

文章编号: 1000-8055(2000) 04-0391-06

加力用气冷与气动雾化喷油杆的性能研究

白兴艳, 张频捷, 岳连捷, 杨茂林
(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 本文提出了一种新型加力用喷油杆方案—气冷与气动雾化喷油杆。该方案既可降低喷油杆壁温, 又可将冷却排气用于雾化而具有气动雾化的特点。本文用示温漆和红外热像仪对新型喷油杆的冷却效果进行了研究, 用 PDA 对其雾化性能进行了研究, 并将其与 V 型稳定器进行匹配燃烧试验, 探讨了其对燃烧性能的影响。试验表明该新型喷油杆的冷却方案初步可行, 并且它对雾化和燃烧性能的改善也表明将冷却气用于雾化是可行的。

关键词: 加力燃烧室; 喷油装置; 气动雾化
中图分类号: V 231 文献标识码: A

1 引言

随着高性能系统的发展, 涡轮前温度越来越高, 加力进口温度也越来越高, 加力喷油杆面临热强度和结焦堵塞及燃油沸腾等问题^[1], 引起性能恶化, 采用气冷方法降低喷油杆壁温是针对这一问题而提出的一种方案。本文的新型加力喷油杆方案在冷却喷油杆的同时还可以利用这股冷却气对燃油进行雾化。通常加力燃烧室中大都采用直射式喷嘴, 一是制造简单重量轻, 二是在高速高温气流中可以达到比较满意的雾化。不过在油压低时雾化性能较差, 尤其在外涵低温情况下, 燃烧性能不佳。在加力室高进气温度下, 提出了带冷却加力喷油杆方案, 将冷却喷油杆的冷却排气用于气动雾化正好可以弥补这一不足。本文是对气冷喷油杆的冷却、雾化和燃烧性能进行的初步研究。

2 新型加力用喷油杆方案

图 1 所示为常规喷油杆与新型喷油杆的结构对比图。由图可见, 新型喷油杆比常规喷油杆在结构上要复杂些, 有内外两层管壁, 外管为气管, 内管为油管, 迎面尺寸略大于常规喷油杆。内外管之间形成冷却气通道, 冷却气由环形通道中流过, 对喷油杆进行冷却, 然后由小孔排出, 又用于雾化。

喷油杆外管壁做成椭圆形, 这样接近流线形可减少流阻损失。外管上装有多个气动喷嘴, 喷嘴进口焊在内管的出油孔上, 每个气动喷嘴上有 4 个雾化气孔, 内外管环形通道中的冷却气体由此排出, 形成四股雾化气, 雾化气相对于喷油方向成 45° 角, 通过撞击对燃油进行雾化。

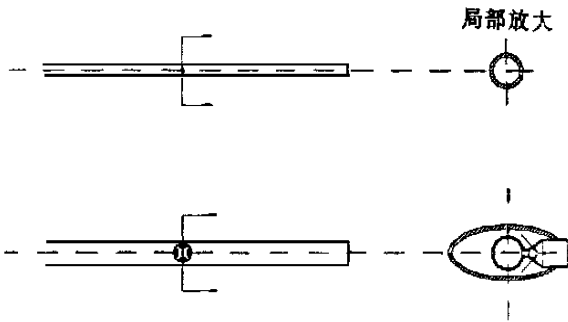


图 1 常规喷油杆与新型气动雾化喷油杆结构图

本研究中所用气冷与气动雾化喷油杆伸入气流长 170 mm, 沿长有 3 个到 4 个气动雾化喷嘴, 喷油杆外管剖面长轴 23 mm, 短轴 10 mm。气动雾化喷嘴喷油孔直径为 0.5 mm, 长径比为 4, 雾化气孔直径为 1.5 mm。

