

文章编号: 1000-8055(2007)10-1646-06

# 尾缘吹气稳定器燃烧性能的数值分析

马文杰, 杨 阳, 杨茂林, 樊未军

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为了验证尾缘吹气火焰稳定器在更宽工作范围内的燃烧性能, 对其燃烧过程进行了数值模拟. 分析了在更宽的应用条件下不同尾缘射流速度、尾缘射流当量比及来流速度等因素对燃烧效率的影响; 并与常规 V 形稳定器的燃烧性能进行了对比, 获得了更宽工作范围内上述因素对吹气稳定器性能的影响规律. 与较窄范围内的相应实验规律进行了对比, 结果表明, 以上因素对燃烧性能的影响趋势大致相同, 但某些方面存在差异.

**关 键 词:** 航空、航天推进系统; 尾缘吹气稳定器; 燃烧性能; 加力燃烧室

**中图分类号:** V231.2

**文献标识码:** A

## Numerical analysis of combustion performance of EBMC flame holder

MA Wen-jie, YANG Yang, YANG Mao-lin, FAN Wei-jun

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

**Abstract:** In order to verify the combustion performance of EBMC flame holder in wider operating range, numerical simulation of the combustion process was carried out. The influence of the jet velocity, jet equivalence ratio and the approach velocity on combustion efficiency was analyzed, meanwhile the simulated results were compared with combustion performance of common V-shaped stabilizer, showing the influence of above-specified factors on the combustion performance of flame holder. On a comparative basis, the results show that the influence of such variables on combustion performance corresponds almost to earlier experimental results in narrower operating range, despite of some differences in some aspects.

**Key words:** aerospace propulsion system; EBMC (edge blowing mixture curtain) flame holder; combustion performance; afterburner

目前, 高性能加力燃烧室火焰稳定器, 要求稳定范围宽、燃烧效率高、流阻损失小. 但是, 这些要求之间存在矛盾, 提高燃烧性能往往加大流阻损失. 因此, 高效低阻的稳定器一直是人们研究的目标. 目前, 各种火焰稳定器中, 最常见的是 V 形火焰稳定器, 此外还有蒸发式、吸入式、双 V 型及气动式火焰稳定器等等. 其中气动稳定器在 70、80 年代美国和印度都进行过研究<sup>[1-3]</sup>, 气动稳定在不加力时流阻特别小, 但气动稳定器引气量大, 而且

单靠气流稳定不太可靠. 北航在 90 年代末提出了尾缘吹气火焰稳定器<sup>[4]</sup>, 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<sup>[5]</sup>, 研究表明, 尾缘吹气稳定器是一种高效低阻的稳定器, 它将机械稳定与气动稳定相结合, 有利于燃烧效率和其它性能的提高. 以前对吹气稳定器燃烧性能的实验研究, 其来流条件与加力燃烧室的实际工作条件还有一定的差距, 因此所获得的规律有待于在加力室实际工作条件下作进一步

收稿日期: 2006-10-16; 修订日期: 2006-12-25

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.

的验证. 本文在接近加力室实际工作条件下, 较以往更宽的范围内, 对改进后的 IV 型尾缘吹气稳定器的燃烧性能进行了数值模拟, 获得了更宽工作范围内, 尾缘射流速度、尾缘射流当量比和来流速度对吹气稳定器性能的影响规律, 并与以往 I 型 (I 型尾缘吹气稳定器与 IV 型的主要区别是, I 型的后挡板为一个平直的挡板, 而 IV 型的后挡板为顶角  $120^\circ$  的 V 形挡板, 参照图 1) 吹气稳定器在较窄范围内的相应实验规律进行了对比. 因而, 进一步验证了吹气式稳定器的性能特点.

## 1 计算简化模型与计算工况

### 1.1 几何模型

图 1 为 IV 型尾缘吹气火焰稳定器, 由前罩 1、后挡板 2 和气动喷油杆 3 组成, 气动喷油杆上有多个小孔射流撞击式气动雾化喷嘴. 经气动雾化喷嘴雾化的油雾混气喷入稳定器内腔, 燃油和空气的混合物由火焰稳定器尾缘的长缝射入主流空气, 射流空气和燃油的流速以及流量可调, 以适应不同工作状态的需要, 从而获得最佳的尾缘油气匹配. 图 2 为常规 V 形火焰稳定器. 1 为 V 形稳定器壳体, 2 为直射式喷油杆, 中心线距稳定器尾缘 265 mm.

