

空气分配对双旋流燃烧室性能影响的试验研究^{*}

张善军^{1,2}, 郑龙席¹, 朱 涛², 赵云科²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘 要: 为了研究燃气轮机燃烧室主燃区和掺混区空气分配比例对燃烧室性能的影响, 本文在双旋流环形燃烧室上进行了全温全压燃烧试验研究。结果表明, 随运行工况的提高, 燃烧室出口温度分布系数 OTDF 呈现总体降低的变化趋势, 出口径向温度分布系数 RTDF 呈现先显著降低、后缓慢升高并最终平稳的变化趋势, 总压恢复系数略有增加; 随着主燃区空气比例的增加, OTDF 呈现先增加再降低再增加的变化趋势, 并在主燃区空气比例为 0.343 时达到最小值; 随掺混区空气比例的增加, 燃烧室 RTDF 持续降低; 主燃区和掺混区的进气比例对燃烧室的总压恢复系数几乎没有影响。

关键词: 燃烧室; 双旋流; 空气分配; 温度分布; 总压恢复系数

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 01-200229-05

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200229

Experimental Investigation of Effects of Airflow Distribution on Double Swirler Combustor Performance

ZHANG Shan-jun^{1,2}, ZHENG Long-xi¹, ZHU Tao², ZHAO Yun-ke²

(1. College of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to investigate the effects of airflow distribution ratio of gas turbine combustor primary zone and dilution zone on combustor performance, an experimental study was conducted on a double swirler annular combustor under actual temperature and pressure condition. The results show that with increment of operation load, combustor outlet temperature distribution factor decreases mostly, radial temperature distribution factor decreases significantly first and then increases slowly and remains stable at last, and total pressure recovery coefficient increases slightly. With increment of airflow ratio of primary zone, outlet temperature distribution factor increases first and then decreases and increases once again, and reaches the minimum value when the airflow ratio of primary zone is 0.343. With increment of airflow ratio of dilution zone, combustor radial temperature distribution factor decreases. Total pressure recovery coefficient keeps stable with change of airflow distribution ratio of primary zone and dilution zone.

Key words: Combustor; Double swirler; Airflow distribution; Temperature distribution; Total pressure recovery coefficient

^{*} 收稿日期: 2020-04-14; 修订日期: 2020-06-22。

基金项目: 国家两机专项项目。

通讯作者: 张善军, 博士生, 高级工程师, 研究领域为燃气轮机燃烧室设计。

引用格式: 张善军, 郑龙席, 朱 涛, 等. 空气分配对双旋流燃烧室性能影响的试验研究[J]. 推进技术, 2022, 43(1): 200229. (ZHANG Shan-jun, ZHENG Long-xi, ZHU Tao, et al. Experimental Investigation of Effects of Airflow Distribution on Double Swirler Combustor Performance[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(1):200229.)

1 引言

燃烧室是燃气轮机的核心部件之一,其功能是将燃料的化学能经过燃烧转化为热能,使气体的总焓增加,以提高燃气在涡轮中膨胀做功的能力。燃气轮机对燃烧室有多项性能指标要求,包括:更低的氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(UHC)和碳烟颗粒(Soot)排放,更高的燃烧效率,更低的压力损失,更宽的稳定燃烧工作范围,更高的点火可靠性,更高的出口温度分布品质,更低的火焰筒壁温等^[1-3]。但是,由于燃烧室内工作非常复杂,包括气体流动、燃油雾化和蒸发、燃油蒸气与空气掺混、燃烧化学反应、传热与传质。燃烧中还涉及声耦合效应与不稳定释热、压力和速度脉动的相互作用、燃气轮机部件相互干扰引起的燃烧室不稳定工作等。这些分过程又相互干扰和耦联,使得燃烧室研发工作非常困难^[4-6]。其中,如何通过火焰筒上的进气装置(包括旋流器、主燃孔、掺混孔、冷却孔等)将全部空气合理的依次供入火焰筒内部各区,进而满足上述各项燃烧室性能指标要求,是燃烧室设计中的关键技术之一^[7-9]。

