

高速碰撞天然白云石板诱发的 光辐射特征实验研究

韩雅菲,唐恩凌,贺丽萍

(沈阳理工大学 装备工程学院, 沈阳 110159)

摘要:利用建立的二级轻气炮加载系统及光辐射特征采集系统开展了2A12铝弹丸以 30° 入射角度、2.5 km/s和3.1 km/s的碰撞速度撞击天然白云石诱发的光辐射特征实验研究。利用光谱仪得到了250~870 nm波长范围的光谱强度、弹靶材料的元素组成以及铝元素的电子激发温度,由光纤高温计测量500 nm、550 nm、650 nm、700 nm波长对应的闪光辐射电压值计算得到了闪光辐射强度及闪光辐射温度的演化曲线。研究表明,由光谱测量得到的元素与实际的弹靶材料元素组成具有较好的一致性;闪光辐射强度、闪光辐射温度及电子激发温度随碰撞速度的增加而增大,并且闪光辐射温度低于电子激发温度。

关键词:高速碰撞;光谱测量;闪光辐射温度;电子激发温度

本文引用格式:韩雅菲,唐恩凌,贺丽萍.高速碰撞天然白云石板诱发的光辐射特征实验研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(5):224-228.

Citation format:HAN Yafei, TANG Enling, HE Liping. Experimental Study on Characteristics of Spectral Radiation Induced by High-Velocity Impacting on Natural Dolomite Plate[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2019,40(5):224-228.

中图分类号:O383

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2019)05-0224-05

Experimental Study on Characteristics of Spectral Radiation Induced by High-Velocity Impacting on Natural Dolomite Plate

HAN Yafei, TANG Enling, HE Liping

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

Abstract: The two-stage light gas gun loading system and characteristics of spectral radiation acquisition system were adopted to study the light radiant characteristics of 2A12 aluminum projectile impacting on natural dolomite at the incident angle of 30 degrees and the impact velocity of 2.5 km/s and 3.1 km/s. The spectral intensities in the rang of 250 ~ 870 nm, elemental composition of the projectile and target material, electron excitation temperature of Al element and the evolutionary curves of flash radiant temperature were obtained by using spectrometer and pyrometer. The results show that the composition of the elements obtained by the spectral measurements have good consistency with that of the real projectile and target materials, the flash radiant temperature and electron excitation temperature increase with the increasing of impact velocity, and the flash radiant temperature is lower than the electron excitation temperature.

Key words: high-velocity impact; spectral measurement; flash radiant temperature; electron excitation temperature

收稿日期:2018-11-09;修回日期:2018-12-15

基金项目:国家自然科学基金项目(11472178,11272218,11802182);超高速碰撞研究中心2019年度开放基金项目(20190201)

作者简介:韩雅菲(1979—),女,副教授,主要从事超高速撞击诱发的热辐射效应、碎片云及等离子体参量测量研究,E-mail:hanyafei0704@163.com。

高速碰撞过程中的光辐射特征依赖于碰撞条件及弹靶材料的性质^[1-4]。目前国内外科研人员对高速碰撞产生的光辐射特征的研究主要采用光电二极管、光谱仪、高温计等测量仪器将光信号转换为电信号,通过理论计算获得光辐射特征各物理量。美国 NASA Ames Vertical Gun Range (AVGR) 实验室开展了铜弹丸以 2~5.5 km/s 的碰撞速度、45°碰撞角度下的超高速碰撞实验。实验中利用两套 ICCD 摄像机及光谱仪作为测试设备,发现光谱的持续时间在弹丸接触靶板后的 0.5~2.5 μs,这基本与碰撞过程出现喷溅物的持续时间一致^[5-6]。Baird^[7]从理论上推导了闪光辐射强度与碰撞速度的关系;进一步地,Goel^[8]采用球状铁弹丸撞击钨、铜、太阳能电池等 7 种不同靶材模拟微流星体对航天器的撞击,得到了闪光辐射强度与质量和速度的关系式;Reinhart^[9]测量了不同冲击压力下的闪光辐射温度;Thomas^[10]和 Jaime^[11]则对高速撞击产生的闪光轮廓演化特征进行了研究。研究高速撞击产生的光辐射特征对于反演碰撞条件、推断弹靶材料组分及评估碰撞造成的毁伤具有重要的应用价值。

