

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.02.020

夹芯式复合结构抗高速破片侵彻性能试验

方志威^{1,2}, 黄晓明², 侯海量¹, 李茂¹, 李永清¹, 朱锡¹

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

摘要:为抵御反舰导弹产生的高速破片,设计制作了以高强玻璃纤维板为面板、聚氯乙烯(PVC)泡沫材料和高强聚乙烯纤维板为芯层的复合结构,并开展弹道试验研究其抗侵彻性能,为对比分析开展了945钢抗高速破片侵彻试验。结果表明,前置高强玻璃纤维板产生纤维剪切、拉伸断裂、基体碎裂和纤维脱粘破坏,前置PVC泡沫产生压实坍塌、胞壁剪切断裂和压碎破坏,高强聚乙烯纤维板主要产生纤维剪切、拉伸断裂并出现背凸大变形,后置PVC泡沫板产生压实破坏,后置高强玻纤板并未明显破坏裂纹;立方体弹侵彻945钢板时产生严重墩粗变形,钢板产生剪切冲塞破坏;复合结构单位面密度吸能较945钢板提高34%。

关键词:复合结构;高速破片;抗侵彻性能;试验研究;破坏模式

中图分类号: O385 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)02-0096-07

Experimental on Anti-penetration Performance of Sandwich Composite Structure under High Velocity Fragment Impact

Fang Zhiwei^{1,2}, Huang Xiaoming², Hou Hailiang¹, Li Mao¹, Li Yongqing¹, Zhu Xi¹

(1. Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Unit 91189 of PLA, Lianyungang 222041, China)

Abstract : The composite structure in order to resist the high velocity fragment produced by anti-ship missile impact was designed and factured. The facet of composite structure was high strength fiber-glass plate and cores were PVC foam and UHMWPE plate. Ballistic experiment was conducted on the composite structure to study its anti-penetration performance. Meanwhile the ballistic experiment of 945 steel penetrated by fragment was carried out. The results showed that the pre facet plate failed in fiber shearing, tensile fracture, matrix crack and fiber seperation with matrix. The damage of pre PVC foam was crushing, through-thickness shearing and tearing. UHMWPE failed in fiber shearing, tensile fracture and back convex deformation. The post PVC foam was craushed while the post fiber-glass plate had no obvious damage. The cube bullet occured serious frusta deformation and the steel failed in shear plugging. The per area energy absorption of composite structure was 34% higher than that of 945 steel.

Keywords : composite structure ; high velocity fragment ; anti-penetration performance ; experimental study ; damage characteristic

反舰导弹爆炸后产生的大量高速破片对舰船上层建筑里的重要设备和人员安全构成巨大威胁,上层建筑的装甲防护日益受到关注。传统舰船上层建筑为钢结构,质量大、易腐蚀、隐身性能差、抗侵彻性能一般。纤维增强复合材料具有高比强度、高比刚度、抗冲击性能及隐身性能好、可设计性强、成型方便等优良特性而引起国内外学者的广泛关注

[1-11]。杜忠华等^[12]基于复合材料的本构关系和失效准则,结合不同厚度层合板的破坏模式和能量守恒定律建立了弹体侵彻玻璃纤维层合板分析模型,给出了正交各向异性纤维层合板的弹道极限速度公式。R. O. Ochola等^[13]研究了玻纤板在不同应变率下力学性能。发现玻纤板在低应变率冲击下主要发生纤维弯曲、断裂破坏,高应变率下主要发生整体

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(6133050202),国家自然科学基金项目(51679246,51409253)

通讯作者: 侯海量,博士,高级工程师,主要研究方向为舰船毁伤与防护 E-mail: 526918052@qq.com

收稿日期: 2017-11-15

引用格式: 方志威,黄晓明,侯海量,等. 夹芯式复合结构抗高速破片侵彻性能试验[J]. 工程塑料应用,2018,46(2):96-102.

Fang Zhiwei, Huang Xiaoming, Hou Hailiang, et al. Experimental on anti-penetration performance of sandwich composite structure under high velocity fragment impact[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2):96-102.

