

层间混杂复合材料的弹道侵彻性能研究

肖露^{a,b}, 程建芳^b, 柴晓明^b, 张华鹏^{a,b}

(浙江理工大学, a. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室; b. 材料与纺织学院, 杭州 310018)

摘要: 结合高性能纤维材料力学性能的差异设计并制备碳纤维、对位芳纶和高强玻纤维增强单一和厚向层间混杂防弹复合材料, 进行弹道侵彻试验并表征冲击能量吸收和弹道极限指数 BPI 。试验表明就单一复合材料而言, Kevlar129 芳纶纤维防弹性能优于 S2 玻璃纤维, T300—6K 碳纤维相对较差, 而厚向层间混杂复合材料能有效地提升三种纤维的防弹性能。在此基础上, 结合复合材料在弹道侵彻下的冲击响应、破坏模式以及能量的吸收的模式对抗弹道侵彻机理进行了初步探讨。

关键词: 混杂复合材料; 弹道冲击; 侵彻性能; 能量吸收

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A

0 引言

高性能纤维树脂基防弹复合材料是一类结构和性能特殊的复合材料, 由于其比吸收能高、抗弹道冲击性能优异、不产生二次杀伤作用等优点, 故而具有不可替代的抗弹道冲击防护作用, 在各种弹道防护装甲和个体弹道防护领域得到了广泛的应用。

目前, 国内防弹复合材料用纤维主要品种有碳纤维、玻璃纤维、芳纶和超高分子量聚乙烯等。有研究表明, 以对位芳纶和超高分子量聚乙烯为代表的有机高性能纤维具有很高的轴向拉伸力学性能, 而轴向压缩、横向剪切或压缩性能比轴向低得多^[1], 以玻璃纤维和碳纤维为代表的无机高性能纤维的轴向拉伸性能低于有机高性能纤维, 但横向剪切或压缩性能较好。由于防弹复合材料正面以纤维压缩、剪切破坏为主, 反面以拉伸破坏为主, 有效的结合材料力学性能上的差异进而组合结构不同的防弹复合材料成为了研究的一个重要方向^[2-3]。Raju B. B 等^[4]研究发现在弹道冲击条件下, 靶板正面几层中的高性能纤维的响应多是非弹性的, 而接近背面几层中的纤维则发生弹性响应, 即由于防弹复合材料受到横向冲击载荷, 复合材料在厚度方向存在厚度效应。

本文针对 kevlar129 芳纶纤维、S2 玻璃纤维和 T300—6K 碳纤维三种高性能纤维平纹织物与增韧改性环氧乙烯基酯树脂进行优化设计后在特定工艺下的复合成型, 制成单一织物和厚度方向层间梯度混杂的复合材料, 采用高压气动滑膛弹道测速工作枪对复合材料的抗弹道冲击性能进行测试并对冲击能量吸收、弹道极限速度 V_{50} 和弹道极限指数 BPI 进行表征, 在性能测试的基础上结合复合材料的冲击响应、破坏模式以及能量吸收的模式对三种铺层混杂高性能纤维树脂基防弹复合材料的抗弹道侵彻机理进行了初步的分析与研究。

1 试验部分

1.1 实验材料及仪器

1.1.1 实验原料

增韧改性环氧乙烯基酯树脂 (Swancor 980), 上纬 (上海) 精细化工有限公司; T300—6K 碳纤维 (日本东丽公司) 平纹布, 江苏宇杰碳纤维科技有限公司; S2 高强玻璃纤维平纹布, 南京玻璃纤维研究设计院; Kevlar129 芳纶平纹布, 北京君安泰防护用品有限公司。三种织物的规格如表 1 所示。

收稿日期: 2012-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51073141)

作者简介: 肖露 (1986—), 男, 四川西昌人, 硕士研究生, 主要研究产业用纺织品的开发及应用。

通信作者: 张华鹏, 电子邮箱: zhp@zstu.edu.cn

表1 三种高性能纤维织物参数

试样	结构	强力/(N/25 cm)		密度/(根/10 cm)		厚度/(mm)	面密度/(g/m ²)	生产厂家
		经向	纬向	经向	纬向			
T300-6K	平纹	8 618	8 510	50	49	0.61	400.0	日本东丽
S2	平纹	2 138	1 926	148	146	0.21	210.0	南京玻纤院
Kevlar129	平纹	4 125	4 104	89	88	0.31	201.0	美国杜邦

