

烧蚀产物对空气辐射影响的实验研究

李鸿德等

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文利用低密度激波管和辐射计,在不同的温度和密度状态下,就杂质辐射在分谱和累积辐射条件下对高温空气平衡辐射的影响进行的实验研究;给出了在不同条件下的实验结果,并做了简单分析。实验结果表明:少量杂质对高温空气平衡辐射的影响较大,这为计算尾流辐射场时,考虑杂质辐射的影响提供了实验依据。

一、引言

对于再入体的识别和突防,弄清真实物体在一定的再入条件下的辐射模型和不同光谱间隔的分谱和累积辐射强度大小是十分重要的。在九十公里以下的再入体辐射场的辐射主要来自三个方面:驻点区的激波层辐射,再入体由于表面温升产生的热辐射和尾流的辐射。驻点区激波层和物体表面的辐射皆为热辐射;而尾流辐射既有热辐射,也有化学发光辐射。对于大钝锥再入体,像头部半径为 30 厘米的再入钝锥体^[1],化学发光在尾流辐射中起重要作用;而对于小钝锥和尖锥的再入体,化学发光辐射在尾流辐射中起次要作用,可以不考虑,一般只考虑尾流的热辐射就可以了。

在实验中全尺度的模拟十分困难,但把局部模拟和流场计算结合起来,将有助于问题的认识和解决。为了更好地局部模拟,我们把含有杂质(即烧蚀产物的成分)的高温空气的辐射分解成下面几个问题:(1)首先弄清一般空气在不同温度和密度下的分谱^[2,3]和累积辐射强度;(2)然后弄清一般空气在不同温度和密度下,非平衡辐射和平衡辐射的相对大小,非平衡辐射的松弛距离,进而对高温空气的平衡辐射进行修正^[4];(3)含有烧蚀产物成分的高温空气的平衡辐射,进而用杂质的辐射影响对空气的平衡辐射修正,这是本文的内容之一;(4)湍流对空气平衡辐射的影响;(5)化学发光辐射在尾流辐射中的地位。我们认为,在研究再入辐射场时,高温空气的平衡辐射是一个基础;在不同再入条件下,其它贡献对高温空气平衡辐射的影响是不同的。

烧蚀产物对辐射场的影响,六十年代初是从再入体头部激波层研究开始,直到七十年代初,国外利用弹道靶等设备,曾模拟过不同材料的烧蚀产物辐射对驻点加热率和对尾流光谱辐射功率的影响,国外对碳氢、碳氟化合物的烧蚀产物辐射研究较多,而对碳-石

本文于 1985 年 7 月 1 日收到,10 月 19 日收到修改稿。

英和石英类型的烧蚀材料产物辐射研究较少;研究结果表明,对钝头物体,波长 $\lambda = 0.2-1.0 \mu$ (微米)的尾流辐射,主要是尾流中烧蚀成分出现引起的。烧蚀产物对辐射场的影响,依赖于烧蚀成分的物理、化学性质和相对烧蚀量等条件。根据我国对硅基增强塑料二氧化硅动力学蒸发烧蚀模型^[5]的研究,得出下面看法:再入体烧蚀后,注入到边界层中的气体主要是一氧化碳(占90%左右);我们结合地面烧蚀速率的实验结果^[6],然后把单位时间的烧蚀量,边界层内的杂质分子的数密度与空气分子的数密度联系起来,通过分析计算,在我们的实验中向空气中加入1%左右的杂质CO气体,研究烧蚀产物CO对平衡空气分谱和累积辐射的影响。

对硅基增强塑料或碳石英再入体,注入到边界层中的烧蚀产物主要是一氧化碳(CO),但这些气体进入尾流后,由于与空气成分发生化学反应,将产生出许多新的分子和自由基如 C_2 、CN、SiO和OH等,如果设法知道尾流中各种成分及其相对含量,这时局部模拟实验和理论计算结合起来,就可给出尾流场的辐射特性。

本文内容是我们利用激波管和辐射计,在不同的温度和密度状态下,就杂质辐射在分谱和累积辐射条件下对空气平衡辐射的影响进行了实验研究,给出了不同状态下的实验结果,并就实验结果进行了分析讨论。

二、实验装置、测量原理和标定

1.实验装置: $\phi 800$ 低密度激波管是模拟再入流场平衡^[2,3]和非平衡辐射^[4]的重要设备,在文献[2]中作了介绍。为研究少量杂质对高温空气平衡辐射的影响,我们采用了图1的配气系统。

