

冷轧卷取机卷筒胀缩机构力学分析与优化

李 兰 周思远

河南安钢南方电磁新材料科技有限责任公司 河南 安阳 455000

摘 要: 冷轧卷取机卷筒胀缩机构是保障带钢卷取质量的关键核心部件, 长期高速交变工况下易出现应力集中、结构变形及配合磨损等故障, 影响生产线稳定运行。本文分析了机构结构原理与实际载荷约束, 开展静态与动力学特性研究, 梳理机构力学缺陷及各类失效机理。针对应力集中、刚度不足、磨损超标等问题, 从结构参数、部件形态、配合形式等方面完成结构优化设计。通过理论预判优化方案可有效降低结构峰值应力, 提升整体刚度与动态稳定性。

关键词: 冷轧卷取机; 卷筒胀缩机构; 力学特性; 失效机理; 优化设计

引言: 冷轧带钢生产对卷取成型精度、设备运行稳定性有着严苛要求, 卷筒胀缩机构的工作性能直接决定钢卷成型质量与生产效率。现阶段多数机组胀缩机构沿用传统结构参数, 长期连续生产过程中, 受交变张力、高速离心载荷与反复胀缩作用, 普遍存在变形量大、局部应力集中、零部件磨损较快等问题, 极易引发松卷、卡滞、部件开裂等故障。为解决现场实际故障问题, 提升机构力学承载性能与使用寿命, 本文对胀缩机构开展力学特性分析与结构优化研究, 为提升冷轧设备运行可靠性提供技术支撑。

1 冷轧卷取机卷筒胀缩机构结构与工作原理

1.1 胀缩机构整体结构组成及核心零部件

冷轧卷取机卷筒胀缩机构是保障带钢稳定卷取的核心执行结构, 整体为斜楔式胀缩结构, 结构紧凑、承载强度高, 适配高速冷轧生产工况。机构主要由主轴、锥形斜楔、胀缩瓦片、推杆、复位弹簧及导向限位组件构成。主轴为整体承载基体, 承担全部卷取载荷; 锥形斜楔为动力传动核心, 通过轴向位移转化为径向胀缩动力; 四块弧形瓦片均匀分布于主轴外侧, 是直接与钢卷接触的工作部件。复位弹簧配套安装于瓦片与主轴间隙, 设备卸力后为瓦片提供收缩回位动力, 导向组件用于限制瓦片运动轨迹, 避免工作过程中出现偏移、卡滞问题, 保障机构运行稳定性。

1.2 卷筒胀紧、收缩工作流程与运动机理

卷筒胀缩动作由液压系统提供动力, 核心依靠斜楔斜面传动实现运动转换。胀紧工作时, 液压推杆推动锥形斜楔沿主轴轴向向前移动, 斜楔斜面挤压内侧瓦片, 克服弹簧弹力推动瓦片沿径向向外扩张, 直至瓦片外径达到工作尺寸, 贴合钢卷内径完成胀紧定位, 为带钢卷取提供支撑。卷取作业完成后, 液压系统卸压, 推杆撤

回, 锥形斜楔复位, 瓦片在复位弹簧的拉力作用下径向收缩, 使卷筒外径缩小, 消除与钢卷的贴合压力, 便于钢卷顺利卸卷。整套动作循环往复, 可精准完成连续胀紧、卸卷作业。

1.3 胀缩机构工况载荷与工作约束条件

实际冷轧生产中, 胀缩机构长期承受径向钢卷抱紧力、带钢拉伸张力及高速运转产生的离心载荷, 载荷具有交变、持续的特点。工作过程中需满足多项约束条件, 瓦片胀缩行程需严格控制在标准区间, 保证胀紧精度, 避免钢卷松紧不均; 机构整体需具备足够刚度, 抑制高速卷取时的形变与振动。各配合零部件间隙需保持合理范围, 既要保障胀缩动作灵活顺畅, 杜绝卡滞故障, 又要降低配合磨损, 满足冷轧生产线连续、高强度的工作要求^[1]。