1.1.2 实验仪器

Instron-2365 万能材料试验机(美国 Instron);XLB 型热压式平板硫化机(浙江双力集团湖州星力橡胶机械制造有限公司);弹道测速工作枪,53 式 7.62 mm 口径(中国兵工集团第 53 研究所);ULTRA 55 型场发射电子显微镜(FE-SEM)(德国 ZEISS)。

1.2 层间混杂复合材料的制备

高性能纤维树脂基防弹复合材料的设计原则是最小的面密度下实现材料最大的能量吸收和抗弹道冲击侵彻能力,为了实现这一目标,在设计时对材料的选择及配合便有了特殊的要求。结合纤维轴向和横向力学性能特点,结合复合材料受子弹横向冲击的响应特征,采用等代设计法对试样进行设计,具体设计如表 2 所示。

表2 厚向铺层混杂复合材料的规格

混杂方式	C ₄	G ₈	K ₈	C ₂ /K ₄	G ₄ /K ₄	C ₁ /G ₂ /K ₄
样品编号	1	2	3	4	5	6
铺层角度/(°)	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90	0/90
树脂含量/%	19.8	21.2	20.5	21.3	21.8	20.9
面密度 AD/(kg/m ²)	2.11	2.06	2.08	2.10	2.04	2.02

注:样品 1 为 4 层碳纤维织物复合材料,样品 2 为 8 层 S2 玻璃纤维织物复合材料,样品 3 为 8 层对位芳纶纤维织物复合材料,样品 4 为 2 层碳纤维织物复合材料(迎弹面)、4 层对位芳纶纤维织物复合材料(背面)所形成的层间混杂复合材料,样品 5 为 4 层 S2 玻璃纤维复合材料(迎弹面)、4 层对位芳纶纤维织物复合材料(背面)所形成的层间混杂复合材料,样品 6 为 1 层碳纤维(迎弹面)、2 层 S2 玻璃纤维复合材料 4 层对位芳纶纤维织物复合材料(背面)所形成的层间混杂复合材料。

层间混杂高性能防弹复合材料的制备工艺流程如图 1 所示:

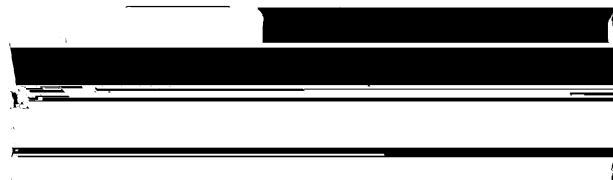


图1 厚向混杂复合材料制备工艺流程

按照表 2 设计规格和图 1 工艺流程制备 15 mm × 15 mm 的厚度方向混杂复合材料试样进行弹道冲击试验。

1.3 弹道冲击性能测试

高性能纤维防弹复合材料弹道冲击试验采用由中国兵工集团第 53 研究所研制的口径为 7.62 mm 的 53 式高压气动滑膛弹道测速工作枪;试验用弹为钢质弹体,Φ=6.35 mm,质量为 5.78 g,45[#] 钢经淬火处理 HRC=50,弹体头部形状呈锥形,锥角为 30°。测速仪器为红外大靶面光幕靶测速系统,弹体的速度可以通过控制氮气的压力加以调整。该装置示意图如图 2 所示。

弹道极限速度 V_{50} 最简化的确定方法,由三发形成完全穿孔的最低速度和三发形成部分侵彻的最

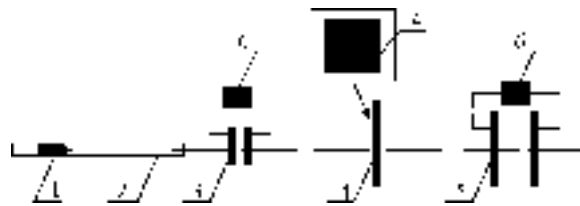


图2 弹道冲击测试装置示意图

1. 子弹;2. 枪管;3. 红外测速屏;4. 试样;5. 铝屏;6. 计时器

高速(共六发弹体)的平均值确定^[5], V_{50} 是衡量防弹复合材料性能的重要参数。在考虑除去内能吸收影响的前提下,试验中采用钢质弹体,在冲击前后变形不大,弹丸完全贯穿靶板的情况下,靶板能量吸收(E_a)可以表示为:

$$E_a = \frac{1}{2} M_p V_r^2 - \frac{1}{2} M_p V_s^2 \quad (1)$$

式中, E_a 为靶板所吸收的能量(J), M_p 为锥形弹丸的质量(kg), V_r 为子弹入射速度(m/s), V_s 为子弹穿透靶板后的剩余速度(m/s)。由此,可以估算出靶板穿透速度 V_l 临界弹道极限速度 V_{50} ^[6]:

$$V_{50} = V_l = \sqrt{\frac{2E_a}{M_p}} \quad (2)$$

弹道性能指数 BPI (Ballistic Performance Indicator) 作为衡量轻质防弹复合材料性能的又一重要

参数,它的物理意义在于体现了靶板单位面积质量吸收的能量值。 BPI 可以表示为:

$$BPI=\frac{E_a}{AD} \tag{3}$$

其中, AD 为防弹复合材料密度(kg/m^2)。

1.4 高性能纤维防弹复合材料弹道冲击破坏形貌表征

采用德国 ZEISS,ULTRA 55 型场发射电子显微镜(FE-SEM)对弹道侵彻后防弹复合材料靶板截面形貌以及对断口出纤维材料破坏形式进行观察,采用摄像机对靶板侵彻正反面破坏弹痕的形貌进行观察,从而定性分析防弹复合材料的防弹性能。

2 结果与分析

2.1 层间混杂复合材料防弹性能

层间混杂复合材料靶板抗弹道冲击侵彻性能测

试结果如表 3 所示,根据碳纤维混杂质量分数(V_C)和玻璃纤维混杂质量分数(V_G)的不同,图 3 与图 4 分别描述了在弹道侵彻下,二者与弹道极限速度 V_{50} 和弹道性能指数 BPI 的关系。

从图 3 我们可以看到就单一复合材料的弹道极限速度 V_{50} 而言,kevlar129 芳纶单一复合材料(样品 3)的 V_{50} 值略大于 S2 玻璃纤维单一复合材料(样品 2),而二者 V_{50} 值均明显高于 T300—6K 碳纤维单一复合材料(样品 1),从图中明显的可以看到当把芳纶纤维分别与碳纤维和玻璃纤维混杂时,弹道极限速度 V_{50} 相对于单一复合材料均有了明显的提高,特别是碳纤维(如图 3a 所示)在引入芳纶纤维后 V_{50} 值提升较大,提高了 13.2%,而玻璃纤维(如图 3b)在引入芳纶纤维后 V_{50} 值也提升了 7.4%,在此基础上,将三种纤维织物进行厚度方向的混杂(样品 6)后, V_{50} 值同样也有不同程度的提升。

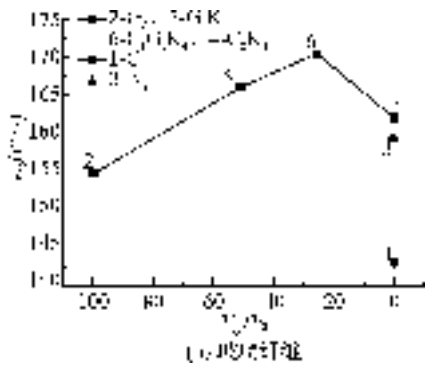
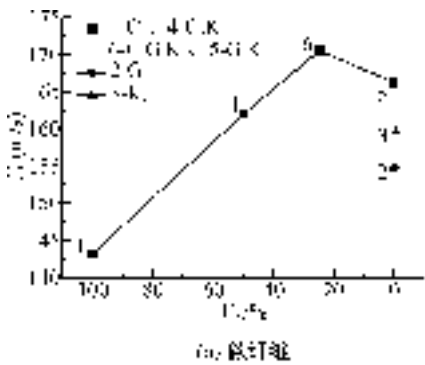


图 3 纤维混杂质量分数与弹道极限速度 V_{50} 的关系
表 3 混杂复合材料靶板冲击侵彻性能测试结果

试样	$AD/(\text{kg}/\text{m}^2)$	$V_C/\%$	$V_G/\%$	弹道极限速度 $V_{50}/(\text{m}/\text{s})$	吸能 E_A/J	BPI 指数/ $\text{J}/(\text{kg}/\text{m}^2)$
C ₄	2.11	100	0	143.05	57.5	27.25
G ₈	2.06	0	100	154.71	68.5	33.25
K ₈	2.08	0	0	159.32	74.8	35.96
C ₂ /K ₄	2.10	49.9	0	162.0	76.2	36.29
G ₄ /K ₄	2.04	0	51	166.12	78.8	38.62
C ₁ /G ₂ /K ₄	2.02	24.6	25.9	170.52	81.3	40.25

