

文章编号: 1000-8055(2003)06-0808-05

带U型槽射流缝隙式稳定器燃烧性能的试验研究

郑殿峰¹, 张会强¹, 林文漪¹, 王家骅²

(1 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2 南京航空航天大学 动力工程学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 对提出的带U型槽射流缝隙式稳定器(简称U型)进行了热态燃烧性能的试验研究, 并与V型和双V型稳定器进行了对比。燃烧试验表明: 在特定供油方式下, V型和U型稳定器的点火性能好, 双V型最差; U型稳定器的燃烧效率最高, 双V型次之, V型最差。这些结果说明了本文提出的U型稳定器能够很好地改进双V型稳定器在上游用雾化槽供油时点火困难和火焰稳定性差的不足, 兼具蒸发式稳定器和双V型稳定器的优点。冷态流场测量结果表明: U型稳定器在稳焰槽内的流动具有三元结构, 在稳定器下游形成较双V型稳定器更强的回流区和低速区, 从而使其具有较双V型稳定器更好的点火性能和火焰稳定性。

关键词: 航空、航天推进系统; 火焰稳定器; 油气比; 熄火极限; 燃烧效率

中图分类号: V 231. 2

文献标识码: A

Experimental Investigation of Combustion Performance of U-Type Flame Holder

ZHENG Dian-feng¹, ZHANG Hui-qiang¹, LIN Wen-yi¹, WANG Jia-hua²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The combustion performance of a U-type flame holder has been experimentally investigated and compared with that of V-type and double V-type flame holders. The combustion-experimental results show that the ignition performance of V-type and U-type flame holders is better than that of the double V-type flame holder under ad hoc case of fuel supplying, and the combustion efficiency of the U-type flame holder is the highest among these flame holders. Furthermore, it is shown that the proposed flame holder of U-type has successfully improved the disadvantage of double V-type flame holder under the circumstance of fuel supplied in the upstream of flame holder, and has the advantages of both other flame holders. The cold-state test results show that the flows in the flame stability tube of U-type are typical three-dimensional and have stronger recirculating zone and low velocity zone in downstream of flame holder than that of double V-type flame holder. It is the reason why the combustion performances of double V-type flame holder are ameliorated by the U-type.

Key words: aerospace propulsion system; flame holder; fuel-air ratio; extinction limit; combustion efficiency

收稿日期: 2002- 12- 29; **修订日期:** 2002- 04- 29

作者简介: 郑殿峰(1966-), 男, 黑龙江富锦人, 清华大学工程力学系博士生, 主要从事工业与航空动力燃烧研究

与 V 型火焰稳定器相比, 双 V 型火焰稳定器是一种新颖的低阻稳定器, 具有点火性能好, 流动损失小, 燃烧效率高等优点。人们已经对双 V 型稳定器进行了大量试验研究, 并在某涡喷发动机上得到了成功应用, 取得了很好的综合性能指标。在蒸发式稳定器与双 V 型稳定器的燃烧对比试验中, 当蒸发管不供油, 而在稳定器上游用雾化槽喷嘴供油时发现: 双 V 型稳定器点火性能和火焰稳定性较 V 型稳定器为差, 出现点火困难和火焰不稳定。为此, 本文提出了带 U 型槽射流缝隙式稳定器, 旨在使其兼具蒸发式稳定器和双 V 型稳定器的优点。通过试验对这一设想进行了证实。

1 试验设备与方法

进行试验研究的三种稳定器如图1所示。它们分别是常规的 V 型 (如图1a)、双 V 型 (如图1b) 和 U 型火焰稳定器 (如图1c)。稳定器槽宽均为 45 mm。V 型是沈阳黎明飞机制造公司生产的标准模型; 双 V 型的小稳定器槽宽 19 mm, 预燃流缝宽 3.5 mm。U 型头部的 U 型槽槽宽 14 mm, 预燃流缝宽 3.75 mm, U 型槽两侧设有 12 个 $\varnothing 4\text{ mm}$ 的喷气孔, 孔间距 14 mm, 进入 U 型槽的一次风经喷气孔喷出与二次风掺混后进入回流区。可见, U 型火焰稳定器和双 V 型火焰稳定器一样都是在稳定器头部增加进气环缝, 降低阻塞比, 实现低阻特性, 不同的是双 V 型火焰稳定器的环缝由主稳定器和前缘的小 V 型稳定器构成, 而 U 型火焰稳定器的环缝由主稳定器和前缘的 U 型稳定槽构成。这就决定了 U 型火焰稳定器具有双 V 型火焰稳定器的基本特征, 即: 低阻、好的点火性能和高燃烧效率。双 V 型的一次风全部通过环缝进入稳定器, 而 U 型只有一部分经过环缝进入稳定器, 而另一部分则经过 U 型槽内的射流孔进入环

