

文章编号: 1000-7032(2018)05-0653-08

高速碰撞诱发闪光辐射温度的测量及误差分析

韩雅菲*, 唐恩凌*, 贺丽萍, 王 猛, 郭 凯,
夏 瑾, 刘淑华, 马建军, 王睿智, 李振波

(沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 为实现对高速碰撞诱发的闪光辐射温度进行实验测量及误差分析,建立了二级轻气炮加载系统及闪光辐射温度测量系统。采用聚碳酸酯弹丸分别以 6 km/s、3.9 km/s 的速度垂直撞击 2A12 铝靶,利用瞬态光纤高温计采集闪光信号,通过比色法计算不同碰撞条件下的闪光辐射强度及辐射温度。依据普朗克辐射定律计算了不同波长及温度条件下的闪光辐射强度理论值,与实验测量结果相比较并进行了误差分析;分别采用双色测温法不同波长组合及四色测温法计算了闪光辐射温度及其平均温度,通过计算标准差分析了波长的选取对闪光辐射温度的影响。结果表明:与理论计算结果相比较,实验测量得到的闪光辐射强度值偏低,采用双色测温法计算闪光辐射温度时波长的选取对计算结果影响很大,波长间隔越大计算结果误差越小(误差最小值实验 No. 1 为 68.25 K,实验 No. 2 为 30.67 K);四色测温法计算得到的闪光辐射温度与平均温度相近(误差实验 No. 1 为 72.88 K,实验 No. 2 为 63.66 K),因此采用比色法计算闪光辐射温度时应尽量选取大间隔波长或多个波长参与计算以降低误差。

关键词: 高速碰撞; 闪光辐射强度; 闪光辐射温度; 瞬态光纤高温计; 误差分析

中图分类号: O383

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20183905.0653

Measurement and Error Analysis of Flash Radiant Temperature Induced by High-velocity Impact

HAN Ya-fei*, TANG En-ling*, HE Li-ping, WANG Meng, GUO Kai, XIA Jin,
LIU Shu-hua, MA Jian-jun, WANG Rui-zhi, LI Zhen-bo

(School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

* Corresponding Authors, E-mail: hanyafei0704@163.com; tangenling@126.com

Abstract: In order to realize the experimental measurement and error analysis of flash radiant temperature induced by high-velocity impact, loading system of two-stage light gas gun and measurement system of flash radiant temperature were set up. Polycarbonate projectiles were accelerated to 6 km/s, 3.9 km/s to impact 2A12 aluminum plate vertically, and instantaneous optical pyrometer was utilized to acquire flash signals, at the same time flash radiant intensities and temperatures were calculated by the ratio method under the different impact conditions. Theoretical values of flash radiant intensities were calculated with different wavelengths and temperatures based on Plank radiant law, thus the error analysis could be obtained by comparing the theoretical values with the experimental ones; the flash radiant temperatures and its average temperature were calculated by selecting corresponding flash radiant intensities of different wavelengths according to the methods of two-color and four-color temperature measurement, and the influence of wavelength's selection to flash radiant

收稿日期: 2017-08-23; 修订日期: 2017-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(11472178, 11272218)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (11472178, 11272218)

temperature was analyzed by calculating the standard deviation. The results show that the flash radiant intensities of experimental measurement are lower than the ones of theoretical value, and the selection of wavelength has a great influence on the calculating results of flash radiant temperature from the method of two-color temperature measurement, meanwhile, the bigger interval of wavelength is, the smaller the calculating error becomes (the minimum error is 68.25 K in experiment No.1 and 30.67 K in experiment No.2); the flash radiant temperature calculated by the method of four-color temperature measurement is close to the average temperature (the error is 72.88 K in experiment No.1 and 63.66 K in experiment No.2), therefore, the bigger interval of wavelength and multiple wavelengths should be adopted in order to reduce error during calculating flash radiant temperature.

