

文章编号:1000-6893(2009)10-1895-06

铝-铝超高速碰撞闪光现象的初步实验测量

唐恩凌^{1,2}, 张庆明², 张健¹

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

(2. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

Preliminary Experimental Measurement of Light Flash Phenomena Produced in Al-Al Hypervelocity Impacts

Tang Enling^{1,2}, Zhang Qingming², Zhang Jian¹

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

(2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

摘要: 为了研究不同碰撞参数条件下超高速碰撞闪光的特点及闪光温度的变化规律,构建了高温计及附属实验测量系统平台,利用该平台进行了超高速碰撞闪光的初步测量。根据 Planck 辐射的基本理论,对每次实验的碰撞闪光强度进行了4种波长的采集并对温度进行了拟合计算,得到了碰撞闪光温度历史。实验结果表明:对于弹丸、靶板材料均为 LY12 铝而言,碰撞角度(与靶板平面夹角)相同、碰撞速度在 5.35~5.97 km/s 范围内时,碰撞速度对碰撞闪光温度影响不明显;然而,碰撞速度相近,碰撞角度越大,碰撞闪光温度越高。

关键词: 超高速碰撞; 碰撞闪光; 高温计; Planck 辐射; 闪光强度; 闪光温度

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A

Abstract: To investigate the hypervelocity impact-flash characteristics and rules of light flash temperature variation in different impact parameter conditions, an experimental measurement system platform composed of a pyrometer and subsidiary experimental measurement system is established, and preliminary experimental measurements of hypervelocity impact flash are carried out using the platform. According to the basic theory of Planck distribution, flash intensity data of four wavelengths are collected and their fitting temperatures from every experiment are calculated. Thus the history of flash temperatures is obtained. Experimental results show that for aluminum projectile LY12 impacting aluminum target LY12, when the impact angle (the angle between the projectile and the target plane) remains the same and the impact velocity is between 5.35 km/s and 5.97 km/s, impact velocity has no obvious influence on light flash temperature, while with similar impact velocities, the larger the impact angle is, the higher the impact light flash temperature will be.

Key words: hypervelocity impact; impact flash; pyrometers; Planck radiation; flash intensity; flash temperature

超高速碰撞会产生机械(应力)、声、光、热、电磁辐射、等离子体以及表面形变等物理效应^[1-7]。详细的闪光测量和分析可以作为诊断技术,用以提供碰撞速度^[8]、弹丸的尺寸和弹丸组成^[9]的信息。R. W. MacCormack^[10]通过发射铝弹丸碰撞铝靶板观察到了辐射谱线的存在。R. A. Koehler^[11]用多种弹丸材料碰撞铅靶,结果发现测到的辐射具有弹丸材料原子激发的特征。同时也观察到了来自碰撞接触面发射的连续辐射。B. Jean 等^[12]观察到了具有弹丸和靶板材料

特征的线发射和连续辐射,得到的谱线除了具有激发的中性原子外,还有电离的铝、镉和镁特征。B. Jeans^[13]拍摄了铝-铝碰撞产生的闪光,结果表明出现的辐射来自弹丸和靶板界面产生的金属蒸气云。

超高速碰撞过程中的碰撞闪光现象是超高速碰撞过程中的重要效应之一,闪光强度的峰值及其衰减趋势可以在细观和微观的层次上揭示超高速碰撞过程的规律^[2-3]。国外对超高速碰撞过程的闪光效应研究已开展了几十年,证实了超高速碰撞产生闪光的可探测性,研究取得了一定成果并得到成功应用。而中国在此领域的研究还处于起步阶段,与国际水平相差甚远。开展

超高速碰撞过程的闪光效应研究对提高中国空间飞行器飞行安全监测能力、加强中国在超高速撞击领域研究水平以及促进冲击动力学学科建设意义重大。

本文建立了测量超高速碰撞闪光的实验系统和碰撞闪光测量系统。通过实验得到了不同碰撞条件下碰撞闪光的特点与闪光温度的变化规律。

1 实验设计

实验在西南交通大学高压物理实验室的二级轻气炮上完成。该二级轻气炮能将宏观弹丸加速到 7 km/s, 发射管和靶室抽成真空, 可以消除气体的影响, 抽真空能力小于 106.67 Pa。