火焰筒分区的基本依据是,由于涡轮叶片的工作温度受材料和冷却技术的限制,燃烧室在设计点工况的总油气比都明显偏离化学恰当油气比,相应的余气系数一般为2~5。这种贫油混气实际上已经明显超出可燃范围,因此为了确保燃烧室的高效可靠运行,必须进行火焰筒分区。通常将火焰筒沿轴向依次划分为主燃区、中间区(或补燃区)和掺混区三个部分。主燃区是指火焰筒头部至主燃孔的一段空间,燃油通过喷嘴直接注入主燃区,与进入该区的空气混合和燃烧。中间区又称补燃区,位于主燃区下游。从中间区进入火焰筒的空气一般有两方面的作用:(1)使主燃区未燃成份补充燃烧;(2)促使主燃区的离解产物完成复合反应。这两方面的作用决定了从中间区进入火焰筒的空气不宜过多,否则会导致燃气温度急剧降低,即不利于补燃,也可能使离解产物冻结,对复合反应有抑制作用。在高温升短环形燃烧室中,通常可以去掉中间区。主燃区和中间区统称为燃烧区。掺混区位于燃烧室区的下游。在满足燃烧和壁面冷却之后,剩余的空气进入火焰筒的掺混区,通过空气与燃烧产物的混合,获得要求的燃烧室出口温度及其分布。

本文在燃气轮机双旋流燃烧室全环形试验件上,对燃用柴油的燃烧室进行全温全压燃烧试验,分

析并总结燃烧室火焰筒主燃区和掺混区不同空气分配比例对燃烧室出口温度分布系数OTDF,径向温度分布系数RTDF和总压恢复系数 σ 等性能指标的影响规律。

2 方法

2.1 试验系统

试验系统主要由空气供应系统、燃油供应系统、测控系统、燃烧室试验件、高低压水系统、电气系统和排气系统组成,试验系统主要部分如图1所示。其中,燃烧室试验件进口空气通过间接换热器和电加热器两级加热,满足燃烧室进口空气温度要求,通过流量调节阀和流量计满足燃烧室进口空气流量要求,燃油供应系统设置质量流量计、调节阀向燃烧室供应燃油,满足燃烧室进口燃油流量要求。

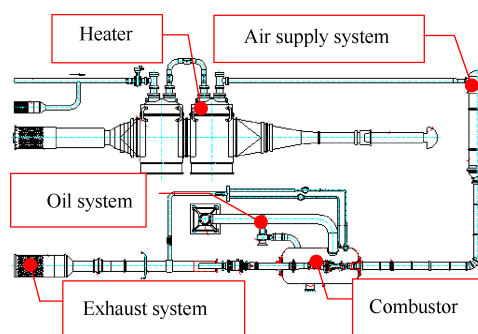


Fig. 1 Primary assembly of test system

2.2 试验件

燃烧室试验件为反向双旋流环形燃烧室,主要包括突扩扩压器、火焰筒、机匣和喷嘴组成,试验件的尺寸大约为直径 $\phi 600\text{mm}$,长度200mm,如图2所示^[10]。其中火焰筒设计了4种开孔方案,不同方案是通过调整火焰筒头部冷却孔、主燃孔和掺混孔的开孔面积实现的。其中,头部冷却孔、主燃孔面积的调整是为了改变火焰筒内主燃区的空气分配比例,掺混孔面积的调整是为了改变火焰筒内掺混区的空气分配比例,不同的火焰筒开孔比例见表1,其中A~D代表4个不同的燃烧室火焰筒开孔方案。

2.3 试验方法

试验时,首先通过进气阀门、放气阀门和排气阀门的组合调节,实现试验要求的燃烧室入口空气流量(5~27kg/s)、压力(0.3~1.6MPa)、温度(420~690K)要求,之后通过调节燃油泵的供油压力,控制供油量,实现试验要求的余气系数。试验状态调整好并稳定,采集燃烧室出口温度场、总压恢复系数等试验数据。