Key words: high-velocity impact; flash radiant intensity; flash radiant temperature; instantaneous optical pyrometer; error analysis

1 引 言

当弹丸以高速撞击靶板时,弹丸的动能转化成内能使碰撞材料的温度急剧升高,瞬间气化同时产生闪光现象。Baird^[1]研究发现,闪光辐射强度随碰撞速度的指数升高;进一步地,作者所在 Tang^[2-5] 研究小组通过理论推导得出闪光辐射强度 I 与碰撞速度 v 和入射角度 θ 的乘积呈幂指数关系 $I \sim (v \sin \theta)^\beta$,并由大量实验结果拟合得到了不同碰撞条件下 β 的取值;对不同碰撞速度条件下 Al 原子的闪光辐射光谱进行了总结,建立了碰撞点附近最大闪光辐射强度及温度的空间演化模型,验证了碰撞产生的闪光辐射温度以近似椭球的形状向外膨胀;为研究非金属材料高速撞击产生的闪光现象,Ernst^[6] 用硅硼玻璃以不同速度及入射角度撞击浮石粉,利用光电二极管采集闪光信号并采用黑体炉进行标定,通过双色测温法得到了闪光辐射温度为 4 000 ~ 4 600 K;对于金属材料碰撞产生的闪光,Bergeron 等^[7] 用钢球以 5 ~ 6 km/s 的速度撞击铝板,测得当碰撞能量大于 16 mJ 时会产生中心波长为 585 nm 的黄色闪光。Reinhart^[8] 用不同金属弹丸撞击铝、铈及 B 炸药,用分光计测量可见光和近红外线波长范围内崩溅物的热辐射强度,采用双色测温法计算得出闪光辐射温度为 2 000 ~ 5 000 K;对于粒子高速撞击产生的闪光,Collette^[9] 采用粒子加速器将铁微粒加速到 1 ~ 32 km/s 撞击钨目标,采用光电倍增管测量碰撞产生的闪光信号,计算得到了闪光辐射温度为 2 500 ~ 5 000 K;有关波长的选

择对闪光辐射温度计算结果的影响方面,Thornhill^[10] 所在研究小组将钛飞片撞击铝板,采用双色测温法计算闪光辐射温度,结果表明选用不同波长计算得到的闪光辐射温度值差异较大;为研究微流星体对行星及其他空间物体撞击产生的闪光现象,Goel^[11] 采用 35 μg ~ 0.15 μg 的球状铁弹丸以 2.8 ~ 67 km/s 的速度撞击钨、铜、太阳能电池等 7 种不同材料,采用多通道光电二极管测量碰撞产生的闪光,得到了闪光信号与质量和速度的关系式,从而实现了通过测试闪光信号反演空间碎片的质量及速度;Schultz^[12-14] 研究小组在深空探测实验中通过对闪光光谱进行分析推断出彗星中的物质组成。因此,研究超高速碰撞诱发的闪光特征对于远程诊断微流星体及空间碎片对航天器的毁伤、探知天体的物质组成具有理论意义^[15]。

目前,在高速碰撞诱发的闪光辐射温度方面的研究多侧重于不同材料不同碰撞条件对测量结果的影响^[16-17],而在波长的选取、发射率及实验相关因素对闪光辐射温度的影响方面研究甚少,本文通过实验测量及误差计算对影响闪光辐射温度的因素进行了分析及讨论,并提出了采用比色法计算闪光辐射温度时降低计算误差的建议。

2 测量系统

图 1 为高速碰撞实验二级轻气炮加载系统及瞬态光纤高温计闪光辐射温度测量系统。利用二级轻气炮加载弹丸,通过调整一二级气室压强实现弹丸以不同入射速度撞击靶板;光纤探头安装

