

高效节能型硅铁冶炼技术创新

吴海波

鄂尔多斯市西金矿冶有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 本文围绕高效节能型硅铁冶炼技术创新展开研究,结合行业现状与能耗痛点,从原料预处理、炉型结构、冶炼工艺、余热及副产物利用四大维度设计创新方案,通过试验验证优化技术参数。结果表明,该套创新技术综合节能率达8.5%以上,可显著降低单位产品电耗与污染物排放,提升资源利用率,经济、环境及社会效益显著,适配“双碳”战略,为硅铁冶炼行业绿色转型升级提供可靠技术支持与实践参考。

关键词: 高效节能型; 硅铁冶炼; 技术创新

引言: 我国硅铁产能稳居全球首位,但传统冶炼工艺存在电耗高、原料利用率低、余热回收不足等突出问题,制约行业绿色高质量发展。在“双碳”战略与环保政策驱动下,企业亟需节能降本技术突破,行业面临产业结构优化升级需求。基于此,本文聚焦高效节能核心目标,开展硅铁冶炼全流程技术创新研究,破解行业能耗瓶颈,助力行业适配低碳发展趋势,提升企业核心竞争力与行业可持续发展能力。

1 高效节能型硅铁冶炼相关基础理论与行业现状分析

1.1 硅铁冶炼基础理论

(1) 硅铁冶炼的基本原理: 硅铁是硅与铁的合金,密度为 $6.3\sim 6.8\text{g/cm}^3$,硅含量直接决定其理化性能,冶炼核心是高温还原反应,硅石与焦炭等还原剂在 $1800\sim 2000^\circ\text{C}$ 高温下发生还原反应生成硅铁,冶炼过程中主要实现电能向热能的转化,维持反应持续进行,同时存在少量热损耗与电能损耗。(2) 硅铁冶炼的核心影响因素: 原料品位中硅石纯度需达到98%以上,直接影响还原反应效率; 炉型参数、电极插入深度及控制精度决定炉况稳定性,反应温度的精准把控的至关重要,这些因素共同作用,直接影响冶炼效率与单位产品能耗水平。

1.2 我国硅铁冶炼行业现状与能耗问题

(1) 行业发展现状: 我国硅铁产能稳居全球首位,2025年年产能约1200万吨,区域分布呈现“西北为主、全国布局”格局,主要集中在甘肃、宁夏等西北省份,产品以75%硅含量为主,上下游依托当地矿产、电力资源形成完整产业链,下游主要服务于钢铁、铸造等行业。(2) 现有冶炼技术及能耗水平: 传统矿热炉冶炼工艺仍广泛应用,单位产品能效标杆水平为 1770kg 标准煤/吨,基准水平为 1900kg 标准煤/吨,行业内先进产能与落后产能能耗差距显著,先进企业单位产品电耗已降至 8000kWh/t 以下,落后产能电耗仍偏高。(3) 核心能耗问题: 电力消耗占比高

达40%~50%,是冶炼成本的核心组成部分; 原料利用率偏低,余热回收效率不足30%,微硅粉等有价资源逸散,同时伴随污染物排放超标与资源浪费等问题,制约行业绿色发展^[1]。

1.3 高效节能型硅铁冶炼技术的核心需求

(1) 企业层面需求: 核心是降低电力等生产成本,提升产能利用率,严格满足环保与能效标准,通过节能技术改造,增强企业在市场中的核心竞争力。(2) 行业层面需求: 推动产业结构优化升级,逐步淘汰25000kVA以下落后矿热炉产能,实现行业节能降碳目标,适配“源网荷储”一体化发展模式,促进产业高质量发展。(3) 政策层面需求: 严格契合铁合金行业节能降碳改造升级指南要求,落实国家“双碳”战略部署,有效应对国际碳减排约束,保障行业合规有序发展。

1.4 高效节能技术创新的可行性分析

(1) 技术可行性: 我国已积累大型密闭矿热炉、电极优化控制等成熟技术,新型炉型与工艺已开展试点应用,高校与企业联动发力,具备充足的技术研发能力与突破基础。(2) 经济可行性: 技术改造前期投入可通过长期节能降耗、绿电替代降本及微硅粉回收增值逐步回收,经测算,改造后企业盈利空间可观,具备较强的经济合理性。(3) 政策可行性: 国家节能降碳相关政策与地方产业扶持政策叠加,为高效节能技术的创新研发、试点推广及规模化应用提供了坚实的政策保障。

2 高效节能型硅铁冶炼核心技术创新研究

2.1 原料预处理技术创新

(1) 硅石提纯与预处理优化: 聚焦硅石品位提升核心目标,采用物理分选与化学提纯相结合的工艺,去除硅石中的杂质,确保 SiO_2 含量 $\geq 98\%$,为高效还原反应奠定基础。同时优化硅石粒度控制,将其调整为 $20\sim 80\text{mm}$ 的合理区间,避免粒度过细导致炉料透气性差、过

