

聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯纤维混杂增强复合材料防弹性能

贾文星 贾子琪 田国峰 陈珺娴 黄献聪 刘少飞 战佳宇 武德珍

Bulletproof performance of polyimide/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites

JIA Wenxing, JIA Ziqi, TIAN Guofeng, CHEN Junxian, HUANG Xiancong, LIU Shaofei, ZHAN Jiayu, WU Dezhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221009.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维增强树脂基复合材料防弹性能影响因素及破坏机制

Influence factors on ballistic performance and failure mechanism of fiber reinforced resin matrix composite

复合材料学报. 2017, 34(9): 1960–1972 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161208.002>

高强高模聚酰亚胺纤维/环氧树脂复合材料力学性能与破坏机制

Mechanical properties and failure mechanism of high strength and high modulus polyimide fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2019, 36(9): 2101–2109 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190121.002>

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维表面处理对UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能的影响机制

Influence mechanism of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber surface modification on interfacial performance of UHMWPE/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(3): 573–580 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190705.001>

层间混杂复合材料装甲板防弹性能及其防弹机制

Bulletproof performance and bulletproof mechanism of interlaminar hybrid composite armor plate

复合材料学报. 2019, 36(4): 837–847 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180611.002>

Ku/Ka双频段防弹天线罩复合材料性能

Performance of the composite used for bulletproof radome in Ku/Ka band

复合材料学报. 2018, 35(2): 260–266 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170615.001>

芳纶沉析纤维-多巴胺/聚酰亚胺-酚醛树脂复合膜的力学及摩擦磨损性能

Mechanical and friction and wear properties of aramid fibril–polydopamine/polyimide–phenolic resin composite films

复合材料学报. 2020, 37(1): 96–103 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190416.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221009.002

聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯纤维混杂增强
复合材料防弹性能



分享本文

贾文星¹, 贾子琪¹, 田国峰^{*1}, 陈珺娴², 黄献聪², 刘少飞³, 战佳宇³, 武德珍¹

(1. 碳纤维及功能高分子教育部重点实验室(北京化工大学), 北京 100029; 2. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100010;
3. 江苏先诺新材料科技有限公司, 常州 213146)

摘要: 针对超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维增强防弹复合材料背部凸起(BFS)较高的不足, 本研究充分利用聚酰亚胺(PI)纤维耐高温、高模量的优势, 制备了一系列PI和UHMWPE纤维混杂复合材料靶板, 研究了混杂靶板的铺层结构和混杂比例对比吸收能(SEA)值和背部凸起(BFS)值的影响, 分析了混杂靶板防护作用机制。结果显示: PI纤维的使用可以在不影响SEA值的情况下有效限制BFS值, 其中两极铺层结构(H3、UHMWPE/PI)和夹芯铺层结构(H4、PI/UHMWPE/PI)表现出混杂正效应, 两种结构的SEA值和BFS值分别可达193.2 J·m²/kg, 17.40 mm和208.9 J·m²/kg, 17.77 mm, 表现出优异的防弹性能。

关键词: 聚酰亚胺纤维; UHMWPE纤维; 复合材料; 防弹; 比吸收能; 背凸高度

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)07-3921-07

Bulletproof performance of polyimide/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites

JIA Wenxing¹, JIA Ziqi¹, TIAN Guofeng^{*1}, CHEN Junxian², HUANG Xiancong²,
LIU Shaofei³, ZHAN Jiayu³, WU Dezhen¹

(1. Key Laboratory of Carbon Fiber and Functional Polymers (Beijing University of Chemical Technology), Ministry of Education, Beijing 100029, China; 2. Systems Engineering Institute, Academy of Military Science (AMS), Beijing 100010, China; 3. Jiangsu Shino New Materials Technology CO., LTD., Changzhou 213146, China)

Abstract: Aiming at the deficiency of high back-face signature (BFS) of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber-reinforced ballistic composites, a series of polyimide (PI) and UHMWPE fiber hybrid composites were prepared by making full use of the advantages of high temperature resistance and high modulus of PI fibers in this study. The effects of layer structure and mixing ratio on the specific energy absorption (SEA) and BFS values of the hybrid composites and the protective mechanism were investigated. The results show that the use of PI fibers can effectively limit the BFS without affecting the SEA value. The bipolar layer structure (H3, UHMWPE/PI) and the sandwich layer structure (H4, PI/UHMWPE/PI) exhibit positive mixed effect. SEA and BFS values of the two structures can reach 193.2 J·m²/kg, 17.40 mm and 208.9 J·m²/kg, 17.77 mm, respectively, demonstrated excellent bulletproof performance.

