

文章编号: 1001-1455(2013)02-0156-07

# 二维平纹编织 C/SiC 复合材料的超高速碰撞实验\*

杨扬<sup>1,2</sup>, 徐绯<sup>1</sup>, 张岳青<sup>1</sup>, 莫建军<sup>3</sup>, 陶彦辉<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学航空学院结构工程系, 陕西 西安 710072;

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. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用电炮加载聚酯薄膜飞片分别对二维平纹编织 C/SiC 复合材料(2D-C/SiC)和 LY12 硬铝材料在 3.4~9.5 km/s 速度下进行碰撞实验。利用光纤位移干涉仪测定了靶材的自由面速度, 并对高速撞击碎片颗粒进行了收集, 采用超声波扫描系统无损检测等方法对 2D-C/SiC 材料在超高速冲击载荷作用下的力学响应进行了检测。结果表明, 随着冲击能量的增大, 2D-C/SiC 材料板自由面速度逐渐升高, 损伤局部且面积逐渐增大, 碎片云团作用区域逐渐变大。与铝板相比, 2D-C/SiC 材料碎片云团整体能量较小、作用区域较大、能量面密度较低, 是飞行器防护结构设计中一种比较理想的防护材料。

**关键词:** 爆炸力学; 超高速碰撞; 电炮; 二维平纹编织 C/SiC 复合材料; 碎片云

**中图分类号:** O383

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

绕地轨道上运行的众多航天器在通讯中继、定位导航、科学研究、国家安全等领域扮演着极其重要的角色, 然而, 这些航天器在发射和运行过程中, 由于各种原因所产生的大量空间碎片正在严重威胁着人类航天活动的安全。空间碎片以超高速运动撞击到航天器, 会在航天器表面留下凹坑和伤痕, 甚至会造成灾难性的后果。目前, 对于直径 10 cm 以上的空间碎片, 航天器可采取主动规避方式予以防护; 但是, 对于众多的厘米级大小及更小的空间碎片, 航天器已无法避免与其碰撞, 只能通过加强自身防护能力的被动防护方式来应对, 这就对航天器防护系统的研究提出了很高的要求<sup>[1]</sup>。

航天器防护系统的基础就是防护材料, 面对复杂的空间环境, 研究具有高比强度的结构材料, 开展材料在航天器服役环境下的力学特性与使役行为研究变得更加重要。碳纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料(C/SiC)克服了传统陶瓷材料脆性大和可靠性差的弱点, 具有高比强度、高比模量、耐高温、抗氧化和低密度等许多优点, 在飞行器耐超高温部件设计、航空与航天发动机和热防护系统等领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>, 但是针对其抗冲击能力的研究尚未见报道。

根据碳纤维编织形式的不同, C/SiC 复合材料主要分为二维平纹编织 C/SiC 复合材料(2D-C/SiC)和三维编织 C-SiC 复合材料(3D-C/SiC)。近年来, 对 3D-C/SiC 的力学性能<sup>[3-6]</sup>以及超高速冲击下的力学特性和破坏机理<sup>[7]</sup>有一些研究。但是, 对 2D-C/SiC 的研究并不多见, 已有的结果仅限于对其宏观抗压性能<sup>[8]</sup>、剪切性能<sup>[9]</sup>和疲劳性能<sup>[10]</sup>的研究。

本文中, 拟对 2D-C/SiC 材料的抗冲击能力进行实验, 并在同等条件下与 LY12 硬铝薄板实验进行对比分析。

## 1 实验

利用金属箔电爆炸驱动聚酯薄膜飞片产生短脉冲冲击波的加载技术(电炮), 结合光纤位移干涉仪、

\* 收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-06-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90916027);

爆炸科学与技术国家重点实验室开放基金项目(KFJJ12-14M)

作者简介: 杨扬(1986—), 男, 博士研究生。

高压探头等光电子学测试手段,对 2D-C/SiC 材料在超高速飞片碰撞作用下的力学响应问题进行了实验研究,获得了超高速飞片碰撞下 LY12 硬铝和 2D-C/SiC 材料自由面速度历程,并对实验样品和碎片云进行了采集。

