

Study on Waste Water Recycling Process of Metal Oxide Production by Hydrometallurgy

Shengwei Liu

Jiangxi Ruifeng Environmental Protection Co., Ltd., Yichun, Jiangxi, 336100, China

Abstract

Hydrometallurgy is the main process of metal oxide production, but the wastewater produced in the process contains high concentration of heavy metals, acid and alkali and suspended solids. If it is discharged directly, it will seriously pollute the environment and waste resources. With the global shortage of resources and the tightening of environmental protection policies, wastewater recycling has become the key to the sustainable development of the industry. However, the prior art generally has problems such as high cost, low cycle efficiency, impurity accumulation affecting product quality, etc., and it is urgent to develop a low-cost, efficient and stable closed-loop cycle process. Firstly, the characteristics of hydrometallurgical wastewater are analyzed in detail, then the design of wastewater recycling process is elaborated, and then the economic and environmental benefits of recycling process are analyzed in detail. Finally, the popularization, application and challenges of the related cycle processes are summarized, in order to provide a useful reference for the related research.

Keywords

Hydrometallurgy; Metal oxide; Wastewater recycling process

湿法冶金生产金属氧化物的废水循环利用工艺研究

刘圣威

江西睿锋环保有限公司, 中国·江西 宜春 336100

摘要

湿法冶金是金属氧化物生产的主流工艺,但其过程中产生的废水含有高浓度重金属、酸碱及悬浮物,若直接排放将严重污染环境并造成资源浪费。随着全球资源短缺与环保政策趋严,废水循环利用已成为行业可持续发展的关键。然而,现有技术普遍存在成本高、循环效率低、杂质累积影响产品质量等问题,亟需开发低成本、高效稳定的闭环循环工艺。本文先是详细分析了湿法冶金废水特性,随后具体阐述了废水循环利用工艺设计,紧接着具体分析了循环工艺的经济性与环境效益,最后总结了相关循环工艺的推广应用与挑战,以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

湿法冶金; 金属氧化物; 废水循环利用工艺

1 引言

湿法冶金因反应条件温和、金属回收率高,广泛应用于氧化铝、氧化锌等金属氧化物生产,但其废水排放量占工业废水总量的15%以上,含有的重金属(如Fe、Cu、Pb)及酸碱物质对生态环境构成长期威胁。传统末端治理技术(如化学沉淀)虽能降低污染物浓度,但存在药剂消耗大、污泥产量高、水资源无法回用等问题。近年来,膜分离、电化学等新型技术虽提高了循环效率,但高昂的投资与运行成本限制了其大规模应用。因此,开发一种兼顾经济性与环保性的废水循环工艺,成为行业亟待解决的难题。本文从废水特性分析入手,构建低成本闭环循环体系,旨在实现资源高

效利用与污染零排放的双重目标。

2 湿法冶金废水特性分析

2.1 废水来源与分类

湿法冶金废水主要源自浸出、净化、洗涤三大核心工序,且各工序废水性质差异显著。浸出工序利用酸(如硫酸、盐酸)或碱(如氢氧化钠)溶解矿石或中间产物,废水中常含过量酸/碱及溶解出的金属离子,如锌冶炼浸出废水含 Zn^{2+} 浓度达10-50 g/L,伴生硫酸根及 Fe^{2+} 、 Cd^{2+} 等杂质,pH值极低或极高,需中和处理后方可进入后续流程;净化工序旨在去除浸出液中的硅、氟、有机物等杂质,废水成分复杂,可能含絮凝剂、有机溶剂及微量重金属,如氧化铝生产净化废水氟离子浓度常超标(>50 mg/L),需专项脱氟处理以避免回用时腐蚀管道;洗涤工序用于去除产品表面残留液,废水金属离子浓度较低(<1 g/L),但水量占比大(60%-80%),

