

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0396

## 超高速碰撞产生的电磁辐射\*

龚良飞<sup>1,2</sup>, 张庆明<sup>2</sup>, 龙仁荣<sup>2</sup>, 张 凯<sup>3</sup>, 巨圆<sup>4</sup>

- (1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074;  
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;  
3. 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205;  
4. 海军研究院, 北京 100161)

**摘要:** 超高速碰撞产生的电磁辐射是固体物质在强冲击作用下的重要物理响应, 在深空探测、航天器对空间碎片的防护设计、武器毁伤评估应用广泛。本文中概述了超高速碰撞产生的电磁辐射现象, 总结了不同碰撞条件下, 超高速碰撞产生微波和闪光的时频特性; 从超高速碰撞产生材料破碎和产生等离子体两个方面, 分析了超高速碰撞产生微波的辐射模型; 归纳了超高速碰撞下的发光机理, 并阐述了超高速碰撞产生连续光谱和线谱的辐射模型, 指出了超高速碰撞产生电磁辐射研究存在的不足与发展趋势。

**关键词:** 超高速碰撞; 电磁辐射; 等离子体; 闪光; 微波

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## The electromagnetic radiation produced by hypervelocity impact

GONG Liangfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Qingming<sup>2</sup>, LONG Renrong<sup>2</sup>, ZHANG Kai<sup>3</sup>, JU Yuanyuan<sup>4</sup>

- (1. *School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;*  
2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*  
3. *State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China;*  
4. *Naval Research Academy, Beijing 100161, China*)

**Abstract:** The electromagnetic radiation from hypervelocity impact is an important physical phenomenon of solid matter under strong impact loadings, and the research results have important application value in fields of deep space exploration, protection design of spacecraft against space debris, assessment of weapon damage, etc. In this paper, the electromagnetic radiation caused by hypervelocity impact was briefly summarized. The time-frequency characteristics of microwave and flash by hypervelocity impact under various collision conditions were respectively provided. The radiation models of microwave generated by hypervelocity impact were analyzed from two aspects of material fragmentation and plasma phase transition. The luminescence mechanisms during hypervelocity impact were described as a whole, and the radiation models of continuous spectrum and line spectrum were performed. The shortcomings and development trend of electromagnetic radiation by hypervelocity impact were pointed out. The results show that the intensity and frequency of microwave and flash are closely dependent on the target thickness, impact material, environmental pressure as well as collisional velocity and angle. The microwave is in the form of pulses lasting from a few to hundreds of microseconds. The intensity of the flash, however, accumulates rapidly and then decays slowly. When the plasma is not accomplished during the hypervelocity impact, the microwave radiation is mainly formed because of the movement of ionized debris. Once the plasma is formed, the effects of the

\* 收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-11-02

基金项目: 国家重点研究与发展计划 (2016YFC0801204); 民用航天预研项目 (D020304)

第一作者: 龚良飞 (1990—), 女, 博士, 讲师, [liangfeigong@163.com](mailto:liangfeigong@163.com)

通信作者: 张庆明 (1963—), 男, 博士, 教授, [qmzhang@bit.edu.cn](mailto:qmzhang@bit.edu.cn)

collision radiation in the plasma, namely the bremsstrahlung and recombination radiation, and the expansion of the plasma should also be taken into account, and the specific spectrum lies on the characteristic parameters of plasma. In vacuum, only the gasification and plasma due to the impact are necessary to be considered in the flash spectrum, while the gasification and even plasma phase transition resulted from the ablation between the gas and debris should be involved at high environmental pressure.

**Keywords:** hypervelocity impact; electromagnetic radiation; plasma; flash; microwave

超高速碰撞中, 固体物质在强冲击作用下, 随着碰撞速度的增加会发生多形性相变、熔化、气化以及等离子体相变, 并伴随从低频到高频的电磁辐射。超高速碰撞产生的电磁辐射信号具有频域宽、短时、非线性非平稳等特点, 其形成过程非常复杂, 与超高速碰撞的力学过程如变形、断裂、破碎、成坑、粒子云化以及相变等紧密耦合在一起<sup>[1]</sup>。早在 20 世纪 50 年代, 人们就开始了浩瀚宇宙的探索, 从登月计划实施以来, 研究范围从太阳系扩展到太阳系外<sup>[2-3]</sup>。2005 年 7 月, 由美国 NASA 喷气推进实验室实施的“深度撞击”实验取得成功, 实验用 372 kg 的探测器以 10.3 km/s 的速度对彗星 Tempel-1 进行斜撞击。通过碰撞产生的电磁辐射信号(主要为碰撞闪光和微波信号)以及中、高分辨率的图像分析, 观测彗星内部的物质组成以及成坑现象, 随后又继续开展了对 Tempel-1 碰撞表面演化的研究, 其目的在于依据对彗星内部的了解, 获取更多关于太阳系形成与演化的信息<sup>[4-5]</sup>。通过天体碰撞产生的电磁辐射信号不仅可以得到物质的表面特性、内部组成、碰撞物质相变状态, 解释星球的演化、物种的形成与毁灭, 还可以揭示由于碰撞产生的一系列自然物理现象, 如月球磁场、等离子体产生的电磁场与地磁场和月球磁场的相互作用等<sup>[6]</sup>。据 NASA 2020 年 2 月的统计显示, 目前地球轨道上有 20 000 个物体, 其中碎片有 11 000 个, 碎片总质量达 8 000 t, 尺寸大于 10 cm 的碎片数量多达 10 000 个, 这意味着航天器受到的威胁十分严重<sup>[7]</sup>。空间碎片对航天器的毁伤主要分为机械毁伤和电磁毁伤。对于机械毁伤, 早在 20 世纪 40 年代, 人们就开始陆续提出并设计了不同材料和不同结构的防护屏用于航天器防护, 如 Whipple 防护结构、多层板结构、复合材料防护层、梯度材料防护层和含能材料防护层等<sup>[8-9]</sup>。但随着大尺寸碎片的增多, 力学防护也面临着巨大的挑战。由于航天器中应用了许多低电压低电流以及复杂的电路, 超高速碰撞电离引起的航天器表面带电和电磁脉冲很可能对航天器的内部电路产生干扰。据 NGDC(national geophysical data center)数据库统计, 截止 2015 年, 由电磁脉冲引起的航天器事故达 490 起、由静电放电引起的故障达 1 072 起、受到无线电干扰的达到 8 起、其他还有 2 587 起事故未找到原因<sup>[10]</sup>。因此, 电磁毁伤也是航天器防护中不可忽视的因素。在评估武器系统毁伤时, 通过测量目标被撞击时产生的可见光和红外光谱, 可以推断弹丸对靶板的破坏情况<sup>[11]</sup>。在导弹防御系统中, 通过分析拦截弹撞击目标弹体时, 用不同时间的电磁波信号来评估拦截弹对目标弹体的毁伤, 进而确定是否可以对目标弹体进行二次发射<sup>[12]</sup>。综上所述, 超高速碰撞产生的电磁场、电磁辐射频谱特性在深空探测、航天器对空间碎片的防护设计、武器毁伤评估等方面具有重要作用。

目前对超高速碰撞诱发电磁辐射的研究主要集中在无线电波和光波段, 在接近真空条件下, 无线电波和光波的产生与碰撞产生的等离子体有关<sup>[13-14]</sup>; 材料在受到超高速撞击发生破碎时也会产生无线电波<sup>[15]</sup>; 随着环境压力的不断增加, 光波除了来自于碰撞产生的等离子体以外, 还与碎片的烧蚀有关<sup>[16-17]</sup>。本文中首先描述超高速碰撞产生的电磁辐射现象, 分析碰撞诱发电磁辐射的时频特性, 对超高速碰撞产生微波、连续光谱和线谱的辐射模型进行总结, 指出超高速碰撞产生电磁辐射研究中存在的不足, 并对未来的研究方向提出建议。

## 1 超高速碰撞产生的电磁辐射现象

电磁波按发生机理不同可以分为  $\gamma$  射线、X 射线、光波和无线电波。 $\gamma$  射线由原子核衰变产生; X 射线是由于原子内层电子激发产生; 光波由原子外层电子的跃迁产生; 无线电波由电子的振荡产生。

碰撞产生 X 射线和  $\gamma$  射线需要极高的碰撞速度(电子速度达到  $10^7$  m/s 以上), 在超高速碰撞范围内产生的电磁辐射主要为光波和无线电波<sup>[18]</sup>。光波按波长分为紫外光(ultraviolet light, UVL)、可见光(visible light, VL)、红外光(infrared light, IL)。无线电波又可分为微波、超短波(ultrashort wave, USW)、短波(short wave, SW)、中波(medium wave, MW)、长波(long wave, LW), 其中, 微波包含了分米波(decimetric wave, DMW)、厘米波(centimeter wave, CMW)、毫米波(millimeter wave, MMW)和亚毫米波(submillimeter wave, SMMW)。各波段电磁波对应的波长和频率如图 1 所示。

