DOI: 10.13801/j. cnki. fhclxb. 20170829.004

刚性卵形头弹撞击角度对编织复合材料层合板 侵彻特性的影响

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: 利用一级气炮发射卵形头弹撞击 2 mm 厚度的编织复合材料层合板,撞击角度分别为 0°、30°和 45°,通 过高速相机记录弹靶撞击过程,并获得弹体速度破坏。基于拟合公式处理试验数据,计算获取弹道极限,分析撞击 角度对弹道极限、靶板能量吸收率及其失效模式的影响规律及机制。结果表明:弹体撞击角度为 45°时,靶板弹道极 限最高,其次为 0°,撞击角度为 30°时最一随着冲击角度增加,层合板损伤形状从菱形逐渐转变为椭球形,损伤 面积随冲击速度增加而增大,且 45°,冲击时层合板损伤面积最大,0°和 30°冲击时损伤面积近似相等。弹体初始撞 击角度对靶体失效模式存在影响、弹体撞击角度为 0°时,纤维断口主要是剪切应力导致的横截面。撞击角度为 30°时,纤维断口主要是剪切应力和拉伸应力导致的斜截面。45°斜撞击时,纤维断口产要是拉伸应力导致的横截面。 关键词: 卵形头弹;撞击角度;编织复合材料;弹道极限;能量吸收率 个图分类号: 0%3% 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2015)08-2039-07

Influence of the impact angle of rigid ogival-nosed projectiles on the penetration characteristics of woven composite laminates

DENG Yunfei, YUAN Jiajun, XU Jianxin*

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

Abstract: The 2 mm thick woven composite faminates were impacted by the ogival-nosed projectiles famiched by a one-stage gas gun, and the impact angle was 0° , 30° and 45° . The process of projectiles impacting targets were recorded with photos of a high-speer comera and the velocities of the projectiles were obtained. The influence of the impact angles on the ballistic fimity, the energy absorption efficiency of the targets and tailure mechanisms was analyzed by using the fitted formula to deal with the experimental data. The results show that the ballistic limit impacted by 45° is the highest, followed by 0° and 30° impact. The damage area shape of daminates gradually changes from rhombus to ellipsoid with the increase of the impact angle and the damage area is approximately equal at 0° and 30° . The impact angle of projectile has great influence on the failure mode of plate, the fiber fracture is main cross section caused by shear stress when 0° impact and that is oblique section by shear stress and tensile stress for 30° impact. For 45° impact, the fiber fracture is cross section caused by tensile stress.

Keywords: ogival-nosed projectile; impact angle; woven composite laminates; ballistic limit; energy absorption efficiency

不同材质的靶板在被具有一定头部形状的刚性 弹体侵彻时具有不同的损伤特征和失效形式,金属 靶板主要是花瓣开裂、延性扩孔和盘式隆起,复合 材料主要是纤维/基体开裂和分层等。卵形头弹作 为常用的穿甲弹,具有较好的穿透性能,其对靶板 的侵彻特性研究主要集中在金属材料^[1-6]和混凝

DENG Yunfei, YUAN Jiajun, XU Jianxin. Influence of the impact angle of rigid ogival-nosed projectiles on the penetration characteristics of woven composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2039-2045 (in Chinese).

收稿日期: 2017-07-12; 录用日期: 2017-08-24; 网络出版时间: 2017-08-29 17:53

网络出版地址: https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170829.004

基金项目:中央高校基本业务费资助项目(Y17-07; 3122016C001)

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.刚性卵形头弹撞击角度对编织复合材料层合板侵彻特性的影响[J].复合材料学报,2018,35(8):2039-2045.

+[7-10],研究手段以试验和数值仿真为主。对已有 文献分析发现,复合材料靶板的高速侵彻研究较 少,且弹体主要是球形弹和圆柱形弹。刘璐璐 等[11]研究了钛合金平头弹侵彻碳纤维增强聚合物 缎纹机织复合材料,并对冲击过程做了理论分析, 发现复合材料靶板的失效模式与冲击面有关,在冲 击正面主要是纤维剪切失效和基体压溃,背面主要 是纤维拉伸失效、基体开裂、纤维拔出和分层失 效。古兴瑾等[12-14] 推导了率相关本构模型并引入。 界面单元模拟分层,结合三维失效和刚度退化。 用ABAQUS有限元软件研究了复合材料在高速冲 击下的破坏过程和损伤特征。XIE 等际研究了圆 球弹不同角度高速撞击 2 mm 厚度的复合材料板, 发现相同弹体撞击速度下层含板的耗能随着撞击角 度的增加而增加。弹体撞击速度小于弹道极限时, 正撞击比斜撞击损伤区域更大,撞击速度大于弹道 极限时则相反。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。

