

文章编号:1007-3124(2000)03-0057-04

激波波后氮分子发射光谱的测量

杨乾锁,余西龙,姜乃波,竺乃宜,林贞彬

(中国科学院力学研究所高温气体动力学研究开放实验室,北京 100080)

摘要:利用多通道光学分析仪测量激波波后不同时刻高温氮气的辐射光谱发现,辐射随时间发生强烈的变化。在非平衡态和平衡态,光谱的各条谱线强度有明显的差别。光谱的结构特征也依赖于激波的速度。

关键词:激波;激波管;激波速度;非平衡辐射;瞬态光谱;氮分子

中图分类号:O354.5 **文献标识码:**A

Spectral measurement of nitrogen emission behind normal shock wave

YANG Qian-suo, YU Xi-long, JIANG Nai-bo, ZHU Nai-yi, LIN Zhen-bin

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The emission spectrum of nitrogen gas behind normal shock wave at different moments is measured with an optical multichannel analyser. The experimental results reveals that the spectrum gradually evolves from nonequilibrium state to equilibrium state after the shock wave passing. Meanwhile, the spectrum is also related to the shock wave velocity.

Key words: shock wave; shock tube; shock wave velocity; nonequilibrium radiation; instantaneous spectrum; nitrogen molecule

0 引 言

激波与气体相互作用,使气体分子激发至相关的激发态而导致气体的辐射。由于相互作用过程的强烈和短暂,使得这种辐射光谱在相互作用过程中发生强烈的变化^[1,2]。在以往的理论分析和实验测量中,一般认为气体分子从非平衡态过渡到平衡态。而非平衡态的光谱又成为研究非平衡态气体各种温度的基本实验数据^[2,3]。在 Sharma 的实验中,报告了氮气从非平衡态过渡到平衡态的光谱变化特征,并且以此研究了非平衡态气

收稿日期:1999-12-27;修订日期:2000-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19982005)

作者简介:杨乾锁(1963-),男,河北鹿泉市人,中国科学院力学研究所副研究员。

体分子的电子温度,振动温度和转动温度的变化规律。而且,作为交换能量的碰撞,在不同的激波速度范围内,交换方式的不同,又有可能因此而导致不同的非平衡辐射光谱。

笔者利用多通道光学分析仪测量的不同时刻氮分子的辐射光谱与 Sharma 的实验结果有所不同:在非平衡态实验结果和 Sharma 的结果类似,然而,随着系统向平衡态的过渡,Sharma 等人用于计算振动温度和转动温度的 $N_2^+(1-)(0,0)$ 和 $N_2^+(1-)(1,1)$ 谱带明显地减弱以致消失^[2]。同时,在不同的激波速度下,得到了具有不同结构形式的激波波后氮分子的辐射光谱。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。激波管的直径为 78mm,利用氢氧燃烧产生的高温气体冲破不同厚度的铝膜来产生具有不同速度的激波。1 号和 2 号探针用来测量激波速度。3 号探针用来触发多通道光学分析仪的延时电子快门,使得多通道光学分析仪记录下设定时刻激波波后的氮气的辐射光谱。电子快门曝光时间的长短和时刻可以调节。多通道光学分析仪的分辨率受到光谱仪前狭缝和所选择的光栅的制约。在我们的实验中,前端狭缝的宽度为 0.03mm,光栅上的刻线为 600 条/mm。激波管上安装的石英窗口可以保证在多通道光学分析仪观测的辐射波长范围内,窗口的透射率保持不变。

