

# 层流预混 V 形火焰中的湍流

张孝谦<sup>①</sup> 雷宇<sup>①</sup> 王宝瑞<sup>②</sup> 王岳<sup>①</sup> 韦明罡<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; <sup>②</sup>中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

**摘要** 研究火焰中的情况, 发现即使层流预混 V 形火焰中也存在着强烈的速度脉动. 这种速度脉动与预混可燃气体的当量比(化学反应因素)密切相关, 而受来流速度的影响较小. 火焰中心区速度的概率分布函数呈“平顶型”. 分析认为火焰与流动的相互作用不仅在流场大尺度空间内影响火焰特性, 而且在火焰中小尺度空间内也存在着火焰(化学反应)与流动的相互作用, 其结果之一就是火焰中产生小尺度湍流, 这种小尺度湍流将在火焰中小尺度空间内影响火焰特性.

**关键词** 火焰与流动相互作用 火焰产生湍流 火焰中小尺度结构

几乎所有的实用燃烧装置中燃烧过程都是在流动中进行的. 火焰与流动相互作用是燃烧科学与技术中最具挑战性的领域之一. 由于它密切地关系到火焰结构、火焰传播、火焰稳定、火焰锋面不稳定性、烟黑过程及污染物形成等燃烧过程的一些基本环节, 所以它也一直是燃烧研究的重点课题之一. 人们曾对火焰与湍流的相互作用进行了大量的研究, 并取得很多重要结果. 但是由于问题本身的复杂性, 火焰与流动相互作用的物理实质仍然不够清楚, 还有很多模糊之点有待进一步研究.

早在 20 世纪 50 年代初期, Karlovitz<sup>[1]</sup>和他的合作者在研究湍流燃烧时就首次提出了“火焰产生湍流”的概念. 随后, Eschenroeder<sup>[2]</sup>从理论上讨论了在火焰中由于化学潜能释放引起气体热膨胀从而增强湍流的机理. Yoshida 和 Tsuji<sup>[3]</sup>在测量非受限火焰中脉动速度的轴向分量时发现在火焰区内湍流增强的趋势. Moreau 和 Boutier<sup>[4]</sup>发现脉动速度的轴向分量的均方根值在火焰中增加. Bray 和他的合作者<sup>[5]</sup>在讨论火焰产生湍流的机理时认为火焰引起的浮力既可能增强, 也可能减弱湍流. 近年来, Driscoll 及其合作者<sup>[6-8]</sup>利用微重力条件研究了火焰与旋涡的相互作用, 发现当火焰与旋涡相遇时, 来流旋涡即消失, 而在火焰后(燃烧产物区)却产生一个新的向相反方向旋转的旋涡. 但是所有这些研究均仅注意到了火焰前、后的情况, 并未仔细研究火焰中的情况. 本项研究把注意力集中于火焰区内, 探索火焰与流动相互作用在火焰区内的行为.

## 1 实验装置

实验在国家微重力实验室预混燃烧实验台上进行. 该实验台具有燃烧器出口保护气流通道、流量和当量比自动计算和显示装置、实验台自动控制装置、激光诊断用示踪粒子发生装置、可移动点火机构以及配合光学诊断的燃烧器三维移动机构, 辅以激光 Doppler 测速仪(LDV)、相干反 Stokes Raman 光谱仪(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy, CARS)、热线风速仪、激光纹影及干涉仪等多种测量系统, 可用于不同流速、不同当量比下的层流及湍流燃烧

2003-01-02 收稿, 2003-04-09 收修改稿

实验研究.

实验使用甲烷-空气预混气体建立 V 形火焰, 实验段结构及典型火焰如图 1 所示. 空气和甲烷分别由实验段下部经混合器进入, 实验段内由下至上设有钢球气流均匀器、管形整流器和气团破碎网(三层)用以破碎气流中大尺度涡团, 并经一定长度直管段获得较为理想的层流流动. 燃烧段出口处可装设不同密度的湍流发生网格以产生不同强度和尺度的网格湍流, 用于湍流实验工况. 实验段出口还设计有保护气通道, 经整流后的保护气以同轴方式射出, 用以消除流动气流与环境静止气体间剪切层对测量火焰区域的影响. 甲烷、空气和保护气流量分别由三台 1 级精度的质量流量计监控, 通过改变其配比可获得不同出口平均流速和不同当量比的实验工况. 燃烧实验段内径为 62 mm, 试验段出口处管壁厚 3 mm, 保护气通道外径 92 mm, 下游距出口 20 mm 处设有直径为 2 mm 的火焰稳定杆, V 形火焰稳定在其下游.