变形、界面分离和纤维拔脱。玻纤材料的动态力学性能随着应变率增加而增加。王晓强^[14]实验研究了四种不同面密度的高强聚乙烯纤维板抗高速立方体破片侵彻的能力,对比分析了靶板的吸能情况。结果表明面密度不仅影响靶板的弹道极限还影响靶板的损伤破坏形貌。T. G. Zhang^[15]研究了在破片模拟弹侵彻下不同厚度的高强聚乙烯纤维板的弹道极限,探讨了纤维的排布方向和靶板的边界约束条件对其变形破坏的影响。柴晓明^[16]根据芳纶纤维、高强玻璃纤维和碳纤维力学性能特征,制备了单一组分纤维与混杂增强复合材料,通过试验发现将抗压和抗剪性能较好的纤维织物置于迎弹面而将抗拉性能好的纤维置于背弹面的混杂板抗弹性能最优。

玻璃纤维分为E-玻璃纤维和S-玻璃纤维,S-玻璃纤维即为高强玻璃纤维。高强玻璃纤维材料具有抗拉强度高、抗剪切性能好,弹性模量、抗疲劳性能和化学稳定性高等特点。高强玻璃纤维材料既可以作为结构承载件,又可以通过基体碎裂、纤维断裂和分层吸收能量。高强玻璃纤维的优异性能既可单独作为抗弹材料,又可作为抗弹复合结构的面板材料。超高分子量聚乙烯纤维是指平均分子量在 1×10^6 以上的聚乙烯纤维所纺出的纤维,通常称为高强聚乙烯纤维。高强聚乙烯纤维是目前投入使用纤维材料中性能最为优异的抗弹纤维复合材料,不仅具有高比强度、高比模量和优异抗弹性能,而且密度仅为 0.97 g/cm^3 ,这对舰船上层建筑的轻量化具有重要意义。

笔者设计制作了以高强玻璃纤维板为面板,聚氯乙烯(PVC)泡沫材料和高强聚乙烯纤维板为芯层的复合结构并开展弹道试验研究其抗侵彻性能,为对比分析复合结构的抗侵彻性能,同时开展了945钢板抗高速破片侵彻试验。分析了复合结构各组成部分、945钢板在高速破片侵彻下的变形破坏模式和吸能机理、破片侵彻过程。

1 实验部分

1.1 原材料

高强玻璃纤维选择SW220玻璃纤维,其密度为 2500 kg/m^3 ,拉伸强度为 4.6 GPa ,拉伸弹性模量为 86.4 GPa ,断裂伸长率为 5.3% 。树脂采用亚什兰510C-350HOI乙烯基酯树脂,固化剂为L液,促进剂为E5。高强玻璃纤维板采用真空辅助成型技术制作,树脂含量约占 30% ,密度约为 1830 kg/m^3 ,由威海海威复合材料制品有限公司生产。

PVC泡沫材料为Divinycell HM100,平面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,厚度为 10 mm ,密度为 100 kg/m^3 ,压缩强度为 2.19 MPa ,拉伸强度为 3.9 MPa ,剪切强度为 1.61 MPa ,剪应变为 39% ,由戴铂新材料(昆山)有限公司提供。

高强聚乙烯纤维板平面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,厚度为 20 mm ,纤维织布为超高分子量聚乙烯按 $0/90^\circ$ UD布,UD布纤度为 1200 D ,拉伸断裂强度为 32 cn/dtex ,拉伸弹性模量为 1300 cn/dtex ,断裂伸长率为 $2.9\% \sim 3.4\%$ 。基体树脂材料为热塑性弹性体树脂与热塑性聚氨酯树脂,含胶量约为 15% ,在高温高压下模压而成,由常熟永利坚新材料有限公司提供。

设计的复合结构以高强玻璃纤维板为面板、PVC泡沫和高强聚乙烯纤维板为芯层,复合结构如图1所示。

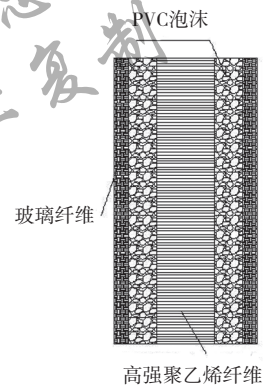


图1 复合结构

1.2 弹靶系统

图2所示为开展弹道试验采用的边长为 7.5 mm 的立方体弹,用以模拟反舰导弹爆炸产生的预制破片。立方体弹质量为 3.3 g ,材料为 $45^\#$ 钢。弹体材料密度为 7830 kg/m^3 ,屈服强度为 355 MPa ,拉伸强度为 525 MPa ,断面收缩率 $\geq 16\%$,冲击强度 $\geq 24 \text{ J/cm}^2$ 。

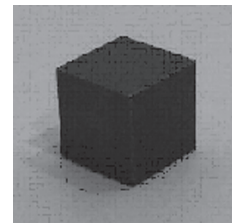


图2 弹道试验用弹体

为了对比设计的复合结构与钢板的抗侵彻性能,开展了高速破片侵彻钢板试验。钢板材料为945钢,平面尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,厚度约为

5.20 mm。945 钢材料密度为 7765 kg/m^3 ,弹性模量为 205 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 525 MPa,拉伸强度为 645 MPa,断面收缩率为 $\geq 24\%$,冲击强度 $\geq 24 \text{ J/cm}^2$ 。

