

文章编号: 1000-8055(2024)12-20220312-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220312

旋流强度对双旋流燃烧室雾化特性影响

高亚平^{1,3}, 刘存喜^{3,4}, 郑昭卓², 梅德清¹, 王少林^{3,4}, 刘富强^{3,4}, 徐 纲^{3,4}

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 空装驻北京地区第五军事代表室, 北京 101300;

3. 中国科学院 工程热物理研究所 轻型动力重点实验室, 北京 100190;

4. 中国科学院大学 航空宇航学院, 北京 100049)

摘 要: 基于粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV)、平面激光散射方法 (planar laser scattering, PLS) 和高速喷雾粒度仪研究了不同旋流强度下预膜式空气雾化喷嘴的雾化特性, 总结了燃油空间分布、喷雾锥角、液滴粒径等参数随旋流强度的变化规律。结果表明: 随内级旋流强度增加, 旋流器出口处气流轴向速度降低, 喷雾锥角的轴向长度、径向宽度、喷雾锥角以及液滴粒径均呈现先增加后降低的趋势; 随外级旋流强度自 0.695 增加至 0.987, 中心回流区起始于轴向距离 70 mm 的位置。内级旋流强度较弱时, 喷雾锥角随外级旋流强度增加而增加, 液滴粒径随外级旋流强度增加先减小后增加; 内级旋流强度较强时, 喷雾锥角、液滴粒径随外级旋流强度增加而增加。研究结果解释了预膜式空气雾化喷嘴在不同旋流强度下喷雾性能的演变规律, 为改善旋流燃烧室雾化性能提供理论支撑。

关 键 词: 旋流强度; 燃油分布; 喷雾锥角; 液滴粒径; 预膜式空气雾化喷嘴; 光学诊断测量

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Study on the effect of swirl intensity for atomization characteristics in two-stage swirl combustor

GAO Yaping^{1,3}, LIU Cunxi^{3,4}, ZHENG Zhaozhuo², MEI Deqing¹,

WANG Shaolin^{3,4}, LIU Fuqiang^{3,4}, XU Gang^{3,4}

(1. School of Automotive and Traffic Engineering,

Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. No.5 Military Representative Office in Beijing of Military Representative Bureau of
Air Force Armament Department, Beijing 101300, China;

3. Laboratory of Light-Duty Gas-Turbine, Institute of Engineering Thermophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. School of Aeronautics and Astronautics,
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on particle image velocimetry (PIV), plane laser scattering (PLS) and high speed granulometer, the atomization characteristics of prefilming air-blast atomizer under different swirl intensities were studied. The variation laws of fuel spatial distribution, spray cone angle and fuel particle size with swirl intensity were summarized. It was found that with the increase of the S_{ni} , the axial velocity

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0005-0048, 2017-III-0007-0032)

作者简介: 高亚平 (1996—), 女, 硕士, 主要从事燃油雾化及燃烧基础研究。

通信作者: 王少林 (1983—), 男, 助理研究员, 博士, 从事航空发动机燃油雾化理论与技术研究。E-mail: wangshaolin@iet.cn

引用格式: 高亚平, 刘存喜, 郑昭卓, 等. 旋流强度对双旋流燃烧室雾化特性影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 20220312. GAO Yaping, LIU Cunxi, ZHENG Zhaozhuo, et al. Study on the effect of swirl intensity for atomization characteristics in two-stage swirl combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(12): 20220312.

of the airflow at the outlet of the swirler decreased. Meanwhile, the axial length and radial width of the spray cone increased first and then decreased, and the spray cone angle and droplet diameter also showed the same trend. The central recirculation zone occurred within the S_{no} range from 0.695 to 0.987, whose starting position was $X=70$ mm. When the S_{ni} was weak, the spray cone angle increased with the increase of S_{no} , and the droplet diameter decreased first and then increased with the increase of S_{no} . When S_{ni} was strong, spray cone angle and droplet diameter were positively correlated with S_{no} . The results showed that the evolution law of spray characteristics of prefilming air-blast atomizer under different swirl intensities was explained, which could provide a theoretical support for improving atomization performance of swirl combustor.

Keywords: swirl intensity; fuel distribution; spray cone angel; droplet diameter; prefilming air-blast atomizer; optical diagnostic measurement

随着环境污染与能源短缺的问题日益突出,对航空发动机的高效燃烧与洁净排放提出了愈加严格的要求。燃烧室是航空发动机的重要部件之一,通过合理组织油气以及与燃烧室优化匹配以实现高效率燃烧,是先进航空发动机研发的关键技术目标^[1-4]。对多旋流分级燃烧室而言,预燃级的旋流组织对其雾化特性、点火性能、火焰稳定等具有很大的影响。燃烧室内的流场特性及燃油雾化特性等是航空发动机燃烧研究的重要内容^[5-9]。

良好的雾化性能是实现高效清洁燃烧的关键环节。燃油雾化粒度越细,则蒸发汽化进行得越快,有助于提高燃油燃烧的速度。目前,通常采用液滴平均直径、液滴尺寸分布、雾化锥角以及燃油周向分布不均匀性等参数表征雾化性能^[10-13]。Gurubaran 等^[14]应用平面 Mie 散射、平面激光诱导荧光等光学测量手段开展了预膜式喷雾在强旋流作用下的雾化特性研究,受旋流影响,较大尺寸的液滴受旋流气流离心力作用向外径向扩散,小液滴集中于中心回流区,雾滴平均粒径随空气压降的增加而降低。李振祥等^[15]应用试验和数值模拟相结合的方法研究了双旋流燃烧室内的喷雾特性,发现液滴粒径和液膜厚度受内外气流的剪切力主导,受气流影响,液滴平均粒径自喷雾边界处沿径向向中心处逐渐减小,回流区内的液滴平均粒径最小。桂韬等^[16]应用试验与数值模拟相结合的方法研究了不同旋流器型式对双旋流燃烧室内索特平均直径、雾化锥角等雾化特征参数的影响规律,发现旋流空气与液滴之间的动量交换以及气流剪切力是导致雾化形态和索特平均直径(sauter mean diameter, SMD)发生变化的主要原因,其中,双级轴向旋流器的组合在雾化角度上明显大于径向旋流器的组合。

