

产安全的核心。

(1) 明确安全职责：构建清晰的责任体系，落实到各环节。设计部门需按安全标准开展设计并对安全性负责；生产部门严格执行工艺规程，对生产安全负责；安全管理部门制定完善制度、监督安全工作、评估整体安全状况。

(2) 完善考核奖惩机制：将安全工作纳入绩效考核，设立奖励基金，表彰奖励在安全管理、技术创新、隐患治理等方面有突出贡献的部门和个人；对违规行为严肃追责，情节严重的依法处理，以此营造安全文化氛围，提升企业安全管理水平。

2.3.2 加强第三方监管力度

强化监管部门对设备设计生产企业的监管，是保障机械安全的重要外部力量。

(1) 严格监督检查：监管部门需制定详细计划与检查清单，明确检查内容、方法和频率，重点审查企业设计文件、生产工艺、质检记录、安全管理制度，并现场检测设备安全性能，确保监管全面有效。

(2) 严肃查处违规行为：对存在安全隐患或违规的企业，依法采取罚款、停产整顿、吊销许可证等处罚。

(3) 加强部门协作联动：推动质量监督、安全生产监管、市场监管等部门建立信息共享机制，形成监管合力，实现监管工作无缝对接。

3 成功案例分析与经验借鉴

3.1 案例一：西门子安全设计生产实践

3.1.1 企业背景与安全目标

西门子作为全球知名工业企业，拥有庞大复杂的产品线与生产体系。该企业高度重视设备安全，将其列为核心价值之一，确立“零事故、零伤害”的安全目标^[1]。

西门子制定全面系统的战略规划，将安全理念融入产品研发、生产制造、市场营销、售后服务全环节，构建全生命周期安全管理体系：研发阶段以安全设计为重要原则，保障产品安全性能；生产环节严格执行安全标准与规程，强化质量和安全管控；销售及售后为客户提供安全培训与技术支持，降低设备使用安全风险。

3.1.2 设计生产阶段安全措施实施

西门子在设备设计中严格遵循安全标准，引入FMEA、FTA等工具全面评估潜在风险并提前消除隐患，例如针对工业自动化设备控制系统元件故障风险，采取增加冗余电路、选用优质元件等措施降低风险。

企业注重安全防护装置设计与人机工程学应用，为大型设备配备安全光幕、急停按钮等装置，可自动停机防护人员安全；同时优化操作界面、流程与工作环境，降低操作难度与风险。

在生产制造环节，西门子依托完善的质量管理体系，严控原材料采购、零部件加工、装配调试各环节质量，保障设备安全性能。此外，企业定期组织员工开展安全培训与演

练，提升员工安全意识与应急处置能力。

3.1.3 实施效果与经验总结

西门子实现“零事故、零伤害”目标，保障员工安全并减少事故损失；提升设备可靠性与稳定性，减少故障停机时间，提高生产效率和产品质量；良好的安全管理形象增强了市场竞争力，带动经济效益增长。

其成功经验可总结为四点：一是树立明确安全目标，将安全理念融入全生命周期管理，形成全员参与的安全文化；二是设计生产阶段严守安全标准，引入先进设计方法，从源头把控安全；三是严控生产过程质量，保障设备可靠稳定；四是重视员工安全教育培训，营造良好安全文化氛围。

4 结论与展望

4.1 研究成果总结

本研究聚焦设备设计生产阶段的安全管控对遏制机械设备事故的关键作用，提出针对性策略。通过分析事故案例，明确机械伤害、电气故障等常见事故类型，及事故突发性、严重性、人为因素主导等特点，揭示设计环节安全标准落实不足、防护与人机设计缺陷，生产阶段工艺质量失控、装配调试违规，以及安全管理与监管缺位等隐患。

针对上述问题，研究从三方面提出对策：一是完善设计标准规范，细化要求、动态更新并引入先进设计理念；二是强化生产过程管控，优化工艺流程、严格物料质检、规范装配调试；三是健全安全管理监督机制，完善企业内部管理体系、加大第三方监管力度、推进安全文化建设与培训。

西门子“零事故”的全生命周期安全管理进一步验证了设计生产阶段安全管控的有效性，为行业提供了实践借鉴。

4.2 研究不足与展望

本研究存在两方面局限：一是案例数量有限，对特殊行业、特殊设备的事故分析不够深入，难以覆盖各类机械设备事故；二是对人工智能、物联网等新兴技术在设备设计生产中的安全风险研究不足，未充分探讨相关安全管理模式、技术保障措施及成本预算。

未来研究可从四方面展开：一是丰富事故案例库，结合大数据分析挖掘事故深层原因与规律，为安全防控提供支撑；二是深化新兴技术应用的安全研究，分析网络安全、数据隐私等风险，建立适配的安全标准与解决方案；三是拓展至设备全生命周期安全管理，探讨各环节关联，构建全周期管理模型与协同机制；四是加强安全文化建设研究，探索营造全员参与的安全氛围，从根本上提升安全管理水平。

参考文献

- [1] 应急管理部. 2024年全国机械行业生产安全事故统计公报[R]. 2025.
- [2] 装配调试技术协会. 机械设备装配与调试安全作业规程[Z]. 2023.
- [3] 西门子安全管理部. 西门子“零事故、零伤害”安全目标实施规划[Z]. 2022.

