

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.12.021

高强玻璃纤维板抗高速破片侵彻性能试验^{*}

方志威,侯海量,李永清,李茂,朱锡

(海军工程大学舰船工程系,武汉 430033)

摘要: 为了研究高强玻璃纤维板抗高速破片侵彻性能,开展了弹道试验,探讨了破片入射速度、靶板厚度对高强玻璃纤维板抗侵彻性能的影响,通过对弹道试验结果分析,指出了高强玻璃纤维板的变形失效模式、吸能特性和抗侵彻机理。结果表明:破片在侵彻高强玻璃纤维板过程中可视为刚体,高强玻璃纤维板迎弹面破坏模式为纤维剪切破坏并伴随纤维反向喷出,迎弹面弹孔附近区域出现基体碎裂、纤维脱粘;背弹面破坏模式为纤维拉伸断裂,背弹面损伤区域远大于迎弹面损伤区域;高强玻璃纤维板单位面密度吸能随着破片侵彻速度增加呈线性增加,在试验速度范围内,得出了立方体破片侵彻不同厚度靶板入射速度与剩余速度、入射速度与靶板单位面密度吸能关系。

关键词: 高强玻璃纤维板; 高速破片; 抗侵彻性能; 破坏模式; 试验研究

中图分类号: O344.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)12-0102-05

Experiment of Anti-Penetration Performance of High Strength Fiber Glass Plate Under High Velocity Fragment Impact

Fang Zhiwei, Hou Hailiang, Li Yongqing, Li Mao, Zhu Xi

(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract : In order to study the anti-penetration performance of high strength fiber glass plate, ballistic experiment was carried out and the influence of fragment impact velocity as well as the thickness of plate on penetration resistance of high strength glass fiber reinforced plastics was studied. By analysing the result of experiment, the deformation and failure morphology, the energy absorption and the mechanical anti-penetration of high strength fiber-glass plate were found. The result shows that the fragment can be regard as rigid in the impact process, the deformation and failure morphology of plate front area is fiber shear with fiber eject on the opposite orientation. The vicinity of bullet hole appear matrix crack and fiber separation with matrix. The deformation and failure morphology of plate rear is fiber tensile fracture, the damage area of rear plate is more bigger than that of front area. The per area energy of high strength fiber glass plate is linear increased with the impact velocity increased. In the range of experimental result, the relation of the impact velocity and the residual velocity of fragment as well as the relation of the per area energy absorption and the impact velocity of different thickness plates were conducted.

Keywords : high strength fiber glass plate ; high velocity fragment ; anti-penetration performance ; damage characteristics ; experimental study

反辐射导弹爆炸产生的大量高速破片会对舰船重要舱室内的仪器设备和人员安全造成巨大伤害,舰船重要舱室的装甲防护日益受到关注。高强玻璃纤维具有高比强度、高比刚度、耐腐蚀、断后延伸率大、抗冲击性能好等优良特性,国内外学者对高强玻璃纤维抗侵彻性能进行了大量研究^[1-9]。E. P. Gellert等^[10]探讨了不同形状的弹体侵彻不同厚度高强玻璃纤维板,发现靶板弹道极限吸能与厚度呈现出非线性增长关系;根据试验中靶板的不同变形破坏形貌,分别建立了薄板与厚板的变形吸能模型,模型计算结果与试验结果吻合较好。杜忠华等^[11]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

彻玻纤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。Ochola等^[12]研究了高强玻璃纤维板在高应变率下的力学性能。高强玻璃纤维板在低应变率冲击下主要出现纤维弯曲、断裂破坏,高应变率下的高强玻璃纤维板则表现为整体变形、界面分离和纤维拔脱。高强玻璃纤维板的动态力学性能随着应变率的增加而增加。梅志远等^[13]开展了针对不同种类玻璃纤维和芳纶纤维层合板的弹道试验,发现具有良好界面特性的C玻

^{*} 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)

