

冷连轧过程中机架间张力厚度控制研究

康宗现 韩晓磊

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要: 双机架冷连轧存在张力与厚度强耦合、非线性扰动显著等问题,传统独立控制策略精度低、抗干扰性差,难以满足高精度轧制需求。本文剖析轧制机理与张力厚度耦合规律,构建多维度耦合数学模型,涵盖轧制力、动态张力、厚度闭环控制等子模型。针对传统控制缺陷,设计自适应张力调控与分级厚度优化策略,搭建多变量解耦协同控制方案。仿真与实测验证表明,该策略可有效抑制参数波动,提升铝带厚度精度与轧制系统稳定性。

关键词: 冷连轧过程; 机架间张力; 厚度控制

引言: 铝带冷轧是铝加工的核心工艺,成品厚度精度与轧制稳定性是衡量产品质量的关键指标。双机架冷连轧工序集中、压下量大,无中间机架缓冲,机架间张力与厚度参数耦合性强,易受轧制速度、压下量、来料偏差等因素干扰,引发参数剧烈波动。传统张力、厚度独立控制模式存在调控滞后、干扰抑制能力不足等弊端。为解决高精度轧制难题,本文围绕双机架冷轧耦合特性开展建模与控制优化研究,旨在优化控制策略,提升轧制精度与生产稳定性。

1 双机架冷连轧轧制机理与控制基础理论

1.1 双机架冷连轧整体工艺原理

①双机架冷连轧机组核心由两台串联轧机、压下系统、张力检测系统、传动控制系统组成,工艺流程为铝带开卷、矫直、连续轧制、平整收卷,依靠两台轧机逐级压下铝带,通过协同传动与压下动作实现连续冷轧成型。②相较于多机架轧制,双机架轧制压下工序集中、单道次压下量大,工艺简化的同时,变形集中引发的参数波动更剧烈;控制难点集中在机架间参数匹配,无中间机架缓冲,稳态调控容错率更低。③稳定轧制核心约束为秒流量恒定、机架间张力稳定、压下参数匹配,同时需保证轧制速度平稳、铝带来料规格均匀,避免变形失衡引发轧制失稳。

1.2 双机架间张力形成机理与特性分析

①秒流量平衡是轧制稳定核心,理想状态下两机架铝带秒流量保持一致,当前后机架轧制速度、压下量出现偏差时,秒流量失衡,铝带被拉伸或挤压,进而影响机架间张力。②轧制速度差值直接决定张力大小,速度差增大则张力显著提升;压下率增大使铝带出口厚度减小、秒流量变化,诱发张力波动;轧制力改变辊缝开度,间接影响铝带变形量与秒流量,导致张力联动变化。③稳态工况下各参数恒定,张力小幅平稳波动;瞬态工况

如加减速、压下调整时,参数突变导致秒流量瞬时失衡,张力出现剧烈震荡,动态特性非线性显著^[1]。

1.3 双机架铝带厚度控制基础理论

①铝带厚度偏差源于来料厚度不均、轧制参数波动、机架刚性变化,双机架轧制中,前机架厚度偏差会随铝带传递至后机架,形成偏差逐级传递效应。②AGC厚度控制以辊缝动态调节为核心,前馈控制依据来料厚度偏差提前修正辊缝,反馈控制依托成品厚度检测结果闭环调参,实现双机架精准控厚。③辊缝开度直接决定成品基础厚度,轧制力波动会引发机架弹性形变、改变实际辊缝,来料厚度偏差会直接叠加轧制厚度误差,共同影响成品厚度精度。

1.4 双机架张力-厚度耦合关联机理

①张力波动会改变铝带轧制受力状态,张力增大可减小轧制力、弱化机架弹性形变,改变实际辊缝与成品厚度,形成张力对厚度的正向耦合影响。②前后机架厚度偏差会破坏秒流量平衡,使机架间铝带拉伸状态改变,反向诱发张力扰动,形成厚度与张力的双向扰动机制。③双机架系统存在强非线性、强耦合特性,张力、厚度、轧制力、速度多参数相互制约,单一参数微调即可引发多变量联动波动,是高精度轧制控制的核心难点。

2 双机架冷连轧张力-厚度耦合数学模型构建

2.1 双机架轧制核心参数建模

①结合冷轧轧制变形基本理论,建立双机架轧制力数学模型,充分考虑铝带材质、变形抗力、摩擦系数、压下量等关键参数,量化单机架轧制力与铝带塑性变形的对应关系,适配双机架大压下、短流程的轧制特性。同时搭建轧制速度传递模型,依据双机架传动系统协同控制逻辑,梳理主传动速度指令、机架实时轧制速度、铝带出口速度的传递关系,明确速度耦合传递规律,为秒流量计算和张力建模提供基础参数支撑。②基于胡克