目前对高速碰撞诱发的光辐射特征研究多侧重于不同碰撞条件下碰撞产生闪光强度或等离子体电子温度等单一物理量的演化特征。为进一步明确高速碰撞诱发光辐射的物理过程,本研究建立了二级轻气炮加载及光辐射特征采集系统,实现了相同入射角度、不同碰撞速度条件下光辐射特征物理量的采集,得到了光谱强度、闪光辐射强度、闪光辐射温度、电子激发温度等多个相关物理量,通过光谱分析验证利用光谱信息推断弹靶材料元素组成的可行性;总结了闪光的辐射强度及温度的演化特征,同时对比了电子激发温度与闪光辐射温度的区别,为深刻理解高速碰撞诱发光辐射的物理机制提供参考。

1 理论模型

1.1 电子激发温度

来自中性原子发射线的光谱辐射强度为

$$I_{nm} = h\nu_{nm} A_{nm} \frac{g_n}{g_0} \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right) N_0^{(0)} \quad (1)$$

式中: h 为 Planck 常数; ν_{nm} 为辐射频率; A_{nm} 为辐射源的发光面积; g_n 为激发态的统计权重; g_0 为基态的统计权重; E_n 为激发态的激发能; k 为玻尔兹曼常数; T 为激发温度; $N_0^{(0)}$ 为基态的原子数。利用 Taylor 膨胀理论,取辐射强度的对数导数(局部幂指数)^[5],得到

$$\frac{d \ln I_{nm}}{d \ln V} = \frac{E_n}{kT} \frac{d \ln T}{d \ln V} \quad (2)$$

为了清晰地描述高速碰撞诱发光辐射的激发温度,作如下基本假设:碰撞产生闪光的辐射为光学薄的球状等离子体云,且处于局域平衡态,根据原子和分子辐射原理。粒子自发跃迁的辐射强度为

$$I = \frac{h\nu}{4\pi} \cdot \frac{gA}{Z} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \cdot N_0 \quad (3)$$

式中: I 为辐射强度; h 为普朗克常数; ν 为光子频率; A 为自发跃迁系数; g 为粒子权重; Z 为配分函数; E 为能级; k 为波尔兹曼常数; T 为激发温度; N_0 为基态粒子数。将式(3)进行变换可得

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{1}{kT} \cdot E + \ln\left(\frac{hN_0}{4\pi Z}\right) \quad (4)$$

通过实验测得不同波长下的特征谱线的强度,以 E 和 $\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$ 为变量进行线性拟合,利用拟合得到的斜率即可得到超高速碰撞光辐射的电子激发温度,电子激发温度表征电子能量的高低。

1.2 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

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

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 0.3~1 μm,温度小于 3 000 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

$$I(\lambda, T) = \varepsilon \frac{C_1}{\lambda^5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (6)$$

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 ,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:

$$\frac{I_1 I_3}{I_2 I_4} = (\lambda_1 \lambda_3 / \lambda_2 \lambda_4)^5 \times \frac{[\exp(c_2/\lambda_2 T) - 1][\exp(c_2/\lambda_4 T) - 1]}{[\exp(c_2/\lambda_1 T) - 1][\exp(c_2/\lambda_3 T) - 1]} \quad (7)$$

2 实验加载及测试系统

高速碰撞实验在沈阳理工大学强动载中心的二级轻气炮上完成。该二级轻气炮能将弹丸加速到 2~7 km/s,为消除气体对实验结果的影响,实验时将发射管和靶室抽成真空,抽真空后靶室内压力小于 100 Pa。光辐射特征系统主要包括光谱仪及光纤高温计,为避免高速撞击产生碎片的影响,光纤探头的布置避开上下弹道所在平面,与靶板夹角为 45°,并且前端指向着靶点,其工作原理如图 1 所示。

