

文章编号:1000-8055(2017)01-0027-08

doi:10.13224/j.cnki.jasp.2017.01.005

不同隔板构型下带反应超声速混合层实验

李 朗^{1,2}, 晏至辉², 刘 或³

(1. 中国科学技术大学 工程科学学院 近代力学系, 合肥 230027;

2. 中国空气动力研究与发展中心 吸气式高超声速技术研究中心, 四川 绵阳 621000;

3. 国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 为了考察超声速混合层混合、燃烧流场特性,并探索其被动增强方法,利用高速纹影、自发辐射成像和平面激光诱导荧光(PLIF)技术对压力匹配条件下的超声速混合层在不同隔板构型下的流场特性进行研究.结果表明:相对于对混合层混合的影响,凹腔对燃烧的影响明显受到抑制;尾部交错结构隔板促进混合层流向涡的产生,大大提高了混合层内燃烧强度.

关 键 词: 超声速混合层; 自发辐射; OH基 PLIF; 燃烧; 流向涡

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Experiment on supersonic reacting mixing layer of splitters with different geometric configurations

LI Lang^{1,2}, YAN Zhi-hui², LIU Yu³

(1. Department of Modern Mechanics, School of Engineering Science,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Airbreathing Hypersonics Research Center,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

3. College of Aerospace and Materials Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: To investigate the mixing, combustion characteristic and passive mixing-enhancement methods of supersonic mixing layer, pressure matched supersonic mixing layer with different geometric configurations was explored using high-speed schlieren photographs, spontaneous emission imaging and planar laser induced fluorescence (PLIF) imaging. Results showed that, the influence of cavity on supersonic mixing layers was repressive under combustion condition. Splitters with sawtooth trail induced large-scale streamwise vortexes and great influence of combustion enhancement in supersonic mixing layer.

Key words: supersonic mixing layer; spontaneous emission;
OH-PLIF (hydroxide radical-planar laser induced fluorescence);
combustion; steamwise vortex

随着超燃冲压发动机特别是双燃烧室冲压发
动机研究的发展,带反应的超声速混合层研究受

到越来越多的重视.带反应的超声速混合层流场
结构复杂,不仅包括冷态下的膨胀波/混合层、激

收稿日期:2015-05-18

作者简介:李朗(1979—),女,讲师,博士生,研究领域为流体力学. E-mail:18845213@qq.com

引用格式:李朗,晏至辉,刘或.不同隔板构型下带反应超声速混合层实验[J].航空动力学报,2017,32(1):27-34. LI Lang, YAN Zhihui, LIU Yu. Experiment on supersonic reacting mixing layer of splitters with different geometric configurations[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 27-34.

波/边界层及激波/混合层相互作用,还涉及到激波/燃烧和混合/燃烧等相互作用,实验装置设计及实验难度都很大,因此对带反应超声速混合层实验研究相对较少.

Miller 等^[1-3]研究了不同对流马赫数及密度比的带反应混合层,分析了放热效应对混合层增长速率的影响. Hall^[4]采用纹影和阴影技术,研究了对流马赫数为 0.1~1 条件下,放热对带反应混合层的影响. Barlow 等^[5]采用 PLIF 对超声速反应射流近场进行成像,研究可压缩效应对环形反应混合层大尺度结构自组织程度. 刘彧等^[6-7]研究了不同隔板构型下的超声速混合层流场特性. 在混合层混合/燃烧增强方面, Rogers 等^[8]研究了燃料入口上游斜坡装置的混合增强能力. Seiner^[9]研究了流场中短小凸台的混合增强特性. Yu^[10]分析了混合层上游凹腔的非定常特性,并考察了其混合效果. 于江飞等^[11]采用大涡模拟方法初步研究了超声速混合层的混合增强措施.

由以文献[1-11]可以看出,对于超声速混合层的研究主要以薄隔板混合层为研究对象,而混合增强装置对燃烧影响方面尚缺乏深入研究. 本文利用高速纹影、OH 基自发辐射成像和 PLIF 技术对 5 种隔板构型超声速混合层冷态、燃烧以及点火过程流场进行可视化成像,着重考察隔板构型对混合层燃烧的影响.

1 实验系统和方案

1.1 实验设备简介

本文的实验工作均在超声速燃烧机理研究实验台^[12-13]上开展(如图 1 所示). 实验中,超声速来流通过固定隔板分为上、下两层(如图 2 所示),通过更换位于上层末端的可更换隔板,可实现混合层上层来流流道局部型面的改变. 上层来流马赫数 Ma_1 为 1.5,总温为 300 K,冷流实验时组分为氮气,热流实验时组分为氮气和氢气混合气. 下层来流为空气加热器尾喷管出口气体,来流马赫数 Ma_2 为 2.5,加热器点火状态(标记为 S_{hot})和不点火状态(标记为 S_{cold})下,气流总温则分别为 1486 K 和 300 K,具体参数见表 1. 上、下层来流在隔离段出口(即观测段入口)静压均为 60 000 Pa. 观测段流道高度为 78 mm,其中含 10 mm 的隔板厚度;观测窗口沿流向距离为 140 mm,流道宽度为 50 mm.

