

文章编号: 1000-8055(2007)06-0881-07

加力燃烧室中缝式稳定器技术研究

张孝春¹, 李江宁¹, 徐兴平¹

刘 涛¹, 钱壬章², 杜一庆²

(1. 中国航空工业第一集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;

2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 提出了一种加力燃烧室新型中缝式稳定器. 冷、热态试验研究表明中缝式稳定器具有结构简单、重量轻、低流阻、高燃烧效率、宽广的稳定工作范围等综合性能. 利用 PIV 激光流场测试技术研究了中缝式稳定器尾迹流场, 揭示其良好的燃烧性能取决于回流区结构和特殊的旋涡脱落方式.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 加力燃烧室; 火焰稳定器; 回流区

中图分类号: V231. 2

文献标识码: A

Investigation on a centrally slit flame holder for afterburner

ZHANG Xiao-chun¹, LI Jiang-ning¹, XU Xing-ping¹

LIU Tao¹, QIAN Ren-zhang², DU Yi-qing²

(1. Shenyang Aeroengine Research Institute,

China Aviation Industry Corporation I, Shenyang 110015, China;

2. College of Power and Energy Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new centrally slit flame holder (CSFH) for afterburner is presented, and the experimental research work shows that it has simpler structure, lighter weight, higher combustion efficiency, and better stability. The PIV technology was applied to study flow fields of the flame holder wake, which reveals that the good combustion characteristics depend on the recirculation zone structure of slit flame holder and the particular vortex shedding patterns.

Key words: aerospace propulsion system; afterburner; flame holder; recirculation zone

加力燃烧室是航空军用涡轮喷气发动机增加机动推力, 改善作战性能的重要部件. 稳定器是加力燃烧室的关键组件之一. 早期的涡喷发动机, 加力燃烧室进口温度较高, 属于均匀混气的火焰稳定机理, 采用简单的 V 形火焰稳定器组织燃烧.

涡扇发动机中, 加力燃烧室外涵存在低温气流, 燃油在稳定器前不能全部蒸发, 稳定器属两相混气火焰稳定机理. 为了改善低温下的火焰稳定性, 同时满足涡扇加力燃烧室的软点火要求, 涡扇加力燃烧室多采用值班火焰稳定器组织燃烧, 即首先

收稿日期: 2006-05-30; 修订日期: 2006-10-24

基金项目: 航空基金资助项目(02C06003)

作者简介: 张孝春(1943-), 男, 辽宁沈阳人, 研究员, 主要从事航空发动机加力燃烧室设计和研究, 曾任昆仑发动机加力燃烧室主管设计师.

在稳定器内部一个相对封闭的小回流区内组织两相混气的燃烧,产生的预燃火焰作为点火源连续强迫地点燃主流混气,使其在稳定器后的大回流区中稳定燃烧.

第4代战斗机对飞机发动机的性能提出了更高要求,使得加力燃烧室的工作环境发生了巨大变化.主要特点是内涵进口气流温度极高(达1200 K以上),加力温度极高(平均加力温度高达2100~2150 K,核心流加力温度可达2300 K),要求更低的流体损失,更高的燃烧效率和更轻的重量.因此一代新型加力稳定器相继出现,如气冷式稳定器,整体结构稳定器等.

本文提供的一种新型加力燃烧室中缝式稳定器具有如下的特点:结构简单重量轻,类似于普通V形火焰稳定器;组织燃烧的机理与值班火焰稳定器相似;稳定工作范围宽、燃烧效率高、流体损失低,可以应用在很高温度的气流中,所以在加力燃烧室的改进和新型加力燃烧室的设计中具有一定应用前景.本项研究是在钱壬章教授将开缝稳定器应用于电厂锅炉所做工作的基础上完成的^[1-3].

