

快速启停的电力锅炉热应力监测与优化控制方法

侯建龙

山西漳山发电有限责任公司 山西 长治 046000

摘要:在新能源大规模接入电网、电力系统对灵活性要求日益提升的背景下,电力锅炉快速启停能力成为保障电网稳定运行的关键。但问题是,快速启停过程中锅炉热应力问题突出,严重影响设备安全与运行效率。基于此,本论文针对快速启停工况下电力锅炉热应力问题,深入研究热应力监测与优化控制方法。通过分析快速启停过程中热应力产生机理,系统阐述基于传感器技术、光纤传感技术、红外热成像技术的热应力监测方法,以及模型预测控制、智能优化算法等优化控制策略。希望论文的研究能够提升电力锅炉快速启停安全性、可靠性及经济性提供理论依据与技术支持。

关键词:快速启停;电力锅炉热应力监测;优化控制方法

引言

在“双碳”目标和能源结构转型背景下,风电、光伏等新能源装机容量快速增长,其间歇性、波动性特征对电网调峰能力提出更高要求。电力锅炉作为传统能源转换设备,需具备快速启停能力以灵活响应电网负荷变化,参与系统调峰。但是,快速启停过程中,锅炉各部件温度急剧变化,导致热应力大幅波动,易引发部件变形、裂纹扩展甚至结构失效,严重威胁锅炉安全稳定运行。据统计,因热应力问题导致的锅炉故障占非计划停机事件的30%以上。因此,研究快速启停电力锅炉热应力监测与优化控制方法,对保障锅炉安全、提高能源利用效率、推动电力系统灵活性提升具有重要意义。

1 快速启停电力锅炉热应力产生机理分析

1.1 温度梯度引发的热应力

在电力锅炉快速启停过程中,温度梯度是引发热应力的关键因素之一。锅炉各部件由于结构、材料以及所处位置的不同,在加热或冷却过程中,温度变化的速率和幅度存在显著差异,从而形成温度梯度。

第一,在启动阶段,锅炉受热面首先接触高温的火焰或烟气,其表面温度迅速升高。而内部由于热传导需要一定时间,温度上升相对缓慢。这种现象就导致受热面内外表面之间存在较大的温度差。而对于一些大型锅炉部件,如汽包,其体积庞大,结构复杂。在启动过程中,汽包上下壁、内外壁之间也会形成明显的温度梯度。汽包上部直接与蒸汽接触,受热较快;下部与水接触,受热较慢。再加上,汽包壁厚较大,热量从外壁向内壁传递需要较长时间。这种温度分布的不均匀性导致汽包各部分膨胀程度不同,进而产生热应力^[1]。如果温度梯度过大,热应力可能会超过材料的屈服强度,导致部

件发生塑性变形,长期作用下还会引发裂纹等缺陷。

第二,在停机阶段,情况则相反。锅炉部件温度迅速下降,但各部分冷却速度不同。受热面外壁直接与低温烟气或空气接触,冷却较快,而内壁由于水的冷却作用相对滞后,温度下降较慢。这又会导致部件内外壁产生相反的热膨胀差异,从而产生压应力。同样,对于汽包等大型部件,停机时上下壁、内外壁的温度梯度也会引发相应的热应力。另一方面,锅炉不同部件之间的温度变化差异也会产生热应力。如,过热器、再热器等受热面与联箱、管道等连接部件之间,由于材料、结构以及受热情况的不同,在启停过程中温度变化不一致,导致连接部位产生热应力。一旦这些热应力得不到有效控制,可能会导致连接部位松动、泄漏甚至断裂等问题。

1.2 压力变化与热应力耦合作用

快速启停过程中,锅炉内部压力也处于动态变化状态。启动时,随着蒸汽产生和压力上升,金属部件承受内压;停机时,压力迅速下降。压力变化与热应力相互耦合,进而加剧了部件受力的复杂性。

当锅炉启动升压时,汽包等压力部件内部压力逐渐升高,金属壁面受到向外的压力作用。与此同时,由于温度梯度的存在,部件内部已经产生了热应力。如果内压与热应力的方向一致,像是在汽包升压过程中,内压使汽包壁向外膨胀,而热应力也是使外壁有向外膨胀的趋势,那么这两种应力会相互叠加,进一步增大部件实际承受的应力。当叠加后的应力超过材料的许用应力时,就可能引发部件的变形、开裂等问题。相反,当锅炉停机降压时,内部压力迅速下降,金属壁面受到的压力减小,甚至可能出现局部的拉应力。此时,如果热应力的方向与压力变化产生的应力方向相反,就可能导致

