

## 高超声速波系结构的彩色纹影显示技术

王殿恺<sup>1,2</sup>, 洪延姬<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 叶继飞<sup>1</sup>

- (1. 中国人民解放军装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416;
2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100083)

**摘要:** 针对高超声速流场波系结构复杂、激波相互作用强、激波强度差别大等特点, 发展了非侵入式、高灵敏度的彩色纹影流场显示技术, 结合彩色滤光片设计技术和高速摄影技术, 将彩色纹影系统的空间分辨率提高至 0.1 mm 量级, 时间分辨率达到 1 s 量级。在高超声速激波风洞中分别研究了斜激波相互作用产生的正规反射和马赫反射激波结构, 以及斜激波与弓形激波相互作用产生的 IV 型激波干扰, 得到了清晰的彩色纹影照片, 细致展现了待测流场的复杂结构, 证明了该彩色纹影技术能够为高超声速流场诊断提供有力的技术支撑。

**关键词:** 彩色纹影; 高超声速; 激波相互作用; 流场诊断

**中图分类号:** V211.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1710-05

## Color schlieren for hypersonic shock wave structures diagnosis

Wang Diankai<sup>1,2</sup>, Hong Yanji<sup>1</sup>, Li Qian<sup>1</sup>, Ye Jifei<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China;
2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A non-invaded and high resolution color schlieren system was developed to diagnose the hypersonic flow field with complex shock wave structures, intensive shock interactions and different shock intensity. The key technique of color schlieren system is the color filter. A high sensitive color filter with 6 regions is designed. High speed color camera and synchronization technique are employed to meet the needs of high speed photography. Space and time resolution were brought up to 0.1mm and 1s, respectively. Experiments were performed in hypersonic shock tunnel with Mach 5.0 and 6.0. Regular reflection and Mach reflection generated by interaction of oblique shocks, and type IV shock interaction generated by oblique shock and bow shock were detected. Clear color schlieren images were obtained at the 3 conditions. The complex structures of the 3 kinds of shock interactions are disclosed, which proves that the color schlieren system was efficient and reliable. And it also supplies an alternate method in the diagnostics of hypersonic flow field.

**Key words:** color schlieren; hypersonic; shock wave interaction; flow diagnostics

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(11372356)

作者简介: 王殿恺(1985-), 男, 助理研究员, 主要从事等离子体流动控制及光学测量方面的研究工作。

Email: diankai@mail.ustc.edu.cn

## 0 引言

随着美国 X-43、X-51 等临近空间高超声速飞行器的相继出现,各国已经加快了研究高超声速飞行器的步伐,国内也做出了发展高超声速技术的战略决策。在高超声速技术的发展中,流场结构的研究对提高飞行器性能是十分必要的。高超声速流场的激波相互作用具有结构复杂、激波相互作用强、激波强度差别大等特点,对诊断技术水平提出了非常高的要求。

纹影测量技术是一种典型的非侵入式流场诊断技术,并能够清晰、直观地显示流场,广泛应用于各种高速流动现象的观测环境中。相对于传统纹影,彩色纹影更加具有鲜明优势:(1)彩色纹影比黑白纹影灵敏更高,流场图像信息量更大,可识别程度更高;(2)固体模型的轮廓在彩色纹影流场图像中呈黑色,气动干扰则呈彩色,这样易于流场边界的诊断和分析;(3)彩色更能引起人们的兴趣,并易于研究纹影照片中所记录的细节流场结构;(4)彩色纹影可以根据色彩的变化进行定量分析,降低了由于光线强度不同带来的干扰。1952年英国国家物理实验室的 Holder D.W. 和 North R.J. 首先报道了使用分光棱镜获得的彩色光源组成的彩色纹影装置<sup>[1]</sup>,此后国际学者们展开了彩色纹影的定性和定量研究。Agrawal A.K. 研究小组对彩色纹影定量测量的研究做出了较大贡献,研究内容涉及到彩色纹影定量测量的原理<sup>[2]</sup>、阿贝尔变换的具体推导验证<sup>[3]</sup>、轴对称自由射流<sup>[4]</sup>、火焰射流<sup>[5]</sup>及其在不同重力场条件下的现象<sup>[6]</sup>、轴对称微射流流场<sup>[7]</sup>,甚至涵盖了使用彩色纹影技术进行三维流动测量<sup>[8]</sup>。2002年,为了获得超声速进气道内部细节信息和激波与边界层的相互作用,德国 DLR 宇航推进中心建立了二维彩色纹影系统<sup>[9]</sup>,测量得到了进气道内压缩段的激波串结构。日本学者 Yoshiaki Miyazato 等人<sup>[10]</sup>使用彩虹纹影技术得到了膨胀自由射流的密度场图像,其结果与探针测量数据吻合较好。国内叶继飞等人<sup>[11-12]</sup>发展了纹影和彩色纹影技术,并分别应用于激光微烧蚀固体靶材羽流特性测量和超声速轴对称流场的密度定量测量,取得了良好的实验结果。

