

双级轴向旋流杯气量比对雾化性能影响的试验

王志凯, 陈 盛, 刘 冉, 江立军, 马 柱
(中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 为探索小状态下改善雾化性能的途径,从调节旋流杯气量分配的角度出发,对同一、二级气量比的双级轴向旋流杯开展了试验研究,获得了气量比对液滴平均直径、液滴尺寸分布指数以及喷雾锥角的影响规律。试验结果表明:气量比的增大不仅降低液滴平均直径,而且使得旋流杯在较宽的供油压差范围内都具有良好的雾化品质,可实现小状态下雾化性能的改善。旋流杯喷雾锥角随气量比的增大而增大,随供油压差的增大而增大并逐渐趋于稳定。旋流杯总气量恒定时,气量比接近 1 时的综合雾化性能最佳。

关 键 词: 双级轴向旋流杯; 气量比; 液滴平均直径; 喷雾锥角; 液雾翻边

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Experiment on effects of airflow ratio on spray characteristics of dual-axial swirl cup

WANG Zhikai, CHEN Sheng, LIU Ran, JIANG Lijun, MA Zhu
(Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: In order to explore a way to improve the spray performance under low injection pressure differential, from the perspective of regulating airflow split, effects of airflow ratio of primary swirler to secondary swirler on the spray characteristics of dual-axial swirl cup were studied by experimental system. The influences of airflow ratio on mean drop diameter, drop size distribution parameter and spray angle were obtained. The experimental results indicated that increasing the airflow ratio, the mean drop diameter decreased, and the swirl cup had good spray property over a wide range of injection pressure differential, which could achieve the improvement of the spray performance under low injection pressure differential. The spray angle increased with the airflow ratio, and firstly increased but then remained constant with the injection pressure differential. For a given total airflow of swirl cup, the optimal comprehensive spray performance was obtained when the airflow ratio was about 1.

Key words: dual-axial swirl cup; airflow ratio; mean drop diameter; spray angle; spray flanging

双级轴向旋流杯是由燃油喷嘴和双级轴向旋流器组成的燃油雾化装置,其回流区与气动雾化一体化设计,工作可靠,性能稳定。旋流杯设计好坏直接影响燃烧室的燃烧效率、点火性能、出口温

度场以及污染排放等性能。一般认为,一级旋流杯主要促进燃油与空气混合,助雾化,二级旋流杯主要用来形成头部回流区,稳定火焰^[1-3]。

对于旋流杯雾化装置,燃油从喷嘴喷出,冲击在文氏管上形成一层薄油膜,油膜在文氏管出口两级旋流空气剪切作用下破碎形成油雾。航空发动机燃油雾化的要求是通过旋流杯将燃油雾化形成液雾,并且均匀分布在燃烧室空间中。为了同时兼顾良好的雾化性能和头部回流形态,需要合理匹配两级旋流流量。

在旋流杯研究方面,文献[4]指出双级旋流杯的喷嘴供油特性和头部气动参数之间进行合理匹配才能保证和提高燃烧室综合燃烧性能。文献[5]研究了旋流杯文氏管长度对积碳的影响,结果显示适当增加文氏管长度有利于减少燃油在文氏管上的积碳。文献[6]研究了一级旋流偏置对反向双旋流杯下游流场的影响规律,发现当增加一级旋流的偏置距离一定程度时下游流场会出现明显偏移。文献[7]研究了一级旋流强度对双旋流杯下游油气分布的影响,结果表明:减小双旋流杯一级旋流切向动量矩会使旋流杯下游流场结构从收扩型转变为扩张型,同时减小油雾的索太尔平均直径(SMD);当与旋流杯出口距离超过 2.5 倍文氏管喉道直径时,油雾分布更加均匀,SMD 更小。文献[8]研究了旋流杯一级旋流数对点火性能的影响,结果表明:一级旋流数的增加影响了下游流场的分布,有利于火核沿回流区向上游传播,并在旋流杯出口形成稳焰,因此一级强旋流杯点火性能更好。文献[9]通过三维数值模拟和试验相结合的方法开展了旋流杯设计参数对燃烧室性能影响的研究,其关键设计参数为副旋流器相对进气量和旋流数,关注的燃烧性能包括出口温度场分布、NO_x 排放量等。文献[10]对平滑和扩张套筒出口形状的旋流杯空气雾化喷嘴燃烧室点火性能进行了研究。研究发现,扩张套筒出口形状旋流杯燃烧室点火性能大大优于平滑出口套筒形状的点火性能。文献[11-12]研究了头部气量分配对不同形式旋流杯结构燃烧室贫熄性能的影响,获得了头部气量分配对熄火性能的影响规律。文献[13]利用典型旋流杯结构下游的流场试验数据,参照经验关系式,提出了物理意义更明确、拟合更准确且更便于对大量试验数据进行相关性研究的半经验关系式。文献[14]对双级反旋轴向旋流杯开展了大涡模拟,并与粒子图像测速(PIV)数据进行了对比,获得了上游到下游的旋流强度

