激波与湍流相互作用的实验研究

赵玉新 易仕和 何 霖 程忠宇 田立丰

(国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073. E-mail: freeflyzyx@yahoo.com.cn)

摘要 在超声速湍流混合层风洞中, 以NPLS技术为基础研究了激波与湍流的相互作用, 观察到了斜激波与湍流边界层的相互作用以及湍流混合层中的大涡对斜激波的影响. 所得到的 NPLS 实验图像不仅再现了复杂的流场结构, 而且不同图像之间还具有时间相关性. 在NPLS图像基础上探讨了激波与湍流相互作用的规律.

关键词 激波 湍流边界层 湍流混合层

激波与湍流的相互作用是超声速流动中最为复杂的现象之一, 对该现象的研究有助于深入理解激波与湍流流动机理, 而且能够应用于流动控制、超音速燃烧和强激光器等领域. 超声速湍流混合层具有十分复杂的流场结构, 在上下两层压力相等时主要表现为拟序结构的产生与演化; 而压力不等时, 流场中会出现激波, 激波与湍流混合层、边界层的相互作用等现象使流场结构异常复杂. 一般说来, 激波与湍流的相互作用可以分为几大类[1], 如激波与各向同性湍流的相互作用、激波与湍流射流的相互作用、激波与湍流混合层的相互作用以及激波与湍流边界层的相互作用等. 本文主要关心激波与湍流边界层以及混合层的相互作用.

Rose与Johnson[2]通过实验手段研究了激波与湍流边界层相互作用, 该实验在超声速湍流边界层中布置斜劈生成斜激波, 但实验方法的分辨率远远不够. Muck等人[3]、Erengil与Dolling[4]以及Beresh等人[5]也分别采用不同方法, 从压力脉动、大尺度结构的变化等角度研究了激波与边界层的相互作用, 但均由于分辨率的限制无法完成更为细致的分析. Settles等人[6]、Hayakawa等人[7]以及Samimy等人[8]采用凹腔产生剪切混合层, 采用斜劈生成斜激波, 研究了斜激波与剪切混合层的相互作用, 由于流场结构十分复杂, 且测试条件有限, 最终仅仅给出了马赫数对湍流强度的影响, 并未给出精细的流场结构. 除实验外, 激波与湍流相互作用的计算研究也取得一定的成果, 有研究人员采用雷诺平均N-S方程试图从计算的角度预测流场结构, 但湍流强度的计算很不准确. 近年来, 计算机技术的发展使得LES和DNS等方法能够越来越多地应用于激波与湍流的相互作用研究中, 如Ducros等人[9]采用LES研究了正激波与各向同性湍流的相互作用, Adams[10]采用DNS研究了激波与湍流边界层的相互作用, Li等人[11]采用DNS研究了激波与湍流相互作用中激波的非定常性. 比较而言, 近几年该领域实验研究的发展速度要慢很多, 但随着现代实验空气动力学的发展, 各种流动显示技术已经初步具备了研究该问题的能力, 如PIV在超声速速度场测量中的应用, PLS和PLIF技术在标量场测量中的应用[12~15].

本文使用的NPLS技术因其高时空分辨率的特点而成为超声速湍流研究的重要手段, 在国防科技大学自行研制的超声速湍流风洞基础上[16], 以激波对湍流边界层的作用以及湍流混合层中的大涡对激波的作用为主要研究对象, 辅以适当的理论分析, 探讨了激波与湍流相互作用的机理, 相应的结果具有一定的理论和工程价值.

1 实验装置

图 1 所示为实验中使用的吸气式超声速湍流风洞, 气源为经过干燥之后的空气, 风洞前端的阀门控制风洞的启动与关闭, 阀门后端的矩形槽道为稳定段, 它能够为喷管提供均匀的来流条件, 若下游安装单喷管则为简单的超声速风洞, 若安装双喷管则为超声速混合层风洞, 喷管之后为实验段和观察窗口, 主要由八块光学玻璃嵌入金属框架实现, 最后的扩压器与真空设备直接连接, 提供混合层与真空装置之间的压力匹配.

