

汽轮机启动过程中热应力分析与控制策略

石 旭

鄂尔多斯市西金余热发电有限公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要: 汽轮机启停阶段的热应力是引发设备疲劳损伤、降低机组运行寿命的核心因素。本文依托热弹性力学理论, 阐释汽轮机四类启动工况的热力特性, 剖析热应力的产生机理与关键影响因素, 结合数值仿真明确热应力分布规律及运行危害。从工况参数优化、设备结构调控、智能监测管控多维度制定热应力控制策略, 经工况对比验证, 该策略可有效降低热应力峰值, 提升机组启动安全性与运行经济性, 为机组稳定运行提供技术支撑。

关键词: 汽轮机; 启动过程; 热应力分析; 控制策略

引言: 汽轮机作为电力生产核心设备, 启动过程的工况动态变化易使转子、汽缸等厚壁部件产生不均匀温度场, 诱发交变热应力, 长期累积会引发部件裂纹、动静摩擦等故障, 制约机组安全高效运行。为解决机组不同启动工况下热应力超标、应力调控滞后等问题, 本文系统探究热应力生成机制与影响规律, 结合仿真分析结果, 针对性构建全方位热应力优化控制体系, 旨在精准管控热应力, 降低设备损耗, 保障机组全工况稳定启停与长效运行。

1 汽轮机启动过程热应力基础理论与产生机理

1.1 汽轮机启动过程分类及热力特性

(1) 冷态、温态、热态、极热态启动以机组停机后金属温度为划分依据。冷态为机组长时间停机, 转子、汽缸金属温度接近环境温度; 温态为停机数小时, 部件存有低温余热; 热态为短时间停机, 核心部件保持较高工作温度; 极热态为紧急停机后即刻重启, 金属温度接近额定运行温度。四类工况的暖机时长、升速升压速率、进汽参数均存在显著差异。(2) 不同启动工况下机组温压场动态变化规律差异明显。冷态启动时, 低温金属与高温蒸汽温差大, 温度场、压力场变化速率快, 分布梯度大; 温态启动参数变化平缓, 场域过渡均匀; 热态与极热态启动初始金属温度高, 蒸汽匹配温差小, 温压场波动小, 但局部易出现短时参数突变, 动态响应更灵敏^[1]。(3) 各类启动工况运行风险与热负荷特征不同。冷态启动热负荷冲击强, 易出现大幅温差应力; 温态启动热负荷适中, 运行风险最低; 热态、极热态启动无需长时间暖机, 但热负荷集中, 易引发部件疲劳损伤, 极热态还存在膨胀不均、动静摩擦的运行风险。

1.2 热应力基础理论

(1) 热弹性力学基本原理是热应力研究的核心, 材料受热产生自由热变形, 当变形受到内部或外部约束无

法自由伸缩时, 就会产生热应力。热应力产生的核心条件为部件存在温度梯度、结构变形受约束、材料具备弹性形变特性。(2) 汽轮机关键部件热应力计算遵循弹性力学公式, 转子、汽缸等厚壁部件核心计算公式以温差、弹性模量、线膨胀系数为核心参数, 核心公式为 $\sigma = E\alpha\Delta T/(1-\mu)$, 其中E为弹性模量, α 为线膨胀系数, ΔT 为部件温差, μ 为泊松比, 可精准核算部件瞬时热应力数值。(3) 热应力、热变形与热疲劳密切关联。热应力是热变形的内在驱动力, 温度变化引发应力变化, 使部件产生可逆热变形; 频繁启停导致热应力反复交变, 会引发塑性累积变形, 逐步造成材料损伤, 最终形成热疲劳裂纹, 降低部件使用寿命。

1.3 汽轮机启动热应力产生机理

(1) 部件内外温差形成温度梯度应力。启动时高温蒸汽加热部件表层, 表层温度快速升高膨胀, 而部件内部升温滞后、膨胀量小, 表层膨胀受内部低温区域约束, 进而产生压应力, 内部则产生拉应力, 形成梯度应力场。(2) 汽缸与转子膨胀差异产生约束应力。转子体积小、受热快、膨胀速率大, 汽缸壁厚、受热滞后、膨胀缓慢, 二者轴向与径向膨胀量不匹配, 相互形成机械约束, 阻碍自由膨胀, 最终产生约束应力。(3) 运行参数诱发应力叠加效应。启停速率过快、暖机时长不足, 会加剧部件温差与膨胀差值, 使温度梯度应力、机械约束应力同步增大, 多重应力相互叠加, 大幅提升瞬时热应力峰值, 加剧部件损伤风险。

2 汽轮机启动过程中热应力关键影响因素与仿真分析

2.1 设备结构与材质对热应力的影响

(1) 汽轮机转子、汽缸均为厚壁承压部件, 结构尺寸与壁厚差异直接决定热应力分布特性。汽缸壁厚更大、结构复杂且存在法兰、凹槽等结构, 蒸汽加热时内外换热温差显著, 易产生集中应力。转子为回转对称结

