

粗轧机轧辊水冷却系统优化与研究

王智航

宝鸡钛业股份有限公司 陕西宝鸡 721000

摘要: 针对热连轧生产中粗轧机轧辊因高温导致的氧化、磨损及尺寸波动问题, 本文基于热传导与表面冷却理论, 建立温度场仿真模型, 优化水冷却系统布局与喷嘴配置, 并通过试验验证轧辊寿命、磨损率、表面缺陷率和尺寸一致性。结果表明, 采用水冷压力 1.0 MPa、喷射角度 45° 方案, 轧辊寿命提高约 52%, 磨损率下降 47.4%, 缺陷率降至 1.2%, 尺寸标准偏差控制在 0.12 mm 以内。合理优化水冷系统可有效控制轧辊温升, 延缓失效, 显著提升钛及钛合金线材的表面质量与尺寸稳定性, 具有良好应用前景。

关键词: 热连轧; 粗轧机; 轧辊水冷却; 温度场仿真

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, 热连轧线大单重高一致性线材产品需求量不断增加。热连轧过程需要连续化, 高节奏的操作, 单件重量与单班产量都有了很大的提高, 致使粗轧机与中预精轧机的轧辊与轴承部分的热负荷明显增大。轧件在高温的重复作用下轧辊表面温度上升较快, 容易产生氧化、磨损、热裂、斑点以及凸起等瑕疵, 缩短了使用寿命, 提高了换辊频率, 增加了维修成本, 影响线材的表面质量以及尺寸稳定性。过高的温度也会促使辊身和氧化物结合在一起, 产生划伤和粘坑的缺陷, 使成品合格率进一步下降。轴向调整轴承由于高温失效经常出现窜辊现象, 极大地影响了生产的稳定性和成材率。所以对粗轧机辊水降温系统优化就成了促进生产效率, 延长设备寿命, 提高产品质量的关键技术手段。

1 粗轧机轧辊水冷却系统现状与问题分析

1.1 粗轧机轧辊热负荷特点与失效机理

粗轧机轧辊担负着热连轧时高温坯料塑性变形的重任, 辊面重复高温轧制和冷却交替进行, 表现出典型的非稳态热负荷。钛及钛合金材料具有热强性强, 热导率小的特点, 轧辊表面温度升高较快, 内部温差较大, 容易引起热应力的集中并诱导热疲劳裂纹的扩展, 最后产生剥落和热裂纹网的失效模式^[1]。同时高温加重了表面氧化膜的产生, 使耐磨性下降, 有利于机械磨损的发生; 受热膨胀也会使尺寸发生变化, 造成轧制压力的不均匀分布, 加剧了成品尺寸的波动。粗轧机辊失效是热负荷, 力学响应和化学反应等多因素相互耦合

作用的结果。

1.2 现有水冷却系统存在的问题

已有的粗轧机轧辊水冷却系统大多采用固定式喷淋方式, 动态调节能力不强, 对冷却水压, 流量和喷射角度的控制精度不够高, 造成冷却效果随着工况的变化而起伏较大。有的装置喷嘴的布置不尽合理, 局部有冷却不充分或过冷区, 容易诱发热应力集中、表面损伤等问题, 加快轧辊的热疲劳破坏。同时冷却水质的管理不到位, 水压波动大等问题的频繁发生进一步减弱了系统的稳定性并影响连轧生产线的成材率。

1.3 冷却水质、压力与流量控制的缺陷

冷却水质、压力和流量对轧辊的冷却效率和均匀性有着直接的影响。有的冷却系统水质管理不善, 循环水中杂质及盐分较多、容易堵塞喷嘴、损坏水膜而使换热效果下降。阀门的老化和管路设计的不合理使水压不稳定, 过低的压力很难形成密实的水膜, 过高则容易冲刷辊面诱发局部的热应力集中^[2]。由于在线监测和动态调节功能的欠缺, 冷却水量不能随着轧制负荷的变化而实时最优, 造成冷却效果起伏较大, 系统的一致性和可控性不强。

1.4 冷却喷嘴布置与调节方式的不合理性

冷却喷嘴是水冷却系统和辊的直接界面、喷嘴的型式、布置方式及喷射角度等因素决定了冷却效果。已有的系统大多采用直流式或者大粒径的喷嘴, 其覆盖范围受限, 雾化效果不佳, 很难实现均匀冷却。喷射角度没有充分考虑轧件的运动轨迹和辊面热负荷的分布情况, 容易产生喷射死角和冷

