

文章编号: 1000-8055(2006)05-0805-05

直射式双旋流空气雾化喷嘴的 雾化效果

张 弛, 张荣伟, 徐国强, 林宇震

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 介绍了一种直射式供油的双旋流空气雾化喷嘴的喷雾性能。该双旋流器采用旋向相反的径向开孔式设计, 在常温常压下进行喷雾试验, 研究了不同空气压力降和气液比工况下液雾的索太尔平均直径 (SMD) 及分布指数。试验中雾化液体为航空煤油, 采用马尔文激光测雾仪测量喷嘴端面下游 50 mm 处的液雾分布。研究表明: 随着气液比的增加, SMD 减小, 分布指数也减小, 并且存在一个关键气液比, 在超过关键气液比的工况下, 液雾的 SMD 及分布指数变化很小。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 燃烧室; 直射式喷嘴; 双旋流器空气雾化喷嘴; 索太尔平均直径(SMD); 分布指数

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental investigation on atomization of an air-blast atomizer with plain-orifice nozzle and dual-swirl cup

ZHANG Chi, ZHANG Rong-wei, XU Guo-qiang, LIN Yu-zhen

(National Key Laboratory on Aero-engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An air-blast atomizer consisting of a plain orifice nozzle and dual counter-rotating radial swirlers was experimentally investigated to obtain sauter mean diameter (SMD) and Rosin-Rammler distribution parameter at different pressure drops and air-fuel ratios. The mean diameter and distribution parameter of fuel spray were measured by Malvern particle size analyzer. The experimental results show that the SMD and distribution parameter of fuel spray decrease with increasing air pressure drop and air-fuel ratio, and a critical air-fuel ratio occurs in the transitional process, when the actual air-fuel ratio exceeds the critical, the SMD and the distribution parameter change little with changing air pressure drop and air-fuel ratio.

Key words: aerospace propulsion system; aircraft engine; combustor; plain-orifice nozzle; swirl cup; air-blast atomizer; sauter mean diameter (SMD); distribution parameter

随着对当今航空燃气轮机整体性能要求的提高, 针对其燃烧系统, 需要有更高的燃烧效率、更

收稿日期: 2005-08-04; 修订日期: 2006-04-18

作者简介: 张弛, (1979), 男, 四川成都人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事航空发动机燃烧及传热传质研究。

低的污染排放、更宽的稳定工作范围以及更合理的出口温度分布,对先进航空发动机燃烧室中的燃油喷嘴雾化质量也提出了更高的要求。

从燃烧效率和污染排放来讲,希望燃油喷嘴所提供的液滴平均直径不但越小越好,并且其尺寸分布也要非常均匀。但为了保证燃烧室较宽的稳定工作范围,又需要其燃油浓度分布具有一定的不均匀性,这就要求喷嘴本身的雾化存在适当的不均匀。因此,从整个燃烧室的综合性能要求考虑,需要权衡液雾尺寸分布特性,这需要对喷嘴结构进行详细分析、设计和加工制造,以达到使用要求。

燃油雾化后的液滴平均直径目前大多采用索太尔平均直径 SMD 或质量中间直径 MMD 来描述^[1],针对不同的燃烧室工作环境,对其大小都有严格的要求,并且由于加工制造而引起的平均直径偏差不能超过一定范围,例如规定 $SMD=50\pm2\mu\text{m}$,这是对喷嘴本身的技术要求。对于液滴尺寸分布均匀性的描述,可以采用罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)液滴尺寸分布模型中的分布指数 N 。

本文所研究的直射式空气雾化喷嘴,燃油在旋流空气环腔内受到气动力作用,并在高速气流带动下喷向燃烧空间,这样既有很好的雾化质量,又使液滴具有良好的穿透性,避免了主燃区局部高温富油而产生的冒烟问题,从而克服了离心喷嘴在这方面的缺点,所以与传统的离心喷嘴相比较,空气雾化喷嘴更适合于增压比不断提高的航空燃气轮机用高温高压燃烧室^[2],并且直射式喷嘴的结构也非常简单,大大降低喷嘴系统的复杂性。为了确定该喷嘴的雾化性能是否满足先进航空燃气轮机的使用要求,对其雾化效果进行试验研究是必要的。主要研究直射式空气雾化喷嘴的雾化性能,包括 SMD 和分布指数等的测量,同时分析影响其雾化性能的关键因素。