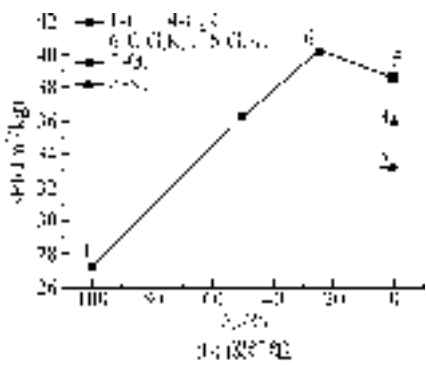
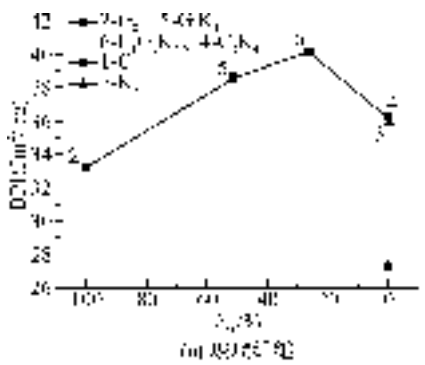


图 4 纤维混杂质量分数与弹道性能指数 BPI 的关系

从图4可以看到就单一复合材料的弹道极限指数BPI而言,与弹道极限速度趋势相同,kevlar129芳纶纤维单一复合材料(样品3)与S2玻璃纤维单一复合材料(样品2)相近,而显著大于T300-6K碳纤维单一复合材料(样品1),在S2玻璃纤维(图4a)和T300-6K碳纤维(图4b)中引入kevlar129芳纶, BPI值同样有较大的提升,分别提高了16.2%和33.2%。且混杂织物复合材料BPI值明显大于单一织物复合材料,在此基础上,将三种纤维织物进行厚度方向的混杂(样品6)后, BPI值同样也有不同程度的提升。

根据图3、4可以得到,kevlar129芳纶纤维与S2玻璃纤维和T300-6K碳纤维的混合有效的提升了三者的单一复合材料的防弹性能,且三者的厚度方向混合复合材料的防弹性能最佳。

2.2 层间混杂防弹复合材料防弹性能和能量吸收机理

2.2.1 层间混杂防弹复合材料防弹性能

靶板在受到弹道侵彻冲击时,通过对冲击形貌的观察,弹道侵彻的响应主要是局部效应,如图5所示为典型单一纤维复合材料靶板和混杂纤维复合材料靶板的弹道侵彻响应形貌示意图,从图中我们可以看到在子弹的侵彻过程中明显形成了一个响应区域。在子弹入射面(图5a),弹体接触处形成复合材料靶板的侵彻区,由于复合材料纤维层在弹道侵



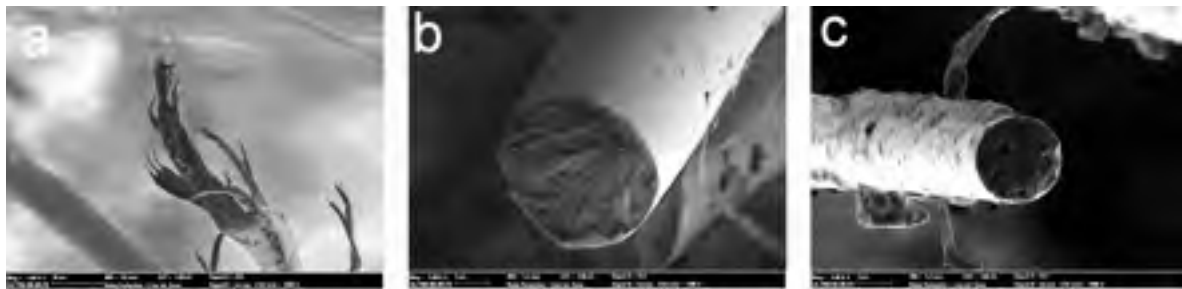
(a)靶板正面;(b)靶板背面

图5 弹道侵彻破坏形貌

彻下受到高瞬态的弹体压缩和横向剪切作用,发生非弹性的压缩和剪断破坏;在子弹的穿出面(图5b),形成明显的锥形背凸区,在该区域纤维主要发生因鼓包正应力造成的纤维拉伸断裂,同时由于弹体冲击压缩波在复合材料靶板背面反射造成的复合材料正应力分层。