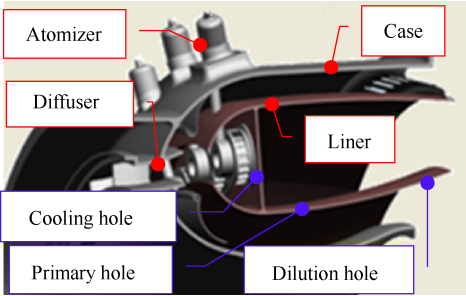


Fig. 2 Diagram of combustor on test

Table 1 Airflow distribution ratio of different scheme combustors

Scheme	Primary zone	Dilution zone
A	0.369	0.203
B	0.325	0.274
C	0.343	0.231
D	0.308	0.284

3 结果与讨论

3.1 出口温度分布系数 OTDF

图 3 给出不同火焰筒方案出口温度分布系数 OTDF 随燃油流量增加的变化情况。从图中可以看出,随着燃油流量的增加,即燃烧室运行工况的提高,燃烧室出口温度分布系数 OTDF 呈现出总体降低的变化趋势,从方案 B 的最大值 0.37 降至方案 C 的最小值 0.18。分析原因是随着燃烧室运行工况的提高,空气雾化喷嘴的雾化质量变好,雾场形态充分发展、喷雾空间分布更加均匀^[11-13],避免局部高温区的产生,进而 OTDF 变得更小。

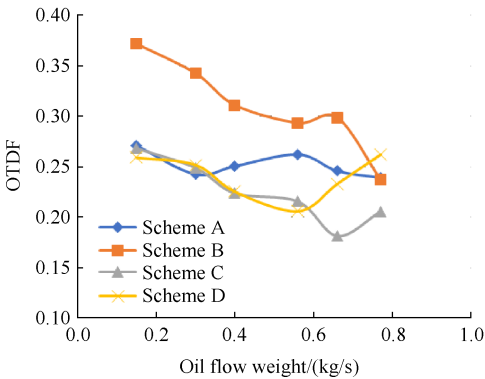
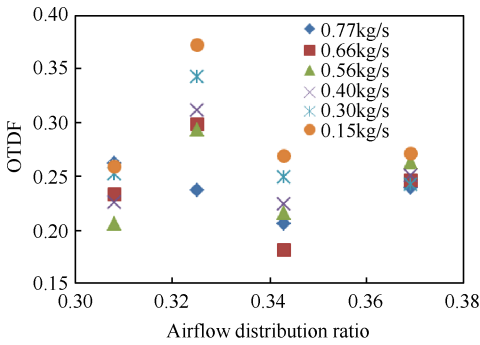


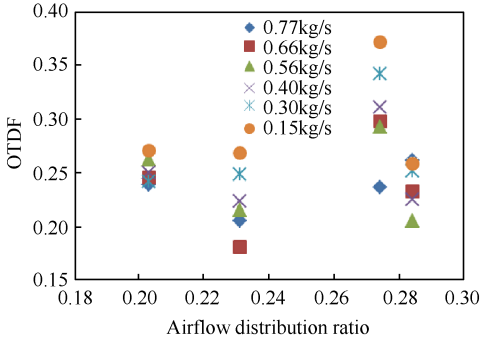
Fig. 3 OTDF as a function of oil flow weight

不同方案之间 OTDF 存在显著的不同,其中方案 B 的 OTDF 明显高于其他 3 个方案。当燃油流量小于等于 0.3kg/s 时,方案 A,方案 C 和方案 D 的 OTDF 基本相同,当燃油流量大于等于 0.56kg/s 时,方案 C 的

