

DOI: 10.19527/j.cnki.2096-1642.0799



# 激光诱导荧光聚焦纹影系统及超声速燃烧流场应用

周芮旭<sup>1,2</sup>, 连欢<sup>1</sup>, 顾洪斌<sup>1</sup>, 张新宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

## Laser-Induced Fluorescence Focusing Schlieren System and Its Application in Scramjet Combustor

ZHOU Rui-xu<sup>1,2</sup>, LIAN Huan<sup>1</sup>, GU Hong-bin<sup>1</sup>, CHANG Xin-yu<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**摘要:** 纹影是一种常用的流动显示技术, 广泛应用于可压缩流动显示及超声速燃烧流场实验. 然而, 在变 Mach 数超声速燃烧实验中, 燃烧室总温随来流 Mach 数变化. 受准稳态/非定常温度变化影响, 光学玻璃窗口的折射率发生显著改变, 影响基于密度梯度的纹影成像质量. 同时, 普通纹影为光程体积沿程积分, 难以同二维燃烧场成像信息进行直接比较以开展燃烧与流动耦合研究. 聚焦纹影技术可抑制燃烧室内高温引起的玻璃窗口折射率变化, 并实现毫米级的急剧聚焦深度, 获得二维流场结构, 同时配合纳秒级脉宽 Nd: YAG 激光光源可冻结高超声速流场. 在传统聚焦纹影系统基础上发展了激光诱导荧光聚焦纹影系统并应用于变 Mach 数超声速燃烧实验, 创新点在于使用激光诱导荧光染料, 以荧光作为光源消除原本激光光源中的相干噪声, 同时发展了边缘增强图像处理方法. 实验结果表明激光诱导荧光聚焦纹影系统及边缘增强图像处理方法能够有效消除激光光源相干噪声, 捕捉二维超声速燃烧流场结构.

**关键词:** 聚焦纹影; 激光诱导荧光; 准稳态/非定常; 超声速燃烧场

中图分类号: O354.3

文献标识码: A

**Abstract:** Schlieren imaging visualizes flow structures with variations in density gradient and has been widely applied in the study of non-reacting and reacting compressible flow experiments. The supersonic combustion experiments were accompanied by high temperature and pressure, which caused distortions of the optical window and changes of its refractive index. Schlieren technique captures density gradient variation along the entire light path. Thus, it is sensitive to the change of temperature induced by window distortion, especially during the long test run of transient experiments. Focusing schlieren is a two-dimensional flow visualization technique with short depth of focus (DOF). The narrow DOF of focusing schlieren reduces the effect of the changes in the refractive index. The Nd: YAG laser has been widely used to illuminate the highly transient supersonic flow field for sufficient flow freezing. However, coherent noise is not evitable. A measurement technique combining the laser-induced fluorescence and focusing schlieren (LIF-FS) system was proposed. The novel contribution is to use fluorescence induced by laser as the light source. The results show that LIF-FS can clearly capture flow structures in supersonic combustion experiments and reduce coherent noise caused by laser illumination.

**Key words:** focusing schlieren; lasers-induced fluorescence; quasi-steady/transient; supersonic combustion

## 引言

纹影是一种常用的流动显示技术, 利用折射率

与流场密度成正比, 纹影成像表征密度梯度变化, 广泛应用于可压缩流动显示<sup>[1-3]</sup>及超声速燃烧流场

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(11872366, 91941104)

第一作者简介: 周芮旭(1995-) 男, 硕士, 主要研究方向为高超声速推进. E-mail: zhouruixu@imech.ac.cn

通信作者简介: 连欢(1988-) 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高超声速推进. E-mail: hlian@imech.ac.cn

引用格式: 周芮旭, 连欢, 顾洪斌, 等. 激光诱导荧光聚焦纹影系统及超声速燃烧流场应用[J]. 气体物理, 2020, 5(2): 14-19.

Citation: Zhou R X, Lian H, Gu H B, et al. Laser-induced fluorescence focusing schlieren system and its application in scramjet combustor[J]. Physics of Gases, 2020, 5(2): 14-19.