旋流燃烧室内,预膜式空气雾化方式因其借

助旋流空气剪切相互作用致使油膜破碎,更有利于燃油雾化而被广泛使用^[17-20]。雾化过程中,一方面燃油流经斜切小孔易形成周向均匀性较高的液膜,降低了液膜厚度;另一方面在燃油流量较低时,增加预膜唇边的长度可使其更好地与旋流空气接触形成均匀液膜。因此喷嘴结构亦会对雾化性能造成不同程度的影响。彭云晖等^[21]研究了应用预膜式空气雾化喷嘴的双旋流燃烧室在关键设计参数(双旋流器结构、旋流数、喷嘴结构、套筒张角)下的喷雾和流动特性,发现旋流器反向布置可使燃油分布区域减小,套筒结构对雾滴分布范围、火焰稳定性等影响较为复杂。Chin 等^[22]研究了不同燃料性质和空气旋流旋向对预膜式的喷雾性能的影响,发现内旋流空气与燃油旋向相同,外旋流空气与燃油旋向相反时,喷雾平均粒径最小,内旋流空气与燃油旋向相反,外旋流空气与燃油旋向相同时,喷雾平均粒径最大。

综上所述,当前针对应用预膜式空气雾化喷嘴的旋流燃烧室内雾化特性的相关研究已取得一定的进展,前期研究多是基于空气动力、液体流速等参数分析固定喷嘴结构下的液滴粒径分布等,缺少涉及喷嘴自身结构参数下的系统性研究,尚未形成燃油分布,流场形态受其设计方案的影响规律。因此,本文采用粒子图像测速仪、平面激光散射方法以及高速喷雾粒度仪对预膜式空气雾化喷嘴在不同旋流强度下所形成的流场结构和雾化性能进行研究,以探究导致燃烧室内雾化性能呈现出不同规律的内在机制。

1 研究对象与试验装置

1.1 研究对象

采用单头部两级旋流燃烧室为研究对象^[23],燃烧室头部结构示意图如图 1 所示。头部结构分

别由内级旋流器、喷嘴和外级旋流器这 3 个组件组成, 其中外级旋流器采用有机玻璃制作, 并进行了透明化处理。旋流器结构上, 由两级反旋布置的轴向旋流器构成, 两级反向旋流强烈的剪切作用能够加速燃油雾化和油气掺混。雾化方式上, 采用预膜式空气雾化喷嘴, 燃油经过预膜喷嘴形

成油膜, 紧接着在预燃级内外两级反旋气流的剪切作用下进一步破碎雾化, 改善雾化效果。为探究内外旋流强度对雾化特性的影响, 试验中所采用的头部设计方案如表 1 所示, 主要包括旋流器内级叶片角度(θ_{s1})、内级叶片个数(n)、外级叶片角度(θ_{s2}), 从旋流器进口看顺时针方向为“+”。

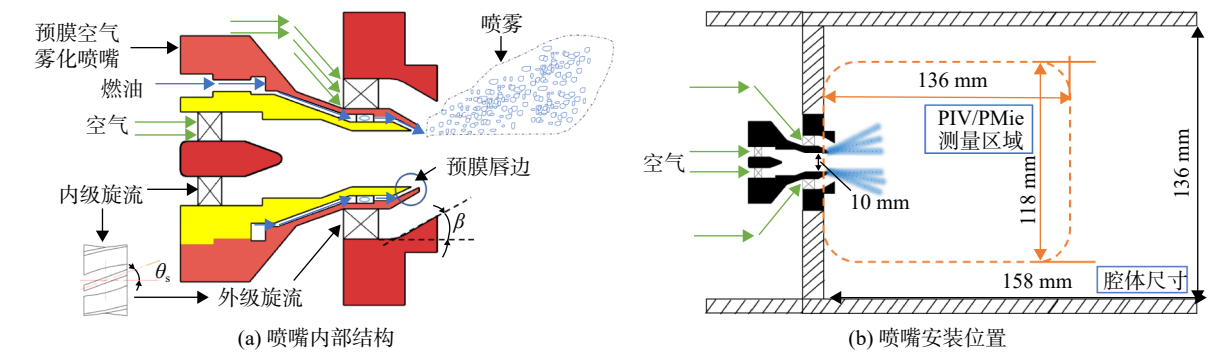


图 1 预燃级结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pilot stage structure

表 1 预燃级参数设计
Table 1 Parameter design of pilot stage

方案编号	内级叶片角度 $\theta_{s1}/(^{\circ})$	内级叶片数目 n	外级叶片角度 $\theta_{s2}/(^{\circ})$	内旋流数 S_{ni}	外旋流数 S_{no}
S1	-20	6	+40	0.235	0.695
S2	-20	8	+40	0.266	0.695
S3	-30	8	+40	0.427	0.695
S4	-20	6	+45	0.235	0.828
S5	-20	6	+50	0.235	0.987
S6	-30	8	+50	0.427	0.987
S7	-30	8	+55	0.427	1.183
S8	-30	8	+60	0.427	1.434

1.2 试验装置

试验系统主要由供气系统、供油系统、控制系统、测量系统以及单头部矩形燃烧室模型等组成, 如图 2 所示。试验过程中, 空气由小型容积式螺杆压缩机提供, 通过试验管路到达试验件进气段, 试验管路上装有科氏(Coriolis)力质量流量计, 测量精度可达 2%, 用于实时测量到达进气段的空气流量。空气经整流段进入火焰筒, 在火焰筒壁面两侧开设可视窗, 上侧开设激光窗, 测量区域为 136 mm × 118 mm。整流段前端和火焰筒后端均装有两对压力和温度传感器, 用于实时测量试验过程中燃烧室前后压力和温度。燃油经燃油泵压出后, 通过调节回流阀满足试验流量要求进入换热段, 换热段通过调节冷热燃油掺混量以控制

温度, 最后通过无油静音泵启动气动电磁阀使得燃油以一定的油压和一定的油温供给试验段。试验工况选定为旋流器前后压降 3%, 空气质量流量为 59.33 kg/h, 油气比为 0.35, 流场测量过程中不供油。

试验过程中分别采用粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV) 和平面激光散射方法 (planar laser scattering, PLS) 进行流场形态和燃油分布特性的测量。PIV 测试系统主要由光路系统、图像采集系统、控制系统和图像处理系统组成, 光路系统依靠 neodymium-doped yttrium aluminium garnet (Nd:YAG) 双腔激光器提供光源, 激光导光臂以及片光源成型部件用来调节光路位置; 图像采集系统包括 (charge coupled device, CCD)