针对具有复合材料层合板被具有一定头部形状 的弹体冲击研究,一些学者也开展了一些工作。 SIKARWAR 等^[16] 通过锥形弹撞击复合材料板研入 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,发现撞击速度高于弹道极限时,损伤面 积随着撞击速度增加而减小,层压材料的弹道极限 与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。辛士红[17]提出了纤维增强复合材料动态 渐进损伤本构模型,基于 ABAQUS 和子程序二次开 发,对复合材料层合板进行了数值模拟,研究了卵形 头弹对玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)、碳纤 维增强树脂基复合材料(CFRP)和芳纶纤维增强树脂 基复合材料(KFRP)层合板的冲击响应。WEN^[18]建 立了分析方程用于预测不同头部形状(锥形、平头。 半球形和卵形)的弹体撞击厚纤维增强树脂基复合林 料(FRP)层合板的穿孔和破坏,并得到了试验验证。 CHU 等^[19] 通过弹体斜撞击芳纶层压复合材料板试 验,发现复合材料发生跳弹的角度大于金属靶板,弹 体在穿过复合材料板后的偏移方向与穿过金属板偏 移方向相反。覃悦等^[20]研究了锥形弹撞击 FRP 层合 板的侵彻和穿透性能,在局部化破坏假设基础上进 行改进,提出了锥形弹侵彻深度、剩余速度和弹道极 限的公式并得到试验验证。

基于上述研究现状分析,利用一级气炮发射卵 形头圆柱形弹体以不同速度和角度撞击编织复合材 料层合板,撞击速度为 30~130 m·s⁻¹,撞击角度 为 0°、30°和 45°,使用高速相机记录撞击过程。通 过弹体撞击靶体实验揭示弹体撞击角度对其弹道极 限的影响规律及机制,分析弹体撞击角度和靶板耗能 的关系,研究层合板在不同撞击角度下的失效模式。

1 实验系统与方法

撞击试验在一级气炮上进行,该测试设备主要包括气室,口径12.7 mm、长2 m 的发射管,靶舱,激光测速系统和高速摄像系统,如图1所示。利用高速摄像机 Photron FASTCAM SA5 记录弹靶撞击过程,采用的帧率为 100 000 帖/s,两个1 300 W 的冷光源增大光量,利用 PFV 软件分析弹体撞击层合板前后的速度。

编织结构复合材料层合板碳纤维为 T-300,基体是环氧树脂,编织方式为横竖交叉编织,每层交叉铺料,共计,层,材料参数如表1所列。层合板试件尺寸为50 mm×150 mm×2 mm,通过8个六角螺径固定在靶架上,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。弹体撞 击角度是指其速度方向与靶板平面法线的夹角,图 2 是撞击角度为 45°的靶架安装情况。



長1 T300/环氧树脂编织结构复合材料参数

Table 1 Parameters of T300/epoxy resin woven

composite material

Property	Value
Fiber volume fraction/ ½	68
Longitudinal stiffness E_1/GPa	8.89
Transverse stiffness E_2/GPa	8.89
Poisson ratio ν_{12}	0.77
Shear moduli G_{12}/GPa	2.51
Longitudinal tensile strength $X_{ m t}/{ m MPa}$	719
Longitudinal compressive strength $X_{ m c}/{ m MPa}$	700
Transverse tensile strength Y_t/MPa	719
Transverse compressive strength Y_c/MPa	700
Interlaminar shear strength S/MPa	77
Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 578



Impact angle a	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	$v_{\rm r}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$(\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1})$	$v_{\rm r}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	$v_{\rm i}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	$v_{\rm r}/({\rm m} \cdot s)$	
1	41.91	0	35. 29	0	57.35		
2	52.36	16. 12	52.94	25.12	62.06	Sx2.02	
3	59.56	39. 71	5 70.59	48.53	73.53	50.12	
4	61.76	46. 32	76.47	61.76	89.71	66.24	
5	68.38	- (23) 84	88.24	73.53	102.94	O 91.18	
6	94.85	86.03	111.76	102.94	107.350	97.06	
7	116.91	WY08.09	_	—	1(4)	102.94	
8		○		_	29.41	120.59	

Notes: v_i —Initial velocity of projectile; v_r —Residual velocity of projectile after penetrating the aminate; $v_r = 0$ represents the laminate isn't penetrated by projectile.