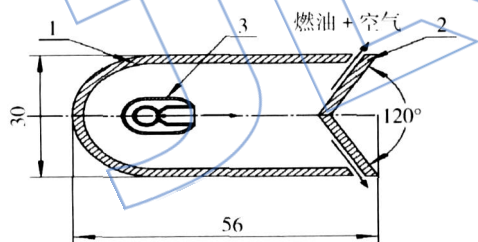


图 1 IV型尾缘吹气火焰稳定器

Fig.1 Schematic of the IV-Type EBMC flame holder

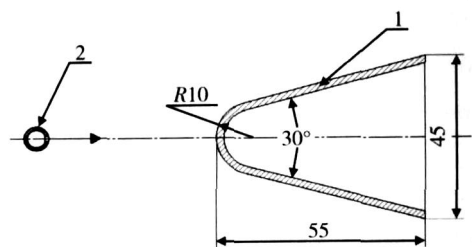


图 2 常规 V 形稳定器

Fig.2 Schematic of the regular V-gutter

### 1.2 计算网格和计算模型的选取

本次计算选取矩形加力燃烧室高 300 mm, 宽 170 mm, 二元稳定器水平置于矩形通道中心,

如图 3. 采用四面体非结构化网格. 由于燃烧室通道上下对称, 为节省计算时间和内存, 实际计算时沿对称面取为一半, 网格数量约为 345 500.

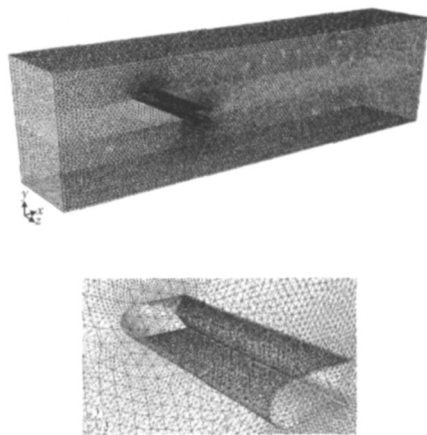


图 3 IV型尾缘吹气稳定器计算网格

Fig.3 Calculation field and meshing

以 FLUENT 6.1 商用软件为计算工具, 选用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 单步快速反应 PDF 燃烧模型, 两相流计算采用颗粒随机轨道模型, 壁面网格的处理采用标准壁面函数方法, 在此次计算分析中没有考虑辐射的影响.

### 1.3 初始雾化条件的给定

油气混气的初始条件在尾缘出口的长缝处给定, 为了孤立因素, 方便分析性能的变化规律, 认为油气已经均匀混合, 尾缘处液滴燃油的速度矢量与尾缘的空气射流一致, 并且认为燃油粒子的直径和通量沿长缝均匀分布.

### 1.4 计算工况

#### 1.4.1 不同尾缘吹气速度时的计算工况

IV型吹气稳定器: 来流  $V_m = 88 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ , 尾缘供油量保持不变  $m_f = 0.011 \text{ kg/s}$ , 尾缘吹气速度分别为  $V_j = 20, 30, 40, 50, 60 \text{ m/s}$ ; 常规 V 形稳定器的来流条件和供油量与吹气稳定器相同.

#### 1.4.2 不同尾缘射流当量比时的计算工况

IV型吹气稳定器: 来流  $V_m = 88 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ , 仅稳定器内供油, 尾缘射流速  $V_j = 50 \text{ m/s}$ , 尾缘射流当量比分别取  $\phi = 1, 2, 3, 4, 6, 8$ .

