

钢球斜侵彻碳纤维复合材料板的实验研究*

谢文波, 张 伟, 姜雄文

(哈尔滨工业大学高速撞击研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了研究碳纤维复合材料板(CFRPs)在斜侵彻下的抗弹性能, 利用一级轻气炮对碳纤维复合材料板进行了 70~280 m/s 速度范围的 0°、30°和 45°的侵彻贯穿实验, 通过高速摄影技术测量了弹体速度和弹道轨迹。分析了冲击角度对弹道极限、能量吸收和弹道偏转的影响。结果表明: 在冲击能量较低时, 靶板在正冲击下的能量吸收率比斜冲击高, 而当冲击能量较高时则恰好相反; 此外, 由于弹体穿过层合板的穿透长度随着冲击角度的增加而增加, 弹道极限随着冲击角度的增加而增加; 而冲击角度对弹道偏转的影响则随着冲击速度的变化而变化。

关键词: 斜侵彻; 碳纤维复合材料板; 弹道极限; 能量吸收; 弹道偏转

中图分类号: O385

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

纤维增强复合材料具有较高的比强度、比刚度和吸能特性, 被广泛地应用于航空、航天等领域。而这些结构件在整个服役过程中又不可避免地遭受斜冲击的威胁, 如飞机在起飞、飞行和着陆过程中的冰雹^[1-2]、鸟撞^[3]等。由于复合材料本身独特的结构形式和力学性能, 与传统的金属材料相比, 它在斜冲击下的抗弹性能就更复杂, 所以研究复合材料层合板的抗斜冲击性能具有重要的实际意义。

秦建兵等^[4]分析了弹头形状、纤维铺设方式、层数等因素对层合板抗弹性能的影响, 给出了层合板在不同弹头冲击下的侵彻破坏特征和模式。彭刚等^[5]构建了以能量耗散分析为基础的复合材料抗侵彻贯穿模型, 对纤维增强复合材料层板的抗侵彻贯穿机理进行了研究。Ivañez 等^[6]研究了低速冲击下冲击角度对复合材料夹层板的能量吸收影响, 结果表明能量吸收随着冲击角度的增加而增加。Chu 等^[7]研究了冲击角度对芳纶纤维复合材料的弹道极限和跳飞角度的影响。Assaf 等^[8]利用 LS-DYNA 对穿甲弹斜侵彻超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维复合材料过程中的弹道偏转问题进行了研究。

以往研究大多集中在对复合材料正侵彻贯穿机理方面的研究, 而有关冲击角度对复合材料抗弹性能的影响相对较少, 尤其缺乏冲击角度对弹道偏转角的影响研究。为此, 本文中利用一级轻气炮对碳纤维复合材料板进行不同角度和速度的侵彻贯穿实验, 分析冲击角度对靶板能量吸收、弹道极限和弹道偏转角的影响。

1 实验方法

1.1 实验材料

所用材料为 2 mm 厚的 $[0/45/90/-45]_{s2}$ 准各向同性铺层的 T700 碳纤维复合材料层合板(见图 1), 在没有特殊加载方向的情况下, 这种铺层构型在工程结构上运用的非常广泛。

T700 碳纤维复合材料单层板的材料属性分别为: 纤维体积分数 $\omega=60\%$, 纵向刚度 $E_1=132$ GPa, 横向刚度 $E_2=11$ GPa, 泊松比 $\nu_{12}=0.29$, 剪切模量 $G_{12}=5.2$ GPa, 纵向拉伸强度 $X_t=2178$ MPa, 纵向压缩强度 $X_c=1039$ MPa, 横向拉伸强度 $Y_t=24$ MPa, 横向抗压强度 $Y_c=168$ MPa, 层间剪切强度 $S=81$ MPa, 密度 $\rho=1600$ kg/m³。

* 收稿日期: 2016-09-21; 修回日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372088)

第一作者: 谢文波(1987—), 男, 博士研究生; 通信作者: 张 伟, zhdawei@hit.edu.cn。

将试样切割成 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的尺寸,如图 2 所示,将它放在两个 3 mm 厚的中心开口面积为 70 mm^2 铁框中间。为了避免试件四周由于弯曲应力集中导致的边界失效,在试件和铁框的接触面放置 1 mm 厚的橡胶垫,用 8 个六角螺栓将夹持试件的两个铁框固定,以约束靶板的面外转动和平动自由度。

