

文章编号: 1001-1455(2009)01-0029-06

超高分子量聚乙烯纤维增强层合厚板 抗弹性能实验研究*

王晓强, 朱 锡, 梅志远, 陈 昕

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要: 研究了四种不同面密度的超高分子量聚乙烯纤维增强层合板(UFRP)的抗高速立方体破片侵彻的能力,并比较了四种不同面密度 UFRP 的吸能情况。实验结果表明,UFRP 薄板和厚板的弹道极限与面密度表现出不同的关系;UFRP 正面出现了垂向层状剥离带,而 UFRP 薄板背面出现了水平层状剥离带,UFRP 厚板则未见剥离带出现;高速破片冲击 UFRP 厚板时,应考虑破片敛粗变形对 UFRP 厚板吸能以及变形模式的影响。

关键词: 固体力学;吸能;弹道冲击;纤维增强层合板;超高分子量聚乙烯纤维

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 130·1545

文献标志码: A

1 引 言

超高分子量聚乙烯(ultra-high molecular weight polyethylene fiber, UHMWPE)纤维是继玻纤、芳纶后的第三代纤维增强层合板(fiber reinforced plastics, FRP)的增强材料,以其作为增强材料的层合板(ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced plastics, UFRP)的防护系数(标准钢甲半无限厚靶面密度与对比材料面密度的比)是芳纶(kevlar fiber reinforced plastics, KFRP)的 3.6 倍。到目前为止,UHMWPE 纤维的防弹性能是最好的^[1]。FRP 的成型方法主要有:手糊、层压、喷射、缠绕等^[2],而用于防弹板制作的主要是前两种。郑震等^[3]回顾了近年在 UHMWPE 纤维增强复合材料的防弹性能方面的研究情况。孙志杰等^[1]认为,成型压力为 12.5 MPa 时,UD75 防弹板的防弹性能最好。梁子青等^[4-5]认为,弹丸的敛粗变形是不同侵彻阶段中逐步完成的,纤维的剪切和拉伸变形是两种主要的响应方式,同时靶板还会出现明显的分层现象。

UFRP 厚板的变形情况及抗弹机理与薄板有着显著的差别,但是,目前对高速破片冲击 UFRP 厚板的研究还不多见。本文中,用实验研究 UFRP 层压厚板的抗弹性能,并比较厚板和薄板的抗弹性能,以得到弹道极限的估算公式。弹道实验的结果对 UFRP 层压厚板抗弹机理的分析、研究和解析模型的建立都具有一定的参考价值。

2 弹道实验概述

2.1 破片的发射及测试系统

弹体采用 45 钢制成的立方体破片,长 7.5 mm,经机械加工磨光,质量为 3.15~3.35 g。采用 14.7 mm 滑膛弹道枪发射,速度由装药量来控制。同时,为保证发射所必须的密封性能和达到规定的速度,破片又用特制的铝合金卡环(弹托)包覆。而弹托在出膛后会分离,使破片以预定的速度飞行。在弹道实验时,布置高速摄影机和照明设备在侧面拍摄弹道侵彻的全过程,观察靶板的变形情况和弹丸的运动情况。弹道实验的示意图如图 1 所示。

层压板四边被固定在支架上(如图 2),采用靶网计时器法进行弹体初始速度和剩余速度的测试(如图 3)。测速的基本原理为:实验开始前,四个测速靶网的信号都处于连通状态,数字计时器处于待激发状态。在靶板前设置间距很小的一对测速靶网(锡纸),当弹体冲击测速靶网 1 时,测速靶网 1 的连通状态断开,数字计时器开始计时;当弹体冲击测速靶网 2 时,测速靶网 2 的连通状态断开,数字计时器停止计时,读出时间间隔 Δt ,则可得到弹体的初始速度 v_0 ;剩余速度 v_t 则根据同样的原理由测速靶网 3~4 得到。