1 中缝式稳定器工作原理

如图1(b)~(e)所示,中缝式稳定器是一类在稳定器前缘中心处开缝,或开有导向槽的稳定器装置.试验和理论分析均表明:尽管中缝式稳定器的几何形状和来流条件都是对称的,但是在流场上,与普通V形稳定器的对称尾迹相比,中缝式稳定器的尾迹不对称.如图2所示,中缝流进入稳定器后会随机地偏向一侧,将开缝钝体回流区分成一大、一小两个回流区,其中大的称为主回流区,小的称为次回流区.中缝流的引入导致近尾的背压升高,减少了回流区的负压,减弱了主流的充

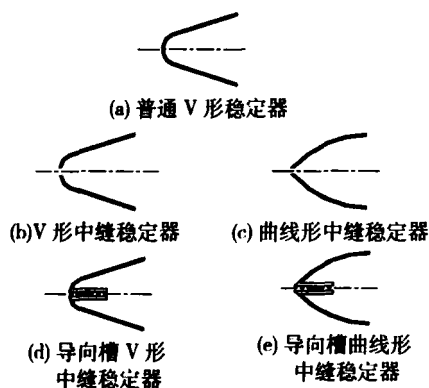


图1 普通V形稳定器和中缝式稳定器示意图

Fig.1 Schematic of V gutter and CSFH

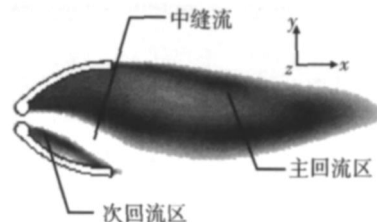


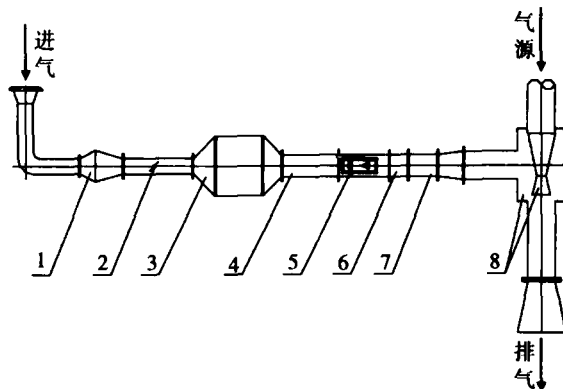
图2 中缝式稳定器回流区结构简图

Fig.2 Recirculation zone structure of CSFH

填作用,降低了尾流中的湍流强度,使主流的会合点后移,导致回流区长度的增长,从而增加了可燃混气的停留时间,增强了火焰稳定能力和提高了燃烧效率.由于湍流强度的降低,流体损失也有所降低.从非定常的角度看,由于次回流区的吸引,中缝流发生偏斜后作用于一侧的剪切层,使得旋涡的形成点后移,相应的旋涡脱落点也后移,回流区加长,对燃烧有利.

2 冷态流阻试验研究

分别在低速风洞和二元稳定器试验器中进行了中缝式稳定器和普通V形稳定器的低速和高速流阻试验.低速试验的流速范围是20~40 m/s,高速试验的速度系数范围是0.15~0.35.高速试验的二元稳定器试验装置如图3所示,由于试验装置上安装了辅助加热器和引射器可以模拟加力燃烧室高温高压的高空进气条件.试验段是180 mm×150 mm尺寸的矩形通道,长度1000 mm,



1. 加热器; 2. 蝶阀; 3. 稳压箱; 4. 前测量段; 5. 试验段; 6. 后测量段; 7. 冷却段; 8. 引射器

图3 二元稳定器试验器简图

Fig.3 Flame holder rectangular test rig

前方设置前测量段,后方设置后测量段.前测量段有1支5点总压测量耙、1支5点总温测量耙和3点静压测量座,后测量段有3支5点总压测量耙、3支5点总温测量耙和2点静压测量座,用以测

量冷态流体损失和热态燃烧效率。

图 1 所示的普通 V 形稳定器和中缝式稳定器试验件均保持相同的槽宽 W (45 mm) 和相近的轴向长度 L (55 mm 左右), 中缝式稳定器的开缝高度 h 则可从 3 mm 变化到 8 mm。试验件(a)为普通 V 形稳定器; 试验件(b)是与 V 形稳定器外形相同的中缝式稳定器; 试验件(c)是所谓流线外形的, 即曲线形中缝式稳定器; 试验件(d)则是与 V 形稳定器外形相同, 前缘开有导向槽的中缝式稳定器; 试验件(e)为曲线外形的前缘开有导向槽的中缝式稳定器。