冷却气可以由压气机引气, 用气量控制在 2% 以内, 也可以由外涵冲压进气。

收稿日期: 1999- 10- 11; 修订日期: 1999- 12- 30

3 试验设备和测量系统

3.1 冷却试验

为了造成 1100℃ 的高温环境,冷却试验在加力试验台上利用二元加力台出口的高温气流来进行。如图 2 所示,加力试验台主要由供气系统、供

油系统、加热系统和移位测量系统组成。试验喷油杆安装在加力台出口,喷油杆前缘距出口 $\Delta X=5\text{ mm}$ (即实际出口测量截面),竖向伸入杆高长度为 200 mm,顺气流喷射。冷却效果用示温漆和红外热像仪进行测量。

本试验加力室出口高温气流为非均匀流。由

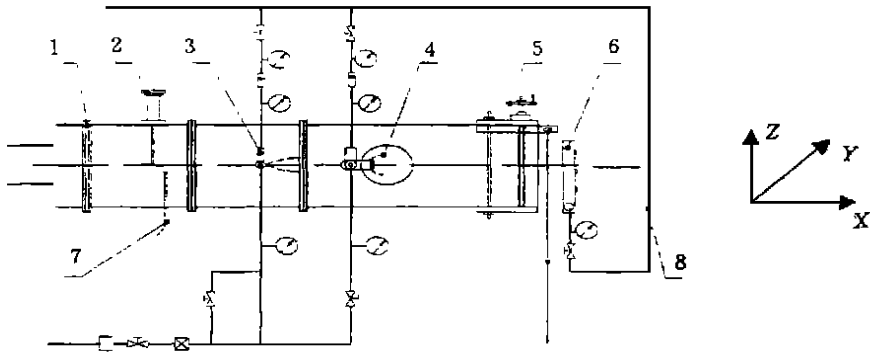
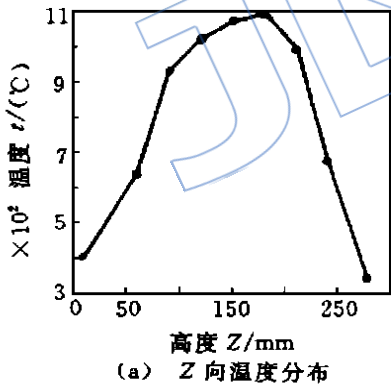


图 2 冷却试验装置

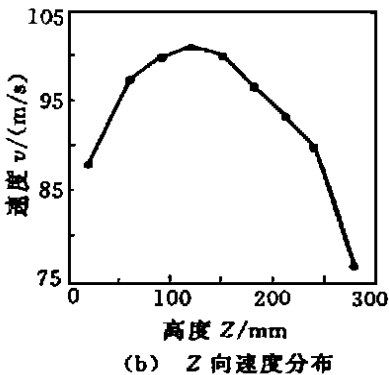
(1- 整流网格;2- 总静压探针;3- 喷油杆;4- 稳定器;5- 移位测量机构;6- 实验件;7- 热电偶;8- 冷却气路)

气冷式多点总温总压组合探针测得出口截面上的 45 点温度分布和 54 点速度分布,出口截面中垂线上的速度与温度分布如图 3 所示。同时也用红外热像仪录取喷油杆表面的温度。图 4 为红外热像仪测量位置图。

冷却试验所用模拟喷油杆分为 3 孔和 4 孔两种,分别模拟 3 喷油孔和 4 喷油孔周围的喷气。模拟喷油杆无气动喷嘴,只有面积相等的出气孔,且不喷油。



(a) Z 向温度分布



(b) Z 向速度分布

图 3 喷油杆试验环境气流

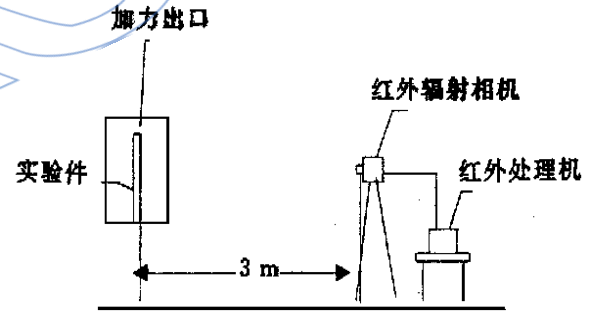


图 4 红外热像仪测量位置

示温漆试验通过对比示温漆在试验前后的颜色变化并与标准色板进行对照来定性测量喷油杆外壁的温度,本试验使用的示温漆为 900-1250℃ 高温涂料,其所配标准色板的颜色与度对应如下:

900℃- 970℃- 1040℃- 1100℃- 1180℃- 1250℃
黄 浅兰 灰 灰褐 褐 黑

红外热像仪则能更直接地定量测出喷油杆外壁的温度分布。本试验使用的是 TVS- 2000 红外热像仪,它由光学系统收集被测目标的红外辐射,经光谱滤波、空间滤波,使聚焦的红外辐射能量图形照射到红外探测器的光敏元件上。由于光学系统与红外探测器间的光机扫描机构连续分割目标,使探测器每瞬间仅接收物体一小部分辐射,并

转为电信号,放大处理转换为标准视频信号通过电视或监测器,即可得到红外图像。

试验参数: 加力出口最高温度 1100℃, 最高速度 100 m/s; 新型喷油杆吹气压力 0~0.2 MPa。

3.2 雾化试验

该试验在二元喷雾试验台上完成。试验设备包括供气系统、供水系统和 PDA 测试系统, 如图 5 所示。这里用喷水代替喷油, 喷水方法简单易行, 并且水与煤油的性质区别使得相同情况下水雾较油雾为粗, 故实际用煤油的雾化性能不会差于用水测得的雾化性能, 因此可以用水来进行保守的模拟。

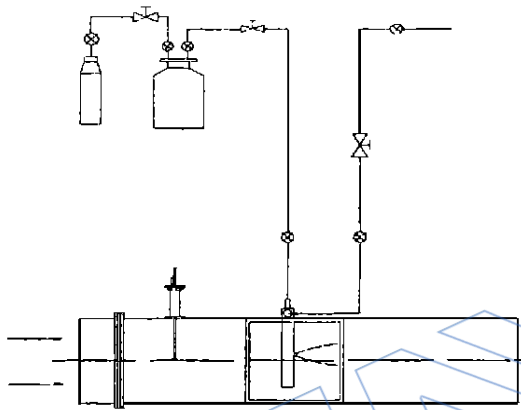


图 5 二元喷雾试验台

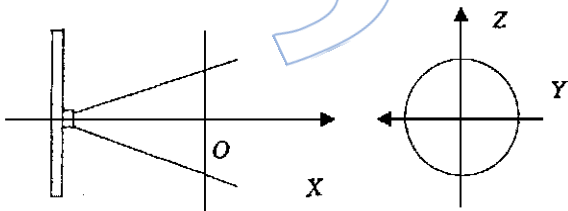


图 6 试验测量截面及测点位置

图 6 为试验测量截面及测点的位置图, 测量截面在喷嘴下游 150 mm 处, 喷雾中心为几何中心, X 和 Y 表示 PDA 位移机构的移动方向及座标方向。测量坐标系 $O-XYZ$, 原点位于测量截面中心, OZ 垂直向上, OY 为水平方向, OX 为顺气流方向。激光测量时, 激光聚焦到被测点处, 测得粒子平均流速与粒径等参数。沿 Y 轴与 Z 轴扫描分别得出沿 Y 与 Z 轴的 SMD 与 n 值分布及轴向速度 U (沿 X 方向的速度) 和横向速度 (沿 Y 方向的速度) 的分布, 移动间隔为 5 mm。

