

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20170704.002

半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性

邓云飞, 袁家俊, 徐建新*
(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 利用一级气炮发射半球形头弹冲击 2 mm 厚的编织复合材料层合板, 冲击角度为 0°、30°和 45°, 通过高速相机记录弹靶撞击过程并得到弹体速度数据。利用拟合公式处理试验数据, 得到不同冲击角度时的弹道极限值, 并和理论模型结果进行对比。分析了冲击角度对靶板弹道极限、能量吸收率和失效模式的影响。结果表明: 45°斜冲击时的靶板弹道极限最高, 正冲击次之, 30°斜冲击最低。相同冲击能量时, 45°斜冲击的能量吸收率最高, 低能量(<80 J)冲击时, 30°斜冲击比正冲击能量吸收率高, 高能量(>80 J)时, 正冲击更高。正冲击时, 靶板正面因剪切失效而形成圆形凹坑, 背面因纤维拉伸失效形成菱形鼓包, 斜冲击形成椭圆形扩孔, 且其面积随冲击角度增加而增加。

关键词: 半球形头弹; 冲击角度; 编织复合材料板; 弹道极限; 能量吸收率; 失效模式

中图分类号: TB332; O385 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)04-0843-07

Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical-nosed projectiles at different angles

DENG Yunfei, YUAN Jiajun, XU Jianxin*

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The woven composite laminates with 2 mm in thickness were impacted by the hemispherical-nosed projectiles launched using a one-stage gas gun, and the impact angles were 0°, 30° and 45°. The process of projectiles impacting targets was recorded by a high-speed camera and the velocities of the projectiles were obtained. The experimental data was processed by the fitting formula to obtain the ballistic limit velocities at each impact angle and the results were compared with the theoretical model. The influence of the impact angles on the ballistic limits, energy absorption efficiency(EAE) and failure modes of the targets was analyzed. The results show that the ballistic limit of 45° oblique impact is the highest, then is normal impact and 30° impact is lowest. At the same impact energy, the energy absorption efficiency of 45° oblique impact is the highest, the EAE of 30° impact is more than normal impact at lower impact energy(<80 J), however, the EAE of normal impact is higher at higher energy(>80 J). The front surface of the targets is formed into circular indentation due to shear failure and the back is diamond bulge due to tensile fiber failure when impact normally. The targets are formed an ellipse reaming and their area increase with the increase of the impact velocity when oblique impact.

Keywords: hemispherical-nosed projectile; impact angle; woven composite laminate; ballistic limit velocity; energy absorption efficiency; failure mode

半球形头弹冲击金属靶板的研究较多, 和数值仿真对其进行了系统的研究, 成果颇丰。对 BORVIK^[1-4]、IQBAL^[5-8] 和 ARIAS^[9] 采用试验、理论 已有文献分析发现, 对复合材料特别是编织复合材

收稿日期: 2017-04-12; 录用日期: 2017-06-16; 网络出版时间: 2017-07-04 12:46
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170704.002>
基金项目: 中央高校基本业务费资助项目(Y17-07); 中央高校基本业务费资助项目(3122017023)
通讯作者: 徐建新, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料结构力学 E-mail: jxxu_cauc@163.com
引用格式: 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性[J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 843-849.
DENG Yunfei, YUAN Jiajun, XU Jianxin. Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical-nosed projectiles at different angles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 843-849 (in Chinese).