冷流实验中采用高速纹影系统进行观测. 其中,成像系统的 CCD(charge-coupled device)为

FASTCAM-ultima APX 高速摄影仪,最高拍摄速度达到 120 000 帧/s,最小快门时间为 1/120 000 s. 纹影法是一种较为普遍的流场显示方法,其原理是将流场中的介质密度梯度变化通过穿过流场光线亮度变化显示出来,从而显示流场中诸如激波、膨胀波等结构. 高速纹影系统则是通过将纹影系统光线成像至高速相机 CCD,高速捕捉流场细节.

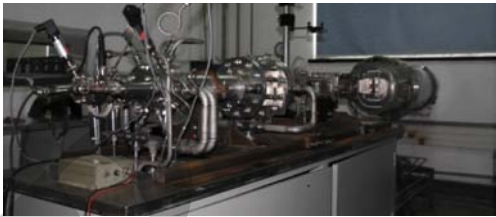


图 1 直连式实验台
Fig. 1 Direct-connected experiment table

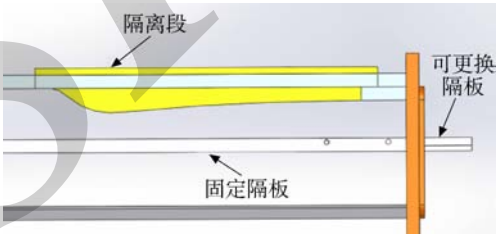


图 2 隔板结构示意图
Fig. 2 Schematic of splitter configuration

表 1 加热器出口产物参数
Table 1 Export product parameters of heater

参数	状态	
	S_{cold}	S_{hot}
Ma	2.5	2.5
p/Pa	60 000	60 000
T_0/K	300	1486

实验中采用氢气和空气作为燃烧介质,通过 OH 基自发辐射^[14]和 OH 基 PLIF 成像^[15-16]来观测混合层燃烧流场. OH 基自发辐射成像接收装置的增强 CCD(ICCD)相机由探头和控制器两部分组成. ICCD 相机前所采用滤波片组波长透过范围为 300~400 nm,可满足 OH 基自发辐射光波(波长为 300~325 nm)的高穿透性. 为了提高图像信噪比,ICCD 相机曝光时间为 50 μs ,故 OH 基自发辐射成像为时均图像.

OH 基 PLIF 成像由激光光源系统,激光传

播系统、成像系统及控制系统 4 个部分组成,其光路如图 3 所示,图中 M 表示镜片;L1 表示凹透镜;L2 表示凸透镜;L3 表示柱面透镜;L4 表示球面镜;BD 表示光束收集器;P 表示滤波片;U 表示 UV(紫外线滤光)镜头。DG535 为 4 通道数字延时脉冲器;Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) 为钕铝石榴石晶体激光器。激发光源发出用于激发 OH 基的紫外激光,其波长为 283.553 nm。光源发出的激光经透镜组(L1, L2, L3, L4)的发散汇聚作用,形成片光从顶部沿展向中心线垂直切入观察窗口。成像探测器系统用于收集 PLIF 信号并成像,其使用的成像装置

