

文章编号: 1000-8055(2007)03-0342-05

复合式收扩套筒空气雾化喷嘴 燃烧室点火研究

林宇震, 林培华, 许全宏, 刘高恩

(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: 复合式收扩套筒空气雾化喷嘴中, 副油路是一个单油路离心喷嘴, 主油路采用双旋流空气雾化, 喷嘴是直射式。在点火研究中, 只是单油路离心喷嘴工作。实验用的燃烧室是一个单头部矩形燃烧室, 在燃烧室进口温度为常温, 进口压力为常压, 燃烧室压力降 0.9%~9.0% 的试验条件下研究了复合式空气雾化喷嘴燃烧室的点火性能。在同样条件下, 研究了复合式空气雾化喷嘴的雾化性能并总结了经验关系, 分析了影响点火的主要因素, 通过整理雾化数据, 以 Lefebvre 点火模型为基础, 总结了该类燃烧室点火经验关系。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 燃烧室; 点火; 复合式空气雾化喷嘴; 模型

中图分类号: V211.6; V231.1

文献标识码: A

Research on ignition performance of a hybrid airblast atomizer combustor with convergent-divergent sleeve

L IN Yu-zhen, L IN Pei-hua, XU Quan-hong, L IU Gao-en

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

Abstract: For a hybrid airblast atomizer combustor with convergent-divergent sleeve, a simplex pressure swirl nozzle is used for the primary fuel circuit, and a direct-injection airblast atomizer is used for the main fuel circuit. Only the pilot simplex nozzle was operated in the ignition tests. The test combustor is a single-nozzle rectangular combustor, with normal inlet temperature and normal inlet pressure. Under the test condition of pressure drop of 0.9%~9.0%, the ignition performance of hybrid airblast atomizer combustor was analyzed. And, the atomization performance of this hybrid atomizer was also summarized to obtain the empirical correlation under the same condition. While major influential factors to ignition were analyzed, the empirical correlation of such combustors was summarized based on the atomization data and Lefebvre's ignition model.

Key words: aerospace propulsion system; aircraft engine; combustor; ignition; hybrid airblast atomizer; model

目前在航空发动机中广泛使用的空气雾化喷嘴的燃烧室, 由于在低功率条件下雾化变差, 燃烧效率不够高, 稳定工作范围窄, 点火启动困难。而在高功率条件下, 空气雾化喷嘴燃烧室燃烧效率

是没有问题的。如果从低功率到高功率这样一个宽广工作范围内, 要保证燃烧室都有很好的综合性能, 从原理上讲, 采用以小流量数的离心喷嘴为副油路的复合式空气雾化喷嘴是解决上述问题的

收稿日期: 2006-03-22; 修订日期: 2006-12-08

作者简介: 林宇震(1969-), 男, 浙江宁波人, 北京航空航天大学副研究员, 航空发动机气动热力重点实验室燃烧方向学术带头人。

一种较好的方式。

对于复合式的空气雾化喷嘴,在文献[1]中对四种不同的喷嘴在低功率条件下的雾化过程进行了研究,重点研究了由压力雾化和空气雾化两种雾化方式组成的复合式空气雾化喷嘴,从气体动力学和燃油压力两个方面综合的描述了雾化的过程。文献[2,3]是对文献[1]的后续研究,提出了一种预测复合式空气雾化喷嘴性能的方法,并研究了喷嘴几何结构,燃油压力,空气压力,气液比等众多参数对复合式空气雾化喷嘴性能的影响(主要是指 SMD)。文献[4]也对由压力雾化和空气雾化组合而成的复合式空气雾化喷嘴做了一定的研究,进行了数值分析和一定的雾化试验。文献[5]提出了一种双液雾的复合式空气雾化喷嘴,副油路是离心喷嘴,对该喷嘴的性能和流场做了数值模拟,在单头部的燃烧室中做了贫油熄火试验。在上述的文献中没有对低功率条件下的复合式空气雾化喷嘴的燃烧性能做进一步的研究,而是主要集中于比较基础的喷雾研究。文献[6]对复合式空气雾化喷嘴单头部燃烧室的效率和稳定性进行了研究。

