

轧钢产品表面质量控制及优化方法

郑传昱 高智 郑海涛 何林 苏志诚

宝钢股份武钢有限条材厂线材分厂 湖北 武汉 430070

摘要: 轧钢产品表面质量控制需从工艺、设备、原料三方面协同优化。通过低温加热、分段控温及高压水/激光除鳞减少氧化铁皮生成;采用高精度轧辊与智能检测系统实时监控表面缺陷;强化钢坯抛丸预处理与化学成分均匀性控制。结合数字孪生模拟与大数据分析,可精准预测缺陷风险并动态调整工艺参数,实现表面质量稳定性与合格率双提升。

关键词: 轧钢产品;表面质量控制;优化方法

引言:在高端制造与绿色发展双重驱动下,轧钢产品表面质量已成为衡量企业竞争力的关键指标。表面缺陷不仅直接降低产品合格率,增加生产成本,更可能引发下游加工失效等链式风险。随着工业互联网与人工智能技术的深度融合,基于多源数据融合的缺陷预测、智能检测与自适应控制等新范式,为突破传统质量管控的“经验依赖”局限提供了技术支撑,推动轧制行业向智能化、精准化方向升级。

1 轧钢产品表面质量缺陷分析

1.1 常见表面缺陷类型及成因

(1) 氧化铁皮(鳞):主要因钢坯加热温度过高、保温时间过长,与空气中氧气充分反应生成 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等氧化物,轧制时未完全清除残留于产品表面。(2) 划伤、擦伤、压痕:划伤多由导卫装置、辊道等设备表面尖锐凸起刮擦导致;擦伤源于产品与设备间相对滑动摩擦;压痕则是轧辊表面缺陷或异物碾压形成。(3) 裂纹、麻点、辊印:裂纹与轧制温度不均、应力集中相关;麻点多为氧化铁皮脱落或腐蚀所致;辊印是轧辊表面状态不良在产品上的复制痕迹。(4) 表面粗糙度超标:主要由轧辊粗糙度不合理、轧制压力不足或速度波动过大,导致产品表面加工纹理不符合要求^[1]。

1.2 缺陷形成机理

(1) 轧制工艺参数的影响:加热温度过高易产生氧化铁皮和裂纹,过低则塑性差导致表面撕裂;速度波动会加剧摩擦损伤;张力不均易引发应力集中,形成裂纹。(2) 设备状态的影响:轧辊磨损后表面精度下降,易产生辊印和粗糙度超标;导卫装置定位不准、表面磨损,会造成划伤和擦伤。(3) 原料质量的影响:钢坯表面本身存在的裂纹、夹杂等缺陷,会在轧制中进一步扩展;化学成分波动会导致钢坯塑性、导热性变化,增加缺陷产生概率。

1.3 表面质量检测方法

(1) 传统检测技术:目视可快速识别明显的氧化铁皮、裂纹等缺陷;触摸适用于感知表面粗糙度和较大压痕;磁粉探伤能有效检测铁磁性材料表面及近表面的微小裂纹。(2) 现代检测技术:激光扫描检测精度高,可量化表面粗糙度和微小缺陷;机器视觉结合图像处理技术,实现缺陷自动识别与分类;超声波检测能穿透表层,检测内部及深层表面缺陷。

2 轧钢表面质量控制关键技术

2.1 轧制工艺优化

(1) 加热工艺控制:加热是轧钢的前置关键环节,均热温度需严格匹配钢种特性,通常控制在1100-1250℃区间,避免因温度过高导致氧化铁皮过度生成,或温度过低造成钢坯塑性不足引发表面撕裂。加热时间需根据钢坯尺寸精准调控,确保钢坯内部温度均匀,减少温差带来的应力集中,同时避免长时间高温保温加剧氧化反应,从源头降低表面缺陷风险。(2) 除鳞技术:除鳞是清除钢坯表面氧化铁皮的核心手段。高压水除鳞通过15-25MPa的高压水流冲击钢坯表面,利用水流的动能击碎并冲蚀氧化铁皮,适用于大部分钢种的轧制场景,需合理布置喷嘴角度与间距,确保除鳞无死角。激光除鳞则借助高能激光束瞬间熔化并汽化氧化铁皮,具有除鳞彻底、无机械损伤、环保无污染等优势,尤其适用于高精度、易损伤的轧钢产品,可有效避免传统除鳞方式带来的表面划伤^[2]。(3) 轧制润滑与冷却:轧制过程中,乳化液浓度需严格控制在3%-8%,浓度过高会降低润滑效果,导致轧辊与轧件之间摩擦加剧,产生划伤;浓度过低则无法形成有效润滑膜,且冷却性能不足。轧辊冷却强度需根据轧制速度、轧件温度动态调整,采用分段冷却方式,避免轧辊表面温度不均产生热裂纹,同时防止冷却过快导致轧件表面组织异常,保障轧钢产品表面平