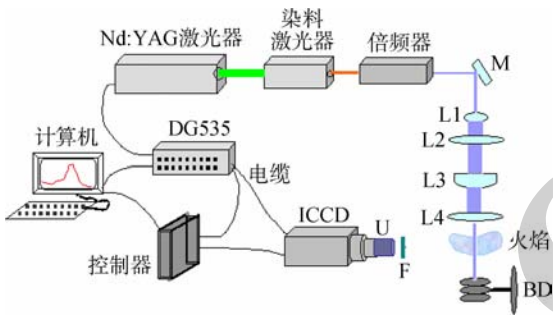


图 3 PLIF 测量系统示意图

Fig. 3 Schematic of PLIF measurement system

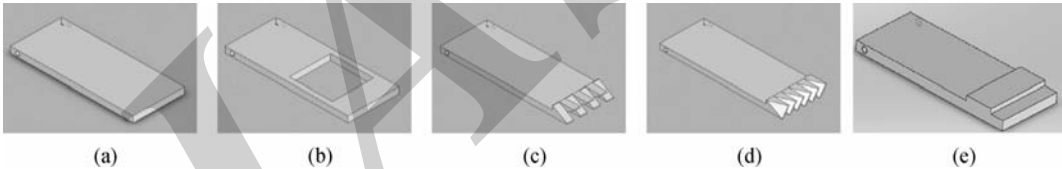


图 4 不同可更换隔板三维结构示意图

Fig. 4 Three-dimensional schematic of different replaceable splitters

2 实验结果及分析

2.1 混合层冷态流场结构

在超声速混合层流场中存在复杂的波系结构,流动、混合及燃烧等物理过程强烈耦合。为了更加深入地认识混合层燃烧流场点火、火焰传播及火焰结构等,首先给出超声速混合层冷态流场基本结构。图 5 为平板隔板混合层实验纹影图像。需要说明的是,纹影系统反射镜为直径为 120 mm 圆形镜面,故纹影图像显示范围为从隔板后缘起接近 120 mm 的流向距离。

如图 5 所示,气流方向从左至右,上、下两股气流在隔板出口(观测窗左侧)开始掺混,在具有一定厚度的隔板出口处产生膨胀波系 1,在隔板后缘附近出现流场中最低压力区 5。随着上下层

波片与自发辐射成像相同^[14,17]。

1.2 实验方案介绍

和滤本文所开展的超声速混合层点火实验中,没有安装混合层的点火系统,而是采用了在观测段后端氢气自点火方式。采用该点火方式会产生如下问题:若上层混合气中氢气摩尔分数太低,自点火难度较大;若氢气摩尔分数过高,则易在下游排气装置中发生爆炸,导致观测窗口玻璃破损。经过多次不带玻璃观测窗点火实验调试,实验中上层混合气取氢气与氮气的摩尔分数为 1:1 较为合适,可解决上述问题。上层来流其他参数如马赫数、静压等与冷流工况下一致。开展燃烧实验时,先开启隔板下层加热器来流及上层氮气,稳定工作一段时间后,再开启氢气阀门,保证一次实验中观察到完整的点火和火焰传播过程。

实验采用的可更换隔板如图 4 所示。其中,图 4(a)为基准工况平板隔板;图 4(b)为凹腔隔板,凹腔后缘距离隔板出口距离为 20 mm,凹腔宽度为 40 mm,长深比为 7;图 4(c)为尾部上下交错构型隔板;图 4(d)为尾部左右交错构型隔板;图 4(e)为凸台隔板,凸台流向长度为 20 mm,其后缘距离隔板出口为 10 mm,凸台高度为 2 mm。

气流向下游流动并相互挤压,产生斜激波 2 和 7,混合层内部发生强烈的动量和质量输运。激波与膨胀波向下游发展,并在上下固壁面处发生反射,在上壁面膨胀波反射位置伴随着压缩波 3 产生。

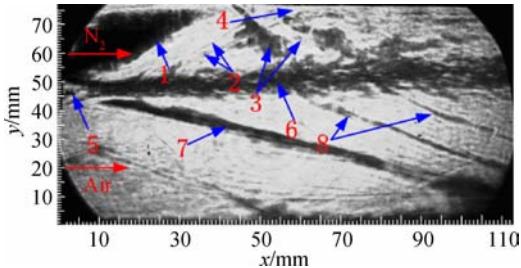


图 5 平板混合层实验纹影图像

Fig. 5 Schlieren photograph of mixing layer with flat splitter

激波入射到上壁面上,形成壁面分离区 4;激波入射到混合层上,使混合层发生小的偏折.当反射激波打在混合层上时,激波穿过混合层发生折射 8.上下层气流之间的相互掺混引起密度梯度明显变化,形成超声速混合层 6.

由超声速混合层的非定常特性可知,图 5 中所列出的混合层厚度、边缘结构、激波入射和反射位置都会随时间发生振荡,图 6 给出了平板混合

层 6 个不同时刻的纹影图像,从图中可以看出,随着时间的变化,激波入射、反射的位置、混合层增长速度、厚度及边缘结构等都发生了振荡,但其振荡的幅度并不大.