本文的工作是文献[6]工作的一个后续,主要对常压常温条件下,采用收扩套筒设计的复合式空气雾化喷嘴的点火性能进行更深入的研究,同时对 Lefebvre 点火模型^[7]进行了部分改进,提出了采用主燃区油气比拟合的点火模型。该方法的物理意义更为明确。为了得到在熄火模型中雾化颗粒度的影响,对复合式空气雾化喷嘴的雾化模型进行了归纳和整理。

1 复合式空气雾化喷嘴

复合式空气雾化喷嘴采用离心式雾化和空气雾化相组合的方式。具体的结构和喷雾散布如图1所示。在复合式空气雾化喷嘴的方案中采用了双油路喷嘴,来解决在燃油宽广的变化范围内保持高性能燃烧问题。副油路采用离心雾化方式,喷嘴为小流量数离心喷嘴,以满足低功率条件下对燃油流量和雾化的要求。主油路采用双旋流空气雾化,燃油喷嘴为直射式喷嘴,燃油先喷到文氏管内壁上,在文氏管内壁上形成油膜,然后在文氏管出口由双涡流器喷出的空气雾化,以满足大功率条件下对燃油流量和雾化的要求。双涡流器方案中,涡流器分为内涡流器和外涡流器,旋向设计为相反,能相应的加强剪切、提高雾化质量。内外涡流器都是径向涡流器结构。为了使低功率条件下

的燃油雾化保持一个较高的水平,在文氏管的设计中,需要考虑副油路小流量离心喷嘴的喷雾张角,使绝大部分燃油不能打到文氏管内壁上,直接进入主燃区。套筒的设计为收扩形式,在油雾进入主燃区前,强化两股旋转射流与油雾的混合。

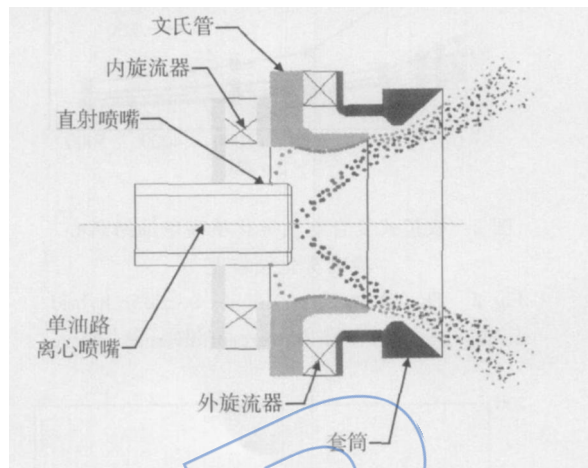


图1 收扩套筒复合式空气雾化喷嘴

Fig.1 Hybrid airblast atomizer with convergent-divergent flare

复合式空气雾化喷嘴的副喷嘴是单油路离心喷嘴,该喷嘴燃油流量和压力的关系为: $m_{fi} = 3.262 \Delta p_{fi}^{0.5}$,式中, m_{fi} 油流量单位为 g/s,压力降 Δp_{fi} 单位为 MPa,流量数为 $3.262 \times 10^{-6} \text{ kg/sPa}^{0.5}$ 。

在文献[6]中已发表了该复合式空气雾化喷嘴在供油供气条件下的雾化数据。该雾化数据是在常温常压下,采用 RP-3 航空煤油,用马尔文喷雾分析仪测量的油雾 SMD。这里整理成与空气压力降为自变量的关系式,见图2。

为了在点火模型中应用喷雾数据,对该种收口式复合空气雾化喷嘴的喷雾数据进行关联。关联采用的方法是以离心喷嘴雾化的数据为基础,采用经典的公式,与本报告喷雾数据相对照。离心喷嘴关系式如下,采用了 Jasuja 的关系式^[8],对其中的关系式前的参数做了修正,以对本文的雾化数据拟合更好,见下式:

$$SMD_{pa} = \frac{8.0 \sigma^6 \nu^{16} m_{fi}^{0.22}}{\Delta p_{fi}^{0.43}} \quad (1)$$

