

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.10.018

纤维增强复合材料轻型装甲抗高速 FSP 弹侵彻性能

黄晓明¹, 方志威^{1,2}, 侯海量², 李永清², 李茂², 朱锡²

(1. 中国人民解放军 91189 部队, 江苏连云港 222041; 2. 海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033)

摘要: 为研究纤维增强复合材料轻型装甲抗高速 FSP 弹侵彻性能, 采用模压工艺制作了玻纤/高强聚乙烯纤维/玻纤(层合板 I)和玻纤/芳纶纤维/玻纤(层合板 II)两种层合板, 将纤维增强复合材料层合板与 945 钢组成轻型装甲并开展弹道试验研究其抗侵彻性能。通过分析弹道试验结果, 指出了破片模拟(FSP)弹、945 钢板和层合板变形失效模式。结果表明, FSP 弹呈现出“蘑菇状”墩粗变形; 945 钢板发生绝热剪切破坏; 层合板主要变形破坏模式为纤维的剪切失效和拉伸断裂, 纤维出现不同程度的原纤化并反向喷出, 纤维层间存在明显的分层; 层合板中玻纤层还伴随脱胶失效破坏; 层合板 I 出现鼓包和侧面皱缩; 层合板 II 的变形损伤区域小于层合板 I 变形损伤区域; 随着弹体入射速度增加, 945 钢板与层合板单位面密度吸能呈现线性增加; 设计的层合板 I 抗侵彻性能优于层合板 II。

关键词: 轻型装甲; 纤维增强复合材料; 抗侵彻性能; 试验研究

中图分类号: O385 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)10-0092-06

Anti-Penetration of Fibre Reinforced Composite Material Light Armor Subjected to Impact of FSP

Huang Xiaoming¹, Fang Zhiwei^{1,2}, Hou Hailiang², Li Yongqing², Li Mao², Zhu Xi²

(1. Unit 91189 of PLA, Lianyungang 222041, China;

2. College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract : In order to study the light armor that made up of fiber reinforced material anti-penetration performance, technology of pressure molding was utilized for two kinds laminates. The laminate I was formed by fiber-glass and ultrahigh molecular weight polyethylene (PE-UHMW), while laminate II was composed by fiber-glass and Kevlar fiber. The light armor was made up by 945 steel and laminate. Ballistic experiment was carried to research the anti-penetration of light armor. Analysing the result of experiment, we found that the deformation and failure pattern of fragment simulated projectiles (FSP) bullet, 945 steel and the laminate. The result shows the FSP bullet occur “mushroom like” frusta deformation while 945 steel fail in thermal isolation shear plugging. The deformation and failure morphology of laminate are fiber shearing and tensile fracture. The fiber also appear fibrillation with fiber eject on the opposite orientation. Obvious delamination also exists in laminate and the fiber-glass accompanied with fiber separation with matrix. Laminate I occur swell deformation and shrinking in the side face. The deformation and damage area of laminate II is smaller than laminate I. With the increase of FSP initial velocity, the per area energy of light armor is linear increased. In the side of anti-penetration, the laminate I perform better than laminate II.

Keywords : light armor ; fibre reinforced composite material ; anti-penetration ; experimental study

随着反舰导弹的发展, 半穿甲导弹因突防能力强及侵入舷侧后内爆等特点而成为舰船面临的主要威胁。半穿甲导弹爆炸产生冲击波与大量高速破片, 这对舱内的重要装置与人员人身安全造成巨大威胁。随着材料科学技术飞速发展, 越来越多的新型

装甲材料应用到舰船防护结构中。纤维增强复合材料以密度低、比强度与比刚度高、耐腐蚀、抗冲击和优异吸声减噪性能而引起研究人员广泛关注^[1-10]。梅志远等^[11]通过弹道试验研究了混杂纤维增强层合板抗微曲面柱形破片性能并分析了混杂纤维增强

基金项目: 国家安全重大基础研究项目 (613305), 国家自然科学基金项目 (51679246, 51479204)

通讯作者: 侯海量, 博士, 高级工程师, 主要从事船用材料、舰船毁伤与防护研究 E-mail : hou9611104@163.com

收稿日期: 2018-08-03

引用格式: 黄晓明, 方志威, 侯海量, 等. 纤维增强复合材料轻型装甲抗高速 FSP 弹侵彻性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(10):92-97.