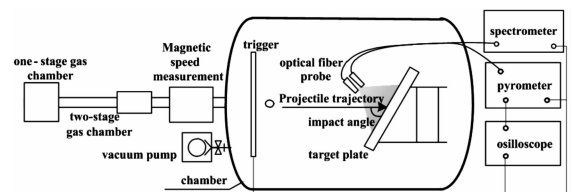


图 1 高速碰撞加载系统及光辐射特征测量系统工作原理

光谱仪用于采集 250 ~ 870 nm 波长范围的光谱强度; 光纤高温计(型号 FOP-8)的测温范围为 20 ~ 10 000 K, 共 7 个通道, 实验选用 500 nm、550 nm、650 nm 和 700 nm 4 个通道进行同步测量。

弹丸选用直径为 4.6 mm 的实心铝球, 靶板材料选用辽宁省岫岩县的天然白云石, 尺寸为 120 mm × 120 mm × 20 mm。白云石的化学成分为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, 具体组成为 MgO 的质量百分比为 21%, CaO 的质量百分比为 31%, CO_2 的质量百分比为 48% (或 CaCO_3 的质量百分比为 54.2%, MgCO_3 的质量百分比为 45.8%)。表 1 为碰撞基本参数值。

表 1 碰撞基本参数值

实验编号	碰撞速度/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	碰撞角/ ($^\circ$)	着靶点与光纤 探头距离/cm	靶舱压 力/Pa
1	2.5	30	5	100
2	3.1	30	5	100

在碰撞闪光信号采集前光纤高温计需要利用太阳光模拟器作为标准光源进行标定^[12]。首先将光纤探头置于太阳光模拟器距离 l_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, 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 500 nm、550 nm、650 nm、700 nm 对应的光谱辐射照度 $N_r(\lambda)$ 为 235.5、340.8、180.8、280.7 $\text{mW}/(\text{nm} \cdot \text{cm}^2)$ 。

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 l_{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 $\theta = 37^\circ$, 则闪光辐射强度测量值 I_{exp}

$$I_{\text{exp}} = \frac{h_{\text{exp}}}{h_c} \cdot \frac{R_c}{R_{\text{exp}}} \cdot \frac{l_c^2}{l_{\text{exp}}^2} \cdot \frac{N_r(\lambda)}{2\pi(1 - \cos\theta)} \quad (8)$$

3 实验结果与分析

3.1 光谱强度

图 2 为实验 1 光谱仪采集的弹丸入射速度为 2.5 km/s 的条件下高速撞击白云石板诱发的光谱辐射强度随波长的变化关系, 图 3 为实验 2 弹丸入射速度为 3.1 km/s 条件下采

集的光谱辐射强度。图 4、图 5 分别为依据实验 1、实验 2 测量的光谱辐射强度, 对元素的特征谱线进行分析得到的靶板材料元素组成。

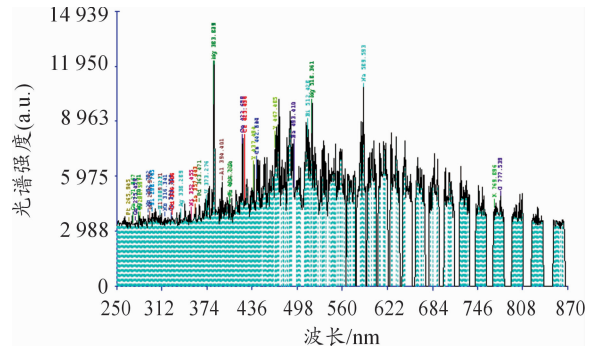


图 2 实验 1 光谱强度

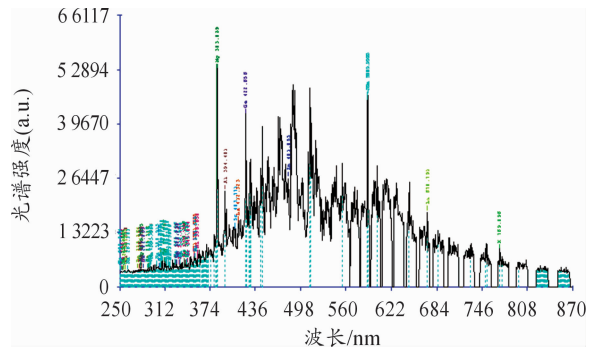


图 3 实验 2 光谱强度

由图 4、图 5 对元素特征谱线的分析可以得到: 弹丸及靶板材料的元素组成包括铝、硅、铁、铜、镁、锰、锌、钛、镍, 其中铝元素为主要成分。实验采用天然白云石及铝弹丸的元素组成主要包括铝、硅、铜、镁、锌、锰、钛、镍及铁元素, 由此说明实验测量结果与实际弹丸和靶板材料的元素组成具有较好的一致性, 因此靶板材料的组分可通过高速碰撞诱发的光辐射特征信息获得。