【作者简介】刘圣威(1987-),男,中国湖南浏阳人,助理工程师,从事化学工程研究。

如铜冶炼洗涤废水含 Cu^{2+} 约 0.1-0.5 g/L, 直接排放会造成资源浪费, 需通过分级回用降低新鲜水消耗。

2.2 主要污染物成分

湿法冶金废水的污染物涵盖无机与有机两大类, 其浓度与毒性对循环利用形成直接阻碍。重金属离子方面, Fe、Cu、Zn、Pb、Cd 等常见重金属具有生物累积性与毒性, 如铅离子 (Pb^{2+}) 超 0.1 mg/L 即可能污染地下水, 锌冶炼废水 Zn^{2+} 浓度过高会导致回用水硬度超标, 影响电解效率, 而 Cr^{6+} 等强氧化性重金属需还原预处理以降低毒性^[1]。酸碱物质方面, 废水 pH 值波动剧烈 (1-13), 极端 pH 会破坏生物处理法中的微生物活性, 并加速设备腐蚀, 如酸性废水腐蚀碳钢管道, 碱性废水则易与钙镁离子结合形成水垢, 堵塞膜分离组件。悬浮物与有机物方面, 矿石粉碎与反应沉淀产生的悬浮物 (SS) 浓度可达 1000-5000 mg/L, 易堵塞过滤介质; 萃取剂、表面活性剂等有机物则可能干扰金属回收, 如 P204 萃取剂残留会降低后续萃取效率, 需活性炭吸附或高级氧化技术降解。

2.3 废水循环利用的挑战

尽管废水资源化对湿法冶金行业意义重大, 但其循环利用仍面临三大核心挑战。首先, 杂质积累会严重影响产品纯度, 循环系统中低浓度的 Si、F、Cl 等杂质随水分蒸发不断浓缩, 最终可能超出产品允许限值, 例如氧化铝生产中, 循环水 SiO_2 积累会使氢氧化铝产品 Si 含量超标, 需通过增加排液量或引入超滤膜截留杂质, 但这又会降低循环率。其次, 水质波动会加剧设备腐蚀, 废水 pH、Cl 浓度等参数的变化会加速金属设备老化, 如铜冶炼循环水中 Cl 浓度升高会使不锈钢设备腐蚀速率大幅提升, 需通过加药调控或采用耐腐蚀材料延长设备寿命。最后, 系统稳定性与长期成本存在矛盾, 多级处理单元协同运行难度大, 易因操作失误或设备故障崩溃, 同时膜组件更换、药剂投加等长期运行成本高昂, 需通过工艺优化降低经济压力。

3 废水循环利用工艺设计

3.1 工艺设计原则

在湿法冶金废水循环利用工艺设计中, 有三大关键原则。其一为资源最大化利用, 需金属回收与水回用并重。废水中含铜、锌、铅等有价值金属, 有效回收可减少资源浪费、降低对原生矿石依赖, 还能带来经济效益, 如含铜废水回收提纯后能再用于冶炼^[2]; 水回用可减少新鲜水取用、降低成本、缓解水资源短缺, 符合可持续发展。其二是工艺兼容性, 新工艺要与现有生产流程无缝衔接, 设计时要考虑设备布局、工艺参数和操作习惯等, 确保处理后水质满足要求且不影响环节运行, 减少对生产的干扰, 保证顺利实施与长期稳定运行。其三是经济性与可操作性, 经济上要降低建设和运行成本, 选性价比、能耗低的设备, 优化流程; 可操作上工艺要易维护管理, 操作人员能掌握要点, 设备可靠稳定,

