

# 尾缘吹气式火焰稳定器时均流场\*

岳连捷<sup>1</sup>, 杨茂林<sup>2</sup>, 刘宝杰<sup>2</sup>, 曾 吾<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 北京航空航天大学能源与动力学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了对尾缘吹气式火焰稳定器的流场进行研究, 在低速风洞中利用二维在线式互相关 PIV 系统, 对新型稳定器及 V 型稳定器的近尾迹流动进行了测量, 考察了可控横向射流气动参数及射流方向对新型稳定器流场的影响。结果表明, 尾缘吹气式火焰稳定器与 V 型火焰稳定器的流场特性基本相似, 但吹气射流扩大了回流区, 增加了回流率和湍流脉动速度; 同时发现, 射流与来流动量比是影响新型稳定器后流场的主要气动参数。

**关键词:** 火焰稳定器; 气动稳定; 流动分布; 激光测量

**中图分类号:** V235.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2003) 06-0524-04

## Experimental study on the mean flow behind EBMC flameholder

YUE Lian-jie<sup>1</sup>, YANG Mao-lin<sup>2</sup>, LIU Bao-jie<sup>2</sup>, ZENG Wu<sup>2</sup>

(1. Inst. of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080, China;

2. School of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to study the flow fields behind the Edge Blowing Mixture Curtain (EBMC) flameholder, the detailed near wake flow behind the EBMC flameholder and the V-gutter flameholder was measured by using 2D cross correlation on-line PIV in a low speed wind tunnel. The effect of the dynamic parameters and the direction of the jet on the flowfield of the novel flameholder was also investigated. It was revealed that the time-averaged flow field of the EBMC flameholder is similar to that of the V-gutter flameholder, while the jet enlarges the recirculation zone and it increases the turbulence intensity and mass flow rate of the recirculation zone, which would benefit the combustion. It was also found that the momentum ratio of the jet to the main flow is a primary dynamic parameter that affects the flow field of the novel flameholder.

**Key words:** Flame holder; Aerodynamic stabilization; Flow distribution; Laser measurement

## 1 引言

高性能推进系统先进加力燃烧室要求火焰稳定器点火容易、稳定工作范围宽、燃烧效率高、流阻损失小,且能在更高进气温度下工作。北航提出了一种机械与气动稳定相结合的新型稳定器——尾缘吹气式火焰稳定器<sup>[1]</sup>。该稳定器槽宽较常规 V 型稳定器窄,具有流线形头部,因而冷阻损失很小;加力时尾缘吹气并供油,扩大回流区;其耗气量较少,且更易于稳定可靠工作。燃烧试验表明该稳定器具有较好的燃烧性能。

稳定器的火焰稳定性和燃烧效率除依赖于燃气浓度分布外,很大程度上取决于稳定器后流体的流动

特性<sup>[2]</sup>。对于新型稳定器,存在尾缘吹气射流与来流的相互作用,流场更为复杂,研究其流场对于进一步探讨其燃烧性能具有非常重要的物理意义。作者曾对新型稳定器及 V 型稳定器后瞬态近尾迹流动结构进行了分析<sup>[3,4]</sup>,现着重对稳定器后的时均流动特性进行探讨。目前关于回流区稳焰机理的理论,包括威廉姆斯的简化热理论、朗威尔的均匀搅拌反应器模型、特征时间模型等大都以时均流场为基础<sup>[5]</sup>,从时均角度对流场进行分析更能直接反映其燃烧性能。

## 2 实验设备及测量技术

实验在北航发动机重点实验室的多功能低速风洞上进行,来流经整流后湍流度小于 0.25%,实验件

\* 收稿日期: 2003-01-15; 修订日期: 2003-03-25。基金项目: 航空基金资助项目 (97CS1100)。

作者简介: 岳连捷 (1972—), 男, 博士后, 研究领域为超燃冲压发动机燃烧室液态碳氢燃料燃烧的实验与计算。

沿展向竖直安装于实验段内。流场测量采用在线式互相关 PIV 系统,激光透过侧面的有机玻璃窗进入实验段。采用脉冲式 Nd: Yag (钕-钷石榴石) 激光器作为光源,其典型工作频率为 10Hz,可见光波长为 532nm(绿光),每个脉冲能量 200mJ,脉冲宽度 9ns。两激光器脉冲间隔从 200ns 到 100ms 可调,以满足从低速到高速流动测量的需要。