实验<sup>[4]</sup>。然而,在变 Mach 数超声速燃烧实验中,燃烧室总温随来流 Mach 数变化。受准稳态/非定常温度变化影响,光学玻璃窗口的折射率发生显著改变<sup>[5]</sup>,影响基于密度梯度变化成像的纹影质量。同时,普通纹影为光程体积沿程积分,难以同二维燃烧场成像信息进行直接比较以开展燃烧与流动耦合研究。为了能够通过燃烧室内的流动结构信息深入研究流动与燃烧的耦合机理,有必要开展高超声速燃烧室内的二维流动显示技术。

聚焦纹影技术可抑制燃烧室内高温引起的玻璃窗口折射率变化,并实现毫米级的急剧聚焦深度<sup>[6]</sup>,获得二维流场结构,同时配合纳秒级脉宽 Nd: YAG 激光光源可实现高超声速流场冻结。Weinstein<sup>[7]</sup>在 Burton<sup>[8]</sup>的纹影系统基础上发展了大视场高亮度的聚焦纹影系统,奠定了现代聚焦纹影的基础。谢爱民等<sup>[9]</sup>、徐翔等<sup>[10]</sup>将聚焦纹影应用于激波风洞,证明其可行性。Garg 等<sup>[11]</sup>使用聚焦纹影系统测量了超声速非反应湍流边界层的特性。Förster 等<sup>[12]</sup>将聚焦纹影应用于超燃冲压发动机的燃烧室,研究不同稳焰模式的特性。Kouchi 等<sup>[5]</sup>运用聚焦纹影系统拍摄双模态超燃冲压发动机的燃烧室,对比冷流图片证明聚焦纹影系统能够很好地降低窗口热变形带来的影响。在大多数以往的实验中使用纳秒脉宽的 Nd: YAG 激光器冻结超声速流场。然而,

这种激光器用于光源时会不可避免地产生相干噪声。因此,减少光源产生的相干噪声能够有效提高成像质量,捕捉到更加清晰的图片。

本文提出了一种结合激光诱导荧光和聚焦纹影系统 (laser induced fluorescence and focusing schlieren, LIF-FS) 的测量技术,利用激光诱导荧光作为光源,显著降低激光光源相干噪声。同时介绍了 LIF-FS 系统在中国科学院连续变 Mach 数直联实验台超声速燃烧流场中的初步应用。

## 1 实验设备

中国科学院连续变 Mach 数直联实验台<sup>[13]</sup>包括烧氢补氧可调加热器,可调 Laval 喷管,通过可调加热器以及喷管配合,实现连续变化的来流 Mach 数和飞行总温及总压,设备组成如图 1 所示,设备描述参见文献 [13]。总温调节范围为 800 ~ 1 900 K,模拟连续变化飞行  $Ma = 4.5 \sim 6.5$ 。试验段包括截面为 80 mm×40 mm 的等截面隔离段和对称双凹腔燃烧室模型。两对凹腔深度均为 17 mm,长度为 65 mm,倾角为 22.5°,其间距为 150 mm。采用火花点火器点火,煤油和引导氢在凹腔上游垂直喷注。第 1 对凹腔的两侧安装石英窗口,以实现流场可视化。本文主要关注超声速横向射流燃烧特性,观测区为隔离段出口燃料喷注点周边。

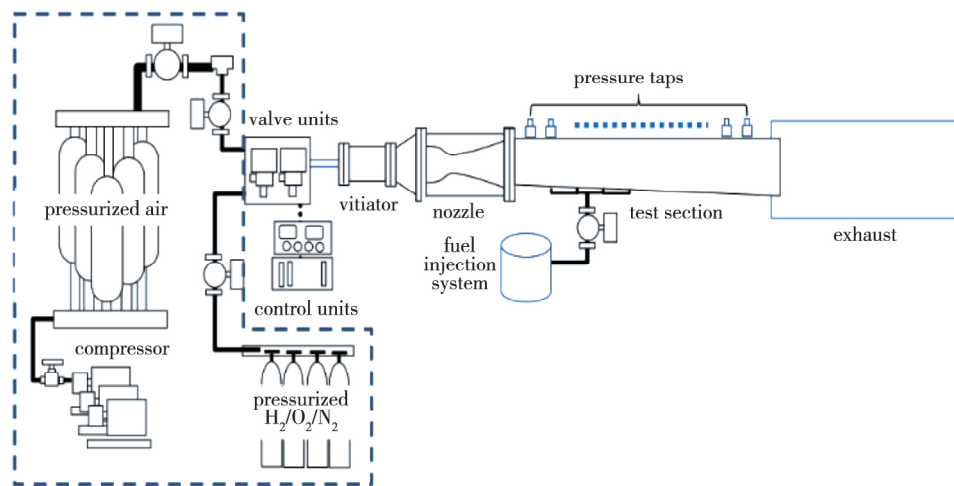


图 1 直连式超声速燃烧实验设备的配置<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Configuration of direct-connected supersonic combustion test facility<sup>[13]</sup>

