

冷却水温对燃气轮机燃烧室热端部件测试精度的影响分析

王 爽

江苏中科能源动力研究中心 江苏 连云港 222000

摘 要: 随着燃气轮机向高参数、高效率方向发展,其燃烧室热端部件的可靠性与性能测试愈发关键。本文聚焦冷却水温对燃气轮机燃烧室热端部件测试精度的影响。先阐述燃气轮机燃烧室热端部件的结构、工作特性,以及主要测试参数、方法与冷却系统作用。接着剖析冷却水温影响测试精度的机制,包括对温度场、传感器测量结果和测试系统稳定性的影响。最后提出提升冷却水温稳定性以优化测试精度的策略,涵盖冷却水温控制技术优化、测试数据校正方法、测试流程规范与质量控制,为提高热端部件测试精度提供理论支撑与实践指导。

关键词: 燃气轮机; 冷却水温; 热端部件; 测试精度

引言: 燃气轮机作为重要的动力设备,其燃烧室热端部件的性能与可靠性至关重要,而精准测试是保障其性能的关键。在实际测试中,冷却水温是影响测试精度的重要因素之一。冷却水温的波动会改变热端部件的温度场分布,干扰测试传感器的测量结果,还可能影响测试系统的稳定性。深入研究冷却水温对燃气轮机燃烧室热端部件测试精度的影响,有助于我们更好地理解测试过程中的干扰因素,进而采取有效措施提升测试精度,对保障燃气轮机的安全稳定运行具有重要意义。

1 燃气轮机燃烧室热端部件测试相关理论基础

1.1 燃气轮机燃烧室热端部件结构与工作特性

燃气轮机燃烧室热端部件主要包括涡轮叶片、燃烧室衬套等。涡轮叶片结构复杂,常采用空心设计,内部设有冷却通道,通过引入冷却空气形成气膜冷却,以降低叶片表面温度。燃烧室衬套则需承受高温燃气冲刷,其表面通常涂有耐高温涂层。工作特性上,热端部件处于高温、高压、高速气流环境,承受着巨大的热负荷与机械负荷。在运行过程中,温度分布极不均匀,局部高温区域易产生热应力,导致部件出现热疲劳、蠕变等损伤,严重影响其使用寿命与燃气轮机的整体性能。

1.2 热端部件主要测试参数与测试方法

热端部件主要测试参数涵盖温度、应力、应变、振动等多个方面。温度参数反映部件的热状态,对评估其热负荷至关重要;应力与应变参数用于分析部件的机械性能与强度;振动参数则能监测部件的运行稳定性。测试方法多样,温度测试常用热电偶、红外热像仪等;应力应变测试多采用应变片与数据采集系统;振动测试借助加速度传感器与振动分析仪。通过这些测试方法获取的数据,可全面了解热端部件的工作状态,为部件的设计优化、故障诊断与寿命预测提供重要依据。

1.3 冷却系统在热端部件测试中的作用

在热端部件测试中,冷却系统发挥着关键作用。首先,它能够模拟实际运行工况下的冷却环境,使测试结果更贴近真实情况。通过精确控制冷却水温、流量等参数,可营造出与实际工作相近的热边界条件。其次,冷却系统有助于保护测试设备与传感器,避免因高温损坏。在测试过程中,高温环境可能对测试仪器造成损害,冷却系统能有效降低测试区域的温度。此外,稳定的冷却系统还能提高测试的重复性与准确性,减少因冷却条件波动带来的测试误差,确保测试数据可靠,为热端部件的性能评估提供坚实保障^[1]。

2 冷却水温对热端部件测试精度的影响机制

2.1 冷却水温对热端部件温度场的影响

(1) 冷却水温直接影响热端部件表面与内部的气膜冷却效率。当冷却水温升高时,冷却介质的密度降低、比热容减小,导致单位体积冷却空气的吸热能力下降。此时,火焰筒冷却孔喷出的冷却气流温度升高,与高温燃气之间的温差缩小,气膜冷却的隔热效果减弱,热端部件表面温度梯度增大,局部区域可能出现过热现象。例如,在燃烧室火焰筒前段,若冷却水温从常温(25℃)升至50℃,气膜冷却效率可能下降15%-20%,导致筒壁金属温度升高30-50℃,直接影响温度场分布的均匀性。(2) 冷却水温波动会改变热端部件内部的热传导路径。冷却水套或闭式水循环系统通过热交换带走部件传导的热量,水温升高会降低冷却介质与部件的温差,使热传导速率减缓。此时,热端部件(如过渡段)内部温度分布可能向高温区偏移,导致温度场出现非线性变化,尤其是靠近冷却水道的区域,温度梯度变化更显著,可能引发局部热应力集中。(3) 冷却水温对热端部件与测试环境的热交换平衡产生影响。测试过程中,