1.3 试验装置

弹道试验中立方体破片发射装置采用 14.7 mm 滑膛弹道枪,通过改变发射火药量来调整立方体破片的入射速度。为保证破片的侵彻姿态,采用特制的三瓣式弹托包覆破片。弹托的存在保证了破片离开滑膛弹道枪口时为平面飞行姿态。试验中采用激光光幕靶测量破片的入射速度与侵彻靶板后的剩余速度。靶板布置如图 3 所示,弹道试验布置如图 4 所示。

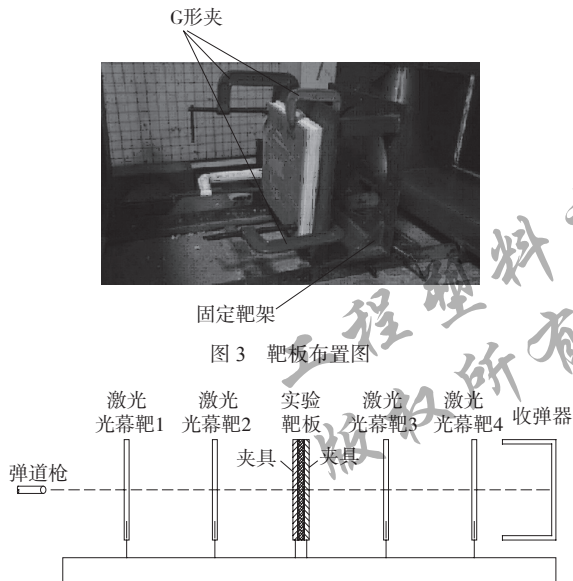


图3 靶板布置图

图4 弹道试验布置示意图

1.4 弹道试验结果

弹道试验共进行了 7 发,弹体速度由激光测速系统直接读出,每发均得到有效数据,其中复合结构弹道试验进行了 4 发,弹体入射速度为 $1183.35 \sim 1295.18 \text{ m/s}$,试验中弹体均未能击穿复合结构,因而无弹体剩余速度。945 钢板弹道试验共进行 3 发,弹体入射速度为 $1224.64 \sim 1268.91 \text{ m/s}$ 。表 1 给出了弹道试验中主要的弹靶特征参数及靶板破坏情况。

2 结果与讨论

2.1 复合结构弹道试验现象

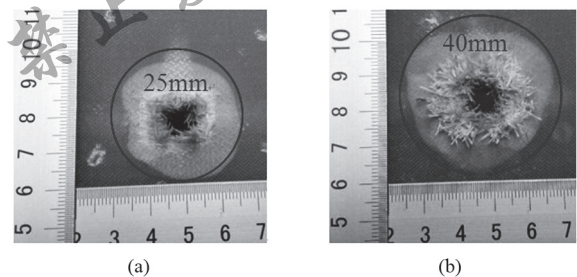
(1) 前置高强玻璃纤维板的破坏现象。

图 5 为 4[#] 试验复合结构中前置高强玻璃纤维板的变形破坏形貌。前置高强玻璃纤维板迎弹面

表1 弹道试验结果

试验号	弹体质量 / g	靶板面密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	入射速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	剩余速度 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	破坏情况
1 [#]	3.29	36.27	1183.35	0	高强聚乙烯发生鼓包变形,后置 PVC 泡沫压缩变形,后置玻璃纤维板几乎无变形
2 [#]	3.28	36.36	1216.98	0	高强聚乙烯发生鼓包变形,后置 PVC 泡沫压缩变形,后置玻璃纤维板部分纤维脱粘
3 [#]	3.27	36.44	1228.57	0	高强聚乙烯发生鼓包变形,后置 PVC 泡沫压缩变形,后置玻璃纤维板部分纤维脱粘
4 [#]	3.29	36.41	1295.18	0	高强聚乙烯发生鼓包变形,后置 PVC 泡沫压缩穿透,后置玻璃纤维板部分纤维脱粘
5 [#]	3.27	40.38	1224.64	503.18	钢板穿透
6 [#]	3.29	40.38	1228.13	520.64	钢板穿透
7 [#]	3.31	40.38	1268.91	577.15	钢板穿透