Keywords: polyimide fiber; UHMWPE fiber; composite material; bulletproof; specific energy absorption; back-face signature

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维由于其质轻、高强高模的优点被广泛应用于防弹复合材料领域^[1-6]。突出的力学性能特点和高的应力波传播速率使得UHMWPE纤维靶板具有很高的比吸收

能(SEA)。但由于断裂伸长率高、抗压强度和抗剪强度偏低、易软化变形等原因, 在受到子弹侵彻时的背部凸起(BFS)一般较高^[7-9]。BFS与子弹通过靶板传递到人体的能量密切相关, 其值过高,

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2022-09-15; 录用日期: 2022-09-17; 网络首发时间: 2022-10-11 09:39:52
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221009.002>
基金项目: 国防基础科研计划资助(JCKY2020110B002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(XK1802-2)
Defense Industrial Technology Development Program(JCKY2020110B002); Fundamental Research Funds for the Central Universities(XK1802-2)
通信作者: 田国峰, 博士, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为高性能及功能型聚酰亚胺及其复合材料 E-mail: tiangf@mail.buct.edu.cn
引用格式: 贾文星, 贾子琪, 田国峰, 等. 聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯纤维混杂增强复合材料防弹性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3921-3927.
JIA Wenxing, JIA Ziqi, TIAN Guofeng, et al. Bulletproof performance of polyimide/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3921-3927(in Chinese).

往往会造成人体钝伤^[10]。层间混杂是提升靶板防弹性能的有效方法^[11-13]，周庆等^[14]通过将 UHMWPE 纤维与对位芳香族聚酰胺纤维混杂，混杂后的复合材料靶板性能优于任一单一纤维增强靶板。Zulkifli 等^[15]在 UHMWPE 靶板的迎弹面、层间、背弹面分别铺设少量碳纤维研究其 BFS 值变化规律，结果表明在迎弹面铺设碳纤维的靶板 BFS 值降低了 30%，可见通过 UHMWPE 纤维靶板与高模量材料复合，可以很好地起到抑制 BFS 的效果。但是碳纤维密度高、脆性大，会对靶板的 SEA 值产生不利影响。

高强高模聚酰亚胺 (PI) 纤维是一种新型的高性能有机纤维，兼具 PI 材料的耐高低温性能和高性能有机纤维高强、高模、高韧的力学性能特点^[16-20]。Wang 等^[21]研究显示高强高模 PI 纤维表现出明显的应变率效应，拉伸强度随应变速率的提高快速提高，断裂形式也从塑性延展性破坏向原纤化劈裂形式转变，表现出很好的防弹吸能特性。充分发挥其耐高温、高模量的特点，有希望与 UHMWPE 纤维实现互补，达到兼顾 SEA 和 BFS 的效果。

为此，本研究以高强高模 PI 纤维和 UHMWPE 纤维为增强体，制备了一系列 PI/UHMWPE 混杂复合材料靶板，系统研究了铺层结构、混杂比对靶板 SEA 值和 BFS 值的影响规律。通过微纳米焦点电子计算机断层扫描 (CT) 无损检测和 SEM 等手段观察了靶板的侵彻破坏形貌，探讨了两种纤维的协同防护机制，得到了能够充分发挥二者作用的最佳铺层结构，实现了在不影响 UHMWPE 靶板 SEA 值的情况下，有效降低 BFS 值的设计目标。

1 实验材料和实验方法

1.1 实验材料

超高分子量聚乙烯纤维，市售产品，拉伸强度 3.49 GPa，初始模量 110 GPa，密度 0.97 g/cm³。高强高模聚酰亚胺纤维，江苏先诺新材料科技有限公司，拉伸强度 3.60 GPa，初始模量 130 GPa，密度 1.44 g/cm³。水性聚氨酯树脂，市售产品。

1.2 复合材料层合板的制备

采用湿法缠绕工艺制备纤维单向 (Unidirectional, UD) 布，控制树脂含量在 15wt% 以内，PI UD 布面密度在 (100±6) g/m²，UHMWPE UD 布面密度在 (60±5) g/m²。采用电剪刀将 UD 布裁切为 300 mm×300 mm 样片，将样片按照 [(0°/90°)]_n 交替的铺层方式铺设一系列混杂结构的层合板。层

合板的铺层结构示意图如图 1 所示。将已铺设的层合板放置在模具中，模具和层合板之间铺设四氟布，四氟布和模具之间涂抹脱模剂。随后将模具放置于热压机，压力为 1 MPa，温度为 128℃，保温时间为 30 min，然后保压降温取出层合板。