冷却水温不稳定会导致部件表面热辐射与对流换热的动态变化。例如,水温突然升高时,部件表面热辐射量可能因温度升高而短暂增加,随后因冷却效率下降而重新分布,造成温度场测量数据的波动,降低测试结果的重复性与准确性。

2.2 冷却水温对测试传感器测量结果的影响

(1) 冷却水温变化会直接干扰温度传感器的测量准确性。热端部件测试中常用的热电偶、热电阻等温度传感器,其输出信号与被测物体温度呈线性关系,但这一关系基于传感器自身温度稳定的前提。当冷却水温升高时,传感器安装位置附近的局部环境温度随之上升,导致传感器本体温度升高,产生附加的热电势或电阻变化。例如,在火焰筒壁面温度测量中,若冷却水温从25℃升至40℃,传感器本体温度可能上升5-10℃,使测量值偏离真实温度5%-8%,尤其在高温工况下,这种偏差会进一步放大,直接影响测试数据的可靠性。(2) 冷却水温波动会引发传感器动态响应特性改变。传感器对温度变化的响应时间与其热容量、导热系数相关,而冷却水温的变化会改变传感器与周围环境的热交换速率。当水温不稳定时,传感器可能无法及时跟踪热端部件温度的快速变化,导致测量信号滞后或超调。例如,在燃烧室瞬态测试中,若冷却水温在短时间内波动超过5℃,传感器输出的温度曲线可能出现振荡或平滑失真,无法准确捕捉温度峰值或梯度变化,降低测试结果的动态精度。(3) 冷却水温对传感器安装结构的热应力影响不可忽视。传感器通常通过焊接、粘贴或机械夹持固定在热端部件表面,冷却水温变化会导致部件与传感器安装基座的热膨胀系数差异,产生微小位移或变形。这种结构变化可能改变传感器的测量角度或接触压力,进而影响信号传输稳定性。例如,在过渡段温度测试中,若冷却水温反复波动,传感器与部件表面的接触热阻可能发生变化,导致测量值出现周期性偏差,增加测试数据的不确定性。

2.3 冷却水温对测试系统稳定性的影响

(1) 冷却水温波动会直接破坏测试系统的热平衡状态。燃气轮机燃烧室热端部件测试中,冷却系统通过调节冷却介质温度维持部件与测试环境的热交换平衡。当冷却水温出现周期性或随机波动时,热端部件表面温度场会随之动态变化,导致传感器采集的信号产生高频噪声或低频漂移。例如,在长时间稳态测试中,若冷却水温在 $\pm 3^\circ\text{C}$ 范围内波动,温度传感器输出的电信号可能因热滞后效应出现0.5%-1%的幅值波动,直接影响数据采集系统的稳定性,甚至触发自动校准程序中断测试流

程。(2) 冷却水温不稳定会加剧测试系统各模块间的耦合干扰。现代测试系统通常集成温度、压力、流量等多参数测量单元,冷却水温变化可能通过热传导或流体共振影响其他传感器的工作环境。例如,冷却水套温度升高会导致附近压力传感器的电子元件热漂移,使压力测量值出现与温度波动同步的周期性误差;同时,水温变化可能改变冷却空气的密度和流速,间接影响流量计的测量精度,导致多参数测试数据出现非线性耦合偏差,降低系统整体可靠性。(3) 冷却水温对测试系统硬件的长期稳定性具有累积效应。冷却水温过高会加速传感器、数据采集卡等关键部件的老化,尤其是热电偶的绝缘层和热电阻的引线材料,可能因长期热应力作用出现性能退化。例如,若测试过程中冷却水温持续超过设计上限(如60℃),传感器线缆的绝缘电阻可能下降30%-50%,导致信号传输噪声增大;同时,数据采集模块的电子元件在高温环境下工作寿命可能缩短50%以上,增加系统故障风险,影响测试的持续性和可重复性^[2]。