2.2 混合层燃烧流场点火过程及火焰结构

在开展带反应超声速混合层火焰结构研究前,有必要对其初始点火过程进行描述.图 7 为混

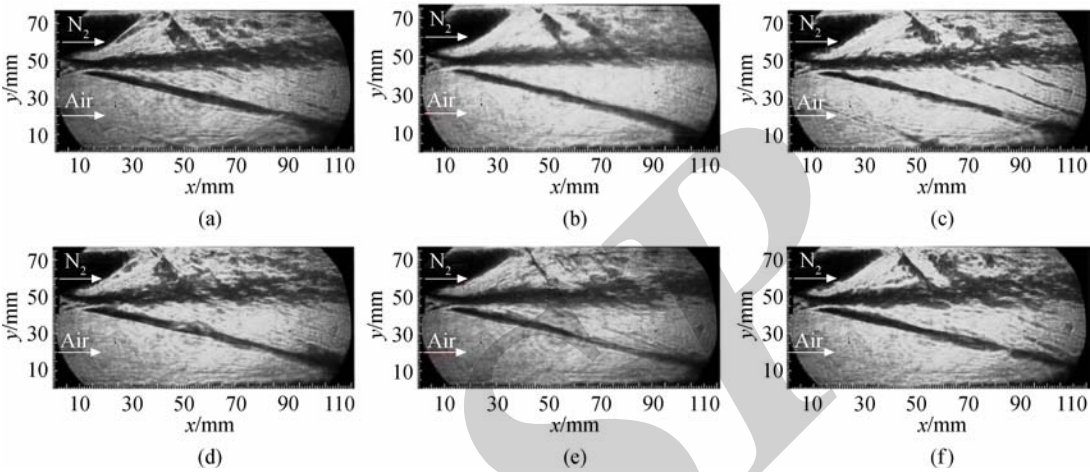


图 6 基准工况下不同时刻的纹影图像
Fig. 6 Schlieren photographs of benchmark case on different times

