

热轧基料冶炼提质对冷轧成品板面质量的改善实践

索世超

安钢集团冷轧有限责任公司 河南 安阳 455000

摘要：冷轧板面麻点、起皮、划痕等缺陷多源于热轧基料冶炼质量缺陷，是制约成品质量与成材率的核心因素。本文分析冶炼杂质、夹杂物及铸坯缺陷诱发冷轧板面瑕疵的作用机理，通过优化铁水预处理、转炉精炼、连铸工艺，搭建全流程质量闭环管控体系。生产实践表明，冶炼提质可显著提升钢水洁净度与板坯质量，有效降低冷轧板面缺陷率，提升产品合格率与生产效益，适用于板材生产质量优化。

关键词：热轧基料冶炼提质；冷轧成品板面质量；改善实践

引言：高端冷轧板材广泛应用于汽车、家电等领域，板面质量直接影响产品使用性能与市场竞争力。实际生产中，冷轧成品诸多表面缺陷并非冷轧工序导致，而是热轧基料冶炼环节的杂质超标、夹杂物聚集、板坯偏析气泡等缺陷经轧制放大形成。为解决冷轧质量衔接短板，本文开展热轧基料冶炼提质优化试验，探究工艺改进对冷轧板面质量的改善效果，为板材质量提质增效提供技术支撑。

1 热轧基料冶炼与冷轧板面质量关联机理及缺陷分析

1.1 热轧基料冶炼核心质量指标体系

(1) 钢水洁净度指标：建立以 $[O] \leq 20\text{ppm}$ 、 $[S] \leq 0.005\%$ 、 $[P] \leq 0.012\%$ 为核心的有害杂质控制标准，针对 IF 钢、高强钢等不同钢种制定差异化内控要求，确保钢水初始洁净度满足冷轧深加工需求。(2) 非金属夹杂物指标：按 ASTM E45 标准实施夹杂物评级控制，要求 A、B、C、D 类夹杂物级别均不超过 2.0 级，DS 类 ≤ 1.5 级，对 $\leq 10\mu\text{m}$ 脆性夹杂物实行重点监控，确保夹杂物呈细小弥散态均匀分布，避免大型簇群状夹杂物聚集^[1]。(3) 连铸板坯质量指标：表面粗糙度 $Ra \leq 3.2\mu\text{m}$ ，皮下气泡深度 $\leq 2\text{mm}$ 且距表面 $\geq 5\text{mm}$ 无密集分布，板坯表面裂纹深度 $\leq 1.5\text{mm}$ 且不得呈网状分布，中心偏析评级 $\leq C$ 类 1.5 级，中心疏松 ≤ 1.0 级，确保板坯内部致密度和表面质量满足热轧加热与轧制工艺要求。

1.2 热轧基料缺陷诱发冷轧板面质量问题机理

(1) 钢中 $[O]$ 、 $[S]$ 含量超标时，热轧高温区晶界处析出 FeO-FeS 低熔点共晶体（熔点约 940°C ），在后续轧制变形中沿晶界扩展形成微裂纹，酸洗后暴露为密集氧化麻点； $[P]$ 偏析导致晶界脆化，冷轧时产生条带状色差，带钢宽度方向上色差分布与连铸坯磷偏析带位置具有对应

性。(2) 连铸过程卷渣或耐火材料侵蚀形成的大型簇群状 Al_2O_3 夹杂物（尺寸 $> 80\mu\text{m}$ ），热轧阶段受轧制应力作用沿轧向延展为串状裂纹源，冷轧时应力集中引发局部塑性失稳，导致表层金属与基体剥离形成起皮、剥落缺陷；高硬度夹杂物与轧辊相对滑动则产生连续划痕，缺陷延伸长度与夹杂物簇群尺寸呈正相关。(3) 板坯皮下气泡（距表面 $5\sim 15\text{mm}$ ）和微裂纹经多道次热轧未能完全焊合，在后续冷轧大变形量加工中沿轧制方向线性延展，贯通至成品表面形成条带状起皮或凹凸瑕疵，缺陷展宽比约 $1:3\sim 1:5$ ，形貌特征与连铸过程结晶器液面波动引起的皮下卷渣位置具有空间对应性。