#### 1.4.3 不同来流速度时的计算工况

IV型吹气稳定器: 来流  $T_m = 773 \text{ K}$ , 尾缘射流速度  $V_j = 50 \text{ m/s}$ , 仅稳定器内供油, 尾缘射流当量比为  $\phi = 6$ , 来流速度分别为  $V_m = 61, 88, 112, 138 \text{ m/s}$ ; 常规 V 形稳定器的计算工况同 IV 型吹

气稳定器。

## 2 计算结果分析

### 2.1 不同尾缘吹气速度对燃烧性能的影响

首先,针对文献[5]中燃烧效率随射流速度变化曲线所对应的工况,进行相应的计算分析,以验证计算模型和假设的合理性,如图4所示。校验结果表明,就计算的燃烧效率随射流速度的变化趋势来看,两者大体一致,计算的最佳射流速度值比试验的最佳值偏小一些;但是,计算的具体燃烧效率值与试验值有较大的差距,具体的原因将在后面分析。从趋势上来看,计算能够大致反映燃烧效率的变化规律。

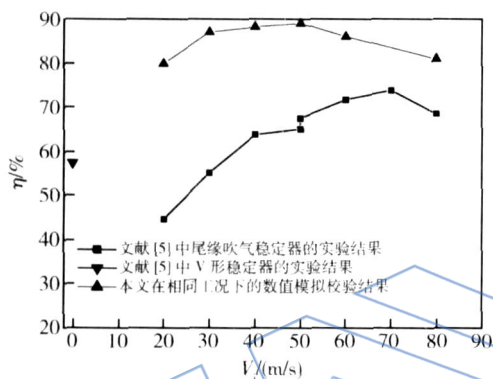


图4 燃烧效率随尾缘射流速度的变化

Fig. 4 Effect of jet velocity on combustion efficiency  
( $V_m = 50 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 573 \text{ K}$ ,  $m_f = 0.013 \text{ kg/s}$ )

然后,在接近加力室实际工作条件下,计算燃烧效率随尾缘射流速度的变化,如图5。随射流速度的增加,效率先增加后降低,对效率来说,存在最佳射流速度值;计算与文献[5]的实验结果(图4)趋势一致。增加射流速度,回流量增加(图6),回流区扩大、火焰张角变大、火焰面变宽(图7),这些因素有利于燃烧效率的提高;但是,随射流速度的增加,尾缘剪切层内气流速度增加,可燃气团在回流区的停留时间会有变短的趋势(图8),降低了燃油的完全燃烧程度,这不利于效率的提高。当射流速度较小时, ( $V_j = 20 \text{ m/s}$  时,射流当量比约为10)尾缘燃油过富,效率较低。随着射流速度的增加,改善了尾缘燃油过富的状态,使得效率逐渐提高,但当射流速度继续增加时,回流量增加,尾缘燃油逐渐趋于贫油,而且停留时间缩短,导致效率下降。因而,计算和实验都会呈现以上的趋势。图4和图5中的实验和计算结果中,还与常规V形稳定器进行了对比,结果表明,当射流速度

$V_j$  超过一定的值后,燃烧效率才会高于V形稳定器。

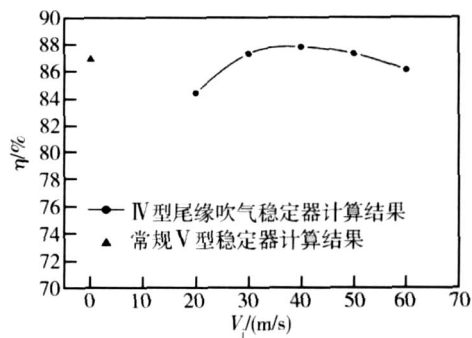


图5 燃烧效率随尾缘射流速度的变化

Fig. 5 Effect of jet velocity on combustion efficiency  
( $V_m = 88 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ ,  $m_f = 0.011 \text{ kg/s}$ )

