

文章编号: 1000-8055(2004)05-0650-06

低压条件下复合式多级旋流杯 燃烧室燃烧效率研究

刘 伟, 林宇震, 刘高恩, 王华芳

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对低压(常压或低于常压)条件下航空发动机燃烧室的燃烧效率作了初步的研究, 主要目的是研究复合式多级旋流杯燃烧室燃烧效率的改进。复合式多级旋流杯组织方案由离心雾化和旋流杯空气雾化组成, 采用双油路, 副油路为小流量离心喷嘴, 主油路为直射式喷嘴匹配空气雾化, 头部采用三级涡流器组织燃烧。燃油采用 RP-3 航空煤油。使用单头部燃烧室为试验件, 在常压和低压状态下, 模拟燃烧室进口速度和总油气比。燃烧效率采用燃气分析法, 用效率分析仪进行测量。研究结果表明, 复合式多级旋流杯燃烧组织方案能改善低压下的燃烧, 提高燃烧效率。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 燃烧室; 燃烧效率; 涡流器; 低压

中图分类号: V 231.2

文献标识码: A

Research of Combustion Efficiency of Combustors Using Hybrid Airblast Atomizer under Low Pressure

L U Wei, L N Yu-zhen, L U Gao-en, WANG Hua-fang

(National Key Laboratory of Aircraft Engine,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Preliminary investigation of combustion efficiency under low pressure was carried out. This study is aimed at investigating the enhancement of combustion efficiency using the hybrid multistage swirling cup. The hybrid multistage swirling cup was made up of a pilot simplex nozzle combined with airblast atomizer. A single nozzle combustor was fabricated for combustion efficiency test. Combustor inlet velocity and overall fuel/air ratio were simulated under low pressure condition. The gas sampling was used for the combustion efficiency measurement. The results show that the hybrid multistage swirling cup can improve combustion and enhance combustion efficiency with combustor inlet pressures ranged from 0.07 MPa to 0.11 MPa.

Key words: aerospace propulsion system; aircraft engine; combustor;
combustion efficiency; swirler; low pressure

航空发动机的燃烧效率直接影响到飞机的耗油率、航程、有效载荷及使用成本, 燃烧室设计点的燃烧效率一般能接近 100%, 但非设计点的燃

烧效率相对低一些, 而在低压条件下的燃烧效率一般在 90% 以下, 这意味着发动机需要更多的燃料补偿燃烧室的低效率燃烧。并且, 随着化学排放

物控制和限制的出现, 低功率状态下的燃烧效率的提高变得更为重要。

国内关于低压条件下燃烧组织方案的研究还不多见。在国外, 有一些进展, 在文献[1]中探讨了小工况条件下 4 种不同离心喷嘴和空气混合喷嘴组合的混合空气雾化喷嘴的结构及雾化性能; 文献[2]中探讨了一种新的空气雾化喷嘴的结构和性能; 文献[3]分析了压力旋流空气雾化喷嘴自身结构对雾化的性能。但上述文献未对低压条件下的燃烧效率进行研究。

本文主要内容是燃烧室进口压力在常压和低压状态下, 提高燃烧室燃烧效率的研究。分析某型发动机燃烧室在低压条件下雾化和工作特点基础上, 发展了复合式多级旋流杯燃烧组织的改进方案。主要特点是解决宽广工作范围内燃烧效率的问题, 特别是在低压、常压条件下燃烧效率下降的问题。并通过常压和低压条件下的试验验证了该方案提高燃烧效率的可行性。

1 基准方案燃烧效率

本文研究的基准是一个推力 2 000 daN 级的涡扇发动机燃烧室, 该燃烧室采用单油路离心喷嘴, 单级涡流器组织燃烧, 见图 1。原来的小功率工况的压力为 0.2 MPa。大功率工况燃烧室进口压力为 1.1 MPa。将来需要该燃烧室工作在压力很低的小功率工况(低于 1 个大气压)。该工况燃烧室进口空气压力变化为: 0.07~0.11 MPa, 进口温度为 520 K, 总油气比为 0.02。而在大功率工作时, 燃烧室进口压力为 1.1 MPa, 进口温度 600 K, 总油气比 0.022。从上述参数来看, 燃烧室工况参数变化范围非常宽广。