以及两级气流之间的影响关系。文献[15-18]研究了叶片角度和文氏管形状(收缩、平直、扩张、锯齿形)对旋流杯下游流场和燃烧室点火性能的影响,表明细节结构参数对 SMD、油雾分布、回流区尺寸、燃烧不稳定性有很大影响,进而影响燃烧效率和 NO_x 排放。

综上,国内外对双级旋流杯开展了广泛研究,但是旋流杯雾化装置普遍存在小状态下雾化较差的问题^[19],目前主要的改进方法有采用高剪切^[20-24]、改变喷嘴与旋流器的轴向相对位置^[25]或者改变喷嘴结构^[26]。本文从调节双级旋流杯气量分配的角度出发,在不改动燃油喷嘴的情况下,通过研究总气量不变时旋流杯一、二级气量比对雾化性能的影响,归纳总结气量比的影响规律,寻求小状态下改善雾化性能的途径,获取综合雾化性能最佳所对应的气量比,为旋流杯雾化性能改善及燃烧室点火性能优化提供参考。

1 试验方案

1.1 试验件方案

图 1 为双级轴向旋流杯结构示意图,其中内侧通道称为一级旋流杯,外侧通道称为二级旋流杯。一、二级旋流叶片角度分别为 40°和 45°,两级叶片旋向相反。设计、加工旋流杯试验件时,保证每个方案总气量尽量一致以及文氏管喉道直径恒定,通过改变流道高度实现旋流杯两级气量比例的变化。 $\dot{m}_1$ 和 $\dot{m}_2$ 分别为流经一、二级旋流杯的空气流量,用 $\dot{m}_1/\dot{m}_2$ 表征两级旋流气量比。本文不同旋流杯试验件方案及参数见表 1。

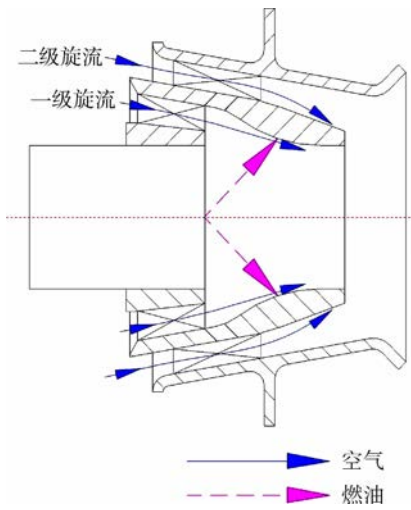


图 1 双级轴向旋流杯示意图
Fig. 1 Schematic of dual-axial swirl cup

表 1 试验件方案及参数
Table 1 Experimental schemes and parameters

方案编号	气量比
S1	0.39
S2	0.55
S3	0.84
S4	1.02
S5	1.28

1.2 试验系统

在常温常压下采用文献[27]的喷雾测试试验系统(如图 2 所示)录取雾化试验数据,试验系统主要由供油系统、供气系统、激光器、光信号接收系统、照相机以及控制计算机等组成,其中使用一台 LSA-Ⅲ型激光粒度测试仪对液雾粒径进行测量,具体试验过程不再赘述。试验用油为 3 号喷气燃料(RP-3),供油压差 Δp_f 范围为 0.07~1.7 MPa,喷嘴的流量范围为 1.1~4.5 g/s,空气压差 Δp_a 为 1000、3000 Pa,对应的空气流量为 8.1、14 g/s。雾化粒度和喷雾锥角的测量位置均为图 2 所示的旋流杯套筒出口下游 30 mm 截面的固定位置处,索太尔平均直径(SMD,量符号记为 D_{Sm})的分散度为 $\pm 2\%$,锥角的测量精度为 $\pm 1^\circ$ 。前期已对本文旋流杯中的喷嘴对象进行了测试,其自身雾化满足 Rosin-Rammler(R-R)分布规律。

