

灵活性运行对汽轮机转子的寿命损耗评估与检修时机优化

马 岗

华润电力(宁武)有限公司 山西 忻州 036700

摘 要: 汽轮机转子在灵活性运行中面临复杂工况,导致寿命损耗加剧。本文详细分析不同工况下转子受力与热应力变化、材料性能影响,阐述低周疲劳、高温蠕变、热机械疲劳等寿命损耗机理。基于物理参数与无损检测的监测方法被引入,并探讨综合应用策略。针对传统检修策略局限,构建基于寿命损耗的检修决策模型,提出检修时机优化的动态调整方法,为汽轮机转子寿命管理与检修决策提供支撑。

关键词: 灵活性运行; 汽轮机转子; 寿命损耗评估; 监测方法; 检修优化

引言: 随着电力系统灵活性需求提升,新能源大规模并网,电网负荷动态调控愈发复杂。汽轮机转子作为机组核心部件,其运行状态直接影响机组安全与电网稳定。灵活性运行带来快速启停、深度调峰、频繁变负荷等工况,使转子承受复杂交变应力与热应力,材料性能劣化,寿命损耗加剧。因此,探究灵活性运行对转子寿命损耗的影响及检修时机优化策略,对保障机组安全运行、提升电网稳定性具有重要意义。

1 灵活性运行对汽轮机转子的作用机制

1.1 不同灵活性运行工况分析

灵活性运行工况围绕电网负荷动态调控需求展开,形成多种典型运行状态,各类工况在参数调控与运行特征上存在显著差异。快速启停工况是应对电网应急调峰需求的关键运行模式,核心在于通过优化启停参数缩短启停时长,适配电网负荷的突发波动,区别于传统稳态启停的缓慢调控模式^[1]。深度调峰工况聚焦电网负荷低谷时段的运行需求,通过降低机组最低稳定负荷实现负荷深度下调,打破传统汽轮机最低稳定负荷偏高的局限,适配新能源大规模并网后电网峰谷差扩大的运行场景。频繁变负荷工况则对应电网负荷的随机波动,要求机组负荷在不同等级间快速切换,负荷变化速率需满足电网实时调控要求,是灵活性运行中对转子作用最为频繁的工况类型。

1.2 各工况下转子的受力与热应力变化

启动过程中转子温度呈现非均匀分布特征,蒸汽与转子表面的热交换速率存在差异,导致转子表面与内部形成明显温度梯度,最大温度梯度可达80-120℃/m,这种温度梯度直接引发热应力分布不均,凹槽、凸起及倒角等应力集中部位热应力更为突出,最大热应力可达350-

450MPa。停机过程中转子逐渐冷却,温度梯度逐步减小,启动阶段产生的热应力缓慢释放,冷却速率的控制直接影响应力释放效果,过快冷却(冷却速率超过20℃/小时)会导致应力释放不充分,进而引发残余应力累积,残余应力最大值可达120-180MPa。变负荷运行时,转子承受的机械应力随负荷变化发生动态调整,机械应力波动范围可达100-300MPa,同时蒸汽温度与压力的波动引发热应力变化,热应力波动幅度可达80-150MPa,两种应力形成耦合作用,这种耦合效应随负荷变化速率提升而增强,对转子结构稳定性构成持续影响。

1.3 灵活性运行对转子材料性能的影响

灵活性运行中转子长期处于高温与交变应力协同作用环境,这种环境会导致转子材料疲劳特性发生显著变化,材料屈服强度、抗拉强度及弹性模量随运行时长呈现下降趋势,疲劳寿命随之缩短。同时,长期交变应力与高温作用会推动转子材料微观结构发生演变,材料内部微观缺陷逐步累积,缺陷密度随运行工况的频繁变化而增加,这种微观结构的演变会进一步劣化材料力学性能,使得转子在后续运行中更易出现疲劳损伤,为转子寿命损耗埋下隐患。

2 灵活性运行下汽轮机转子寿命损耗机理与评估

2.1 低周疲劳损伤机制

低周疲劳损伤是灵活性运行下汽轮机转子寿命损耗的核心形式之一,低周疲劳裂纹的萌生依赖特定力学与环境条件,当转子材料承受的交变应力超过材料疲劳极限,且循环次数达到临界值时,裂纹便会在应力集中区域萌生。灵活性运行中频繁的启停与变负荷的过程,会使转子反复承受较大幅度的应力循环,这种应力循环会打破材料内部原子排列的稳定性,在晶界、缺陷等薄弱

区域形成微小裂纹^[2]。循环载荷持续作用下,裂纹会沿材料薄弱路径逐步扩展,扩展过程受应力幅值、循环频率及材料特性共同影响,应力幅值越大,裂纹扩展速率越快,且扩展方向始终指向应力集中程度更高的区域,最终导致转子结构完整性遭到破坏,寿命大幅缩短。