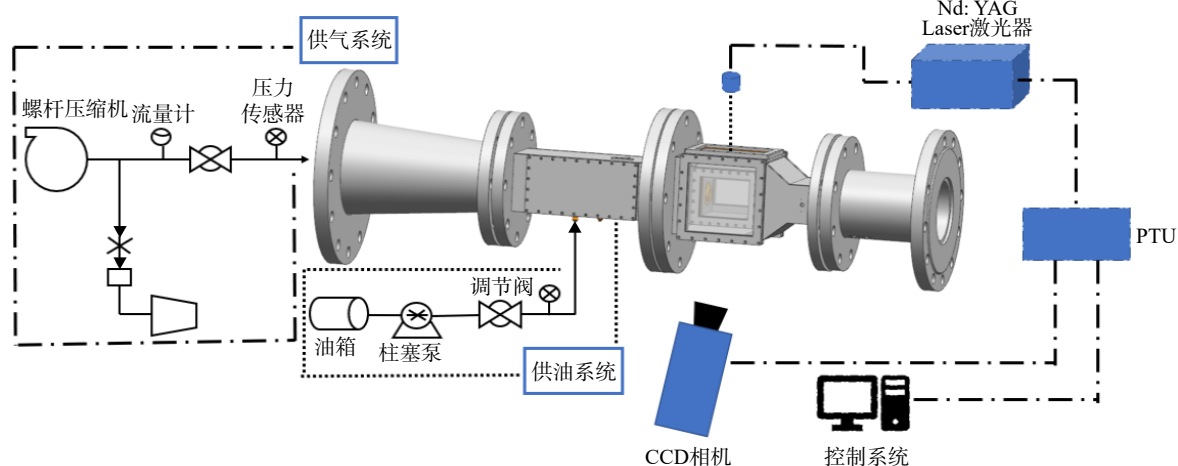


图2 雾化特性试验系统

Fig. 2 Experimental system for atomization characteristics

相机、带通滤波片以及数据采集部件。其中试验采用波长为 532 nm 的激光, 激光脉冲能量 200 mJ, 脉冲宽度 6~8 ns, 脉冲频率最大为 15 Hz, CCD 相机分辨率为 1376 像素 × 1040 像素, 帧频为 10 帧/s, 最小帧间隔 500 ns, 量子效率 65%@500nm, 带通滤波片为 (532±10) nm, 使得 CCD 相机只采集某范围段波长的光, 用于消除噪声影响。控制系统包括计算机和时间同步控制器 (PTU), 作为整个 PIV 控制系统的核心, 分别给激光器和 CCD 相机发射 (transistor-transistor logic, TTL) 脉冲信号, 保证激光器和相机同步, 测量过程中需加入示踪粒子, 所采用的示踪粒子为 3~5 μm 的 TiO₂, 通过采集一定时间内多次曝光的粒子图像, 得到某一测量平面的二维速度场数据。

PLS 测量系统与 PIV 测量系统相似, 试验时采用波长 266 nm 的紫外光, 所采集图像的灰度值正比于测试区中激光强度和燃油质量, 以得到燃油空间分布。因航空煤油中的单环和双环芳香化合物在紫外线照射下能够发出荧光, 燃油分布特性测量时不需要添加额外的示踪剂, 故先开展燃油分布特性测量。

采用高速喷雾粒度仪进行液滴粒径的测量, 主要由发射端、接收端、导轨、控制系统及数据采集系统组成, 试验装置如图 3 所示。发射端光源采用 638 nm、20 mW 的高稳定固体激光器, 接收端采用 38 单元均匀交叉分布的高灵敏度探测器, 可测量到 0.1~2 080 μm 粒径范围下的粒子, 测量浓度最高可达 90%, 采集频率最高可达 10 kHz, 测量准确度优于 0.5%。

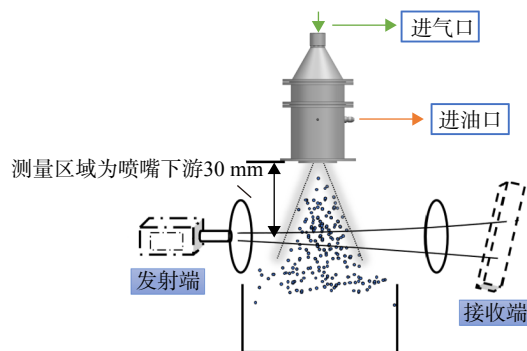


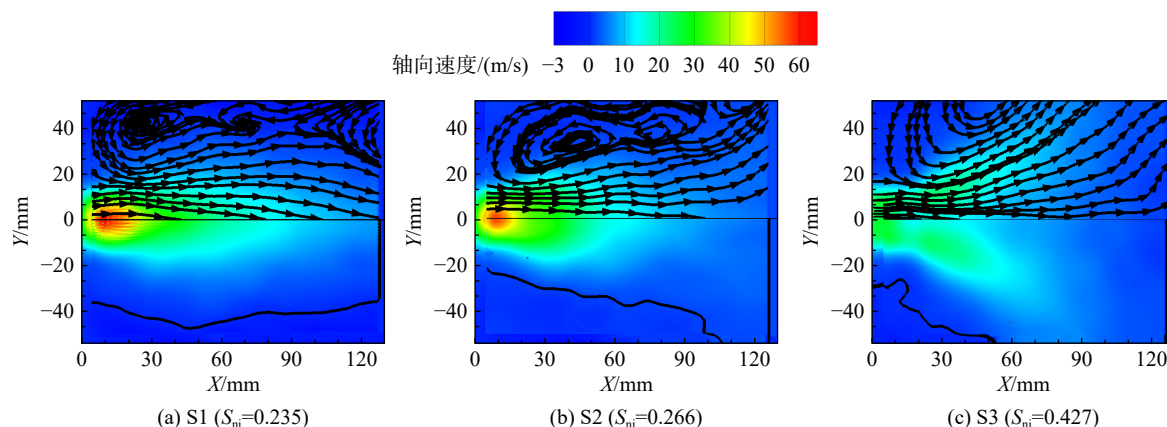
图3 液滴粒径测量系统

Fig. 3 Droplet size measurement system

2 分析与讨论

2.1 流场形态

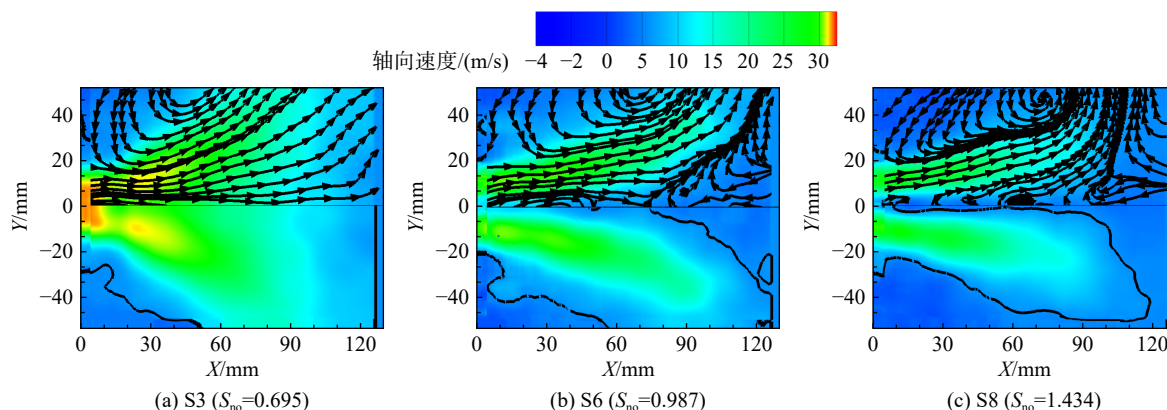
文中 PIV 流场测量结果均为样本数为 100 的瞬态流场的平均结果, 来避免瞬态流场测量结果的随机性。以旋流器中心线为参考建立坐标系, 以轴向速度方向为水平方向, 径向速度方向为竖直方向, 且以旋流器出口位置为零点, 图例所示 V 表示速度, S_{ni} 表示内级旋流强度, S_{no} 表示外级旋流强度。图 4 为中心截面位置不同内级旋流强度 S_{ni} 下的流场形态, 其中 S1、S2、S3 分别为内级旋流强度为 0.235、0.266、0.427 的流场形态图, 此时外级旋流强度 S_{no} 保持不变, 为 0.695, 图中背景为轴向速度云图, 上侧带箭头黑线表示流线, 下方黑色线条表示轴向速度为零的等值线。结合表 1 可知, 在 S_{no} 为 0.695 时, 随着 S_{ni} 增加, 旋流器出口处轴向速度降低, 气流扩散角增大。当 $S_{ni}=0.235$ 时, 气流自旋流器出口轴向喷出, 整个流域内由中心射流主导, 壁面