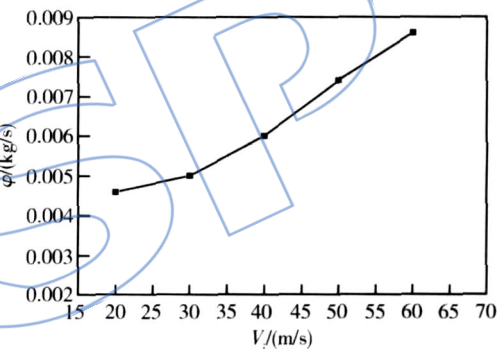


图6 回流量随尾缘射流速度的变化

Fig. 6 Effect of jet velocity on recirculation ratio

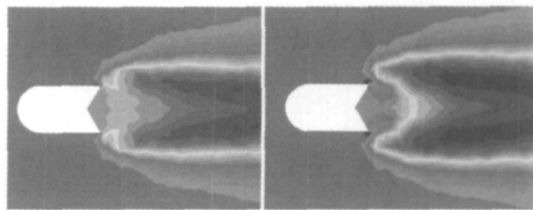


图7  $V_j = 20, 60 \text{ m/s}$  中心截面温度分布

Fig. 7 Temperature distribution on center plane  
( $V_m = 88 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ ,  $m_f = 0.011 \text{ kg/s}$ )

值得注意的是,图5中, $V_m = 88 \text{ m/s}$  时的最佳射流速度值为  $40 \text{ m/s}$ ,而图4中,文献[5]试验所得的  $V_m = 50 \text{ m/s}$  时的最佳射流速度值为  $70 \text{ m/s}$ ,其相应的计算校验最佳射流速度为  $50 \text{ m/s}$ ;这说明当来流速度大幅增加后,最佳速度值可能会减小。这主要是由于随来流速度的增加,尾迹回流量也会随之增加,因此在相同的供油条件下,只需要较少的尾缘射流卷吸空气(也就是较小的尾缘射流速度,根据图6),就可以使得回流区内达到合适的油气比,因此,最佳射流速度可能会减小。

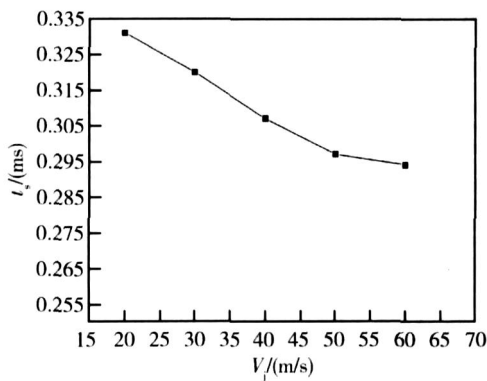


图 8 可燃气团停留时间随尾缘射流速度的变化  
Fig. 8 Effect of jet velocity on the residence time

2.2 不同尾缘射流当量比对燃烧性能的影响

图 9 的计算表明,在接近加力室实际工作条件下,保持来流条件和尾缘射流速度不变,随尾缘供油量的增加,燃烧效率先增加,后降低,说明对于燃烧效率来说,存在最佳的尾缘射流当量比;与文献[5]的实验结果趋势一致,如图 10. 只有稳定器单独供油时,效率高高低主要取决于回流区内的当量比是否合适;图 11 为射流当量比  $\Phi = 1, 3, 8$  时回流区近似温度,大致反映了回流区内当量比的大致变化过程. 当  $\Phi = 1$  时,回流区当量比过贫,燃烧温度较低;随着射流当量比的提高,回流区当量比逐渐接近恰当比,燃烧温度达到最高;但随着射流当量比的进一步增加,燃烧区当量比过富,导致回流区内燃烧温度下降,从而效率下降.

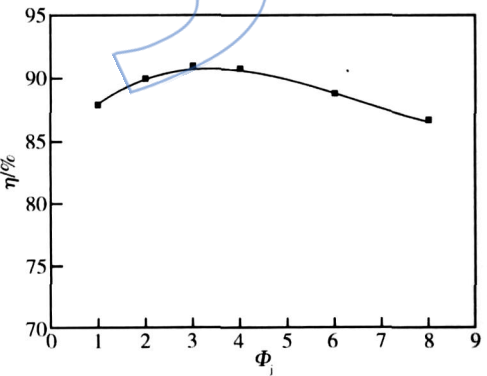


图 9 燃烧效率随射流当量比的变化  
Fig. 9 Effect of jet equivalence ratio on combustion efficiency ( $V_m = 88 \text{ m/s}$ ,  $V_j = 50 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ )

