文章编号:1001-2060(2023)05-0103-08

旋流器流量分配对燃气轮机燃烧性能的影响研究

郑玮琳1,李晓东1,李 洁2,马宏宇2

(1. 沈阳航空航天大学 航空发动机学院,辽宁 沈阳 110136;

2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所,辽宁 沈阳 110015)

摘 要:为研究旋流器流量分配对干式低排放(Dry Low Emission, DLE)燃烧室燃烧特性的影响规律,针对单头部中 心分级旋流燃烧室,以天然气作为燃料,在保持旋流数不变的前提下开展两级旋流器不同空气分配比例下的试验 测试和数值模拟,获得不同结构参数条件下燃烧室的综合燃烧性能以及污染物排放等变化规律。研究表明:随主 燃级/预燃级旋流器流量比增大,燃烧室中心回流区变小、回流区长度变短;预燃级局部当量比的增大造成燃烧室 出口 CO 排放增加,主燃区燃烧加剧,热力型 NO_x 排放也增加;同时,燃烧室中心高温区域向燃烧室出口方向扩张, 出口温度分布均匀性变差。

关键 词:流量分配;DLE 燃烧室;中心分级旋流;燃烧性能;污染物排放

中图分类号: V231.2 文献标识码: A DOI: 10.16146/j. cnki. mdlgc. 2023.05.013

[**引用本文格式**]郑玮琳,李晓东,李 洁,等. 旋流器流量分配对燃气轮机燃烧性能的影响研究[J]. 热能动力工程,2023,38(5): 103 – 110. ZHENG Wei-lin,LI Xiao-dong,LI Jie, et al. Study on the effect of swirling flow distribution on combustion performance of gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(5):103 – 110.

Study on the Effect of Swirling Flow Distribution on Combustion Performance of Gas Turbine

ZHENG Wei-lin¹, LI Xiao-dong¹, LI Jie², MA Hong-yu²

(1. School of Aero-engine, Shenyang Aerospace University, Shenyang, China, Post Code: 110136;

2. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang, China, Post Code: 110015)

Abstract: To investigate the effect of swirling flow distribution on the combustion characteristics of dry low emission (DLE) combustion chamber, on the premise of unchanged swirl number, experimental tests and numerical simulations were carried out for two-stage swirler in a single-dome center-staged swirl combustion chamber by using natural gas as fuel at different air flow split ratios. The change rules of integrated combustion performance and pollutant emission of the combustion chamber under different structural parameters were obtained. Research shows that with the increase of flow ratio of primary combustion stage/pre-combustion stage swirlers, the area and length of recirculation zone at the center of the combustion chamber becomes smaller and shorter; the increase of local equivalence ratio at the pre-combustion stage results in an increase of CO emission at the outlet of combustion chamber, and thermal NO_{χ} emission also increases as primary combustion stage burns severely; meanwhile, the high temperature area expands towards the outlet of the combustion chamber, which deteriorates the outlet temperature distribution uniformity.

Key words: swirling flow distribution, DLE combustion chamber, central-staged swirl, combustion performance, pollutant emission

收稿日期:2022-11-08; 修订日期:2022-12-26

基金项目:辽宁省教育厅面上项目(LJKMZ20220537)

Fund-supported Project:General Program Supported by Educational Committee of Liaoning Province of China(LJKMZ20220537) 作者简介:郑玮琳(1989 -),女,沈阳航空航天大学副教授.