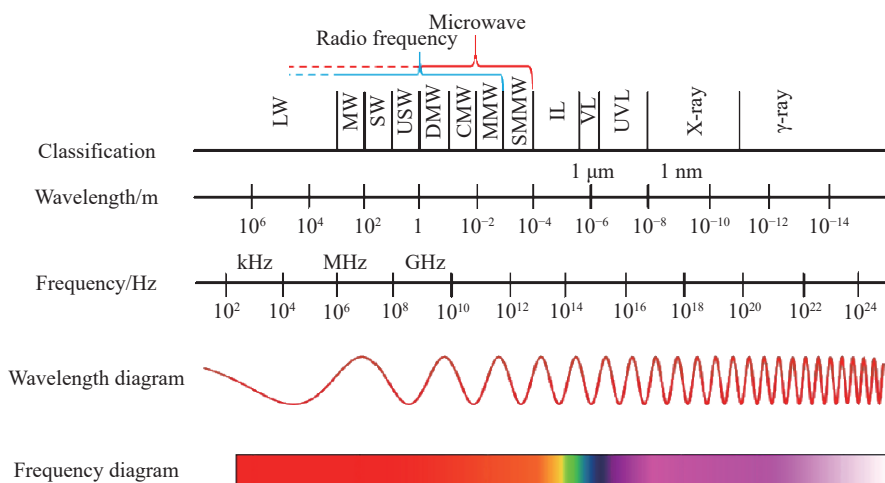


图 1 各波段电磁波对应的波长和频率

Fig. 1 The wavelength and frequency of electromagnetic wave in each band

超高速碰撞中, 弹丸和靶板在强冲击作用下可能会出现以下几种物质状态: 热凝聚体(固体碎片和液体颗粒)、气态物质和等离子体, 材料发生断裂和破碎等, 这些物质和力学状态的改变使得碰撞中会产生不同波长的电磁辐射。碰撞产生的电磁辐射与碰撞速度、碰撞角度、弹靶材料、弹靶厚度比、弹丸形状、靶室压强等多种因素相关。由于超高速碰撞产生的闪光和无线电波在深空探测和航天器防护领域具有非常重要的作用, 因此, 美国 Sandia 国家实验室、布朗大学、斯坦福大学、日本东京大学、日本空间和航天科学研究所、加拿大计算设备有限公司和中国空气动力研究与发展中心、北京理工大学、中科院国家空间科学中心等机构和单位的学者对超高速碰撞中产生的闪光和无线电波进行了大量的实验和理论工作, 分析了碰撞条件对电磁辐射能量、辐射强度、信号特征等的影响<sup>[5, 12, 14, 16-30]</sup>。

## 2 超高速碰撞产生电磁辐射的频域特性

### 2.1 不同碰撞条件下微波频域特征

无线电波包含了频率小于 10 THz 的电磁波, 其中频率在 3 THz 以下的一个有限带宽的电磁波称为微波。由于超高速碰撞产生的无线电波辐射频段较广, 测量难度大, 早期对无线电波的测量主要在时域内, 随后又进行了频域内的分析, 测量频段集中在 1~30 GHz 的微波段。

张凯<sup>[31]</sup>利用 0~26 GHz 的喇叭天线和 2 Hz~26 GHz 的实时频谱分析仪, 对直径为 6.4 mm 的铝合金弹丸以不同速度、不同角度超高速撞击 23 mm 厚的铝靶产生的微波频域进行了测量。如图 2(a) 所示, 碰撞产生的微波辐射功率为 -67~-53 dBm, 该强度的电磁辐射信号足以干扰航天器的通信; 在低频段(2 Hz~13 GHz), 辐射功率随碰撞速度略微升高, 且出现了多个峰值; 在高频段(13~26 GHz), 辐射功率随碰撞速度增大的趋势更为明显, 尤其当速度大于 5 km/s 时, 这种突跃非常显著, 此时, 信号出现峰值的次数减少。如图 2(b) 所示, 同样地, 在 13 GHz 频段左右, 微波信号存在突跃; 微波辐射功率与碰撞角度正相关。

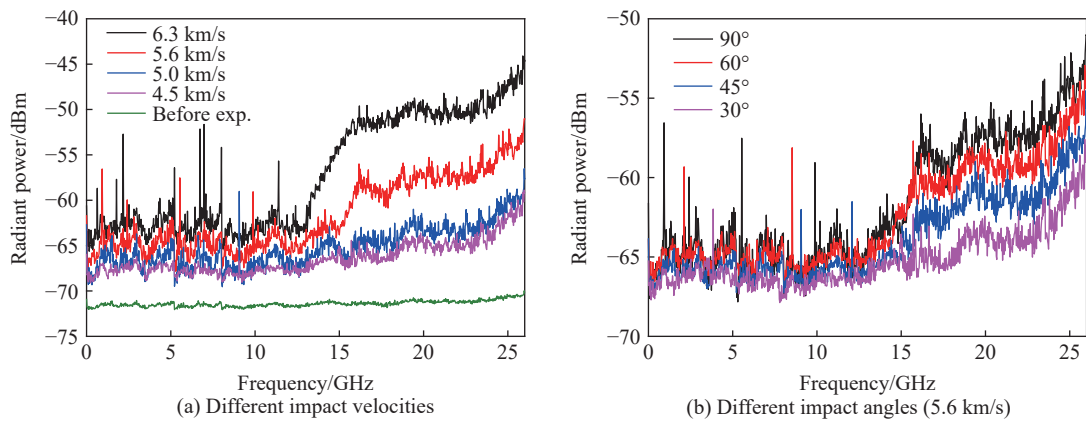


图 2 以不同速度和角度碰撞时产生的微波频谱<sup>[31]</sup>

Fig. 2 Microwave spectra produced by collision at different velocities and angles<sup>[31]</sup>

### 2.2 不同碰撞条件下闪光频域特征

采用不同波长范围的光谱仪, 如红外光谱仪、可见光光谱仪等可以得到光强度在曝光时间内的积分和, 从而对超高速碰撞产生的发光现象进行定量分析。目前对超高速碰撞产生的光谱测量主要集中在紫外和可见光波段, 对红外波段的研究较少。

从频域上来看, 超高速碰撞会使原子系统、分子以及离子系统中的电子发生能级跃迁, 从而产生光的吸收和发射, 在光谱中表现为线谱、带谱以及连续谱。若是原子或离子中的电子发生固定能级之间的跃迁, 将产生线谱; 若是分子, 伴随着固定能级之间的电子跃迁, 还会产生振动和转动模式的变化, 并将产生带状谱线; 此外, 由于黑体热辐射、等离子体中韧致辐射和复合辐射, 谱线中将产生连续谱线。

如图 3 所示, 当直径为 6.4 mm 的铝合金弹丸以 6.3 km/s 的速度正碰撞 23 mm 厚的铝靶时, 在 200~500 nm 光波段产生了多条铝原子线谱(Al I)、一价铝离子线谱(Al II)、铜原子(Cu I)、铁原子(Fe I)线谱以及连续谱线<sup>[32]</sup>, 说明碰撞过程中产生了等离子体。

Lawrence 等<sup>[33]</sup> 将飞片以不同速度撞击铝合金薄靶, 发现在相对低碰撞速度下(5.6 km/s), 谱线中既

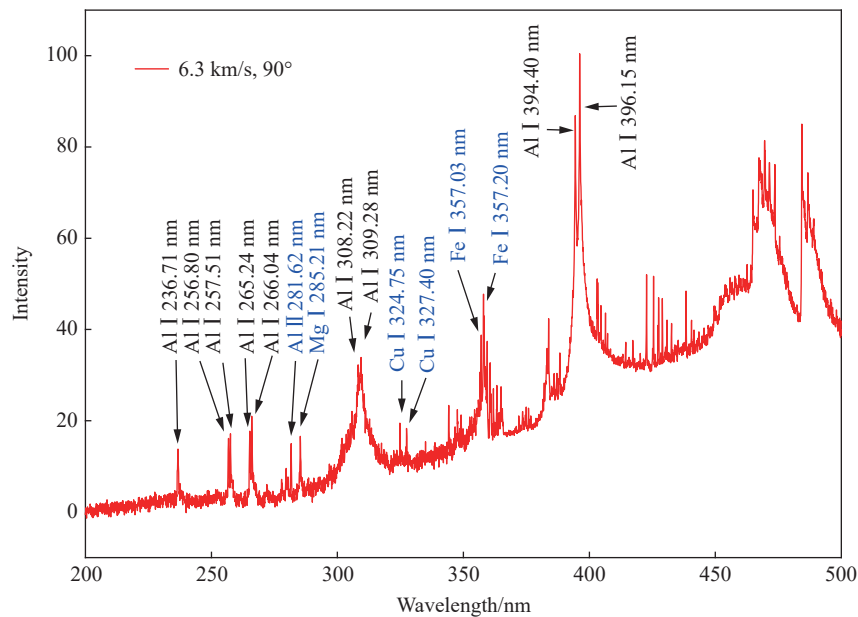


图 3 超高速碰撞厚靶时产生的闪光光谱<sup>[32]</sup>

Fig. 3 The flash spectra generated by hypervelocity impact on thick targets<sup>[32]</sup>

有铝原子线谱, 也有铝一价和铝二价离子谱线。Dugger 等<sup>[34]</sup> 通过 200~600 nm 光谱分析, 鉴定了铝弹丸碰撞铝合金靶板时产生的镁和铜的谱线。Reinhart 等<sup>[35]</sup> 运用二级轻气炮将铝弹丸加速至 5~7 km/s, 分别撞击铝靶板 ( $E/E_v=1$ , 其中  $E$  为冲击材料增加的内能,  $E_v$  为材料的气化潜热)、铈靶板 ( $E/E_v=3$ ) 和 B 炸药 ( $E/E_v=5$ ) 靶板, 使用光谱分析仪测量碰撞过程中的可见光光谱和近红外光光谱, 并由光谱数据分析了闪光温度。Sugita 等<sup>[14]</sup> 得到了石英弹丸以不同速度 (4.7~5.6 km/s) 撞击白云石产生的光谱 (150~900 nm)。如图 4 所示, 超高速碰撞产生的可见光光谱由黑体辐射、分子带谱以及原子线谱组成; 当积分时间较短时, 即碰撞前期, 闪光光谱主要为分子带谱和原子线谱; 通过光谱频域信号, 计算了闪光物质的平均温度为 4 000~6 000 K, 从而判断出闪光来源于射流的形成。随后, Sugita 等<sup>[14]</sup> 又开展了铜弹丸斜撞击白云石的超高速碰撞实验, 由光谱计算了射流温度、得到了射流中靶板与弹丸的质量比随碰撞角度的变化关系<sup>[21]</sup>。

