

# 高温空气光学性质的激波管实验研究

李红德 罗 军 李思文  
(中国科学院力学研究所)

## 提 要

本文主要介绍用低密度激波管和辐射计得到的高温空气光谱辐射系数的实验结果,并与国外理论和实验结果进行了比较,同时给出了流场特点和实验结果的分析。实验温度为 4380 ~ 7500 K,密度为  $1.40 \times 10^{-2} \rho_0 \sim 1.00 \times 10^{-1} \rho_0$  ( $\rho_0$ ——标准空气密度),光谱波长为 4300, 5400, 6400, 7200 和 10380 Å。

## 一、引 言

高温空气光学性质是一个应用较广的研究课题。它对于大气传输、再入飞行、等离子体辐射诊断以及实验室内激波发射和吸收的研究具有重要意义。一些学者从理论和实验上对这一课题进行了大量研究<sup>[1~6]</sup>,但是由于理论计算数据较分散而实验结果较少,近年来这项工作仍在进行。

本文主要介绍用低密度激波管和辐射计得到高温空气光学性质的实验结果,并与国外的理论和实验结果进行了比较,同时对流场特点和实验结果作了分析。

## 二、实验装置和测量原理

### 1. 低密度激波管

它是研究高温气体平衡和非平衡辐射的重要设备之一。驱动段长 1.5 m, 内径 223 mm; 实验用 5 mm 铝膜, 采用氢氧燃烧破膜, 破膜压力为 80 atm 左右; 为改变驱动条件, 可充适量氮气。入射激波实验段内径 800 mm, 从膜片至横向观察窗约 15 m。为了研究反射激波区(即图 1 中的⑤区)空气的光学性质, 专门设计了长 2.1 m, 内径 600 mm 的反射段取样筒, 其上设有纵向和横向光学窗口。实验系统真空漏量为  $1.0 \times 10^{-4}$  torr/min, 实验气体为室内空气, 实验状态如表 1 所示。

### 2. 测量仪器

(1) 入射激波速度测量 探测器采用电离探针, 为准确可靠, 在七个不等间隔上使用了两台计时器, 它们在中间二个距离上重合。

(2) 辐射计 组装使用的辐射计有聚光, 分光和接受记录三部分, 用于测量气体的辐射。为了便于数据处理, 实验前须做静态校正, 像辐射计波长鼓轮曲线、能量线性关系和单色光谱响应等。辐射计与反射段匹配图如图 1 所示。

表 1

状态代号	初始压力 $P_1$ (mm Hg)	入射激波马氏数 (Ms)	实验温度(K) <sup>[7]</sup>	实验密度( $\rho/\rho_0$ ) <sup>[7]</sup>
A	1	12.2	6810	1.00
B	1	12.2	4380	$1.41 \times 10^{-2}$
C	$5 \times 10^{-1}$	13.6	6900	$5.82 \times 10^{-2}$
D	1	10.4	6060	$8.47 \times 10^{-2}$
E	$1 \times 10^{-1}$	14.0	6600	$1.30 \times 10^{-2}$
F	$1 \times 10^{-1}$	16.5	7500	$1.62 \times 10^{-2}$

图中1为激波管, 2为电探针, 3为白炽灯, 4为光阑, 5为聚光透镜, 6为单色仪, 7为标准钨带灯, 8为稳流源, 9为平面反射镜, 10为光调制器, 11为延时器, 12为示波器, 13为光电装置, 14为高压高源。入射激波区匹配同图1中的⑤区。

### 3. 测量原理

利用相同条件下辐射能量相比较的原理, 由图1标定光路, 得到

$$I_{p\lambda} = \frac{R_{p\lambda}}{R_{w\lambda}} \cdot I_{w\lambda} \left( \frac{\tau_w}{T_g} \right) \quad (1)$$