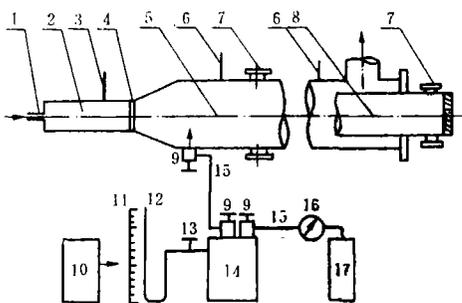


图1 低密度激波管和配气装置示意图

1. 配气入口; 2. 高压段; 3. 点火塞; 4. 膜片; 5. 入射激波实验段; 6. 电探针; 7. 测量窗口;
8. 反射段取样筒; 9. 高真空阀; 10. 测高仪; 11. 刻度尺; 12. U形管水银压力计; 13. 两通阀;
14. 标准容器; 15. 管道; 16. 压力表; 17. 高纯气体容器。

通过实验和计算确定了低密度激波管实验段与标准容器(14)的体积比为两千多倍。当实验段真空度在 $10^{-3} \tau$ 或更高时,标准容器多次充入2000多毫米汞柱压力的气体时,实验段气体压力为1毫米汞柱左右;利用测高仪,U形管压力计的读数可以精确到

0.1 毫米汞柱。当实验段的初始压力要求为 1 毫米汞柱左右时, 考虑到配气时间和激波管的漏量小于 1.0×10^{-4} τ /分, 应用上述配气装置, 少量杂质气体的引入量是比较准确的, 杂质本身误差小于 2%。

2. 杂质辐射的分谱测量装置和分谱辐射标定与空气平衡辐射实验^[2]基本相同。对于累积杂质气体辐射的测量装置见图 2。

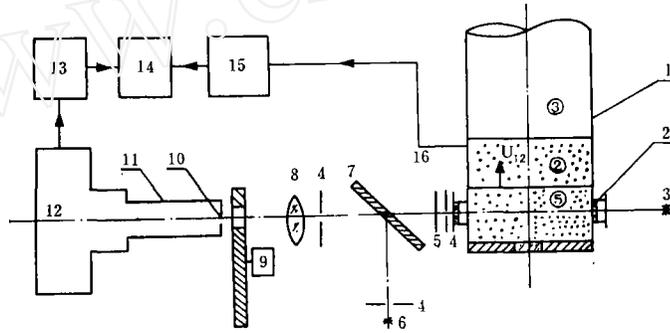


图 2 累积辐射的测量装置及光路示意图

1. 激波管; 2. 光学窗口; 3. 对光光源; 4. 光闸; 5. 滤光片; 6. 钨带灯; 7. 全反射镜; 8. 聚光透镜; 9. 光调制盘; 10. 入射光孔; 11. 暗箱; 12. 光电装置; 13. 放大器; 14. 示波器; 15. 延时器; 16. 电探针。

使用图 2 的实验装置, 在测量波长 $\lambda \cong 4000 \sim 7600 \text{ \AA}$ 范围内的累积平衡辐射时, 我们使用了波段滤光片紫一号, 当 $\lambda \cong 4000 \text{ \AA}$ 时光被截止; 在 $\lambda \cong 7600 \text{ \AA}$ 一端, 利用了可见光电倍增管的特性。在波长 $\lambda \cong 7000 \sim 12000 \text{ \AA}$ 范围的累积平衡辐射测量, 利用了波段滤光片红三号, 把 λ 小于 7000 \AA 的光截止, 而在近红外端 $\lambda \cong 1.2 \mu$ 利用了红外光电倍增管的特性。

3. 关于累积辐射的标定用标准温度灯做标准光源。在相同的光路条件下, 对一定温度和密度下的高温气体和温度灯的辐射能量进行比较。单位体积、单位立体角和光谱范围 $\Delta\lambda$ 内的气体辐射功率 $I_{g\Delta\lambda}$ 为

$$I_{g\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{g\lambda} \cdot R(\lambda) d\lambda = \frac{R_{g\Delta\lambda}}{R_{W\Delta\lambda}} \cdot \frac{1}{L} \left(\frac{r_W}{T_g} \right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{W\lambda} \cdot R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

这里的 $R(\lambda)$ 是辐射计的光谱响应, 其它符号与文献[2]中一样, 这里只不过用一光谱宽度 $\Delta\lambda$ 代替了[2]中的光谱波长。

在数据处理时, 我们假设空气和含有杂质的空气的辐射在相同状态下的光谱分布规律相同, 只是大小不同。由(1)式我们得到了不同条件下含有杂质的空气平衡辐射。在分谱和累积辐射比较时, 均以空气的平衡辐射作标准。