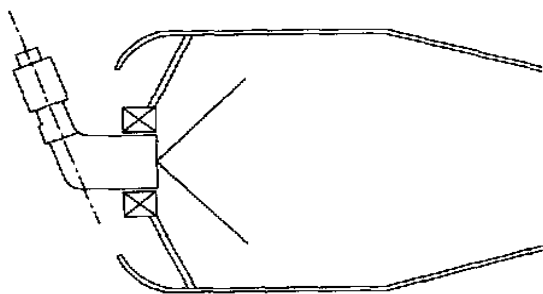


图 1 基准型燃烧组织方案

Fig 1 The prototype combustor

现分析在这个状态下该燃烧室的燃烧效率。燃烧分为三个过程: 蒸发、混合以及化学反应^[4], 这三个过程总体来说决定了燃烧室的燃烧性能的

好坏, 而喷雾质量的好坏直接决定了这三个过程。因此在航空发动机中, 燃料喷嘴的设计和燃烧室气动方式是雾化质量、燃烧效率好坏的关键。

在本文基准方案中采用的是一个单油路离心雾化喷嘴雾化方式, 离心雾化喷嘴流量和压力的关系可总结为: $m_f = 10.42 \Delta P_f^{0.5}$, 式中, 油流量单位为 g/s, 压力单位为 MPa。

根据 Jasuja^[5] 总结的离心喷嘴索太尔平均直径的经验关系式:

$$SMD = \frac{4.4 \sigma_f^{0.6} \mu_f^{0.16} m_f^{0.22}}{\Delta P_f^{0.43}} \quad (1)$$

计算了基准方案单油路离心喷嘴的雾化颗粒度, 并与试验结果相对照。如图 2 所示。

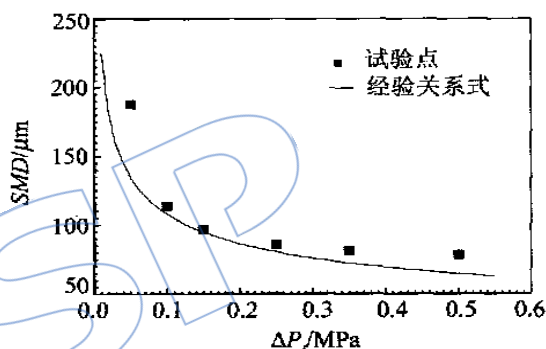


图 2 基准型单油路离心喷嘴雾化颗粒度

Fig 2 Influence of Injection Pressure on Mean Drop Size to Simplex Nozzle of Prototype Combustor

从图 2 可见, 试验结果与经验关系式符合很好。在常压和低压工作时, 基准型的燃油喷嘴流量为 1.74~2.78 g/s, 相应的压力范围是 0.027~0.074 MPa。若采用 RP-3 航空煤油, 油温 20℃其表面张力为 0.023 N/m², 运动粘性 1.5 × 10⁻⁶ m²/s, 由公式(1)可得在燃烧室常压和低压状态下, 燃油雾化的索太尔平均直径为 120~163 μm, 如果要保证高的燃烧效率, 这种雾化颗粒度远远达不到要求, 目前高效燃烧, 雾化颗粒度至少要达到 60 μm 以下。因此必须对相应的离心雾化喷嘴进行改进, 以满足高效率燃烧性能要求。

在燃烧室进口压力为: 0.113~0.130 MPa, 进口温度为 520~600 K 时, 其基准型燃烧组织方案的燃烧效率只有 0.88~0.92, 平均起来将近有 10% 的燃料未燃烧。在燃烧室的进口压力低于一个大气压的情况下, 即 0.07 MPa~0.08 MPa, 碳氢燃料燃烧化学反应速率正比于压力的 1.5 次方, 因此燃烧效率进一步降低, 低于 90%。对于如此低的燃烧效率, 必须改进燃烧室的燃烧组织方