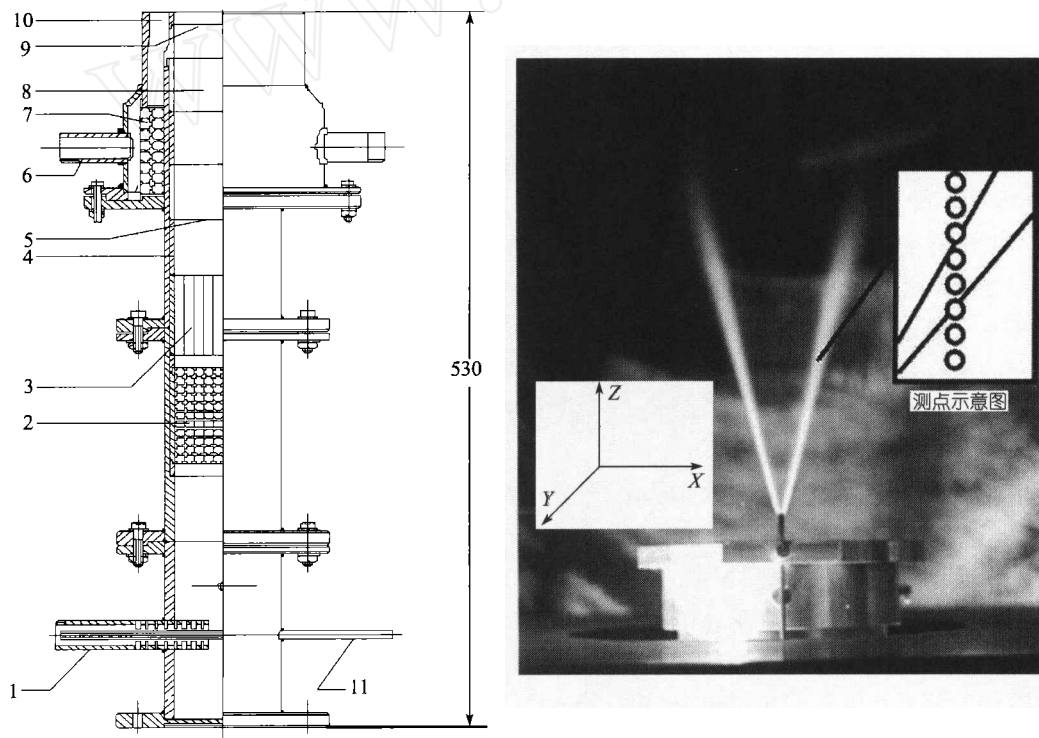


图 1 实验段结构及火焰测量示意图

1 示空气入口, 2 示钢珠气流均匀器, 3 示管形整流器, 4 示衬套, 5 示气团破碎网, 6 示保护气入口, 7 示保护气流速均匀器, 8 示火焰筒内腔, 9 示湍流网格, 10 示保护气通道, 11 示燃料入口

实验段安装于可在  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  3 个正交方向上移动, 并绕  $Z$  轴转动的坐标架上.  $Z$  轴与燃烧器中心轴线重合.  $Z$  向, 即竖直方向上可获得低至 0.07 mm 的移动精度. 实验主要依靠热线风速仪和激光 Doppler 测速仪(LDV)来得到流场特性数据.

实验使用 TSI 二维热线风速仪. 由于热线风速仪仅能在冷态下使用, 且为接触式测量, 对测量精度带来一定影响, 但因其使用方便, 不依赖于局部示踪粒子密度, 测量稳定性高, 实验中主要用于冷态流场的测量并为 LDV 测量提供基准数据.