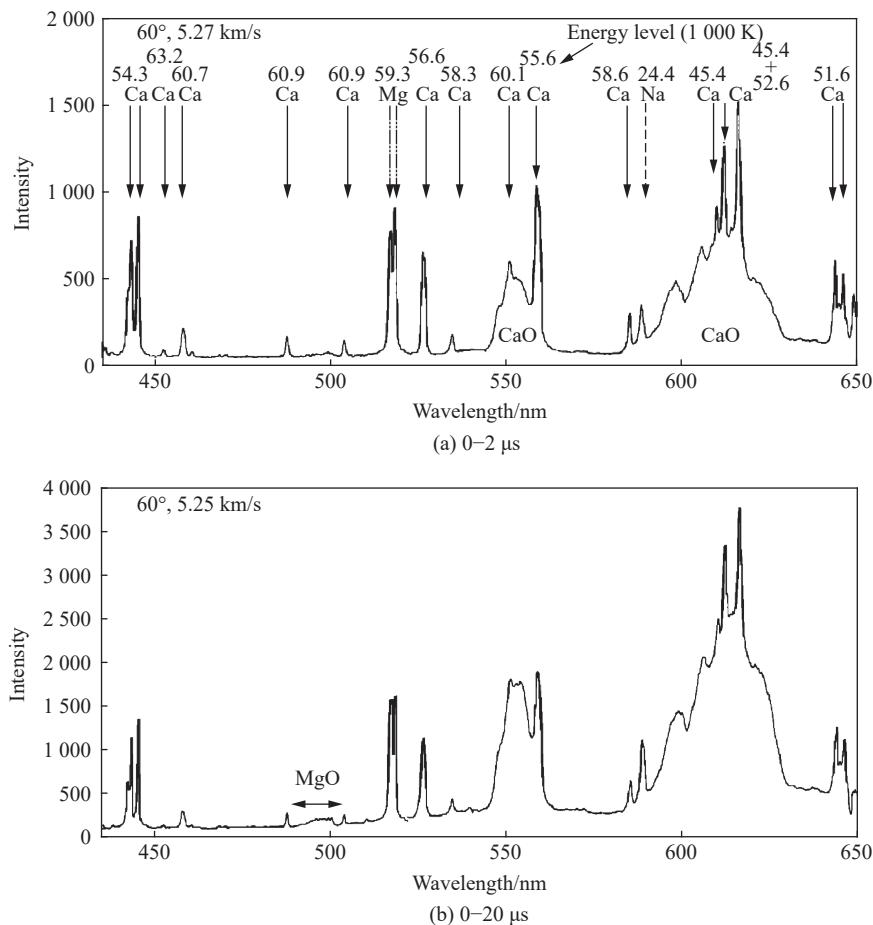


图 4 石英弹丸撞击白云石产生的光谱<sup>[14]</sup>

Fig. 4 The spectra produced by quartz projectiles impacting on dolomite targets<sup>[14]</sup>

此外, 张凯<sup>[31]</sup> 通过铝合金弹丸超高速碰撞铝厚靶实验, 分析了 1 ms 积分时间内碰撞产生的可见光与碰撞速度、碰撞角度的关系。如图 5(a) 所示, 碰撞速度越高, 线谱和连续辐射的强度越大, 碰撞中线谱出现的波长位置大致相同; 速度越低, 线谱越不明显。图 5(b) 表明碰撞角度越小, 发光强度越小, 且线谱越弱。石安华等将铝弹丸以 2.8 km/s 的速度分别撞击铝合金靶板和黄铜靶板, 利用光辐射计对波长为 574、672 nm 的光信号进行测量, 获取了光强度时程曲线, 并利用瞬态光谱仪获得了 370~420 nm 波段内的光谱<sup>[36-37]</sup>。

考虑环境压力时, Xue 等<sup>[28]</sup> 分析了平头长杆弹在 100 Pa 环境压力下以 1.3~3.2 km/s 超高速撞击铝薄靶时产生的光谱频域特性 (2~4 μs 积分时间), 从可见光谱线中分辨出了多条氮、氧原子和离子线谱。

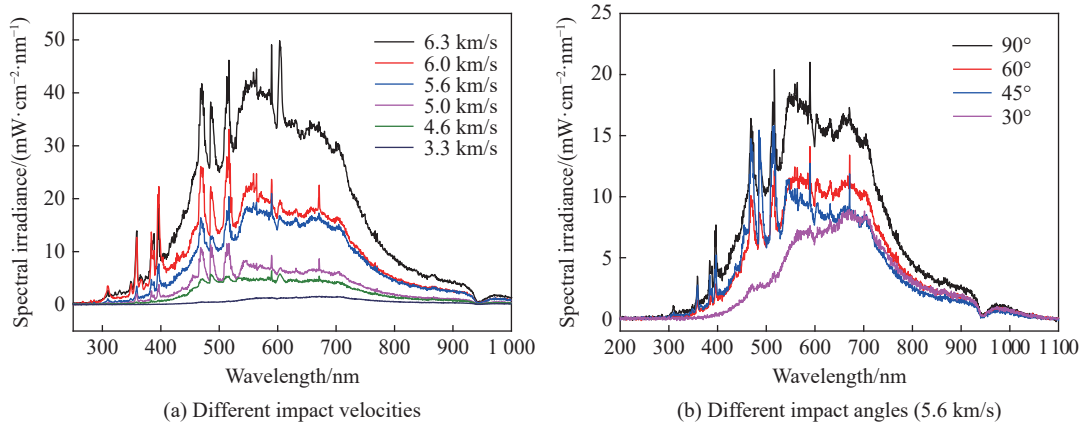


图 5 不同碰撞速度和角度下产生的闪光光谱<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Flash spectra at different collisional velocities and angles<sup>[31]</sup>

从原子物理学角度看, 原子在跃迁过程中, 轨道能量从低到高排序为  $3s < 3p < 4s < 3d$ 。对于金属铝原子, 基态电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p$ , 基态原子组态为  $2p^{1/2}$ 。当基态电子组态相同时, 考虑不同轨道之间的耦合时, 还存在  $2p^{3/2}$  等原子组态。当基态气态铝原子得到 5.99 eV 的能量, 会产生电离, 此时对应的一价铝离子基态电子组态为  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ , 基态离子组态为  $1s^0$ 。表 1 列出了铝原子 (Al I) 以及铝离子 (Al II) 的共振线, 可以看到, 铝原子的共振线位于紫外和可见光波段, 铝离子的共振线处于紫外波段。

表 1 铝原子和铝离子的共振线

Table 1 Resonance lines of aluminum atom and aluminum ion

| 元素    | 跃迁能级                                       | 波长/nm   | 对基态的能量/eV |
|-------|--|---------|-----------|
| Al I  | $3s^2 3p^2 P_{1/2} \sim 3s^2 3d^2 D_{3/2}$ | 308.215 | 4.02      |
| Al I  | $3s^2 3p^2 P_{1/2} \sim 3s^2 4s^2 S_{1/2}$ | 394.401 | 3.15      |
| Al II | $3s^2 S_0 \sim 3s^3 p^3 P_2$               | 265.007 | 4.67      |
| Al II | $3s^2 S_0 \sim 3s^3 p^3 P_1$               | 266.916 | 4.65      |

在 Ma 等<sup>[24]</sup> 的实验结果中, 不管环境压力如何变化, 250~310 nm 紫外波段只测到了铝原子的共振线和激发态线谱, 并没有测到铝离子的共振线。对比 Lawrence 等<sup>[33]</sup> 和其他<sup>[32]</sup> 真空环境超高速碰撞实验光谱同样可以发现, 测到的离子线谱更多为铝离子的激发态线谱, 而不是铝离子的共振线。如图 6(a) 所示, 当环境压力增高到 990 Pa 时, 从碰撞前 1.43  $\mu s$  开始后的 2  $\mu s$  时间内, 在紫外波段出现了铝原子、杂质元素原子(铁、硅、锰、镁)和环境气体的线谱, 碰撞后 2.57  $\mu s$  开始(图 6(b)), 杂质元素原子和环境气体的线谱消失, 只剩下铝原子的共振线和激发态谱线。

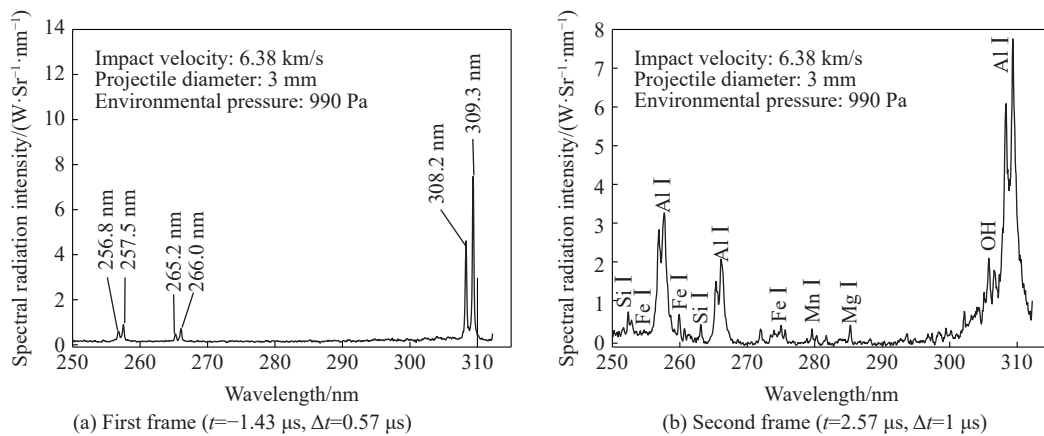


图 6 纯铝超高速碰撞产生的紫外波段的光谱辐射强度<sup>[24]</sup>

Fig. 6 Spectral radiation intensity in ultraviolet band generated by hypervelocity impact of pure aluminum<sup>[24]</sup>

### 3 超高速碰撞产生电磁辐射的时域特性

#### 3.1 不同碰撞条件下微波时域特征

通过地面上的超高速碰撞实验, 学者们对超高速碰撞产生的微波进行了时域测量, 除了在地面上模拟超高速碰撞实验, 许多空间测试装置对碰撞产生的 1 Hz~1 GHz 范围内的无线电波进行了原位测量<sup>[38-42]</sup>。