Huang Xiaoming, Fang Zhiwei, Hou Hailiang, et al. Anti-penetration of fibre reinforced composite material light armor subjected to impact of FSP[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(10):92-97.

层合板横向破坏模式,发现层合板结构的横向纤维层在高速破片侵彻下存在变形破坏模式与吸能机理的差异。Walter 等^[12]探究了三维编织玻纤板在小口径弹侵彻下的变形失效模式,研究表明玻纤板的主要破坏模式为编织面分层破坏,为限制玻纤板的分层失效,作者提出在纤维布的 Z 轴方向增加纱线,这种方法提高了玻纤板抗侵彻性能。方志威等^[13]通过试验探究了高速破片侵彻下高强玻纤板的防护性能,研究了破片的入射速度、靶板的厚度对高强玻纤板抗高速破片侵彻性能的影响。

为防御半穿甲导弹爆炸产生的破片模拟 (FSP) 弹,笔者设计并采用模压工艺制作了玻纤/高强聚乙烯纤维/玻纤和玻纤/芳纶纤维/玻纤两种层合板,开展弹道试验研究了层合板与 945 钢板组成轻型装甲的抗侵彻性能,分析了 FSP 弹、945 钢板与层合板的变形破坏模式和吸能特性,对比分析了两种层合板的抗侵彻性能。

1 弹道试验

1.1 试验层合板的制作

试验层合板中的玻纤机织布由中材科技南京玻纤院提供,玻纤机织布厚度为 0.21 mm,面密度为 236 g/m²,四枚合缎纹断裂强力经向 19 000 N/25 mm,纬向 1 600 N/25 mm。高强聚乙烯纤维材料的纤度为 1 200 D,拉伸断强度不小于 32 cN/dtex,断裂伸长率为 2.9%~3.4%,拉伸弹性模量不小于 1 300 cN/dtex。芳纶纤维选用帝人 Twaron2000,纤度为 1 600 D,拉伸断强度不小于 20 cN/dtex,断裂伸长率为 2.7%~3.0%,拉伸弹性模量不小于 750 cN/dtex,层合板的基体材料为热塑性弹性树脂和热塑性聚氨酯树脂,层合板由常熟市永利坚新材料有限公司在高温高压下模压而成。制作成型后的层合板平面尺寸均为 400 mm×400 mm。玻纤/高强聚乙烯纤维/玻纤层合板(层合板 I)前后各为 1 mm 厚玻纤机织布,中间为超高分子量聚乙烯 0/90 度 UD 布,面密度约为 18.4 kg/m²。玻纤/芳纶纤维/玻纤层合板(层合板 II)前后各为 1 mm 厚玻纤机织布,中间为芳纶纤维 0/90 度 UD 布,面密度约为 25.9 kg/m²。层合板面密度以实际测量的面密度为准。

1.2 弹靶系统

试验用 FSP 弹(破片模拟弹)长为 12.4 mm,直径为 10 mm,质量为 7.5 g,材料为 45# 钢。破片的具体尺寸及形状如图 1 所示。破片采用 14.5 mm

口径的滑膛弹道枪发射,通过改变火药用量来控制破片的抛射速度。采用激光光幕测速系统测破片的初始速度及剩余速度。纤维增强复合材料层合板与 4.2 mm 厚船用 945 钢组成轻型装甲共同抵御 FSP 侵彻。FSP 弹和 945 钢板材料的力学性能见表 1,弹道装置试验示意图如图 2 所示。其中, E 为弹性模量, σ_y 为屈服强度, σ_b 为硬化模量, δ_s 为延伸率。