高超声速流场的特点要求测量技术具备高时间空间分辨率和高灵敏度,文中拟解决短曝光时间、高灵敏度彩色滤光片设计和制作、纳秒时间尺度的同步等关键技术,发展彩色纹影测量技术,并将其应用于高超声速流场诊断领域。在高超声速激波风洞中测量正规反射和马赫反射以及 IV 型激波相互作用等典型流场,通过对纹影照片的分析证明该项技术应用于高超声速流场诊断的应用价值。

## 1 彩色纹影系统设计

### 1.1 光路设计

在高超声速条件下,激波与边界层相互作用可能引致边界层分离。层流边界层是一个厚度不足 1 mm 的薄层,湍流边界层具有很强的非定常特性,因此边界层的光学显示面临两大挑战:空间分辨率要达到 1 mm 以内,时间分辨率要达到 1  $\mu$ s 量级。为清晰揭示激波相互作用的波系结构,测量系统的灵敏度需要很高。针对上述问题,文中设计了彩色纹影测量系统,采用“Z”字形光路布局,如图 1 所示。光源和成像系统布置于平行光流场测试区的两侧,离轴角约 5°。彩色纹影系统包括 3 大组成部分:(1)脉冲氙灯闪光光源。采用高电压击穿氙气时的发光现象照明,其特点是亮度高,100 ns 时间量级的曝光便可获得较亮的视场,满足短曝光、高时间分辨率的要求。凸透镜 1 的作用是将光源均匀扩展并成像至狭缝位置,然后利用狭缝将光源尺寸限制在一个

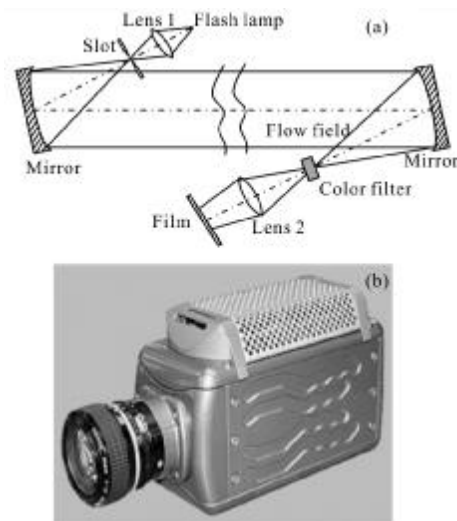


图 1 纹影系统光路布局和彩色相机

Fig.1 Set-up of color schlieren system and color camera

较小的范围,以提高系统灵敏度;(2)直径为 150mm 的纹影镜组,焦距 1.5 m,光源和刀口分别位于两面纹影镜的焦点上;(3)彩色滤光片和成像系统,凸透镜 2 将待测流场在高速相机接收屏上成清晰的像,文中采用的高速彩色相机是美国 Vision Research 公司生产的 PHANTOM V711 型彩色相机高速彩色相机,最短曝光时间  $1\ \mu\text{s}$ ,在分辨率为 10 001 000 像素的条件下记录速度可达到 10 000 fps 以上。