一维激光 Doppler 测速系统被用于本实验的热态测量, 测速系统图如图 2 所示. 由于热态

环境下火焰对激光 Doppler 测速系统产生较大的测量干扰, 使得后向式 LDV 测量系统难以获得理想的 Doppler 信号. 为提高测量信噪比, 本系统依托一台一维 QSP 后向式 LDV 测速仪, 按前向式原理搭建了 LDV 测量系统. 系统激光光源使用一台 18 mW 的 He-Ne 气体激光器, 经分光系统使二测量光束交于测量点处. 接收光路利用 QSP 后向式 LDV 测速仪, 调节其接收焦点与测量点重合, 对后处理软件进行相应的参数调整后即可在热态下获得高信噪比的 Doppler 信号, 从而较好地解决了热态测量干扰问题.

本实验采用的示踪粒子为  $ZrO_2$  专用 Doppler 实验示踪粒子, 标称平均粒径  $< 3 \mu m$ .

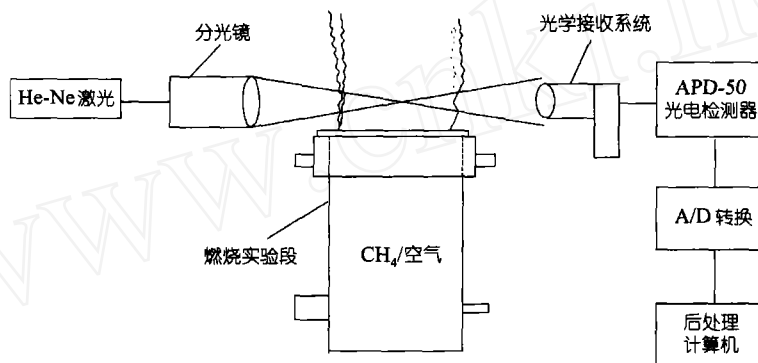


图 2 LDV 测量系统图

## 2 结果与讨论

### 2.1 冷态实验

在出口流量  $m = 19 \text{ kg/h}$ , 出口平均速度  $U = 1.35 \text{ m/s}$  时, 用热线风速仪分别测量了在加装和不加装火焰稳定杆时实验段出口的流场分布(开保护气). 测量选取垂直于火焰稳定杆的中心截面, 在距出口 0, 1 和 2 D(D 为实验段内径 = 62 mm)的水平线上进行测量, 两测点间距为 2.5 mm. 图 3 和 4 分别给出了两种情况下的平均速度和湍流度分布. 为便于比较, 图中仅绘出了沿主流方向的一维速度分布, 图中距中心线  $\pm 32 \text{ mm}$  对应实验段的内壁边缘.

可以看出, 当不装设稳定杆时, 实验段各测量截面的速度分布都相当平缓. 0D 截面的平均湍流度最低, 约在 0.3% 左右, 其后随截面距出口距离的增加而缓慢增加, 在 2D 截面的平缓区平均湍流度  $> 2\%$ . 除 0D 截面的出口边缘因管壁厚度而存在一定的剪切效应外, 保护气的存在

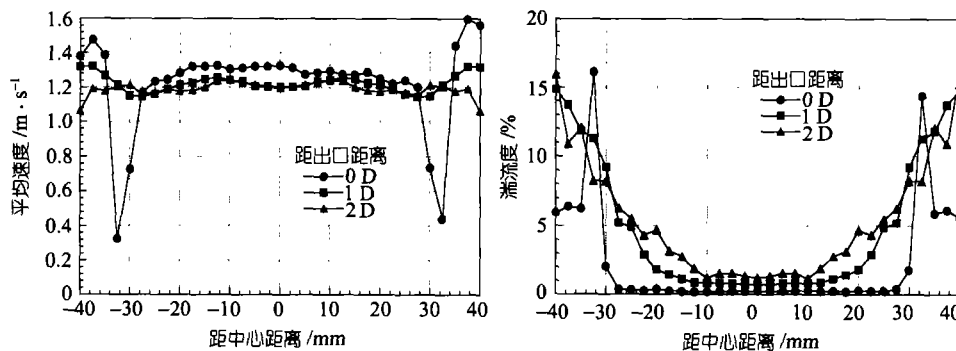


图 3 层流冷态流场的热线测量结果(无稳定杆)