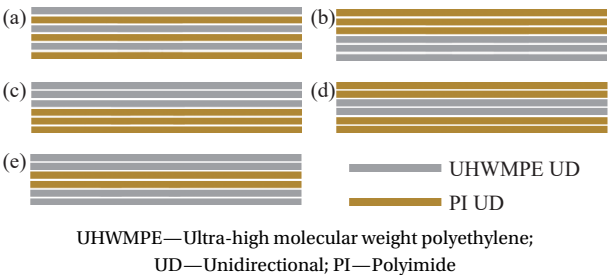


图 1 层合板铺层结构示意图 (厚度方向): (a) 交替铺层结构 (H1); (b) 两极非对称铺层结构 (H2); (c) 两极非对称铺层结构 (H3); (d) 夹芯铺层结构 (H4); (e) 夹芯铺层结构 (H5)

Fig. 1 Schematic diagram of laminate lay-up structure (thickness direction): (a) Alternating lay-up structure (H1); (b) Two-pole asymmetric lay-up structure (H2); (c) Two-pole asymmetric lay-up structure (H3); (d) Sandwich lay-up structure (H4); (e) Sandwich lay-up structure (H5)

1.3 性能表征测试

1.3.1 防弹性能

参照 GJB 4300 A—2012《军用防弹衣安全技术性能要求》^[22]规定的方法对试样的弹道极限速度 V50 值和 BFS 进行测试。投射物种类为 5.6 g 7.62 mm 铅芯弹，发射距离为 5 m。V50 值取结果为贯穿和未贯穿数量接近的多次弹速经过修正后得出。BFS 测试控制子弹初速度为 (445±10) m/s，采用精度为 0.01 mm 深度尺测量，取 6 发弹痕深度平均值作为 BFS 值。

V50 值是评价防弹制品的重要指标，是指枪弹对防弹制品穿透概率为 50% 的平均着靶速度。V50 值与防弹制品面密度密切相关，为了消除面密度的影响，采用 SEA 表征防弹性能，即单位面密度防弹制品在 V50 的侵彻速度下所吸收的能量。计算公式如下：

$$SEA = \frac{\frac{1}{2}m_p V50^2}{AD} \tag{1}$$

式中：SEA 为靶板比吸收能 (J·m²/kg)；m_p 为弹丸质量 (kg)；V50 为靶板弹道极限速度 (m/s)；AD 为靶板面密度 (kg/m²)。BFS 值是指防弹层在投射物有效命中且部分穿透情况下，在背面垫料上所产生的最大变形深度，可用于评价弹体在非贯穿情况下造成的人体钝伤。

1.3.2 靶板微纳米焦点 CT 无损检测

将 BFS 测试后的靶板进行微纳米焦点 CT 无损检测^[23]，分析侵彻路径和靶板层间破坏失效模式。该方法能够在不对靶板产生破坏的情况下，通过发射 X 射线，检测靶板的损伤区域和损伤体积分布情况，再经过计算机数据处理和图像重建，得到靶板切片图。

1.3.3 微观形貌

采用 JSF-7800 型扫描电子显微镜 (SEM，日本

电子株式会社) 观察防弹试验后靶板弹孔处纤维微观破坏断裂形貌。

2 结果与讨论

2.1 PI/UHMWPE 纤维混杂增强复合材料防弹性能

采用 1.2 节中层合板的铺层结构和制备方法，制备了一系列 PI/UHMWPE 纤维增强复合材料靶板。由于 PI 和 UHMWPE 纤维密度差异较大，因此控制各个靶板相同的铺层数，混杂比为 PI 与 UHMWPE 纤维质量比。所制备的靶板结构见表 1。

表 1 聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯 (PI/UHMWPE) 纤维混杂增强复合材料靶板铺层结构
Table 1 Laminated structure of PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composite target plate

Type of structure		Mass ratio (PI : UHMWPE)	Layers structure	Surface density/(kg·m ⁻²)
PI	—	1 : 0	P ₇₀	6.60
UHMWPE	—	0 : 1	U ₇₀	4.02
H1	H1-1	5 : 3	(U ₂ P ₂) ₁₈	5.45
	H1-2	5 : 6	(U ₄ P ₂) ₁₂	4.99
	H1-3	5 : 12	(U ₈ P ₂) ₇	4.58
H2	H2-1	5 : 3	P ₃₆ U ₃₆	5.45
	H2-2	5 : 6	P ₂₄ U ₄₈	5.02
	H2-3	5 : 12	P ₁₄ U ₅₆	4.55
H3	H3-1	5 : 3	U ₃₆ P ₃₆	5.45
	H3-2	5 : 6	U ₄₈ P ₂₄	5.04
	H3-3	5 : 12	U ₅₆ P ₁₄	4.62
H4	H4-1	5 : 3	P ₁₈ U ₃₆ P ₁₈	5.47
	H4-2	5 : 6	P ₁₂ U ₄₈ P ₁₂	5.03
	H4-3	5 : 12	P ₆ U ₅₆ P ₈	4.93
H5	H5-1	5 : 3	U ₁₈ P ₃₆ U ₁₈	5.47
	H5-2	5 : 6	U ₂₄ P ₂₄ U ₂₄	5.03
	H5-3	5 : 12	U ₂₈ P ₁₄ U ₂₈	4.61

Note: U stands for UHMWPE fiber and P stands for PI fiber, P₃₆U₃₆ stands for 36 layers of PI UD and 36 layers of UHMWPE UD lay-up structure, and PI fiber is used as the spring-return surface.