1.1 碰撞基本参数

碰撞角度指弹丸与靶板平面的夹角。弹丸、靶板材料均为 LY12 铝; 弹丸形状为实心球状且其直径为 6.4 mm。表 1 列出了碰撞基本参数, 其中, Torr 为真空度单位, 1 Torr = 133.3 Pa。

表 1 碰撞基本参数

Table 1 Basic impact parameters

实验编号	靶板厚度 /mm	碰撞速度 / $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	碰撞角度 / $(^\circ)$	靶室压力 /Torr
1	10	5.35	30	0.5
2	10	5.97	30	0.5
3	23	5.95	60	0.5
4	23	5.95	90	0.6

1.2 系统配置

二级轻气炮发射超高速弹丸碰撞靶板产生闪光; 光纤探头对准碰撞点并对闪光信号进行采集, 信号输入高温计, 对采集信号实施光电转换和放大; 放大的信号输入示波器进行实时数据采集。系统配置框图如图 1 所示。

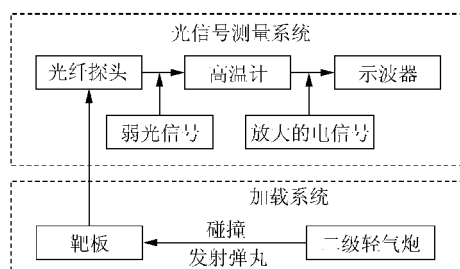


图 1 系统配置框图

Fig. 1 Block diagram of system layout

1.3 实验及测量系统布局

光纤探头在靶室内的布局见表 2。实验及测量系统示意图如图 2 所示。

表 2 光纤探头在靶室内的布局

Table 2 Layout of fibre-optic probe in impact chamber

实验编号	光纤探头端面到碰撞点的距离/cm	光纤探头安装角度
1	7.5	垂直靶板平面, 指向碰撞点
2	17.0	与靶板平面成 45° , 指向碰撞点
3	11.5	与靶板平面成 45° , 指向碰撞点
4	7.5	与靶板平面成 45° , 指向碰撞点

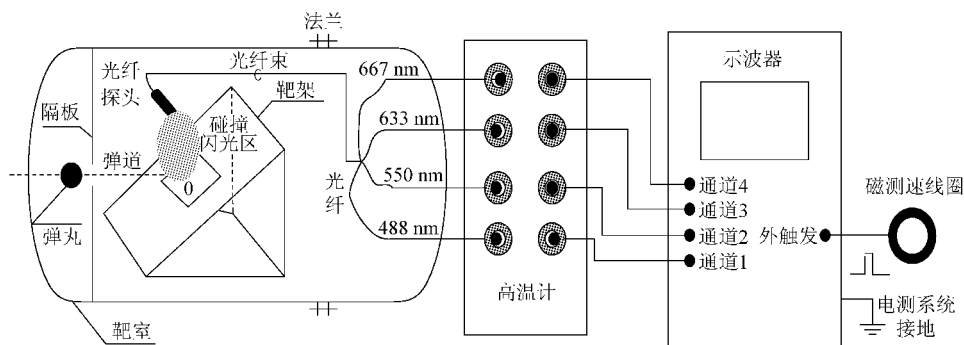


图 2 实验及测量系统示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of experimental and measurement system

1.4 高温计测量原理

瞬态辐射高温测量的基本假定是物质在冲击波后的很短时间内晶格与电子的相互作用达到热

平衡, 而且热辐射主要来自电子的热激发, 即认为处于高温高压状态下的物体是灰体。

本实验中使用光纤高温计, 以光电倍增管 (PMT) 为辐射能量转换放大器件, 共设置 4 个测试

通道, 对应波长分别为 667 nm, 633 nm, 550 nm, 488 nm。在平衡热辐射条件下, 其辐射满足经典辐射定律, 用灰体模型描述高温物体。

根据 Planck 平衡辐射理论

$$I_{PI}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

$$I_{gra}(\epsilon, \lambda, T) = \epsilon I_{PI}(\lambda, T) \quad (2)$$

式中: $c_1 = 1.191 0 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Sr}^{-1}$, $c_2 = 1.438 8 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 分别为 Planck 第 1 和第 2 辐射系数; λ 为波长; T 为温度; ϵ 为发射率。 $I_{PI}(\lambda, T)$ 表示温度为 T 的黑体辐射强度, 在单位时间、单位面积内, 向单位立体角内辐射的单位波长间隔内的能量, 称为光谱辐射强度。实验中测定的是 $I_{PI}(\lambda, T)$, 在拟合温度的编程计算过程中考虑到发射率 ϵ 的影响, 用灰体辐射强度 $I_{gra}(\epsilon, \lambda, T)$ 进行计算。

