文章编号:1000-8055(2024)06-20210695-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210695

# 分级旋流燃烧室流动及碳烟排放特性研究

胡 阁,李建中,张靖周,金 武

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京210016)

摘 要:为了探究某分级旋流燃烧室流动及碳烟排放特性,结合试验和数值仿真方法对流动特性进行 研究,揭示了主、副模分级旋流燃烧室的流动发展过程。通过大涡模拟(LES)非定常流动计算,结果表明:副 模出口附近速度存在着1820 Hz的周期性振荡,而主模出口流动未见明显脉动,同时钝体下游存在进动涡核 (PVC)结构;对分级旋流燃烧室碳烟排放的数值研究,结果表明:中心回流区附近是碳烟主要生成区域,在贫 油燃烧时,随着油气比增大,碳烟浓度显著增大,碳烟质量浓度随沿程轴向距离增加均呈现先上升后减小趋 势,且其峰值对应轴向位置逐渐后移,最终导致燃烧室出口冒烟排放的差异。

关键 词:燃烧室;分级旋流;流场;非定常;碳烟
 中图分类号:V231.2
 文献标志码:A

### Flow field and soot emission characteristics of staged swirling combustor

HU Ge, LI Jianzhong, ZHANG Jingzhou, JIN Wu

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to investigate the flow field and soot emission characteristics of staged combustor, the flow field characteristics were studied by experimental and numerical simulation methods, and the flow development process was revealed. The results of large eddy simulation (LES) showed that there was a 1 820 Hz periodic velocity oscillation at the outlet of the pilot stage, but without obvious flow pulsation at the outlet of the main mode, and there was a precession vortex core (PVC) downstream the swirler. Numerical studies of soot emission characteristics showed that soot was abundant in primary recirculation zone. The soot concentration increased significantly with the increase of ratio of fuel and air in the lean combustion state. Along axial direction, the mass concentration of soot all showed a trend of decrease after rising first, and the peak corresponding to the axial position gradually moved back, ultimately resulting in a difference in soot emission from the combustor exit.

Keywords: combustor; staged swirl; flow field; unsteady; soot

随着燃烧技术的不断提高和环保意识的不断 增强,航空发动机燃烧室朝着高推重比、高温升 的方向不断发展的同时,也对排放提出了更高的 要求<sup>[1-2]</sup>。高温升燃烧室存在拓宽稳定工作范围 且解决小工况下的贫油熄火和大工况下的排气冒 烟等技术挑战,为此,先进的燃烧组织技术成为 关键。分级分区燃烧概念应运而生,该燃烧组织 方式通过空气和燃油分级的方式将燃烧区分为多 个,各燃烧区可独立工作或同时工作,可实现拓 宽燃烧室工作范围。多点直接喷射燃烧技术相比

引用格式:胡阁,李建中,张靖周,等. 分级旋流燃烧室流动及碳烟排放特性研究[J]. 航空动力学报, 2024, 39(6): 20210695. HU Ge, LI Jianzhong, ZHANG Jingzhou, et al. Flow field and soot emission characteristics of staged swirling combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(6): 20210695.

收稿日期:2021-12-06

基金项目: 国家科技重大专项(2017-Ⅲ-0002-0026, 2019-Ⅲ-0014-0058)

作者简介:胡阁(1993-),男,博士生,主要从事航空发动机燃烧室性能研究。

通信作者:李建中(1979-),男,教授、博士生导师,博士,主要从事航空发动机燃烧技术研究。E-mail: ljzh0629@nuaa.edu.cn

于预混预蒸发燃烧技术能有效避免自燃、回火和 振荡燃烧等问题,相比于富油-淬熄-贫油燃烧 (RQL)技术减排潜力大,因此多点直喷燃烧技术 是未来低排放燃烧技术的主要发展方向之一<sup>[3]</sup>。 本文基于某分级旋流多点直喷燃烧室,对其流动 及碳烟排放特性展开研究。