1 双旋流空气雾化喷嘴

双旋流空气雾化喷嘴较单旋流器具有更佳的雾化效果,本文研究中所采用的双旋流空气雾化喷嘴,还考虑了旋流器旋流方向对雾化效果的影响:内旋流器和外旋流器旋向相同时,其雾化效果比较差;内外旋流器旋向相反时,能得到较好的雾化质量。因此直射式旋流器空气雾化喷嘴采用了旋向相反的内外旋流器方案。其结构如图 1 所示,具体参数请见表 1。

直射式喷嘴与离心喷嘴相比优点是结构简单,射流分布比较灵活,但是空间散布范围较窄,

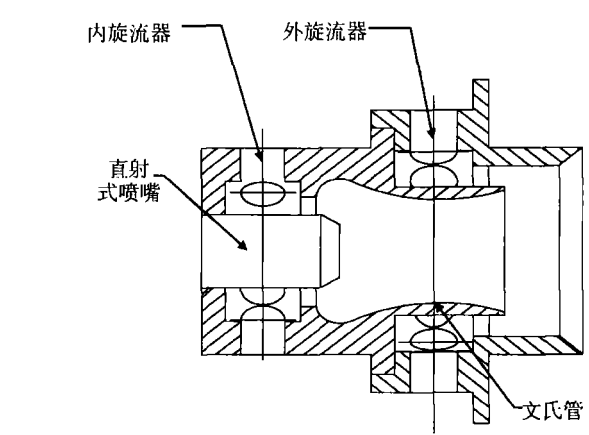


图 1 双旋流空气雾化喷嘴雾化原理简图

Fig.1 Dual swirl cup air blast atomizer scheme

所以本文研究中的直射喷嘴仅仅是将燃油喷射到文氏管表面,形成油膜,由内旋流器所产生的气流带动向前流动,而在文氏管出口处,内外旋流器形成的两股反向气流对油膜产生剪切破碎,这是主要的雾化过程。因此,该喷嘴是一种预膜空气雾化喷嘴,影响这种喷嘴雾化性能的主要参数有气液比(ALR)、空气压力降($\Delta P/P$)、以及喷嘴几何参数等。与用离心喷嘴产生油膜的空气雾化喷嘴相比,本文所研究的直射式空气雾化喷嘴也是主要利用气动力进行雾化,理论上两者效果相差不大,但具有结构更简单,分布更方便,成本更低的优点^[3]。

表 1 径向双旋流器参数

Table 1 Radial dual swirlers parameters

	$\beta/(^{\circ})$	S	$C_d A_e/(mm^2)$
内旋流器	+ 75	0.616	33
外旋流器	- 75	0.7475	50

(β ——旋流器开口方向与喷嘴轴向的夹角, S ——旋流器旋流数, $C_d A_e$ ——旋流器等效流通面积)

2 试验系统

本试验的液雾尺寸分布数据处理采用目前应用最广泛的粒子尺寸分布的数学表达式罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler)模型。其分析模型如下,函数形式为:

$$Q = 1 - \exp\left[-\left(\frac{D}{\bar{D}}\right)^N\right] \quad (1)$$

式中: Q ——累计分布,即尺寸小于 D 的液滴体积占总液雾的体积百分数; $\bar{D}$ ——在液滴尺寸分布粒子的特征尺寸; N ——液滴尺寸分布指数,表明液滴尺寸分布的均匀性^[1]。