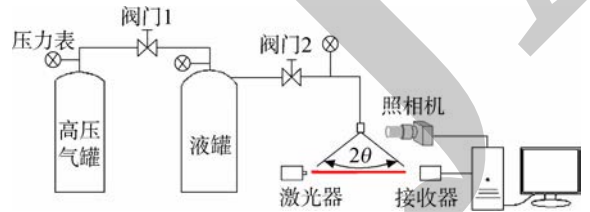


图 2 喷雾测试试验系统示意图[27]
Fig. 2 Schematic of the spray test experiment system[27]

2 试验结果与分析

2.1 液滴平均直径试验结果分析

通常用液滴平均直径来表示液滴群的雾化细度。SMD 同时考虑了液雾总体积与总表面积的有效性,最能反映真实液雾的燃烧属性,所以在燃烧学中应用最广泛[28]。由于点火能量与 SMD 的 4~5 次方成正比,因此工程应用中希望 SMD 要小,但是 SMD 太小会影响燃油的穿透和散布。 N 为液滴尺寸分布指数,表征液滴尺寸分布的均匀

性,其值越大表示液雾的尺寸分布越均匀。 $D_{0.1}$ 表示相应于累积体积占总体积 10% 的液滴直径,其值越小,表示细小尺寸的液滴越多,对点火有利[1-3]。

图 3 显示了不同空气压差下各气量比方案旋流杯的 SMD 随供油压差的变化趋势。由图 3(a)可见,在空气压差为 1000 Pa,供油压差小于 0.35 MPa 时,气量比小于 1 的 S1、S2 和 S3 方案旋流杯 SMD 差异很小,这是因为供油压差较小时,雾化粒径的主要影响因素是气动雾化,空气压差小,一级旋流空气弱,导致雾化效果整体偏差;对于气量比大于 1 的 S4 和 S5 方案旋流杯,雾化效果优于其余方案,这是由于一级旋流空气的增加使得雾化效果改善。

由图 3(b)可见,当空气压差为 3000 Pa,供油压差小于 0.35 MPa 时,各方案旋流杯 SMD 均随供油压差的增大而显著降低,供油压力达到 0.35 MPa 之后,各方案旋流杯 SMD 差值变小且趋于稳定,这是因为小供油压差时喷嘴自身一次雾化效果很差,随着供油压差逐渐增大,油膜动量相对

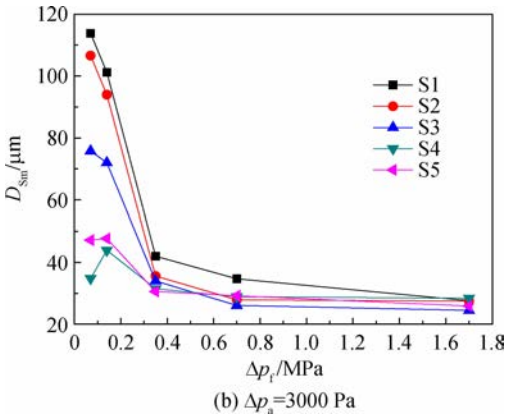
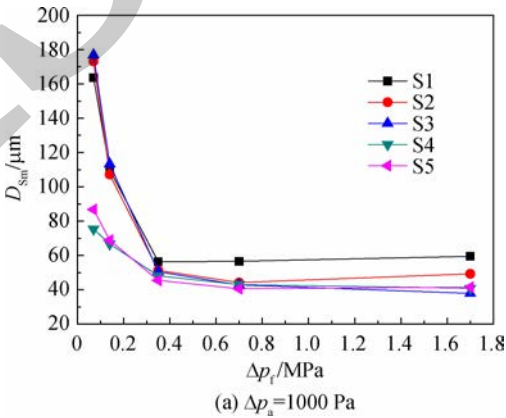


