

冶金机械设备动态响应特性与振动控制方法

杨 坤

陕钢集团汉中钢铁有限责任公司 陕西 汉中 724200

摘 要：冶金机械设备在高温、重载、连续作业的极端工况下运行，其动态响应特性直接决定设备的加工精度、服役寿命与生产安全性。随着冶金工业向高速化、大型化和精密化方向发展，机械系统的振动问题日益突出，已成为制约产品质量提升和设备可靠运行的关键瓶颈。本文系统分析冶金机械设备的动态激励源特征，包括周期性轧制力、齿轮啮合冲击、辊系偏心及结构非线性因素，阐述其动态响应特性——涵盖模态分布、共振风险、非线性振动及耦合振动行为。在此基础上，综述被动隔振与阻尼减振、半主动控制、主动振动控制以及结构优化设计等振动控制方法，重点讨论各方法的适用工况、控制效果与工程局限性。

关键词：冶金机械设备；动态响应；振动控制；模态分析；减振技术

引言

冶金机械设备涵盖轧机、连铸机、输送辊道、剪切机等关键装备，是钢铁及有色金属生产线的核心载体。这类设备普遍具有结构尺度大、运行速度高、负载波动剧烈以及多源激励并存的特征。在实际运行中，机械系统不可避免地产生不同程度的振动。适度振动尚在容许范围，但过度振动将引发一系列不良后果：轧制产品厚度波动加剧、表面出现振纹；轴承和齿轮过早疲劳失效；连接螺栓松动甚至结构断裂；同时产生高分贝噪声污染作业环境。因此，深入研究冶金机械的动态响应特性，并采取有效的振动控制措施，对提升冶金装备的可靠性、产品质量和生产效率具有重要的工程价值。冶金机械的振动问题具有强非线性、宽频带和多模态耦合的复杂性，单一控制手段往往难以奏效，需要从“激励源-传递路径-响应点”全链条进行综合治理。

1 冶金机械设备动态响应特性

1.1 动态激励源分析

冶金机械的动态响应首先取决于激励源的特征。主要激励源可分为以下四类。第一，工艺载荷激励。以轧机为例，轧制力是周期性变化的动态载荷。由于来料厚度波动、轧辊偏心、摩擦系数变化等因素，轧制力并非恒定值，而是包含基频分量及其倍频分量。轧制力的波动频率通常在0~50Hz范围内，与机架-辊系的固有频率接近时易引发共振。连铸机振动装置的结晶器振动属于强制位移激励，其振动波形（正弦或非正弦）直接影响铸坯表面质量。第二，传动系统激励。齿轮啮合过程中的时变啮合刚度、传动轴的不平衡以及联轴器对中误差，会产生周期性激励力。齿轮啮合频率（齿数×轴频）及其倍频、边频带成分丰富，往往落在中高频段

（50~500Hz）。此外，电机电磁转矩波动也会通过传动轴传递至工作机构^[1]。第三，结构非线性激励。冶金机械中广泛存在的非线性因素包括：轧辊与轴承座之间的间隙、万向接轴的大转角运动、液压缸的摩擦力-速度非线性特性、基础松动等。这些非线性环节在特定条件下可诱发亚谐共振、超谐共振或混沌振动，使响应呈现复杂的频谱结构。第四，环境与流体激励。轧制冷却水冲击、高压除鳞水射流、通风气流等流体-结构相互作用也会贡献宽频随机激励，尤其在高速线材轧机中，该激励不可忽略。

1.2 模态特性与共振风险评估

动态响应特性与机械结构的模态参数（固有频率、振型、阻尼比）密切相关。冶金机械通常是多自由度复杂系统，其模态可分解为局部模态和整体模态。以四辊轧机为例，工作辊和支撑辊之间可产生弯曲模态和压扁模态；机架立柱的横向弯曲模态；传动轴系的扭转模态和弯曲模态。采用有限元模态分析可获得各阶固有频率及振型图。共振风险判断的基本准则是：激励频率与某阶固有频率接近（通常认为频率比在0.8~1.2范围内）且该模态振型在响应点具有较大幅值时，将发生显著共振。在实际冶金装备中，最危险的情况往往是轧制力基频或其高次谐波与辊系弯曲模态重合，导致轧辊出现“第三倍频程振纹”或“第五倍频程振纹”。此外，齿轮啮合频率与传动轴扭转模态的耦合可引发扭振，严重时造成联轴器剪断。阻尼在动态响应中起耗散能量、限制共振峰值的作用。冶金机械的结构阻尼比通常较小（钢结构阻尼比约0.01~0.03），轴承和油膜提供一定附加阻尼，但总体阻尼水平偏低，导致共振峰尖锐，对频率漂移敏感。

