文章编号:1000-5773(2008)02-0220-05

超高速碰撞微波辐射强度测量*

马 平[1],柳 森[1],黄 洁[1],石安华[1],苗俊刚[2]

(1.中国空气动力研究与发展中心超高速空气动力研究所,四川绵阳 621000;
2.北京航空航天大学电子工程学院,北京 100083)

摘要:针对超高速碰撞物理现象研究需要,为了确认超高速碰撞过程中的电磁辐射信号能作为超高速碰撞产生的可探测物理量之一,利用研制的 8 mm 微波辐射计在中国空气动力研究与发展中心 FD-18A 超高速碰撞靶开展了超高速碰撞过程中的微波辐射强度测量初步试验研究。对试验测量方案进行了介绍,获得了弹丸超高速撞击半无限铝靶和半无限铜靶时产生的微波辐射强度测量试验结果。弹丸为∅5 mm 的 LY12 铝球,撞击速度 1.98～4.3 km/s,撞击角为 0°,结果表明:在本试验条件下,超高速碰撞产生了明显的微波辐射强度,材料的不同导致碰撞过程中产生的微波辐射强度差别较大。

关键词:超高速碰撞;微波辐射;测量
中图分类号:O347 **文献标识码**:A

1 引 言

随着人类太空活动的增加,太空垃圾对航天器的威胁日益严重。开展超高速碰撞现象研究对于建立空间飞行器被撞事件探测及撞击破坏程度评估具有十分重要的意义。碰撞过程中的电磁辐射作为描述超高速碰撞产生的可探测物理量之一,国外开展了相关研究工作[1]。当超高速弹丸撞击到物体时,产生强烈的物理化学过程而产生电磁辐射,辐射的强度和时间延迟依赖于目标的损坏程度。因此,人们可以利用这个现象研究超高速碰撞毁伤机理、探测空间碎片对空间飞行器的损伤[2]。

图 1 是日本 Institute of Space and Astron-Autical Science 利用微波辐射计测量获得的碰撞微波辐射与时间的关系曲线(靶材:2 mm 厚铝板;弹丸:速度为 4 km/s、直径为 7 mm 的尼龙球)[3]。在应用方面,美国等航天大国开展了利用空间碎片撞击航天器产生的微波辐射、无线电波辐射等来感知碎片撞击的强度等特征的研究,利用超高速碰撞过程中电磁辐射现象研究超高速碰撞和空间碎片碰撞空间飞行器的损伤机理[1,3]。

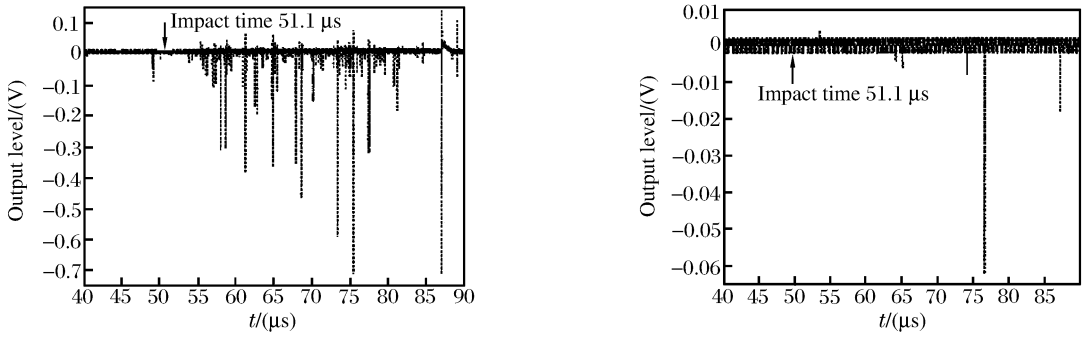
结合超高速碰撞物理现象研究领域发展的需要,本文介绍了在碰撞靶上开展超高速碰撞试验研究的碰撞微波辐射强度测量技术及其试验结果。