降低维护成本、保证正常运行。

3.2 关键技术模块

3.2.1 预处理技术

在湿法冶金废水循环利用的预处理技术中, 调节 pH 是重要环节。因废水 pH 常偏离中性, 过酸或过碱会损害后续处理设备与工艺, 所以需加入酸或碱进行中和反应, 让 pH 达适宜范围, 如酸性废水加氢氧化钠等碱性物质, 碱性废水加硫酸等酸性物质, 此举既能保护设备, 又为后续工艺创造条件。絮凝沉淀用于去除悬浮物, 废水中含矿石颗粒等大量悬浮物, 加入聚丙烯酰胺等絮凝剂, 使颗粒凝聚成大絮体, 在重力下沉淀, 实现固液分离, 该方法处理效果好、操作简单。过滤与膜分离可分级净化废水, 过滤靠滤料层截留悬浮物和部分胶体, 常见设备有砂滤池等; 膜分离利用膜的选择性透过性分离组分, 按孔径分微滤、超滤等, 组合使用可获不同水质, 满足后续工艺需求。

3.2.2 金属回收技术

在湿法冶金废水的金属回收技术中, 溶剂萃取法凭借其独特优势广泛应用。它利用不同金属在有机溶剂和水相中溶解度差异, 选合适萃取剂, 让废水与萃取剂充分接触, 使目标金属从水相转至有机相, 再经反萃实现富集回收, 具有分离效果好、选择性高、操作灵活等特点。离子交换法利用离子交换树脂对金属离子的吸附作用回收金属, 树脂表面活性基团能与金属离子交换, 废水通过树脂柱时金属被吸附, 饱和后用再生剂洗脱金属使树脂重复使用, 此法吸附效率高、操作简单、可自动化控制, 但树脂成本高且再生有废液^[3]。电化学法利用电解原理, 让废水中的金属离子在电极还原沉积实现回收, 以废水为电解液, 外加电流使金属离子在阴极得电子生成单质, 它成本低、操作简便、回收率高, 适合处理高浓度金属离子废水, 还能控制条件选择性回收不同金属。

3.2.3 水质调控技术

在湿法冶金废水循环利用的水质调控技术里, 反渗透是深度脱盐的关键手段。它借助半透膜的选择性, 在压力下让水分子通过, 截留溶解性盐类等杂质, 处理后的水盐分极低, 能满足高纯度用水需求, 可用于进一步净化处理后的水, 去除残留盐分和微量杂质, 提升水质, 回用于电解液配制等对水质要求高的生产环节。蒸发浓缩则通过加热使废水水分蒸发, 减少体积、提高杂质浓度, 水分以蒸汽逸出, 盐类等留在浓缩液中, 适用于处理高含盐量废水, 能降低后续处理难度与成本, 浓缩液还可进一步回收有价值物质或无害化处置。此外, 废水循环时因水分蒸发、杂质积累, 水质参数会变化, 如 pH 值、硬度等, 此时需补加药剂稳定参数, 像 pH 偏离就补加酸或碱, 硬度过高补加软化剂, 以此保障废水循环利用系统稳定运行。

3.3 循环工艺流程优化

在循环工艺流程优化方面, 多级循环模式设计是提升

废水循环利用的有效之策。分质回用依据不同生产环节对水质的要求，将处理后的废水分级回用，如初步处理后水质要求低的废水用于冲洗设备、冷却，深度处理后水质要求高的废水用于电解液配制、产品洗涤。梯度利用则按水质从高到低顺序，依次用于不同生产环节，实现水资源最大化利用，减少新鲜水取用和废水排放，提高利用效率。杂质动态平衡控制也必不可少^[4]。废水循环时杂质会不断积累，影响系统运行和产品质量，需实时监测杂质含量，依结果调整处理工艺参数，如增加排液量、调整药剂投加量，让杂质含量保持动态平衡，还可采用杂质分流排出部分杂质，保证系统稳定。此外，能量与物质耦合优化能提高系统综合效益。废水处理产生大量余热，如蒸发浓缩的蒸汽余热，用回收装置收集用于预热废水或其他加热环节，可降低能耗。同时，对沉淀物、浓缩液等副产物资源化利用，如回收金属、用于生产其他产品，可实现物质循环，减少废弃物排放，降低成本，提升经济与环境效益。