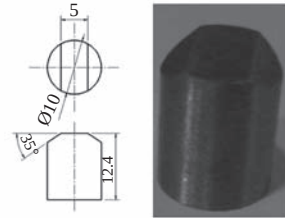


图 1 弹体模拟弹形状及尺寸

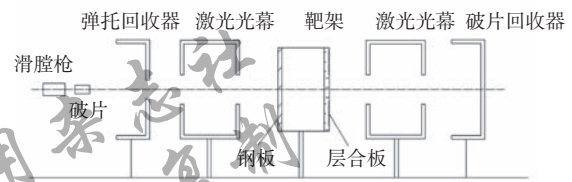


图 2 弹道试验示意图

表 1 钢和 945 钢的力学性能

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 ν	E / GPa	σ_y / MPa	σ_b / MPa	$\delta_s / \%$
45# 钢	7 830	0.3	205	355	500 ~ 650	22
945 钢	7 850	0.3	210	440	560 ~ 800	24

2 弹道试验结果

FSP 弹侵彻轻型复合装甲弹道试验共进行了 6 次,通过激光测速装置测量 FSP 弹的速度,每次试验均得到 FSP 弹的速度,发射弹体的速度范围为 1 307.98 m/s~1 369.43 m/s。弹道试验中轻型装甲结构试验结果由表 2 所示。

表 2 弹道试验结果

试验编号	复合结构形式	层合板面密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	弹体初速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹体余速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单位面密度吸能 / ($\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)
1#	钢板+层合板 I	18.47	1 369.43	297.44	130.26
2#	钢板+层合板 I	18.83	1 307.98	0	123.85
3#	钢板+层合板 I	18.44	1 315.54	0	126.24
4#	钢板+层合板 II	25.96	1 333.33	0	113.13
5#	钢板+层合板 II	25.74	1 365.24	218.76	116.00
6#	钢板+层合板 II	25.98	1 318.01	0	110.51

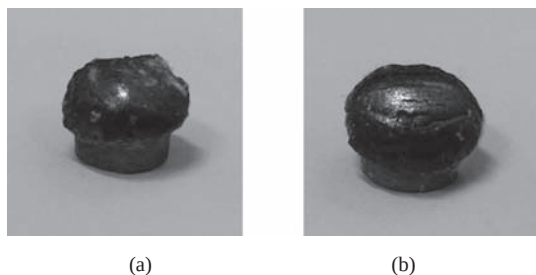
轻型装甲结构中的层合板均未穿透而发生了凸起大变形。为观测层合板厚度方向的变形破坏模式,笔者在威海威复合材料制品有限公司采用水刀切割机对试验后层合板沿弹孔对称面进行切割。