* 收稿日期: 2007-07-10; 修回日期: 2007-12-09

基金项目: “十一五”军队预研基金项目

作者简介: 王晓强(1981—),男,博士研究生。

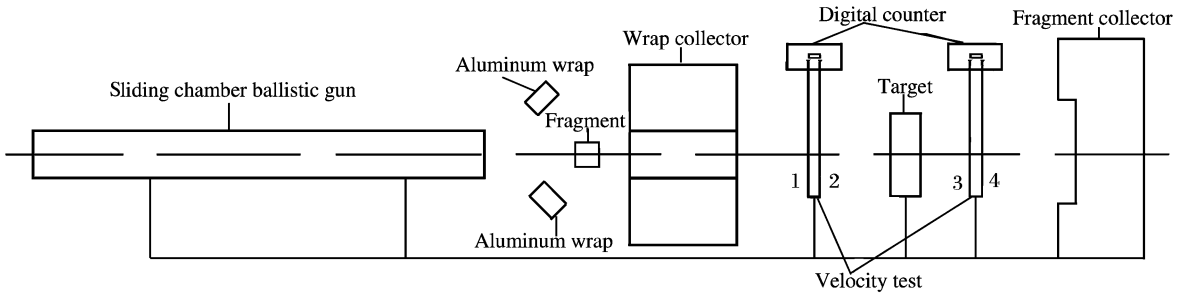


图1 弹道实验示意图

Fig. 1 Sketch of the ballistic impact experiment

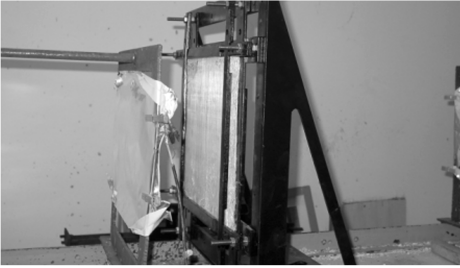


图2 靶板固定情况

Fig. 2 Boundary conditions of the target

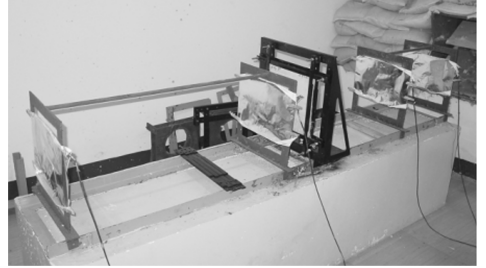


图3 实验速度测试系统

Fig. 3 Test system for experiment velocity

2.2 实验靶板的制备

将预浸料按设计要求裁成一定尺寸;预估所需层数、铺层至所需厚度;置于热压机上成型,升温速率为 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;当温度稳定在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,保温、加压;在此过程中,由于预浸料的压缩,需要不断调压至所需值;30 min后,自然冷却至室温、卸模;利用水刀切去毛边;测量层压板的几何尺寸。靶板大小为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,满足文献[6]所提出的最小靶板尺寸 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 的要求。

3 弹道实验结果及分析

3.1 弹道实验结果

数值计算结果表明,随着靶板尺寸的减小,靶板的破坏越来越严重,但剩余速度等瞬态量变化不大^[7]。本文中用实验研究了靶板尺寸对吸能和变形模式的影响,认为靶板参与变形部分的最大直径为约 80 mm 。因此,针对本文中的立方体破片,只要靶板的尺寸大于 100 mm ,靶板的边界和大小对吸能的影响就可以忽略。考虑到这些因素,又为了充分利用靶板,将靶板分为两类:(1)靶板被划分为四个区域,每个区域的中心作为弹击的预定位置;(2)弹着点为靶板的中心。弹道实验中,通过测速靶得到破片的初始速度和剩余速度。本实验共制作了7块层压板,发射破片14枚。7块层压板大小均为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$,而层数则分别为88、90、186、248、372。具体的弹道实验测试结果如表1所示。表中: h 为靶板厚度, N 为层数, ρ 为面密度, m 为破片质量, v_0 为初始速度, v_r 为剩余速度, E 为单位面密度吸能量。