采用 RS-170 式互/自相关 CCD 摄像机记录流动图像,其分辨率为 640 像素 ×480 像素,采集速度 30 帧/s,每两帧图像之间的最小时间间隔约为 15μs,受激光器的工作频率(10Hz)的限制,系统的最大图像采集率为 20 帧/s。实验提供的示踪粒子直径为 0.6μm ~ 1.2μm,在实验条件下具有较好的流动跟随性。

### 3 实验方案

新型稳定器和 V 型稳定器实验件分别如图 1 及图 2 所示,两者槽宽相同,几何堵塞比为 11.5%,新型稳定器吹气射流经宽 2mm 的二维缝隙吹出,射流角分别为 90°,120°,180°。本文分别在来流 10m/s 和 20m/s 条件下对两型稳定器后的流动进行了测量,新型稳定器的射流速度分别为 10m/s 和 20m/s。以稳定器槽宽为特征尺度,来流雷诺数为 10<sup>4</sup> 量级。

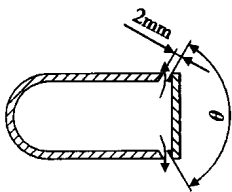


Fig. 1 Sketch of the EBMC flameholder

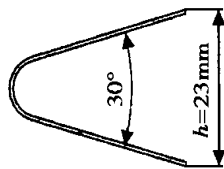


Fig. 2 Sketch of the V-gutter flameholder

当前 PIV 系统工作频率远低于尾流旋涡脱落频

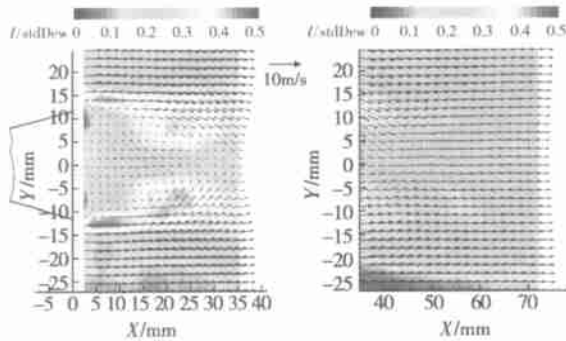
率,实际上测量的是流动的时间离散结果。每个工况下随机采集了 96 幅瞬时速度场,进而平均得到时均结果。采集图像的分辨率为 87μm ~ 90μm/像素,其大小不足以包含整个近尾迹的信息,因而对沿流向两相邻区域的流场进行了测量。在图像分析时,查问域大小为 64 像素 ×64 像素。

### 4 实验结果及分析

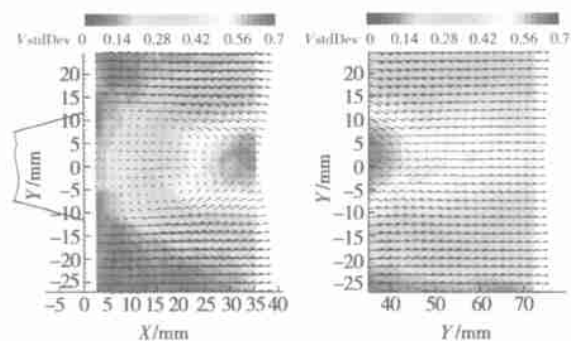
图 3 中 X 代表流向, Y 代表纵向,坐标原点为稳定器中轴线与稳定器尾缘交点。V<sub>m</sub> 为来流速度, V<sub>j</sub> 为尾缘吹气速度, {U StdDev}, {V StdDev} 分别表示 X 向、Y 向湍流脉动速度与来流流速之比, {Vel StdDev} 表示湍流脉动速度与来流速度之比。图 3(a) 中两图为沿流向两相邻测量区域的流场。所有速度矢量图的标尺相同。严格意义上讲,时均场应是若干瞬态场的统计结果,而本文最多情况下仅对 96 幅速度场进行了平均,这造成了时均场的结果不太规范,流场不太对称,但它基本可以体现时均场的特征。