### 1.1 实验设备

#### 1.1.1 加载装置

2D-C/SiC 材料超高速冲击实验在高性能电炮装置上进行,该电炮装置主要由储能电容器、平板传输线、能量转换开关、爆炸桥箔负载等部件组成。电路原理如图 1(a)所示,主要性能参数为:电容器电容  $31.8 \mu\text{F}$ ,回路电阻  $11 \text{ m}\Omega$ ,短路回路电感  $49 \text{ nH}$ ,放电周期  $7.9 \mu\text{s}$ ;核心部件爆炸桥箔板的结构如图 1(b)所示,大小为  $12.5 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 0.05 \text{ mm}$ ;有机玻璃加速腔尺寸为  $\varnothing 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。

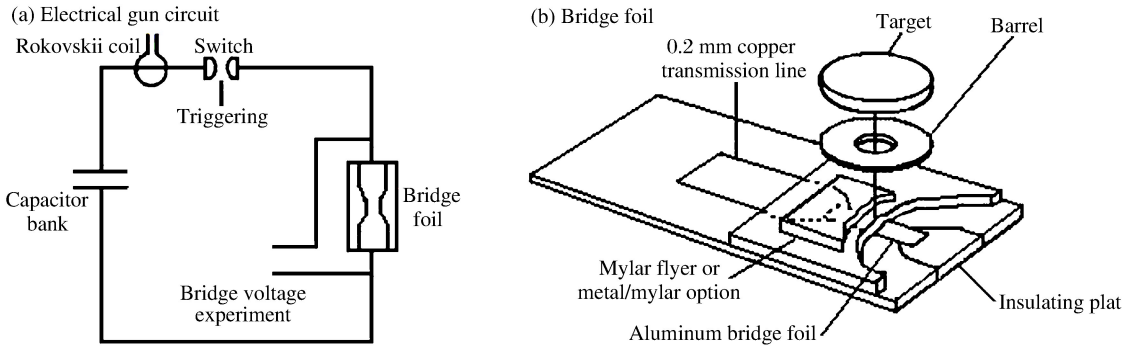


图 1 电炮示意图

Fig. 1 Sketch of the electrical gun

电炮的基本工作原理是:开关接通后,储存在电容器里的能量开始释放,回路产生较大的电流。当大电流经过加载区时,搭接在桥箔板的金属箔由于横截面积最小,导致线电流密度急剧增大,使桥箔板的金属箔快速发生固体→液体→气体相变,进而被两端的高压击穿形成等离子体,等离子体膨胀推动置于金属箔上的聚酯薄膜经有机玻璃加速腔边界切割形成飞片,飞片在加速腔中加速一定距离后达到最大速度,最终撞击靶板<sup>[11]</sup>。

#### 1.1.2 测速装置

实验中靶板材料的自由面速度利用全光纤位移干涉仪系统(Doppler pins system, DPS)测量,其基本原理是利用光学多普勒效应实现对速度的测量。发射器发出 2 束单一频率  $f_0$  的激光,一束直接到达接收器,另一束通过光学探头垂直照射到待测物体表面,经物体反射后传回接收器。此时,当物体相对探头运动时,反射光频率会发生改变,根据接收器收到的频率变化可以计算出物体的运动速度<sup>[12]</sup>,其基本原理如图 2 所示。

在实验中,由于 2D-C/SiC 表面反光效果较差,无法满足光纤位移干涉仪的测量条件,因此需要在靶板(包括铝板)背部自由面粘贴厚度  $8 \mu\text{m}$  的铝膜,通过测量实验过程中铝膜自由面速度可以推出靶材的自由面速度。