弹体为钢球,直径 7.50 mm ,质量 1.72 g 。它具有很高的强度,在冲击过程中忽略弹体的塑形变形,动能减小仅由速度变化引起,这样可以很好地理解靶板在冲击过程中的各种损伤能量吸收机制。

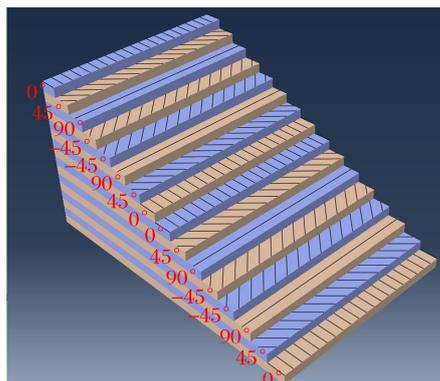


图 1 碳纤维复合材料板的铺层示意图
Fig. 1 Schematic of CFRPs stacking sequence

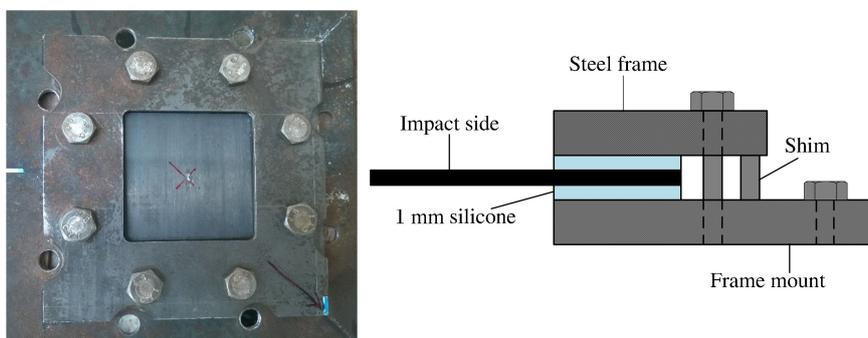


图 2 框型夹具中的复合材料层合板
Fig. 2 Composite laminate mounted in a square-frame jig

1.2 侵彻实验

实验在直径 7.62 mm 的一级轻气炮(见图 3)上完成,该装置通过工业级的压缩氮气来驱动弹体,出炮口有一个尺寸为 $610\text{ mm} \times 310\text{ mm} \times 310\text{ mm}$ 的装甲钢靶舱。为了测量弹体速度和弹道轨迹,在靶舱旁边放置一个高速摄影机 Photron FASTCAM SA5。帧率设定为 $100\ 000\text{ s}^{-1}$,分辨率为 $320\text{ 像素} \times 192\text{ 像素}$,由于曝光时间非常短,在实验过程中用两个 $1\ 300\text{ W}$ 的冷光灯来增大光通量。在靶舱后面放置一张坐标纸,用以标定和计算弹体速度。由于在测量过程中有测量误差,利用文献[9]中方法来估计误差,可得初始速度和剩余速度的误差为 5.2% 。

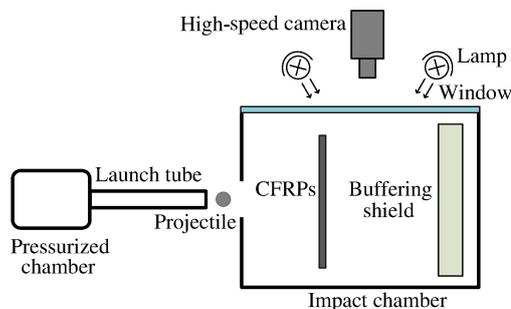


图 3 侵彻贯穿实验装置示意图
Fig. 3 Experimental setup of impact perforation experiment

2 实验结果与讨论

2.1 弹道极限

弹道极限是评价靶板在某特定冲击条件下抗冲击性能的一个重要指标。对于一个给定角度的弹体和复合材料层合板,弹道极限定义为弹体完全侵彻和部分或者没有贯穿靶板的最小速度。在弹道侵彻实验中,通过调整轻气炮的充气压力,逐步增大或减小子弹初始速度,最终将复合材料层合板的弹道极限速度锁定在一个较小的速度范围内。共进行了 45 发有效实验(弹体速度 $72\sim 280\text{ m/s}$),获取靶板在 3 种冲击角度下的弹道极限,实验结果见表 1,正的剩余速度表示靶板被贯穿,负值表示弹体反弹。