2 卷筒胀缩机构力学特性分析

2.1 卷筒胀缩机构静态力学特性分析

结合冷轧卷取机斜楔式胀缩结构的实际装配形式与工作状态, 其静态力学特征主要体现在承载受力、应力分布与结构刚度三个方面。(1) 静态承载受力特征。卷筒完成胀紧后, 瓦片与钢卷内圈完全贴合, 持续承受钢卷径向抱紧压力和带钢卷取静态张力。载荷通过瓦片均匀传递至锥形斜楔, 再由斜楔传递至主轴基体。稳态工况下, 轴向液压推力与斜楔接触面的分力形成力学平衡, 瓦片径向支撑力与钢卷收缩压力相互抵消。相较于普通传动结构, 胀缩机构的受力具有多点均布、载荷集中于斜楔接触区域的特点, 核心承载区域集中在斜楔斜面、瓦片内侧支撑面与主轴配合段。(2) 静态应力与形变分布。在额定胀紧行程和标准卷重工况下, 机构最大应力集中位置出现在斜楔接触棱边与瓦片根部过渡区域。由于零件装配存在配合间隙, 局部接触区域会出现

应力叠加,导致局部应力高于结构平均应力。卷筒整体形变以径向微变形为主,瓦片外侧受载后产生微量扩张形变,主轴受轴向挤压力产生微小压缩形变,形变数值直接影响钢卷卷取精度,形变过大会造成钢卷内圈松卷、错层等工艺缺陷。(3)静态刚度特性。机构静态刚度由主轴基体刚度、斜楔接触刚度、瓦片结构刚度共同决定。冷轧生产中,卷筒长期处于静态承压状态,结构刚度不足会导致持续塑性变形,造成胀紧精度下降、重复性偏差增大。实际工况表明,固定胀紧行程下,机构刚度随钢卷载荷增大呈小幅衰减趋势,载荷超限后刚度衰减速率明显加快,直接影响设备稳态工作性能。

2.2 卷筒胀缩机构动态力学特性分析

冷轧卷取过程为连续高速运转工况,卷筒始终处于旋转、载荷波动、启停交替的动态状态,动态力学特性直接决定设备运行稳定性与疲劳使用寿命。相较于静态工况,动态载荷具有交变、冲击、瞬时波动的显著特征,力学响应规律更为复杂。(1)动态交变载荷响应。带钢连续卷取过程中,钢卷直径随卷取时长持续增大,卷筒承受的径向抱紧力、切向摩擦力呈周期性变化,形成交变载荷。同时,生产线速度波动、带钢厚度偏差会造成卷取张力瞬时波动,使胀缩机构持续承受交变冲击载荷。长期交变载荷作用下,机构配合间隙不断变化,接触应力反复增减,是结构产生疲劳损伤的主要诱因。

(2)高速旋转离心力学特性。卷筒高速旋转时,瓦片、斜楔等运动部件会产生离心力,离心力随转速提升呈平方级增长。离心力会叠加在静态胀紧载荷上,增大瓦片径向扩张趋势,使斜楔接触面挤压应力进一步提升。高转速工况下,离心载荷不可忽略,极易导致局部应力超标,引发瓦片磨损、斜楔滑移等故障。(3)动态振动与冲击特性。设备启停、卷取收尾卸荷、带钢跑偏纠偏过程中,胀缩机构会产生瞬时冲击振动。振动会破坏结构受力平衡,使局部接触位置出现瞬时应力峰值,反复冲击会加剧零部件配合面磨损,造成装配间隙扩大。长期动态振动作用下,卷筒胀紧精度持续下降,最终出现胀紧不到位、卸卷卡滞等现场故障,严重影响冷轧生产线连续作业效率^[2]。