$I_{w\lambda}$  为钨带灯单色亮度, 只要知道灯的亮温和钨的光谱发射率, 可以算出  $I_{w\lambda}$ ;  $R_{p\lambda}$  和  $R_{w\lambda}$  分别为相同光谱间隔上高温空气和钨带灯的辐射计光电接受系统读数(单位相同), 分别由实验和标定得到;  $\tau_w$  为平面反射镜反射率;  $T_g$  为窗口透过率, 二者可以测量; 这样气体在波长  $\lambda$  处的辐射亮度  $I_{p\lambda}$  ( $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu$ ) 可以确定。

由于激波管内气体不是面发射体, 而有一定厚度  $L$ , 在光学薄和小立体角辐射条件下, 运用平面层体积辐射模型, 得到高温空气辐射系数表达式

$$I_\lambda = I_{w\lambda} \cdot \frac{R_{p\lambda}}{R_{w\lambda}} \cdot \frac{1}{L} \left( \frac{\tau_w}{T_g} \right), \quad (\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu) \quad (2)$$

用(2)式求  $I_\lambda$  时, 反射段和入射段的  $L$  分别为 57.7 cm 和 80 cm;  $\tau_w = 0.78$ ;  $T_g$  取相应测量值。辐射计入口狭缝高 1.2 mm, 宽 0.1~1 mm, 在使用的光谱波长上, 对应的光谱宽度处在 70~1400 Å 里。

理论计算气体光学特性时, 多用线吸收系数, 利用基尔霍夫定律和公式, 由线吸收系数可得到辐射系数。

## 三、测量结果及其分析

### 1. 典型的测量信号

利用反射端横向和纵向光学窗口, 对高温平衡空气辐射系数进行了测量。反射段横向窗口的测量信号如图2所示, 由辐射平台, 利用(2)式得到不同条件下空气的辐射系数。反

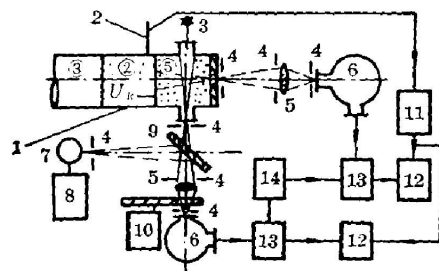


图1 辐射计与激波管匹配示意图

Fig. 1 Diagram showing the match between radiometer and shock tube

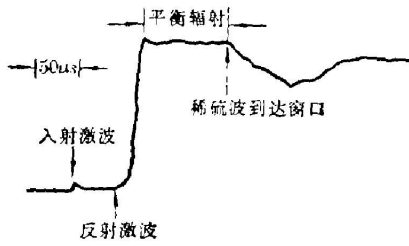


图 2 反射段横向窗口的辐射信号(032\*)  
Fig. 2 Radiative signal at the transverse window of reflective section (032\*)

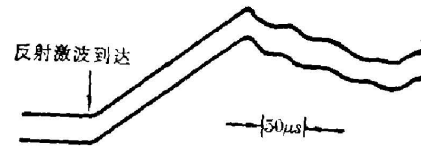


图 3 反射段纵向窗口的辐射信号(077\*)  
Fig. 3 Radiative signal at the longitudinal window of reflective section (077\*)

射端纵向窗口的平衡辐射信号如图 3 所示,由线性增长时间可确定图 1 中的 ⑤ 区流场均匀流实验时间,并给出流场的特性。

## 2. 测量结果的可靠性

由于激波管直径大,加上取样筒后,更减小了边界层对中心流场的污染和影响:在纵向窗口测量时,由于我们的均匀流实验时间比一般激波管长几倍,同样边界层污染和影响也小,故流场较干净。由图 2 辐射信号平台表明,⑤ 区状态是热力学平衡的。由图 3 看出,信号线性很好,表明 ⑤ 区气体辐射为光学薄,即体积辐射,与推导(2)式时的假设模型一致。对横向窗口的相同状态,不同次实验信号的差别一般在  $\pm 10\%$  左右;而对横向和纵向窗口的不同方式,相同状态的测量信号,其差别也在  $\pm 10\%$  左右,实验重复性好。