图 4 $S_{no}=0.695$ 时内级旋流强度对流场的影响Fig. 4 Effect of inner swirl intensity on flow field when $S_{no}=0.695$

处形成的角涡占据了流场形态的 1/2, 且角涡内出现了多个中心涡点。当内级旋流强度 S_{in} 增加到 0.266 时, 中心射流作用减弱, 轴向速度降低, 旋流器出口较下游位置气流出现明显扩张, 角涡位置受喷嘴下游气流扩张影响逐渐向上侧、前侧移动。随着内级旋流强度 S_{in} 增加至 0.427, 轴向速度大幅降低, 气流逐渐向两侧流动, 旋流器出口下游 30 mm 处明显看到气流张角, 角涡内存在的多个涡点消失, 然而 FOV 区内仍未观察到中心回流区。

图 5 为中心截面位置不同外级旋流强度下的流场结构, 其中 S6、S8 分别为外级旋流强度

为 0.987、1.434 的流场形态图, 此时内级旋流强度保持不变, 为 0.427。由图可知, 在内级旋流强度 S_{in} 为 0.427 时, 随着外级旋流强度 S_{no} 增加, 旋流器出口处轴向速度降低, 形成中心回流区。当 S_{no} 由 0.695 增大到 0.987 时, 高速区气流向两侧扩散, 形成中心低压区, 因而出现中心回流区, 该回流区起始于旋流器出口下游 $X=70$ mm 的位置。当 S_{no} 继续增加至 1.434 时, 轴向速度进一步降低, 流场以高速气流为界限, 将角涡与中心回流区分离, 中心回流区起始位置明显前移, 并出现了多个涡点, 此时流场内可清晰观察到角涡位置。

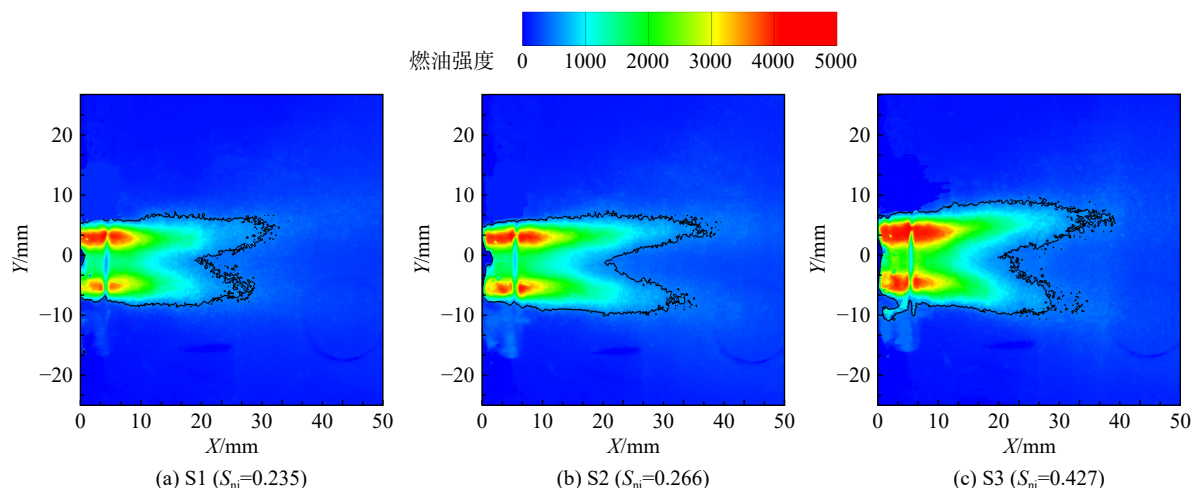
图 5 $S_{in}=0.427$ 时外级旋流强度对流场的影响Fig. 5 Effect of outer swirl intensity on flow field when $S_{in}=0.427$

2.2 喷雾特性

2.2.1 不同旋流强度下的燃油分布形态

试验过程中, 采集 100 个燃油瞬态分布数据样本, 经平均处理后进行分析。图 6 为外级旋流强度保持不变时不同内级旋流参数下的燃油分布形态。由图可见, S1 方案中所形成的燃油喷雾雾

锥并未散开, 绝大部分燃油集中于喷嘴出口位置, 受轴向射流空气影响雾锥呈直线分布。随着内级旋流强度 S_{in} 增加, 喷雾雾锥的轴向贯穿深度随之增加, 燃油向两侧扩散趋势增强, 内级旋流空气对液膜的剪切力增强, 使得液膜更易破碎成小液滴并随气流向下游延伸; 与此同时, 随着内级旋

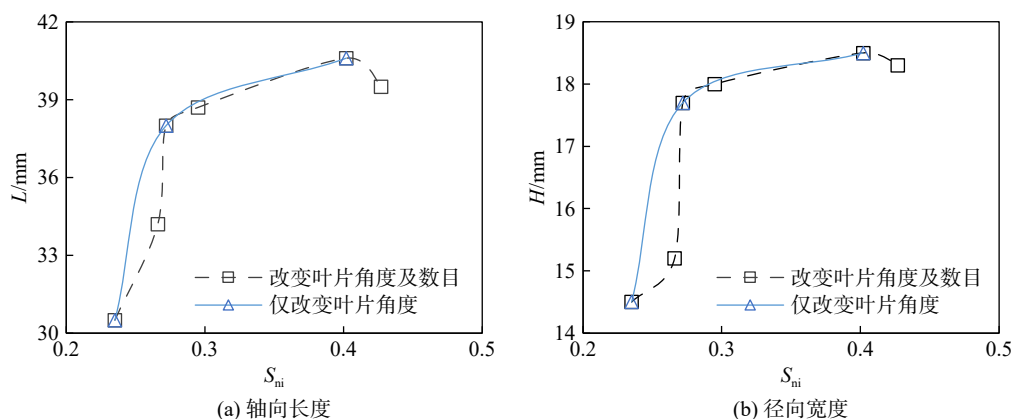
图 6 $S_{no}=0.695$ 时内级旋流强度对燃油分布的影响Fig. 6 Effect of inner swirl intensity on fuel distribution when $S_{no}=0.695$