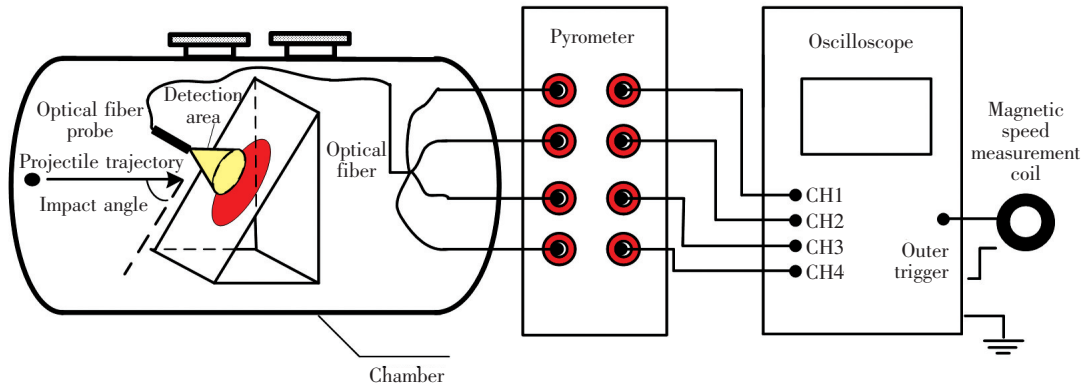


图 1 二级轻气炮加载系统及瞬态光纤高温计闪光辐射温度测量系统

Fig. 1 Loading system of two-stage light gas gun and flash radiant temperature measurement system based on instantaneous optical pyrometer

在碰撞点正上方,与瞬态光纤高温计及示波器相连接;当碰撞闪光出现在光纤探头覆盖的锥体探测区域时,闪光信号将通过瞬态光纤高温计中的光电倍增管转换成电信号被采集完成。

3 理论计算

3.1 闪光辐射强度

在热平衡辐射条件下,闪光辐射强度符合普朗克热平衡辐射理论,即单位面积黑体在半球方向、单位时间的单色辐射强度^[18]

$$I_b(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

式中: C_1 为第一辐射常数, $3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; C_2 为第二辐射常数, $1.4388 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}$; λ 为波长, m ; T 为黑体辐射温度, K 。当波长在 $0.3 \sim 1 \mu\text{m}$ 、温度小于 3000 K 时,普朗克定律可以由维恩辐射定律取代,同时考虑灰体表面发射率 ε ,得到灰体光谱辐射强度的理论计算公式:

$$I(\lambda, T) = \varepsilon \frac{C_1}{\lambda^5} \exp(-C_2/\lambda T), \quad (2)$$

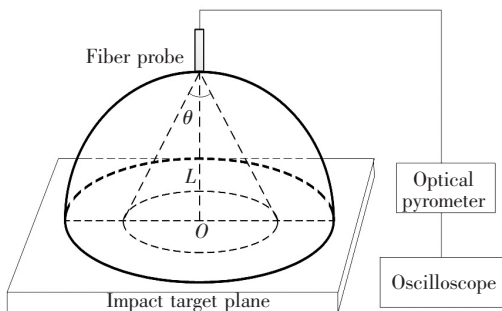


图 2 光纤探头探测范围与半球方向光谱辐射范围

Fig. 2 Detection range of optical fiber probe and the spectral radiant range of hemispherical direction

若采用光纤探头采集闪光信号,如图 2 所示,假定光纤探头的光纤孔径角为 θ ,与碰撞点 O 距离为 L 并垂直于目标靶板平面,则通过计算光纤探头探测区域体积与光谱辐射半球体积之比,可得到实测物体光谱辐射强度的理论计算公式:

$$I(\lambda, T) = \frac{1}{2} \varepsilon \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \frac{C_1}{\lambda^5} \exp(-C_2/\lambda T). \quad (3)$$

3.2 闪光辐射温度

依据光谱辐射强度的维恩近似公式(2),取任意两波长 λ_1, λ_2 的光谱辐照强度 I_1, I_2 ,采用比色法,得到闪光辐射温度理论计算公式:

$$T = \frac{C_2 [(1/\lambda_2) - (1/\lambda_1)]}{\ln(I_1/I_2) - 5 \ln(\lambda_2/\lambda_1) - \ln(\varepsilon_1/\varepsilon_2)}, \quad (4)$$

假定 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$,得到双色测温法闪光辐射温度计算公式:

$$T = \frac{C_2 [(1/\lambda_2) - (1/\lambda_1)]}{\ln(I_1/I_2) - 5 \ln(\lambda_2/\lambda_1)}. \quad (5)$$

作者所在研究团队提出了四色测温法。选取 4 个波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 的光谱辐照强度 I_1, I_2, I_3, I_4 ,依据公式(3),同时假定 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4$,采用比色法,得到四色测温法闪光辐射温度计算公式:

$$\frac{I_1 I_3}{I_2 I_4} = (\lambda_1 \lambda_3 / \lambda_2 \lambda_4)^5 \cdot \frac{[\exp(C_2/\lambda_2 T) - 1][\exp(C_2/\lambda_4 T) - 1]}{[\exp(C_2/\lambda_1 T) - 1][\exp(C_2/\lambda_3 T) - 1]}. \quad (6)$$