Takano 等<sup>[15]</sup>利用二级轻气炮将 0.21 g 的尼龙弹丸加速到 4 km/s, 以 45°斜撞击不同厚度的铝靶, 用宽频接收器和超外差方法测量得到了频率在 22 GHz 左右的微波时域信号。如图 7 所示, 微波信号为脉冲振荡电压信号, 持续时间为 20~40  $\mu\text{s}$ ; 微波信号在碰撞之后有 1~15  $\mu\text{s}$  的时间延迟, 靶板越薄, 信号的延迟越长; 信号峰值之间存在数微秒的间断; 靶板越厚, 脉冲数越少, 信号幅值越高。此外, Takano 等<sup>[22]</sup>分别测量了直径为 7 mm 的尼龙弹丸以 3.8 km/s 撞击 1~40 mm 厚度的铝靶时产生的 2 GHz 和 22 GHz 频段的微波辐射功率, 结果发现, 最大微波辐射功率对应的靶板厚度为 8 mm。

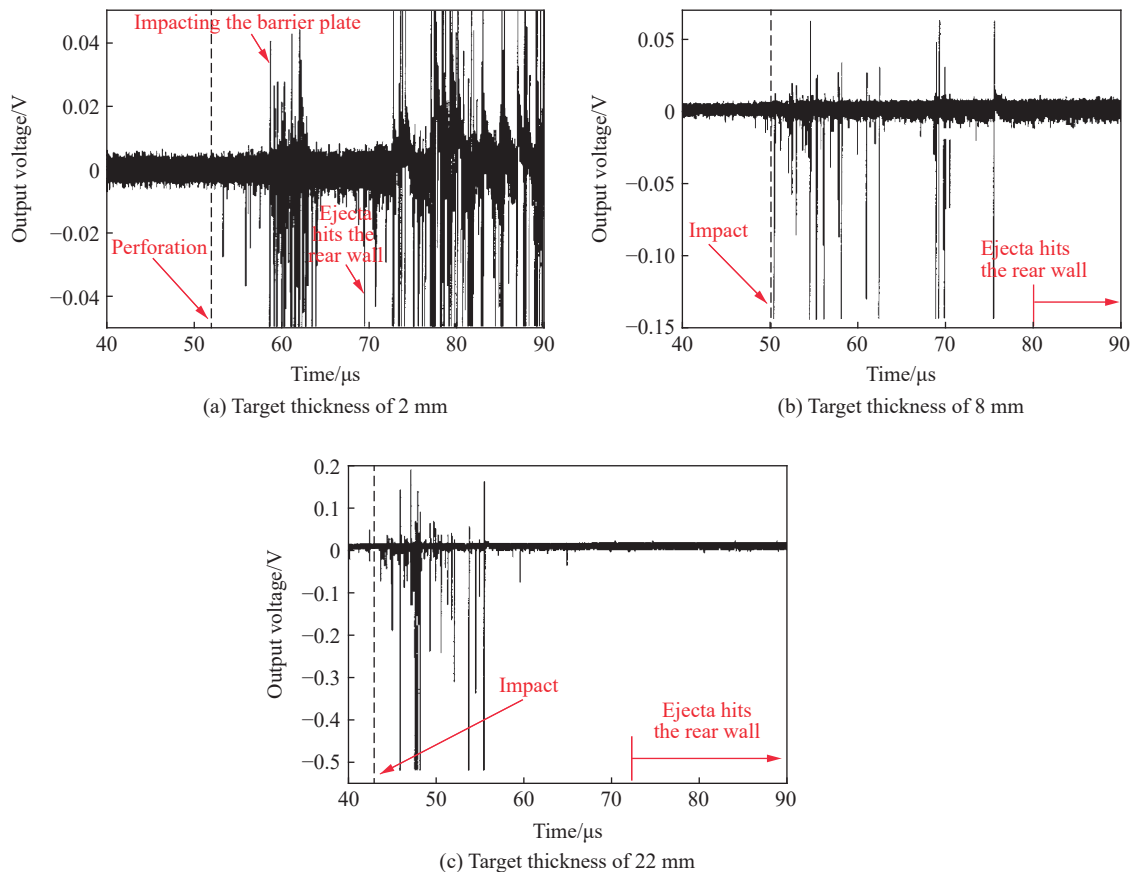


图 7 尼龙弹丸撞击不同厚度铝靶时产生的微波时域特性<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Microwave time domain characteristics of nylon projectile impacting aluminum targets with different thickness<sup>[15]</sup>

Maki 等<sup>[43]</sup>采用 22 GHz 的外差接收机和低噪声放大器得到了 1.1 g 聚碳酸酯柱形弹丸超高速撞击 (3.8 km/s) 2 mm 铝靶时产生的微波, 利用高速摄影拍摄了碰撞中的闪光过程。通过对比发现, 微波辐射不同于闪光, 前者是一个脉冲信号, 而后者是一个连续过程 (见图 8), 并指出微波的产生与弹丸的撞击速度、靶板材料密切相关<sup>[44]</sup>。撞击速度越大, 信号强度越大 (见图 9(a)), 微波辐射能量与碰撞速度的 5.7 次方成正比。通过分析 4 种靶板材料 (铝、铝陶瓷、红砖、聚氨酯甲酸酯橡胶) 在受到超高速撞击 (4 km/s) 后产生的微波信号, 指出导体产生的微波信号高于绝缘体 (见图 9(b))。

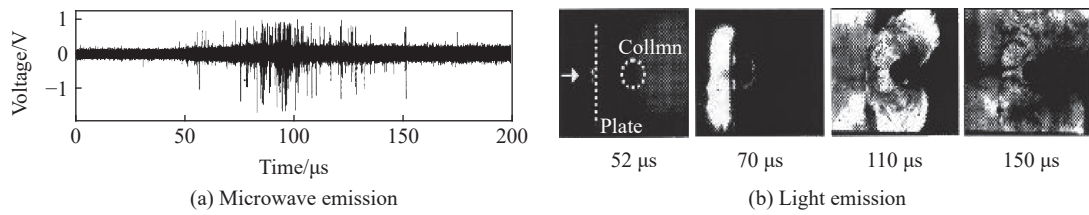


图 8 微波与闪光信号的对比<sup>[43]</sup>

Fig. 8 Contrast between the microwave and flash signals<sup>[43]</sup>

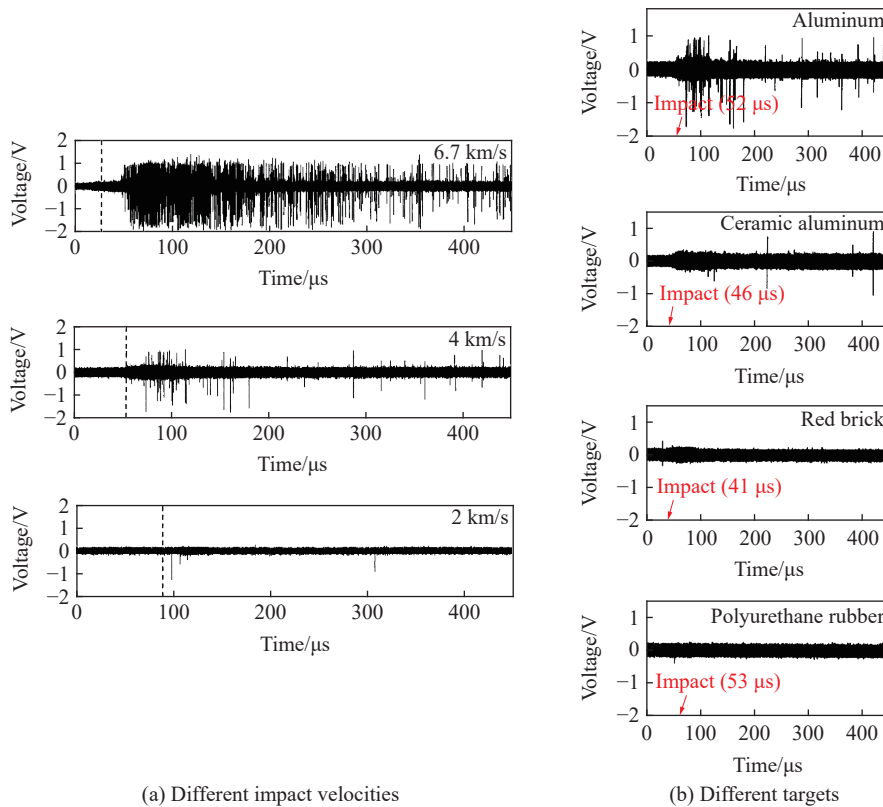


图 9 微波与撞击速度和靶板材料的关系<sup>[44]</sup>

Fig. 9 Relationship between microwave and impact velocity and target material<sup>[44]</sup>

### 3.2 不同碰撞条件下闪光时域特征

超高速碰撞中,采用光电二极管、光电倍增管等测量手段可以获得某特定频域(波长)上光强度随时间的变化。

从 Thoma 等<sup>[45]</sup>拍摄到的直径为 6 mm 的球形铝合金弹丸超高速撞击铝合金 Whipple 防护结构产生的闪光过程来看(见图 10),当弹丸撞击薄靶时,碎片云头部和反溅碎片云处均会产生闪光。撞击厚靶时,碎片反溅区会产生闪光<sup>[46]</sup>。

在时域上,超高速碰撞产生的闪光强度从碰撞开始迅速上升至峰值,再缓慢衰减,如图 11 所示,其中强闪光持续时间为 50~100 μs,加上较长时间的黑体辐射,整个过程可以持续到毫秒量级<sup>[47]</sup>。

Ernst 等<sup>[48]</sup>认为超高速碰撞产生的闪光强度  $I$  与时间  $t$  满足关系  $I \sim t^{-\alpha}$ ,其中  $\alpha$  为衰减指数,与靶板密度呈线性关系,如图 12 所示。此外,Ernst 等<sup>[48]</sup>使用耐热玻璃以不同入射角度碰撞浮石靶板,发现入射角度越大,碰撞闪光强度越大。

在不同碰撞速度下,光辐射强度  $I$  与碰撞速度  $v$  符合  $I \sim v^n$ ,其中,幂指数  $n$  依赖于测量的波长,也受弹靶材料的影响,在实验测量中, $n$  值还受光学设备分辨率的影响,实验得到  $n$  值在 2~9 之间<sup>[49]</sup>。