弹性变形理论与机架弹跳特性,构建双机架辊缝动态模型。轧机机架、轧辊在轧制力作用下会产生弹性形变,导致实际辊缝与设定辊缝存在偏差,模型通过量化轧制力与机架弹性形变的线性关联,动态修正实际辊缝数值,精准表征轧制过程中辊缝随载荷波动的实时变化规律^[2]。③依托现场轧制实验数据与仿真数据,完成铝带塑性变形模型的参数标定。针对不同规格、材质的铝带,修正塑性变形抗力系数、摩擦损耗系数等关键参数,消除理论模型与实际工况的偏差,同时结合轧制温度、速度扰动因素,对模型进行动态修正,提升模型适配性与精准度。

2.2 双机架间动态张力数学模型

①以秒流量平衡原理为核心,建立双机架稳态张力数学模型。稳态轧制工况下,忽略微小扰动,通过量化前后机架铝带入口、出口厚度与轧制速度的匹配关系,计算秒流量差值,结合铝带弹性拉伸特性,推导稳态状态下机架间张力的理论计算公式,明确稳态张力与轧制速度、压下率、铝带规格的定量关系。②为适配复杂实际工况,构建考虑多维度轧制扰动的动态张力微分方程模型。综合轧制过程中的速度波动、辊缝偏移、来料厚度不均等动态扰动因素,引入时间变量,表征张力随工况变化的瞬时变化规律,精准描述瞬态轧制过程中张力的动态振荡、渐变特性,贴合实际非稳态轧制工况。③结合双机架冷轧设备极限参数与工艺规范,确定张力模型的边界条件与关键参数取值。明确最大、最小安全轧制张力范围,限定轧制速度、压下率、轧制力的有效取值区间,通过现场试验标定弹性模量、阻尼系数等核心参数,规避模型计算失真问题,保障模型运算的稳定性与有效性^[3]。

2.3 双机架厚度闭环控制模型

①搭建第一机架前馈AGC厚度控制模型,该模型以来料厚度偏差为核心调控依据,通过实时检测铝带入口厚度波动数据,提前预判厚度偏差对成品的影响,结合辊缝响应特性,提前对第一机架辊缝进行前置补偿调节,从源头削弱来料厚度扰动带来的偏差,实现前置防控的控制效果。②构建第二机架反馈AGC+秒流量协同厚度控制模型,依托成品厚度检测传感器,采集出口铝带厚度实时数据,与目标厚度对比形成偏差信号,通过反馈闭环动态修正辊缝参数。同时结合秒流量平衡准则,校正速度匹配偏差引发的厚度误差,双重调控提升成品厚度控制精度。③设计双机架厚度递进传递补偿模型,针对双机架轧制厚度逐级传递、偏差叠加的特点,梳理第一机架厚度偏差向第二机架的传递路径,量化偏差传递系数,根据前机架轧制偏差实时补偿后机架控制参数,实

现两级机架的协同调控,有效抑制厚度偏差逐级累积的问题。

2.4 双机架张力-厚度耦合整体模型与解耦分析

①整合前文建立的轧制力、辊缝、速度、动态张力、厚度控制等子模型,结合各参数的内在关联关系,联立构建双机架张力-厚度耦合整体数学模型。统一各子模型参数维度与运算逻辑,实现张力波动、厚度偏差、轧制参数变化的一体化表征,完整还原双机架冷轧多参数耦合的轧制过程。②基于整体耦合模型,深入分析系统非线性特征与干扰传递路径。双机架轧制系统存在参数非线性耦合特性,轧制力、张力、厚度任意参数波动,都会通过形变传递、速度匹配、辊缝变化等路径,诱发多参数联动扰动,且扰动幅度无固定线性规律,多维度干扰交叉耦合,大幅提升了控制难度^[4]。③通过仿真对比、现场实测数据比对的方式完成模型有效性验证,将模型仿真计算结果与实际轧制工况数据进行对比,统计厚度、张力参数的计算误差,分析误差产生的核心原因,针对性优化模型参数与运算逻辑,降低系统误差,确保耦合模型能够精准反映实际轧制工况,为后续解耦控制算法设计提供可靠模型支撑。

3 双机架张力-厚度协同控制策略优化设计

3.1 传统双机架控制策略缺陷分析

①传统双机架冷轧控制多采用张力、厚度独立控制模式,两套控制系统单独运算、互不联动。厚度控制依托AGC系统调节辊缝消除厚度偏差,张力控制通过速度闭环维持机架间张力恒定。该独立控制逻辑结构简单、易于实现,但完全忽略张力与厚度的强耦合关联,单一回路调节会对另一参数产生干扰,无法适配高精度轧制工况,存在明显控制局限性。②传统PID控制算法依赖固定参数调控,面对轧制加减速、压下调整、来料波动等动态工况时,参数响应速度慢,存在明显控制滞后。在双机架短流程轧制体系中,工况扰动传递速度快,滞后的调节动作无法及时抵消瞬态扰动,易造成张力、厚度参数持续波动,大幅降低轧制稳定性。③双机架轧制系统具备非线性、强耦合特征,传统独立控制策略无交叉干扰抑制机制。张力波动会改变铝带塑性变形状态,引发成品厚度超差;而厚度偏差会破坏秒流量平衡,进一步加剧张力失稳,形成恶性循环,这也是传统控制方式下轧制精度难以提升、工况易失稳的核心诱因。