式(1)中, SMD_{pa} 指仅是离心喷嘴在没有雾化空气($\Delta p_a = 0$)时的雾化颗粒度,对于油压 0.1 MPa 至 0.5 MPa 之间,公式(1)与实验点对照关系很好,见图3。图3中,张力 $\sigma = 0.023 \text{ N/m}$,运动粘性系数 $\nu = 3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

图2中的试验数据,除了喷嘴油压降为 0.05

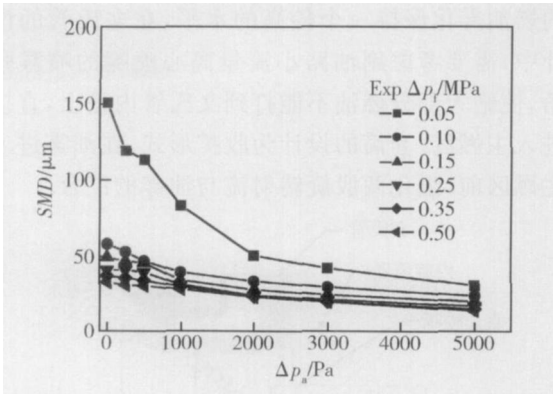


图 2 收扩式复合空气雾化喷嘴单油路离心喷嘴雾化颗粒度

Fig.2 The SMD of the simplex nozzle in hybrid airblast atomizer with convergent-divergent sleeve

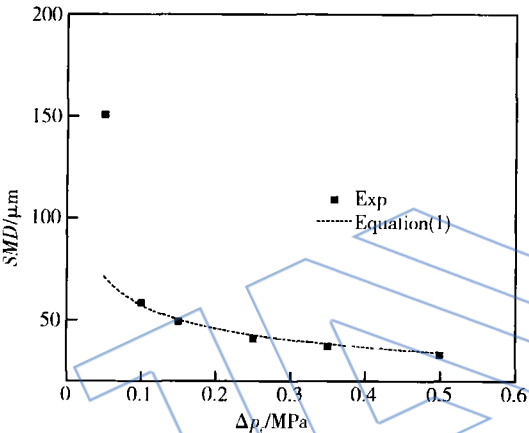


图 3 单油路离心喷嘴经验关系式与试验数据的对照

Fig 3 Comparison of experience relative formula and experimental data of the simplex nozzle

MPa 时外,可以考虑在 Jasuja 的关系式上考虑气动力的影响. 这时, SMD 的表达式是: $SMD = SMD_{pa} f(We)$, 式中空气雾化的 Weber 数表达式用 $\frac{\rho_a u_a^2 d_0}{\sigma}$, ρ_a 是气体密度, u_a 是气体速度, d_0 是喷嘴直径, σ 是燃料的表面张力, $f(We)$ 从试验数据中拟合, 按照这个关系式拟合的公式如下:

$$SMD = 60 SMD_{pa} We^{-0.4}$$

(2)

该公式适用范围是 $\Delta p_a > 0 \text{ Pa}$ 以及 $\Delta p_t > 0.05 \text{ MPa}$, 其预测值与试验数据对照如图 4 所示. 精度为 $\pm 10 \%$, 95 % 的数据在这个精度范围内.