料的冲击研究还比较少见，且大多采用圆球形弹体。古兴瑾等^[10]建立了球形弹高速冲击玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板力学模型，发现冲击速度小于弹道极限时，靶板损伤面积随冲击速度增加而减小；冲击速度大于弹道极限时，损伤面积保持不变。马凯等^[11]建立纤维增强聚合物基复合材料(FRP)层合板在球形弹斜冲击下的数值分析模型，发现弹体冲击速度不变而增加冲击角度会使剩余速度减小。XIE 等^[12]研究了圆球弹以不同角度高速冲击 2 mm 厚度的复合材料板，发现相同冲击速度下层合板的耗能随着冲击角度的增加而增加；冲击速度小于弹道极限时，正撞击比斜撞击损伤区域更大，冲击速度大于弹道极限则相反；正撞击和斜撞击的最大损伤区域在各自的弹道极限附近，并且斜撞击更大。

针对具有一定头部形状的弹体冲击复合材料板，一些研究者也开展了一定的研究并得到了相关成果。WEN^[13]建立了用于预测不同头部形状的弹体冲击厚 FRP 层合板穿孔和破坏的分析方程，并通过试验得到了验证。CHU 等^[14]通过斜冲击芳纶层压复合材料板试验，发现复合材料板发生跳弹的角度大于金属靶板，弹体穿过复合材料板后的偏移方向与穿过金属板的偏移方向相反。覃悦等^[15]研究了锥形弹冲击 FRP 层合板的侵彻和穿透性能，基于局部化破坏假设，提出了锥形弹侵彻深度、残余速度和弹道极限的公式并得到试验验证。SIKARWAR 等^[16]通过锥形弹冲击复合材料板研究了纤维方向和靶板厚度对靶板弹道极限和能量吸收的影响，发现冲击速度高于弹道极限时，损伤面积随着冲击速度增加而减小，层压材料的弹道极限和能量吸收能力随着动态杨氏模量和破坏应变的增加而增加。

基于上述研究成果，本文利用一级气炮发射半球形头圆柱形弹以不同速度和角度冲击编织复合材料层合板，冲击速度为 30~150 m·s⁻¹，冲击角度为 0°、30°和 45°，使用高速相机记录冲击过程。基于试验数据，通过公式拟合得到不同角度下的弹体速度曲线和弹道极限，然后分析了冲击角度和靶板耗能的关系，最后研究层合板不同冲击角度下的失效模式。

1 试验系统与方法

1.1 试验设备

冲击试验在哈尔滨工业大学高速碰撞中心的一

级气炮上完成，该测试设备主要包括气室、口径 12.7 mm、长 2 m 的发射管、靶仓、激光测速系统和高速摄像系统，见图 1。弹体通过高压气室提供的压缩氮气推动，在发射管中加速，并在其出口处获取一定的冲击速度。发射管后是装甲钢靶仓，为防止弹体反弹损伤炮管，靶仓前端只有一个直径为 10 cm 的开孔。一台型号为 Photron FASTCAM SA5 的高速照相机用于记录弹靶撞击过程，帧率设定为 75 000，两个 1 300 W 的冷光源增大光通量，利用 PFV 软件处理得到弹体冲击层合板前后的速度。

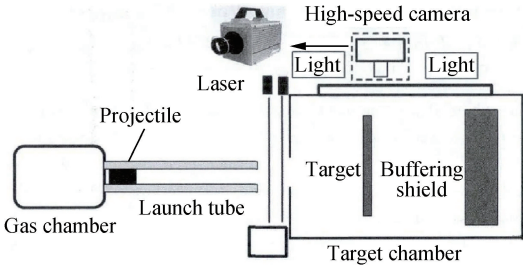


图 1 一级气炮装置
Fig. 1 Device of one-stage gas gun

1.2 弹靶材料

本文采用的靶板材料为编织结构复合材料，其编织物增强体纤维相互缠绕，具有较强的整体性，使其拉伸强度、抗冲击性和损伤容限都优于传统层压复合材料。编织复合材料由东莞市协创复合材料有限公司，其中碳纤维为 T-300，基体是环氧树脂，复合材料参数如表 1 所示。层合板为平纹编织，共 10 层，每层 0.2 mm，编织方式为 3 k 横竖交叉编织，每层交叉铺料。