联系人: 侯海量,高级工程师,主要从事舰船毁伤与防护研究

收稿日期: 2017-10-02

纤抗弹性能优于 S 玻纤,面密度较大的靶板抗弹性能更优异和稳定。Walter 等^[14]对分析了小口径弹侵彻下三维编织玻璃纤维板的失效模式,发现编织面分层破坏是玻璃纤维板的主要破坏模式,Z 轴纱线能够较好地限制玻璃纤维板的分层破坏从而提高玻璃纤维板的抗弹性能。柴晓明等^[15]根据芳纶纤维、玻璃纤维和碳纤维的力学性能和靶板破坏特征制备了混杂增强复合材料层合板,将抗压和抗剪性能较好的纤维织物置于迎弹面而抗拉性能好的纤维置于背弹面的复合材料层合板抗侵彻性能优于单一织物增强复合材料层合板。Rubaian 等^[16]利用有限元软件研究了玻璃纤维管的抗冲击性能,低速冲击下玻璃纤维管的破坏模式为基体碎裂和分层破坏,高速冲击下的破坏模式则为纤维断裂。

笔者通过弹道侵彻试验研究了高强玻璃纤维板抗高速立方体破片侵彻性能,分析了破片入射速度、靶板厚度对高强玻璃纤维板抗侵彻性能的影响。通过对弹道试验结果分析,指出了高强玻璃纤维板的变形失效模式、吸能特性和抗侵彻机理。

1 弹道试验

1.1 弹靶系统

反辐射导弹爆炸后主要产生预制型破片和自然破片两种。预制破片通过在战斗部壳体上刻槽实现,形状和尺寸较为固定,主要有方形和菱形两种;自然破片则大小不一,形状各异。笔者开展的弹道试验采用边长为 7.5 mm 的立方体弹,见图 1,用以模拟反舰导弹爆炸产生的预制破片。立方体破片质量为 3.3 g,材料为 45[#] 钢。破片材料密度为 7830 kg/m³,拉伸屈服强度 355 MPa,拉伸强度 525 MPa,断面收缩率 $\geq 16\%$,冲击强度 $\geq 24 \text{ J/cm}^2$ 。

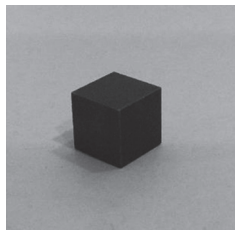


图1 试验用破片

高强玻璃纤维板平面尺寸为 300 mm × 300 mm,厚度分别为 4 mm 和 6 mm,如图 2 所示。面密度则以试验前实际测量值为准。高强玻璃纤维板的织布为 SW220 玻璃纤维织布,基体材料采用乙烯基酯树脂,通过真空辅助成型技术进行加工。高强玻

璃纤维板的树脂含量约占 30%,密度约为 1830 kg/m³。SW220 玻璃纤维的力学性能参数为密度为 2500 kg/m³,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%。

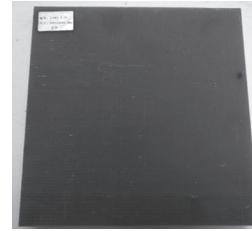


图2 高强玻璃纤维板

1.2 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。图 3 为靶板布置图,图 4 为弹道试验布置示意图。



图3 靶板布置图

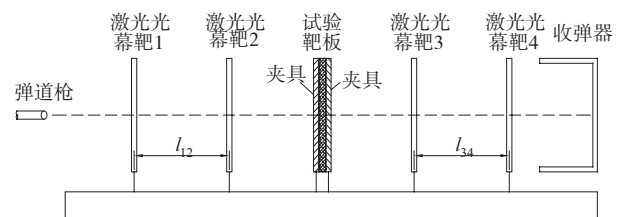


图4 弹道试验布置示意图

2 弹道试验结果

弹道试验共进行了 9 发,破片速度由激光测速系统直接读出,每发均得到有效数据。弹体入射速度范围为 427.54 ~ 534.74 m/s。表 1 给出了弹道试验中主要的弹靶特征参数及破坏情况。

