第 35 卷 第 3 期 力 学 学 报 Vol. 35, No. 3
2003 年 5 月 ACTA MECHANICA SINICA May, 2003

二维高超声速钝体激波层紫外辐射的实验观察[1)]

余西龙 林贞彬 竺乃宜 张恒利 郭大华 杨乾锁 林建民
(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100080)

03 A

摘要 利用光学多道分析仪, 在 JF-10 氢氧爆轰驱动高焓激波风洞上测量了二维钝体驻点的发射光谱. 实验结果表明, 在 200~280 nm 的波长范围内, 辐射主要来自 NO 的 γ 系, 同时还分辨出了 OH 的 A-X 跃迁、 N_2^+ 的 B-X 跃迁和烧蚀金属的原子线辐射.

关键词 高焓激波风洞, 发射光谱, 非接触测量, 高超声速流

引 言

对于高超声速飞行器, 诸如跨大气层飞行器, 可控制再入以及轨道转移飞行器 (AOTV) 和先进空间运输系统兴趣的日益增加使得对高超声速气动热的研究更为重视 [1]. 飞行器流场热环境和流动的精确数据获得已经变得比较重要 [1].

由于高超声速飞行器周围流场的空气处于振动激发、解离和电离状态, 对高超声速流动中非平衡现象和机理的研究是一项极有挑战性的工作. 它首先要求先进的诊断和测量手段 [1,2]. 由于任何接触式的测量器件, 都会对局部流场造成极大的干扰, 导致不能获得正确的数据, 因此, 发展非侵入的诊断方法是很重要的. 其次, 对于包含有物理化学过程的非平衡现象的研究已经不能采用测量宏观的温度和压力等参数. 深入到测量组分参数, 诸如分子态分布和组分密度等更为重要. 而在研究高超声速非平衡机理研究中, 光学诊断技术是主要研究手段. 现有的光学诊断方式, 如相干反斯脱克斯光谱 (CARS) 、激光诱导荧光 (LIF) 、电子束荧光 (EBF) 等等, 由于设备要求性能较高和复杂的光路布置, 相对来说比较困难. 发射光谱是光学诊断方式中比较容易实现的一种. 同前面三种诊断方式相比, 它获得的信息不是很多, 但是对于非平衡辐射现象研究却是最直接和方便的测量方式.

辐射光谱的测量, 是建立在气体直接辐射的基础上, 非常容易进行的, 它是一种沿光线实现, 能够获得上能级的振动温度, 转动温度和电子温度, 和沿光程的数密度.

高超声速非平衡机理的研究还需要高焓地面模拟设备. 产生高焓高压驻室气体是获得高超声速来流的必要手段. 迄今为止的几种高焓模拟设备中, 激波风洞是进行大尺寸模型实验的重要地面手段之一 [6]. 而模型尺寸大小是模拟高超声速非平衡流动的一个重要参数. 弹道靶上的模型虽然也可以获得同激波风洞相同的速度环境, 但是发射的模型尺寸不能做到很大, 因此, 不能充分满足模拟准则. 其次, 不能发射非对称模型. 因此, 对于模型流场的光谱, 由于受到地面模拟设备驱动能力的限制, 还缺乏有很强说服力的数据. 1999 年, 由于 LHD 建成 JF-10 高焓爆轰驱动激波风洞 [3] , 获得了焓值在 10 MJ/kg 以上、自由流速度在 5 km/s 的高焓实验气流 (由驱动状态确定) , 因此, 有能力模拟高超声速非平衡流动现象. 我们的工作就是利用光学多道分析仪 (OMA) 测量了二维钝体非平衡辐射. 这一初步工作对于了解高超声速再入现象中的气动热和气动物理特性有一定的意义.

1 实验设备和模型

实验主要是在 JF-10 氢氧爆轰驱动高焓激波风洞上完成的 (图 1) , 该风洞是国际上首次采用氢氧爆轰驱动方式运行的激波风洞. 由于采用爆轰驱动, 所以可以在被驱动段获得高温高压状态的实验气体. 本次采用的实验状态是驻室总温约为 7 600 K , 总压约为 8.8 MPa , 焓值约为 17.1 MJ/kg.

JF-10 高焓激波风洞由五部分组成: 卸爆段、驱动段、被驱动段、气体供应系统及真空系统、喷管

2001-11-01 收到第一稿, 2002-09-23 收到修改稿.
1) 国家自然科学基金资助项目 (19982005 和 10032050).