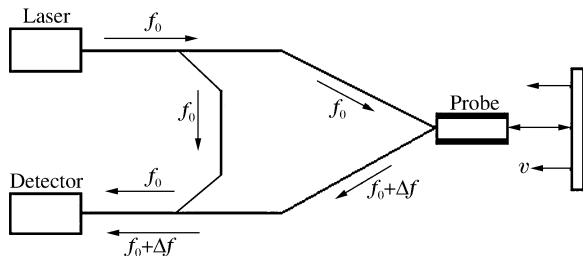


图 2 DPS 原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DPS

## 1.2 实验材料

由于加载装置的要求,实验中的弹丸选用 $\varnothing 10\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}$ 的聚酯薄膜(mylar)飞片,质量约 $0.01\text{ g}$ ,密度 $1.38\sim 1.4\text{ g/cm}^3$ ,拉伸强度可达 $200\text{ MPa}$ ,弹性模量在 $4\text{ GPa}$ 以上,飞片的表面平整度小于 $25\text{ ns}$ 。

实验采用2D-C/SiC材料,厚 $3\text{ mm}$ ,密度 $2.0\sim 2.1\text{ g/cm}^3$ ,制备完成后切割成 $115\text{ mm}\times 115\text{ mm}$ 的正方形薄板作为实验靶板,铝板选用普通的硬铝LY12材料。

选用厚 $5\text{ mm}$ 的聚甲基丙烯酸酞亚胺(PMI)泡沫板作为采集板,主要用于在靶材后方的固定距离处接受碎片云团的轰击。PMI泡沫塑料是一种轻质、闭孔的硬质泡沫塑料,具有良好的力学性能、热变形温度和化学稳定性,可使得冲击产生的碎片较易嵌入其中,便于后续测量和数据分析。

## 1.3 实验计划

Mylar飞片超高速撞击2D-C/SiC靶板和LY12硬铝靶板实验分为2大类:(1)收集类,飞片超高速撞击靶板,形成碎片云团轰击PMI采集板;(2)测速类,利用DPS系统测量飞片撞击靶板时自由面碎片的脱靶速度。PMI采集板距靶材背面 $70\text{ mm}$ ,飞片冲击速度 $3.4\sim 9.5\text{ km/s}$ 。受实验条件限制,收集实验和测速实验不能同时进行。具体实验参数如表1所示,表中 $v_p$ 为弹丸速度, $E_p$ 为弹丸能量。

表1 超高速碰撞实验参数

Table 1 Hypervelocity impact experiment parameters

实验编号	靶板材料	$v_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_p/\text{J}$
S-1	Al	5.2	148.7
S-2	Al	9.5	496.2
S-3	2D-C/SiC	5.0	137.4
C-1	Al	5.0	137.4
C-2	2D-C/SiC	5.0	137.4
C-3	2D-C/SiC	9.3	475.5
S-4	2D-C/SiC	9.3	475.5
S-5	2D-C/SiC	3.4	63.6
C-4	Al	3.4	63.6
C-5	2D-C/SiC	3.4	63.6

注:实验编号为S的均为收集类实验;编号为C的为测速类实验。

## 2 实验结果与分析

实验阶段,利用电炮加载装置共完成10发超高速撞击实验,其中2D-C/SiC材料6发,铝板4发。在后续分析阶段,主要完成3项工作:(1)测定靶板在超高速mylar飞片冲击时,背部自由面碎片的脱靶速度;(2)在靶板后方固定距离处设置采集板,接受碎片云团轰击,收集碎片颗粒;(3)观测2D-C/SiC靶板在超高速冲击下的损伤情况和穿孔形貌。下面依次对上述3点内容进行分析说明。

### 2.1 自由面速度

共完成5发测速实验,其中2D-C/SiC板3发,铝板2发。DPS可以获得靶板背部所粘贴铝膜自由面的速度历程,图3中给出了冲击速度 $5\text{ km/s}$ 时2D-C/SiC板和Al板自由面速度历程曲线,图中 $U$ 表

