

文章编号:0258-1825(2009)增刊-0084-06

激波管高温空气绝对辐射功率实验测量

杨乾锁, 彭志敏, 刘春, 竺乃宜, 姜宗林

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力实验室, 北京 100190)

摘要:利用激波管加热技术,得到1000K~3000K温度范围内的高温空气,利用宽波段能量计、光电探测器以及滤波片等设备,测量出高温空气在0.3 μm ~9 μm 宽波段范围内绝对辐射功率,以及中心波长在4.26 μm 、5.23 μm 、8.32 μm 处,单位波长的绝对辐射功率;实验结果表明,在1000K~2000K温度范围内,高温空气宽波段的辐射功率约为60 W/cm²·MP,且辐射主要集中在2 μm ~8 μm 波段范围内;当温度高于2000K以上,辐射功率随着温度的升高增大较快,且辐射向紫外、可见方向移动;在3000K时,高温空气在0.3 μm ~9 μm 宽波段范围内的辐射功率约为150 W/(cm²·MP)。

关键词:辐射功率;辐射持续时间;高温空气;激波管

中国分类号:V211.7

文献标识码:A

0 引言

导弹、火箭等航天飞行器再入大气层后,由于激波压缩和气体粘性的作用,在飞行器周围形成高温高压的流场,驻点温度高达7000K~8000K,在此温度范围内,高温空气发生离解和电离,国内外众多文献已给出了3000K以上高温空气各组份的辐射功率曲线,而关于3000K以下的辐射功率曲线却不完善,并且缺少相关方面的实验验证^[1],而尾迹流场绝大部分地区的温度都在3000K以下。

为此,在此次试验中我们利用激波管来压缩空气,在⑤区得到温度在1000K~3000K、持续时间在几百微秒到几毫秒的高温空气,利用宽波段能量计、光电探测器以及滤波片等设备,测量出各个波段范围内高温空气的绝对辐射能量和辐射持续时间,进而得到各个波段高温空气的绝对辐射功率,这些数据将为飞行器周围流场的辐射特性研究提供相关的参数依据。

1 实验方案及数据处理方法

用来产生高温空气的激波管内径为50mm,膜片采用0.2mm厚的铝膜;高、低压段长度分别为1220mm、1710mm,在激波管的尾部安装有光学实验

段,其结构如图1(a)所示,激波管尾部侧翼安装有十字型、用于观测高温空气辐射特性的四个氟化钙窗口,窗口的通光口径为15mm,其透过波段为0.3 μm ~9.0 μm ,透过率约为92%;热释电材料能量计安装在激波管尾部的侧翼窗口上,如图1(b)所示,用来测量高温空气各个波段的绝对辐射能量,其响应波长为0.3 μm ~12 μm ,最小测量能量为0.01mJ,受光口径为18mm;滤波片放置在能量计与激波管之间的连接件中;高灵敏度光电探测器对准激波管尾部的一个侧翼窗口上,用来监测⑤区高温空气的辐射强度随时间的变化关系,其响应时间小于1ns,灵敏度小于200nW,响应波长为0.3 μm ~1.8 μm ;两个压力传感器用来精确测量激波速度,其响应时间小于1 μs ,距离为1250mm。

通过实验发现,这种膜片的破膜压力可控制在10~20个大气压,当实验段的压力选在5kPa~30kPa时,所形成的激波马赫数在2.2~4.6之间,对应⑤区的平衡温度在800K~3000K范围内。试验过程中,利用光学支架将光电探测器与其中的一个光学窗口对准,并将信号输入示波器,同时将压力传感器信号也输入示波器,并将端面处压力传感器信号作为触发信号,信号如图2所示;入射激波在端面反射后,形成反射激波,再次压缩空气,⑤区空气温度急剧上升,向四周产

* 收稿日期:2008-05-31;修订日期:2009-01-26.

基金项目:国家自然科学基金(10772187)资助.

作者简介:杨乾锁(1963-),男,理学博士学位,研究方向:高温气体动力学.

