

湿法冶金工艺中金属回收效率提升研究

何广辉

江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂 江西 鹰潭 335400

摘要：本文围绕湿法冶金工艺中金属回收效率展开研究。阐述了湿法冶金核心流程、金属回收效率影响机制与评价指标，分析浸出、净化除杂、富集回收等环节制约因素，提出各环节及全流程协同优化策略，包括原料预处理、浸出剂改良、设备升级等，旨在为提升湿法冶金金属回收效率提供理论支持与实践参考。

关键词：湿法冶金工艺；金属回收效率；制约因素；优化策略

引言：在资源日益稀缺的当下，湿法冶金作为金属提取关键工艺，其金属回收效率至关重要。该工艺涵盖浸出、净化除杂、富集回收等多个环节，各环节紧密相连且受多种因素影响。深入探究金属回收效率的理论基础、关键制约因素，并制定针对性提升策略，对提高资源利用率、降低生产成本、减少环境污染意义重大。

1 湿法冶金工艺金属回收的理论基础

1.1 湿法冶金工艺的核心流程

浸出环节作为金属回收起始步骤，通过酸浸、碱浸、生物浸出作用于原料。酸浸用酸性溶液溶解易溶于酸的金属成分，碱浸针对两性金属或酸性杂质含量高的原料，生物浸出依靠微生物代谢产物化学作用，将目标金属转化为可溶性离子进入水溶液，为后续回收奠定基础。净化除杂环节承接浸出液处理，采用沉淀、萃取、离子交换去除杂质离子^[1]。沉淀法调节溶液条件使杂质离子形成难溶化合物析出，萃取法利用有机相选择性溶解目标金属离子实现与杂质分离，离子交换法借助树脂吸附特定离子，提纯目标金属离子，降低杂质对后续回收的干扰。富集回收环节聚焦目标金属提取，通过电解沉积、化学沉淀、吸附完成转化。电解沉积利用电极反应使金属离子在电极表面析出，化学沉淀加入沉淀剂使金属离子形成固态沉淀物，吸附法借助吸附材料捕获溶液中金属离子，将净化后溶液中的目标金属转化为固态产物。后续处理环节加工回收的金属产物，通过精炼去除残留杂质提升纯度，经成型工艺加工为符合应用需求的形态，最终实现金属资源循环再利用。

1.2 金属回收效率的核心影响机制

传质机制直接关系金属溶出效率，原料与浸出剂的接触效率受原料粒度、搅拌情况影响，粒度越小、搅拌越充分，两者接触越紧密；离子在溶液中的扩散速率则与温度、溶液浓度相关，温度升高、浓度梯度合理，扩散速率加快，这两方面共同决定金属离子从原料进入

溶液的效率。反应动力学机制主导金属溶解反应进程，浸出剂浓度影响反应的驱动力，浓度适宜能加快反应速率；温度通过改变反应活化能影响反应快慢，温度过高可能导致试剂分解，过低则使反应迟缓；反应时间不足会导致反应不充分，过长则造成资源浪费，这些参数共同作用于金属溶解反应速率。热力学平衡机制决定金属离子的存在状态与反应方向，溶液pH值影响金属离子的水解程度与沉淀生成条件，电位则关系到氧化还原反应的进行，两者共同调控金属离子在溶液中的存在形态，以及沉淀、萃取等反应的平衡状态，进而影响回收效率。

界面作用机制影响金属离子的富集效果，固液界面吸附能力取决于界面性质与离子特性，吸附能力强能促进金属离子从固相转移至液相；离子交换树脂或萃取剂与金属离子的界面结合能力，决定其对目标金属离子的选择性捕获效率，直接作用于富集过程的效果。

1.3 金属回收效率的评价指标

浸出率作为浸出环节的关键指标，反映目标金属从原料中溶出进入溶液的比例，比例越高说明浸出环节回收效果越好，是后续环节效率的基础保障。净化率衡量净化除杂环节的成效，指浸出液经处理后杂质离子的去除比例，净化率高意味着溶液中杂质含量低，能有效提升后续回收产物的纯度。总回收率综合体现全流程回收效果，计算从原料到最终金属产物的整体回收比例，涵盖浸出、净化、富集等各环节的效率，是评价金属回收工艺综合水平的核心指标。能耗与药耗关注工艺的经济性，指单位金属回收量所消耗的能源与化学药剂用量，在保证回收效率的前提下，能耗与药耗越低，工艺的经济可行性与环保性越优。

