

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20181218.005

对位芳香族聚酰胺纤维/环氧树脂复合材料 防弹性能及其破坏机制

周庆*, 何业茂, 刘婷

(北京普诺泰新材料科技有限公司, 北京 102200)

摘 要: 为研究对位芳香族聚酰胺纤维/环氧树脂(Epoxy resin, EP)复合材料的防弹性能及其破坏机制, 采用铅芯弹侵彻复合材料靶片。以对位芳香族聚酰胺纤维作增强纤维, EP 作基体树脂, 纳米 SiO₂ 和聚乙烯醇缩丁醛(Polyvinyl butyral, PVB)作增韧剂, 通过热压工艺制备单向(Unidirectional, UD)结构的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片。研究单片纤维面密度、UD 片材结构、射击角度和树脂改性对靶片防弹性能的影响; 观察弹击实验后靶片的破坏形貌, 分析靶片的破坏机制。研究结果表明: 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料具有优异的防弹性能, 随着单层纤维面密度的增大, 靶片的防弹性能呈现整体上升、局部上下波动的变化趋势; 铺层方式为 0°/90°/0°/90°的四层单 UD 片材(4UD)结构的防弹性能优于铺层方式为 0°/90°的两层单 UD 片材(2UD)结构; 角度射击时, 靶片的穿透比率更大, 背衬凹陷深度(Back face signature, BFS)比率更小; PVB 增韧改性 EP 提升了靶片的防弹性能; 纤维拉伸变形破坏、片材分层和基体树脂碎裂是复合材料靶片主要的吸能方式。

关键词: 对位芳香族聚酰胺纤维; 环氧树脂(EP); 增韧改性; 单向(UD)结构; 破坏机制

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)10-2235-12

Bulletproof properties and failure mechanism of para-aromatic polyamide fiber/epoxy resin composite

ZHOU Qing*, HE Yemao, LIU Ting

(Beijing Protech New Material Science CO. LTD., Beijing 102200, China)

Abstract: In order to investigate the bulletproof performance and failure mechanism of para-aromatic polyamide fiber/epoxy resin(EP) composite, the lead core projectiles were employed to penetrate composite target. The type of reinforcement was para-aromatic polyamide fiber, whereas the resin was EP; Nano-SiO₂ and polyvinyl butyral (PVB) worked as modifier. Unidirectional (UD) composites were fabricated using hot pressing process. The effects of single-layer fiber areal density, the structure of UD sheet, shooting angle and resin modification on the ballistic properties were discussed. The final fracture morphologies were observed by the stereomicroscopy. The failure mechanisms of composite target subjected to the ballistic impact were analyzed. The results show that para-aromatic polyamide fiber/EP composite exhibits excellent bulletproof performance. As the increasing of single-layer fiber areal density, the bulletproof performance of composite increases with fluctuations. Moreover, the bulletproof performances of 4 layer sheets with 0°/90°/0°/90° layer sequence(4UD) structures are superior to those of 2 layer sheets with 0°/90° layer sequence(2UD) structures. When shooting with a angle, the higher penetration layer ratio and smaller back face sign-ature (BFS) ratio are found. PVB improves the bulletproof performance. It can be concluded that the energy absorptions are significantly influenced by the tensile deformation of fiber, the delamination of sheet and the matrix resin cracking.

Keywords: para-aromatic polyamide fiber; epoxy resin (EP); toughening modification; unidirectional (UD) structure; failure mechanism

收稿日期: 2018-09-20; 录用日期: 2018-11-23; 网络出版时间: 2018-12-21 14:02

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181218.005>

通讯作者: 周庆, 博士, 研究方向为防弹复合材料的研究和开发 E-mail: johnnyzhou@chn-protech.com

引用格式: 周庆, 何业茂, 刘婷. 对位芳香族聚酰胺纤维/环氧树脂复合材料防弹性能及其破坏机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2235-2246.

ZHOU Q, HE Y M, LIU T. Bulletproof properties and failure mechanism of para-aromatic polyamide fiber/epoxy resin composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica. 2019, 36(10): 2235-2246 (in Chinese).

随着科学技术的发展,防弹材料经历了多次的更新换代,从金属材料到陶瓷材料,再到高性能纤维/树脂复合材料,从单纯的合成材料到多种材料的复合体系,防弹材料的发展主题始终围绕着轻量化^[1],即在保证防弹性能的前提下,追求轻量化,以减轻装配者的负重,提高装配者的机动性。高性能纤维/树脂复合材料是以纤维作为增强材料,以树脂为基体制备的一种先进复合材料,具有密度低、比吸收能高、比强度和比模量大的优点^[2],是实现轻量化不可或缺的一种防弹材料。因此,开展对高性能纤维/树脂复合材料防弹性能及其破坏机制的研究^[3-5]具有十分重要的意义。SABET 等^[6]研究了高强玻璃纤维/聚酯复合材料靶板的防弹性能及其破坏机制,研究结果显示正交单向(UD)结构的复合材料靶板具有更好的防弹性能,复合材料靶板主要的破坏方式有纤维剪切和拉伸、纤维抽拔和分层;NGUYEN 等^[7]和 LANGSTON^[8]分别研究了超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维复合材料靶板的防弹性能及其破坏机制,前者通过高速摄像机拍摄弹丸侵彻靶板过程并采用扫描电镜观察弹孔剖面分析靶板被弹丸侵彻后的破坏机制,后者基于理论模型预测复合材料靶板的防弹性能,并指出靶板主要的吸能方式有纤维拉伸断裂、分层和基体碎裂;TIRILLO 等^[9]研究了碳纤维-玄武岩纤维/环氧树脂(EP)复合材料的防弹性能,由于玄武岩纤维比碳纤维具有更好的韧性,将玄武岩纤维加入碳纤维/EP 复合材料,可提高碳纤维/EP 复合材料的弹道极限速度。

对位芳香族聚酰胺纤维是目前在防弹领域应用最广泛的高性能有机纤维之一,其高分子主链是由酰胺键对位连接在芳香环上的线性高聚物,如图 1 所示,分子链中的苯环和分子间的氢键作用使分子链难以旋转,分子链不能折叠,呈伸展的刚性棒状结构^[10],分子链之间排列紧密,因此纤维具有很高的模量和强度,具有优异的防弹性能。FANG 等^[11]和 MCKEE 等^[12]通过结合弹击实验和有限元模拟的方法,分别研究了 Kevlar 机织物和 Kevlar 针织物的防弹性能及其耗能机制;GURGEN 等^[13]

和 MAJUMDAR 等^[14]研究了芳纶织物/剪切增稠溶液(STF)复合材料的防弹性能,发现芳纶织物浸渍 STF 后能显著提高其防弹性能,并认为芳纶织物/STF 复合材料是一种防弹性能优异的软质防弹衣材料,且前者通过材料微观形貌观察认为 STF 通过增加芳纶织物内纱线之间的摩擦力来提升其防弹性能;PALTA 等^[15]将对位芳纶纤维复合材料与防弹钢板组合制备混杂装甲板,相比纯钢板装甲板,其防弹性能显著提升,并且减重 26%。