OTDF 明显小于方案 A 和方案 D。不同燃烧室方案之间的 OTDF 差异主要在于火焰筒的开孔规律不同,主燃区和掺混区的空气分配比例对不同方案燃烧室 OTDF 的影响规律见图 4。从图中可以看出,随着主燃区空气比例的增加,燃烧室 OTDF 呈现先增加再降低再增加的震荡式变化趋势,同时主燃区空气比例为 0.343 时,出口温度场的 OTDF 最小。通过进一步计算,得出当主燃区空气比例为 0.343 时,主燃区的当量比略>1,即富油状态。当燃烧室主燃区当量比<1 或者明显>1,即主燃区在贫油状态或者过富油状态,OTDF 都会增加,并且主燃区贫油状态下的燃烧室出口温度场 OTDF 比主燃区过富油状态下的 OTDF 更大。从火焰温度和当量比的对应关系可以得出,主燃区在略微富油的状态下火焰温度达到最大值,此时的燃烧速率最快,燃烧更加充分,所以燃烧室的 OTDF 更小,另外主燃区处于富油状态时,掺混区的空气比例相对更大,这也会有利于燃烧室的出口温度分布更加趋于均匀,OTDF 更小。由此,当主燃区空气比例为 0.325 时,较高的主燃区油气比导致 OTDF 变大,同时增加的掺混空气还未起到显著降低 OTDF 的作用,所以此时的 OTDF 最大。同时,由于 4 个方案燃烧室主燃区和掺混的空气分配比例具有对应关系,所以,燃烧室 OTDF 随掺混区空气比例的



(a) Primary zone airflow distribution ratio



(b) Dilution zone airflow distribution ratio

Fig. 4 OTDF as a function of airflow distribution ratio under different oil flow weight

变化规律与随主燃区空气比例的变化规律正好相反。

3.2 径向温度分布系数 RTDF

图 5 给出不同火焰筒方案径向温度分布系数 RTDF 随燃油流量增加的变化情况。从图中可以看出,随着燃油流量的增加,燃烧室出口径向温度分布系数 RTDF 呈现出先显著降低,后缓慢升高,最终趋于平稳的变化趋势,大部分处于 0.06~0.1。RTDF 前期显著降低的原因是燃油雾化方式由压力雾化为主转换成空气雾化为主,燃油雾化水平显著改善,燃油在火焰筒内的径向分布更加均匀,燃烧室出口温度分布更加均匀,当燃油流量 > 0.3 kg/s 时,随着燃油量的增加,燃油空气雾化的质量先略有变差,之后趋于稳定,影响了燃油的径向分布,最终导致燃烧室 RTDF 缓慢升高并最终趋于平稳的变化结果。

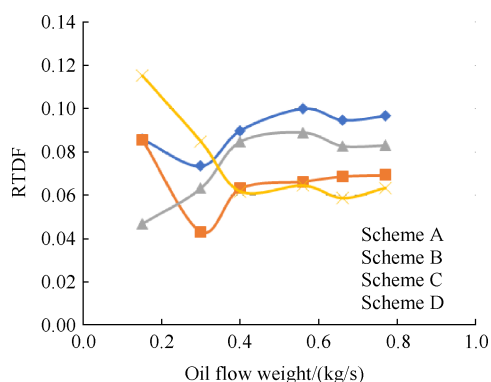
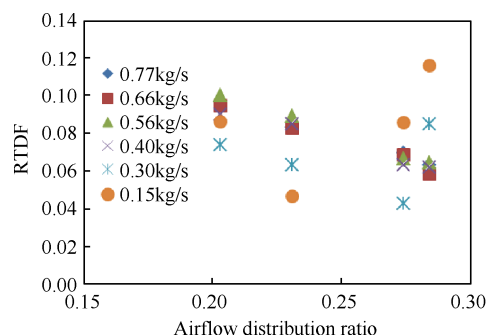


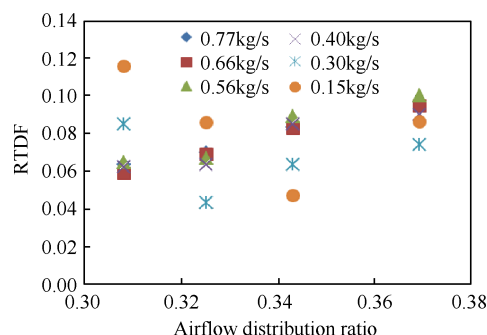
Fig. 5 RTDF as a function of oil flow weight