3 试验现象及分析

立方体破片侵彻高强玻璃纤维板后典型形貌如图 5 所示。由图 5 可知,立方体破片在侵彻过程中并未产生严重变形破坏,与高强玻璃纤维板相比,立方体破片强度大、速度高,撞击产生的压缩应力未

表1 弹道试验结果

试样编号	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/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单位面密度吸能/($\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	破坏情况
1 [#]	3.28	7.29	427.54	328.79	16.80	击穿
2 [#]	3.29	7.33	437.72	334.43	17.89	击穿
3 [#]	3.31	7.39	468.16	353.26	21.14	击穿
4 [#]	3.27	10.99	385.18	149.46	18.75	击穿
5 [#]	3.26	11.05	426.32	208.41	20.40	击穿
6 [#]	3.28	11.03	534.74	363.66	22.85	击穿
7 [#]	3.28	7.50+8.06	443.93	116.38	19.34	全部击穿
8 [#]	3.26	7.34+7.33	477.98	179.67	21.80	全部击穿
9 [#]	3.27	7.32+7.36	532.09	240.23	25.11	全部击穿

能达到立方体破片材料屈服强度。在本试验速度范围内,立方体破片在侵彻高强玻璃纤维板过程中可视为刚体。

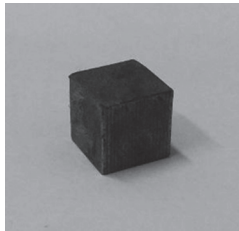
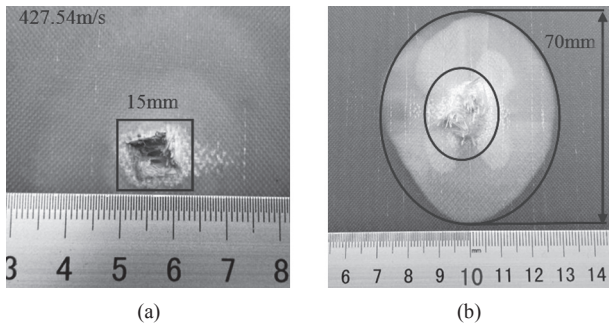


图5 试验后破片典型形貌

3.1 高强玻璃纤维板典型破坏形貌

弹道试验中高强玻璃纤维板的典型变形破坏形貌如图6~图8所示。图6为试验1中高强玻璃纤维板的变形破坏形貌,由图可知靶板迎弹面弹孔近似正方形,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。



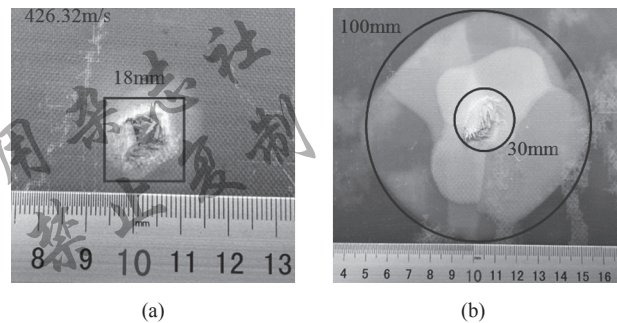
a—迎弹面; b—背弹面

图6 试验1中高强玻璃纤维板变形破坏形貌

靶板的背弹面损伤区域近似椭圆形,背弹面损伤范围远大于迎弹面损伤范围。破片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。背弹面的高强玻璃发生纤维拉伸变形和断裂破坏,断裂的纤维几乎完全覆盖弹孔。背弹面弹孔附近区域出现不同程度的基体碎裂,高强玻璃纤维脱粘现象。

靶板迎弹面损伤区域范围约为15 mm,靶板迎弹面主要发生高强玻璃纤维剪切破坏并伴随一定程度的纤维反向喷出。迎弹面的高强玻璃纤维在被破片高瞬态剪切的过程中,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未出现明显的原纤化,几乎完全覆盖弹孔。迎弹面弹孔附近区域出现泛白,这是由于基体发生碎裂,高强玻璃纤维脱粘引起的。