采用高速摄影设备拍摄了弹道实验T72的破片侵彻过程,取侵彻开始、侵彻中和侵彻结束三个阶段作为典型的考察阶段,具体的侵彻和穿透情况如图4所示。

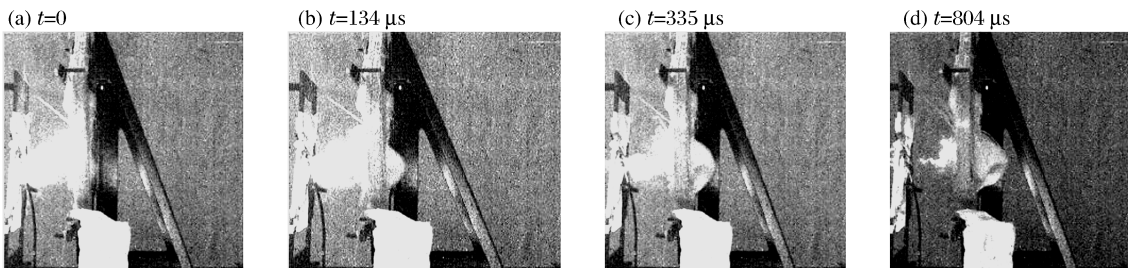


图4 实验T72的侵彻过程

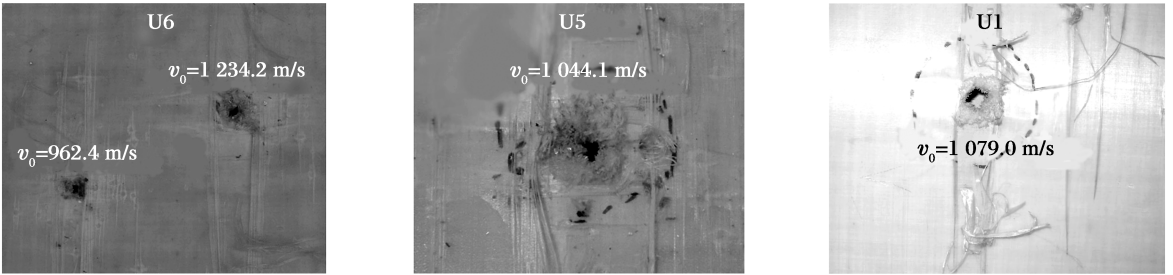
Fig. 4 Penetration of experiment T72

表 1 弹道测试结果

Table 1 Experimental results of ballistic test

靶板	h/mm	N	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^2)$	实验	m/g	$v_0/(\text{m}/\text{s})$	$v_r/(\text{m}/\text{s})$	$E/(\text{J} \cdot \text{m}^2/\text{kg})$
U1	7.6	88	7.11	T11	3.15	817.2	571.6	75.6
				T12		1 079.0	873.3	89.0
U2	7.7	88	7.07	T21	3.15	928.7	753.0	65.8
				T22		1 325.8	1 164.4	89.5
U3	7.8	88	7.11	T31	3.15	569.1	0	71.7
				T32		649.3		
U4	7.8	90	7.11	T41	3.15	1 284.8	1 143.2	72.6
U5	15.2	186	15.4	T51	3.30	1 044.1	嵌于靶板	116.8
				T52		1 161.2	666.7	96.8
U6	20.8	248	20.6	T61	3.35	962.4	嵌于靶板	75.3
				T62		1 234.2	521.8	101.7
U7	30.2	372	30.8	T71		1 497.0	嵌于靶板	120.1
				T72	3.30	1 624.1	嵌于靶板	141.3
				T73		1 667.8	嵌于靶板	149.0