同样值得注意的是,在计算工况  $V_m = 88 \text{ m/s}$  时的最佳的尾缘射流当量比  $\Phi \approx 3$ . 而文献[5]中  $V_m = 35, 50 \text{ m/s}$  时的最佳尾缘射流当量比  $\Phi = 2.5 \sim 3$ ;两者相差很小. 这说明对于燃烧效率来说的最佳尾缘射流当量比,随来流条件的变化不敏

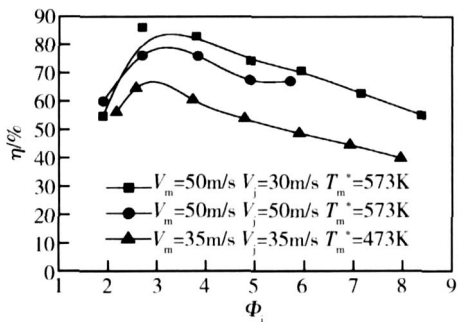


图 10 燃烧效率随射流当量比的变化<sup>[5]</sup>  
(I 型尾缘吹气稳定器实验结果)  
Fig. 10 Effect of jet equivalence ratio on combustion efficiency (I-Type EBMC flame holder experimental results)



图 11 稳定器回流区温度 (K)  
Fig. 11 Temperature of recirculation zone (K)

感;这可能是由于射流当量比相对于其他因素在很大程度上决定了回流区内的油气比的缘故.

2.3 吹气稳定器与常规 V 形稳定器的速度特性

图 12 的计算表明,对于 IV 型吹气稳定器,当尾缘空气和燃油射流保持不变时,燃烧效率随着来流速度的增加而提高;与文献[4]的实验结果趋势一致,如图 13. 计算的 V 形稳定器速度特性与吹气稳定器相同. 随着来流速度增加,供氧更加充分,湍流脉动增强,燃料与氧化剂的掺混更加充分,强化了燃烧过程,火焰内收,长度缩短(如图 14),从而使燃烧效率提高.

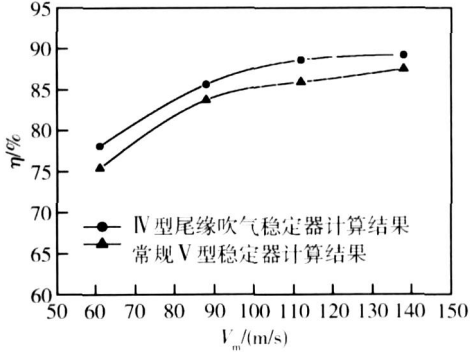


图 12 燃烧效率随来流速度的变化图  
Fig. 12 Effect of approach velocity on combustion efficiency ( $V_j = 50 \text{ m/s}$ ,  $T_m = 773 \text{ K}$ )

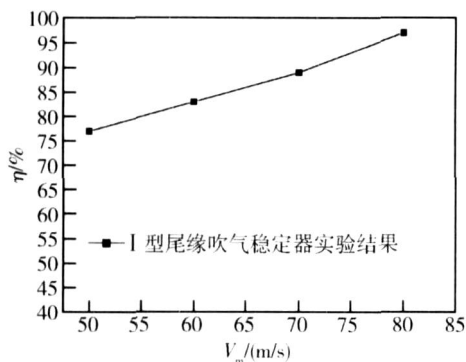
图13 燃烧效率随来流速度的变化<sup>[4]</sup>

Fig. 13 Effect of approach velocity on combustion efficiency ( $p_j = 0.2$  MPa,  $T_m = 597$  K)

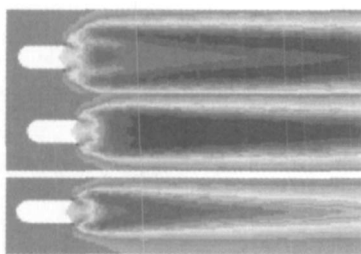
图14  $V_m = 61, 88, 138$  m/s 时的火焰长度对比

Fig. 14 Comparison of the flame structure in case of  $V_m = 61, 88, 138$  m/s

在来流速度从 61 m/s 到 138 m/s 的变化范围内, I 型尾缘吹气稳定器的燃烧效率都高于常规 V 型稳定器. 对比图 15 中的两种稳定器的火焰结构可以看出, V 型稳定器的火焰分为上下两支, 随着向下游传播逐渐加厚, 最后联成一片; 而吹气稳定器, 高温区域几乎充满整个尾缘回流区, 回流区中存在着剧烈的燃烧过程. 这说明吹气稳定器内部供油使尾缘处燃油浓度分布较为合理; 同时, 尾缘射流扩大了回流, 增加了回流量, 改善了尾部燃油掺混, 这使得燃烧性能得到了一定程度的改善, 从而吹气稳定器的燃烧效率高于常规 V 形稳定器.

