

文章编号: 1000-8055(2007)12-1977-07

尾缘吹气稳定器与前方溅板式喷油匹配试验

马文杰, 杨 阳, 柳 杨, 樊未军, 杨茂林
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 使用了一种作为主流供油的侧喷挡板喷油杆, 研究了主流供油与尾缘吹气稳定器局部供油的燃油匹配规律, 揭示了尾缘吹气稳定器的性能特点. 同时, 为了验证侧喷挡板这种新的燃油匹配方式是否具有优越性, 使用两种不同型式的火焰稳定器作为主稳定器, 将其与一种逆喷挡板匹配方式的燃烧性能进行了对比分析. 结果表明, 在试验参数范围内, 使用吹气稳定器作为主稳定器, 侧喷挡板的燃烧性能好于逆喷挡板.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 喷油杆; 尾缘吹气稳定器; 侧喷; 逆喷

中图分类号: V 231. 3

文献标识码: A

Experimental study of fueling match on EBMC flame holder and frontal atomizing platelet injectors

MA Wenjie, YANG Yang, LIU Yang, FAN Weijun, YANG Maolin

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An experimental study on the fuel match of main fuel and local fuel of EBMC Flame holder was conducted using a main atomizing platelet injector. Meanwhile, the performance characteristics of EBMC Flame holder were presented. In order to demonstrate the advantage of this new type of atomizing platelet injector by which fuel was injected into the cross flow, two different types of flame holders were used as main flame holders. Its combustion performance was compared with that of atomizing platelet injector by which fuel was injected into the opposed flow. The experimental results show that combustion performance of the atomizing platelet injectors by which fuel was injected into the cross flow is superior to that of the other one within the range of operating conditions of this experiment.

Key words: aerospace propulsion system; injector; edge blowing mixture curtain (EBMC) flame holder; injection into the cross flow; injection into the opposed flow

杨茂林等人在 1998 年提出了尾缘吹气火焰稳定器^[1], 并进行了初步的可行性研究, 随后在其燃烧性能方面做了进一步的工作^[2], 研究表明, 它将机械稳定与气动稳定相结合, 有利于燃烧性能的提高. 一般来说, 目前大多数加力燃烧室中的供油由稳定器单独供油和主流供油组成. 由于火焰稳定器回流区中的空气量有限, 因此一般火焰稳定器所负

担的燃油量很少, 只占总供油量的 10%~15%^[3], 再增加则有可能出现不稳定燃烧和效率的大幅下降, 因此必须恰当匹配稳定器的局部和主流供油. 对于尾缘吹气稳定器, 要充分发挥其性能, 同样要匹配好主流与局部供油.

目前, 加力燃烧室的主流燃油喷射方式中, 应用较为广泛的是直射式喷嘴侧喷方式^[4]. 但是, 侧

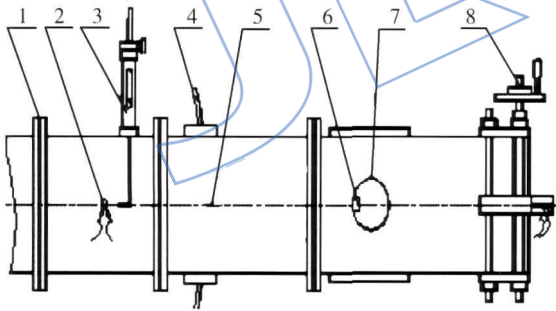
收稿日期: 2006-11-28; 修订日期: 2007-04-06

作者简介: 马文杰(1978), 男, 山西大同人, 博士生, 主要从事航空宇航推进理论与工程研究.

喷方式的燃油穿透深度会随着发动机工作状态的变化而改变, 根据 Ernst 建立的总的喷射油气当量比 ϕ 和尾迹当量比 θ 的关系式^[5]可知, 由于穿透深度的改变较大程度的影响了火焰稳定器上的燃油收集系数 β_2 , 从而直接影响火焰稳定器的尾迹当量比。在文献[2]中, 虽然对吹气式稳定器的燃油匹配进行了试验研究, 但是, 只是在稳定器的正前方放置了一支顺喷直射式喷油杆。本文设计了一种作为主流供油的侧喷挡板喷油杆, 一方面限制了燃油穿透深度, 减小了其对工作条件变化的敏感程度; 另一方面, 用溅板来改善雾化质量。基于这种侧喷挡板, 研究了主流供油与尾缘吹气稳定器局部供油的燃油匹配规律。同时, 为了验证侧喷挡板这种新的燃油匹配方式是否具有优越性, 使用两种不同型式的火焰稳定器作为主稳定器, 将其与一种逆喷挡板匹配方式的燃烧性能进行了对比分析。