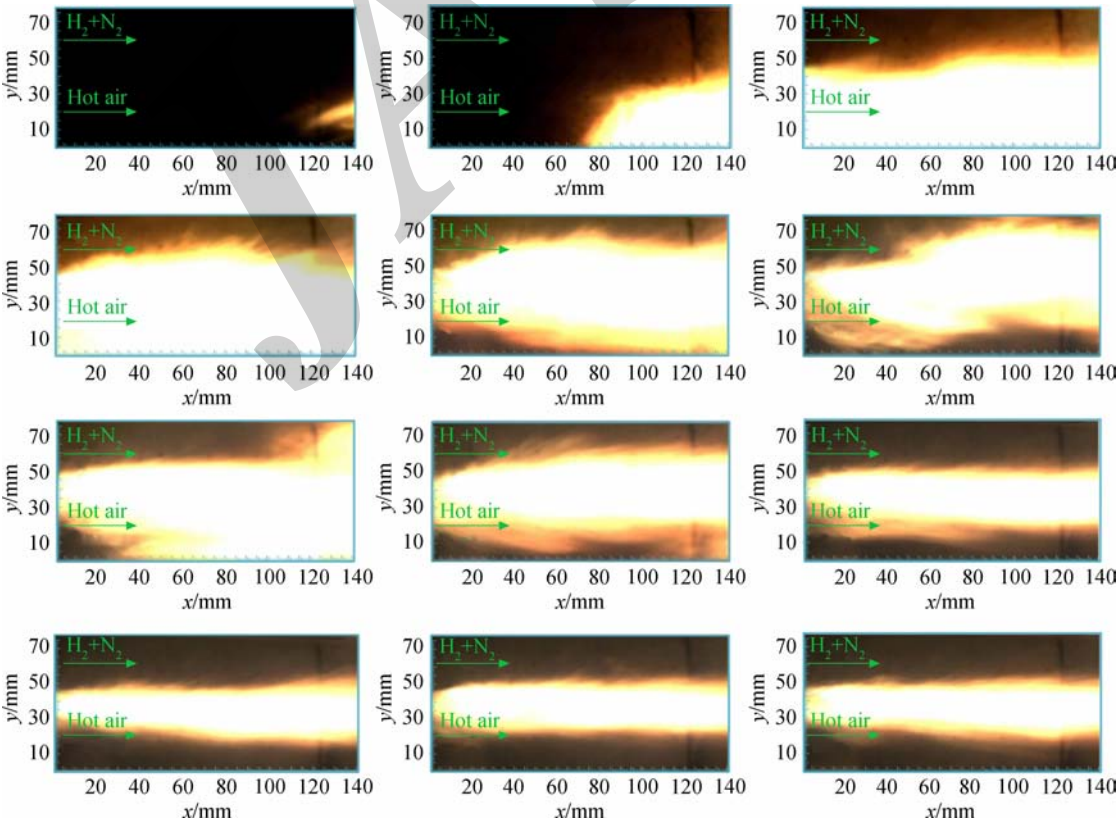


图 7 带反应混合层点火过程
Fig. 7 Ignition process of reacting mixing layer

合层点火过程的高速摄影图像,其中,前 8 幅为连续曝光图像,后 4 幅取点火完成后间隔不超过 2 帧的任意 4 幅(拍摄间隔 4 000 帧/s).从图中可以观测到:火焰在观测窗口贴近下壁面位置由下游上传至上游,第 1 帧图片火焰刚刚进入观测窗口,第 2 帧则上传至观测窗中间位置,第 3 帧火焰则已充斥整个观测窗下层区域,接下来 5 帧图片记录了火焰稳定在混合层的过程.如最后 4 帧图片,火焰在混合层区域稳定后,氢气的燃烧反应集中在混合层区域,观测窗下层火焰消失.结合火焰传播位置和拍摄时间间隔可以估算火焰传播速率,约为 1 500 m/s.同时,考虑到观测窗区域混合层点火前下层来流马赫数为 2.5,可以推断火焰传播为爆轰波形式.通过图 6 和图 7 的对比可以看出:混合层的燃烧区域与不点火条件下掺混区基本一致,并可以观测到混合层燃烧具有明显的振荡特性.

图 8~图 12 为不同构型隔板条件下,超声速混合层燃烧流场的 OH 基自发辐射图像.图中利用伪彩颜色表征火焰相对强度,蓝色和红色分别表征最强和最弱燃烧强度.鉴于 CCD 曝光和混合层点火控制的同步较为困难,每种构型隔板只给出 2 帧 OH 基分布图像.从图中可以得出以下结论:

1) 平板隔板超声速混合层燃烧流场 OH 基分布区域与纹影所拍摄不点火条件下混合层掺混

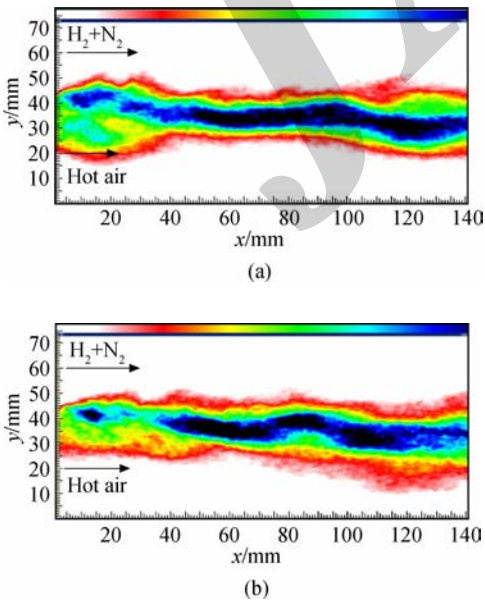


图 8 平板隔板构型混合层燃烧流场 OH 基自发辐射
Fig. 8 OH radical spontaneous emission images of mixing layer combustion flowfield with flat splitter

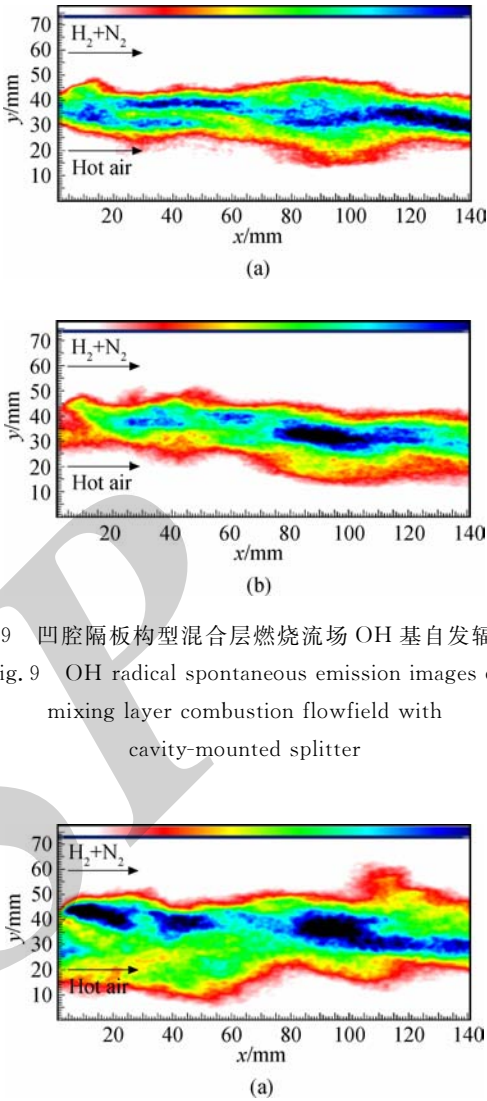


图 9 凹腔隔板构型混合层燃烧流场 OH 基自发辐射
Fig. 9 OH radical spontaneous emission images of mixing layer combustion flowfield with cavity-mounted splitter