表 1 实验结果
Table 1 Experimental results

No.	$v_i/(m \cdot s^{-1})$ $v_r/(m \cdot s^{-1})$		$v_i/(m \cdot s^{-1})$ $v_r/(m \cdot s^{-1})$		$v_i/(m \cdot s^{-1})$ $v_r/(m \cdot s^{-1})$	
	$\theta=0^\circ$		$\theta=30^\circ$		$\theta=45^\circ$	
1	71.7	-23.9	70.3	-34.7	74.8	-46.8
2	118.5	-19.4	107.4	-41.6	102.6	-61.4
3	141.8	-21.4	141.6	-31.5	165.2	-60.4
4	164.6	-28.7	172.2	-34.9	192.3	-39.8
5	175.6	-41.8	191.9	-32.4	213.3	-34.7
6	177.2	-28.4	195.2	-10.6	218.7	-16.2
7	178.9	-10.2	197.0	-16.4	220.7	0
8	181.8	-31.3	197.5	27.0	224.4	74.0
9	184.3	34.5	198.4	57.7	225.8	81.2
10	188.2	53.2	199.0	60.8	230.0	107.8
11	190.7	62.5	206.6	58.5	233.3	115.9
12	219.6	125.5	209.0	91.7	242.3	131.1
13	227.1	137.8	238.8	143.3	244.8	139.8
14	257.7	180.4	255.8	171.9	262.8	156.5
15	279.6	203.4	274.8	180.2	276.1	171.8

根据实验结果,采用经典 Lambert-Jonas 弹道极限方程可以较好拟合弹道冲击的剩余速度-初始速度关系(见图 4),方程仅对入射速度大于弹道极限的情况适用。经典 Lambert-Jonas 弹道极限方程为:

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

式中: v_{bl} 、 a 和 p 是拟合参数。通过这个线性回归曲线可以得到,复合材料层合板在 0° 、 30° 和 45° 冲击下的弹道极限分别为 182、197.4 和 220.7 m/s。很明显,与正侵彻相比,靶板在斜侵彻下有更好的抗冲击性能,并且随着冲击角度的增加,靶板的弹道极限逐渐增加。与正冲击相比, 30° 和 45° 的斜冲击弹道极限分别提高了 8% 和 21%; 45° 冲击的弹道极限比 30° 提高了 12%。由此可见,随着冲击角度的增加,弹道极限的增幅也越来越大。

图 5 为弹体斜冲击靶板的示意图,冲击角度 θ 为弹体入射方向与靶板法线方向的夹角,弹体冲击力为 F ,其法向分力为 F_N ;层合板沿冲击方向和厚度方向的冲击应力分别 σ_F 和 σ_n ,切向应力为 σ_t , A 为靶板的损伤面积,则冲击力 $F = F_N / \cos\theta$,冲击损伤面积 $A' = A \cos\theta$,则层合板沿冲击方向和厚度方向的冲击应力关系为:

$$\sigma_F = F/A' = \sigma_n / \cos^2\theta \tag{2}$$

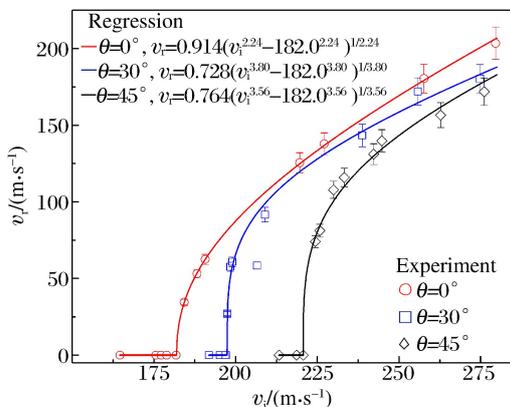


图 4 弹体正/斜冲击的剩余速度与冲击速度的关系曲线

Fig. 4 Residual velocity vs. impact velocity

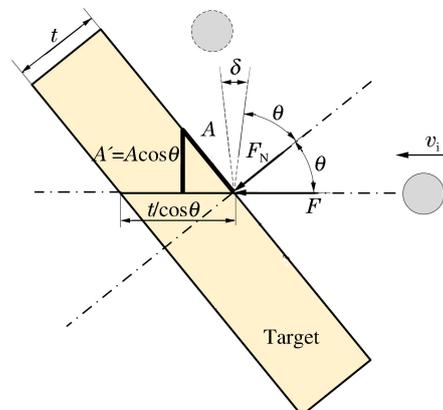


图 5 碳纤维复合材料板的斜冲击示意图

Fig. 5 Schematic diagram of CFRPs under oblique impact

López-Puente 等^[10]指出,在冲击速度接近弹道极限时,弹体动能大部分转换为层合板的压缩功(形成冲塞),也就是 $m_p v_{bl}^2/2 = \sigma_F A t$,而弹体在斜侵彻下的冲击应力又比正侵彻下的大,因而其弹道极限也比正侵彻的大,而且随着冲击角度的增加,弹道极限的增幅也越来越大。以前也有学者进行过解释,认为这仅仅是由于靶板斜度增加致使弹体贯穿靶板的厚度变厚了,对于斜侵彻,弹体贯穿的线性厚度为 $t/\cos\theta$ 。因此,在所关注的冲击速度范围内,除非增加材料厚度,否则斜度对复合材料板的抗侵彻能力没有任何影响。

2.2 能量吸收

弹体在冲击、侵彻和贯穿复合材料板过程中,一部分动能被靶板吸收,定义靶板的能量吸收率:

$$\frac{E_{\text{abs}}}{E_k} = \frac{\frac{1}{2} m_p v_i^2 - \frac{1}{2} m_p v_r^2}{\frac{1}{2} m_p v_i^2} \quad (3)$$

式中: E_k 是弹体的初始动能; E_{abs} 是弹体的动能损失,也就是靶板的能量吸收; m_p 为弹体质量, v_i 和 v_r 分别是弹体入射速度和剩余速度。

图6为冲击能对靶板能量吸收的影响关系曲线。从图中可以看出,对于正冲击:在冲击能从4.4 J增加到12.1 J的过程中,靶板的能量吸收率急剧增加;继续增加冲击能直到靶板被击穿,靶板的能量吸收进入一个相对缓慢的增长阶段;在冲击能为27.5 J时,靶板能量吸收率达到最大值99.7%,最终当冲击能增加到29.2 J(184.3 m/s)时靶板被击穿,之后靶板的能量吸收率随着冲击能的增加急剧下降。对于30°和45°冲击也观察到了相似的情形。

此外,从图中还可以看出,冲击角度对靶板的能量吸收影响在不同的冲击速度下呈现出不同的变化趋势。在低速冲击时,靶板的能量吸收率随着冲击角度的增加而减小,此时靶板的能量吸收主要通过靶板鼓包变形、纤维断裂、基体开裂和分层的形式来实现,而这些变形和失效形式又主要取决于作用在靶板上的法向分力 F_N ,随着冲击角度的增加,法向分力减小,因而靶板的能量吸收减小。当弹体贯穿靶板时,靶板的能量吸收率随着冲击角度的增加而增加,此时靶板的损伤除了上面的纤维断裂、基体开裂和分层外,还会产生剪切冲塞。Rajagopal 等^[11]指出,靶板在正/斜侵彻下的能量吸收差异主要是由形成冲塞的能量不同引起,靶板形成冲塞所需的能量为 $m_p v_{bl}^2/2$,而斜冲击的弹道极限又比正冲击的高,因而靶板在斜冲击下的能量吸收比正冲击的高。

最后,尽管本文中进行的弹体速度在70~280 m/s内,但是可以推测,当冲击速度远超弹道极限时,靶板的能量吸收率会趋向一个常值。Pernas-Sánchez 等^[12]也观察到了这个现象,他把这种靶板能量吸收率改变的行为归因为靶板由分层损伤到压剪失效的失效机制的转变。

2.3 弹道偏转

弹道偏转是弹体在斜冲击过程中的一个重要特征,钢球斜侵彻贯穿靶板时的理论穿透长度为 $t/\cos\theta$ (见图5),然而由于整个弹靶结构不是轴对称的,因而合力方向与钢球运动方向不一致,与钢球运动方向垂直的合力分力将使钢球运动方向发生改变。这个现象非常复杂,对于不同的冲击角度和速度,钢球可能发生正偏转,也可能发生负偏转。通过高速相机可以记录钢球侵彻贯穿碳纤维复合材料板的整个过程,并可以测量钢球在侵彻贯穿过程中的弹道偏转角, θ 为弹体初始斜度, δ 为斜度改变,约定弹体斜度增加为正值,减小为负值。