1 试验装置

燃烧试验在北航二元加力试验台上进行。该燃烧试验装置如图 1 所示, 燃烧室出口温度和压力采用温度压力组合探针来测量。图 2 给出本次试验燃烧段出口截面的测点分布示意图, 横排 5 个温度测点、6 个压力测点(与温度测点交错排列), 纵排 7 个测点, 如示意图 2。



1 整流孔板; 2 热电偶; 3 总静压探针; 4 静压探针;
5 通道壁面; 6 火焰稳定器; 7 观察窗; 8 测量耙

图 1 二元加力燃烧试验台示意图

Fig. 1 Schematic of combustion test facility

2 试验件和相应的燃油匹配方案

图 3(a) 所示为试验中使用的主稳定器 FH-A, 在燃烧段中的堵塞比为 10%, 不同于文献[2]中的吹气稳定器, 这种稳定器在壳体的前方开有 3 个 $\Phi 10\text{ mm}$ 进气孔, 引入一部分来流空气, 与气动雾化喷油杆喷出的油气在稳定器混合腔内进一步掺混。在后挡板上也同时开有两排 $\Phi 1.5\text{ mm}$ 小

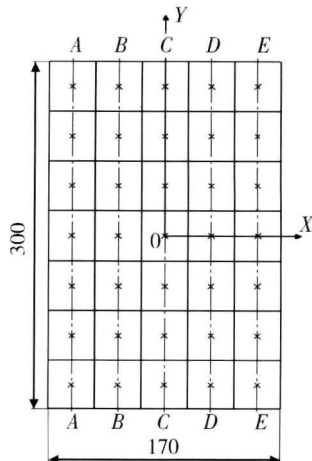
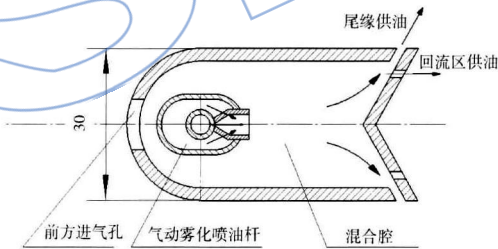


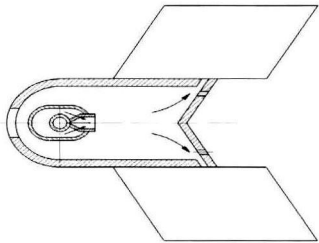
图 2 燃烧段出口的测点分布示意图

Fig. 2 Positions of measured points of exhaust outlet

孔, 直接在回流区中供油气; 其余的油气由稳定器尾缘供出。图 3(b) 所示的 FH-B 是在 FH-A 的基础上加装了径向稳定器, 在燃烧段中的投影堵塞比约为 16%。图 4 所示为试验中的 4 种燃油匹配方案, 其中使用侧喷挡板为宽挡板, 逆喷挡板为窄挡板。每支喷油杆都是 3 个 $\Phi 0.6\text{ mm}$ 的喷射点。侧喷挡板与喷孔的距离为 4 mm。