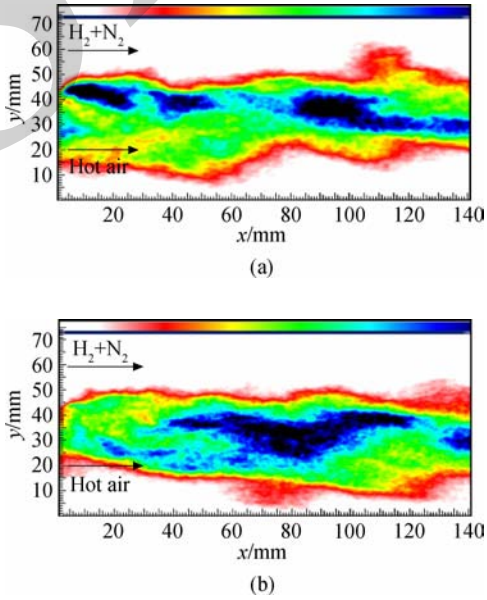


图 10 尾部上下交错隔板构型混合层燃烧流场 OH 基自发辐射
Fig. 10 OH radical spontaneous emission images of mixing layer combustion flowfield with up-down staggered splitter

结构以及高速相机所拍摄火焰结构吻合.混合层中心区域 OH 基浓度(也即燃烧强度)高于边缘区域.隔板后缘往下游方向 10 mm 以内的 OH 基浓度较低.

2) 凹腔隔板混合层的 OH 基浓度分布与平

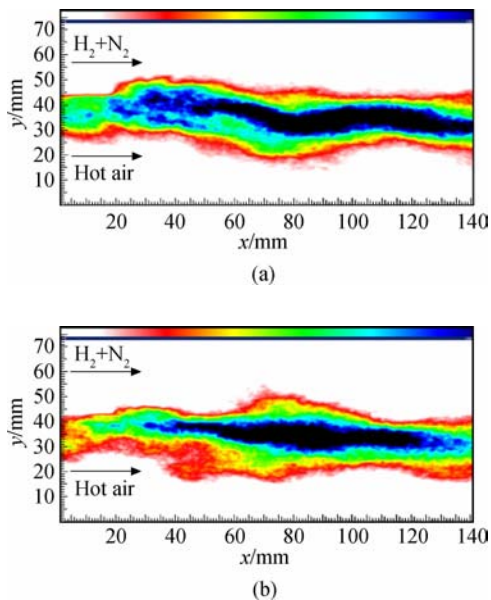


图 11 尾部左右交错隔板构型混合层燃烧流场 OH 基自发辐射

Fig. 11 OH radical spontaneous emission images of mixing layer combustion flowfield with left-right staggered splitter

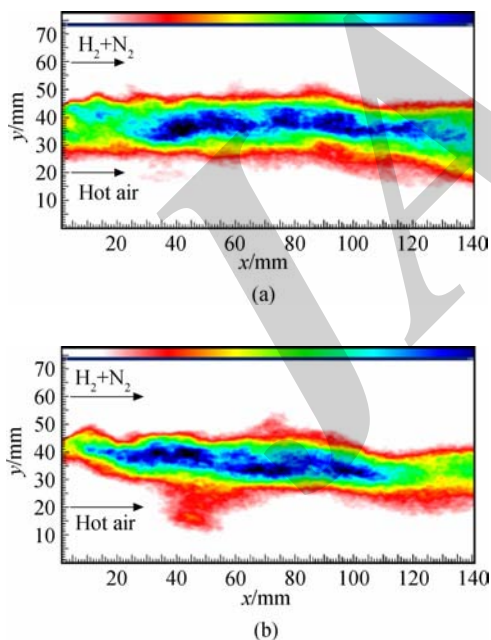


图 12 凸台隔板构型混合层燃烧流场 OH 基自发辐射
Fig. 12 OH radical spontaneous emission images of combustion flowfield with vibration splitter

板混合层大体相当。相对于文献[14]的冷流状态,隔板上凹腔装置对超声速混合层燃烧流场的作用被显著抑制而无法体现。

3) 凸台隔板超声速混合层燃烧流场在观测窗上游 OH 基具有较高的浓度,往下游发展,则

明显降低。可以推断由于上层超声速经过凸台装置形成激波对气流的升温作用,混合层掺混初期燃烧明显增强。而随着混合层往下游发展,由于激波对气流总压的衰减作用,混合层的掺混、增长能力受到抑制,其燃烧强度也有所降低。

4) 作为被动混合增强装置,尾部上下交错构型混合层燃烧区域明显大于平板隔板工况,但是其中心蓝色区域分布较散。尾部左右交错构型隔板混合层燃烧流场在观测窗上游区域流向涡结构较稳定,掺混及燃烧强度不高;往下游发展,随着混合层流向涡结构发展,燃烧增强。