(a) Obverse deformation



(b) Rear deformation

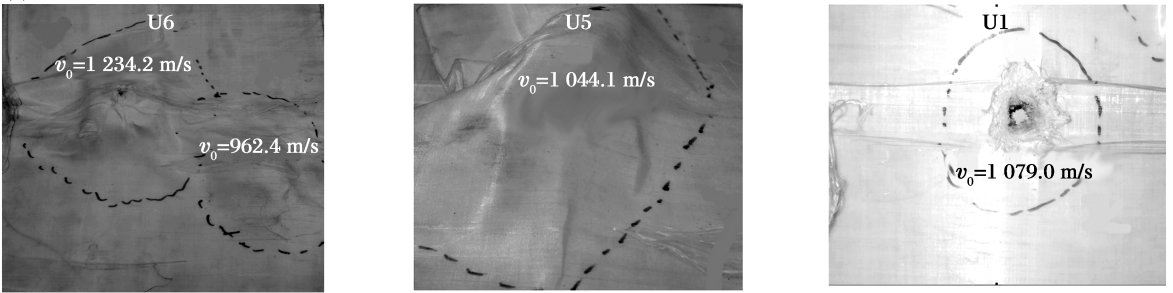


图 5 不同实验条件下的破片变形

Fig. 5 Deformation of different experiments

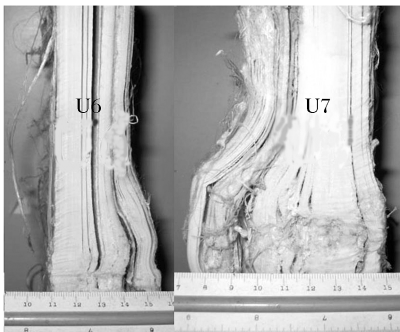


图 6 靶板 U6、U7 的破坏截面

Fig. 6 Destroyed sections of U6、U7

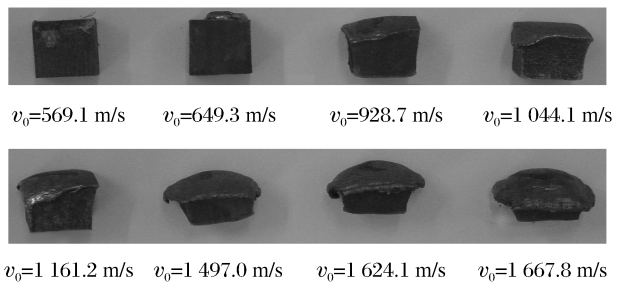


图 7 不同速度下的破片变形

Fig. 7 Deformation of fragments with different velocities

UFRP 在遭受立方体破片的高速侵彻时,不同厚度的板在同一速度侵彻时及同一厚度在不同冲击速度时,都呈现出不同的变形规律(见图 5)。

为了更直接的观察 UFRP 厚板内部剪切冲塞和拉伸变形这两种破坏模式的过渡情况,用水刀将靶板 U6、U7 在着弹处(T62、T73)切开,具体的变形情况如图 6 所示。为了考查破片的变形情况,采用破片回收器收集破片(见图 7)。

3.2 实验结果分析

3.2.1 弹道极限的确定

弹道极限是衡量靶板在一定弹体侵彻下抗弹性能的重要指标。弹道极限又称为穿透临界速度,通常通过这样的实验过程得到:取 6 发弹丸侵彻速度的平均值,3 发为完全穿透靶板的最低速度,3 发为未穿透靶板的最高速度,且未穿透速度中的最低值与穿透速度中的最高值之差小于或等于 50 m/s。根据弹道测试结果,结合不同的分析方法可以得到不同面密度 ρ 下的弹道极限 v_c :(1)当 $\rho=7.11 \text{ kg/m}^2$ 时,根据实验 T31 和 T32 的初始速度平均值,得到 $v_c=609.2 \text{ m/s}$ 。(2)当 $\rho=15.4 \text{ kg/m}^2$ 时,实验 T51 的靶板还有 14 层未穿透,假设单位面密度吸能量与破坏的层数成比例,可以得到 U5 的弹道极限近似为 1 100.2 m/s。(3)当 $\rho=20.6 \text{ kg/m}^2$ 时,根据图 5~6,实验 T62 的初始速度略大于弹道极限,又结合实验 T61、U6 的弹道极限近似取为 1 223.5 m/s。(4)当 $\rho=30.8 \text{ kg/m}^2$ 时,实验 T73 的靶板还有 49 层未穿透,假设单位面密度吸能与破坏的层数成比例,可以得到 U7 的弹道极限近似为 1 789.0 m/s。