生强烈的辐射,当光学实验段改装为石英玻璃管时,利用高速相机观测到⑤区高温空气辐射如图3所示。

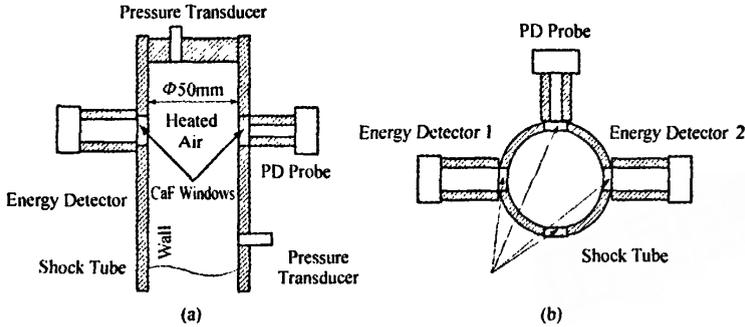


图1 激波管光学实验段结构示意图

Fig. 1 Scheme of the experimental setup for the radiation measurement of the shock heated air (a) the axial section (b) the cross section where four CaF₂ windows are used

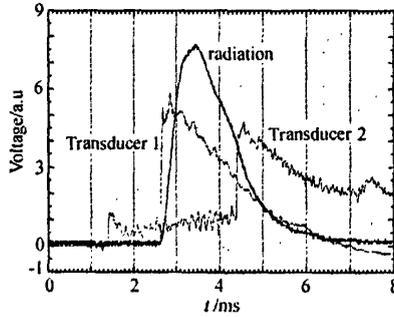


图2 高温空气辐射强度随时间的变化曲线图

Fig. 2 Typical waveform the radiation and the curves from two pressure transducers

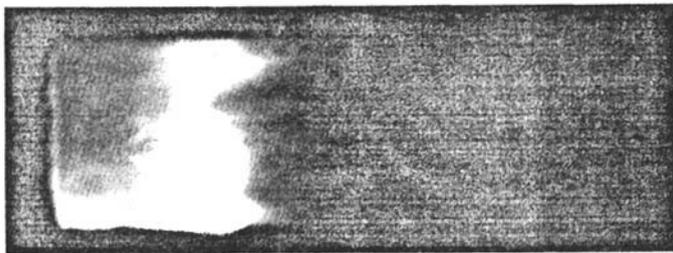


图3 激波管⑤区高温空气辐射图

Fig. 3 The typical radiation of high temperature air

实验中,我们测量了高温空气宽波段(0.3 μm ~ 9.0 μm)以及中心波长在4.26 μm 、5.23 μm 、8.32 μm 处、单位波长的绝对辐射功率,各滤波片参数如表1所示;由于能量计测量的只是一定立体角范围内高温空气的辐射能量,考虑到能量计探头的口径、距⑤区

的距离以及氟化钙窗口、滤波片的透射系数等因素,最后可以得出⑤区单位体积(cm^3)高温空气向四周空间(4π 立体角)辐射能量和能量计读数的关系,在此定义为传输参数 C_r ,其结果如表1所示。

表1 滤波片参数以及各种状态下的传输参数 C_F
Table 1 The parameters of three filters and the corresponding translation constant C_F

状态	中心波长(μm)	半宽度(μm)	透过率(%)	传输参数(cm ³)
0	0.3~9.0	-	-	36.5
1	4.26	0.34	80	45.6
2	5.23	0.23	80	45.6
3	8.32	1.50	65.7	55.6

实验数据处理如图4所示,实验中有四个基本参数是测量得到的:入射激波速度 V_s 、⑤区辐射持续时间 t_s 、辐射能量 E 、实验段初始压力 P_1 ;由图2可知,第①、②压力传感器信号图反映激波速度 V_s ,⑤区辐射信号图反映高温空气的辐射强度随时间的变化关

系,将其半宽度定义为⑤区高温空气辐射持续时间 t_s ;能量计直接测量出⑤区一定立体角范围内高温气体的辐射能量 E ;实验段初始压力 P_1 通过数字式真空计直接读出。