图 4 给出了不同开缝高度的曲线形中缝稳定器(c)和普通 V 形稳定器(a)冷态流阻对比试验结果, 试验时的进口气流参数为: 总压 $p_t = 65$ kPa, 总温 $T_t = 920$ K, 速度系数 $\lambda = 0.21$ 。试验结果表明曲线形中缝稳定器的流阻损失系数 ξ 比普通 V 形稳定器低, 为后者的 86%~98%, 普通 V 形稳定器流阻以点表示, 中缝稳定器流阻随缝高变化, 曲线形状呈 S 形, 这同低速试验的结果十分相似。中缝稳定器流阻损失小的原因是由于中缝流对尾迹区的充填, 使其负压梯度比普通 V 形稳定器小, 从而减小了稳定器的总压损失。

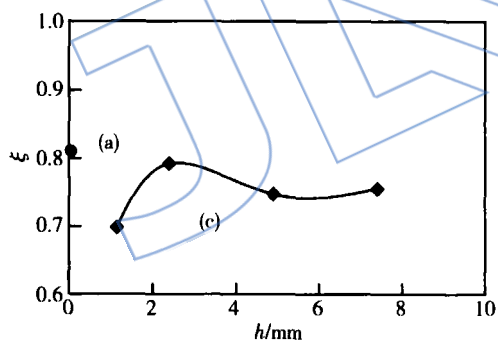


图 4 流阻系数随开缝高度的变化

Fig. 4 Flow loss versus CSFH slit height

中缝钝体的回流区比较复杂, 次回流区和中缝流的扰动会通过中缝流影响主回流区的稳定, 进而影响中缝式稳定器的流阻特性。当开缝高度 h 很小时, 中缝流和次回流区都很弱, 对主回流区的影响小, 稳定器流阻较低; 当开缝高度 h 增加后, 中缝流和次回流区增强, 对主回流区的扰动增大, 稳定器流阻增大; 开缝高度 h 进一步增加时, 由于中缝流增强, 偏斜程度减小, 对主回流区的扰动变小, 稳定器流阻降低, 于是呈现了图 4 所示的 S 形流阻特性曲线。

图 5 提供了开缝式曲线形中缝稳定器(c)和

带导向槽的曲线形中缝稳定器(e)总压恢复系数的比较。试验条件为: 总压 $p_t = 65$ kPa, 总温 $T_t = 920$ K, 速度系数范围 $\lambda = 0.15 \sim 0.35$ 。曲线 2 代表开缝高度 $h = 3$ mm 的带导向槽的曲线形中缝稳定器, 其总压恢复系数 σ 明显高于曲线 1 代表的开缝高度 $h = 3$ mm 的开缝式曲线形中缝稳定器。可以看出随着速度系数的增加稳定器总压恢复系数均急剧降低。

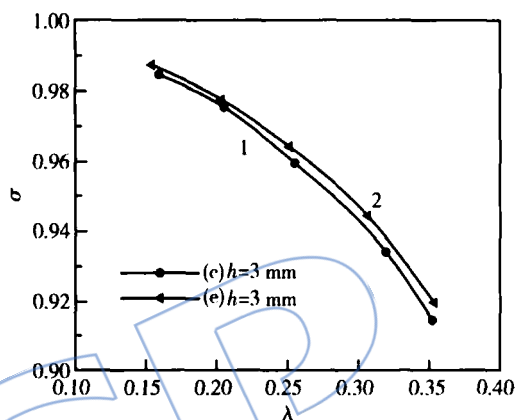


图 5 开缝式与导向槽中缝稳定器的总压恢复系数

Fig. 5 Total pressure recovery of the cut and the channeled CSFH

冷态流阻试验表明中缝式稳定器的流体损失随开缝高度的不同而变化, 但均小于普通 V 形稳定器, 约低 2%~14%, 当开缝高度 h 为 8 mm 时流体损失低 7%左右, 开缝高度为 3 mm 时流体损失低 14%。带导向槽的中缝稳定器流体损失低于开缝式中缝稳定器。至于中缝式稳定器外形的影响, 无论是 V 形, 还是流线形, 在高速试验的速度系数范围内 ($\lambda = 0.15 \sim 0.35$) 流体损失差别不大, 低速试验时 V 形中缝稳定器的总压恢复系数明显低于曲线形中缝稳定器。