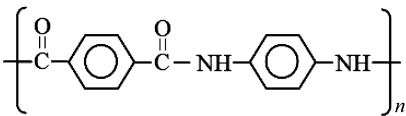


图 1 对位芳香族聚酰胺纤维分子结构
Fig. 1 Molecular structure of para-aromatic polyamide fiber

基于 UD 结构优异的防弹性能和制备工艺的易操作性,本文以对位芳香族聚酰胺纤维为增强纤维,EP 为基体树脂,纳米 SiO₂ 和聚乙烯醇缩丁醛(PVB)为树脂改性剂,通过热压工艺制备 UD 结构的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片。通过弹击实验研究对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片的防弹性能,研究单层纤维面密度、纤维单丝的排列方式、树脂增韧改性和射击角度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片防弹性能的影响;通过观察靶片各层弹孔表面形貌和靶片的微观破坏形貌,分析对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片在铅芯弹侵彻下的破坏机制。

1 实验材料和方法

1.1 原材料

对位芳香族聚酰胺纤维,杜邦公司,纤维性能如表 1 所示。EP,中蓝晨光化工研究设计院有限公司;纳米 SiO₂(平均粒径 20 nm,≥99.9%,比表面积 640 m²/g),浙江舟山明日纳米材料有限公司;PVB(平均粒径 20 nm,≥97.9%),广州雁林化工有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 制备 UD 结构的复合材料片材

使用纤维缠绕成型机 CR-1 制备单 UD 片材。

表 1 对位芳香族聚酰胺纤维性能参数
Table 1 Properties parameters of para-aromatic polyamide fiber

Types	Liner density/tex	Fiber strength/GPa	Fiber modulus/GPa	Density/(g·cm ⁻³)
Para-aromatic polyamide fiber	166.67	3.05	123.48	1.44

其原理是利用压辊将浸过基体树脂的纤维束均匀的铺展开, 在压辊的挤压作用下, 树脂均匀铺展在纤维表面并且部分树脂浸润到纤维单丝之间, 将均匀铺展的纤维束连成一个整体, 形成单 UD 片材。

将两层或四层单 UD 片材按照 0°/90° 或 0°/90°/0°/90°正交方式交叉铺层, 在一定的复合工艺条件下, 通过复合设备复合为一个整体, 制成 2UD 或 4UD 结构片材。

对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料表面形貌和微观形貌如图 2 所示, 其 UD 结构片材参数如表 3 所示, 样品靶片的参数如表 4 所示。由图 2 的微观形貌和表 3 的体积分数可知, UD 结构片材中纤维单丝之间存在空隙, 即在对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料中, 基体树脂不呈连续相的

特征^[16]。

1. 2. 2 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片防弹性能测试

参照 NIJ Standard-0101. 04^[17]测试对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片的防弹性能, 弹击试验选用 9 mm 乌兹冲锋枪, 配 9 mm×19 mm Parabellum 子弹, 弹击实验参数如表 5 所示。因为弹击实验所用的弹丸为全金属披甲圆头弹, 内部为铅芯, 外表面为铜合金, 所以弹丸在侵彻复合材料靶片时会被芯粗变形、甚至碎裂, 9 mm 弹丸形貌如图 3 所示。

1. 2. 3 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料形貌观察

使用扫描电子显微镜 TM3000(日立高新技术

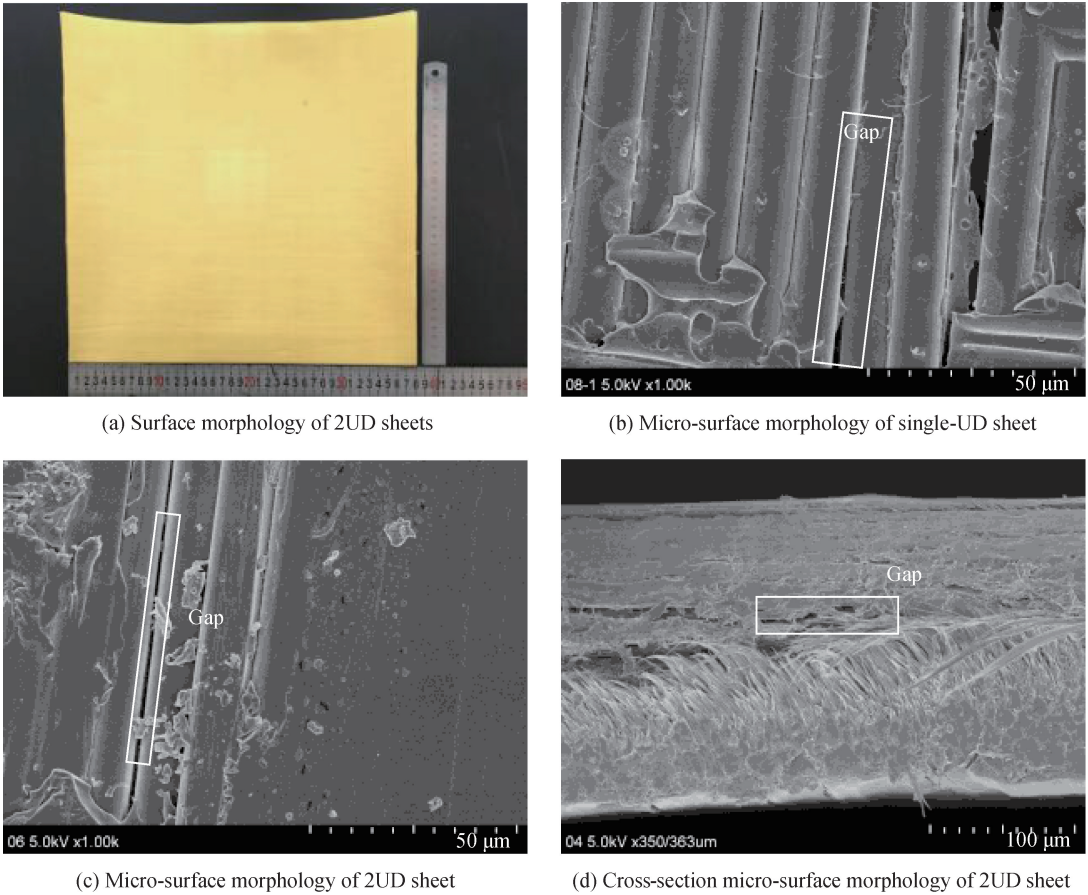


图 2 单向(UD)结构的对位芳香族聚酰胺纤维/环氧树脂(EP)复合材料表面形貌和微观形貌
Fig.2 Morphologies of unidirectional(UD) structure para-aromatic polyamide fiber/epoxy resin(EP) composite

表 2 实验用试剂
Table 2 Reagents of experiment

Types	Chemical formula	Standard	Note
Carbinol	CH ₃ CH ₂ OH	AP	Diluents of epoxy resin
EP-b	—	AP	Curing agent of epoxy resin

表 3 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 UD 结构片材参数

Table 3 Parameters of UD sheets of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