3 弹道试验现象及分析

3.1 FSP 弹变形失效模式

高速弹体侵彻复合结构后的破坏形貌如图 3 所

示。通过观察试验后收集到的 FSP 弹可知, FSP 弹在侵彻复合结构的过程中产生严重塑性变形, 其头部呈现出“蘑菇”状墩粗变形。



a—1[#] 试验后弹体形貌; b—5[#] 试验后弹体形貌

图3 弹体侵彻复合结构后变形破坏形貌

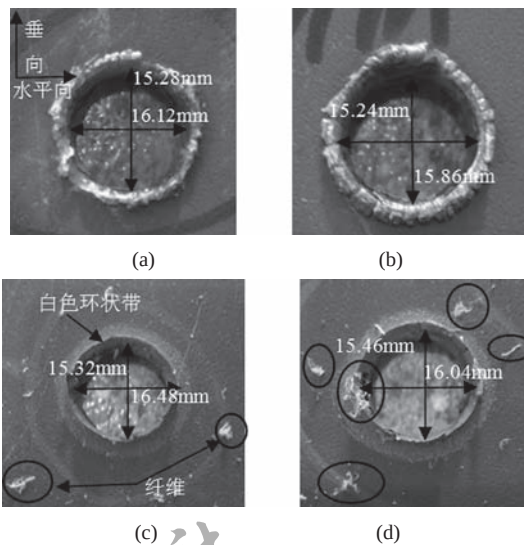
当高速的 FSP 弹侵彻复合结构中前置 945 钢板时, 弹体与钢板撞击区域的压应力迅速增长。弹靶接触区域瞬时达到材料的弹性极限, 同时撞击产生的压缩波迅速向 FSP 弹的尾部传播。当压缩波未传播至弹体末端时, FSP 弹的尾端速度保持不变。在压缩波离开弹靶作用的区域后, 撞击区域的应力继续增长而进入塑性变形状态。随着 FSP 弹继续侵彻钢板, 撞击产生的塑性应力波也向弹体尾部传播。塑性波应力传播后, FSP 弹进入塑性状态, 由于惯性效应沿轴向流向弹体头部。由于 945 钢板材料强度大于弹体的材料强度, 945 钢板抗侵彻能力较高。因此变形较小的钢板对 FSP 弹沿轴向流动形成阻碍, 导致在弹体头部区域材料沿径向向塑性流动。随着 FSP 弹继续撞击 945 钢板, 越来越多的弹体材料沿径向塑性流动, FSP 弹撞击区域横截面积不断增加, 最终呈现“蘑菇”形。

弹体侵彻钢板过程中发生严重的墩粗变形破坏, 头部横截面积增加, 弹体侵彻钢板后飞行一段距离后继续撞击纤维增强材料层合板。弹体的墩粗变形增大了弹体与纤维增强材料层合板的接触面积, 撞击区域产生的压应力相应下降, 弹体的侵彻能力减弱。钢板不仅消耗了弹体的动能还使得弹体墩粗变形, 从而进一步降低了弹体的侵彻能力。

3.2 钢板变形失效模式分析

复合结构中钢板的典型破坏形貌如图 4 所示, 钢板主要发生剪切冲塞破坏。钢板弹孔近似圆形, 表明弹体入射姿态较好, 在飞行过程中没有发生偏转。钢板上弹孔平均直径为 15 mm, 大于 FSP 弹的弹径 10 mm, 表明弹体在侵彻钢板过程中产生塑性挤压。弹孔边缘部分区域颜色泛蓝。弹孔区域外并无观测到明显变形破坏, 表明 FSP 弹侵彻钢板过程

中呈现明显的局部效应。FSP 弹弹体入射速度高, 钢板变形还未及扩展而 FSP 弹已穿透钢板。



a, b—1[#], 5[#] 试验后迎弹面; c, d—1[#], 5[#] 试验后背弹面

图4 钢板典型变形破坏形貌

钢板迎弹面弹孔附近出现延性堆积。当 FSP 弹侵彻前置钢板时, 弹靶接触区域受到很大的冲击力, 弹靶撞击区域和邻近区域相连接的环形截面上产生剪应力从而形成环形剪切带。撞击过程中产生大量的热量来不及散失, 进而使得环形区域温度急剧升高。局部的高温导致了钢板材料的热软化甚至熔化, 热软化的钢板在 FSP 弹的撞击作用下向弹孔附近堆积。

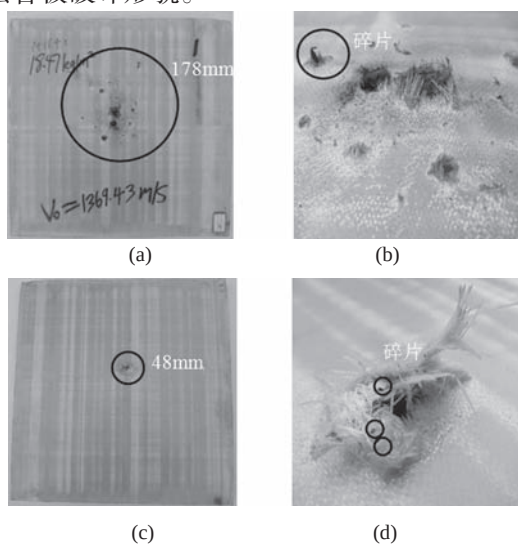
钢板的背弹面弹孔周围可观测到宽度约为 3 mm 的白色环状带。这是因为当 FSP 弹高速撞击时, 钢板发生剧烈变形产生瞬时高温使得钢板防锈漆与空气发生氧化作用。背弹面附着有纤维, 这是纤维增强复合材料板受到弹体冲击后发生破坏反向喷射。