试验5中高强玻璃纤维板的典型变形破坏形貌如图7所示。高强玻璃纤维板迎弹面损伤区域范围约为18 mm,其中弹孔区域范围约为13 mm,略大于弹径。迎弹面玻璃纤维产生纤维断裂,弹孔附近基体发生碎裂并伴随纤维脱粘。



a—迎弹面; b—背弹面

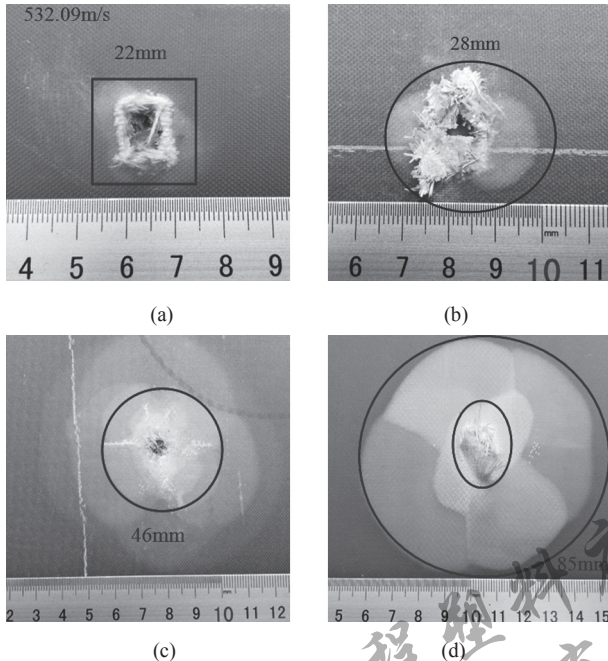
图7 试验5中高强玻璃纤维板变形破坏形貌

靶板背弹面损伤区域范围近似圆形,圆形直径约为100 mm,背弹面损伤范围远大于迎弹面损伤范围。试验5中弹体入射速度与试验1中入射速度相近,但试验5中靶板背弹面损伤区域范围远大于试验1中背弹面损伤区域范围。由于试验5中靶板比试验1中靶板厚,破片侵彻时间较长,弹体撞击产生的沿周向传播的剪切应力波传播范围更广,导致基体产生碎裂与高强玻璃纤维脱粘更为严重。

图8给出了试验9中高强玻璃纤维板破坏形貌。试验9中两块4 mm 高强玻璃纤维板叠加,第一块靶板迎弹面损伤区域范围约为22 mm,弹孔范围近似长方形,表明弹体撞击靶板时产生偏转。迎弹面弹孔区域范围高强玻璃纤维出现少量原纤化。第一块靶板背弹面损伤区域近似椭圆形,背弹面弹孔区域可以明显观测到剪切断裂的纤维,弹孔附近区域出现明显的基体碎裂与纤维脱粘现象。

试验9中第二块靶板迎弹面损伤区域范围近似圆形,直径约为46 mm。第二块靶板迎弹面不仅受到弹体侵彻作用,还受到第一块靶板背弹面断裂

纤维的挤压作用。由图 8c 可以明显看出弹体侵彻过程中基体碎裂与纤维脱粘损伤区域不断扩展。第二块靶板背弹面损伤区域范围近似圆形,直径约为 85 mm。背弹面弹孔区域范围拉伸断裂的玻璃纤维几乎完全覆盖弹孔。