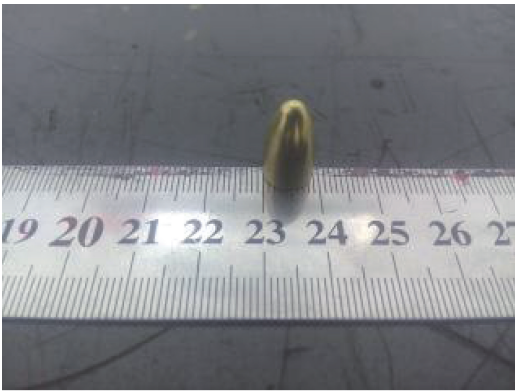
No.	Fiber	Resin system	Structure	Fiber areal density/ (g·m ⁻²)	Fiber volume fraction/ vol%	Resin volume fraction/ vol%	Thickness/ mm	Fiber mass fraction/ wt%
1 [#]	Para-aromatic polyamide fiber	EP	2UD	158	49.3	13.7	0.223	78±3
2 [#]				185	51.3	17.4	0.250	
3 [#]				203	51.7	16.9	0.273	
4 [#]				230	52.4	19.1	0.305	
5 [#]				255	52.0	16.9	0.341	
6 [#]		SiO ₂ /EP	4UD	316	46.8	16.3	0.469	
7 [#]			2UD	203	56.4	19.0	0.250	
8 [#]				203	49.3	19.4	0.286	

表 4 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片参数

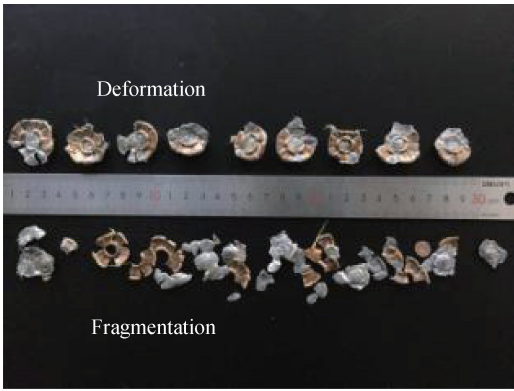
Table 4 Parameters of para-aromatic polyamide fiber/EP composite target

No. of target	UD sheet	Layers	Areal density/(kg·m ⁻²)	Sizes/mm	Test bullet
1	1 [#]	31	6.2±0.1	380×380	9 mm FMJ RN(Lead)
2	2 [#]	26			
3	3 [#]	24			
4	4 [#]	21			
5	5 [#]	19			
6	6 [#]	15			
7	7 [#]	24			
8	8 [#]	24			

Note: FMJ RN is the abbreviation for full metal jacket round nose.



(a) Before test



(b) Stopped by composite target

图 3 9 mm 弹丸形貌

Fig. 3 Bullet morphology of 9 mm full metal jacket round nose

表 5 弹击实验参数

Table 5 Parameters of ballistic test

Standard	Test bullet	Bullet weight/g	Velocity/ (m·s ⁻¹)	Shots per panel	Shots angle	Maximum BFS/mm
NIJ Standard-0101.04 IIIA	9 mm FMJ RN(Lead)	8.0	436±9	6	0°; 0°; 0°; +30°; -30°; 0°	44

Note: BFS—Back face signature.

公司)观察弹击实验后对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料的表面微观形貌。基于形貌观察,分析对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料被铅芯弹侵彻后的破坏机制。

2 结果与分析

2.1 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片的防弹性能

针对确定防护级别的研发实验,可以通过弹击

实验检测样品的防弹性能, 计算弹击实验后靶片的穿透比率和测量背衬凹陷深度 (Back face signature, BFS) 来比较靶片的防弹性能, 要求在有效防住弹丸侵彻的前提下, BSF 在合理值范围内。即在有效防住弹丸穿透伤害的同时, 还需要考虑弹丸冲击带来的非穿透性弹道损伤^[18]。表 6 为弹击实验后靶片的穿透层数比率和 BSF 值比率。可知, 制备的靶片样品中, 有四组靶片未发生完全穿透, 且 BSF 值都在标准规定值范围内。其中, 在有效防住弹丸侵彻的前提下, 第八组靶片的未穿透材料的余量为 70.83%, 抗穿透性能最佳; 第三组靶片抗凹陷性能最佳, 其最大 BSF 值仅为标准规定最大值的 35.68%, 说明对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料具有优异的防弹性能。

2.2 单层纤维面密度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

图 4 为单层纤维面密度对对位芳香族聚酰胺纤

维/EP 复合材料抗弹丸穿透性能的影响。图 4(a)和图 4(b)分别表明了靶片平均穿透率和最大单发穿透率随单层纤维面密度增大的变化情况。由图 4(a)可知, 对于树脂体系相同、靶片面密度和纤维质量含量相近的靶片样品, 随着单层纤维面密度的增大, 靶片的防弹性能呈现整体上升、局部区域上下波动的变化趋势, 这是由 UD 片材中单层纤维面密度的变化引起靶片层数的变化导致的。由表 4 可知, 随着 UD 片材中单层纤维面密度的增加, 其对应靶片的层数逐渐减少。对于靶片面密度和纤维质量含量相近的复合材料靶片, 其防弹性能同时受到单层面密度和靶片层数的影响, 且始终共同存在, 存在一种相互调节机制。

当 UD 片材单层纤维面密度增大时, 片材单位面积内纤维单丝的排列更加紧密, 单丝之间的协同效应得到提升, 同时单层 UD 片材的厚度增加, 如表 3 所示, 单层中起防护作用的纤维量增加, 从而

表 6 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片测试结果

Table 6 Test results of para-aromatic polyamide fiber/EP composite target

No. of target	Penetration layer ratio/%						BFS ratio/%					
	0°	0°	0°	+30°	−30°	0°	0°	0°	0°	+30°	−30°	0°
1	100	40.63	100	34.38	100	100	100	43.40	100	25.00	100	100
2	19.23	26.92	38.46	100	65.38	61.54	29.78	42.50	30.91	100	29.91	27.05
3	29.17	41.67	29.17	33.33	37.50	37.50	31.36	28.64	35.68	25.68	21.82	20.09
4	14.29	23.81	14.29	100	100	100	19.32	30.91	35.68	100	100	100
5	21.05	26.32	15.79	15.79	36.84	36.84	42.27	33.41	43.41	7.95	20.23	12.05
6	26.67	46.67	33.33	46.67	33.33	40.00	22.27	37.27	17.05	30.45	19.55	26.82
7	33.33	100	100	100	100	100	25.23	100	100	100	100	100
8	29.17	16.67	16.67	29.17	29.17	29.17	29.77	29.09	37.50	19.77	21.82	25.68

Note: 100% represents complete penetration.