流强度 S_{ni} 增加, 经旋流器出口气流旋流作用加强, 径向速度增加, 受卷吸作用小液滴被带动向两侧移动, 在气流扩张和旋流的共同作用下, 雾锥逐渐打开, 并以一定的角度向外喷出。

图 7 为不同内级旋流强度下喷雾雾锥轴向长度(L)和径向宽度(H)的变化规律, 图中黑色虚线表示随内级旋流强度的增加喷雾雾锥的变化趋势, 蓝色实线表示在不改变内级叶片数目的前提下改变内级叶片角度所导致的喷雾雾锥的变化趋势。由图可见, 在外级旋流强度 S_{no} 保持不变时, 随着内级旋流强度 S_{ni} 增加, 燃油液滴分布的轴向长度、径向宽度均呈现先增大后减小的趋势。在 S_{ni} 较低时, 旋流器出口气流以轴向速度为主导, 更多的燃油随气流向下游运动, 使得燃油聚集区的轴向长度增加; 在 S_{ni} 增加到 0.295 时, 曲线趋于平缓, 表明此时燃油液滴向下游扩散趋势减弱, 内级旋流对喷雾作用力趋于稳定; S_{ni} 继续增加至

0.402, 燃油液滴分布范围最广, 此后继续增加 S_{ni} , 轴向长度、径向宽度均略有降低, 此时气流的回流作用使得更多的液滴群向中心聚集。此外, 对比图中实线和虚线的变化趋势可以发现, 增加内级叶片数目与增加内级叶片角度均可使燃油分布形态发生改变, 但改变叶片角度会使旋流强度大幅增加, 所得到的燃油液滴空间分布特征变化也会更加明显。

图 8 为不同外旋参数变化下的燃油分布形态。由图可见, 随着外级旋流强度 S_{no} 增加, 燃油从射流分布向锥形分布变化, 且当内级旋流较强时变化更为明显。当内级旋流强度 S_{ni} 为 0.235 时, 即图 8(a)~图 8(c), 随着外级旋流强度 S_{no} 增加, 旋流器出口处气流流动方向改变, 更多的液滴被外级旋流气流带动卷吸至外侧, 使得燃油液滴迅速向两侧扩散; 当 S_{ni} 为 0.427 时, 即图 8(d)~图 8(f), 中心轴线位置燃油浓度降低, 近壁面位置燃油浓

图 7 $S_{no}=0.695$ 时内级旋流强度对喷雾雾锥的影响Fig. 7 Effect of parameters of inner swirler on the profile of spray cone when $S_{no}=0.695$

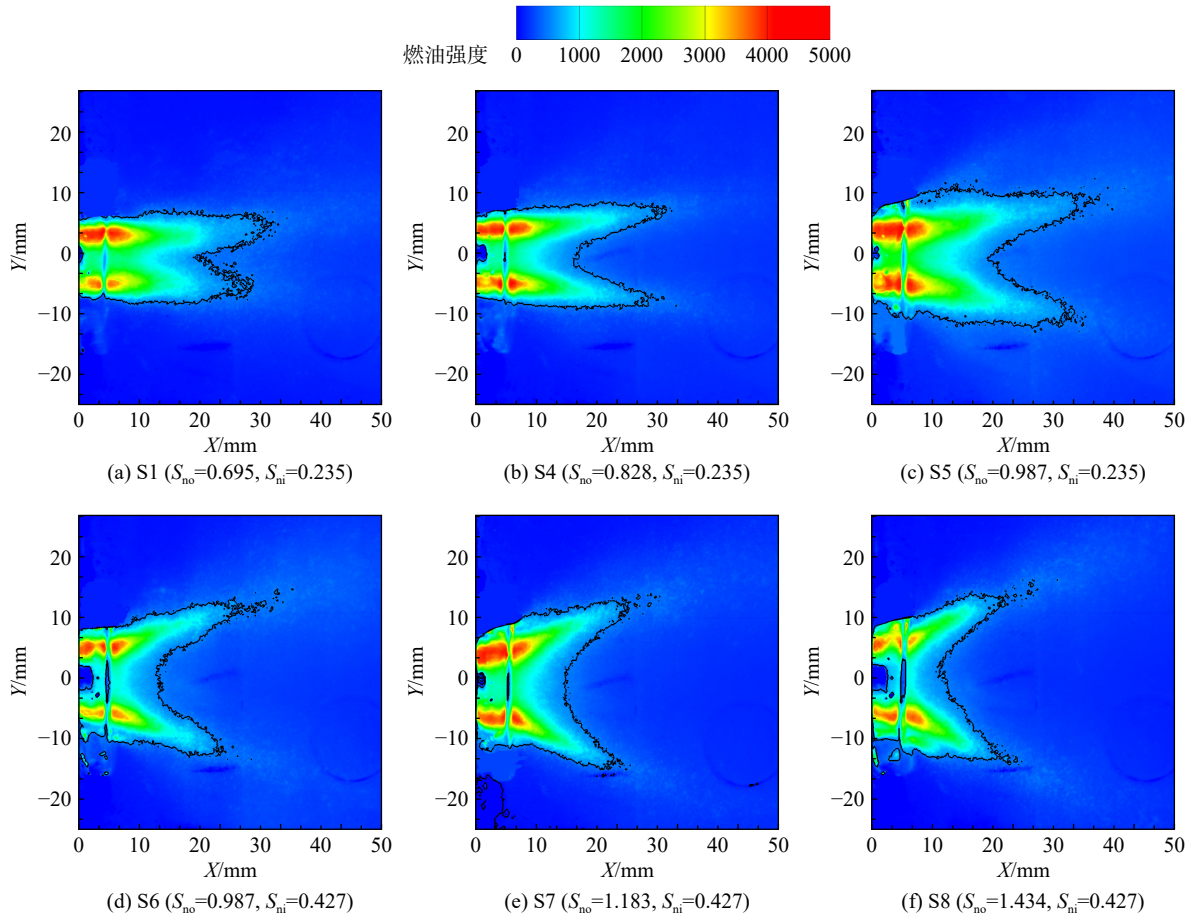


图 8 外级旋流参数对燃油分布的影响

Fig. 8 Effect of outer swirl intensity on fuel distribution

度升高, 且当 S_{no} 保持不变时, S_{ni} 为 0.427 时所形成的喷雾锥角明显增大, 中心回流区内的回流空气诱导内旋流器出口旋流空气向外扩张, 进一步加速液膜破碎并改善燃油雾化。