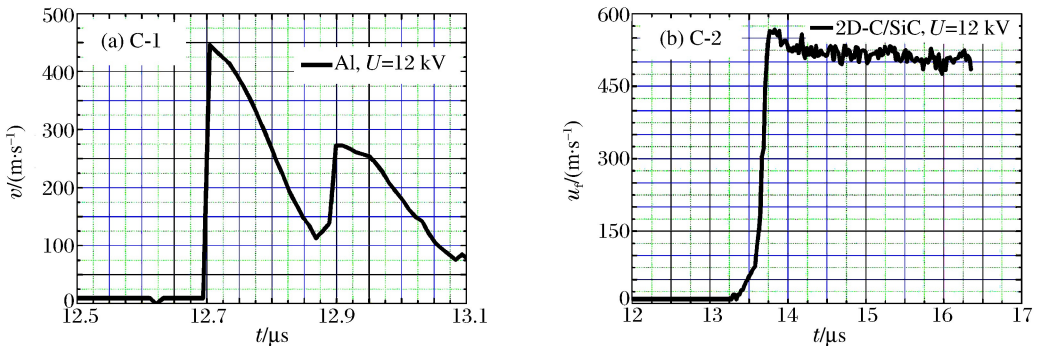


图3 靶板自由面速度历程

Fig. 3 Velocity histories of the free surface

示电炮加载时的充电电压。从图中可以看出,当靶材受到 mylar 飞片撞击后,2D-C/SiC 板被穿透,初始应力波传播到靶板背面时即引起铝膜损坏,无法测得反向拉伸波;而对于 Al 板,则存在明显的应力波反射现象,进而在 Al 板背面产生层裂片飞出。因此,根据应力波传播原理和动量定理,在利用上述铝膜自由面的速度历程曲线计算靶材背部碎片脱靶速度时,应该将 Al 板的实测速度取 2 倍处理。

图 4 中给出了 2D-C/SiC 靶材和硬铝 LY12 自由面速度的比较曲线,从图中可以看出:(1) 随着冲击能量的增大,2D-C/SiC 靶板自由面碎片速度逐渐升高,但增大趋势逐渐减小;(2) 在同样能量的冲击下,Al 板碎片速度大于 2D-C/SiC 板自由面速度,这说明相与 Al 相比,2D-C/SiC 板背部碎片云团整体能量较低。

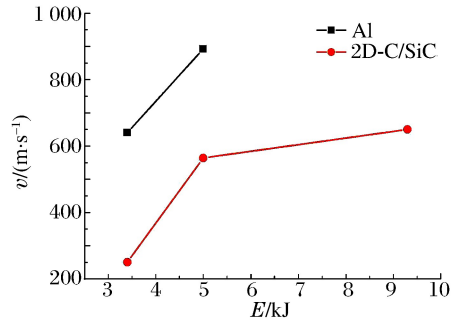


图 4 靶板自由面速度变化曲线

Fig. 4 Velocity curves of the free surface

### 2.2 碎片云分析

当超高速飞片撞击薄靶板时,由于靶内压缩波和拉伸波的共同作用,靶板会出现层裂,形成固体颗粒。当碰撞速度足够高时,这些碎裂的固体颗粒大部分会以一定的形态向前抛出,轰击靶板正后方 70 mm 处放置的 PMI 泡沫板,根据泡沫板上颗粒和成坑的分布可以测量碎片云分布区域。由于实验中采用的 mylar 膜弹片很薄,并且 mylar 膜强度、熔点都很低,在撞击的高压作用下易发生相变,极难形成碎片而进入碎片云中。因此,不妨假设碎片云中仅含有靶材碎片,而没有弹丸碎片。碎片云 PMI 采集板如图 5 所示。

(a) S-1(Al,  $v_p=5.2$  km/s)

(b) S-5(2D-C/SiC,  $v_p=3.4$  km/s)

(c) S-3(2D-C/SiC,  $v_p=5.0$  km/s)