实验采用天然白云石板材料中包含镁元素、钙元素及碳酸根, 而实际测量结果中无钙、碳、硫及氧元素的特征谱线, 说明在本次实验的碰撞条件下碰撞产生的能量不足以破坏钙元素与碳酸根间的化学键。

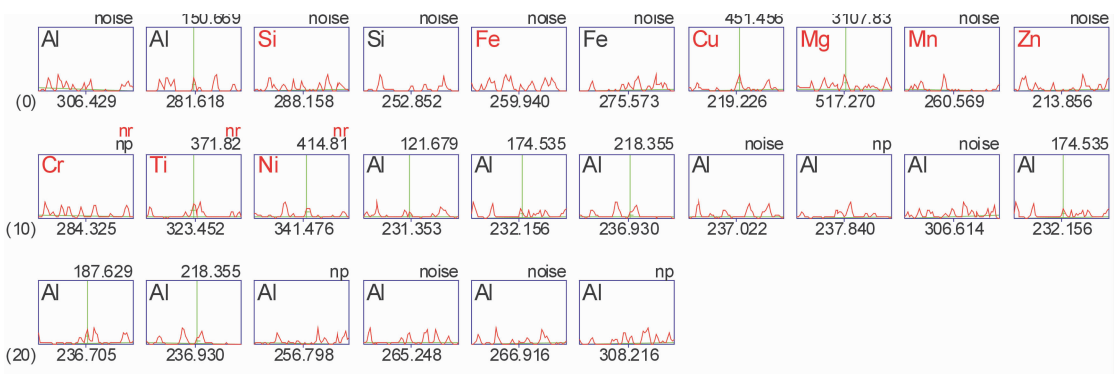


图 4 实验 1 光谱测量靶板材料的元素组成

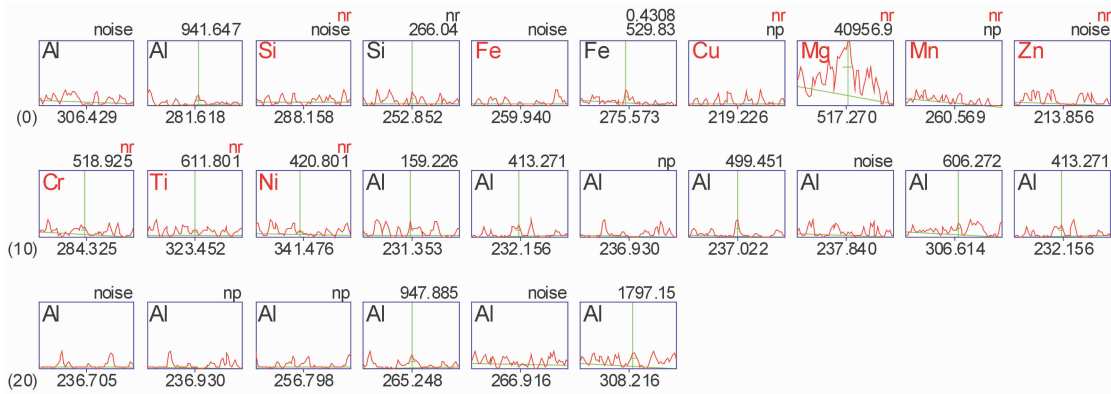


图5 实验2 光谱测量弹靶材料的元素组成

3.2 电子激发温度

由于实验碰撞速度为 2 ~ 7 km/s 范围内,闪光辐射的温度约为几千 K^[12-15],该实验条件下仅考虑一次电离,即闪光辐射球内仅存在两种粒子:处于不同激发态的 Al 原子和处于不同激发态的 Al⁺。实验 1 条件下 $\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right)$ 与 E 的拟合直线如图 6 所示。