试验段进口参数: 来流温度为室温, 来流速度

50 m/s。

新型喷油杆参数: 气压 0~0.2 MPa, 水压 0~1.6 MPa。

3.3 燃烧试验

燃烧试验也是在加力试验台上进行, 如图 7

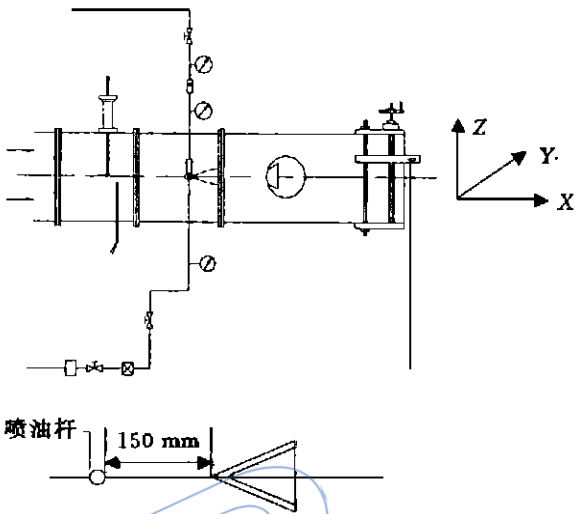


图 7 加力试验台及喷油杆与稳定器相对位置

所示。由暂冲气源供气, 经稳定箱和整流网格使进口流场均匀。加热器加热来流, 模拟进气温度, 自动调节系统所需来流参数。试验段长 900 mm, 截面尺寸为 $300 \times 170 \text{ mm}^2$, 前后段开有观察窗, 可以观察和照相。V 型火焰稳定器水平装在试验段中心, V 型火焰稳定器的迎面尺寸为 72 mm, 机械堵塞比为 24%, 张角为 30° 。新型喷油杆安装

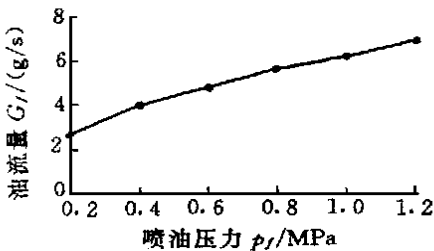


图 8 单孔喷油杆油流量特性标定曲线

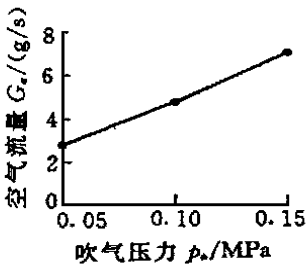


图 9 单孔喷油杆吹气空气流量特性标定曲线

在稳定器上游 150 mm 处。

气冷多点总温总压组合探针水平固定在试验段出口截面, 测取出口截面上总温和总压分布(总温 45 点, 总压 54 点)。经过计算处理(按进出口质量平均总焓量及燃油流量)可得出燃烧效率。由固定来流速度与温度点火燃烧逐渐减小油量到熄火, 测取熄火瞬间油气参数得到熄火边界。

试验段进口参数: 来流温度 300°C, 来流速度 40~50 m/s。

新型喷油杆参数: 气压 0~0.2 MPa, 油压 0~1.6 MPa。

燃料为航空煤油, 标定的喷油杆流量曲线和吹气量特性曲线见图 8 和图 9。

4 试验结果及分析

4.1 冷却试验

(1) 示温漆试验结果: 在平均温度为 1064°C、平均速度为 71 m/s 的前缘来流条件下示温漆试验结果显示: 不吹冷却气时的喷油杆表面示温漆由黄色变为白色与灰色, 迎气流表面为灰褐色, 且局部区域示温漆脱落, 这说明喷杆迎气流面温度很高, 最高可达 1000°C 以上。而在 0.2 MPa 吹气压力冷却下的喷油杆表面示温漆则由黄色变为白兰色, 比不吹冷却气时下降了 150°C 以上。示温漆定性反应了吹气与不吹气喷油杆表面温度的变化。

(2) 红外热像仪测量结果: 本试验对每一工况下的红外热像仪测量结果进行了处理。处理时选取了表面上 30 点温度, 该 30 点分别位于喷油杆侧壁前缘、中间和尾缘 3 条线上, 每条线上 10 点, 自喷油杆端部起到根部每相距 20 mm 一点。将相同杆高处三点(前缘、中间和尾缘, 其间相距 10 mm)的壁温温度平均, 得沿杆高壁温。

