

文章编号: 1001-1455(2009)05-0523-06

# 三维正交机织复合材料的弹道性能和破坏模式\*

余育苗, 王肖均, 李永池, 王志海

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 利用球形弹和柱形弹对 Kevlar/乙烯基树脂和 E-玻璃纤维/乙烯基树脂三维正交机织复合材料进行弹道实验。结果表明, 材料对球形弹的抗侵彻能力比对柱形弹的强; Kevlar/乙烯基树脂比 E-玻璃纤维/乙烯基树脂具有更好的抗弹侵彻性能; 迎弹面以压缩剪切破坏为主, 而背面则以纤维拉伸破坏模式为主;  $z$  向纤维的存在, 提高了三维正交机织复合材料的内层强度, 使之不易发生分层、鼓包等破坏现象, 其结果使得内层吸能为其主要吸能机制。

**关键词:** 爆炸力学; 吸能机制; 弹道侵彻; 三维正交机织复合材料; E-玻璃纤维

**中图分类号:** O383; O315 **国标学科代码:** 130 · 3530 **文献标志码:** A

## 1 引言

三维机织复合材料由于具有较高的比强度和冲击损伤容限而在航空、航天和装甲防护等领域得到广泛地应用。三维正交机织复合材料(3D orthogonal woven composite, 3D-OWC)由面内相互正交的经纱、纬纱和贯穿  $z$  方向的捆绑纱通过相互正交机织的方式制成。由于  $z$  纱将经纱和纬纱所形成的叠层在  $z$  方向上贯穿起来形成一个三维的整体, 从而有效地抑制了面内分层裂纹的扩展, 提高了厚度方向上抗冲击损伤的能力<sup>[1]</sup>。

目前对 3D-OWC 开展了广泛而深入的研究, 这些研究主要集中在准静态力学性能、材料模型的建立、弹道实验研究和数值模拟。如, 戎琦等<sup>[2]</sup>对 3D-OWC 进行拉伸、压缩实验, 并和机织层合板进行对比, 发现其拉压强度均有所提高。郭兴峰等<sup>[3]</sup>、刑誉峰等<sup>[4]</sup>建立了 3D-OWC 的单胞模型, 对材料参数进行了计算。TAN Ping 等<sup>[5-6]</sup>对玻璃纤维、Kevlar 纤维 3D-OWC 进行了一系列的准静态压缩、拉伸实验。徐静怡等<sup>[7]</sup>、顾伯洪<sup>[8]</sup>、LUO Yun-song 等<sup>[9]</sup>和 LÜ Li-hua 等<sup>[10]</sup>对三维复合材料进行了弹道实验, 分析了材料的宏观和细观破坏模式, 发现靶板入射面以基体剪切、压缩破坏为主要模式, 而出射面以纤维的拉伸破坏为主要模式, 并利用有限元软件开展了弹道数值模拟工作。J. N. Baucom 等<sup>[11]</sup>对 E-玻璃纤维的层合板和 3D-OWC 进行了一系列低速冲击实验, 考察了两者破坏损伤的差异, 指出三维材料比层合板具有更好的抗弹性能。B. A. Gama 等<sup>[12]</sup>发展了 LS-DYNA 中复合材料连续损伤材料模型, 用来模拟 3D-OWC 的弹道侵彻过程。

3D-OWC 的弹道性能与增强纤维类型、基体百分比、材料结构和弹道实验条件等有关, 本文中以 Kevlar29/乙烯基树脂和无碱 E-玻璃纤维/乙烯基树脂等 2 种 3D-OWC 为研究对象, 开展一系列的弹道冲击实验, 研究这 2 种材料的弹道性能, 分析 3D-OWC 的破坏模式, 并讨论  $z$  纱对吸能机制的影响, 为后续建立弹道吸能模型和开展数值模拟研究打下基础。

## 2 实验

实验材料有 Kevlar29/乙烯基树脂和无碱 E-玻璃纤维/乙烯基树脂 3D-OWC, 2 种靶板密度分别为 1.29、1.89 g/cm<sup>3</sup>, 厚度有 3.5、4.5、8.5 mm 等 3 个系列。子弹材料为 45 钢, 球形弹和柱形弹的质量分

\* 收稿日期: 2008-05-04; 修回日期: 2009-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572134); 国防科技重点实验室基金项目(51453030205ZK0101)