3 流场结构的 PIV 试验研究

许多人对钝体后尾迹流场和旋涡脱落的一般规律进行过较深入的研究^[4-5], 本文则利用 PIV 测试技术, 对中缝式稳定器和普通 V 形稳定器尾迹流场结构进行试验分析, 探讨不同尾迹结构以及旋涡脱落方式对宏观性能的影响。PIV 系统的控制和分析软件为 TSI 公司的 Insight3。试验段为 250 mm × 250 mm 的正方形有机玻璃通道, 风速 30 m/s。

图 6 为瞬时场平均后得到的速度矢量场。图 6(a)是普通 V 形稳定器尾迹的平均速度矢量图, 图 6(b)是 $h = 10$ mm 的中缝式稳定器流场图像。

可以看出在普通 V 形稳定器后的尾迹中,上下两个旋涡是对称的,而中缝式稳定器后的尾迹中存在着一大、一小两个旋涡,即前面所述的主回流区和次回流区,相对主流而言较弱的中缝流在离开进口一段距离后就偏向一侧主流. 试验还表明中缝流的偏斜方向,无论是向上,还是向下,完全是随机的. 中缝射流偏斜的程度随着中缝流相对强度的减弱(即开缝高度 h 的减小)而增加. 当中缝射流极强时,则完全摆脱主流的控制,而呈直射状态,将两侧的回流区完全分开.

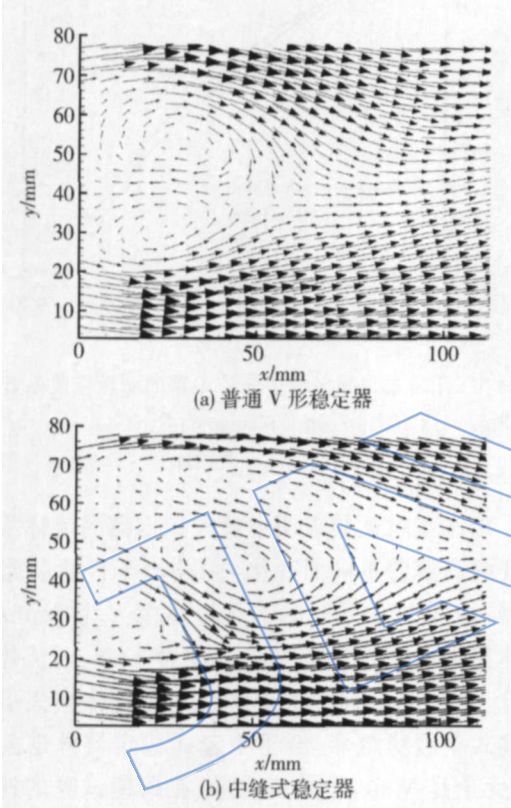


图 6 PIV 得出的平均速度矢量

Fig. 6 Measured time averaged velocity field by PIV

图 7 表示测量得到的钝体后湍流动能分布的比较. 图 7(a) 所示的普通 V 形稳定器最大湍流动能点在近尾, 集中程度高, 数值大, 分布范围却较小. 图 7(b) 所示的中缝式稳定器湍流动能明显分为主、次两个回流区, 数值小, 分布范围广, 所以尽管回流区大, 流体损失却小.