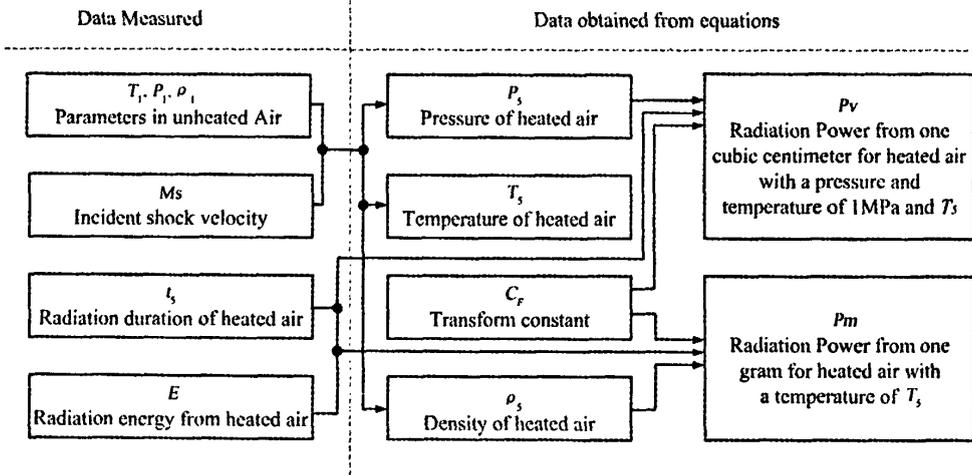


图4 实验数据处理过程图

Fig. 4 Following chart of experimental data process

⑤区 P_5 、 T_5 、 ρ_5 等参数的确定可根据激波管流动理论公式来推导,这些参数仅由入射激波马赫数 M_s 和①区参数 P_1 、 T_1 、 ρ_1 确定,在此次实验中 $T_1 = 298K$, P_1 根据实验需要选取,根据理想气体状态方程和激波管流动理论公式有:

$$\rho_1 = P_1 / RT_1 \quad (1)$$

$$P_{s1} = \frac{P_5}{P_1} = \left(\frac{7M_s^2 - 1}{6} \right) \left(\frac{8M_s^2 - 2}{M_s^2 + 5} \right) \quad (2)$$

$$T_{s1} = \frac{T_5}{T_1} = \frac{(4M_s^2 - 1)(M_s^2 + 2)}{9M_s^2} \quad (3)$$

$$\rho_{s1} = \frac{\rho_5}{\rho_1} = \frac{3M_s^2(7M_s^2 - 1)}{(M_s^2 + 2)(M_s^2 + 5)} \quad (4)$$

2 试验结果及分析

通过上述分析,在实验中我们发现激波管⑤区高温空气的压力 P_5 一般在 8~12 个大气压范围内,故高温空气的辐射功率可用 10 个大气压下(MPa)单位体积(cm³)的辐射功率与温度的关系来表示,计算公式为:

$$P_V = C_p E (t_s P_s)^{-1} [W \cdot cm^{-3} \cdot (MPa)^{-1}] \quad (5)$$

为了直观性,也可用单位质量(g)的高温空气辐射功率与温度的关系来表示,计算公式为:

$$P_M = C_p E (t_s \rho_s)^{-1} (W/g) \quad (6)$$

式中: P_M 的单位为 J, t_s 的单位为 sec, P_s 的单位为 MPa, ρ_s 的单位 g/cm^3 。

当计算中心波长在 $4.26\mu m$ 、 $5.23\mu m$ 、 $8.32\mu m$ 处高温空气单位波长的辐射功率时,应将公式(5)(6)除以其滤波片的半宽度,如表 1 所示。

为了高温空气不同波段范围内的辐射功率具有比较性,我们利用两个能量计进行同步测量,在同一个实验状态下,可以同时测量两个不同波段的辐射功率,在实验中,宽波段($0.3\mu m \sim 9.0\mu m$)和中心波长为 $8.32\mu m$ 为一组进行同步测量,其辐射功率与温度的关系如图 5 所示;中心波长为 $4.26\mu m$ 、 $5.26\mu m$ 为另一组进行同步测量,其辐射功率与温度的关系如图 6 所示。