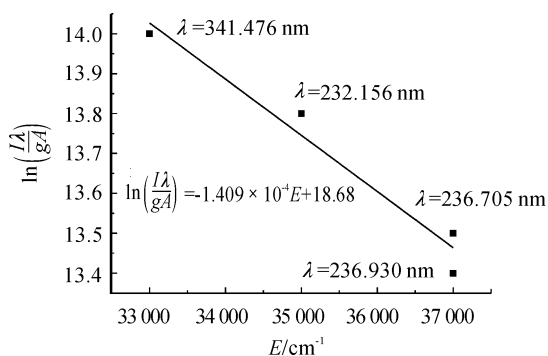


图6 实验1 电子激发温度拟合直线

由图 6 可知,实验 1 条件下的电子激发温度为 24 203 K,同样方法得到实验 2 条件下的电子激发温度为 26 312 K。由于实验 2 的碰撞速度高于实验 1,碰撞产生等离子体的电子能量较大,因此电子激发温度较高。

3.3 闪光辐射温度

利用光纤高温计测量不同碰撞条件下的闪光电压时程曲线如图 7 所示。

由闪光电压值计算得到闪光辐射强度及闪光辐射温度时程曲线如图 8、图 9 所示。

由实验结果可知:相同碰撞角度、不同碰撞速度条件下的闪光辐射强度及闪光辐射温度演化过程相近,均呈现快速升高至峰值后缓慢下降的趋势,并且闪光辐射强度随碰撞速度的增加而增大。

由实验 1、实验 2 得到闪光辐射温度峰值分别为 2 886 K, 3 182 K,可以得出碰撞速度越高,弹靶材料获得的热能越大,因此闪光辐射温度越高;由于闪光辐射温度表征可见光范围内弹靶材料的光辐射能,而电子激发温度表征高速碰撞

诱发电离的电子整体能量,因此闪光辐射温度低于电子激发温度。

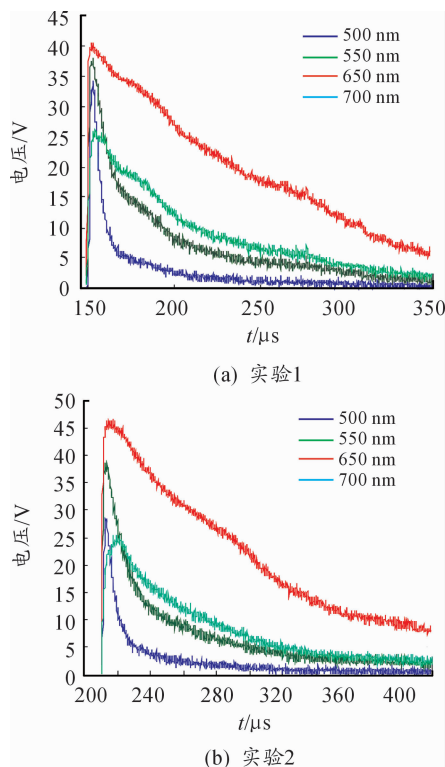


图7 不同碰撞速度条件下的闪光电压时程曲线

4 结论

通过开展相同碰撞角度、不同碰撞速度条件下高速碰撞诱发的光辐射特征实验研究证实了采用光谱分析判定弹靶材料组分的可行性;不同碰撞速度条件下的闪光辐射强度及闪光辐射温度演化过程相近,均呈现快速上升至峰值后缓慢衰落的趋势,并且随着碰撞速度的增加而增加;借助碰撞闪光光谱中元素的特征谱线能量函数的线性拟合可以得到电子激发温度,其值高于碰撞产生的闪光辐射温度。