2.2 高温蠕变损伤机制

汽轮机转子长期运行于高温环境,高温会促使材料发生蠕变现象,高温蠕变损伤是转子寿命损耗的重要组成部分。高温环境下,材料内部原子热运动加剧,原子间结合力减弱,在外力作用下会发生缓慢且不可逆的塑性变形,这种塑性变形随时间累积形成蠕变损伤。转子材料的蠕变特性表现为随温度升高、应力增大,蠕变变形速率加快,且蠕变损伤具有累积效应,无法通过冷却等方式完全恢复。蠕变与疲劳存在密切相互作用,疲劳裂纹的存在会加速蠕变损伤的发展,裂纹尖端的应力集中会促使蠕变变形集中发生,而蠕变产生的塑性变形又会加剧裂纹扩展,两者协同作用进一步加速转子寿命损耗,缩短转子服役周期。

2.3 热机械疲劳损伤机制

灵活性运行中,转子反复经历加热与冷却过程,同时承受机械应力作用,形成热机械疲劳损伤,其核心在于热应力与机械应力的耦合效应。温度变化引发的热应力与负荷波动产生的机械应力相互叠加,使转子材料承受复杂的交变应力状态,这种耦合效应会加剧材料内部

缺陷的产生与发展,破坏材料微观结构稳定性。热机械疲劳损伤遵循累积规律,损伤程度随循环次数增加而不断加深,热机械疲劳损伤的累积模型基于材料疲劳特性与蠕变特性构建,能够反映不同运行工况下损伤的发展过程,清晰体现温度循环、应力循环与损伤累积之间的内在关联,为转子寿命损耗分析提供重要支撑。

2.4 寿命损耗评估方法

结合灵活性运行工况特征与转子寿命损耗机理,采用理论计算与试验验证相结合的方式,构建多机理耦合的寿命损耗评估方法,实现转子寿命损耗的精准量化。基于损伤累积理论,整合低周疲劳、高温蠕变、热机械疲劳的损伤计算模型,结合转子材料性能参数与实际运行工况数据,量化各损伤形式的损耗占比,最终得到转子总寿命损耗量^[3]。对于低周疲劳损耗,采用Miner线性累积损伤理论,结合转子应力循环特征与材料S-N曲线,计算疲劳损伤累积量;对于高温蠕变损耗,基于蠕变损伤模型,结合转子运行温度、应力及时间参数,量化蠕变塑性变形带来的寿命损耗;对于热机械疲劳损耗,通过耦合热应力与机械应力计算模型,结合温度循环与应力循环参数,评估耦合损伤对转子寿命的影响。同时,引入修正系数,修正不同灵活性运行工况波动对寿命损耗评估结果的影响,提升评估方法的适配性与准确性,为后续检修时机优化提供精准的寿命损耗数据支撑,如图1所示。

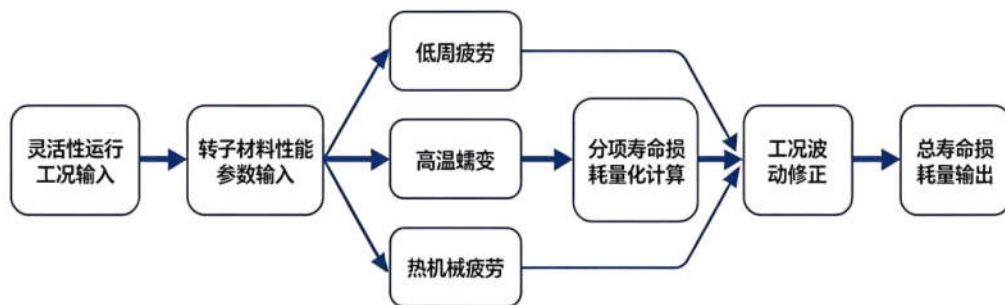


图1

3 汽轮机转子寿命损耗监测方法

3.1 基于物理参数的监测方法

基于物理参数的监测方法依托转子运行过程中的关键物理量变化,实现寿命损耗的实时跟踪,是转子状态监测的基础手段。温度监测技术通过布置高精度测温元件,捕捉转子不同部位的温度分布及动态变化,温度参数的异常波动可直接反映转子热应力状态,为热疲劳损伤监测提供数据支撑,常用测温技术包括红外测温与热电偶测温,可实现转子表面与内部温度的精准捕捉。红

外测温精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,热电偶测温精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,能够满足转子温度监测的需求。应力监测技术聚焦转子运行中的应力变化,通过应变片、光纤传感等技术手段,实时采集转子应力数据,精准捕捉应力集中区域的应力幅值与循环特征,为疲劳损伤分析提供直接依据。振动监测技术通过采集转子运行中的振动信号,分析振动幅值、频率等特征参数,振动信号的异常变化可间接反映转子裂纹萌生、扩展及材料劣化情况,实现寿命损耗的间接监测。