万方数据

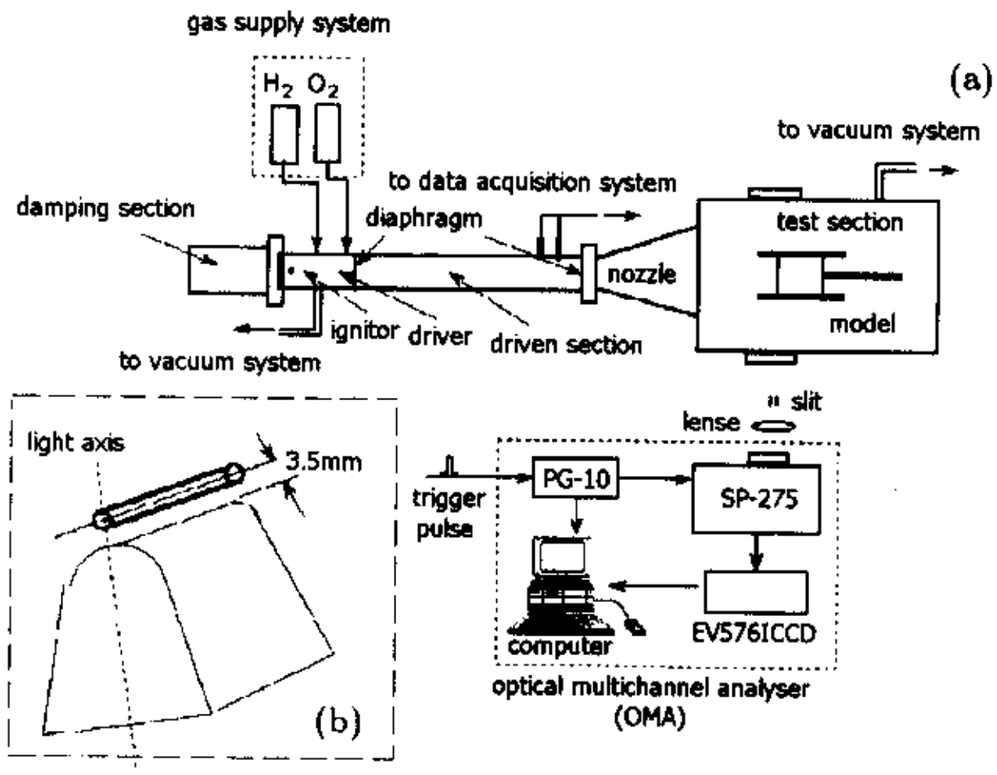


图 1 JF-10 氢氧爆轰激波风洞和光学测量系统

Fig.1 Schematic of JF-10 facility and experimental setup

(a) JF-10 oxyhydrogen detonation driven shock tunnel;

(b) Arrangement of optical system

和实验段. 驱动段长度和被驱动段的长度均为 10 m. 驱动段的直径为 150 mm，被驱动段的直径 100 mm. 被驱动段上安装有电离探针来测量激波速度.

采用的喷管为半锥角 7°7′ 的锥型喷管，喷管喉部直径为 18 mm，出口直径 500 mm，喷管的膨胀比 771，名义马赫数 6.6. 获得的自由流速度为 5 km/s，自由流的压力为 220 Pa，温度为 880 K，有效气流持续时间约为 1.5 ms.

模型是铝制二维柱楔模型，头部直径 40 mm，两端加有平面护板以防止边缘气流的干扰. 上面对称的打有直径为 5 mm 的圆孔，作为通光孔以便钝头体驻点或其它部位的辐射能够通过并通过风洞的窗口引出.

实验段窗口材料为 CaF_2，它在从深紫外波段到中红外波段的较大范围内具有良好的通光性能. 透过率曲线呈现平台状.

光谱数据由光学多道分析器 (optical multichannel analyzer IV, OMA IV) 接收. OMA IV 放置在风洞检测窗口外边的光学平台上. OMA IV 的入射狭缝与激波风洞 CaF_2 窗口距离约 30 cm. 时间平均的辐射光谱由增强型 CCD 相机接收 (像素 576×384，型号 Priceton Instruments EVV576×384). 光谱仪为 Acton 公司的 SP-275，内有三块光栅，分别为 300 条 /mm, 600 条 /mm 和 1200 条 /mm. 本实验采用的是分辨率最高的 1200 条 /mm 的光栅，分辨率为 0.06 nm/pixel. SP-275 光谱仪的曝光时间由 PG-10 脉冲发生器控制，实验中曝光时间设定为 24 μs. 我们首先利用点火脉冲来出发 MFS-2 脉冲发生器，经过 MFS-2 延迟一定时间后产生一个脉冲信号，出发 PG-10 脉冲发生器，同时在光谱仪对面设置一光电二极管，监测气流发光，确定测量得到的光谱信号是实验有效时间内. 图 2 分别为点火脉冲、 MFS-2 双脉冲发生器、光电二极管信号和 PG-10 脉冲的时序关系，从图 2 可以推断出采集到的是实验有效时间内的光学信号.