3 提升冷却水温稳定性以优化测试精度的策略

3.1 冷却水温控制技术优化

(1) 采用闭环动态温控系统替代传统开环控制,通过高精度温度传感器实时监测冷却水入口与出口温度,结合PID控制算法动态调节冷却介质流量。例如,在测试系统中集成可编程逻辑控制器(PLC),根据热端部件负载变化自动调整冷却水泵转速,使水温波动范围从 $\pm 5^\circ\text{C}$ 压缩至 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。同时,引入前馈补偿机制,针对燃烧室瞬态工况(如点火、变负荷)提前调整冷却水流量,避免水温滞后导致的测试误差。(2) 优化冷却回路设计以减少热惯性干扰。通过缩短冷却水管道长度、增大管径降低流体阻力,减少水温在传输过程中的延迟;在关键测试区域(如火焰筒冷却水套)采用并联式分流结构,确保各支路水温均匀性。例如,将单通道冷却回路改造为多通道独立控制,每条支路配备电动调节阀,根据传感器反馈独立调节流量,使局部水温偏差控制在 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 以内,提升温度场分布的一致性。(3) 应用相变材料(PCM)辅助温控技术增强系统稳定性。在冷却水储罐或循环管道中填充石蜡类相变材料,利用其熔化/凝固过程吸收或释放热量,平抑水温短期波动。例如,当燃烧室负荷突变导致冷却需求激增时,PCM通过相变吸热减缓水温上升速度,为温控系统提供缓冲时间;反之,在负荷降低时释放储存的冷量,避免水温过度下降。

3.2 测试数据校正方法

(1) 建立基于冷却水温的动态误差补偿模型。通过实验标定不同水温(如20℃、30℃、40℃)下传感器的

输出偏差,拟合水温与测量误差的数学关系式。例如,针对热电偶测温数据,采用多项式回归分析水温每升高 1°C 时输出电压的变化量,生成误差补偿表。在实际测试中,系统根据实时监测的冷却水温自动调用对应补偿系数,对原始测量数据进行修正,消除因水温波动导致的线性或非线性误差。(2)引入多传感器融合校正技术提升数据可靠性。在热端部件关键测试点同时布置热电偶、红外热像仪等不同类型传感器,利用各传感器对水温变化的敏感度差异进行交叉验证。例如,当冷却水温波动导致热电偶测量值偏离预期时,系统通过对比红外热像仪的温度场分布数据,识别异常值并采用加权平均算法生成校正后的温度值,降低单一传感器受水温干扰的风险。(3)实施历史数据驱动的自适应校正策略。收集长期测试中冷却水温与测量误差的关联数据,构建机器学习模型(如支持向量机或神经网络),训练模型预测不同水温条件下的误差趋势。在实际测试时,模型根据实时水温数据动态调整校正参数,实现“边测边校”的智能化数据修正。

3.3 测试流程规范与质量控制

(1)制定标准化测试前准备流程,确保冷却系统初始状态可控。在测试启动前,需对冷却水箱进行预冷处理,使水温稳定在设定值 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内,并检查冷却水泵、阀门及管道是否存在泄漏或堵塞。同时,对温度传感器进行零点校准和线性度验证,确保其输出与标准温度源偏差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,避免因设备初始状态差异导致后续数据失真。(2)实施分阶段测试与实时监控策略。将测试过程划分为预热、稳态和瞬态三个阶段,每个阶段设置独立的水温控制目标。例如,预热阶段逐步提升冷却水温至设计值,避免热冲击;稳态阶段通过闭环控制

维持水温恒定,同时每5分钟记录一次水温、流量及传感器输出数据;瞬态阶段模拟燃烧室负荷突变,实时监测水温响应速度(需 ≤ 2 秒)及传感器动态误差。若任一阶段水温波动超过阈值(如 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$),系统自动暂停测试并触发警报。(3)建立测试后数据复核与追溯机制。测试完成后,需对原始数据进行完整性检查,剔除因水温突变导致的异常数据点,并通过对比历史测试记录验证数据合理性。同时,将冷却水温、传感器校准记录及环境条件等元数据与测试结果关联存储,形成可追溯的质量档案^[3]。

结束语

冷却水温作为燃气轮机燃烧室热端部件测试中的关键变量,其稳定性直接影响测试精度。水温波动会导致热端部件温度场分布失真,使传感器测量产生动态误差,甚至引发测试系统热平衡失效。优化冷却水温控制技术、建立水温-误差补偿模型、规范测试流程,是提升测试精度的核心路径。未来需进一步融合智能温控算法与多物理场耦合分析,构建水温-部件-测试系统的全链条闭环控制,为燃气轮机高温部件的可靠设计与性能优化提供更精准的技术支撑。

参考文献

- [1]林小杰,毛熠辉,钟崴.区域供热系统动态建模与不确定性分析[J].能源工程,2025,46(1):20-26.
- [2]龚振国.管径渐变的微管换热器流动与传热性能优化[J].机械工程学报,2025,46(1):57-67.
- [3]黄行良,朱志劫,叶文.燃气轮机燃烧室预混结构性能的数值研究[J].动力工程学报,2021,036(009):P.697-703.