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撞击性能的参量。利 用 Recht 和 Ipson^[21]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,通过数据拟合赛 取速度曲线和弹道极限, R-I 公式为

$$v_{\rm r} = a (v_{\rm i}^{p} - v_{\rm bl}^{p})^{1/p} \tag{1}$$

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。 v_{bl} 和待定系数 p可以通过式(1)用最小二乘法拟合得到,相关模型参数如表 3 所示。

图 4 为卵形头弹以 3 种初始角度撞击编织复合 材料层合板的初始-剩余速度曲线,撞击角度为 0°、 30°和 45°时对应的弹体弹道极限分别为 52 m•s⁻¹、 48 m•s⁻¹和 60 m•s⁻¹。撞击角度为 45°比撞击角度 》弹体对靶体的弹道极限和模型参数

Ballistic limits and model constants of

projectile to laminate

~~~~				
Imact angle $\alpha$	0°	30°	45°	
а	1	1	1	
Þ	2.4	2.6	2.2	
$v_{\rm bl}/({\rm m} \cdot {\rm s}^{-1})$	52	48	60	

为0°和30°时的弹道极限分别提高15.38%和25%, 撞击角度为30°比撞击角度为45°的弹道极限低 20%。因此,弹体弹道极限随着其初始撞击角度 增加先降低后增加,说明撞击角度在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 Y等^[22]在做撞击纤维金属层合板试验 时,也发现弹体以一定角度斜撞击时弹道极限 最小。



#### 2.2 靶体能量吸收率

能量吸收率[8]指弹体在贯穿靶板的前后动能差 值与其初动能的比值、可以作为评估复合材料层合 板在撞击过程中的能量吸收,定义为

$$\eta = \frac{0.5m_{\rm p}(v_{\rm r}^2 + v_{\rm r}^2)}{0.5m_{\rm p}v_{\rm i}^2} = 1 - \frac{v_{\rm r}^2}{v_{\rm i}^2}$$
(2)

图 5 为不同撞击角度下的层合板能量吸收率随 弹体撞击能量的变化趋势。可以发现, 靶板能量吸 收率随弹体撞击能量的增加先急剧降低然后趋于稳 定。当撞击速度远大于各自的弹道极限时,3种冲 击角度下的靶板能量吸收效率趋于稳定,说明弹体



Fig. 5 Relation between initial kinetic energy of projectile and energy absorption rat of target laminate

贯穿靶板的耗能趋于稳定,即弹体初始动能对靶板 的能量吸收影响很小,这是由于靶板的失效模式从 分层转化为压剪导致[3]。此外,在试验速度范围 内,45°撞击时的靶板能量吸收率最高。冲击速度 在弹道极限速度附近时,0°次之,30°最小。但是, 当湖击速度远大于其弹道极限时,弹体 30°撞击时 的靶板能量吸收率比 0°撞击更高, 这也说明靶体能 量吸收率不仅与弹体初始撞击角度有关。还与弹体 初始撞击速度相关。

#### 2.3 靶体失效形式

利用高速相机可以清楚地记录弹体运动轨迹和 靶板的变形情况。图 6 为97形弹以不同撞击角度撞







(a)  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $v_i = 94.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_r = 86.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 



(b)  $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $v_i = 76.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v_i = 61.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 



(c)  $\alpha = 45^{\circ}$ ,  $v = 89.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $v = 62.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 图 6 弹体撞击靶体高速摄像过程







Fig. 6 High-speed camera pictures showing perforation process of the laminate

击编织复合材料的典型过程。可以看出,弹体撞击 角度为0°时,弹体穿过靶板后姿态平稳,运动方向 没有发生变化。但是,弹体撞击角度为30°和45° 时,弹体在穿过靶板后向靶板法向偏转,弹体击穿 后运动方向与其初始运动方形存在一定夹角。

图 7 为不同撞击角度下层合板正面和背面的损伤形貌。可以看出,撞击角度对靶板破坏存在一定的影响。编织复合材料在受卵形弹撞击时,主要失效形式是扩孔,靶板正面受剪切力作用,形成一个凹坑,背面受拉伸,形成一个裂纹与对角线重合的菱形鼓包^[23],如图 7(a)所示。当撞击角度增大时,靶板正面开孔形状由圆形过渡为椭圆、如图 7(b)所示,且孔缘变得十分粗糙。撞击角度达到某一值后,弹体不能从菱形鼓包中心区域穿透,而是刺穿鼓包侧面,如图 7(c)所示,这是由于靶板背面的菱形区域是其正面受弹体冲击扩展形成,且早于弹体





(a)  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $v_1 = 94.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 



(b)  $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $v_i = 76.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 





(c) α=45°, ν_i=89.71 m・s⁻¹
图 7 不同撞击角度下 T300/环氧树脂复合材料层合板损伤形貌
Fig. 7 Damage morphologies of T300/epoxy composite
laminated plates with different impact angles

击穿,菱形鼓包侧面隆起与靶板平面呈一定角度, 且 45°冲击使弹体在靶板平面速度分量增加,导致 弹体从菱形侧面贯穿。