构,壁厚均匀性优于汽缸,但轴径梯度变化区域会出现应力集中,壁厚越大,温度传导滞后性越强,热应力峰值越高、分布越不均匀。(2)金属材质热物性参数直接影响热应力生成强度。导热系数较高的金属可快速传递热量,缩小部件内外温差,有效降低温度梯度应力;热膨胀系数越大的材质,温度变化引发的伸缩变形量越大,在结构约束作用下会产生更强的热应力,是决定部件热应力响应特性的核心材质参数。(3)设备长期运行产生的老化、材质缺陷会引发热应力异常。金属疲劳老化会导致材质导热、膨胀性能劣化,局部传热不均;材质气孔、夹杂、裂纹等缺陷会破坏温度传递的连续性,造成局部应力集中,使常规启动工况下的热应力超出标准范围,加剧部件局部损伤^[2]。

2.2 运行参数对热应力的影响

(1)升温速率与升负荷速率是热应力峰值的核心影响参数。速率过快会使部件表层温度急剧攀升,内部温度响应滞后,大幅扩大内外温差,直接提升热应力峰值;速率过慢虽可降低应力,但会增加机组能耗与启动时长,合理匹配升降速率是控制热应力的关键。(2)暖机时间与温度对温度场均匀性具备良好调控作用。充足的暖机时长可让热量充分传导至部件内部,弱化温度梯度,使应力均匀释放;适配的暖机温度可匹配部件升温节奏,避免温差突变,有效均衡整机温度场,抑制热应力集中现象。(3)蒸汽温度、压力、流量的波动会产生明显应力扰动。蒸汽参数骤变会打破稳定换热状态,使部件表层温度反复突变,产生交变瞬时应力,干扰应力稳定分布,频繁参数波动会持续叠加应力损伤,危害设备安全。

2.3 基于数值模拟的启动热应力仿真分析

(1)仿真模型搭建以汽轮机转子、汽缸核心部件为对象,通过三维建模还原设备真实结构,简化细小次要结构后,对模型进行精细化网格划分,重点加密应力集中区域网格,保障仿真计算的精度与可靠性。(2)结合冷、温、热、极热态四类启动工况,定义对应的蒸汽温度、压力、换热系数等热力边界条件,匹配机组实际启动流程,模拟不同工况下部件的受热换热过程。(3)仿真结果可直观呈现各工况热应力分布规律,明确汽缸法兰、转子轴肩等核心应力峰值区域,获取热应力随启动时长的动态变化曲线,为热应力控制策略提供数据支撑。

2.4 热应力危害分析

(1)机组频繁启停产生的交变热应力,会使金属材料反复承受拉伸与压缩应力,引发微观塑性变形累积,

逐步产生金属热疲劳损伤。长期作用下,部件应力集中区域会萌生微裂纹,并随启停次数增加持续扩展,最终破坏部件结构完整性。(2)启动过程中热应力超标会引发汽缸不均匀膨胀、变形翘曲,改变机组通流间隙,极易造成动静部件摩擦、碰磨等故障,严重时会导致转子弯曲、密封损坏,直接影响机组启动安全性,引发设备故障与停机隐患^[3]。(3)长期应力累积与反复疲劳损伤,会持续消耗设备使用寿命,降低金属材料力学性能与结构稳定性。同时异常热应力会大幅提升机组运行故障概率,降低机组运行可靠性与安全性,给电厂经济稳定运行带来长期隐患。

3 汽轮机启动过程热应力优化控制策略

3.1 基于工况匹配的启动参数优化控制

(1)针对汽轮机冷态、温态、热态、极热态四类启动工况的热力特性,定制差异化升温、升负荷速率控制方案。冷态启动部件整体温度低、内外温差耐受度差,需采用低速升温、阶梯式升负荷模式,规避大温差引发的强热应力;温态启动热力条件适中,可采用常规速率平稳推进启动流程;热态与极热态启动金属基础温度高,无需低速预热,可适当提升升温升负荷速率,同时严控速率上限,避免瞬时应力激增,实现不同工况下应力与启动效率的平衡。(2)优化传统暖机工艺,推行分级暖机控制模式,精准设定各级暖机时长与温度阈值。根据汽缸、转子的传热滞后特性,划分低速暖机、中温稳温、高温过渡三级暖机阶段,结合机组容量与设备壁厚参数,量化各阶段温度停留阈值。通过阶梯式恒温暖机,让热量充分渗透至部件内部,逐步消除部件内外温度梯度,缓解应力集中问题,解决传统一次性暖机温度不均、应力残留的缺陷^[4]。(3)强化锅炉与汽轮机协同调控,稳定启动阶段蒸汽介质参数,减小温度、压力、流量波动幅度。机组启动初期,锅炉燃烧工况不稳定,易出现蒸汽参数频繁扰动,会使汽轮机部件承受交变热应力。通过优化锅炉升温升压逻辑,匹配汽轮机启动节奏,平稳控制蒸汽参数变化梯度,杜绝参数骤升骤降,保持进汽介质稳定,降低瞬时应力扰动对核心部件的损伤。