2 点火实验

采用一个单头部燃烧室进行常温常压空气进口条件下的点火研究, 单头部燃烧室设计的流量

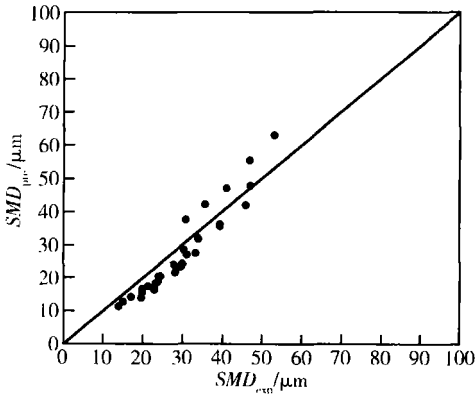


图 4 拟合公式与实验数据的对照

Fig.4 Comparison of predicted and measured values of SMD

分配是: 头部气量占整个气量的 26 %, 头部旋流器的当量比在设计点为 2.0; 主燃区的气量占整个气量的 35 %, 壁面冷却采用离散冷却方法, 冷却气量分配 30 %. 单头部燃烧室侧壁不开孔, 即侧壁不冷却, 避免影响燃烧性能. 燃烧室侧壁装了一块透明的石英玻璃, 直接观察是否着火. 点火电嘴通过一个浮动衬套插入燃烧室, 电嘴表面与火焰筒的内表面齐平. 电嘴与主燃孔的轴向位置相同, 并在两个主燃孔中间, 如图 5 所示. 头部高度 100 mm.

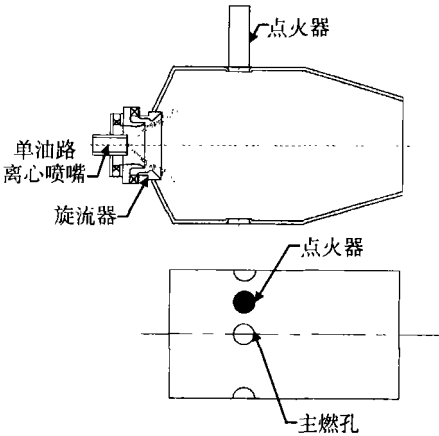


图 5 单头部燃烧室实验件

Fig.5 The single nozzle combustor

点火器是 XD H-12 高能点火器, 工作电压 220 V, 由点火线圈、半导体点火电嘴和高压电缆组成, 通过点火线圈中的升压整流变换成直流脉动电流, 对储能的电容充电. 当电容充满时, 放电电流经过放电管、扼流线圈及高压电缆传送到半导体点火电嘴, 形成高能电弧火花. 储能 12 J, 点火电压 2 500 V, 火花频率 10 次/ s^[9].

点火实验是在常温常压进口空气条件下进行的.实验系统详细描述见文献[6].实验台空气流量测量的精度为 1%,燃油流量采用质量流量计测量,精度为 0.5%.进行点火实验时,给定空气流量,然后给定燃油流量同时启动点火器,以 5 s 为限制时间,能够点燃主燃区,则认为该油气比和气流条件下能够点燃.否则,则认为不能点燃.逐步减小燃油流量,得到最小能够点着火的油气比,这也称之为贫油点火^[7].在最小能够点着火的油气比的工况下,需要验证两次以上,以确定该油气比.实验空气流量的变化的范围通过燃烧室的压力降来表达,这个压力降从 1%~9%.

3 实验结果和分析

将最小能够刚点着的主燃区油气比连成了一条曲线,就是该燃烧室在常压进口空气温度条件下的点火边界.

对不同气流量和主燃区油气比的试验结果,绘制出油气比与总压损失之间的点火边界线,如图 6 所示.从图中可以看出,随着总压损失的增加,点火区域逐渐增宽,点火性能改善.原因是气量增加后,副喷嘴的单油路离心喷嘴燃油流量增加,雾化压力增加,离心喷嘴本身的雾化改善,同时,空气压力降增加,进一步增加了气动力,亦改善了雾化,这二者作用使得雾化颗粒度减小.按照本文前述公式(2)的计算,对应点火边界的雾化颗粒度值如图 7 所示.当空气压力降进一步增加,雾化颗粒度减小趋势变缓,则点火边界变宽的趋势也同时变缓,雾化颗粒度变化的趋势反映到了点火性能中.