作者简介: 余育苗(1983—), 男, 硕士研究生。

别为 4.6 和 2.6 g,柱形弹形状及尺寸见图 1。弹道枪为 53 式 7.62 mm 标准弹道枪,冲击速度为 200~1 500 m/s。弹道实验装置如图 2 所示。

子弹在 A 点出膛后,以一定的速度继续飞行,经过前置光屏计数器,可测得子弹在 B 点的速度,然后以着靶速度  $v_i$  弹道冲击复合材料靶板 C,以剩余速度  $v_r$  出靶,并且通过后置光屏计数器,测得子弹在 D 点的速度。

由于高速运动的子弹在空气中速度会有所衰减,衰减程度主要由实验条件决定,如空气扰动和弹形,采用速度衰减经验公式

$$v_x = v_0 e^{-\alpha x} \tag{1}$$

利用 B、D 等 2 点的速度反推出  $v_i$  和  $v_r$ 。对于球形弹,  $\alpha = 1.102 \times 10^{-2}$ ; 对于柱形弹,  $\alpha = 4.833 \times 10^{-3}$ 。

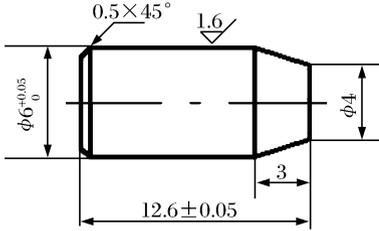


图 1 柱形弹尺寸(mm)

Fig. 1 Sizes of a cylindrical bullet

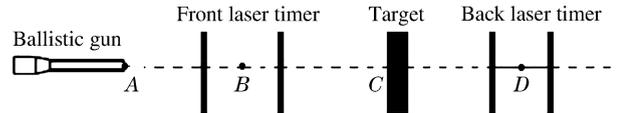


图 2 弹道实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ballistic experimental setup

### 3 结果和分析

#### 3.1 着靶速度与剩余速度的关系

经过速度衰减公式校正的 2 种靶板的着靶速度  $v_i$  和剩余速度  $v_r$  关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知:(1)所有的  $v_i-v_r$  关系曲线基本上都近似平行于直线  $y=x$ , 这与  $v_i-v_r$  关系曲线在远离弹道极限处以直线  $y=x$  为渐近线的结论是一致的。(2)不论是 Kevlar/乙烯基树脂还是 E-玻纤/乙烯基树脂,子弹以同样速度弹道冲击同一厚度的靶板时,球形弹的剩余速度比柱形弹的剩余速度小,鉴于球形弹的质量比柱形弹的大,球形弹的初始动能比柱形弹的大得多,则材料吸收了更多的球形弹动能,材料对球形弹的抗弹道侵彻能力比对柱形弹的强。这是因为,一方面,球形弹直径比柱形弹直径大,因此截面积大,在侵彻过程中接触到的纤维多,这些纤维参与能量吸收;另一方面,柱形弹前端的圆台有利于子弹直接切断纤维攻入靶板材料,但由于柱形弹截面积小,被切断的纤维少,因此参与能量吸收的纤维少,降低了靶板的抗侵彻能力。

