

# 轧机振动特性及影响因素

梁 龙 王博文

洛阳盈创极光精密制造有限公司 河南 洛阳 471822

**摘要:** 轧机振动是影响轧制过程稳定性和产品质量的关键因素,其特性表现为多类型耦合振动。垂直振动多源于轧辊系统,与带钢厚度波动直接相关;水平振动集中于机架,易引发板形缺陷;扭转振动则由传动系统失衡导致。振动频率涵盖低频( $< 100\text{Hz}$ ,机械共振引发)和中高频( $100\text{-}1000\text{Hz}$ ,动态载荷激励)。影响因素包括轧制速度、压下量、张力控制、机械结构刚度、轴承间隙及润滑条件等,其中轧制速度过高、润滑不良或结构刚度不足是诱发自激振动的主要诱因。

**关键词:** 轧机振动特性;影响因素;减振策略;优化方法

引言:在现代化轧制生产中,轧机振动已成为制约轧制效率与产品精度的核心瓶颈。其振动形式复杂多样,涵盖垂直、水平及扭转振动,不仅直接导致带钢厚度波动、板形缺陷等质量问题,还可能引发设备疲劳损伤,甚至造成断轴等重大事故。研究发现,轧机振动是机械结构、工艺参数、材料特性及控制系统等多因素耦合作用的结果。深入剖析振动特性及其影响机制,对实现轧制过程稳定性控制、提升产品质量及降低设备运维成本具有重要意义。

## 1 轧机振动类型与特性分析

### 1.1 振动分类

(1)按振动方向:垂直振动多发生于轧辊系统,是导致带钢厚度波动的核心因素,尤其在轧制力突变时振幅显著增大;水平振动主要出现在机架与牌坊间,易引发板形波浪、侧弯等缺陷,对高精度板材生产影响显著;扭转振动集中于传动系统,如电机、联轴器、轧辊等部件的扭转失衡,长期作用会造成轴系疲劳损伤,甚至引发断轴事故。(2)按频率范围:低频振动( $< 100\text{Hz}$ )多由轧机机械结构共振引发,如机架立柱、底座的固有频率与轧制节奏耦合时,易出现持续性振动;中高频振动( $100\text{-}1000\text{Hz}$ )主要源于动态载荷激励,如轧辊偏心、来料厚度不均导致的轧制力脉动,或高速轧制时的油膜振荡。

### 1.2 振动特性参数

(1)幅值:作为振动强度的核心量化指标,可通过位移(微米级,反映结构变形程度)、速度(毫米/秒,关联振动能量)、加速度(米/秒<sup>2</sup>,体现冲击程度)三种参数表征,不同参数适用于不同振动场景,如位移常用于评估低频振动对板厚的影响。(2)频率:与轧机各部件固有频率紧密相关,如机架固有频率通常在 $50\text{-}80\text{Hz}$ ,

当轧制速度引发的激励频率接近固有频率时,易产生共振;同时,频率与轧制速度呈正相关,如高速轧制时( $> 15\text{m/s}$ ),激励频率易进入中高频范围。(3)相位:可用于分析多源振动的耦合关系,如通过对比轧辊垂直振动与水平振动的相位差,判断是否存在振动能量叠加,当相位差为 $0^\circ$ 或 $180^\circ$ 时,易出现振动加剧现象,增加板形缺陷风险<sup>[1]</sup>。

### 1.3 振动信号采集与处理

(1)传感器布置:压电式加速度计广泛应用于机架、轧辊轴承座等部位,具备高频响应(可达 $10\text{kHz}$ )、体积小优势,可实时采集振动加速度信号;激光测振仪则用于非接触式测量,如对轧辊表面振动位移的监测,避免传感器安装对轧机运行的干扰,适用于高精度轧制场景。(2)信号分析方法:时域分析通过提取振动信号的峰值、均值、方差等参数,快速判断振动强度,如峰值加速度超过 $50\text{m/s}^2$ 时需触发报警;频域分析(如傅里叶变换)可将时域信号转换为频率谱,精准识别主导振动频率,定位振源(如 $200\text{Hz}$ 峰值多对应轧辊偏心激励);小波变换则适用于非平稳振动信号分析,如轧制速度切换时的瞬态振动,可有效捕捉振动频率的动态变化,为轧机减振调控提供依据。

## 2 轧机振动影响因素分析

### 2.1 机械结构因素

(1)轧辊与机架刚度:轧辊与机架作为轧机核心承载部件,其刚度直接决定抗振能力。当刚度不足时,易在轧制力周期性作用下产生弹性变形,引发低频共振(通常为 $20\text{-}80\text{Hz}$ )。例如,磨损严重的工作辊刚度下降后,轧制过程中易出现辊系弯曲振动,加剧带钢厚度波动;机架立柱若存在焊接缺陷,刚度不均匀会导致振动能量集中,长期运行可能引发机架开裂。(2)轴承间

