

联合循环电厂燃机排气温度偏差成因及调整策略探讨

代金成

广东大唐国际肇庆热电有限责任公司 广东 肇庆 526105

【摘要】：燃气轮机排气温度是联合循环机组安全、经济运行的关键监测参数，排气温度偏差过大容易造成透平热通道部件热应力不均，降低机组运行效率，严重时还会引起保护动作而出现非计划停运。本文以 AE94.3A 型燃气蒸汽联合循环机组为研究对象，根据机组设备结构特点和现场运行规程，对燃机排气温度偏差的各种原因进行详细的分析，有针对性地提出相应的调整和运维措施，为同类型燃机机组排气温度控制、设备长周期稳定运行提供一定的借鉴。

【关键词】：联合循环机组；燃气轮机；排气温度偏差；成因分析；调整策略

DOI:10.12417/2811-0528.26.10.089

引言

燃气-蒸汽联合循环机组由于具有高效、环保、调峰能力强的特点，是目前电力行业清洁能源发电的主要机型。广东大唐国际肇庆热电有两套安萨尔多 AE94.3A 型燃机联合循环供热机组，单套额定功率为 447MW，燃机透平排气温度直接影响余热锅炉换热效率、机组整体出力和设备使用寿命。该型燃机排气系统装设 30 个热电偶进行温度监测，其中 24 个监测透平热通道烟气温度，6 个监测排气管道温度，运行过程中如果出现各个测点温度偏差过大，就会破坏烟气温度场的均匀性，造成余热锅炉受热面换热失衡，还会引起透平静动叶热膨胀不均，产生部件磨损、裂纹等设备隐患，严重时会导致排气温度异常触发机组跳闸，影响电网供电稳定性。目前该机组在运行中出现的排气温度测点偏差超标问题，不能依靠常规运行调整来解决。根据机组运行规程、设备制造参数和行业事故教训，系统整理出排气温度偏差的主要原因，制订出标准化的调整和控制方案，是保证机组安全、环保、经济运行的重要手段，也是本次研究的主要目的。

1 燃机排气温度偏差的核心运行危害

燃机排气温度偏差本质上就是透平出口烟气温度场分布不均的直接反映，它所造成的危害贯穿于整个机组的运行过程之中，主要表现在三个方面。其一，增大透平设备损耗，透平静叶、动叶靠压气机抽气冷却，温度偏高会引发局部部件超温运转，材料疲劳速度变快，缩减透平核心部件的检修周期和寿命，加大设备维护费用。第二，降低联合循环效率，排气温度不均会影响余热锅炉各个受热面的换热效果，造成高、中、低压蒸汽参数波动，蒸汽轮机做功效率降低，机组整体供电煤耗和厂用电率升高。第三，触发保护隐患，该机组排气温度、压损均有保护逻辑，温度偏高容易导致测点误报，严重时还会引起燃机跳闸保护，造成机组非计划停运，违背了机组可靠运行的基本要求。

2 燃机排气温度偏差的主要成因分析

根据肇庆热电 AE94.3A 型燃机的结构设计以及现场运行情况，排气温度偏差的原因可以分为燃烧系统失衡、透平冷却系统异常、进气和压气机工况波动、监测仪表故障、运行维护不到位五类，各种原因互相联系，共同影响烟气温度场的均匀性。

2.1 燃烧系统工况不均

燃烧系统是决定排气温度分布的关键部分，该型燃机使用环形燃烧室，有 24 个均匀分布的混合燃烧器，燃料和空气的混合比例、燃烧稳定情况都会影响到排气温度的均匀程度。一方面，天然气前置模块调压、过滤不合格会造成天然气流量分配不均，单个或者多个燃烧器燃料供给偏差，导致局部燃烧不充分或者过烧现象，造成对应区域排气温度异常；另一方面，燃烧器预混控制阀、值班控制阀卡涩或者调节精度不够，不能准确匹配机组负荷所要求的燃料供给量，值班火焰稳定性降低，燃烧室局部燃烧脉动加剧，温度偏差变大。火焰传感器故障、点火器性能衰减都会造成燃烧室点火不均、燃烧偏移，从而加大排气温度差值；进口可调导叶和第一级静叶调节不同步，也会改变燃烧室进气量的分布，破坏空燃配比的均匀性。

2.2 透平冷却空气系统分配失衡

该型燃机透平为四级轴流式结构，静叶、动叶冷却空气全部来自压气机不同级别的抽气，冷却空气流量分配均匀性影响透平部件温度和排气温度场。冷却系统抽气管道蝶型调节阀卡涩、开度不一致，会造成各级冷却空气流量偏差，局部透平叶片冷却不够，部件温度升高，带动相应区域排气温度上升；压气机抽气口积垢、管道堵塞，会减少冷却空气供给量，冷却效果变差，局部超温及温度偏差加重。同时冷却空气密封失效，高温烟气就会窜入转子空腔里，破坏透平内部温度的平衡，从而加大排气温度的差别。