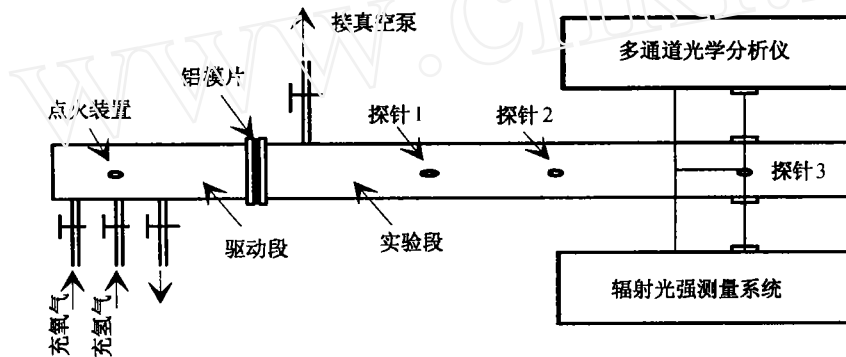


图 1 激波管,多通道光学分析仪及其辐射强度记录装置示意图

Fig.1 Experimental diagram of shock tube, optical multichannel analyser and light intensity recorder

在实验中,采用了两种不同厚度的铝膜和在驱动段两种不同的气体配比,在厚度为 1mm 的膜片所使用的驱动气体中,氮气、氧气和氢气分别为 0.8、0.5 和 4.2 个大气压,而 2mm 的膜片对应的气压比为 0.8、0.6 和 5.2 个大气压。在实验中,利用真空泵,首先将实验段抽至 10~15Pa,然后充氮气至 100Pa。

2 实验结果及其分析

图 2 为典型的激波波后氮分子辐射波长大约在 300~400nm 的辐射强度随时间的变化波形。由此可以看到,辐射的强度首先急剧地增加至最大,然后下降。一般认为,在辐射的上升沿,气体处于非平衡态;而当辐射至最大后,开始下降时,气体已处于平衡状态^[1,2]。

图 3 为激波速度在 6.4km/s 的激波波后不同时刻氮分子的发射光谱。这里(a),(b),(c),(d)和(e)延迟时间分别为 20, 25, 30, 45 μ s 和 55 μ s, 曝光时间为 4 μ s。(a)和(b)是上升沿即非平衡态的光谱;(c)是当辐射强度达至最大值时拍摄的光谱图;而(d)和(e)对应与下降沿即平衡态时的光谱。在图 3(a)中,A 和 B 所示的谱线峰值, 分别为 $N_2^+(1-)(0,0)$ 和 $N_2^+(1-)(1,1)$ 带头;而在图 3(c)中,C,D,E 分别为氮原子的 3 条光谱。在图 3(a)和 Sharma 的实验结果相比较, 可以发现^[2],

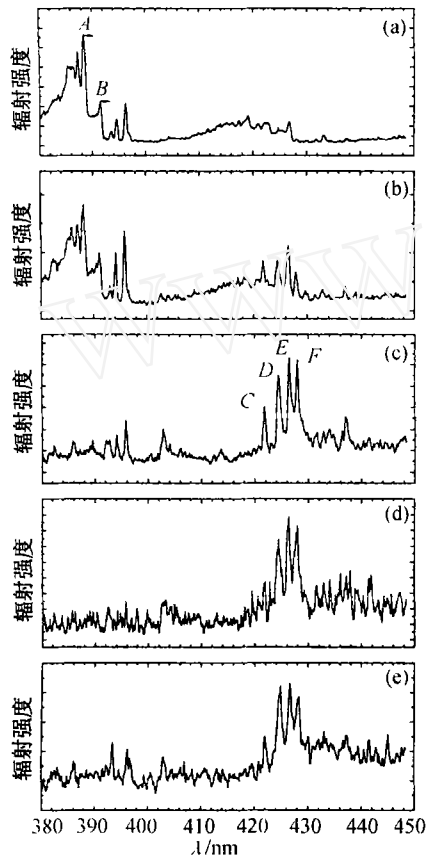


图 3 激波速度为 6.4km/s 时, 采用不同的延迟时间测得的激波波后氮分子的辐射光谱图

Fig.3 The variety of nitrogen emission spectra with different delay time behind normal shock wave where the velocity of shock wave is 6.4km/s