注:1[#]~4[#] 为复合结构;5[#]~7[#] 为钢板。



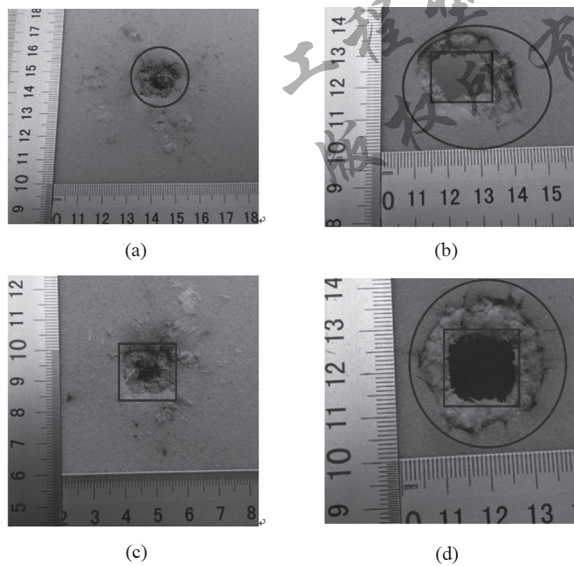
a—4[#] 试验迎弹面;b—4[#] 试验背弹面

图5 前置高强玻璃纤维板变形破坏形貌

弹孔近似正方形,表明弹体在飞行过程中侵彻姿态较稳定未发生明显的偏转,弹体以平面侵彻复合结构。前置高强玻璃纤维板迎弹面主要发生纤维剪切破坏并伴随纤维反向喷出。迎弹面的高强玻璃纤维再被高速破片剪切的瞬态过程中获得一定的弹性变形能,随着纤维的断裂和破片的挤压作用,断裂的纤维出现弹性恢复所致。断裂的高强玻璃纤维部分出现了原纤化,迎弹面附近区域出现泛白。前置高强玻璃纤维板背弹面弹孔区域拉伸断裂的玻璃纤维反向喷出过程中受到 PVC 泡沫板限制呈盛开“葵花”状,高强玻璃纤维板背弹面基体碎裂、纤维脱粘的损伤区域远大于迎弹面损伤区域,弹体在侵彻高强玻璃纤维板时产生沿周向传播的剪切应力波,剪切应力波在靶板中的传播过程使得靶板损伤范围不断扩展。

(2) 前置 PVC 泡沫板的破坏现象。

弹体侵彻复合结构过程中,除弹体与靶板之间相互作用外,复合结构中高强玻璃纤维板、PVC 泡沫板、高强聚乙烯纤维板之间也存在相互作用。图 6 为 2[#] 试验和 4[#] 试验前置 PVC 泡沫板变形破坏形貌。PVC 泡沫迎弹面弹孔产生剪切破坏,破碎分离的 PVC 泡沫材料部分堆积在弹孔内。弹体侵彻前置高强玻璃纤维板时,受到撞击的高强玻璃纤维板挤压 PVC 泡沫板, PVC 泡沫在受到弹体撞击前已产生压缩变形;断裂的玻璃纤维反向喷出时撞击 PVC 泡沫,由于 PVC 泡沫材料密度小、强度弱而产生胞壁压缩破坏和剪切断裂破坏。PVC 泡沫背弹面呈现出两个明显的损伤破坏区域,弹孔破坏区域近似方形,周边破坏区域近似圆形;PVC 泡沫周边损伤区域与高强聚乙烯纤维板迎弹面损伤区域范围相同。高速破片侵彻 PVC 泡沫后撞击高强聚乙烯纤维板时,高强聚乙烯板碎裂的基体与高强聚乙烯纤维反向喷出时受到 PVC 泡沫限制。PVC 泡沫由于强度较低在反向喷出的碎裂基体与高强聚乙烯纤维撞击下产生压碎破坏。



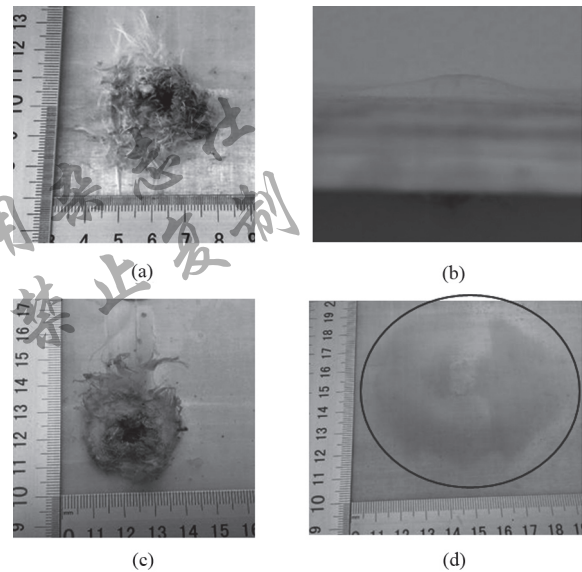
a—2[#] 试验迎弹面; b—2[#] 试验背弹面;
c—4[#] 试验迎弹面; d—4[#] 试验背弹面

图 6 前置 PVC 泡沫变形破坏形貌

(3) 高强聚乙烯纤维板的破坏现象。

高强聚乙烯纤维板在弹体侵彻过程中耗散了弹体大部分动能,复合结构进行的 4 发弹道试验中,弹体均停留在高强聚乙烯纤维板。图 7 为高强聚乙烯纤维板破坏形貌。高强聚乙烯纤维板迎弹面主要产生纤维剪切破坏、基体碎裂并伴随严重的纤维反

