

面向“双碳”目标的铜冶炼清洁生产路径优化

潘金科

巴彦淖尔西部铜材有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要：面向“双碳”目标，铜冶炼清洁生产路径优化需聚焦源头控碳、过程减碳与资源循环。源头推广高效选矿与低品位矿石利用技术；过程采用富氧熔炼、连续吹炼等低碳工艺，配套烟气净化与余热回收系统；资源循环方面，强化废渣中有价金属回收及废气、废水治理与资源化利用。同时，推动智能化改造，构建全流程低碳清洁生产体系，实现铜冶炼行业绿色低碳转型。

关键词：面向“双碳”目标；铜冶炼；清洁生产路径；路径优化

引言：在全球积极践行“双碳”目标的大背景下，各行业纷纷踏上绿色转型之路，铜冶炼行业作为高能耗、高排放领域，清洁生产转型迫在眉睫。当前，国内外铜冶炼技术虽取得一定进展，但仍存在能耗偏高、污染物排放管控不足、资源利用效率待提升等问题。探索面向“双碳”目标的铜冶炼清洁生产路径优化策略，对降低行业碳排放、提升资源利用率、实现可持续发展具有重大而深远的意义。

1 铜冶炼清洁生产现状分析

1.1 国内外铜冶炼技术发展概况

(1) 国外先进铜冶炼技术：国外铜冶炼技术已趋于成熟，核心以高效清洁工艺为主，富氧顶吹熔炼、闪速熔炼应用最为广泛，兼具能耗低、排放少的优势，可大幅提升铜回收率与冶炼效率，部分企业还实现了生产过程智能化管控，同时配套完善的资源回收系统，实现了冶炼与环保的协同发展，代表了行业先进发展水平。(2) 国内铜冶炼技术现状：国内铜冶炼行业发展迅速，已掌握富氧熔炼、闪速熔炼等核心技术，部分企业形成了特色清洁工艺，如富氧侧顶吹连续炼铜技术，推动产业绿色转型。但整体发展不均衡，中小型企业仍沿用传统工艺，存在能耗偏高、污染物排放管控不足、资源利用效率有待提升等问题，与国外先进水平存在一定差距。

1.2 铜冶炼清洁生产体系

(1) 源头控碳技术：聚焦原料端减碳，重点推广高效选矿技术，提高铜精矿品位，减少杂质带来的额外能耗与排放；同时发展低品位矿石利用技术，拓宽原料来源，通过工艺优化降低原料加工过程中的碳消耗，从源头减少污染物产生。(2) 过程控碳技术：覆盖熔炼、精炼、电解全环节，推广富氧熔炼、连续吹炼等节能减排工艺，减少熔炼过程中燃料消耗与烟气排放；优化电解工艺，降低电解能耗，配套烟气净化处理技术，有效控制二

氧化硫等污染物排放，实现生产过程低碳清洁。(3) 资源循环利用技术：构建“三废”回收利用体系，废渣可回收有价金属并用于建材生产，废气经处理后回收制酸实现资源化利用，废水经深度处理后循环复用，大幅提升资源利用率，减少固废、废水、废气的无序排放，践行循环经济理念^[1]。

1.3 现有技术存在的问题与挑战

(1) 技术瓶颈：现有清洁技术仍存在短板，高效熔炼、深度资源回收等核心技术的核心设备与关键工艺仍需突破；部分技术应用成本较高，中小型企业难以承担；在低能耗、超低排放、资源高效回收的协同提升方面，仍存在明显技术瓶颈。(2) 政策与市场挑战：环保政策日趋严格，对铜冶炼污染物排放、碳减排提出更高要求，企业技术改造压力加大；市场对铜产品质量及绿色属性要求提升，同时原料价格波动、技术升级投入不足等因素，制约了清洁生产技术的推广应用与迭代升级。

2 面向“双碳”目标的铜冶炼清洁生产路径优化

2.1 优化原则与目标

(1) 优化原则：坚持科学性原则，立足铜冶炼工艺特性与“双碳”技术要求，结合行业发展实际，借鉴国内外先进技术经验，确保技术优化方案符合低碳发展规律；坚持系统性原则，统筹源头控碳、过程减碳、末端固碳与资源循环，实现全流程、全环节协同优化，避免单一环节优化导致的整体效率失衡；坚持可行性原则，兼顾技术成熟度、企业经济承受能力与行业发展水平，优先推广低成本、易落地、见效快的优化技术，逐步推进高端技术迭代升级，确保方案可落地、可推广、可长效。(2) 优化目标：近期（1-3年），重点推广成熟清洁技术，实现铜冶炼综合能耗降低8%-10%，二氧化硫排放浓度控制在30mg/m³以下，废水循环利用率达到95%以上，废渣有价金属回收率提升至98%；中期（4-6年），突破核

