

# 正激波后 $\text{OH } A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ 瞬态光谱的测量\*

李招宁 竺乃宜 刘玉珍

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学开放研究实验室, 北京 100080

**摘要** 用光学多道分析仪(OMA 光学系统)测量了氢氧燃烧驱动激波管中典型状态下正激波后高温空气不同时刻的瞬态光谱。光谱结果显示高温空气的光谱中有很强的  $\text{OH } A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  光谱。通过采用线线合成光谱的方法得到激波后不同时刻高温空气中 OH 分子的转动温度。

**关键词** 激波管; 高温空气; 瞬态光谱; 羟基; 转动温度

**中图分类号** TL64

## 0 引言

高温真实气体效应是当代气体动力学研究的热点。除创建高焓气动设备外, 建立高温气体温度和组分非平衡过程的测量技术是开展有关实验工作的基础。

激波管是产生高温气体的主要实验手段, 因为激波后有效时间一般只有  $100\mu\text{s}$  左右, 非平衡辐射的弛豫时间更短, 所以常规的摄谱方法很难定量研究激波后高温气体的辐射。国外在 80 年代之前、我国至今都是通过数台单色仪或滤光片选出测量波长, 再用光电技术探测选定波长的非平衡和平衡辐射<sup>[1]</sup>。这样的实验方法不可能在同一次实验中测量很多波长的辐射, 只有将同一实验条件多次实验的结果综合, 才能得到较大波长范围的结果, 这样的实验方法得到的数据分散, 也不可能精确测量高温空气中  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{NO}$  等分子的带光谱。从 80 年代末, 国外开始探索使用光学多道分析仪(配一维探测器)、变相管相机、CCD 相机与像处理器结合等现代高灵敏、快速光电仪器研究激波后某一时刻高温气体的非平衡和平衡辐射光谱<sup>[2-3]</sup>。由于实验难度大, 实验结果很少。目前还没有查到国外有在一次实验中测量波后高温气体辐射光谱从非平衡向平衡演化全过程的报道。我国已有部分单位从国外进口了不同档次的光学多道分析仪(简称 OMA), 但是至今还没有把它应用于测量激波后高温气体的非平衡光谱。

在高焓高雷诺数设备尚未建立时, 利用现有设备对非平衡辐射的研究很有必要。利用我们实验室已有目前世界上最大的、内径 800mm 的高温激波管, 和刚从美国进口的可研究纳秒量级瞬态光谱的光学多道分析仪(OMA 光学系统), 测量了正激波后不同时刻高温空气的瞬态光谱。本文主要测量了典型状态下正激波后不同时刻高温空气中  $\text{OH } A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  的瞬态光谱, 通过采用线线合成光谱的方法得到激波后不同时刻高温空气中 OH

\* 国家自然科学基金、中国博士后科学基金、中国科学院力学研究所所长择优基金资助项目

收稿日期: 1996-12-23

分子的转动温度。

## 1 瞬态光谱的测量

实验装置由激波管、OMA 光学系统和辐射监测系统组成。实验使用的激波管驱动段长 1.5m, 内径 223mm, 入射激波实验段内径 800mm, 从膜片至实验窗口约 15m。根据实验的需要选用 2mm 或 5mm 的铝膜片。用氢氧燃烧破膜。实验气体为室内空气。激波速度由安装于激波管壁、不同间距的电探针信号得到。位于光学窗口上方的电探针信号同时还作为 OMA 光学系统中高压脉冲发生器的触发信号。

OMA 光学系统由光谱仪控制器, SpectroPro 275 光谱仪, 576×384 ICCD 探头, PG-10 高压脉冲发生器, ST-138 CCD 控制器, 计算机及输出设备组成。光谱仪为美国 Acton Research Corporation 生产的 SpectraPro-275 光谱仪, 其焦距 275mm, 孔径比 f/3.8。光谱仪内部同时可安装三个任意选用的光栅。实验中只用 1200 groove/mm 的高分辨光栅(当入射狭缝宽度为 10μm 时, 435.8nm 处的分辨率 0.1nm)。当使用高分辨光栅时, 每次采集光谱的波长范围仅有 30nm。在这么小的波长范围内, 可以近似认为 OMA 的光谱响应近似相等。换句话说, 使用高分辨光栅采集光谱时可以不进行强度校准。

PG-10 高压脉冲发生器控制 OMA 光学系统收集光谱的时间和曝光时间。PG-10 的延迟时间和高压脉冲宽度分别在 0.27μs 至 7ms 和 0.18μs 至 6ms 范围内分五档连续可调。在非平衡区辐射的变化较大, 采集非平衡光谱的曝光时间为 2.5μs, 而在平衡区辐射变化较小, 采集光谱的曝光时间为 10μs。

为了监测每次实验采集光谱相对激波波阵面的时刻, 实验中设计了辐射监测系统。用光电倍增管或红外器件测量实验气体可见光区或红外区的辐射过程。光谱仪和辐射监测系统入射狭缝分别正对激波管管壁相对的两个光学窗口。光谱仪入射狭缝宽度为 50μm。光谱测量系统的空间分辨约 6mm。目前实验中用红外探测器测量 1~5μm 的红外累积辐射。图 1 给出入射激波后高温空气红外非平衡辐射的典型信号。为了比较, 图 1 中还给出 PG-10 高压脉冲发生器的门控信号, 该信号负脉冲的宽度表示曝光时间。