3 胀缩机构力学性能缺陷与失效机理

卷筒胀缩机构长期处于交变载荷、高速运转与反复胀缩的工作环境,结构本身存在固有力学缺陷,长期运行易出现各类失效问题,直接影响卷取精度与设备稳定性。(1)局部应力集中缺陷与结构失效。胀缩机构斜楔接触面、瓦片根部圆角过渡区域为应力集中高发部位。原有结构过渡圆角尺寸偏小,接触边缘存在锐角结

构,在胀紧承压与高速卷取工况下,局部应力会大幅超出结构平均应力。长期运行中,应力集中区域会产生微裂纹,裂纹持续扩展后会引发瓦片变形、开裂等结构失效,造成卷筒胀紧精度下降。(2)交变载荷下的磨损与配合失效。生产线连续作业过程中,机构反复完成胀紧、收缩动作,斜楔与瓦片、主轴的配合面持续产生相对摩擦。动态载荷引发的微小结构形变,会加剧配合面磨损,导致装配间隙持续扩大。配合间隙超标后,卷筒运行时会出现径向跳动、胀紧偏移问题,最终出现松卷、卸卷卡顿等故障。(3)结构参数不合理引发的刚度失效。现有胀缩机构核心零部件壁厚、斜楔倾角等参数沿用传统标准,针对性较差。面对大规格、高张力冷轧带钢生产工况,机构整体刚度储备不足,受载后径向形变量过大。持续的弹性形变累积会产生塑性变形,导致卷筒有效胀紧行程衰减,力学承载性能持续劣化,无法满足高强度冷轧生产需求。

4 基于力学性能的胀缩机构优化设计

4.1 优化设计目标、约束条件与设计变量选取

本次优化以解决现场结构失效问题为核心,结合冷轧卷取机设备安装空间、生产工况及结构设计规范,明确优化体系的目标、约束与变量,保证优化方案具备工程实用性。(1)优化设计目标。以降低机构关键部位应力集中、提升整体结构刚度为核心目标,控制卷筒受载后的径向变形量,减小动态工况下的应力波动幅值。优化结构配合形式,降低反复胀缩过程中的零部件磨损速率,延长机构疲劳使用寿命,在不改变设备原有安装尺寸与工作流程的前提下,全面提升胀缩机构承载稳定性与作业精度。(2)设计约束条件。优化过程严格遵循设备实际工作约束,卷筒整体外形尺寸、安装基准、轴向行程保持不变,满足原有设备装配要求;结构最大应力不得超过材料许用应力,杜绝塑性变形;胀缩机构胀紧精度、响应速度需满足冷轧生产工艺标准;零部件配合间隙控制在行业允许范围内,避免出现卡滞、偏移等故障。(3)设计变量选取。结合失效机理分析结果,选取对力学性能影响显著的结构参数作为优化变量,主要包括瓦片根部过渡圆角半径、斜楔工作面倾角、核心零部件壁厚、配合面接触宽度等关键参数。剔除对结构力学性能影响较小、无需改动的装配参数,保证优化变量精准可控,降低优化复杂度。

4.2 以降低应力、提升刚度为核心的结构优化

针对现有机构应力集中严重、刚度储备不足的核心问题,从结构形态、受力形式、承载体系三个维度开展优化,改善机构整体力学性能,适配高强度卷取工况。

(1) 应力集中结构优化。原有瓦片根部、斜楔接触棱边存在锐角过渡,是局部应力超标的主要原因。优化过程中,对瓦片根部直角结构进行圆角过渡处理,增大过渡圆弧半径,平缓结构受力截面变化,消除应力突变区域。对斜楔工作面边缘进行倒角处理,避免接触应力集中于棱边,实现接触面载荷均匀分布,大幅降低局部峰值应力。(2) 整体刚度结构优化。基于机构受力传递路径,对主轴、瓦片等核心承载结构进行刚度强化。在不增大设备整体体积的前提下,适度优化瓦片有效承载厚度,提升瓦片抗变形能力;优化主轴承载段结构,减少轴向挤压与径向载荷作用下的弹性形变。通过优化受力传递路径,使载荷均匀分散至整体结构,避免局部结构单独承载,提升机构整体刚度与载荷适应性。(3) 动态稳定性优化。针对高速卷取工况下应力波动、振动冲击问题,优化机构接触配合结构,提升接触面贴合精度,减小动态运行过程中的配合间隙波动,抑制交变载荷引发的结构振动,降低动态应力波动幅度,提升机构高速运行状态下的力学稳定性。

