

激波管研究高温气体的非平衡辐射特性

李 红 德

(中国科学院力学研究所)

一、引 言

在现代工程技术^[1]、激波结构的计算^[2]、实验室的激波物理现象研究和非平衡辐射诊断中,高温气体非平衡辐射性质的研究,在理论和实际中都有重要意义。早在五十年代,有的学者就观察过高温气体的非平衡辐射;六十年代初,国外许多学者对此感兴趣,但其定量测量还是在 Lin^[3] 设计出直径为 24 英寸的低密度激波管后做出的。关于非平衡辐射强度的理论计算是相当复杂的, Camm^[4]、Hammerling^[5] 和 Allen^[6] 应用不同模型对 $N_2^+(1-)$ 带系的非平衡辐射强度进行了计算。再入体于三十公里高空以上的辐射测量^[7]与非平衡的计算一致,同平衡计算偏离很大;但这种非平衡计算必须与具有化学反应的气体热力学和气体动力学耦合起来,相当复杂。关于高温气体非平衡辐射性质研究远没有平衡辐射的研究充分,仅有的一些数据较粗糙,离非平衡诊断要求还差的远,因此这个课题的深入实验研究很有必要。

本文介绍我们在低密度激波管上,利用辐射计对高温气体非平衡辐射进行的实验研究,给出了几种状态下高温空气的非平衡峰值辐射系数以及不同状态和波长下非平衡峰值辐射与平衡辐射的相对比值。报告还给出不同状态的非平衡辐射激发时间和非平衡辐射松弛距离,并同国外的结果作了比较;它们对于工程实际、非平衡辐射机制和动力学理论研究是有用的。

二、实验装置和测量原理

1) 实验装置 $\phi 800$ 低密度激波管在文献[8]中做了介绍,它不仅适宜于高温气体平衡光学性质的实验研究,而且在入射激波实验段也适宜于高温气体非平衡光学性质的实验研究。关于测量非平衡辐射的装置及与激波管的匹配见附图 1。

2) 测量原理 在测量非平衡辐射系数时,标准温度灯做辐射能量标准源,在平面层体积辐射的模型下,我们利用辐射系数公式^[8]

$$I_{\lambda} = I_{W\lambda} \frac{R_{g\lambda}}{R_{W\lambda}} \cdot \frac{1}{L} \cdot \left(\frac{r_W}{T_g} \right), \quad (\text{W/cm}^3 \cdot \text{ster} \cdot \mu) \quad (1)$$

可以得到非平衡峰值辐射系数 $I_{ne\lambda}$, 同时得到 $I_{ne\lambda}$ 与平衡辐射系数 $I_{e\lambda}$ 的相对比值。式(1)中各符号说明见文献[8]。入射激波后的辐射信号比反射激波后的信号小的多,因此仪器的灵敏度必须提高。由于非平衡的激发和松弛时间短,测量仪器的动态响应时间要小于微秒。

本文于 1984 年 1 月 5 日收到。

非平衡辐射的松弛距离从随时间变化的信号和激波速度得到; 而非平衡的辐射激发和松弛时间可直接从随时间变化的信号得到。

三、实验结果及分析

1) 典型的测量信号: 按附图 1 装置, 我们在有的状态同时测量了空气的平衡和非平衡辐射, 测量信号见附图 2(A); 在有的状态只测量了非平衡辐射, 见附图 2(B)。由 (A) 看出, 当入射激波波面通过辐射计视场时, 辐射信号突然上升, 在辐射激发时间 t_E 内, 非平衡辐射达到峰值辐射 I_{ne} ; 然后在辐射松弛时间 t_R 内下降到平衡辐射 I_e ; 从辐射信号突然上升至非平衡辐射降至 I_e 以上 10% 的时间为 $t_{0.1}$, 非平衡距离 $X_{0.1} = U_s \cdot t_{0.1}$, U_s 为入射激波速度。