1.3 现场冷轧成品板面典型缺陷溯源分析

(1) 对冷轧成品板面麻点、起皮缺陷部位取样进行扫描电镜及能谱分析，发现麻点区域氧含量较基体高出 $8\sim 12$ 倍，且伴有 Ca 、 Mg 等保护渣特征元素，确认缺陷源于连铸过程结晶器卷渣；起皮缺陷皮下夹渣物尺寸集中分布于 $50\sim 150\mu\text{m}$ 区间，追溯对应炉次钢水 $[O]$ 超标率达 18.6% 。(2) 对条状划痕缺陷板面进行逐道次冷轧轧制参数反推验证，发现缺陷延伸方向与热轧终轧温度梯度方向一致，缺陷部位硫印检验显示硫偏析带与色差区域高度吻合，确认条状划痕源于热轧高温段硫化物沿晶界析出，且在终轧温度 $> 910^\circ\text{C}$ 时发生概率显著增加^[2]。(3) 统计某产线连续 12 个月数据表明：因钢水 $[O] > 25\text{ppm}$ 导致的冷轧麻点缺陷降级率达 2.3% ，夹杂物超标造成的起皮报废率 1.6% ，皮下气泡延伸形成的凹凸缺陷不合格率 1.1% ，三项合计影响冷轧综合成材率约 4.8 个百分点，表明冶炼环节质量短板是制约冷轧板面合格率提升的关键瓶颈因素。

2 热轧基料冶炼提质对冷轧成品板面质量的改善实践

2.1 铁水预处理工序提质优化

(1) 精细化 KR 脱硫工艺参数调整, 精准控制铁水硫含量, 降低硫化物夹杂生成量。将搅拌桨转速由原来的 80~100r/min 优化为 90~110r/min, 搅拌时间延长至 8~12min, 脱硫剂单耗控制在 6.5~8.0kg/t, 确保脱硫后铁水 [S] 稳定 $\leq 0.015\%$, 从源头削减 FeS、MnS 等硫化物夹杂的生成基础。(2) 铁水除渣、净化工艺优化, 减少铁水残渣带入造成的后续冶炼杂质污染。采用双挡渣技术, 机械扒渣与气动挡渣协同作业, 扒渣时间控制在 5~8min, 扒渣后净铁水液面残渣厚度 $\leq 2\text{mm}$, 将残渣携带率由原 1.2% 降至 0.5% 以下, 有效减少转炉冶炼外来杂质污染。(3) 预处理工序质量管控标准细化, 稳定铁水基础品质。制定 KR 脱硫终点 [S] 内控合格率 $\geq 98\%$ 的管控目标, 建立铁水温度、脱硫剂活性度等 11 项关键参数的标准操作制度, 实现铁水预处理合格率由 92.5% 提升至 97.8%。

2.2 转炉炼钢与精炼工序提质优化

(1) 转炉供氧、造渣制度优化, 降低钢水氧含量, 减少氧化物夹杂生成。采用底吹氩全程强搅拌模式, 供氧强度由 $3.2\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 优化至 $3.8\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$, 终点 [C] 控制目标由 0.035% 提升至 0.045%, 避免终点过氧化, 转炉终点 [O] 由平均 32ppm 降至 22ppm, 降幅达 31%。(2) LF 精炼、RH 真空精炼工艺参数迭代, 实现钢水深度净化、成分均匀化。LF 精炼采用高碱度精炼渣 ($R = 4.0 \sim 6.0$), 处理时间 $\geq 35\text{min}$, RH 真空度 $\leq 67\text{Pa}$ 保持时间 $\geq 15\text{min}$, 净循环时间 $\geq 8\text{min}$, 精炼后钢水 [H] $\leq 1.5\text{ppm}$ 、[N] $\leq 30\text{ppm}$, 钢中 T[O] $\leq 15\text{ppm}$ 。(3) 精炼过程夹杂物改性与去除技术应用, 细化、无害化残余夹杂物。采用钙处理工艺对 Al_2O_3 夹杂进行变性, 喂钙线速度 2.5~3.5m/s, 喂入量 1.5~2.0kg/t, 使高熔点脆性 Al_2O_3 转变为低熔点 (约 1400°C) $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 液态夹杂物, 促进上浮去除, 夹杂物合格率由 86% 提升至 95%^[3]。