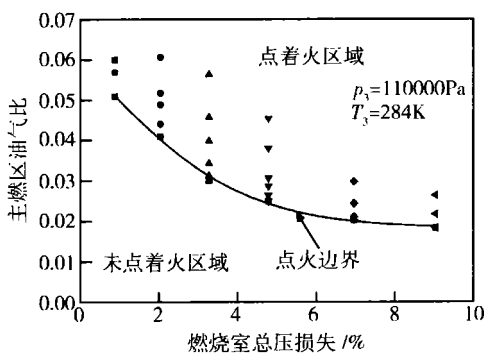


图 6 主燃区点火边界与燃烧室总压损失的关系
Fig. 6 Relationship between ignition boundary of primary zone and total pressure loss of combustor

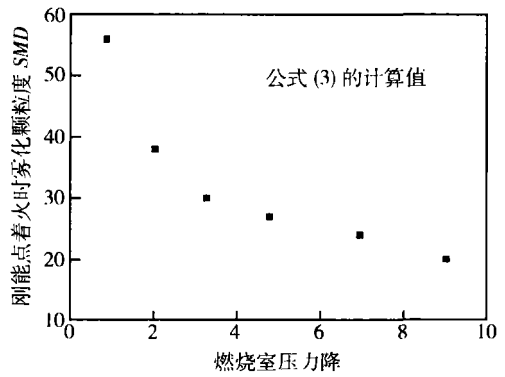


图 7 刚点着火时的喷油雾化颗粒度与燃烧室压力降关系

Fig. 7 Relationship between spraying SMD that light ignition and pressure drop of combustor

从燃烧室的功能分区来看,点火与主燃区的油气比关系更大,因为下游中间区和掺混区设计对点火影响较小.因此,采用主燃区的刚点着火的油气比来拟合可用的贫油点火边界经验关系式是合理的.

在文献[9]中,Lefebvre 总结的经验关系的贫油点火油气比是燃烧室的总油气比,在本文中,按照上述思路,采用主燃区的油气比来整理数据.

$$f / \alpha_{lo, pz} = \left(\frac{B}{V_{pz}} \right) \left(\frac{\dot{m}_a f_{pz}}{p_3^{1.5} \exp(T_3 / 300)} \right) \left(\frac{SMD^2}{\lambda_{eff} H_u} \right) \tag{3}$$

式中: B 是常数,与燃烧室类型有关, $f / \alpha_{lo, pz}$ 是贫油状态下最小点火燃烧室油气比, $\dot{m}_a$ 是燃烧室进气量,单位 kg/s , p_3 是燃烧室进口压力,单位用 kPa , T_3 是燃烧室进口气流温度 K , λ_{eff} 是燃料有效蒸发量,单位为 mm^2/s , H_u 是燃料的低热值 kJ/kg . 上述关系式中,除了 SMD 采用微米为单位,其它量均为国标单位. f_{pz} 为主燃区的气流量分配, V_{pz} 是燃烧室主燃区容积. λ_{eff} 的计算需要考虑收扩套筒复合式空气雾化喷嘴处空气的速度,因为空气速度强化了蒸发.计算方法参考文献[10].公式(3)中, B 是经验常数,由实验数据拟合得到.再使用该方法时,由于式(3)左右皆包含了油气的参数,因此,需要迭代来得到点火油气比.

按照公式(4)计算了该复合式空气雾化喷嘴燃烧室参数在不同主燃区点火油气比下,拟合了 B 值为 1.39,按此模型计算的点火油气比与试验值对照见图 8.图 8 表明,符合程度相当好.

