

燃气轮机环形燃烧室燃烧失稳原因分析及防范措施

刘建生

(中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院, 合肥 230000)

摘要: 燃气轮机燃烧失稳会造成燃烧室内部剧烈扰动,甚至熄火停机。对不同燃气轮机燃烧失稳产生的机理进行分析,认为环形燃烧室更容易产生大幅燃烧波动,并会引发更为严重的热声振荡现象,损伤燃烧室及下游热通道部件。为了避免燃烧波动的产生,分析了燃烧失稳的原因,提出了相应的防范措施,对采用同类型燃气轮机的发电企业具有一定的借鉴意义。

关键词: 燃烧波动;熄火停机;机理;环形燃烧室;热声振荡;防范措施

中图分类号:TK477

文献标志码:B

文章编号:1009-2889(2022)04-0061-05

1 问题提出的背景

燃气轮机发电具有技术先进、有利于电网调峰和更加环保等优势,在国内发电领域占有一定的比重。国内主要引进GE、三菱、安萨尔多和西门子等厂家的燃气轮机机型,设备技术存在一定的差异,尤其在燃烧系统设计方面差异最大。几家制造单位在天然气燃烧方面做了大量的研究,燃气轮机燃烧设备更新换代最快,燃烧效率、污染物排放指标竞争最为激烈。

目前重型燃气轮机主流燃烧室分为环形和环管形两种。环形燃烧室在燃烧器后部形成一个大的环形腔室,在腔室内壁覆有高温隔热瓦,用于隔离高温烟气和燃气轮机缸体,高温烟气混合后进入透平。环形燃烧室以西门子SGT5-4000F、安萨尔多AE94.3A两种机型为代表。环管形燃烧室由圆周分布的多个筒形燃烧器组成,各燃烧器分别组织燃烧,烟气沿燃烧筒、过渡段送入后部的透平。GE公司9F、三菱公司M701F燃气轮机均采用环管形燃烧室^[1]。

2 环形和环管形燃烧室的区别

环形和环管形燃烧室是燃气轮机发展中形成的

两种不同技术路线,在燃烧组织方面具有不同的特点。

2.1 环形燃烧室

以安萨尔多 AE94.3A 燃气轮机为例(如图1所示),该机型采用环形燃烧室,共有24个燃烧器,分布于燃烧室前侧端盖。该公司最新燃气轮机的燃烧器有值班、预混1、预混2三路燃料,由燃料阀对流量进行调节后送入环管,经环管分别进入24个燃烧器。值班燃气为扩散燃烧方式,燃烧温度较高,用于维持燃烧火焰稳定;预混燃气为预混燃烧方式,燃烧温度较低,保证燃烧产生的氮氧化物维持在较低水平^[2-4]。燃烧器燃烧生成的烟气进入相通的环形燃烧室,高温烟气可以在该区域进行混合后进入下游透平做功。

2.2 环管形燃烧室

以三菱公司M701F燃气轮机为例,该机型燃烧室有20个燃烧器,分布于燃烧室前端盖。该机型燃烧器为筒形(如图2所示),分别由燃烧器和尾筒组成,尾筒又称为过渡段。该燃烧器有值班、主燃料A、主燃料B、顶环四路燃料,由燃料阀对流量和压力调节后送入环管,经环管分别进入20个燃烧器。值班燃气为扩散燃烧方式,主燃料A、B和顶环均为预

收稿日期:2022-03-13 改稿日期:2022-04-19

作者简介:刘建生(1976—),男,河北唐山人,本科,正高级工程师,主要从事汽轮机、燃气-蒸汽联合循环机组的技术研究和设备管理工作,E-mail:1170852860@qq.com。