激光诱导荧光聚焦纹影系统的原理与传统聚焦纹影相同,如图 2 所示<sup>[14]</sup>,不同之处在于采用小于 10 nm 的脉冲宽度,单脉冲能量约 1 mJ 的激光作为光源,并通过诱导荧光降低聚焦纹影系统光照

中的相干噪声,激光光源经过扩束满足照明区域需求。聚焦纹影系统中有两对光学共轭平面:源格栅与刀口栅、测试区与测试区像平面。其中源格栅与刀口栅的明暗相间条纹为成比例负相,通过刀口栅

部分遮挡源格栅以实现纹影功能. 测试段的后成像透镜组须尽可能地靠近测试区, 使系统具有较小的急剧聚焦深度.

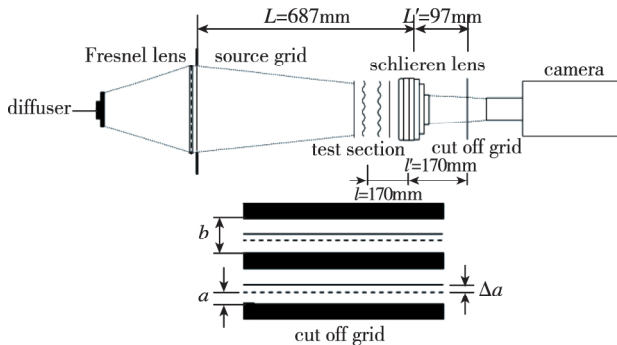


图2 激光诱导荧光聚焦纹影系统原理图<sup>[14]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of LIF-FS<sup>[14]</sup>

## 2 聚焦纹影系统设计

本文的聚焦纹影系统建立在 Weinstein<sup>[7]</sup>、谢爱民等<sup>[9-10]</sup>的基础上设计而成. 设计主要参数有表征系统灵敏度的光线最小偏折角  $\varepsilon_{\min}$ , 由单缝衍射判断决定的测试区最小分辨率  $\omega$ , 急剧聚焦深度  $D_s$ , 非急剧聚焦深度  $D_U$  以及混合线对数  $\phi$ .

光偏角代表系统能够检测到最小密度梯度的变化, 与光线相对于刀口栅的垂直运动有关, 在图像中表现为亮度的变化. 如果选择亮度变化最小值为 10%, 聚焦纹影系统的光线最小偏折角  $\varepsilon_{\min}$  为

$$\varepsilon_{\min} = 20\ 626aL/[L'(L-l)]\text{arcsec}$$

其中,  $a$  代表刀口栅 50% 切光时光源像高的一半<sup>[14]</sup>,  $L$ ,  $L'$ ,  $l$  为如图 2 所示的光路参数, 由实验环境确定. 光线最小偏折角  $\varepsilon_{\min}$  与  $a$  成正比, 因此须减小  $a$  以提高系统的灵敏度<sup>[6]</sup>.

另一个重要参数为测试区最小分辨率. 聚焦纹影系统的分辨率受光学元件的衍射效应与非衍射效应共同影响<sup>[7]</sup>, 通常假设系统的分辨率仅受光学元件衍射效应的影响. 对于聚焦纹影系统, 刀口栅的衍射效应最大程度地限制分辨率, 可用光源的波长  $\lambda$ , 刀口栅狭缝的宽度  $b$  和光路参数等表示为

$$\omega = \frac{2(l'-L)\lambda}{l'b}$$

聚焦深度是衡量系统聚焦能力的重要指标. Weinstein<sup>[7]</sup> 定义聚焦深度为急剧聚焦深度  $D_s$  和非急剧聚焦深度  $D_U$ . 急剧聚焦深度  $D_s$  表示由失焦导

致的分辨率损失超过光学系统分辨率的深度,  $D_s$  为

$$D_s = \frac{2\omega l}{A}$$

非急剧聚焦深度  $D_U$  表示由于失焦导致的分辨率损失超过流量相关的某个阈值  $\delta$  的深度,  $D_U$  为

$$D_U = 2\delta \frac{l}{A}$$

其中,  $A$  为纹影透镜的孔径, 通常假设  $\delta=2$  mm.

