

纳米示踪平面激光散射技术 在激波复杂流场测量中的应用*

易仕和[†] 何霖 田立丰 赵玉新

国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073

摘要 在激波以及激波边界层相互作用这类含激波的复杂流场中, 流场结构具有明显的三维特征. 研究这类流场, 采用纹影、阴影和干涉等传统流动显示技术空间分辨率较低, 难以分辨流场的三维特性. 基于纳米示踪的平面激光散射技术 (nano-tracer planar laser scattering, NPLS), 是作者近年来开发的一种新的研究超声速流场的测试与显示技术, 可对超声速复杂三维流场进行高时空分辨率流动显示与测量. NPLS 技术的特点使其成为测量激波复杂流场的有力手段. 近年来, 作者以 NPLS 技术为主要手段, 对航空航天领域典型的激波复杂流场进行了试验研究, 包括超声速弹头绕流、超声速混合层、超声速边界层, 以及激波边界层相互作用流场, 显示出 NPLS 技术在激波复杂流场精细测试与流动显示中优势. 本文简要介绍 NPLS 技术在激波复杂流场测量中应用的研究进展.

关键词 纳米示踪, 平面激光散射, NPLS, 激波, 测量

1 引言

激波、激波边界层相互作用是超声速流动中普遍存在的流场结构, 对其进行深入研究, 不仅有利于加深对其流动机理的认识, 而且对工程应用有着重要的指导意义^[1-6]. 超声速流场中激波厚度很小, 和分子平均自由程处于同一量级, 要想准确地显示流场中激波的位置和形状, 要求流动显示技术具有较高的空间分辨率. 激波和边界层的相互作用导致边界层分离, 分离泡中包含不同尺度的涡结构, 对应不同的频率分量, 要观察流场内部的精细结构, 流动显示技术要有较高的空间分辨率和时间分辨率. 激波、激波边界层相互作用流场, 大都具有三维特征, 要求流动显示技术还应具有较强的三维流场分辨能力. 传统的光学流动显示技术, 如纹影、阴影和干涉等, 因其时空分辨率较低, 研究激波、激波边界层相互作用的能力受到限制. 2007 年, Kalra 等^[7] 采用纹影技术对 $Ma = 2.8$ 流场中 10° 斜劈产生的斜激波与边界层的相互作

用进行了流动显示研究, 纹影图像展示了流场的大致结构, 但无法反映流场中的湍流边界层、分离泡等流场精细结构. 平面激光诱导荧光 (planar laser induced fluorescence, PLIF) 和过滤瑞利散射 (filtered Rayleigh scattering, FRS) 等现代光学流动显示技术, 可对超声速三维复杂流场的某一截面进行流动显示, 甚至可对某些流场参数进行定量测量. PLIF 技术已在众多领域发挥了重要的作用^[8-13], 但在超声速流场中, PLIF 信号较弱, 通常必须用到增强型 CCD (intensified charge-coupled device, ICCD). Palma 等^[8] 采用 PLIF 技术研究了圆柱和圆锥在超声速流场中的绕流流场, PLIF 图像再现了流场中的激波结构. 由于图像分辨率较低, 激波界面较厚. 1990 年, Miles 和 Lempert^[14] 进行了 FRS 流动显示实验, 讨论并验证了该方法测量各种流动参量的可行性. 从那时起, FRS 逐渐得到了广泛应用, 并用于测量流场的密度分布^[15-19]. 由于这种分子瑞利散射光很弱, 需要 ICCD 才能获得, 信噪比较低. 1997 年, Lempert 等^[20] 采用 FRS

收稿日期: 2012-02-13, 修回日期: 2012-03-13

*国家自然科学基金 (11172326), 国家重点基础研究发展计划 “973” 项目 (2009CB724100) 资助

[†] E-mail: ysh_1819@yahoo.com.cn

技术研究了 $Ma = 2.5$ 流场中激波边界层相互作用流场, 观察到了流场某一截面内的流场结构, 再现了流场中的激波以及湍流边界层, 但是空间分辨率较低, 图像的信噪比较低. 常规的 PIV (particle image velocimetry) 速度场测试技术使用微米级尺寸的粒子作为示踪物, 原理上属于 Mie 散射, 不能满足超声速、高超超声速流场对示踪粒子跟随性的要求; 而对于 PLIF 技术, 使用气体分子散射, 则不存在粒子跟随性难题, 但其信号非常弱, 信噪比很低.

NPLS(nano-tracer planar laser scattering) 是作者近些年开发的一种基于示踪粒子散射的新的流动显示技术^[21-22]. 该技术以纳米粒子作为示踪粒子, 以脉冲平面激光作为光源, 通过 CCD 记录流场中的粒子图像实现超声速流动的高分辨率成像. NPLS 技术既不同于 PIV 测量中的 Mie 散射, 也有别于 PLIF 测量中的气体分子散射, 原理上属于纳米示踪的瑞利散射. NPLS 方法采用的纳米示踪粒子, 体积远小于常规 PIV 的示踪粒子, 解决了示踪粒子在超声速流场中的跟随性难题. 另一方面, 纳米示踪粒子的散射信号比 PLIF 分子散射要强几个量级, 而且通过激光偏振调节技术, 实现信噪比大幅增强. 所以, 利用常规 CCD 相机即可获得高质量的流场结构图像, 甚至肉眼也清晰可见, 实现了流动结构高分辨率可视化. 通过对流场结构 NPLS 图像的校准和计算, 可以得到超声速流动高分辨率的密度场、速度场等流场参数, 这是以往其他方法难以做到的.