案。

2 低压高效燃烧组织方案

根据L efebvre 总结的经验关系式^[6]:

$$\frac{SMD}{D_h} = \left(1 + \frac{1}{ALR}\right) \left[0.33 \left(\frac{\sigma}{\rho_a u_a^2 D_p}\right)^{0.6} \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.1} + 0.068 \left(\frac{\mu_f^2}{\sigma \rho_f D_p}\right)^{0.5}\right] \tag{2}$$

雾化用的气动力正比于 $0.5\rho_a u_a^2$, 在大状态或高压工况下, 气动力比较大, 雾化质量比较好, 而在小状态低压工况时, 气动力相对变化比较大, 对比大工况可能下降 10 倍以上, 雾化质量比较差。在海平面起飞等大工况的条件下, 气动力比较大, 能满足燃油雾化性能的要求, 但对主要的低压工况, 气动力比较小, 空气雾化喷嘴显然不能达到比较好的雾化性能。所以, 针对本文燃烧室的不同的工况要求, 如果采用预膜空气雾化喷嘴, 显然是不合理的。

在燃烧室的一个工作循环中, 燃油工作范围宽, 油流量变化大, 在大功率状态下燃油量是低压工况的 13~16 倍, 而小流量喷嘴主要解决的是低压工况下的供油需求, 如果仅采用单油路离心喷嘴是无法满足油量变化要求, 因此, 考虑采用双油路离心喷嘴的方案。为了保证燃烧室在低压工作时保持高效燃烧以及大工况时的高效燃烧, 以及在整个工作范围内有良好的其它性能, 燃烧的总方案拟定采用复合空气雾化喷嘴, 复合的意思是结合了专门设计的小流量离心喷嘴雾化和大流量条件下的空气雾化。具体的燃烧组织的实施方案为: 采用双油路喷嘴, 解决燃油宽广的变化范围的问题, 副油路为专门设计的小流量离心喷嘴, 主油路为直射式喷嘴, 燃油先喷到文氏管上, 在文氏管出口由多级涡流器喷出的空气雾化, 采用三级涡流器的头部, 可以强化主燃区油气掺混, 与主燃孔配合形成主燃区的燃烧组织方案, 该方案组合了离心雾化和旋流杯空气雾化, 称之为复合式多级旋流杯燃烧组织方案, 参见图 3 中的改进型方案。

对低压工况, 本方案中采用专门设计的小流量离心喷嘴, 离心雾化喷嘴流量和压力的关系为: $m_f = 3.262\Delta P_f^{0.5}$, 式中, 油流量单位为 g/s, 压力单位为 MPa。在常压和低压工况下, 该喷嘴的流量范围为 1.8~2.2 g/s, 相应的喷嘴压力范围是 0.30~0.45 MPa。采用 RP-3 航空煤油, 在燃烧室常压和低压工况下, 试验结果表明燃油雾化的索太尔平均直径小于 40 μm, 见图 4。对比于基准方案的离心雾化喷嘴, 雾化性能有极大的提高, 能满足高效燃烧的要求。