2 测量方案

2.1 碰撞微波辐射强度分析

超高速碰撞产生的微波辐射强度与弹丸材料、弹丸速度、弹丸大小以及靶材材料、靶材结构和碰撞角度等相关。微波辐射计可应用于超高速碰撞过程中的辐射强度测量。对于在碰撞靶上开展的超高速碰撞试验研究来说,通常弹丸直径在 10 mm 以下,速度在 7 km/s 以下,超高速碰撞产生的微波辐射信号变化很快,信号较小,结合国外测量结果(见图 1),设计 8 mm 微波辐射计系统的灵敏度 $1.7\times10^{-13}\,\mathrm{W\cdot Sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}}$。

* **收稿日期**:2007-06-14;**修回日期**:2007-11-12
作者简介:马 平(1976－),男,硕士,工程师,主要从事超高速碰撞光电测试研究. E-mail:hbmaping@263.net



(a) 22 GHz　　(b) 2 GHz

图 1　超高速碰撞后物体辐射的电磁能量

Fig. 1　The microwave radiation due to hypervelocity impacts

2.2　8 mm 微波辐射计

微波辐射计实质是一种接收微弱信号的高灵敏度接收机,因为在一定温度下自然界的任何一种物体,都会辐射出各种波长的电磁波,同时也被别的物体发射的电磁波照射,因而微波辐射计可利用物体在微波波段的辐射特性来探测目标,工作原理如图 2 所示。

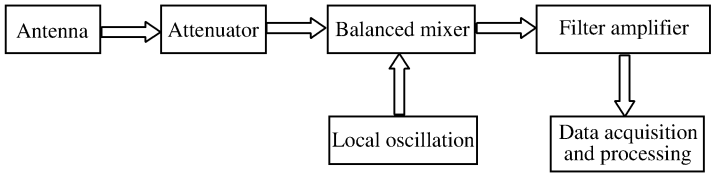


图 2　微波辐射计原理框图

Fig. 2　The block diagram of microwave radiometer

在微波辐射测量中,都是用天线接收微波辐射的能量,然后将其所接收的辐射能量通过匹配波导送至超外差接收机上进行测量。

具有超低噪声的高灵敏度接收机性能将直接决定系统的温度灵敏度,如何在增加接收机增益的同时降低系统噪声是需要重点解决的问题。采用超外差式接收机从技术实现上比较成熟,系统设计中严格控制馈线的 VSWR(电压驻波比),并采用低噪放器件和通带波纹小的宽频放大器,以提高接收机的灵敏度。

2.3　试验方案

试验在中国空气动力研究与发展中心超高速研究所的 FD-18A 超高速碰撞靶上进行。该靶是一座专门用于超高速撞击试验研究的弹道靶设备(见图 3)[4],包括发射器、测控系统和靶室/真空 3 个分系统。其中发射器是一座 7.6 mm 口径二级轻气炮,最高发射速度大于 7 km/s;测控系统包括三站激光测速装置和一套阴影照相设备,测速精度优于 2.9‰。

利用 FD-18A 超高速碰撞靶,采用如图 4 所示的试验方案,探测超高速碰撞产生的微波辐射脉冲。试验系统主要由下列几个部分组成:(1) 弹丸和靶材;(2) 发射器;(3) 测控系统;(4) 8 mm 微波辐射计。



图 3　FD-18A 超高速碰撞靶

Fig. 3　FD-18A hypervelocity impact facility at HAI,CARDC

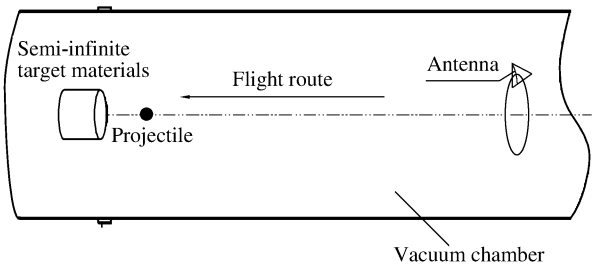


图 4　试验方案示意图

Fig. 4　The sketch of the test program

7.6 mm 口径二级轻气炮将弹丸发射到需要的速度,布置在弹丸飞行弹道上的测控系统记录下弹丸通过不同位置的时刻,计算出弹丸飞行速度,同时给 8 mm 微波辐射计测量系统提供触发信号。半无