对多点直喷燃烧技术的研究主要分为阵列式 多点直喷和多旋流多点直喷燃烧两大类,其中Fu 等[4-5]采用试验的研究手段揭示了受限比、旋流 角度和喷嘴位置等对贫油直喷燃烧室流场和液滴 分布的影响规律,为燃烧室设计提供了有力借鉴。 Dewanji 等<sup>[6-7]</sup>采用 LES 方法研究了贫油直喷燃 烧室的流场特性,对 PVC 和旋涡破碎泡(VBB)现 象进行了解释。Patel 等<sup>[8-9]</sup> 对贫油直喷燃烧室的 研究结果表明剪切层有利于油雾散布, VBB 有利 于火焰的稳定。Broatch 等<sup>[10]</sup> 通过模态分解的方 法分析了贫油直喷(LDI)旋流场 LES 数值喷雾数 据,表明燃烧室内产生的主要流动结构(如进动涡 核、涡破裂泡、再循环区等)在燃料-空气混合过 程中起着至关重要的作用,并验证了 VBB 和 PVC 的振荡引起的旋流-声学相互作用。上述研究表 明LDI技术的核心是实现良好燃油雾化和油气 混合,因此流场结构十分关键。

Wang 等[11] 通过对旋流杯的非定常流动数值 仿真,结果表明旋流杯出口处的非定常流动与 PVC 的周期性运动有关,同时各级旋流器旋向组 合对中心回流区结构、各级气流剪切作用、湍流 强度等有显著影响,进而影响燃烧室高效稳定燃 烧。Dhanuka、Sturgess 等针对 TAPS(twin annular premixing swirler)燃烧室开展了冷热态流动试验 研究<sup>[12-13]</sup>,发现 TAPS 燃烧室下游流场显著不同 于传统的多级旋流器,主模和副模之间存在台阶 涡,主、副模射流在台阶涡下游相互剪切混合,在 燃烧状态时,形成了分层火焰,这也是决定 TAPS 燃烧室性能的关键技术之一。通过对 TAPS 燃烧 室热态流场的回火和回流区火焰稳定性的研 究<sup>[14]</sup>,鉴于 TAPS 燃烧室流场结构特点,重点分析 了剪切层和主、副模两级掺混区域,结果表明:剪 切层可以有效的抑制副模尾部的燃气速度,同时 在主模旋流作用下,有利于主模燃烧区火焰成功 着火。

可以发现,对于分级旋流预混燃烧室的研究 相对较热,对基于分级旋流多点直喷燃烧室的研 究还有很大的研究空间,国内西北工业大学索建 秦课题组<sup>[15-17]</sup>对分级旋流多点直喷燃烧室有过研究,但主要是对定常流动及出口温度等燃烧特性的研究,在这种背景下,本文基于分级旋流多点 直喷燃烧室,采用试验和数值仿真相结合的手段 对其非稳态流动和碳烟排放特性展开研究。

## 1 研究对象及系统

### 1.1 分级旋流燃烧室结构

分级燃烧燃烧室头部主要包含有:一级轴向 叶片结构的副模结构、由一级轴向叶片结构形成 的旋流部分和非旋流通道部分组成的主模结构, 头部结构如图 1(a)所示,其中 *M*<sub>1st</sub>、*M*<sub>2nd</sub> 分别为流 经副模、主模的流量, *M*<sub>2nd</sub> 由流经非旋部分的 *M*<sub>2nd-d</sub> 及流经旋流部分的 *M*<sub>2nd-s</sub>组成。主、副模流量分 配为4:1,主副模旋流数分别为1.52、0.44。燃烧 室结构如图 1(b),简化模型燃烧室结构,忽略了 壁面冷却孔。





#### 1.2 流场试验系统

粒子图像测速技术(PIV)具有在对流动无干 扰的条件下实现全场测量,并具有和单点测量相 当的空间分辨率,因此本研究也采用 PIV 的手段 对主副模分级燃烧组织的流动特性开展试验研究。 流场试验在常温常压下进行,试验系统如图2所 示,主要由分级旋流燃烧室、流量测量系统、光学 测量系统等组成。在燃烧室进口前管道布置了由 若干直径为5mm小孔阵列排布构成的整流段以 保证燃烧室进口气流的均匀与稳定,在整流段后 布置总压管测量来流总压;在燃烧室出口排气段 布置若干喷淋小孔,用于吸附处理随气流运动到 出口附近的示踪粒子。试验采用平均直径为10µm 的 MgO 作为示踪粒子,具有足够高的跟随性以满 足试验要求<sup>[18]</sup>,试验采用 Nd:YAG 双脉冲激光器, 激光波长 532 nm,数字相机为 Imperx 公司的 Bobcat B2041 型,最大分辨率为2048 像素×2048 像素。