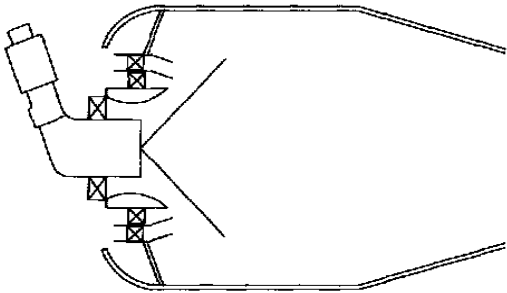


图 3 复合式多级 流杯燃烧组织方案

Fig 3 The scheme of hybrid air blast atomizer combustor

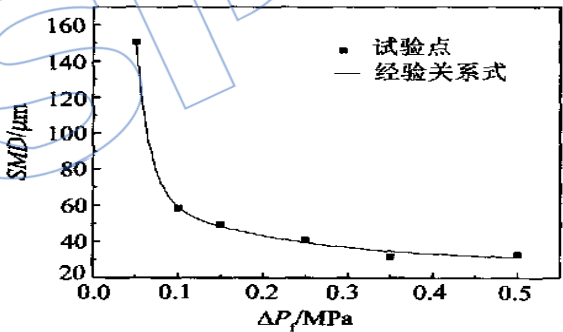


图 4 小流量离心喷嘴雾化颗粒度

Fig 4 Influence of injection pressure on mean drop size to small mass flow simplex nozzle

离心喷嘴喷雾张角控制在 90°左右, 使离心喷嘴的喷雾大部分不打在文氏管壁面上, 保证雾化燃油直接进入主燃区燃烧, 以利于匹配头部旋流气量, 获得高的燃烧效率。

头部涡流器采用三级旋流器, 能有利于安排用于雾化的空气和用于油雾散布的空气, 有利于增强湍流掺混。对于三级涡流器方案, 涡流器分为内涡流器、外涡流器和头部涡流器, 内涡流器与外涡流器的旋向相反, 能相应的加强剪切, 提高雾化质量, 从涡流器进气方向来看, 内涡流器为顺时针旋转, 外涡流器为逆时针旋转, 头部涡流器为逆时针旋转。头部气量占整个气量的 21%, 整个头部的流量系数为 0.65, 主燃区的气量占整个气量的 32.3%, 在小功率工况下主燃区的当量比为 1, 预

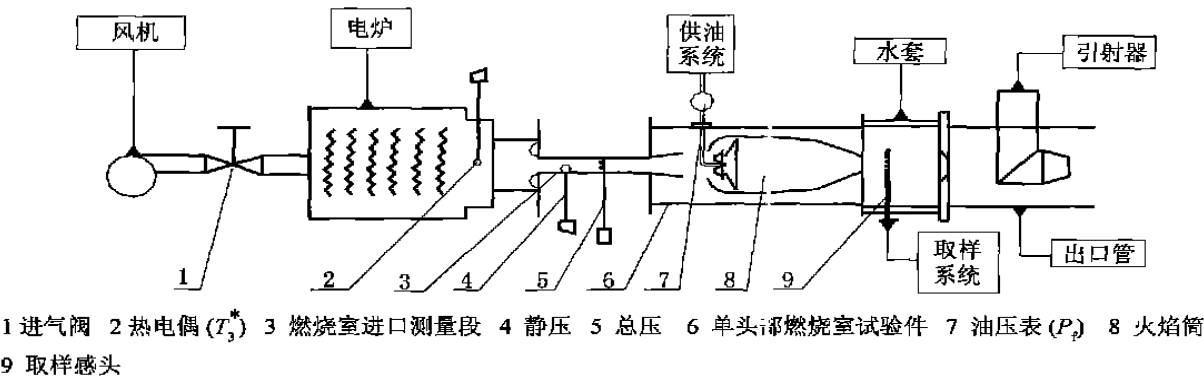


图 5 试验系统简图

Fig 5 Setup of the experimental system

期能够达到高效率燃烧。

3 试 验

试验系统简图如图 5, 其中 6、8 为试验件, 燃烧室的进口温度通过电炉加温获得, 这种加热方式对燃烧室进口空气无污染; 燃烧室进口压力可通过风机和引射器来调节, 通过引射高压气体, 可以调节燃烧室进口低压。2 为热电偶, 4、5 为总静压感头, 分别测量相应的温度、总压和静压。燃油流量通过压力表 7 来控制。取样感头 9 取样燃料燃烧后的燃气。水套的作用是冷却出口气体和取样感头。