2.3 进气与压气机系统运行异常

压气机进气质量及工况稳定是保证燃机高效燃烧、均匀排气的前提。进气装置过滤器积尘过多、压差过大,会造成进气量不足、分布不均,压气机压缩效率降低,空燃配比失衡;压气机叶片积垢未及时清洗,会使叶片气动特性发生变化,造成压缩空气流量和压力分布不均匀,从而影响燃烧室的燃烧工况。压气机防喘放气阀动作不同步、关闭不严会造成部分压缩空气泄漏,改变燃烧室进气总量和分布;进口可调导叶角度偏差会加重进气不均,造成排气温度偏差。

2.4 温度监测仪表故障与偏差

该机组燃机排气温度用30个热电偶实时监测,仪表本身精度和运行状态影响温度数据的准确性。热电偶长时间在高温烟气环境中工作,容易出现测点漂移、元件老化、接线松动等状况,造成监测数据失真,产生虚假温度偏差;排气系统压差变送器故障,不能准确测量排气压损,会间接影响运行人员对温度异常的判断,造成调整延误。另外仪表校验周期过长、校验精度不达标,都会造成监测数据和实际温度出现偏差,从而影响到运行调整工作的开展。

2.5 运行维护与规程执行不到位

现场运行及维护操作是否规范,会对温度偏差问题的发生产生影响。部分运行人员没有严格按照规程执行启停操作,在启停过程中IGV调节、防喘放气阀动作控制不规范,容易引起燃烧工况波动;压气机在线、离线水洗操作不规范,水洗后水质不合格、烘干不到位,会造成叶片上残留污垢,影响压缩工况;日常巡检不到位,不能及时发现燃烧器、冷却系统、仪表的隐性故障,再加上专项试验开展不及时,不能提前排查温度偏差隐患,最终造成问题逐步扩大。

3 燃机排气温度偏差针对性调整策略

针对上述成因,结合机组运行规程与现场实操经验,从燃烧优化、系统调试、仪表管控、运维规范四个维度,制定系统化调整策略,实现排气温度偏差的精准管控。结合本机组历经十次修订的运行规程、集团燃机典型规程要求及行业反措经验,调整策略全程贴合AE94.3A型燃机结构特性与220kV并网供热双重运行需求,兼顾日常稳态调整、启停过渡管控与隐患应急处置三类核心场景,摒弃单一参数微调的局限性,采用全系统联动调试模式。

3.1 优化燃烧系统运行与调试

规范天然气前置模块的运维工作,定期清理过滤装置,校验调压设备,保证天然气的压力、流量稳定且均匀地分配到各个用气点上,防止由于燃料供给的波动而引起燃烧失衡。日常

运行时要按照机组的负荷区间分段进行精细化的管控,30%负荷以下稳燃阶段主要控制值班燃气流量,把流量波动范围控制在厂家技术手册规定的合理范围内,完全消除低负荷工况下燃烧脉动的问题;50%到100%高负荷段同步优化预混阀和IGV联动控制逻辑,每季度专门做一次空燃比动态校准试验,根据实时烟气排放数据微调阀位开度,实现燃烧效率和氮氧化物排放之间的平衡。对环形燃烧室24个混合燃烧器进行逐台定点排查,每月对燃烧器火焰均匀性和稳定性进行抽查,发现单个燃烧器对应的排气温度异常时,立即停机检查喷嘴堵塞、磨损情况,清理燃烧室隔热陶瓷片表面积灰和结垢,杜绝局部燃烧偏移、燃烧不充分的问题,从燃烧源头上筑牢排气温度场均匀的基础。

3.2 规范透平冷却系统调试与维护

定期对透平冷却空气系统进行专项调试,全面检查各级抽气管道蝶型调节阀,校准阀位开度,保证冷却空气流量分配均匀。调试时用TCS控制系统实时检测四级透平对应的各级冷却空气压力、流量数据,保证流量偏差小于5%,每半年对蝶型调节阀做一次全行程动作试验,消除阀件卡涩、响应滞后等隐性故障。对压气机5级、9级、13级抽气口,在每次机组大修时同时进行内窥镜检查,彻底清除抽气通道内杂质、氧化皮和积垢,保证冷却空气流通截面积符合要求,防止供风不足造成局部叶片超温。冷却系统密封检查采用专项气密性试验的方式,每月定时进行一次,主要检查转子空腔和透平气缸结合面、抽气管道接口处的密封件,发现密封老化、破损及时更换,建立冷却系统运行参数长效台账,对流量、压力变化趋势进行跟踪,提前预判密封失效或者管道堵塞隐患,从源头上阻止冷却不均造成的排气温度偏差。