(a) 前方开孔的吹气式稳定器 FH-A



(b) 带径向稳定器的吹气式稳定器 FH-B

图 3 试验中使用的两种尾缘吹气火焰稳定器

Fig. 3 Types of EBM C flame holders in the experimental study

3 试验结果与分析

3.1 尾缘吹气稳定器前方与局部供油比例对燃烧性能的影响

采用图 4 中的燃油匹配方案 A, 稳定器的阻

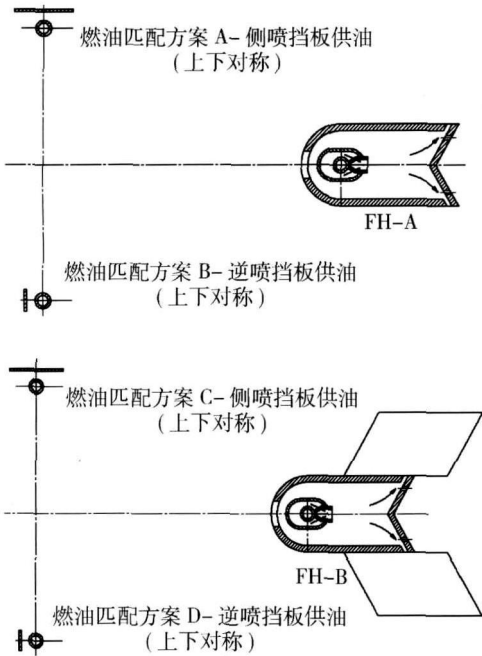


图 4 试验中使用的 A, B, C, D 四种燃油匹配方案
Fig. 4 Layout of A, B, C, D four groups of injectors and flame holders

塞比为 10%, 在来流 $T = 303\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 80.0\text{ m/s}$, 稳定器吹气量 20 g/s , 总供油量 $G_f = 19.2\text{ g/s}$ 保持不变, 分别使得稳定器的局部供油量占总供油量的比例 $R_F = 25\%, 33.3\%, 50\%$ (对应的稳定器局部混合腔油气当量比的估计值分别为 $\phi = 2.3, \phi = 3.0, \phi = 4.5$) 分别测量三种情况下的燃烧段出口温度分布和压力分布。

参照图 2 所示的测点分布, 在三种不同的 R_F 下, 将燃烧段出口截面数据进行对比, 分别给出出口典型截面 $B-B, G-G, D-D$ 上的温度分布, 如图 5、图 6 和图 7 所示。从图 5 至图 7 的温度分布图中都可以看出, 在来流 $T = 303\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 80.0\text{ m/s}$, 总供油量 $G_f = 19.2\text{ g/s}$ 的工况下, 三种不同供油比例 R_F 下, 温度分布趋势大致相同, 但明显看出, 随 R_F 的增加, 燃烧温度有很大程度的提高。为了进一步比较, 图 8 描述了随 R_F 增加, 出口截面质量加权平均温度的变化趋势, 由图可以看出, $R_F = 50\%$ 时的出口平均温度比 $R_F = 25\%$ 时高出了将近 70 K , 约为 10% 。原因有以下几方面, 第一, 空气流量保持不变, 当混合腔内的局部供油增加时(本次试验混合腔当量比 ϕ 从 2.3 增加至 4.5), 回流区油气比逐渐趋于合适, 而且不超过一定范围, 燃烧温度会逐渐增加。第二, 与相同槽宽的 V 形稳定器相比, 吹气稳定器的尾缘射流增加了回流区的卷吸空气量, 另外值得注意的是, 参照

图 3(a), 本次试验使用的稳定器前方开有三个进气孔, 在后挡板上开有两排 $\phi 1.5$ 的小孔在回流区中直接供油气, 这样会进一步增加回流区中的空气量, 从而使得稳定器 $R_F = 50\%$ 时, 燃烧温度仍然高于 $R_F = 25\%$ 和 33.3% 时的燃烧温度。因此, 初步看来, 这种型式的吹气式稳定器可以在局部负担比 V 形稳定器更多的燃油量, 而仍然保持较好的燃烧性能。

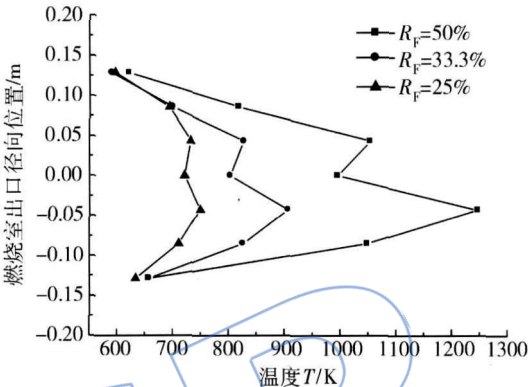


图 5 $B-B$ 截面的温度分布对比(方案 A)
Fig. 5 Comparison of temperature distribution in line $B-B$ (Layout A)