Burchell 等<sup>[50]</sup> 运用 van de Graaff 粒子加速器将铁微粒 ( $10^{-13} \sim 10^{-17}$  kg) 加速度到  $1 \sim 42$  km/s, 撞击铝靶和钨靶。实验中, 闪光持续时间在  $1 \mu\text{s}$  量级, 闪光能量/质量 ( $E/m$ ) 与碰撞速度 ( $v$ ) 的关系如下: 铁-铝碰撞质能比  $E/m = \alpha_1 v^{3.5}$ , 铁-钨碰撞质能比  $E/m = \alpha_2 v^{3.9}$ , 其中  $\alpha_1 = 3.6$ 、 $\alpha_2 = 4.4$ 。

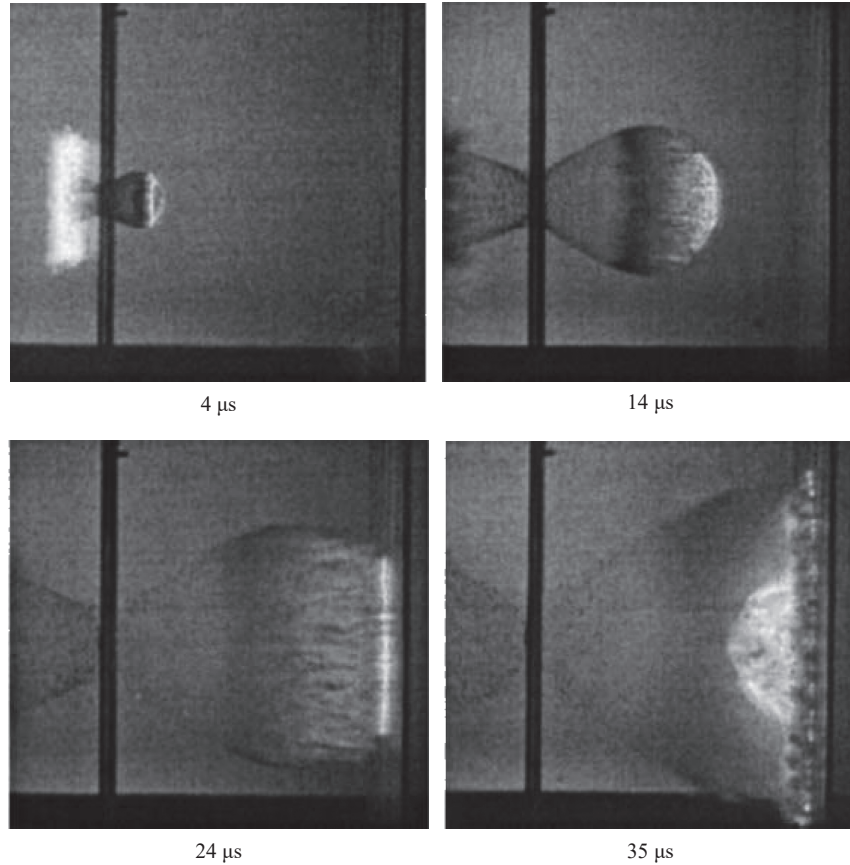


图 10 球形铝弹丸撞击 Whipple 防护结构产生的闪光现象<sup>[45]</sup>(6.7 km/s)

Fig. 10 The Flash caused by impacting of the spherical aluminum projectile on Whipple protective structure (6.7 km/s)<sup>[45]</sup>

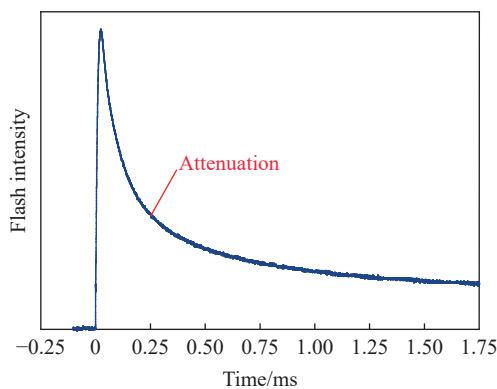


图 11 闪光时域特性<sup>[47]</sup>

Fig. 11 Time-resolved characteristic of flash<sup>[47]</sup>

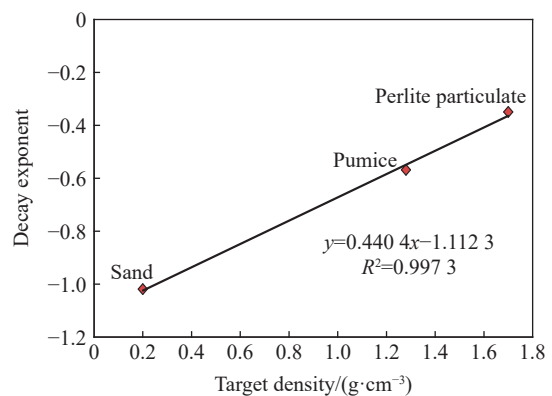


图 12 闪光衰减指数与靶板的关系<sup>[47]</sup>

Fig. 12 The relationship between flash attenuation index and target<sup>[47]</sup>

以上超高速碰撞实验中未说明靶室压强时, 均指的是近真空环境。MacCormack 等<sup>[51]</sup> 指出在较高的靶室压强下, 碰撞形成的碎片云与靶室气体介质摩擦会发光, 随着靶室压强的升高, 发光强度会增大, Eichhorn 等<sup>[52]</sup> 的实验也证实靶室压强对光辐射会产生影响。2003 年, Sugita 等<sup>[17]</sup> 获得了不同环境压力

下, 聚碳酸酯弹丸撞击水靶板时产生的碳化合物的分子带状谱线和黑体连续背景辐射, 环境压力越大时, 辐射强度和温度越高。Ma 等<sup>[24]</sup>分析了在不同环境压力范围内(0.58~990 Pa), 球形纯铝弹丸(1A30)超高速撞击半无限纯铝靶(20 mm)时产生的光谱特征(250~310 nm)。如图 13 所示, 光谱演化过程中会出现单峰、双峰和三峰结构; 峰值的产生与碰撞参数如碰撞速度、弹丸直径和环境压力有密切联系; 当碰撞速度较高、环境压力较低时会出现三峰结构, 分别对应弹丸侵彻靶板阶段、侵彻完成阶段以及碎片云膨胀阶段。

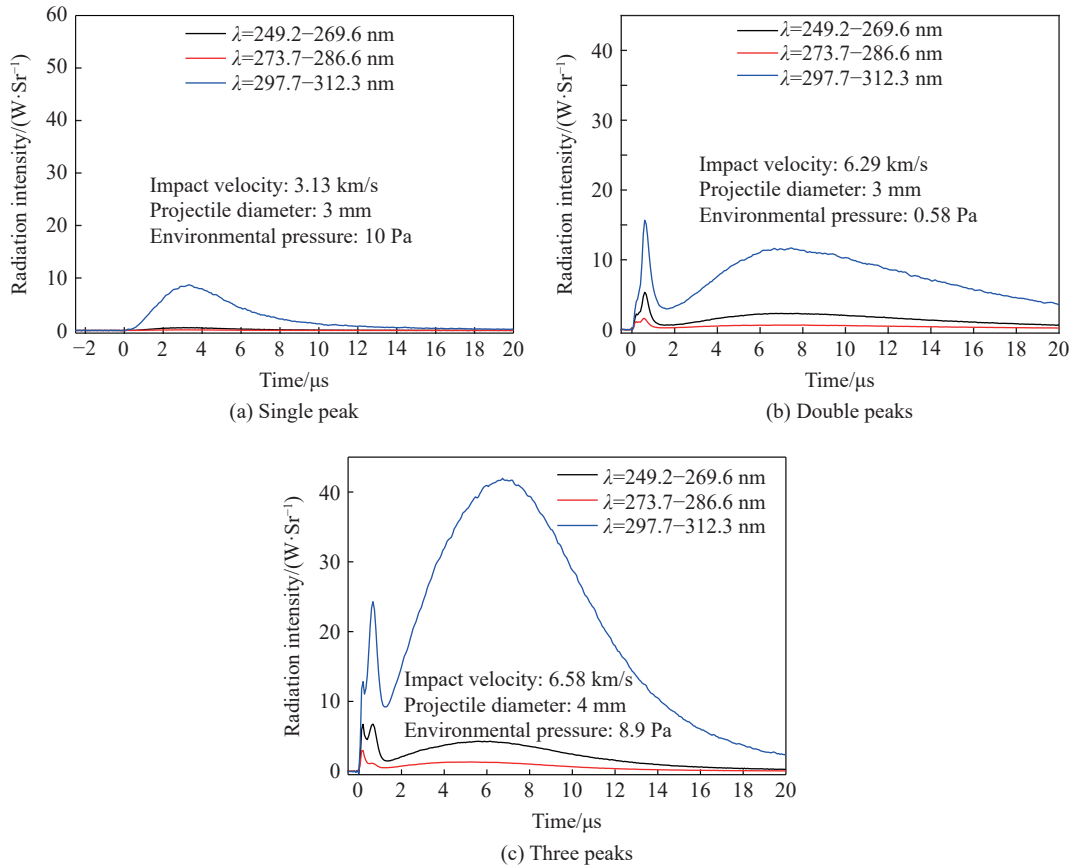


图 13 不同碰撞参数下的光谱演化过程<sup>[24]</sup>

Fig. 13 Spectral evolution under different collision parameters<sup>[24]</sup>

## 4 超高速碰撞产生电磁辐射的理论模型

### 4.1 超高速碰撞产生微波辐射机理

#### 4.1.1 材料破碎产生微波辐射模型

超高速碰撞会对材料产生严重的破坏, 撞击厚靶会产生不同程度的层裂, 撞击薄靶会形成碎片云。实验结果表明, 超高速碰撞中金属晶格的振动<sup>[53]</sup>、金属键的断裂以及裂纹的开裂<sup>[15, 22]</sup>会产生微波辐射。当超高速碰撞发生时, 弹丸与靶板之间的原子碰撞会改变原有的晶格状态。Takano 等<sup>[22]</sup>假设外层电子云与原子实会发生 3 种位置的改变: 轨道突跃、碰撞极化、碰撞电离。3 种位置变化均会导致电磁辐射的产生, 当前两种位置变化发生时, 外层电子仍然处于原子实的力场中; 只有当碰撞电离产生时, 外层电子才会完全成为自由电子, 不受原子实的束缚, 如图 14 所示。