非平衡峰值辐射的出现是由于分子中电子激发的速度相当快, 以致电子温度可与平动温度达到一致, 这样处于电子激发态的分子占据数可以很快超过最后平衡的数目, 导致非平衡辐射 I_{ne} 超过平衡辐射 I_e 。辐射松弛是由于分子的振动和离解弛豫造成的, 达到平衡辐射时, 分子的平动、转动和振动温度趋于一致。

2) 非平衡峰值辐射系数 I_{ne} : 下表为不同状态空气波长为 $7200 \text{ \AA} \pm 695 \text{ \AA}$ 下的 I_{ne} 。

实验状态		平衡时状态参数		I_{ne} $(\text{cm}^{-3} \cdot \text{ster} \cdot \mu)$
$P_1(\text{mmHg})$	$U_s(\text{mm}/\mu\text{s})$	$T(\text{K})$	ρ/ρ_0	
1	4.20	4200	1.00×10^{-3}	4.88×10^{-4}
5×10^{-1}	4.62	4380	7.47×10^{-3}	3.44×10^{-4}
1×10^{-1}	6.18	5640	1.97×10^{-3}	2.48×10^{-4}
5×10^{-2}	6.43	5520	1.07×10^{-3}	8.11×10^{-5}
1×10^{-2}	6.94	5400	2.37×10^{-4}	2.78×10^{-5}

上表中的平衡参数为计算值; P_1 为实验段初始压力; ρ_0 为空气的标准密度; I_{ne} 是利用 (1) 式得到的。实验证明上述状态下的高温气体为体积辐射, 由于气体发光立体角很小, 可用平面层近似。 I_{ne} 的误差比文献 [8] 中的平衡辐射系数的大些, 其主要来源是由于激波波面的弯曲, 测量值一般偏低。

3) 不同状态和波长下, 非平衡峰值辐射 I_{ne} 与平衡辐射 I_e 的相对值 (见下表):

序号	气体	状态		波长 (\AA)	I_{ne}/I_e
		$P_1(\text{mmHg})$	$U_s(\text{mm}/\mu\text{s})$		
1	空气	1	4.03	5400	2.58
2	氮气	1	4.09	5800	2.70
3	空气	1	3.96	5800	2.58
4	空气	5×10^{-1}	4.55	5800	3.00
5	空气	1	4.16	6400	2.73
6	空气	1	4.16	7200	2.73

上表中的 I_{nc}/I_c 比值是在同一测量信号中得到的,我们选择这种实验状态,结果比较可靠;但由于波面弯曲的影响,测量值一般偏低,误差比平衡辐射测量的误差大一些。

由表看出,相同气体在相近状态下,对可见光谱的不同波长, I_{nc}/I_c 比值相近;相同气体于不同状态下(3与4), I_{nc}/I_c 有些差别, P_1 降低, U_i 增大时, I_{nc}/I_c 比值将增大一些;对空气 P_1 相同, U_i 增大时, I_{nc}/I_c 也将增大;相同状态下,空气的 I_{nc}/I_c 比氮气小些,这主要由于空气中的氧分子解离造成。总之在我们的实验范围, I_{nc}/I_c 比值在 2.7 左右。我们认为: 鉴于非平衡辐射的理论计算相当复杂,而平衡辐射的理论比较成熟,实验结果^[6]与理论已有系统的比较;因此可据表中的比值和平衡辐射的理论预计相同或相近状态下其他波长的非平衡峰值辐射;结合非平衡的松弛特征,进而估计累积的非平衡辐射。

4) 非平衡辐射的特征参数:

(1) 非平衡辐射的距离 $X_{0.1}$: 在不同 U_i 下, $X_{0.1}$ 与 P_1 的关系示于附图 3 中,图中一组直线是 Tearce^[9] 等人的经验曲线,其压力 $P_1 = 0.1-1\tau$, $U_i = 4-11\text{mm}/\mu\text{s}$, 图中箭头表示覆盖范围。为了比较,我们的实验点也划于该图中。 P_1 是 $5 \times 10^{-1}\tau$ 和 $1 \times 10^{-1}\tau$ 的 $X_{0.1}$ 比较接近,其他的有些偏离。对于氮气,我们测量的 $X_{0.1}$ 比相近状态下空气的