三、烧蚀产物一氧化碳对高温空气平衡辐射的影响

1. 在分谱条件下, 杂质辐射的影响

在激波管实验段里, 通过图1的配气系统向已知量的空气里放入不同含量的一氧化碳气体; 在激波加热的过程中, 选用 $\lambda \cong 5120 \text{ \AA}$, 目的是观察 $C_2(0, 0)$ 的 Swan 基振动带及其在该波长的其它分子带系^[7]对高温空气平衡辐射的影响。 $C_2(0, 0)$ 带是一个很强的辐射带, 由于该带的跃迁几率大, 即使少量的 C_2 分子也会产生较大的影响。 $C_2(0, 0)$ 的带头在 $\lambda \cong 5165 \text{ \AA}$, 我们测量时的光谱宽度 $\Delta\lambda \cong 110 \text{ \AA}$, 定量测试结果见下表。

表1 分谱条件下杂质辐射影响的测量结果

序号	实验状态				实验气体	绝对值	相对值
	$P_1(\tau)$	M_s	$T(K)$	ρ/ρ_0			
1	1	12.2	6800	9.76×10^{-2}	Air(100%)	40.0	
2	1	11.6	6620	9.50×10^{-2}	Air(100%)	33.3	1
3	1	11.8	6700	9.60×10^{-2}	Air(99%) + CO(1%)	80.0	2.40
4	1	12.1	6780	9.74×10^{-2}	Air(98%) + CO(2%)	83.3	2.50
5	1	11.9	6720	9.61×10^{-2}	Air(97%) + CO(3%)	83.6	2.51

表1中的 P_1 和 M_s 分别为激波管实验段的初始压力和入射激波马赫数; T 和 ρ 分别为实验时的温度和密度^[8], ρ_0 为空气的标准密度。

由表1看出, 在相近的状态下, 1%的一氧化碳含量对空气平衡辐射的影响为两倍左右; 而(1~3)%的一氧化碳含量对空气平衡辐射的影响差别不大。计算表明, 在上述的测量条件和光谱宽度里, 尽管各种分子, 如 C_2 、CO、 CO_2 、CN 和 N_2^+ 等的含量不同, 但对该波长间隔最终辐射贡献的和却差别不大。

2. 在累积辐射条件下, 杂质辐射的影响

(1) $\lambda \cong 4000 \sim 7600 \text{ \AA}$ 时, 杂质辐射的影响(见表2)

由表2看出: 在 $P_1=1\tau$, $M_s \cong 10.6$ 状态下, 一氧化碳含量在1%和2%时, 对空气累积平衡辐射的影响分别为1.52倍和2.20倍; 而2%一氧化碳含量的影响是1%一氧化碳含量影响的1.45倍。当温度升高, 密度降低时, 即 $P_1=5 \times 10^{-1}\tau$, $M_s \cong 13.4$ 时, 0.5%一氧化碳含量的影响就增加一倍多; 如果把1%一氧化碳含量的实验状态归一到0.5%含量的实验状态时, 即温度由6710 K 升高到6870 K 时, 1%一氧化碳含量的影响由2.07倍提高到2.56倍。表2的实验结果表明: 在 $\lambda \cong 4000 \sim 7600 \text{ \AA}$ 内和我们的实验条件下, 少量杂质对空气累积平衡辐射的影响随着杂质含量的增加而增大, 序号1状态下杂质含量增加对高温空气累积平衡辐射的影响比较明显。在序号3条件下, 空气与氮气的累积平衡辐射大小相差不多, 这说明在 $\lambda \cong 4000 \sim 7600 \text{ \AA}$ 内辐射的主要贡献来自 $N_2(1+)$, $N_2(2+)$ 和 $N_2^+(1-)$ 等分子带系。

表 2 累积辐射条件下, 杂质辐射影响的测量结果

序号	实 验 状 态				实 验 气 体	绝对值	相对值
	$P_1(\tau)$	M_s	$T(K)$	ρ/ρ_0			
1	1	10.6	6200	8.87×10^{-2}	Air(100%)	35.0	1
	1	10.5	6120	8.62×10^{-2}	Air(99%) + CO(1%)	53.3	1.52
	1	10.6	6200	8.78×10^{-2}	Air(98%) + CO(2%)	77.1	2.20
2	5×10^{-1}	13.3	6310	5.63×10^{-2}	Air(100%)	6.62	1
	5×10^{-1}	12.4	6870	5.76×10^{-2}	Air(99.5%) + CO(0.5%)	13.9	2.10
	5×10^{-1}	13.1	6710	5.53×10^{-2}	Air(99%) + CO(1%)	13.7	2.07
3	1	11.9	6720	9.61×10^{-2}	Air	103	1
	1	11.8	6600	9.60×10^{-2}	N ₂	97.1	0.943

(2) $\lambda \cong 7000 \text{ \AA} \sim 12000 \text{ \AA}$ 范围内, 杂质辐射影响的测量结果(见表 3)。