a—前置迎弹面; b—前置背弹面; c—后置迎弹面; d—后置背弹面

图 8 试验 9 中高强玻璃纤维板变形破坏形状

3.2 高强玻璃纤维板抗侵彻性能分析

试验中高强玻璃纤维板单位面密度吸能与立方体破片侵彻速度关系如图 9 所示。

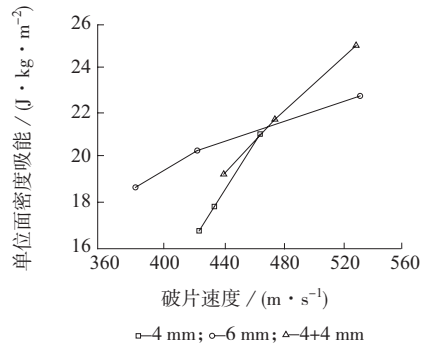


图 9 不同侵彻速度下靶板单位面密度吸能

由图 9 可知,随着破片侵彻速度的增加,靶板单位面密度吸能呈现线性增加趋势。试验中立方体破片侵彻速度远大于靶板的弹道极限速度,具体表现为破片穿透靶板后还有较大的剩余速度,因此对于靶板单位面密度吸能的讨论也是基于试验速度范围内。当立方体破片侵彻速度大于靶板弹道极限速度且不超过 470 m/s 时,6 mm 厚高强玻璃纤维板单

位面密度吸能最大,其次是 4 mm+4 mm 厚靶板,4 mm 厚靶单位面密度吸能最小。当立方体破片侵彻速度大于 470 m/s 时,4 mm+4 mm 厚高强玻璃纤维板单位面密度吸能大于 6 mm 厚高强玻璃纤维板单位面密度。在三种靶板单位面密度变化曲线中,4 mm 厚高强玻璃纤维板单位面密度吸能随速度变化曲线斜率最大,即随着弹体速度提高,4 mm 厚高强玻璃纤维板的单位面密度吸能变化最大。

通过对试验数据进行拟合,得出立方体破片侵彻不同厚度高强玻璃纤维板入射速度与剩余速度、入射速度与靶板单位面密度吸能关系。

立方体破片侵彻 4 mm 厚高强玻璃纤维板时剩余速度与入射速度关系:

$$V_r = 0.6V_i + 69.42 \quad (1)$$

立方体破片侵彻 4 mm 厚高强玻璃纤维板时单位面密度吸能与剩余速度关系:

$$E_A = 0.1068V_r - 28.87 \quad (2)$$

立方体破片侵彻 6 mm 厚高强玻璃纤维板时剩余速度与入射速度关系:

$$V_r = 1.432V_i - 402.16 \quad (3)$$

立方体破片侵彻 6 mm 厚高强玻璃纤维板时单位面密度吸能与剩余速度关系:

$$E_A = 0.0264V_r + 8.805 \quad (4)$$

(1)~(4) 式中: E_A 为复合结构单位面密度吸能, V_i 为立方体破片入射速度, V_r 为立方体破片剩余速度。

3.3 高强玻璃纤维板抗侵彻机理分析

弹体高速撞击高强玻璃纤维板时,在弹体与靶板接触区域的压应力迅速增长。弹体撞击产生的压缩应力波分别沿着靶板厚度方向和弹体尾部方向传播,撞击产生的横向剪切波沿着靶板周向传播。当压缩应力波传播到弹体尾部或高强玻璃纤维板背面时反射形成拉伸应力波,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,沿周向传播的横向剪切波经过区域靶板也获得速度,这两个速度之间存在巨大的速度梯度而导致高强玻璃纤维产生剪切破坏。压缩应力波和横向剪切波传播过程中,撞击区域附近基体碎裂与玻璃纤维脱粘范围不断扩展。反射拉伸应力波形成后沿弹体侵彻相反的方向传播,在此过程中破片继续以剪切方式侵彻高强玻璃纤维板。反射拉伸波遇到弹体后,由于靶板材料速度增加,弹体的速度也随着弹体尾端反

射拉伸波的传播(期间可能传播多个来回)而降低,弹体与靶板相对速度降低。高强玻璃纤维板产生纤维剪切破坏减少而纤维拉伸断裂破坏增加。弹体不断侵彻靶板直至飞出。通过分析可知,高强玻璃纤维板中纤维剪切破坏、拉伸断裂,基体碎裂与纤维脱粘,分层损伤是靶板吸收弹体动能主要方式。