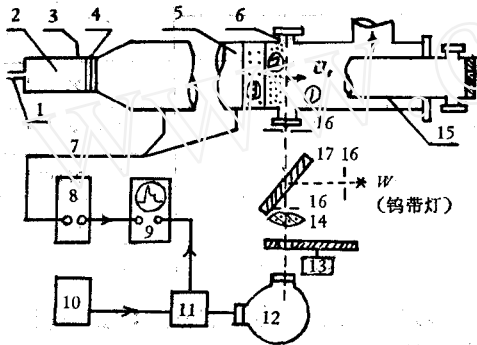


图 1 激波管与非平衡辐射测量装置示意图

- 1 配气入口 2 高压段 3 点火塞 4 膜片 5 入射激波试验段 6 测量窗口 7 电探针 8 延时器 9 示波器
- 10 稳压源 11 光电装置 12 单色仪 13 光调制器 14 透镜 15 反射段 16 光阑 17 全反射镜

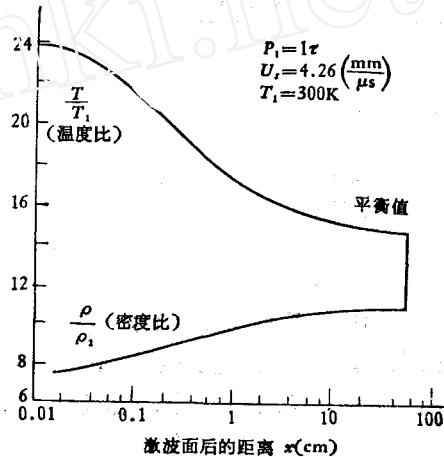


图 2 空气正激波后温度和密度的非平衡理论松弛过程

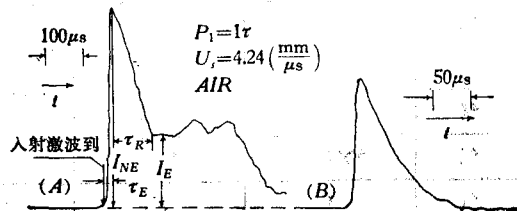


图 3 非平衡辐射测量信号

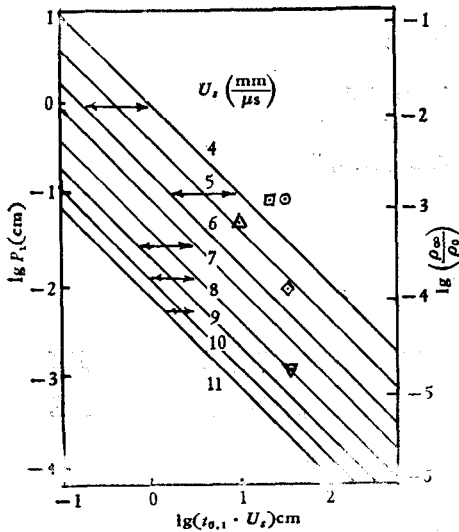


图 4 不同激波速度的 $X_{0.1}$ 与 P_1 的关系

符号	气体	$P_1(\tau)$	$U_1(\frac{\text{mm}}{\mu\text{s}})$
○	AIR	1	4.23
△	AIR	0.5	4.75
□	N_2	1	4.09
◇	AIR	0.1	5.13
▽	AIR	0.01	6.94