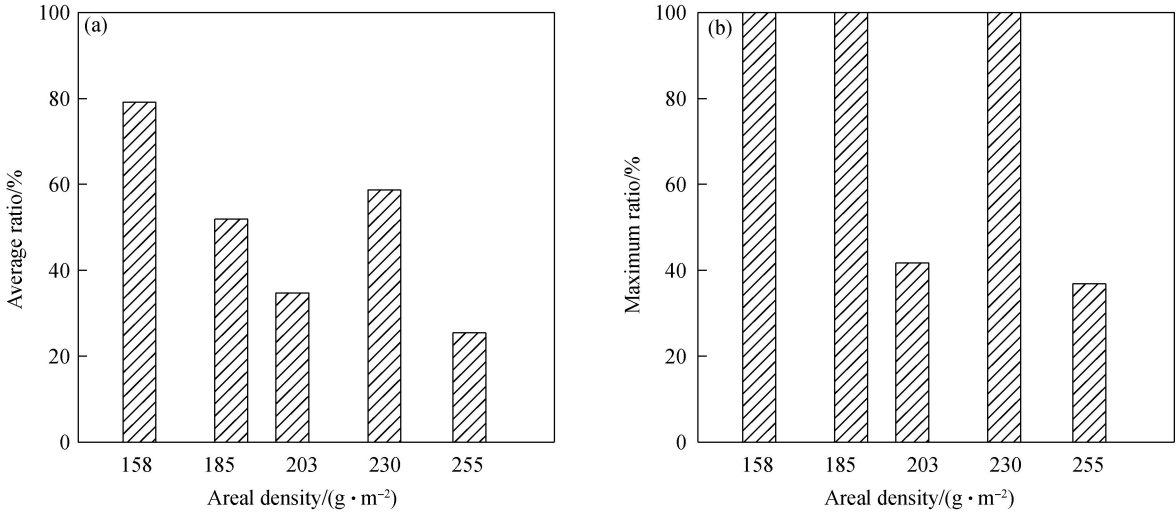


图 4 单层纤维面密度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

Fig. 4 Effect of single-layer fiber areal density on ballistic performance of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

导致单 UD 片材的防弹性能得到提高。与此同时，靶片层数的减少降低了靶片整体片材的协同效应^[11]，进而降低了靶片的防弹性能。这两种作用机制的同时发生导致随着单层纤维面密度的增大，对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片的防弹性能呈现整体上升、局部波动的变化趋势。图4(b)为靶片的最大单发穿透率。可知，存在两组完全防住弹丸侵彻的靶片。由图 4(a)可知，在单层纤维面密度变化初期，随着单层纤维面密度增大，靶片的防弹性能从完全穿透向完全防住转变，这说明在此变化区域，单层纤维面密度的增大导致靶片防弹性能提高的效应占主导因素，因此靶片的防弹性能得到了显著提高；单层纤维面密度增大的同时，靶片的层数同步减少，当靶片层数减少了 32%时，靶片又出现了完全穿透的现象，说明此时层数减少导致靶片防弹性能下降的效应占主导因素；随后单层纤维面密度继续增大，又重复出现完全防住的现象。图 5 为未穿透靶片背衬材料凹陷值的平均比率和最大单发比率。可知，单层纤维面密度为 203 g/m² 和 255 g/m² 的靶片在有效防住弹丸穿透的同时，其 BSF 值都在标准规定值的范围内。但是，随着单层纤维面密度的增大，靶片的柔软度随之下降，此时靶片具有较差的服用性能。因此，综合考虑材料的防弹性能和服用性能，单层纤维面密度为 203 g/m² 的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料更适合用作软质防弹复合材料。

2.3 结构和射击角度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

图 6 为 UD 片材结构对靶片防弹性能的影响。

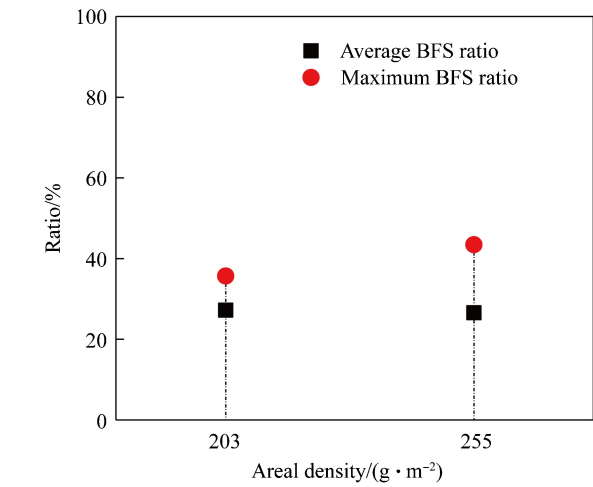
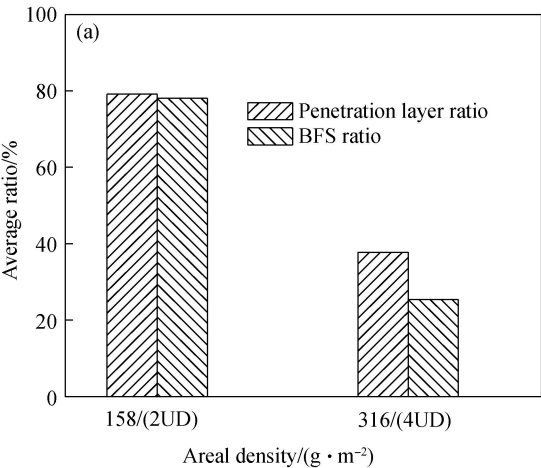


图 5 未穿透对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料的 BFS 比率
Fig. 5 BFS ratio of non-penetrating para-aromatic polyamide fiber/EP composite

单层纤维面密度为 158 g/m² 的片材为 2UD 结构，单层纤维面密度为 316 g/m² 的片材为 4UD 结构，结构如图 7 所示。图 6(a)和图 6(b)分别表明了靶片平均穿透率和最大单发穿透率与 UD 片材结构之间的关系。由图 6 可知，对于树脂体系相同、靶片面密度和纤维质量含量相近的靶片，2UD 结构的靶片发生了完全穿透现象，4UD 结构的靶片在有效防住弹丸穿透的同时，其 BSF 值也在标准规定值范围内。

4UD 结构的防弹性能优于 2UD 结构的防弹性能，主要是由片材之间协同效应增强导致的。图 8 为相邻两层 2UD 结构片材和一层 4UD 结构片材弹击试验后的表面形貌，对比图 8(a)和图 8(b)弹着点处破坏形貌可知，相邻的两层 2UD 结构片材各

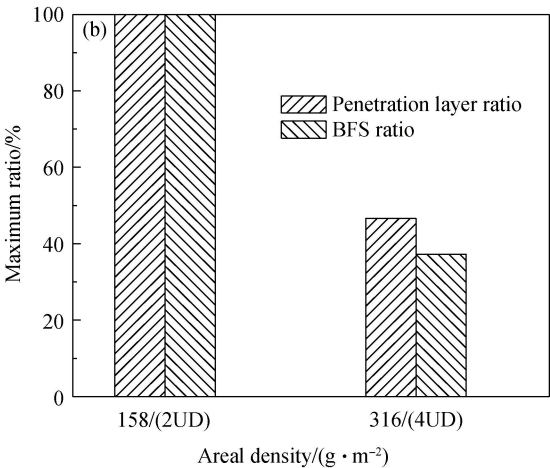


图 6 UD 片材结构对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

Fig. 6 Effect of structure of UD sheet on ballistic performance of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

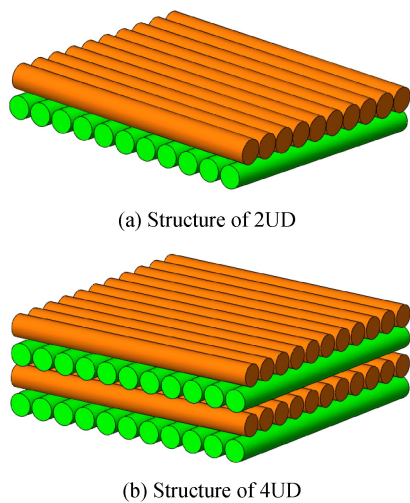


图 7 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料单层 UD 片材结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of single-layer UD sheet structure of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