Fig. 2 Schematic of PIV experiment system

#### 1.3 数值仿真方法

分别采用 RANS 对流场和碳烟排放进行仿真 及 LES 开展非定常流动研究。RANS 和 LES 计 算采用同一网格,模型燃烧室采用多面体网格划 分,近壁处划分边界层网格,网格质量 0.3 以上, 网格数为 420 万。RANS 模拟时选用基于压力的 求解器,边界条件设置为压力进口、压力出口,总 压损失系数为 4%,湍流模型选用 Realizable *k-ε* 模型。

主、副模喷雾燃烧数值仿真时,在拉格朗日 坐标下采用 DPM 模型追踪燃油颗粒轨迹,副模 为压力雾化喷嘴,主模燃油由周向均匀分布的直 射式喷嘴供给,燃烧模型采用稳态火焰面模型, 化学反应机理采用 Kundu 等的 C<sub>12</sub>H<sub>23</sub> 的 23 步化 学反应简化机理<sup>[19]</sup>,选用 Moss-Brookes 碳烟模 型<sup>[20]</sup>,该模型计算过程中包含了碳烟的形成、表 面增长和氧化等过程。本文所用分级旋流燃烧室, 在小工况时只有副模油路工作,此时为扩散燃烧 方式,大工况时主、副模油路同时工作,实现了燃 烧室工作范围的拓宽。由于碳烟颗粒主要在大工 况下产生,本文主要计算大工况下燃烧室喷雾燃 烧过程,分级比τ定义为副模燃油流量与燃烧室 总燃油流量之比φ为燃烧室总油气比。如表1所 示参数,对燃烧室总油气比φ对 soot 排放的影响 规律展开了研究。

表 1 数值计算工况 Table 1 1 Numerical simulation conditions

工况	进口温度/K	进口压力/Pa	分级比τ	油气比
а	700	911 925	0.2	0.034
b	700	911 925	0.2	0.04
c	700	911 925	0.2	0.046
d	700	911 925	0.2	0.052

## 2 结果及分析

## 2.1 流动特性

图 3(a)为 RANS 仿真 YOZ 截面冷态流场,红 色虚线框为 PIV 试验时 YOZ 截面有效取景视窗, 图 3(b)为 PIV 试验 YOZ 截面冷态流场。H=100 mm, 以H为基准对燃烧室尺寸归一化。可以看出在 试验测量所对应的区域内,试验得到的流场与数 值仿真得到的流场较为吻合,均能在头部下游形 成典型的分开分层旋流运动,主、副模射流在下 游交汇掺混进而形成了剪切层,同时下游流场主 要包含有3种回流区,分别为主回流区(PRZ)、台 阶回流区(LRZ)和角回流区(CRZ),其中 PRZ、 LRZ、CRZ 相互独立不连通,这与公开文献中心 分级燃烧室的典型流动特征相吻合,说明该结构 有效达到了分级的目的。由于主模存在一定占比 的非旋空气,其与主模旋流空气混合,使得主模 射流起始径向速度较小,而主要沿轴向方向流动, 主模射流受角回流区的压制作用而向燃烧室中心 偏转。随着主模旋流射流向燃烧室下游的流动和 发展,角回流区对其在离心力的作用下沿径向扩 张的抑制作用逐渐减弱,旋流空气得以再一次沿 径向向外扩张,从而形成一个较大的二次回流区, 且产生的回流进一步影响旋流器出口附近流动, 使得出口下游形成了对称的回流区,该回流区还 限制了主模射流产生的一次回流区的发展。

LES 在进口温度为 700 K、压力为 911 925 Pa 条件下进行,边界条件设置为速度进口、压力出 口,选用 WMLES 模型,进口速度为 RANS 在总压



图 3 YOZ 截面流场结构 Fig. 3 Flow field on central section YOZ

损失系数为4%时对应的进口速度。在LES计算 过程中,对副模出口射流附近点P(Z/H=0.5, r=0.1) 和主模出口射流附近点R(Z/H=0.5, r=0.4)的轴向 速度 u进行了监测,时间步长为10<sup>-5</sup> s,为保证流 场充分发展到统计定常状态,记录20000个时间 步长,并对该速度信号做快速傅里叶变换(FFT), 频率分辨率约为5 Hz。图4为点P和点R的脉 动速度频谱,点P在1820 Hz处具有明显的振荡 峰值,点R处无明显主频,表明该分级燃烧室旋 流流场存在周期性流动。

图 5 为点 P 轴向速度 u 在一个振荡周期内的



图 4 轴向速度频谱







演变过程,  $t_1$ - $t_8$  为该振荡周期内等间隔的 8 个时间点,  $\delta t$ 为 0.54 ms, 这与 FFT 得出的特征频率对应, 即 $f = 1/\delta t$ 。