Research on Resource Utilization and Pollution Control of Copper Smelting Solid Waste Based on Circular Economy

Wei Zhou

Yunnan Copper Co., Ltd., Qiubei, Yunnan, 615000, China

Abstract

The large-scale development of copper smelting industry has generated a large amount of solid waste, whose disorderly disposal not only causes waste of valuable resources such as copper, iron, and cobalt, but also triggers environmental problems such as heavy metal pollution and soil ecological damage. The concept of circular economy provides a systematic solution to this dilemma. Taking copper smelting solid waste as the research object, this paper systematically sorts out the current status of resource utilization, deeply analyzes diversified comprehensive utilization approaches, and clarifies the direction of pollution control technologies and policy support systems. The study shows that through the closed-loop model of 'source reduction - graded recycling - high-value conversion', dual benefits can be achieved, including a reduction of over 96% in solid waste environmental risks and an increase in resource recovery rate to 98%. With policy guidance and technological innovation, copper smelting solid waste has the potential to be transformed from an environmental burden into a strategic reserve supporting resource security, providing a practical model for the green transformation of the metallurgical industry.

Keywords

Circular economy; Copper smelting solid waste; Resource utilization; Pollution control; Staged recovery

基于循环经济的铜冶炼固废资源化与污染治理研究

周微

云南铜业股份有限公司, 中国·云南丘北 615000

摘要

铜冶炼工业的规模化发展伴随产生大量固体废弃物, 其无序处置不仅造成铜、铁、钴等宝贵资源浪费, 更引发重金属污染、土壤生态破坏等环境问题。循环经济理念为破解这一困境提供了系统性解决方案。本文以铜冶炼固废为研究对象, 系统梳理其资源化利用现状, 深入剖析多元综合利用途径, 明确污染治理技术与政策支撑体系。研究表明, 通过“源头减量-梯级回收-高值转化”的闭环模式, 可实现固废环境风险降低96%以上、资源回收率提升至98%的双重效益。结合政策引导与技术创新, 铜冶炼固废有望从环境负担转化为支撑资源安全的战略储备, 为冶金行业绿色转型提供实践范式。

关键词

循环经济; 铜冶炼固废; 资源化利用; 污染治理; 梯级回收

1 引言

1.1 研究背景

铜作为关键战略金属, 广泛应用于电力、电子、新能源等领域, 伴随全球能源转型加速, 其需求量持续攀升。铜冶炼过程中约产生 2-3 倍于铜产量的固体废弃物, 全球年排放量达 2470-3770 万吨, 主要包括冶炼渣、烟灰、阳极泥及废电路板等铜基固废。我国作为铜生产与消费大国, 2024 年相关政策明确要求到 2025 年冶炼渣等大宗固废新增大宗综合利用率达到 60% 中国政府网, 而当前部分中小企业仍存在固废堆存占地、重金属浸出等问题, 既威胁土壤与地下

水安全, 又造成铜、钴等宝贵资源流失。

1.2 循环经济理论支撑

循环经济以“减量化、再利用、资源化”为核心原则, 通过物质闭环流动实现资源效率最大化与环境影响最小化。在铜冶炼固废治理中, 这一理论体现为三个维度: 源头减量化通过优化冶炼工艺降低固废产生量; 过程再利用依托梯级技术提取多元价值; 末端资源化实现固废向产品的完全转化。与传统“末端治理”模式相比, 循环经济模式可使固废处理的生态毒性和人体健康毒性分别降低 96.86% 和 98.53%, 为行业可持续发展提供核心支撑。

1.3 研究内容与意义

本文聚焦铜冶炼固废资源化利用现状、综合利用途径及污染治理方向三大核心内容, 结合最新技术突破与政策框架, 构建“技术-政策-市场”三位一体的解决方案。研究

【作者简介】周微(1986-), 女, 中国云南丘北人, 本科, 环境工程师, 从事工业企业环保管理研究。

成果可为企业固废处理提供技术参考，为政策制定者完善循环利用体系提供理论依据，对保障国家资源安全、推进“双碳”目标实现具有重要现实意义。

2 铜冶炼固废资源化利用现状

2.1 固废产生特征与资源潜力

铜冶炼固废成分复杂且差异显著，冶炼渣主要含铁硅酸盐（20-40%）、残留铜（2-5%）及钴、镍等稀贵金属；烟灰富集铅、锌等挥发性元素；阳极泥则是金、银等贵金属的重要载体；废电路板铜品位虽低至1.36%，但伴生多种有色金属国家生态环境科技成果转化综合服务平台。这些固废蕴含巨大资源价值，仅全球铜渣中每年流失的铜、钴资源量即相当于中型矿床储量，若实现充分回收可有效缓解传统矿产资源枯竭压力。