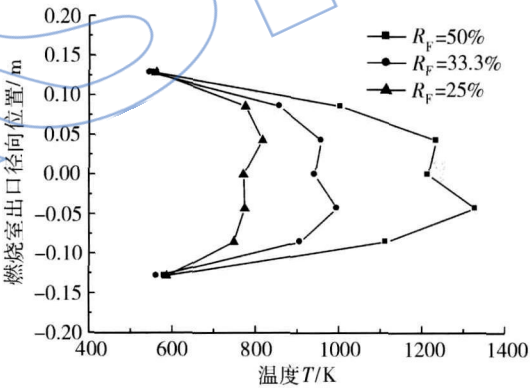


图 6 $G-G$ 截面的温度分布对比(方案 A)
Fig. 6 Comparison of temperature distribution in line $G-G$ (Layout A)

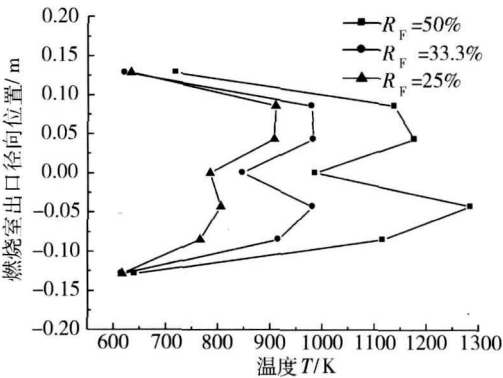


图 7 $D-D$ 截面的温度分布对比(方案 A)
Fig. 7 Comparison of temperature distribution in line $D-D$ (Layout A)

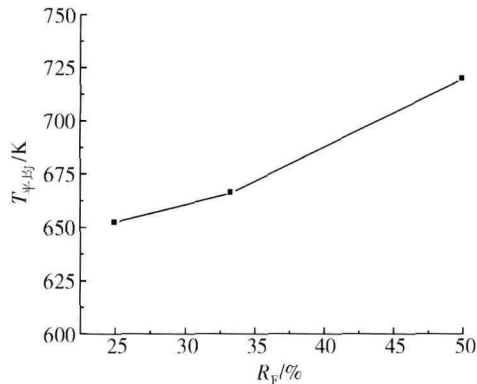


图 8 出口截面质量加权平均温度随 R_F 的变化

Fig. 8 Effect of R_F on mass weighted average temperature of exhaust outlet

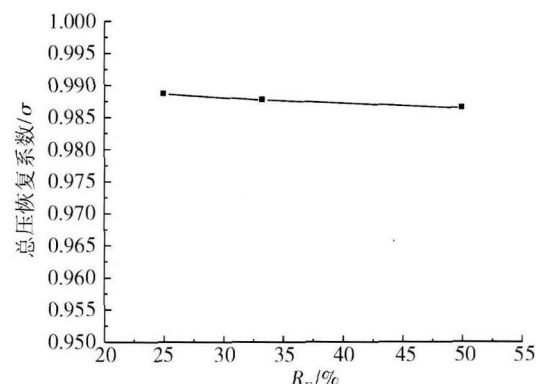


图 10 总压恢复系数随 R_F 的变化

Fig. 10 Effect of R_F on σ

图 9 表示随着 R_F 的增加, 燃烧段出口总压的径向分布, 可以看出, 随着 R_F 的增加, 燃烧温度有所增加, 但是总压分布变化很小, 总压损失变化不明显; 图 10 是总压恢复系数随 R_F 的变化曲线, 可以看出, 随着 R_F 的增加总压恢复系数只是略有下降. 一般来看, 燃烧温度增加会增加热阻, 但是由本次试验结果来看, 热阻增加的程度远没有燃烧温度增加的幅度大, 这是因为, 较大幅度的改变 R_F 值, 也就较大程度的改变了燃烧段内的燃油质量分数分布状态, 质量分数分布改变, 也会影响通道内的流动阻力, 可能增加 R_F 获得的燃油质量分数分布有利于减小流阻, 与热阻的增加相抵消, 因此, 会使得温升增加较大, 而流阻增加很小.