利用超声 C 扫描检测系统(PBJC-X50Y40)对 撞击后的靶板进行无损探伤,图8(a)、图8(b)和图 8(c)分别是层合板在卵形头弹以0°、30°和45°斜撞 击下的 C 扫描图像。可以看出,随着冲击角度增 加,靶板损伤形状从菱形逐渐转变为椭球形。

图 9 是层合板在卵形头弹不同冲击角度下 C 扫描的损伤面积。可以看出,45°斜冲击时层合板的 损伤面积最大,且随着冲击速度的增加而增大。0° 和 30°冲击时层合板损伤面积都随冲击速度增加而 缓慢增大,且二者损伤面积近似。

为更深入分析靶板的失效机制,利用扫描电子 显微镜(Hitarchi S-3400N)观察不同撞击角度下靶 板开孔断面和纤维断口形状,如图 10 所示。弹体 撞击角度为30时,弹孔断面的两侧材料对称分布, 弹道附近小区域范围内有分层。当弹体以一定角度 斜撞击时,弹体在靶板中发生偏转,增加了弹靶相 互作用区域,分层现象变得明显,且靶板损伤区域



图 8 T300/环氧树脂复合材料层合板 C 扫描图像 Fig. 8 F



图 9 T300/环氧树脂复合材料层合板 C 扫描损伤面积和 弹体初速度关系

Fig. 9 Damage area of C-scan of T300/epoxy vs. initial velocity of projectiles







(c) 45°

图 10 卵形弹撞击下 T300/环氧树脂复合材料层合板开孔断面和 纤维微观结构

Fig. 10 Cross section of the T300/epoxy laminate and the fiber microstructure impacted by projective

随撞击角度增加而增大。

碳纤维属于典型的脆性就不存在塑性变形,断裂处无明显的颈缩现象。T300纤维是中强度碳纤维,具有高强度和低强度纤维的断口特征。 弹体撞击角度为0°时,纤维断口主要是光滑横截面,这是由于剪切应力和纤维轴线垂直所造成,还 有少量波浪状纤维断口,可能是交变剪切应力和交 变弯曲应力所造成^[24]。弹体撞击角度为30°时,纤 维断口主要为斜截面,这是由于剪切应力和纤维轴 线不垂直所造成,还有少量表面不规则的断口,可 能是剪切应力与拉伸应力造成^[25]。弹体撞击角度 为45°时,纤维断口主要是横截面,弹体表面与靶 板平面夹角很小,剪切应力小于纤维拉伸应力,纤 维断裂主要是由拉伸应力所造成。

### 3 结 论

本文通过对 T300/环氧树脂编织复合材料层合 板在弹体 0°、30°和 45°撞击下的试验研究,分析了 弹体撞击角度对其弹道极限、靶体能量吸收率和失 效机制的影响规律及机制。 (1) 弹体撞击角度为 45°时其弹道极限最高,其次为 0°和 30°。

(2)复合材料层合板能量吸收率与弹体初始撞击速度和角度相关,其随弹体初始撞击能量的增加先急剧降低然后保持稳定。

(3)随着冲击角度增加,层合板损伤形状从菱 形逐渐转变为椭球形,损伤面积随冲击速度增加而 增大,且45°冲击时层合板损伤面积最大,0°和30° 9冲击时损伤面积近似相等。

(4) 弹体撞击角度对复合材料层合板失效模式 存在影响,弹体撞击角度为0°时,层合板纤维断口 主要是剪切应力导致的横截面,弹体撞击角度为 30°时,层合板纤维断口主要是剪切应力或拉伸应 力导致的斜截面,弹体撞击角度为45°斜撞击时, 层合板纤维断口主要为拉伸应力导致的横截面。

参考文献:

- [1] DF So BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, et al. The effect
   Of target strength on the perforation of steel plates using three different projectile nose shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8-9): 1005-1038.
- [2] BØRVIK T, CLAUSEN A H, ERIKSSON M AN Experimental and numerical study on the performance AA6005-T6 panels [J]. International Journal of Dupact Engineering, 2005, 32(1-4): 35-64.
- [3] DEY S, BØRVIK T, TENCE of al. On the ballistic resistance of double-layered cuch plates: An experimental and numerical investmental). International Journal of Solids & Structures 2007, 44(20): 6701-6723.
- [4] BØRVIK T. HOPPERSTAD O S, PEDERSEN K O. Quasibritte fracture during structural impact of AA7075-T651 aluniuum plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(5): 537-551.
  - J IQBAL M A, GUPTA N K. Ballistic limit of single and layered aluminum plates [J]. Strain, 2009, 47 (s1): e205e219.
- [6] IABAL 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.

[7] 周宁,任辉启,沈兆武,等.卵形头部弹丸侵彻钢筋混凝土的工程解析模型[J].振动与冲击,2007,26(4):73-76.
ZHOU N, REN H Q, SHEN Z W, et al. Engineering analytical model for projectiles to penetrate into semi-infinite reinforced concrete targets [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4):73-76 (in Chinese).

[8] 刘志林,孙巍巍,王晓鸣,等. 卵形弹丸垂直侵彻钢筋混凝

土靶的工程解析模型[J]. 弹道学报, 2015(3): 84-90. LIU Z L, SUN W W, WANG X M, et al. Engineering analytical model of ogive-nose steel projectiles vertically penetrating reinforced concrete target[J]. Journal of Ballistics, 2015 (3): 84-90 (in Chinese).

- [9] 周宁,任辉启,沈兆武,等.卵形头部弹丸侵彻混凝土的研究[J].高压物理学报,2007,21(3):242-248.