回流区由逆流区和顺流区组成, 一般逆流区长度可以代表回流区长度. 利用 PIV 测量得到的中缝式稳定器逆流区长度比普通 V 形稳定器大许多. 图 8 显示了 V 形中缝式稳定器逆流区长度随开缝高度 h 变化的曲线, 可以看出当相对开缝高度 (h/W) 增加时, 相对逆流区长度 (逆流区长度 L_b 除以槽宽 W) 急剧增大, 然后略降, 这对于提高

燃烧效率和改善燃烧稳定性颇有好处.

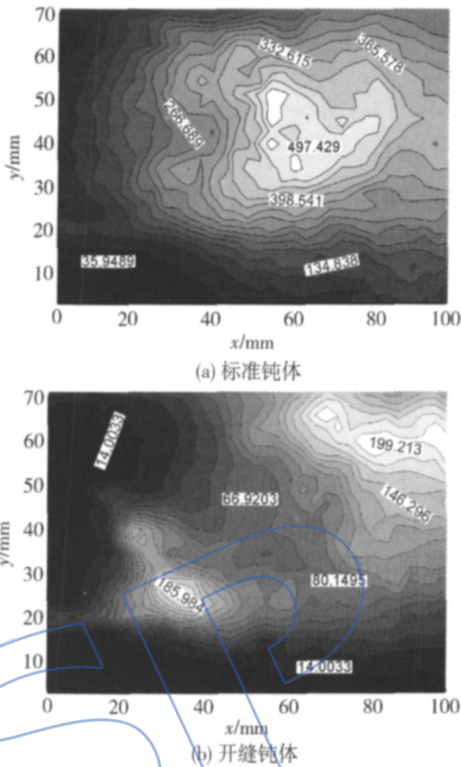


图 7 PIV 得出的湍流动能分布

Fig. 7 Measured TE distribution by PIV

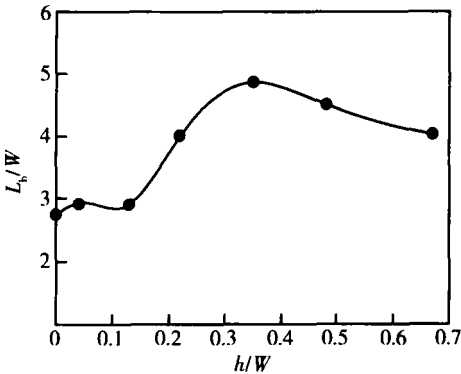


图 8 不同缝高率 h/W 的逆流区相对长度 L_b/W

Fig. 8 Relative length of back flow zone versus the relative CSFH slit height

利用 PIV 的动态流场数据对稳定器流场的非稳态特性进行了研究, 结果显示: 无论普通 V 形稳定器, 还是中缝式稳定器, 其尾迹都存在旋涡脱落现象. 我们把大涡脱落前与上、下剪切层相遇点和稳定器尾缘的轴向距离称为旋涡脱落特征尺度 L_s . 试验证明特征尺度越大, 回流区越长, 旋涡从形成到脱落的时间越长, 火焰稳定性也就越好. 图 9 是旋涡脱落瞬态速度场的典型试验结果, 显示了钝体后旋转方向相反的旋涡交替脱落的瞬时