图6为三种纤维在侵彻区断裂形貌的FE-SEM图,从图中可以看到碳纤维与S2玻璃纤维为明显的脆性断裂纤维断口比较齐整,对位芳纶纤维由于其高韧性而表现为韧性断裂纤维断口原纤化比较严重。图5b为靶板背面的破坏形貌,S2玻璃纤维与对位芳纶纤维背凸形貌相似存在着明显的分层和纤维的拉伸断裂,与之相比碳纤维复合材料背凸区不是很明显,纤维的断裂比较严重呈现开坑形貌,这与纤维的模量对其复合材料的结构刚度的影响有着密切的关系。从纤维层的分层区大小来看对位芳纶纤维复合材料分层区大于S2玻璃纤维的,碳纤维复合材料分层不明显。

三种纤维的轴向拉伸性能见表4,S2玻璃纤维具有最高的拉伸断裂能,芳纶其次,碳纤维最低。由于玻璃纤维密度远大于芳纶纤维,在相同面密度下,其拉伸断裂能低于芳纶,碳纤维的拉伸断裂能最低。因此,在相同面密度下,单一纤维复合材料的防弹性能芳纶复合材料最好,玻璃纤维次之,而碳纤维最差。同时,S2玻璃纤维为准各向同性材料,剪切和横向压缩模量与强度大于碳纤维和芳纶纤维;碳纤维的剪切和横向压缩模量与强度大于芳纶纤维^[7],而芳纶纤维的剪切和横向压缩性能大大低于其轴向性能,拉伸剪切强度比为17:1,拉伸剪切模量比为70:1^[8]。对于层间混杂复合材料,玻璃纤维和碳纤维放置在迎弹面,可以充分发挥二者的高剪切和压缩性能,芳纶纤维放置在背面,可以充分发挥其轴向拉伸性能。



(a)kevlar129 芳纶纤维;(b)S2 玻璃纤维;(c)T300-6K 碳纤维

图6 高性能纤维的弹道侵彻破坏形貌 FE-SEM 图

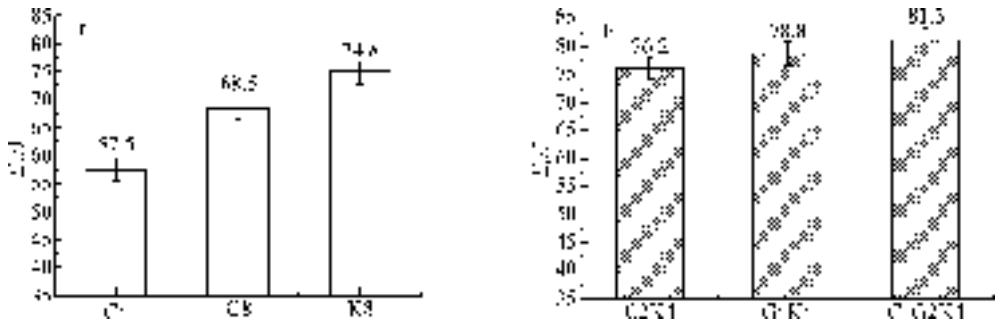
表 4 单纤维的细度及静态力学性能

试样	细度/ (μm)	拉伸强度/ (MPa)	拉伸模量/ (GPa)	断裂延伸 率/(%)	断裂能/ (MPa)
T300-6K	7.2	3 475	217.8	1.62	28.1
Kevlar129	8.0	3 400	98.5	3.40	57.8
S2	8.2	4 251	87.6	4.02	85.4

2.2.2 弹道侵彻能量的吸收

低树脂含量高性能纤维树脂基防弹复合材料对弹道侵彻的能量吸收集中表现在高性能纤维材料的破坏、纤维层的分层现象、基体的开裂以及弹体与复合材料之间的摩擦等,其中面层纤维的剪切和压缩破坏、背层纤维的拉伸断裂破坏和纤维层的层间分层现象吸收了大部分的能量^[9-10]。图 7 为复合材料对弹道冲击能量吸收情况直方图,结合复合材料在

弹道冲击时材料的冲击响应和破坏模式,就单一复合材料能量吸收(图 7a)而言,在相同面密度下,对位芳纶纤维复合材料对弹道侵彻能量的吸收达到了 74.8 J,强于 S2 玻璃纤维复合材料的 68.5 J,碳纤维复合材料最差,只有 57.5 J。将三种材料进行层间混杂时,将对位芳纶纤维复合材料置于靶板背层能有效的提升复合材料的抗弹道冲击性能,如图 7b 所示,试样 C_2K_4 与试样 G_4K_4 相比,抗压、抗剪和抗拉强度较好的 S2 玻璃纤维放置在迎弹面,比碳纤维放置于靶板迎弹面的混杂复合材料能量吸收能力好,达到 78.8 J。对于 $C_1G_2K_4$ 混杂复合材料,既充分发挥了碳纤维和玻璃纤维的抗压抗剪能力,又充分发挥了玻纤和芳纶纤维高拉伸性能,其能量吸收能力达到 81.3 J。