综上,不带燃烧反应的超声速混合层掺混状态基本决定其燃烧形态,而同时燃烧反应对流动掺混亦有一定影响。需要指出的是,OH 基自发辐射所拍摄图像为时均图像,无法反应混合层火焰瞬时形态。因此,为了进一步了解超声速混合层燃烧流场火焰结构,针对本文几种工况,开展了 OH 基 PLIF 实验研究。

2.3 基于 OH 基 PLIF 图像的瞬态火焰结构

本文的 OH 基 PLIF 实验,入射激光片光与观测窗内宽度中心线重合并垂直于流道上壁面。受限于入射激光片光宽度,单次实验拍摄仅能拍摄一半长度的观察窗内流场(沿流向),因而以下每个工况图片均为两次拍摄图片的拼接图。同一工况的实验、拍摄过程及图像后处理均尽量保持条件一致。图 13~图 17 给出了各种构型隔板混合层燃烧流场的 OH 基 PLIF 图像。从图中可以得出以下结论:

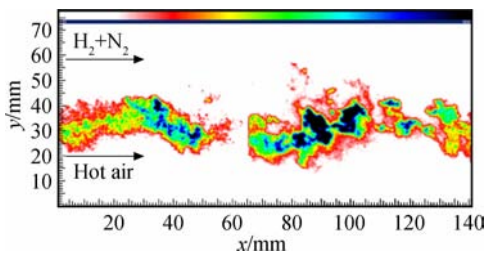


图 13 平板隔板混合层燃烧流场 OH 基 PLIF 图像
Fig. 13 OH-PLIF images of mixing layer combustion flowfield with flat splitter

1) 相对于自发辐射图像,PLIF 图像分布更为离散,体现出较强的不均匀性,局部近似于“涡”结构,这也展示了混合层内部火焰的湍流特性。

2) 尾部上下交错隔板 OH 基分布的区域明显大于其他构型隔板,但其燃烧强度也较为离散,这是由火焰的湍流特性所决定,同时也有部分原

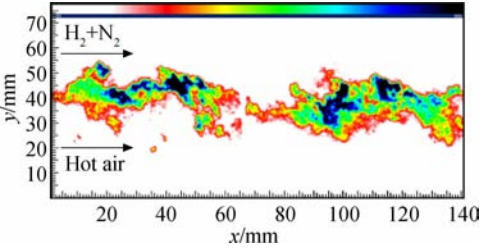


图 14 凹腔隔板混合层燃烧流场 OH 基 PLIF 图像
Fig. 14 OH-PLIF images of mixing layer combustion flowfield with cavity-mounted splitter

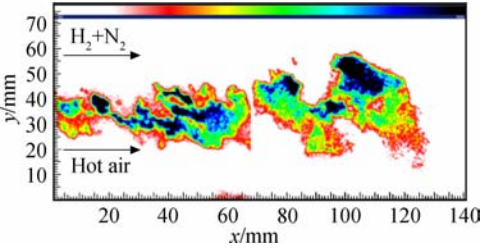


图 15 尾部上下交错隔板混合层燃烧流场 OH 基 PLIF 图像
Fig. 15 OH-PLIF images of mixing layer combustion flowfield with up-down splitter

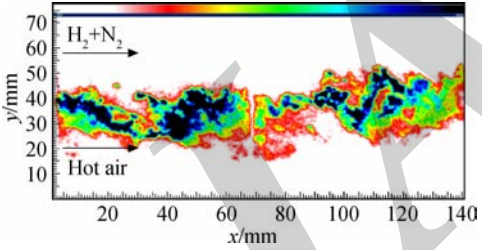


图 16 尾部左右交错隔板混合层燃烧流场 OH 基 PLIF 图像
Fig. 16 OH-PLIF images of mixing layer combustion flowfield with left-right staggered splitter

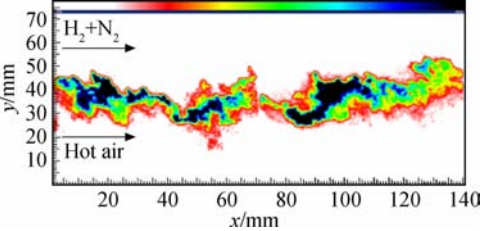


图 17 凸台隔板混合层燃烧流场 OH 基 PLIF 图像
Fig. 17 OH-PLIF images of mixing layer combustion flowfield with vibration splitter

因是 OH 基的激光诱导荧光信号的强度较弱,且激光能量不均造成的. 尾部左右交错隔板中 OH

基的分布区域较窄,与 OH 基自发辐射图像相似,其在混合层中 OH 基的浓度明显高于其他隔板类型.