## 1.2 彩色滤光片设计

彩色纹影最大特点是采用彩色滤光片代替了黑白纹影系统的刀口,对偏折大小和偏折方向不同的光线以不同的颜色显示,彩色滤光片的设计与标定是决定彩色纹影测量技术的关键。加色的方法可以大致分为三种:一种是用彩色滤光片加色,以彩色刀口代替传统纹影仪的刀口;第二种是利用彩色光源掩膜,在光源处引入彩色光谱或条带,并用相应形状的缝孔代替传统纹影仪中的刀口;第三种是光电加色,其原理是利用光电或数字技术,人为地给黑白纹影照片中的不同亮度加上特定的颜色,即“假色法”。该实验采用第一种方法,彩色滤光片的制作和标定是关键技术问题,其过程可描述为:

(1) 利用 Matlab 预先设计好所需的滤光片样式。Matlab 中读取和存储图像文件时使用的是 RGB 色彩制式,即每一个像素点上的色彩都被分解为红、绿、蓝三原色,因此可以很方便地改变所设计的滤光片参数。

(2) 将设计好的滤光片拍摄到胶卷底片上。胶卷采用了富士 Chrome Velvia RVP 50° 反转片,其优点是冲洗出来以后底片上的颜色为实际景物的颜色,避免了失真,利于获得所期望的色彩。胶卷的 ISO 度数值越低,颗粒就越细腻,生成的滤光片灵敏度就越高,但曝光时间就越长。该实验设计的彩色滤光片特性如图 2 所示,其中图 2(a) 为预先设计好的滤光片样式。将狭缝光源聚焦于 2-5 区,待测流场密度的变化改变了光的折射率,引起滤光片上所成像的偏移,改变了成像色度,从而给接收屏上得到的照片加了色彩。由图 2(b) 中色度与像素的关系曲线可知,该彩色滤光片在 2-5 区色度随像素变化剧烈,灵敏度很好。彩色滤光片实物照片如图 3 所示。

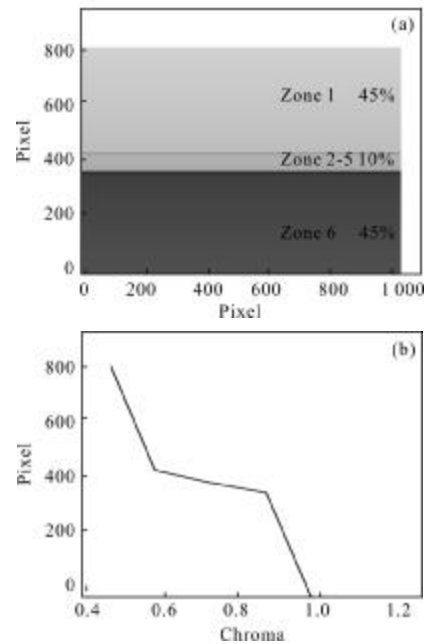


图 2 彩色滤光片特性

Fig.2 Characteristics of color filter



图 3 彩色滤光片照片

Fig.3 Photos of color filters

## 2 实验平台

实验在高超声速激波风洞内进行。激波风洞的主要组成部分是:激波管、拉法尔喷管和真空舱。激波管的作用是利用激波的反射产生高温高压气体,作为风洞气源;拉法尔喷管为轴对称结构,采用特征线法设计,分段加工,其作用是将高温高压气体等熵膨胀为均匀高超声速气流;真空舱的作用是降低背压,利于风洞起动。激波管主体结构为高低压段长度均为 6 m 的等截面圆形不锈钢管,刻槽的铝膜将高压区(4 区)和低压区(1 区)隔离。激波管原理如图 4(a)所示,实验时,4 区气体将膜片压破,4 区气体向 1 区膨胀,产生向 1 区传播的运动激波(Moving shock, Ms) 和向 4 区传播的膨胀波(Rarefaction waves)。1 区气体受入射激波 Ms 压缩后形成 2 区气体,3 区为膨胀波后的气体状态,2 区和 3 区的交界

面为接触面。5 区为入射激波  $M_s$  在低压端面反射后再次压缩的气体状态,该区气流具有高温、高压、滞止的特点,可以作为激波风洞的气源。建成的激波风洞如图 4(b)所示。