2006-09-08 收稿, 2006-12-14 接受
国家自然科学基金(批准号: 10672178)资助项目

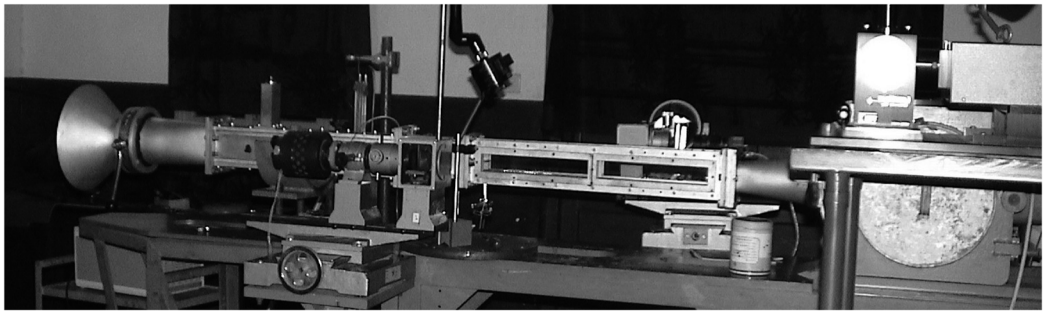


图 1 吸气式超声速湍流风洞

在实验中, 风洞采用双喷管模式运行, 上下喷管校测马赫数分别为 3.59 和 2.11. 来流通过内部安装的隔板分成上下两部分, 上侧气流经过总压调节器进入喷管, 下侧气流直接进入喷管. 通过控制总压调节器可以控制上喷管的出口静压, 当两喷管静压相等时, 实验段内部为压力匹配混合层, 当上喷管压力较高时, 实验段内部为压力不匹配混合层, 下喷管出口处会出现斜向下的激波, 激波与混合层以及下壁面湍流边界层相互作用, 本文所观察到的就是压力不匹配时的激波与湍流流场结构.

NPLS 技术可以实现湍流流场结构的高时空分辨率流动显示, 该技术涉及到纳米技术、激光技术和控制技术等多学科的交叉, 其中最为关键的是纳米技术. 传统的平面激光散射技术大都采用液滴或固体颗粒作为示踪粒子, 粒子的大小和浓度难以控制, 因此在跟随性和散射光强等方面很难调节. 超声速流动的速度较高, 可能产生的加速度也较大, 若采用示踪物显示流场结构, 必须保证示踪物的跟随性, 才能捕捉到精细的湍流流场结构. 经过大量实验反复验证, 本文选择纳米粒子作为示踪物, 结果表明即使是激波前后的速度突变, 粒子也能较好地跟随流体一起运动. 在本文的实验中, 消除团聚效应的纳米粒子经过旋风分离器之后通过喷嘴均匀地注入到下喷管中, 厚度为 1 mm 的脉冲激光从风洞正上方平行于观察窗口照射流场, 流场中纳米粒子散射的光线成像在 CCD 上就可以再现激波与湍流相互作用的流场结构.

2 激波对湍流边界层的作用

在超声速流动中, 由于边界层的存在, 斜激波不可能一直延伸到壁面. 边界层内部总是存在一层亚声速流, 激波后面的高压会通过这一亚声速层传到激波前面去. 这在边界层内就形成很强的逆压梯度. 在逆压梯度的作用下, 激波前面的边界层会变得很厚, 这相当于产生一个凹角, 而凹角会使主流提前开始产生一系列弱激波, 这一系列弱激波在离壁面一定距离处集中成为一道斜激波. 对湍流边界层来说, 边界层内部的亚声速底层较薄, 波后的高压前传的范围比层流边界层小得多, 波前的边界层也没有像层流那样长而强的逆压梯度段, 因此所反射的往往只有一道斜激波, 其流动图谱如图 2 所示.