图 3 是多次实验被驱动段电离探针测量的激波速度，从图中可以看出，实验的重复程度是很高的.

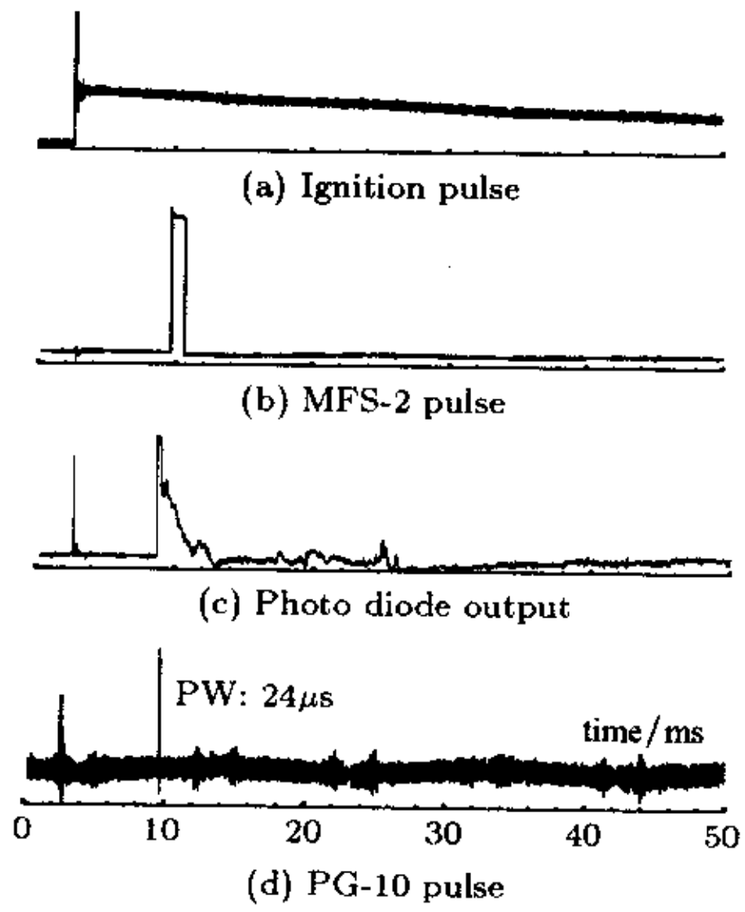


图 2 不同脉冲之间的时间序列关系

Fig.2 Time relationship among pulses series

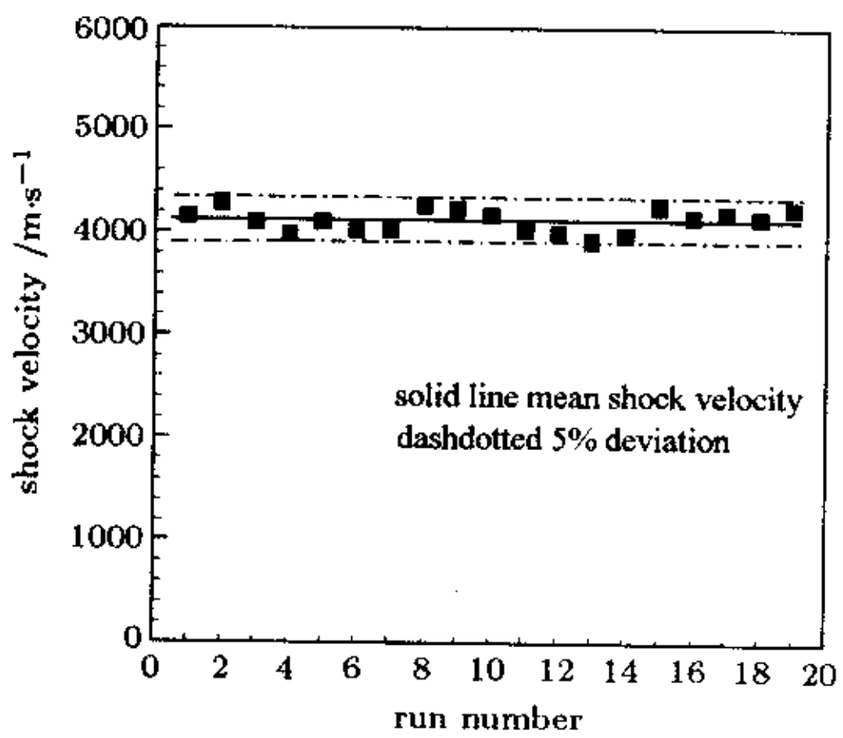


图 3 实验激波速度

Fig.3 Shock velocity deviation of different run

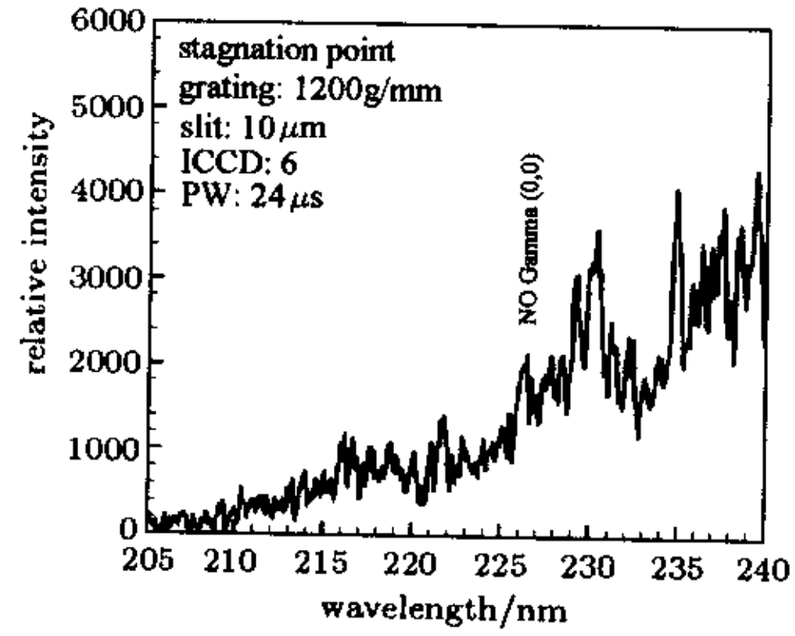
2 实验光谱和分析

我们采集的波长范围在 200~440 nm 之间. 因为

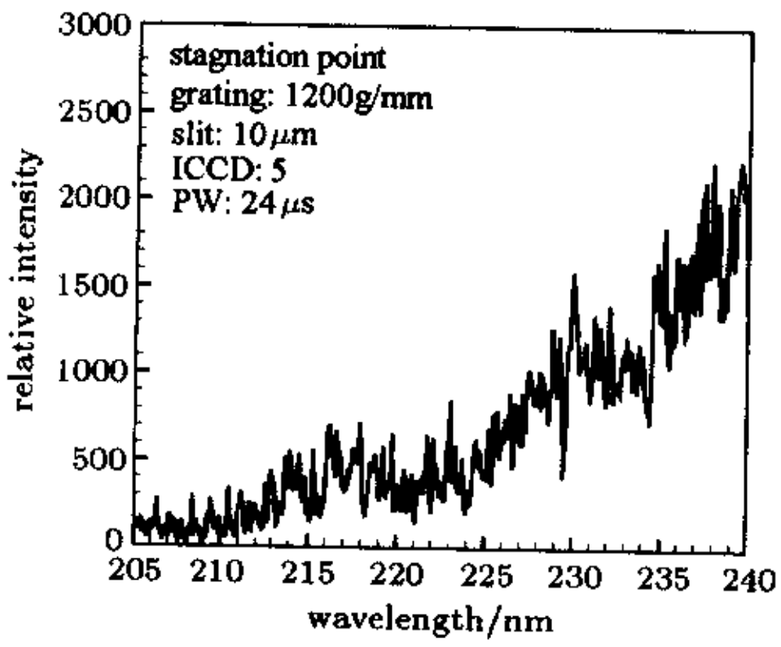
万方数据

采用的高分辨率光栅每次的摄谱范围只有 35 nm，所以整个实验完成需要 7 次实验.

在紫外段进行了多次重复实验，图 4 是两次在同一谱段范围内的实验光谱. 从光谱轮廓和谱线的峰值强度来看，说明自由流的重复程度是很好的. 另外，又被驱动段 5 区尾端激波马赫数 (图 3) 的测量的重复性也可以说明这一点 (图 4 至图 11 中的纵坐标均为光谱的相对强度).



(a)



(b)

图 4　波长在 205~240 nm 之间的发射谱

Fig.4　Captured spectra at wavelength from 205~240 nm

观察得到谱线在 200~280 nm 的范围以内，可以准确无误地辨识到是 NO 的 γ 系 A-X 跃迁. 当然，还不能排除存在 NO β 系 B-X 的辐射. 早期 AVCO 的实验表明 [4]， NO β 在这一范围内的辐射很弱. 而且，从我们的高分辨率光谱结果来看，可以很明显地辨识出 NO γ 的振动带系有 (0,0), (0,4). 同时，在这一谱段范围内，又可能有激波管壁烧蚀下来的金属杂质的元素谱线几乎没有，因此， 200~280 nm 范围内的辐射来自 NO 是确凿无疑的.