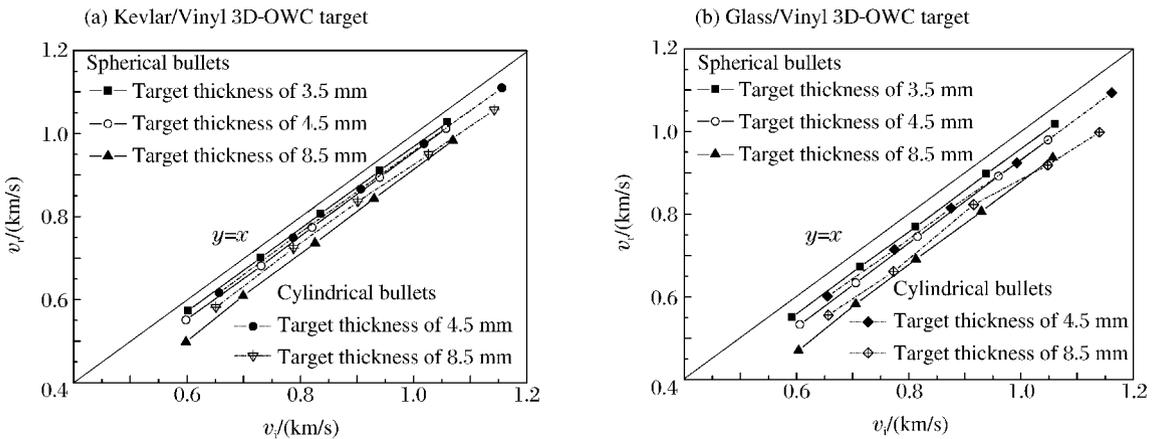


图 3 不同弹形的弹丸的着靶速度与剩余速度的关系

Fig. 3 Relationship between impact and residual velocities for different bullets

### 3.2 弹道极限和弹道性能指数

弹道极限描述弹体对防弹材料的冲击速度和贯穿防弹材料的贯穿概率之间的关系,可以用来评价防弹材料对特定弹体的防弹性能。通常采用贯穿概率为 50% 的速度  $v_{50}$ 。

由于条件有限,只进行了球形弹  $v_{50}$  实验,主要是因为球形弹弹道轨迹稳定,弹速易于控制。实验中采用 12 发有效射击确定  $v_{50}$  的 Langlie 射击方法,其结果厚度为 3.5、4.5 和 8.5 mm 的 Kevlar/乙烯基树脂 3D-OWC 靶板对应的  $v_{50}$  分别为 185、231 和 342 m/s,厚度为 3.5、4.5 和 8.5 mm 的 E-玻璃纤维/乙烯基树脂 3D-OWC 靶板对应的  $v_{50}$  分别为 213、252 和 349 m/s。

为了消除靶板厚度或密度的影响,通常采用弹道性能指数  $\beta$  来比较不同材料的防弹性能,其定义如下

$$\beta = E_a / \rho_A \quad (2)$$

式中: $E_a$  为材料吸收的能量, $\rho_A$  为面密度。在弹体一定的情况下,弹道性能指数  $\beta$  越高,材料的防弹性能越好。

根据  $v_{50}$  实验结果和材料面密度  $\rho_A$ ,可以得到球形弹冲击下 2 种靶板的吸能  $E_a$  与面密度  $\rho_A$  的关系曲线,如图 4 所示。由图 4 可以看出,Kevlar/乙烯基树脂的弹道性能常数  $\beta$  高于 E-玻璃纤维/乙烯基树脂的,因此 Kevlar/乙烯基树脂具有更优越的抗弹性能。

### 3.3 破坏模式

以球形弹弹道冲击 E-玻璃纤维/乙烯基树脂 3D-OWC 靶板为例,分析三维正交机织复合材料的破坏模式,如图 5 为球形弹以弹道极限速度冲击厚度为 8.5 mm 的靶板的破坏形貌。

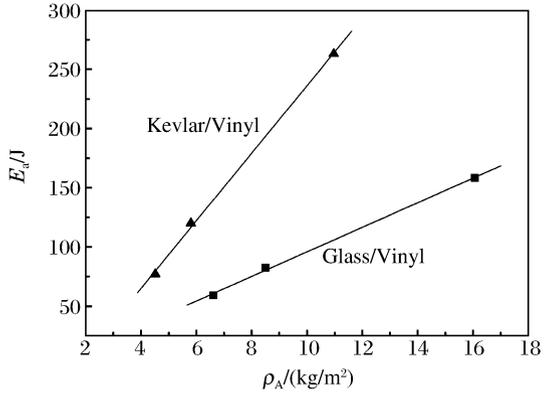


图 4 在球形弹冲击下 2 种靶板的吸能与面密度的关系  
Fig. 4 Absorption energy-area density relationship for two different targets impacted by spherical bullets