限靶安装在靶室的轴线上，碰撞面与靶室轴线垂直；天线及 8 mm 微波接收机安装在靶室内靠近轴线的位置，与靶材的距离大于 0.5 m；数据采集及处理系统放置在靶室外。

2.4 微波辐射测量系统标定[5]

在对微波辐射强度进行测量之前需要对微波辐射计进行标定。微波辐射计定标就是用天线去接收一个微波辐射特性已知的定标源的辐射信号，建立辐射功率与温度之间的对应关系，得到辐射通量与等效温度之间的定量关系。

对于黑体，在毫米波频段以下区域，其辐射亮度可用瑞利-琼斯公式 $B_f=2kT/\lambda^2$ 表示，即黑体辐射强度和温度之间存在线性依赖关系。

设辐射源的谱亮度为 $B_f(\theta,\varphi)$，它是辐射区域坐标(θ,φ)的函数；且 $B_f(\theta,\varphi)$是无极化的，即辐射电磁波的极化是随机均匀分布的，而接收天线通常是线极化的，因而仅有一半的功率被接收到。

在频率 $f\sim f+\Delta f$ 范围内，天线接收的总辐射功率为

$$P=\frac{1}{2}A_e\int_f^{f+\Delta f}\iint_{4\pi}B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\,d\theta\,d\varphi\,df \tag{1}$$

式中：A_e 为天线有效面积，m^2；F_n 为天线归一化方向图。

由于测量中 $\Delta f\ll f$，可认为在带宽 Δf 内，$B_f(\theta,\varphi)$近似为一个与频率无关的函数，瑞利-琼斯公式 $B_f=2kT/\lambda^2$ 代入上式，可得

$$P=\frac{1}{2}\,\frac{\lambda^2}{4\pi}\iint_{4\pi}B_f(\theta,\varphi)F_n(\theta,\varphi)\,d\theta\,d\varphi \tag{2}$$

根据天线理论，对方向图的积分为

$$\iint_{4\pi}F_n(\theta,\varphi)\,d\theta\,d\varphi=\frac{\lambda^2}{A_e} \tag{3}$$

将(3)式代入(2)式可得天线接收到的总辐射功率为

$$P=kT\Delta f \tag{4}$$

式中：k 为玻尔兹曼常数。T 不是一个常数而是一个方向函数，表示天线主瓣观测到的目标的亮度温度，即目标的等效黑体温度。

考虑到天线口径、目标尺度均远小于测量距离，因此，目标在天线方向上的辐射强度可由下式表示

$$I=P/A_e \tag{5}$$

在计算过程中，认为辐射计的线性良好，两点定一条直线，辐射计采集的平均功率与外界亮温对应，定标亮温为室温(293 K)时，收到的平均功率为 0.995 38 mW；定标亮温为液氮(77.4 K)时收到的平均功率为 0.624 14 mW，得到定标曲线(如图 5 所示)为亮温 T_a(K)与辐射计接收到的平均功率 P(W)关系式

$$T_a=5.8076\times10^5\times(P-6.2414\times10^{-4})+77.4 \tag{6}$$

根据定标曲线，根据(4)式可由亮温计算碰撞辐射时天线接收的总功率。

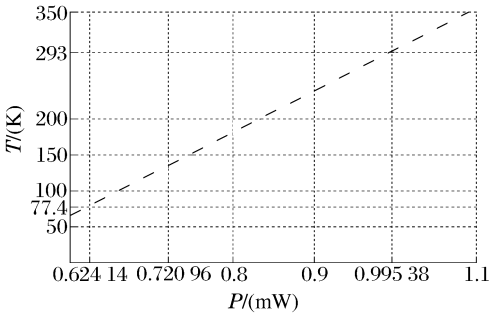


图 5 辐射计定标曲线

Fig. 5 The calibration curve of the micorwave radiometer

试验中，测量到目标辐射功率 P 后，利用(6)式即可求得目标的等效黑体温度 T，然后利用(4)式可得天线接收到的总辐射功率，最后由(5)式得到目标的微波辐射强度。