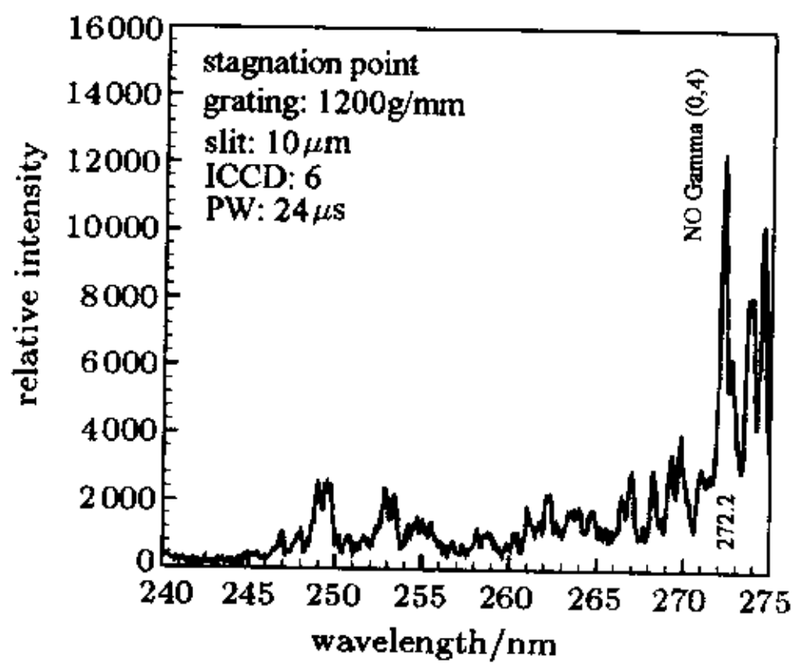


图 5　波长在 240~275 nm 之间的发射谱

Fig.5　Captured spectra at wavelength from 240~275 nm

在图 6 上显示的谱带结构，从两个特征的峰值 280 nm 和 306 nm 可以明确地判定，这一辐射是 OH 的 $A^2\Sigma^+ \rightarrow X^2\Pi$ 跃迁的辐射，这说明，爆轰气中氢氧反应后生成的水蒸气沉积在被驱动段后，每次实验后虽然进行多次抽空，但仍不能消除. 图 7 是利用光谱程序计算的 OH 发射光谱，可同图 6 进行相互比较.