4 循环工艺的经济性与环境效益评估

4.1 经济性分析

循环工艺经济性分析涵盖投资、运行成本与收益。投资成本包括设备、药剂和能耗。设备上要购置反渗透装置等核心及配套辅助设备，不同规模项目投资差异大，小型数十万，大型可达数千万甚至更高；药剂用于调节废水 pH 等，费用取决于废水成分与处理要求；能耗主要是设备运行耗电，如反渗透靠高压泵、蒸发浓缩需加热蒸汽。运行成本有维护、人工和折旧，设备维护要定期检修换件，费用因设备而异；人工成本看自动化程度，自动化高则人工少但需专业人员；折旧是将设备投资按年限分摊。收益来自水资源节约，能减少新鲜水取用、降低水费，在水资源匮乏地区效益显著，还因回收废水中铜等有价值金属创造价值，且可能避免环保罚款间接增收。

4.2 环境效益评估

循环工艺的环境效益评估涵盖多方面。在减排量计算上，它借助生物处理、化学氧化降低废水 COD，用化学沉淀、离子交换去除重金属，还能循环利用废水减少排放量，某企业采用后废水排放量减 80%，COD 和重金属排放量降幅分别达 70%、90% 以上。碳足迹分析方面，其能耗源于设备运行，反渗透、蒸发浓缩等是高碳排放环节，不过通过优化流程、采用高效节能设备，以及利用余热回收技术预热废水等，可

降低能耗与碳排放，某项目靠余热回收年减碳数百吨。生态风险评估也不容忽视，循环水含残留药剂、微生物，回用可能影响产品质量与设备，需严格监测水质，同时评估其排放对周边生态的影响，防止污染土壤、水体和生物。

5 循环工艺的推广应用与挑战

循环工艺推广应用面临诸多情况与挑战。行业适用性上，不同金属氧化物生产企业因生产流程、产品及规模差异，对循环工艺需求不同，小型企业重成本与操作简便，大型企业则倾向高效稳定大规模处理且水质要求高。但规模化应用有障碍，先进工艺技术复杂，缺专业人才难应用，购置设备等资金需求大，中小企业常因资金有限而却步。政策与市场是重要驱动力，环保法规强制要求废水循环，严格排放标准及处罚促使企业应用；绿色供应链使下游倾向选环保达标供应商，碳交易市场让企业为碳排放付费，循环工艺降能耗碳排放可获收益。未来，智能化监控与自适应调控技术可实时监测调整参数，提高效率；新型材料如纳米吸附剂能提升污染物吸附能力、降低成本；与新能源技术耦合，如光伏驱动膜分离，可推动循环工艺绿色可持续发展。

6 结论与展望

综上所述，本文聚焦湿法冶金生产金属氧化物的废水循环利用工艺，经分析明确了废水特性及循环利用面临的杂质积累等挑战，设计了含关键技术模块的循环工艺并优化流程。经济与环境效益评估显示其成效显著，不过推广应用存在行业适用性和规模化障碍，好在政策与市场提供了驱动力。展望未来，需研发低成本高效的新型处理技术与材料，强化智能化监控与自适应调控技术应用，推动循环工艺与新能源技术深度耦合，构建绿色可持续体系，还要加强政策引导与行业协作，以促进其在湿法冶金行业广泛应用。

参考文献

- [1] 刘勇,高越,祁国宝.铜钴矿湿法冶金生产过程中物料平衡与流程控制优化[J].冶金管理,2024,(09):82-84+87.
- [2] 李康.湿法冶金全流程优化补偿方法及仿真实验平台建立[D].东北大学,2019.
- [3] 吴青彦,林晓,刘晨明,等.镍钴湿法冶金污染源解析及防治建议[J].世界有色金属,2019,(06):4-8.
- [4] 马志玫,金占富.湿法冶金金锌电积用阴阳极板生产工艺改进研究[J].世界有色金属,2018,(18):4-6.