图 6 单头部多级旋流杯燃烧室试验件

Fig 6 The single nozzle test cobustor with hybrid multistage swirling cup

本试验是在低压工况下, 测量其燃烧室的燃烧效率, 研究燃烧室的燃烧组织方案。试验件是按照低压条件下燃烧室的气动热力条件设计的, 采用单头部燃烧室, 且简化成矩形结构, 见图 6。燃烧效率通过取样燃气成分来测量, 通过效率分析仪测量燃气成分的含量, 主要是 UHC 和 CO 的含

量, 然后通过相应的公式计算其燃烧效率。试验时模拟燃烧室的进口速度, 保证进口温度以及总油气比与设计点一致, 压力变化范围为 0.07~0.11 MPa, 试验状态参数见表 1。

表 1 实验参数			
Table 1 Test condition			
试验	1	2	3
$m_{\text{a}}/(\text{kg/s})$	0.087 6	0.099 2	0.133 7
P_3/Pa	70 330.0	79 630.00	109 712.30
T_3^*/K	528	521	518
f/a_0	0.020 0	0.020 1	0.020 8

4 试验结果与分析

在文献[5]中介绍了不同燃烧室燃烧效率测量及效率公式的分析, 本文采用和文献[5]相似的燃气法测量燃烧室的燃烧效率, 通过效率分析仪分析燃烧室出口气体的燃气成分: CO 和 UHC, 计算燃烧室的燃烧效率, 并把 UHC、CO 排放的试验结果表达为 EI 指数。根据所测得的未燃物的发热量在燃料完全燃烧的热量的百分比计算燃烧效率。把 UHC 按照 CH₄ 来处理, 推导其计算公式为:

$$\eta = 100 - \left(\frac{EI_{\text{CO}}}{43.02} + \frac{EI_{\text{UHC}}}{8.72} \right) \tag{3}$$

式中:

$$EI_{\text{CO}} = \frac{28}{29} C_{\text{CO}} \frac{1 + f/a}{f/a} \times 10^{-3}$$
$$EI_{\text{UHC}} = \frac{16}{29} C_{\text{UHC}} \frac{1 + f/a}{f/a} \times 10^{-3}$$

η 为燃烧室的燃烧效率; $EI/(\text{g/kg})$ 为每千克燃

料燃烧排放量的克数,单位为 g/a 为燃烧室油气比; C 为排放物的浓度,单位为百万分之一。

本试验中效率分析仪对UHC和CO的测量精度为5%,采用误差传递函数的误差分析表明, $E_{I_{CO}}$ 和 $E_{I_{UHC}}$ 的最大误差为5.2%。以下是一些具体的方案及数据,按表1的试验参数进行试验。

本文主要针对的是在低压状况下,燃烧组织方案的研究。通过测量燃烧效率确定燃烧方案的可行性。试验参数见表1,在参数变化的范围中,燃烧室进口温度基本不变:520 K,压力为低压状态,分别为0.07 MPa, 0.08 MPa, 0.11 MPa的进口压力,油气比为:0.02。具体测量的燃烧效率的变化情况见图8。

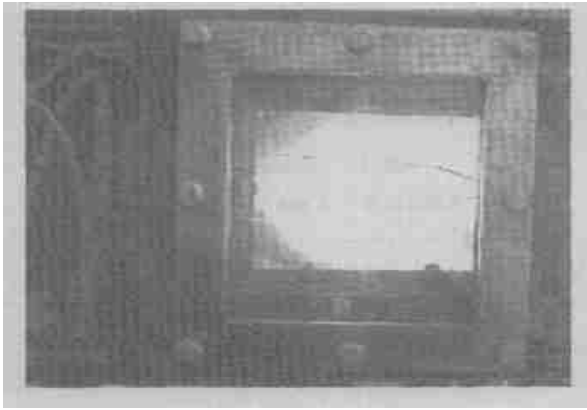


图7 多级旋流杯燃烧室常压试验情况

Fig. 7 The single nozzle test combustor using the hybrid multistage swirling cup under normal pressure