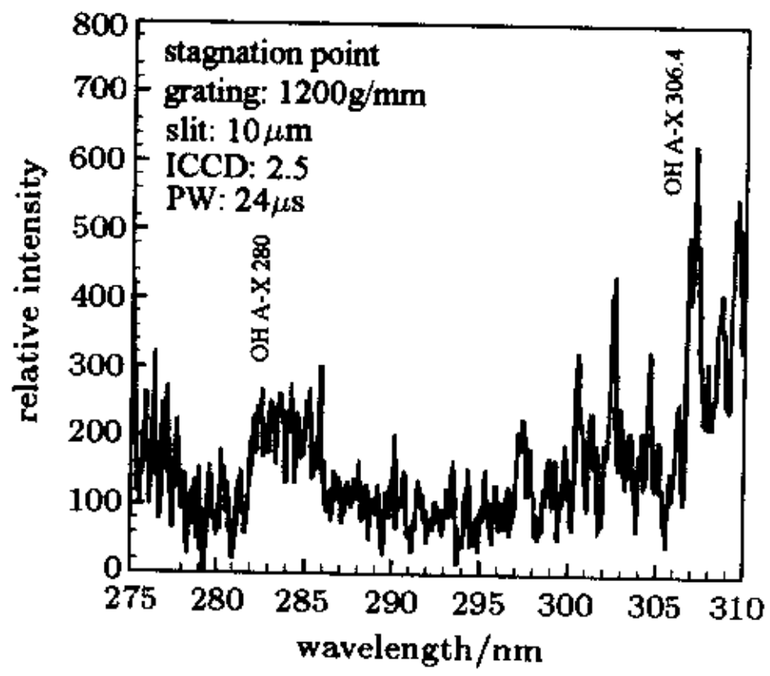


图 6　波长在 275~310 nm 之间的发射谱

Fig.6　Captured spectra at wavelength from 275~310 nm

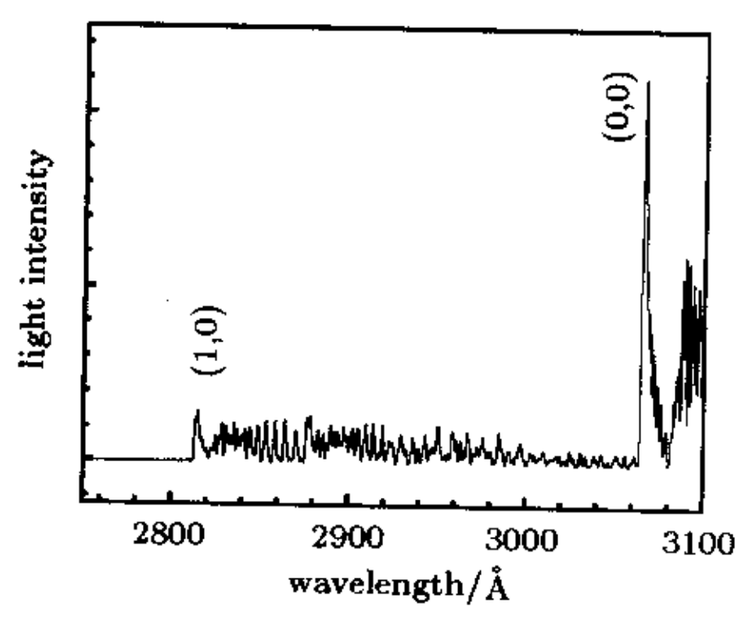


图 7　计算的 OH A-X 跃迁的谱带结构

Fig.7　Computed spectra of OH A-X transition

万方数据

出现在图 8, 图 9 中几个分立的谱线, 显著不同于连续弥漫的分子光谱. 这几条谱线应该是气流中的金属杂质元素的发射谱. 我们同标准的谱带表进行对照, 可以肯定, 图中的谱线有 Cu, Cr, Ni 和 Fe. 这一段谱宽范围的谱线同理论计算比较 [5,6], 理论光谱上应该存在 $N_2(1+)$ 的发射谱, 但是在我们采集到的谱线上, 没有观察到明显的分子光谱结构. NASA AMES 研究中心的风洞上的实验拍摄的 $N_2(1+)$ 的谱带结构很明显 [7~10]. 而我们的结果为什么没有这一带系, 是不是存在一定的化学反应, 导致气流中 N_2 的辐射被别的组分的辐射湮没呢, 还没有一个确定的结论.