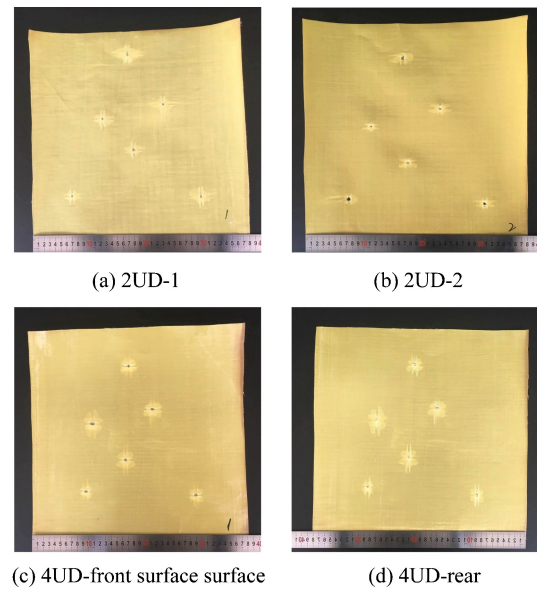


图 8 弹击试验后对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 UD 结构片材表面形貌
Fig. 8 Surface morphology of UD structure sheets of para-aromatic polyamide fiber/EP composite after ballistic impact

弹着点处的破坏形貌相差较大, 表明片材并非同时被弹丸破坏, 协同效应较差; 由图 8(c)和图 8(d)可知, 4UD 片材中的两层 2UD 片材紧密贴合, 受弹丸冲击时, 同时被弹丸破坏, 破坏形貌吻合较好, 具有较好的协同效应。

侵彻体接触并侵彻纤维/树脂复合材料时, 侵彻体携带的动能以冲击波的形式作用于纤维/树脂

复合材料, 冲击波以脉冲的形式在片材中传播, 片材中的纤维在冲击波作用下拉伸变形甚至断裂^[19]。图 9 为 4UD 片材抗弹丸侵彻机制示意图。4UD 片材中的两层 2UD 纤维层在基体树脂作用下紧密粘合在一起, 在弹丸侵彻作用下同时拉伸变形, 共同抵抗弹丸的侵彻作用, 协同效应好, 抗侵彻性能好。图 10 为 2UD 结构片材抗弹丸侵彻机制示意图。受到弹丸冲击时, 由于热固性 EP 的变形能力相对较弱, 还会限制纤维的拉伸变形, 导致相邻 2UD 片材尚未贴合并共同抵抗弹丸侵彻时, 第一层 2UD 结构片材已经被完全穿透, 随后穿透第二层 2UD 结构片材, 因此, 相邻的 2UD 结构片材的协同效用相对较弱, 防弹性能相对较差。

图 11 为表 6 中四组完全防住弹丸侵彻的靶片样品在不同射击角度下的测试结果, 体现了弹击实验过程中射击角度对靶片防弹性能的影响。可知, 在有效防住弹丸侵彻的前提下, 角度射击时, 靶片

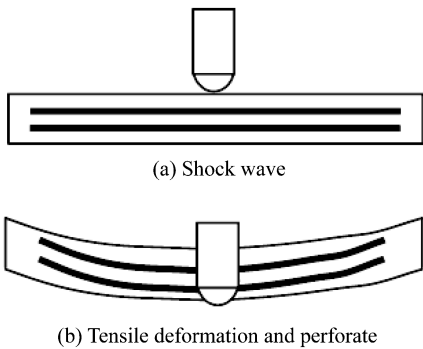


图 9 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 4UD 结构片材的侵彻机制
Fig. 9 Penetration mechanism of 4UD structure sheet of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

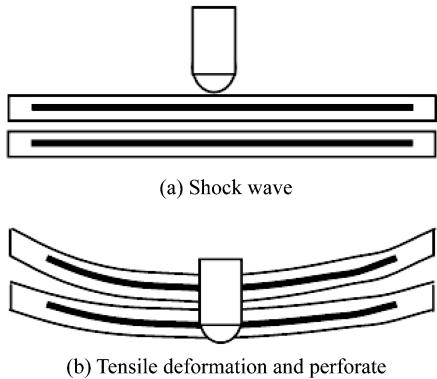


图 10 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 2UD 结构片材的侵彻机制
Fig. 10 Penetration mechanism of 2UD structure sheet of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

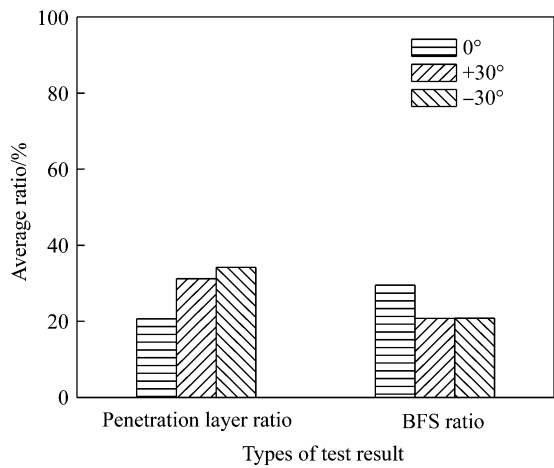


图 11 射击角度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

Fig. 11 Effect of shooting angle on ballistic performance of para-aromatic polyamide fiber/EP composite

的穿透比率更大，BSF 值比率更小。

当靶片受到弹丸角度侵彻时，弹丸会沿着片材表面进行滑动^[1]，UD 结构中纤维之间无交织和片

材内部树脂基体呈非连续相的特性，导致片材中纤维出现脱粘、滑移现象，降低了发挥防护作用的纤维承载量，使弹丸更容易穿透靶片。同时，弹丸沿片材表面的滑动，扩大冲击波的分散区域，使冲击波耗散更快，传递到背弹面的冲击波强度相对较小，从而导致 BSF 值减小。如图 12 所示，在弹丸停留层，角度射击后片材的破坏面积大于 0°射击后片材的破坏面积，这是由于弹丸在片材表面滑行导致的，角度射击的弹丸停留在偏离迎弹面入射口的区域。

2.4 树脂改性对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响

热固性树脂致密的交联网络结构赋予了其优异的力学性能、耐热性、耐环境稳定性和尺寸稳定性等，同时伴随着固化后质脆、耐冲击性能差等缺点^[20]，一定程度上限制了其在防弹材料领域的应用。目前，可通过在热固性树脂中添加橡胶类颗粒、刚性粒子、热塑性树脂等方法^[21]来提升热固性树脂的韧性，进而提高其防弹性能。本文采用纳米