2.3 连铸工序质量管控优化

(1) 保护渣选型与浇注温度优化, 杜绝板坯表面裂纹、皮下气泡缺陷。针对不同钢种选用专用保护渣 (碱度 1.1~1.3, 熔点 $1050 \sim 1150^\circ\text{C}$), 控制中间包钢水过热度 $15 \sim 30^\circ\text{C}$, 浇注速度 1.2~1.6m/min, 有效消除表面纵裂和皮下气泡, 裂纹发生率由 2.1% 降至 0.6%。(2) 连铸结晶器液位、振动参数精准调控, 提升板坯表面平整度。结晶器液位波动控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内, 采用非正弦振动, 振幅 3~5mm、频率 120~180 次/min, 板坯表面粗糙度由 $\text{Ra} 3.8\mu\text{m}$ 降至 $2.5\mu\text{m}$, 振痕深度由 0.3mm 减至

0.15mm。(3) 板坯冷却制度优化, 改善铸坯组织均匀性, 减少偏析缺陷。比水量由 0.9L/kg 调整为 0.75L/kg, 实施三段动态配水, 铸坯中心偏析由 C 类 2.0 级降至 1.0 级, 中心疏松由 1.5 级改善至 0.5 级^[4]。

2.4 全流程质量闭环管控体系搭建

(1) 冶炼各工序参数实时监测与数据联动机制建立。搭建全流程冶炼质量大数据平台, 集成铁水预处理、转炉、精炼、连铸各工序关键参数 (共计 57 项), 实现各工序质量数据的实时采集、传输与共享, 建立工序间质量交互预警机制, 数据响应时间 $\leq 2\text{s}$ 。(2) 异常工况预警与快速处置流程制定, 规避批量质量缺陷。建立基于大数据的冶炼过程异常智能识别模型, 对温度异常波动 (超出 $\pm 15^\circ\text{C}$)、成分偏离内控范围、精炼时间不足等 22 项异常工况实施分级报警与自动推送处置方案, 异常处置响应时间由平均 8min 压缩至 3min 以内, 实现“异常发现—预警推送—处置反馈”3min 闭环管理, 有效防止批量质量事故发生, 缺陷逃逸率控制在 0.5% 以下。

3 热轧基料冶炼提质优化效果验证与应用分析

3.1 热轧基料冶炼质量优化前后指标对比

(1) 优化前后钢水洁净度、有害杂质含量数据对比分析。全流程提质优化后, 钢水 T[O] 由平均 32ppm 降至 15ppm, 降幅 53.1%; [S] 由 0.008% 降至 0.004%, [P] 由 0.014% 降至 0.010%, [H] 由 2.8ppm 降至 1.5ppm, 钢水综合洁净度指数由 78.5 分提升至 93.2 分。(2) 优化前后夹杂物尺寸、分布状态及板坯表面质量指标提升效果。大型夹杂物 ($> 80\mu\text{m}$) 去除率由 65% 提升至 92%, A、B、C、D 类夹杂物评级分别由 2.0 级、1.5 级、1.5 级、2.0 级改善至 1.0 级、0.5 级、0.5 级、1.0 级; 板坯裂纹率由 2.1% 降至 0.6%, 气泡检出率由 1.8% 降至 0.3%, 表面粗糙度 Ra 由 $3.8\mu\text{m}$ 降至 $2.5\mu\text{m}$ ^[5]。(3) 冶炼工序产品合格率、质量稳定性改善情况统计。连铸板坯综合合格率由 95.2% 提升至 98.6%, 夹杂超标判废率由 2.3% 降至 0.5%; 精炼成分命中率由 91.5% 升至 97.2%, 质量波动标准差由 0.028% 收窄至 0.012%, Cpk 由 0.85 升至 1.25。

3.2 冷轧成品板面质量改善效果验证

(1) 冷轧成品板面麻点、起皮、划痕等典型缺陷发生率变化对比。氧化麻点缺陷率由 2.3% 降至 0.5%, 起皮剥落率由 1.6% 降至 0.3%, 划痕率由 1.2% 降至 0.4%, 综合板面缺陷率由 5.1% 降至 1.2%, 成材率由 94.8% 升至 97.5%。(2) 板面光洁度、平整度、色差均匀性等核心质量指标检测结果分析。表面粗糙度 Ra 由 $0.45\mu\text{m}$ 降至 $0.28\mu\text{m}$, 平整度由 35IU 降至 18IU, 色差 ΔE 由 1.8 降