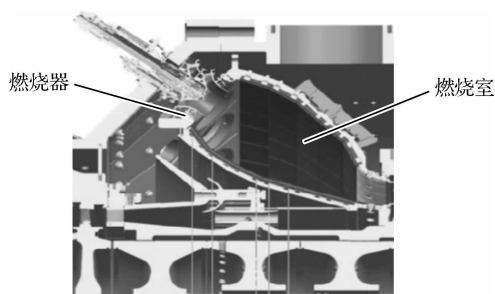


图 1 燃气轮机环形燃烧室示意图

混燃烧模式,四路燃气配合能够维持燃烧稳定,并获得较低的氮氧化物等污染物排放^[5]。燃烧器生成的高温烟气沿各燃烧筒、尾筒后部的弧段进入透平做功。

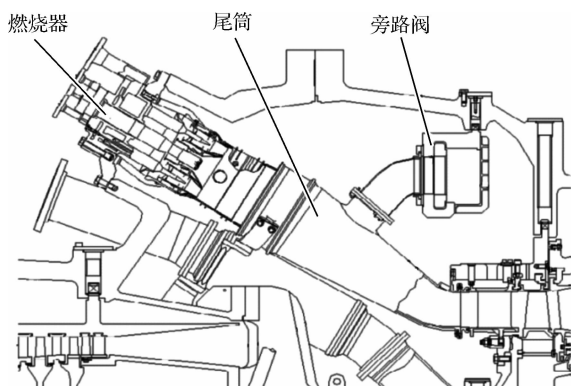


图 2 燃气轮机环管形燃烧室示意图

2.3 两种燃烧室的区别

环形燃烧室的多个燃烧器燃烧生成的烟气进入到同一个环形腔室,优点是燃烧器后部相通,生成的烟气能够相互混合,温度场分布更为均匀;缺点是各燃烧器会相互影响,若单个燃烧器出现燃烧波动,引起压力或温度扰动后会影响到其他燃烧器,并可能产生燃烧共振,扩大燃烧波动,诱发严重的热声振荡现象。由于烟气经过混合,导致透平后部温度元件测量的温度趋向一致,难以识别个别燃烧器存在的燃烧不稳问题,燃烧器缺陷容易被掩盖。

环管形燃烧室的筒形燃烧器是独立的个体,仅通过连焰管相连,用于完成燃烧器的串联点火功能。每个燃烧筒形成一个独立的燃烧空间,独立组织燃烧,基本不受其他燃烧器的影响。一般在筒形燃烧器后部透平设置轮间温度对燃烧器燃烧情况进行监测,燃烧器出现燃烧异常会体现在轮间温度偏差上,能够快速识别燃烧器是否存在故障。独立的燃烧器产生的燃烧振荡不会对其他燃烧器造成影响,不易引发燃烧器间的共振现象,更有利于维持燃烧系统稳定。

从国内天然气发电机组运行情况来看,环形燃烧室的缺陷明显多于环管形燃烧室。环管形燃烧室缺陷一般位于单个燃烧器,出现燃烧波动熄火、加速度超标等异常,故障停机后一般也不会对燃烧器造成损坏。但环形燃烧室在燃烧器出现故障时会相互影响,产生燃烧振荡,造成燃烧波动瞬间恶化,导致大量燃料的能量在燃烧室瞬间爆发,对燃烧室产生较大的加速度冲击,造成隔热瓦块的损坏,并危及下游透平设备。近年来,安萨尔多 AE94.3A 燃气轮机燃烧失稳波动造成机组跳机,并导致隔热瓦开裂损坏的故障较多。

3 环形燃烧室调试或运行中出现的问题

为了达到更高的安全性和运行效率,燃气轮机在投运前和季节变化时均要进行燃烧调整。燃气轮机在燃烧调整中要对燃料阀、空气阀进行调整,以维持更低的污染物排放和更高的运行效率。燃烧调整需对稳定燃烧上下限进行确定,因此燃烧调整具有一定的风险性,需要根据燃烧调整规程和调试经验谨慎操作,防止出现跳机事件。现就环形燃烧室燃气轮机跳机的几个案例进行简介和分析。

(1) 某燃气轮机燃烧调整时,在对值班燃料进行下限试探中,突然出现燃烧波动,燃烧室嗡鸣声和加速度突然增大,造成燃烧室内部隔热瓦块损坏。

(2) 某燃气轮机在燃烧调整过程中,由于系统故障引发燃料阀门开度突变,燃烧室出现剧烈的波动,燃烧室嗡鸣声和加速度突然升高,造成燃烧室内部隔热瓦块损坏并脱落,伤及后部透平叶片。