表 2、图 2、图 3 为系列靶板的射击试验结果。由于 PI 和 UHMWPE 的密度不同，当靶板所用的 UD 布总层数相当时，不同铺层比例的面密度不同，因此 V50 值不具备可比性，可采用 SEA 值进行横向对比。从结果中可以看出：单一 PI 纤维靶板具有最低的 BFS 值，仅为 16.15 mm；单一 UHMWPE 纤维靶板具有最高的 SEA 值，达到 222.4 J·m²/kg。这是由于 PI 纤维较高的模量和结构刚性，导致在

表 2 单一纤维 PI/UHMWPE 纤维混杂增强复合材料比吸收能 (SEA) 值与背部凸起 (BFS) 值
Table 2 Specific energy absorption (SEA) value and back-face signature (BFS) value of single fiber PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites

Type of structure	V50/(m·s ⁻¹)	SEA/(J·m ² ·kg ⁻¹)	BFS/mm
PI	601.4	153.4	16.15
UHMWPE	565.1	222.4	20.40

Note: V50—Ballistic limit velocity of the target plate.

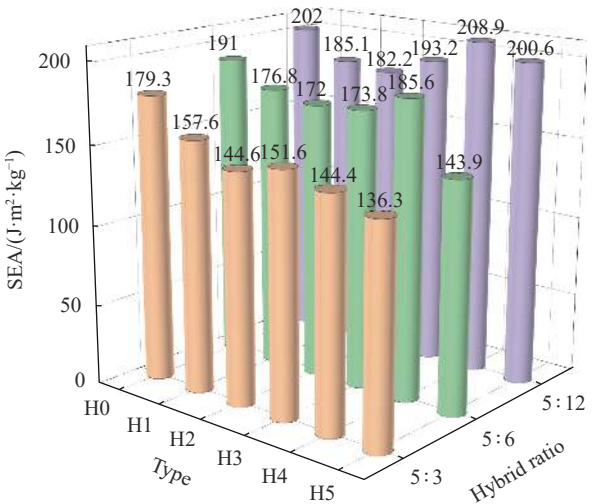


图 2 PI/UHMWPE 纤维混杂增强复合材料靶板 SEA 值与铺层结构和混杂比例的关系 (H0 为复合材料混杂定律按照质量分数计算的理论值)
Fig. 2 Relationship between SEA value of PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composite target plate and the layer structure and hybrid ratio (H0 is the theoretical value calculated according to the mass fraction of the hybrid law of composite materials)

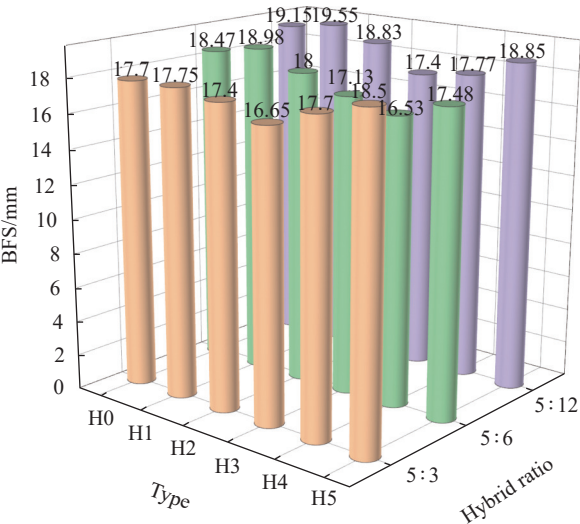


图3 PI/UHMWPE 纤维混杂增强复合材料靶板 BFS 值与铺层结构和混杂比例的关系 (同一类型靶板的弹道极限速度 V50 值和 BFS 由两块完全相同的靶板分别测得)

Fig. 3 Relationship between BFS value of PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composite target plate and layer structure and hybrid ratio (V50 and BFS of the same type of target plate are measured by two identical target plates separately)