图 3 不同气量比旋流杯 SMD 随供油压差的变化
Fig. 3 Variation of SMD with fuel pressure difference for swirl cups with different airflow ratios

增大,雾化品质改善。分析图 3 可得,SMD 随气量比的增大而减小,原因是旋流杯雾化主要受一级旋流影响,气量比越大,一级旋流空气越多,相同油压下旋流杯一级气液比越大,对应的韦伯数也越大,因此燃油雾化粒度越小。

图 4 显示了不同空气压差下各气量比方案旋流杯的 $D_{0.1}$ 随供油压差的变化趋势。与图 3 对比可得, $D_{0.1}$ 的变化规律与 SMD 类似,即 $D_{0.1}$ 随气量比的增大而减小。但是空气压差为 1000 Pa,小供油压差时各方案旋流杯的 $D_{0.1}$ 之间的差别小于 SMD 之间的差别,这是因为 $D_{0.1}$ 是基于积分分布的平均直径,物理意义是相应于累积体积占总体积 10% 的液滴的直径,表征液滴尺寸分布中细小尺寸的一头,而 SMD 是基于微分分布的平均直径,是用均一尺寸的液雾代替实际液雾^[2]。此外图 3 和图 4 还显示旋流杯一、二级总气量恒定时,气量比接近 1 时的 SMD 和 $D_{0.1}$ 最小。同时,气量比的增大不仅降低液滴平均直径,而且使得旋流杯在较宽的供油压差范围内都具有良好的雾化品质,保证了小供油压差工况下也具有较好的雾化

性能,有利于燃烧室点火,而且小状态下 SMD 较小,对排放(CO 和未燃碳氢(UHC))有利。

图 5 显示了不同空气压差下各气量比方案旋流杯液滴尺寸分布指数 N 随供油压差的变化趋势。对于 N 值本文采用 R-R 分布函数进行计算,公式如下^[28]:

$$N = \frac{\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-R}\right)\right]}{\ln\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)}$$

式中 R 为粒径小于 d 的液滴体积占总体积的分数, $\bar{d}$ 为液滴尺寸分布中 $R = 0.632$ 时的液滴尺寸。

由图 5(a)可见,1000 Pa 空气压差时除去因初始供油时测试误差影响较大的 S3 方案旋流杯,其他方案 N 值较为集中;综合图 5(b)分析,曲线整体规律表现为 N 值随着气量比的增大而减小,表明减小气量比可使液雾尺寸分布变得均匀。原因是,气量比较小时,由图 3 和图 4 知液滴平均直径大,较细的液滴跟随一级旋流流出文氏管,大液

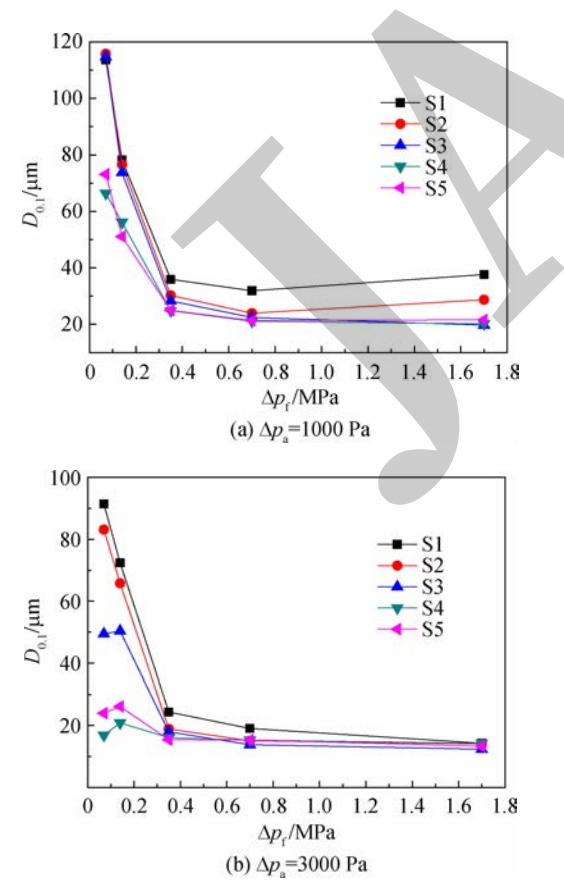


图 4 不同气量比旋流杯 $D_{0.1}$ 随供油压差的变化
Fig. 4 Variation of $D_{0.1}$ with fuel pressure difference for swirl cups with different airflow ratios