目前, NPLS 技术已成功应用于激波边界层干扰、超声速混合层^[23-26]、超声速绕流^[27]、超声速边界层^[28]等多种超声速流场精细结构的测量研究. 根据 NPLS 技术的原理, 作者及其研究小组开发了一种新的超声速密度场测量方法^[29], 该方法可对超声速三维复杂流场进行瞬态密度切片测量^[30-32]. 针对超声速激波流场的特点, 构建了一套基于 NPLS 原理的粒子图像测速系统, 该系统采用纳米粒子作为示踪粒子, 利用瑞利散射作为散射信号, 选用高能量的激光器和高精度的同步控制器, 速度场计算过程中引入多种适用于超声速流场的高精度算法. 采用 NPLS 新技术, 作者对激波、激波边界层相互作用流场进行了 NPLS 流动显示、流场密度分布的定量测量, 以及速度场的全场瞬态测量, 揭示了流场的精细结构, 分析研究了流场的动力学特性.

2 基于 NPLS 原理的流动可视化与精细测量技术

基于 NPLS 原理, 研制了超声速流场 NPLS 试验系统, 开发了基于 NPLS 原理的超声速流场显示技术、密度场测量技术和速度场技术.

2.1 NPLS 技术

NPLS, 是近年来开发的一种新的研究超声速流场测试与显示技术, 可对超声速复杂三维流场进行高时空分辨率的瞬态流动显示与测量, 具有很高的时空分辨率和信噪比. NPLS 系统由光源系统、图像采集系统、同步控制系统、粒子发生器系统, 以及图像后处理系统组成, 如图 1 所示. NPLS 系统以双腔 Nd:YAG 激光器, 其单脉冲的能量为 500 mJ, 脉冲宽度 6 ns; 经透镜组后, 激光束被整形为厚度约为 0.5 mm 的片光, 照射到待测流场区域. 行间传输的双曝光 CCD 用于采集粒子散射信号, 其分辨率为 2048×2048 像素, 双曝光的最短间隔可达 200 ns. NPLS 系统同步控制器的精度高达 250 ps, 根据计算机设置的指令向激光器和 CCD 发送触发信号, 确保激光器的出光时间和 CCD 的两次曝光时间相对应, 从而使两束片光照下粒子的散射信号分别记录在两幅图像中. 纳米示踪粒子发生器将纳米示踪粒子均匀地撒播到风洞来流中, 本文所用示踪粒子的名义直径为 20 nm. 计算机负责存储、分析 CCD 采集到的图像, 并负责设置同步器的同步参数. 基于纳米粒子的平面激光流动成像技术的纳米粒子图像与片光切面内的流场结构有一定对应关系, 通过适当的处理方法就可以得到粒子图像所反映的流场结构. 采用跨帧技术, NPLS 系统不仅可以测量流场的瞬态空间结构, 还可以研究双曝光时间间隔内的流场时间演化特征.

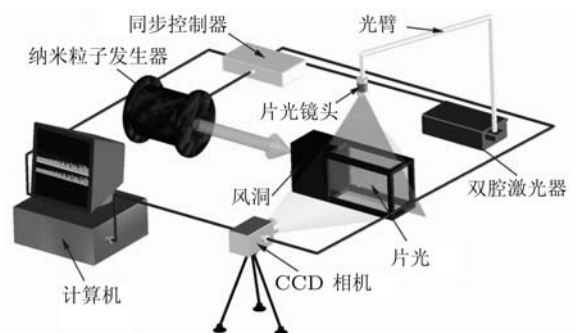
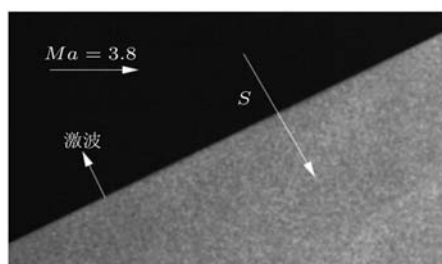
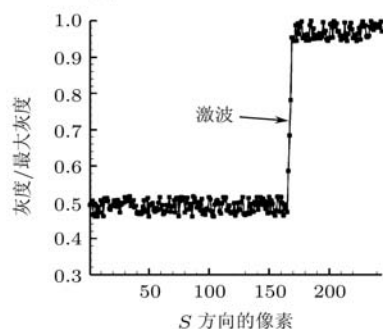


图 1 NPLS 系统组成示意图^[22]

NPLS 系统的空间分辨率高达微米量级, 时间分辨率为 6 ns, 时间相关分辨率最高可达 200 ns. NPLS 技术是以纳米粒子作为示踪粒子, 由图 2 斜激波的 NPLS 照片可以看出, 斜激波是一条明显锐利的分界线. 斜激波前流场密度低, 图像灰度也低; 斜激波后流场密度高, 图像灰度也大. 图 2 中沿 S 方向的灰度变化, 可以研究纳米



(a) 斜激波前后 NPLS 图像



(b) 沿 S 方向的相对灰度

图 2 超声速流场斜激波前后 NPLS 图像及其灰度分布

示踪粒子穿过激波过程的动力学行为, 并可以大致测量出激波的厚度、纳米粒子穿过激波的时间(弛豫时间)、粒子的平均粒径等. 众多实验结果表明, 该粒子在超声速流场中具有很好的跟随性^[21-34]. 作为一种流动显示技术, NPLS 技术关心的是示踪粒子的整体散射特性, 将纳米粒子看作大小服从某种分布的球形粒子, 其散射特性和粒子直径、入射光波长以及粒子材料折射率等众多因素有关, 可通过严格的瑞利散射理论计算得到.