此外, 如果刀口栅线宽间距过大, 仅有一小部分的线对用于形成图像, 导致图像中出现刀口栅形状. Weinstein 定义图像单点混合线对数  $\phi$  为

$$\phi = \frac{AN(l'-L)}{2l'}$$

其中,  $N$  代表每单位尺寸刀口栅的行数. 为了获得较好的图像质量要求  $\phi > 8$ .

聚焦纹影系统调试过程中, 刀口栅的制作工艺往往限制了各设计参数的选择范围, 通常使用遮光和暗室处理方法进行制作, 过程较为繁琐复杂. 微米级透光光栅的加工精度可通过线切割金属加工方式实现, 但伴随金属光栅自重形变等问题, 而高精度光刻法制作刀口栅的面积大小受限且价格昂贵. 因此综合考虑经济性、幅面大小以及聚焦纹影系统设计的要求. 本文所用刀口栅通过在透光薄膜上使用高精度激光喷墨打印的方法进行制作<sup>[7]</sup>, 该方法须确保所选打印机与图像分辨率匹配.

由于光学元件及系统实际精度与设计精度存在误差, 急剧聚焦深度理论值仅为设计参考, 风洞实验过程中通常由可聚焦超声速射流偏离最佳焦平面的距离来确定系统的实际聚焦能力  $D_F$ <sup>[5]</sup>, 本文所述系统实测  $D_F$  为  $\pm(5\sim 10)$  mm. 表 1 总结了设计聚焦纹影的主要参数.

表1 聚焦纹影系统参数  
Table 1 Specification of focusing schlieren system

$\varepsilon_{\min}/\text{arcsec}$	$D_s/\text{mm}$	$D_U/\text{mm}$	$\omega/\text{mm}$	$N/\text{mm}^{-1}$	$\phi$
28.25	0.92	9.44	0.19	1.67	28.12

## 3 图像处理过程

图像处理过程可实现两个目的: 阴影校正及降噪, 总体流程如图 3 所示. 阴影校正过程处理聚焦纹影图像中存在的均匀照明问题, 如图 4(a) 所

示. 采用 Kouchi 等<sup>[5]</sup>的方法: 原始图像减去背景图像进行校正. 首先, 为了获得每幅图像的背景图, 使用 Gauss 低通滤波器对原始图像进行滤波处理. 其次, 用原始图像减去背景图得到阴影校正图. 将阴影校正图的像素值线性映射到 0~255 以增强对比度. Gauss 低通滤波器的参数会影响处理结果, 因此对比了 Gauss 滤波器不同方差和滤波核大小的滤波效果, 如图 5 所示. 较小的  $\sigma_g$  值或较小的滤波核大小均会使得射流结构模糊, 因此选用  $\sigma_g = 50$ , 滤波核大小为  $401 \times 401$  像素的 Gauss 滤波器进行后续处理. 阴影校正之后的图片如图 4(b) 所示. 在降噪过程中采用均值滤波器去除椒盐噪声. 均值滤波器的窗口越大, 图像越模糊, 图像失真越严重. 本文采用滤波核窗口大小为  $3 \times 3$  像素的均值滤波器来处理椒盐噪声. 图 4(c) 为降噪处理之后的图像. 尽管图像边缘仍存在部分椒盐噪声, 图像中部的椒盐噪声已明显降低. 实验结果图片并没有出现激光光源图像所具有的相干噪声, 证明激光诱导荧光聚焦纹影系统的可行性.

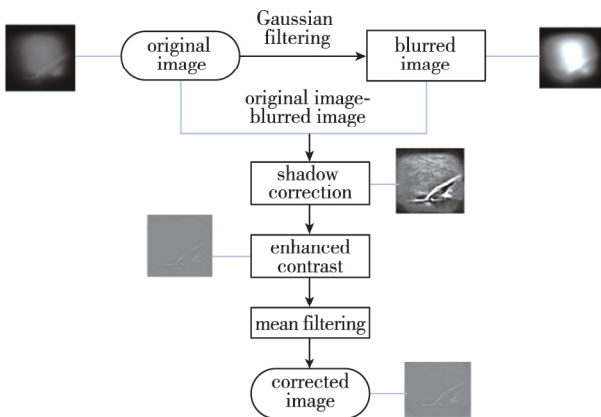
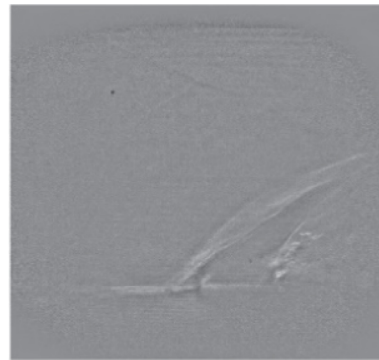