4.3 核心零部件尺寸参数与结构形式优化

结合现场失效故障特征,对胀缩机构瓦片、斜楔、复位结构、导向结构等核心零部件进行参数优化与结构改进,解决原有结构磨损快、形变量大、定位精度差的问题。(1) 瓦片结构参数优化。原有瓦片结构壁厚均匀性较差,受力薄弱区域易产生形变。优化后调整瓦片截面尺寸,增厚受力根部区域壁厚,保留外侧贴合面标准尺寸,保证与钢卷贴合精度不变;优化瓦片导向槽结构,修正导向限位角度,避免往复运动中出现偏移磨损,提升瓦片径向运动的同轴度与稳定性。(2) 斜楔结构形式优化。斜楔作为力转换核心部件,原有倾角参数易导致载荷集中。在满足胀缩行程要求的前提下,微调斜楔工作面倾角,优化轴向力与径向力的转换比例,降低斜面单位接触压力;同时加宽斜楔有效接触宽度,分散接触载荷,减少斜面磨损与挤压变形,提升力传递平稳性。(3) 辅助配合结构优化。优化复位弹簧参数,匹配优化后结构的胀缩阻力,保证收缩动作快速到位、无

卡顿;改进导向限位结构,减小往复运动摩擦损耗,控制零部件配合间隙,避免间隙过大引发的径向跳动,从结构层面降低疲劳失效与磨损失效概率^[3]。

4.4 优化方案模型建立与理论力学性能预判

完成结构优化参数确定与结构形式改进后,依据冷轧卷取机卷筒实际装配尺寸,建立优化后胀缩机构三维实体模型,为后续仿真验证与力学性能校核提供基础模型。建模过程严格遵循优化参数,保留设备原有装配关系、运动约束与边界条件,简化螺栓、细小倒角等对整体力学性能影响极小的结构,保证模型精准度与计算效率。结合经典力学理论对优化后机构性能进行预判,优化后的圆角过渡结构可彻底消除结构锐角应力集中区域,关键部位峰值应力显著下降;加厚承载结构与优化后的接触形式,可有效降低结构径向与轴向变形量,整体结构刚度得到提升。优化后的斜楔传力结构受力更加均匀,动态工况下载荷波动幅度减小,零部件摩擦磨损速率降低,可有效解决原有机构松卷、胀紧精度不足、局部开裂等现场问题。

结束语:本文完成冷轧卷取机卷筒胀缩机构的结构原理分析、动静力学特性研究及结构优化工作,明确了机构应力集中、刚度不足的主要诱因,分析了交变载荷下的磨损与失效规律。通过优化部件过渡结构、截面参数与斜楔配合形式,有效改善了机构受力状态,减小结构形变与载荷波动。优化方案保留原有设备装配条件与工作原理,工程适配性强,能够显著提升卷筒运行精度与结构稳定性,有效降低设备故障率,满足高强度冷轧连续生产的工况需求。

参考文献

- [1]史晓艳,金琳,丁建国,等.冷轧卷取机变频控制系统改造及应用[J].设备管理与维修,2025,(1):109-111.
- [2]孙建爽,李文山,于旭,等.冷轧卷取机张力控制研究[J].冶金设备,2024,(1):17-21+65.
- [3]朱长月,王建华,王会宾.冷轧卷取机带头褶皱问题分析及控制[J].山西冶金,2024,47(12):269-271.