万斯, 陈焕宇, 等. 冶炼污酸中铊、砷协同去除实验研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(8): 141-146.
- YUAN C Y, WAN S, CHEN H Y, et al. Study on simultaneous removal of thallium and arsenic from smelting waste acid[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(8): 141-146.
- [14] 黄太彪, 刘飞飞, 罗敏, 等. 钼铼生产废水处理工程案例[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(03): 91-94.
- HUANG T B, LIU F F, LUO M, et al. Engineering project of treatment of waste water from molybdenum and rhenium production[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(03): 91-94.
- [15] 熊江磊, 赵浩钧, 刘云霄, 等. 聚吡咯修饰阳极在电絮凝技术处理铜铬废水过程中的研究[J]. 安全与环境工程, 2022, 29(6): 200-207.
- XIONG J L, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Enhanced treatment of heavy metal wastewater containing Cu and Cr using polypyrrole-modified anode during the electro coagulation process[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(6): 200-207.
- [16] 杨国超, 陈涛. 电絮凝法处理碱性含铊重金属废水研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(04): 93-95.
- YANG G C, CHEN T. Electroflocculation applied to treatment of alkaline wastewater containing heavy metals of thallium[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(04): 93-95.
- [17] 刘兴, 周少奇. 铁板电絮凝同时去除氟和镉[J]. 2019, 45(5): 15-19, 24.
- LIU X, ZHOU S Q. Simultaneous removal of fluoride and cadmium by electrocoagulation using iron electrode[J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(5): 15-19, 24.
- [18] 段翠清, 任珺, 陶玲. 纳米氧化石墨烯复合材料的制备及重金属废水处理研究[J]. 功能材料, 2023, 54(12): 12085-12090.
- DUAN C Q, REN J, TAO L. Study on preparation of nanometer graphite oxide composites and treatment

- of heavy metal wastewater[J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, 54(12): 12085-12090.
- [19] 杨毅, 高敏轩, 陈元, 等. 电厂粉煤灰、炉渣和污泥复合陶粒对低浓度 Pb^{2+} 的吸附特性[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(2): 407-414.
- YANG Y, GAO M X, CHEN Y, et al. Adsorption characteristics of power plant fly ash, slag and sludge composite ceramics for low concentration Pb^{2+} [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(2): 407-414.
- [20] 李超, 王丽萍, 戴崑, 等. 高硅渣碱熔水热合成 13X 分子筛及吸附铅铜锌离子研究[J]. *无机盐工业*, 2023, 55(9): 88-93.
- LI C, WANG L P, DAI C, et al. Study on alkali fusion hydrothermal synthesis of 13X zeolite from high silicon tailings and its adsorption on lead, copper and zinc ions[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2023, 55(9): 88-93.
- [21] 崔国居, 李家亮. 空心类水滑石对重金属的吸附性能研究[J]. *工业水处理*, 2023, 43(2): 142-147.
- CUI G J, LI J L. Adsorption of heavy metals by hollow layered double hydroxides[J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(2): 142-147.
- [22] 吴权佳, 王铎, 叶涛, 等. 剩余污泥裂解灰陶粒吸附酸性矿山废水中 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 性能及机理[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023(8): 149-158.
- WU Q J, WANG D, YE T, et al. Performance and mechanism of Zn^{2+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} adsorption by surplus sludge lysed ash ceramics in acid mine drainage[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2023(8): 149-158.
- [23] 邵立南, 杨晓松, 胡建龙, 等. 复合纳米吸附深度除铊技术研究[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(2): 75-78.
- SHAO L N, YANG X S, HU J L, et al. Technical study of advanced treatment of thallium by nano composite adsorption[J]. *Environmental Protection Science*, 2016, 42(2): 75-78.
- [24] 覃朝科, 李运稳, 刘静静, 等. 离子交换纤维深度处理铅锌矿重金属废水试验研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(12): 99-101, 107.
- QIN C K, LI Y W, LIU J J, et al. Experimental study on advanced treatment of wastewater containing heavy metal from lead-zinc mine by ion exchange fiber[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(12): 99-101, 107.
- [25] 陈广源, 孙诗书, 张小朋, 等. 偕胺胍吡啶树脂对含盐体系中 $Cu(II)$ 的去除[J]. *工业水处理*, 2021, 41(10): 78-82.
- CHEN G Y, SUN S S, ZHANG X P, et al. Removal of $Cu(II)$ ions from salty systems by amidoxime pyridine resin[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(10): 78-82.
- [26] 韦蒙蒙, 刘福强, 赵伟, 等. D463 树脂对废水中镍-氨络合离子的吸附性能与机理研究[J]. *离子交换与吸附*, 2016, 32(6): 555-567.
- WEI M M, LIU F Q, ZHAO W, et al. Removal of complex of $ni(II)$ -ammonia from the wastewater by D463 and the mechanism insight[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2016, 32(6): 555-567.
- [27] 李雅, 张盈, 王美娇, 等. 离子交换树脂除废水中 Ni 技术研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021, (10): 121-125.
- LI Y, ZHANG Y, WANG M J, et al. Study on removal of ni in wastewater by ion exchange resin[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2021, (10): 121-125.