图 3 所示为激波与边界层相互作用产生的复杂流场的 NPLS 图像, 图像的空间分辨率为 $10.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$, 流动方向从左往右. 图 3 中入射激波由绕流模型生成, 入射激波作用于边界层并导致其分离, 分离的边界层相当于流场中的障碍物, 因此在其上游产生诱导激波, 诱导激波与入射激波之间由马赫盘连接, 马赫盘之后的两条滑移线在流场扰动的作用下产生 K-H 不稳定涡结构, 并在下游出现了多重混合层相互作用的现象, 诱导边界层下游产生的膨胀波也反映在该图中. 从

图 3 中可以看出, NPLS 技术可以不仅同时捕捉到激波、膨胀波、边界层、滑移线和混合层等流动结构, 同时具有很高的空间分辨率, 能够捕捉到许多小尺度结构. 这说明该技术在超声速流动成像中不仅具有良好的跟随性, 而且具有足够高的散射光强, 可以实现对三维复杂流动瞬态结构的精细测量.

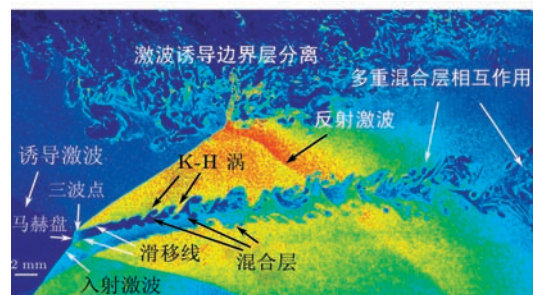


图 3 激波与边界层相互作用产生的复杂流场的 NPLS 图像

2.2 基于 NPLS 原理的超声速流动密度场测量

采用 NPLS 技术测量超声速流场精细结构时, 在超声速来流均匀撒播纳米示踪粒子, 示踪粒子良好的跟随性使得高密度流场区域内单位体积包含较多的纳米粒子, 散射信号较强, NPLS 图像中对应区域的灰度较高; 相反, 流场密度较低区域对应的 NPLS 图像灰度较低. 因此, 在均匀撒播示踪粒子的前提下, NPLS 图像灰度和流场密度之间存在一定的对应关系. NPLS 技术正是利用这一原理来观察流场中的流动结构的.

粒子散射成像受到背景噪声、暗信号、片光强度分布不均匀性等因素的影响, 通过特定的图像校准去除这些影响后, 再借助斜激波校准方法将图像灰度和流场密度的关系定量化, 进而实现超声速流场截面的瞬态密度场定量测量^[29], 基于 NPLS 密度场测量的校准方法如图 4 所示.

2.3 超声速流场 PIV 技术

考虑到激波、激波边界层相互作用流场的特点, 基于 NPLS 原理作者构建了一套超声速 DPIV 系统. 该系统有如下特点: 选用纳米粒子作为示踪粒子; 采用精度为 250 ps 的同步控制器, 目的在于降低从位移场到速度场换算过程中产生的误差; 采用单脉冲能量 500 mJ 的双腔 Nd:YAG 激光器作为光源, 以提高粒子图像的信噪比, 进而提高位移场计算精度; 在粒子位移场计算过程中综合采用

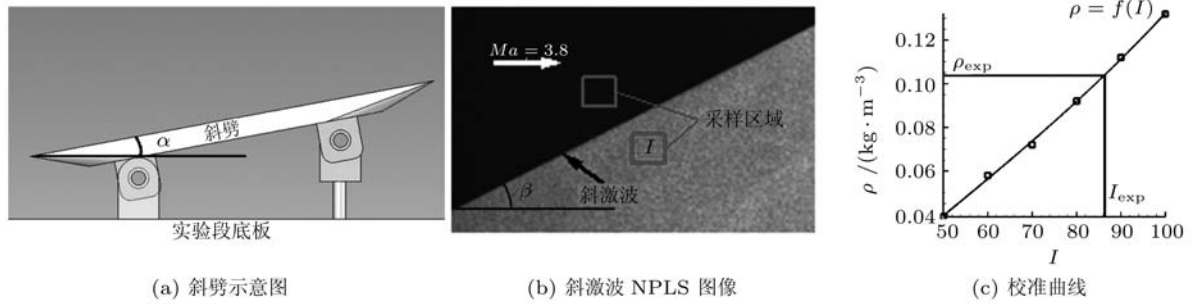


图 4 基于 NPLS 密度场测量的校准方法 [29]

预估校正、超分辨率、窗口变形修正和亚像素拟合等多种适用于超声速流场测量的高精度算法. 本文构建的超声速 DPIV 系统的硬件配置和 NPLS 系统相同, 如图 1 所示.

采用超声速 DPIV 系统测量速度场时, 不可避免地存在误差, 充分考虑各种误差来源, 并在实验过程中尽量避免, 以得到更为真实可信的速度场, 是 DPIV 实验过程中需要注意的问题. 可能会导致 DPIV 测量误差的因素 [35] 包括示踪粒子跟随性、粒子和背景噪声对比度、粒子数密度、粒子对的丢失、视差.

3 超声速弹头绕流流场的流动显示研究

3.1 弹头绕流流场的流动显示

本文分别采用纹影和 NPLS 技术对超声速弹头绕流流场进行了流动显示研究. 纹影技术的原理, 决定了纹影图像反映的是光线传播路径上密度梯度信息的积分, 空间分辨率较低. 超声速流场中的激波具有不同程度的三维特性, 因此纹影图像中的激波具有相当的厚度, 准确定位激波的位置和形状的能力十分有限, 如图 5 所示. 从如图 5 所示的纹影图中, 我们可以观察到凹窗弹头模型周围流场的大致结构, 但无法反映湍流边界层、尾迹等流场内部的精细结构. 虽然纹影技术反映流场精细结构的能力十分有限, 但作为一种较为成熟的传统光学流动显示技术, 纹影法不失为一种简单实用的观察流场大致结构的有效方法.