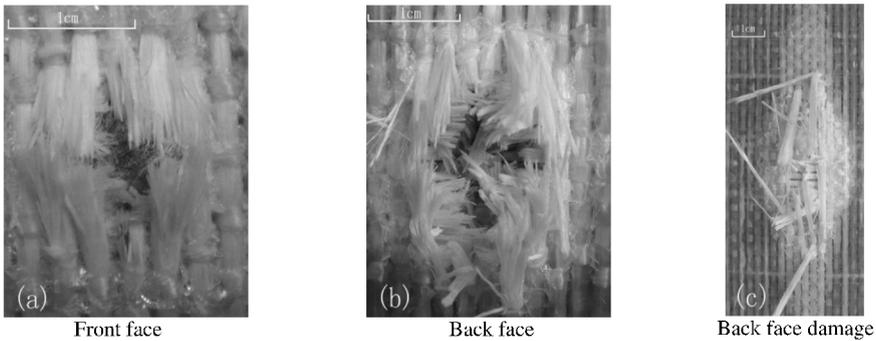


图 5 破坏形貌

Fig. 5 Damage patterns

在迎弹面 2 倍子弹直径范围内,靶板破坏严重,主要表现为基体崩裂、表面附近的纤维有整齐的剪切断面,并有明显的开坑,迎弹面呈现出以压缩剪切破坏为主的模式,见图 5(a),这与文献[2]中的结果类似;此外,在子弹 4 倍直径范围内,可以观察到基体裂纹;这是因为子弹着靶时,纤维和基体在高应变率下处于压缩剪切状态,基体开裂,而纤维则被剪断。在靶板背面,可以明显地看到面内纤维被拉伸拔丝,如图 5(b)所示,说明以拉伸破坏为主。同时除在背面有基体碎裂区外,还可以明显地看到面内纤维的损伤区,如图 5(c)所示,并且纬向的条形损伤区比经向的范围大,这是由 3D-OWC 材料机织结构所决

定的。面内纬向纤维比经向纤维更平直,先被拉伸拔丝,继而达到破坏,载荷被转移到其他未损纤维,并且通过纱线结点传递给经纱,引起更多的纤维被拉伸破坏,吸收更多的能量。

与球形弹侵彻相比,柱形弹侵彻靶板时,在迎弹面有更明显的基体崩裂区,而没有明显的开坑,靶板受影响区域较小,约为子弹直径的 2 倍。在背面只有少许纤维被拉伸拔丝,这说明参与能量吸收的纤维数有限,主要是因为柱形弹直径小,子弹前端有圆台,易于“挤入”靶板,而使得与之发生接触、参与能量吸收的纤维不如球形弹时的多。这也说明了材料对球形弹的抗弹道侵彻能力比对柱形弹的强。值得注意的是,在球形弹侵彻实验中,在回收的子弹上并没有发现明显的变形;而在柱形弹侵彻实验中,尤其是高速侵彻厚靶实验中,可以明显地观察到子弹的蘑菇头塑性变形,甚至蘑菇头外表面有烧蚀的痕迹,见图 6,这也是弹体吸能的重要体现。

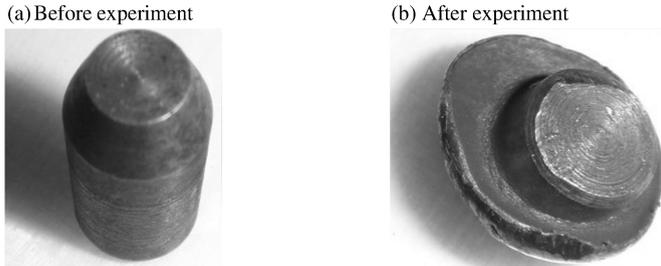


图 6 柱形弹变形

Fig. 6 Deformation of a cylindrical bullet

另外可以发现,与层合板的弹道侵彻相比,3D-OWC 材料弹道冲击破坏具有以下的特点:(1)靶板背面没有形成鼓包;(2)没有出现靶板分层的现象;(3)材料损伤区域小。

## 4 主要吸能机制分析

对于纤维增强复合材料,其最主要的能量吸收机制为面内和面外吸能,以及分层吸能。

### 4.1 面内和面外吸能

纤维增强复合材料受到弹体冲击时,直接和弹体接触的纱线产生 2 种应变波,即沿着纱线方向的纵向波和沿着弹体速度方向的横向波,如图 7 所示。纵向波使和弹体直接接触的纱线产生应变,应变以纵向波速向外传递,随着纵向波的传播,纱线上越来越多的部分产生拉伸应变,直至断裂。在此过程中一部分子弹动能转化为纱线的应变能,此即为面内吸能。

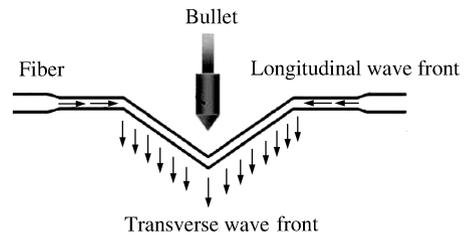


图 7 横波和纵波

Fig. 7 Longitudinal and transverse waves

由于纱线间的层叠交叉,直接和弹体接触的纱线上的横波会传递给与之交叉的不和弹体直接接触的纱线,导致一部分不和弹体直接接触的纱线也产生应变。在横向波和纵向波的作用下,导致纱线横向运动形成一个锥形鼓包,在弹体的冲击作用下,锥形区域不断扩大,越来越多的纱线受到应变而参与横向运动,直至弹体贯穿或者被织物所拦截。锥形区域内横向运动的纱线的动能即为面外吸能。