2 湿法冶金工艺金属回收效率的关键制约因素

2.1 浸出环节的制约因素

原料特性对浸出效率影响显著，原料粒度不均匀会导致部分颗粒过大，浸出剂难以渗透至内部，而细小颗

粒易团聚形成结块，同样阻碍浸出剂与目标金属接触；致密结构的原料内部孔隙少，进一步降低浸出剂渗透能力，最终造成目标金属溶出不充分^[2]。浸出剂性能不足制约溶出效果，选择性差的浸出剂在溶解目标金属的同时，会同步溶解原料中的杂质金属，增加后续净化除杂的负荷与难度；浓度过高可能导致溶液粘度上升影响传质，浓度过低则降低溶出驱动力，配比失衡还会引发副反应，共同影响金属溶出速率与效率。工艺参数调控不当加剧效率损耗，反应温度过低会降低浸出剂活性与反应动力学速率，导致溶出进程迟缓；温度过高不仅增加能源消耗，还可能使浸出剂分解失效；搅拌强度不足时，浸出剂与原料混合不均，传质受阻；过度搅拌则会加速药剂挥发与损耗，造成浪费。反应环境不稳定干扰溶出反应，溶液pH值波动会改变金属离子的存在形态，使部分目标金属形成难溶化合物，阻碍溶出反应持续进行；氧气、二氧化碳等气体参与不足会抑制氧化还原类浸出反应，参与过量则可能与浸出剂或金属离子反应生成沉淀，干扰正常浸出过程。

2.2 净化除杂环节的制约因素

除杂剂适配性差造成目标金属损失，选择性低的除杂剂无法精准识别杂质离子，易与目标金属离子形成共沉淀或络合物，导致部分目标金属随杂质一同被去除，降低金属回收率。

工艺条件控制失衡影响除杂效果，沉淀过程中pH值过高可能使目标金属离子水解沉淀，pH值过低则导致杂质离子无法完全析出；温度波动会改变沉淀物溶解度与反应速率，造成杂质去除不彻底；萃取时相比过大或过小、萃取剂浓度失衡，会降低目标金属与杂质的分离系数，影响净化效果。设备效率不足拖慢除杂进程，离子交换柱装填不均匀会形成沟流现象，部分溶液未与树脂充分接触便流出，降低吸附除杂效率；萃取设备若混合不充分，有机相与水相接触不彻底，或分离不彻底导致两相夹带，均会削弱净化除杂效果。二次污染风险伴随效率损耗，除杂过程产生的废渣废液中若残留未回收的目标金属，未及时开展二次回收便直接排放，不仅造成金属资源浪费，还会因回收不彻底降低全流程金属回收效率。

2.3 富集回收环节的制约因素

富集剂性能缺陷增加回收难度，吸附容量低的吸附剂难以高效捕获溶液中的目标金属离子，需频繁更换或再生，影响处理效率；选择性差则易吸附杂质离子，降低产物纯度；萃取剂再生能力弱会缩短其使用寿命，增加药剂采购成本与更换频率。工艺参数失衡降低富集效

果，电解沉积时电流密度过低会减慢金属沉积速率，过高则可能导致电极附近浓度极化，使镀层出现疏松、脱落等问题；槽电压不稳定会影响电解反应效率；化学沉淀时沉淀剂用量不足导致目标金属沉淀不完全，用量过量则引入新杂质，影响后续处理。溶液性质不佳加剧富集阻碍，溶液中目标金属离子浓度过低时，富集剂捕获离子的难度增大，需延长处理时间或增加富集剂用量；共存的杂质离子会与目标金属竞争吸附或沉淀位点，降低富集剂对目标金属的选择性捕获效率，进而影响回收效果。设备损耗问题破坏回收稳定性，电解槽电极长期使用易发生钝化，降低电极导电性与反应活性，减慢金属沉积速率；吸附柱因杂质堆积易发生堵塞，导致溶液流通受阻，影响富集回收过程的连续性与稳定性，间接造成效率损耗。

3 湿法冶金金属回收效率的提升策略

3.1 浸出环节的优化策略

原料预处理优化通过物理与化学手段改善原料特性，采用破碎、研磨工艺细化原料粒度，增大与浸出剂的接触面积；对结构致密的原料，通过焙烧破坏其晶体结构，或借助超声辅助产生的振动剥离表面杂质，进一步提升浸出剂渗透效率，确保目标金属与浸出剂充分作用。

浸出剂改良聚焦提升选择性与经济性，研发高选择性复合浸出剂，通过复配不同功能组分，精准作用于目标金属，减少杂质金属溶出；选用可循环再生的浸出剂，经简单处理即可重复使用，既能降低化学药剂消耗，又能减少废液排放带来的污染^[3]。工艺参数智能调控依托反应动力学模型，实时监测浸出过程中的温度、搅拌强度、反应时间等参数，根据金属溶出速率动态调整。温度过低时适当升温加快反应，温度接近阈值时及时调控避免能耗浪费；搅拌强度根据原料分散状态灵活调整，确保传质效率与药剂消耗的平衡。强化传质技术应用通过外力辅助与设备升级提升反应效率，引入超声场、磁场等外场，利用能量作用加速溶液中离子扩散，促进固液界面反应；采用流化床浸出设备，使原料在溶液中呈悬浮状态，大幅提升固液接触频率，进一步加快金属溶出速率。