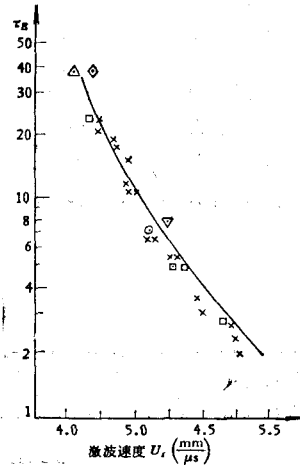


图 5 氮气在 $P_1 = 0.5\tau$ 下, τ_R 与 U_1 的关系

- 本文实验
- △ $N_2(1+)$, N_2 , $P_1 = 1\tau$
 - ◇ $N_2(1+)$, AIR, $P_1 = 1\tau$
 - ▽ $N_2(1+)$, AIR, $P_1 = 0.5\tau$
- 国外结果
- ^[11] $N_2(1+)$, N_2 , $P_1 = 0.5\tau$
 - ×^[12] $N_2(1+)$, N_2 , $P_1 = 1\tau$
 - ^[11] (理论值) $N_2(1+)$, N_2 , $P_1 = 0.5\tau$

小。对空气在 $P_1 = 1\tau$, $U_1 = 4.23\text{mm}/\mu\text{s}$ 下, 我们的非平衡辐射时间 $t_{0.1} = 115\mu\text{s}$; 而非平衡辐射的理论计算 $t_{0.1} = 123\mu\text{s}$ (见附图五), 两者相近; 由 Teare 的曲线得 $t_{0.1} = 21\mu\text{s}$, 相差太大。看来有必要对 Teare 等人的外推经验曲线作进一步的验证。我们的非平衡辐射时间的平均误差只有几个微秒。

(2) 关于达到峰值辐射的时间 t_E : 在研究非平衡辐射的 t_E 时, 我们采用 $N_2(1+)$ 的辐射, 为了与 Marrone^[10] 对 N_2 在 $P_1 = 0.5\tau$ 下的实验和理论结果比较, 对 $P_1 = 1\tau$ 下的 t_E , 我们也采用 Marrone 的处理方法, t_E 予以加倍, 划在 $P_1 = 0.5\tau$ 的同一图上。本文和 Wray^[11] 的实验结果皆列于附图 4 中。从图中看出, 本文的实验结果与 Marrone 的理论和实验结果, 及与 Wray 的实验结果符合较好, 这说明 Marrone 等人使用的 $N_2(1+)$ 的激发机制模型符合实际。

李思文、刘玉珍、李连祥、李淑琴等同志参加了实验工作, 在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Horton, T. E., AIAA Paper No. 76-170 (1976).
- [2] Nelson, H. F. et al., *Phys. Fluids*, 12, 8(1969), 1605.
- [3] Lin, S. C. and Fyfe, W. I., *Phys. Fluids*, 4(1961), 238.
- [4] Camm, J. et al., *J. Q. S. R. T.* 1(1961), 53.
- [5] Hammerling, P. et al., *Phys. Fluids*, 2(1959), 422.

- [6] Allen, R. A. et al., *Phys. Fluids*, 5(1962), 284.
[7] Farrow, L. A. et al., *AIAA. J.*, 11, 3(1973), 272.
[8] 李红德, 罗军, 李思文, *光学学报*, 3, 4(1983), 380.
[9] Teare, J. D. et al., *Hypersonic Flow Research*, 7(1962), 281.
[10] Marrone, P. V. and Wurster, W. H., Reentry precursor plasma-determination of the vacuum Ultraviolet photoionizing Radiation Flux, From "NASA SP-252 (1970)."
[11] Wray, K. L., *J. Chem. Phys.*, 44, 2(1966), 623.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON NON-EQUILIBRIUM RADIATIVE PROPERTIES OF HIGH TEMPERATURE GASES IN SHOCK TUBE

Li Hongde

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

Abstract

This note presents the experimental research on the non-equilibrium radiative properties of high temperature gases by using the radiometer in the low density shock tube. The report gives the non-equilibrium peak radiative coefficient of high temperature air at several states and the relative ratio between non-equilibrium peak radiation and equilibrium radiation at different wave lengths. This paper also gives the excited time and relaxation distance of non-equilibrium radiation at different states, the results are compared with the ones published by other countries.