却盲区, 导致较大的温度梯度和热应力集中^[3]。喷嘴的位置是固定且不可调节的, 不能根据轧辊磨损情况或者工况变化情况对冷却模式进行优化, 使系统适应性和灵活性下降, 从而进一步加重轧辊表面的破坏。

2 粗轧机轧辊水冷却系统优化设计与仿真分析

2.1 轧辊热传导与表面冷却基本理论

在热连轧过程中, 粗轧机轧辊表面与高温轧件短时接触并迅速升温, 随后通过冷却系统进行强制冷却。轧辊表面温度变化受导热、对流换热和辐射换热共同作用, 热交换过程可由以下能量守恒方程描述:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - h(T - T_\infty) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4)$$

其中, ρ 为轧辊材料密度, c_p 为比热容, k 为热导率, T 为轧辊局部温度, h 为冷却水换热系数, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, ε 为表面辐射率, T_∞ 为冷却介质温度。在高温阶段, 辐射换热影响尤为显著, 需综合优化冷却设计以降低热应力集中风险。

2.2 轧辊水冷却系统优化设计方案

水冷却系统的优化主要集中在管道布局、喷嘴设计以及水气混合冷却这三个关键方面。本实用新型通过双路并联设计实现了一路常规水冷和一路水气混合冷却的功能, 并各自配置了独立的调压阀和流量监测模块以保证介质供给的持续稳定。喷嘴选择高雾化压力式扇形喷头并设置在轧辊的上下两侧, 优化喷射角度为 $45^\circ \sim 60^\circ$ 。试验确定了最佳的覆盖效果以避免水膜破裂和局部过冷。在重载阶段, 水气混合冷却系统被激活, 其喷雾的粒径被控制在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的范围内, 并通过动态调整来增强换热效率和冷却的均匀性。

2.3 轧辊温度场仿真建模与计算

基于优化方案, 采用 CFD 软件建立轧辊三维温度场仿真模型, 材料设为高铬合金钢, 初始温度设定为 450°C 。边界条件包括轧制阶段瞬态热流输入及冷却阶段的对流与辐射散热。仿真设置不同冷却水压力 (0.5 MPa、1.0 MPa、1.5 MPa) 与喷射角度 (30° 、 45° 、 60°) 组合, 评估温度分布与冷却效果变化。换热系数与喷射速度关系按经验公式修正:

$$h = C \cdot v^n$$

其中, C 和 n 为试验拟合常数。本仿真中, 取 $C=50$, $n=0.8$ 。通过不同冷却工况对比分析最优参数组合。

2.4 仿真结果分析与最优方案选择

在各组合工况下, 分别提取轧辊表面冷却 5 秒后的温度均值、温度最大最小值差异 (ΔT), 以及预测的最大热应力值。仿真主要数据结果见图 1。



图 1 轧辊水冷却仿真结果汇总

从图 1 可见, 随着冷却水压力升高及喷射角度增大, 轧辊表面冷却效果增强, 平均温度下降, 温度分布更均匀, 最大热应力减小。但在 1.5 MPa 压力下, 热应力波动加剧, 存在局部过冷风险。综合分析, A2 工况 (1.0 MPa, 45°) 在实现 275°C 平均温度和 32°C 温差的同时, 将最大热应力控制在 148 MPa 以内, 兼顾冷却效率与安全性, 确定为最优方案。

3 粗轧机轧辊水冷却系统试验与效果验证

3.1 试验材料与工艺参数设定

本试验选用 Ti-6Al-4V 合金 $\Phi 120\text{ mm}$ 棒坯, 具备优良的高温强度与耐腐蚀性能。试验在宝钛集团热连轧生产线粗轧机组进行, 采用三辊式高铬合金钢轧辊。轧制工艺控制初轧温度 950°C , 终轧温度 880°C , 采用 $\beta-20^\circ\text{C}$ 窗口轧制, 目标尺寸 $\Phi 8.0\text{ mm}$ 。轧制速度维持在 $1.2 \sim 1.5\text{ m/s}$, 确保连轧节奏稳定, 并实时记录轧辊表面温升与轧件表面状态。

3.2 试验方案与分组设置

为评估不同冷却方案对轧辊性能的影响, 设置三组试验:

无冷却对比组: 轧制过程中不开启水冷系统;

方案 1 (标准水冷控制): 水压 1.0 MPa, 喷射角度 45° , 水气混合比 1:3;