鉴于 NPLS 的高时空分辨率和测量三维空间流场能力较强的特点, 本文采用 NPLS 技术研究 $Ma = 3.0$ 的超声速弹头光学头罩绕流流场的精细结构. 微米量级的空间分辨率使得 NPLS 技术能够分辨流场中不同尺度的流动结构, 而 6 ns 的时间分辨率, 使得激光脉冲时间内的流场完全可以

看作是“冻结的”. 另外, NPLS 技术可测量任意截面内的流场结构.

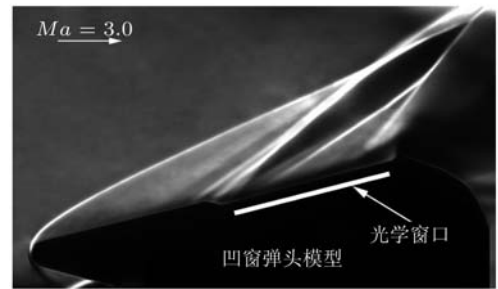


图 5 超声速成像制导弹头流场纹影图像

如图 6 所示, $Ma = 3.0$ 流场中, 凹窗弹头模型周围的激波、膨胀波、层流边界层、湍流边界层和尾迹等流场结构清晰可见, 其空间分辨率为 $89.6 \mu\text{m}/\text{pixel}$, 上下两图的时间间隔为 $5 \mu\text{s}$. 从图中可以看出, 实验段来流区域图像灰度较为均匀;

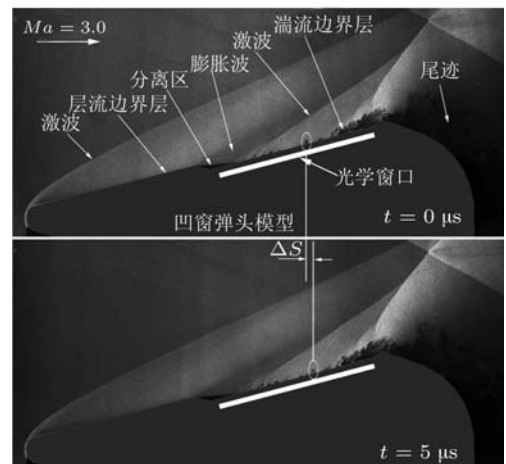


图 6 超声速成像制导弹头流场对称面的 NPLS 图像 ($Ma = 3.0$)

经过激波后灰度明显升高；而经过膨胀波的过程中，灰度逐渐降低。与纹影实验结果相比较，NPLS 图像中的激波比纹影图像中的要薄得多，流场中湍流边界层和尾迹中不同尺度的涡结构清晰可见，这些均是因为 NPLS 技术反映的是片光平面内的流场结构，其空间分辨率要远高于纹影技术。上下两图中的两个椭圆，分别表示湍流边界层中的一个涡在不同时刻所处的位置。对比 $5\ \mu\text{s}$ 前后的流场结构可以发现，模型头部弓形激波的位置和形状没有明显变化，湍流边界层的运动表现为整体向下游的平移，而涡的形状变化相对较小。

3.2 弹头绕流流场的密度场切片

基于超声速流动密度场测量技术，对 $Ma = 3.0$ 的超声速成像制导弹头流场中对称面流场的瞬态密度分布进行了定量研究，如图 7 所示，其空间分辨率为 $89\ \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。图 7 中的两个椭圆分别表示湍流边界层中小涡在前后两个时刻的空间位置。图 7 给出的流场定量密度分布，具有很高的时空分辨率，能够分辨 $6\ \text{ns}$ 时间内湍流边界层中不同尺度的密度变化。分析比较图 7(a) 和 7(b) 可以发现，经过 $5\ \mu\text{s}$ 的时间，湍流边界层中的涡结构整体表现为向下的平移，而自身的变形相对较小。流场密度和折射率之间满足 Gladstone-Dale 关系式，超声速凹窗弹头模型密度场的定量测量，为流场的气动光学效应研究奠定了基础。基于密度场定量测量的气动光学研究方法^[36]的高时空分辨率特点，能够对流场进行局部分析，避免其他测量方法的积分效应；可避免风洞边界层和环境干扰等因素的影响。

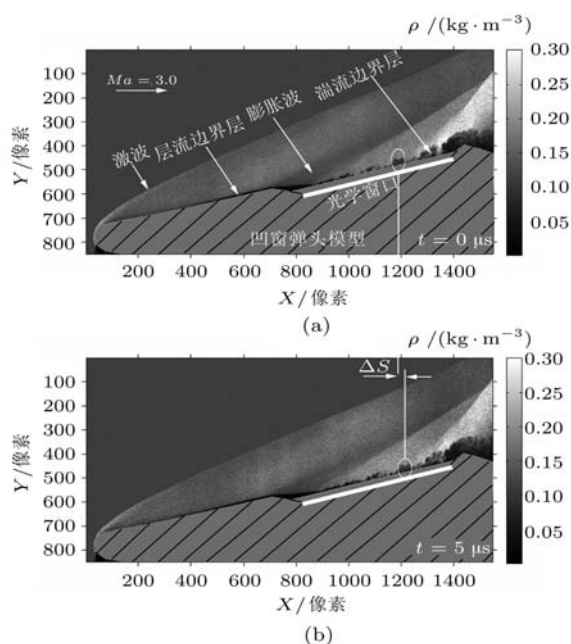


图 7 超声速成像制导弹头对称面的瞬态密度分布 ($Ma = 3.0$)