层合板试件尺寸为 150 mm×150 mm×2 mm，通过 8 个六角螺栓固定在靶架上，为避免试件应力集中而损坏，在其上下表面各有 1 mm 厚的橡胶垫。冲击角度是指弹体速度方向与靶板平面法线的夹角，用特制的角铁将靶架与靶仓通过 4 个大螺栓连接，图 2 是冲击角度为 45°的靶架安装情况，其余角度类推。

表 1 编织复合材料参数

Table 1 Parameters of braided composite material

Property	Value
Fiber volume fraction	68%
Longitudinal stiffness E_1 /GPa	9.05
Transverse stiffness E_2 /GPa	9.05
Poisson's ratio ν_{12}	0.29
Shear modulus G_{12} /GPa	3.53
Longitudinal tensile strength X_t /MPa	715
Longitudinal compressive strength X_c /MPa	640
Transverse tensile strength Y_t /MPa	715
Transverse compressive strength Y_c /MPa	640
Interlaminar shear strength S /MPa	77
Density ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.578

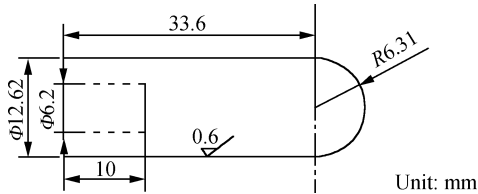


图 3 弹体形状及尺寸

Fig. 3 Geometry and size of the projectiles

10 mm、直径为 6.2 mm 的圆形孔。弹体材料比碳纤维复合材料具有更高的强度，在冲击过程中忽略弹体的塑性变形，其能量的变化只是速度因素引起^[12]。

2 试验结果与分析

2.1 弹道极限

本文共做了 25 发有效试验，其中正冲击和 45°斜冲击各 9 发，30°斜冲击 7 发，试验工况和结果见表 2。表中 v_i 是弹体初始速度， v_r 为弹体贯穿靶板后的剩余速度， v_r 等于 0 表示弹体反弹。

弹道极限速度是弹体能穿过靶板的最小速度，是表征弹体穿透能力和靶板抗冲击性能的参量。使用 RECHT 和 IPSON^[17] 提出的公式(R-I 公式)对表 1 的初始-剩余速度数据进行处理，得到速度曲线和弹道极限，R-I 公式为

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{1/p} \tag{1}$$

式中： $a = m_p / (m_p + m_{pl})$ ， m_p 和 m_{pl} 分别是弹体质量和冲塞质量； v_{bl} 为弹道极限速度，其值越大表征弹体的穿透能力越弱， v_{bl} 和待定系数 p 可以根据式(1)用最小二乘法拟合得到，相关模型参数详见表 3。

图 4 给出了半球形头弹以三种冲击角度侵彻编织复合材料层合板的初始-剩余速度曲线。结合表 3，得到弹体正冲击、30°和 45°斜冲击层合板的弹道极限分别为 $46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。45°



图 2 靶架安装方式

Fig. 2 Installation of target frame

弹体是经过特殊热处理的 38CrSi 合金钢加工制成，硬度约为 53 HRC，名义质量为 34.5 g，弹体形状和几何尺寸如图 3 所示。为使撞击过程弹体保持运动姿态平稳，在弹身中后部挖出长

表 2 弹体冲击靶板试验结果

Table 2 Results from impact experiment

Impact angles Exp. No	0°		30°		45°	
	$v_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_r / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_r / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_i / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_r / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	39.71	0	38.24	0	54.41	0
2	46.32	13.24	45.59	11.76	64.71	44.12
3	52.94	39.71	66.18	47.06	79.41	57.35
4	59.56	44.12	69.12	57.35	83.82	69.12
5	77.21	66.18	82.35	73.53	91.18	79.41
6	86.03	75.02	94.12	86.76	104.41	88.88
7	99.26	90.44	116.18	113.24	116.18	107.35
8	105.88	99.26	—	—	126.47	117.65
9	145.59	138.97	—	—	135.29	126.47

Notes: v_i —Initial-residual velocity; v_r —Residual velocity(0 represents the rebound).