受到冲击时背面变形较小；UHMWPE 密度低、韧度高，因此具有较高的 SEA 值。

在 H1、H2、H3、H4、H5 等 5 种混杂铺层结构中，SEA 值均随着靶板中 UHMWPE 纤维占比的提升而提升，在混杂比为 5：12 时达到最高，这主要归因于 UHMWPE 纤维的高比吸能特性。在该混杂比条件下，H3、H4、H5 表现出相近的 SEA 值，分别为 193.2、208.9 和 200.6 J·m²/kg。明显高于 H1 和 H2 结构。从这一现象可以推测，高模量 PI 纤维的支撑作用有利于协同发挥 UHMWPE 纤维的吸能作用。若以质量分数按照混杂定律计算，理论 SEA 值约为 202 J·m²/kg，则只有 H4 结构体现出混杂正效应。这可能是两个方面共同作用的结果，即迎弹面为高模量的 PI 纤维，有利于应力波在靶板平面范围内的快速传播扩散，然后中间层的 UHMWPE 可以更大范围的吸收冲击能量，再结合背弹面的 PI 纤维的支撑作用，表现出最佳的防护效果。

在 BFS 值方面，表现出与混杂比例较低的相关性，而是与铺层结构密切相关。当混杂比为 5：3 和 5：12 时，H3 结构的 BFS 均达到最小值，分别为 16.65 mm 和 17.40 mm，相比于纯 UHMWPE 纤维靶板降低了 18% 和 15%，更接近于纯 PI 纤维靶板。当混杂比为 5：6 时，H4 结构 BFS 达到最小值。H3 和 H4 的共同点都是背弹面为 PI 纤维，

一方面可避免背弹面为 UHMWPE 纤维时的熔融形变；另一方面对迎弹面或者芯层的 UHMWPE 纤维起到了很好的变形抑制作用。因此在铺层结构设计时将 PI 纤维铺设于背弹面，迎弹面铺设 UHMWPE 纤维或者使用 PI 纤维将 UHMWPE 纤维夹芯保护，能有效降低 BFS 值。就本研究所设计的几种靶板结构而言，H3-3 和 H4-3 能够同时满足高 SEA 值和低 BFS 的需求，表现出最佳的防护效果。

2.2 靶板宏观形貌检测与失效模式分析

为了更清晰地观察弹体的侵彻过程，采用微纳米焦点 CT 对 BFS 测试后的靶板进行扫描，结合其背弹面的宏观形貌分析靶板的吸能机制，结果如图 4 所示。可以看出：7.62 mm 铅芯弹在侵彻靶板过程中，发生塑性变形，逐渐变成圆饼状，子弹的塑性变形是吸能方式的一种。观察背弹面凸起形貌，5 块靶板均呈菱形。背弹面采用 PI 纤维作为增强体的 H3 和 H4 靶板，其凸起面积和凸起高度均小于背弹面采用 UHMWPE 纤维作为增强体的 H2 和 H5 靶板。值得注意的是具有交替铺层结构的 H1 靶板。在混杂比相同的情况下，这种更均匀的混杂结构并未充分发挥出两种纤维的作用，反而 SEA 值和 BFS 均表现出较差的结果。结合厚度方向微纳米焦点 CT 无损检测图像可以看出，H1 靶板分层较多，且各个层间均有分布，但大面积严重分层集中在靠近迎弹面一侧，这是由于 H1 靶板有过多的 PI/UHMWPE 纤维界面，在界面处，不同纤维受到子弹侵彻会产生不同的应变，从而产生内应力，促使靶板分层。同样过多的界面使 PI 纤维无法发挥其限制 BFS 的优势，PI 纤维作为层合板具有较高的刚度阻止变形，而一旦在局部区域分层树脂基体失效成为单层板，通过协同作用限制变形的机制就会被削弱。

从图 4(b3) 可以看出，H2 靶板的 PI 层未出现明显分层，子弹贯穿 PI 层之后进入 UHMWPE 层，在二者界面处出现明显分层，且 UHMWPE 层的凸起呈现窄、高的特点。从图 4(c3) 可以看出，H3 前侧 UHMWPE 纤维产生分层并形成大面积凸起，但由于有背弹面的 PI 纤维作为支撑，凸起高度有了很好的限制，从凸起处的厚度可以看出，子弹并未穿透 UHMWPE 层。H4 与 H3 的表现基本相似，不同之处在图 4(d3) 中可以看到在迎弹面出现分层，推测是 PI 层与 UHMWPE 层的界面分层，当子弹穿透 PI 层进入 UHMWPE 层之后，其侵彻过程与 H3 相同。虽然部分 PI 层被放置于迎弹面，减少了背弹面对于 UHMWPE 层的支撑