#### 4.1 V 型稳定器时均流场分析

图 3 反映了低速回流区的存在,目前对其速度特性的研究已非常深入<sup>[2]</sup>。图 3(a), (b) 显示了 X 向的脉动速度在纵向截面上呈双峰分布,在剪切层及回流区核心处较大,而 Y 向则呈单峰分布,峰值在稳定器对称面上,且在回流区后驻点附近达到最大值。两方向湍流脉动不同, Y 向湍流脉动要强烈得多,这体现了由于涡的交替脱落引起的湍流各向异性。比较通用的涡粘性湍流模型恰恰假定了湍流的各向同性,导致模型不能很好地预测回流区。结合图 3(a), (b) 可见,湍流脉动在回流区后驻点和剪切层较强,这表明回流区和来流之间存在着较强的湍流脉动热质交换。



(a) Velocity vector and contour of axial fluctuating velocity

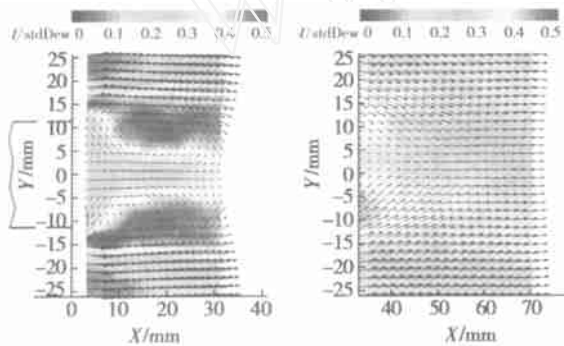


(b) Velocity vector and contour of transverse fluctuating velocity

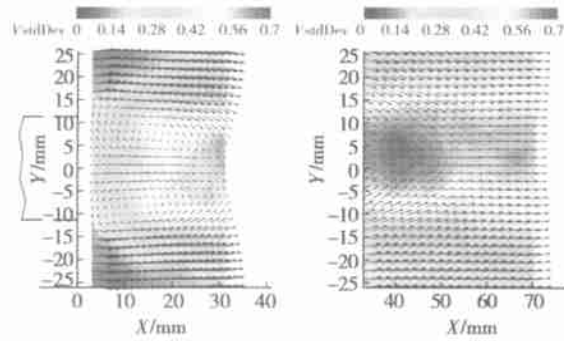
Fig. 3 Mean flow field behind the V-gutter flameholder V<sub>m</sub> = 10m/s

### 4.2 尾缘吹气式稳定器时均流场分析

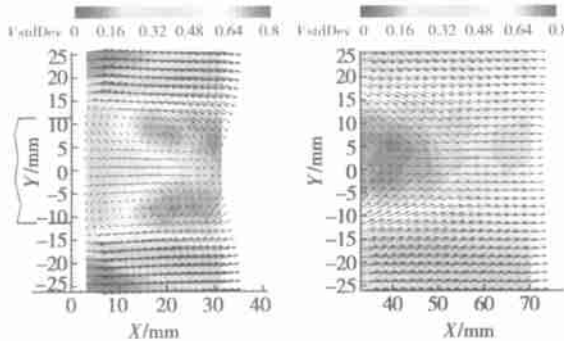
图4为来流与吹气射流速度均为10m/s时新型稳定器( $\theta = 180^\circ$ )后的时均流场。其形态与V型稳定器流场非常相似,回流区和剪切层是其流场的主要特征,但特点不同。V型稳定器中流动分离与剪切层形成是由稳定器壁面所引起,分离发生在稳定器尾缘尖角处;而尾缘吹气式火焰稳定器中流动分离是由于吹气射流的横向阻滞作用引起的,分离发生在射流后,吹气射流扩大了回流区,宽度约30mm,长度约33mm,相应回流率也增长为2.46%,相比同等气动阻塞比的V型稳定器,回流率仅为1.875%。这体现了新型火焰稳定器具有较高的回流率,有利于燃烧。



(a) Velocity vector and contour of axial fluctuating velocity



(b) Velocity vector and contour of transverse fluctuating velocity



(c) Velocity vector and contour of fluctuating velocity

Fig. 4 Mean flow field behind the novel flameholder ( $\theta = 180^\circ$ )  $V_m = 10\text{m/s}$   $V_j = 10\text{m/s}$