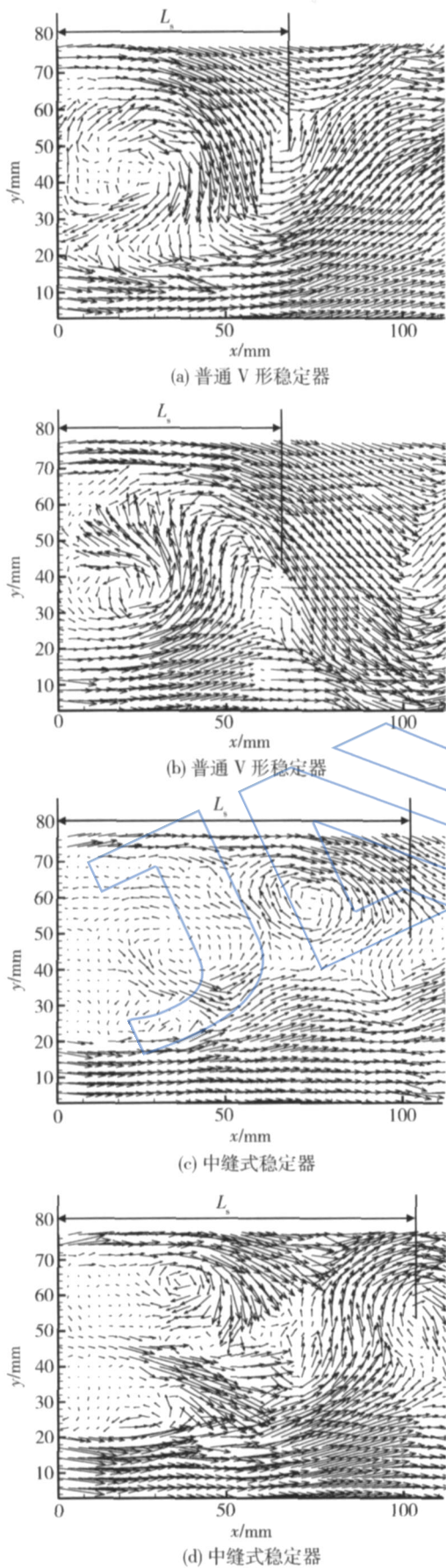


图 9 PIV 测量的旋涡脱落瞬态速度场

Fig.9 Transient velocity fields for vortex shedding

矢量场,不难看出图 9 (a) 和 (b) 中表示的普通 V 形稳定器上、下两个旋涡脱落呈对称状态,图 9 (c) 和 (d) 中的中缝式稳定器旋涡不对称,旋涡脱落特征尺度 L_s 大于普通 V 形稳定器。

参考文献[6] 应用商用软件 FLUENT,采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型对中缝式稳定器进行了二维稳态和非稳态模拟数值计算,结果同 PIV 测量一致。

4 中缝式稳定器燃烧性能

分别在低速风洞和高速的二元稳定器试验器中进行了中缝式稳定器的燃烧性能试验,这里主要介绍高速试验的结果。采用与图 3 同样的试验装置进行燃烧性能试验,中缝式稳定器和普通 V 形稳定器以相同的供油方式从前方喷油,稳定器中心处的燃气用 1 支逆喷喷油杆加挡板,即雾化槽的形式供油,稳定器两侧的燃气分别由 3 支喷油杆侧喷供油。试验段后方有 3 支 15 点水冷热电偶测温,用以计算燃烧效率。图 10 为中缝式稳定器和普通 V 形稳定器燃烧稳定性的比较(纵坐标为总油气比 FAR_t)。试验的进口气流参数模拟加力燃烧室中条件较差的高空工作状态:总压 $p_t = 65 \text{ kPa}$,总温 $T_t = 920 \text{ K}$,速度系数 $\lambda = 0.21$ 。点 b 和 a 分别表示普通 V 形稳定器(a)的贫、富油稳定工作边界,曲线 2 表示曲线形中缝稳定器(c)在不同开缝高度下的贫、富油稳定边界,稳定工作范围比前者宽许多,特别是富油稳定边界的油气比由 0.067 增大到 0.078。曲线 1 代表带导向槽的曲线形中缝稳定器(e)具有更宽广的稳定工作范围,富油边界油气比达到 0.084 以上,开缝高度为

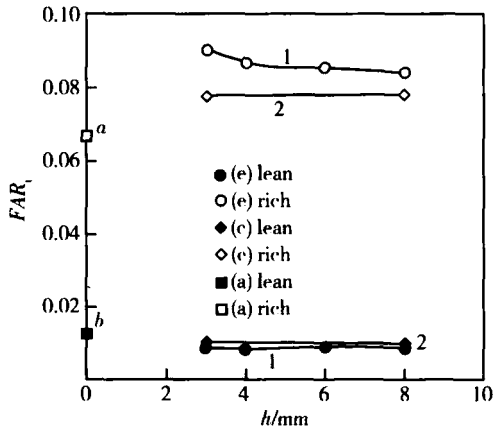


图 10 中缝式稳定器和普通 V 形稳定器燃烧稳定范围的比较

Fig.10 Comparison of combustion stability between V gutter and CSFH

3 mm 的稳定器富油燃烧稳定性更好,甚至达到 0.09. 中缝式稳定器富油稳定工作边界十分宽广是其突出的优点,这在先进加力燃烧室设计中是非常重要的指标.

