

冶金废水深度处理及资源化回用工艺在矿山项目中的应用

张瑜

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 在当前环保要求日益严格与资源循环利用需求迫切的背景下, 本文聚焦冶金废水深度处理及资源化回用在矿山项目中的应用。先分析冶金废水与矿山项目废水特性及共性, 阐述深度处理技术体系, 包括预处理、主体处理和深度处理阶段技术。接着设计资源化回用工艺路径, 涵盖回用场景、流程及水质稳定控制。最后提出技术集成与系统优化策略, 如分质处理、自动化控制、能源资源综合利用, 为冶金废水在矿山项目处理回用提供参考。

关键词: 冶金废水; 矿山项目; 深度处理技术; 资源化回用; 系统优化

引言: 矿山项目在开采及选矿过程中产生大量废水, 与冶金废水在污染成分等方面存在诸多相似性。随着环保要求提高和水资源日益紧张, 冶金废水深度处理及资源化回用成为关键。深度处理不仅能满足矿山项目对水资源循环利用需求, 降低新鲜水取用量, 还能确保冶金废水达标排放。研究冶金废水在矿山项目中的应用, 对实现水资源高效利用和环境保护具有重要意义。

1 冶金废水特性与矿山项目适配性分析

1.1 冶金废水分类与特征

冶金废水来源广泛, 涵盖生产全流程各环节^[1]。冷却水是冶金设备运行中用于降温的循环用水, 长期使用后可能携带设备磨损产生的金属颗粒及少量润滑油。酸洗废水产生于金属表面处理工序, 通过酸性溶液去除金属表面氧化层, 废水中含有高浓度酸液及溶解的金属离子。除尘洗涤水用于净化冶金生产过程中产生的含尘气体, 水中悬浮物含量高, 且可能吸附部分有害气体成分。冲渣废水是冶炼炉渣冷却冲洗过程中产生, 含有大量炉渣颗粒及未完全反应的化学物质。冶炼烟气洗涤水则用于洗涤冶炼产生的烟气, 废水中不仅含有烟尘, 还可能携带冶炼过程中挥发的重金属及酸性气体。冶金废水污染物成分复杂。重金属离子是典型污染物, 铅、锌、铜等在废水中以离子形态存在, 具有毒性且易在环境中积累。悬浮物涵盖颗粒大小不一的固体杂质, 影响水体透明度。油类物质主要来自设备润滑及泄漏, 在水面形成油膜阻碍氧气溶解。酸碱物质使废水pH值偏离中性, 腐蚀性强。氟化物在特定冶炼工艺中产生, 对生物体具有潜在危害。有机物来源多样, 可能来自原料、添加剂或微生物代谢产物。水质波动性显著, 水量随生产规模及设备运行状态变化, pH值受酸碱物质投加量及反应进程影响, 温度则与生产环节热交换情况相关。

1.2 矿山项目废水特性与冶金废水的共性

矿山项目废水与冶金废水在污染成分上存在显著相似性。重金属离子是两者共同关注的污染物, 在矿山开采及选矿过程中, 矿石破碎、筛分、浸出等环节均可能导致重金属溶出, 铅、锌、铜等重金属离子在矿山废水中的浓度与冶金废水相近, 铅离子浓度约在每升废水0.1-10毫克, 锌离子浓度约为每升废水1-50毫克, 铜离子浓度在每升废水0.5-20毫克。悬浮物同样广泛存在, 矿石颗粒、尾矿砂等构成主要悬浮物来源, 悬浮物含量通常在每升废水100-1000毫克。酸性或碱性物质在矿山废水中也较为常见, 酸性废水多源于硫化矿物氧化, 碱性废水则可能来自选矿药剂使用, 酸性废水pH值可能在2-5之间, 碱性废水pH值可能在9-12之间。处理需求方面, 两者均需通过深度处理实现资源化回用或达标排放。矿山项目对水资源循环利用需求迫切, 深度处理可降低新鲜水取用量, 一个中型矿山项目每天新鲜水取用量可达1000-5000立方米, 通过深度处理回用可减少300-1500立方米的新鲜水取用; 冶金行业为满足环保要求, 需确保废水排放符合标准, 深度处理是关键环节, 冶金企业每天产生的废水量可能在500-3000立方米, 深度处理后可使废水达标排放。

2 冶金废水深度处理技术体系

2.1 预处理阶段

物理分离技术是冶金废水预处理的基础。格栅设不同孔径筛网, 拦截较大颗粒杂质, 如矿石碎屑、木块、塑料碎片, 防止进入后续单元致设备磨损或堵塞, 筛网孔径一般有10-50毫米等规格^[2]。沉砂池利用重力沉降, 使砂粒、泥土等密度大无机颗粒沉淀池底, 定期排出减少对系统干扰, 沉淀时间一般在1-3小时。调节池承担均质均量功能, 冶金废水水量随生产波动明显, 调节池储存高峰废水低流量时释放, 稳定进入后续单元水量; 通过搅拌或曝气混合不同时段废水, 平衡水质指标, 为后续处理创