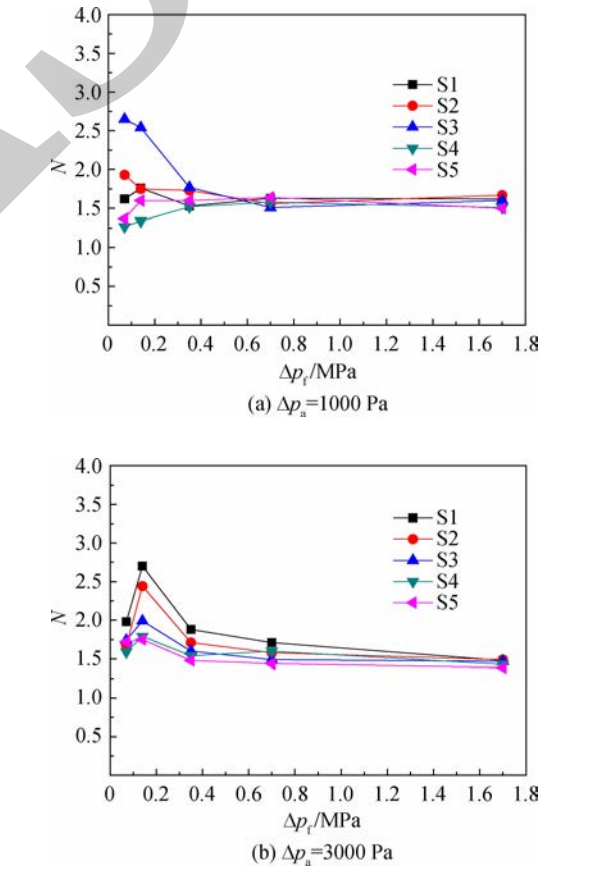


图 5 不同气量比旋流杯 N 值随供油压差的变化
Fig. 5 Variation of N with fuel pressure difference for swirl cups with different airflow ratios

滴冲击文氏管附着在壁面上,且一级旋流杯流量小,气流速度低,大液滴在文氏管上的润湿长度相对较大,因此液膜均匀。此外,由图 5(b)可得,对于固定的旋流杯,空气压差恒定时, N 值随着供油压差的增大先增后减,这是因为初始供油时油路刚打开,供油压差增大改善初始雾化,液滴直径分布也变得均匀;随着供油压差继续增大,燃油流量增大,液膜开始变厚,液滴直径变得不均匀。

2.2 喷雾锥角试验结果分析

在获得了气量比对雾化质量的影响规律后,为了解旋流杯燃油喷雾的空间分布特性,需对锥角试验结果开展分析。旋流杯喷雾锥角是油气综合作用的结果,其值对于燃烧特性有重要影响,很大程度上决定燃料在燃烧室内的分布情况。

图 6 显示了各气量比方案旋流杯在不同空气压差下雾化锥角随供油压差的变化趋势。由图 6(a)可见,供油压差小于 0.3 MPa 范围内(即阴影区域),锥角随气量比无规律变化,其原因是该油压范围内喷嘴一次雾化弱,同时容易受到旋流杯旋涡核心进动(PVC)^[19]的影响,表明小状态下双旋流油气的匹配和耦合更为复杂。供油压差大于 0.3 MPa 后,曲线基本表现出喷雾锥角随气量比增大而增大的趋势,与图 6(b)显示的规律一致,其原因是,由图 3 结论可知气量比越大,SMD 越小,液滴跟随性越好,喷雾中油滴的径向分布广,因此喷雾锥角越大;气量比越小,SMD 越大,经过旋流杯的液雾较为集中,导致锥角较小。