不同:其一,后者的谱线条数增多光谱图变得较为复杂。其二,后者的谱线较前者的谱线明

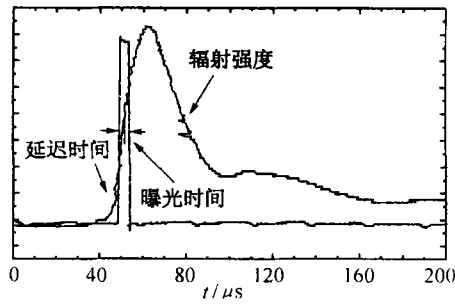


图 2 波长范围在 300nm 至 400nm 典型的激波波后氮分子的辐射强度随时间的变化波形
Fig.2 Typical evolution of nitrogen molecule radiation at the length range from 300nm to 400nm behind normal shock wave

在开始时的非平衡状态,两种实验结果的光谱结构基本一致;而在平衡态的光谱图中,具有一定宽度的 $N_2^+(1-)(0,0)$ 和 $N_2^+(1-)(1,1)$ 的带系逐渐减至很弱。而开始时的氮原子光谱带系的某些谱线,由开始时的很弱,随着相互作用的进行而逐渐增强,最终形成平衡态的光谱。这一点不同于 Sharma 的实验结果。在 Sharma 的实验中,当气体过渡至平衡态时, $N_2^+(1-)(0,0)$ 和 $N_2^+(1-)(1,1)$ 两个谱带仍然可以观测到,其原因可能与激波速度有关。上述的两个谱带是处于第一激发态的氮分子离子向基态的跃迁所致。因此可以看出,至少在非平衡态激发态的氮分子离子浓度很低,甚至不排除氮分子离子浓度有所降低的可能性。

实验结果还表明,在 6.4km/s 直至 7km/s,在相互作用开始时的非平衡态,波长在 380~450nm 的光谱结构特征基本不变。然而,当激波速度变为 4.5km/s 时,实验观测到波长在 370nm 至 410nm 的辐射光谱如图 4 所示。在此,OMA 的曝光时间增至 16 μ s 且延迟时间为 20 μ s。尽管在激波速度为 4.5 km/s 两个光谱图中,各条谱线的强度有些差别,但在结构上基本相同。和图 3 的实验结果相比较,两者在结构上有两个方面的不同:

显著变窄,而使得各条谱线显得相互孤立。而最为明显的是在图3中的氮分子离子的两个谱带在此消失了。这种差别是由于在6km/s以下的激波,分子间的碰撞主要通过重粒子的碰撞来实现。而在6km/s以上,这种碰撞的能量交换主要通过电子间的碰撞来完成。而在后一种非平衡辐射过程中, $N_2^+(1-)$ 带系应该能明显地被观测到^[1]。

在光谱的理论计算中^[4,5],对于象氮分子这样的双原子分子,由于多普勒加宽效应和相同电子激发态和相同振动激发态上的不同转动激发态将会使分子谱线形成很小的间隔甚至重迭的谱线。在此,氮分子的转动能级间隔大约在 10^2cm^{-1} 的范围内,而OMA却没有这样高的分辨率。因此,对应分子谱线的观测结果为具有固定带头和一定宽度的带状光谱。另外,由于氮分子在失去电子后才可转变成氮分子离子。因此,氮分子离子相对于氮分子需要较多的能量,而这些能量来自分子间的碰撞。

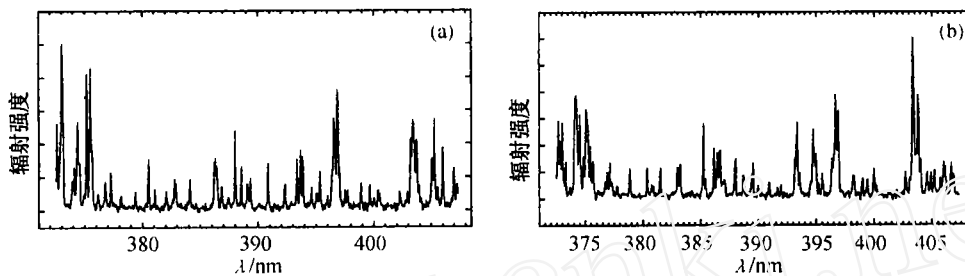


图4 激波速度为4km/s时,激波波后非平衡态氮分子的两个辐射光谱图,这里延迟时间为20μs

Fig.4 Two spectra of nitrogen emission with 20 microsecond delay time behind normal shock wave where the velocity of shock wave is 4.0km/s