2.5 数据采集及处理

由于碰撞过程极短，要求微波辐射测量系统具有快速响应能力。微波辐射测量系统具有 50 MHz 带宽，选择数据采集系统分辨率 14 位，采样频率 200 Ms/s。数据处理软件可对信号进一步滤波，消除高频噪声影响后，对电信号进行转换，得到碰撞微波辐射强度随碰撞时间历程的变化。

3　试验结果与分析

试验条件如下。(1) 弹丸:∅5 mm 铝合金(LY12)球,速度为 1.98～4.30 km/s;(2) 靶材:铝合金(LY12)半无限靶,黄铜半无限靶;(3) 碰撞角:0°;(4) 试验环境压力:小于 400 Pa;(5) 测量中心频率为 $f_0=34.975$ GHz,带宽为 $\Delta f=50$ MHz;(6) 天线与靶材中心的测量距离 0.8 m,天线测量轴线与靶板法向成 7°角。

图 6、图 7 和图 8 分别是试验测量结果,其中图 8 中弹丸撞击铝合金靶的速度分别为:2.9、3.2、3.4、4.3 km/s,弹丸撞击铜靶的速度分别为:1.98、2.7、2.9、3.0、4.3 km/s。

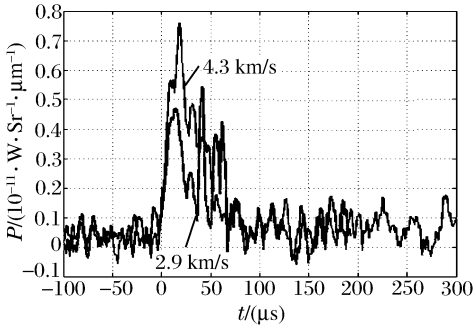


图 6　靶材为 LY12Al 时的碰撞微波辐射强度

Fig. 6　The microwave radiation intensity of LY12 Al target materials due to hypervelocity impacts

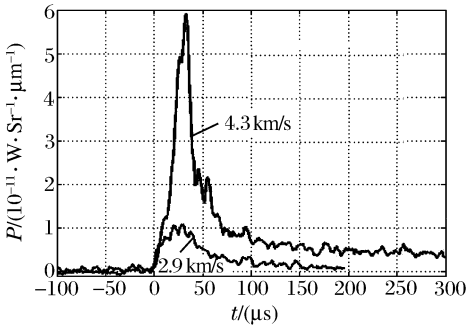


图 7　靶材为黄铜时的碰撞微波辐射强度

Fig. 7　The microwave radiation intensity of brass target materials due to hypervelocity impacts

从图 6～图 8 可以看出:

(1) 碰撞微波辐射强度迅速上升,说明微波辐射测量系统具有快速响应能力;

(2) 随着弹丸速度的增加,弹丸对同一靶材撞击产生的微波辐射强度明显增强。说明弹丸速度对碰撞微波辐射强度有较大影响。

(3) 在弹丸及速度相同情况下,对黄铜撞击产生的微波辐射强度远大于对 LY12Al 靶材撞击的微波辐射强度。说明靶材不同,产生的碰撞微波辐射强度也会不同。

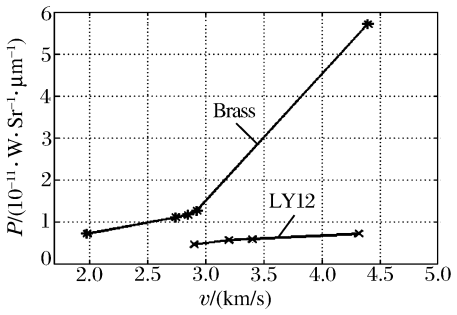


图 8　LY12Al、黄铜靶材碰撞辐射强度随速度的变化

Fig. 8　The microwave radiation intensity of LY12 Al and brass target materials at different impacts velocities

超高速碰撞产生的微波辐射已被探测到,试验结果表明,目标微波辐射强度依赖于目标的损坏程度(即随着弹丸速度的增加,弹丸对同一靶材撞击产生的微波辐射强度明显增强)。对于该现象,可作如下解释。在超高速碰撞过程中,弹丸将动能释放在靶材很小的面积上,在这一过程中存在内能的转化和传递,靶材获得能量并将该能量转化为靶材的热力学能。超高速碰撞引起材料加热,导致局部温度可能高达 10^4 K。在碰撞的初始阶段,在极端条件下喷出物的部分物质会发生电离[6-7],产生等离子体云。高温等离子体云向外辐射电磁波。等离子体云与碰撞的速度、材料、角度等因素有关,产生了不同的碰撞微波辐射强度。