如果在若干不同波长上同时测出了待测温度的光谱辐射强度, 就可以用最小二乘法通过式(2)拟合出待测温度 T 和平均发射率 ϵ 。原则上只需 2 个通道进行测量就可由式(2)计算出 T 和 ϵ , 但这样得到的值误差过大。通道数越多得到的结果精度越高, 本文采用 4 通道。用最小二乘法计算 T 和 ϵ 时, 拟合目标函数为

$$S = \sum_{i=1}^4 [\epsilon f(\lambda_i, T) - I_i]^2 \quad (3)$$

式中: I_i 为第 i 种波长的光谱辐射强度。

令 $\partial S/\partial \epsilon = 0, \partial S/\partial T = 0$, 可推得

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^4 (I_i f(\lambda_i, T))}{\sum_{i=1}^4 f^2(\lambda_i, T)} \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^4 (\epsilon^2 f^2(\lambda_i, T) \frac{c_2}{\lambda_i T^2} \exp(c_2/\lambda_i T))}{(\exp(c_2/\lambda_i T) - 1) - \sum_{i=1}^4 (\epsilon I_i f(\lambda_i, T) \frac{c_2}{\lambda_i T^2} \cdot \exp(c_2/\lambda_i T))} / (\exp(c_2/\lambda_i T) - 1) = 0 \quad (5)$$

根据误差理论, 得到光辐射强度的方差为

$$\sigma_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^4 [\epsilon f(\lambda_i, T) - I_i]^2}}{4 - 1} \quad (6)$$

对式(2)全微分有

$$\partial I = \left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_\epsilon \partial T + \left(\frac{\partial I}{\partial \epsilon}\right)_T \partial \epsilon \quad (7)$$

所以 T 和 ϵ 的不确定性可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_I / \sqrt{(\partial I / \partial T)_{\epsilon, \lambda}} \\ \sigma_\epsilon &= \sigma_I / \sqrt{(\partial I / \partial T)_{T, \lambda}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

1.5 高温计标定方法

在实验前, 必须对高温计进行标定, 高温计标定就是确定辐射能量响应, 然后根据实验获得信号幅度推知实验中辐射能量, 最终转换成对应光强。实验前, 用 WBr 灯作为标准光源进行现场标定。标准光源给出了光谱辐射度 $N_r(\lambda)$ 值, 它定义为单位时间内辐射到距离 l_0 处单位面积(1 cm^2)、单位波长内的辐射能量, 单位为 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。标定时, 将光纤探头置于距标准灯 l_0 处, 则探头单位面积上入射的能量为

$$E_0(\lambda) = N_r(\lambda) \eta(\lambda) \quad (9)$$

式中: $\eta(\lambda)$ 为光学传输系统的几何因子。表 3 列出了本实验中使用的标准灯与高温计相对应波长的 $N_r(\lambda)$ 值, 此值由四川省计量研究院标定给出, 标定距离为 1 m。入射辐射能量经过高温计的光电转换后变成电信号并用示波器记录, 信号幅度 h 。正比于入射能量 E_0 。

表 3 标准 WBr 灯的 $N_r(\lambda)$ 值

Table 3 $N_r(\lambda)$ values of standard by WBr lamp

λ/nm	$N_r(\lambda)$	λ/nm	$N_r(\lambda)$
660	1.271	640	1.197
670	1.308	480	0.465
630	1.157	490	0.509

本文使用的是光纤传输高温计, 所用光纤直径为 200 μm , 孔径角为 $\theta = 12^\circ$ 。

1.6 高温计的实验标定

在实验前必须对高温计进行标定, 标定后应马上着手实验, 时间间隔过长可能导致标定结果失真, 标定结果受周围环境的影响较大。表 4 为高温计的实验标定值。

表 4 高温计的实验标定值

Table 4 Experimentally labeled value of pyrometer

实验编号	标定电阻 /k Ω	标定温度 /K	波长/nm	标定值 /mV
1	100	5 000	667	270
			633	242
			550	166
			488	109
2	10	4 500	667	43
			633	39
			550	30
			488	23

