

燃气轮机燃烧室部件常见故障诊断与维护

郝浩宇 闫煜鑫

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：燃气轮机承担电力、航空、舰船等领域的核心动力任务，燃烧室长期处于高温、高压、强湍流环境，火焰筒烧蚀、喷嘴堵塞、裂纹扩展、积碳振荡等故障易导致效率下降和停机风险。以温度场、压力脉动、排放参数、内窥检测为依据，建立故障识别、成因判定、分级维护、寿命管理流程，可实现早发现、快定位、准处置，为计划检修提供依据，减少突发故障对机组负荷和安全裕度的影响，使维护由事后修复转向状态管控，降低检修成本，提升燃烧稳定性、运行可靠性和部件服役周期。

【关键词】：燃气轮机；燃烧室部件；故障诊断；维护策略；寿命管理

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.060

引言

燃烧室是燃气轮机能量转换最集中的区域，燃料雾化、空气掺混、火焰稳定和高燃气输出都在有限空间内完成。高温燃气反复冲刷、热应力交替变化、燃料杂质沉积和冷却结构退化，会使火焰筒、喷嘴、过渡段等部件逐步产生烧蚀、裂纹、堵塞、振动异常。若早期征兆未被准确识别，小缺陷可能演变为燃烧失稳、排放超限甚至非计划停机。将故障特征、成因判断和维护措施建立清晰对应关系，有助于形成更可靠的检修路径，为后续部件故障类型、诊断方法和维护流程展开奠定基础。

1 燃烧室部件运行工况及故障诱因识别

1.1 高温高压工况下的热负荷集中

燃烧室内燃料释放的大量热能使得火焰筒、喷嘴以及过渡段长期承受高温梯度影响，局部区域容易形成热负荷集中现象。火焰温度分布不均会造成材料表面温差增大，引发热应力循环，长期作用下导致金属组织变化、强度下降以及裂纹萌生。燃烧区域的气流扰动、火焰摆动和冷却气膜分布偏差会进一步加剧局部过热，使部件产生非均匀烧蚀。针对高热负荷区域，需要结合温度监测、热应力计算和材料性能变化规律进行状态判断，优化冷却结构参数，提高部件承受复杂热环境的能力。

1.2 燃料品质波动引发的沉积堵塞

燃料品质变化会直接影响燃烧过程稳定性，燃料中的杂质、重组分以及微量污染物在高温环境下容易发生裂解和氧化反应，形成附着物并积聚于喷嘴流道、旋流器以及供油通道内部^[1]。沉积物不断增加会改变燃料喷射速度和雾化状态，使燃油与空气混合比例发生偏移，造成局部燃烧不充分、温度分布异常以及排放参数波动。堵塞程度持续发展后，会降低燃烧室调节性能，增加喷嘴热损伤概率。针对燃料因素引起的故障，需要加强燃油过滤、品质检测和沉积物监测，通过优化燃料处理流程减少污染物进入燃烧系统。

1.3 冷却结构退化造成的局部损伤

燃烧室冷却系统承担降低部件表面温度、维持材料强度的重要任务，冷却孔堵塞、气膜覆盖不足以及通道磨损会削弱冷

却效果，使局部区域长期处于超温状态。冷却结构退化后，热量无法及时传递和释放，容易造成材料氧化加剧、表面剥落以及壁厚减薄等损伤。长期热循环作用还会扩大局部缺陷范围，影响火焰筒和衬套的结构完整性。针对冷却性能下降问题，需要结合流量检测、孔道状态检查和热成像监测，及时识别冷却异常位置，通过结构优化和维护修复恢复冷却能力，避免局部损伤进一步扩展。

2 典型故障表现及成因判定

2.1 火焰筒烧蚀裂纹的形成机理

火焰筒长期处于高温燃气直接冲刷区域，材料表面受到热辐射、氧化腐蚀和机械应力共同影响，容易产生烧蚀减薄与裂纹扩展。燃烧过程中温度周期性变化会使火焰筒产生反复热胀冷缩，形成交变热应力，当局部应力超过材料疲劳极限时，裂纹会从表面缺陷区域逐渐向内部扩展。高温氧化环境还会破坏材料保护层，使基体金属抗裂能力下降。故障判定需要结合壁厚变化、裂纹形态、温度分布以及材料性能检测结果，明确烧蚀程度和裂纹发展阶段，为后续维修决策提供依据。

2.2 燃油喷嘴积碳堵塞的参数特征

燃油喷嘴承担燃料精确雾化和均匀分配任务，其内部流道尺寸变化会直接影响燃烧状态^[2]。积碳形成后，喷嘴流量系数下降，喷射压力与设计参数产生偏差，燃油雾化颗粒增大，导致燃烧区域局部温度升高。堵塞程度加深时，燃烧室压力波动、排气温度分布以及污染物排放参数会出现异常变化。故障诊断过程中，需要结合燃油流量、压差变化、喷射状态和燃烧参数进行综合判断，识别沉积位置及影响范围。精准分析参数变化规律，有助于提高喷嘴维护的针对性，避免因供油异常引发更严重的燃烧不稳定问题。