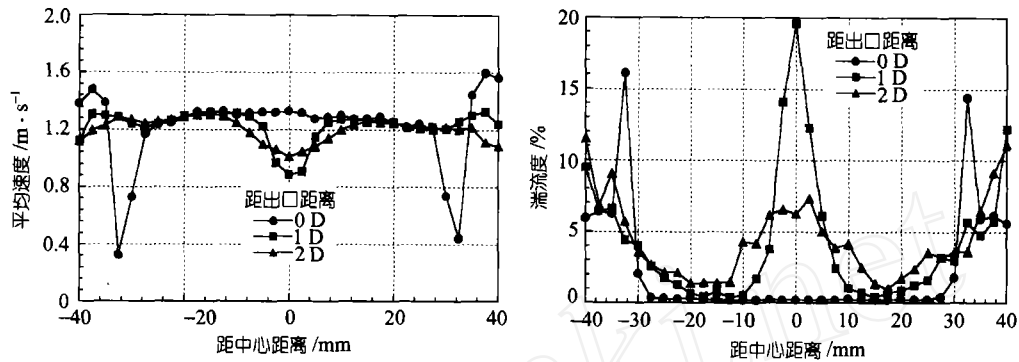


图 4 层流冷态流场的热线测量结果(有稳定杆)

使得气流边界剪切效应并不明显。

而在装有稳定杆时,对于实验段出口 0D 截面,由于处于火焰稳定杆的上游,平均速度及湍流度曲线仍相当平缓。而在 1D 和 2D 截面,由于火焰稳定杆的影响,在流场中心存在稳定杆尾迹区,其对平均速度影响随着距出口距离增大而减小,而对湍流度的影响则有扩散趋势。在设计的热态实验测量区(距中心线 10~20 mm,距出口 1D 左右)内速度分布平坦,湍流度变化不大且 <1%,符合实验设计的均匀层流来流设想。

冷态热线实验表明实验段内的整流装置起到了设想的整流效果,保护气的存在也有效地减弱了剪切边界层的影响。实验来流均匀,可近似认为是均匀一维层流状态。

## 2.2 热态实验

热态实验时,用一维激光 Doppler 测速仪从远离火焰的上游开始沿 Z 方向逐步靠近火焰,并穿过火焰至已燃区逐点测量平均速度和湍流度。相邻两测点在 Z 方向的距离为 0.14 mm。在火焰区内可获得多于 15 个测点的数据。保持燃烧器出口平均速度  $U = 1.35 \text{ m/s}$  不变,将预混可燃气的当量比  $\phi$  由 0.66 逐渐增加至 0.86。图 5 给出的实验结果表明:(i)火焰内湍流度明显高于来流可燃混气和燃烧产物区的湍流度。(ii)燃烧产物区内的湍流度与来流可燃混气内的湍流度大致相等。(iii)火焰内湍流度随当量比的增加显著增加。在现有实验参数的范围内,火焰内湍流度最大可接近 19%。