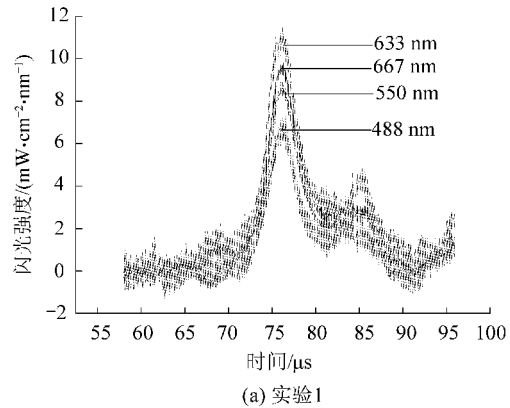
续表				
实验编号	标定电阻/k Ω	标定温度/K	波长/nm	标定值/mV
3	10	4 500	667	256
			633	342
			550	246
			488	206
4	10	4 500	667	246
			633	358
			550	246
			488	210

2 实验结果与分析

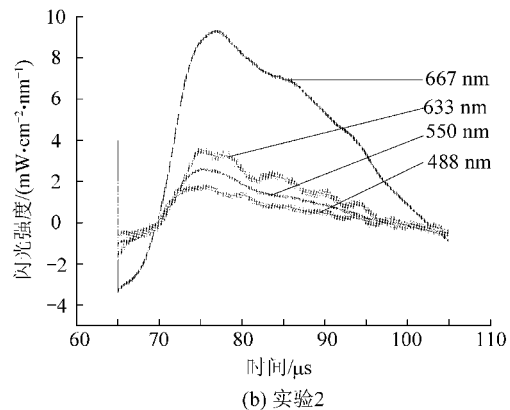
碰撞闪光强度随时间的变化,如图3所示。光测系统由测量弹丸速度的磁测速系统触发(图2),实验1~实验4的触发点到着靶点的距离分别为:388 cm,372 cm,642 cm和622 cm。由实验1可以看出,系统触发后(73 \pm 10) μ s开始有闪光信号,持续到(105 \pm 10) μ s,历时约32 μ s;实验2,系统触发后(65 \pm 10) μ s开始有闪光信号,持续到(105 \pm 10) μ s,历时约40 μ s;实验3,系统触发后(110 \pm 10) μ s开始有闪光信号,持续到(142 \pm 10) μ s,历时约32 μ s;实验4,系统触发后(100 \pm 10) μ s开始有闪光信号,持续到(130 \pm 10) μ s,历时约30 μ s,结合各自弹丸的碰撞速度可以看出信号出现时刻与弹丸着靶时间是完全一致的,说明测到的信号是由弹丸与靶板碰撞产生的。

由图3可以看出曲线由两部分组成:其一,首先出现陡升强度峰值;其二,长时间的黑体衰减信号。曲线由两部分表示:峰值前表示第1部分,代表弹丸的发光曲线信号;峰值后表示第2部分,代表碰撞产生的热羽黑体辐射衰减信号,其持续时间较长,依赖于靶板的组成。实验3闪光强度出现2个峰值,后一个强度峰值可能是由于光纤被碰撞产生的飞片撞击漏光所致,检测回收光纤验证了上述原因。由于LY12铝靶板是强度较高的固体材料,因此,与其他软质材料或粉末状材料相比,黑体辐射衰减时间相对要短,这与理论相符^[14]。图4所示为实验1~实验4闪光温度随时间的变化关系。

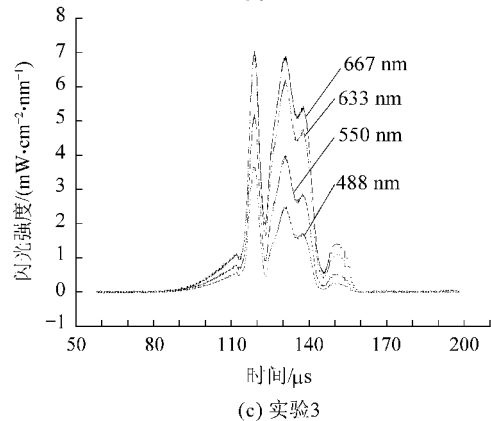
由图4(a)可以看出,超高速碰撞闪光温度在72~85 μ s这段时间间隔里闪光温度最高,此时间起点和间隔恰是弹丸与靶板的作用时间。此后,温度逐渐降低。由图4(a)和图4(b)可知,在