不同燃烧室方案之间 RTDF 存在明显的差异,特别是当燃油流量 > 0.4 kg/s 以后,4 个燃烧室方案 RTDF 的差异性保持一致,不随燃油流量的增加而明显变化,即:方案 A 的 RTDF 最大,方案 C 的 RTDF 次之,方案 B 与方案 D 的 RTDF 相当且最小。当燃油流量 < 0.4 kg/s 时,不同燃烧室方案 RTDF 对比没有明显规律。不同燃烧室方案之间的 RTDF 差异主要是由于火焰筒的不同开孔规律引起的,主燃区和掺混区的空气分配比例对不同方案燃烧室 RTDF 的影响规律见图 6。从图中可以看出,随着掺混区空气比例的增加,燃烧室 RTDF 总体呈现持续降低的变化趋势,特别是当燃油流量 > 0.4 kg/s 时,燃烧室 RTDF 与掺混区空气比例呈明显的线性关系。分析主要是随着掺混空气比例增加,掺混射流深度增加,燃烧室出口温度分布在径向方向上更加均匀,所以 RTDF 变得更小。掺混区空气比例高的燃烧室方案,主燃区空气比例低,所以燃烧室 RTDF 随主燃区空气比例增加而大体

增加。



(a) Dilution zone airflow distribution ratio



(b) Primary zone airflow distribution ratio

Fig. 6 RTDF as a function of airflow distribution ratio under different oil flow weight

3.3 总压恢复系数

图 7 给出不同火焰筒方案总压恢复系数 σ 随燃油流量增加的变化情况。从图中可以看出,随着燃油流量的增加,燃烧室总压恢复系数略有增大,为 0.955 ~ 0.96。其主要原因是随着燃烧室运行工况的提高,燃烧室内气体流动马赫数降低,导致燃烧室总压损失降低,即燃烧室总压恢复系数增大^[14-15]。

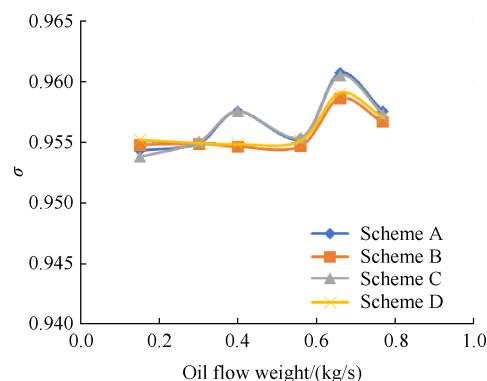


Fig. 7 Total pressure recovery coefficient as a function of oil flow weight

不同方案燃烧室的总压恢复系数基本相同。分析原因得知:燃烧室总压损失主要包含扩压器损失、

火焰筒损失和加热损失3部分,不同方案燃烧室的扩压器相同、火焰筒热容强度相同,所以不同方案燃烧室的扩压器损失和加热损失基本相同,虽然不同燃烧室方案的火焰筒主燃区和掺混区的进气比例不同,但是火焰筒的总开孔面积是一样的,所以不同方案燃烧室的火焰筒损失也基本相同,最终决定不同的燃烧室方案的总压恢复系数基本相同。

4 结 论

本文通过燃烧试验,获得了火焰筒主燃区和掺混区空气分配比例对燃气轮机双旋流燃烧室性能的影响规律,总结如下:

(1)随着燃烧室运行工况的提高,燃烧室出口温度分布系数OTDF呈现出总体降低的变化趋势,出口径向温度分布系数RTDF呈现出先显著降低,后缓慢升高,最终趋于平稳的变化趋势,燃烧室总压恢复系数略有增加。