图 10 和图 11 分别为红外热像仪所测得的三孔与四孔喷油杆在不同冷却气压下壁温的结果(p_a 为冷却气压(单位: MPa)), 并与不吹冷却气时进行比较。由图可见, 由于气流温度分布及冷却气流进口与出口处温度不同, 造成了在杆高为接近气流中心最高温度处的喷油杆壁温最高, 而靠近边缘处壁温最低。此外, 不吹冷却气时的喷油杆壁温明显高于有冷却气的壁温, 且随着冷却气压的升高壁温降低, 最大温度可降低近 200°C。这是由于冷却气压升高使冷却气量加大, 喷油杆内冷却对流换热热量加大, 因而冷却气带走的热量加大的缘故。

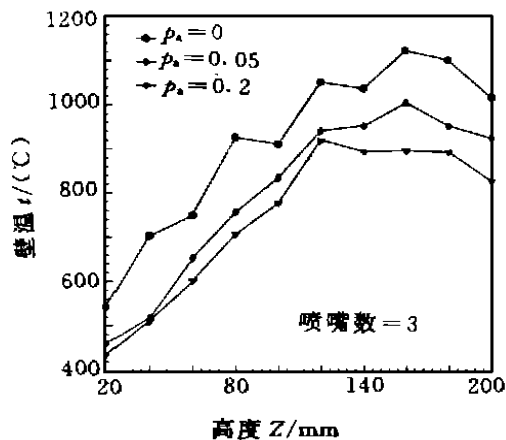


图 10 三孔喷油杆壁温沿杆高分布

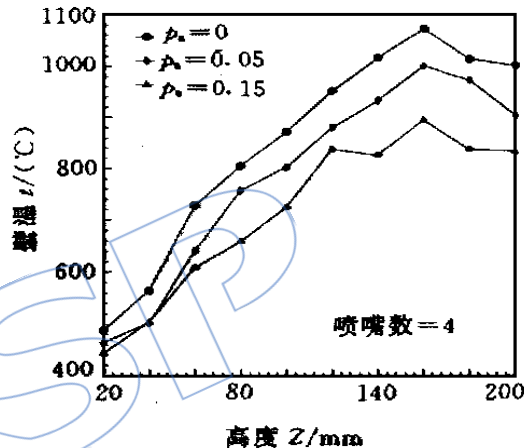


图 11 四孔喷油杆壁温沿杆高分布

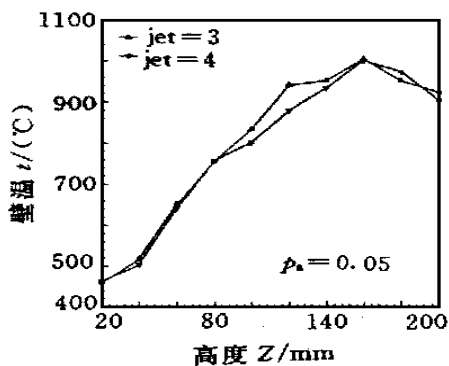


图 12 三孔和四孔喷油杆沿杆高壁温的比较分布

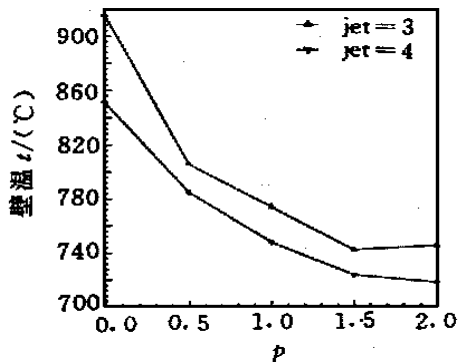


图 13 三孔和四孔喷油杆平均壁温随吹气压力的变化

图 12 是冷却气压为 0.05 MPa 时三孔喷油杆与四孔喷油杆的壁温结果比较。由图看到, 四孔喷油杆由于冷却气量更大, 壁温略低。图 13 是杆上所有测点的平均温度随吹气压力的变化情况。可见随冷却气压的升高壁面平均温度下降, 但其下降趋势趋平; 同时, 四孔喷油杆的平均温度由于冷却气量大的缘故低于三孔喷油杆的平均温度。