4 实验参数及测量

闪光辐射温度测量系统由多通道瞬态光纤高

温计(型号 FOP-8)和太阳模拟器组成,多通道瞬态光纤高温计的温度测量范围为 20 ~ 10 000 K,共 7 个通道,对应波长为 400,450,500,550,600,650,700 nm,符合可见光范围的测量要求,实验选用 400,500,600,700 nm 4 个通道进行同步测量。

碰撞闪光信号采集前,需要用太阳光模拟器作为标准光源进行标定。首先将光纤探头置于太阳光模拟器距离 I_c 处,由太阳光模拟器发出标准光,经过高温计中的光电倍增管转换成电信号在示波器上显示,记录标定电压 h_c 和标定负载电阻 R_c ;已知标准光源的光谱辐射照度 $N_r(\lambda)$ (由中国测量技术研究院标定给出),波长 400,450,500,550,600,650,700 nm 对应的光谱辐射照度

$N_r(\lambda)$ 为 281.7,101.7,235.5,340.8,357.3,180.8,280.7 $\text{mW} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

测量闪光辐射强度时,将光纤探头置于与碰撞点垂直距离为 I_{exp} 处,记录实验负载电阻 R_{exp} 和示波器测得闪光电压值 h_{exp} ,已知光纤孔径角为 θ ,则闪光辐射强度测量值 I_{exp} :

$$I_{\text{exp}} = \frac{h_{\text{exp}}}{h_c} \cdot \frac{R_c}{R_{\text{exp}}} \cdot \frac{l_c^2}{l_{\text{exp}}^2} \cdot \frac{N_r(\lambda)}{2\pi(1 - \cos\theta)}, \quad (7)$$

实验中光纤探头与碰撞点距离为 90 mm;弹丸为圆柱形聚碳酸酯,长径比为 1:1,质量为 0.117 g;靶板材料为 2A12 铝,靶板厚度 2 cm;光纤孔径角 $\theta = 37^\circ$,具体碰撞参数及四通道标定值如表 1 所示。

表 1 实验基本参数

Tab.1 Basic experimental parameters

No.	Impact angle/ ($^\circ$)	Impact velocity/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	Calibration voltage/V			
			CH1 (400 nm)	CH2 (500 nm)	CH3 (600 nm)	CH4 (700 nm)
1	90	6	6.48	2.12	5.48	3.52
2	90	3.9	7.12	2.28	5.48	4.08

5 结果及误差分析

5.1 理论计算结果

实验中靶板材料为 2A12 铝,经测定其 550 nm 波长对应发射率为 0.1,假定不同波长对应的发射率相等,依据公式(3),得到不同波长及温度下的闪光辐射强度理论计算,结果如图 3 所示。

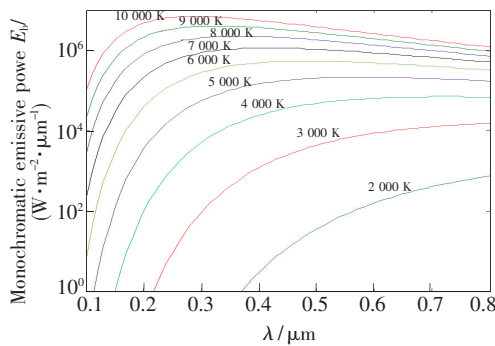


图 3 不同波长及温度条件下的闪光辐射强度理论值

Fig.3 Theoretical values of flash radiant intensity with different wavelengths and temperatures

5.2 实验测量及计算结果

图 4、图 7 分别为 No. 1、No. 2 实验中依据公式(7)计算得到的不同波长对应的闪光辐射强度

I_{exp} 。依据公式(5)选取不同波长及对应闪光辐射强度采用双色测温法计算闪光辐射温度,得到 6 组闪光辐射温度值,结果如图 5、图 8 所示;图 6、图 9 分别为两次实验中依据公式(6)采用四色测温法计算得到闪光辐射温度值和两种方法计算得到的闪光辐射温度平均值,闪光辐射温度记录时间范围为闪光出现后 40 μs 。