(2)随着主燃区空气比例的增加,燃烧室OTDF呈现先增加再降低再增加的震荡式变化趋势,同时主燃区空气比例为0.343时,出口温度场的OTDF最小。

(3)随着掺混区空气比例的增加,燃烧室RTDF总体呈现持续降低的变化趋势,特别是当燃油流量 $>0.4\text{kg/s}$ 时,燃烧室RTDF与掺混区空气比例呈明显的线性关系。

(4)虽然不同燃烧室方案的火焰筒主燃区和掺混区的进气比例不同,但在火焰筒的总开孔面积相同的情况下,火焰筒主燃区和掺混区的进气比例对燃烧室的总压恢复系数几乎没有影响。

致 谢:感谢国家两机专项项目的资助。

参考文献

- [1] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 1999.
- [2] Dodds W. Engine Technology Development to Address Local Air Quality Concerns[C]. Belgium: International Coordinating Council of Aerospace Industries Associations, 2008.
- [3] 丁国玉, 何小民, 江平, 等. 套筒角度对三级旋流燃烧室燃烧性能的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 376-385. (DING Guo-yu, HE Xiao-min, JIANG Ping, et al. Effects of Flare Angle on Combustion Performance of a Triple Swirler Combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(2): 376-385.)
- [4] Mellor A M. Design of Modern Turbine Combustor[M]. New York: Academic Press, 1990.
- [5] Lieuwen T C, Yang V. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engine[M]. Reston: AIAA, 2005.
- [6] 黎明, 吴二平, 唐明. 高温升蒸发型双腔燃烧室的设计[J]. 推进技术, 2010, 31(4): 418-422. (LI Ming, WU Er-ping, TANG Ming. Design of Vaporizing Combustor with Double Chambers and High Temperature Rise[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(4): 418-422.)
- [7] 林宇震, 林阳, 张弛, 等. 先进燃烧室分级燃烧空气流量分配的探讨[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 1923-1930.
- [8] 刘爱骥, 朱悦, 陈保东, 等. 以柴油为燃料的旋流杯燃烧室燃烧性能研究[J]. 推进技术, 2017, 38(8): 1804-1811. (LIU Ai-guo, ZHU Yue, CHEN Baodong, et al. Combustion Performance Study of Swirl Cup Combustor Using Diesel as Fuel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(8): 1804-1811.)
- [9] 林宏军, 程明. 喷嘴匹配方案及火焰筒开孔对燃烧室性能影响的试验研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 13-17.
- [10] 张善军, 马宏宇. 生物柴油对双旋流燃烧室燃烧与排放性能的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1562-1568.
- [11] 王兴甫. 高压环境中空气雾化喷嘴的雾化性能[J]. 推进技术, 1994, 15(4): 47-53. (WANG Xing-fu. Atomization of an Air-Blast Nozzle at High Ambient Pressures[J]. Journal of Propulsion Technology, 1994, 15(4): 47-53.)
- [12] 郭新华, 林宇震, 张弛, 等. 离心式同向双旋流器空气雾化喷嘴雾化特性研究[J]. 航空动力学报, 2009, 24(10): 2249-2254.
- [13] 郑严, 沈倍毅. 弹用涡喷发动机燃烧室出口温度场试验与分析[J]. 推进技术, 2001, 22(3): 187-190. (ZHENG Yan, SHEN Bei-yi. Tests and Analysis of Exit Temperature Distribution of the Combustor for Missile Turbojet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 187-190.)
- [14] 蒋波, 何小民, 金义, 等. 低排放驻涡燃烧室冷态流场特性试验[J]. 航空动力学报, 2013, 28(8): 1719-1726.
- [15] 李瀚, 索建秦, 梁红侠, 等. 先进燃烧室分配器式扩压器实验研究[J]. 推进技术, 2013, 34(1): 88-94. (LI Han, SUO Jian-qin, LIANG Hong-xia, et al. Experimental Study of Distributor Type Diffuser Performance for Advanced Combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(1): 88-94.)

(编辑:梅 瑛)