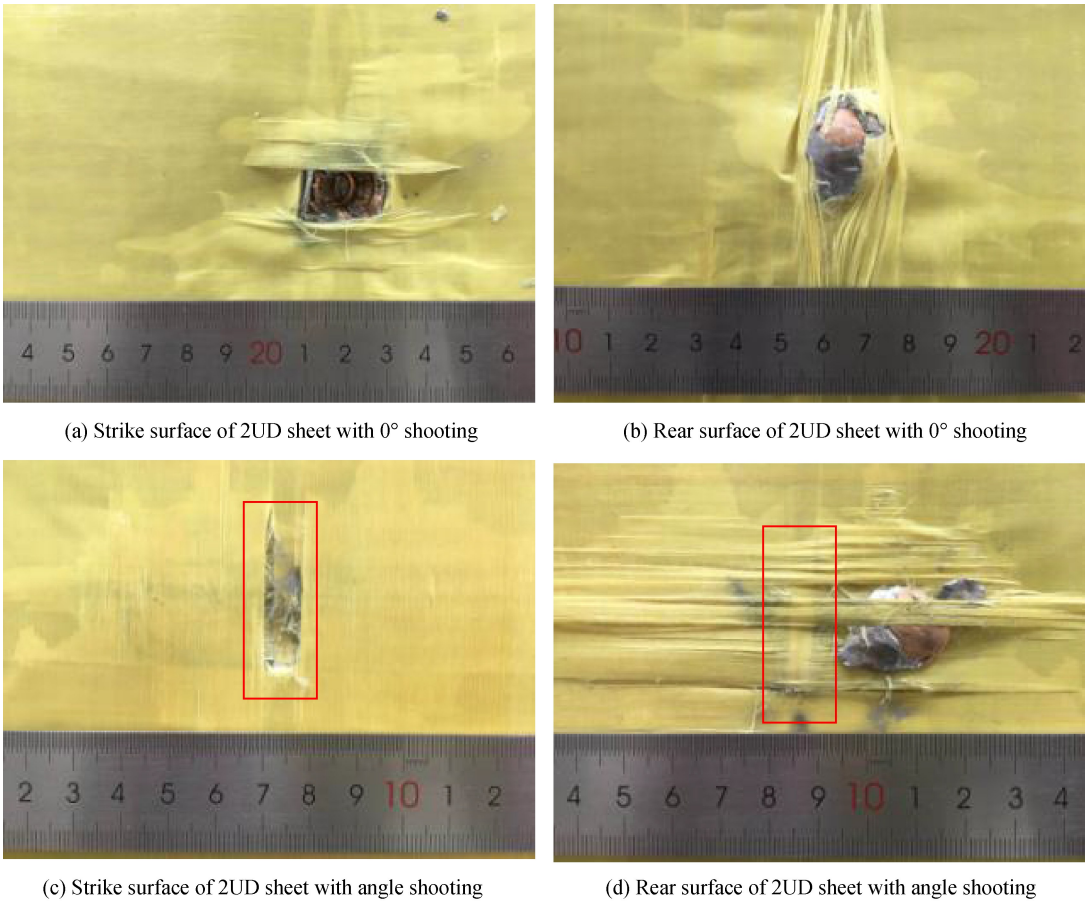


图 12 射击角度对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料弹丸停留层表面形态的影响

Fig. 12 Effect of shooting angle on sheet surface morphology of para-aromatic polyamide fiber/EP composite with stopped bullet

SiO₂ 粒子和聚乙烯醇缩丁醛(PVB)对 EP 进行外增韧改性。图 13 为树脂增韧改性对靶片防弹性能的影响。由图 13(a)可知, 纳米 SiO₂ 粒子增韧改性的靶片受弹丸冲击时发生完全穿透的现象, 靶片防弹性能明显下降; PVB 增韧改性的靶片受弹丸冲击时有效防住弹丸的侵彻, 并且相比纯 EP 树脂基的靶片, 具有更好的抗穿透性能, 靶片的防弹性能得到显著提高。由图 13(b)可知, EP 树脂体系和 EP/PVB 树脂体系的靶片在有效防住弹丸侵彻后, 其 BSF 值相近且都在标准规定值范围内。

这是由两种改性剂的作用机制不同导致的, 纳米 SiO₂ 粒子属于无机物, 以颗粒状分散在 EP 体系中, 其作用机制是基于银纹理论^[22]抑制裂纹的扩张而起到增韧作用; PVB 是一种耐冲击性能优异的热塑性树脂, 其以连续的形态贯穿于 EP 中形成互穿网络结构, 从而形成物理上的两相结构: 一相是 EP 高密度的三维交联网络结构, 另一相是 PVB

分子结构杂乱无章的贯穿分布, 其作用机制是基于桥联-裂纹钉锚作用^[23]来约束树脂裂纹扩张而起到增韧作用。图 14 为不同树脂体系的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 UD 结构片材表面微观形貌。由于制备的 UD 结构片材中的树脂呈非连续相分布, 主要分布在片材表面和纤维单丝表面, 纤维单丝之间存在空隙, 因此大部分纳米 SiO₂ 粒子不能均匀分布在 EP 中, 在树脂粘合作用下, 其以颗粒或团簇状分布在纤维表面, 如图 14(b)所示, 其不但无法起到增韧树脂的作用, 还会导致纤维表面在弹丸侵彻作用下产生应力集中, 加速纤维的断裂, 减少了纤维断裂破坏吸收的能量, 进而降低了靶片的防弹性能。PVB 可以通过稀释剂与 EP 均匀共混, 如图 14(c)所示, 形成互穿网络结构, 不受片材内部空隙的影响, 依旧能起到增韧树脂的作用, 提高了 EP 的韧性和断裂延伸性, 最大限度的提高 EP 与纤维的断裂同时性, 使树脂自身消耗冲击波

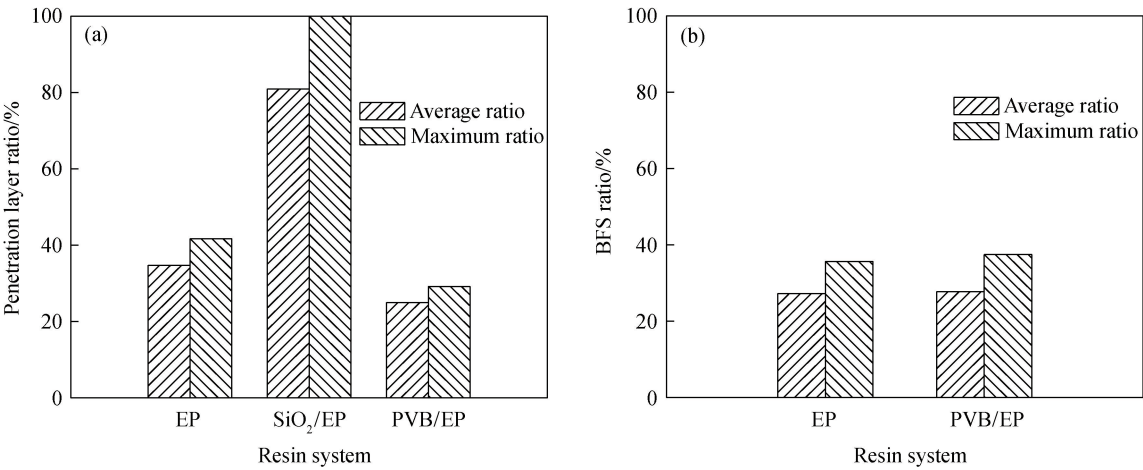


图 13 树脂改性对对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料防弹性能的影响(单层纤维面密度为 203 g/m²)
Fig. 13 Effect of resin modification on ballistic performance of para-aromatic polyamide fiber/EP composite
(Single-layer fiber areal density is 203 g/m²)