对比图3(a),(b),图4(a),(b),两稳定器湍流脉动的分布型很相近,X方向的脉动速度在近尾迹呈双峰对称分布,而Y方向脉动速度呈单峰分布,湍流同样为各向异性,湍流脉动速度在剪切层及回流区后驻点处较大,在回流区后驻点附近达到极值。但因为射流的搅扰作用,尾缘吹气式火焰稳定器X方向的脉动速度较V型稳定器X方向的脉动速度要大得多,几乎和Y方向脉动速度接近,这促进了新鲜混气与高温燃气的热质交换,对燃烧有利。

### 4.3 新型稳定器流场影响因素探讨

#### 4.3.1 吹气射流的影响

图5为来流10m/s,吹气射流20m/s下新型稳定器( $\theta = 180^\circ$ )后的时均流场。回流区宽度达40mm以上,回流率也增至3.5%左右。和图4(c)对比发现,吹气射流速度增大使射流与来流动量比增大,致使射流穿透加深,扩大了回流区,回流率也相应增加。同时增大的射流速度强化了对流场的搅扰,导致湍流脉动加剧,分布范围较广,这有利于燃烧的进行。

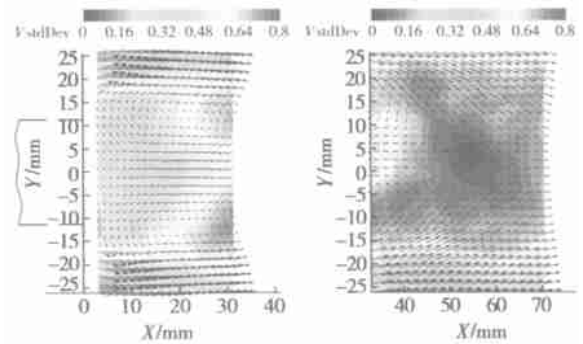


Fig. 5 Mean flow field behind the novel flameholder ( $\theta = 180^\circ$ )  $V_m = 10\text{m/s}$   $V_j = 20\text{m/s}$

#### 4.3.2 来流的影响

图6是来流20m/s,吹气射流10m/s下新型稳定器( $\theta = 180^\circ$ )后的时均流场。与图4(c)对比可见,随来流速度增加,回流区长度和宽度都减小,这与V型稳定器后回流区随来流速度增加而变长的规律不同。对于新型稳定器,来流速度增加导致吹气射流与来流的动量比减小,射流穿透深度降低,回流区变窄,且来流的受迫偏转角度变小,这相当于钝体稳定器槽宽变窄及顶角减小的情形,导致回流区长度也缩短。

#### 4.3.3 气动参数影响分析

图4(c)和图7显示了来流和射流速度相同,分别为10m/s和20m/s时的流态。两者回流区大小基本相同,湍流的脉动速度分布及量级也大致相当,结合上述对来流及射流速度影响的分析,可见在实验条件

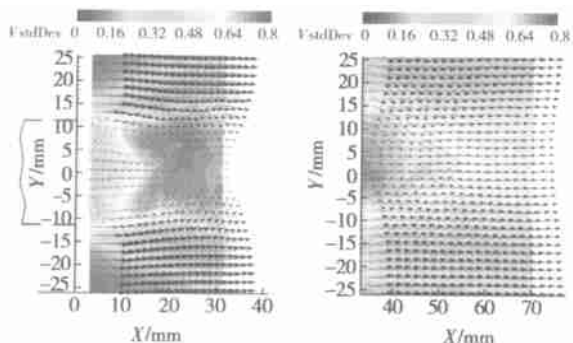


Fig. 6 Mean flow field behind the novel flameholder  
(  $\alpha = 180^\circ$  )  $V_m = 20\text{m/s}$   $V_j = 10\text{m/s}$

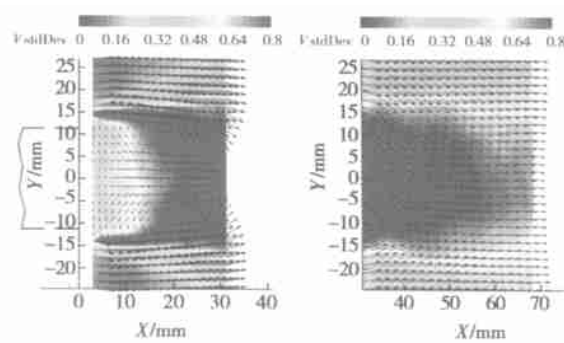


Fig. 8 Mean flow field behind the novel flameholder  
(  $\alpha = 90^\circ$  )  $V_m = 10\text{m/s}$   $V_j = 20\text{m/s}$