应力集中现象。

另一方面,压力变化与热应力的耦合作用还受到部件结构和材料性能的影响。不同结构的部件在压力和热应力作用下的应力分布不同,如,球形部件和圆柱形部件在相同压力和温度变化下的应力分布存在差异^[2]。并且,材料的弹性模量、泊松比等力学性能也会影响应力的大小和分布。因此,在锅炉快速启停过程中,需要综合考虑压力变化和热应力的耦合作用,合理控制启停速度和压力变化率,以减少部件的应力水平,保证锅炉的安全运行。

1.3 材料疲劳与热应力累积效应

频繁的快速启停使锅炉部件经历多次温度、压力循环,导致材料疲劳损伤。每次启停过程中的热应力循环都会使材料内部产生微观裂纹,随着启停次数增加,裂纹逐渐扩展,形成宏观裂纹,最终影响部件结构完整性。

在快速启停过程中,锅炉部件承受着交变的热应力作用。启动时,温度升高产生拉应力;停机时,温度降低产生压应力。交变的热应力会使材料内部的晶粒发生滑移和变形,当应力超过材料的疲劳极限时,就会在材料内部产生微观裂纹。这些微观裂纹在后续的启停循环中不断扩展,逐渐形成宏观裂纹。如,过热器管在频繁的快速启停过程中,由于温度和压力的周期性变化,管壁承受着交变的热应力和内压应力。而随着裂纹的扩展,过热器管的壁厚逐渐减薄,强度降低,最终可能导致过热器管爆管等严重事故。

而材料疲劳与热应力累积效应还与启停速度、温度变化幅度等因素有关。启停速度越快,温度变化幅度越大,热应力循环的幅值就越大,对材料的损伤也就越严重。除此之外,材料的微观结构、表面质量等因素也会影响其疲劳性能。

2 电力锅炉热应力监测方法

2.1 基于传感器技术的监测

2.1.1 应变片传感器监测

应变片传感器通过粘贴在锅炉部件表面,将机械应变转化为电阻变化,进而测量热应力。在锅炉汽包、集箱等关键部位布置应变片,可实时获取部件表面应力数据^[3]。其优点是测量精度高、响应速度快,但存在粘贴工艺要求高、长期稳定性差等问题,且只能监测表面应力,无法反映内部应力状态。

2.1.2 压力传感器与温度传感器协同监测

通过在锅炉内部安装压力传感器测量介质压力,结合温度传感器获取的温度数据,利用热-力耦合模型计算热应力。如,在水冷壁管进出口布置压力、温度传感

器,根据伯努利方程和热传导方程,可间接推算管壁热应力分布,该方法能综合反映压力与温度对热应力的影响,但计算模型准确性依赖于参数设置。

2.2 光纤传感技术监测

光纤传感技术利用光纤的光弹效应和热光效应,实现对热应力的分布式测量。将光纤光栅传感器植入锅炉部件内部或沿表面铺设,当部件受热应力作用时,光纤光栅中心波长发生漂移,通过解调仪测量波长变化,可反演热应力大小和分布。与传统传感器相比,光纤传感具有抗电磁干扰、耐高温、可实现长距离分布式测量等优势,能够实时监测锅炉部件不同位置的热应力变化情况,尤其适用于复杂高温环境下的热应力监测。

2.3 红外热成像技术监测

红外热成像技术基于物体热辐射原理,通过检测物体表面温度分布,间接反映热应力状态。快速启停过程中,热应力集中区域会因材料变形、热传导异常等导致温度异常,红外热像仪可捕捉这些温度差异,生成温度场图像^[4]。技术人员通过分析温度场分布及变化趋势,判断热应力集中部位和程度。该方法具有非接触、可视化程度高、检测范围广等特点,可快速对锅炉整体进行热应力筛查,但存在温度-应力转换模型精度不足、受环境因素影响大等问题,需结合其他监测方法提高准确性。

3 电力锅炉热应力优化控制方法

3.1 模型预测控制(MPC)

模型预测控制以锅炉热-力耦合模型为基础,通过建立未来一段时间内的热应力预测模型,根据当前工况和控制目标,滚动优化控制策略。在快速启停过程中,MPC系统实时采集温度、压力等数据,预测未来热应力变化趋势,以热应力最小化、启停时间最短化为目标,优化调整燃烧速率、给水流量、蒸汽排放等控制参数。比如,在锅炉启动阶段,MPC系统根据预设的升温曲线和热应力约束条件,动态调整燃料供给量,使锅炉在满足快速启动要求的同时,将热应力控制在安全范围内。该方法能够有效处理多变量、强耦合、时变的热应力控制问题,但对模型准确性要求较高。