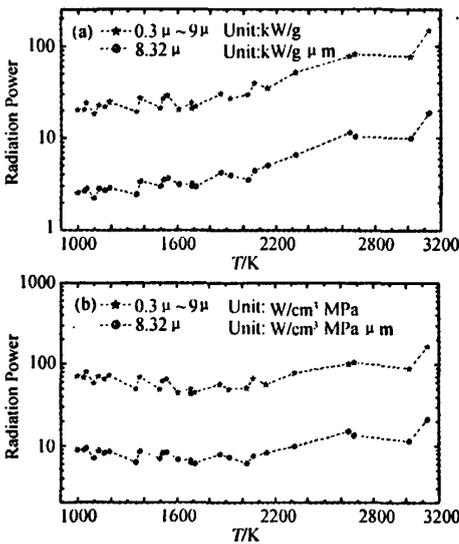


图5 宽波段(0.3~0.9μm)及中心波长在8.32μm处、单位波长的辐射功率与温度关系曲线

Fig. 5 Experimental results: radiation power of heated air in two types of unit in wavelength range of $0.3\mu m \sim 9\mu m$ and at the wavelength of $8.32\mu m$

由图 5 可知,高温空气在 10 个大气压下、单位体积(cm^3)内的宽波段辐射功率在 $1000K \sim 2000K$ 范围内变化缓慢,约为 $60W \cdot cm^{-3} \cdot (MPa)^{-1}$,但在 $2000K$ 以上时,辐射功率随着温度的升高增大较快,在

$3000K$ 时,达到为 $150W \cdot cm^{-3} \cdot (MPa)^{-1}$,其结果与文献[1]的理论计算结果相符合;因为在 $2000K$ 以下时,空气基本上由 O_2 、 N_2 组成,其他成分很少,其辐射主要集中在 $2\mu m \sim 8\mu m$ 波段范围内;当温度高于 $2000K$ 时, O_2 开始离解,随着温度的升高, N_2 也开始离解,并且发生化学反应,生成 NO 、 NO_2 ,这些变化对辐射功率的变化有很重要的影响,在 $2000K$ 以上时,存在着 O_2 的 Schumann - Runge 带系辐射 ($0.2\mu m \sim 0.47\mu m$), NO 的 β 、 γ 辐射 ($0.2\mu m \sim 0.56\mu m$) 以及 NO_2 的化学发光辐射、热辐射 ($0.4\mu m \sim 1.4\mu m$) 等等,随着温度的升高,辐射向着可见、紫外方向移动。

由图 5 可以看出,高温空气在中心波长 $8.32\mu m$ 处、单位波长(μm)的辐射功率变化趋势与宽波段相同,但辐射功率大小约为宽波段的十分之一。另外由图 5 还可以看出,就单位质量(g)的高温空气而言,无论是宽波段($0.3 \sim 9.0\mu m$)还是中心波长在 $8.32\mu m$ 处的窄波段,其辐射功率都随着温度的升高而逐渐增大,在 $2000K$ 以上时,辐射功率增大较快。

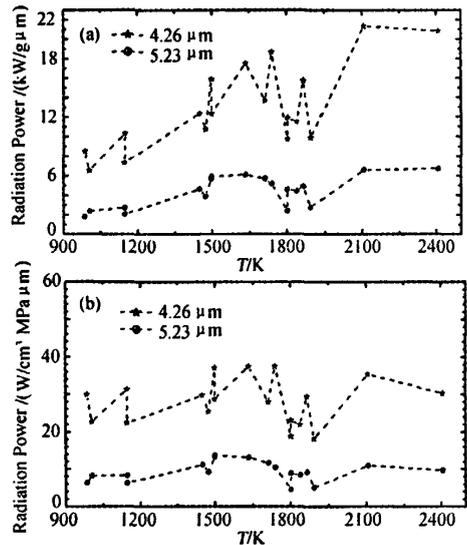


图6 中心波长4.26μm、5.23μm处、单位波长的辐射功率与温度关系曲线

Fig. 6 Experimental results: radiation power of heated air in two types of unit at wavelength of $4.26\mu m$ and $5.23\mu m$

由图 6 可知,高温空气在 $4.26\mu m$ 、 $5.23\mu m$ 波段处的辐射功率变化趋势以及产生辐射的原因与宽波段相同,在 $1000K \sim 2500K$ 范围内, $4.26\mu m$ 处的辐射功率明显高于 $5.23\mu m$ 处的辐射功率,约为其 3 倍。