(3) 某燃气轮机在运行中,值班燃料阀因温度低,出现天然气中含有的硫析出,造成阀门堵塞,使得值班流量降低,导致燃烧室出现燃烧波动,加速度突然增大,造成燃烧室内部隔热瓦块出现裂纹。

4 原因分析

4.1 燃烧波动的机理

对于重型燃气轮机,为了降低氮氧化物的排放,同时获得较高的效率,一般采用最小值班燃料来维持火焰的稳定。对于燃气轮机天然气燃烧机理,国内外科研机构、大学有多年的研究,并进行过不同燃空比、压力、温度等环境下的试验^[6-7]。虽然预混燃烧能够维持较低温度的燃烧,但由于燃烧温度较低,燃烧过程极不稳定,如果失去值班火焰,就会造成燃

烧波动,甚至熄火跳机。

对于环管形燃烧室,如果单个燃烧器值班燃料突然减少,会造成该燃烧器火焰不稳,如果值班火焰过小甚至熄灭,将无法提供给预混燃烧足够的能量,会造成预混燃烧波动,局部出现熄火、重新点燃的动态过程。燃烧筒内部剧烈波动,系统就会发出该燃烧器燃烧波动、加速度大报警,甚至触发保护跳机。由于单个燃烧器的燃料有限,能量较小,因此燃烧波动幅度较小,对燃烧器涂层一般不会造成损坏。

对于环形燃烧室,各燃烧器后部相连,一旦某个燃烧器故障造成值班燃料减少,值班燃烧提供的能量不足以维持预混火焰的燃烧,该燃烧器就会出现燃烧波动,预混火焰也会出现熄火、重新点燃的过程,造成小范围的燃烧波动。如果值班燃料减少到一定程度,就会造成预混燃料无法维持正常燃烧,整个燃烧器瞬间失去火焰,该处的燃烧压力骤降,其他燃烧器的火焰压力就会转向该燃烧器,造成火焰偏斜。同时由于流入该燃烧器的预混燃料逐渐增多,燃料又会被瞬间点燃,燃烧压力会骤然增加,造成燃烧室压力的剧烈波动,气体激波在燃烧室内反复作用,不断积累增大,瞬间产生激烈的轰鸣和更大的加速度冲击。由于环形燃烧室采用较为脆弱的隔热陶瓷瓦块作为隔离层,该瓦块承受超过 $8g$ 的加速度冲击时,会产生裂纹,甚至碎裂(如图3所示)。



(a) 陶瓷瓦损坏的燃烧室

(b) 开裂的陶瓷瓦块

图3 燃烧室加速度突增导致损坏的隔热陶瓷瓦块

4.2 热声振荡的预防

燃气轮机燃烧室燃烧的剧烈波动破坏力巨大,燃料的能量瞬间在密闭的空间释放,带来的冲击力也是巨大的,不但燃烧室陶瓷瓦块无法承受该加速度冲击,甚至燃烧器等金属部件也会在冲击中发生严重损坏,整个过程还会伴随强烈的啸叫噪声,这就是燃烧的热声振荡现象。国内外燃烧专家对热声振荡现象做过具体研究,并提出过避免热声振荡的相关措施。

(1) 查找故障燃烧器并进行处理

为了消除燃烧室热声振荡故障,首先通过技术手段找到故障燃烧器。如果燃烧器出厂流量测试合格,流量分散度符合标准,安装也满足设计规范要求,就需要对现场进行排查。首先对值班燃气流量阀进行检查,对流量计进行校验,以检查阀门的流量特性是否符合要求^[8]。其次对燃烧器的燃料喷嘴进行检查,保证燃料喷嘴畅通,必要时返厂或在现场进行流量测试,排除燃烧器喷嘴堵塞的可能。最后对环管、供气软管、接头和法兰进行检查,保证管路系统不存在泄漏。运行经验表明,某型燃气轮机值班燃料总流量降低 40 g/s 、单个燃烧器降低不到 2 g/s ,即可发生燃烧失稳造成跳机。