缝, 但由于其垂直于环缝射流喷入, 从而对环缝射流形成了阻挡和遮断作用。因此 U 型稳定器从分流和阻挡两个方面削弱了环缝射流, 从而强化主稳定器后方的回流区。同时通过 U 型槽引入一次风有利于燃油的雾化和混合以及火焰稳定。通过这些措施的引入, 以改善在稳定器上游用雾化槽喷嘴供油时双 V 型稳定器点火性能和火焰稳定性较 V 型稳定器为差的问题。通过试验的方法对这一设想进行了验证。

试验系统如图2所示。试验段为二元, 宽 $\times$ 高 = 100 mm $\times$ 150 mm。气源由 3 台空气压缩机提供, 每台流量为 0.4 kg/s, 气流经压气机、流量计、分流段、加温器、掺混段、试验段、冷却段, 最后从真空泵排出。试验段燃气进出口温度分别用非水

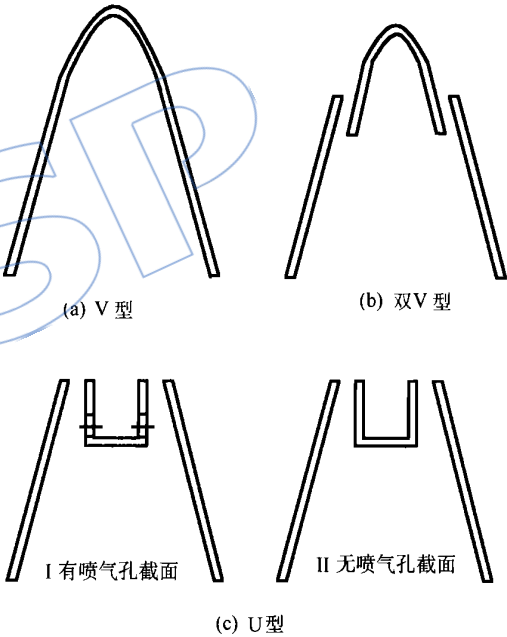


图1 三种稳定器结构示意图

Fig 1 Three type of flame holder

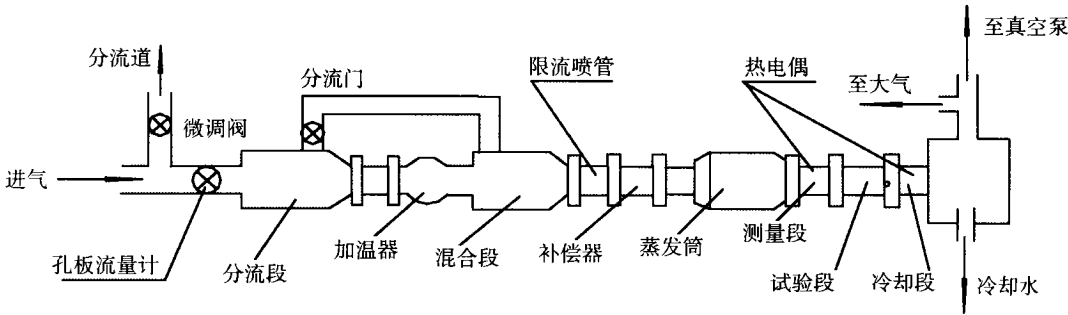


图2 加力燃烧室常低压热态燃烧试验设备示意图

Fig 2 Experiment system for combustion in afterburner under low and normal pressure

冷温度靶和水冷温度靶测量;孔板流量计测量空气流量,用计算机采集数据;燃油流量通过操纵台控制,浮子流量计测量燃油流量。流场测试仪器采用美国 TST 公司智能热线风速仪系统。

热态燃烧试验是在常压下进行的。空气预燃温度200~ 500℃,试验段进口速度80~ 140 m/s,空气流量1 kg/s。在热态试验中,在相同工况下,对三种稳定器进行对比试验,测定试验段进出口温度、空气流量、燃油流量、贫富油熄火边界。