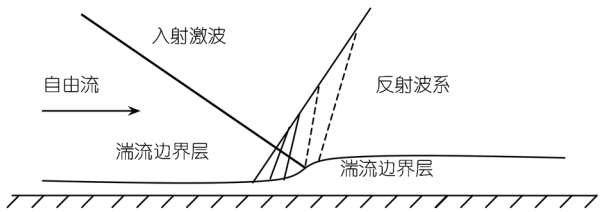


图 2 斜激波与湍流边界层的相互作用示意图

在超声速混合层 NPLS 实验中, 以纳米粒子为示踪粒子, 采用同步控技术观察到了斜激波与超声速湍流边界层的相互作用图案. 图 3 所示为边界层以及斜激波与边界层相互作用之后反射弓形激波的 NPLS 图像, 其中(a)为边界层流场的灰度图, (b)为(a)的边缘检测图, (c)为激波与湍流边界层流场相互作用的 NPLS 灰度图, (d)为(c)的边缘检测图, (e)为经过 3 μs 之后(c)的发展, (f)为(e)的边缘检测图. 3 幅边缘检测图像均采用 Canny 边缘检测算子计算, 并通过形态学图像处理中的膨胀方法增强边缘厚度, 以突出显示边界层和激波的结构.

从图 3(a)和(b)可以看出无激波时湍流边界层内部由于密度脉动而导致的粒子浓度变化. 由图 3(c)~(f)可以看出当斜激波与下壁面湍流边界层相互作用时, 湍流边界层在激波入射点之后突然增厚, 增厚的边界层相当于超声速流场中的阻碍物, 因此反

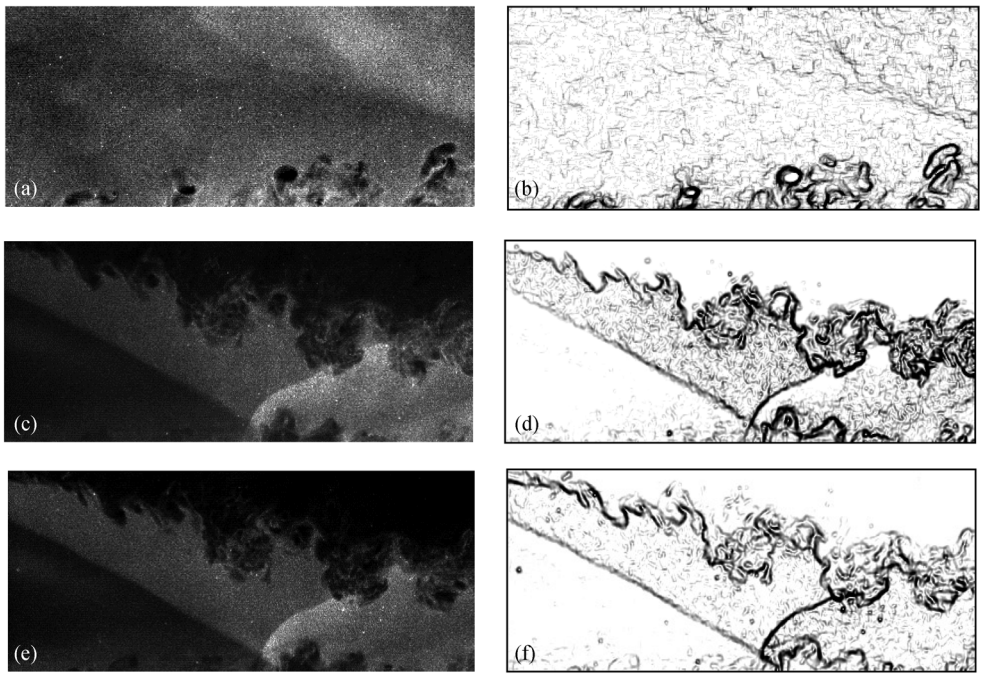


图 3 斜激波与湍流边界层相互作用的 NPLS 图像

射为弓形激波而不是规则的斜激波，弓形激波之后的湍流边界层并没有像无激波时的边界层那样持续增厚，而是有逐渐变薄的趋势. 比较图 3(c), (d)和(e), (f)可以发现，3 μs 的时间间隔内，斜激波与湍流边界层的交点有一定的漂移，且反射弓形激波的形状也有所变化，这说明湍流的非定常性对激波也有所影响. 由图 3 还可以看出，斜激波前后流动图像的明暗变化十分明显，而且反射后的弓形激波穿越混合层之后因为没有示踪粒子便观察不到了，由此也可以说明粒子具有较好的跟随性能，能够准确地反映边界层的湍流流场结构.