(2) 安装监测软件系统,超前进行控制

为了对燃气轮机燃烧室进行监控,部分燃气轮机在燃烧室安装了嗡鸣探头和加速度测量元件。通过对嗡鸣声和加速度信号的实时测取,并依靠软件进行频谱分析。软件一般通过傅里叶变换获得时域、频域的转换,得到不同频域压力信号的振幅变化(如图4所示)。通过对不同频域幅值的变化,可以超前发现各频域振幅的异常,并通过增加值班燃料、降低机组负荷等手段来保持燃烧稳定,在一定程度上避免热声振荡的发生。

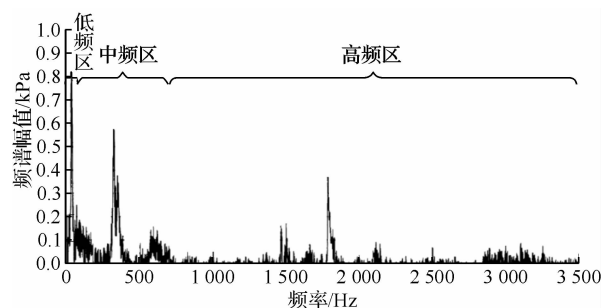


图4 燃烧振荡压力信号频域分布示意图

当前燃烧室嗡鸣加速度频谱分析系统有西门子公司 ARGUS 系统,三菱公司在控制系统中内置了类似的分析模块,国内上海交通大学、上海电气燃气轮机有限公司等研究机构对该分析系统进行了研究,实现了算法集成,并作为后续分析软件服务供用户选择^[9]。

5 防范措施

为了减小环形燃烧室的燃烧波动,将燃烧不稳、热声振荡对燃烧室造成的损坏降低到最低程度,提出如下防范措施。

1) 合理设计燃烧室及燃烧器的结构,保证运行

中的空气和燃料供给流量满足设计要求。燃烧器的值班燃料、预混燃料互相配合应能够维持燃烧稳定,并兼顾较高燃烧效率和较低污染物排放。

2) 合理组织燃烧,按燃料成分、热值设置合理的燃料特性曲线^[10]。通过燃烧模拟仿真和现场试验获得不同负荷点的值班燃料边界,作为燃烧调整的依据。

3) 安装前测试每个燃烧器的燃料流量特性,保证燃烧器流量分散度符合偏差要求,必要时进行 CFD 流体力学数学仿真模拟计算。

4) 对天然气配气阀门及管道、环管进行检查清理^[11],消除管道及接口渗漏,并对流量计进行校验。出现嗡鸣声和加速度信号增大、透平排烟温度分散度超标等异常时对天然气滤网、各燃烧器供应管路、燃烧器燃料喷嘴进行全面检查,防止因喷嘴堵塞造成燃烧波动。