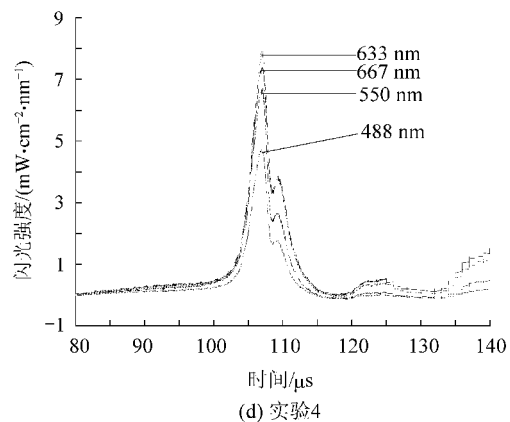
(a) 实验1



(b) 实验2



(c) 实验3



(d) 实验4

图3 碰撞闪光强度随时间的变化

Fig. 3 Variation of impact light flash intensity with time

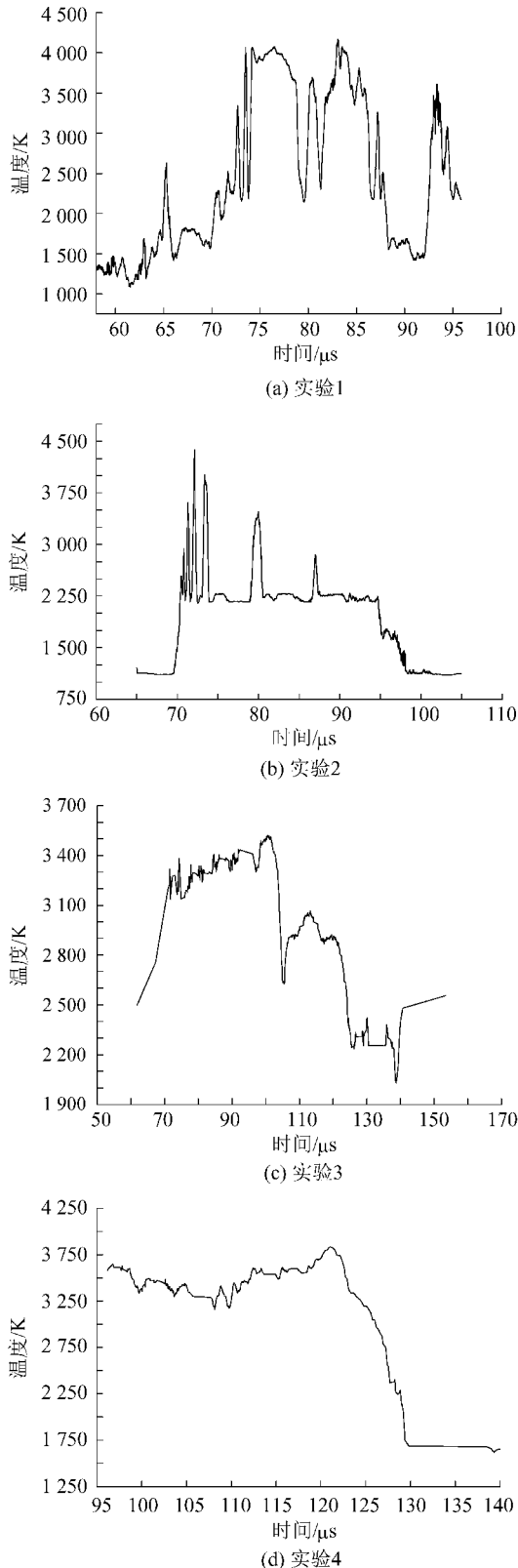


图 4 碰撞闪光温度随时间的变化

Fig. 4 Variation of impact light flash temperature with time

碰撞速度不同, 弹丸入射角度(与靶板平面的夹角)相同的情况下, 碰撞闪光温度差异并不明显, 最高闪光温度均在 4 500 K 左右。由图 4(c)和图

4(d)可知, 在弹丸入射速度相近, 弹丸入射角度不同的情况下, 弹丸的入射角度对碰撞闪光温度影响明显; 弹丸入射角度越大, 最大碰撞闪光温度越高。由此看出, 弹丸的入射角度对碰撞闪光温度有影响, 究其原因可解释为: 随着碰撞角度的减小, 弹丸碰撞靶板使弹丸大部分的动能更大比例地用于碰撞产生熔池的扩大; 因此, 用于相变和闪光效应的能量相应减少。