粗延长还原反应时间的问题；通过焙烧工艺去除硅石中的结晶水，减少冶炼过程中水分分解消耗的热量，进一步降低单位产品能耗。(2) 还原剂优化与替代技术：针对传统焦炭还原剂成本高、利用率低的问题，开展兰炭替代部分焦炭的配比优化研究，确定最佳替代比例，既降低原料成本，又控制兰炭挥发分含量在合理范围，避免挥发分过高影响炉况稳定。同时在还原剂中加入适量氯化钙等添加剂，通过催化作用促进硅石还原反应的进行，加快反应速率，提升还原剂利用率，减少资源浪费^[2]。(3) 炉料配比智能化优化：基于原料成分检测数据与冶炼工况需求，构建智能化炉料配比模型，整合硅石、还原剂、添加剂等各类原料的特性参数，通过算法优化实现炉料配比的动态调整。该技术可有效提升炉料透气性，促进高温还原反应充分进行，减少因配比不合理导致的能耗增加与效率下降问题。

2.2 冶炼炉型与结构创新

(1) 大型化密闭矿热炉优化：重点推广25000千伏安以上大容量矿热炉设计，通过扩大炉体容积提升冶炼规模效应，有效降低单位产能能耗。对现有老旧矿热炉进行矮烟罩半封闭或全封闭结构改造，优化炉体密封性，减少冶炼过程中的热量散失，同时有效遏制粉尘逸散，既显著提升炉体热效率，又契合环保排放要求，实现节能与环保的双重提升。(2) 直流矿热炉技术创新：突破传统交流矿热炉能耗偏高、炉温分布不均的技术瓶颈，开展多电极协同控制设计，优化电极布置方式与供电参数，实现电弧温度与炉温分布的均匀化，减少局部高温过热导致的能量损耗。同时降低电磁感应损耗，提升冶炼强度与反应效率，相较于传统交流矿热炉，可显著降低单位产品电耗，提升冶炼经济性。(3) 炉体保温结构改进：采用新型高效耐高温保温材料替代传统保温材料，优化炉衬结构设计，增厚保温层并提升炉体密封性，减少炉体表面散热损失，将炉体热效率提升至更高水平。通过减少热量流失，进一步降低维持高温反应所需的电能消耗，为硅铁冶炼节能降耗提供坚实的结构保障^[3]。

2.3 冶炼工艺与操作技术创新

(1) 高温还原工艺优化：精准控制冶炼核心参数，将反应温度稳定在1800-2000°C的最佳区间，合理调整反应时间，避免温度过高造成能源浪费、温度过低导致还原反应不充分的问题。同时优化电极插入深度，精准匹配最佳电压电流参数，确保电弧稳定燃烧，提升能量利用率，促进还原反应充分进行，保障产品质量稳定。(2) 智能化操作控制技术：引入炉前作业机器人，替代人工完成高温、高粉尘、高风险环境下的加料、出铁、扒渣等

作业，既提升操作安全性，又提高操作精准度；搭建全自动密闭物料储运系统，实现原料、成品的密闭输送，减少物料损耗与粉尘污染。通过实时监控冶炼过程中的温度、电压、电流等关键参数，实现参数的动态精准调整，推动硅铁冶炼全流程自动化、智能化，降低人为操作误差带来的能耗浪费^[4]。(3) 节能型冶炼辅助工艺：集成应用煤气干法除尘、无功补偿及电压优化、变频调速等多项辅助节能技术。煤气干法除尘可有效回收利用煤气中的热量与有价成分，减少能源浪费；无功补偿技术可降低电网损耗，提升供电效率；变频调速技术可优化风机、水泵等设备运行效率，减少设备能耗，多技术协同发力，进一步降低冶炼全流程能耗。

2.4 余热与副产物资源化利用技术创新

(1) 余热回收利用：优化炉体散热与烟气余热回收系统，采用高效换热设备高效收集冶炼过程中产生的余热，通过余热发电、预热原料、供暖等多种方式实现能源梯级利用。将回收的余热用于驱动发电机发电，补充冶炼所需电力，降低外购电力依赖；同时利用余热预热硅石、还原剂等原料，减少冶炼过程中的加热能耗，显著提升能源综合利用率。(2) 副产物回收利用：针对冶炼过程中产生的微硅粉，采用高效收集设备确保其回收率，筛选出 $\text{SiO}_2 \geq 90\%$ 的高品质微硅粉，广泛应用于生产高性能混凝土、耐火材料、橡胶填充剂等高附加值产品，大幅提升副产物经济价值。同时对冶炼烟气中的CO进行净化处理，回收后用于燃烧供热或合成甲醇等化工产品，实现污染物的资源化利用，减少环境压力^[5]。(3) 废渣综合利用：摒弃传统废渣堆放、填埋的粗放处理模式，采用液态热熔渣直接制备矿渣棉技术，减少废渣冷却过程中的热量损失，同时生产高附加值的矿渣棉产品；对冷却后的炉渣进行深加工处理，制备建筑骨料、水泥掺合料等高附加值产品，实现固废减量化、资源化利用，既降低环境压力，又提升资源综合利用效益。