造条件。化学沉淀技术通过投加药剂改变废水性质。中和反应是核心，针对酸性废水投加石灰或氢氧化钠，针对碱性废水投加硫酸或盐酸，将废水pH值调至适宜范围，促使重金属离子与氢氧根离子结合形成沉淀。例如，铅离子生成氢氧化铅沉淀，锌离子形成氢氧化锌沉淀，沉淀可通过沉淀池分离。混凝沉淀技术强化悬浮物去除效果。向废水中投加混凝剂如聚合氯化铝，其水解产生带正电荷胶体粒子，与废水中带负电荷胶体颗粒电中和，降低排斥力，促使颗粒碰撞凝聚成较大絮体。这些絮体在沉淀池中因重力作用快速沉降，实现固液分离。

2.2 主体处理阶段

物化处理技术中，气浮法通过向废水中通入微小气泡，使油类及轻质悬浮物附着在气泡表面形成浮渣，通过刮渣机去除，适用于处理含油量较高或密度接近水的悬浮物废水，气泡直径一般在10-100微米，气浮时间约20-40分钟。膜分离技术凭借膜的选择透过性实现高效分离，超滤膜孔径较小，可截留微小颗粒、胶体及部分大分子有机物，超滤膜孔径一般在0.001-0.1微米，操作压力约0.1-0.5兆帕；反渗透膜孔径更小，能脱除溶解性盐类及小分子有机物，产出高纯度回用水，反渗透膜孔径一般在0.0001-0.001微米，操作压力约1-5兆帕。离子交换法利用离子交换树脂的选择性吸附特性，针对特定重金属离子进行吸附分离，通过再生操作实现树脂重复利用，离子交换树脂工作交换容量一般在每升树脂1-5摩尔。生物处理技术依托微生物代谢作用降解污染物。活性污泥法通过曝气使废水中形成活性污泥絮体，污泥中微生物以有机物为营养源进行代谢分解，将大分子有机物转化为小分子物质，最终矿化为二氧化碳和水，适用于处理含有机物较多的冶金废水。生物膜法通过在载体表面形成生物膜，微生物附着生长形成稳定生态系统，废水与生物膜接触过程中污染物被降解，抗冲击负荷能力强。

2.3 深度处理阶段

高级氧化技术通过产生强氧化性自由基分解难降解有机物。臭氧氧化利用臭氧的强氧化性直接氧化有机物，或通过分解产生羟基自由基间接氧化，适用于处理含酚类、染料等难降解有机物的废水。Fenton试剂由亚铁离子与过氧化氢组成，反应生成羟基自由基，氧化能力极强，可有效破坏有机物分子结构。吸附技术中活性炭凭借发达孔隙结构及巨大比表面积，吸附废水中的残留有机物及重金属离子，通过再生处理恢复吸附能力。电化学技术通过电解作用，在阴极还原重金属离子生成金属单质，实现资源回收，同时阳极产生氧化性物质辅助降解有机物。

3 资源化回用工艺路径设计

3.1 回用场景分类

冶金废水资源化回用的场景丰富多样，依据用水需求及水质要求差异可划分为不同类型。生产用水回用是核心场景之一，涵盖冷却水、锅炉补水及工艺用水等关键环节。冷却水在冶金生产中用量大，对水质要求相对较低，经处理达标后回用可显著降低新鲜水消耗。锅炉补水对水质要求较高，需去除水中硬度、溶解性固体等杂质，防止锅炉结垢影响运行效率。工艺用水则根据具体生产工序需求，对水质成分及纯度有特定要求，回用需精准匹配水质标准。杂用水回用主要面向厂区非生产用水需求，如绿化灌溉、道路冲洗及厕所冲洗等。这些场景对水质要求相对宽松，经简单处理后的废水即可满足使用要求，实现水资源在厂区内的二次利用，提升水资源利用效率。封闭循环系统是冶金废水回用的高级形式，通过串联用水与分质供水策略，构建内部水循环网络。串联用水将上一工序排水作为下一工序用水，实现水资源梯级利用；分质供水根据不同工序对水质需求差异，供应不同水质的水，避免水质浪费，最大限度减少新水取用量。

3.2 回用工艺流程

分级回用模式是常用工艺路径，依据水质处理程度及回用需求划分不同级别。一级回用阶段，超滤产水凭借其良好的水质，主要回用于冷却系统。超滤技术可有效去除水中微小颗粒、胶体及部分大分子有机物，产水水质满足冷却系统对悬浮物及微生物的控制要求，保障冷却设备稳定运行。二级回用阶段，反渗透产水经过深度脱盐处理，水质纯度更高，主要用于锅炉补水。反渗透技术能脱除水中溶解性盐类及小分子有机物，防止锅炉结垢及腐蚀，延长锅炉使用寿命。零排放工艺是冶金废水回用的终极目标，针对处理后产生的浓盐水，采用蒸发结晶技术进行深度处理。蒸发结晶通过加热使浓盐水中的水分蒸发，盐分结晶析出，生成工业盐或结晶盐，实现水资源与盐分的同步回收，消除废水排放对环境的影响。