3.2 智能优化算法应用

3.2.1 遗传算法优化

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)源于对生物进化过程的模拟,通过选择、交叉、变异等算子,在庞大的控制参数空间中进行全局寻优。在电力锅炉热应力控制场景下,遗传算法以热应力峰值、应力波动范围等关键指标作为适应度函数,对燃烧控制参数(如燃料供给量、空气配比)和启停操作流程(如升温速率、降压策

略)进行优化。算法首先将控制参数编码为基因序列,形成初始种群;随后通过选择操作筛选出适应度较高的个体,通过交叉操作实现基因重组,通过变异操作引入新的基因组合,经过多代进化逐步逼近最优解。

遗传算法的全局搜索能力使其适用于复杂非线性系统的优化,尤其在处理电力锅炉热应力控制这类多参数、多约束问题时表现突出。它能够跳出局部最优陷阱,在广阔的参数空间中寻找全局最优控制方案,从而有效降低热应力对锅炉部件的损伤。但该算法也存在计算复杂度高、收敛速度较慢的缺点,实际应用中需合理设置种群规模、交叉变异概率等参数,以平衡优化效果与计算效率。

3.2.2 粒子群优化算法(PSO)

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)模拟鸟群觅食行为,通过粒子在解空间中的位置更新实现优化目标。在热应力控制过程中,每个粒子代表一组锅炉运行参数组合,粒子根据自身历史最优位置和群体历史最优位置调整移动方向与速度,不断向最优解靠近。当系统监测到热应力异常时,PSO算法能够快速响应,通过迭代计算调整燃烧器功率、风机转速等参数,实现热应力的动态优化。

相较于遗传算法,PSO算法具有结构简单、参数设置少、收敛速度快的特点,特别适合对实时性要求较高的快速启停场景。其无需复杂的编码和解码过程,能够直接在实数空间中进行优化,计算效率更高^[5]。但PSO算法也存在易陷入局部最优的缺陷,尤其是在处理多峰函数优化问题时,需要通过引入惯性权重调整、动态邻域结构等改进策略,提升算法的全局搜索能力。

3.3 多目标协调控制策略

电力锅炉快速启停过程涉及热应力控制、启停速度、能源效率等多个相互关联又彼此制约的目标。多目标协调控制策略旨在通过构建综合优化模型,平衡各目标间的矛盾,实现锅炉运行性能的整体提升。该策略首先需明确各目标的优先级与权重系数,权重的确定通常依据锅炉运行工况、设备健康状态以及电厂运行需求进行动态调整;随后,采用加权求和法、帕累托最优解等方法,将多目标问题转化为单目标优化问题或求解非支配解集。

在实际应用中,多目标协调控制策略通过协调燃烧强度、风机转速、给水流量等关键参数,实现不同目标的协同优化。如,在锅炉启动阶段,以热应力不超过安全阈值为硬约束,在保证设备安全的前提下,通过优化燃烧控制策略,兼顾缩短启动时间与降低燃料消耗;在停机过程中,则优先考虑热应力均匀下降,避免因应力突变导致设备损伤,同时合理控制降压速率,减少能源浪费。该策略的应用能够显著提升锅炉运行的综合性能,但其实施过程需要精确的目标量化与权重分配,对控制系统的智能化水平要求较高。

结语

本文系统研究了快速启停电力锅炉热应力监测与优化控制方法。通过分析热应力产生机理,提出基于多种技术的监测手段和模型预测控制、智能算法等优化策略,并通过实际案例验证了方法的有效性。然而,现有研究仍存在一些不足:热应力监测技术在复杂环境下的准确性和可靠性有待进一步提高,优化控制算法的计算效率和鲁棒性需持续改进。未来研究可聚焦于多源监测数据融合技术,提高热应力监测精度;探索深度学习与传统控制方法的结合,开发更智能、高效的热应力优化控制策略;同时,加强热应力-材料损伤-寿命预测的多物理场耦合研究,为电力锅炉全寿命周期安全管理提供更完善的技术支撑。

参考文献

- [1]李鹏.660 MW超超临界褐煤锅炉烟气余热深度耦合系统设计与应用[J].山东电力高等专科学校学报,2023,26(02):50-53.
- [2]张精桥,薛建庆,杜小军,等.660MW超超临界空冷机组给水泵汽轮机排汽冷却技术研究应用[J].能源科技,2024,20(06):61-65.
- [3]张海明.电厂集控运行中汽轮机运行优化措施[J].设备管理与维修,2020(09):85-86.
- [4]栾阳.煤电机组多能互补灵活性改造技术分析[J].电力系统装备,2024(1):97-99.
- [5]杜小泽,张璇,庞力平,等.燃煤发电机组灵活调峰下机炉安全状态监测与调控研究综述[J].中国电机工程学报,2024,44(18):7178-7199.