4 结论

通过开展高强玻璃纤维板抗立方体破片侵彻试验,分析了破片入射速度、靶板厚度对高强玻璃纤维板抗侵彻性能的影响。通过对试验结果分析,主要可以得出以下结论:

(1) 立方体破片在侵彻高强玻璃纤维板过程中变形较小可视为刚体;高强玻璃纤维板在高速破片侵彻下迎弹面主要产生纤维剪切破坏并伴随一定程度的纤维反向喷出,迎弹面弹孔附近区域发生基体碎裂、纤维脱粘而泛白;高强玻璃纤维板背弹面破坏模式为纤维拉伸断裂,断裂的纤维几乎完全覆盖弹孔,背弹面损伤区域远大于迎弹面损伤区域。

(2) 随着破片侵彻速度增加,高强玻璃纤维板单位面密度吸能呈线性增加;在试验速度范围内,得出了立方体破片侵彻不同厚度高强玻璃纤维板入射速度与剩余速度、入射速度与靶板单位面密度吸能的关系。

(3) 高强玻璃纤维板中纤维剪切破坏、拉伸断裂、基体碎裂与纤维脱粘、分层损伤是耗散立方体破片动能的主要方式。

参考文献

- [1] Wang B, Chou S M. The behavior of laminated composite plates as armour[J]. Journal of Material Processing Technology, 1997, 68:279-287.
- [2] Deluca E, Prifti J, Betheney W. Ballistic impact damage of S2-glass-reinforced plastic structural armor[J]. Composite Science and Technology, 1998, 58:1453-1461.
- [3] 黄英, 刘晓辉, 李郁忠. S-玻纤维物增强复合材料层合板的冲击损伤特性研究[J]. 机械科学与技术, 1999, 18(3):483-485.
Huang Ying, Liu Xiaohui, Li Yuzhong. Study of the damage characteristics of S-glass wave-fabric reinforced composite plate[J]. Mechanical Science and Technology, 1999, 18(3):483-485.
- [4] Jacobs M J N, Dingenen Van J L J. Ballistic protection mechanisms in personal armor[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36:3 137-3 142.
- [5] 梅志远, 朱锡, 刘燕红, 等. 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):375-389.
Mei Zhiyuan, Zhu Xi, Liu Yanhong, et al. The developments of fiber-reinforced composite laminates under ballistic impact[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(3):375-387.
- [6] 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):38-41.
Mei Zhiyuan, Tang Dali, Zhu Xi, et al. Experimental study on the structure optimization of anti-ballistic composites laminates[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(4):38-40.
- [7] Thomason J L. The influence of fibre length, diameter and concentration on the impact performance of long glass-fibre reinforced polyamide 6, 6[J]. Composite:Part A, 2009, 40:114-124.
- [8] 田占强, 马志垒, 李成. 复合材料纤维叠层织物弹道侵彻数值分析[J]. 机械设计与制造, 2011(12):222-224.
Tian Zhanqiang, Ma Zhilei, Li Cheng. Numerical analysis on ballistic penetration through laminated fiber composites[J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(12):222-224.
- [9] Sandor K, Tibor C. Damage detection and self-repair in hollow glass fiber fabric-reinforced epoxy composites via fiber filling[J]. Composite Science and Technology, 2014, 99:82-88.
- [10] Gellert E P, Cimpoeu 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.
- [11] 杜忠华, 赵国志, 欧阳春, 等. 玻璃纤维层合靶板抗弹性能的研究[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]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 26(5):46-49.
- [12] Ochola, Marcus, Nurick. Mechanical behaviour of glass and carbon fiber reinforced composites at varying strain rate[J]. Composite Materials, 2004, 63:455-467.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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, Chen 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.
- [16] Rubaian, Nesar, Shafique, et al. On the impact-induced damage in glass fiber reinforced epoxy pipes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 97:57-65.