图3(a)为稳定器上游雾化槽喷嘴供油方式,雾化槽壁厚1.5 mm,直角边长7.5 mm,槽宽12 mm,喷油杆直径10 mm,双喷孔间距40 mm,孔直径均为0.6 mm;图3(b)或3(c)为稳定器上游7或5孔喷嘴供油方式,喷油杆按试验段高度方向布置,喷油孔直径均为0.4 mm,距试验段侧壁10 mm,按等面积布置喷油孔,带4喷油孔喷油杆的油孔间距为37 mm,带3喷油孔喷油杆的油孔间距为50 mm,带5喷油孔喷油杆的油孔间距为30 mm,燃油射流与气流方向垂直。稳定器安装在试验段宽度方向中心,距离三种供油方式下游125 mm 处。

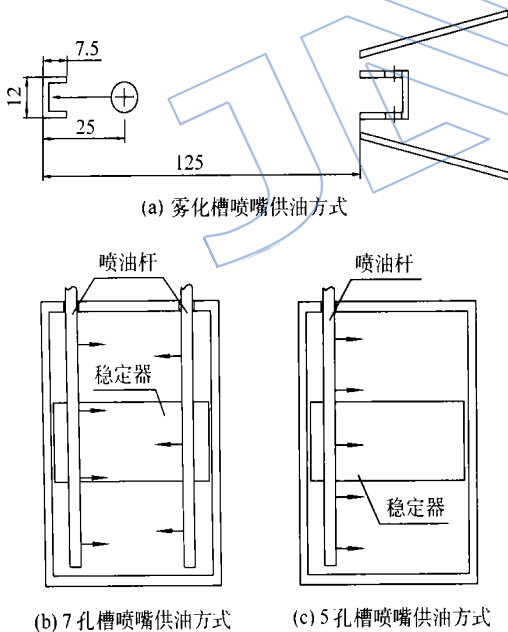


图3 稳定器上游供油方式

Fig 3 Type of fuel supplying in the upstream of flame holder

按高度方向,在稳定器上游1000 mm 安装5点镍铬- 镍硅热电偶温度靶,在稳定器下游2000 mm 安装5点双铂铑热电偶温度靶。温度靶的测温点沿试验段高度方向布置,间距30 mm。按面积加

权获得平均温度,误差在5% 范围内。根据进出口温度平均值,按热焓法计算燃烧效率,如式(1)和式(2)所示。

$$f_i = (m_1 + m_2) / m_a \tag{1}$$

$$\eta = \frac{(m_a + m_f) I_{T2} - m_a I_{T1} - m_f I_{Tf}}{m_f H_f} \tag{2}$$

其中, f_i 和 η 分别为油气比和燃烧效率; m_1, m_2 和 m_a 为蒸发管供油量、稳定器上游供油量和空气流量; I_{T1}, I_{T2}, I_{Tf} 和 H_f 为燃烧室进、出口燃气的滞止焓、燃油进口热焓和燃油低热值。

2 试验结果与分析

2.1 在稳定器上游125 mm 处用雾化槽喷嘴供油

在空气流量为1 kg/s、空气流速为85 m/s、进口温度为200℃条件下,双V 型很难点火成功,而V 型与U 型能够点火成功并稳定燃烧。在空气流速为120 m/s、进口温度为400℃条件下,双V 型能够点火成功,但燃烧不稳定,V 型和U 型的点火性能很好并稳定燃烧。测得V 型贫富油熄火边界为 $f_i = 0.0185 \sim 0.0298$,U 型 $f_i = 0.0173 \sim 0.0241$,U 型贫富油熄火边界比V 型向贫油熄火方向移动,富油熄火边界大幅度变窄,主要是因为雾化槽喷嘴燃油浓度分布基本为正态分布,使得从U 型槽及缝隙进入稳定器的燃油量比V 型多。

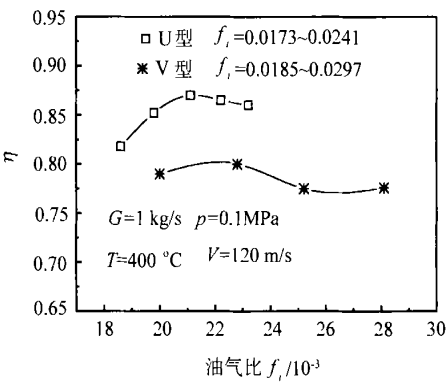


图4 雾化槽喷嘴供油燃烧效率曲线

Fig 4 Combustion efficiency versus fuel-air ratio in case of fuel supplied by atomizer

图4是稳定器上游125 mm 处用雾化槽喷嘴供油时,V 型与U 型燃烧效率曲线。U 型的燃烧效率高于V 型,主要是稳定器头部的U 型槽改善了燃油的雾化、蒸发和掺混性能,因而提高了燃烧