图 2 为激波后高温空气相对辐射峰值不同时刻 300~330nm 光谱范围的典型光谱, 实验气体为室内空气, 初始压强 P<sub>1</sub>=13.3Pa, 激波速度 D=5.88km/s。图 2 中纵坐标归一化的任意光强单位。图 2 很明显看出波后不同时刻光谱强度的变化。经分析此光谱范围内的辐射除 A1308.197 和 A1309.266nm 外, 其余均来自 OH A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> - X<sup>2</sup>Π。光谱中出现强的 OH 的杂质光谱, 可能是因为实验中采用氢氧燃烧破膜, 实验气体中含有上次实验残留的水蒸汽杂质。

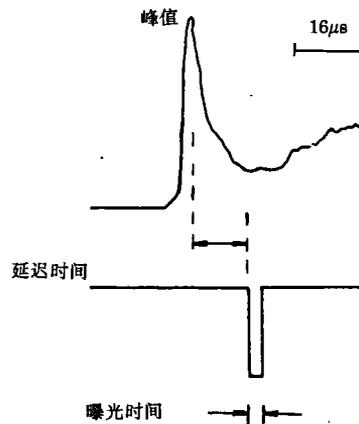


图 1 典型非平衡辐射与门控信号  
Fig. 1 Typical nonequilibrium radiation and gate pulse

受 OMA 光学系统采集光谱工作方式的限制,每次实验只能采集波后某个时刻一幅光谱。OMA 光学系统中 PG-10 的触发信号来自光学窗口上方激波管管壁的电探针,光辐射信号来自激波管中心,致使很难准确确定每次采集光谱相对当地波阵面的时间。我们认为目前以每次实验记录到的宽带红外辐射最大值(峰值)对应的时刻作为时间起点相对比较合理。

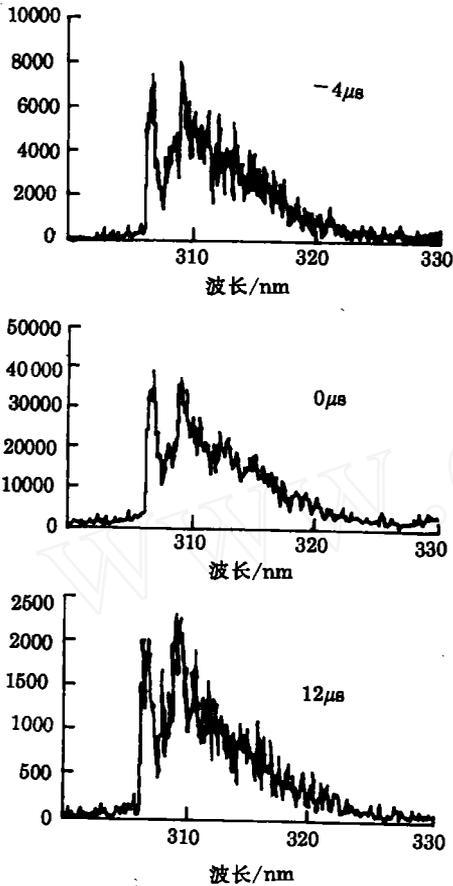


图2 不同时刻的瞬态光谱( $P_1=13.3\text{Pa}$ ,  $D=5.88\text{km/s}$ )

Fig. 2 Emission spectra at different delay time  
( $P_1=13.3\text{Pa}$ ,  $D=5.88\text{km/s}$ )

式中  $T_r$  和  $M$  分别为转动温度和分子质量。若光谱仪的光谱分辨率  $\Delta\lambda$ , 则实验测量到  $\lambda$  波长处谱线强度为  $\lambda-\Delta\lambda/2$  到  $\lambda+\Delta\lambda/2$  波长范围内所有转动线的积分强度。计算中还考虑了光谱仪的狭缝函数,并假设光谱仪的狭缝函数为高斯型。详细的光谱计算过程见文献<sup>[4~5]</sup>。

在非平衡条件下分子内各自由度之间还未达到平衡,平动、转动和振动温度不相等,总分子数  $N$  也随时间变化。假设在测量范围内没有连续辐射,且各种分子的谱带没有重叠,则在一个振动带内两波长处的相对强度只与转动温度有关。假设转动、振动、平动温度均为  $4000\text{K}$ , OH 分子浓度  $1 \times 10^{15}$ , 高斯型狭缝函数半宽  $0.42\text{nm}$ , 比较仅考虑  $(0,0)$  一个振动带与考虑了  $(1,0)$ ,  $(2,1)$ ,  $(3,2)$ ,  $(0,0)$ ,  $(1,1)$ ,  $(2,2)$ ,  $(3,3)$ ,  $(1,2)$ ,  $(0,1)$  九个振动带计算的 OH  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$   $300 \sim 330\text{nm}$  的光谱,可以得出在  $300 \sim 311\text{nm}$  的辐射主要来自