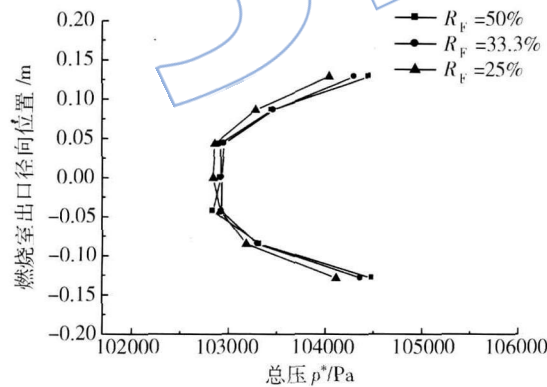


图 9 出口总压的径向分布

Fig. 9 Radial distribution of total pressure of exhaust outlet

3.2 前方采用侧喷挡板和逆喷挡板的燃烧性能初步对比

本次试验使用了一种侧喷挡板喷油的主流供油方式, 为了初步验证其性能, 将其与一种逆喷挡板供油方式进行了燃烧性能对比. 在对比中使用

了两种不同型式的主稳定器: 稳定器 $FH-A$ 和带有径向稳定器的 $FH-B$, 具体的匹配方式参照图 4, 分别将燃油匹配方案 A、B 及燃油匹配方案 C、D 进行了对比.

在 $T = 303\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 80.0\text{ m/s}$, $G_f = 19.2\text{ g/s}$, $R_F = 25\%$ 的工况下, 方案 A 与 B 的对比结果, 如图 11 至图 14 所示. 图 11 至图 13 分别给出出口典型截面 $B-B$, $C-C$, $D-D$ 上的温度分布, 可以看出, 当 R_F 保持在 25% 时侧喷挡板的燃烧温度要高于逆喷挡板, 但出口总压下降很小 (见图 14); 方案 C 与 D 虽然改变了主稳定器的型式, 并改变 R_F 为 50%, 但相应的对比结果, 如图 15 至图 18 所示 ($T = 303\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V = 80.0\text{ m/s}$, $G_f = 19.2\text{ g/s}$, $R_F = 50\%$), 基本反映了同样的规律. 即侧喷挡板供油方式可以比逆喷挡板达到更高的燃烧温度, 但阻力增加不明显.

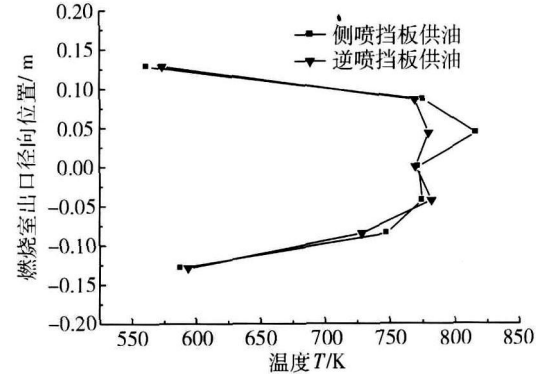


图 11 $B-B$ 截面的温度分布对比 (方案 A 与 B 的对比)

Fig. 11 Comparison of temperature distribution in line $B-B$ (Comparison of layout A and B)

为了进一步量化分析, 将这几种匹配方式工作时的出口质量加权平均温度和总压恢复系数进行对比, 见表 1. 由表 1 看出, 在方案 A、B 的对比

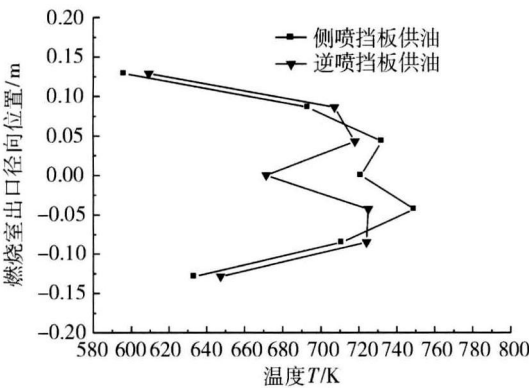


图 12 $G-C$ 截面的温度分布对比
(方案 A 与 B 的对比)

Fig. 12 Comparison of temperature distribution in line $G-C$ (Comparison of layout A and B)

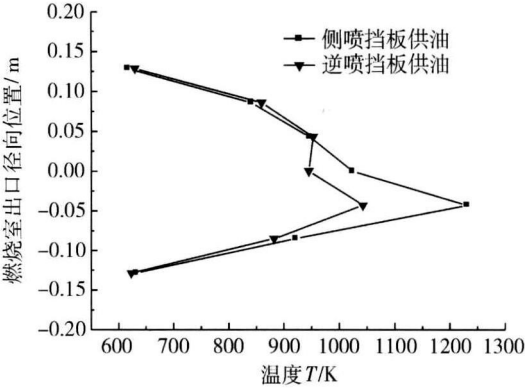


图 15 $B-B$ 截面的温度分布对比
(方案 C 与 D 的对比)