3.3 水质稳定控制

水质稳定控制是保障回用系统长期稳定运行的关键环节。阻垢剂投加是防止反渗透膜结垢的重要措施，反渗透膜对进水水质要求严格，水中钙、镁等硬度离子易在膜表面形成结垢，影响膜通量及脱盐率。投加阻垢剂可螯合水中硬度离子，抑制结垢形成，保障反渗透系统高效运行，阻垢剂投加量一般在每升废水1-10毫克。腐蚀控制通过调节水质pH值及添加缓蚀剂实现，冶金废水成分复杂，回用过程中可能对管道设备产生腐蚀^[3]。调节

pH值至适宜范围可降低水体腐蚀性,添加缓蚀剂能在金属表面形成保护膜,阻止腐蚀介质与金属接触,保护管道设备免受腐蚀损害,延长设备使用寿命,缓蚀剂投加量一般在每升废水10-50毫克,适宜的pH值范围一般在7-9之间。

4 技术集成与系统优化策略

4.1 分质处理与分流回用

冶金废水成分复杂,不同来源废水水质差异显著,若采用统一处理模式,不仅难以满足各类回用场景对水质的要求,还会造成处理成本增加及资源浪费。依据废水水质特性设计针对性处理流程成为关键。例如,高盐废水因含盐量高、处理难度大,若与其他废水混合处理,需投入更多药剂及能量进行脱盐,而单独设置高盐废水处理线,采用蒸发结晶或膜浓缩等适宜技术,可提升处理效率,降低整体成本。“清污分流、分质回用”理念强调将水质较好的废水与污染严重的废水分开收集处理。清洁废水经简单处理即可回用于对水质要求不高的场景,如绿化灌溉、道路冲洗等;污染较重的废水则进入深度处理单元,经多级处理后回用于生产用水或更高要求的场景。这种模式避免了清洁废水与重度污染废水混合后需整体进行高强度处理的情况,显著降低处理成本,同时提高水资源回用率。

4.2 自动化控制与智能监测

在冶金废水处理系统中部署在线监测设备是实时掌握水质动态的关键举措。pH计可连续监测废水酸碱度,确保处理过程中pH值稳定在适宜范围,避免因酸碱失衡影响处理效果或腐蚀设备。电导率仪通过测量水中离子浓度反映水质纯度,为判断反渗透等脱盐工艺运行效果提供依据。重金属传感器针对废水中的铅、锌、铜等重金属离子进行精准检测,及时发现重金属超标情况,保障出水水质达标。SCADA系统作为自动化控制核心,将在线监测设备采集的数据进行集成分析,实现工艺参数实时调控。依据水质变化自动调整药剂投加量、设备运行

频率等参数,确保处理系统始终处于最佳运行状态。同时,系统具备故障预警功能,通过对设备运行数据及工艺参数的实时监测,提前发现潜在故障隐患,及时通知运维人员进行处理,避免故障扩大影响系统稳定运行。

4.3 能源与资源综合利用

冶金废水处理过程中蕴含着丰富的能源与资源,通过综合利用可实现节能减排与资源循环。余热回收是重要能源利用方式,冶金废水温度往往较高,利用热交换装置将废水余热回收,用于预热新水或厂区供暖,可减少能源消耗,降低生产成本。例如,将高温废水与低温新水进行热交换,使新水温度升高后再进入处理系统,减少加热新水所需能量。污泥资源化是资源综合利用的重要方向。冶金废水处理产生的污泥含有一定量的金属元素及有机物,经脱水处理后,可根据污泥成分特性进行资源化利用。将污泥作为烧结原料掺入烧结工序,可回收污泥中的金属资源,同时减少烧结原料外购量;将污泥用于制砖,通过添加适量黏结剂及调整工艺参数,可生产出符合标准的建筑用砖,实现污泥变废为宝。

结束语

冶金废水深度处理及资源化回用在矿山项目中的应用,通过适配性分析、构建技术体系、设计回用路径以及实施优化策略,实现了废水有效处理与资源循环利用。分质处理与分流回用降低成本、提高回用率;自动化控制与智能监测保障系统稳定运行;能源与资源综合利用实现节能减排。这些措施为矿山项目可持续发展提供了有力支撑,推动了冶金与矿山行业绿色转型。

参考文献

- [1]夏传,刘双,高伟,等.锌冶炼废水反渗透高倍浓缩工艺改造工程实例[J].工业水处理,2025,45(7):195-199.
- [2]王明.离子型稀土分离企业氨氮废水的回收利用工艺[J].稀有金属与硬质合金,2023,51(3):13-17.
- [3]崔佳娜,吴班.钽铌精矿湿法冶炼过程“三废”综合治理工艺设计[J].稀有金属与硬质合金,2023,51(6):23-28,32.