为了检验在相似结构下的模型预估准确性,对另外一个结构类似的燃烧室进行了点火性能预估.该燃烧室的头部高度 70 mm,旋流器空气占

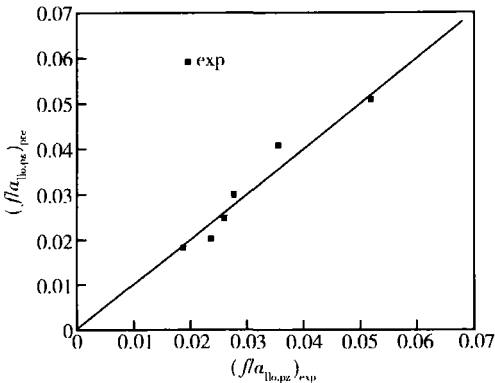


图 8 点火试验数据与模型预估值对照
Fig. 8 Comparison of predicted and measured values of ignition

10 % , 头部冷却空气占 8 % , 主燃孔气量分配 15 % , 在单头部上进行了常温常压下的点火. 离心喷嘴的流量数与上述燃烧室一致. 模型预估值与实验数据对比见图 9. 从预估值来看, 在燃烧室压力降较低时, 预估值比实验值高, 燃烧室压力降较大时, 预估值比实验值低, 精度在 20 % 以内. 原因是计算的 SMD 值在压降低时比实际值偏大, 而压降高时比实际值低.

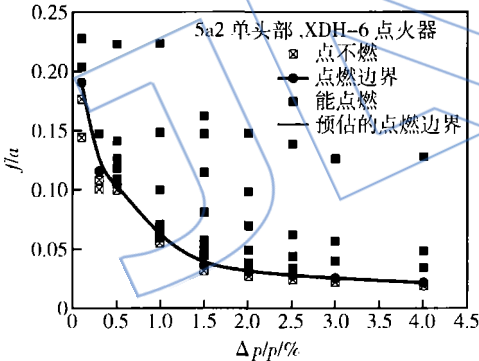


图 9 对另一个单头部燃烧室的点火预估

Fig. 9 Comparison of predicted and measured values of ignition for another single injector combustor

4 结 论

对采用收扩套筒设计的复合式空气雾化喷嘴燃烧室的点火性能进行了深入的研究, 同时对 Lefebvre 点火模型^[9]进行了部分改进, 提出了一

种采用主燃区油气比拟合的点火模型.

得到的主要结论是:

(1) 喷嘴的雾化特性对于点火有重要影响. 因此, 为了得到一个点火性能良好的燃烧室并同时保持其它燃烧性能良好, 采用复合式空气雾化喷嘴是一个较好的办法.

(2) 对喷嘴雾化数据应建立完善的经验模型, 喷雾数据对于预估点火特性是非常重要的方面.

(3) 采用 Lefebvre 的模型, 加上主燃区的点着火时的油气比来拟合点火数据方法的物理意义更为明确. 从工程应用来讲, 不同的燃烧室, 如果其头部设计和主燃区的结构类型相似, 即可用同样方法来预估其点火特性, 可以不考虑掺混区和冷却的设计.

参考文献:

[1] Rizk N K, Mongia H C. Performance of hybrid airblast atomizers under low power condition [R]. AIAA-92-0463, 1992.

[2] Rizk N K, Chin J S, Razdan M K. Influence of design configuration on hybrid atomizer performance [R]. AIAA-96-2628, 1996.

[3] Chin J S, Rizk M N, Razdan M K. Study on hybrid airblast atomization [R]. AIAA-96-0406, 1996.

[4] Mansour A, Benjamin M. A new hybrid air blast nozzle for advanced gas turbine combustion [R]. ASME Paper 2000-GT0117, 2000.

[5] Nickolaus D A, Crocker D S, Black D L, et al. Development of a lean direct injector for low emission aero gas turbines [R]. ASME Paper GT-2002-30409, 2002.

[6] GONG Jing, LIN Yuzhen, XU Quanhong, et al. Investigation of combustion performance of a hybrid airblast atomizer under simulated low power conditions [R]. ASME Paper 2005-GT-68219, 2005.

[7] Lefebvre A H. Gas turbine combustion [M]. Taylor & Francis Press, 1999.

[8] Jasuja A K. Atomization of crude and residual fuel oils [J]. Journal of Engineering for Power, 1979, 101(2): 250-258.

[9] XDH 高能点火装置使用说明书 [Z]. 徐州燃烧控制研究院有限公司, 2004.

[10] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室 [M]. 北京: 宇航出版社, 1985.