向喷出现象,碎裂的基体和断裂的高强聚乙烯纤维撞向前置高强玻璃纤维板。观察发现断裂的纤维端部较为粗糙并出现不同程度的原纤化现象,由于高强聚乙烯纤维不耐高温,弹孔区域部分高强聚乙烯纤维还出现熔断破坏痕迹。随着弹体不断撞击高强聚乙烯纤维板,弹体速度进一步降低,高强聚乙烯纤维破坏模式从剪切破坏转为拉伸断裂,弹体撞击过程中形成“动态变形锥”,动态变形锥在变形扩展过程中挤压后置 PVC 泡沫板。高强聚乙烯纤维板背弹面产生较大程度的背凸变形,形成圆形鼓包。高强聚乙烯纤维板侧面无明显的褶皱变形,未观察到明显的分层现象。



a—3[#] 试验迎弹面; b—3[#] 试验侧视图;
c—4[#] 试验迎弹面; d—4[#] 试验背弹面

图 7 高强聚乙烯纤维板破坏形貌

(4) 后置 PVC 泡沫板与高强玻璃纤维板的破坏现象。

图 8 为后置 PVC 泡沫板变形破坏形貌。后置 PVC 泡沫板在高压聚乙烯纤维板挤压作用下产生胞壁压实坍塌破坏,压实破坏区域与高压聚乙烯纤维板鼓包范围相同。当弹体速度较高时,后置 PVC 泡沫板出现穿孔破坏,压实破碎的 PVC 泡沫材料部分堆积在穿孔内。

1[#] 试验中后置高强玻璃纤维板未产生破坏,其余试验中后置高强玻璃纤维板在撞击区域泛白,图 9 为后置高强玻璃纤维板变形破坏形貌。表明出现基体碎裂和纤维脱粘破坏,并未观察到明显的破坏裂纹。在试验速度范围内,复合结构中后置高强玻璃纤维板还存在抗侵入能力。

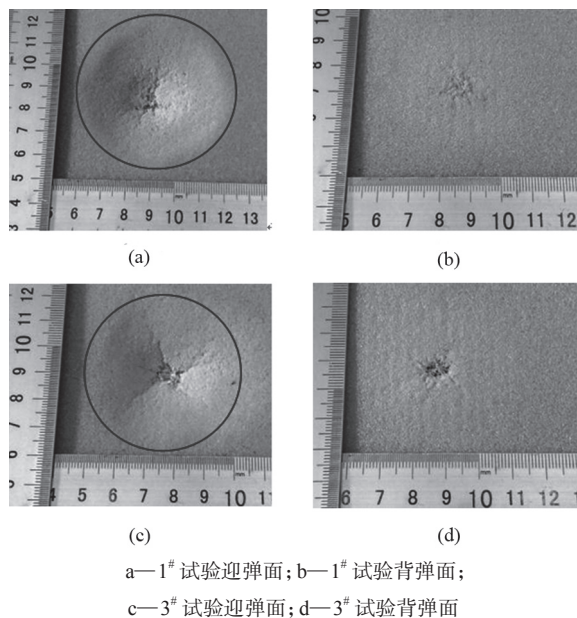


图8 后置 PVC 泡沫板破坏形貌

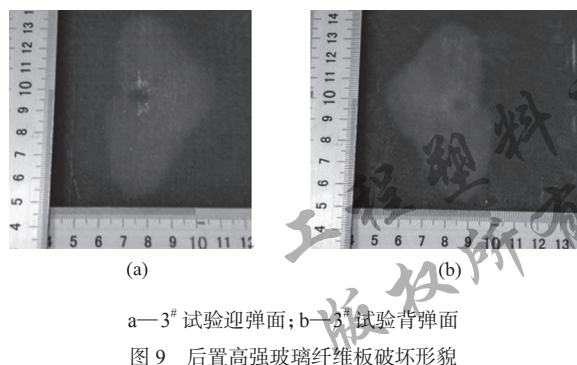


图9 后置高强玻璃纤维板破坏形貌

2.2 复合结构抗高速弹体侵彻机理

通过对复合结构在高速弹体侵彻下变形破坏形貌分析可知,高速弹体撞击前置高强玻璃纤维板产生的压缩应力波分别向弹体尾部和高强玻璃纤维板背弹面传播。当压缩应力波传播到高强玻璃纤维板与 PVC 泡沫界面处时,压缩应力波发生反射和透射,反射的压缩应力波形成拉伸应力波,透射的压缩应力波继续向 PVC 泡沫背弹面传播。与弹体直接接触的高强玻璃纤维板在弹体撞击过程中产生较大的速度,撞击区域与临近区域的高强玻璃纤维板存在速度梯度从而产生剪应力,高强玻璃纤维板产生剪切破坏。撞击产生的剪切应力波沿高强玻璃纤维板周向传播,传播到靶板边界反射形成拉伸波。压缩应力波和横向剪切波传播过程中,撞击区域附近不断产生基体碎裂与玻璃纤维脱粘。