1.3 非线性与耦合振动行为

冶金机械的动态响应往往呈现显著的非线性特征。典型现象包括：硬弹簧效应——随着振动幅值增大，等效刚度增加，共振频率向高频偏移；间隙非线性——当振动幅值超过轴承间隙时，系统出现“碰摩”或冲击，响应频谱中出现分数谐波；干摩擦非线性——摩擦阻尼器的滞回特性可产生极限环振动。耦合振动是另一重要特征。轧机中，垂直方向的轧制力波动通过机架传递，可激发水平方向的机架摆动；同时，辊系的扭转振动与垂直振动通过轧制界面上的摩擦力耦合在一起。这种跨模态、跨方向的耦合效应使得动态响应分析不能采用解耦简化，必须建立多自由度、多物理场的耦合动力学模型。例如，轧机辊系-传动系统-液压压下系统的联合动力学模型中，轧制界面上的摩擦-滑移条件成为耦合的关键环节。

1.4 动态响应的表征与评价指标

工程中通常采用以下指标评价冶金机械的动态响应特性。一是振动位移、速度、加速度的有效值（RMS），反映振动能量水平，依据ISO2372或GB/T6075标准设定报警阈值。二是频谱峰值对应的频率成分，用于识别激励源和诊断故障类型。三是瀑布图（频谱随时间的变化），用于分析变速过程的共振穿越行为。四是轴心轨迹（针对旋转部件），用于判断不平衡、不对中或油膜涡动。五是动态轧制力波动幅度，直接反映对产品厚度均匀性的影响。对于高速轧机，还关注振动烈度随轧制速度的变化曲线，确定“临界速度”以避免共振。

2 冶金机械设备振动控制方法

针对上述动态响应特性，振动控制方法可从激励源抑制、传播路径隔断和响应点减缓三个层面实施。以下分类阐述主要控制方法。

2.1 被动振动控制方法

被动控制不依赖外部能量输入，依靠材料的弹性、阻尼或惯性特性实现减振，具有结构简单、可靠性高的优点。

2.1.1 隔振技术

通过在振源与基础之间设置弹性支撑（弹簧、橡胶垫、空气弹簧）来减小振动传递率。对于冶金机械，常见的隔振对象包括轧机机架、电机底座和齿轮箱。隔振设计的核心是选择适当的隔振刚度，使隔振系统的固有频率远低于激励频率（通常要求频率比 $\geq \sqrt{2}$ ）。需要注意，隔振层过软会导致设备晃动过大，影响轧制精度^[2]。为此，冶金机械常采用组合隔振——钢弹簧并联粘滞阻尼器，兼顾低频隔振与高频衰减。

2.1.2 阻尼减振技术

通过增加结构损耗因子耗散振动能量。具体措施包括：在机架立柱的空腔内填充高阻尼混凝土或沙粒，利用颗粒间的摩擦耗能；在板壳类结构（如防护罩、导板）表面敷设约束阻尼层（粘弹性材料+约束金属板），利用剪切变形耗能；在轴承座与机架之间加装粘弹性阻尼环，减小高频振动传递。阻尼材料的性能受温度影响显著，冶金现场的高温环境（轧机附近可达80℃以上）要求选用耐高温的硅橡胶或聚酰亚胺基阻尼材料。

2.1.3 动力吸振器

是窄带减振的有效手段。其原理是在主振系统上附加一个单自由度弹簧-质量子系统，调谐使其固有频率等于主系统目标频率，从而将主系统的振动能量转移到吸振器上。冶金机械中，动力吸振器已被用于抑制轧辊的特定模态振动（如第三倍频程振纹）。但传统动力吸振器对频率失谐敏感，当轧制速度变化引起激励频率漂移时，减振效果急剧下降。为此发展了自适应调谐动力吸振器（见半主动控制）。

2.2 半主动振动控制方法

半主动控制通过实时调节控制元件的参数（刚度、阻尼）来适应工况变化，所需外部能量远小于主动控制，兼具被动控制的可靠性和主动控制的适应性。

2.2.1 磁流变液阻尼器

磁流变液在外加磁场作用下可在毫秒内从牛顿流体转变为宾汉流体，屈服应力连续可调。将其应用于轧机辊系或传动轴系，可通过改变励磁电流调节阻尼系数，实现对振动响应的半主动抑制。控制策略可采用天棚阻尼（Skyhook）或地棚阻尼（Groundhook）算法，根据相对速度和绝对速度的正负判断施加阻尼力的时机。实验表明，磁流变阻尼器可使轧机垂直振动降低30%~50%。

2.2.2 可调刚度支撑

通过压电陶瓷、形状记忆合金等智能材料驱动，改变支撑结构的等效刚度。例如，在轧机液压压下油缸的活塞杆处并联一个压电堆栈，施加电压后产生微位移，可抵消轧制力波动引起的辊缝变化^[3]。这种方法响应速度快（亚毫秒级），但位移输出小（微米级），适用于高频小幅振动抑制。