  ZHOU N, REN H Q, YAO Z W, et al. Study on penetration of concrete targets by ogiva-nose steel projectile[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(3): 242-248 (in Chinese).
- [10] 聂明飞,李玉龙. 卵形头部弹侵彻单多层混凝土靶板有股元 仿真[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(4): 78-83 NIE M F, LI Y L. Finite element simulation or ogive-nosed projectiles penetrating single and multitagered concrete targets[J]. Journal of Detection & Conrrol, 2009, 31(4): 78-83 (in Chinese).
- [11] 刘璐璐,宣海军,洪棣荣 等 锻纹机织复合材料高速冲击 试验研究及理论分析 中国科技论文,2016,11(10): 1169-1174.

LIU L L (NAN H J, HONG W R, et al. Experimental study and heoretical analysis on high velocity impact of satin worven carbon fiber reinforced composites[J]. China Science Paper, 2016, 11(10): 1169-1174 (in Chinese).

- [12] 古兴瑾,许希武. 纤维增强复合材料层板高速冲击损伤数据 模拟[J]. 复合材料学报, 2012, 30(1): 211-219.
  GU X J, XU X W. Numerical simulation of damage in fiber reinforce composite laminates under high velocity impact[J].
  Acta Materiae Compositae Sinica, 20(2), 30(1): 211-219 (in Chinese).
- [13] 古兴瑾,许希武,黄晶. 层合复合材料薄板高速撞击损伤研究[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).
- [14] 马凯,许希武,古兴瑾.纤维增强复合材料层板高速倾斜撞击损伤数值模拟[J].复合材料学报,2013,30(3):150-164
  MAK,XUXW,GUXJ. 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).

- [15] XIE W, ZHANG W, KUANG N, 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.
- [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.

文字士红.纤维增强树脂基复合材料层合板抗侵彻性能数值模拟研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015.

XIN S H. Numerical study on the penetration resistence of fiber reinforced plastic laminates [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 (in Chinese).

- [18] WEN H M. Penetration and perforation of thick FRP laminates[J]. Composites Science & Technology, 2001, 61(8): 1163-1172.
- [19] CHUCK, CHENY, HSEUGC, et al. The study of obliquity on the ballistic performance of basket fabric composite materials. J. Journal of Composite Materials, 2007, 41 (13): 339-1558.
- [20] 建筑文鹤鸣,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 cone-nosed projectiles[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(2):121-128 (in Chinese).
- [21] RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics[J]. Journal of Applied Mechanics. 2963, 30(3): 384-390.
- [22] CHEN Y, PANG B J, ZHENG W, et al. Experimental investigation on normal and oblique ballistic impact behavior of fiber metal lamnates [J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 23)37 32(23): 1769-1778.
- [23] LÓPEX Experimental and numerical analysis of normal and obtinue Dallistic impacts on thin carbon/epoxy woven lamineus[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2008, 39(2): 374-387.
  - [] ZHANG H J, CHEN W Y, CHEN D C. Microstructure of the hole surface of CFRP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2000, 17(2): 98-101.
- [25] ZHENG L, YUAN J T, WANG Z H. Microscopic study of ground surfaces of drilled holes in fibre reinforced plastics[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(12): 1492-1496.