试验在常温常压下进行,先将供气压力调节

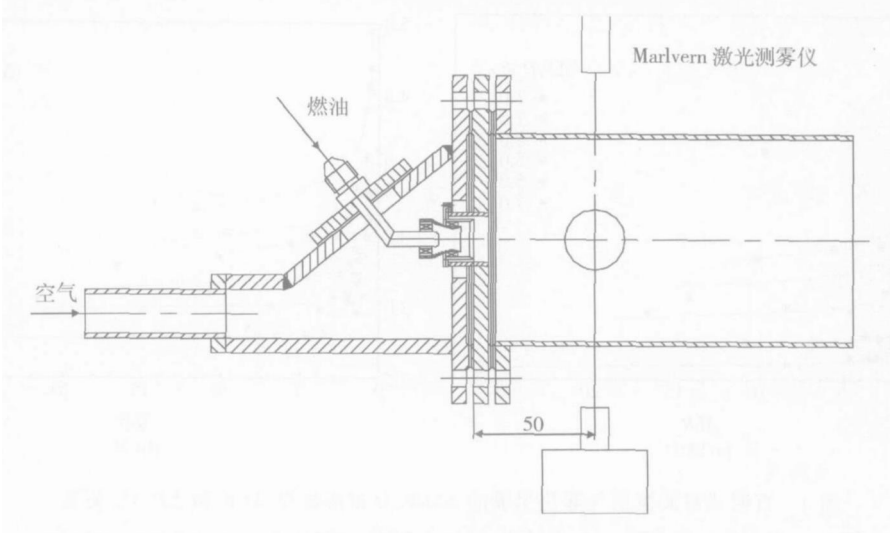


图2 喷嘴雾化试验系统示意图

Fig. 2 Atomization experimental system scheme

到适当大小,用浮子流量计测量供气量,然后将供油压力调节到不同的大小,并用质量流量计测量燃油流量,在喷嘴端面 50mm 下游处用 Marlvem 激光测雾仪测量该处液雾的液滴大小及尺寸分布特性,主要测量的液雾参数是 SMD 和分布指数。再调整气动喷嘴的空气压力降,重新调节供油压力,对液雾进行测量。由此可见,最终可以实现对不同气液比下的液雾参数的测量。

本试验中的直射式空气雾化喷嘴以 RP-3 航空煤油为介质测试其雾化性能。试验系统由供气段、供油段及喷嘴试验段组成。供气段与图 2 中的空气进口相连接,并有静压接嘴测量此处压力已确定压力降。供油段与图 2 的进油嘴相连,可以调整供油压力。

直射式喷嘴有 3 个和喷嘴轴向成 45° 角的小喷口,形成的喷雾角约为 75° 。利用 Marlvem 激光测雾仪,以罗辛-拉姆勒 (Rosin Rammler) 模型对液滴的尺寸分布进行测量。

为了消除空气可压缩性对雾化效果的影响,

试验中喷嘴最大空气压力降为 7%,此时空气射流速度为 100 m/s 左右,属于不可压缩流状态。因此整个试验的参数范围:空气温度 23°C ,空气压力降 $\Delta P/P = 1\% \sim 7\%$,气液比 (ALR): $0.4 \sim 26$ 。

3 雾化试验结果分析

3.1 试验结果

图 3 是 $\Delta P/P = 1.5\%$ 时不同气液比下的液雾尺寸 R-R 分布图。图中曲线表示液雾的累积分布,其大小对应于左边纵坐标;图中柱形表示液雾的频率分布,其大小对应于右边纵坐标;横坐标为液滴直径。图 (a) 气液比为 0.7,其液雾分布指数 N 为 3.8,图 (b) 气液比为 9.7,其液雾分布指数 N 为 3.37,可以发现,图 (b) 中的液雾尺寸分布范围比图 (a) 更宽一些,说明其均匀性更差。