弹体在撞击高强玻璃纤维板时,高强玻璃纤维板受到撞击而产生变形压缩 PVC 泡沫板, PVC 泡沫板产生胞壁坍塌压实破坏。弹体穿透高强玻璃纤

维板后继续侵彻 PVC 泡沫板,由于 PVC 泡沫材料强度较低,在高速破片侵彻下产生胞壁剪切、压缩撕裂破坏。弹体撞击过程中产生的压缩应力波传播到 PVC 泡沫和高强聚乙烯纤维板界面时产生反射和透射,透射的压缩应力波使得高强聚乙烯纤维板产生预变形。

弹体侵彻 PVC 泡沫后继续侵彻高强聚乙烯纤维板表现为典型的开坑压缩、剪切压缩和拉伸变形“三阶段”过程。在开坑压缩阶段,弹体速度高于压缩应力波传播速度,破片紧随前驱压缩波侵彻已产生预变形的高强聚乙烯纤维板;弹体与靶板接触面的压缩应力大于高强聚乙烯纤维板的动态压缩强度,导致碰撞区域内的高强聚乙烯纤维板变形失效,碎裂的基体和断裂的纤维由于受到 PVC 泡沫板限制而不能喷出。

在剪切压缩阶段,撞击区域与临近区域的高强聚乙烯纤维板之间存在的速度梯度导致高强聚乙烯纤维产生剪切失效;随着弹体速度不断降低,压缩应力波“脱离”弹靶接触界面向前传播至高强聚乙烯纤维板与 PVC 泡沫板交界面,压缩应力波发生反射和透射,透射压缩应力波传向 PVC 泡沫板;反射形成拉伸应力波传播至弹靶接触面时,该阶段结束。

在拉伸变形阶段中,弹体侵彻过程中速度不断降低,速度梯度减小,高强聚乙烯纤维板从剪切变形转换为拉伸变形破坏。弹体推动未被穿透的纤维层形成“动态变形锥”。高强聚乙烯纤维板由于与 PVC 泡沫板紧贴在一起,“动态变形锥”扩展过程中受到后置 PVC 泡沫限制而挤压 PVC 泡沫, PVC 泡沫受到挤压而产生大范围的压缩变形破坏。弹体速度较高时,“动态变形锥”甚至穿透 PVC 泡沫而挤压后置高强玻璃纤维板。弹体速度不断下降直至停留在高强聚乙烯纤维板中。

2.3 钢板弹道试验现象及分析

(1) 弹体变形破坏现象。

图 10 为试验中破片变形破坏形貌。通过观测试验后收集到的弹体可知,立方体弹在侵彻 945 钢板过程中产生较大的塑性变形,弹体呈现出“蘑菇”状墩粗变形。

高速弹体撞击 945 钢板时,弹体与钢板撞击区域的压应力迅速增长,撞击区域立刻达到材料的弹性极限,同时撞击产生的压缩波迅速向弹体尾部传播。压缩波未传播到弹体尾端时,弹体尾端速度保持不变。在压缩波离开弹靶撞击区域后,撞击区域

的应力继续增长而进入塑性状态。随着弹体继续压缩钢板,撞击产生的塑性波也向弹体尾部传播。塑性波传播后,弹体处于塑性状态,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,钢板抗侵彻能力较高。因此变形较小的钢板对弹体沿轴向流动形成阻碍,导致在弹体头部区域材料沿径向塑性流动。随着弹体继续撞击钢板,越来越多的材料沿径向塑性流动,弹体横截面积不断增加,最终呈现“蘑菇”形,弹体在撞击钢板过程中发生墩粗变形破坏。

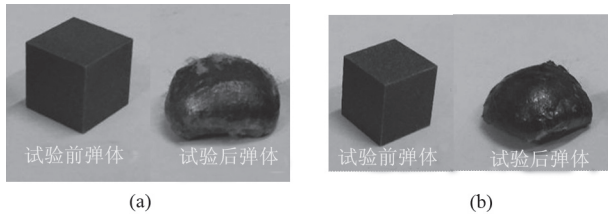
a—5[#] 试验; b—7[#] 试验

图 10 弹体破坏形貌

(2) 钢板破坏现象。

图 11 为试验中钢板变形破坏形貌。945 钢板在高速弹体侵彻下主要发生剪切冲塞破坏。弹孔范围大于弹体长度,弹体在侵彻钢板过程中挤压所致。弹孔边缘部分区域颜色泛蓝,说明撞击过程中弹靶接触区域温度较高,接触部分已发生氧化。钢板侵彻区域呈现出明显的局部效应,弹孔区域外并无明显变形,这是因为弹体侵彻速度较高,变形还未扩展弹靶侵彻作用已结束。