所以,如果碰撞使氮分子离子的相对浓度越高,对应的氮分子离子的 $N_2^+(1-)(0,0)$ 和 $N_2^+(1-)(1,1)$ 带系的谱线也应该就越强。在实验中观察到的这两条谱线的开始时的激烈增强和随后的减弱,很可能是由于氮分子离子在这一激发态的一种首先由小到大随即又减弱的一种暂态的弛豫过程。反过来讲,开始时分子间的碰撞应该最强,随后逐渐变弱。

事实上,分子间碰撞导致的热动能交换,相对于分子的振动能级间隔和电子态的能级间隔是比较小和很小的。因此,振动能级和电子态的激发应该是具有相同能量的纯激发转动态向激发振动态或激发电子态弛豫的结果。由于这种弛豫,导致平衡态的破坏,并产生了与理想气体的差别。对应的这种能量在整个系统能量中所占比例的大小,决定了这种真实气体效应对气体特性影响的强弱。有关这方面的研究正在继续。

3 结 论

在激波和氮气的相互作用中,辐射光谱随时间发生明显的变化,非平衡态和平衡态的谱线强度明显不同。此外,较大的激波速度状态导致谱线变宽,使得多条谱线连接在一起。同时,随着激波速度的变化,各条谱线的相对强度的变化也有所不同。

(下转第65页)

流偏转方向一侧前缘涡破裂位置的延迟量也增大,另一侧前缘涡受喷流的影响(提前破裂的趋势)有减小的趋势。

(2) 对于相同的相对喷流速度比和相同的偏转角度,矢量喷流对三角翼前缘涡破裂的影响随着攻角的增大有减小的趋势,即当攻角增大时,矢量喷流使与喷流偏转方向一致的前缘涡有延迟破裂的趋势和使另一侧的前缘涡提前破裂的趋势都有所减小。

(3) $\alpha = 40^\circ$ 时,很小的带有偏转角度的喷流就可使流态由均衡的双向掺混转化为偏转方向的单向掺混。

参考文献:

- [1] HELIN H E, WATRY C W. Effect of trailing edge jet entrainment on delta wing vortices. *AIAA Journal*, 1996, 34(7): 802~804.
- [2] NAWROCKJ D A. Differential and vectored trailing edge jet control of delta wing vortices. AIAA 95-0008.

(上接第60页)

参考文献:

- [1] SHARMA S P, WHITING E E. Modeling of nonequilibrium radiation phenomena. An Assessment AIAA 94-0253. 32nd Aerospace Sciences Meeting, January 10~13, 1994, Nevada.
- [2] SHARMA S P, GILLESPIE W. Nonequilibrium and equilibrium shock front radiation measurements. *J. Thermophysics. Heat Transf.* 1991, 5(3): 257~265.
- [3] 李招宁,竺乃宜,刘玉珍. 正激波后 $\text{OHA}^2 \text{II}^+ \rightarrow \text{X}^2 \text{II}$ 瞬态光谱的测量. *流体力学实验与测量*, 1997, 11(3): 44~47.
- [4] ARNOLD J O, WHITING E E, LYLE G C. Line by line calculation of spectra from diatomic molecules and atoms assuming a voigt line profile. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1969, 9(6): 775~798.
- [5] WHITING E E, ARNOLD J O, LYLE G C. A Computer program for a line by line calculating of spectra from diatomic molecules and atoms assuming a voigt line profile. NASA TN D-5088, 1969, 1-115.