导致这些结果可能有多种原因,火焰锋面褶皱是原因之一。对空间某一定点,当火焰锋面

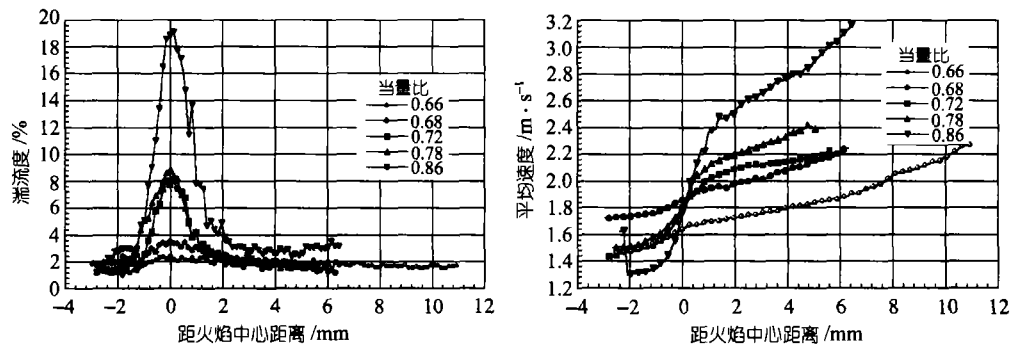


图 5 保持出口平均速度  $U = 1.35 \text{ m/s}$  不变,改变当量比时的湍流度和平均速度测量结果

扫过时, 该点处的速度会在来流可燃混气的速度和燃烧产物的速度间跳动. 这种速度变化就构成测量结果中显示的速度脉动的一部分. 火焰锋面褶皱会造成这种结果. 原因之二是由多种因素引起火焰锋面不稳定, 使得火焰锋面在其平衡位置附近摆动. 火焰锋面的这种运动也构成测量结果中速度脉动的一部分. 原因之三是有一种意见认为在圆杆稳定器下游产生的小旋涡会沿火焰锋面传播, 由此引起的火焰锋面的波动也会构成测量结果中速度脉动的一部分. 但是, 仅这 3 种原因尚不能很好地解释本项研究所观测到的结果. 因为, 如果测量结果中的速度脉动仅由火焰锋面褶皱、火焰锋面摆动及火焰锋面波动引起的, 那么构成这种速度脉动的速度的概率分布函数(PDF)应该是双峰形式. 但是, 图 6 给出的现在的速度 PDF 在火焰中心部分并不是双峰型而是“平顶型”. 尽管在相当于来流可燃混气速度和燃烧产物速度的部位 PDF 值较高, 这只能表示火焰锋面褶皱、火焰锋面摆动和火焰锋面波动所起的作用, 可是在介于来流可燃混气速度和燃烧产物速度之间的速度却占有不可忽略的比例. 这说明了引起本项研究观测到的火焰中的强烈速度脉动的原因除了上述讨论的 3 种原因之外, 一定还有其他原因存在. 经过仔细地分析研究, 我们认为火焰与流动的相互作用不仅在流场大尺度空间内影响火焰特性(如引起火焰锋面褶皱、火焰锋面摆动和火焰锋面波动), 而且在火焰中小尺度空间内也存在着火焰(化学反应)与流动的相互作用. 化学反应是一个速率过程, 它具有一定范围的特征时间尺度和特征空间尺度. 流动(湍流)也是一个速率过程, 它也具有一定范围的特征时间尺度和特征空间尺度. 在化学反应释放化学潜能转化为热能的速率过程中, 由于化学反应速率过程和流动(湍流)速率过程的耦合, 部分释放的化学潜能可能转化为流动中湍流脉动速度的动能, 从而增强了湍流度. 这种小尺度空间内火焰与流动相互作用的结果之一就是在火焰内部产生小尺度旋涡, 也即火焰产生湍流. 这种小尺度旋涡(湍流)将在火焰中小尺度空间内影响火焰特性. 由于火焰中这种小尺度旋涡的存在, 这就构成了在火焰中心部分速度的 PDF 中介于来流可燃混气速度和燃烧产物速度之间的速度的部分. 此外, 从图 5 还可以看出随着可燃混气化学当量比的增加, 火焰中的湍流度明显增加. 这说明化学反应因素起着重要作用. 当保持可燃混气化学当量比  $\phi = 0.75$  不变时, 而将燃烧器出口可燃混气平均速度由 1.0 m/s 逐渐增加至 1.6 m/s 时, 火焰中的湍流度仅有微小增加(如图 7 所示). 这说明来流可燃混气的速度对火焰中的湍流度仅起很微弱的影响. 同时, 虽然强烈的湍流度存在于火焰中, 但离开火焰进入燃烧产物区时, 湍流度便迅速衰减, 并恢复到来流可燃混气中湍流度的水平. 这说明火焰中的这种湍流是一种小尺度旋涡引起的, 这种小尺度旋涡在高温燃烧产物区内由于高的黏性作用而迅速衰

