

热连轧生产线精轧机组水冷系统优化改造

王智航

宝鸡钛业股份有限公司 陕西宝鸡 721000

摘要: 针对热连轧生产线精轧机组水冷系统供水压力与流量不可控、冷却不均、故障频发等问题, 本文提出了基于智能化装备精度保持与故障预测的系统优化方案。通过 CFD 仿真与热-力耦合分析揭示冷却过程中的流动与热应力分布特性, 结合数据采集与 LSTM 模型, 实现水冷系统状态的智能预测与动态调控。实验证明, 优化后系统冷却均匀性提升 55.6%, 最大热应力降低 20%, 线材轧制通过率提升 1.1%, 故障预测准确率达 96.2%, 提前预警时间 32 分钟。研究结果为精轧机轧辊冷却系统智能化升级与稳定运行提供了有力支撑, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 精轧机; 轧辊冷却; 智能控制; 故障预测

引言

随着钛及钛合金材料广泛应用于航空航天, 海洋工程和高端制造等领域, 对于热连轧生产线中精轧机组运行稳定性和轧制质量的要求也越来越高。水冷却系统是精轧机组中保证轧辊温度控制和延长使用寿命的一个重要环节, 水冷却系统性能的好坏直接影响着轧制过程是否连续和成材率。但现有水冷系统普遍存在供水压力及流量不能精确调控等问题, 造成料头裂纹, 脱落频繁发生, 诱发精轧机组“堆钢”, 严重限制生产效率及经济效益的提高。因此在智能化装备精度保持及故障预测技术的基础上, 以精轧机水冷系统为对象开展优化研究具有一定的理论意义和现实意义。

1 精轧机轧辊水冷却系统现状与存在问题分析

1.1 精轧机水冷系统结构及功能描述

现有热连轧线精轧机组水冷系统由主管路供水装置, 水冷喷嘴组件和相应冷却回收系统组成。该系统利用高压水流将精轧机辊面直接喷射冷却, 从而达到控制辊面温度的目的, 避免了过热造成的辊面裂纹, 变形和早期失效。水冷喷嘴围绕轧辊设置, 按预设流量持续给水, 努力使轧制时轧辊热场均匀稳定。

1.2 存在的主要问题

现有水冷系统普遍存在供水压力和流量不易控制、缺乏准确在线调节和反馈机制、不能依据轧制状态对冷却参数进行动态调节等问题, 造成冷却效果不够稳定。轧制钛及钛合金线材时, 轧件料头区域因温度突变, 应力集中等原因, 容易产生裂纹、脱落、继而导致精轧机内“堆钢”现象的出现,

使轧制流程中断^[1]。受冷却水不均匀分布的影响, 辊面温度梯度显著, 并促使热应力在局部范围内集中, 从而增大辊环疲劳损伤及微裂纹的扩展风险, 减少辊环实际寿命, 提高设备维护频率。

1.3 对生产效率与经济效益的影响

水冷系统性能存在缺陷, 直接关系到热连轧生产线能否平稳运行。料头的裂纹和脱落造成轧制过程经常被中断, 既降低线材轧制通过率又加重操作人员劳动强度, 延长生产调整及检修时间, 限制生产整体效益。同时由于轧辊冷却效果差而造成设备的损坏问题也进一步加大备件更换及维修成本、影响生产线经济收益以及企业竞争力。为此, 迫切需要通过系统性优化和智能化控制手段来增强水冷系统稳定性、精准性和预警能力, 确保精轧机组连续、高效、可靠地运行。

2 水冷系统智能化优化方案设计与原理分析

2.1 流体动力学与热-力学理论基础

为准确描述精轧机轧辊水冷系统中的冷却过程, 需依据流体动力学和热-力学基本理论进行建模与分析。冷却水在管路及喷嘴内部的流动行为满足连续性方程, 以保证质量守恒性, 表达式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

其中, ρ 为流体密度, \mathbf{v} 为速度矢量, t 为时间。轧辊表面的流体动力行为同时受控于 Navier-Stokes 方程, 反映动量守恒特性:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}$$

其中, ρ 为压力, μ 为动力黏度系数, \mathbf{F} 为体积力项。在热-力学分析中, 辊环温度场的不均匀分布将导致热应力集中, 热应力估算采用下式:

$$\sigma_{\text{thermal}} = E \alpha \Delta T$$

式中, σ_{thermal} 为热应力, E 为材料弹性模量, α 为热膨胀系数, ΔT 为温度梯度。上述模型为后续优化设计及仿真分析提供了理论基础。

2.2 智能化调控系统设计

为了实现水管系统的动态精准控制, 本研究对原有供水管路进行了优化设计, 在原主管路基础上增设了与之并联的同管径旁路管道, 并在旁路上设置气动调节阀。气动阀门通过接入生产线连锁逻辑系统, 实现轧件进入精轧机区域时冷却参数的自适应调整, 确保不同工况下冷却水压力与流量的实时切换^[2]。同时, 供水管路中增加分体式电磁流量计, 采用闭环控制策略, 基于流量反馈信号对阀门开度进行动态修正, 实现量化调节。系统目标控制公式可简化表达为:

$$Q_{\text{target}} = K_p (Q_{\text{set}} - Q_{\text{actual}})$$

其中, Q_{target} 为目标调节流量变化量, Q_{set} 为设定值, Q_{actual} 为当前实时测量值, K_p 为流量控制比例系数。此方法有效提升了冷却系统响应速度与调控精度。