因此, 吹了冷却气后喷油杆外壁温度明显下降, 最高温度比不吹气时可下降 200℃。

4. 2 雾化试验

图 14 和图 15 分别为不同吹气压力及不同喷水压力下 SMD 的分布曲线($U=50\text{ m/s}$)。由图中可以看出, 吹气使粒子 SMD 明显下降, 特别是在小喷水量的时候, 但当吹气压力大到一定程度时 SMD 下降幅度减小。

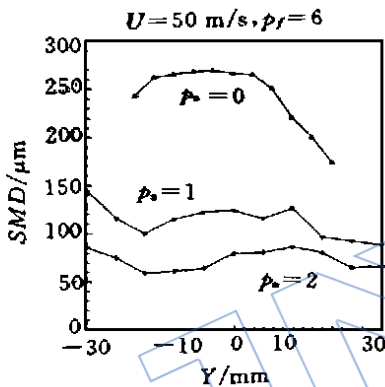


图 14 不同吹气压力对 SMD 的影响
(p_a 单位为 0.1 MPa)

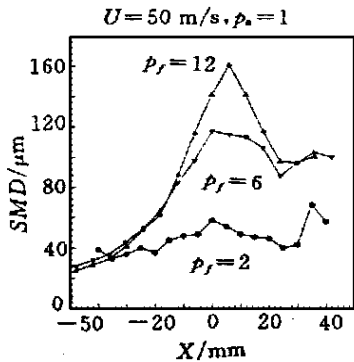


图 15 不同油压下吹气对 SMD 的影响
(p_f 单位为 0.1 MPa)

图 16(喷水压力 $p_f=1.2\text{ MPa}$) 和图 17(吹气压力 $p_a=0.2\text{ MPa}$) 给出了不同喷水压力及吹气压力下均匀度指数 n 的分布变化。可见吹气能改善雾化, 均匀度指数 n 增大, 图 17 中显示在不同喷水压力下, 吹气使得均匀度指数均在 4 以上。但

在较大的喷水压力 $p_f=1.2\text{ MPa}$ 下, 不吹气时喷

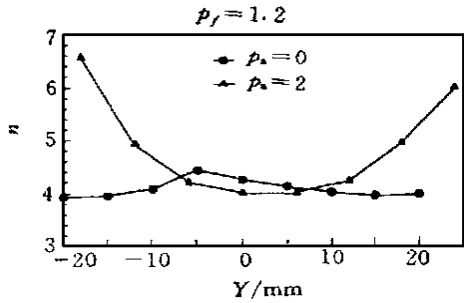


图 16 均匀度指数分布(p_a 单位为 0.1 MPa)

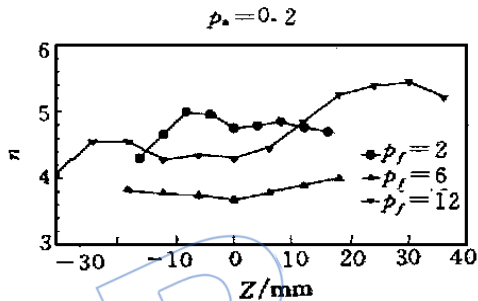


图 17 均匀度指数分布(p_f 单位为 0.1 MPa)
雾也已比较均匀, 吹气仅在边缘处使均匀度指数明显增大。

4. 3 燃烧试验

图 18 给出了随着喷油杆吹气压力和来流速度的变化, 贫熄边界的变化规律。由图可见, 随着吹气压力的增加, 贫熄边界先变宽后变窄, 吹气压力为 0.05 MPa 时的贫熄油气比较小不吹气时小一倍多, 但吹气量过大时贫熄油气比反而又加大。这是因为少量吹气可以改善小油量时油压低造成的雾化蒸发差, 但吹气过大时雾化趋于均匀使得局部油气比变贫, 反而不利于燃烧。因此, 存在一最佳吹气压力值使贫熄边界最宽。