3.2 净化除杂环节的提升策略

除杂剂与工艺适配优化需结合浸出液成分特性，针对不同杂质离子选择高选择性除杂剂，避免与目标金属离子发生反应。采用分步沉淀工艺，按杂质离子沉淀特性依次调节反应条件去除杂质；通过协同萃取工艺增强萃取剂对特定杂质的分离能力，提升整体净化效果。工艺条件精准控制依赖在线监测技术，实时追踪溶液pH

值、电位等关键参数，根据除杂反应需求及时调整。沉淀过程中稳定pH值范围，确保杂质完全沉淀且不影响目标金属离子；萃取时精准控制相比与萃取剂浓度，保障杂质分离彻底。设备升级与革新通过引入高效设备提升分离效率，采用高效混合澄清槽强化萃取过程中的相接触与分离；使用连续离子交换设备实现杂质离子的连续去除；引入膜分离技术，利用膜的选择性渗透特性，实现杂质与目标金属离子的精准分离。二次回收体系构建针对除杂产生的废渣废液，通过溶解、萃取等工艺回收其中的目标金属离子，减少金属损失。对废渣进行研磨、浸出处理，提取残留金属；对废液进行深度处理，分离回收溶解的目标金属，实现资源最大化利用。

3.3 富集回收环节的改进策略

富集剂性能提升通过材料研发与结构优化实现，开发纳米吸附剂、功能化树脂等新型吸附材料，利用其大比表面积与特殊功能基团，提升对目标金属离子的吸附容量与选择性；优化萃取剂分子结构，增强与目标金属离子的结合能力，同时改善其再生性能，延长使用寿命。工艺耦合与集成通过组合工艺提升低浓度溶液回收效率，将电解沉积与吸附工艺结合，先用吸附剂富集低浓度金属离子，再通过电解沉积将其转化为固态金属；采用“萃取-反萃-电解”一体化工艺，缩短从溶液到金属产物的流程，减少中间环节的金属损失。设备自动化与智能化通过技术升级优化富集过程，应用智能电解槽，自动调节电流密度、电极距离等参数，改善金属沉积形态与速率；部署在线监测系统，实时掌握溶液中金属离子浓度变化，及时调整工艺参数，确保富集回收稳定高效。溶液循环利用针对富集回收后的残液，去除残留杂质后回用于浸出环节，减少水资源与药剂消耗。对残液进行过滤、中和等处理，降低杂质含量，使其满足浸出工艺要求，实现浸出剂与水资源的循环使用。

3.4 全流程协同优化策略

工艺参数协同匹配统筹各环节参数设置，根据浸出环节的金属溶出效率，调整净化除杂的反应条件，避免因浸出液成分波动影响除杂效果；结合净化后溶液特性，优化富集回收的工艺参数，形成各环节参数的适配体系，提升全流程效率。物料与能量循环构建闭环利用体系，回收浸出、萃取过程中的废弃药剂，经处理后重新投入使用；收集各环节产生的余热，用于加热浸出液、维持反应温度，降低外部能源消耗，实现物料与能量的高效利用。智能管控系统构建依托物联网技术，实时采集全流程的温度、浓度、流量等关键参数，通过大数据分析挖掘参数间的关联规律，优化工艺方案，实现各环节的动态调控与协同运行。绿色工艺融合引入环保技术减少环境影响，采用生物浸出技术，利用微生物作用溶出金属，降低化学药剂使用；选用绿色萃取剂，减少有毒有害物质排放，在提升回收效率的同时实现清洁生产。

结束语

湿法冶金工艺中金属回收效率受多环节因素制约，通过各环节针对性优化及全流程协同改进，可有效提升回收效率。从原料预处理到智能管控系统构建，从设备升级到绿色工艺融合，多方面策略的实施能实现资源高效利用与清洁生产。未来，持续探索创新技术与方法，将进一步推动湿法冶金工艺金属回收水平迈向新高度。

参考文献

- [1]董明甫.基于湿法冶金的铬盐尾渣高效回收工艺与技术开发[J].山西冶金,2025,48(03):68-70.
- [2]彭贵熊,王江飞,王震,等.优化湿法冶金工艺回收电子废物中硫酸盐[J].冶金与材料,2024,44(10):77-79.
- [3]宋玉安,赵伟.基于深度学习算法的湿法冶金资源回收效率提升方法设计及研究[J].湿法冶金,2025,44(01):125-131.