2.3 故障预测模型构建

为提高水冷系统的故障预警能力, 本文构建了基于深度学习与退化建模相结合的智能预测模型。通过传感器网络实时采集冷却水压力、流量、温度、喷嘴工作状态等多维特征数据, 形成完整的时序输入序列。采用长短期记忆网络 (LSTM) 对时间序列数据进行建模, 捕捉系统状态变化趋势与潜在异常模式。LSTM 网络的基本单元状态更新公式如下:

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t)$$

其中, h_t 为隐藏状态, o_t 为输出门状态, c_t 为单元状态, \odot 表示 Hadamard 积。为进一步评估系统寿命与故障风险, 引入基于 Weibull 分布的退化建模方法, 对冷却系统关键部件的剩余寿命 (RUL) 进行预测, 从而实现故障发生前的提前干预与维护决策。

3 仿真实验与智能优化效果验证

3.1 仿真实验方案设计

为了验证本文设计的精轧机轧辊水冷系统智能化优化方案, 通过数值仿真和智能预测开展综合实验研究。在 ANSYS Fluent 软件平台上构建了轧辊水冷系统的三维冷却流场模型, 并通过计算流体力学 (CFD) 进行了仿真分析, 仿真研究了喷嘴喷射角度, 流量变化等因素对冷却区域内温度和压力分布规律^[3]。利用 ANSYS Mechanical 对辊环进行了热-力耦合仿真并分析了辊环在不同冷却条件下温度场的分布和热应力的集中。在智能故障预测环节, 对实际轧制时冷却水压力, 流量, 温度和辊面温度等数据进行采集并构造时序数据集。利用长短期记忆网络 (LSTM) 进行故障预测模型的训练, 该模型的输入是水冷系统工况的特征相量, 而输出则是预测未来 30 分钟内是否会出现异常波动的信号。通过比较故障模拟组和正常组的数据来评价模型的预测准确率和提前预警能力。整个仿真实验的过程如图 1 所示。



图 1 仿真实验与故障预测流程示意图

3.2 关键性能指标设定

模拟和实验过程中设置如下关键性能指标, 作为系统优化效果的评价基础: 冷却均匀性是由轧辊表面温度的标准差来度量的, 标准差越小说明冷却效果越匀。最大热应力是用来度量辊环受到热冲击危险程度的指标, 其值越小表明热应力集中程度越小, 辊环使用寿命越长^[4]。故障预测的准确性 (Accuracy) 与提前预警的时间 (Lead Time) 被视为评估智能系统监测表现的关键指标。为了保证评估标准的一致性, 各项指标均在仿真及实际生产验证中使用了同样的计算方法以保证实验的可比性和科学性。

3.3 实验结果与数据分析

表 1 汇总了水冷系统优化改造前后在不同指标下的对

比数据。

表 1 水冷系统优化前后主要性能指标对比

指标项目	改造前	改造后
冷却水流量控制误差 (%)	± 12%	± 2.5%
轧辊表面温度标准差 (°C)	18	8
最大热应力 (MPa)	185	148
线材轧制通过率 (%)	97.2	98.3
料头开裂率 (%)	2.3	0.8
故障预测准确率 (%)	—	96.2
故障提前预警时间 (分钟)	—	32

从表 1 中可以观察到, 通过集成智能控制和故障预测系统, 冷却水的流量控制误差显著减少到 ± 2.5%, 这极大增强了水冷系统的稳定性; 轧辊的表面温度标准偏差降低了 55.6%, 最大的热应力也减少了 20%, 这大大优化了冷却的均匀性和辊环的热冲击情况。线材的轧制合格率增加了 1.1%, 而料头的开裂率降低到了 0.8%, 这使得整体轧制生产的稳定性得到了显著的提升^[5]。在智能预测的领域中, LSTM 模型在识别冷却系统的异常状态上具有高达 96.2% 的准确率, 并能在故障发生前的 32 分钟内提供有效的预警信息, 给生产调度及设备维护带来足够的时间, 应用前景好, 有工程推广价值。

4 结论

本文针对精轧机轧辊水冷系统供水控制不稳和冷却不均以及频繁发生故障的现状, 提出系统性智能优化预测控制策略。通过构建冷却流场和热 - 力耦合仿真模型深刻揭示

水冷过程物理变化规律; 引进旁路调节和智能控制装置增强系统水压和流量定量调节能力; 结合时序特征数据对 LSTM 网络进行训练, 以实现故障状态高准确率提前预警。经验证, 该优化系统显著提高轧辊冷却均匀性、减小热应力水平、提升生产效率和产品质量、具有故障自诊断及预防能力。研究结果对于钛和钛合金材料热连轧现场设备智能化改造有重要借鉴意义, 对于提升整个生产线的稳定性和经济效益有着积极的意义。

参考文献:

- [1] 付龙虎, 周文平, 朱小超. 90 mm 厚工程机械用 Q460 钢板热轧后的水冷工艺优化 [J]. 机械工程材料, 2024, 48(7):30-33.
- [2] 杨永兴. 热精轧机轧辊分段冷却系统的研究与改进 [J]. 铝加工, 2024(5):49-54.
- [3] 李宁, 杨涛, 马银涛. 热轧带钢精轧辊缝冷却水的应用分析及其改造 [J]. 轧钢, 2023, 40(5):80-85.
- [4] 齐纪德, 张静. 1580 轧机工作辊冷却水改造及其效果研究 [J]. 电脑采购, 2023:82-84.
- [5] Chunlei B, Danfeng Y U, Ru D. Research on vibration response characteristics and evolution law of finishing rolling in hot strip mills [J]. Baosteel Technical Research, 2024(4).

作者简介: 王智航 (1991—), 男, 汉族, 陕西宝鸡, 助理工程师, 本科, 研究方向为设备运行管理。