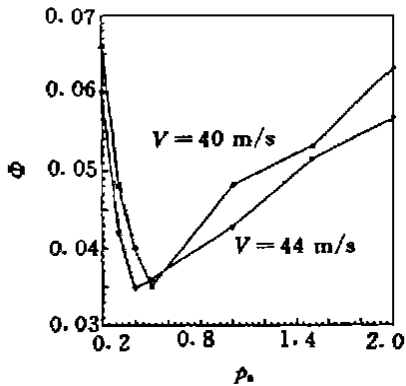


图 18 贫熄边界分布(p_a 单位为 0.1 MPa)

图 19 为燃烧效率受吹气影响的变化图。可见

在相同油压下,随着吹气压力的升高,燃烧效率增加,而在相同的吹气压力下,油压小时燃烧效率高。这是因为,吹气压力的增加使雾化改善,化学

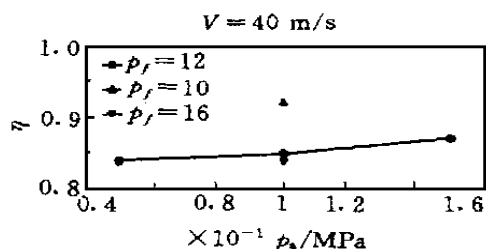


图 19 燃烧效率分布

反应速度加快、着火感应时间缩短,因而燃料燃烧得更加充分,同时燃油散布更宽,燃烧效率提高。同样,在相同吹气压力下油压小则油量少,燃油雾化效果好,因此燃烧效率高。

5 结 论

(1) 带冷却气动雾化的加力喷油杆用双层结

Experimental Study on Performance of Air Cooling/Atomizing Fuel Injector Bar in Afterburner

BAI Xing-yan, ZHANG Pin-jie, YUE Lian-jie, YANG Mao-lin

(4th Dept., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An air cooling/atomizing fuel injector bar is developed for afterburner. It not only can lower the wall temperature of the fuel injector bar, but also has the ability of air atomizing. Its comprehensive performance in cooling, atomizing and combustion was studied experimentally. The temperature indicating paint and thermal infrared imager were used to measure the wall temperature of the fuel injector bar. The cooling experiment shows that a very good cooling effect can be reached with this new design. When less than 2% of the compressor outlet air is used for cooling, the bar's surface temperature can be decreased by 100 K to 200 K in 1300 K high temperature gas flow. Results of the atomizing experiment obtained from the PDA measuring system show that a much better fuel spray quality can be achieved with the new design. The SMD is obviously decreased and the spray uniformity is considerably improved. Due to its matching with the V type flame holder, the combustion experiment demonstrates that flame lean extinguishing limit can be widened two or three times and the combustion efficiency is much higher too. Therefore its comprehensive performance is enhanced, and the new design is effective and feasible.

Key words: afterburners; injectors; pneumatic atomization

构和有限出气孔,用不足 2% 的吹气量,在最高温度为 1300 K 的气流下,使喷油杆表面温度降低 100~200 K,可达到冷却喷油杆的目的。

(2) 气动雾化加力喷油杆由于引入气动雾化,显著改善了雾化质量,特别是在供油压力低的情况下。

(3) 气动雾化加力喷油杆与稳定器相匹配,改善燃烧性能,在 600 K 及 40~50 m/s 的气流中,适量吹气能加宽贫熄边界,可比不吹气时大 1~2 倍,并能提高燃烧效率。

参考文献:

- [1] 郭成富,王勇,曹康. 高温状态下加力燃烧室喷油杆结焦的试验研究. CSAA 96-PC-0, 中国航空学会第十届燃烧及传热传质学术会议, 1996

(责任编辑 杨再荣)