表 3 半球形弹对编织复合材料靶体的弹道极限速度和模型参数

Table 3 Ballistic velocity limits and model parameters of woven composite laminate targets against hemispherical projectiles

Impact angles	0°	30°	45°
<i>a</i>	1	0.99	0.99
<i>p</i>	2.22	2.84	2.52
Ultimate velocity <i>v_{bl}</i> /(m·s ⁻¹)	46	44	60

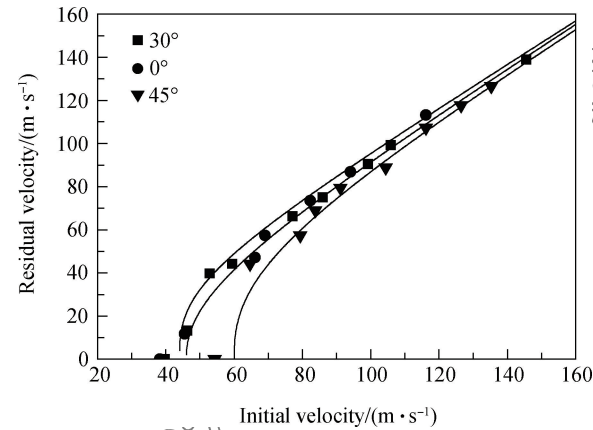


图 4 弹体贯穿编织复合材料靶板的初始-剩余速度曲线
Fig. 4 Initial-residual velocity curves of the projectiles in penetrating the woven composite laminate targets

斜冲击比正冲击和 30°斜冲击的弹道极限分别高了 30.43%和 36.36%，30°斜冲击比 45°斜冲击的弹道极限低了 26.67%。发现弹道极限随着冲击角度增加先降低后增加，说明冲击角度在 0°和 45°之间有一个最小弹道极限点，此时弹体的穿透能力最强。CHEN 等^[18]在做冲击纤维金属层合板试验时，也发现弹体以一定角度斜冲击时具有更强的穿透效果。

WEN^[19]假设弹体在侵彻过程中表面所受靶体的平均压力由靶体材料弹塑性变形引起的静态阻力和速度效应引起的动阻力组成，即

$$\sigma = \sigma_e + \beta \sigma_e \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} v_i \quad (2)$$

式中： σ_e 为准静态下复合材料层合板厚度方向的压缩弹性极限； ρ_t 为层合板密度； β 为经验常数。

半球形头弹穿透薄板过程分为三阶段，分别为： $x \leq h$ 、 $h < x \leq R$ 和 $R < x \leq R + h$ ，其中 x 表示弹体侵彻深度， h 、 D 和 R 分别表示靶板厚度、弹身直径和弹体头部曲率，如图 5 所示。

整个穿透过程靶板耗功为

$$W = \int A(x) \sigma dx \quad (3)$$

其中， $A(x)$ 为弹体头部表面与复合材料层合板接

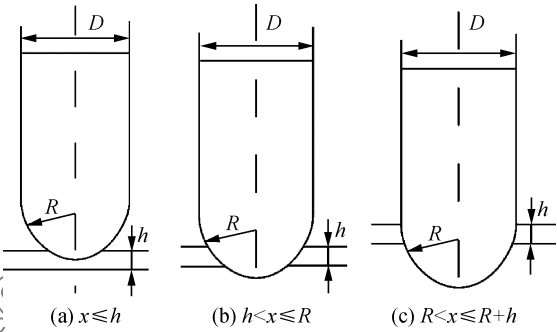


图 5 半球形弹穿透薄板示意图
Fig. 5 Schematic diagram of hemispherical-nosed projectiles penetrating thin targets