此外,图 6 还显示恒定的空气压差下,旋流杯喷雾锥角随供油压差的增大而增大并逐渐趋于稳定,这是因为随着供油压差增大,燃油喷射速度增大,出口处切向速度增大,锥角增大,但切向速度分量的相对变化率逐渐变小,喷雾锥角增大速度也因此趋于稳定。

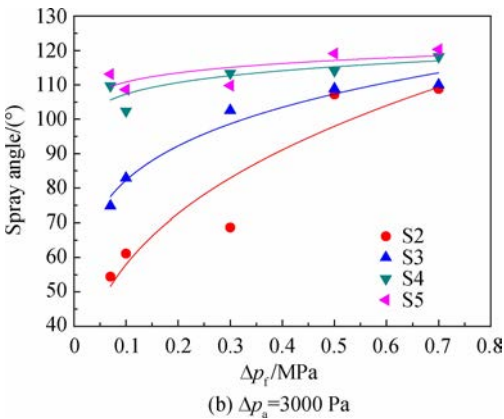


图 6 不同气量比旋流杯锥角值随供油压差的变化
Fig. 6 Variation of spray angle with fuel pressure difference for swirl cups with different airflow ratios

S1 方案旋流杯由于喷雾翻边导致锥角无法成功测量,故图 6 中未显示其锥角数据。图 7 显示了供油压差为 0.3 MPa 时单独喷嘴以及 S1 方案旋流杯喷雾形态照片,由图可见,1000 Pa 空气压差下 S1 方案旋流杯液雾空间分布范围较广,与单喷嘴喷雾形态相比出现了液雾卷吸翻边现象。产生该现象的原因是,在本文研究方案中 S1 方案旋流杯一、二级气量比最小,一级旋流空气最少,大部分气流通过二级旋流杯,由文献[29]的 PIV 流场试验结论可知该方案旋流杯下游回流区最大,流场旋流扩张角大,且在回流区上游存在反向角涡,翻边到头部的燃油燃烧不完全,造成燃烧效率降低。旋流杯雾化的液雾散布与流场相关,随着供油压差增大雾化质量改善,雾化均匀的燃油颗粒更容易被卷吸进去,进而出现翻边贴壁现象,导致头部壁温偏高。综合全文分析可知:S4 方案旋流杯的 SMD 和 $D_{0.1}$ 均最小,然而 SMD 太小会影响燃油的穿透,但是 S4 方案对应的 N 值在所有方案中并非最大,即液滴尺寸分布均匀性一般,虽然小尺寸液滴数量多,但是此时较大尺寸液滴

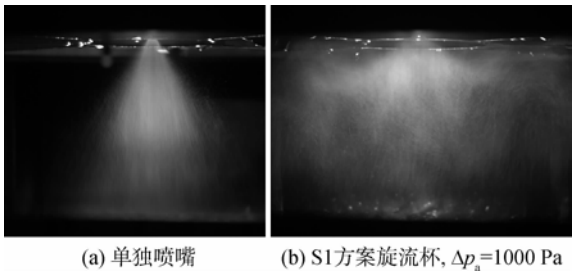
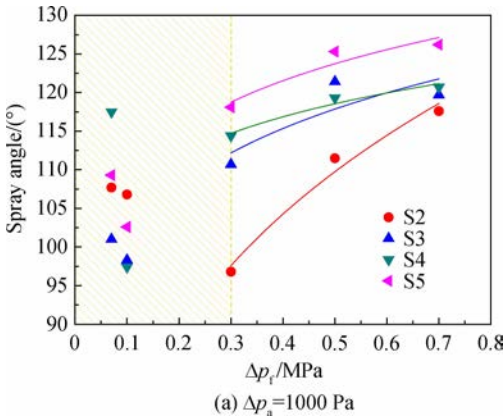


图 7 喷雾形态($\Delta p_f = 0.3 \text{ MPa}$)

Fig. 7 Spray shape ($\Delta p_f = 0.3 \text{ MPa}$)