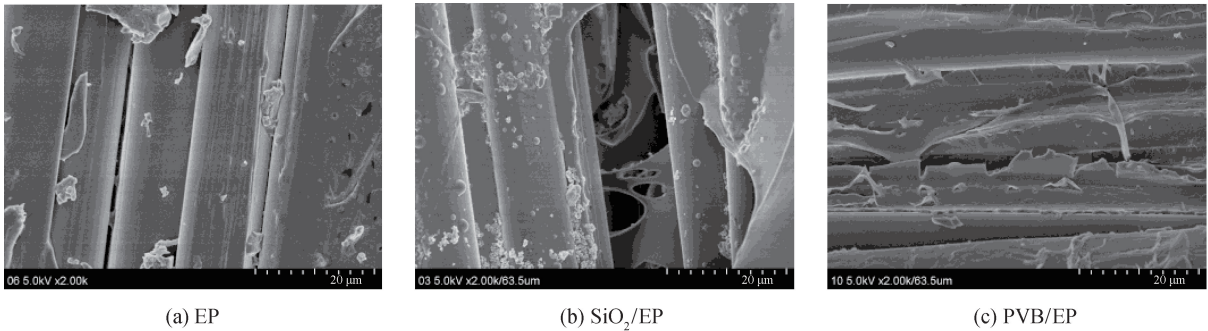


图 14 不同树脂体系的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料 UD 结构片材表面微观形貌
Fig. 14 Micro-surface morphologies of UD structure sheet of para-aromatic polyamide fiber/EP composite
with different resin systems

能量的同时还能使纤维充分变形耗能,进而提高其防弹性能。

3 基于弹击后靶片形貌分析复合材料靶片的破坏机制

图 15 和图 16 分别为对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片弹击实验后各层迎弹面和背弹面表面形貌。可知,从弹丸开始侵彻靶片到最后被靶片捕获,弹孔直径和被破坏面积逐渐增大,这是由于在弹丸侵彻靶片的过程中,弹丸被芯粗变形、甚至碎裂,弹丸与靶片每层的接触面积逐渐增加,从而导致靶片每层的弹孔直径逐渐增大;靶片每层的破坏主要集中在弹着点附近,出现明显的分层现象和纤维拉伸变形破坏,并且分层现象贯穿弹丸侵彻靶片的整个过程。如图 15(e)和图16(e)所示,靶片内部发生剪切破坏现象,这是由于变形后的弹丸会带有锋利的刃口,其切割靶片从而导致片材的剪切破坏。由图 15(f)可知,破碎后的弹丸被复合材料靶片完全捕获,有效防止了弹丸破碎后造成的二次伤害。

图 17 为弹击实验后靶片中弹着点附近的微观形貌。由图 17(a)可知,在弹丸侵彻的作用下,基体树脂发生了碎裂;由图 17(b)可以看到,对位芳香族聚酰胺纤维出现颈缩现象,即纤维被拉伸变形

和变形后的断裂破坏;由图 17(c)可知,在弹丸冲击作用下,对位芳香族聚酰胺纤维发生拉伸变形的同时,还存在劈叉、分裂现象,这是由于对位芳香族聚酰胺纤维分子结构是由无数刚性伸直链通过范德华力和氢键连接在一起而形成的刚性棒状结构,受到弹丸冲击时,刚性伸直链受到的外力大于其连接力时,刚性棒状结构散开成无数刚性伸直链,即纤维原纤化现象^[24]。

综上,对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片受铅芯弹侵彻时的破坏机制主要为基体树脂碎裂、分层、纤维拉伸变形和断裂破坏、纤维剪切破坏、弹丸变形和碎裂,其中纤维拉伸变形、分层和基体树脂碎裂是消耗弹丸动能的主要方式。

4 结 论

(1) 对位芳香族聚酰胺纤维/环氧树脂(EP)复合材料具有优异的防弹性能,当靶片面密度为 (6.1 ± 0.2) kg/m² 时,其能够通过 NIJ Standard-0101.04 IIIA 级别弹道测试。在有效防住弹丸侵彻的前提下,其抗穿透性能最佳的靶片的未穿透材料比率为 70.83%;其抗凹陷性能最佳的靶片的最大背衬凹陷深度(BSF)值为标准规定最大值的 35.68%。

(2) 对于树脂体系相同、靶片面密度和纤维质量含量相近的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料,随着单层纤维面密度的增大,靶片的防弹性能

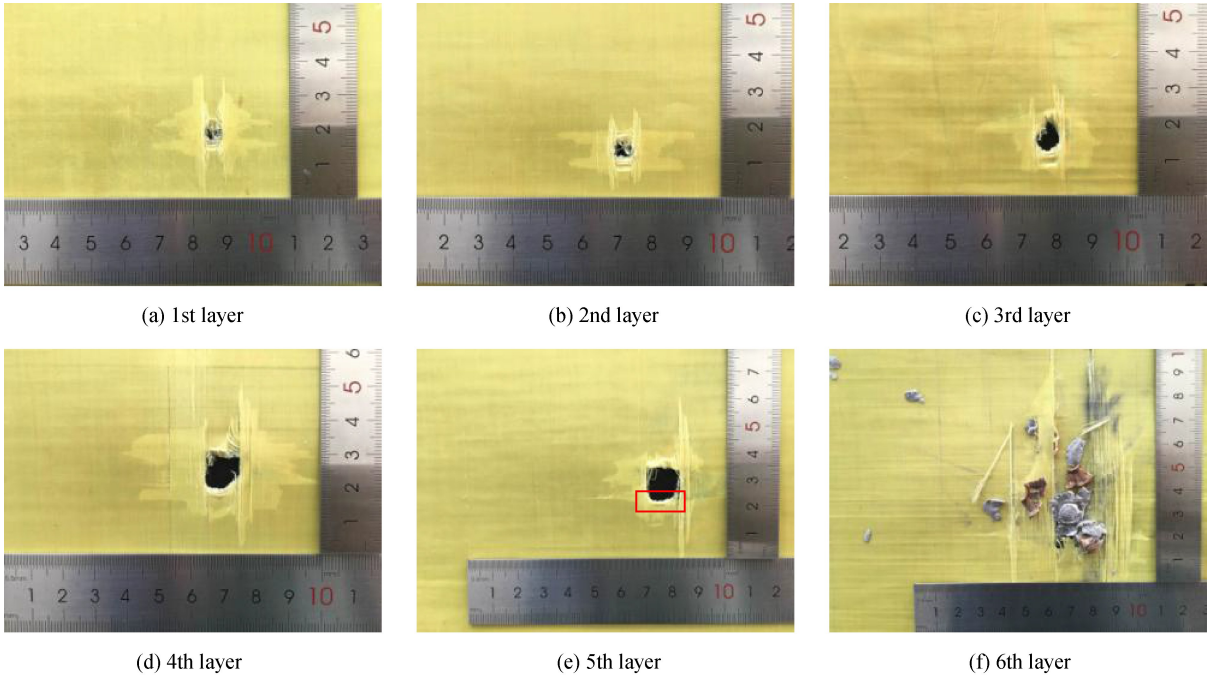


图 15 第四组对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片第二发各层弹击实验后迎弹面表面形貌
Fig. 15 Strike surface morphologies of each layer of the second shooting in the No. 4 para-aromatic polyamide fiber/EP composite target after ballistic test