心技术瓶颈,普及智能化、低碳化工艺,综合能耗降低15%~20%,实现氮氧化物、VOCs等污染物超低排放,废水“零排放”企业占比达到80%,余热回收利用率提升至70%;远期(7-10年),构建全流程低碳清洁生产体系,综合能耗达到国际先进水平,碳排放强度降低30%以上,实现“碳达峰”目标,形成资源循环利用闭环,推动铜冶炼行业向绿色低碳、高质量发展转型^[2]。

2.2 源头控碳技术优化

(1) 高效选矿与低品位矿石利用:推广智能化勘探技术,结合物联网、遥感探测与地质大数据分析技术,精准定位矿产资源分布,提高资源勘探效率与利用率,避免盲目开采造成的资源浪费与生态破坏;升级高效选矿工艺,采用高压辊磨、浮选柱分选等先进技术,优化选矿药剂配比,降低药剂消耗与环境污染,将铜精矿品位提升至28%以上,同时显著提高矿石回收率,推动低品位、难选冶矿石的规模化、高效利用,拓宽原料来源的同时,降低原料加工过程中的能耗与碳排放,从源头减少碳足迹。(2) 原料预处理技术:全面优化原料破碎、筛分、配料全流程,采用智能化破碎设备替代传统破碎工艺,降低破碎环节能耗与噪音污染;推广精准筛分技术,高效去除原料中的杂质与脉石,提高原料纯度;应用自动化配料系统,结合冶炼工艺实时需求,精准调控原料配比,确保原料混合均匀、成分稳定,大幅提高原料的适用性与后续冶炼效率,减少冶炼过程中因原料配比不合理导致的能耗增加、污染物排放超标与产品质量波动,从源头为低碳冶炼奠定坚实基础。

2.3 过程控碳技术优化

(1) 熔炼环节:大力推广富氧底吹熔炼、熔池熔炼等低碳高效工艺,逐步替代传统高能耗、高排放熔炼工艺,将富氧浓度提升至90%以上,减少化石燃料消耗,降低一氧化碳等温室气体排放;优化熔炼炉结构设计,采用新型高效保温材料,减少熔炼过程中的热量损耗,进一步提升熔炼效率,降低单位铜产品能耗,同时配套高效烟气预处理技术,提前去除烟气中的部分杂质,减少熔炼过程中二氧化硫等污染物的产生,实现熔炼环节低碳、清洁、高效生产。(2) 精炼环节:精准优化精炼工艺参数,科学调控精炼温度、反应时间与药剂用量,减少精炼过程中的能源消耗与杂质残留,提升铜产品纯度;推广无水轧制、绿色环保润滑等先进技术,替代传统含油轧制工艺与高污染润滑剂,大幅减少废水、废油产生量,降低污染物处理压力与环保成本;引入精炼渣循环利用工艺,将精炼过程中产生的废渣返回熔炼环节重新处理,既提高铜回收率,又减少固废排放,实现精炼环

节节能减碳与环保效益的协同提升^[3]。(3) 电解环节:全面应用永久阴极电解工艺,替代传统可溶阴极电解工艺,减少阴极制备过程中的能耗与材料损耗,将电解效率提升10%以上;推广密闭电解槽防酸雾技术,配套高效酸雾回收装置,有效减少酸雾排放,改善生产环境,同时回收酸雾实现资源化利用,降低原料消耗;优化电解液成分与电解电压参数,进一步降低电解能耗,减少电能浪费,推动电解环节向低能耗、低排放、高效率、高环保的方向转型。

2.4 资源循环利用技术优化

(1) 废渣资源化利用:升级废渣处理技术,采用湿法冶金、膜分离、生物浸出等先进工艺,高效回收废渣中的铜、金、银等有价金属,最大限度提升资源回收率,提高资源利用效益;推动废渣多元化综合利用,将处理后的废渣用于生产水泥、新型建材、道路铺设材料等,替代传统建筑原料,减少废渣填埋带来的土地占用与环境污染,真正实现废渣“变废为宝”,构建闭环式废渣资源循环利用体系。(2) 废气治理与余热回收:应用高效烟气脱硫、脱硝技术,采用活性炭吸附、低温等离子体、石灰石-石膏法等先进工艺,实现二氧化硫、氮氧化物等污染物的超低排放,满足环保政策严格要求;配套完善的余热回收系统,高效回收废气中的高温余热,通过余热锅炉、换热器等设备,将余热用于加热冶炼原料、预热空气,或供应生产生活用热,提高能源利用率,降低化石能源消耗,实现废气治理与余热资源化利用的协同推进,进一步提升节能减碳成效^[4]。(3) 废水治理与回用:建立“预处理-深度处理-循环回用”全流程废水处理系统,采用膜分离、反渗透、重金属螯合等先进处理技术,高效去除废水中的重金属离子、有机物、悬浮物等污染物,确保处理后废水达到生产回用标准;大力推动生产废水“零排放”建设,将处理后的废水全部循环用于原料洗涤、设备冷却、工艺用水等生产环节,大幅减少新鲜水用量,降低水资源消耗,同时避免废水排放造成的水体污染,实现水资源的循环利用。