Fig. 15 Comparison of temperature distribution in line $B-B$ (Comparison of layout C and D)

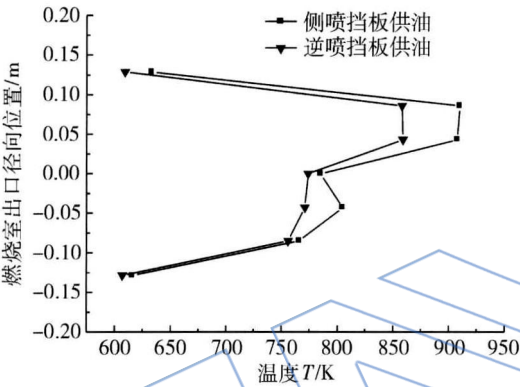


图 13 $D-D$ 截面的温度分布对比
(方案 A 与 B 的对比)

Fig. 13 Comparison of temperature distribution in line $D-D$ (Comparison of layout A and B)

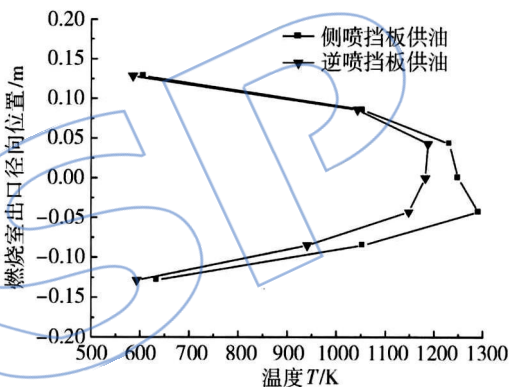


图 16 $G-C$ 截面的温度分布对比
(方案 C 与 D 的对比)

Fig. 16 Comparison of temperature distribution in line $G-C$ (Comparison of layout C and D)

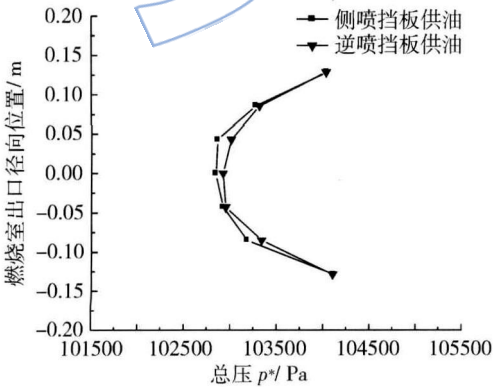


图 14 周向总压的径向分布
(方案 A 与 B 的对比)

Fig. 14 Radial distribution of total pressure of exhaust outlet (Comparison of layout A and B)

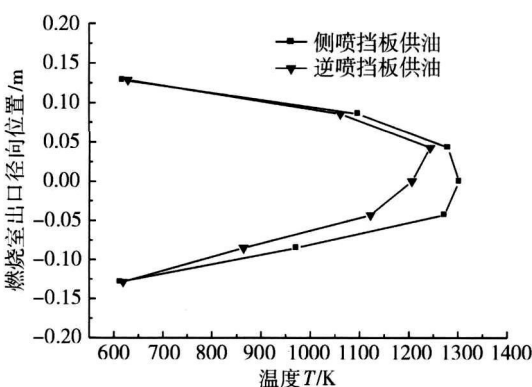


图 17 $D-D$ 截面的温度分布对比
(方案 C 与 D 的对比)

Fig. 15 Comparison of temperature distribution in line $D-D$ (Comparison of layout C and D)

中, $R_F=25\%$ 时, 侧喷挡板的出口平均温度比逆喷挡板增加 0.93%, 总压恢复系数只减少了 0.05%; 在方案 C、D 的对比中, $R_F=50\%$ 时, 侧喷