至 0.7, 反射率由 82% 升至 94%, 光泽度均匀性标准差由 2.5 降至 0.9。(3) 高端冷轧板材板面质量达标率、优质品率提升效果。汽车面板用 IF 钢达标率由 86.5% 升至 95.8%, 优质品率由 72.3% 升至 89.6%; 家电深冲板一级品率由 78.5% 升至 93.2%, 高端产品合格率突破 95%。

3.3 生产应用效益分析

(1) 质量效益: 降低板面缺陷返工、报废率, 提升产品市场竞争力。返工率由 4.2% 降至 1.0%, 废品率由 1.8% 降至 0.4%, 降级率由 3.6% 降至 0.9%, 质量异议率由 2.1% 降至 0.4%, 客户满意度升至 97.5%。(2) 成本效益: 优化冶炼工艺能耗、辅料消耗, 降低整体生产成本。石灰消耗由 42kg/t 降至 35kg/t, 精炼电耗由 52kWh/t 降至 43kWh/t, 保护渣单耗由 0.45kg/t 降至 0.32kg/t; 冶炼成本降约 28 元/t 钢, 废品品损失由 56 元/t 降至 18 元/t, 年创综合效益约 4800 万元。(3) 生产效益: 提升冷轧轧制稳定性, 减少断带、停机等生产异常。断带率由 0.8 次/万吨降至 0.2 次/万吨, 非计划停机由月均 6.5 小时降至 1.8 小时, 机组作业率由 86.3% 升至 94.7%, 月均产能提升 8.5%。

3.4 现存问题与后续优化方向

(1) 当前冶炼提质工艺存在的局限性与现场应用短板。精炼周期由 45min 延至 52min, 节奏下降 8.5%; LF 高碱度渣系加剧耐材侵蚀, 中间包水口寿命由 8 炉次降至 6 炉次; 钙处理钙收得率波动较大 (15% ~ 35%), 影响改性稳定性。(2) 精细化、智能化冶炼质量管控的后续优化思路。引入机器学习转炉终点预报模型, 实现终点 [C]、[O] 动态精准控制; 开发 AI 视觉在线检测连铸

板坯表面缺陷; 构建数字孪生驱动的精炼夹杂物行为预测模型, 实现钙处理参数自适应优化。(3) 冶炼-热轧-冷轧全链条一体化质量升级研究展望。构建全流程板面质量大数据追溯系统, 建立“冶炼参数→热轧组织→冷轧表面质量”全链条数字映射; 开展板坯质量与热轧、冷轧工艺协同匹配研究, 建立一体化最优工艺窗口, 实现全流程质量设计与智能决策, 推动质量控制向“全链条协同设计”战略转型。

结束语

本次全工序冶炼提质优化实践, 有效解决了基料冶炼带来的冷轧板面质量问题, 明显降低成品缺陷率、提升成材率与高端产品品质, 取得良好的质量、经济与生产效益。同时工艺优化存在生产节奏放缓、耐材损耗增加等问题。后续将依托智能数字化技术优化冶炼工艺参数, 构建冶轧全链条协同质量管控体系, 推动板材生产质量实现精细化、智能化升级。

参考文献

- [1] 刘真海, 李宝龙. RH 冷轧基料硅升温、硅脱氧工艺实践 [J]. 鞍钢技术, 2025, 13(03): 81-86.
- [2] 佚名. 热轧基料轧制工艺对冷轧成品板形质量的影响及优化 [J]. 轧钢, 2026, 43(02): 8-15.
- [3] 张铭志, 张晓蒙. 热轧低碳钢冷轧边裂原因分析及改善措施 [J]. 冶金工程, 2022, 9(03): 212-216.
- [4] 黄一铭. 轧钢过程中的温度控制及其对组织性能的影响 [J]. 冶金与材料, 2023, 43(11): 55-57.
- [5] 石坤, 王兴, 郑岗. 热轧基料参数优化对冷轧板形质量的调控实践 [J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(04): 92-98.