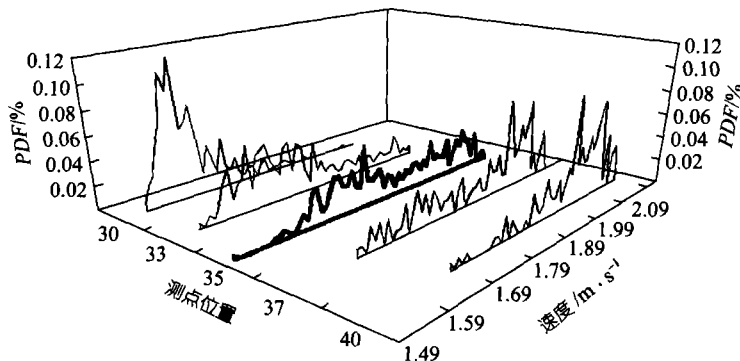


图 6 出口平均速度  $U = 1.35$  m/s, 当量比  $\phi = 0.72$  时火焰区的速度 PDF 分布

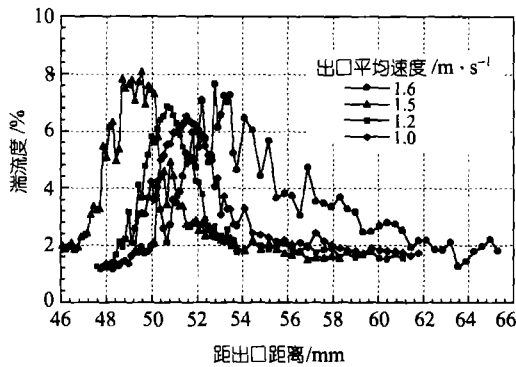


图 7 当保持当量比  $\phi = 0.75$  不变, 改变燃烧器出口平均速度时火焰内湍流度分布

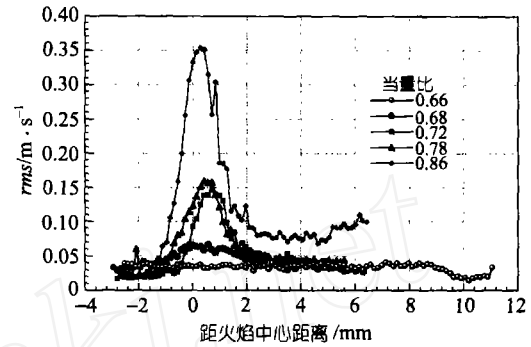


图 8 保持出口平均速度  $U = 1.35$  m/s 不变, 改变当量比时的脉动速度测量结果

减. 但是由于燃烧产物的平均速度高于来流可燃混气的速度, 尽管其湍流度大致相当, 图 8 给出的结果却表示燃烧产物中的脉动速度明显高于来流可燃混气中的脉动速度. 这些结果都明确地证实了即使对于层流预混 V 形火焰在火焰中小尺度空间内火焰与流动相互作用也产生了小尺度旋涡(也即火焰产生湍流).

与本项研究结果密切相关的层流预混 V 形火焰中的温度脉动和密度脉动的实验研究工作正在进行中, 这将会更多地获取火焰内部(小空间尺度范围内)化学反应、流动过程和输运过程(传热传质过程)的特征参数, 从而进一步探索层流预混火焰结构这一基本命题.

### 3 结论

实验结果明确地证实了即使层流预混 V 形火焰中也存在着强烈的速度脉动(也即火焰产生了湍流), 这种速度脉动与预混可燃气体的当量比(化学反应因素)密切相关, 而受来流速度的影响较小. 火焰中心区速度的概率分布函数呈“平顶型”. 分析认为, 火焰与流动的相互作用不仅在流场大尺度空间内影响火焰特性(火焰锋面褶皱、火焰锋面摆动、火焰锋面波动), 而且在火焰中小尺度空间内也存在着火焰(化学反应)与流动的相互作用, 其结果之一就是在火焰内部产生小尺度湍流, 这种小尺度湍流将在火焰中小尺度空间内影响火焰特性.

### 参 考 文 献

- 1 Karlovitz B, Denniston Jr D W, Wells F E. Investigation of turbulent flames. *J Chem Phys*, 1951, 19: 541~547
- 2 Eschenroeder A Q. Intensification of turbulence by chemical heat release. *The Physics of Fluids*, 1964, 7: 1735~1743
- 3 Yoshida A, Tsuji H. Measurements of fluctuating temperature and velocity in a turbulent premixed flame. *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1979. 945~955
- 4 Moreau P, Boutier A. Laser velocimeter measurements in a turbulent flame. *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1977. 1747~1756
- 5 Bray K N C, Libby P A, Masuya G, et al. Turbulence production in premixed turbulent flames. *Combustion Science and Technology*, 1980, 25: 127~140
- 6 Driscoll J F, Sichel M, Sinibaldi J O. Premixed flame-vortex interactions imaged in microgravity. *Fourth International Microgravity Combustion Workshop*, Cleveland, 1997. 167~172
- 7 Mueller C J, Driscoll J F, Reuss D L, et al. Vorticity generation and attenuation as vortices convect through a premixed flame. *Combustion and Flame*, 1998, 112: 343~358
- 8 Driscoll J F. Flame-vortex interactions in microgravity to improve models of turbulent combustion. *Fifth International Microgravity Combustion Workshop*, Cleveland, 1999. 267~270