3.3 纤维增强材料层合板变形失效模式分析

FSP 弹体侵彻复合结构的过程中, 不仅 FSP 弹与纤维增强材料层合板相互作用, 钢板也与纤维增强材料层合板产生作用。对试验后的层合板进行观察后, 可以发现设计的两种纤维增强材料层合板的破坏模式存在差异。试验中层合板大部分工况未被弹体穿透而是产生大鼓包变形。弹体侵彻方向为层合板厚度方向, 厚度方向上各纤维层的变形失效形貌对分析层合板抗弹性能具有重要意义。为研究层合板沿厚度方向的变形破坏模式, 对试验后的层合板沿弹孔对称面进行切割观察。

(1) 层合板 I 变形失效模式分析。

为了分析层合板 I (玻纤 / 高强聚乙烯纤维 / 玻纤层合板) 在弹体侵彻下的典型失效破坏形貌, 选取了试验中 1[#], 3[#] 两个工况试验。图 5 为 1[#] 试验中层合板破坏形貌。



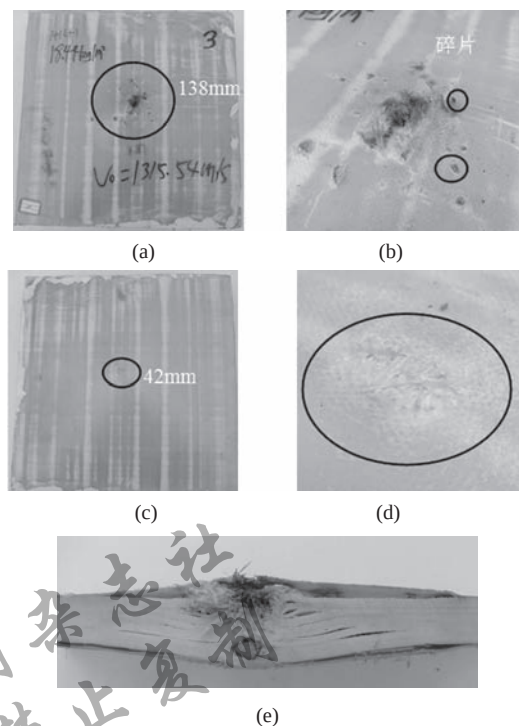
a—1[#] 试验后迎弹面; b—1[#] 试验后迎弹面弹孔附近区域;
c—1[#] 试验后背弹面; d—1[#] 试验后背弹面弹孔附近区域

图 5 1[#] 试验后层合板破坏形貌

1[#] 试验层合板应弹面损伤区域约为 178 mm, 远大于钢板弹孔直径 16.5 mm, 迎弹面破坏区域可观测到嵌在层合板上的钢碎片。弹体侵彻钢板完成后与侵彻过程中产生的钢碎片一起侵彻层合板, 钢板与层合板之间存在间隙, 由于钢碎片存在初始飞散角度, 其对层合板的侵彻范围更大。层合板出现两个较大的弹孔, 分别是弹体和钢板冲塞块侵彻引起的。层合板迎弹面弹孔区域纤维及周围附着的黑色物质为火药燃烧产物, 纤维出现断裂破坏, 断裂的纤维集中于弹体及钢碎片的侵彻区域, 侵彻区域以外的层合板部分出现泛白。通过进一步的观察, 发现玻璃纤维发生剪切破坏并反向喷出。层合板 I 背弹面的损伤范围约为 48 mm, 在背弹面弹孔附近的纤维也附着有钢碎片。层合板背弹面除观测到断裂的玻璃纤维外, 还观测到发生拉伸断裂破坏的高强聚乙烯纤维。高强聚乙烯纤维原纤化严重并沿弹孔喷出。