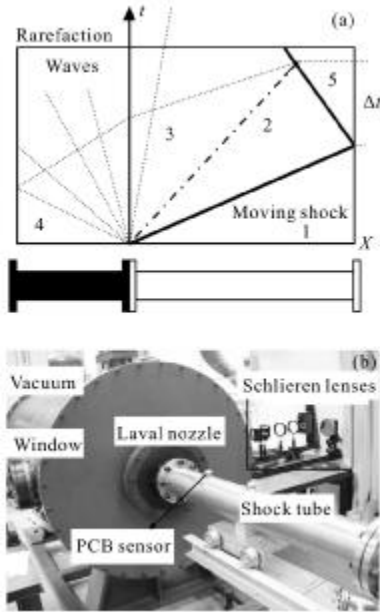


图 4 激波管原理及激波风洞照片

Fig.4 Principle of shock tube and photo of shock tunnel

为保证实验时间较长,激波管应采用缝合接触面方式运行,即反射激波与接触面相互作用既不反射压缩波也不反射稀疏波。为满足缝合条件,本次实验高压驱动气体选用比例为 87:13 的氦气和氮气的混合气体,低压段为 1 个大气压的普通空气,破膜压力 1.35 MPa,温度均为室温 293 K,据此推算出风洞实验段静温为 220 K,静压 2 500 Pa,与临近空间的真实飞行环境相当。

时序同步控制方案如图 5(a)所示,其中虚线所示为纹影光路。激波管低压端安装的 PCB 压力传感器监测入射激波,入射激波到达之后 3 ms 风洞已完全起动,脉冲氙灯响应时间为 160  $\mu$ s。激波风洞、闪光灯和高速相机的时序关系如图 5(b)所示。

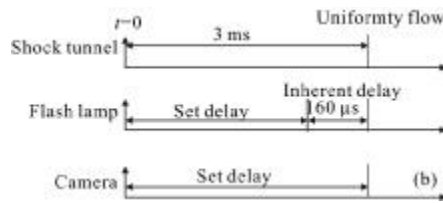
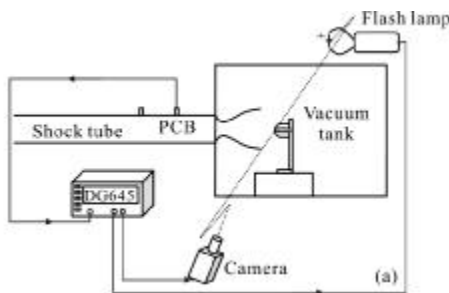


图 5 系统时序控制示意图

Fig.5 Schematics of synchronization control system

### 3 测量结果与分析

#### (1) 正规反射结构

在马赫 5.0 的来流中采用折转角分别为 15°和 45°的双斜面模型研究斜激波相互作用,曝光时间 30  $\mu$ s,得到的正规反射结构如图 6 所示。彩色纹影照片中波系结构清晰,边界层、入射激波、透射激波、滑移线、反射激波都有细致的呈现。图中紫色区域即为边界层,其厚度为 1 mm 左右,证实了该系统具备较高的灵敏度和空间分辨率。

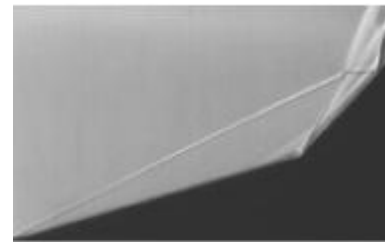


图 6 斜激波相互作用的正规反射结构

Fig.6 Regular reflection of interaction of oblique shocks

#### (2) 马赫反射结构

图 7 为彩色纹影系统得到的高超声速马赫反射照片,曝光时间 30  $\mu$ s,来流马赫数为 6.0,斜劈对称安装,角度为 29°,前缘间距 63 mm,收缩比为 0.24。照片清晰反映了马赫反射的波系结构,斜激波、马赫杆、滑移层、膨胀波、以及斜激波在壁面的反射结构都得到了清晰呈现。马赫杆下游由于超声速和亚声