将碰撞中原子实与外层电子发生位置变化时产生的电磁辐射等效成一对电偶极子产生的电磁辐射, Takano 等<sup>[22]</sup>分别计算了撞击薄靶产生碎片时, 原子发生轨道突跃和碰撞极化时产生的微波辐射功。由于这两种情况计算得到的微波辐射能量远低于实验值, 信号持续时间为纳秒, 且为单脉冲形式, 因此

不能解释实验中出现的微秒多脉冲微波辐射信号。当碰撞电离发生时,如图 15 所示,碎片分离的两个表面分别带上等量异号电荷,电荷的宏观分离将形成电流,从而产生微波辐射。

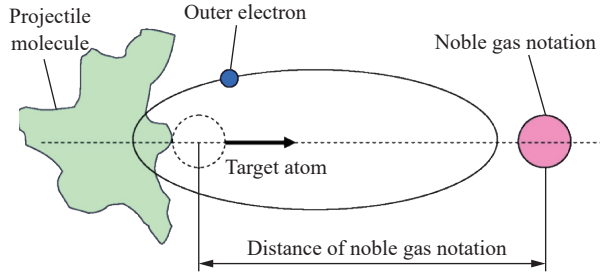


图 14 弹丸分子与靶板原子碰撞后原子的电离<sup>[22]</sup>  
 Fig. 14 The ionization of atoms after collision between projectile molecules and target plate atoms<sup>[22]</sup>

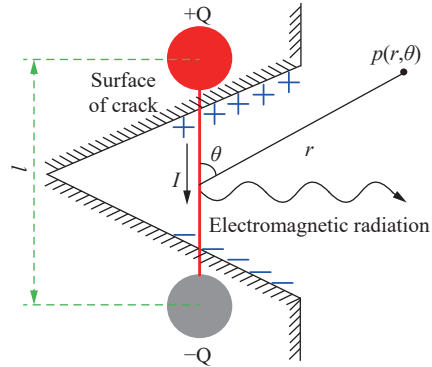


图 15 材料破碎时产生微波辐射模型  
 Fig. 15 The model of microwave radiation when materials are damaged

根据此模型,可以得到在距离电偶极子为  $r$  处  $p$  点的磁场强度:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \phi(r) \quad (1)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\phi(r) = \frac{\mu_0 I l}{4\pi r} e^{-i\omega r/c}$  为  $p$  点的电势,  $I$  为电流,  $l$  为电偶极子的长度,  $\omega$  为电偶极子振荡频率,  $c$  为真空中的光速。

电偶极子的电场强度可以表示为:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{i\omega\epsilon_0} \nabla \times \mathbf{H} \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数。

电偶极子在  $p$  点产生的辐射功率如下:

$$P = 40\pi^2 I^2 (l/\lambda)^2 \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为电磁辐射波的波长。

设定单个碎片的带电量以及碎片总数, Takano 等<sup>[22]</sup> 大致计算了由于破碎产生的微波辐射功,与实验结果量级相同。

#### 4.1.2 等离子体产生微波辐射模型

总体来讲,等离子体产生的微波辐射模型主要有 2 种(见图 16): 碰撞辐射模型和等离子体膨胀运动模型。等离子体产生的微波辐射特性由碰撞产生的等离子体参数决定,微波辐射模型依赖于碰撞产生等离子体的特征参量,如等离子体电子温度和电子密度。

如图 16(a) 所示,  $E_1$  为单个基态原子的能量,  $E_2$ 、 $E_3$  激发态原子能量,当原子能量大于 0 时,原子被电离,成为由离子和自由电子组成的系统。等离子体中电子将发生以下 3 种跃迁方式: 固定能级之间的跃迁、自由态到固定能级之间的复合辐射和自由态到自由态之间的韧致辐射。

等离子体中,韧致辐射系数可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$\epsilon_{\text{ff}} = n_e n_i Z^2 \left( \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{8\pi}{3\sqrt{3}m_e^2 c^3} \sqrt{\frac{2m_e}{\pi k_B T}} e^{-\frac{hf}{k_B T}} g_{\text{ff}} \quad (4)$$

式中:  $n_e$ 、 $n_i$  分别表示等离子体中电子和离子数密度,  $Z$  为离子电荷数,  $q$  为元电荷,  $m_e$  为电子质量,  $c$  为光速,  $k_B$  为玻尔兹曼常量,  $T$  为电子温度,  $h$  为普朗克常量,  $f$  为电磁波的频率,  $g_{\text{ff}}$  为 Gaunt 因子。

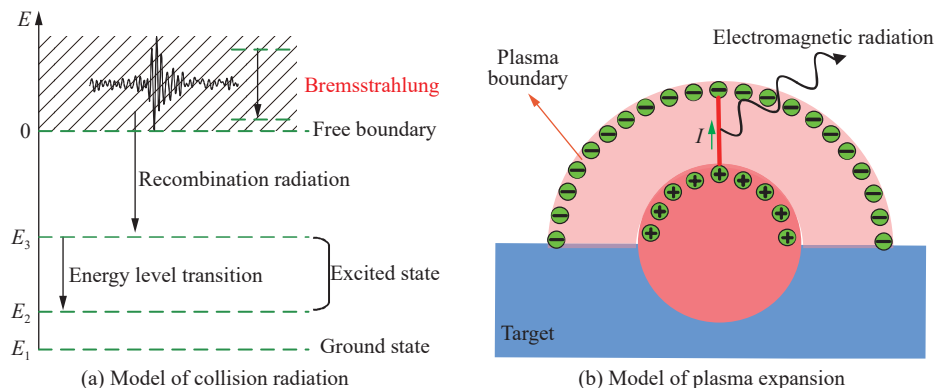


图 16 等离子体产生微波辐射模型

Fig. 16 Model of microwave radiation generated by plasma

只有在等离子体的电子数密度足够低时(小于  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 当电磁辐射波的频率大于等离子体的截止频率时, 由式(4)计算得到的电磁辐射才会处于微波辐射阶段, 否则韧致辐射将会发出更高频率的电磁辐射, 如红外和可见光波等<sup>[13]</sup>。由超高速碰撞实验测量得到的等离子体特征参量判断得知<sup>[54-55]</sup>, 碰撞产生的等离子体中韧致辐射可以产生微波电磁辐射, 其辐射频率应大于 1 GHz。

等离子体中复合辐射系数可以表示为:

$$\varepsilon_{\text{fb}} = \frac{16\pi}{3c^2 \sqrt{6\pi} m_e k_B} \frac{q^6}{(4\pi \varepsilon_0)^3} \frac{n_e n_i}{\sqrt{T}} \zeta (1 - e^{-\frac{hf}{k_B T}}) \quad (5)$$

式中:  $\zeta$  为 Biberman 因子。

与韧致辐射相比, 将相同的等离子体特征参数代入式(5), 可以得到复合辐射的电磁辐射频率更高, 可以忽略其对微波辐射的影响, 而能级跃迁的电磁辐射为可见光波段<sup>[56]</sup>。因此, 在碰撞辐射模型中, 只需考虑低电子数密度的等离子体中韧致辐射对微波辐射的贡献。

在等离子体产生微波辐射的两种机制中, 即韧致辐射和复合辐射, 碰撞速度越高, 意味着等离子体特征参数越大, 此时, 由韧致辐射引起的微波辐射越来越小, 微波辐射应当以等离子体的膨胀为主。

如图 16(b) 所示, 将等离子体膨胀视为球形对称膨胀, 由于电子与离子质量的差异, 使得电子率先脱离正离子向四周膨胀, 假设等离子体的膨胀速度为离子等温声速  $c_s$ , 电子相对于离子的位移  $\xi$  表示如下<sup>[20]</sup>:

$$\xi(t) = -\frac{v_{\text{exp,e}}}{\omega_{p,0}} (1 + c_s t / r_0)^{3/4} \sin\left(\omega_{p,0} \frac{r_0}{c_s} (1 + c_s t / r_0)^{-1/2}\right) \quad (6)$$

式中:  $v_{\text{exp,e}}$  为初始电子运动速度,  $\omega_{p,0} = \sqrt{\frac{n_{e0} e^2}{m_e \varepsilon_0}}$  为等离子体初始振荡频率,  $n_{e0}$  为等离子体的初始电子密度,  $e$  为元电荷,  $m_e$  为电子质量,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $c_s = \sqrt{\frac{\gamma e T_e}{m_i}}$  为离子的等温声速,  $\gamma$  为比热比,  $T_e$  为等离子体电子温度,  $m_i$  为离子质量,  $t$  为时间,  $r_0$  为初始等离子体的半径。

图 17 为超高速碰撞产生等离子体时, 电位移随时间的变化关系。从图中可以看到, 电子相对于离子的运动使得电位移在平衡位置附近来回振荡, 振动幅值随时间逐渐增大, 振动频率随时间逐渐降低, 正是这种来回振荡运动产生了微波辐射。

其辐射功率可以表示为<sup>[20]</sup>:

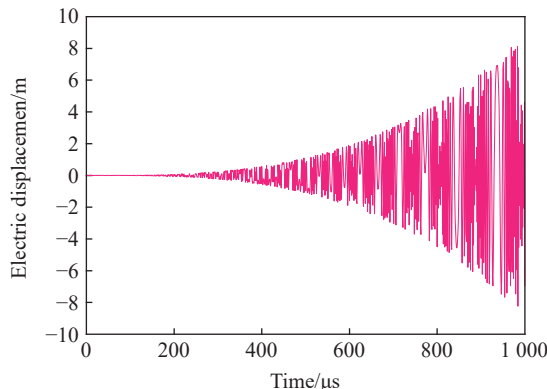


图 17 等离子体中电位移随时间的变化关系

Fig. 17 Time dependence of electric displacement in plasma

$$p(t) = \frac{\omega_{p,0}^2 v_{\text{exp},e}^2 e^2 N \sin^2 \left( \omega_{p,0} \frac{r_0}{c_s} (1 + c_s t / r_0)^{-1/2} \right)}{6\pi \epsilon_0 c^3 (1 + c_s t / r_0)^{9/2}} \quad (7)$$