5) 按燃气轮机燃烧器各设计工况进行燃烧调整^[12],如燃料阀、空气阀开度流量特性应良好,出现偏差及时查找原因,必要时对管路系统缺陷进行排查并处理。

6) 在燃气轮机调试和运行中加强监视,为防止出现燃烧室热声振荡对设备造成损坏,安装嗡鸣加速度频谱分析系统,并设置数据异常报警,发现燃烧不稳及时进行干预。

7) 提高环形燃烧室的强度和耐冲击能力,对陶瓷隔热瓦块进行升级,防止因加速度大造成隔热瓦块的大面积损坏,从而避免损伤后部透平叶片。

8) 对空气系统进行检查,保证压气机入口滤芯工作正常。机组停机时对压气机 IGV、CV1 开度进行检查,并对传动机构定期进行检修维护。

9) 在燃气轮机燃烧调整前制定合理的技术方案,设置各燃料阀的流量调整区间,并在调整过程中对燃烧室压力波动情况进行监视,出现异常及时对方案进行调整。

10) 加强对天然气燃料的管理,定期对过滤器进行检查,保证天然气清洁;进入燃气轮机的天然气温度应正常,必要时进行加热,防止低温下析出硫或

其他杂质对燃料阀门或喷嘴造成堵塞。

6 小结

随着国内燃气轮机安装数量的不断增多,部分燃气轮机环形燃烧室存在的问题也逐渐暴露出来。燃烧室压力剧烈波动、加速度突增有较大的破坏作用,一旦发生会造成较大的设备事故和经济损失,目前也已经得到了燃气轮机发电企业的重视。本文对燃气轮机燃烧室燃烧波动的原因和机理进行了分析,重点对环形燃烧室燃烧器由于各种原因导致的值班燃料流量减小并引发燃烧室剧烈振荡进行了介绍,并提出了较为可行的防范措施,为同类型燃气轮机的运行和维护提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 杨志鹏,杨景祺,章伟杰. 国外燃气轮机燃烧监测系统的分析对比[J]. 发电设备,2017,31(04):234-239.
- [2] 朱杰文,刘江,翁培奋,等. F 级燃气轮机环形燃烧室设计方法的研究[J]. 上海电力大学学报,2020,36(02):168-172,178.
- [3] 蔡季雨,陈明敏. 燃气轮机环形燃烧室热态性能研究[J]. 热力透平,2017,46(02):111-116.
- [4] 刘富强,张栋芳,崔耀欣,等. 某重型燃气轮机环形燃烧室的数值模拟[J]. 燃气轮机技术,2011,24(01):20-25.
- [5] 杨勇,艾松,贾文. 燃气轮机燃烧室燃烧稳定性分析[J]. 东方电气评论,2012,26(01):25-29.
- [6] 和宏宾,陈明敏,刘晓佩. F 级重型燃气轮机燃烧室热声振荡分析研究[J]. 热力透平,2020,49(03):206-211,238.
- [7] 王玮,肖俊峰,高松,等. 空燃比对燃气轮机燃烧室燃烧不稳定性影响的数值研究[J]. 燃烧科学与技术,2019(10):439-444.
- [8] 杨安建,田晓晶,凤云仙,等. 某燃气轮机燃烧室燃料喷嘴流量特性研究[J]. 东方汽轮机,2021(04):27-30.
- [9] 王鑫,瞿虹剑. V94.3A 型燃气轮机燃烧稳定裕度控制系统的实现和应用[J]. 电力与能源,2015,36(03):364-368.
- [10] 李涛,郑祥龙,张哲巖,等. 某燃气轮机燃烧室燃料适应性数值研究[J]. 热力发电,2022,51(03):70-78.
- [11] 齐立武,刘齐,霍志勇. 燃气轮机燃烧故障原因与检修策略探究[J]. 内燃机与配件,2021(24):127-129.
- [12] 曹炼博,刘志坦,王凯,等. 发电领域燃气轮机燃烧调整方法研究[J]. 燃气轮机技术,2021,34(02):31-37.

Cause Analysis and Preventive Measures of Combustion Instability in Gas Turbine Annular Combustion Chamber

Liu Jiansheng

(East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and
Technology General Research Institute Ltd. , Hefei 230000, China)

Abstract: The combustion instability of gas turbine will cause severe disturbance in the combustion chamber and even shut down. The mechanism of combustion instability of different gas turbines was analyzed. It was considered that the annular combustion chamber was easier to produce large combustion fluctuation, which would lead to more serious thermoacoustic oscillation, damage the combustion chamber and downstream heat channel components. In order to avoid the generation of combustion fluctuation, the causes of combustion instability were analyzed, and the corresponding preventive measures were put forward, which can be used as a reference for gas-fired power generation enterprises using the same type of gas turbine.

Keywords: combustion fluctuation;flameout shutdown;mechanism;annular combustion chamber; thermoacoustic oscillation;preventive measures

.....
(上接第 52 页)

Experimental Study on Throttle Failure and Temperature of Anti-Surge Deflation of an Industrial Gas Turbine

Wei Changmiao, Wu Yiming, Li Peize

(Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC,Jiangsu Wuxi 214151,China)

Abstract: During the operation of an industrial gas turbine, the throttle was out of control, and all the faults occurred in the gas turbine anti-surge and deflation power range. Through the experimental study on the air temperature of the box body, the box body temperature rose rapidly in the power range of 5% ~30% , but when the gas turbine power rose above 30% and the anti-surge and deflation valve was closed, the box body air temperature dropped sharply. In order to prevent the anti-surge air from being discharged directly into the box, the air induction pipeline for anti-surge was optimized, and the maximum cross-section temperature of the box in the air venting section was about 40 ℃ , which met the working temperature requirements of electrical components. Meanwhile, the air noise outside the box was reduced, and the working environment of operators was optimized.

Keywords: gas turbine; box body; optimize