表 3 $\lambda \cong 7000 \sim 12000 \text{ \AA}$ 内, 杂质辐射影响的测量结果

序号	实 验 状 态				实 验 气 体	绝对值	相对值
	$P_1(\tau)$	M_s	$T(K)$	ρ/ρ_0			
1	1	10.9	6300	8.99×10^{-2}	Air(100%)	2.40	1
2	1	11.1	6390	9.21×10^{-2}	Air(99.5%) + CO(0.5%)	6.50	2.71
3	1	10.9	6300	8.99×10^{-2}	Air(99%) + CO(1%)	5.33	2.22

由表 3 看出, 在 $\lambda \cong 7000 \sim 12000 \text{ \AA}$ 范围内, 0.5% 含量的一氧化碳对高温空气累积平衡辐射的影响增加一倍多; 考虑到序号 3 状态的温度修正, 1% 含量的一氧化碳的影响与 0.5% 含量的差不多, 原因是在我们的测量条件下和该光谱范围内, 尽管杂质含量不同造成的生成物分子的含量不同, 但对该波长间隔的辐射贡献的求和却差不多。

四、关于杂质辐射影响的初步看法

1. 从上述分谱的和累积平衡辐射实验结果知道, 考虑到我们的测量误差一般小于 30% 时, 仅是引入 1% 左右含量的杂质气体一氧化碳, 对空气平衡辐射的影响就增加一倍左右。如果要较真实地局部模拟尾流中的各种化学成分, 激波管实验时还要引入象氢气, 金属氧化物等组分; 因为尾流中包括着几十种化学组分, 除了 N₂、O₂ 和 NO 分子外, 还有 C₂、CO、CN 和 N₂⁺ 分子和自由基 OH 和 CH₂ 等, 这时杂质的影响还要增加。可以比较肯定地说: 少量杂质对高温空气平衡辐射的影响较大, 因此在计算尾流辐射场

时, 必须考虑。

2. 在分谱实验时, 我们也观察到引入1%的一氧化碳杂质后, 在中心波长 $\lambda = 5120 \text{ \AA}$ 处的空气平衡辐射强度增大一倍左右, 但在中心波长 $\lambda = 5400 \text{ \AA}$ 处, 空气的平衡辐射强度有所下降; 即在空气里引入少量杂质后, 有的波长随高温空气的平衡辐射增加, 而有的波长随高温空气的平衡辐射反而下降。正如微量金属原子对尾流中的电子密度影响很大, 但引入一些金属氧化物和氟化物后^[9, 10], 可以减少尾流中的电子密度一样; 在尾流中, 有些少量组分, 由于它的振子强度大, 对辐射的贡献也大, 能否设法在空气里引入某些杂质, 使辐射占优势的成分下降, 导致辐射的减小。为此预先了解尾流中的化学组分, 对局部模拟实验十分有用。

3. 我们目前的研究是在可见和近红外区域, 实验是初步的, 还不系统。在红外区, 杂质分谱的和累积的辐射影响研究也很重要。

4. 我们实验的温度比近尾流高, 密度也大一点; 如果在温度降低, 密度减小的情况下; 进一步研究某些杂质辐射的影响很必要。

感谢卞荫贵先生、崔季平、竺迺宜等同志对本工作的支持和帮助; 刘玉珍、李思文、李连祥和李淑琴等同志参加了有关的实验工作, 对此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Teare, J. D. et al., *Hypersonic Flow Research*, 7, (1962), 281—317.
- [2] 李红德、罗军、李思文: *光学学报*, 3, 7, (1983), 380—384.
- [3] 罗军、李红德、李思文: *力学学报*, 16, 2, (1984), 185—191.
- [4] 李红德: *力学学报*, 17, 2, (1985), 172—176.
- [5] 刘志民: *超高速气动研究*, 3, (1979).
- [6] 王贞尧等: “碳纤维增强石英复合材料的烧蚀机理”, 中国科学院上海硅酸盐研究所报告, (1979).
- [7] Pearse, R. W. B. and Gaydon, A. G., “The identification of Molecular Spectra”, Fourth Edition, Chapman and Hall, London, (1976).
- [8] Glass, I. I. and Hall, J. G., “Handbook of Supersonic Aerodynamics”, Section 18, U. S. Govt. Print. off., Washington, (1959).
- [9] Shui, V. H. et al., *AIAA Paper*, 79—252.
- [10] Mudson, J. M., *AIAA Paper*, 79—253.

EXPERIMENTAL RESEARCH ABOUT THE INFLUENCE OF THE IMPURITY ON AIR RADIATION

Li Hongde et al.

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

This report presents the experimental research at different temperatures and densities about the influence of impurity on radiation at spectral and integral radiation on air equilibrium radiation by using the radiometer in the low density shock tube. The experimental results were given at different conditions and simple analysis was made. The experimental results show that the influence of a small amount of the impurity on air equilibrium radiation is rather big; When wake radiation field is computed, the influence of impurity on radiation must be considered.