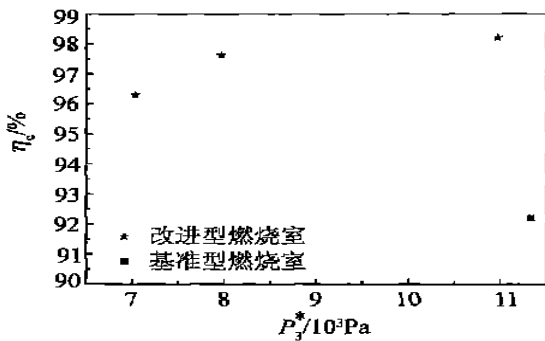


图8 不同压力下燃烧效率的变化

Fig. 8 Combustion efficiency in different pressures

由图可见,在常压状态下,改进型燃烧效率能达到98.22%,远远高于基准型在相同工况下的92%的燃烧效率,达到了试验设计的要求。特别是在进口压力为0.07 MPa~0.08 MPa的工况点,基准型方案在模拟工况下,燃烧效率预测下降比

较严重,只有80%~90%,而改进型方案的燃烧效率在进口压力为0.08 MPa的时候,为97.6%,在进口压力为0.07 MPa时候,为96.3%,燃烧效率比基准型提高了大约10%左右。

从试验结果可见,复合式旋流杯燃烧组织方案解决了常规燃烧室在常压和低压工况条件下的燃烧效率低下的问题。验证了本方案在提高低压和常压燃烧室进口条件下燃烧效率的可行性。在燃油油滴的分布和雾化方面达到了高效燃烧室设计的要求。在另一方面,随着燃烧室进口压力的提高,此种燃烧方案的燃烧效率会逐渐的上升,在高压条件下,燃烧效率基本接近100%,因此,此种燃烧组织方案可推广到许多燃烧室的应用。具有广泛的应用前景。

在整个试验完成后,燃烧室头部无冒烟现象,从另一方面说明燃烧效率高,火焰控制比较合理,燃烧组织方案的初步研究取得了较大进展。

5 结 论

通过改进型方案燃烧组织的研究发现:

(1) 复合式旋流杯燃烧组织方案在小工况情况下,燃烧效率常压时大于98%,低压时大于96%,取得了较大的提高。说明小流量喷嘴选择比较合理,对燃烧效率的改进起到了非常重要的作用。头部三级流量分配合理,利于强化油雾与空气掺混,其主燃区流态能够与油雾很好匹配,能比较好的控制油滴的雾化和分布。

(2) 基准型相比,此种方案对改善燃烧,防止污染物的排放有比较大的潜力。对于此种燃烧组织方案,点火、熄火和出口温度场分布需进一步进行试验,在低污染方面,可结合 NO_x 的排放和燃烧室结构方面的问题作详细的研究。

可见,小工况和低压条件下,复合式多级旋流燃烧组织方案在燃烧效率方面有较大的提高,对于高压状态下的燃烧室燃烧方案也有很好的借鉴作用,进一步的工作是优化旋流组合及喷嘴轴向位置,达到更好的性能。

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] Abdelmansour, et al. A New Hybrid Air Blast Nozzle For Advanced Gas Turbine Combustion [R]. ASME Paper 2000-GT-113, 2000.
- [3] Liao Y, et al. On The Mechanism of Pressure-swirl Airblast

A tom ization[R]. A IAA - 2001- 3571, 2001.*Journal of Engineering for Power*, 1979, 101(2): 250- 258

[4] L efebvre A. H. Gas Turbine Combustion[M]. *Taylor & Francis Press*, 1999.

[6] Barry Schlein Gas Turbine Combustion Efficiency [R]. *ASME Paper 85- IGT - 121*, 1985

[5] Jasuja A. K. A tom ization of Crude and Residual Fuel Oils[J].