3) 相对于不带燃烧反应的超声速混合层混合层,带燃烧反应超声速混合层的增长速率变小.

3 结 论

本文首先利用高速纹影对超声速混合层流动、点火过程和震荡特性做出描述,然后,利用 OH 基自发辐射和 OH 基 PLIF 技术,考察了不同隔板构型条件下带反应超声速混合层的流动、燃烧特性. 得到结论如下:

- 1) 超声速混合层 OH 基分布构型与冷态条件下混合层流场构型基本相似,混合层的流动、掺混决定了燃烧区域大小和燃烧强度;
- 2) 冷态条件下,超声速混合层具有明显的震荡特性;燃烧条件下,火焰也在混合层附近小幅振荡;
- 3) 凸台产生的激波对超声速混合层在流场下游的增长及燃烧起到抑制作用;
- 4) 带反应超声速混合层流场三维特性明显,左右交错构型隔板增强了混合层内展向混合,使得燃烧强度得到增强.

参考文献:

[1] Miller M F I T C, Yip B, Bowman C T. An experimental study of the structure of a compressible, reacting mixing layer[R]. AIAA 93-0354, 1993.

[2] Miller M F I T C, Seitzman J M. Compressibility effects in areacting mixing layer[R]. AIAA 93-1771, 1993.

[3] Miller M F I T C, Seitzman J M. An experimental investigation of supersonic reacting mixing layers[R]. AIAA 94-0823, 1994

[4] Hall J L. An experimental investigation of structure, mixing and combustion in compressible turbulent shear layers [M]. Belvoir: Defense Technical Information Center, 1991.

[5] Barlow R S, Fourquette D C, Mungal M G, et al. Experiments on the structure of an annular compressible reacting shear layer[J]. AIAA Journal, 1992, 30(9): 2244-2251.

[6] 刘戥,周进,晏至辉. 不同隔板构型下的超声速混合层流场特性[J]. 国防科学技术大学学报, 2013, 35(5): 1-5.

LIU Yu, ZHOU Jin, YAN Zhihui. Study on the flow fields of supersonic mixing layer with splitters of different geometric configurations[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(5): 1-5. (in Chinese)

[7] 刘戥. 双燃烧室冲压发动机混合增强及燃烧流场的实验和数值仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

LIU Yu. An experimental and numerical investigation of mixing enhancement and combustng flow field of dual

- combustor ramjet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [8] Rogers R C C D, Pa G R W. Experimental supersonic combustion research at NASA Langley[R]. AIAA 98-2506, 1998.
- [9] Seiner J M G G E. Effect of tabs on mixing on round jets [R]. AIAA 98-2326, 1998.
- [10] Yu K H S K C. Role of large coherent structures in turbulent compressible mixing[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, 14(1): 75-84
- [11] 于江飞, 晏至辉, 刘卫东. 双燃烧室冲压发动机三维隔板后缘构型数值研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(4): 108-112.
- YU Jiangfei, YAN Zhihui, LIU Weidong. Numerical study for three-dimensional clap board models in dual combustor ramjet[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2010, 30(4): 108-112. (in Chinese)
- [12] 晏至辉. 超声速混合层混合、燃烧机理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- YAN Zhihui. Investigations on mixing and combustion mechanism of supersonic mixing layers[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 晏至辉. 双燃烧室冲压发动机超声速混合层混合增强数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 821-828.
- YAN Zhihui. Numerical study on mixing enhancement for supersonic mixing layer in dual combustor ramjet[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 821-828. (in Chinese)
- [14] 耿辉, 翟振辰, 桑艳, 等. 利用 OH-PLIF 技术显示超声速燃烧的火焰结构[J]. 国防科学技术大学学报, 2006, 28(2): 1-6.
- GENG Hui, ZHAI Zhenchen, SANG Yan, et al. Reveal the flame structure of supersonic combustion using OH-PLIF technology[J]. Journal of National University Defense Technology, 2006, 28(2): 1-6. (in Chinese)
- [15] 李麦亮. 激光光谱诊断技术及其在火箭发动机燃烧研究中的应用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- LI Mailiang. Studies on laser spectroscopy technology and its application to combustion diagnosis in the jet engine [D]. Changsha: National University Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [16] 耿辉. 超声速燃烧室中凹腔上游横向喷注燃料的流动、混合与燃烧特性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- GENG Hui. Investigation of flow, mixing and combustion properties of transverse fuel injection up stream of the cavity in a supersonic combustor[D]. Changsha: National University Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] 范周琴. 超声速湍流燃烧火焰面模型判别、建模及应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- FAN Zhouqin. Investigation of validation, modeling and application of flamelet model in supersonic turbulent combustion[D]. Changsha: National University Defense Technology, 2011. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)