引 言

保证高效率燃烧的前提下对燃气轮机进行结构 优化设计,追求高效率低排放是现代燃气轮机发展 的关键^[1-2]。干式低排放(Dry Low Emission, DLE) 技术能有效控制燃烧区火焰温度、抑制 CO, NO_x 和 未燃碳氢化合物(UHC)的生成^[3-4]。其中,燃烧室 的头部结构设计对燃烧室整体性能起关键作用,通 常采用旋流器结构来生成低速热回流区以保证燃烧 室高效稳定燃烧。目前,头部旋流器结构已从单级 发展为多级组合方式,结构参数变化对燃烧室性能 的影响也变得更加复杂^[5]。

针对头部旋流器对燃烧室影响的研究,前期工 作主要集中在旋流器的旋流数^[6-8]、旋向和旋向组 合方式等方面[9-11],在旋流器流量分配方面的研究 相对较少。刘涛等人[12]针对旋流杯两级不同流通 面积比对其出口速度场分布变化影响开展了试验研 究,结果表明,随流通面积比的增大,出口回流区变 小,回流区轴向速度变大,出口射流张角减小,速度 场的抗偏斜能力增强。王志凯等人^[13]针对旋流器 旋流数和流量分配变化对旋流器出口流场的影响. 开展了试验研究,研究发现,随气量比增大,回流区 轴向速度和径向速度均降低,回流区面积变小。汪 玉明等人^[14]针对双级轴向旋流器旋流数及流量分 配变化对流场特性的影响开展了试验与模拟研究. 结果表明,随流量比增大,旋流器下游轴向和径向速 度均降低,回流区宽度和回流率均减小。刘冉等 人[15]试验研究了双级轴向旋流器旋流数和流量分 配变化对单头部燃烧室综合性能的影响,结果表明, 随着旋流器流量比增大,中心回流区宽度变小,点火 边界油气比先减小后增大。姜磊等人[16]试验研究 了两级旋流器旋流数和流量分配变化对矩形模型燃 烧室综合性能的影响,结果表明,该燃烧室存在一个 最佳流量分配比例,使燃烧室贫熄边界最宽:同时随 着外旋流器空气流量的增大,燃烧室火焰面扩大, NO_x 排放量增加。

上述研究中关于旋流器流量分配的调节是旋流 数与流量分配变化共同作用的结果,无法区分旋流 数变化和流量分配变化对燃烧室的影响规律和机 制。为此,本文针对流量分配对燃气轮机燃烧性能 的影响展开试验测试和数值模拟。采用单头部两级 中心分级旋流器,保证两级旋流器各自旋流数不变, 通过调整两级旋流器进气面积来调控流量分配比 例。共设计4组方案,流量比分别为1.7,2.3,3.3 和4.5,开展流量分配比例对燃烧室内部流场、温度 场、主要反应物和产物浓度场的影响研究,为燃烧室 的结构改进和性能优化设计提供理论指导,对推进 国内低排放燃气轮机技术发展具有重要意义。

1 试验模型及计算方法

1.1 试验模型与工况

采用单头部双级旋流、3级供气燃烧室,其结构 及部件分布如图1所示。图中 y/D 是无量纲参数, 表示轴向距离与火焰筒直径的比值。沿径向由外向 内分别为主燃级喷嘴(周向均布 20 个)、预燃级喷 嘴(周向均布4个)和1个中心值班级喷嘴。主燃 级和预燃级燃料经过两级旋流器作用,与空气充分 混合后进入燃烧室发生预混燃烧,值班级燃料直接 通入燃烧室内部进行扩散燃烧。双旋流器采用同向 旋转强旋流的设计,外环较大的为主燃级旋流器,选 取叶厚4 mm,叶宽25 mm 的直叶片,周向均布18 个;内环较小的为预燃级旋流器,选取叶厚2 mm,叶 宽23 mm 的直叶片,周向均布8 个。在保证旋流数 和出口扩张角不变的情况下调整流通面积来调控两 级流量分配,旋液器结构参数如表1 所示。