图 6 所示为 t<sub>1</sub>-t<sub>8</sub> 各时刻的燃烧室瞬态流场 分布图。瞬态流场中涡旋未表现出规则的回流区 结构, 而是各种不同尺度的涡旋分离与合并的过 程。连续变化的流场表明在旋流射流的根部存在 较明显的波动, 该区域为旋流射流与中心回流区 相互作用的起始点, 当旋流射流受到中心回流区 顶点扰动时, 在旋流流动作用下产生周期性地脉





图 6 一个周期内不同时刻的流场分布 Fig. 6 Flow field at different times in a period

图 7为*Q* = 10<sup>9</sup>获取的某瞬时时刻的基于旋流 器轴向速度 *V<sub>z</sub>*染色的流场结构特征。*Q*是速度 梯度张量的不变量之一,其定义为:

$$Q = \left(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}\right)/2 \tag{1}$$

其中  $\Omega_{ij}\Omega_{ij}$ 表示转动速率,  $S_{ij}S_{ij}$ 表示应变率。可 以发现,此时形成了明显的进动涡核结构。结合 图 5 和图 6,点 P处的周期性速度变化与进动涡 核的周期性演变有关,而进动涡核主要受副模旋 流结构的影响。



Fig. 7 Instantaneous flow field structure

## 2.2 碳烟特性

不同工况下燃烧室出口温度分布系数(OTDF)

及燃油雾化性能如图 8 所示。OTDF 根据文献 [22] 中公式计算所得,颗粒直径取统计液滴最大直径 尺寸。可以看出,在该模型条件下,在分级比、燃 烧室进口气动参数不变的前提下, ø 增大,OTDF 显著减小,燃油颗粒的蒸发比例逐渐增大、颗粒 直径逐渐减小。这说明了此结构下 ø 增大,燃烧 室燃料雾化更优,燃烧更充分、OTDF 分布越均匀。 上述不同状态的主要区别是主油路直射式喷嘴供 油量不同,因此可推断在直射式喷嘴直径、角度 等几何参数不变时,供油量的改变可能会对其雾 化性能有重大影响。



Fig. 8 OTDF and fuel atomization characteristics

不同油气比时燃烧室中心截面温度分布云图 如图9所示。可以发现油气比对燃烧室温度分布 的影响,而碳烟生成与高温区密切相关。

Moss-Brookes 碳烟模型中,  $C_2H_2$  是碳烟形成 的重要先驱物<sup>[23]</sup>, 下式分别为碳烟初始生成速率  $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{inception}$ 、碳烟表面增长速率 $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{growth}$ 、碳烟氧 化速率 $\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{oxidation}$ :

$$\left(\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{inception}} = c_1 M_{\mathrm{p}} \left(\rho \frac{\omega_{\mathrm{C_2H_2}}}{M_{\mathrm{C_2H_2}}}\right) \mathrm{e}^{-21\ \mathrm{I}00/T} \tag{2}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{growth}} = c_2 \left(\rho \frac{\omega_{\mathrm{C_2H_2}}}{M_{\mathrm{C_2H_2}}}\right) \mathrm{e}^{-21\,100/T} \times (\pi n)^{1/3} \left(\frac{6\omega}{\rho_{\mathrm{soot}}}\right)^{2/3}$$
(3)

$$\left(\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\right)_{\mathrm{oxidation}} = -4.232 \ 5\rho \frac{\omega_{\mathrm{OH}}}{M_{\mathrm{OH}}} \ \sqrt{T} \ (\pi n)^{1/3} \left(\frac{6\omega}{\rho_{\mathrm{soot}}}\right)^{2/3}$$
(4)

其中ω为质量分数, M为摩尔质量, c1、c2为常数。

图 10显示了不同工况时沿轴向截面上的密 度加权平均碳烟质量浓度变化曲线。不同工况下





碳烟质量浓度随着沿程轴向距离增加均呈现先上 升后减小趋势。由于燃烧过程中碳烟在生成的同 时伴随有碳烟的氧化,在燃烧室上游区域碳烟生 成速率高于碳烟的氧化速率,而在燃烧室下游区 域碳烟的氧化速率高于生成速率,因此碳烟质量 浓度沿程变化趋势表现为先增加后减小。其中工 况 a、工况 b、工况 c 在 Z/H 为 1 时碳烟质量浓度