3 总结及讨论

本实验利用激波管加热技术,通过宽波段能量计、光电探测器以及示波器等设备,测量了1000K~3000K高温空气在不同波段范围内的辐射功率,并且3000K的试验结果与理论计算结果基本符合;引起实验误差主要有以下三方面原因:首先:实验中⑤区温度是通过测量激波速度,根据激波管理论公式计算得到的,但实际上当 $Ms > 4$ 时,考虑真实气体效应的平衡温度与按照热量完全气体的计算温度有明显的偏离;其次:试验认为⑤区辐射持续时间的半宽度即为试验时间也对试验结果造成一定的误差,其主要是因为由于通光口径较大、辐射光线在激波管中反射以及辐射的积分效应引起的;再次,在数据处理过程中,关于传输参数 C_r 计算模型也是造成试验误差的主要原因。

利用这种测量方法,不仅可以测量高温空气的辐射功率,也可以对其他气体的热辐射进行测量,如 N_2 、 O_2 等气体。

致 谢

本项研究得到国家自然科学基金项目支持:高温空气辐射特性和温度测量技术的研究(10772187)。

参 考 文 献:

- [1] ALLEN R A. Spectrally integrated fluxes including line contributions and self absorption[R]. NASA CR-556, 1966.
- [2] RAYMOND L TAYLOR. Continuum infrared radiation from high-temperature air and nitrogen [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1963, 139(9): 2354-2360.
- [3] WURSTER W H. Quantitative spectroscopic studies with the shock tube[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1963, 3(4): 355-364.
- [4] KURT L WRAY and THOMAS J CONNOLLY. Nitrogen and air radiation in the near IR[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1965, 5(1): 111-123.
- [5] ALLEN R A, TEXTORIS A and WILSON J. Measurements of the free-bound and free-free continua of nitrogen, oxygen and air[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1965, 5(1): 95-108.
- [6] WALTER H WURSTER and PAUL V MARRONE. Nitric oxide radiation in the near I. R. spectrum of shock-heated air [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1967, 7(4): 591-604.
- [7] WRAY K L. Oscillator strengths of transitions between Rydberg states of nitric oxide in the near IR[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1969, 9(2): 255-276.
- [8] EVANS R D and EVANS D L. An experimental measurement of the ultraviolet absorption coefficient of shock heated air [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1969, 9(9): 1201-1208.
- [9] WRAY K L and TAYLOR R L. 4 μ band radiation from high temperature air[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1969, 9(10): 1317-1329.
- [10] DAIBER J W and WILLIAMS M J. Transition probabilities for nitric oxide in the far ultraviolet[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1961, 1(2): 135-142.
- [11] 陈强. 激波管流动的理论 and 试验技术[M]. 中国科技大学五系, 1979.

Experimental investigation of absolute radiation power for high temperature air by shock wave

YANG Qian - suo, PENG Zhi - min, LIU Chun, ZHU Nai - yi, JIANG Zong - lin

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

Abstract: The radiation in the wavelength range from $0.3\mu\text{m}$ ~ $0.9\mu\text{m}$ emitted by shock - heated air at temperature from 1000K to 3000K has been experimentally estimated. With the energy detectors, photodiode detector and narrow - band infrared filters, the radiation intensities at $4.26\mu\text{m}$, $5.23\mu\text{m}$ and $8.32\mu\text{m}$ versus temperature are also investigated. The experimental results reveal that the radiation power ($0.3\mu\text{m}$ ~ $9\mu\text{m}$) is about $60\text{ W}/(\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})$ at temperature from 1000K to 2000K, the radiation is mainly from the infrared band from $2\mu\text{m}$ to $8\mu\text{m}$. The radiation power is increasing quickly when the temperature is above 2000K, and the radiation moving to ultraviolet - visible, the radiation power (0.3 ~ $9\mu\text{m}$) is about $150\text{ W}/(\text{cm}^3 \cdot \text{MPa})$ when the temperature is up to 3000K.

Keywords: radiation power; radiation duration; high temperature air; shock tube