2.5 智能化与自动化技术应用

(1) 智能控制系统:引入物联网、大数据分析、人工智能、云计算等先进技术,构建铜冶炼全流程智能监控与管理系统,实时采集熔炼、精炼、电解、“三废”处理等各环节的能耗、排放、生产效率、产品质量等核心数据,通过大数据分析与智能算法,实现工艺参数的动态优化与精准调控,及时发现生产过程中的能耗异常、设备故障与污染物排放隐患,提前预警、快速处置,实现节能减碳与生产效率、产品质量的同步提升^[5]。(2) 自动

化设备：全面推广自动化生产线、工业机器人等智能化设备，逐步替代人工完成破碎、配料、冶炼、成品分拣、设备巡检等高强度、高风险、高误差的作业环节，减少人工干预带来的操作误差，提高生产过程的稳定性与生产效率；采用自动化检测设备，实时监测原料纯度、产品质量与污染物排放情况，确保生产过程严格符合清洁生产标准，同时减少人工操作带来的能源浪费，降低人力成本，推动铜冶炼行业向智能化、自动化、低碳化转型，助力“双碳”目标实现。

3 面向“双碳”目标铜冶炼清洁生产技术路径优化的政策与市场保障

3.1 政策保障

(1) 政府支持政策：当前，政府已出台多项政策支持铜冶炼清洁生产转型，税收优惠方面，对采用低碳冶炼技术、开展“三废”资源回收的企业减免部分企业所得税；补贴政策重点向技术改造、绿色转型项目倾斜，助力企业引进先进设备与工艺。环保监管上，逐步收紧污染物排放限值，倒逼企业淘汰落后产能。建议进一步细化政策扶持力度，加大对中小型企业技术改造的补贴，简化补贴申请流程；强化环保监管的常态化与精准化，建立差异化监管机制，同时完善激励机制，对绿色转型成效显著的企业给予表彰与额外扶持。(2) 行业标准与规范：目前铜冶炼行业已具备清洁生产评价指标体系、环保排放标准等相关规范，涵盖能耗、排放、资源利用等核心指标，且已完成修订升级，新增碳排放指标，与节能、环保等相关标准有效衔接。但部分标准仍需完善，建议结合行业技术迭代进度，动态更新清洁生产评价指标，提高低碳化、智能化相关指标要求；细化不同工艺的环保排放标准，明确“三废”回收利用的具体规范，推动标准与国际先进水平接轨，同时加强标准落地监管，确保企业严格合规。

3.2 市场保障

(1) 市场需求引导：随着“双碳”目标推进，下游新能源、高端电子等产业对“低碳铜”的需求持续攀升，低

碳铜因碳足迹低、品质优，溢价能力逐渐显现，出口优势突出。建议加强“低碳铜”宣传推广，建立统一的低碳铜认证体系与碳足迹追溯机制；引导下游企业优先采购低碳铜产品，将低碳属性纳入采购考核标准，通过市场需求倒逼铜冶炼企业加快清洁生产技术升级，提升低碳铜产能与品质。(2) 产业协同与供应链生态圈：构建绿色低碳供应链生态圈是推动技术落地的关键，可依托龙头企业，带动上下游协同发展，如推动冶炼企业与矿山、下游加工企业建立合作，实现原料、产品、废弃物的循环衔接。建议搭建产业协同平台，促进技术共享与交流，推动清洁生产技术在全产业链普及；鼓励企业延伸产业链，发展铜精深加工与资源循环利用产业，打造纵向闭合、横向共生的循环经济模式，形成上下游联动、协同发力的绿色供应链生态圈。

结束语

面向“双碳”目标，铜冶炼清洁生产技术路径优化意义重大。通过源头控碳、过程减碳、资源循环利用以及智能化自动化技术应用等举措，能显著降低能耗与排放，提升资源利用率。同时，政策与市场保障为其提供有力支撑。未来，需持续推进技术创新与升级，强化全产业链协同，不断完善保障体系，让铜冶炼行业在“双碳”征程中稳步迈向绿色低碳、高质量发展的新阶段。

参考文献

- [1]刘诚,陈瑞英,王满仓.铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析[J].中国有色冶金,2021,50(4):61-64.
- [2]金尚勇,李永鹏,陈虎.铜冶炼危险废物环境管理问题探讨[J].中国资源综合利用,2021,37(3):142-143.
- [3]凌飞,吕翔.新形势下铜冶炼企业环保治理实践与探索[J].中国有色金属,2020,(S2):176-178.
- [4]周俊.铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J].有色金属,2021,9(8):91-94.
- [5]孔德颂.铜冶炼企业持续盈利模式的解析与构建[J].云南冶金,2023,52(4):188-192.