3.2.2 实验现象分析

从图 4 可以看到,侵彻开始阶段,有大量的白色粉末状物向靶后喷出,这是 UFRP 表层破坏时喷射出的纤维及基体碎片。破片侵彻厚板 U7 时,冲击速度小于弹道极限,靶板的背部凸起和变形区域都随着侵彻的进行而增大,而且背凸有一个回弹的过程,且 U7 呈现出大范围的分层和拉伸变形。

图 5 中,U6 的实验比较了同一靶板在不同冲击速度下的正、背面的变形差异。从正面的变形看,实验 T62 的弹着点处的弹坑和表层纤维的破坏都大于实验 T61,但两者都是冲塞破坏;从背面的变形看,由于 T62 的冲击速度接近弹道极限,它的背部呈现出大范围的大变形及明显的分层;弹孔正面附近出现了垂向层状剥离带。

图 5 中,U1、U5 的实验比较了不同靶板在相近的冲击速度作用下的变形情况。薄板 U1 的正、背面的破坏和变形情况都小于厚板 U5。主要原因是 U5 的冲击速度接近弹道极限,靶板发生了充分变形,而 U1 的冲击速度远大于弹道极限,靶板呈现明显的冲塞破坏。弹孔附近正面表层出现垂向层状剥离带,背面表层出现水平层状剥离带,这与弹孔附近较大的剪切力和层合板的组成(正面纤维垂向布置、背面纤维水平向布置)有关。

由图 6 可以清楚地看到两个不同的吸能阶段:横向变形很小的剪切冲塞和横向大变形的拉伸破坏。剪切部分的分层较小,而拉伸变形部分则出现了大面积的分层现象,原因是拉伸阶段持续的时间较长,有利于层间剪切波的传播;通过对参与剪切破坏和拉伸破坏的纤维数量的测量发现,U7 被破坏的纤维中拉伸破坏的纤维所占的比例要大于 U6,因而 U7 的单位面密度吸能量要大于 U6,实验结果也验证了这一点。

由图 7 可以看到,随着侵彻速度和靶板面密度的增大,破片从发生较小的变形到产生较大的塑性墩粗变形,弹头部从方形变为蘑菇状。制式弹在侵彻高强聚乙烯层合板时,弹体变形吸能占弹体动能损失的 25% 左右^[8];而且不同类型的弹头在侵彻 FRP 层合板时,靶板也呈现出了不同的破坏断裂模式^[9-10];因此,应该考虑破片的墩粗变形对 UFRP 厚板吸能以及变形模式的影响。但是,由于弹体的墩粗变形吸能是一个复杂的过程,需要做专门的研究,而且关于这方面的研究也很少见。因此,本文将弹、靶系统的吸能近似假设为 UFRP 厚板的吸能。

3.2.3 弹道极限与面密度的相关性分析

B. L. Lee 等^[11]、M. J. Iremonger 等^[12]根据实验结果,给出了针对高强聚乙烯纤维平纹织物层合板的弹道极限与面密度的经验公式

$$v_{c,1} = 226.36\rho^{0.51} \quad (1)$$

式中: v 、 ρ 的单位分别为 m/s、 kg/m^2 ,下同。

将由式(1)计算得到面密度分别为 7.11、15.4、20.6、30.8 的弹道极限 $v_{c,1}$ 和实验结果 $v_{c,e}$ 绘制于图 8 中,具体的弹道极限值见表 2。

从表 2 中可以看到,当面密度为 7.11 kg/m^2 时,由式(1)得到的弹道极限与实验值吻合较好;但是,当面密度增大到 15.4、20.6、30.8 kg/m^2 时,由式(1)所预测的弹道极限与实验结果存在很大的差异,这说明式(1)仅适用于薄板的情况。式(1)中弹道极限的平方与靶板面密度近似成正比关系,但是大量的实验结果表明,弹道极限的平方与面密度不成正比关系。图 8 中的实验点反映出靶板 U5、U6、U7 的弹道极限随面密度的增加而增大的速度明显加快,这与式(1)所反映

表 2 不同公式计算的弹道极限值

$\rho/(\text{kg/m}^2)$	$v_{c,e}/(\text{m/s})$	$v_{c,1}/(\text{m/s})$	$v_{c,2}/(\text{m/s})$
7.11	609.2	615.1	609.2
15.4	1 100.2	912.9	1 074.0
20.6	1 223.5	1 058.9	1 271.1
30.8	1 789.0	1 300.1	1 768.9