由实验结果可知,实验测量得到的闪光辐射强度值要远远低于理论计算值。No. 1 实验得到的闪光辐射温度平均值峰值为 4 200 K,按照图 3 所示理论计算结果其闪光辐射强度值应大于 $10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,而实际测量的闪光辐射强度值

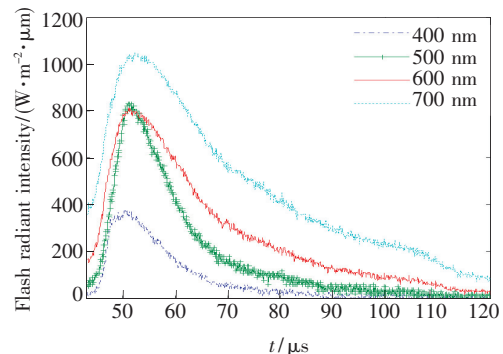


图 4 No. 1 实验闪光辐射强度时程曲线

Fig.4 Flash radiant intensity versus time in No. 1 experiment

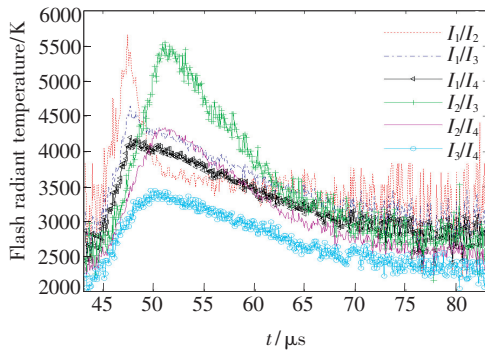


图 5 No. 1 双色测温法不同波长计算所得闪光辐射温度时程曲线

Fig. 5 Flash radiant temperature of different wavelengths versus time based on two-color method in No. 1 experiment

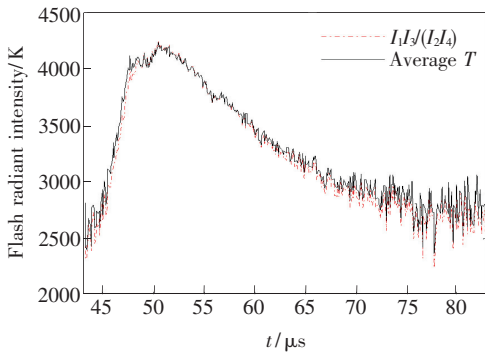


图 6 No. 1 四色测温法闪光辐射温度与平均温度时程曲线

Fig. 6 Flash radiant temperature and average temperature from four-color and two-color methods versus time in No. 1 experiment

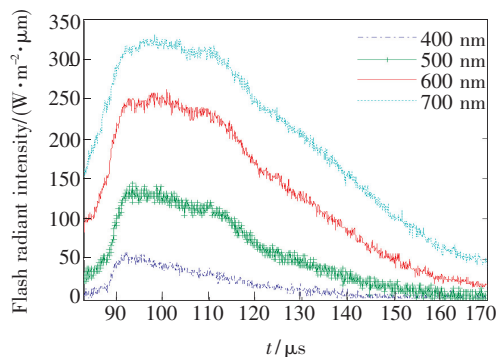


图 7 No. 2 实验闪光辐射强度时程曲线

Fig. 7 Flash radiant intensity versus time in No. 2 experiment

约为 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; No. 2 实验得到闪光辐射平均温度峰值为 3 300 K, 理论计算闪光辐射强度值应大于 $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 而实际测量得到的闪光辐射强度值约为 $320 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 。

根据图 3 所示闪光辐射强度理论值, 当闪光

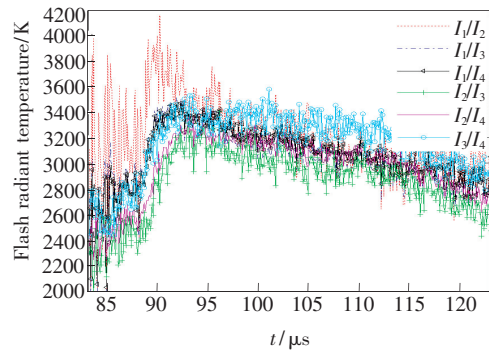


图 8 No. 2 双色测温法不同波长计算所得闪光辐射温度时程曲线

Fig. 8 Flash radiant temperature of different wavelengths versus time based on two-color method in No. 2 experiment.