## 2 转动温度的测量

不考虑核自旋情况下,双原子分子  $(v', J') \rightarrow (v'', J'')$  跃迁的积分强度<sup>[4]</sup>

$$E(\lambda) = \left\{ \frac{16\pi^3 c N_u v^4}{3(2J'+1)} \right\} \{ |R_e(\bar{r}_{v'v''})|^2 \} q_{v'v''} \{ S_{J'A'}^{J''A''} \} 10^{-7}, \text{W/cm}^2\text{-sr} \quad (1)$$

式中各个量的含义与文献<sup>[4]</sup>相同。假设分子的电子温度,振动温度,转动温度分别为  $T_e, T_v, T_r$ ; 分子的配分函数可写为平动配分函数  $Q_e(T_e)$ , 转动配分函数  $Q_r(T_r)$ , 振动配分函数  $Q_v(T_v)$  的乘积,由上能级的分子数  $N_u$  可写为

$$N_u = \frac{N(2J'+1)}{Q_e(T_e)Q_r(T_r)Q_v(T_v)} \exp \left\{ -\frac{hc}{k} \left( \frac{T'_e}{T_e} + \frac{G'(v')}{T_v} + \frac{F'(J')}{T_r} \right) \right\} \quad (2)$$

忽略碰撞加宽,谱线的半宽由多普勒加宽决定。由多普勒加宽决定的谱线半宽为

$$\Delta\lambda_D = 7.16 \times 10^{-7} \lambda \sqrt{T_r/M} \quad (3)$$

自(0,0)带的结论。所以,310.12和306.64nm两波长处强度比值仅与转动温度 $T_r$ 有关。为了确定转动温度,先计算310.12和306.64nm两波长处强度比值随转动温度的变化曲线,再根据由实验测量的OH瞬态光谱测量310.12和306.64nm两波长处强度比值,就可以确定对应时刻的转动温度。

根据以上方法确定出波后辐射峰值前 $4\mu\text{s}$ 、辐射峰值和辐射峰值后 $12\mu\text{s}$ 三个不同时刻OH的转动温度分别为3700K,7800K和5300K。该状态理论计算的平衡温度5490K,与平衡态测量的OH的转动温度5300K在实验误差内一致。这三个时刻的转动温度说明在 $P_1=13.3\text{Pa}$ ,激波速度 $5.88\text{km/s}$ 状态下,波后OH的转动温度弛豫过程是先很快超过平衡温度再降到平衡温度。由高温空气中OH瞬态光谱确定振动温度将在另文讨论。

### 3 结 论

使用由ICCD探头,高压脉冲发生器等器件组成的OMA光学系统可以在激波管上测量正激波后高温空气不同时刻的非平衡瞬态光谱。光谱结果表明在氢氧燃烧驱动条件下,高温空气的光谱中有很强的氢氧基杂质光谱。通过采用线线合成光谱拟合OH  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  光谱的方法得到激波后不同时刻OH分子的转动温度。初步的实验结果表明利用高温空气中OH杂质分子的强辐射可以测量波后高温空气温度的弛豫过程。

激波管实验属于单次、脉冲实验,实验次数受各种条件的限制不可能很多。采集高温气体的非平衡光谱又要求整个实验系统具有快的时间分辨、高的空间和光谱分辨,使提高采集光谱信噪比的难度大大增加。目前先进OMA光学系统ICCD探头的曝光时间已达到纳秒量级。今后测量非平衡瞬态光谱或由瞬态光谱确定转动、振动温度将主要面临如何在满足时间、空间、光谱分辨的同时提高采集光谱的信噪比。

赵斌和李学芬同志参加了实验工作。

### 参 考 文 献

- 1 李红德. 激波管研究高温气体的非平衡辐射特性. 力学学报, 1985, 17(2): 172~176
- 2 Sharma S P, Gillespie W. Nonequilibrium and Equilibrium Shock Front Radiation Measurements. J. Thermophys. Heat Transf., 1991, 5(3): 257~265
- 3 Sharma S P. Vibrational and Rotational Temperature Measurements in a Shock Tube in Shock Waves Proceedings of the 18th International Symposium on Shock Waves. 1991, Vol. 1, 683~690
- 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 E. E. Whiting E E, J. O. Arnold J O, G. C. Lyle G C. A Computer Program for a Line by Line Calculating of Spectra from Diatomic Molecules and Atoms Assuming a Voigt Line Profile. 1969, NASA TN D-5088, 1~115

## SPECTROSCOPIC MEASUREMENTS OF OH $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ BEHIND A NORMAL SHOCK WAVE

Li Zhaoning Zhu Naiyi Liu Yuzhen

Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

**Abstract** Spontaneous emission spectra of behind a normal shock wave in high temperature air were measured in a hydrogen oxygen combustion driven shock tube, in a typical condition. Intense radiation of OH  $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$  system was presented in the spectra of high temperature air. The rotational temperatures were determined using fits to synthetic OH molecular spectra at different time behind shock waves.

**Key words** shock tube; high temperature air; emission spectra; hydroxyl radical; rotational temperature