3.3 弹头绕流流场的速度场切片

基于超声速速度场技术，对 $Ma = 3.0$ 的超声速成像制导弹头对称面流场进行了速度场研究，结果如图 8 所示。其中图 8(a) 为速度大小云图；图 8(b) 为 X 方向速度分量 U 云图；图 8(c) 为 Y 方向速度分量 V 云图，图中两条直线表示粒子图像中激波的位置，与本图所示的激波位置重合得很好；图 8(d) 为涡量大小云图；图 8(e) 为速度矢量图；图 8(f) 为对应的流线图。从图 8 中可以看出：弓形激波前来流区域的速度分布比较均匀；经过弓形激波，速度大小和方向突然变化，以 Y 方向速度

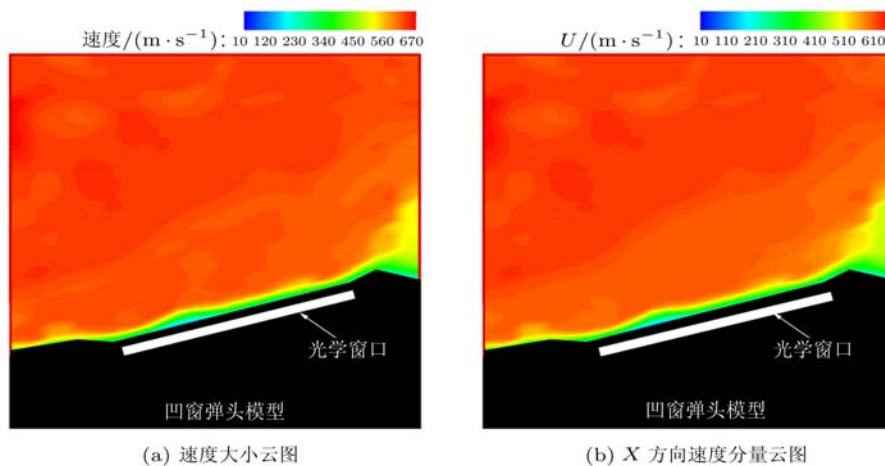


图 8 超声速成像制导弹头凹窗附近流场对称面速度场 ($Ma = 3.0$)

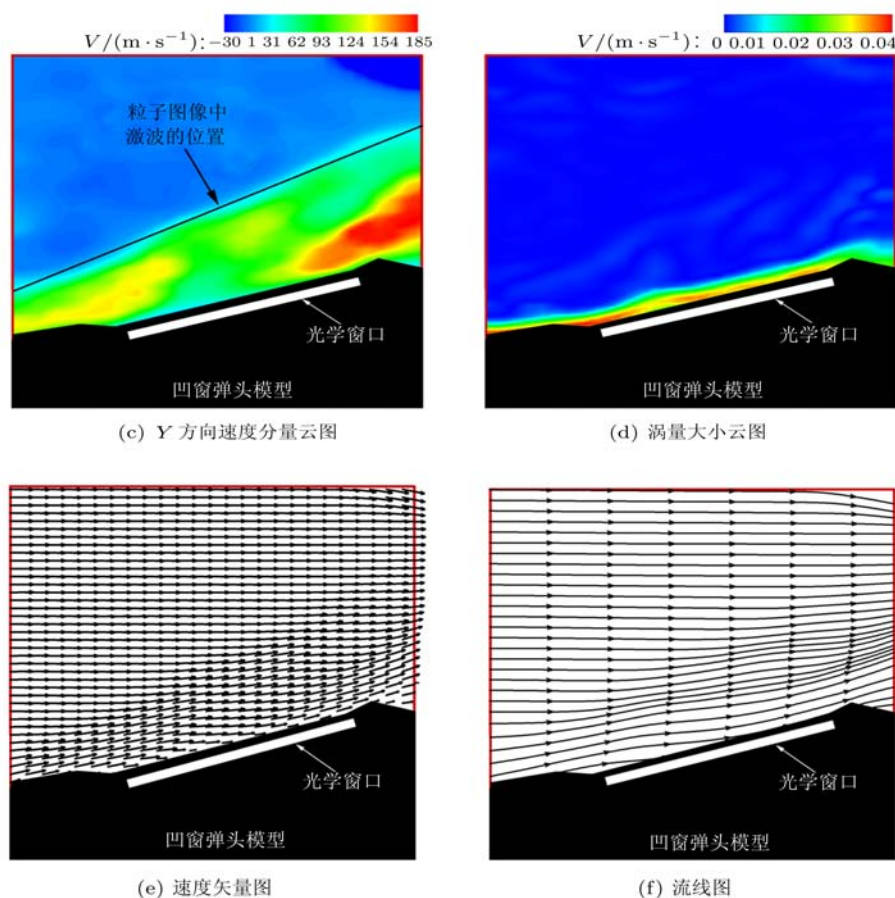


图8 超声速成像制导弹头凹窗附近流场对称面速度场 ($Ma = 3.0$) (续)

分量 V 变化最为明显; 模型表面的气流到达光学窗口凹槽开始膨胀, 速度矢量偏向光学窗口, 流线也逐渐向光学窗口靠拢; 受到壁面剪切的作用, 越靠近模型表面, 气流速度越小, 速度梯度越大, 导致模型表面涡量的大小明显大于外围涡量. 图8对应流场的右上角有一道斜激波, 这是激波与实验段壁面边界层作用导致边界层分离后, 诱导产生的激波. 从这些速度场的测量结构可以看出, 基于 NPLS 原理的密度场测量空间分辨率比速度场测量的空间分辨率要高得多.