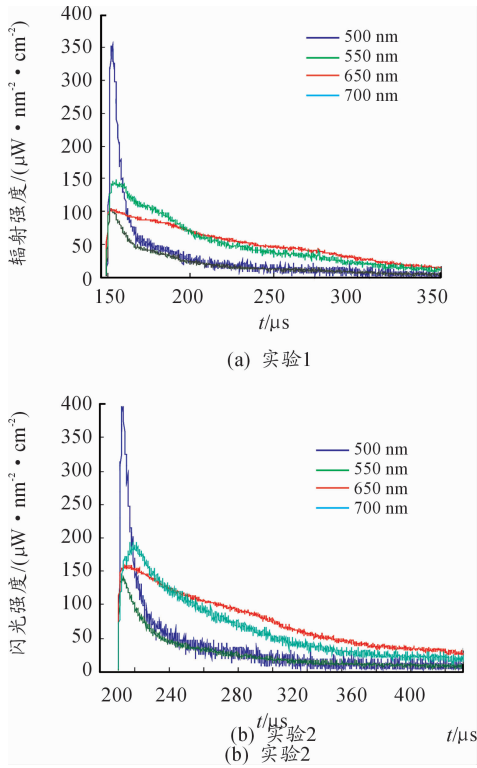


图8 不同碰撞速度条件下闪光辐射强度时程曲线

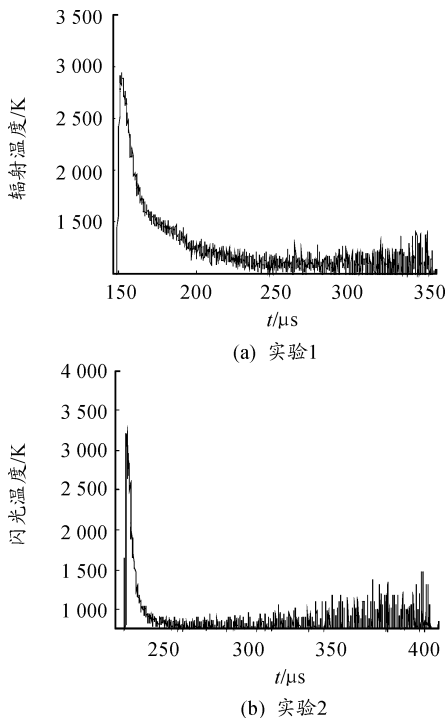


图9 不同碰撞速度条件下闪光辐射温度时程曲线

参考文献:

- [1] BELLOT RUBIO L R, ORTIZ J L, SADA P V. Luminous efficiency in hypervelocity impacts from the 1999 lunar Leonids[J]. *Astrophys*, 2000, 542: 65 – 68.
- [2] ORTIZ J L, ACEITUNO J, QUESADA J A, et al. Detection of sporadic impact flashes on the Moon: implications for the luminous efficiency of hypervelocity impacts and derived terrestrial impact rates[J]. *Icarus*, 2006, 184: 319 – 326.
- [3] SUGITA S, SCHULTZ P H, ADAMS M A. Spectroscopic measurements of vapor clouds due to oblique impacts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (E8): 19427 – 19441.
- [4] SCHULTZ P H, SUGITA S, EBERHARDY C A, et al. The role of ricochet in impact vaporization [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33: 771 – 780.
- [5] SCHULTZ P H, ERNST C M, ANDERSON J L B. Expectations for crater size and photometric evolution from the Deep Impact collision[J]. *Space Science Reviews*, 2005, 117: 207 – 239.
- [6] 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.
- [7] BAIRD J K, HOUGH G R, KING T R. Velocity depend of impact fluorescence[J]. *International Journal of Impact Engineering*. 1997, 19(3): 273 – 276.
- [8] GOEL A, LEE N, CLOSE S. Estimation of hypervelocity impact parameters from measurements of optical flash[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015 (84): 54 – 63.
- [9] 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]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008 (35): 1745 – 1755.
- [10] THOMAS T, RAYMOND R H. Characteristic of ballistic impact flash empirical model development [C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. [S. l.]: [s. n.], 2011.
- [11] JAIME J B, BRIAN K. Ballistic impact flash characterization [C]//AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. [S. l.]: [s. n.], 2010.
- [12] 韩雅菲, 唐恩凌, 贺丽萍, 等. 高速碰撞诱发闪光辐射温度的测量及误差分析[J]. *发光学报*, 2018, 39(5): 653 – 660.
- [13] TANG Enling, ZHANG Lijiao, ZHANG Qingming, et al. Experimental Study on light flash intensity generated by strong shock 2A12 aluminum plate[J]. *Plasma Science and Technology*, 2015, 17(7): 529 – 533.
- [14] 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.
- [15] 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.

(责任编辑 杨继森)