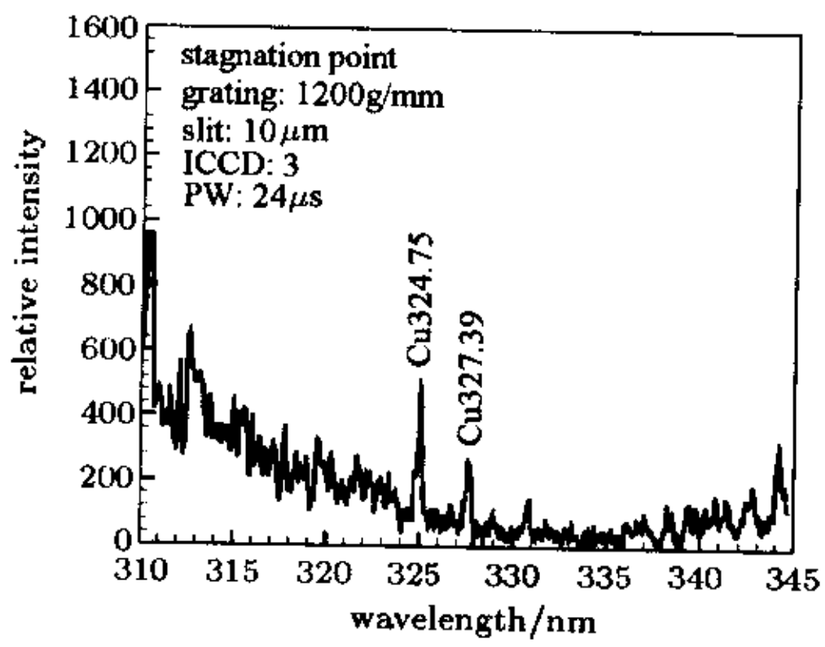


图 8 波长在 310~345 nm 之间的发射谱

Fig.8 Captured spectra at wavelength from 310~345 nm

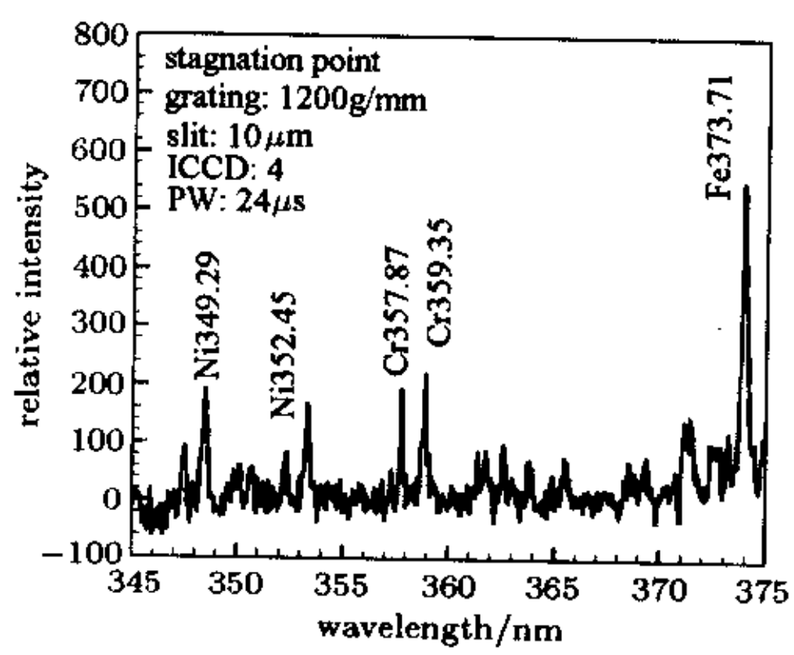


图 9 波长在 345~375 nm 之间的发射谱

Fig.9 Captured spectra at wavelength from 345~375 nm

图 9, 图 10 中观察的谱线结构极为复杂, 可以明确肯定的是 $N_2^+(1-)$ 的 $\Delta v = -1$ 的 (0,1), (1,2), (2,3) 带. 其他的一些未能确定的谱线可能是多个分子带系弥重叠的结果, 而且由于 OMA 在这一段谱段的半高谱宽 (FWHM) 的分辨率是 4Å, 导致仪器不能充分分辨谱线的精细结构. 另外, 在 360 nm 以上, 已经存在很强烈的背景辐射.