触的水平投影面积。
根据能量守恒定律，弹体动能变化量和靶板耗能关系如下：

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m (v_i^2 - v_r^2) = & \int_0^h \pi (2Rx - x^2) \sigma dx + \\ & \int_h^R \pi (2hR + h^2 - 2hx) \sigma dx + \\ & \int_R^{R+h} \pi (R^2 + x^2 + h^2 + 2hR - 2hx - 2Rx) \sigma dx \end{aligned} \quad (4)$$

当剩余速度 $v_r = 0$ 时，初始速度 v_i 即是弹道极限速度 v_{bl} ，则 v_{bl} 满足

$$\frac{1}{2} m v_{bl}^2 = \pi h R^2 \left[\sigma_e + \beta \sigma_e \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} v_{bl} \cos \theta \right] \quad (5)$$

本文采用的复合材料板的 σ_e 和 ρ_t 分别是 100 MPa 和 $1\,578\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，靶板厚度为 2 mm，弹体质量 m 为 34.5 g，弹头半径 R 为 6.31 mm，经验常数 β 为 1.5^[19]。代入式(5)计算得到靶板在半球形头弹正冲击时的弹道极限为 $42\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

对于斜冲击，冲击角度增加会增大弹体穿孔时与靶板的接触面积，此时的弹道极限关系为

$$\frac{1}{2} m v_{bl}^2 = \pi h R^2 \cos \theta \left[\sigma_e + \beta \sigma_e \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma_e}} v_{bl} \right] \quad (6)$$

其中， θ 为冲击角度。可得 30°和 45°斜冲击的弹道极分别为 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $59\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 6 是试验和通过理论分析得到的靶板弹道极限速度对比。可以看出，试验结果和理论值符合较好，正冲击、30°斜冲击和 45°斜冲击的理论值比试验值分别低了 8.70%、高了 13.64% 和低了 1.67%。这种差异与靶板失效机制、层合板编织方式和边界条件引起^[20]的层合板的能量吸收与织造纤维在经向和纬向的交织有关，并且由织物的卷曲和

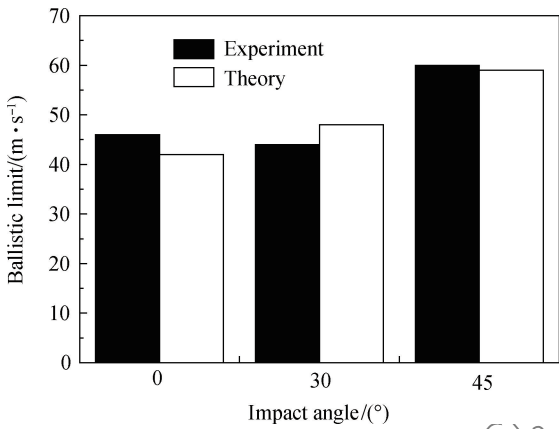


图6 试验和理论弹道极限速度对比

Fig. 6 Comparison of ballistic limits between experimental and theoretical results

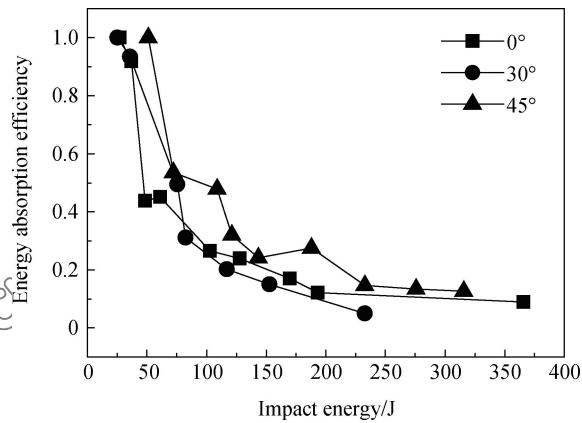


图7 不同冲击角度下编织复合材料靶板的能量吸收率随冲击能量的变化曲线

Fig. 7 Relationship between impact energy and energy absorption efficiency of the woven composite laminate target with different impact angles