图 3 图像处理流程图

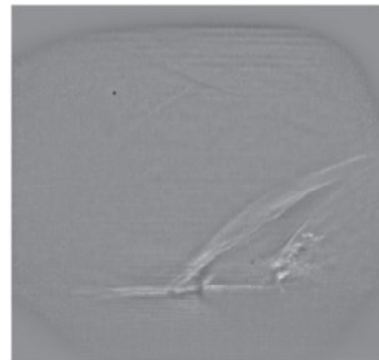
Fig. 3 Flowchart of image processing



(a) Initial image



(b) Shade correction image



(c) Noise reduction image

图 4 图像处理过程中的代表图  
Fig. 4 Typical images in image processing



(a)  $\sigma_g = 50, N = 31$



(b)  $\sigma_g = 10, N = 401$

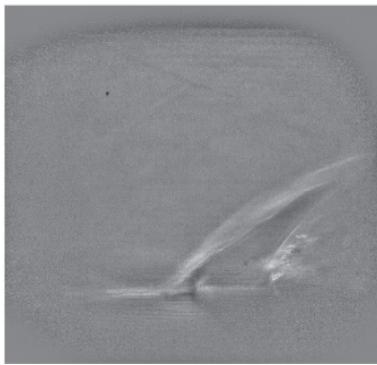
(c)  $\sigma_g = 50, N = 401$ 

图5 不同方差和滤波核大小的 Gauss 滤波器效果  
Fig. 5 Filtered images by Gaussian filters with different standard deviations and kernel sizes

#### 4 结果分析

本文给出激光脉冲聚焦纹影在连续变 Mach 数超声速横向射流和燃烧流场测量的初步应用. 图6为隔离段和燃烧室入口的非反应引导氢横向射流的典型图像以及局部放大图. 在横向射流前方, 可见弓形激波结构. 此激波与壁面之间有较大抬升. 在弓形激波的后方, 超声速主流与欠膨胀射流相互作用形成剪切面, 产生大尺度结构. 大尺度结构随着弓形激波向后弯曲, 控制近场射流与主流的混合. 在大尺度结构下方的图像亮度较高区域是欠膨胀射流所形成的 Mach 盘结构. 需要注意的是, 图片中间的另一个激波是由喷块安装缝隙引起的. 以上结果可以看出, LIF-FS 能够捕捉到超声速非反应横向射流的结构.

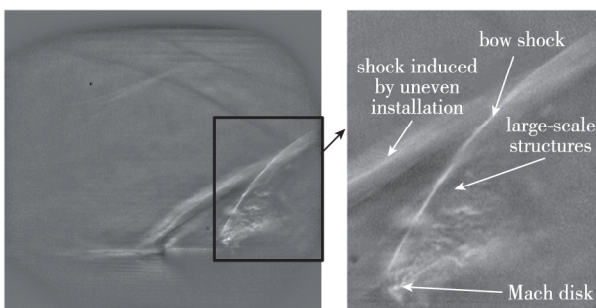


图6 凹腔上游非反应引导氢横向射流 LIF-FS 图  
Fig. 6 LIF-FS image of the non-reactive transverse jet injection upstream of the cavity

超声速燃烧场的 LIF-FS 如图7所示. 图中可见下游燃烧室释热引起的上行激波串结构后期通过将 LIF-FS 图像与同光路火焰化学发光  $\text{CH}^+$  二维成像及激光诱导荧光 PLIF 结合, 可以获得流动-火焰

相互作用关系, 辅助认知超声速燃烧-流动耦合机理.