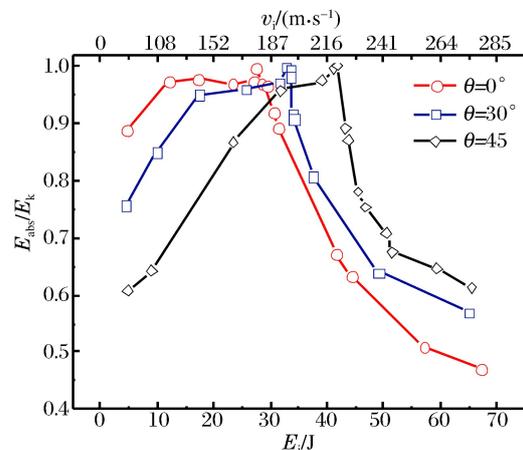


图6 冲击能量对靶板能量吸收的影响

Fig. 6 Effect of impact energy on target's energy absorption

图 7 为钢球以 3 种角度冲击、侵彻和贯穿碳纤维复合材料靶板的过程图。需要注意的是,高速相机拍摄的两张照片之间的时间间隔为 $10\ \mu\text{s}$,而为了清楚地观察斜侵彻过程中的弹体偏转,图中自由设定两帧照片之间的时间间隔,将弹体接近靶板表面的时刻取为参考时间“零”。从图中可以看出,钢球正侵彻贯穿碳纤维复合材料层合板的过程中几乎不发生偏转,而在 30° 和 45° 冲击下,钢球发生了明显的弹道偏转。

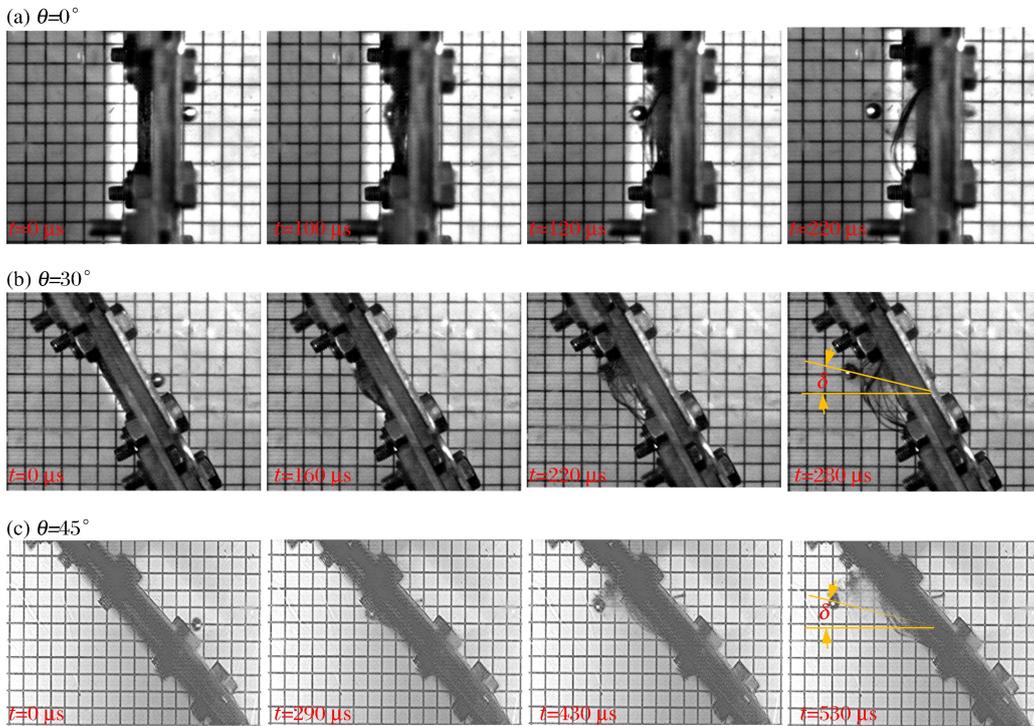


图 7 冲击速度约为 260 m/s 的不同靶板的冲击过程

Fig. 7 Impact process of different targets at a velocity around 260 m/s

根据实验数据,可以得到钢球冲击速度与偏转角关系曲线,如图 8 所示。图中没有给出正冲击的弹道偏转角数据,因为对于正冲击而言,弹体没有发生任何偏转,仅作为斜冲击的参考。