2.2.3 自调谐动力吸振器

通过改变吸振器的附加质量位置或弹簧刚度来实时跟踪激励频率变化。例如，采用伺服电机驱动丝杠调节吸振器质量块的悬臂位置，当频谱分析检测到优势频率漂移后，控制器计算并调整吸振器固有频率与之匹配。在变转速轧机中，这种装置可保持宽频带内的有效

减振。

2.3 主动振动控制方法

主动控制通过作动器向系统施加与振动方向相反的控制力,实现振动的实时抵消。冶金机械中主动控制主要应用在精密轧制的辊缝调节和传动系统的扭振抑制。

2.3.1 液压伺服主动控制

在轧机压下系统中安装伺服阀控制液压缸,通过位移传感器或压力传感器反馈辊缝或轧制力信号,控制器按PID或自适应算法输出控制电流,驱动伺服阀调节油缸位移,动态补偿轧辊的偏心运动和来料厚度波动。现代轧机已实现基于轧制力前馈和辊缝反馈的复合控制,可将厚度偏差控制在 $\pm 5\mu\text{m}$ 以内^[4]。然而,液压系统的响应频率受限于油液体积模量和伺服阀频响(通常100~200Hz),对更高频振动(如齿轮啮频)的控制能力有限。

2.3.2 压电陶瓷主动作动器

适用于高频小位移振动控制。将压电叠堆内置于轧辊轴承座与机架之间,根据振动加速度信号经功率放大后驱动压电元件输出反向位移。其控制频带可达1kHz以上,但输出位移仅数十微米,适合抑制轧辊的表面振纹(高频小幅度)。由于压电陶瓷存在迟滞非线性,需要采用电荷反馈或逆模型补偿控制策略。

2.3.3 电磁作动器

用于传动系统扭振控制。在电机与齿轮箱之间的联轴器处加装电磁转矩调节器,通过检测转速波动信号产生反向电磁转矩,抑制轴系的扭转振动。该方法响应迅速,但需要较大功率的放大器,且电磁干扰可能影响周边仪表。

2.4 结构动力学优化设计

从设计源头改善动态特性是根本性措施。结构优化包括拓扑优化、形状优化和尺寸优化三层次。拓扑优化以模态频率、动态柔度为目标,寻找材料的最优分布。例如,对轧机机架进行拓扑优化,在保证静刚度的前提下提高第一阶固有频率,使之避开轧制力基频。形状优化关注应力集中和刚度分布,通过改变立柱截面、增加加强筋等方式提高结构阻尼。尺寸优化确定关键部件的截面参数,如轧辊的辊颈直径、轴承座的壁厚等,以调整模态频率分布。优化策略中,模态频率配置是核心。

应使设备的前几阶固有频率明显偏离主要激励频率,并设置频率禁区。对于无法避免的低阶模态,应增大该模态的阻尼比(通过附加阻尼结构)。近年来,仿生结构(如蜂窝夹芯、格子结构)被引入冶金机械的设计中,在减轻重量的同时提高了比刚度和阻尼特性。

2.5 工艺参数优化与运行策略

振动控制也可从工艺操作层面入手。通过调整轧制速度、压下量、张力制度等工艺参数,改变激励频率和强度,主动避开共振区。具体做法:在调试阶段对设备进行升速扫频测试,绘制“轧制速度-振动幅值”曲线,识别出临界速度区间;在正常生产中,通过逻辑控制快速跳过该速度区间(如以 2m/s^2 以上的加速度穿越),减少共振停留时间。此外,采用变张力轧制或分段冷却工艺,可破坏振动的相干性,降低响应幅值。

3 结语

冶金机械设备的动态响应特性与振动控制是一个涉及多物理场耦合、非线性动力学和先进控制理论的前沿课题。本文系统分析了冶金机械的动态激励源、模态特性及非线性耦合行为,明确了共振风险的形成机制与评价指标。在此基础上,从被动控制、半主动控制、主动控制、结构优化及工艺调整等多个维度综述了振动控制方法,指出各方法的技术特点与适用范围。研究表明,冶金机械的振动控制不应依赖单一手段,而应建立“源头抑制-路径阻断-响应减缓”三级集成的控制策略,并贯穿于设计、制造、运行和维护的全生命周期。未来,随着智能感知、数字孪生和机器学习技术的深度融合,冶金机械振动控制将向自适应、自优化和预测性方向演进,为冶金工业的提质增效和智能化转型提供关键技术支撑。

参考文献

- [1]朱德强.冶金机械传动系统动态特性分析与振动抑制方法研究[J].山西冶金,2025(2):153-155.
- [2]和东平,王涛,刘元铭,等.板带轧机振动理论研究进展[J].机械工程学报,2024,60(7).
- [3]黄金磊,臧勇,郜志英.工艺参数对热轧机振动固有特性影响分析[J].钢铁,2021(2).
- [4]王明,徐慧东,和东平,等.颗粒阻尼吸振器对轧机辊系减振特性的研究[J].振动与冲击,2023,42(2):23-34,78.