图 6 为 3[#] 试验层合板破坏形貌。3[#] 试验中层合板未发生穿透破坏, 迎弹面的损伤区域约为 138 mm, 迎弹面破坏形貌与 1[#] 试验中层合板相似。层合板背弹面的损伤范围约为 42 mm, 损伤区域呈现白色, 正交编织的玻璃纤维出现断裂破坏和分离。

为了观测层合板厚度方向的破坏形貌, 对层合板沿弹孔对称面进行切割。



a—3[#] 试验后迎弹面; b—3[#] 试验后迎弹面弹孔附近区域;
c—3[#] 试验后背弹面; d—3[#] 试验后背弹面弹孔附近区域
e—3[#] 试验后横剖面

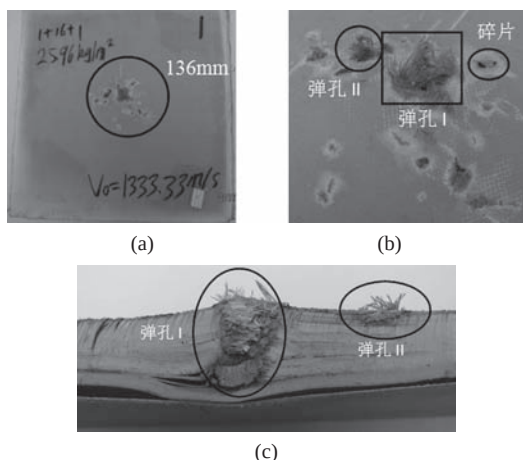
图 6 3[#] 试验后层合板破坏形貌

3[#] 试验中层合板横剖面如图 6e 所示, 弹体停留在层合板中, 约有 3 mm 厚的高强聚乙烯纤维未被穿透, 从弹体最后姿态可知弹体在侵彻层合板过程中在纤维作用下发生偏转。层合板迎弹面弹孔最上层纤维呈现黑色, 弹体贯穿钢板时的绝热剪切使得弹体与钢碎片温度上升, 使得层合板的基体材料出现烧焦现象。迎弹面还出现反向喷出的纤维, 迎弹面的纤维在被 FSP 弹体高瞬态剪切的过程中获得一定的弹性变形能。随着 FSP 弹的挤压作用与纤维的继续断裂, 断裂后纤维出现弹性恢复所致。层合板中两侧玻纤层与高强聚乙烯纤维层发生分层破坏, 高强聚乙烯纤维层层内也出现分层破坏。高强聚乙烯纤维层分层破坏区域沿厚度方向逐渐增加, 弹体侵彻层合板时产生了沿周向传播的剪切应力波, 剪切应力波的传播使得高强聚乙烯纤维层分层破坏范围不断扩展。

(2) 层合板 II 变形失效模式分析。

层合板 II (玻纤 / 芳纶纤维 / 玻纤层合板) 在弹体侵彻下的典型破坏形貌如图 7 和图 8 所示。图 7 为 4[#] 试验中层合板的破坏形貌, 弹体未能够穿透

层合板。5[#] 试验中弹体穿透层合板,其破坏形貌如图 8 所示。



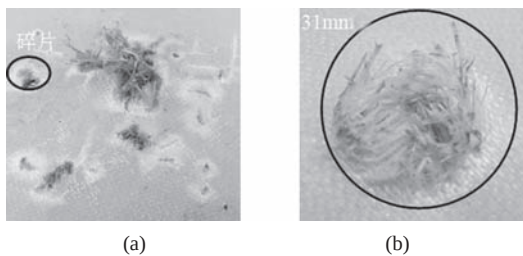
a—4[#] 试验后迎弹面; b—4[#] 试验后迎弹面弹孔附近区域;

c—4[#] 试验后横剖面

图 7 4[#] 试验后层合板破坏形貌

由图 7 可知,层合板 II 迎弹面有两个明显弹孔,分别记作弹孔 I 和弹孔 II。进一步对弹孔进行观察,发现两个弹孔处的玻璃纤维发生剪切破坏,芳纶纤维原纤化严重并大量反向喷出。原纤化的芳纶纤维挤压断裂的玻璃纤维且几乎完全覆盖住了弹孔。由层合板的横剖面可知,弹孔 I 为弹体侵彻造成,弹孔 II 深度较浅,是被钢板碎块侵彻造成,钢碎片动能较小,弹孔 II 损伤区域较小。迎弹面处的玻璃纤维层未与芳纶纤维层发生明显的分层破坏,而背弹面处的玻璃纤维层与芳纶纤维层几乎分离;芳纶纤维层仅在弹体停留处出现分层破坏。