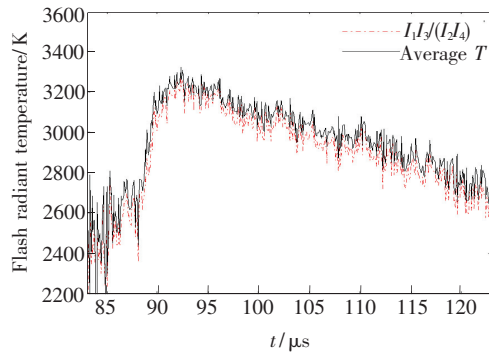


图 9 No. 2 四色测温法闪光辐射温度与平均温度时程曲线

Fig. 9 Flash radiant temperature versus time based on four-color method and average temperature of two-color method in No. 2 experiment

辐射温度约为 3 000 ~ 4 000 K 时, 在 300 ~ 700 nm 波长范围内, 波长越长对应闪光辐射强度值越大; No. 1、No. 2 实验测量得到的闪光辐射强度中, 700 nm 波长对应的闪光辐射强度值最大, 600, 500, 400 nm 波长对应的闪光辐射强度依次降低, 如图 4、图 7 所示。实验测量所得规律与理论相符。

采用双色测温法计算闪光辐射温度, 其结果随波长选取的不同而有所差异。如图 5 所示, No. 1 实验选取 1、2 通道 (400, 500 nm) 计算所得闪光辐射温度值最高, 峰值近 5 500 K; 选取 3、4 通道 (600, 700 nm) 计算所得闪光辐射温度值最低, 峰值近 3 500 K; 选取 1、4 通道 (400, 700 nm) 计算得到的闪光辐射温度值接近平均值。可见, 采用双色测温法计算闪光辐射温度, 其误差与波长的选取密切相关。采用四色测温法计算所得闪

光辐射温度与两种方法计算得到的闪光辐射温度的平均值较为接近(图 6、图 9)。No. 2 实验采用不同波长计算所得闪光辐射温度值及其呈现的规律与 No. 1 实验相同,与 No. 1 实验相比较,采用双色测温法计算闪光辐射温度时不同波长的选取对结果影响较小(图 8)。

根据维恩位移定律,黑体最大辐射强度对应波长与辐射温度满足 $\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$,根据 No. 1 及 No. 2 实验闪光辐射强度时程曲线,最大闪光辐射强度对应波长为 700 nm,由维恩位移定律计算出对应黑体辐射温度近似为 4 139 K,采用双色及四色测温法得到的闪光辐射温度的平均值为 3 300 ~ 4 200 K(图 5、图 6、图 8、图 9),因

表 2 双色及四色测温法计算闪光辐射温度标准差

Tab.2 Standard deviation of flash radiant temperature obtained by methods of two-color and four-color temperature measurement

No.	闪光辐射温度标准差/K						
	I_1/I_2	I_1/I_3	I_1/I_4	I_2/I_3	I_2/I_4	I_3/I_4	$I_1 I_3 / (I_2 I_4)$
1	520.17	230.29	68.25	514.05	243.14	585.41	72.28
2	235.28	69.31	30.67	133.02	111.61	131.05	63.66

5.3.1 闪光辐射强度

采用瞬态光纤高温计测量闪光辐射强度时,闪光在到达探测器的过程中能量会衰减,同时光纤探头的污染、弹靶材料高速撞击产生的碎片及蒸气云对闪光的遮挡、闪光辐射分布不均匀及周围环境因素等均会影响测量结果,因此实验测量得到的闪光辐射强度值低于理论计算结果。

5.3.2 闪光辐射温度

(1) 波长选取对测量结果的影响

通过分析双色测温法理论计算公式(5)可知,采用双色测温法计算闪光辐射温度时影响测量精度的主要因素有两个:一是实际物体的发射率随波长的增加而增加或减小,而闪光辐射温度的计算假定发射率相同,因此波长间隔越大计算结果误差越大;二是闪光辐射温度要通过波长及对应闪光辐射强度的比值取对数计算获得,波长间隔越小温度分辨率越差,误差越大。