表1	旋流器结构参	数

Tab. 1 Structural parameters of swirler

方案	主燃级			预燃级				主燃级/预燃级	
	内径 D ₁ /mm	外径 D_2/mm	叶片角/(°)	旋流数 S1	内径 d_1 /mm	外径 d_2 /mm	叶片角/(°)	旋流数 S2	流量比
1	82.00	110	33.9	0.59	20	60.0	47.6	0.79	1.7
2	77.50	110	34.4	0.59	20	55.5	47.2	0.79	2.3
3	72.00	110	35.1	0.59	20	50.0	46.8	0.79	3.3
4	67.50	110	35.5	0.59	20	45.5	46.2	0.79	4.5

燃烧试验系统如图2所示。该试验系统由空气 供应系统、燃料供应系统、加热系统、点火系统、测试 系统、试验燃烧室、数据采集系统和冷却系统等组 成。空气和燃料流量采用进气阀调节,并用孔板流 量计测量;进口温度、压力由进口测量段热电偶和总 压传感器测量;出口温度场采用双铂铑热电偶耙测 量,在燃烧室出口测量段周向均布6支三点气冷热 电偶耙,共18个测量点。热电偶分布如图3所示。



图 2 然 况 风 迎 杀 坑



试验稳定 2 min 后进行采集,每 3 s 记录 1 组 数据,连续采集不少于 2 min,取平均值作为该测点 温度值,并对每个试验工况进行 3 次重复试验;出 口燃气成分通过将温度耙更换为为 6 支三点式采 样耙,对出口燃气进行采集,汇流后通入 Testo350 燃气分析仪进行测量。试验以天然气为燃料,其 主要成分为 CH₄(体积分数为 98%),N₂(体积分数 为 1. 7%),CO₂(体积分数为 0. 3%),其热值为 47.99 MJ/kg。在保证进口工况、两级旋流器各自 旋流数和出口扩张角不变的基础上,通过调整两级 旋流器的进气面积来调节流量分配比例,研究主燃 级和预燃级空气流量分配比例对燃烧室燃烧性能 的影响规律。燃烧室运行工况如表 2 所示。



图 3 热电偶分布 Fig. 3 Thermocouple distribution

4

燃烧室运行工况

0.3

主燃级

当量比

0.40

0.36

0.33

0.31

Tab. 2 Operation condition of combustion chamber 空气流量 燃料流量 值班级燃料量 预燃级燃料量 主燃级燃料量 进口温度 进口压力 预燃级 方案 T/Kp∕kPa $W_a/kg \cdot s^{-1}$ $W_{\rm f}/{\rm g}\cdot{\rm s}^{-1}$ $W_{\rm fl}/{\rm g} \cdot {\rm s}^{-1}$ $W_{f2}/g \cdot s^{-1}$ 当量比 $W_{\rm f3}/{\rm g} \cdot {\rm s}^{-1}$ 1 690 400 0.69 17.5 0.3 7.2 0.47 10 2 690 400 0.69 17.5 0.3 7.2 0.57 10 3 690 400 0.69 17.5 0.3 7.2 0.75 10

表 2

17.5

1.2 网格划分与边界条件

690

采用 Fluent 进行数值模拟,流体域网格划分采 用六面体和多面体混合网格(Poly-Hexcore)。为了 保证计算结果的准确性,对燃气轮机喷嘴处、突变处 以及中心回流区等流场特性较复杂的区域进行了局 部加密。为验证网格无关性,设计了 170 万、260 万 和 340 万共 3 套网格进行计算,比较了 3 套网格在 火焰筒前端入口突扩段结束处的径向速度分布,结 果如图4 所示(图中 z/D 是无量纲参数,表示径向距 离与火焰筒直径的比值)。结果显示,260 万和 340 万的模拟结果非常接近,考虑计算效率和准确性,最 终选定网格数为 260 万,网格质量良好,满足计算 要求。