隙：轧辊轴承（如四列圆柱滚子轴承）的间隙需严格控制，间隙过大会破坏辊系运行稳定性，引发非线性振动。当间隙超过0.15mm时，轧辊在旋转过程中易出现径向窜动，形成冲击载荷，使振动信号呈现非正弦特性；同时，间隙过大还会导致轴承内外圈接触不良，产生局部磨损，进一步扩大振动幅值，尤其在中高频范围（300-600Hz）表现明显<sup>[2]</sup>。（3）连接件松动：轧机各部件间的连接件（如机架与底座的连接螺栓、轧辊轴承座的紧固螺栓）若预紧力不足，会导致连接部位出现间隙，引发振动失稳。例如，牌坊连接螺栓预紧力下降10%以上时，轧制过程中机架易出现横向位移振动，与水平振动耦合后，会显著增加板形侧弯缺陷率；此外，松动的连接件还会导致振动传递路径改变，使原本分散的振动能量集中于局部部件，加速设备老化。

## 2.2 工艺参数因素

（1）轧制速度：轧制速度与振动强度呈正相关，高速轧制（ $> 12\text{m/s}$ ）时，动态载荷会急剧增加。当速度超过临界值时，轧辊与带钢间的摩擦力变化频率升高，易激发辊系自激振动；同时，高速下油膜轴承的油膜厚度变薄，油膜振荡风险增加，引发中高频振动（600-900Hz），严重时会导致轧辊表面出现振痕。（2）压下量：大压下量（如单道次压下率超过30%）会使轧制力大幅波动，进而诱发振动。压下量过大会导致轧件变形抗力骤增，轧制力峰值超出设备承载范围，使轧辊产生纵向振动；同时，不均匀的压下分布会造成辊系受力失衡，引发垂直振动与水平振动的耦合，加剧带钢厚度偏差与板形缺陷。（3）张力控制：前后张力失配（如前后张力差超过10%）是引发水平振动的关键因素。当前张力过大、后张力不足时，带钢在轧制过程中易出现横向偏移，导致机架与牌坊间产生水平冲击力，激发水平振动；反之，后张力过大则会使带钢出现拉伸变形不均，振动能量通过带钢传递至轧辊，引发辊系振动。

## 2.3 材料特性因素

（1）被轧材料硬度：被轧材料硬度不均会对轧辊产生周期性冲击，诱发振动。例如，热轧带钢的硬度偏差若超过50HV，轧制时轧辊会受到交替变化的接触应力，形成周期性激励，其频率与轧辊转速相关（通常为50-150Hz）；长期作用下，不仅会加剧轧辊磨损，还会使振动传递至机架，影响轧制稳定性。（2）材料厚度：来料厚度波动（如厚度偏差超过0.2mm）会直接影响垂直振动。当厚差较大的坯料进入轧机时，轧制力会随之剧烈变化，使轧辊系统产生垂直方向的冲击振动；若波动频率与轧机固有频率接近，还会引发共振，导致带钢厚度精度进

一步下降，形成“厚差-振动-厚差”的恶性循环<sup>[3]</sup>。

## 2.4 控制策略因素

（1）AGC（自动厚度控制）系统响应延迟：AGC系统若存在超过50ms的响应延迟，会导致厚度波动反馈滞后，无法及时调整轧制参数，加剧振动。例如，当带钢出现瞬时厚差时，延迟的控制信号会使压下装置调节滞后，造成轧制力过度补偿，引发轧辊垂直振动；长期延迟还会使振动信号叠加，形成持续性厚差缺陷。（2）AFC（自动板形控制）系统参数失配：AFC系统的控制参数（如弯辊力调节系数、倾辊速度）若与实际轧制工况失配，会诱发水平振动。例如，弯辊力调节系数过大时，板形矫正过度，导致带钢横向应力不均，引发机架水平振动；倾辊速度过快则会使轧辊倾斜角度突变，产生冲击载荷，进一步扩大振动幅值，增加板形波浪缺陷的发生概率。

## 3 轧机减振策略与优化方法

### 3.1 被动减振措施

（1）结构优化：通过增强轧辊-机架刚度从根源降低振动风险，例如采用整体锻造机架替代拼接结构，使机架刚度提升20%-30%，有效避开低频共振区间（50-80Hz）；同时，在轧辊轴承座与机架间加装金属橡胶阻尼减振器，利用材料内摩擦耗散振动能量，可使中高频振动（300-600Hz）幅值降低40%以上。针对高速轧机，还可在工作辊表面喷涂耐磨涂层，减少因辊面磨损导致的刚度不均，进一步抑制振动传递。（2）隔振基础：采用弹性支承结构阻断环境振动向轧机传递，常用的钢弹簧-橡胶复合隔振器，可通过调整弹簧刚度与橡胶阻尼比，实现对10-50Hz低频振动的隔离效率达85%以上。在基础施工中，将轧机底座与地面通过隔振器柔性连接，避免车间其他设备（如轧机辅助传动装置）的振动通过刚性地面传导至轧辊系统，尤其适用于多机组集中布置的轧制车间，可显著降低振动耦合风险。