## 3. 测量精度和误差

最大误差来源是激波速度,误差一般在  $1\%$  左右,在我们的实验条件下(如  $T=6000\text{ K}$ , 波长  $4000\sim 10380\text{ \AA}$  时),将导致辐射强度  $10\%$  左右的相对变化;标定误差为  $5\%$  左右;初始压力  $P_1$ 、读数和使用图表等数据处理误差在  $15\%$  左右。整个实验结果的精度为  $\pm 30\%$  左右。

## 4. 我们的结果

状态 A 和 B 的空气辐射系数测量结果分别见图 4 和 5; 状态 C、D、E 和 F 的测量结果见表 1。

## 5. 与国外结果比较

国外的理论和实验结果分别列在图 4、5 和附表 1 中。

(1) 与理论结果比较:在波长  $5400\text{ \AA}$  的诸状态下,Churchill<sup>[27]</sup>、Meyerott<sup>[31]</sup>、Ashley<sup>[33]</sup> 和 Breene<sup>[20]</sup> 的结果,互相比较一致,本实验结果与上述四种理论结果也较一致,其中 A 状态时与 Churchill 的结果符合很好。其它波长与国外理论结果符合也较好,只有  $7200\text{ \AA}$  的 E 状态最大差别高达 9 倍。

由图 4、5 看出,波长小于大约  $5000\text{ \AA}$  时, Meyerott 的理论值比 Churchill 的高,原因可能是 Meyerott 计算时采用的  $\text{O}_2(S-R)$  与  $\text{N}_2^+(1-)$  带的振子强度较大;在波长大于  $5000\text{ \AA}$  时, Meyerott 的结果又比 Churchill 的低,这是 Meyerott 没有考虑  $\text{NO}(V-R)$  振转光谱和  $\text{NO}_2$  连续谱的贡献。我们获得的结果除  $4300\text{ \AA}$  和  $7200\text{ \AA}$  稍偏低外,其它均在上述两种理论值之间。

表 1 在状态 C、D、E 和 F, 对不同波长的辐射系数

Table 1 Radiative coefficients of air for different wavelength in states of C, D, E and F

作者	$\lambda(\text{\AA})$	4300			5400			6400			7200		
		C	D	F	C	D	F	C	D	E	C	D	E
This report		0.104	$4.12 \times 10^{-2}$	$6.30 \times 10^{-2}$	0.355			0.410			$6.51 \times 10^{-2}$		$1.37 \times 10^{-2}$
Ashley		0.311	$9.77 \times 10^{-2}$	$4.76 \times 10^{-2}$	0.114								
Churchill		0.352	$8.53 \times 10^{-2}$	$7.21 \times 10^{-2}$	0.295			1.20			$4.15 \times 10^{-1}$		$9.58 \times 10^{-2}$
Meyerott		2.10	$11.3 \times 10^{-2}$	$8.51 \times 10^{-2}$	0.300			0.370			$2.37 \times 10^{-1}$		$3.77 \times 10^{-2}$
Breene		0.941	$7.80 \times 10^{-2}$		0.216			0.253			$5.92 \times 10^{-2}$		$12.4 \times 10^{-2}$
Wray											$4.70 \times 10^{-2}$		

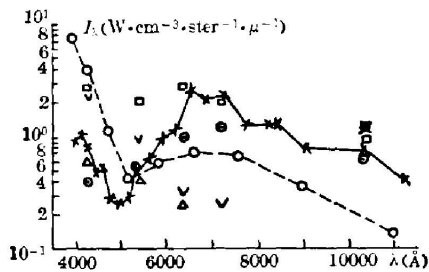


图 4 在状态 A, 各种波长所得实验结果的比较

Fig. 4 Comparison of our results at the state A over various wavelengths with the external results