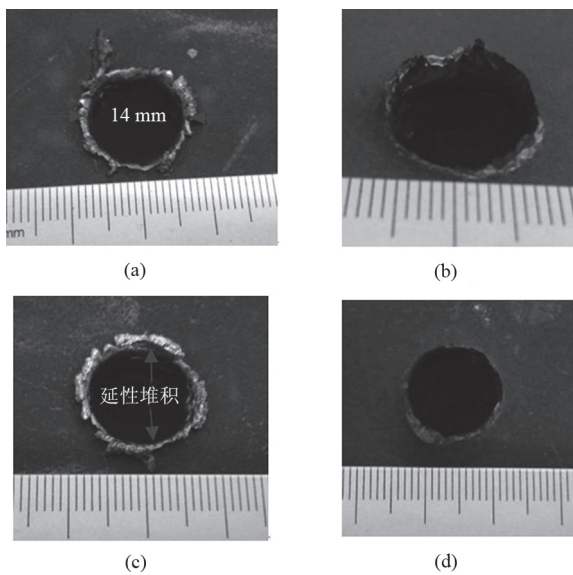
a—5[#] 试验迎面; b—5[#] 试验背面;c—7[#] 试验迎面; d—7[#] 试验背面

图 11 弹体破坏形貌

迎弹面弹孔附近出现延性堆积,弹体侵彻钢板时,弹靶接触区域受到很大的冲击压力,接触区域和靶板其他区域相连接的环形截面上产生很大的剪应力,形成剪切带。弹体撞击钢板过程中产生的热量来不及散失,从而使得环形区域温度大大提高,局部的高温导致了钢板材料的热软化甚至熔化,热软化的钢板在弹体的挤压作用下向弹孔附近堆积。背弹面弹孔周围出现白色环带,这是钢板受弹体冲击时发生剧烈变形产生瞬时高温使得背板防锈漆发生氧化作用。

2.4 抗弹性能差异分析

在试验速度范围内,立方体弹均未能穿透复合结构而停留在高强聚乙烯纤维板中。图 12 为复合结构中高强聚乙烯纤维板变形轮廓。通过对试验后高强聚乙烯纤维板的观察,发现立方体弹随着弹体速度的提高,高强聚乙烯纤维板背凸高度和鼓包范围不断扩大。

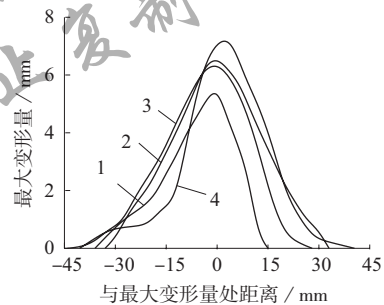
1—1[#] 试验; 2—2[#] 试验; 4—3[#] 试验; 4—4[#] 试验

图 12 复合结构中高强聚乙烯纤维板变形轮廓

图 13 为复合结构与 945 钢板单位面密度吸能随弹体入射速度变化曲线。由图可知随着弹体速度提高,复合结构和 945 钢板单位面密度吸能均呈线性增加,复合结构单位面密度吸能随速度增加变化更快。复合结构单位面密度吸能大于 945 钢板单位面密度吸能,复合结构抗侵彻性能优于 945 钢板;复合结构的单位面密度吸能较 945 钢板单位面密度吸能提高了 34%。通过对试验数据进行拟合,得出

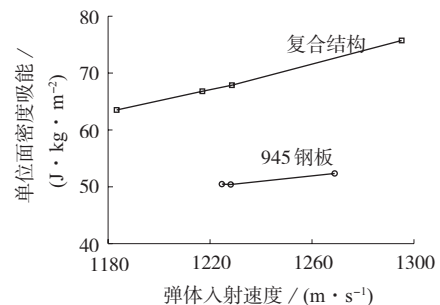


图 13 复合结构与 945 钢板吸能对比

复合结构单位面密度吸能 (E_A) 与立方体弹入射速度 (v_i) 的关系见式 (1)。

$$E_A = 0.1109v_i - 68.101 \quad (1)$$

3 结论

(1) 前置高强玻璃纤维板主要产生纤维剪切破坏并伴随纤维反向喷出,弹孔附近区域产生基体碎裂、纤维脱粘破坏;前置 PVC 泡沫板在弹体、前置高强玻璃纤维板、高强聚乙烯纤维板共同作用下产生胞壁压缩破坏、剪切断裂破坏和压碎破坏;高强聚乙烯纤维板在立方体弹侵彻下产生纤维剪切破坏、拉伸断裂,部分纤维还出现烧蚀破坏,高强聚乙烯纤维板出现背凸大变形;后置 PVC 泡沫受到高强聚乙烯纤维板挤压作用而产生压缩破坏,破坏范围与高强聚乙烯纤维板鼓包相同。后置高强玻璃纤维板主要产生脱胶破坏,并未观察到明显的破坏裂纹。