效率。

2 2 在稳定器上游125 mm 处用两支7孔
直流式喷嘴对喷供油

在空气流速为100 m/s、进口温度为300℃条件下,或空气流速为120 m/s、进口温度为400℃条件下,双V型点火困难,V型和U型点火性能好,测得V型贫油熄火边界为 $f_{i}=0.0175$ (或0.0192),U型为 $f_{i}=0.0191$ (或0.0201),V型比

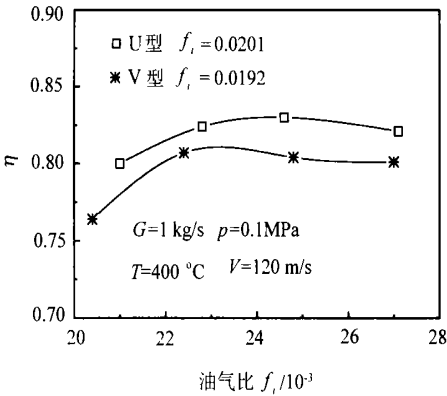


图5 两支共七孔直流式喷嘴供油时燃烧效率曲线
Fig 5 Combustion efficiency versus fuel-air ratio
in case of fuel supplied by 7-hole nozzle
($T=400^{\circ}\text{C}$, $V=120\text{ m/s}$)

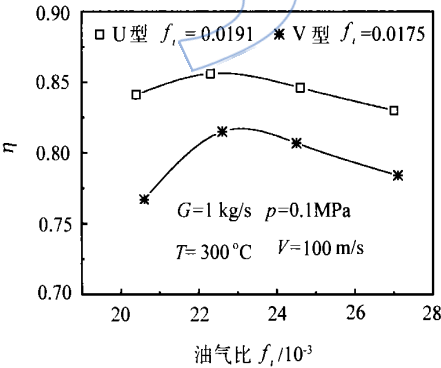


图6 两支共七孔直流式喷嘴供油时燃烧效率曲线
Fig 6 Combustion efficiency versus fuel-air ratio
in case of fuel supplied by 7-hole nozzle
($T=300^{\circ}\text{C}$, $V=100\text{ m/s}$)

U型扩大了贫油熄火边界,主要是其区域较大的回流区和低速区造成的,易于形成合适的油气比以维持稳定燃烧。温度升高,贫油熄火边界变窄,说明温度提高,气流速度提高,不利于火焰的稳定。

图5和图6分别为上边两种工况条件下,U型和V型稳定器的燃烧效率曲线。由图可知:U型燃烧效率高于V型。温度降低,空气速度降低,燃油的雾化蒸发质量变差,但在稳定器壁面形成油膜,油膜蒸发,使得贫油熄火边界变宽。U型比V型改善了燃油的雾化、蒸发和掺混性能,从而提高了燃烧性能。

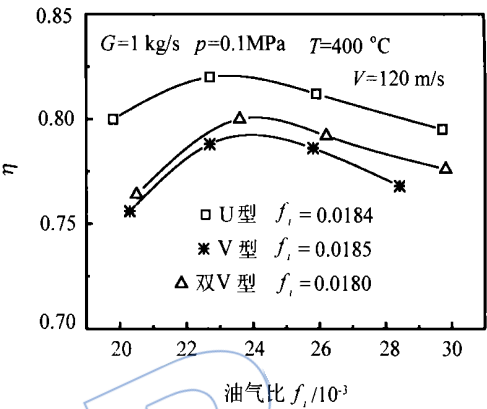


图7 五孔直流式喷嘴供油燃烧效率曲线
Fig 7 Combustion efficiency versus fuel-air ratio
in case of fuel supplied by 5-hole nozzle
($T=400^{\circ}\text{C}$, $V=120\text{ m/s}$)

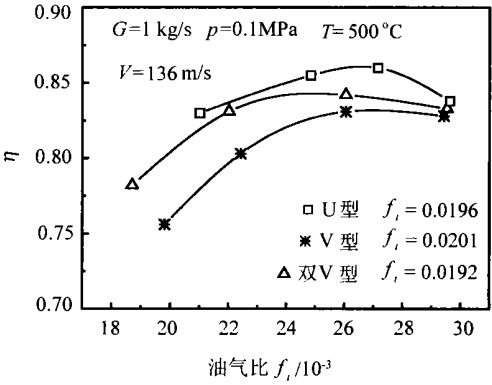


图8 五孔直流式喷嘴供油燃烧效率曲线
Fig 8 Combustion efficiency versus fuel-air ratio
in case of fuel supplied by 5-hole nozzle
($T=500^{\circ}\text{C}$, $V=136\text{ m/s}$)