的弹道极限变化规律也不一致。所以，由式(1)预测的 UFRP 厚板弹道极限已经不适用于本文的研究对象。

本文中根据实验结果的变化趋势，并结合指数函数的变化规律，在不考虑破片质量影响的情况下，假设 UFRP 厚板的弹道极限与面密度成自然指数的函数关系。根据 U5、U6、U7 靶板的弹道极限实验值，可得到 UFRP 厚板的弹道极限的计算式： $v_c = 652.1e^{0.0324\rho}$ 。

根据弹道极限实验值的分布规律可知，面密度在 15.4 kg/m² 以下的靶板弹道极限与面密度在 15.4 kg/m² 以上的靶板弹道极限呈现不一样的变化规律；在 $\rho = 15.4 \text{ kg/m}^2$ 时，弹道极限曲线有明显的拐点出现，因此需要对 UFRP 薄板的弹道极限与面密度的相关性作进一步的分析。

结合式(1)所反映的规律，假设 UFRP 薄板的弹道极限与面密度成幂函数关系，又根据靶板 U1~U5 的实验结果，可得到 UFRP 薄板的弹道极限的计算式： $v_c = 145\rho^{0.7323}$ 。

综合上所述，UFRP 在遭受立方体破片冲击时的弹道极限估算式为

$$v_{c,2} = \begin{cases} 145\rho^{0.7323} & \rho \leq 15.4 \\ 652.1e^{0.0324\rho} & \rho > 15.4 \end{cases} \quad (2)$$

图 8 和式(2)都反映出，UFRP 厚板的弹道极限曲线随面密度的增加呈现出斜率增大的趋势，即增加相同面密度时，UFRP 厚板的抗弹性能呈现出迅速增加的趋势。图 6 也反映了这一点。其主要原因是：UFRP 厚板的吸能通过剪切冲塞和拉伸实现，所增加的厚度主要参与拉伸变形。

考虑到同一靶板情况下，弹道极限与破片质量是相关的，随破片质量的增大， v_c 值减小。关于考虑破片质量影响的 UFRP 弹道极限计算式(在同一面密度下，得到相同几何形状、不同质量破片的靶板弹道极限)，将作进一步的实验研究。

4 结 论

由长 7.5 mm 的立方体高速破片冲击 UFRP 的弹道实验研究，可以得到以下结论：

- (1) 冲击速度远大于弹道极限时，靶板呈现明显的冲塞破坏；冲击速度接近弹道极限时，靶板呈现较大的变形。
- (2) 被穿透靶板正面出现垂向层状剥离带，背面出现水平向层状剥离带，这与弹孔附近较大的剪切力和层合板的组成(正面纤维垂向布置、背面纤维水平向布置)有关。
- (3) 高速破片冲击 UFRP 厚板时，应考虑破片的墩粗变形对 UFRP 厚板吸能以及变形模式的影响。
- (4) 不考虑破片质量的影响时，UFRP 的弹道极限 v_c 与面密度 ρ 的关系为式(2)。

参考文献：

[1] 孙志杰,张佐光,沈建明,等. UD75 防弹板工艺参数与弹道性能的初步研究[J]. 复合材料学报, 2001,18(2):46-49. SUN Zhi-jie, ZHANG Zuo-guang, SHEN Jian-min, et al. Preliminary study on the process parameters and ballistic properties of UHMWPE fiber composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2001,18(2):46-49.

[2] 沈观林,胡更开. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2006:12-13.

[3] 郑震,施楣梧,周国泰. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料及其防弹性能的研究进展[J]. 合成纤维, 2002,31(4): 20-23;26. ZHENG Zhen, SHI Mei-wu, ZHOU Guo-tai. Progress in ultrahigh molecular weight polyethylene fiber reinforced composites and its bulletproof property[J]. Synthetical Fiber, 2002,31(4):20-23;26.