从图中可以看出,两种斜冲击角度下的钢球弹道偏转角与冲击速度关系曲线很相似。随着冲击速度的增加,弹道偏转角先以近似抛物线的形式从正值变为负值;当冲击速度增加到快贯穿靶板的弹道极限速度时, 30° 和 45° 冲击分别达到了 58° 和 98° 的最大反弹偏转角,也就是钢球基本上沿入射方向原路反弹;

之后随着冲击速度的进一步增加,靶板被贯穿,弹道偏转角从负值急剧变为正值, 30° 和 45° 冲击分别达到了 10° 和 12° 的最大贯穿偏转角;最后随着冲击速度的增加,偏转角出现小幅度增加后又继续缓慢地减小。

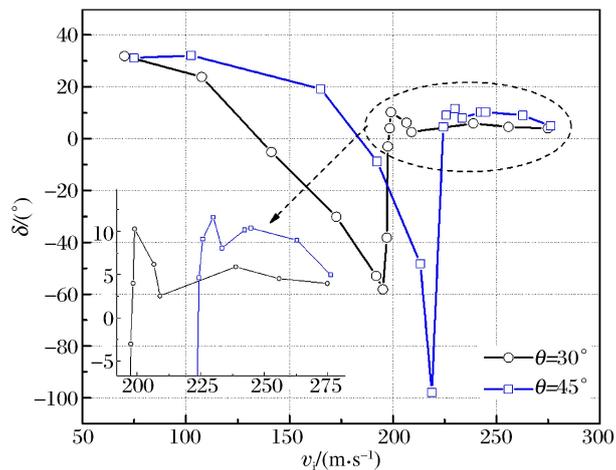


图 8 斜冲击下的弹体偏转角与冲击速度的关系

Fig. 8 Variations in projectile obliquity vs. impact velocity for oblique impacts

此外,从图中还可以看出,冲击角对弹道偏转的影响在不同的冲击速度范围内呈现出不同的变化趋势。钢球低速冲击靶板时,靶板表面损伤很小,而本文实验所用的钢球和碳纤维复合材料板表面又较光滑,钢球的水平分速度 $v_i \sin\theta$ 使钢球在靶板上发生滑移,使它反弹速度向滑移方向偏转,在相同的冲击速度下,45°冲击的水平分速度比30°的大,其弹道偏转角也大;随着冲击速度的增加,冲击力的法向分力 F_N 使靶板表面发生纤维断裂、基体开裂和压溃损伤,从而形成一个弹坑,弹坑施加给钢球的切向力将急剧增大,使得弹道偏转角减小,弹体反弹轨迹由远离靶板法线方向到靠近靶板法线方向转变,随着冲击角度的增加,钢球的法向分力 F_N 减小,弹道偏转角从正值变为负值的临界冲击速度也从135.7 m/s(30°)增加到183.2 m/s(45°)。

钢球贯穿靶板时,钢球在靶板冲击面产生弹坑,在靶板背面反射形成的拉伸波又使层合板的层间分层,当钢球侵彻到两个分层界面时,钢球的水平速度 $v_i \sin\theta$ 使它在分层界面发生滑移;此外,由于复合材料层合板的层间黏结层施加给钢球的反作用力没有层合板各单层的大,这使在冲击过程中靶板施加给钢球的法向作用力越来越小,加上钢球在分层界面的滑移,因而改变了钢球与靶板之间的相互作用力和运动轨迹,使钢球在侵彻贯穿靶板后的弹道偏转角为正值,而且水平速度 $v_i \sin\theta$ 越大,弹道偏转角就越大,在相同的冲击速度下,冲击角度越大,弹道偏转角也就越大;当冲击速度远高于弹道极限时,此时靶板的失效模式转变为压剪失效,弹道偏转角缓慢减小后趋向一个常值。

3 结 论

通过对碳纤维复合材料层合板在0°、30°和45°下的侵彻贯穿实验研究,分析了冲击角度对靶板弹道极限、能量吸收率和弹道偏转的影响。从实验结果和讨论,可以得出以下结论:

(1) 靶板的弹道极限随着冲击角度的增加而增加,且角度从30°增加到45°的靶板弹道极限增幅比冲击从0°增加到30°的大。

(2) 当钢球未贯穿靶板时,靶板的能量吸收率取决于法向冲击力,能量吸收随着冲击角度的增加而减小;而当钢球贯穿靶板后,靶板的能量吸收率取决于冲塞能,靶板在斜冲击下的能量吸收率比正冲击的高。

(3) 冲击角对弹道偏转的影响在不同的冲击速度下的变化趋势不一样。在低速冲击时,由于弹体发生滑移,弹道偏转角随着冲击角度的增加而增加;当靶板产生弹坑时,弹体反弹轨迹由远离靶板法线方向到靠近靶板法线方向转变;当钢球贯穿靶板后,层合板的层间分层失效模式导致弹道偏转角为正值,45°冲击的弹道偏转角比30°的大。

参考文献:

- [1] TANG Z, HANG C, SUO T, et al. Numerical and experimental investigation on hail impact on composite panels[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017,105:102-108.
- [2] PERNAS-SANCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Experimental analysis of ice sphere impacts on unidirectional carbon/epoxy laminates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016,96:1-10.
- [3] DONADON M V, ARBELO M A. Bird strike modeling in fiber-reinforced polymer composites[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2017,17(6):1750065.
- [4] 秦建兵,韩志军,刘云雁,等. 复合材料层合板侵彻行为的研究[J]. *振动与冲击*, 2013,32(24):122-126.
QIN Jianbing, HAN Zhijun, LIU Yunyan, et al. Penetration behavior of composite laminated plates[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013,32(24):122-126.
- [5] 彭刚,王绪财,刘原栋,等. 复合材料层板的抗贯穿机理与模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2012,32(4):337-345.
PENG Gang, WANG Xucai, LIU Yuandong, et al. Research on anti-perforation mechanism and simulation of composite laminates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012,32(4):337-345.
- [6] IVANEZ I, MOURE M M, GARCIA-CASTILLO S K, et al. The oblique impact response of composite sandwich plates[J]. *Composite Structures*, 2015,133:1127-1136.

- [7] 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.
- [8] ASSAF Z, RAN E, BLASS T, et al. Oblique penetration of AP projectile to laminated composites-modeling and verification[C]//The 27th International Symposium on Ballistics. 2012;1187-1194.
- [9] POWELL D, ZOHDI T, JOHNSON G. Impact and delamination failure characterization of BSM 8-212 composite aircraft material; DOT/FAA/AR-2008/48[R]// Air Traffic Organization Operations Planning Office of Aviation Research and Development, 2008. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=879184>.
- [10] LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R, NAVARRO C. An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2007,44(9):2837-2851.
- [11] RAJAGOPAL A, NAIK N K. Oblique ballistic impact behavior of composites[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2014,23(4):453-482.
- [12] PERNAS-SÁNCHEZ J, ARTERO-GUERRERO J A, VARAS D, et al. Experimental analysis of normal and oblique high velocity impacts on carbon/epoxy tape laminates[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2014,60(3):24-31.

Oblique penetration on CFRPs by steel sphere

XIE Wenbo, ZHANG Wei, JIANG Xiongwen

(*Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, Heilongjiang, China*)

Abstract: In this study we performed a series of penetration tests on specimens of carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) using a one-stage gas gun at impact angles of 0° , 30° and 45° at speeds ranging from 70 to 280 m/s to investigate their ballistic resistance behavior in oblique penetration. High speed photography was employed to measure the projectile velocity and ballistic trajectory, and analyzed the influence of the impact angle on their energy absorption, ballistic limit and projectile obliquity variations. The results show that the energy absorption coefficient of the normal impact outperformed the oblique impact at lower impact-energies whereas at the higher impact-energies the ballistic performance was observed to be approximately just the opposite. In addition, due to the increase of the penetration length through the laminate with the impact angle, the ballistic limit increases with the impact angle; the influence of the impact angle on the projectile obliquity varies generally with the impact velocity.

Keywords: oblique penetration; carbon fiber reinforced plastics; ballistic limit; energy absorption; projectile obliquity variation

(责任编辑 丁 峰)