在比较稳定器的燃烧效率时,重点考核高性能加力燃烧室中最关键的大油气比下的燃烧效率.图 11 是与图 10 同样的高气流条件下,曲线形中缝式稳定器(c)和普通 V 形稳定器(a)相对燃烧效率 η 的比较.在所示的各种油气比下,开缝高度为 3 mm 的曲线形中缝式稳定器比同样条件下工作的普通 V 形稳定器的相对燃烧效率 η 提高 20%~25%,开缝高度为 8 mm 的曲线形中缝式稳定器燃烧效率还要高一些.

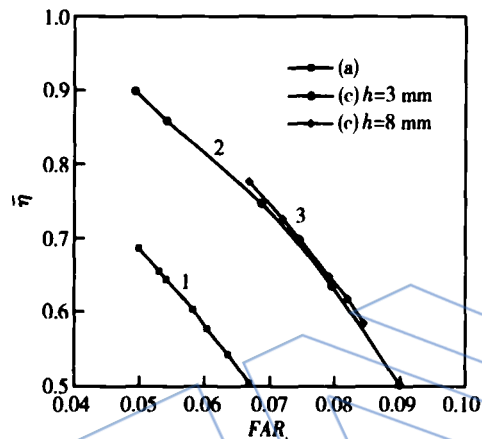


图 11 中缝式稳定器和普通 V 形稳定器燃烧效率的比较

Fig. 11 Comparison of combustion efficiency between V gutter and CSFH

图 12 是在更低的气流总压 ($p_t = 55 \text{ kPa}$) 和更高的气流总温 ($T_t = 1\,120 \text{ K}$) 条件下,将相同缝高 ($h = 3 \text{ mm}$) 的开缝式曲线形中缝稳定器(c)和带导向槽的曲线形中缝稳定器(e)进行相对燃烧效率的比较.试验结果表明在较低的油气比下,带导向槽的中缝式稳定器优越于开缝式中缝稳定器,在高的油气比下,两者差别不大.

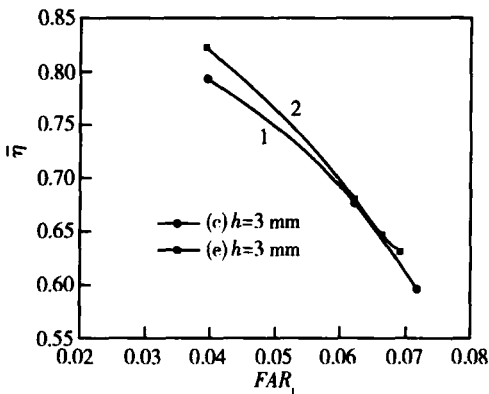


图 12 开缝式与带导向槽的中缝稳定器燃烧效率比较

Fig. 12 Comparison of combustion efficiency between the cut and the channeled CSFH

表 1 给出了各种中缝式稳定器在所试验的低压环境下前缘壁温和后缘壁温随气流总温的变化.不难看出由于火焰驻留在稳定器后缘附近,后缘壁温远高于前缘壁温;此外,随气流温度 T_t 的升高稳定器壁温 T_w 显著增高.开缝高度小时(如 $h = 3 \text{ mm}$),无论是开缝式中缝稳定器,还是带导向槽的中缝稳定器壁温均较低,开缝高度大时(如 $h = 8 \text{ mm}$),壁温较高.由于试验条件的限制,未能试验到 $1\,200 \text{ K}$ 的气流温度,从趋势看在 $1\,200 \text{ K}$ 的气流温度下最高壁温在 $1\,220 \text{ K}$ 左右,现有的耐热合金材料是可以承受的,进一步提高热负荷时,还可以采用耐温达 $1\,473 \text{ K}$ 的机械合金化耐热合金实现稳定器长期工作的可靠性.