3 大涡对激波的作用

拟序结构是剪切湍流中的一种重要流动特征，在超声速混合层中最常见的拟序结构是由 K-H 不稳定性导致的大尺度旋涡，若流场中还存在激波结构，大涡对激波的作用使流动十分复杂. 本文在 NPLS 技术基础上研究压力不匹配的混合层时发现了湍流脉动大涡与斜激波相互作用的现象. 研究表明，给定尺度的大涡离斜激波比较远时，斜激波基本是直线，但随着大涡离激波越来越近，大涡的诱导速度场对斜激波的影响也越来越大，此时斜激波将会变成曲线激波，其示意图如图 4 所示，其中虚线为大涡对激波作用不够明显时的激波形状，实线为大涡相距斜激波较近时的斜激波形状，曲线为混合层界面，带箭头的圆环为大涡诱导速度场示意图.

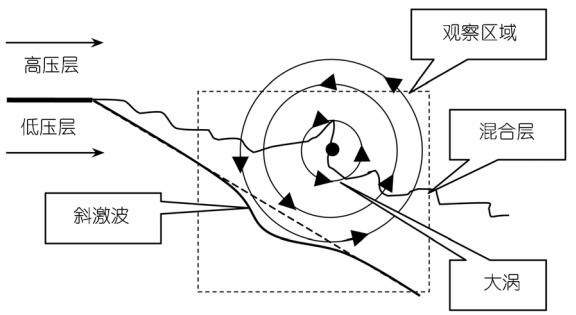


图 4 大涡对斜激波作用的示意图

图 5 所示为混合层中大涡对斜激波作用的 NPLS 图案，其中平滑的明暗界面为斜激波，破碎的明暗界面为湍流混合层. 图 5(a)所示为大涡对激波影响比较小的 NPLS 图像，图 5(b)和(c)是大涡对激波影响比较大的相隔 4 μs 的 NPLS 图像，图 5(b)和(c)空间位置相同，对应实际空间尺寸宽 18 mm、高 19 mm. 图 5(d)~(f)分别为相应的边缘检测图.