### 3.2 主动控制策略

（1）轧制力前馈补偿：基于振动预测模型实现实时压力调整，通过安装在轧机入口的激光测厚仪，提前获取来料厚度波动数据，结合轧制力-振动耦合模型，预测未来0.1-0.3秒内的轧制力变化趋势，进而通过液压压下系统提前调整轧制压力，补偿振动引发的力波动。该策略可使轧制力波动幅度控制在 $\pm 5\%$ 以内，有效抑制垂直振动对带钢厚度的影响，在薄带钢轧制（厚度 $< 1\text{mm}$ ）中应用效果尤为显著。（2）自适应AGC控制：通过动态优化压下量与轧制速度的匹配关系，解决传统AGC响应滞后问题。系统实时采集振动信号（如轧辊加速度、带钢厚

度偏差),利用模糊PID算法自适应调整压下速度与轧制速度系数,例如当检测到中高频振动(600-900Hz)时,自动降低轧制速度5%-10%,同时微调压下量,避免动态载荷进一步激增。实际应用中,该策略可使带钢厚度标准差从 $\pm 0.02\text{mm}$ 降至 $\pm 0.012\text{mm}$ ,且能根据不同钢种(如低碳钢、不锈钢)的轧制特性自动切换控制参数<sup>[4]</sup>。

### 3.3 工艺参数优化

(1)多目标优化:以振动幅值、产品厚度标准差为核心约束条件,构建多目标优化函数。在制定轧制工艺时,不仅需满足产量要求,还需将振动幅值控制在加速度 $\leq 30\text{m/s}^2$ 、厚度标准差 $\leq 0.015\text{mm}$ 的范围内。例如,在冷轧硅钢生产中,通过平衡轧制速度(8-12m/s)与压下率(15%-25%),既保证生产效率,又避免因参数极值引发的振动风险,同时结合现场试验数据动态调整约束阈值,适应不同批次材料的轧制需求。(2)优化算法:将遗传算法、粒子群算法应用于工艺参数寻优,解决传统试凑法效率低、精度差的问题。遗传算法通过模拟生物进化过程,对轧制速度、压下量、张力等参数进行编码迭代,在50-100代迭代后即可找到最优参数组合,使振动幅值降低35%以上;粒子群算法则凭借收敛速度快的优势,适用于轧制工况动态变化场景,例如当来料硬度波动时,可在10-20秒内重新优化参数,确保振动稳定在可控范围。两种算法均已集成到轧机控制系统中,实现参数自动寻优与实时更新。

### 3.4 智能监测与预警

(1)基于机器学习的振动故障诊断:采用支持向量机(SVM)分类模型构建故障识别体系,通过采集历史振动数据(如正常运行、轴承磨损、连接件松动等工况下的振动信号),提取时域(峰值、均方根)、频域(特征频率、功率谱密度)特征参数,训练模型实现故障类型识别,准确率可达92%以上。系统实时采集振动数

据并输入模型,当检测到异常振动(如轴承间隙过大引发的非线性振动)时,立即触发声光报警,同时推送故障原因与处理建议,缩短故障排查时间。(2)数字孪生技术:构建轧机全生命周期数字孪生模型,通过传感器实时采集物理轧机的振动、温度、压力等数据,在虚拟空间中1:1映射设备运行状态。利用有限元分析与振动仿真算法,预测未来24-48小时内的振动趋势,例如当预测到机架振动幅值将超过临界值时,提前发出维护预警,指导工作人员调整工艺参数或更换部件。该技术可使轧机非计划停机时间减少25%-30%,同时通过虚拟调试优化减振方案,降低现场试验成本。

### 结束语

轧机振动作为轧制领域的共性难题,其特性研究与影响机制解析对提升生产稳定性与产品竞争力至关重要。本文通过系统分析垂直、水平及扭转振动的形成机理与耦合关系,揭示了机械结构刚度、工艺参数匹配度、材料均匀性及控制策略响应速度等关键影响因素。未来需进一步融合智能传感、数字孪生与先进控制算法,构建"预测-诊断-调控"一体化减振体系,推动轧制技术向高精度、低振动、智能化方向发展,为制造业转型升级提供技术支撑。

### 参考文献

- [1]李国华,孙宁,谢新伟.轧机液压系统的振动诊断[J].文化科学,2020,(11):94-95.
- [2]李斌.带钢热连轧机组的振动及预防[J].冶金机械及自动化,2020,(04):48-49.
- [3]洪嵩源.轧机机械振动对轧制精度的影响及其抑制方法[J].建筑技术科学,2025,(05):54-55.
- [4]李泽越.轧机振动特性及影响因素[J].中国科技信息,2025,(08):91-92.