2.3 过渡段变形振动的诱发因素

过渡段连接燃烧区域与涡轮入口，是高温燃气流动转换的重要部件，复杂流场环境容易造成结构变形和振动异常。燃气温度分布不均会产生局部热应力，使过渡段出现热变形累积，长期循环作用下可能降低结构刚度。气流压力脉动、燃烧振荡

以及连接部位间隙变化会进一步增强机械振动,使部件产生疲劳损伤。故障识别需要结合振动频谱、压力波动、结构位移检测等数据,分析振动来源和发展趋势。通过建立多参数联合诊断方式,可提高过渡段异常状态判断精度,减少结构失效风险。

3 故障诊断技术路径构建

3.1 温度压力排放数据联合判读

温度、压力和排放参数是反映燃烧室运行状态的重要数据来源,通过多源信息融合能够提高故障识别准确度。燃烧室内温度场变化可反映火焰分布均匀性和局部过热情况,排气温度偏差增大通常表明燃烧区域存在燃料分配异常、火焰偏移或冷却效果下降问题。压力参数能够体现燃烧过程稳定程度,压力波动幅值异常可能与燃烧振荡、流场扰动以及喷嘴供油不均有关。排放数据中的氮氧化物、一氧化碳含量变化可辅助判断燃烧效率和混合状态。诊断过程中需要建立参数关联模型,对不同工况下的数据变化趋势进行对比分析,结合实时监测系统实现异常状态提前识别。通过数据采集、特征提取和智能判定相结合的方式,可减少单一参数误判,提高燃烧室部件故障定位效率,为精准维护提供数据支撑。

3.2 内窥检查裂纹识别流程

内窥检查是燃烧室部件无损检测的重要手段,能够直接观察内部结构表面状态,识别早期损伤特征。检测流程需要根据部件结构特点确定检查区域,通过高清成像设备获取火焰筒、衬套、过渡段等关键位置的表面信息,重点关注裂纹长度、扩展方向、烧蚀深度以及材料剥落情况。裂纹识别过程中,需要结合图像增强、缺陷标记和尺寸测量技术,提高微小缺陷发现能力。对于复杂高温部位,还需结合历史检修记录和运行参数,判断裂纹形成原因及发展趋势。数字化检测技术的应用能够实现检测结果标准化管理,使缺陷位置、损伤程度和维修等级形成对应关系^[3]。通过规范化检查流程,可提升燃烧室部件状态评估精度,降低因隐蔽裂纹扩展造成的运行风险。

3.3 振动信号燃烧稳定性评估

振动信号能够反映燃烧过程中的压力变化和结构响应,是判断燃烧稳定性的重要依据。燃烧振荡发生时,压力脉动会通过结构传递形成特定频率特征,导致燃烧室及连接部件振动幅值增加。评估过程中需要采集不同运行工况下的振动频谱数据,分析频率成分、幅值变化和持续时间,识别异常振动来源。低频波动可能与整体流场不稳定有关,高频振动则可能与局部燃烧异常和结构共振相关。结合压力传感器、加速度检测和数据处理算法,可建立振动特征与故障类型之间的映射关系,提高诊断结果可靠性。智能监测技术能够实现振动趋势跟踪,对潜在燃烧失稳状态进行提前预警,为燃烧参数调整和部件维护提供准确依据。

4 针对性维护措施匹配

4.1 烧蚀裂纹的修复更换策略

烧蚀裂纹维护需要根据损伤程度、裂纹扩展范围以及部件剩余寿命进行分级处理。轻微表面烧蚀可采用表面修复、耐热涂层补充等方式恢复防护能力,减少高温氧化对基体材料的持续影响。裂纹达到一定深度后,需要结合无损检测结果判断是否具备修复条件,通过裂纹打磨、焊接修补和热处理工艺消除局部缺陷,避免残余应力引起二次开裂。对于结构强度下降、损伤范围较大的火焰筒部件,应采用更换方式恢复整体可靠性。维护过程中需要严格控制修复区域尺寸、材料匹配性和加工精度,保证修复部位与原结构具有一致的热膨胀性能。结合数字化检测和寿命评估技术,可建立损伤等级与维护方案之间的对应关系,提高检修决策准确性,延长燃烧室关键部件服役周期。

4.2 喷嘴堵塞的清洗校验策略

燃油喷嘴堵塞处理需要重点恢复燃油流量特性和雾化性能,避免供油偏差影响燃烧稳定性。清洗过程中应根据沉积物类型选择适合的处理方式,重点去除喷嘴内部流道、喷孔区域附着的积碳和杂质,防止清理过程造成结构损伤。完成清洗后,需要对喷嘴进行流量检测、喷雾状态检测以及压力参数校验,确认各喷嘴之间的供油一致性。对于存在喷孔磨损、流道变形或性能下降明显的部件,应及时进行更换处理,避免重复使用造成燃烧参数持续偏移^[4]。维护流程还需要加强燃油过滤系统管理,通过优化过滤精度和污染物控制水平减少二次堵塞风险。结合智能检测设备建立喷嘴性能数据库,可实现状态变化跟踪,提高维护工作的精准程度和运行稳定性。