[4] 梁子青,周庆,王韬,等. UHMWPE 纤维/LDPE 复合材料防弹性能及机理研究[J]. 纤维复合材料, 2002(4):6-9. LIANG Z-qing, ZHOU Qing, WANG Tao, et al. A study on ballistic performance and mechanism of UHMWPE fiber/LDPE composites[J]. Fiber Composites, 2002(4):6-9.

[5] 梁子青,周庆,邱冠雄,等. 超高分子量聚乙烯纤维防弹复合材料的研究[J]. 天津工业大学学报, 2002,22(2):6-9. LIANG Zi-qing, ZHOU Qing, QIU Guan-xiong, et al. Study on ultra-high molecular weigh polyethylene antiballistic composites[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2002,22(2):6-9.

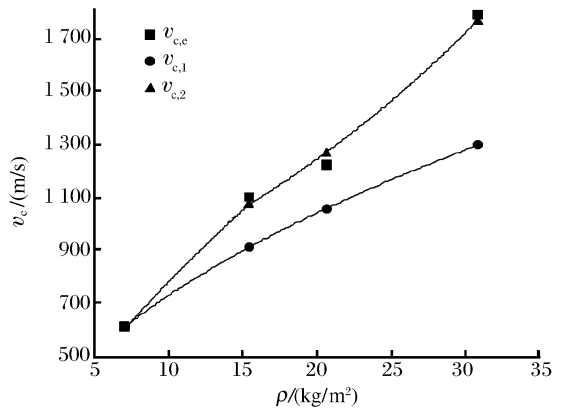


图 8 UFRP 的弹道极限曲线

Fig. 8 Ballistic limit curve of UFRP

- [6] Roach A M, Evans K E, Jones N. The penetration energy of sandwich panel elements under static and dynamic loading[J]. *Composite Structures*, 1998,4(2):119-152.
- [7] 韩丽,高世桥. 混凝土靶体尺寸对过载影响的数值研究[J]. *计算机仿真*, 2007,24(6):17-19;26.
HAN Li, GAO Shi-qiao. Numerical study of the effect of concrete target's diameter on deceleration[J]. *Computer Simulation*, 2007,24(6):17-19;26.
- [8] Jacobs M J N, van Dinggenen J L J. Ballistic protection mechanisms in personal armor[J]. *Journal of Materials Science*, 2001,36(13):3137-3142.
- [9] Reddy T Y, Wen H M, Reid S R, et al. Penetration and perforation of composite sandwich panels by hemispherical and conical projectiles[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1998,120(2):186-194.
- [10] Wen H M, Reddy T Y, Reid S R, et al. Indentation penetration and perforation of composite laminates and sandwich panels under quasi-static and projectile loading[J]. *Key Engineering Materials*, 1998,141/143(1):501-552.
- [11] Lee B L, Song J W, Ward J E. Failure of spectra polyethylene fiber reinforced composites under impact loading [J]. *Journal of Composite Materials*, 1994,28(13):1202-1226.
- [12] Iremonger M J, Went A C. Ballistic impact of fiber composite armors by fragment-simulating projectiles[J]. *Composites: A*, 1996,27(7):575-581.

Ballistic performances of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced thick laminated plates

WANG Xiao-qiang*, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, CHEN Xin

(*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China*)

Abstract: Ballistic tests were performed to investigate the anti-penetration properties of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced laminated plates (UFRP) against high-speed cubic fragments. Energy absorption performances were compared among these fiber-reinforced laminated plates with the four different area densities of 7.11, 15.4, 20.6 and 30.8 kg/m². Experimental results show that the relations of ballistic limit and area density for the thin UFRP are different from those for the thick ones. Vertical strips on the obverse sides of the thin UFRP and horizontal strips on their rear sides can be observed, but no trips can be seen from the thick UFRP. It is required to consider effects of stamp deformation of the fragments on energy absorption and deformation modes of the thick UFRP impacted by high-speed fragments.

Key words: solid mechanics; energy absorption; ballistic test; fiber-reinforced laminated plate; ultra-high molecular weight polyethylene fiber

* Corresponding author: WANG Xiao-qiang
Telephone: 86-27-83443120-803

E-mail address: qq000112@163.com