依然存在,有利于穿透和散布,同时,由于大尺寸液滴在向旋流杯下游运动的过程中继续破碎成为小尺寸液滴,因此下游液雾的分布逐渐变得均匀,电嘴附近更容易形成有利点火的可燃混气。此外,如果锥角太大(如图 6(a)中 S5 方案),油滴容易喷射到火焰筒壁面,造成积碳和不完全燃烧,相邻喷嘴喷雾重叠区域可能成为热点;如果锥角太小(S2 方案),燃油不能有效分布,导致小供油压差状态下点火困难,或者燃烧过于集中导致出口温度分布恶化^[1-3],S3 和 S4 方案旋流杯的锥角有效避免了上述两种极端情况。但是由图 3 和图 4 可知 S3 方案旋流杯小供油压差状态下雾化质量较差,不利于燃烧室点火成功率。综上所述,在工程应用中对于总气量恒定的双级轴向旋流杯,在不改动燃油喷嘴的情况下,为了得到保证燃烧室小状态下可靠点火的综合雾化性能,建议采用 S4 方案,即一、二级气量比的设计值选取在 1 附近。

3 结 论

针对总气量恒定的双级轴向旋流杯,在不改动燃油喷嘴的情况下,研究了旋流器一、二级气量比对其雾化性能的影响,通过本文研究可得如下结论:

1) 通过调节气量比可实现小状态下雾化性能改善。气量比的增大不仅降低液滴平均直径,而且使得旋流杯在较宽的供油压差范围内都具有良好的雾化品质。

2) 旋流杯喷雾锥角随气量比的增大而增大,随供油压差的增大而增大并逐渐趋于稳定。气量比太小,当供油压差增大到一定程度时会出现液雾翻边现象,存在头部烧蚀隐患。

3) 综合分析液滴平均直径、液滴尺寸分布指数以及喷雾锥角,对于总气量恒定的旋流杯,气量比取值在 1 附近时综合雾化性能最佳,有利于提高燃烧室点火成功率。

参考文献:

- [1] LEFEBVRE A H. Gas turbine combustion[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [2] 金如山,索建泰. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [3] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [4] 徐华胜,黄义勇,王秀兰. 喷嘴供油特性对双涡流器头部气动雾化效果的影响研究[J]. 燃气轮机试验与研究, 2004, 17(2): 14-17.

- XU Huasheng, HUANG Yiyong, WANG Xiulan. Study on the effect of fuel jet characteristics on airblast atomization performance for device with two-stage swirler[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 14-17. (in Chinese)
- [5] 张弛,田兴鹏,林宇震,等. 旋流杯文氏管长度对积碳的影响研究[J]. 推进技术, 2015, 36(12): 1833-1838.
ZHANG Chi, TIAN Xingpeng, LIN Yuzhen, et al. Effects of venturi length of swirl cup on carbon deposition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(12): 1833-1838. (in Chinese)
- [6] 刘成川,许全宏,于博文. 一级旋流偏置对双旋流杯下游流场的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1244-1249.
LIU Chengchuan, XU Quanhong, YU Bowen. Influence of primary swirl offset on downstream flowfield of dual-swirl cup[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(6): 1244-1249. (in Chinese)
- [7] 于博文,张弛,杨谦,等. 一级旋流强度对双旋流杯下游油气分布的影响[J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1482-1487.
YU Bowen, ZHANG Chi, YANG Qian, et al. Effects of primary swirl intensity on flow and fuel distribution downstream a dual-swirl cup[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1482-1487. (in Chinese)
- [8] 刘桂桂,林宇震,胡好生,等. 旋流杯一级旋流数变化对点火性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(6): 1117-1121.
LIU Guigui, LIN Yuzhen, HU Haosheng, et al. Effect of swirl cup's primary swirl number on ignition performance[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6): 1117-1121. (in Chinese)
- [9] 程明,林宏军,李锋. 旋流杯设计参数对燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(10): 2355-2361.
CHENG Ming, LIN Hongjun, LI Feng. Effect of swirl cup design parameters on combustion performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(10): 2355-2361. (in Chinese)
- [10] 罗国良,宋双文,胡好生,等. 旋流杯空气雾化喷嘴套筒出口形状对小型燃烧室点火性能的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1708-1712.
LUO Guoliang, SONG Shuangwen, HU Haosheng, et al. Influences of the swirl cup flares design on the small combustor ignition performances[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1708-1712. (in Chinese)
- [11] 谢法,黄勇,苗辉,等. 气量分配对轴径向旋流杯燃烧室贫熄边界的影响[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1756-1760.
XIE Fa, HUANG Yong, MIAO Hui, et al. Effects of air-flow split and primary holes arrangement on the lean blowout limits of a combustor with axial-radial swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1756-1760. (in Chinese)
- [12] 徐浩鹏,王方,黄勇,等. 头部气量分配对旋流杯结构燃烧室