起伏引起的剪切变化也会影响层合板的弹道极限。

2.2 能量吸收率

能量吸收率^[2]指弹体贯穿靶板后的动能减小量与其初动能的比值, 可以作为评估复合材料层合板在冲击过程中的能量吸收率(EAE), 定义为

$$E = \frac{0.5m_p(v_i^2 - v_r^2)}{0.5m_p v_i^2} = 1 - \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (7)$$

图7为不同冲击角度下靶板的能量吸收率随冲击能量的变化曲线, 其中EAE为1表示弹体未穿过靶板。可以发现, 能量吸收率随冲击能量的变化趋势与冲击角度无关, 都是随着冲击能量的增加先

急剧降低后保持不变, 在冲击速度远大于各自的弹道极限时, 弹体初动能增加对靶板的能量吸收几乎不起作用, 这是靶板的失效模式从分层转化为压剪导致^[21]。还可以发现, 在相同冲击能量下, 45°斜冲击的能量吸收率最高, 冲击能量较低时(<80 J), 30°斜冲击的能量吸收率比正冲击高, 较高能量冲击时(>80 J), 正冲击的能量吸收率比30°斜冲击高。

2.3 失效模式

图8为半球形弹以不同冲击角度侵彻编织复合

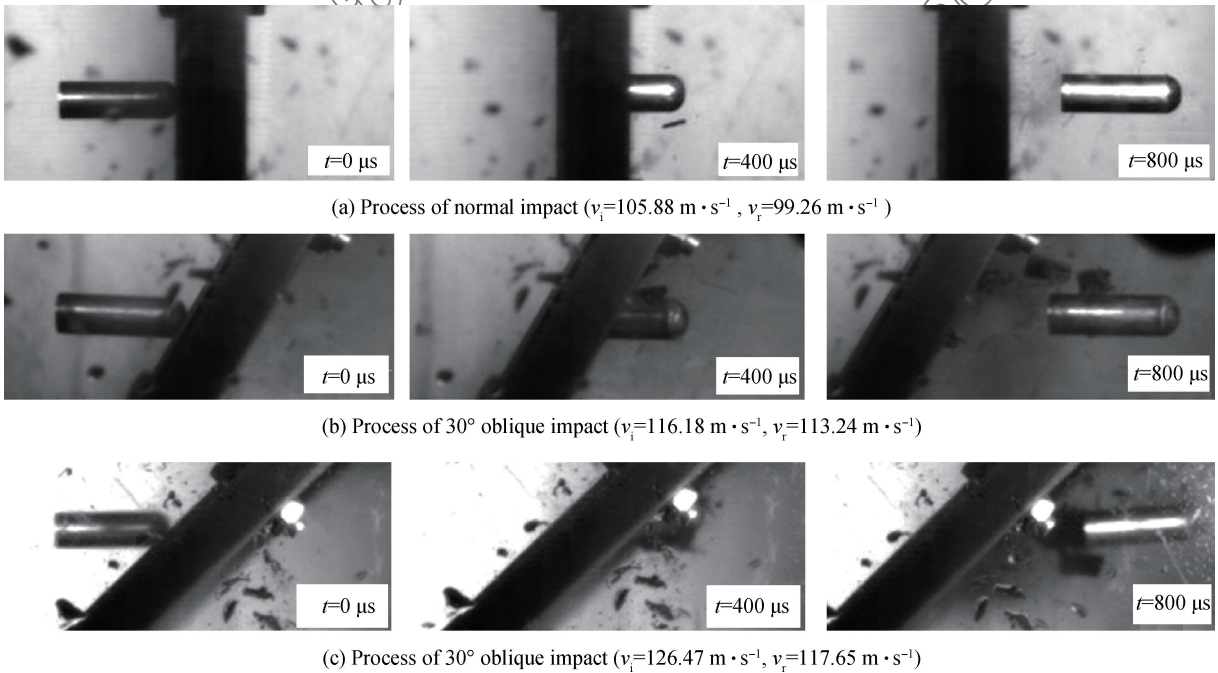


图8 半球形弹对编织复合材料靶板的典型撞击工况

Fig. 8 Typical impact of the hemispherical-nosed projectiles on the woven composite laminate targets