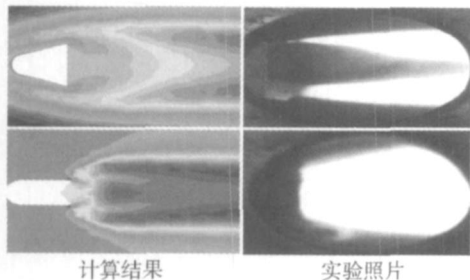


图15 吹气稳定器与 V 形稳定器的火焰结构对比

Fig. 15 Comparison of the flame structure of V-gutter and EBMC flame holder

同时, 值得注意的是, 文献[4]的实验中在来流速度  $V_m = 50 \sim 80$  m/s 变化范围内, 燃烧效率随来流速度的增加单调上升; 在本文计算的更宽速度变化范围内  $V_m = 61 \sim 138$  m/s, 燃烧效率依然随来流速度的增加单调上升, 在此来流范围内不存在效率拐点.

从图 4、图 5 和图 9 的计算数据可以看出, 燃烧效率的变化范围很小, 初步分析原因可能有以下几个方面, 首先, 尾缘长缝处初始雾化场随着不同工况变化的实际情况是, 其液雾粒子的通量分布, 速度分布, 粒子直径等参数都会随相应工作条件的变化而不同, 而在计算中由于缺乏大量的有主流空气条件下的稳定器初始雾化试验数据, 因此暂时没有充分体现这种差异; 第二, 计算采用快速反应 PDF 燃烧模型, 假定反应迅速达到平衡, 这与煤油的复杂反应机理还有一定的差异. 所以效率的计算虽然能反映一定变化趋势, 但是其变化的幅度与真实还有一定的差距, 有待进一步改进.

### 3 结 论

(1) 本文的计算分析表明, 在比文献[5]试验更高的来流速度下, I 型尾缘吹气稳定器的燃烧效率仍然存在最佳吹气速度; 而且结合文献[5]的试验结果和本文对其的计算校验结果分析表明, 当来流速度大幅增加后, 最佳射流速度值很可能会减小.

(2) 本文的计算分析表明, 在比文献[5]试验更高的来流速度下, I 型尾缘吹气稳定器计算的最佳尾缘射流当量比  $\phi_j \approx 3$ , 而文献[5]中  $V_m = 35$  m/s, 50 m/s 时的最佳尾缘射流当量比  $\phi_j = 2.5 \sim 3$ , 两者相差很小; 这说明对于燃烧效率来说的最佳尾缘射流当量比, 可能随来流条件的变化不敏感.

(3) 本文的计算分析表明, 在比文献[4]的试验 ( $V_m = 50 \sim 80$  m/s) 更宽的来流速度变化范围内  $V_m = 61 \sim 138$  m/s, 燃烧效率依然随来流速度的增加单调上升, 在此来流范围内不存在效率拐点; 在计算的来流速度变化范围内, I 型尾缘吹气稳定器的燃烧效率都高于槽宽更宽的常规 V 形稳定器.

### 参考文献:

- [1] Perk R E, Samuelsen G S. Generalized stability criteria for an opposed-jet flameholder[R]. AIAA 82-4229, 1982.

[ 2 ] Sridhara K,Chidananda M S,Paranjpe P A. Jet curtain flameholder for aircraft afterburners[ R]. 78- GT-95.

[ 3 ] Sridhara K,Chidananda M S. Fresh mixture entertainment in a jet curtain flameholder[ R]. Fifth International Symposium on Airbreathing Engines ,Bangalove ,India :February , 1981.

[ 4 ] 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]. Journal of Aerospace Power ,1998 ,13(2) :185-188.

[ 5 ] 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.

JAS SP