图 5 碎片颗粒采集板

Fig. 5 Collector plates of the fragments

通过观察 PMI 采集板上的颗粒分布情况可以大致推测碎片云团的组分构成。在碎片云团中心,靶材粉末化效应比较严重;随着碎片云分散角的逐渐增大,靶材粉末化效应逐渐减轻,碎片颗粒直径逐渐增大,颗粒分布从中心向外渐变。

若假设 2D-C/SiC 薄板碎片云团呈圆锥状分布,可以通过测量 PMI 板上碎片颗粒的分布区域直径  $D$  确定碎片云团在后板上的作用区域,测量结果如表 2 所示;依据表中数据,为了便于观察变化规律,给出碎片云团在后板作用区域直径随冲击速度的变化曲线,如图 6 所示。

由图 6 可以看出:随着冲击速度的增大,碎片作用区域直径逐渐增大,但变大的速度逐渐减小;与 Al 板相比,2D-C/SiC 板碎片作用区域较大,这说明对于相同能量的冲击,2D-C/SiC 板的碎片云团能量

更为分散。另一方面,由 2.1 节的分析已经知道,在相同能量的冲击下,2D-C/SiC 板较 Al 板而言,碎片云团能量较低。因此综合而言,对于相同能量的冲击,2D-C/SiC 板产生的碎片云团作用于被防护的飞行器主壳体单位面积上的能量要远小于 Al 板的碎片云团,对飞行器主壳体的威胁大大减小。

表 2 碎片云作用域直径

Table 2 Diameter of debris cloud scope

靶板材料	$v_p / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$D / \text{mm}$
Al	5.2	80
Al	9.5	105
2D-C/SiC	3.4	50
2D-C/SiC	5.0	110
2D-C/SiC	9.3	120

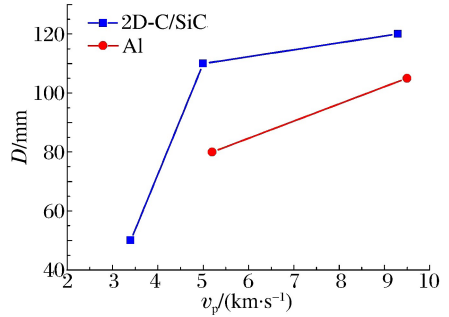


图 6 碎片分布域直径

Fig. 6 Diameter of fragment distribution area

### 2.3 损伤情况分析

为了更加准确地获取实际损伤范围,对实验靶材进行了超声波无损检测。采用水浸式 ULTRA-PAC 自动超声扫描检测系统进行检测,根据经验,对于孔隙率较高的 2D-C/SiC 使用频率为 5 MHz 的探头。对不同冲击速度下每个靶板的正面与背面分别进行了扫描,图 7 中给出了 5.0 km/s 冲击速度下靶板的冲击图片和 C 扫描损伤检测结果。

从图 7 可以看出:靶板上有明显的辐射状痕迹,这是 mylar 膜飞片在高速撞击靶板时发生了瞬间相变,产生的高压气体快速流动所致;超高速冲击载荷的作用使得 2D-C/SiC 材料出现了明显的碎片剥落,穿孔周围编织状碳纤维暴露出来。

图 7 图例中的不同颜色表示探头接收到的回波能量占原始探头所发射入射波能量的百分比,即试样的损伤程度。图上中心白色区域表示探头没有收到回波信号,这是超高速冲击造成靶材中心穿孔和穿孔周边的材料剥落造成的;在白色区域周围,存在一个损伤程度逐渐减轻的宽度较小的过渡带,分层