在本试验条件下,开展了超高速碰撞的微波辐射与撞击速度的关系、同一弹丸对不同靶材的超高速碰撞情况初步研究。结果表明,超高速碰撞过程中的电磁辐射现象可以作为研究超高速碰撞毁伤的可测物理量之一。

但是,微波辐射强度不仅与弹丸材料、弹丸速度、靶材材料,而且与弹丸大小、靶材结构和碰撞角度等因素有关。

今后,我们将开展包括微波辐射强度与弹丸材料、弹丸大小、靶材结构等因素在内的研究因素范围

更广的工作，深入研究超高速碰撞过程中电磁辐射现象，为超高速碰撞毁伤机理提供技术支持。

4 结 论

(1) 通过试验获得了∅5 mm 铝合金(LY12)球在速度约为 1.98～4.3 km/s 条件下撞击 LY12Al 和黄铜半无限靶产生的微波辐射结果。

(2) 随着弹丸速度的增加，弹丸对同一靶材撞击产生的微波辐射强度明显增强。

(3) 在相同速度条件下不同材料产生的微波辐射强度差别较大。

References:

[1] Bianchi R, Capaccioni F, Cerroni P. Radiofrequency Emission Observed during Macroscopic Hypervelocity Impact Experiments [J]. Nature, 1984, 308: 830-832.

[2] Takayo T, Murotani Y, Toda T, et al. Microwave Generation due to Hypervelocity Impact [A]//51th IAF Congress, IAA-OO-IAA [C]. Riode Janeiro, Brazil, 2000.

[3] Takano T, Murotani Y, Toda T. Microwave Emission due to Hypervelocity Impacts and Its Correlation with Mechanical Destruction [J]. J Appl Phys, 2002, 92(9): 5550-5554.

[4] Liu S, Li Y. The Ballistic Limit Experiments on the Whipple Shield [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(2): 205-207. (in Chinese)
柳 森，李 毅. Whipple 防护屏弹道极限参数试验 [J]. 宇航学报，2004，25(2)：205-207.

[5] Zhang Z Y. A Theoretical Analysis and Scale Shrinking Measurement of the Microwave Radiation Characteristic of Metal Objects [J]. J Huazhong Univ Sci Tech, 1994, 22(4): 85-88. (in Chinese)
张祖荫. 金属目标微波辐射特性的理论分析和缩比测量 [J]. 华中理工大学学报，1994，22(4)：85-88.

[6] Lai S T, Murad E, McNeil W J. Hazards of hypervelocity Impacts on Spacecraft [J]. Spacecraft & Rockets, 2002, 39(1): 106-114.

[7] McDonnell J A M. Cosmic Dust [M]. New York: Wiley, 1987.

Microwave Radiation Measurement on Hypervelocity Impacts

MA Ping[1], LIU Sen[1], HUANG Jie[1], SHI An-Hua[1], MIAO Jun-Gang[2]

(1. *Hypervelicity Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research & Department Center, Mianyang* 621000, *China*;
2. *School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The microwave radiation intensity measurement on hypervelocity impacts were conducted with the 8 mm microwave radiometer at the hypervelocity impact facility at HAI, CARDC. The paper presented the test results of the microwave radiation resulted from hypervelocity impacts on the semi-infinite aluminum and semi-infinite copper target materials. The projectiles were LY12 aluminum spheres with impact velocity ranged from 1.98 km/s to 4.3 km/s. The projectiles were 5 mm in diameter. The impact angle is 0°. The microwave radiation intensity were measured in the approach of fixing projectiles, varying projectile velocity and target materials. The results showed that the hypervelocity impact induced microwave radiation could be detected obviously under test conditions. The microwave radiation intensity of the semi-infinite copper target materials duo to hypervelocity impacts was higher than that of the semi-infinite aluminum target materials under the same conditions.

Key words: hypervelocity impacts; microwave radiation; measurement