材料的典型过程。可以看到，弹体在穿甲靶板前后姿态保持很好，靶板在局部产生大变形。

图 9 为不同冲击角度下层合板正面和背面的损伤形貌，其中 9(a)、图 9(b)和图 9(c)的速度值与图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)一一对应。弹体撞击靶板使靶板正面材料受挤压，背面受拉，当达到靶板材料的压缩和拉伸强度时，径向和环向拉伸应力在靶板撞击中心形成裂纹。正冲击时，弹体向四周挤压靶板材料而穿透靶板，靶板正面因剪切失效形成圆形凹坑，背面因纤维拉伸失效形成菱形鼓包，且两条相互垂直的长裂纹与菱形对角线重合。对于斜冲击，靶板形成椭圆形扩孔，这是由弹体头部侧面先接触靶板所致，靶板正面的剪切厚度比正冲击时更深，背面纤维断裂深度较薄。复合材料板是通过各铺层通过粘结层连接，斜冲击在铺层方向有分量，使靶板易发生分层损伤，靶板背面的撕裂纤维条沿弹体冲击方向扩展。冲击角度增加会增加弹体头部在厚度方向的投影面积，导致靶板损伤区域随

着冲击角度的增加而增加。

3 结 论

通过半球形头弹对编织复合材料层合板在 0°、30°和 45°下的侵彻贯穿试验研究，分析了冲击角度对弹道极限、层合板能量吸收率和失效形式的影响。对试验结果分析可得如下结论：

(1) 半球形弹 45°斜冲击编织复合材料时的弹道极限最高，正冲击次之，30°斜冲击最小。

(2) 靶板能量吸收率随冲击能量的增加先急剧降低后保持基本不变，相同冲击能量下，45°斜冲击的弹道极限最高，低能量(<80 J)冲击时，30°斜冲击比正冲击能量吸收率高，高能量(>80 J)冲击时，正冲击更高。

(3) 靶板冲击正面为剪切失效，背面为纤维断裂失效，且正冲击时，靶板正面因扩孔形成凹坑背面为菱形鼓包，斜冲击时，靶板为冲塞破坏且背面有纤维条撕裂。靶板受冲击的扩孔面积随着冲击角度的增加而增加。

参考文献：

[1] BØRVIK T, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part I—Experimental study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 27(1): 19-35.

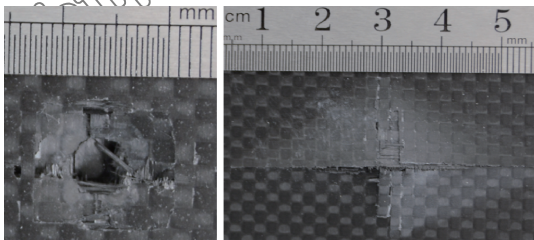
[2] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: Part II—Numerical simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 27(1): 37-64.

[3] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27 (27): 37-64.

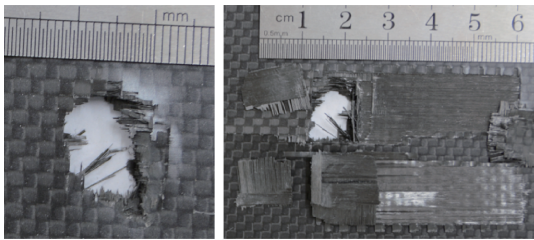
[4] BØRVIK T, DEY S, HOPPERSTAD O S, et al. On the main mechanisms in ballistic perforation of steel plates at sub-ordnance impact velocities [M]//Predictive Modeling of Dynamic Processes. US: Springer, 2009: 189-219.