由图 4 还可以判断出, 超高速碰撞产生的闪光现象是溅射闪光, 本实验条件下温度峰值在 3 400~4 400 K 间; 比国外测出的实际值偏低^[15]。可能原因是: 一方面, 设备分辨率有限; 另一方面, 由于光纤的布局不够合理或溅射发光没有充满光纤的孔径角, 数据处理时是按充满光纤孔径角考虑的。

3 结 论

瞬态光学高温计测量系统与超高速碰撞靶结合可作为研究超高速碰撞光辐射现象的有效手段。通过实验与测量系统的配置两方面构建了实验系统平台。利用搭建的平台进行了超高速碰撞闪光实验, 从实时实验结果看, 基本能反应超高速碰撞闪光的特点: 强度峰值信号首先出现; 其后伴随相对较长时间的持续黑体辐射衰减。对每次实验的碰撞闪光强度进行了 4 种波长的采集并对温度进行了拟合, 得到了碰撞闪光历史。

对于弹丸和靶板材料均为 LY12 铝而言, 碰撞角度相同、碰撞速度在 5.35~5.97 km/s 范围内时, 碰撞速度对碰撞闪光温度影响不明显; 然而, 碰撞速度相近, 碰撞角度越大, 碰撞闪光温度越高。由于实验处于起步阶段, 没有得到更多有规律的信息, 有待于今后的继续努力。

参 考 文 献

- [1] Schafer F. The threat of space debris and micrometeoroids to spacecraft operations[R]. ERCIM News No. 65, 2006: 27-29.
- [2] Ramjaun D, Shinohara M, Kato I, et al. Spectroscopic study of radiation associated with hypervelocity impacts [C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Shock Waves. 2001.
- [3] Dugger P, Hendrix R. Measurement of transient hypervelocity impact phenomena at AEDC[R]. AIAA-1994-0087, 1994.
- [4] Cundiff C R, Bean B L. Electro-optical measurements in support of PAC-3 sled test[R]. SPE-A748283, 2000.
- [5] Sugita S, Schultz P H, Hasegawa S. Intensities of atomic

- lines and molecular bands observed in impact induced luminescence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (E12): 14.1-14.17.
- [6] Tang E L, Zhang Q M, Ouyuang J T. Fast diagnosis of transient plasma by langmuir probe[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology: English Edition*, 2007, 16(3): 375-378.
- [7] Drolshagen G, Svedhem H, Grun E, et al. Measurement of cosmic dust and micro-debris with the GORID impact detector in GEO[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(9): 1325-1333.
- [8] Jean B, Rollins T L. Radiation from hypervelocity impact generated plasma[J]. *AIAA-1969-364*, 1969.
- [9] Reid J L, Harwell K E, Hughes A R. Theoretical and experimental investigation of the relationship of impact flash to physical damage[R]. *TR AFATL-TR-67-138*, 1967.
- [10] MacCormack R W. Investigation of impact flash at low ambient pressures[C]//*Proceedings of the Sixth Hypervelocity Impact Symposium*. 1963, II, 613-625.
- [11] Koehler R A. Spectroscopic study of the impact flash[D]. Ohio: University of Western Ontario, 1965.
- [12] Jean B, Rollins T. Hypervelocity impact flash for hit detection and damage assessment[R]. *TR AFATL-TR-68-46*, 1968.
- [13] Jean B. Experimental observations of optical radiation associated with hypervelocity impact [J]. *AIAA Journal*, 1966, 4(10): 1854-1856.
- [14] Ang J A. Impact flash jet initiation phenomenology[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1990, 10: 23-33.
- [15] Nebolsine P E, Gelb A H, Krech R H. Impact flash measurements and color temperature determination versus impact velocity[C]//*AIAA Space Programs and Technologies Conference*. 1996: 24-26.

作者简介:

唐恩凌(1971—) 男,博士,副教授。主要研究方向:超高速碰撞产生等离子体、凝聚态物理、航天器空间环境及超高速碰撞闪光等深空探测相关领域。

Tel: 024-82932565

E-mail: tangenling@126.com

张庆明(1963—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:超高速碰撞力学效应、电磁效应、超高速碰撞闪光、爆炸技术、材料及结构动态力学。

Tel: 010-68914284

E-mail: qmzhang@bit.edu.cn

张健(1961—) 男,博士研究生,教授。主要研究方向:武器系统引信及电火花材料改性。

Tel: 024-24681243

E-mail: zbgc2003@yahoo.com.cn

(编辑:徐晓,杨冬)