3.2 基于无损检测的监测方法

基于无损检测的监测方法可在不破坏转子结构完整性的前提下,实现内部缺陷与损伤的精准检测,是转子寿命损耗监测的核心技术。超声波检测技术利用超声波在材料中的传播特性,通过分析反射、折射信号,识别转子内部裂纹、夹杂等缺陷,可精准定位缺陷位置、尺寸及形态,适用于转子内部疲劳裂纹的早期检测。超声波检测对裂纹的检测灵敏度可达0.1mm,能够发现微小的裂纹缺陷。磁粉检测技术依托铁磁材料的磁特性,通过施加外部磁场使转子表面及近表面缺陷产生漏磁场,利用磁粉吸附现象显现缺陷,可有效检测转子表面及近表面的微小裂纹,适配转子应力集中区域的损伤监测。涡流检测技术利用电磁感应原理,通过检测涡流信号的变化,识别转子表面及近表面的缺陷与材料劣化,检测过程不受表面油污、氧化层影响,适配汽轮机转子复杂的运行环境。

3.3 多种监测方法的综合应用策略

单一监测方法存在各自局限性,无法全面覆盖转子寿命损耗的各类损伤形式,多种监测方法的综合应用的核心在于实现优势互补。温度、应力、振动等物理参数监测可实现寿命损耗的实时动态跟踪,无损检测技术可实现缺陷的精准定位与定量分析,两者结合可弥补单一方法的检测盲区,提升监测的全面性与准确性。多参数融合的寿命损耗监测体系构建需整合各类监测数据,通过数据预处理、特征提取与融合分析,建立监测参数与寿命损耗之间的内在关联,实现转子寿命损耗的精准评估与趋势预测。体系构建需兼顾监测实时性与准确性,优化数据传输与分析流程,确保监测数据能够及时支撑转子状态判断与检修决策,为转子寿命管理提供可靠技术保障。

4 基于寿命损耗的检修时机优化策略

4.1 传统检修策略的局限性分析

传统汽轮机转子检修策略难以适配灵活性运行的复杂工况,存在明显局限性。定期检修以固定时间周期为核心依据,未考虑转子实际寿命损耗状态与运行工况差异,易出现检修过度或检修不足的问题^[4]。检修过度会增加机组停机时间与检修成本,降低机组运行经济性,检修不足则无法及时发现转子潜在损伤,可能导致损伤进一步扩大,引发机组故障。事后检修依赖转子故障发生后再开展检修作业,存在显著安全风险,故障发生时不仅会造成机组非计划停机,影响电网供电稳定性,还可能导致转子损伤加剧,甚至引发更严重的设备损坏,增加检修难度与成本,无法满足灵活性运行下转子寿命管理的需求。

4.2 基于寿命损耗的检修决策模型构建

基于寿命损耗的检修决策模型构建,核心是建立科

学的关联关系与变量体系,实现检修时机的精准把控。结合前文构建的寿命损耗评估方法,建立寿命损耗与检修周期的关联模型,需结合转子材料特性、运行工况特征及监测数据,量化寿命损耗速率与检修周期的内在联系,避免固定周期带来的弊端,使检修周期能够适配转子实际损耗状态。多因素影响的检修决策变量确定,需筛选影响转子寿命损耗与检修效果的关键变量,涵盖转子运行负荷特征、温度应力变化、材料劣化程度及监测数据异常情况等,通过变量量化与权重分配,明确各因素对检修决策的影响程度,为检修时机判断提供全面、精准的参数支撑,提升决策模型的科学性与适用性。

4.3 检修时机优化的动态调整方法

灵活性运行工况具有随机性与波动性,检修时机优化需采用动态调整方法,确保检修计划与转子实际状态匹配。根据运行工况实时调整检修计划,需实时采集转子运行参数与寿命损耗评估数据,分析工况变化对寿命损耗的影响,当工况出现大幅波动导致损耗速率加快时,及时调整检修节点,提前开展检修作业;当工况稳定、损耗速率低于预期时,可适当延长检修周期,兼顾检修安全性与运行经济性。考虑转子剩余寿命的检修优先级排序,需结合转子剩余寿命评估结果,对不同机组、不同部位的转子进行优先级划分,剩余寿命较短、损伤风险较高的转子优先安排检修,剩余寿命较长、状态稳定的转子合理延后检修,实现检修资源的优化配置,提升转子寿命管理的整体效果。

结束语:灵活性运行下汽轮机转子寿命损耗受多因素影响,准确把握寿命损耗机理、科学监测评估是优化检修时机的关键。通过构建基于寿命损耗的检修决策模型,采用动态调整方法,可实现检修计划与转子实际状态的精准匹配,有效避免传统检修策略的不足。这有助于提升转子寿命管理水平,保障机组安全稳定运行,为电力系统灵活性与可靠性提供坚实支撑。

参考文献

- [1]隆飞.1000MW火电机组深度调峰对汽轮机转子寿命损耗影响分析[J].电力设备管理,2025(1):58-60.
- [2]王元良,廖燕清,彭家辉,等.基于损伤力学分析的汽轮机转子寿命损耗计算方法[J].动力工程学报,2024,44(10):1525-1532.
- [3]祁乃斌,何江南,曹寒,等.深度调峰对汽轮机转子寿命损耗的影响及运行优化研究[J].东方电气评论,2024,38(1):59-64.
- [4]高创立.燃气-蒸汽联合循环电厂汽轮机转子寿命损耗预测方法研究[J].机电信息,2024(23):72-75.