( $\times$ —C<sup>[2]</sup>,  $\Delta$ —A<sup>[6]</sup>,  $\nabla$ —B<sup>[10]</sup>,  $\square$ —K<sup>[11]</sup>,  $\blacksquare$ —W<sup>[1]</sup>,  $\circ$ —M<sup>[9]</sup>,  $\odot$ —this report,  $T=6900\text{K}$ ,  $\rho/\rho_0=0.10$ )

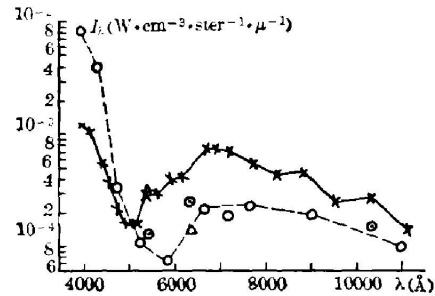


图 5 在状态 B, 各种波长所得实验结果的比较

Fig. 5 Comparison of our results at the state B over various wavelengths with the external results

( $\Delta$ —A<sup>[6]</sup>,  $\times$ —C<sup>[2]</sup>,  $\circ$ —M<sup>[9]</sup>,  $\odot$ —this report,  $T=4500\text{K}$ ,  $\rho/\rho_0=0.0141$ )

(2) 与实验结果比较: 由图 4 看出, Keck<sup>[11]</sup> 的实验结果均比我们的, 而我们结果与 Wurster<sup>[12]</sup> 和 Wray<sup>[1]</sup> 的实验结果符合较好。

综上所述, 我们实验结果是可靠的。

李连祥、李淑琴和刘玉珍同志参加了实验工作, 在此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] K. L. Wray et al.; *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer*, 1965, **5**, No. 1 (Jan/Feb), 111.
- [2] D. R. Churchill et al.; *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer*, 1966, **6**, No. 4 (Jul/Aug), 371.
- [3] I. V. Avilova et al.; *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer*, 1969, **9**, No. 1 (Jan), 89.
- [4] G. F. Andreev; *J. Appl. Spectrosc. (USSR)*, 1971, **14**, No. 7 (Jul), 916.
- [5] V. A. Volkov; *AIAA J.*, 1976, **14**, No. 3 (Mar), 371.
- [6] N. E. Kuzmenko et al.; *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer*, 1980, **24**, No. 1 (Jul), 29.
- [7] I. I. Glass et al.; *«Handbook of Supersonic Aerodynamics», Section 18—Shock tube.*
- [8] Ernest N. Ashley; *DASA-1506*.
- [9] R. E. Meyerott et al.; *PB-158 937*.

- [10] R. Breene *et al.*; *J. Quant. Spectrosc. & Rad. Transfer*, 1962, **2** (Jul/Sep), 273.  
[11] J. C. Keck *et al.*; *Ann. Phys.*, 1959, **7**, No. 1 (May), 1.  
[12] W. H. Warster *et al.*; 1966, *CAL Report QM-1756-A-1*.

## Experimental research on optical properties of high temperature air in shock tube

LI HONGDE LUO JUNE AND LI SIWEN

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing*)

(Received 19 April 1982, revised 24 August 1982)

### Abstract

This paper mainly presents the experimental research on the optical properties of high temperature, low density air using a 800 mm diameter shock tube and a radiometer. The experimental temperature ranges over 4380~7500 K; the density ranges over  $1.41 \times 10^{-2} \sim 1.00 \times 10^{-1} \rho_0$  ( $\rho_0$  is the standard density at sea level). The spectral wavelengths are 4300, 5400, 6400, 7200 and 10380 Å. The experimental results are compared with the theoretical and experimental results published by other countries and shown a good coincidence. The characteristics of flow field are given and the reliability of experimental results is analysed too.