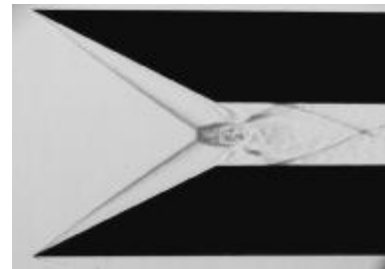


图 7 斜激波相互作用的马赫反射结构

Fig.7 Mach reflection of interaction of oblique shocks

速气流的掺混而发生湍流, 涡结构比较清晰。由彩色滤光片特性可知, 气流密度增加的方向波系偏紫色, 密度降低的方向则偏黄色, 流场信息量远大于黑白纹影照片。

### (3) IV 型激波相互作用

在马赫 5.0 来流中实验得到 IV 型激波相互作用的彩色纹影照片如图 8 所示, 其中斜劈角度为  $15^\circ$ , 钝头体直径为 20 mm。由彩色滤光片工作原理可知, 偏向紫色的线代表密度升高, 偏向黄绿色的线代表密度降低。图中斜激波、弓形激波、膨胀波结构清晰, 色彩对比强烈, 其中斜激波角为  $25^\circ$ , 与理论值吻合。斜激波与弓形激波相互作用产生的透射激波、剪切层和超声速射流结构清楚。

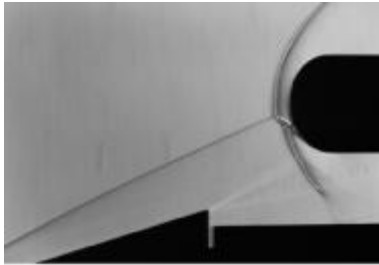


图 8 IV 型激波干扰

Fig.8 Interaction of type IV interaction

## 4 结 论

文中建立了高时间空间分辨率、高灵敏度的彩色纹影系统, 并利用该系统研究了高超声速来流条件下的正规反射、马赫反射和 IV 型激波干扰, 得到的彩色纹影照片能够清晰反映高超声速流场的细节激波结构。随着高速相机技术的发展, 彩色纹影技术的时间空间分辨率仍然存在着很大提高空间, 是一项在高超声速流场诊断领域具有较强应用前景的技术。

### 参考文献:

- [1] Holder D W, North R J. A schlieren apparatus giving an image in colour[J]. *Nature*, 1952, 169: 466.
- [2] Shenoy A, Agrawal A K, Gollahalli S. Quantitative evaluation of flow computations by rainbow schlieren deflectometry[J]. *AIAA Journal*, 1998, 36: 1953-1960.
- [3] Agrawal A K, Albers B, Griffin D. Abel inversion of deflectometric measurements in dynamic flows [J]. *Applied Optics*, 1999, 38: 3394-3398.
- [4] Yildirim B S, Pasumarthi K S, Agrawal A K. Concentration measurements in Self-Excited momentum dominated low-density gas jets[C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004, 1279.
- [5] Xiao X, Puri I, Agrawal A K. Temperature measurements in steady axisymmetric partially premixed flames by use of rainbow schlieren deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2002, 41: 1922-1928.
- [6] Yep T, Agrawal A K, Griffin D. Gravitational effects on near-field flow structure of low-density gas jets [J]. *AIAA Journal*, 2003, 41: 1973-1979.
- [7] Kolhe P, Agrawal A K. Density measurements in a supersonic microjet using miniature rainbow schlieren deflectometry[J]. *AIAA Journal*, 2009, 47: 830-838.
- [8] Agrawal A K, Butuk N, Gollahalli S. Three-dimensional rainbow schlieren tomography of a temperature field in gas flows[J]. *Applied Optics*, 1998, 37: 479-485.
- [9] Herrmann C D, Koschel W W. Experimental investigation of the internal compression of a hypersonic intake [C]//38th AIAA /ASME /SAE /ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2002, 4130.
- [10] Yoshiaki M, Masayuki I. Quantitative flow visualization of correctly expanded supersonic jets by rainbow schlieren deflectometry [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, 1218.
- [11] Ye Jifei, Hong Yanji. Plume field evolution characteristics of the laser micro ablation for solid target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S01): 47-51. (in Chinese)
- [12] Ye Jifei, Hong Yanji. Quantitative measurement of density by color schlieren based on axial symmetry field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3335-3338. (in Chinese)