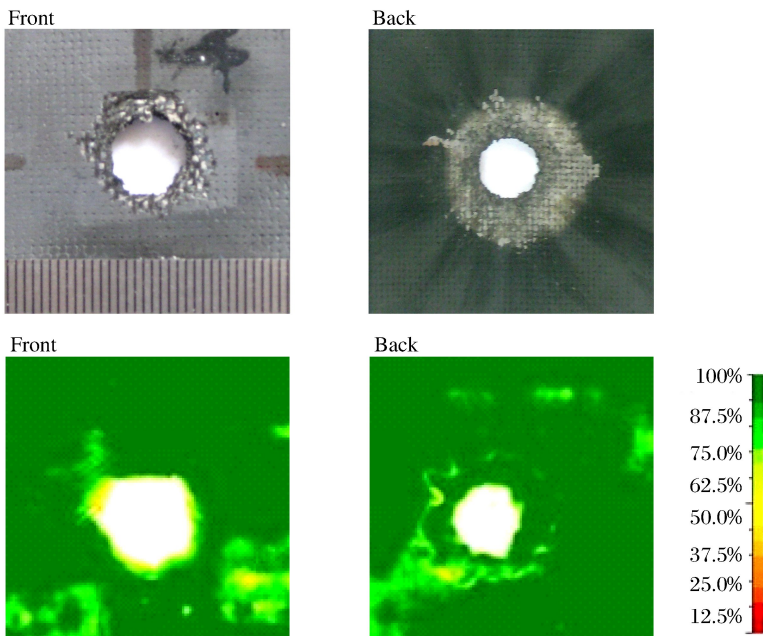


图 7 损伤形貌及无损检测结果

Fig. 7 Results of damage morphology and non destructive inspection

是这一过渡带区域内主要的损伤形式;远离冲击点出现的损伤,除了超声检测过程中噪声的影响,靶材内部的大量孔隙以及纤维编织造成的表面粗糙度较大是造成这一现象的主要原因。与文献[13]的低速落锤冲击研究结果类似,在超高速冲击载荷作用下,2D-C/SiC 板的损伤一般只会发生在以载荷作用点为中心的局部范围内。

### 3 结 论

利用电炮加载 mylar 膜飞片完成了 2D-C/SiC 复合材料的超高速冲击实验。实验结果分析表明:一方面,在超高速冲击载荷作用下,随着冲击能量的增大,2D-C/SiC 材料自由面速度逐渐升高,损伤局部,损伤面积逐渐增大,碎片云团作用区域逐渐变大;另一方面,与铝板相比,2D-C/SiC 材料碎片云团整体能量较小,作用区域较大,能量面密度较低,大大减小对防护对象的破坏,是航天器防护结构设计中一种比较理想的防护材料。

### 参考文献:

- [1] Bernhard R P, Christiansen E L, Kessler D E. Orbital debris as detected on exposed spacecraft[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997,20(1/2/3/4/5):111-120.
- [2] 张立同,成来飞,徐永东. 新型碳化硅陶瓷基复合材料的研究进展[J]. *航空制造技术*, 2003(1):24-32.  
Zhang Li-tong, Cheng Lai-fei, Xu Yong-dong. Progress in research work of new CMC-SiC[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003(1):24-32.
- [3] Xu Y D, Zhang L T. Mechanical properties of 3D fiber reinforced C/SiC composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2001,300(1/2):196-202.
- [4] 王波,矫桂琼,潘文革,等. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究[J]. *复合材料学报*, 2004,21(3):110-114.  
Wang Bo, Jiao Gui-qiong, Pan Wen-ge, et al. Tensile and compress experimental investigation of three-dimensionally braided C/SiC composites[J]. *Acta Materiea Composita Sinica*, 2004,21(3):110-114.
- [5] 王波,矫桂琼. 三维编织 C/SiC 复合材料剪切和弯曲性能的实验研究[J]. *机械强度*, 2007,29(1):44-47.  
Wang Bo, Jiao Gui-qiong. Shear and bending experimental investigation of three dimensionally braided C/SiC composites[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2007,29(1):44-47.
- [6] Morris W L, Cox B N, Marshall D B, et al. Fatigue mechanisms in graphite/SiC composites at room and high temperature[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1994,77(3):792-800.
- [7] 李金柱,黄风雷,张庆明. 超高速弹丸撞击三维编织 C/SiC 复合材料双层板结构的实验研究[J]. *高压物理学报*, 2004,18(2):163-168.  
Li Jin-zhu, Huang Feng-lei, Zhang Qing-ming. A study of hypervelocity impact on 3D-C/SiC composite material dual-plate armor[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2004,18(2):163-168.
- [8] Camus G, Guillaumat L, Baste S. Development of damage in a 2D woven C/SiC composite under mechanical loading: I. Mechanical characterization[J]. *Composites Science and Technology*, 1996,56(12):1363-1372.
- [9] 管国阳,矫桂琼,张增光. 平纹编织 C/SiC 复合材料的剪切性能[J]. *机械科学与技术*, 2005,24(5):515-517.  
Guan Guo-yang, Jiao Gui-qiong, Zhang Zeng-guang. In-plane shear fracture characteristics of plain-woven C/SiC composite[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005,24(5):515-517.
- [10] 孙龙生,姚磊江,吕国志,等. 二维平纹编织 CVI 工艺 C/SiC 复合材料的疲劳行为[J]. *西北工业大学学报*, 2007,25(4):478-481.  
Sun Long-sheng, Yao Lei-jiang, Lü Guo-zhi, et al. Fatigue behavior of 2D plain-woven carbon/silicon carbide composites using chemical vapor infiltration (CVI) technique[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007,25(4):478-481.
- [11] 王桂吉,赵剑衡,唐小松,等. 平面一维应变电炮加载技术研究[J]. *高压物理学报*, 2005,19(3):269-274.  
Wang Gui-ji, Zhao Jian-heng, Tang Xiao-song, et al. Study on the technique of electric gun loading for one dimensionally planar strain[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005,19(3):269-274.
- [12] 胡昌明,王翔,刘仓理,等. 阵列 DPS 测量技术在材料动态力学性能研究中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2010,30(1):