400

0.69





计算空气入口和燃料入口均选质量入口,出口 选自由流出口。燃烧室头部壁面设为绝热壁面,火 焰筒壁面选择等温壁面,根据火焰筒壁面试验测量 数据选取壁面温度为700 K,测量数据如图5 所示。 计算数学模型采用 Realizable *k* - *c* 湍流模型和标准 壁面函数,燃烧模型采用部分预混火焰面生成流形 (Flamelet Generated Manifold, FGM)模型,辐射模型 采用 P-1 模型, 压力 - 速度耦合方式采用 COUPLE 算法和二阶迎风差分格式, 反应机理采用 GRI Mech 3.0 气相化学动力学机理。

0.96

10

7.2



图 5 火焰筒壁面试验温度测量数据

Fig. 5 Flame tube wall test temperature measurement data

2 结果与分析

2.1 流场分布特性

不同旋流器流量比条件下燃烧室中心截面流线 分布如图 6 所示。图中阴影区域为燃烧室回流区, 包括中心主回流区和扩张段角回流区。从图中可以 看出,随着旋流器流量比的增大,角回流区逐渐变 小,中心回流区长度变短、更加紧凑。图 7 和图 8 分 别给出了燃烧室内不同轴向位置处轴向和径向速度 的分布规律。轴向位置 y/D 为 0.23~1.25 之间的 6 个截面。随着旋流器流量比的增大,旋流器的总 流通面积逐渐增大。由图 7 和图 8 可知,旋流器出 口轴向速度增大,主燃级出口轴向速度峰值分别为 69.33,72.93,73.53,73.69 m/s,预燃级出口轴向速度 峰值分别为 84.03,89.79,96.26,100.49 m/s;主燃级 出口径向速度增大,其峰值分别为 6.87,9.59, 13.55,14.42 m/s;预燃级出口径向速度减小,其峰 值分别45.57,38.36,36.11,35.12 m/s;回流区上游 (y/D=0.23~0.49)轴向回流速度降低,回流区宽 度变窄;回流区下游(y/D=0.49~1.25)回流速度 差异逐渐减小,回流区宽度变化不大。







图 8 不同旋流器流量比条件下的径向速度分布

Fig. 8 Radial velocity distribution under different swirler flow ratios

2.2 温度场分布特性

图 9 为不同旋流器流量比条件下燃烧室出口温 升与温度分布系数 (Outlet Temperature Distribution Factor, OTDF)的试验与计算结果对比。温升为出口 平均温度与进口空气温度的差值,出口温度分布系 数为出口最高温度与平均值的差值与出口温升之 比。从图中可以看出,燃烧室温升在 800~900 K 左 右, OTDF 在 0.035~0.1 之间,燃烧室温升随旋流 器流量比增大略微减小, OTDF 整体呈增大趋势。 图中温升和 OTDF 的计算值均略高于试验值,这是 由于试验向环境的散热方式和途径相对于数值模拟 更加多元、热量损失更多。此外,试验值的温度参数 是通过有限个测量点计算平均得来,导致试验的温 升和 OTDF 值与计算值存在差异,但均符合理论分 析结果且满足误差要求。







不同旋流器流量比条件下的燃烧室中截面和出 口计算温度云图如图 10 和图 11 所示。由图 10 和 图 11 可以看出,随着旋流器流量比增大,燃烧室中 截面温度明显升高,峰值温度分别为 1 681,1 998, 2 206和 2 417 K,高温区域集中在预燃级出口处,呈 心形分布且逐渐向燃烧室出口方向扩张。这是由于 预燃级出口空气流量减小导致其附近的局部当量比 增加,燃烧加剧并释放大量热量,中心高温集中并随 流量比增大,燃烧室出口中心高温区域面积增大, 出口温度均匀性变差。这是由于燃烧室内部中心区 域燃烧加剧,高温区增大并向后扩张,对燃烧室出口 温度分布产生了影响。