根据表 2 闪光辐射温度标准差及图 5、图 8 计算结果,波长间隔越大所得闪光辐射温度越接近平均值,可见在上述影响测量精度的两个因素中,波长的增加所引起的发射率变化很小,而后者对误差的影响则更大,因此 1、4 通道(400,700 nm)间隔最大,计算所得闪光辐射温度最接近平

此,实验所得闪光辐射温度值与理论值接近,在合理范围。

5.3 误差分析

由于无法确定实验中高速碰撞诱发的瞬态闪光的真实辐射温度,本文通过计算标准差来分析不同波长的选取对闪光辐射温度测量结果的影响。假定瞬态光纤高温计获取闪光电压数据点数为 N ,计算得到闪光辐射温度值为 T_{exp} ,闪光辐射温度平均值为 T_{avg} ,则标准差

$$E_{\text{sd}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_{\text{exp}}(i) - T_{\text{avg}}(i)]^2}, \quad (8)$$

计算两种方法在选取不同波长条件下的闪光辐射温度的标准差,结果如表 2 所示。

均值,相反,波长间隔越小误差越大。

(2) 双色测温法与四色测温法误差比较

双色测温法采用维恩近似,温度限定在 3 000 K 以下。No. 1 和 No. 2 实验得到的闪光辐射温度分别为 4 200 K 和 3 300 K,均超出了维恩近似的温度适用范围,由于 No. 1 实验测量闪光辐射温度超出限定范围较多,因此相较于 No. 2 实验, No. 1 实验得到的结果误差值更大。

四色测温法综合了多个波长的闪光辐射强度值来计算闪光辐射温度,因此有利于削弱随机噪声对测量结果的影响。如表 2 所示,与双色测温法相比较,四色测温法计算所得闪光辐射温度值误差较小(No. 1 为 72.88 K, No. 2 为 63.66 K),尽管该结果要高于双色测温法中选取 1、4 通道计算所得误差值(No. 1 为 68.25 K, No. 2 为 30.67 K),然而,四色测温法没有采用维恩近似,对闪光辐射温度的测量范围没有约束,不需要考虑波长的选择,因此,在测量温度值超出了维恩近似的范围并且无先验信息的条件下,四色测温法为更优选择。

6 结 论

利用建立的瞬态高温计测量系统对闪光辐

射强度及温度进行了实验测量,与理论计算结果相比较,实验测量得到的闪光辐射强度值偏低。双色测温法计算闪光辐射温度时波长的选取对结果影响很大,同时,由于该方法采用了维恩近似,对测量温度范围有所约束,测量温度超过限定范围越多,波长选取对结果的影响越大;采用双色测温法计算闪光辐射温度时,发射率相同的近似条件对结果影响很小,而波长间隔对结果影响较大,波长间隔越大误差越小(误差最小值

No.1 为 68.25 K, No.2 为 30.67 K),相反,波长间隔越小误差越大(误差最大值 No.1 为 585.41 K, No.2 为 235.28 K)。四色测温法没有采用维恩近似,对测量温度范围无限制,并且计算闪光辐射温度综合了4个通道的闪光辐射强度值,其结果与平均值较接近(误差 No.1 为 72.88 K, No.2 为 63.66 K),因此采用比色法计算闪光辐射温度时,应选取大间隔波长或多波长参与计算以降低误差。

参 考 文 献:

- [1] BAIRD J K, HOUGH G R, KING T R. Velocity depend of impact fluorescence [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 1997, 19(3):273-276.
- [2] 唐恩凌,施晓涵,王猛,等. 强冲击 LY12 铝靶产生闪光的辐射强度演化特征 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(7):26074003-1-5.
TANG E L, SHI X H, WANG M, *et al.*. Evolution characteristic of radiation intensity for light flash created by strong shock LY12 aluminum target [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(7):26074003-1-5. (in Chinese)
- [3] TANG E L, ZHANG L J, ZHANG Q M, *et al.*. Experimental study on light flash intensity generated by strong shock 2A12 aluminum plate [J]. *Plasma Sci. Technol.*, 2015, 17(7):529-533.
- [4] 唐恩凌,徐名扬,张庆明,等. 超高速撞击 2A12 铝过程中铝原子的光谱辐射特征 [J]. *发光学报*, 2016, 37(8):940-947.
TANG E L, XU M Y, ZHANG Q M, *et al.*. Characteristics of spectral radiation for Al atom during hypervelocity impact on 2A12 aluminum target [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(8):940-947. (in Chinese)
- [5] 唐恩凌,李振波,韩雅菲,等. 超高速碰撞 2A12 铝板产生闪光辐射的空间演化规律 [J]. *发光学报*, 2017, 38(7):944-952.
TANG E L, LI Z B, HAN Y F, *et al.*. Spatial evolutionary rules of light flash radiation generated by hypervelocity impact on 2A12 aluminum plate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(7):944-952. (in Chinese)
- [6] ERNST C M, SCHULTZ P H. Early-time temperature evolution of the impact flash and beyond [J]. *Lunar Planet. Sci.*, 2004, 35:1721-1722.
- [7] BERGERON N P, HOLLERMA W A, GOEDEKE S M, *et al.*. Experimental evidence of triboluminescence induced by hypervelocity impact [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2006(33):91-99.
- [8] REINHART W D, THORNHILL T F, CHHABILDAS L C, *et al.*. Temperature measurement of expansion products from shock compressed materials using high-speed spectroscopy [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2008(35):1745-1755.
- [9] COLLIERE A, DRAKE K, MOCKER A, *et al.*. Time-resolved temperature measurements in hypervelocity dust impact [J]. *Planet. Space Sci.*, 2013(89):58-62.
- [10] THORNHILL T F, REINHART W D, CHHABILDAS L C, *et al.*. Characterization of promote flash signatures using high-speed broadband diode detectors [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2008(35):1827-1835.
- [11] GOEL A, LEE N, CLOSE S. Estimation of hypervelocity impact parameters from measurements of optical flash [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2015(84):54-63.
- [12] SCHULTZ P H, SUGITAB S, EBERHARDYA C A, *et al.*. The role of ricochet impacts on impact vaporization [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2006(33):771-780.
- [13] ERNST C M, SCHULTZ P H. Evolution of the deep impact flash: implications for the nucleus surface based on laboratory experiments [J]. *Icarus*, 2007(190):334-344.
- [14] SCHULTZ P H, EBERHARDY C A, ERNST C M, *et al.*. The deep impact oblique impact cratering experiment [J]. *Icarus*, 2007(190):295-333.

- [15] YANAGISAWA M, OHNISHI K, TAKAMURA Y, *et al.*. The first confirmed Perserd lunar impact flash [J]. *Icarus*, 2006(182):489-495.
- [16] 张薇, 唐恩凌, 相升海, 等. 超高速碰撞 2024-T4 铝靶产生的闪光强度测量 [J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12): 3412-3416.
ZHANG W, TANG E L, XIANG S H, *et al.*. Measurement of light flash intensity produced by hypervelocity impact of 2024-T4 aluminum target [J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 2011, 23(12):3412-3416. (in Chinese)
- [17] 相升海, 王迪, 唐恩凌, 等. 超高速碰撞天然白云石板产生闪光的辐射温度 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(1): 014003-1.
XIANG S H, WANG D, TANG E L, *et al.*. Radiated temperature of light flash intensity produced by hypervelocity impact on natural dolomite plate [J]. *High Power Laser and Particle Beams*. 2015, 27(1):014003-1. (in Chinese)
- [18] TSEMBEIS K, BURCHELL M J, COLE M J. Residual temperature measurements of light flash under hypervelocity impact [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2008(35):1368-1373.



韩雅菲(1979 -),女,吉林辽源人,博士,副教授,2011年于哈尔滨工程大学获得博士学位,主要从事高速撞击诱发的热辐射效应、碎片云及等离子参量测量等方面的研究。
E-mail: hanyafei0704@163.com



唐恩凌(1971 -),男,辽宁沈阳人,博士,教授,南京理工大学博士生导师,2007年于北京理工大学获得博士学位,主要从事爆炸与冲击动力学、凝聚态物理和原子分子物理等方面的研究。
E-mail: tangenling@126.com