挡板的出口截面平均温度比逆喷挡板增加 2.92%, 总压恢复系数只减少了 0.05%。
以上结果初步说明, 在此次试验的工况范围

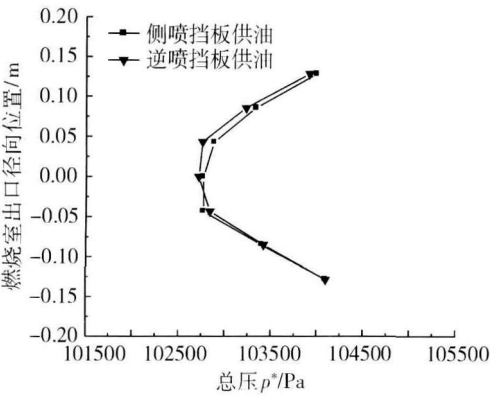


图 18 出口总压的径向分布
(方案 C 与 D 的对比)

Fig. 18 Radial distribution of total pressure of exhaust outlet(Comparison of layout C and D)

内,侧喷挡板匹配方案的性能要好于逆喷挡板,提高燃烧温度的同时,阻力增加并不明显.参照图 4,一方面喷嘴侧喷可以在横向气流作用下,较快的破碎、雾化,再加上垂直于燃油射流的挡板,因此,其雾化效果较好,因此会在一定范围内,使得燃烧效率有所提高.另一方面,与图 4 中的逆喷挡板相比,侧喷挡板的迎风面积小一些,因此,侧喷挡板提高燃烧温度的同时,总的流动阻力增加不明显.

表 1 中的试验结果,还有一点值得注意,当侧喷挡板与逆喷挡板两者就提高燃烧温度的程度相比较时,可以明显看出,主稳定器带径向稳定器与不带径向稳定器,侧喷挡板对逆喷挡板的温度提高比率分别为 2.92% 和 0.93%,带径向稳定器的

表 1 侧喷挡板与逆喷挡板供油的燃烧温度和阻力特性对比

Table 1 Comparison of combustion temperature and flow drag (Layout A and B, Layout C and D)

	燃油匹配方案 A 与 B 的对比 (主稳定器不带径向稳定器) ($R_F = 25\%$)			燃油匹配方案 C 与 D 的对比 (主稳定器带径向稳定器) ($R_F = 50\%$)		
	侧喷	逆喷	增加或减少比例 (侧喷比逆喷)	侧喷	逆喷	增加或减少比例 (侧喷比逆喷)
出口截面质量加权 平均温度 T/K	652.2	646.2	增加 0.93%	727.0	706.4	增加 2.92%
总压恢复系数 σ	0.988 6	0.989 1	减少 0.05%	0.988 3	0.988 8	减少 0.05%

方案要比不带的方案高出将近两个百分点.这一点很好理解,根据文献[4],径向侧喷的供油方式,其燃油质量分数分布能够较好的与径向稳定器相匹配,因此会有以上结果.

最后,从本文的试验结果来看,侧喷挡板的性能好于逆喷挡板;但是,侧喷挡板一方面,需要在更广的工况参数范围内进行进一步的验证;另一方面,在进一步的工作中,需要进行雾化试验,对其结构参数进行优化、对其雾化特性和燃油质量分数分布特性进行进一步的对比分析.

4 结 论

(1) 本次试验使用的吹气稳定器,随着 R_F 从 25% 增加到 50%,出口平均温度单调增加; $R_F = 50\%$ 时的平均温度比 $R_F = 25\%$ 时的平均温度高出 70 K,但阻力增加不明显;稳定器前方开孔,后挡板上开有两排小孔在回流区中直接供油气,进一步增加了回流区中的空气量,初步看来,这种型式的吹气稳定器可以在局部负担比 V 形稳定器

更多的燃油量,而仍然保持较好的燃烧性能.

(2) 使用了一种侧喷挡板喷油的主流供油方式,选择了两种型式的主稳定器,将其与逆喷挡板供油方式进行了燃烧性能对比.初步试验结果说明,在此次试验的参数范围内,侧喷挡板匹配方案的性能要好于逆喷挡板,提高燃烧温度的同时,阻力增加不明显.但下一步还需进行雾化试验,对其雾化特性和燃油质量分数分布特性进行进一步的研究和对比分析.

(3) 本次试验工况范围内,主稳定器带径向稳定器与不带径向稳定器两种情况下,侧喷挡板对逆喷挡板的温度提高比率分别为 2.92% 和 0.93%,可以看出,侧喷挡板的供油方式比较适合与带径向稳定器的吹气式稳定器配合工作.