由图 5 可以看出，压力不匹配混合层上下两层流体之间掺混形成的大涡在距离斜激波较远时，激波没有明显的变形，但距离较近时，大涡会使原来为直

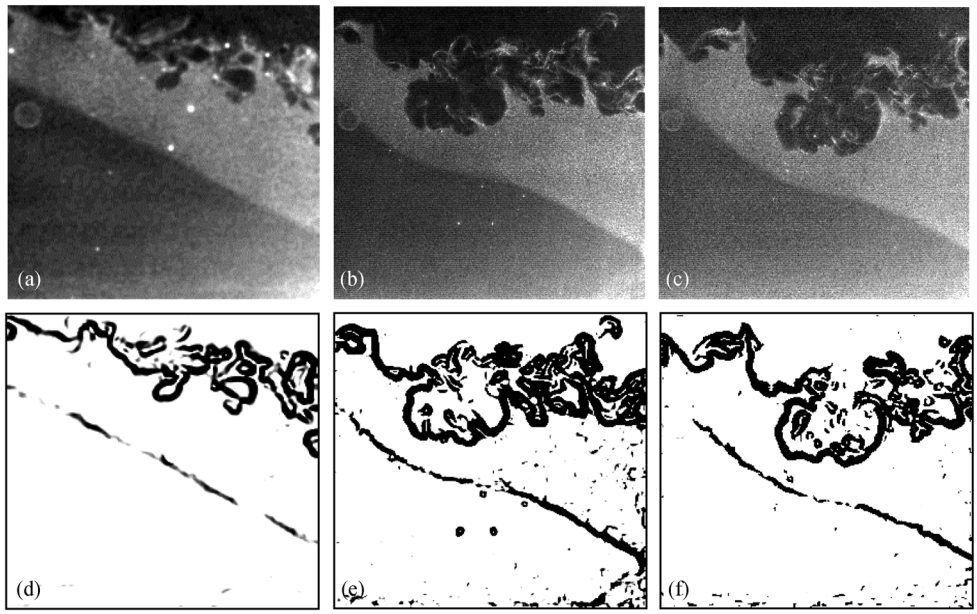


图 5 大涡对激波作用的 NPLS 流动图像

线的斜激波变成局部区域与大涡边缘形状相近的弯曲激波. 大涡向下游运动时, 斜激波的弯曲部分随之运动. 这一现象说明大涡运动造成诱导速度场的变化会在一定尺度内对流场中的激波产生影响, 而且激波形变对大涡运动的响应时间是非常短的. 由于超声速混合层速度场测量十分困难, 目前尚无法定量测量大涡诱导速度场, 所以定量化研究大涡对激波的作用是尚需进一步研究的问题.

4 小结

综上所述, 激波与湍流相互作用的实验研究证明了 NPLS 技术在超声速湍流流动现实中的可行性. 对所获取的 NPLS 图像分析表明, 斜激波与湍流边界层的相互作用导致极为复杂的流场结构, 入射的斜激波一般反射为弓形激波, 而且激波的入射点在湍流边界层脉动的影响下会前后漂移. 当湍流中的大涡与斜激波相距较远时, 大涡对斜激波并没有明显的影响, 但大涡与斜激波靠得很近时, 斜激波将会随着大涡的运动而改变形状.

参 考 文 献

1 Andreopoulos Y, Agui J H, Briassulis G. Shock wave-turbulence interactions. Annu Rev Fluid Mech, 2000, 32: 309—345[DOI]

2 Rose W C, Johnson D A. Turbulence in a shock-wave boundary-layer interaction. AIAA J, 1975, 13(7): 884—889

3 Muck K C, Andreopoulos J, Dussuage J P. Unsteady nature of shock wave/turbulent boundary layer interaction. AIAA J, 1988, 26(2): 179—187

4 Erengil M E, Dolling D S. Correlation of separation shock motion with pressure fluctuations in the incoming boundary layer. AIAA J, 1991, 29(11): 1868—1877

5 Beresh S J, Clemens N T, Dolling D S. The relationship between upstream turbulent boundary-layer velocity fluctuations and separation shock unsteadiness. AIAA J, 2002, 40(12): 2412—2422

6 Settles G S, Williams D R, Baca B K, et al. Reattachment of a compressible turbulent free shear layer. AIAA J, 1982, 20(1): 60—67

7 Hayakawa K, Smits A J, Bogdonoff S M. Turbulence measurements in a compressible reattaching shear layer. AIAA J, 1984, 22(7): 889—895

8 Samimy M, Petrie H L, Addy A L. A study of compressible turbulent reattaching free shear layers. AIAA J, 1986, 24(2): 261—267

9 Ducros F, Ferrand V, Nicoud F, et al. Large-eddy simulation of the shock/turbulence interaction. J Comput Phys, 1999, 152(2): 517—549[DOI]

10 Adams N A. Direct simulation of the turbulent boundary layer along a compression ramp at M=3 and Re=1685. J Fluid Mech, 2000, 420: 47—83[DOI]

11 Li Q L, Coleman G N. DNS of an oblique shock wave impinging upon a turbulent boundary layer. In: Friedrich R, Geurts B J, Métais O, eds. Direct and Large-Eddy Simulation V. The Netherlands: Kluwer Academic, 2003. 387—396

12 易仕和, 侯中喜, 赵玉新. 超声速自由漩涡气动窗口及其光学质量研究. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005. 10—11

13 范洁川. 近代流动显示技术. 北京: 国防工业出版社, 2002. 418—435

14 Hermanson J C. Shock-induced mixing of nonhomogeneous density turbulent jets. Phys Fluids, 2000, 12: 1210—1225[DOI]

15 Kit E, Krivonosova O, Zhilenko D, et al. Reconstruction of large coherent structures from SPIV measurements in a forced turbulent mixing layer. Exp Fluids, 2005, 39(4): 761—770[DOI]

16 田立丰, 赵玉新, 易仕和. 超声速混合层风洞设计研究. 见: 湖南省宇航年会论文集, 2005. 21—24