式中:  $N$  表示运动过程中的电子数,  $c$  为光速。

根据以上等离子体膨胀微波辐射模型, Close 等<sup>[20]</sup>将微粒子以 50 km/s 的超高速碰撞的碰撞参数代入式(7), 经傅里叶分析, 得到了该碰撞条件下产生的微波辐射功率谱和其振荡特性。通过与卡西尼号上等离子体收集器得到的振荡信号对比, 验证了等离子体膨胀辐射模型。

### 4.2 超高速碰撞下的发光机理

图 18 总结了目前超高速碰撞条件下可能存在的发光机理, 若超高速碰撞时产生了等离子体, 则其中连续谱线来源于凝聚态物质的热辐射和等离子体中的韧致辐射(电子数密度较高时)和复合辐射, 线谱则来源于气态原子和等离子体中原子和离子的能级跃迁。当真空度较高时, 只需考虑由碰撞引起的气化和等离子体相变, 反之, 若碰撞时的环境压力较高, 则不能忽略气体与碎片的烧蚀作用<sup>[16]</sup>。

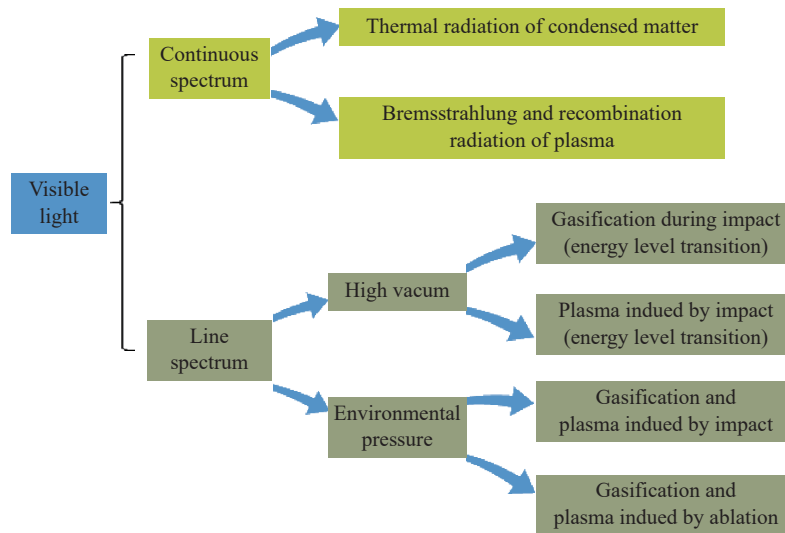


图 18 超高速碰撞产生可见光的机理

Fig. 18 The mechanism of visible light caused by hypervelocity impact

#### 4.2.1 超高速碰撞产生连续光谱辐射模型

由 4.1.2 节可知, 当碰撞中等离子体的电子密度大于  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时, 其韧致辐射才会产生光波, 在光谱中表现为连续谱线。将超高速碰撞中凝聚态物质和等离子体的热辐射看成是理想黑体的热辐射, 则其连续辐射规律均可以用普朗克辐射定律表示:

$$M_{\text{bla}}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(c_2/(\lambda T)) - 1} \quad (8)$$

式中:  $M_{\text{bla}}(\lambda, T)$  为黑体光谱辐射出射度,  $\lambda$  为可见光波长,  $T$  为热辐射物质的温度,  $h$  为普朗克常量,  $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.74 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ,  $c_2 = hc/k_B = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ , 其中  $c$  为光速,  $k_B$  为玻尔兹曼常数。

对于等离子体, 以上黑体辐射是计算等离子体温度最为简单的模型。当等离子体发生膨胀(见图 16(b)), 电子密度会逐渐降低, 等离子体不再是光学不透明, 因此不能将其简化为黑体, 此时等离子体的温度用碰撞产生线谱的方法计算更为合适<sup>[57]</sup>。总体来讲, 黑体辐射假设适用于碰撞点处等离子体形成的初始时刻, 在膨胀过程中, 利用多条原子或离子特征线谱计算膨胀中的温度变化更为合适, 这种计算方法的改变对于碰撞气体产物也同样适用。

#### 4.2.2 超高速碰撞产生线谱辐射模型

真空条件下, 超高速碰撞产生气体或等离子体有两种来源: 单次冲击压缩使弹丸和靶板产生了相

变、碰撞产生射流时产生了相变。根据超高速碰撞光谱实验可知,碰撞产生射流发生气化或等离子体相变需要的碰撞速度更低<sup>[14,19]</sup>。超高速碰撞产生碎片云时,碎片云的运动速度基本与碰撞速度处于同一量级,因此,当碎片云未处于真空环境时,环境气体会与处于膨胀运动中的碎片云发生高速的相对运动,从而烧蚀碎片,使碎片发生气化甚至是等离子体相变<sup>[16]</sup>。

如图 16(a)所示,电子在固定能级之间的跃迁在光谱中表现为线谱,超高速碰撞闪光中线谱来源于碰撞产生的气体和等离子体。为计算气体原子、等离子体中原子或离子的平均激发温度,方便起见,常采用玻尔兹曼斜率法。

以等离子体为例,等离子体中自发发射强度表示为:

$$I_{ul} = \frac{hc}{4\pi \lambda_{ul}} A_{ul} g_u \frac{n_e}{G} \exp\left(-\frac{E_u}{k_B T}\right) \quad (9)$$

式中:下标  $u, l$  分别表示高能级和低能级,  $\lambda_{ul}$  为线谱的中心波长,  $n_e$  为等离子体中电子数密度,  $G$  为配分函数,  $E_u$  为高能级能量。

对式(9)求对数,可以得到:

$$\ln \frac{I_{ul} \lambda_{ul}}{g_u A_{ul}} = -\frac{1}{k_B T} E_u + C \quad (10)$$

式中:  $C$  为常数。

以  $\ln \frac{I_{ul} \lambda_{ul}}{g_u A_{ul}}$  为纵坐标,  $E_u$  为横坐标,利用超高速碰撞实验中多条原子或离子的线谱信息进行拟合,得到线性函数的斜率,即  $-\frac{1}{k_B T}$ ,从而可求解等离子体中原子或离子在积分时间内的平均激发温度,用以分析碰撞产物在一段时间内的平均膨胀特征。

若考虑碎片与环境气体的烧蚀作用,欲得到碰撞中光谱辐射强度演化、辐射强度与碰撞条件的关系,则需要考虑碎片的运动方程、环境气体参数、烧蚀系数和阻碍系数等<sup>[16]</sup>,目前对于这方面的研究尚处于发展阶段。

## 5 展 望

尽管对超高速碰撞产生的电磁辐射现象已经进行了大量的实验和理论工作,对碰撞产生的微波和闪光的时频特性及产生机理进行了分析,但由于超高速碰撞过程非常复杂,且碰撞中产生的电磁辐射频段覆盖非常广,因此,在超高速碰撞产生的电磁辐射研究中仍然存在以下几个未解决的问题,值得大家关注:

(1)在真空环境下的超高速碰撞实验中,光谱分析表明碰撞会产生激发态离子谱线,从而证明了等离子体相变的产生,但对于产生等离子体相变的阈值速度或条件并不清楚,且没有具体的理论计算结果;

(2)随着超高速碰撞环境压力的增大,若考虑碎片云与环境气体的相互作用,对超高速碰撞产生等离子体的阈值、由等离子体诱发的电磁辐射又有怎样的影响;

(3)无线电波频段较宽,而实验主要集中在微波辐射的某些频段范围内,得到了碰撞条件对其辐射的影响,对其他频段的无线电波特性还并不清楚,因此无法更全面地评估超高速碰撞带来的电磁毁伤;

(4)当产生等离子体相变时,随着碰撞条件的改变,在无线电波的不同频段范围内,材料破坏和等离子体产生的无线电波各自占比或者贡献是怎样的还不清楚。

后续研究将针对以上提出的问题进行更深入和细致的工作,为深刻认识超高速碰撞产生的电磁辐射现象奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 经福谦. 超高速碰撞现象 [J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(3): 279-288.