参考文献:

[1] 杨茂林,全中,白兴艳,等.尾缘吹气式火焰稳定器试验研究[J].航空动力学报,1998,13(2):185-188.
YANG Maolin, QUAN Zhong, BAI Xingyan, et al. Experimental Investigation on EBMC Flameholder[J]. Jour

nal of Aerospace Power, 1998, 13(2): 185-188.

[2] 岳连捷, 熊建秋, 樊维均, 等. 尾缘吹气式火焰稳定器燃烧性能研究[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 345-349.
YUE Lianjie, XIONG Jianqiu, FAN Weijun, et al. Research on combustion performance of the edge blowing mixture curtain flameholder [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4): 345-349.

[3] 侯晓春, 季鹤鸣, 刘庆国, 等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社. 2002

[4] 《航空发动机设计手册》总编委会编. 《航空发动机设计手册》第 11 册 加力燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社. 2001.

[5] Ernst R C. A combustion model for low frequency instability in turbofan augmentors[R]. AIAA Paper 76-680.

2006 年度中国科技论文统计结果发布会在京举行

2007 年 11 月 15 日, 国家科学技术部中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心举行“ 2006 年中国科技论文统计结果发布会”。

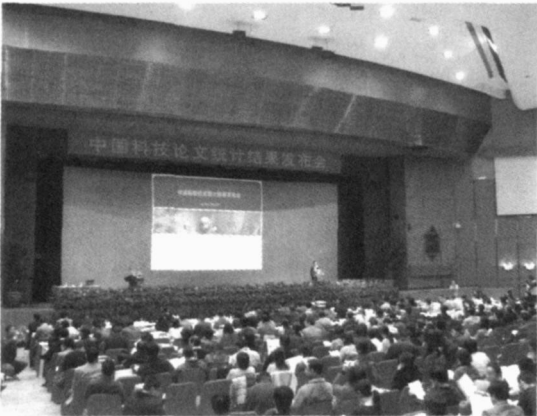
2006 年度, 我国国际科技论文数量增长显著, 我国作者发表在国际主要科技期刊和会议上的论文共 17.2 万篇, 占世界论文总数的 8.4%, 比 2005 年的 15.3 万篇增加 12.4%。按照国际论文数量排序, 我国跃居世界第 2 位, 仅次于美国, 较 2005 年的第 4 位, 上升了两位。

根据本次发布的科技论文统计结果,《航空动力学报》在 2006 年工业技术类期刊高被引指数, 五年载文数 731, 五年被引频次为 322, 五年影响因子 0.440, 被引率 0.290, 被引 50% 文章累积指数为 44.75, 被引 50% 作者累计指数 1.57, 被引 50% 机构累计指数 62.25, 单篇文章最高被引次数为 6 次, 学科高被引文章分布数为 5。我期刊在 2006 年学科高被引西文期刊的总被引频次为 121, 引用刊数为 50, 被引半衰刊为 7.25, 2006 年中国科技期刊被引用指标中《航空动力学报》总被引频次为 423, 影响因子为 0.318, 即年指标为 0.031, 他引率为 0.75, 引用刊数为 110, 扩散因子为 26, 学科影响指标为 0.63, 学科扩散指标为 4.58, 被引半衰期为 4.6。在 2006 年航空、航天技术类 41 种期刊中总被引频次和影响因子排序中名列前茅, 总被引频次数值为 423, 影响因子的数值为 0.318。

随着中国科技论文数量快速的增长, 论文质量越来越受到重视,《航空动力学报》将继续注重发表论文的质量, 争取以后更好的发展。统计报告还列出了 2006 年度学科高被引作者的名单, 其中我刊的多位作者也列在其中。

2006 年度航空、航天学科高被引作者(总被引频次/ 被引文章篇数)

朱仁璋(18/ 8)	赵凤起(18/ 8)	董彦非(16/4)	符小卫(15/ 3)
季路成(14/10)	刘 刚(13/ 5)	林来兴(13/2)	邓旺群(12/ 7)
帅 平(11/ 6)	洪伟良(11/ 5)	易 彦(11/2)	林雪原(10/ 4)
高 晖(10/ 2)	刘宝杰(10/ 4)	杨 刚(10/4)	李晓斌(9/2)
连葆华(9/4)	王江峰(9/ 5)	吴 虎(9/6)	杨 博(9/3)



2006 年中国科技论文统计结果发布会会场