(2) 立方体弹侵彻 945 钢板过程中,立方体弹产生较大塑性变形,弹体呈现“蘑菇”状墩粗变形;钢板产生剪切冲塞破坏,弹孔区域附近出现延性堆积。

(3) 复合结构和 945 钢板单位面密度吸能随立方体弹侵彻速度的增加均呈线性增加,复合结构增加趋势大于 945 钢板变化趋势;复合结构抗侵彻性能优于 945 钢板,其单位面密度吸能较 945 钢板单位面密度吸能提高了 34%。

参考文献

- [1] Lee B L, Song J W, Ward J E. Failure of spectra polyethylene fiber-reinforced composites under ballistic impact loading[J]. *Journal of Composite Materials*, 1994, 28(13):1 202-1 226.
- [2] Gellert E P, Cimpoeru S J, Woodward R L. A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(5):445-456.
- [3] 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.
- [4] Jacobs M J N, Van Dingenen J L J. Ballistic protection mechanisms in personal armor[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36:3 137-3 142.
- [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*, 2003, 22(2):6-9.
Liang Ziqing, Zhou Qing, Qiu Guanxiong, et al. Study on ultra-high molecular weight polyethylene antiballistic composites[J]. *Journal of Tianjin Polytechnic University*, 2003, 22(2):6-9.
- [6] 梅志远, 朱锡, 任春雨, 等. 弹道冲击下层合板破坏模式及抗弹性能实验研究 [J]. *海军工程大学学报*, 2005, 17(1):11-15.
Mei Zhiyuan, Zhu Xi, Ren Chunyu, et al. Research of deformation model and resistance characteristic for laminates under ballistic impact[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2005, 17(1):11-15.
- [7] Walter T R, Subhash G, Sankar B V. Damage modes in 3D glass fiber epoxy woven composites under high rate of impact loading[J]. *Composite:Part B*, 2009, 40:584-589.
- [8] Ong C W, Boey C W, Hixson R S, et al. Advanced layered personnel armor[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 24(1):1-15.
- [9] 陈长海, 徐文献, 朱锡, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强层合板抗高速钝头弹侵彻的理论模型 [J]. *中国舰船研究*, 2015, 10(3):63-69.
Chen Changhai, Xu Wenxian, Zhu Xi, et al. Theoretical model for thick ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced laminates penetrated by high-velocity blunt-nosed projectiles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2015, 10(3):63-69.
- [10] Nguyen L H, Lassig J R, Ryan S, et al. Numerical modelling of ultra-high molecular polyethylene composite under impact[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 103:436-443.
- [11] Alshahrani R F, Merahb N, Khanb S M A, et al. On the impact-induced damage in glass fiber reinforced epoxy pipes[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 97:57-65.
- [12] 杜忠华, 赵国志, 欧阳春, 等. 玻璃纤维层合板抗弹性能的研究 [J]. *南京理工大学学报*, 2002, 26(5):465-468.
Du Zhonghua, Zhao Guozhi, Ouyang Chun, et al. Defensible performance of glass fibre laminated armour[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5):465-468.
- [13] 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.
- [14] 王晓强, 朱锡, 梅志远, 等. 超高分子量聚乙烯纤维增强层合板抗弹性能实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1):29-34.
Wang Xiaoqiang, Zhu Xi, Mei Zhiyuan, et al. Ballistic performances of ultra-high molecular weight polyethylene fiber-reinforced thick laminated plates[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1):29-34.
- [15] Zhang T G, Satapathy S S, Vargas-Gonzalez L R, et al. Ballistic impact response of ultra-high-molecular-weight polyethylene(UHMWPE)[J]. *Composite Structures*, 2015, 133:191-201.
- [16] 柴晓明, 肖露, 程建芳, 等. 混杂防弹复合材料的结构优化及弹道机理分析 [J]. *东华大学学报: 自然科学版*, 2015, 41(2):148-154.
Chai Xiaoming, Xiao Lu, Cheng Jianfang, et al. Structural optimization and ballistic mechanism analysis of hybrid bulletproof composite[J]. *Journal of Donghua University:Natural Science*, 2015, 41(2):148-154.