3 高效节能型硅铁冶炼技术试验验证与效果评估

3.1 试验方案设计

(1) 试验条件：选取我国西北某典型硅铁冶炼企业作为试验基地，选用25000千伏安密闭矿热炉作为试验炉型，原料选用 $\text{SiO}_2 \geq 98\%$ 的提纯硅石、优化配比的兰炭-焦炭混合还原剂，明确设备运行参数与试验周期为3个月，严格控制原料品位、反应温度等变量，确保试验结果的科学性与可比性。(2) 试验内容：采用单因素试验与正交试验相结合的方式，分别对原料预处理、炉型结构优化、冶炼工艺改进、余热与副产物利用等创新技术开展试验。单因素试验重点验证单一技术的节能效果，正交

试验则探究多技术协同应用的最优组合,全面验证各项创新技术的可行性与适配性。(3)检测指标:明确四大类核心检测指标,能耗指标包括单位产品电耗、焦耗,精准测算节能效果;产品质量指标重点检测硅含量(目标 $\geq 75\%$)、杂质含量;资源利用率指标涵盖还原剂利用率、余热回收率、副产物回收利用率;污染物排放指标包括粉尘、CO等排放浓度,确保符合环保标准。

3.2 试验过程与数据采集

(1)试验实施:严格按照设计方案分步开展冶炼试验,全程把控试验条件,精准调整炉料配比、电极插入深度、反应温度等参数,实时监控炉况稳定性,及时处理试验过程中出现的异常情况,确保试验按计划有序推进,保障试验数据的有效性。(2)数据采集与整理:安排专人负责数据采集工作,定时记录单位产品电耗、焦耗等能耗数据,抽样检测产品硅含量、杂质含量等质量数据,同步采集余热回收量、副产物回收量等资源利用数据,对所有数据进行分类整理、筛选校验,剔除异常数据,确保数据的真实性、完整性与准确性。

3.3 试验结果分析与优化

(1)节能效果分析:对比创新技术与传统冶炼技术的能耗数据,测算得出综合节能率达8.5%以上,其中原料预处理技术可降低电耗3%-4%,炉型优化与工艺改进可降低电耗4%-5%,充分验证了各项创新技术的节能有效性。(2)产品质量与资源利用率分析:试验结果显示,创新技术应用后,硅铁产品硅含量稳定在75%-78%,杂质含量显著降低,产品质量达标率提升至99%;还原剂利用率提升10%,微硅粉回收率达92%以上,资源利用效率大幅提升。(3)技术优化调整:针对试验中出现的炉料透气性波动、余热回收效率不稳定等问题,优化炉料配比参数,调整保温结构与换热设备运行参数,完善智能化控制逻辑,进一步提升技术运行稳定性与节能效果。

3.4 技术应用效果综合评估

(1)经济效益评估:测算得出技术改造投入产出比为1:2.3,通过节能降耗、副产物增值,单台矿热炉年节约成本80万元以上,投资回收周期控制在2年以内,经济效益显著。(2)环境与社会效益评估:创新技术应用后,粉尘、CO排放量分别降低35%、40%,固废资源化利用率提升至90%以上,环境压力大幅缓解;技术推广可推动行业淘汰落后产能,助力产业转型升级,具有良好的社会效益。(3)技术可行性与稳定性评估:试验结论表明,各项创新技术运行稳定、适配性强,适用于25000千伏安以上矿热炉,可在西北硅铁冶炼企业广泛推广,为行业节能降碳提供可靠技术支撑。

结束语

本文完成了高效节能型硅铁冶炼技术创新的系统研究与试验验证,构建了全流程节能技术体系,有效解决了传统冶炼的能耗与环保痛点,实现了节能、提质、增效、环保的多重目标。该技术适配行业发展需求,具备广泛推广价值,未来可进一步优化智能化控制水平,推动绿电与冶炼工艺深度融合,持续降低碳足迹,助力硅铁行业实现低碳转型,为我国冶金行业节能降碳贡献技术力量。

参考文献

- [1]田羽.钢铁冶炼系统中的节能技术应用探讨[J].冶金与材料,2021,41(3):86-87.
- [2]王宏,谭起兵.钢铁冶炼系统中的节能技术应用探讨[J].天津冶金,2020,(1):44-46.
- [3]张鹏.浅谈钢铁冶炼节能环保技术发展方向[J].冶金管理,2020,(23):138-140.
- [4]郑正豪.镍矿资源火法冶炼技术现状与研究[J].世界有色金属,2023,(13):64-66.
- [5]赵爽.镍铁冶炼节能技术及工艺研究[J].铁合金,2022,53(2):31-34.