图 9 为不同外级旋流强度下喷雾雾锥轴向长度和径向宽度的变化规律。当内级旋流 S_{ni} 较弱时, 即图中虚线 $S_{ni}=0.235$ 时, 随着外级旋流强度

S_{no} 增加, 喷雾雾锥轴向长度和径向宽度呈现先增大后减少的趋势。燃油流动过程中受流场影响, 一部分液滴在气流径向速度的推动下向两侧扩张, 一部分液滴受气流轴向速度影响持续向下游流动。当 S_{no} 增加到 1.183 后, 燃油液滴受中心回流区影响向内卷吸, 喷雾雾锥轴向长度和径向宽度开始减小, 尤以轴向长度变化最为显著。当 S_{ni} 较强时,

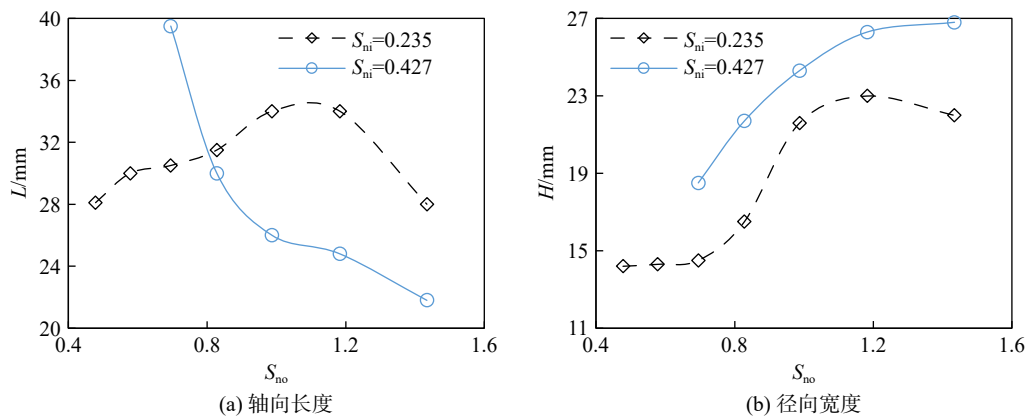


图 9 内级旋流强度保持不变时外级旋流参数对喷雾雾锥的影响

Fig. 9 Effect of outer swirl intensity on spray cone when inner swirl intensity is constant

即图中实线 $S_{ni}=0.427$ 时,随着 S_{no} 增加,喷雾雾锥轴向长度逐渐降低,径向宽度逐渐增加,内级旋流气流增强加速了切向动量与轴向动量的相互损耗,更多的轴向速度被转化为径向速度,使得雾锥轴向长度迅速降低;同时径向速度的增加带动液滴更多地向两侧运动,导致雾锥径向宽度增加。

2.2.2 喷雾锥角

图 10 是不同旋流强度下的喷雾锥角(θ)变化曲线。由图可见,在外级旋流强度 S_{no} 保持不变时,随着内级旋流强度 S_{ni} 增加,喷雾锥角呈现先增大后减小的趋势;在内级旋流强度 S_{ni} 保持不变时,喷雾锥角随外级旋流强度 S_{no} 增加而增加,且当内级旋流强度 S_{ni} 较强时,喷雾锥角增加得愈加明显。 S_{ni} 为 0.427 时,受气流回流影响,雾滴向下游运动趋势减弱,喷雾雾锥轴向长度、径向宽度均有降低,导致喷雾锥角略有降低。在 $S_{ni}=0.235$

时, S_{no} 在 0.695~1.183 时对喷雾锥角影响较为明显;而在 $S_{ni}=0.427$ 时,随着 S_{no} 的增加,喷雾锥角大幅增加,并在 $S_{no}=1.434$ 时,喷雾锥角达到最大值 94°。在内级旋流强度增加时,内级旋流强度的切向动量虽在一定程度上转化为了径向动量推动气流向外扩张,但因为外级旋流气流向内部扩散受到压制,导致内级旋流只是减弱了其向内扩散的趋势,而非直接改变了其扩散方向,因此相比而言,改变内级旋流强度对喷雾锥角的影响较小。而当外级旋流强度增强时,外级气流本身便具有向外扩张的趋势,更易促进流场内形成中心回流区,且较强的回流气流再次推动内级气流向两侧扩张,内外空气相互耦合作用使得喷雾锥角迅速增加;且在同一外级旋流强度变化范围内,内级旋流强度越强,回流空气更易使其发生扩张,因而喷雾锥角增加得更为明显。

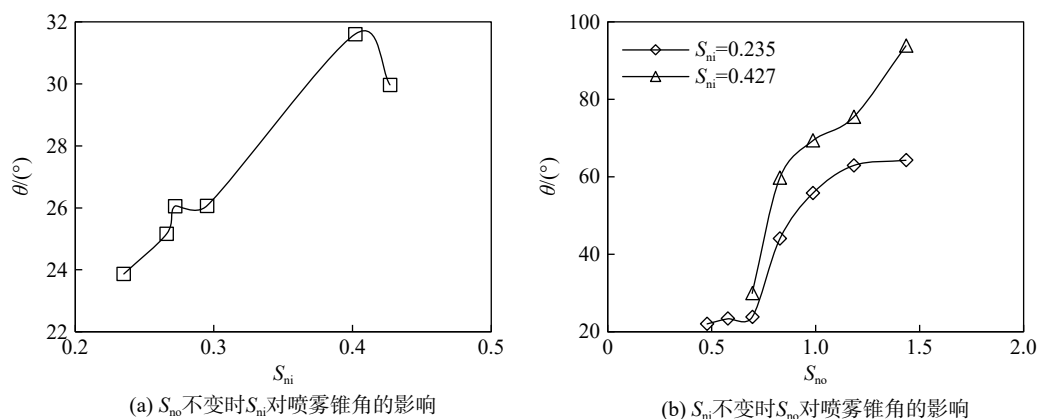


图 10 不同旋流强度下的喷雾锥角

Fig. 10 Spray cone angle under different swirl intensities

2.2.3 液滴粒径

测量不同旋流强度下喷嘴出口下游 30 mm 处液滴的 SMD。图 11 为外级旋流强度保持不变时不同内级旋流参数下 SMD 的变化曲线,其中 Δp 为旋流器入口与出口压降, p_a 为入口压降。由图可见,在同一燃油流量下,不同内级旋流强度 S_{ni} 下的 SMD 均随旋流器压降百分比的增加而降低,且随着 S_{ni} 增强, SMD 的下降曲线更加接近;在同一压降下, SMD 随 S_{ni} 增加先增加后降低,气液比 (air liquid ratio, ALR) 越小曲线下降得越明显。随着 S_{ni} 增加至 0.341 时,旋流器出口气流旋转动量增强,更多的切向动量转化为径向动量,外级气流向内流动趋势减弱,对液膜的剪切力降低,导致 SMD 有所增加;随着 S_{ni} 增加至 0.427 时,旋流器出口处受内级气流径向动量的推动向两侧扩