4 超声速流场中激波边界层相互作用的流动显示研究

如图9所示, 为超声速流场中激波和边界层相互作用的示意图. 由于入射激波前后压力差的作用, 气流经过激波后, 压力突然上升, 通过边界层内的亚声速区域向上游传播, 使得激波入射点附近上游压力升高, 导致流速降低, 边界层增厚, 流线向外凸起. 较大的逆压梯度和黏性的作用, 往

往会导致边界层的分离, 产生分离泡. 分离泡的存在, 使得激波入射点上游形成一个压缩波区域, 进而汇聚成诱导激波. 诱导激波和入射激波相交, 产生两道激波和一条滑移线. 气流流经分离泡的后半段, 会形成扇形的膨胀波束, 尔后又由于气流方向终将要与壁面平行而形成一系列压缩波, 进而汇聚成反射激波.

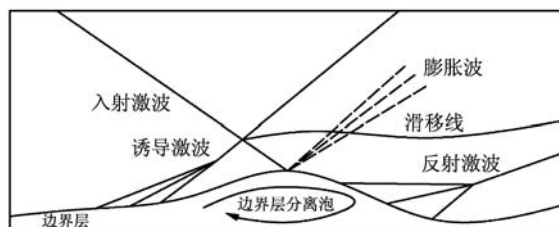


图9 激波边界层相互作用示意图

4.1 激波边界层相互作用的流动显示

在 $Ma = 3.0$ 超声速风洞实验段中放置角度为 15.7° 的斜劈, 产生激波角为 33° 的入射激波, 和风

洞壁面边界层相互作用,产生如图 10 所示的流场结构,其空间分辨率为 $43.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$. 从图 10 中可以看出,超声速来流区域图像灰度均匀,经过入射激波和诱导激波之后灰度突然升高,而膨胀波区域灰度逐渐降低,湍流边界层和分离泡中的图像灰度明显低于外部主流区域. 如图 9 所示的所有流动现象均展现在图 10 所示的 NPLS 图像中,湍流边界层和分离泡中不同尺度的涡结构清晰可见. 图 10 中两个椭圆表示湍流边界层中小涡在两个不同时刻流场中的位置,经过 $10 \mu\text{s}$ 的时间,湍流边界层的运动表现为整体向下游的平移,而自身变形相对较小. $10 \mu\text{s}$ 的时间内,分离泡的位置基本上没有变化,但受分离泡内涡结构平移的影响,分离泡形状变化较为明显. 鉴于激波边界层流场结构在时空分布上的复杂性和明显的三维特征,采用 NPLS 技术对激波边界层相互作用流场结构开展流动显示研究是很合适的.

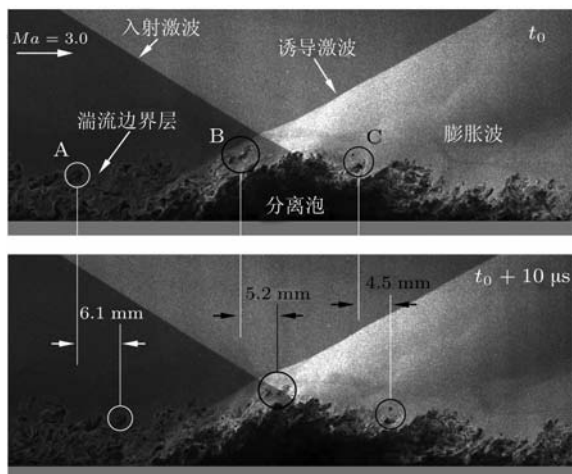


图 10 $Ma = 3.0$ 流场中激波边界层相互作用的 NPLS 图像

4.2 激波边界层相互作用的密度场切片

采用基于 NPLS 原理的超声速流动密度场测量方法,测量如图 10 所示流场的密度分布,结果如图 11 所示. 图 11 给出了密度场的定量分布,可以清晰地分辨流场中激波、膨胀波、湍流边界层、分离泡和滑移线等流场结构,湍流边界层和分离泡中不同尺度的密度变化清晰可见. 随着涡结构的移动和变形,湍流边界层和分离泡内密度的变化较为明显;而边界层外部流场在 $5 \mu\text{s}$ 的时间内,没有明显变化. 从图中可以看出,边界层分离泡内的密度要远远低于来流密度.

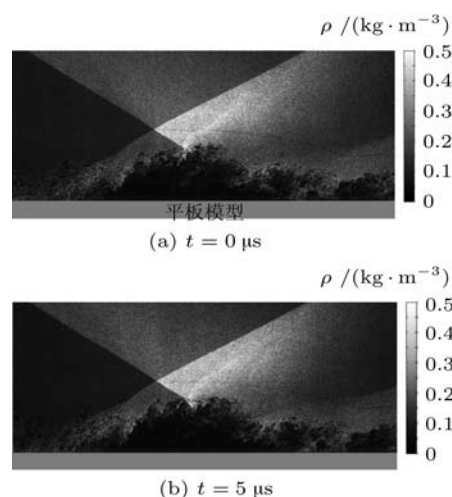


图 11 与图 10 相对应的流场密度分布

4.3 激波边界层相互作用的速度场切片

激波边界层相互作用的流场结构复杂,速度分布很不均匀,采用 DPIV 技术测量其速度场,不仅要求示踪粒子具有较好的跟随性,而且必须引入适用于该流场的高精度 PIV 算法. 作者采用上述超声速 DPIV 系统研究了激波边界层相互作用流场的速度分布. 实验的来流条件、斜劈以及斜劈的放置状态和 NPLS 实验时相同. 如图 12 所示,为平均流场速度矢量和 \bar{u}/U_∞ 云图;如图 13 所示,为平均流场流线和 \bar{v}/U_∞ 云图. x 和 y 方向查询区窗口尺寸分别为 1.42 mm 和 0.71 mm ,网格间距分别为 0.71 mm 和 0.355 mm . 从图 13 中我们可以看到,自由来流区域的气流水平向右运动;经过入射激波后,气流方向突然向下偏折;经过诱导激波后,气流方向突然向上偏折;入射激波和诱导激波相交之后,二者波后气流速度之间的差异,导致了滑移线的产生. 分离泡外围气流受到分离泡的影响,从平行壁面开始远离壁面,经过分离泡后,又逐渐靠近壁面,直至最后再次和壁面平行. 分离泡内的气流,受逆压梯度的影响,逐渐减速,直至产生向上游的回流.