方案 2 (高压水冷控制): 水压 1.5 MPa, 喷射角度 45° , 增强冷却强度。

各组在相同工艺条件下进行批量轧制, 测试轧辊寿命、磨损率、表面缺陷率及尺寸一致性。

3.3 试验检测指标与方法

轧辊使用寿命以单支轧制吨位计算,采用累计轧制量至出现严重磨损或尺寸超差作为更换标准。轧槽磨损率以初始槽型尺寸与轧制后槽型尺寸变化量测得,单位为微米/吨,使用三维激光轮廓仪进行检测^[4]。表面缺陷率按照每批次成品中检测出的划伤、粘坑、热裂纹数量与总数比率计算,采用公式:

$$\text{表面缺陷率} = \frac{N_d}{N_t} \times 100\%$$

其中, N_d 为检测出存在缺陷的线材数量, N_t 为检测总数量。尺寸一致性评估采用成品线材 $\Phi 8.0$ mm 外径的标准偏差 (Standard Deviation, SD) 进行表征,公式如下:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}$$

其中, d_i 为第根样品的外径, $\bar{d}$ 为样本平均外径, n 为样本总数。

3.4 试验数据与结果分析

各试验方案的数据结果见表 1。

表 1 轧辊水冷试验结果汇总

方案	轧辊寿命(吨)	磨损率($\mu\text{m}/\text{吨}$)	表面缺陷率(%)	尺寸一致性 SD (mm)
无冷却	820	3.8	4.5	0.27
方案 1	1250	2	1.2	0.12
方案 2	1300	1.9	1	0.1

从表 1 可以看出,使用水冷却系统后,轧辊的使用寿命得到了显著的延长,方案 1 和方案 2 的寿命分别增加了大约 52% 和 58%;磨损率降低 47.4% 和 50%;无冷却组的表面缺陷率从 4.5% 下降到了 1.2% 和 1.0%。尺寸一致性显著改善,SD 由 0.27 mm 降至 0.12 mm (方案 1) 和 0.10 mm (方案 2)。综合考虑冷却效果与热应力安全性,推荐采用方案 1 (1.0 MPa, 45°) 作为最优控制参数。

3.5 水冷系统优化的综合评价

经过此次系统优化和试验验证后,粗轧机轧辊水冷却系统性能有明显提高。合理的管路设计及准确的冷却控制,既能有效地抑制轧辊表面的温升、降低热应力积累及氧化磨

损,又能显著地延长轧辊使用寿命,减少设备故障率,提高钛及钛合金线材表面质量以及尺寸一致性^[5]。该优化冷却系统在实际生产中显示了较好的稳定性与适应性,有很高的推广应用价值,对热连轧高效稳定生产提供强有力的技术支持。

4 结论

本文以轧辊热传导和冷却换热理论为基础,通过对粗轧机轧辊水冷却系统管路设计,喷嘴布置及水气混合控制策略等方面进行优化,构建温度场仿真模型并进行系统实证试验。模拟和试验结果表明,当冷却水压力为 1.0 MPa,喷射角度为 45° 时,标准水冷方案保证了轧辊的冷却效率和热应力安全,显著提高轧辊的使用寿命和线材尺寸的一致性并有效减少表面缺陷率。该优化水冷却系统应用于实际热连轧过程中,显示了优异的冷却效果及稳定性,显著提高了装置运行的可靠性和产品质量。研究成果为高效连轧钛及钛合金生产线平稳运行提供理论支撑和技术保障,有较好的工程应用推广前景。

参考文献:

- [1] 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.
 - [2] 杜宪宇,崔维启,王立萍,等. 轧辊-轴承系统动力学特性及轧制参数影响试验研究[J]. 重型机械, 2024(4).
 - [3] 林滨. 优化创新轧辊修复工艺技术运用的方法探析[J]. 数字农业与智能农机, 2023(7):124-126.
 - [4] 朱伟超. 冶金轧机轧辊磨损量优化预测方法研究[J]. 冶金与材料, 2024(12).
 - [5] Le V T, Banh T L, Ha X D, et al. The Material Removal Rate of AISI H13 Tool Steel in the Roughing EDM Process with Mixing Powder: Influence Analysis and Optimization of Major Process Parameters[C]//International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development. Springer, Cham, 2024.
- 作者简介: 王智航 (1991—), 男, 汉族, 山西宝鸡, 助理工程师, 本科, 研究方向为机电机械。