- [28] 李福勤, 张引弓, 朱敏, 等. 单价选择性电渗析处理酸性重金属废水应用研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(3): 118-122.
- LI F Q, ZHANG Y G, ZHU M, et al. Study on treatment of acid heavy metal wastewater by monovalent selective electrodialysis[J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(3): 118-122.
- [29] 李子梦, 于鸿光, 王志伟, 等. 耦合膜分离和电吸附的复合功能膜处理 $Cu(II)$ 废水[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(7): 4017-4022.
- LI Z M, YU H G, WANG Z W, et al. $Cu(II)$ removal using a composite functional membrane process coupling membrane separation and electrosorption[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(7): 4017-4022.
- [30] 武延坤, 刘欢, 朱佳, 等. 陶瓷膜短流程工艺处理重金属废水的中试研究[J]. *水处理技术*, 2015, 41(8): 92-95.
- WU Y K, LIU H, ZHU J, et al. Pilot test of the treatment of heavy metal wastewater by a short flow ceramic membrane process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, 41(8): 92-95.
- [31] 田晓媛, 杨水莲, 王威燕, 等. 反渗透膜处理有色冶金酸性无机复合重金属废水[J]. *水处理技术*, 2014, 40(11): 61-64, 74.
- TIAN X Y, YANG S L, WANG W Y, et al. Treatment of nonferrous metallurgical acidic inorganic wastewater containing heavy metals by reverse osmosis membrane[J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(11): 61-64, 74.

- (Science and Technology), 2013, 44(5): 2060-2067.
- [13] WU Q, LI X, WENG L, et al. Experimental investigation of the dynamic response of prestressed rockbolt by using an SHPB-based rockbolt test system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 93: 103088.
- [14] 杨林, 朱训国, 夏洪春, 等. 拉压复合型锚杆锚固机理的数值及模型试验应用研究[J]. *西安理工大学学报*, 2024(1): 132-142.
- YANG L, ZHU X G, XIA H C, et al. Numerical and model experimental application study on the anchoring mechanism of tensile and compression composite anchor rods[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2024(1): 132-142.
- [15] 马学斌, 秦庆词. 基于FLAC3D对不同荷载下锚杆锚固作用机制的数值模拟[J]. *矿冶*, 2019, 28(5): 21-26.
- MA X B, QIN Q C. Numerical simulation of anchorage mechanism of bolts under different loads based on FLAC3D[J]. *Mining and Metallurgy*, 2019, 28(5): 21-26.
- [16] 刘学, 郭廷科, 沈龙, 等. 土岩复合地层不同长度预应力锚索锚固机制及现场测试分析[J]. *隧道建设*(中英文), 2023, 43: 154. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.S1.018.
- LIU X, GUO Y K, SHEN L, et al. Anchorage mechanism and field tests of prestressed anchor cables with different anchorage lengths in soil-rock composite strata[J]. *Tunnel Construction*, 2023, 43: 154. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.S1.018.
- [17] 王海涛, 刘维, 田江涛, 等. 动荷载作用下锈蚀砂浆锚杆黏结性能研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(增刊1): 2623-2632.
- WANG H T, LIU W, TIAN J T, et al. Research on bonding performance of mortar bolt under the coupling action of dynamic load and corrosion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(Sup. 1): 2623-2632.
- [18] 王小伟, 朱杰兵, 阮怀宁, 等. 考虑通氧环境的预应力锚杆腐蚀损伤时变特征[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(3): 86-91.
- WANG X W, ZHU J B, RUAN H N, et al. Time-dependent characteristics of corrosion damage of prestressed rock bolts in oxygen-ventilated environment[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2022, 39(3): 86-91.
-
- (上接第18页)
- [32] 毛轩雯, 李逸雯, 姜小羽, 等. 混合白腐真菌的固定化及其在治理铅污染废水中的应用[J]. *微生物学报*, 2024, 64(1): 283-302.
- MAO X W, LI Y W, JIANG X Y, et al. Immobilization of mixed white rot fungi and its application in the treatment of lead-contaminated wastewater[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2024, 64(1): 283-302.
- [33] 焦晓斌, 于建忠, 匡乐意, 等. 铅锌冶炼重金属废水生物制剂深度处理及协同脱砷工业实践[J]. *中国有色冶金*, 2022, 51(1): 79-82, 101.
- JIAO X B, YU J Z, KUANG L Y, et al. Removal of heavy metals and Tl in the wastewater from Pb-Zn smelting by biologicals[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2022, 51(1): 79-82, 101.
- [34] 张晶然, 李琳琳, 卢许佳, 等. 氧化改性对污泥生物炭去除酸性矿山废水中Cd(II)的影响[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(6): 122-133.
- ZHANG J R, LI L L, LU X J, et al. Effect of oxidation-modified sludge biochar on removal of Cd(II) from acid mine wastewater[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(6): 122-133.
- [35] 胡泽亚. 污酸资源化处理新技术的应用[J]. *硫酸工业*, 2023(3): 59-62.
- HU Z Y. Application of a new technology for resource treatment of waste acid[J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2023(3): 59-62.