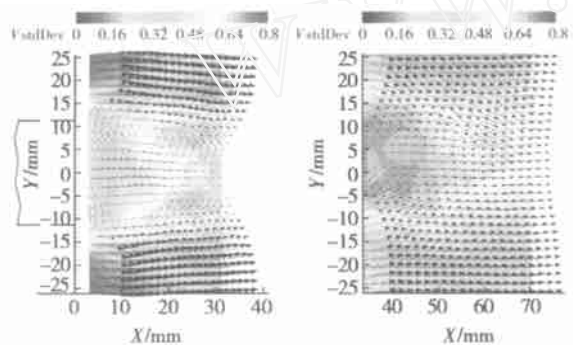


Fig. 7 Mean flow field behind the novel flameholder  
(  $\alpha = 180^\circ$  )  $V_m = 20\text{m/s}$   $V_j = 20\text{m/s}$

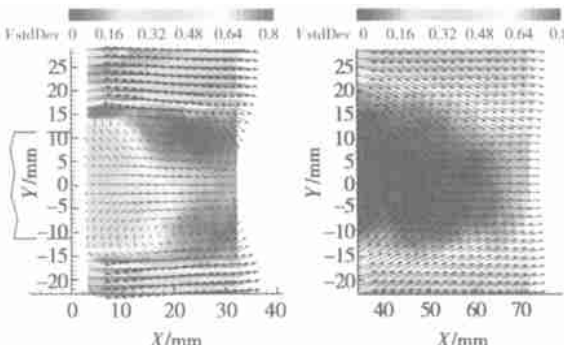


Fig. 9 Mean flow field behind the novel flameholder  
(  $\alpha = 120^\circ$  )  $V_m = 10\text{m/s}$   $V_j = 20\text{m/s}$

下影响新型稳定器流场的最终气动参数为吹气射流与来流的动量比,而不是单纯的来流速度或吹气射流速度。随吹气射流与来流动量比的增大,回流区增长,高湍流脉动区域范围变广,回流率也相应增加。

#### 4.3.4 射流角度的影响

图 8 及图 9 为来流 10m/s,吹气射流 20m/s 条件下新型稳定器射流喷射角 分别为 90 和 120 时其后的时均流场。对比图 5,图 8 及图 9,其他参数不变时,随射流角度的减小,回流区萎缩。的减小,使得 Y 向分速度降低,射流的横向分量与来流动量比变小,导致回流区变窄。这说明射流质量不变条件下,射流角度减小,不利于回流区的形成,不利于燃烧。但射流对来流的阻塞作用也相应减弱,流动损失下降,在发动机应用中,这使得推力增加。在稳定器的研究设计过程中,需综合考虑这两方面的影响,结合前人的经验及新型稳定器的前期研究发现,在射流与来流垂直条件下,稳定器的总体性能较好。

### 5 结 论

(1)尾缘吹气式火焰稳定器后存在着回流区,其特性与 V 型火焰稳定器基本相似,但吹气射流扩大

了回流区,增加了回流率,且 X 向湍流脉动速度明显增长,导致湍流脉动增强,对燃烧有利。(2)尾缘吹气式火焰稳定器是一种可控稳定器,射流与来流动量比是影响稳定器后流场的主要气动参数。(3)湍流脉动是各向异性的,X 向的脉动速度在纵向截面上呈双峰分布,在剪切层及回流区核心处较大,而 Y 向湍流脉动速度呈单峰分布。

#### 参考文献:

- [1] 岳连捷,杨茂林. 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).
- [2] Raffoul C N, Nejad A S, Gould R D, et al. An experimental and numerical study of the isothermal flowfield behind a bluff body flameholder[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME*, 1997, 119.
- [3] 岳连捷,刘宝杰,杨茂林. 尾缘吹气式稳定器近尾迹流动研究[J]. 工程热物理学报,2001,22(2).
- [4] 岳连捷,杨茂林. 火焰稳定器稳焰机理的非定常观点探讨[J]. 航空动力学报,2001,16(4).
- [5] 傅维镛,张永廉,王清安. 燃烧学[M]. 北京:高等教育出版社,1989.

(编辑:梅 瑛)