(a)单一复合材料;(b)层间混杂复合材料
图 7 复合材料对弹道侵彻能量的吸收

3 结 论

a) 在靶板面密度接近条件下,单一复合材料抗弹道侵彻性能(弹道极限速度 V_{50} 和弹道极限指数 BPI)中 Kevlar129 芳纶纤维复合材料优于 S2 玻璃纤维, T300-6K 碳纤维相对较差。

b) 芳纶纤维和玻璃纤维以及碳纤维的层间混杂复合能显著提高复合材料的抗弹道冲击性能。厚度方向混杂方式不同,复合材料的防弹性能不同,在相同面密度下,保证芳纶纤维质量分数基本不变条件下,改变碳纤维和玻璃纤维的质量分数,抗弹道冲击性能 C_2K_4 明显弱于 G_4K_4 而 $C_1G_2K_4$ 相对二者更强。

c) 复合材料在弹道冲击中侵彻响应具有厚度效应,迎弹面以压缩、剪切等非弹性破坏为主,背面以纤维的拉伸变形和破坏、分层和鼓包为主。层间混杂复合材料充分发挥了对位芳纶纤维高抗拉和高韧性,碳纤维与 S2 玻璃纤维的抗压抗剪能力,具有明显的正向混杂效应。

参考文献:

[1] Tabieia, Weitao Yi, Robert Goldberg. Non-linear strain rate dependent micro-mechanical composite material model for finite element impact and crashworthiness simulation [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2005, 40(7): 957-970.

[2] Balakrishna T. Differential ballistic response of aramid-glass fiber laminates to soft and hardshots [J]. Defence Science Journal, 1998, 148(1): 55-60.

[3] 朱 锡, 张振中, 刘润泉. 混杂纤维增强复合材料抗弹丸穿甲实验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(1): 3-7.

[4] Raju B B, Liu D, Dang X L, et al. Thichness effects on impact response of composite laminates [C]//Baltimore, Maryland, Proceedings of the 13th Annual Technical Conference on Composite Materials. 1998: 21-23.

[5] 熊 杰, 萧庆亮. 铺层混杂对复合材料层压板侵彻性能的影响[J]. 材料科学与工程报, 2003. 21(2): 178-181.

[6] 张佐光, 沈建明, 孙志杰, 等. 航空用防弹复合材料弹道极限速度的估算[J]. 航空学报, 2000, 21(S): 90-93.

- [7] Peijs T, Rijdsdijk H A, De Kok J M M, et al. The role of interface and fibre anisotropy in controlling the performance of polyethylene fibre reinforced composites[J]. Composites Science and Technology, 1994, 52(3): 449-466.
- [8] Hunghan Yang. Aramid fibers in comprehensive composite materials[M]. Amsterdam: Elsevier Ltd, 2000: 24.
- [9] Mines R A W, Roach A M, Jones N. High velocity Perforation behaviour of polymer composite laminates [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(6): 561-588.
- [10] 梅志远, 朱 锡, 张立军, 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.

Study on Ballistic Penetration Property of Interply Hybrid Composite Material

XIAO Lu^{a,b}, CHENG Jian-fang^b, CHAI Xiao-ming^b, ZHANG Hua-peng^{a,b}

(a. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education;

b. College of Materials and Textiles, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: This paper designs and prepares carbon fiber, twaron and high-strength glass fiber fabric in combination with the difference of mechanical property of high-performance fibrous materials to enhance single and normal interply hybrid bulletproof composite material, conducts ballistic penetration test and characterizes impact energy absorption and ballistic limit index *BPI*. The test shows that, in terms of single composite material, the bulletproof property of Kevlar129 aramid fiber is better than that of S2 glass fiber; that of T300-6K carbon fiber is relatively poor; normal interply hybrid composite material can effectively improve the bulletproof property of these three fibers. On this basis, this paper preliminarily discusses anti-ballistic penetration mechanism in combination with the impact response, failure mode and energy absorption mode of composite materials under ballistic impact.

Key words: hybrid composite material; ballistic impact; penetration property; energy absorption

(责任编辑: 许惠儿)