5[#] 试验中层合板发生穿透破坏,其破坏形貌如图 8 所示。



a—迎弹面; b—背弹面

图 8 5[#] 试验后层合板破坏形貌

在层合板迎弹面,弹体及钢碎片侵彻区域的玻璃纤维发生剪切破坏并出现泛白,表明玻璃纤维发生脱胶现象。层合板背弹面损伤区域的玻璃纤维与芳纶纤维呈含苞待放的“菊花”状。芳纶纤维发生拉伸破坏后未出现严重的外翻而是聚集成团,弹体侵彻层合板的过程中速度不断降低,背弹面的处芳

纶纤维受到弹体撞击时获得的弹性变形能较小,断裂的纤维在弹体挤压后并没有出现明显的弹性恢复。弹体侵彻芳纶纤维层后继续侵彻玻璃纤维,断裂后的玻璃纤维未受到芳纶纤维的严重挤压作用而是轻轻覆盖在团状芳纶纤维上。弹体侵彻速度相近时,层合板 II 的损伤区域小于层合板 I 的损伤区域。

3.4 层合板的抗弹性能分析

945 钢板与纤维增强材料层合板组成的复合结构单位面密度吸能如图 9 所示。

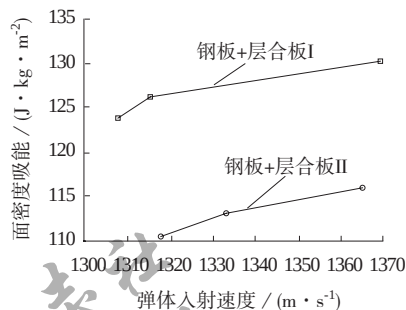


图 9 复合结构单位面密度吸能

由图 9 可知,随着 FSP 弹入射速度的增加,复合结构的单位面密度吸能呈现出线性增加的趋势。入射速度范围内,945 钢与层合板 I 组成复合结构的平均单位面密度吸能较 945 钢与层合板 II 组成复合结构的平均单位面密度吸能提高 11.98%。试验中钢板弹孔大小和破坏形貌相近,结构之间吸能差异是由层合板引起的。通过观测试验后层合板的变形破坏形貌,可知弹体侵彻速度相近时,层合板 II 的损伤区域小于层合板 I 的损伤区域,因此层合板 II 的吸能小于层合板 I 吸能。在制作多种纤维层合板时要充分考虑每种纤维的吸能特性,充分发挥层合板整体吸能优势,以便充分发挥多种纤维层合板的性能。

4 结论

为抵御 FSP 弹侵彻,笔者设计并采用模压工艺制作了玻纤/高强聚乙烯纤维/玻纤和玻纤/芳纶纤维/玻纤两种层合板,开展弹道试验研究了层合板与 945 钢板组成轻型装甲的抗侵彻性能。得出的主要结论如下:

(1) FSP 弹体侵彻钢板与复合材料层合板组成的复合结构过程中产生较大的塑性变形,呈现出“蘑菇”状墩粗变形。

(2) 945 钢板在高速 FSP 弹侵彻下主要发生绝热剪切破坏,其破坏区域呈现出明显的局部效应,弹孔区域外并未观察到变形。

(3) 层合板 I 与层合板 II 在高速 FSP 弹侵彻下变形失效模式主要为纤维的剪切破坏和拉伸断裂,纤维出现不同程度的原纤化并反向喷出,纤维层间出现分层;层合板中的玻纤层还出现脱胶失效破坏模式。层合板 I 还出现大鼓包变形和侧面皱缩,层合板 II 变形损伤区域小于层合板 I 的变形损伤区域。