2.2 资源化利用现有水平

我国铜冶炼固废资源化呈现“大型企业领先、中小企业滞后”的不均衡格局。大型企业通过引进浮选、火法贫化等技术，铜回收率可达95%以上，如广东贵屿园区采用顶吹熔池熔炼技术，铜综合回收率超97%，稀贵金属回收率大于95%国家生态环境科技成果转化综合服务平台。但多数中小企业仍以填埋或简单堆存为主，不仅占用土地资源，更存在重金属浸出风险，据测算，传统填埋处理导致的土壤污染修复成本是资源化利用成本的3-5倍。

2.3 制约因素分析

技术层面：复杂成分制约高效利用，低品位固废处理能耗高，如传统浮选技术对含硅量高的铜渣处理效率不足80%；高值转化技术产业化程度低，催化应用等前沿方向仍处于实验室阶段。

经济层面：资源化初期投资大，广东某2万吨/年铜基固废处理项目总投资超1.1亿元国家生态环境科技成果转化综合服务平台，中小企业难以承担；部分技术存在成本倒挂，如碳铝热还原技术因氢能依赖导致经济性不足。

政策层面：标准体系不完善，固废成分检测与产品质量标准不统一；激励机制不健全，税收优惠与绿色金融支持尚未完全落地，企业内生动力不足。

3 铜冶炼固废综合利用途径

3.1 有价金属梯级回收技术

铜与稀贵金属回收：火法工艺中，搅拌强化短时贫化法利用热铜渣潜热，45分钟内铜回收率达90.13%，尾渣含铜量降至0.23wt%，每吨渣节能1250MJ以上；湿法工艺通过柠檬酸浸出可实现99.1%的铜提取， H_2SO_4 焙烧-水浸组合工艺铜回收率达94%；浮选技术经 Na_2CO_3 机械活化优化后，铜回收率提升至98.07%。

铁资源高效利用：碳铝热还原法在1550℃条件下可同步回收99.1%的铁和98.5%的铜，尾渣还可制备陶瓷材料实现全量利用；涡流分离技术对磁性铁氧化物的回收纯度达

99.56%，为钢铁工业提供优质原料。

贵金属富集提取：针对阳极泥开发的“焙烧-浸出-电解”工艺，金、银回收率分别达99%和98%；废电路板经顶吹熔池熔炼后，贵金属富集于粗铜中实现同步回收国家生态环境科技成果转化综合服务平台。

3.2 建筑领域规模化消纳

铜渣作为建筑材料替代天然资源具有显著优势，成为短期大规模消纳的主要途径。在混凝土领域，100%替代天然砂制备自密实混凝土（SCC），可使抗压强度提升27%，干燥收缩减少36%，成本降低19%；碱激发矿渣混凝土（AASC）中掺入铜渣可降低孔隙率，抗氯离子渗透性优于传统混凝土。在道路工程中，铜渣替代2.5mm级配骨料制备沥青混合料，抗裂性显著提升，同时减少15-20%天然骨料消耗。但该途径受建筑行业需求波动影响较大，且产品质量管控难度较高。

3.3 高值化创新应用方向

催化材料开发：铜渣中的铁氧化物（ Fe_3O_4 、 Fe_2SiO_4 ）经改性后可用于燃煤烟气 Hg^0 氧化，在250℃条件下催化效率达93.8%；经 H_2 还原后用于CO甲烷化反应，甲烷选择性达87%。

能源领域应用：铜渣基光催化材料产氢速率达 $0.113 \mu mol/g \cdot h$ ，兼具废水降解功能，实现“能源生产-污染治理”协同；尾渣制备储能材料电极，循环稳定性达2000次以上。

生态修复材料：铜渣与生物炭复合制备重金属吸附剂，对土壤中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的吸附率超90%；用于矿山生态修复可改善土壤结构，同步固化重金属。

3.4 资源化路径优化策略

基于生命周期评价与价值评估的多维度分析表明，2035年铜冶炼渣最优利用结构为升级回收30%、降级回收50%、原级回收10%。短期应优先发展降级回收（建筑利用）实现大规模消纳，中期扩大升级回收（金属回收）比例，远期布局高值转化（催化、能源）方向。智利通过税收优惠推动浮选技术规模化，印度将铜渣纳入绿色建筑标准（LEED）的实践表明，政策引导可加速路径优化进程。

4 铜冶炼固废污染治理方向

4.1 源头减量与清洁生产

冶炼工艺优化：推广闪速熔炼和氧强化熔炼技术，通过提高反应效率减少渣量生成；控制渣中 Fe/SiO_2 比在1.4-1.6、温度 $\leq 1250^\circ C$ ，可将铜残留量降至0.55wt%以下。

过程污染物控制：采用富氧熔炼减少烟气排放量，广东贵屿项目通过炉内气氛精准控制，使二燃室温度维持在1200-1300℃，烟气停留时间超3秒，有效抑制二噁英生成国家生态环境科技成果转化综合服务平台。

资源循环集成：构建“冶炼-回收-再制造”闭环系统，