Fig. 10 Temperature contour on the middle section of combustion chamber



Fig. 11 Temperature contour at the outlet of combustion chamber

2.3 浓度场分布特性

图 12 为不同旋流器流量比条件下燃烧室出口 CO 和 NO_x 排放的试验与计算结果对比。从图中可 以看出,随着两级旋流器流量比由 1.7 增大到 4.5, 燃烧室出口 NO_x 试验值由 5.11 × 10⁻⁶增大到 24.21 ×10⁻⁶,计算值由 8.54 × 10⁻⁶增大到 26.91 × 10⁻⁶;燃 烧室出口 CO 试验值由 12.98×10⁻⁶增加到 23.01×10⁻⁶,计算值由 10.9×10⁻⁶增加到 20.91×10⁻⁶。NO_x和 CO 的排放量均增大,但均符合污染物排放标准。



outlet of combustion chamber

图 13 和 14 分别为不同旋流器流量比条件下的 燃烧室中截面 CO 和 NO_x 分布云图。





由图可知,CO 主要分布在值班级出口和剪切 层附近,由于值班级出口存在局部当量比过高区域, 导致燃料燃烧不充分,生成 CO;剪切层局部温度偏低,CO氧化反应不充分。NO_x主要分布在燃烧室中心的高温区域,主要为热力型,受温度影响较大。随着旋流器流量比的增大,值班级和预燃级出口附近的 CO 明显增加,剪切层附近的 CO 略有减小,中心高温区 NO_x 明显增加。导致上述变化的原因在于随着旋流器流量比的增大,值班级出口局部当量比升高的区域面积增大,剪切层低温区变窄,主燃区燃烧加剧,高温区域面积增大。



图 14 燃烧室中截面 NO_x 分布云图 Fig. 14 NO_x distribution contour on the middle section of combustion chamber

3 结 论

通过试验测试和数值模拟,在保持旋流数不变 的前提下,系统研究了两级旋流器的气量分配对单 头部双级干式低排放(DLE)燃烧室燃烧性能及污染 物排放的影响,结论如下:

(1)随主燃级/预燃级旋流器流量比的增大,燃烧室中心回流区长度变短、更加紧凑。回流区上游轴向回流速度降低,回流区变窄;回流区下游轴向回流速度差异不大,回流区宽度变化不大。

(2)随主燃级/预燃级旋流器流量比的增大,燃烧室中心高温区面积增大,燃烧室平均温度、热点温度升高,出口温度分布均匀性变差。这是由于随流量比增大,预燃级出口局部当量比增加,中心高温区

域向燃烧室出口扩张,出口温度分布均匀性变差。

(3)随主燃级/预燃级旋流器流量比的增大, CO和NO_x生成量均增加。这是由于随流量比增 大,值班级出口局部当量比过高,燃烧不充分区域增 大,CO生成量增加;同时主燃区燃烧加剧,温度升 高,高温区域面积随流量比增大而扩张,热力型 NO_x生成量增加。

参考文献:

47(8):120-124.

- [1] 刘爱虢. 气体燃料燃气轮机低排放燃烧室技术发展现状及水平[J]. 沈阳航空航天大学学报,2018,35(4):1-28.
 LIU Ai-guo. Technology development status and level of low emission combustor for gas turbine using gas fuel [J]. Journal of Shenvang Aerospace University,2018,35(4):1-28.
- [2] 刘 凯,曾 文,刘爱虢. 某型燃气轮机燃烧室改进试验[J].
 热力发电,2018,47(8):120-124.
 LIU Kai, ZENG Wen, LIU Ai-guo. Experimental modification for combustor of a gas turbine [J]. Thermal Power Generation,2018,
- [3] 刘爱虢,李昱泽,杨宇东,等. 微型燃气轮机燃烧室燃烧特性实验[J]. 航空动力学报,2020,35(6):1335-1344.
 LIU Ai-guo, LI Yu-ze, YANG Yu-dong, et al. Experimenton on combustion characteristics of micro gas turbine combustor [J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(6):1335-1344.
- [4] LIU Y, SUN X, SETHI V, et al. Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2017, 94:12-45.
- [5] 李家松. 旋流强度对 F 级燃气轮机燃烧稳定性影响分析[J].
 热力透平,2021,50(3):161-165.
 LI Jia-song. Influence of swirl strength on combustion stability in F-

class gas turbine [J]. Thermal Turbine ,2021 ,50 (3) :161 – 165.