(4) 随着弹体入射速度的增加,复合结构单位面密度吸能呈线性增加;设计的层合板 I 抗侵彻性能优于层合板 II。

参考文献

- [1] Wen Heming. Predicting the penetration and perforation of FRP laminates struck normally by projectiles with different nose shapes[J]. Composite Structures, 2000, 49(3):321-329.
- [2] 孙志杰, 张佐光, 徐国跃, 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 Zhijie, Zhang Zuoguang, Xu Guoyue, 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.
- [3] Ochola R O, Marcus K, Nurick G N. Mechanical behaviour of glass and carbon fiber reinforced composites at varying strain rate[J]. Composite Materials, 2004, 63:455-467.
- [4] 李典, 侯海量, 朱锡, 等. 破片群侵彻纤维增强层合板破坏机理及穿甲能力等效方法 [J]. 兵工学报, 2018, 39(4):707-716.
Li Dian, Hou Hailiang, Zhu Xi, et al. Study of the failure mechanism of fiber reinforced composite laminates subjected to fragment cluster penetration and the equivalent method for armor piercing ability of fragment cluster[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(4):707-716.
- [5] Oian Linxin, Qu Min. Study on terminal effects of dense fragment cluster impact on armor plate numerical simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(6):769-780.
- [6] 徐豫新, 戴文喜, 王树山, 等. 纤维增强复合材料三明治板破片穿甲数值仿真 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(2):134-139.
Xu Yuxin, Dai Wenxi, Wang Shushan, et al. Numerical simulation on fragment armor piercing against sandwich plate with fiber reinforced composite cores[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2):134-139.
- [7] O Masta M R, Deshpande V S, Wadley H N G. Mechanisms of projectile penetration in dyneema encapsulated structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 74:16-35.
- [8] 李典, 朱锡, 侯海量, 等. 近距爆炸破片作用下芳纶纤维夹芯复合舱壁结构毁伤特性实验研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(8):1436-1442.
Li Dian, Zhu Xi, Hou Hailiang, et al. Experimental investigation on damage of aramid fiber sandwich bulkhead under close range explosion and fragment loadings[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(8):1436-1442.
- [9] 赵晓旭, 徐豫新, 王树山. 抗破片侵彻钢/芳纶纤维叠层复合结构优化设计方法 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(8):179-183.
Zhao Xiaoxu, Xu Yuxin, Wang Shushan. An optimization design method of steel/aramid fiber composite structure against fragment penetration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8):179-183.
- [10] 梅志远, 朱锡, 刘燕红. 纤维增强复合材料层合板弹道冲击研究进展 [J]. 力学进展, 2003, 33(3):375-387.
Mei Zhiyuan, Zhu Xi, Liu Yanhong. The development of fiber-reinforced composite laminates under ballistic impact[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(3):375-387.
- [11] 梅志远, 谭大力, 朱锡, 等. 层合板抗弹混杂结构优化试验研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(4):38-42.
Mei Zhiyuan, Tan Dali, Zhu Xi, et al. Experimental study on the structure optimization of anti-ballistic composite laminates[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(4):38-42.
- [12] Walter, Subhash, Sankar. Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading [J]. Composite: Part B, 2009, 40:584-589.
- [13] 方志威, 侯海量, 李永清, 等. 高强玻璃纤维抗高速破片侵彻性能试验 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(12):102-106.
Fang Zhiwei, Hou Hailiang, Li Yongqing, et al. Experiment of anti-penetration of high strength fiber glass plate under high velocity fragment impact[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(12):102-106.

欢迎订阅 2019 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

欢迎广大读者到当地邮政局(所)订阅 2019 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》杂志, 订阅杂志及合订本光盘及过期刊物的读者可直接向杂志社办理订阅。《工程塑料应用》为月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版, 2019 年定价 20 元/期, 全年 240 元。《化学分析计量》为双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版, 2019 年定价 20 元/期, 全年 120 元。

电话: (0531)85878223 85878057 传真: (0531)85947355