最大,工况d碳烟浓度峰值位置在Z/H为1.3处, 且随着φ增大,碳烟浓度峰值逐渐增大,说明φ对 燃烧室碳烟生成影响明显,从而导致出口冒烟排 放产生差异。

图 11 为不同工况时 YOZ 截面 Soot 质量分数 及流线图。结合图9温度分布,燃烧化学反应释 热区域主要集中在中心回流区,回流区附近气流 速度低,停留时间长,不利于局部富油区的扩散, 同时回流区内形成的高温缺氧环境,造成其是碳 烟生成的主要场所。







燃烧室 YOZ 截面 Soot 质量分数及流线图 图 11 Fig. 11 Mass fraction and streamline diagram of Soot on combustion chamber section YOZ

碳烟生成主要包含有碳烟的成核、碳烟的表 面增长及碳烟的氧化。碳烟的成核和碳烟的增长 过程使得碳烟浓度增加, 而碳烟的氧化过程通过 消耗已生成的碳烟而使得碳烟的浓度降低,因此 有必要对碳烟生成过程中不同过程进行单独 分析。

图 12 为不同工况时 YOZ 截面 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 质量分数 分布。结果表明 C,H,的生成依赖于燃料的质量 浓度,这与文献[24-25]结论相一致。







图 13 为 YOZ 截面碳烟表面增长速率,看出 碳烟的表面增长速率与碳烟质量浓度分布密切相 关。碳烟表面增长主要集中在主副模射流剪切层 附近,和碳烟质量浓度分布位置相同。油气比增 大时,碳烟表面增长速度峰值逐渐增大,碳烟生 成速率加快。

图 14 为不同 ø时 YOZ 截面碳烟氧化速率, 各 ø时碳烟的氧化速率极值相同,其位置相较碳 烟表面增长位置滞后,即氧化速率分布受到碳烟 生成和增长过程的影响。









## 3 结 论

本文通过对某单头部分级旋流燃烧室流动和 碳烟排放特性的研究,得出结论:

1) 副模旋流器出口附近形成一扩张角为45° 的中心回流区, 主模旋流空气与副模空气剪切混 合后二次扩张, 再次建立了稳定的逆压梯度, 形 成二次中心回流区。燃烧状态下中心回流区结构 改变为扩张角60°的中心回流区, 且主模旋流形 成贴壁流动, 这有利于小工况下的火焰稳定;

 2)副模出口存在着1820 Hz 周期性速度振荡,主模出口流动未见明显脉动,副模出口周期 性速度变化与进动涡核的周期性演变有关;

3)回流区形成了高温缺氧的环境,其附近气 流速度低、停留时间长,不利于局部富油区的扩 散,使得回流区附近为碳烟主要生成区域;

4)贫油燃烧时,随 ø 增大,碳烟浓度逐渐增大,且燃烧室内碳烟浓度随沿轴向距离增大呈现先上升后减小趋势,分别对应于碳烟的生成和氧化过程,其差异造成燃烧室出口冒烟排放的差异。

## 参考文献:

- [1] LIEUWEN T C, YANG V. Gas turbine emissions[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
- [2] LEFEBVRE A H, WHITELAW J H. Gas turbine combustion[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1984, 5(4): 228.
- [3] 张弛,林宇震,徐华胜,等.民用航空发动机低排放燃烧室 技术发展现状及水平[J].航空学报,2014,35(2):332-350.
  ZHANG Chi, LIN Yuzhen, XU Huasheng, et al. Development status and level of low emissions combustor technologies for civil aeroengine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 332-350. (in Chinese)
- [4] FU Yongqiang, CAI Jun, JENG S M, et al. Characteristics of the swirling flow generated by a counter-rotating swirler: AIAA 2007-5690 [R]. Reston, Virigina: AIAA, 2007.
- [5] FU Yongqiang, JENG S M, TACINA R. Confinement effects on the swirling flow generated by a helical axial swirler: AIAA 2006-545 [R]. Reston, Virigina: AIAA, 2006.
- [6] DEWANJI D, RAO A G, POURQUIE M, et al. Investigation of flow characteristics in lean direct injection combustors[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(1): 181-196.
- [7] DEWANJI D, RAO A G. Spray combustion modeling in lean direct injection combustors: Part I single-element LDI[J]. Combustion Science and Technology, 2015, 187(4): 537-557.
- [8] PATEL N, MENON S. Simulation of spray-turbulence-flame interactions in a lean direct injection combustor[J]. Combustion and Flame, 2008, 153(1/2): 228-257.
- [9] PATEL N, KIRTAŞ M, SANKARAN V, et al. Simulation of spray combustion in a lean-direct injection combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31(2): 2327-2334.
- [10] BROATCH A, CARRERES M, GARCÍA-TÍSCAR J, et al. Spec-

tral analysis and modelling of the spray liquid injection in a lean direct injection (LDI) gas turbine combustor through Eulerian-Lagrangian large eddy simulations[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 106992.