假定纤维为线弹性体,对于无限长不受约束的纱线,受到速度为  $v$  的弹体横向冲击后产生的横向波速、纵向波速及其与弹体冲击速度之间的关系分别为

$$v = c\sqrt{2\epsilon\sqrt{\epsilon(1+\epsilon)} - \epsilon^2}, \quad c = \sqrt{E/\rho}, \quad u = c(\sqrt{\epsilon(1+\epsilon)} - \epsilon)$$

式中: $v$  为弹体冲击速度, $c$  为纤维束纵向波速, $u$  为横向波前速度, $E$  为纤维束模量, $\rho$  为纤维束密度, $\epsilon$  为纤维束的应变。从上式可以看出,在其他条件相同的情况下,纤维模量越高,密度越小,纵向波速就越

高,参与面内能量吸收的纤维的区域就越大,而且横向波速也越高,锥形区域就越大,参与面外能量吸收的纤维区域也增加。

在本文实验中,Kevlar29纤维束的弹性模量为70 GPa,密度为 $1.44 \text{ g/cm}^3$ ,而无碱E-玻璃纤维的弹性模量为73 GPa,密度为 $2.54 \text{ g/cm}^3$ ,在受到同样的球形弹冲击后,由于Kevlar29的纵向波速大于无碱E-玻璃纤维的,因此Kevlar/乙烯基树脂3D-OWC中参与能量吸收的纤维区域更大,吸收的子弹动能更多,故其弹道性能常数 $\beta$ 高于E-玻璃纤维/乙烯基树脂的。另外靶板并没有像层合板出现背面鼓包现象,这是由于 $z$ 向纤维将面内各纤维层贯穿起来形成一个整体,束缚了纤维层在 $z$ 向的运动,从而面外能量吸收有限,故面内吸能是3D-OWC的主要吸能机制。

#### 4.2 分层吸能

在弹体冲击接触靶板时,产生一个横向压缩应力波,其波速比弹体侵彻速度高得多,压缩波到达靶板背部后反射产生一个横向拉伸应力波,如果该拉伸波强度大于材料的面内抗拉伸强度,则会导致材料分层模式1的出现;而侵彻过程中产生的面内载荷则可能会导致材料分层模式2的出现,见图8。由于分层破坏也会吸收一定的子弹动能,所以分层吸能也是主要的吸能机制之一。

一般而言,分层模式1出现的难易与材料面内抗拉伸强度有关;而模式2则与材料面内抗剪切强度有关。

层合板的面内强度由基体或者基体和纤维的界面强度决定,层合板的基体抗拉强度较低,界面抗剪强度也不很高,因此层合板很容易发生分层破坏。而基体较低的拉伸、剪切强度或界面强度是导致层合板易发生分层现象的主要原因;但是对于3D-OWC材料,由于引入 $z$ 向纤维而使面内强度得到很大提高。纤维较高的拉伸强度限制了分层破坏模式1的出现。另外 $z$ 向纤维的剪切强度也大于乙烯基树脂的剪切强度,从而提高了面内的剪切强度,故分层破坏模式2的也比层合板中的难以出现。实验中并没有发现明显的分层现象,这也说明3D-OWC材料分层吸能很少。

## 5 结 论

利用球形弹和柱形弹对Kevlar29/乙烯基树脂和无碱E-玻璃纤维/乙烯基树脂3D-OWC进行一系列的弹道冲击实验,得到如下结论:

(1)与柱形弹相比,实验靶板可以吸收球形弹更多的动能,靶板材料说明对球形弹的抗弹道侵彻能力比对柱形弹的强。

(2) $v_{50}$ 实验指出,Kevlar/乙烯基树脂的弹道性能常数高于E-玻璃纤维/乙烯基树脂的,具有更优越的防弹性能。

(3)3D-OWC材料受到弹道冲击时,在2~4倍子弹直径区域内可以明显地观察到基体和纤维有损伤区,靶板迎弹面以压缩剪切破坏为主,而背面则以纤维拉伸破坏模式为主。

(4) $z$ 向纤维的存在,提高了3D-OWC材料的面内强度,因此使之不易发生分层、鼓包等破坏现象,这说明面内吸能为3D-OWC材料的主要吸能机制。

#### 参考文献:

- [1] Miravete A. 3D textile reinforcements in composite materials[M]. London: CRC Press, 1999:12-37.
- [2] 戎琦,邱夷平. 二维与三维机织复合材料的力学性能实验研究[J]. 纤维复合材料,2006,23(2):13-15.  
RONG Qi, QIU Yi-ping. Study on mechanical properties of 2D and 3D woven composites[J]. Fiber Composites, 2006,23(2):13-15.
- [3] 郭兴峰,黄故,王瑞. 三维正交机织物结构的几何模型[J]. 复合材料学报,2005,22(4):183-187.

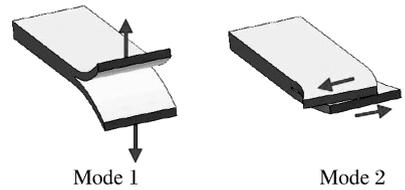


图8 分层模式

Fig. 8 Delamination modes

- GUO Xing-feng, HUANG Gu, WANG Rui. Geometric model of three dimensional orthogonal woven fabric structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2005,22(4):183-187.
- [4] 荆誉峰,田金梅. 三维正交机织复合材料单胞特征单元及其应用[J]. *航空学报*,2007,28(4):881-885.  
XING Yu-feng, TIAN Jin-mei. Unit cell eigen-element of 3D orthogonal woven composites and its applications[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2007,28(4):881-885.
- [5] Tan P, Tong L Y, Steven G P, et al. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites, Part I : Experimental investigation[J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000,31(3):259-271.
- [6] Tan P, Tong L Y, Steven G. P, et al. Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites, Part II : FEA and analytical modeling approaches[J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2000,31(3):273-281.
- [7] 徐静怡,顾伯洪. 编织复合材料弹道冲击破坏形态及模式[J]. *弹道学报*,2002,14(2):39-43.  
XU Jing-yi, GU Bo-hong. Damage pattern and failure mode of 3D braided composites under ballistic impact[J]. *Journal of Ballistics*, 2002,14(2):39-43.
- [8] 顾伯洪. 织物弹道贯穿性能分析计算[J]. *复合材料学报*,2002,19(6):92-96.  
GU Bo-hong. Analytical modeling of woven fabric under ballistic perforation[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2002,19(6):92-96.
- [9] LUO Yun-song, LÜ Li-hua, SUN Bao-zhong, et al. Transverse impact behavior and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composite[J]. *Composite Structures*, 2007,81(2):202-209.
- [10] LÜ Li-hua, GU Bo-hong. Transverse impact damage and energy absorption of three-dimensional orthogonal hybrid woven composite: Experimental and FEM simulation[J]. *Journal of Composite Materials*, 2008,42(17):1763-1786.
- [11] Baucom J N, Zikry M A, Coffelt R A. Low-velocity impact damage progression in woven E-glass composite systems[J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005,36(5):658-664.
- [12] Gama B A, Bogdanovich A E, Gillespie J W, et al. Ballistic impact damage modeling and experimental validation on a 3-D orthogonal weave fabric composite[C]//*Proceedings of the 9th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition*. 2005:1161-1175.

## Ballistic property and damage modes of 3-D orthogonal woven composites

YU Yu-miao\*, WANG Xiao-jun, LI Yong-chi, WANG Zhi-hai

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China*)

**Abstract:** Ballistic experiments were performed for Kevlar/Vinyl and E-glass/Vinyl 3D orthogonal woven composites (3D-OWC) impacted by spherical and cylindrical bullets. The results show that the anti-penetration abilities of the targets against spherical bullets are higher than those against cylindrical bullets and the absorption energy per unit area density of Kevlar/Vinyl 3D-OWC is more than that of E-glass/Vinyl 3D-OWC. The major failure mechanisms at the impact sides of the targets are shear and compression failure, but only tension failure can be observed at the back sides of the targets. The  $z$ -fibers can improve the in-plane strength of 3D-OWC and the in-plane energy absorption is the major energy absorption mechanism of 3D-OWC.

**Key words:** mechanics of explosion; energy absorption mechanism; ballistic penetration; 3D-OWC; E-glass

\* Corresponding author; YU Yu-miao

E-mail address: yym1983@mail.ustc.edu.cn

(责任编辑 张凌云)