整度与光洁度。

2.2 设备状态管理

(1) 轧辊表面质量维护：轧辊辊型设计需结合轧件规格与轧制工艺要求，采用凸度、锥度优化设计，确保轧辊与轧件接触均匀，避免局部压力过大产生压痕。轧辊表面粗糙度需控制在 $0.8\text{--}3.2\mu\text{m}$ ，通过磨削加工精准把控，定期对轧辊进行研磨修复，及时清除表面疲劳裂纹、磨损痕迹，避免轧辊缺陷传递至轧钢产品表面，同时延长轧辊使用寿命。(2) 导卫装置优化：导卫装置作为轧件的导向、扶正部件，需采用耐磨、耐高温材料制造，减少与轧件之间的摩擦磨损。通过优化导卫装置的结构设计，调整导向角度与间隙，确保轧件在轧制过程中运行平稳，避免因偏移、晃动产生冲击与刮擦，从设备层面杜绝划伤、擦伤等表面缺陷的产生。

2.3 原料质量控制

(1) 钢坯表面预处理：钢坯入库前需进行抛丸处理，利用高速弹丸冲击钢坯表面，清除氧化铁皮、铁锈及杂质，同时增强钢坯表面硬度。对于表面存在裂纹、夹杂等缺陷的钢坯，采用修磨方式精准去除缺陷，修磨深度控制在 $0.5\text{--}2\text{mm}$ ，确保钢坯表面无明显缺陷后再进入轧制环节，从源头提升轧钢产品表面质量^[3]。(2) 化学成分均匀性控制：通过优化炼钢工艺，采用炉外精炼、真空处理等技术，严格控制钢坯中C、Si、Mn、S、P等元素的含量，确保化学成分波动范围在允许区间内。同时，加强钢坯浇铸过程的温度与速度控制，避免成分偏析，保障钢坯材质均匀性，提升钢坯塑性与加工性能，减少轧制过程中表面缺陷的产生。

3 轧钢产品表面质量优化方法

3.1 基于数据驱动的表面质量预测模型

(1) 机器学习算法在缺陷预测中的应用：依托机器学习算法构建表面质量预测模型，是实现缺陷提前预警的核心手段。支持向量机(SVM)凭借较强的小样本学习能力和泛化性能，可精准挖掘轧制过程中非线性特征与表面缺陷的关联，适用于小众钢种或复杂工艺下的缺陷预测，能有效识别氧化铁皮、微小裂纹等隐性缺陷的前兆特征。神经网络算法(如CNN、RNN)则擅长处理海量多维度数据，通过构建输入层(工艺参数、设备状态等)、隐藏层(特征提取)、输出层(缺陷类型、严重程度)的网络结构，实现对表面缺陷的定量预测，尤其适用于大规模连续轧制生产线，可实时输出缺陷发生概率，为工艺调整提供精准依据。此外，通过集成学习算法融合多种单一模型优势，能进一步提升预测精度，降低误判率^[4]。(2) 工艺参数与表

面质量的关联性分析：基于工业互联网平台采集轧制全流程数据，包括加热温度、轧制速度、张力、除鳞压力等工艺参数，以及对应的表面质量检测结果，构建多维度数据集。通过相关性分析、主成分分析等方法，筛选出对表面质量影响显著的关键参数，明确参数阈值范围。例如，通过数据分析可确定不同钢种对应的最优加热温度区间，避免因温度偏差引发氧化铁皮或裂纹缺陷；同时量化各参数交互作用对表面质量的影响，如轧制速度与乳化液浓度的匹配关系对表面粗糙度的调控规律，为工艺参数优化提供数据支撑，实现从“经验调控”向“精准调控”的转变。

3.2 智能检测与闭环控制系统

(1) 表面缺陷在线识别技术：集成机器视觉、激光扫描、超声波检测等多源传感技术，构建全方位在线检测系统。通过高清相机与图像处理算法结合，可快速识别划伤、压痕等外观缺陷，识别精度达 0.1mm 级；激光扫描技术通过采集表面三维轮廓数据，精准量化表面粗糙度、氧化铁皮厚度等指标；超声波检测则弥补表面检测不足，实现对近表面裂纹等深层缺陷的识别。借助边缘计算技术，检测数据可在设备端实时处理，避免数据传输延迟，同时通过深度学习算法持续优化识别模型，提升对复杂缺陷、微小缺陷的识别能力，实现缺陷的实时、全面、精准识别。(2) 自适应轧制工艺调整策略：基于在线检测结果与预测模型输出，构建闭环控制系统，实现轧制工艺的自适应调整。当检测到表面缺陷超标或预测到缺陷风险时，系统自动触发调整指令：若为氧化铁皮缺陷，立即提升高压水除鳞压力或延长除鳞时间；若为表面粗糙度超标，自动调整轧辊转速与乳化液浓度配比；若检测到裂纹缺陷，结合温度监测数据，适当降低轧制速度、调整均热温度。同时，系统通过PID控制算法动态优化调整参数，避免过度调整引发新的质量问题，并将调整后的数据反馈至预测模型，持续优化模型参数，形成“检测-分析-调整-反馈”的闭环管理，实现表面质量的动态精准控制，大幅提升轧钢产品表面质量稳定性^[5]。