3.3 强化进气与压气机系统运维管控

严格实行进气系统日常巡检制度,定时清除进气过滤器,监控过滤器压差,保证进气清洁、流量一致。根据现场运行环境,对进气过滤器压差设定出明确的预警限值,压差超标就立即启动在线反吹程序,每半月做一次全面的过滤器清理工作,在雾霾、沙尘等恶劣天气之后还要增加巡检和清理的次数,保证进气阻力在规程允许的范围内。压气机水洗严格按照规程标准进行,离线水洗每季度固定进行一次,在线水洗根据机组运行效率、压气机压差变化灵活调整频次,水洗全程控制水质、冲洗时间及烘干流程,水洗后排污水水质电导率需稳定在 $10\mu\text{s}/\text{cm}$ 以下才能结束操作,烘干流程严格按照厂家要求时长执行,严禁水洗后直接闲置机组,防止叶片残留污垢、锈蚀影响压缩效率。同时压气机防喘放气阀每月做一次全行程动作试验,记录全开全关响应时间,保证启停过程中转速达到2400r/min节点时动作准确、关闭严密;IGV角度每半年校准

一次,角度偏差不大于 $\pm 1^\circ$,彻底消除进气量分布不均造成的燃烧和排气温度异常。

3.4 完善温度监测仪表校验与管理

缩短排气温度热电偶和压差变送器的校验周期,按照电力行业标准进行精度校验,及时更换老化、漂移超标的热电偶,紧固接线端子,消除仪表因素造成的虚假温度偏差。考虑到燃机排气区高温、粉尘等恶劣的工作环境,将常规半年一次的校验周期缩短到每季度一次,压差变送器也一起进行了校验,所有的校验数据都进行了完整的保存和归档,对于不合格的仪表立即进行更换,坚决杜绝仪表带病工作。对机组30个排气温度测点实行分区责任管控,将测点分为透平热通道和排气道两个测点区域,由专人每天对测点数据进行核对,发现单点数据漂移、突变时立即查找接线松动、元件烧损问题。在DCS和TCS系统里加入温度偏差多级预警体系,确定轻微、中度、重度三个级别的偏差阈值,联动声光报警以及运行人员弹窗提醒,改进系统数据传输逻辑,消除数据传输延迟状况,达成仪表监测、数据传输、异常预警全环节精准掌控,彻底清除虚假温度偏差给运行调整带来的干扰。

3.5 严格落实规程执行与标准化运维

组织运行人员系统学习燃机运行规程和反措要求,规范启停操作、参数调整和巡检流程,防止因违规操作造成工况波动。定期组织规程专项培训和实操演练,重点考核机组启动/停止IGV调节、防喘放气阀控制、温度偏差应急处理等主要流程,

合格者可独立上岗,每月对规程执行情况做一次复盘,及时发现现场不规范操作。制定排气温度偏差专项排查方案,确定巡检点位、频次、量化标准,每天记录燃烧、冷却、进气、仪表四大系统主要参数,每周进行一次跨专业联合排查,每季度根据机组运行情况开展一次全面隐患治理。把排气温度均匀性作为班组日常绩效考核指标,促使运维人员执行精细化管控要求,按照机组历次规程修订内容,同步更新现场运维作业指导书,固化成熟调整经验,创建起“隐患排查-准确调整-效果复查-优化提升”的闭环管理体系,使温度偏差控制由临时处理转变为常态化的、标准化的运维,保证管控效果长期稳定。

4 结论

经过以上调整和运维措施后,肇庆热电AE94.3A型燃机排气温度测点偏差在合理范围之内,透平热通道温度场均匀性明显改善,没有出现由于排气温度偏差造成的保护误动、非计划停运事件。机组透平核心部件损耗下降,检修周期变长,余热锅炉换热效率和机组整体出力保持稳定,达到安全运行和经济运行的目的。燃机排气温度偏差控制属于一项系统工程,关键之处在于准确找到原因并严格执行规程,还要细致地展开系统调试工作,并且要形成常态化的运维管理体系。对联合循环燃机机组来说,只有立足设备实际,结合行业标准和厂家技术要求,不断优化调整策略,加强运行人员实操能力,才能有效规避温度偏差隐患,保证机长周期、高效率、可靠运行,为电力系统稳定供电、清洁能源高效利用提供支持。

参考文献:

- [1] 刘弋.燃气发生器排气热电偶结构分析及优化——以西门子SGT400型燃机为例[J].通讯世界,2025,32(12):88-90.
- [2] 樊爱兵,徐龙魏,潘雪澄,等.基于模型的燃机进气加热控制策略优化方法[J].电子制作,2025,33(22):59-63.
- [3] 白玲丽.F级燃机配套补燃型余热锅炉设计浅析[J].锅炉技术,2025,56(01):42-46.
- [4] 丁勇能,江峰.9F.03型燃气-蒸汽联合循环机组启动吹扫时长浅析[J].河北水利电力学院学报,2025,35(04):60-64.
- [5] 钱猛,辛团团,刘鑫,等.基于天然气-煤分级燃烧的燃煤发电系统节能降碳改造与热力学分析[J].中国电机工程学报,2026,46(03):1098-1109.