[5] IQBAL M A, GUPTA N K. Ballistic limit of single and layered aluminium plates[J]. Strain, 2011, 47(s1): e205-e219.

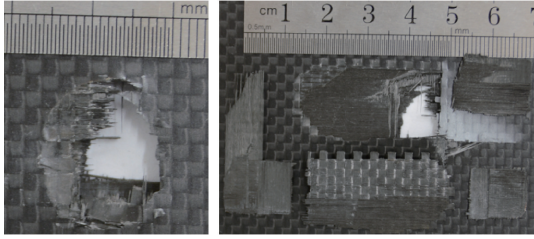
[6] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt and hemispherical-nosed projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 1921-1944.



(a) Damage morphologies of laminates at front (left) and back (right) at normal impact



(b) Damage morphologies of laminates at front (left) and back (right) at 30° oblique impact



(c) Damage morphologies of laminates at front (left) and back (right) at 45° oblique impact

图 9 不同冲击角度下编织复合材料层合板损伤形貌
Fig. 9 Damage morphologies of woven composites laminates at different impact angles

- [7] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of aluminum plates[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2007, 44(10): 3411-3439.
- [8] IQBAL M A, GUPTA G, DIWAKAR A, et al. Effect of projectile nose shape on the ballistic resistance of ductile targets[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2010, 29(4): 683-694.
- [9] ARIAS A, RODRIGUEZ-MARTINEZ J A, RUSINEK A. Numerical simulations of impact behaviour of thin steel plates subjected to cylindrical, conical and hemispherical non-deformable projectiles[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(6): 1635-1656.
- [10] 古兴瑾, 许希武, 黄晶. 层合复合材料薄板高速冲击损伤研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2008, 40(3): 370-375.
GU X J, XU X W, HUANG J. High velocity impact damage of thin composite laminates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 40(3): 370-375 (in Chinese).
- [11] 马凯, 许希武, 古兴瑾. 纤维增强复合材料层板高速倾斜冲击损伤数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2013, 30(3): 150-161.
MA K, XU X W, GU X J. Numerical simulation of damage in fiber reinforce composite laminates under high velocity oblique impact[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2013, 30(3): 150-161 (in Chinese).
- [12] XIE W B, ZHANG W, KUANG N H, et al. Experimental investigation of normal and oblique impacts on CFRPs by high velocity steel sphere[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 99: 483-493.
- [13] WEN H M. Penetration and perforation of thick FRP laminates[J]. *Composites Science & Technology*, 2001, 61(8): 1163-1172.
- [14] CHU C K, CHEN Y L, HSEU G C, et al. The study of obliquity on the ballistic performance of basket fabric composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 2007, 41(13): 1539-1558.
- [15] 覃悦, 文鹤鸣, 何涛. 锥头弹丸撞击下 FRP 层合板的侵彻与穿透的理论研究[J]. *高压物理学报*, 2007, 21(2): 121-128.
QIN Y, WEN H M, HE T. Theoretical study on the penetration and perforation of FRP laminates struck by conenosed projectiles[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(2): 121-128 (in Chinese).
- [16] SIKARWAR R S, VELMURUGAN R, GUPTA N K. Influence of fiber orientation and thickness on the response of glass/epoxy composites subjected to impact loading[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 60(1): 627-636.
- [17] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(3): 384.
- [18] CHEN Y, PANG B, ZHENG W, et al. Experimental investigation on normal and oblique ballistic impact behavior of fiber metal laminates[J]. *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, 2013, 32(23): 1769-1778.
- [19] WEN H M. Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes[J]. *Composite Structures*, 2000, 49(3): 321-329.
- [20] ULVEN C, VAIDYA U K, HOSUR M V. Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite panels[J]. *Composite Structures*, 2003, 61(12): 143-150.
- [21] PERNAS-SANCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J, VARAS D, et al. Experimental analysis of ice sphere impacts on uni-directional carbon/epoxy laminates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 96: 1-10.