综上所述,中缝式稳定器显著增大了高空低压条件下火焰稳定范围,特别是拓宽了富油稳定边界,大大提高了高空富油条件下的燃烧效率,具有良好的燃烧特性.各种中缝式稳定器中带导向槽的中缝稳定器具有更佳的综合性能.至于开缝高度的影响,当开缝高度为 3 mm 时,稳定燃烧特性稍好一些,当开缝高度为 8 mm 时燃烧效率略高一些.

表 1 中缝式稳定器壁温测量结果

Table 1 Measured wall temperature of CSFH

试 验 件	前缘壁温 T_w / K		后缘壁温 T_w / K	
	T_t / K			
普通 V 形稳定器 (a)	920	1 120	933	
曲线形中缝稳定器 (c) $h = 3 \text{ mm}$	713	991	878	1 052
带导向槽的曲线形中缝稳定器 (e) $h = 3 \text{ mm}$	794	943	961	1 052
带导向槽的曲线形中缝稳定器 (e) $h = 8 \text{ mm}$	906	1 097	1 033	1 166

5 结 论

通过对中缝式稳定器的试验研究可以得出以下结论:

(1) 中缝式稳定器是一种具有值班火焰特点的新型稳定器,其稳定工作范围宽、燃烧效率高、流体损失低,具有一定应用前景。

(2) 中缝式稳定器的尾迹流场中存在偏斜的中缝流和一大、一小两个不同尺寸的回流区,即主回流区、次回流区。由于中缝流的引入减少了尾缘处负压,并使主流会合点后移,不仅降低了流体损失,还增大了回流区长度。正是中缝式稳定器的特殊回流区结构和旋涡脱落机制,决定了它具有良好的冷、热态综合性能。

(3) 采用 PIV 激光流场测试技术研究中缝式稳定器回流区的非稳态结构和时均流场特性,是探索稳定器火焰稳定机理和分析稳定器冷、热态宏观特性十分有益的工具。

(4) 试验证明中缝式稳定器的流体损失系数随开缝高度而变化,但均低于普通 V 形稳定器,一般低 2%~14%。带导向槽的中缝稳定器比开缝式中缝稳定器具有更低的流阻损失。

(5) 中缝式稳定器最突出的特点是比普通 V 形稳定器具有更宽广的稳定燃烧范围,特别是在先进加力燃烧室所需的富油状态下具有优越的稳定工作特性,带导向槽的中缝稳定器富油稳定边

界更宽。中缝式稳定器的燃烧效率明显高于普通 V 形稳定器,带导向槽的中缝稳定器效率更高。

参考文献:

- [1] 钱壬章,郑远平,陈维汉,等. 煤粉燃烧新概念:粉气分离[J]. 工程热物理学报,1991,12(3):320-323.
QIAN Renzhang, ZHENG Yuanping, CHEN Weihang, et al. New concept of powder coal burning: powder and gas separation [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1991, 12(3): 320-323.
- [2] 杜一庆,钱壬章,王键夫,等. 开缝 V 形体火焰稳定器的冷态试验研究[J]. 华中科技大学学报,2004,32(2):67-69.
DU Yiqing, QIAN Renzhang, WANG Jianfu, et al. Cold state experimental research on a slit V-shape flame holder [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2004, 32(2): 67-69.
- [3] 杜一庆,钱壬章. 开缝钝体火焰稳定器的初步研究[A]. 中国航空学会航空百年学术论坛动力分论坛论文集[C]. 北京:中国航空学会动力专业分会,2003.
- [4] Yang J T, Tsai G L. Near wake flow of a V-gutter with slit bleed[J]. Journal of Fluids Engineering, 1993, 115: 13-20.
- [5] Perry A E, Chong M S, Lim T T. The Vortex-shedding process behind two-dimensional bluff bodies[J]. Journal of Fluid-Mechanics, 116: 77-90.
- [6] Du Yiqing, Qian Renzhang, Peng Shiwen. Coherent structure in flow over a slit bluffbody[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical simulation, 2006, 11: 391-412.