4 轧钢产品表面质量提升的先进技术展望

4.1 新材料与新技术应用

(1) 纳米涂层轧辊技术：纳米涂层轧辊是提升轧钢表面质量的关键新材料技术，通过物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)等工艺，在轧辊表面制备纳米级陶瓷涂层(如TiN、 Al_2O_3)或金属陶瓷复合涂层。该涂层具有极高的硬度、耐磨性和润滑性，能大幅降低轧辊与轧件的摩擦系数，减少划伤、辊印等缺陷的

产生；同时涂层耐高温、抗氧化性能优异，可延长轧辊使用寿命，减少换辊频次，保障轧制过程的稳定性。此外，纳米涂层的表面粗糙度可精准调控，能有效改善轧钢产品的表面光洁度，满足高端产品的质量要求。（2）超快冷技术（UFC）对表面组织的改善：超快冷技术通过在轧制后采用高密度、强冷却能力的冷却介质，实现轧件表面的快速降温，冷却速率可达100-500℃/s。该技术能有效细化轧钢产品的表面晶粒，形成均匀、致密的微观组织，提升表面硬度、耐磨性等力学性能；同时可抑制表面氧化反应的进行，减少氧化铁皮的生成量，降低后续除鳞难度。此外，超快冷技术能通过精准控制冷却路径和冷却强度，避免轧件表面产生热应力裂纹，改善表面平整度，尤其适用于高强钢、特种钢等高端轧钢产品的生产，为表面质量提升提供组织层面的保障。

4.2 数字化与智能化趋势

（1）数字孪生技术在轧制过程模拟中的应用：数字孪生技术通过构建与实际轧制生产线1:1的虚拟数字模型，整合工艺参数、设备状态、原料特性等多源数据，实现轧制过程的全流程动态模拟。借助该技术，可提前预判不同工艺参数组合下轧钢产品的表面质量状态，优化工艺方案，避免实际生产中的试错成本；同时能实时映射实际轧制过程中的异常状态，精准定位导致表面缺陷的关键因素，为及时调整工艺提供精准指导。此外，通过数字孪生模型进行虚拟调试和工艺迭代，可大幅缩短新产品研发周期，提升高端轧钢产品的表面质量稳定性。（2）工业互联网平台下的表面质量大数据管理：依托工业互联网平台，构建覆盖轧制全流程的表面质量大数据管理系统，实现对原料质量数据、工艺参数数据、设备状态数据、检测数据等的全面采集、存储与分析。通过大数据分析技术，可挖掘表面质量与各影响因素之间的深层关联，形成精准的质量预测模型和工艺优化方案；同时构建表面质量追溯体系，实现从原料到成品的全生命周期质量管控，快速追溯缺陷产生的环节与原因。此外，平台支持多生产线数据共享与协同优化，推动轧制行业表面质量管控水平的整体提升。

4.3 绿色制造与表面处理技术

（1）无酸除鳞技术：传统酸浸除鳞技术存在环境污

染、腐蚀设备等问题，无酸除鳞技术成为绿色制造的重要发展方向。电解抛光通过电化学作用，去除轧钢表面的氧化铁皮和杂质，同时使表面形成光滑的钝化膜，提升表面光洁度和耐腐蚀性，该技术无废液排放，环保性优异；机械刷光则通过高速旋转的耐磨刷辊对轧钢表面进行打磨，清除氧化铁皮和微小缺陷，具有工艺简单、能耗低、无化学污染等优势，适用于对表面质量要求较高的中薄板轧钢产品。（2）低能耗表面涂层工艺：低能耗表面涂层工艺以节能、环保为核心，通过优化涂层材料配方和涂装工艺，降低涂层制备过程中的能耗与污染物排放。例如，采用水性涂料替代传统溶剂型涂料，减少VOCs排放；采用静电喷涂、粉末喷涂等高效涂装技术，提升涂料利用率，降低材料消耗；同时研发低固化温度的涂层材料，减少固化过程中的能耗。该类工艺在提升轧钢产品表面防护性能和装饰性的同时，契合绿色制造发展理念，助力轧制行业实现节能减排与高质量发展的协同推进。

结束语

轧钢产品表面质量控制是融合工艺优化、设备管理、智能技术的系统性工程。通过精准调控加热与除鳞工艺、强化轧辊与导卫装置全生命周期维护、构建基于数据驱动的缺陷预测模型，可显著降低表面缺陷率。未来，随着数字孪生、工业互联网等技术的深度应用，表面质量控制将向实时化、自适应化方向演进，助力轧制行业实现质量跃升与绿色低碳转型的协同发展。

参考文献

- [1]陈璐.现场质量管理提升轧钢生产的质量探究[J].冶金与材料,2024,44(08):142-144.
- [2]朱泰阳.轧钢生产过程中的质量控制研究[J].冶金与材料,2023,43(06):75-77.
- [3]赵林.轧钢生产过程中的质量控制研究[J].冶金与材料,2022,42(02):53-54.
- [4]成康荣.轧钢生产过程产品质量控制策略与应用实践[J].冶金与材料,2021,41(06):77-78.
- [5]张晋彰.热轧钢材氧化及表面质量控制技术的发展及应用[J].冶金与材料,2020,40(06):73-74.