作用,但前侧PI层的高模量作用有利于应力波快速扩散,增加了靶板的整体吸能面积,因此其虽然在BFS值方面略高于H3结构,但SEA值却得到明显提升。H5结构的表现与H2类似,不同的是迎弹面增加了UHMWPE层,子弹先接触UHMWPE层吸收部分能量,然后进入PI层扩散应力波,最后进入UHMWPE层吸收剩余能量。因此这一结

构表现出最大的分层面积,SEA值仅略低于H4结构,但由于背弹面为UHMWPE纤维,缺少PI纤维的支撑和约束,其BFS值相对较高。

2.3 弹孔微观形貌

为了研究PI和UHMWPE纤维在迎弹面和背弹面不同的破坏形式,使用SEM对不同靶板进行观察,结果如图5所示。可以看出:在迎弹面PI

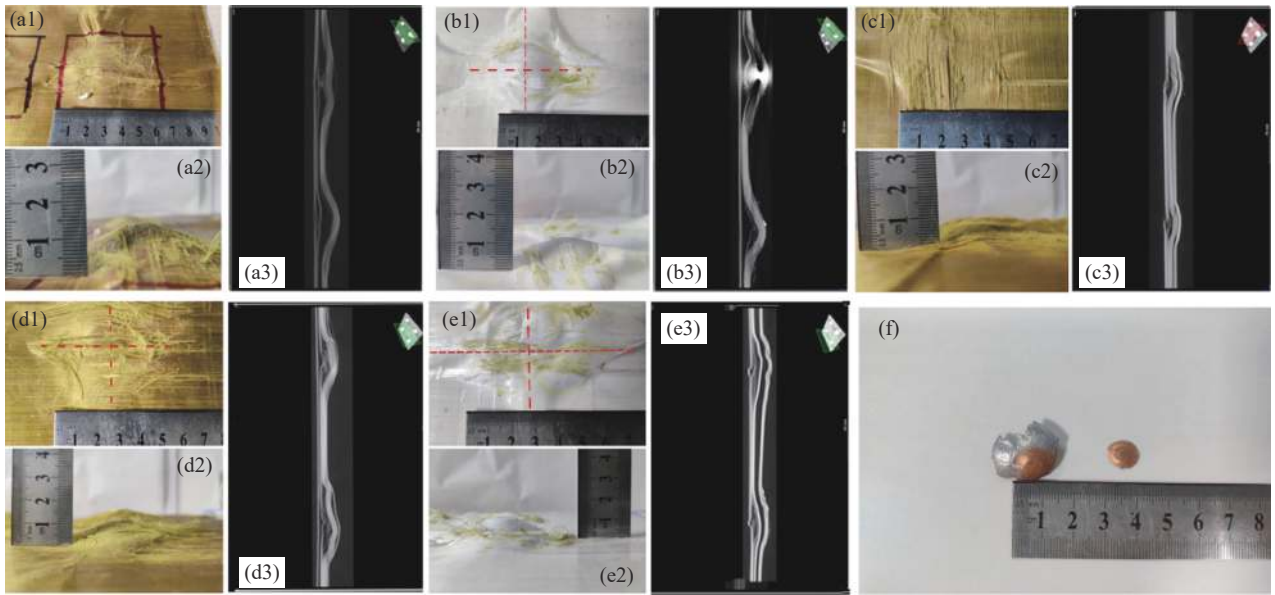


图4 PI/UHMWPE纤维混杂增强复合材料宏观形貌((a)~(e)分别对应H1~H5靶板,混杂比均为5:12,下标1、2、3分别为背弹面凸起宏观形貌、厚度方向凸起形貌、厚度方向微纳米焦点CT无损检测切片图;(f)子弹宏观形貌)

Fig. 4 Macroscopic morphology of PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites ((a)-(e) Correspond to H1-H5 target plate, mixing ratio are 5:12, subscripts 1, 2, 3 are the macroscopic morphologies of the projection of the back elastic surface, thickness direction projection morphology, thickness direction micro-nano-focus CT nondestructive inspection section; (f) Macroscopic morphology of the bullet)