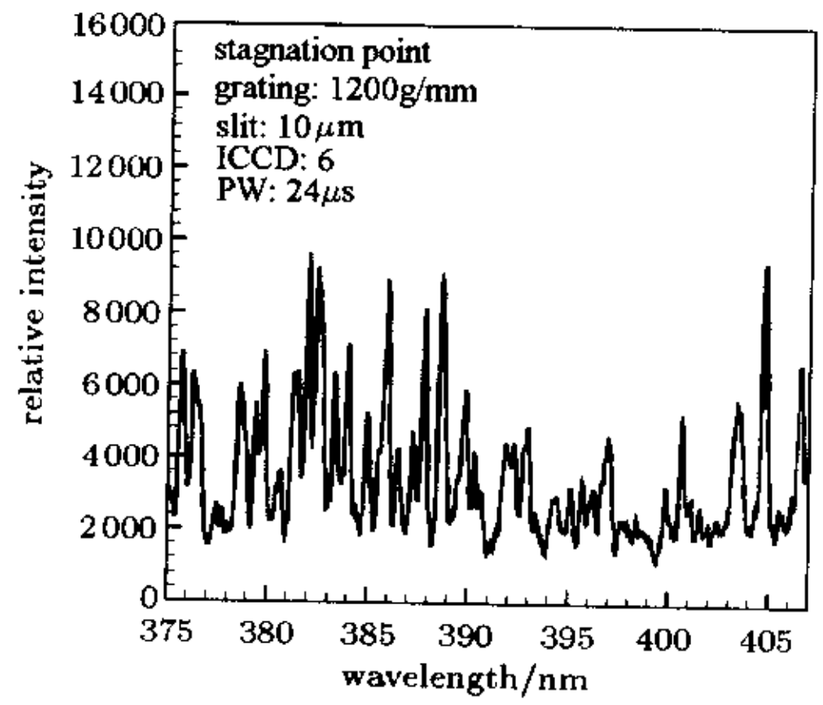


图 10 波长在 375~407 nm 之间的发射谱

Fig.10 Captured spectra at wavelength from 375~407 nm

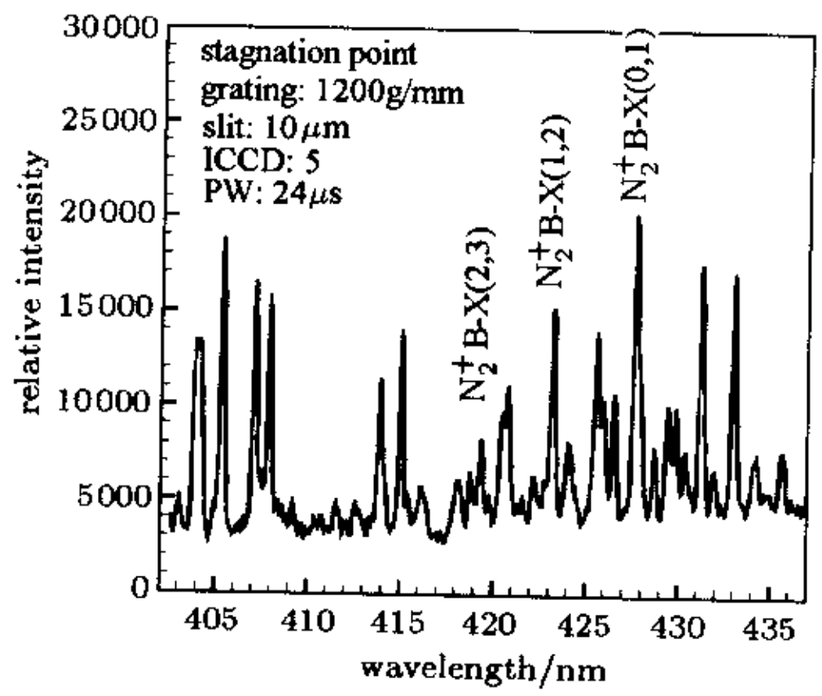


图 11 波长在 402~437 nm 之间的发射谱

Fig.11 Captured spectra at wavelength from 402~437 nm

3 总 结

在 JF-10 世界首座高焓驱动激波风洞上进行了二维钝体驻点发射光谱的测量. 初步的实验结果表明:

(1) 钝体驻点的发射光谱在 200~280 nm 范围的辐射主要来自 NO γ 系的辐射.

(2) 观察到了很强烈的 OH A-X 的辐射光谱和金属杂质颗粒的原子谱线. 在 370~440 nm 的范围内, 存在着 $N_2^+(1-)$ 带的辐射.

(3) 对于这种脉冲型的高焓激波风洞, 进行模拟真实气体效应的现象实验时, 首先必须考虑到自由流的真实气体现象. 尤其是气流中各种杂质 (管壁烧蚀下来的金属颗粒、来自爆轰驱动段残余的水在下次反应的 OH 自由基) 的影响. 这些影响都必须详细考虑, 同时需要精心设计实验, 以对这些杂质在气流中的含量的大小有一个明确的概念, 以排除其影响.

万方数据

参 考 文 献

1 Park Chul. Evaluation of real gas phenomena in high enthalpy impulse test facilities: a review. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1997, 11(1): 10~18

2 Sharma Surendra P, Park Chul. Survey of simulation and diagnostics techniques for hypersonic non-equilibrium flows. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1990, 4(2): 129~142

3 Yu HR, Zhao W, Lin JM, Li ZF, Gu JH. Oxyhydrogen detonation driverss for shock tube/tunnels. In: Proceedings of ISSW22, Imperial College, London, UK, July 18~23, 1999

4 Keck JC, Camm JC, Kivel Bennett, et al. Radiation from hot air, Part II. shock tube study of absolute intensities. *Annals of Physics*, 1959, 7: 1~38

5 Goken Tahir, Chung S Park, Mark E Newfield, et al. Computational simulation of emission spectra from shock layer flow in an arc jet facility. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12(2): 180~189

6 Lofthus Alf, Paul H Krupenie. The spectrum of molecular nitrogen. *J of Physical and Chemical Reference Data*, 1977, 6(1): 113~307

7 Blackwell Harvel E, Scott CD, Sivaram Arepalli. Measured shock layer vibrational population and temperatures in arcjet nitrogen flow. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12(4): 465~472

8 Boyd Iain D, Wyatt D Phillips. Prediction of ultraviolet radiation in non-equilibrium hypersonic bow-shock waves. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12(2): 38~43

9 Blackwell Harvel E, Scott CD, Sivaram Arepalli, et al. Non-equilibrium shock layer temperature profiles from arc jet radiation measurements. AIAA Paper No.89-1679, AIAA 24th Thermnophysics Conference, 1989

10 Park Chung S, Tahir Goken, Mark E Newfield, et al. Spectroscopic emission measurements within the blunt body shock layer in an arc jet flow. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12(2): 190~197

PRELIMINARY OBSERVATION ON ULTRAVIOLET EMISSION SPECTRA IN NON-EQUILIBRIUM 2-D HYPERSONIC BLUNT BODY SHOCK LAYER FLOW [1)]

Yu Xilong　Lin Zhenbin　Zhu Naiyi　Zhang Hengli　Guo Dahua　Yang Qiansuo　Lin Jianmin

(*LHD, Institute of Mechanics, CAS, Beijing* 100080, *China*)

Abstract　Non-intrusive measurement has been made to investigate emission spectra from shock layer flow in JF-10 shock tunnel, which is first driven by hydrogen oxygen detonation driver. The optical multi-channel analyzer is employed to obtain radiance for 2-d hypersonic blunt body flow. The results show the main Emission spectra at wavelength range from 200~280 nm is mainly come from NO γ system ($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ transition). Strong emission from OH A-X transition, $N_2^+(1-)$ B-X transition and metal particles were also observed.

Key words　high enthalpy shock tunnel, emission spectroscopy, line of sight non-intrusive measurement, hypersonic flow

Received 1 November 2001, revised 23 September 2002.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (19982005, 10032050).

万方数据