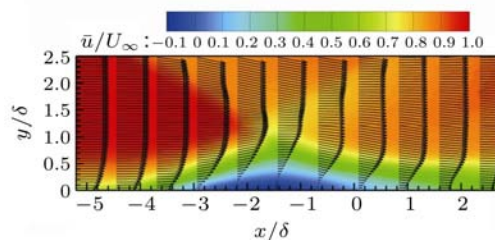


图 12 $Ma = 3.0$ 流场中,激波边界层相互作用平均矢量和 \bar{u}/U_∞ 云图

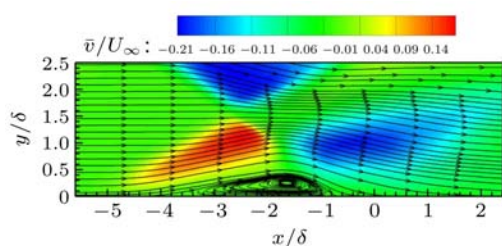


图 13 $Ma = 3.0$ 流场中, 激波边界层相互作用平均流线和 \bar{v}/U_∞ 云图

5 结 语

本文简要介绍了超声速流场 NPLS 技术在激波复杂流场测量中应用情况. 重点介绍了在超声速光学头罩弹头绕流、激波边界层相互作用等激波复杂流场的测量与显示中的应用, 包括激波复杂流场高时空分辨率流场密度分布和速度分布的定量测量. 采用超声速流场 NPLS 技术, 在对激波复杂流场进行高时空分辨率的流动显示的同时, 获取流场同一区域的速度场和密度场. 这些结果表明: (1) 作为一种新的流动显示技术, NPLS 流动显示技术具有非常高的空间分辨率, 甚至可以分辨出激波本身的厚度, 而且可以对三维瞬态流场进行流场切片显示, 这是传统的纹影、阴影和干涉方法无法达到的; (2) 基于 NPLS 技术的密度场测量技术, 在进行激波复杂流场密度场测量时, 具有与 NPLS 流动显示同样的高空间分辨率, 也可以分辨出激波本身的厚度, 而且可以对三维瞬态流场进行密度场切片; (3) 基于 NPLS 技术的速度场测量技术, 对激波复杂流场速度场进行测量时, 可以同时对流场进行密度场切片, 但速度场测量空间分辨率比密度场测量技术要低得多. NPLS 流场显示技术、基于 NPLS 原理的超声速流场密度场测量技术, 以及速度场技术, 可以成为研究激波复杂流场新的强有力手段.

参 考 文 献

- 1 Dolling D S. 50 years of shock wave/boundary layer interaction-what next? AIAA 2000-2596, 2000
- 2 Smits A J, Dussauge J P. Turbulent Shear Layers in Supersonic Flow. 2nd edition. New York: Springer, 2006
- 3 Humble R A, Scarano F, Oudheusden B W. Experimental study of an incident shock wave/turbulent boundary layer interaction using PIV. AIAA paper, 2006-3361, 2006
- 4 董志勇, 吕阳泉. 激波与边界层干扰研究综述. 浙江工业大学学报, 2009, 29(3): 295-300
- 5 Hadjadj A, Dussauge J P. Shock wave boundary layer interaction. Shock Waves, 2009, 19: 449-452
- 6 Délerly J, Dussauge J P. Some physical aspects of shock wave/boundary layer interactions. Shock Waves, 2009, 19:

- 453-468
- 7 Kalra C S, Zaidi S H, Alderman B J, et al. Non-thermal control of shock-wave induced boundary layer separation using magneto-hydrodynamics. AIAA paper 2007-4138, 2007
- 8 Palma P C, Danely P M, Houwing A F P, et al. PLIF thermometry of a free-piston shock-tunnel nozzle flow. AIAA paper 1998-2703, 1998
- 9 Danehy P M, O'Byrne S. Measurement of NO density in a free-piston shock tunnel using PLIF. AIAA paper 1999-0772, 1999
- 10 O'Byrne S, Stotz I, Neely A J, et al. OH PLIF imaging of supersonic combustion using cavity injection. AIAA paper 2005-3357, 2005
- 11 Danehy P M, Wilkes J A, Alderfer D W, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) investigation of hypersonic flowfields in a Mach 10 wind tunnel (invited). AIAA paper 2006-3442, 2006
- 12 耿辉, 翟振辰, 周松柏, 等. 欠膨胀自由射流密度场的丙酮平面激光诱导荧光显示与测量. 实验流体力学, 2006, 20: 85-90
- 13 Bathel B F, Danely P M, Inman J A, et al. PLIF visualization of active control of hypersonic boundary layers using blowing. AIAA paper 2008-4266, 2008.
- 14 Miles R B, Lempert W R. Two-dimensional measurement of density, velocity, and temperature in turbulent high-speed air flows by UV Rayleigh scattering. Appl. Phys., 1990, 51: 1-7
- 15 Elliott G S, Boguszko M, Carter C. Filtered Rayleigh Scattering: toward multiple property measurements (invited). In: Proceedings of the 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NEVADA, January 8-11, 2001
- 16 Panda J, Seasholtz R G. Density fluctuation measurement in supersonic fully expanded jets using Rayleigh scattering. AIAA paper 1999-1870, 1999,
- 17 Panda J, Seasholtz R G. Density measurement in under-expanded supersonic jets using Rayleigh scattering. In: Proceeding of the 36th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, NEVADA, January 12-15, 1998
- 18 Mielke A F, Elam K A, Sung C J. Rayleigh scattering diagnostic for measurement of temperature, velocity, and density fluctuation spectra. In: Proceedings of the 44th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, NEVADA, January 9-12, 2006
- 19 王杰, 姚建铨, 于意仲, 等. 瑞利散射用于气体流场二维瞬态密度测量. 光电子·激光, 2001, 12(1): 62-64
- 20 Lempert W R, Wu P F, Miles R B. Filtered Rayleigh scattering measurements using a MHz rate pulse-burst laser system. AIAA paper 1997-0200, 1997
- 21 Zhao Y X, Yi S H, Tian L F, et al. Supersonic flow imaging via nanoparticles. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(12): 3640-3648
- 22 易仕和, 赵玉新, 何霖, 等. NPLS 技术及其在超声速湍流流动显示中的应用. 力学 50 周年大会, 北京, 2007
- 23 Yi S H, He L, Zhao Y X, et al. A flow control study of a supersonic mixing layer via NPLS. Sci China Ser G, 2009, 52: 2001-2006
- 24 Zhao Y X, Yi S H, He L, et al. The experimental study of interaction between shock wave and turbulence. Chinese Sci Bull, 2007, 52: 1297-1301
- 25 赵玉新, 易仕和, 何霖, 等. 超声速湍流混合层中小激波结构的实验研究. 国防科技大学报, 2007, 29: 12-15
- 26 Zhao Y X, Yi S H, Tian L F, et al. The fractal measurement of experimental images of supersonic turbulent mixing layer. Sci China Ser G, 2008, 51: 1134-1143

- 27 田立丰, 易仕和, 赵玉新, 等. 超声速弹头凹型光学头罩流动显示研究. *实验流体力学*, 2009, 23(1): 15-17
- 28 He L, Yi S H, Zhao Y X, et al.. Visualization of coherent structures in a supersonic flat-plate boundary layer. *Chinese Sci Bull*, 2011, 56: 489-494
- 29 Tian L F, Yi S H, Zhao Y X, et al. Study of density field measurement based on NPLS technique in supersonic flow. *Sci China Ser G*, 2009, 52(9): 1357-1363
- 30 Yi S H, Tian L F, Zhao Y X, et al. Aero-optical aberration measuring method based on NPLS and its application. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 3545-3549
- 31 Zhao Y X, Yi S H, Tian L F, et al. Multiresolution analysis of density fluctuation in supersonic mixing layer. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 584-591
- 32 Zhao Y X, Yi S H, Tian L F, et al. Density field measurement and approximate reconstruction of supersonic mixing layer. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 2004-2009
- 33 田立丰, 易仕和, 赵玉新, 等. 超声速光学头罩流场的 PIV 研究. *实验流体力学*, 2010, 24(1): 26-29
- 34 He L, Yi S H, Zhao Y X, et al. Experimental study of a supersonic turbulent boundary layer using PIV. *Sci China Ser G*, 2011, 54: 1702-1709
- 35 Gilbert R A D. Evaluation of FFT based cross-correlation algorithms for particle image velocimetry: [Master Thesis]. London: University of Waterloo, 2002
- 36 易仕和, 田立丰, 赵玉新, 等. 基于 NPLS 原理的气动光学畸变测量方法和应用的研究. *科学通报*, 2010, 55(23): 2283-2288

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1774.O3.20120322.1451.001.html>

THE APPLICATION OF NANO-TRACER PLANAR LASER SCATTERING IN SHOCK WAVE FIELD MEASUREMENT*

YI Shihe[†] HE Lin TIAN Lifeng ZHAO Yuxin

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract There are usually three dimensional structure in the complex flow fields involving shock waves and interaction between shock waves and boundary layers. It is of low spatial resolution to study these flow fields using traditional flow visualization techniques, such as schlieren, shadow and interference methods, and the three dimensional characters are usually hard to be identified. The Nano-tracer based Planar Laser Scattering (NPLS) technique is a new method developed recently for the measurement and visualization of supersonic three dimensional complex flow fields. It has achieved spatiotemporal resolution, and is thus a good method for the measurement of complex flow fields involving shock waves. In recent years, mainly with NPLS technique, we have carried out vast experimental research on typical complex flows in the area of aeronautics and aerospace, including supersonic flows over bullets, supersonic mixing layers, supersonic boundary layers and the interaction between shock waves and boundary layers. And advantages of the NPLS technique are clearly revealed in these studies. Process is elucidated in this paper for the application of NPLS technique to the measurement of complex flow fields involving shock waves.

Keywords nano-tracer, planar laser scattering, NPLS, shock wave, measuerment



易仕和, 男, 1965 生, 湖南湘阴人, 国防科学技术大学航天与材料工程学院教授、博士生导师. 研究方向: (高) 超声速设备及其实验技术、(高) 超声速流场非接触精细测试技术、可压缩湍流及其应用实验研究、航天气动光学与成像制导技术. 曾获多项科研成果奖励, 其中部委级科技进步一等奖 3 项、二等奖 3 项、三等奖 1 项. 发表学术论文 65 篇, 其中 SCI 检索 18 篇, 发表学术专著 2 部.

* The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (11172326), the National Basic Research Program of China (2009CB724100).

[†] E-mail: ysh_1819@yahoo.com.cn