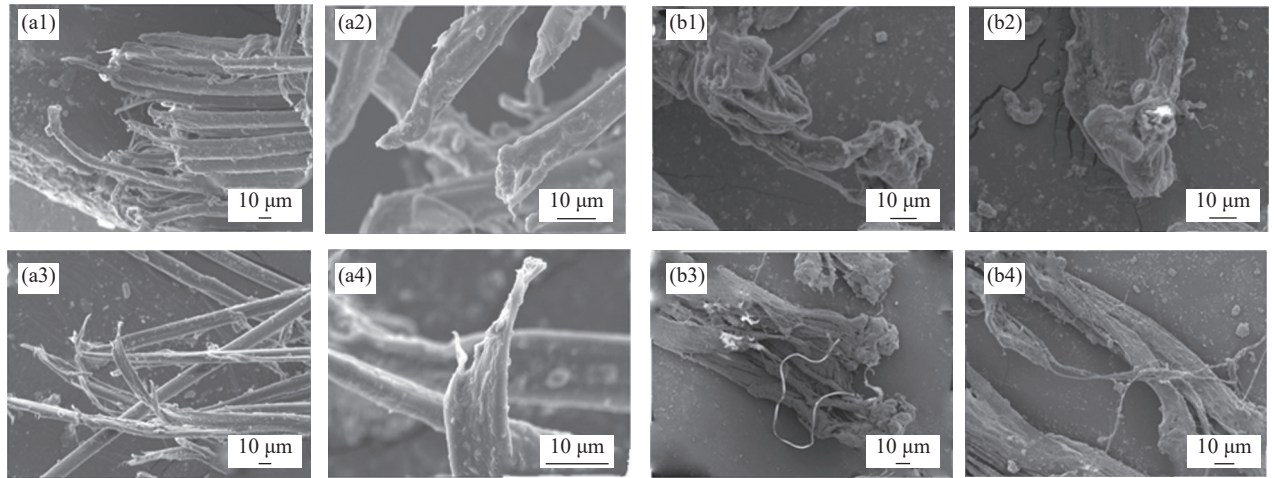


图5 PI/UHMWPE纤维混杂增强复合材料迎/背弹面纤维微观形貌:((a1),(a2))H4-3靶板迎弹面弹孔处PI纤维微观形貌;((a3),(a4))H4-3靶板背弹面弹孔处PI纤维微观形貌;((b1),(b2))H5-3靶板迎弹面弹孔处UHMWPE纤维微观形貌;((b3),(b4))H5-3靶板背弹面弹孔处UHMWPE纤维微观形貌

Fig. 5 Micromorphologies of PI/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites on the front and back elastic surfaces: ((a1), (a2)) Microscopic morphologies of PI fibers at the bullet holes on the face of H4-3 target plate; ((a3), (a4)) Microscopic morphologies of PI fibers at the bullet holes on the back surface of H4-3 target plate. ((b1), (b2)) Microscopic morphologies of UHMWPE fibers at the bullet holes on the face of H5-3 target plate; ((b3), (b4)) Microscopic morphologies of UHMWPE fibers at the bullet holes on the back of H5-3 target plate

断口形貌较平整,无明显撕裂痕迹,为典型的剪切破坏形貌。在背弹面处断口形貌出现轴向裂纹,断口形貌不规则,为典型的拉伸撕裂破坏。有机纤维横向剪切强度小于其轴向拉伸强度,因此前侧迎弹面纤维在少量吸收能量后即发生破坏而失效,更多的能量则由背弹面的纤维吸收。UHMWPE在破坏时迎弹面和背弹面均出现了塑性变形现象,且在迎弹面一侧更明显,在背弹面一侧还出现原纤化现象表明纤维受到拉伸破坏变形。因此UHMWPE在迎弹面和背弹面侧均可通过塑性变形吸收能量,在背弹面一侧还可通过纤维拉伸降低子弹动能,因此多种破坏形式使得UHMWPE具有高的比吸收能,但UHMWPE容易塑性变形使靶板难以有效限制BFS。

3 结论

制备了一系列不同铺层结构和混杂比的聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯(PI/UHMWPE)靶板,通过弹道测试获得比吸收能(SEA)值和背部凸起(BFS)值,并采用无损检测、宏观微观形貌表征等方法分析其破坏特征,探讨了其抗侵彻机制,研究结果表明:

(1) PI/UHMWPE靶板的SEA值随着UHMWPE纤维比例的增加而提升。BFS则与靶板铺层结构密切相关,将PI纤维铺设于背弹面能够有效降低BFS值;

(2) 当PI/UHMWPE的混杂质量比为5:12时,铺层结构为PI纤维作为背弹面的两极非对称结构,或PI纤维在外侧,中间为UHMWPE纤维的夹芯结构,可在不显著降低SEA值的前提下减小BFS,获得抗贯穿能力和抗凹陷能力均衡的混杂正效应。

参考文献:

- [1] ABTEW M A, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Ballistic impact mechanisms—A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses[J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 110966.
- [2] TAM T, BHATNAGAR A. 1—High-performance ballistic fibers and tapes[M]. *Lightweight Ballistic Composites (Second Edition)*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016: 3-30.
- [3] MAWKHLIENG U, MAJUMDAR A, LAHA A. A review of fibrous materials for soft body armour applications[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(2): 1066-1086.
- [4] 叶卓然, 罗靓, 潘海燕, 等. 超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研究现状与分析[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4286-4309.
- [5] YE Zhuoran, LUO Liang, PAN Haiyan, et al. Research status and analysis of ultra-high molecular weight polyethylene fibers and their composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9): 4286-4309(in Chinese).
- [6] 董彬, 魏汝斌, 王小伟, 等. 纤维增强树脂基复合材料防弹头盔研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(4): 125-132.
- [7] DONG Bin, WEI Rubin, WANG Xiaowei, et al. Research progress on fiber-reinforced resin matrix composite bullet-proof helmets[J]. *Weapon Materials Science and Engineering*, 2022, 45(4): 125-132(in Chinese).
- [8] VARGAS-GONZALEZ L R, GURGANUS J C. Hybridized composite architecture for mitigation of non-penetrating ballistic trauma[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 295-306.
- [9] PEIJS A A J M, CATSMAN P, GOVAERT L E, et al. Hybrid composites based on polyethylene and carbon fibres part 2: Influence of composition and adhesion level of polyethylene fibres on mechanical properties[J]. *Composites*, 1990, 21(6): 513-521.
- [10] ZHOU Y, LI H, XIONG Z, et al. The structural effects on the impact response of ultra-high-molecular-weight polyethylene plain weaves[J]. *Textile Research Journal*, 2021, 91(7-8): 911-924.
- [11] PRAT N, RONGIERAS F, SARRON J C, et al. Contemporary body armor: Technical data, injuries, and limits[J]. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 2012, 38(2): 95-105.
- [12] 周越松, 梁森, 王得盼, 等. 层间混杂铺层复合材料装甲抗侵彻性能研究[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(10): 118-123, 129.
- [13] ZHOU Yuesong, LIANG Sen, WANG Depan, et al. Study on anti-penetration performance of interlayer hybrid laminated composite armor[J]. *New Chemical Materials*, 2022, 50(10): 118-123, 129(in Chinese).
- [14] 肖露, 程建芳, 柴晓明, 等. 层间混杂复合材料的弹道侵彻性能研究[J]. *浙江理工大学学报*, 2013, 30(4): 471-476.
- [15] XIAO Lu, CHENG Jianfang, CHAI Xiaoming, et al. Ballistic penetration performance of interlayer hybrid composites[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2013, 30(4): 471-476(in Chinese).
- [16] 王晓宏, 张丰发, 刘长喜, 等. 陶瓷/纤维层间混杂复合材料设计

- 制作及抗弹体冲击性能测试[J]. 复合材料学报, 2021, 38(8): 2684-2693.
- WANG Xiaohong, ZHANG Fengfa, LIU Changxi, et al. Design, fabrication and impact resistance testing of ceramic/fiber interlayer hybrid composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(8): 2684-2693(in Chinese).
- [14] 周庆, 何业茂, 刘婷. 层间混杂复合材料装甲板防弹性能及其防弹机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(4): 837-847.
- ZHOU Qing, HE Yemao, LIU Ting. Bulletproof performance and bulletproof mechanism of interlayer hybrid composite armor plate[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 837-847(in Chinese).
- [15] ZULKIFLI F, STOLK J, HEISSERER U, et al. Strategic positioning of carbon fiber layers in an UHMWPE ballistic hybrid composite panel[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 129: 119-127.
- [16] ZHANG M, NIU H, WU D. Polyimide fibers with high strength and high modulus: Preparation, structures, properties, and applications[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2018, 39(20): 1800141.
- [17] HE B, WANG B, WANG Z, et al. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon fiber and high-strength and high-modulus polyimide fiber[J]. *Polymer*, 2020, 204: 122830.
- [18] JIANG M, YUAN D, HAN E, et al. Structure and properties of BPDA/PDA polyimide fibers[J]. *High Performance Polymers*, 2021, 33(6): 646-656.
- [19] LIN D, LI T, LI R, et al. Structures and properties of polyimide fibers prepared via gel spinning induced by chemical imidization[J]. *Polymer*, 2022, 238: 124377.
- [20] WANG Z, ZHANG J, NIU H, et al. Influences of different imidization conditions on polyimide fiber properties and structure[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138(40): 51189.
- [21] WANG B, ZHANG M, HAN E, et al. Mechanical behavior of polyimide filament tows under high strain rate tension[J]. *High Performance Polymers*, 2020, 32(7): 842-848.
- [22] 中国人民解放军总后勤部. 军用防弹衣安全技术性能要求: GJB 4300 A—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Logistics Department of the PLA. Requirements of safety technical performance for military body armor: GJB 4300 A—2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012(in Chinese).
- [23] ZIÓŁKOWSKI G, PACH J, PYKA D, et al. X-ray computed tomography for the development of ballistic composite[J]. *Materials*, 2020, 13(23): 5566.