- 贫熄性能的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 347-352.
- XU Haopeng, WANG Fang, HUANG Yong, et al. Effects of flow split among swirlers and primary holes on the lean blowoff limits of a combustor with swirl cup[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 347-352. (in Chinese)
- [13] 黄勇, 郭志辉. 适于旋流杯下游流场的改进型半分析关系式[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6): 630-634.
- HUANG Yong, GUO Zhihui. Improved semi-analytical correlation approach for the flowfield downstream of swirl cups[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(6): 630-634. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] WANG Xiaofeng, LIN Yuzhen, ZHANG Chi, et al. Effect of swirl cup's secondary swirler on flow field and ignition performance[J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(5): 488-495.
- [16] WANG Xiaofeng, LIN Yuzhen, HU Haosheng, et al. Effect of swirl cup's venturi shape on spray structure and ignition process[R]. ASME Paper GT2014-25216, 2014.
- [17] JONG-HOON P, YOUNGBIN Y, IN-SEUCK J, et al. Effect of swirl cup on characteristics of fuel spray in gas turbine combustor[R]. AIAA-2000-3352, 2000.
- [18] LIN S C, WANG Xionghui, ESTEFANOS W, et al. The effect of the geometric modifications of the venturi on the non-reactive flow and combustion behavior using a counter-rotating radial-radial swirler[R]. ASME Paper GT2017-64876, 2017.
- [19] 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: 1-26.
- [20] COHEN J M, ROSFJORD T J. Influence on the sprays formed by high-shear fuel nozzle swirler assemblies[J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(1): 16-27.
- [21] ROCK N, CHTEREV I, SMITH T, et al. Reacting pressurized spray combustor dynamics; Part 1 fuel sensitivities and blowoff characterization[J]. ASME Paper GT2016-56346, 2016.
- [22] CHTEREV I, ROCK N, EK H, et al. Reacting pressurized spray combustor dynamics; Part 2 high speed planar measurements[R]. ASME Paper GT2016-56345, 2016.
- [23] CHTEREV I, ROCK N, EK H, et al. Simultaneous high speed (5 kHz) fuel-PLIE, OH-PLIF and stereo PIV imaging of pressurized swirl-stabilized flames using liquid fuels[R]. AIAA-2017-0152, 2017.
- [24] ROCK N, CHTEREV I, EMERSON B, et al. Liquid fuel property effects on lean blowout in an aircraft relevant combustor[R]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(7): 071005. 1-071005. 13.
- [25] HAN Y M, SEOL W S, LEE D S, et al. Effects of fuel nozzle displacement on pre-flaming airblast atomization[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(1): 33-40.
- [26] LIU Cunxi, LIU Fuqiang, YANG Jinhu, et al. Investigations of the effects of spray characteristics on the flame pattern and combustion stability of a swirl-cup combustor[J]. Fuel, 2015, 139: 529-536.
- [27] XIAO Wei, GUO Zhengyan, CHEN Pimin. Effect of geometric parameters on mean drop sizes from dual-orifice pressure nozzles[R]. ASME Paper GTP-18-1061, 2018.
- [28] 陈坚, 李建中, 袁丽, 等. 雾化特性对喷雾燃烧点火过程的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(6): 1318-1326.
- CHEN Jian, LI Jianzhong, YUAN Li, et al. Effects of spray characteristics on ignition process in spray combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(6): 1318-1326. (in Chinese)
- [29] 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 Zhikai, CHEN Sheng, JIANG Lijun, et al. Experimental investigation of effects of airflow split on the characteristics of dual-axial swirler[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(8): 1799-1806. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)