4.3 冷却异常的清孔检测策略

冷却系统异常会直接影响燃烧室部件温度控制能力,因此需要针对冷却孔堵塞、流量不足以及气膜分布不均等问题开展专项检测。清孔维护首先需要利用检测设备确认堵塞位置和堵塞程度,再根据通道结构特点选择合适的清理工艺,恢复冷却气体正常流通。检测过程中应重点关注冷却孔尺寸变化、孔壁损伤以及局部堵塞残留情况,避免清理后仍存在冷却能力不足的问题。对于长期高温运行导致的冷却结构变形,需要结合流量测试和温度监测重新评估冷却性能,必要时进行部件修复或更换。维护完成后,通过冷却效率测试验证气流分布状态,确保热负荷能够有效降低。采用精细化检测和状态维护方式,可提高冷却结构可靠性,减少因局部过热造成的材料损伤。

5 诊断维护闭环成效提升

5.1 停机风险降低路径

停机风险降低需要依靠故障诊断、状态监测和预防维护的协同管理,形成从异常发现到维修处理的快速响应流程。燃烧室部件运行数据持续采集后,可通过温度偏差、压力波动、振

动变化以及排放异常等指标识别潜在故障,使设备异常由突发状态转变为可预测状态。针对火焰筒裂纹扩展、喷嘴性能下降、冷却能力衰减等高风险问题,应建立故障等级划分标准,根据风险程度制定检修优先级,避免小缺陷发展为重大故障。维护过程中结合检测结果优化备件准备、维修时间安排和技术方案,可缩短故障处理周期。智能化监测系统的应用能够提高异常预警准确性,使燃烧室运行状态得到持续控制,降低非计划停机概率,提高燃气轮机运行连续性。

5.2 检修周期优化路径

检修周期优化需要改变固定时间维护模式,根据燃烧室部件实际运行状态制定动态检修计划。传统周期检修容易出现维护不足或过度检修问题,而基于状态评估的维护方式能够结合部件损伤程度、运行小时数、温度历史数据和故障发展趋势确定合理检修时间。通过建立部件健康状态评价体系,可对火焰筒、喷嘴、过渡段等关键部位进行分级管理,明确检查频率和维护深度^[5]。检测数据积累后,可利用趋势分析技术预测性能变化规律,为维修资源配置提供依据。检修过程中加强检测结果反馈,将故障信息、维修记录和运行参数形成闭环数据,提高后续维护计划的准确性。优化后的检修模式能够减少无效拆检,提高设备利用率,同时保证燃烧室部件始终处于安全运行

范围。

5.3 部件寿命延长路径

部件寿命延长需要从材料保护、运行控制和维护管理多个方面进行综合优化。燃烧室部件长期受到高温氧化、热循环和机械载荷影响,合理控制运行参数能够减少异常热负荷对材料性能的影响。维护过程中采用精细化检测方式,及时发现早期烧蚀、裂纹和结构退化问题,可避免损伤持续扩大。针对关键部件表面防护能力下降情况,需要结合耐热涂层修复、结构状态评估和性能恢复措施,提高材料抵抗高温环境的能力。运行管理中,通过优化燃烧参数、改善冷却效果和减少不稳定燃烧现象,可降低部件疲劳损耗。建立长期寿命管理体系,对部件服役状态进行持续记录和分析,有助于提升维修决策水平,延长燃烧室部件使用周期,提高设备整体经济性和可靠性。

6 结语

燃气轮机燃烧室部件故障诊断与维护需要结合运行参数监测、缺陷识别和精准维修措施,形成完整的状态管理体系。针对烧蚀裂纹、喷嘴堵塞、冷却异常等问题,建立故障判断与维护方案匹配机制,可提升设备运行稳定性,降低非计划停机风险。智能检测技术与数据管理方法的融合,为燃烧室部件可靠运行和寿命提升提供了有效支撑。

参考文献:

- [1] 李亚飞.基于灰箱理论的燃气轮机建模与仿真研究[D].安徽建筑大学,2025.
- [2] 李云飞.基于知识图谱的燃气轮机故障知识管理与应用研究[D].中国石油大学(华东),2023.
- [3] 潘冰.燃气轮机状态监测与故障诊断方法研究及系统开发[D].浙江大学,2023.
- [4] 俞维文.燃气轮机燃烧室的热声振荡预警方法及系统研究[D].浙江大学,2023.
- [5] 李德兵.燃气轮机燃烧室部件故障研究[C]//福建省电机工程学会 2020 年学术年会获奖论文集(下册).海峡出版发行集团(THE STRAITS PUBLISHING&DISTRIBUTION GROUP)、福建科学技术出版社(FUJIAN SCIENCE&TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE),2021:80-83.