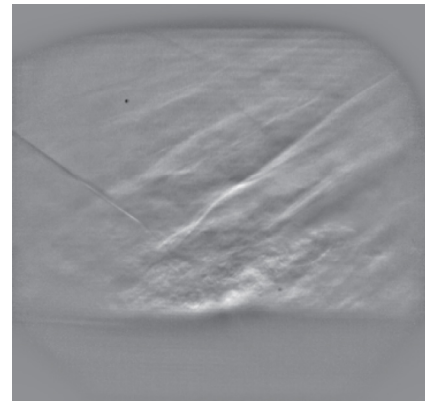


图7 燃烧诱导激波串反应流的 LIF-FS 图  
Fig. 7 LIF-FS image of the reacting flow with shock train induced by combustion

#### 5 总结

本文在传统聚焦纹影系统基础上发展了激光诱导荧光聚焦纹影系统. 创新点在于使用激光诱导荧光染料, 以荧光作为光源消除原本激光光源中的相干噪声. 最后开展了变 Mach 数超声速燃烧实验, 得到以下结论:

(1) 提出了激光诱导荧光聚焦纹影(LIF-FS)方法结合激光诱导荧光与聚焦纹影技术: 该系统使用激光诱导荧光作为聚焦纹影光源, 降低激光光源的相干噪声影响. 并针对阴影校正和图像降噪发展了图像处理方法, 进一步提高了成像质量.

(2) 以隔离段出口为观测区域, 开展了激光脉冲聚焦纹影在连续变 Mach 数风洞的初步应用, 观察到非反应横向射流的大尺度结构等以及燃烧场中上行激波串结构. 未来工作主要为将该系统应用在不同测量区域, 获得更多的超声速燃烧流场信息, 发展基于 LIF-FS 的流场量化分析手段以及燃烧诊断技术同光路设计方法.

致谢 感谢国家自然科学基金(11872366, 91941104)资助. 感谢高占彪工程师的宝贵技术支持.

#### 参考文献 (References)

- [1] Kouchi T, Hoshino T, Sasaya K, et al. Time-space trajectory of unsteady jet into supersonic crossflow using high-speed framing schlieren images [R]. AIAA 2009-

- 7316, 2011.
- [2] Ben-Yakar A, Mungal M G, Hanson R K. Time evolution and mixing characteristics of hydrogen and ethylene transverse jets in supersonic crossflow[J]. *Physics of Fluids*, 2006, 18(2): 026101.
- [3] Ben-Yakar A, Hanson R K. Ultra-fast-framing schlieren system for studies of the time evolution of jets in supersonic crossflows[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(6): 652-666.
- [4] Fotia M L, Driscoll J F. Isolator-combustor interactions in a direct-connect ramjet-scrumjet experiment[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 28(1): 83-95.
- [5] Kouchi T, Goyne C P, Rockwell R D, et al. Focusing-schlieren visualization in a dual-mode scramjet[J]. *Experiments in Fluids*, 2015, 56(12): 211.
- [6] VanDercreek C P, Smith M S, Yu K H. Focused schlieren and deflectometry at AEDC hypervelocity wind tunnel No. 9 [R]. AIAA 2010-4209, 2010.
- [7] Weinstein L M. Review and update of lens and grid schlieren and motion camera schlieren[J]. *The European Physical Journal Special Topics*, 2010, 182(1): 65-95.
- [8] Burton R A. A modified schlieren apparatus for large areas of field[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949, 39(11): 907-908.
- [9] 谢爱民, 黄洁, 徐翔, 等. 激波风洞流场密度测量的聚焦纹影技术[J]. *实验流体力学*, 2012, 27(2): 82-86.
- Xie A M, Huang J, Xu X, et al. Focusing schlieren technique applied to measure the flow density in shock tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 27(2): 82-86( in Chinese).
- [10] 徐翔, 谢爱民, 吕治国, 等. 聚焦纹影显示技术在激波风洞的初步应用[J]. *实验流体力学*, 2009, 23(3): 75-79.
- Xu X, Xie A M, Lyu Z G, et al. Application of focusing schlieren visualization system in shock tunnel experiment[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2009, 23(3): 75-79( in Chinese).
- [11] Garg S, Settles G S. Measurements of a supersonic turbulent boundary layer by focusing schlieren deflectometry[J]. *Experiments in Fluids*, 1998, 25(3): 254-264.
- [12] Förster F J, Dröske N C, Buhler M N, et al. Analysis of flame characteristics in a scramjet combustor with staged fuel injection using common path focusing schlieren and flame visualization[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 168: 204-215.
- [13] Lian H, Gu H B, Yue L J, et al. Characterisation of combustion oscillations in a cavity flame holder during acceleration experiments[C]. *International Conference on High-Speed Vehicle Science Technology*, Moscow: Hungarian-Italian Symposium on Spectrochemistry, 2018.
- [14] Floryan D, Hofferth J, Saric W. Design, assembly, and calibration of a focusing schlieren system[R]. *Technical Report*, 2012.