- [11] WANG S, YANG V, HSIAO G, et al. Large-eddy simulations of gas-turbine swirl injector flow dynamics[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 583: 99-122.
- [12] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J. Unsteady aspects of lean premixed prevaporized gas turbine combustors: flame-flame interactions[J]. Journal of Propulsion & Power, 2010, 273: 631-641.
- [13] STURGESS G J, ZELINA J, SHOUSE D T, et al. Emissions reduction technologies for military gas turbine engines[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(2): 193-217.
- [14] DHANUKA S K, TEMME J E, DRISCOLL J F, et al. Vortexshedding and mixing layer effects on periodic flashback in a lean premixed prevaporized gas turbine combustor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 2901-2908.
- [15] 于涵,索建秦,朱鹏飞,等.中心分级贫油直喷(LDI) 燃烧室 流动及污染排放特性研究[J].西北工业大学学报,2018, 36(5): 816-823.
  YU Han, SUO Jianqin, ZHU Pengfei, et al. The characteristic of flow field and emissions of a concentric staged lean direct injec-

tion(LDI) combustor[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(5): 816-823. (in Chinese)

[16] 于涵,索建秦,郑龙席.带收敛出口的单元贫油直喷燃烧室 冷态和热态流动特性研究[J].推进技术,2019,40(3):608-618.

YU Han, SUO Jianqin, ZHENG Longxi. Investigation of non-reaction and reaction flow characteristic of single element lean direct injection combustor with convergent outlet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(3): 608-618. (in Chinese)

[17] 李乐, 索建秦, 于涵, 等. 中心分级多点直喷燃烧室冷态流动特性研究[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1339-1350.
LI Le, SUO Jianqin, YU Han, et al. Non-reaction flow characteristic of concentric staged multi-point direct injection combustor[J].

Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(6): 1339-1350. (in Chinese)

- [18] CHEN Jian, LI Jianzhong, YUAN Li, et al. Flow and flame characteristics of a RP-3 fuelled high temperature rise combustor based on RQL[J]. Fuel, 2019, 235: 1159-1171.
- [19] KUNDU K, PENKO P, VANOVERBEKE T. A practical kinetic mechanism for computing combustion in gas turbine engines: AIAA 1999-2218 [R]. Reston, Virigina: AIAA, 1999.
- [20] BROOKES S, MOSS J. Predictions of soot and thermal radiation properties in confined turbulent jet diffusion flames[J]. Combustion and Flame, 1999, 116(4): 486-503.
- [21] 秦皓, 丁志磊, 李海涛, 等. LESS 燃烧室非定常旋流流动[J]. 航空动力学报, 2015, 30(7): 1566-1575.
  QIN Hao, DING Zhilei, LI Haitao, et al. Unsteady swirling flow in low emissions stirred swirls combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(7): 1566-1575. (in Chinese)
- [22] 杨思恒,王建臣,张弛,等.三头部中心分级燃烧室出口温度分布研究[J].工程热物理学报,2021,42(10):2737-2748.
  YANG Siheng, WANG Jianchen, ZHANG Chi, et al. Investigation on outlet temperature distribution of a three-sector centrally staged combustor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(10): 2737-2748. (in Chinese)
- [23] BASHIRNEZHAD K, MOGHIMAN M, ZAHMATKESH I. Studies on soot formation and combustion in turbulent spray flames: modeling and experimental measurement[J]. Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering-International English Edition, 2007, 26: 45-54.
- [24] PENKO P, KUNDU K, SIOW Y, et al. A kinetic mechanism for calculation of pollutant species in Jet-a combustion: AIAA 2000-3035[R]. Reston, Virigina: AIAA, 2000.
- [25] 李宇航, 张弛, 王建臣, 等. 预燃级对 TeLESS Ⅱ燃烧室冒烟 排放的影响[J]. 航空动力学报, 2018, 33(10): 2424-2433.
  LI Yuhang, ZHANG Chi, WANG Jianchen, et al. Effect of pilot strutures on smoke emissions in the TeLESS Ⅱ combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(10): 2424-2433. (in Chinese)

(编辑:张 雪)