105-108.

Hu Chang-ming, Wang Xiang, Liu Cang-li, et al. Applications of DPS arrays testing technique to dynamic properties study of materials [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(1):105-108.

[13] 姚磊江, 李自山, 程起有, 等. 2D-C/SiC 复合材料低速冲击损伤研究[J]. *无机材料学报*, 2010, 25(3):311-314.

Yao Lei-jiang, Li Zi-shan, Cheng Qi-you, et al. Damage behavior of 2D C/SiC composites under low velocity impact[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, 25(3):311-314.

## Hypervelocity impact experiment on two-dimensional plain-woven C/SiC composites\*

Yang Yang<sup>1,2</sup>, Xu Fei<sup>1</sup>, Zhang Yue-qing<sup>1</sup>, Mo Jian-jun<sup>3</sup>, Tao Yan-hui<sup>3</sup>

(1. *School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;*

2. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** Two-dimensional (2D) plain-woven C/SiC composite plates and duralumin (LY12) plates were impacted by mylar-film flyer plates which were loaded by an electrical gun to 3.4–9.5 m/s, respectively. The free interfacial velocities of the experimental plates were measured with a laser Doppler velocimeter and the impact-induced debris clouds were collected with prepared foam plates. And the damage areas of the experimental plates were inspected by using an ultrasonic scanning system. Based on the above experimental results, the mechanical responses of the 2D plain-woven C/SiC composites under hypervelocity impact were analyzed. The above experimental results show that with the increase of the impact intensity, the free interfacial velocities of the 2D plain-woven C/SiC composite plates increase, the local damage areas increase, and the debris clouds-affected regions in the prepared foam plates increase. And compared with the LY12 plates subjected to the impact of the same intensity, the intensities of the debris clouds from the 2D plain-woven C/SiC composite plates are lower, their affecting regions in the foam plates are larger, and the areic impact energies are lower. So the 2D plain-woven C/SiC composites can markedly decrease the damage which will be suffered by protected objects and it can be used as an ideal protective material in space debris protection shields.

**Key words:** mechanics of explosion; hypervelocity impact; electrical gun; 2D plain-woven C/SiC composites; debris cloud

\* Received 1 December 2011; Revised 6 June 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (90916027)

Corresponding author: Xu Fei, xufei@nwpu.edu.cn