利用 Marlvem 激光测雾仪测量得到的 SMD 和分布指数 N 与试验中的气液比和 $\Delta P/P_0$ 关系如图 3 所示。

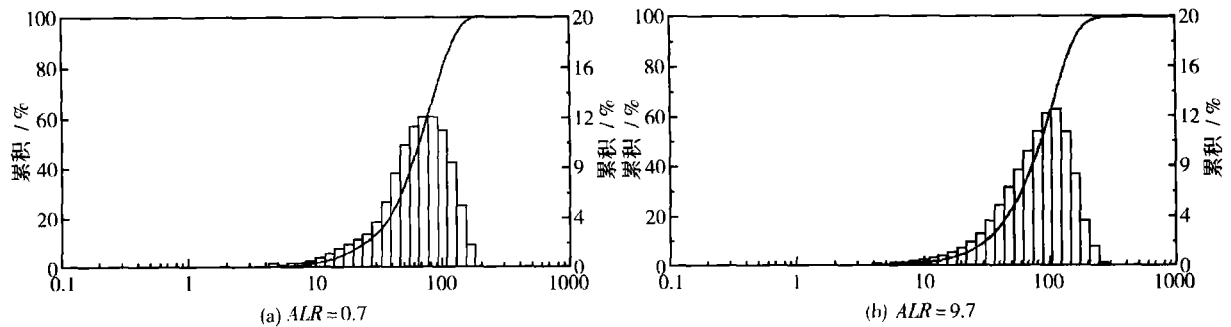


图3 $\Delta P/P = 1.5\%$ 液雾尺寸 R-R 分布

Fig. 3 $\Delta P/P = 1.5\%$ Drop size distribution of Rosin Rammler model

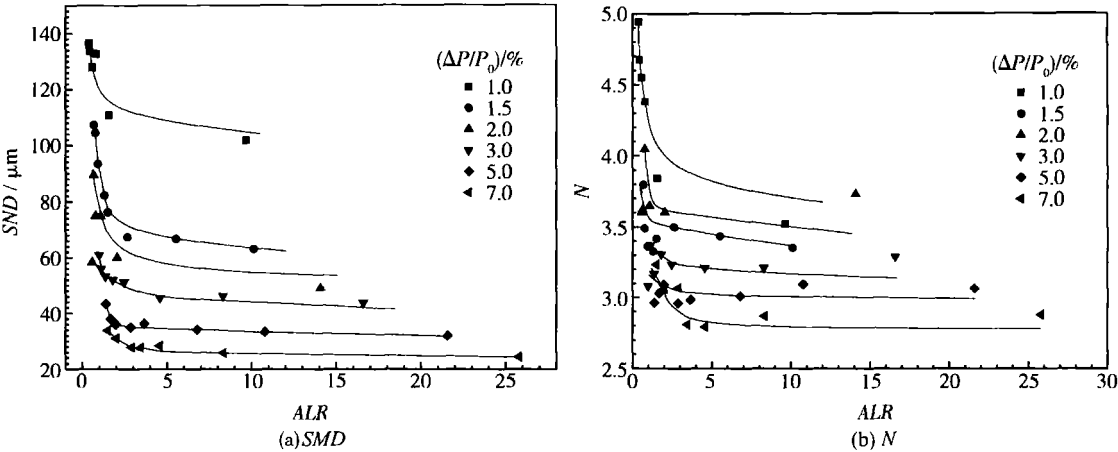


图 4 直射式双旋流空气雾化喷嘴的 SMD、分布指数与 ALR 和 $\Delta P/P_0$ 关系

Fig. 4 Relationship between SMD, N and ALR, $\Delta P/P_0$ for an air blast atomizer

从图 4(a) 可见, 随着喷嘴压力降的增加, SMD 不断减小。压力降为 1% 时, SMD 在 100~140 μm 之间, 雾化效果差。但压力降增加到 1.5% 以上, 气液比大于 3, SMD 就小于 70。当压力降增加到 7% 以上, 气液比大于 4, SMD 小于 30, 完全满足现在航空发动机燃烧室要求雾化平均直径小于 50~55 μm ^[1] 的要求。因为预膜喷嘴油膜破碎颗粒度大小直接与气动力有关, 相同气液比条件下, 空气压降增加, 其流量和流速也随之增大, 气动力变大, 雾化颗粒变细, 所以该试验结果是满足雾化普遍规律的。

另外, 在气液比较小, SMD 随气液比下降很快, 但是, 随着气液比增加至某一值, SMD 下降就迅速减慢。比如 $\Delta P/P_0 = 3\%$ 时, $ALR > 2.5$ 后, SMD 下降很慢, 只是从 51 μm 减小到 43 μm 。

这个结果与文献[4]对预膜空气雾化喷嘴研究的结论一致。原因是气液比增加到一定程度, 作用在液膜上的气动力对液雾破碎的影响减小了。

如图 4(b) 所示, 液雾尺寸分布指数随着气液比增加, 也存在一个转折点, 这个转折点与 SMD 随气液比变化的转折点是基本对应的。同时, 从图中还可发现, 随着压力降增加, 分布指数逐渐减少, 说明液雾的均匀度下降。可见, 对于预膜气动雾化喷嘴而言, 随着气动力的增加, 其雾化效果增加, 雾化液膜形成的颗粒尺寸分布却更广, 导致均匀度下降, 即对应的尺寸分布指数减小。

从图 4 可以看出, 在相同的空气压力降条件下, 随着气液比的变化, 直射式双旋流空气雾化喷嘴的液雾颗粒平均直径和分布指数的变化规律中

存在一个明显的转折点, 但这个转折点对于不同的空气压力降是变化的。这个气液比转折点可称为关键气液比 ALR_c , 如图 5 所示, 这个转折点的关键气液比的值随着压力降的增加而增加, 但最终稳定在 3 左右, 这个值对于该类喷嘴在实际工程中的应用具有重要的指导意义。