3.2 双机架张力稳定控制策略设计

①针对双机架张力易波动问题,设计基于速度微调的恒张力控制方案。以机架间实时张力偏差为调控依据,摒弃大幅度速度调节模式,通过前后机架轧制速度微量

动态修正,精准补偿秒流量失衡问题。该方案可在不影响整体轧制节奏的前提下,消除稳态张力偏差,实现全程恒张力轧制,适配常规稳定轧制工况。②为解决瞬态工况张力剧烈波动问题,引入张力偏差动态补偿算法。采集轧制瞬态过程中的张力突变数据,结合张力动态变化特性,计算实时偏差补偿量,叠加至速度控制回路中,快速抵消加减速、压下扰动带来的张力冲击,抑制张力震荡,提升系统瞬态抗干扰能力。③结合不同轧制规格、轧制速度的工况差异,设计张力阈值自适应调节策略。根据铝带材质、厚度、压下率等工艺参数,动态匹配合理的张力稳定区间,摒弃传统固定张力阈值模式,避免阈值过高引发铝带拉伸变形、阈值过低导致铝带松弛跑偏,实现不同工况下的张力自适应稳定控制^[5]。

3.3 双机架高精度厚度控制优化策略

①优化双机架分级厚度控制逻辑,明确前后机架控制分工,实现精准协同配合。第一机架采用前馈控制为主、反馈为辅的模式,主要抑制来料厚度扰动,完成初步厚度修正;第二机架聚焦成品精度控制,依托反馈AGC与秒流量平衡控制,精准消除残余厚度偏差,通过两级机架分级调控,避免偏差累积。②设计辊缝动态修正算法,解决张力波动诱发的厚度偏差问题。通过实时采集机架间张力波动数据,量化张力变化对轧制力、辊缝形变及成品厚度的影响,根据张力扰动量实时修正辊缝设定值,抵消张力耦合带来的厚度误差,实现张力扰动下厚度精度的稳定控制。③优化来料厚度扰动前馈补偿方案,改进传统单一提前补偿模式。结合来料厚度波动变化规律,建立动态前馈补偿模型,根据入口厚度偏差的变化速率与幅值,自适应调整补偿系数,提前完成辊缝预调节,从源头削弱来料厚度不均对成品质量的影响,提升系统抗扰动能力。

3.4 双机架张力-厚度协同解耦控制策略

①针对双机架系统强耦合、多扰动的特性,设计多变量解耦控制算法。基于张力-厚度耦合数学模型,梳理

参数干扰传递通道,通过引入解耦补偿矩阵,抵消张力与厚度之间的耦合关联,将多变量耦合系统拆解为独立的张力、厚度控制子系统,消除参数联动干扰,实现单参数精准独立调控。②建立张力、厚度多目标协同优化控制规则,兼顾轧制稳定性与成品精度。以张力波动最小化、成品厚度偏差最小化为控制目标,平衡两个子系统的调控优先级,避免单一参数过度调节引发的另一参数失控,实现双参数协同最优控制,适配复杂多变的轧制工况。③设计控制参数自适应整定方法,解决传统固定参数适配性差的问题。根据轧制速度、压下率、铝带规格及实时扰动状态,动态整定PID控制参数与补偿系数,使控制系统可自适应匹配不同稳态、瞬态轧制工况,提升控制策略的通用性、快速性与稳定性。

结束语

本文系统完成双机架冷连轧张力厚度耦合机理分析、数学建模与控制策略优化,有效解决了传统控制耦合干扰、响应滞后、精度不足等问题。所设计的协同解耦控制策略,可实现张力自适应稳定调控与厚度精准补偿,显著提升轧制系统抗扰动能力与成品质量。研究成果完善了双机架冷轧控制理论体系,可为冷轧高精度生产提供技术参考。后续可结合智能算法优化参数整定,进一步适配复杂多变的工业轧制工况。

参考文献

- [1]王硕.2030mm酸轧机组轧制模型中张力控制的优化[J].金属世界,2022,18(6):71-74.
- [2]王文奇,李健.冷连轧机组动态变规格时铝带楔形区参数优化设定[J].钢铁,2024,59(8):89-96.
- [3]张宇.冷连轧机架间张力与厚度耦合扰动抑制控制策略[J].冶金自动化,2023,47(3):45-51.
- [4]陈晨,赵晓燕.基于模糊PID的冷连轧张力厚度协同控制方法[J].轧制技术与装备,2023,9(2):32-37.
- [5]李明昊.超高强钢冷连轧张力-厚度协同优化控制技术[J].中国冶金,2025,35(2):68-74.