张,增强了内外两级气流对液膜的耦合作用,使得 SMD 降低。

图 12 为内级旋流强度保持不变时不同外级旋流参数下 SMD 的变化曲线。由图可见,与内级旋流强度变化相同,不同外级旋流强度下的 SMD 随旋流器压降百分比增加而降低;不同的是,同一压降下,当 $S_{ni}=0.235$ 时, SMD 随 S_{no} 增加先增加后降低,当 $S_{ni}=0.427$ 时, SMD 随 S_{no} 增加而增加。 $S_{ni}=0.235$ 时,中心回流区形成于 $S_{no}=0.828$ 时,在此之前,外级旋流强度增加一部分用于压制内级旋流气流向外扩张的趋势,另一部分转化为径向动量带动气流向外偏转,该偏转气流对已形成的雾化液滴形成二次剪切作用,导致 SMD 降低;在产生中心回流区后,出口处气流的流动方向发生了改变,受回流气流的卷吸作用,部分液滴在雾

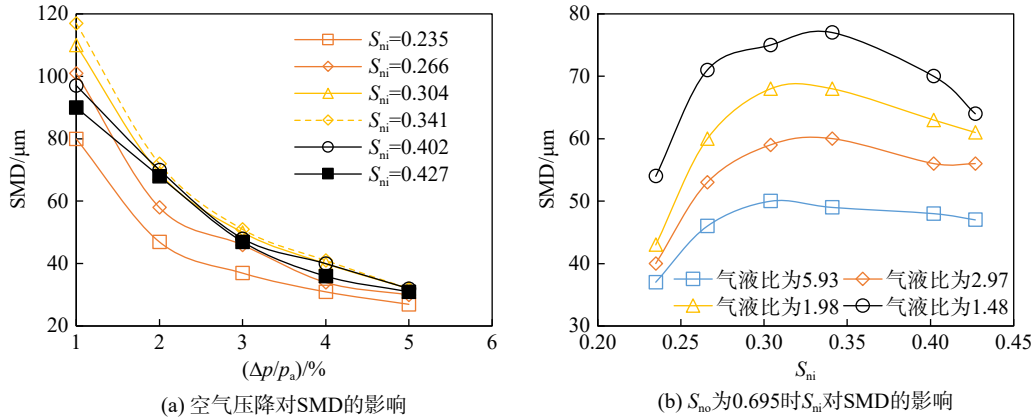
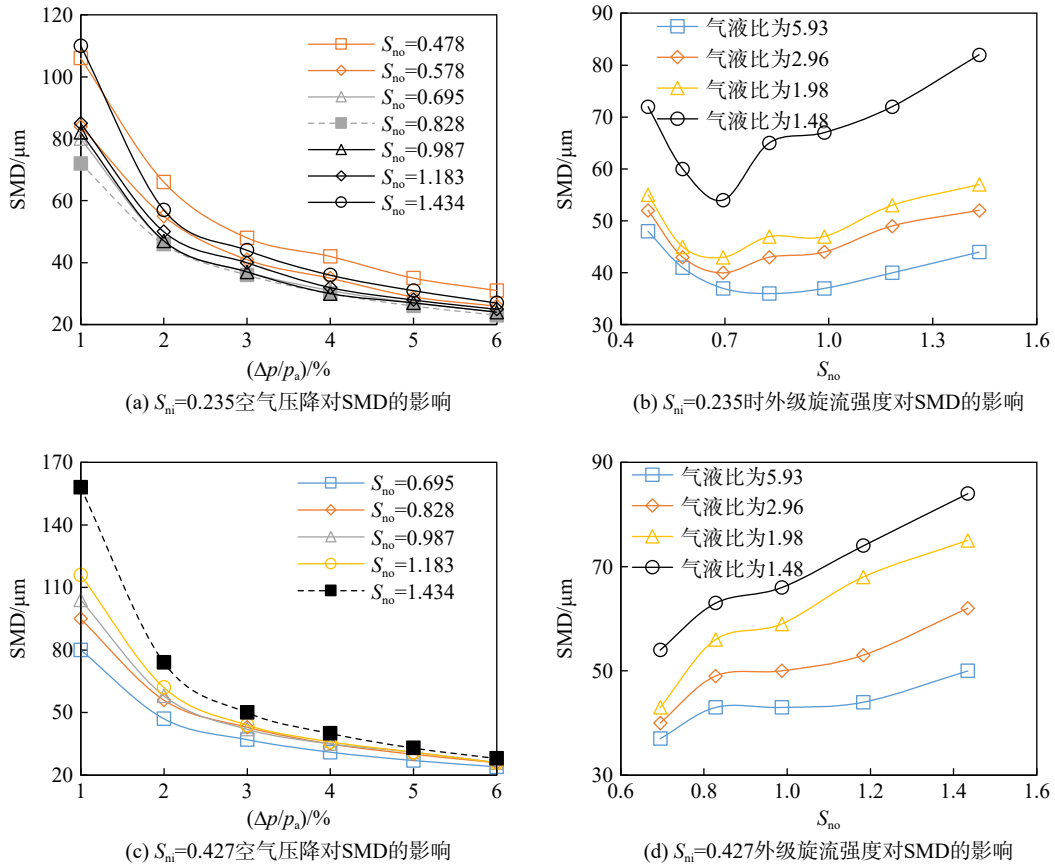
图 11 $S_{no}=0.695$ 时不同内级旋流强度下的 SMDFig. 11 SMD under different inner swirl intensities when $S_{no}=0.695$ 

图 12 内级旋流强度保持不变时 SMD 随外级旋流参数的变化趋势

Fig. 12 SMD under different outer swirl intensities when inner swirl intensity is constant

化后产生了二次碰撞,且 S_{no} 越强,中心回流区起始出现位置更加靠近旋流器出口,二次碰撞的液滴增多,SMD增加。同理,当 $S_{mi}=0.427$ 时受气流回流影响,增加的外级旋流强度在一定程度增加了中心回流区的径向宽度,雾滴回流范围变宽,SMD随之增加。

3 结 论

采用 PIV 测量系统、PLS 测量系统、高速粒

度喷雾仪在可视化受限空间模型燃烧室试验件内,开展了不同旋流强度下的雾化特性研究,总结了旋流强度对流场形态、燃油空间分布、喷雾锥角和燃油粒径的影响规律。主要结论如下:

1) 在外级旋流强度 $S_{no}=0.695$ 时,内级旋流强度 S_{mi} 增加会降低旋流器出口轴向速度,增大气流扩散角,但测试区内观察不到中心回流区;在内级旋流强度 $S_{mi}=0.427$ 时,外级旋流强度 S_{no} 增加至0.987时可观察到中心回流区,回流区起始于

$X=70\text{ mm}$ 的位置。说明增加内级旋流强度、外级旋流强度均有利于形成含有中心回流区的流场结构。

2) 受流场形态影响, 旋流强度对喷雾性能的影响较为复杂, 内级旋流强度增加虽加强了内级气流向外运动的趋势, 增大了喷雾锥角, 但同时减弱了外级气流对液膜的剪切作用使燃油平均粒径增加; 外级旋流强度增加改变了气流的流动方向, 改善了燃油分散特性, 喷雾锥角增大, 然而外级旋流强度过强时受回流气流影响, 液滴发生二次碰撞会使平均粒径增加。

参考文献:

- [1] 李杰. 商用航空发动机先进低排放燃烧室技术进展[J]. 航空科学技术, 2014, 25(7): 6-11.
LI Jie. Technology progress of advance low-emissions combustion chambers in commercial aircraft engines[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2014, 25(7): 6-11. (in Chinese)
- [2] 刘伟, 林宇震, 刘高恩, 等. 低压条件下复合式多级旋流杯燃烧室燃烧效率研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 650-655.
LIU Wei, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Research of combustion efficiency of combustors using hybrid airblast atomizer under low pressure[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2004, 19(5): 650-655. (in Chinese)
- [3] LEBEVRE A H, BALLAL D R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions [M]. Third Edition. Boca Raton: CRC Press, 2010: 374-375.
- [4] BOILEAU M, PASCAUD S, RIBER E, et al. Investigation of two-fluid methods for large eddy simulation of spray combustion in gas turbines[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2008, 80(3): 291-321.
- [5] 吴浩玮. 预燃级关键参数对分层部分预混高温升燃烧室点火特性的影响研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
WU HaoWei. Study on the influence of key parameters of pre-combustion stage on ignition extinction characteristics of stratified partially premixed high temperature rise combustion chamber[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [6] LEBEVRE A H. Fuel effects on gas turbine combustion[J]. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 1986, 3(2/3): 231-244.
- [7] SOVANI S D, SOJKA P E, LEBEVRE A H. Effervescent atomization[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(4): 483-521.
- [8] LEE Sang, KIM J Y. Dependence of spraying performance on the internal flow pattern in effervescent atomizers[J]. *Atomization and Sprays*, 2001, 11(6): 22.
- [9] LIN K C, KENNEDY P, JACKSON T. Structures of internal flow and the corresponding spray for aerated-liquid injectors: AIAA 2001-3569[R]. Reston, Virginia: AIAA, 2001.
- [10] 付淑青, 马洪安, 吴宗霖, 等. 低温环境下 RP-3 航空煤油雾化特性试验研究[J]. 航空发动机, 2021, 47(6): 26-31.
FU Shuqing, MA Hongan, WU Zonglin, et al. Test study on spray characteristics of RP-3 aviation kerosene at low temperature[J]. *Aeroengine*, 2021, 47(6): 26-31. (in Chinese)
- [11] 严红, 陈福振. 航空发动机燃油雾化特性研究进展[J]. 推进技术, 2020, 41(9): 2038-2058.
YAN Hong, CHEN Fuzhen. Review on fuel atomization in aero-engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(9): 2038-2058. (in Chinese)
- [12] DATTA A, SOM S K. Effects of spray characteristics on combustion performance of a liquid fuel spray in a gas turbine combustor[J]. *International Journal of Energy Research*, 1999, 23(3): 217-228.
- [13] MIYAMOTO S, MIKAMI M, KOJIMA N, et al. Spray characteristics of LPP gas turbine injector-an experimental study on optimum swirler condition [R]. Kyoto, Japan: Proc International Conference on Liquid Atomization & Spray Systems, 2006.
- [14] GURUBARAN R K, SUJITH R I, CHAKRAVARTHY S R. Characterization of a prefilming airblast atomizer in a strong swirl flow field[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(5): 1124-1132.
- [15] 李振祥, 郭志辉, 车俊龙, 等. 一种强剪切空气雾化喷嘴的流场和喷雾[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2704-2709.
LI Zhenxiang, GUO Zhihui, CHE Junlong, et al. Flow field and spray of a high shear air-blast nozzle[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(11): 2704-2709. (in Chinese)
- [16] 桂韬, 夏丽敏, 邱伟, 等. 旋流器型式对空气雾化喷嘴雾化特性影响规律[J]. 航空动力学报, 2022, 37(3): 465-477.
GUI Tao, XIA Limin, QIU Wei, et al. Effect of swirler types on spray characteristics of airblast atomizer[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(3): 465-477. (in Chinese)
- [17] SWITENBANK J, CATLIN C A. Physical processes influencing effervescent atomizer performance in the slug and annular flow regimes[J]. *Atomization and Sprays*, 2001, 11(5): 575-595.
- [18] 郭新华, 林宇震, 张驰, 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.
GUO Xinhua, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Experiment investigation on atomization characteristic of an air-blast atomizer with centrifugal nozzle and co-dual-swirl cup[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(10): 2249-2254. (in Chinese)
- [19] 罗坤, 樊建人, 岑可法. 旋流喷雾燃烧的直接数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 2035-2037.
LUO Kun, FAN Jianren, CEN Kefa. DNS of swirling spray combustion[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(12): 2035-2037. (in Chinese)
- [20] SHANMUGADAS K P, CHAKRAVARTHY S R, CHIRANTHAN R N, et al. Characterization of wall filming and atomization inside a gas-turbine swirl injector[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(10): 1-26.
- [21] 彭云晖, 林宇震, 许全宏, 等. 双旋流空气雾化喷嘴喷雾、流动和燃烧性能[J]. 航空学报, 2008, 29(1): 1-14.
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, XU Quanhong, et al. Atomization, aerodynamics and combustion performance of swirl cup[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(1): 1-14. (in Chinese)
- [22] CHIN J S, RIZK N K, RAZDAN M K. Effect of inner and outer airflow characteristics on high liquid pressure prefilming airblast atomization[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2000, 16(2): 297-301.
- [23] 赵乾鹏, 杨金虎, 刘存喜, 等. 多级旋流空气雾化喷嘴高空气雾化场的数值研究[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2555-2567.
ZHAO Qianpeng, YANG Jinhu, LIU Cunxi, et al. Numerical investigation of high altitude aerodynamic and spray fields for multi-swirl airblast atomizer[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(12): 2555-2567. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)