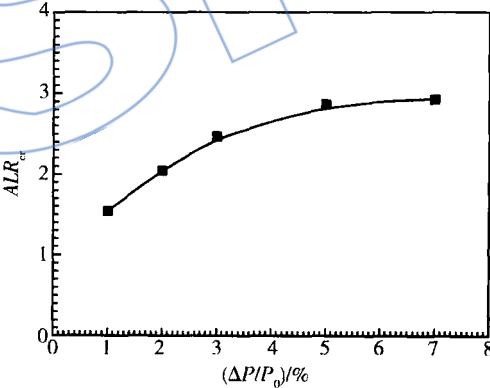


图 5 关键气液比与 $\Delta P/P_0$ 关系

Fig. 5 Relationship between ALR_c and $\Delta P/P_0$

3.2 SMD 计算模型

对于本文所研究的直射式双旋流空气雾化喷嘴的雾化平均直径 SMD 可以采用 Lefebvre 提出的瞬态雾化模型进行计算^[4]:

$$SMD/d_0 = 1.5 [A + CWe/(1 + ALR^{-1})]^{-1} \tag{2}$$

其中, d_0 是直射式喷嘴的射油孔直径;

$We = \rho_L U_A^2 d_0 / \sigma$ 是表示气动力和液体表面张力的韦伯数, ρ_L 是液体密度, U_A 是气流速度, σ 是液体表面张力;

A 和 C 是与喷嘴结构相关的经验系数。

用上式对直射式双旋流空气雾化喷嘴的雾化

试验数据进行拟合,可以得到其工程可用的液雾分布平均直径 SMD 计算公式:

$$SMD/d_0 =$$

$$1.5[4.97 + 0.00018We/(1 + ALR^{-1})]^{-1} \quad (3)$$

图 6 是公式(3)的 SMD 计算值与试验结果的比较,横坐标是试验值,纵坐标是计算值。从图中可以看出,58%的数据点分布在 $\pm 10\%$ 误差带内,而分布在 $\pm 15\%$ 误差带内的数据点占 88%,说明该公式具有较高的计算精度。

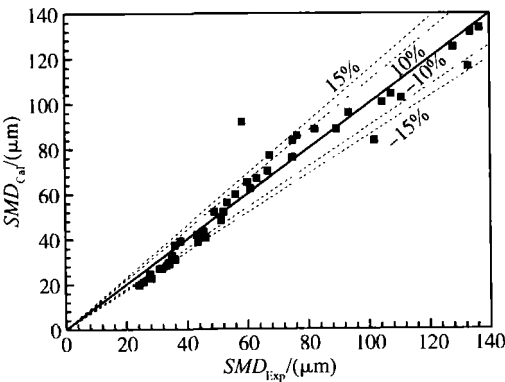


图 6 SMD 计算值与试验值比较

Fig. 6 Comparison between experimental and calculated data

4 结 论

本文对采用直射式喷嘴和双旋流杯的组合式空气雾化喷嘴的雾化性能试验研究表明: 随着 $\Delta P/P$ 与 ALR 的增加, SMD 逐渐减小, 而分布

指数 N 逐渐减小, 但存在一个关键气液比 ALR_{α} , 当实际的气液比的值超过它之后, SMD 及其分布指数的变化很小。这种现象与 Lefebvre 提出的关于空气雾化喷嘴的瞬态雾化理论相符, 即当气液比达到一定值后, 气流对油膜的破碎雾化效果迅速完成, 直接形成较稳定的液雾。由此, 作者根据瞬态雾化理论和试验数据整理出该直射式双旋流空气雾化喷嘴的液雾平均直径 SMD 的计算公式:

$$SMD/d_0 =$$

$$1.5[4.97 + 0.00018We/(1 + ALR^{-1})]^{-1}$$

参考文献:

[1] 金如山.《航空燃气轮机燃烧室》[M], 北京: 宇航出版社, 1985.
Jin Rushan, Gas turbine combustor [M], Beijing: Space press, 1985.

[2] Mellor A M, Design of Modern Turbine Combustors [M]. Beijing: Academic Press, 1991.

[3] 徐华胜, 黄文勇, 王秀兰. 喷嘴供油特性对双涡旋流器头部气动雾化效果的影响研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 14-18.
Xu Huasheng, Huang Yiyong, Wang Xiulan. Study of the Effect of Fuel Jet Characteristics on Airblast Atomization Performance for Device with Two stage Swirler [J]. China Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 14-18.

[4] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion [M]. Talor & Francis, 1999.