2 3 在稳定器上游125 mm 处用一支5孔
直流式喷嘴侧喷供油

在空气流速为120 m/s、进口温度为400℃条件下,或空气流速为136 m/s、进口温度为500℃条件下,三种稳定器的点火性和火焰稳定性均很好。

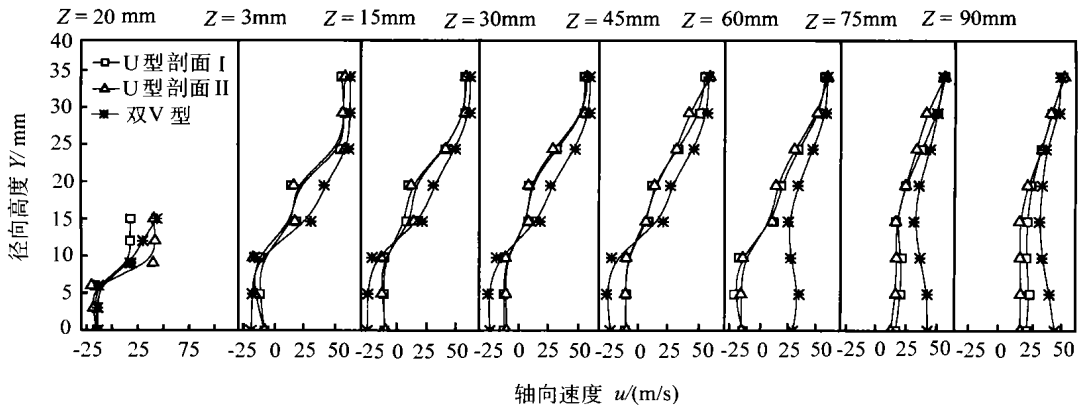


图9 双V型与U型剖面I和II速度 u 对比曲线

Fig 9 Axial velocity distributions of double V type and U type

空气流速为136 m/s,进口温度为500℃条件下时,双V型贫油熄火边界 $f_i=0.0192$,U型 $f_i=0.0196$,V型 $f_i=0.0201$ 。双V型、U型和V型稳定器的贫油点火边界依次变窄。

图7和图8分别为空气流速为120 m/s,进口温度为400℃条件下和空气流速为136 m/s,进口温度为500℃条件下时燃烧效率曲线。U型稳定器的燃烧效率最高,双V型次之,V型最低。

图9为双V型稳定器与U型稳定器剖面I和II流向速度在流向不同位置的纵向分布。坐标的建立是以稳定器出口为坐标原点,沿下游方向为Z轴,槽宽方向为Y轴,由图可以看出,U型稳定器稳焰槽内的速度分布具有三元结构,而在稳焰槽之后的速度分布具有二元结构。这说明:与双V型对称结构相比,U型稳定器稳焰槽内的流动更为复杂,从而强化了油气混合,有利于提高点火性、火焰稳定性和燃烧效率。由图还可以看到,U型稳定器的回流区和回流区之后的低速区要比双V型的大很多,从而改善了在稳定器上游用雾化槽喷嘴供油时双V型稳定器点火性能和火焰稳定性较V型稳定器为差的问题。

3 结 论

提出的U型稳定器具有和V型稳定器相当的点火性能和火焰稳定性能,优于双V型稳定器,同时又具有比V型稳定器和双V型稳定器都要高的燃烧效率,兼具双V型稳定器和V型稳定器的优点。试验研究表明U型稳定器在稳焰槽内的流动具有三元结构,同时在稳定器下游形成较双V型稳定器更强的回流区和低速区,从而改善了在稳定器上游用雾化槽喷嘴供油时双V型稳定器点火性能和火焰稳定性较V型稳定器为差的问题。但在某些情况下,富油熄火边界变窄,尚需在接近使用条件下进一步的实验验证。

参考文献

[1] 韩启祥,王家骅 沙丘驻涡蒸发式稳定器低压性能的试验研究[J]. 推进技术, 2001, 22(1): 40- 42
[2] 张洪滨,王纪根 双V型火焰稳定器的研制和应用[J]. 推进技术, 1994, 6(3): 38- 43
[3] 韩启祥,刘洪,王方,等 开孔沙丘驻涡火焰稳定器总压损失的试验研究[J]. 推进技术, 1999, 20(4): 81- 84
[4] 王家骅 带缝隙V型火焰稳定器试验研究[A]. 中国航空科技文献文集[C]. HJB880654