 [6] 徐 丽,刘 凯,曾 文.旋流数对贫预混燃烧特性影响[J/OL].航空动力学报:1-7[2022-07-01].DOI:10.13224/j. cnki. jasp. 20210675.

XU Li, LIU Kai, ZENG Wen. Effect of swirl number on lean premixed combustion characteristics [J/OL] Journal of Aerospace Power:1 - 7 [2022 - 07 - 01]. DOI: 10. 13224/j. cnki. jasp. 20210675.

[7] 葛 臣,付忠广,石 黎,等. 旋流数对某环管型燃烧室内燃烧及 NO_x 生成特性的影响[J]. 热能动力工程,2018,33(12):
 65-71.

GE Chen, FU Zhong-guang, SHI Li, et al. Effect of swirl number on combustion and NO_x formation in can-annular combustion chamber [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12):65 – 71.

[8] REN X, BRADY K B, XUE X, et al. Experimental investigation of

lean-dome high-airflow airblast pilot mixers' operability, emissions, and dynamics [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105829.1 - 105829.14.

[9] 陆羽笛,史 挺,葛 冰,等.双级燃烧器内外旋流匹配对燃烧性能的影响分析[J].燃烧科学与技术,2020,26(6): 512-520.

LU Yu-di, SHI Ting, GE Bing, et al. Analysis of influences of swirl matching of a two-stage burner on combustion performance [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26 (6): 512 – 520.

- [10] VASHAHI F, LEE J. On the emerging flow from a dual axial counter rotating swirler; LES simulation and spectral transition
 [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129:646 656.
- [11] ROJATKAR P, JOG M A, JENG S M. Numerical study of flow through 3x3 multi-swirler arrays with CO and counter swirler arrangements[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2015, 56697:36 - 45.
- [12] 刘 涛,李文高,卢克乾.流通面积比对旋流杯油雾速度场的 影响[J].航空动力学报,2017,32(10);2338-2343.
 LIU Tao,LI Wen-gao,LU Ke-qian. Effect of flowing area ratio on the spray velocity field of a swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power,2017,32(10);2338-2343.
- [13] 王志凯,陈 盛,江立军,等. 气量分配对双级轴向旋流器性 能影响的试验研究[J]. 推进技术,2019,40(8):1799-1806.
 WANG Zhi-kai, CHEN Sheng, JIANG Li-jun, et al. Experimental investigation of effects of airflow split on characteristics of dualaxial swirler [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8):1799-1806.
- [14] 汪玉明,肖 为,王志凯,等.双级轴向旋流器气量分配对流 场特性影响的数值模拟与试验验证[J].航空发动机,2022, 48(1):26-32.

WANG Yu-ming, XIAO Wei, WANG Zhi-kai, et al. Numerical simulation and test verification of the influence of air flow splits on the flow field characteristics in dual-axial swirlers [J]. Aero-engine, 2022, 48(1):26 - 32.

- [15] 刘 冉,陈 盛,王志凯,等.双级轴向涡流器气量分配对燃烧室点火特性的影响[J].推进技术,2022,43(8):253-260.
 LIU Ran, CHEN Sheng, WANG Zhi-kai, et al. Effects of dual axial swirler airflow split on combustor ignition characteristics [J].
 Journal of Propulsion Technology,2022,43(8):253-260.
- [16] 姜 磊,孔文俊.双级反向旋流器气量分配对燃烧室性能的影响[J]. 热能动力工程,2018,33(3):50-56.
 JIANG Lei, KONG Wen-jun. Effects of air split of dual-stage counter rotating swirlers on the performance of combustor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(3):50-56.

(刘 颖 编辑)