3.2 设备结构与状态优化调控

(1)对汽轮机转子、汽缸、法兰等关键部件进行结构优化,从根源降低温度梯度与应力集中。针对汽缸法兰厚重、边角突变、通流结构不均等应力高发区域,优化结构形制,简化突变截面、均匀壁厚分布,减少局部传热死角与结构约束;对转子轴肩、叶轮等应力集中部位进行圆角优化、结构过渡处理,均衡部件受热与传热

速率,弱化结构约束带来的附加热应力。(2)优化机组启动预热与疏水工艺,全面改善设备整体温度均匀性。启动前开展整机充分预热,提升设备基础温度,缩小环境温度与工作温度的初始差值;优化高低压疏水系统布置与疏水时序,及时排出管道及缸体内部冷凝水,避免局部积水导致的受热不均,消除部件局部低温区域,有效均衡整机温度场,减少温差型热应力。(3)建立常态化设备检测与老化评估机制,规避材质异常引发的应力风险。定期对转子、汽缸等核心部件开展无损检测,排查材质夹杂、微裂纹、疲劳老化等缺陷;持续监测金属材料导热、热膨胀等物性参数的衰减变化,对老化严重、性能劣化的部件及时检修维护。通过提前排查材质隐患,避免因材质不均、缺陷导致的局部应力异常增高问题。

3.3 热应力实时监测与智能管控体系搭建

(1)搭建汽轮机热应力在线监测系统,依托缸体、转子布设的高精度温度、振动、应变传感器,实时采集核心部件运行数据。系统核心监测参数包括部件内外壁温度、温差、升温速率、应变数值及机组负荷变化率,通过内置热应力计算模型,实时换算部件瞬时热应力数值、应力分布状态,实现热应力的全天候动态监测。

(2)构建基于监测数据的启动过程动态调整机制,打破固定参数启动模式。系统实时对比实测热应力与安全阈值,当监测到应力接近限值时,自动反馈调控,放缓升温、升负荷速率,延长暖机时长;当应力处于安全区间时,维持平稳启动节奏,实现启动参数随设备热力状态的自适应调整,避免人工调控的滞后性与偏差性^[5]。

(3)引入智能算法优化启停流程,实现热应力精准闭环控制。依托大数据与机器学习算法,拟合不同工况下热应力的变化规律,迭代优化启动控制逻辑,修正传统固定控制曲线的弊端。通过智能系统全程管控启动、暖机、升负荷全过程,自动匹配最优运行参数,形成“监测—分析—调控—修正”的闭环管控体系,大幅提升热应力控制精度。

3.4 管控效果验证与优化总结

(1)通过多机组、多工况对比试验,开展优化策略

应用前后热应力数据对比分析。结果表明,分工况参数调控与智能管控模式下,汽轮机转子、汽缸热应力峰值显著降低,应力波动幅度大幅减小,交变应力循环次数明显减少,应力集中区域的应力数值始终处于安全允许区间,优化效果直观显著。(2)优化策略全面提升机组启动安全性与运行经济性。热应力的精准管控有效杜绝了汽缸变形、转子弯曲、动静摩擦等故障,大幅降低设备损耗率与故障停机概率;同时智能自适应调控避免了过度暖机、低速运行等低效工况,缩短机组启动时长,降低启动阶段能耗,全面提升机组运行综合效率。(3)当前热应力优化控制策略仍存在一定局限性,对极端工况、设备突发异常工况的自适应调控能力不足,老旧机组传感器精度不足会影响监测与调控精度。后续可通过升级高精度监测设备、优化智能算法模型、拓展极端工况数据库,进一步完善热应力管控体系,实现全工况、全生命周期的精准热应力优化控制。

结束语

本文完整分析了汽轮机启动热应力的产生机理、影响因素及运行危害,搭建了工况适配、设备优化、智能管控一体化的热应力控制体系。通过差异化参数调控与智能闭环管控,有效改善了机组热应力集中问题,提升了设备运行稳定性。同时,研究明确了现有管控技术的短板,后续将聚焦极端工况调控、设备精度升级与算法迭代,持续完善热应力管控体系,助力机组安全、经济、高效运行。

参考文献

- [1]董洪潮,曹敏,朱雷,等.汽轮机转子冷态启动过程的温度场和热应力研究[J].化工设备与管道,2024,61(1):63-69.
- [2]曾娜.关于汽轮机启动进程的改进研究[J].长春大学学报,2023,33(2):85-90.
- [3]李智强.邯峰发电厂660MW汽轮机自动启停过程中的应力控制[J].河北电力技术,2022,5(6):14-18.
- [4]雷栋.300MW机组启停过程中全程使用汽动给水泵组的研究与应用[J].科技传播,2025,7(18):44-45.
- [5]卢俊,翟春华.联合循环机组启停过程中汽轮机转子热应力控制及运行调整[J].燃气轮机技术,2023,11(3):47-51.