- JING F Q. Hypervelocity impact phenomena [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1990, 10(3): 279–288.
- [2] PERKINS M A, SIMPSON J A, TUZZOLINO A J. A cometary and interplanetary dust experiment on the Vega spacecraft missions to Halley's Comet [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 1985, 239(2): 310–323. DOI: 10.1016/0168-9002(85)90731-4.
- [3] LEDERER S M, JENSEN E, FANE M, et al. Unveiling clues from spacecraft missions to comets and asteroids through impact experiments [C]//Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 2016: 331.01 <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016DPS...4833101L>.
- [4] A'HEARN M F, BELTON M J S, DELAMERE A, et al. Deep impact: a large-scale active experiment on a cometary nucleus [J]. *Space Science Reviews*, 2005, 117(1–2): 1–21. DOI: 10.1007/s11214-005-3387-3.
- [5] 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(2): 334–344. DOI: 10.1016/j.icarus.2007.03.030.
- [6] CRAWFORD D A, SCHULTZ P H. Laboratory observations of impact-generated magnetic fields [J]. *Nature*, 1988, 336(6194): 50–52. DOI: 10.1029/91JE02012.
- [7] ANZ-MEADOR P. Orbital debris quarterly news [R]. Texas: NASA Orbital Debris Program Office, 2020.
- [8] WU Q, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Potential space debris shield structure using impact-initiated energetic materials composed of polytetrafluoroethylene and aluminum [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 101903. DOI: 10.1063/1.4943584.
- [9] ZHANG P L, GONG Z Z, TIAN D B, et al. Comparison of shielding performance of Al/Mg impedance-graded-material-enhanced and aluminum whipple shields [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 126: 101–108. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.007.
- [10] FLETCHER A, MATHIAS D L, CLOSE S. Susceptibility of spacecraft to impact-induced electromagnetic pulses [C] // 2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2015: 1–6. DOI: 10.1109/RAMS.2015.7105118.
- [11] THOMSON G M, MCNEIR M R. Impact flash: a tool for rapid battle damage assessment [C] // Infrared Technology and Applications XXX. 2004, 5406: 690–700. DOI: 10.1117/12.538654.
- [12] LAWRENCE R J, REINHART W D, CHHABILDAS L C, et al. Spectral measurements of hypervelocity impact flash [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 33(1–12): 353–363. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2006.09.010.
- [13] RUDOLPH M. Review of radio frequency emission from hypervelocity impact plasmas [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58(1): 409–417. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.047.
- [14] SUGITA S, SCHULTZ P H, ADAMS M A. Spectroscopic measurements of vapor clouds due to oblique impacts [J]. *Journal of Geophysical Research Planets: E*, 1998, 103(8): 19427–19441. DOI: 10.1029/98je02026.
- [15] TAKANO T, MUROTANI Y, MAKI K, et al. Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(9): 5550–5554. DOI: 10.1063/1.1513885.
- [16] MA Z X, SHI A H, LI J L, et al. Radiation mechanism analysis of hypervelocity impact ejecta cloud [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 141: 103560. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103560.
- [17] SUGITA S, SCHULTZ P H. Interactions between impact-induced vapor clouds and the ambient atmosphere: 1. spectroscopic observations using diatomic molecular emission [J]. *Journal of Geophysical Research: E*, 2003, 108(6): 5051. DOI: 10.1029/2002je001959.
- [18] CLOSE S, LINSKOTT I, LEE N, et al. Detection of electromagnetic pulses produced by hypervelocity micro particle impact plasmas [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(9): 2102. DOI: 10.1063/1.4819777.
- [19] HEW Y M, GOEL A, CLOSE S, et al. Hypervelocity impact flash and plasma on electrically biased spacecraft surfaces [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 121: 1–11. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.008.
- [20] CLOSE S, KELLEY M, FLETCHER A, et al. RF signatures of hypervelocity impacts on spacecraft [C] // 3rd AIAA Atmospheric Space Environments Conference. 2011: 3150. DOI: 10.2514/6.2011-3150.
- [21] SUGITA S, SCHULTZ P H. Spectroscopic characterization of hypervelocity jetting: comparison with a standard theory [J]. *Journal of Geophysical Research Planets: E*, 1999, 104(12): 30825–30845. DOI: 10.1029/1999JE001061.
- [22] TAKANO T, IKEDA H, MAEDA T. Consideration of the mechanism of microwave emission due to material destruction [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8): 083722. DOI: 10.1063/1.3499291.
- [23] JEAN B, ROLLINS T L. Radiation from hypervelocity impact generated plasma [J]. *AIAA Journal*, 2012, 8(10): 1742–1748.

- DOI: 10.2514/3.5984.
- [24] MA Z X, SHI A H, LI J L, et al. Radiation evolution characteristics of the ejecta cloud produced by aluminum projectiles hypervelocity impacting aluminum plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 138: 103480. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103480.
- [25] MA Z X, HUANG J, SHI A H, et al. Analysis technique for ejecta cloud temperature using atomic spectrum [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 91: 25–33. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.008.
- [26] MA Z X, HUANG J, SHI A H, et al. The analysis technique for ejecta cloud temperature based on atomic spectrum [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 103: 357–364. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.04.033.
- [27] ZHANG K, ZHANG Q M, LONG R R. The experiment study on flash spectrum produced by hypervelocity impact [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 782: 197–203. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.782.197.
- [28] XUE Y J, ZHANG Q M, LIU D Y, et al. Hypersonic impact flash characteristics of a long-rod projectile collision with a thin plate target [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2): 368–376. DOI: 10.1016/j.dt.2020.02.011.
- [29] ZHANG Q M, GONG L F, MA Y F, et al. The electromagnetic properties of plasma produced by hypervelocity impact [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(2): 022906. DOI: 10.1063/1.5009067.
- [30] LI H W, HAN J W, CAI M H, et al. The analogue experiment of small space debris impact inducing solar array discharge [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103582. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103582.
- [31] 张凯. 超高速碰撞 LY12 铝靶产生电磁辐射实验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016. DOI: CNKI:CDMD:1.1018.811986.
- [32] ZHANG K, LONG R R, ZHANG Q M, et al. Flash characteristics of plasma induced by hypervelocity impact [J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(8): 083519. DOI: 10.1063/1.4960297.
- [33] LAWRENCE R J, REINHART W D, CHHABILDAS L C, et al. Hypervelocity impact flash at 6, 11, and 25 KM/S [C] // AIP Conference Proceedings. 2006, 845(1): 1349–1352. DOI: 10.1063/1.2263574.
- [34] DUGGER P, HENDRIX R. Measurements of transient hypervelocity impact phenomena at the AEDC [C] // 32nd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1994: 87. DOI: 10.2514/6.1994-87.
- [35] REINHART W D, THORNHILL T F, CHHABILDAS L C, et al. Temperature measurements of expansion products from shock compressed materials using high-speed spectroscopy [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(12): 1745–1755. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.062.
- [36] 石安华, 柳森, 黄洁, 等. 铝弹丸超高速撞击铝靶光谱辐射特性实验研究 [J]. *宇航学报*, 2008, 29(2): 715–717. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2008.02.061.
- SHI A H, LIU S, HUANG J, et al. Spectra measurement of radiation produced by aluminum projectiles impacting aluminum targets at hypervelocity speeds [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(2): 715–717. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2008.02.061.
- [37] 石安华, 柳森, 黄洁, 等. 超高速碰撞可见光谱辐射强度测量技术 [J]. *实验流体力学*, 2007, 21(4): 83–85. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2007.04.017.
- SHI A H, LIU S, HUANG J, et al. Visible spectral radiant intensity measuring technology for hypervelocity impact phenomena [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(4): 83–85. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9897.2007.04.017.
- [38] MEYER-VERNET N, MAKSIMOVIC M, CZECHOWSKI A, et al. Dust detection by the wave instrument on STEREO: nanoparticles picked up by the solar wind? [J]. *Solar Physics*, 2009, 256(1–2): 463–474. DOI: 10.1007/s11207-009-9349-2.
- [39] MEYER-VERNET N, LECACHEUX A, KAISER M L, et al. Detecting nanoparticles at radio frequencies: Jovian dust stream impacts on Cassini/RPWS [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3). DOI: 10.1029/2008GL036752.
- [40] GURNETT D A, KURTH W S, KIRCHNER D L, et al. The Cassini radio and plasma wave investigation [J]. *Space Science Reviews*, 2004, 114(1–4): 395–463. DOI: 10.1007/s11214-004-1434-0.
- [41] WARWICK J W, PEARCE J B, EVANS D R, et al. Planetary radio astronomy observations from Voyager 1 near Saturn [J]. *Science*, 1981, 212(4491): 239–243. DOI: 10.1126/science.212.4491.239.
- [42] WARWICK J W, EVANS D R, ROMIG J H, et al. Planetary radio astronomy observations from Voyager 2 near Saturn [J]. *Science*, 1982, 215(4532): 582–587. DOI: 10.1126/science.215.4532.582.
- [43] MAKI K, TAKANO T, FUJIWARA A, et al. Radio-wave emission due to hypervelocity impacts in relation to optical observation and projectile speed [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(5): 1085–1089. DOI: 10.1016/j.asr.2003.02.032.
- [44] MAKI K, SOMA E, TAKANO T, et al. Dependence of microwave emissions from hypervelocity impacts on the target

- material [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(10): 104911. DOI: 10.1063/1.1896092.
- [45] THOMA K, SCHÄFER F, HIERMAIER S, et al. An approach to achieve progress in spacecraft shielding [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(5): 1063–1075. DOI: 10.1016/j.asr.2003.03.034.
- [46] HERMALYN B, SCHULTZ P H, SHIRLEY M, et al. Scouring the surface: ejecta dynamics and the LCROSS impact event [J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 654–665. DOI: 10.1016/j.icarus.2011.12.025.
- [47] ERNST C M, SCHULTZ P H. Effect of initial conditions on impact flash decay [C] // Lunar and Planetary Science Conference. 2003: 2020. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003LPI....34.2020E>.
- [48] ERNST C M, SCHULTZ P H. Effect of velocity and angle on light intensity generated by hypervelocity [C] // Proceedings, 33rd Lunar and Planetary Science Conference. 2002: 1782. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2002LPI....33.1782E>.
- [49] BAIRD J K, HOUGH G R, KING T R. Velocity dependence of impact fluorescence [J]. *International Journal Of Impact Engineering*, 1997, 19(3): 273–276. DOI: 10.1016/S0734-743X(96)00039-5.
- [50] BURCHELL M J, KAY L, RATCLIFF P R. Use of combined light flash and plasma measurements to study hypervelocity impact processes [J]. *Advances in Space Research*, 1996, 17(12): 141–145. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00772-7.
- [51] MACCORMACK R W. Investigation of impact flash at low ambient pressures [C] // 6th Symposium on Hypervelocity Impact. 1963: 613–625.
- [52] EICHHORN G. Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements [J]. *Planetary and Space Science*, 1976, 24(8): 771–781. DOI: 10.1016/0032-0633(76)90114-8.
- [53] MISRA A. Electromagnetic effects at metallic fracture [J]. *Nature*, 1975, 254(5496): 133–134. DOI: 10.1038/254133a0.
- [54] FLETCHER A, CLOSE S, MATHIAS D. Simulating plasma production from hypervelocity impacts [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(9): 093504. DOI: 10.1063/1.4930281.
- [55] JU Y Y, ZHANG Q M, ZHANG D J, et al. Theoretical model for plasma expansion generated by hypervelocity impact [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(9): 092112. DOI: 10.1063/1.4895592.
- [56] ZEL'DOVICH Y B, RAIZER Y P. *Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena* [M]. Chicago: Courier Corporation, 2002.
- [57] GHISELLINI G. *Radiative processes in high energy astrophysics* [M]. New York: Springer, 2012: 873. DOI: 10.1007/978-3-319-00612-3.

(责任编辑 曾月蓉)