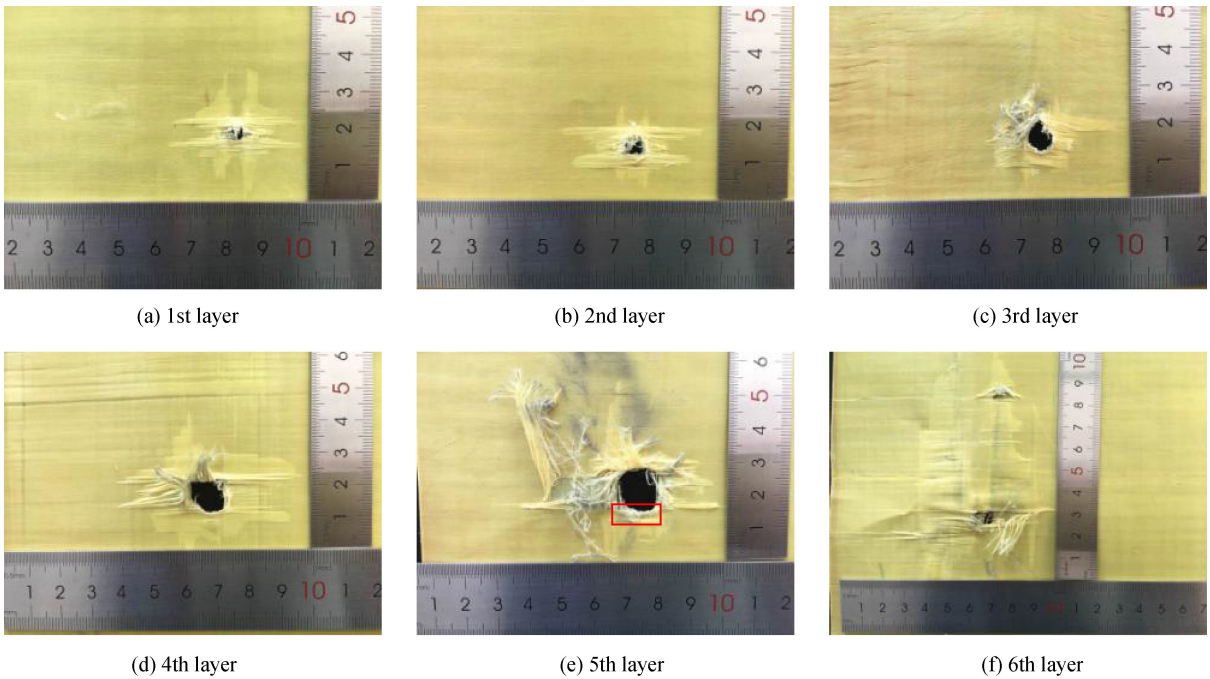


图 16 第四组对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片第二发各层弹击实验后背面表面形态

Fig. 16 Rear surface morphologies of each layer of the second shooting in the No. 4 para-aromatic polyamide fiber/EP composite target after ballistic test

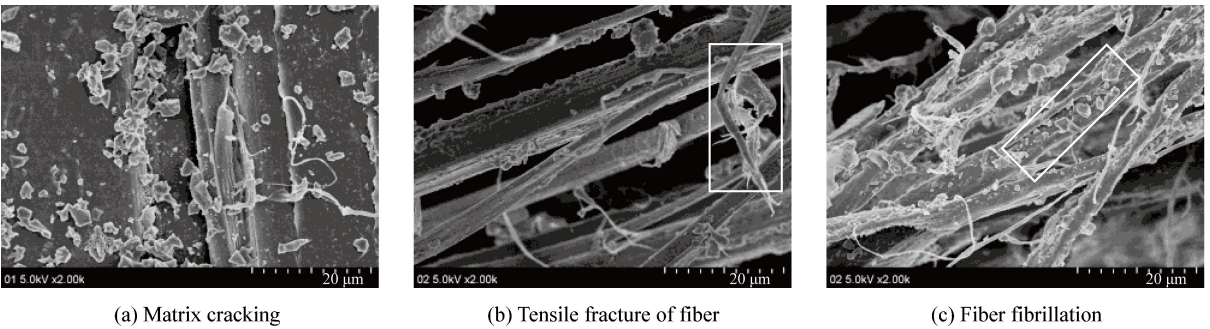


图 17 弹击实验后对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料微观形貌

Fig. 17 Micro-surface morphologies of para-aromatic polyamide fiber/EP composite after ballistic test

呈现整体上升、局部上下波动的变化趋势。综合材料的防弹性能和服用性能，单层纤维面密度为 203 g/m^2 的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料更适合用作软质防弹复合材料。

(3) 对于对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料，铺层方式为 $0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ$ 的四层单 UD 片材(4UD)结构的防弹性能优于铺层方式为 $0^\circ/90^\circ$ 的两层单 UD 片材(2UD)结构，主要是由片材之间协同效应增强导致。

(4) 在有效防住弹丸侵彻的前提下，角度射击时，对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片的穿透比率更大，BSF 值比率更小。

(5) 对于树脂体系呈非连续相分布的 UD 结构的对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料，纳米 SiO_2 粒子增韧改性 EP 降低了靶片的防弹性能，聚乙烯醇缩丁醛(PVB)增韧改性 EP 提升了靶片的防弹性能。

(6) 对位芳香族聚酰胺纤维/EP 复合材料靶片受到铅芯弹侵彻时，复合材料靶片的破坏机制主要为基体树脂碎裂、分层、纤维拉伸变形和断裂破坏、纤维剪切破坏、弹丸变形和碎裂，其中纤维拉伸变形、分层和基体树脂碎裂是消耗弹丸动能的主要方式。

参考文献:

[1] BILISIK K. Impact-resistant fabrics (ballistic/stabbing/

- slashing/spike)[J]. *Engineering of High-Performance Textiles*, 2018, 16: 377-434.
- [2] ASHOK B. Lightweight fiber-reinforced composites for ballistic applications[J]. *Comprehensive Composite Materials II*, 2018, 3: 527-544.
- [3] ANDY V, ANDY S, JAMES D, et al. An experimental investigation into the high velocity impact responses of S2-glass/SC15 epoxy composite panels with a gas gun[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 244-254.
- [4] REDDY P R S, REDDY T S, MADHU V, et al. Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact[J]. *Materials and Design*, 2015, 84: 79-86.
- [5] ROSSO S D, LANNUCCI L, CURTIS P T. On the ballistic impact response of microbraid reinforced polymer composites[J]. *Composite Structures*, 2016, 137: 70-84.
- [6] SABET A, FAGIH N, BEHESHTY M H. Effect of reinforcement type on high velocity impact response of GRP plates using a sharp tip projectile[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38: 715-722.
- [7] NGUYEN L H, RYAN S, CIMPOERU S J, et al. The effect of target thickness on the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene composite[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 75: 174-183.
- [8] LANGSTON T. An analytical model for the ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 179: 245-257.
- [9] TIRILLO J, FERRANTE L, SARASINI F, et al. High velocity impact behavior of hybrid basalt-carbon/epoxy composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 305-312.
- [10] 孙晋良, 吕伟元. 纤维新材料[M]. 上海: 上海大学出版社, 2007: 76-77.
- SUN Jinliang, LV Weiyuan. *New fiber material*[M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2007: 76-77 (in Chinese).
- [11] FANG H B, GUTOWSKI M, DISOGRA M, et al. A numerical and experimental study of woven fabric material under ballistic impacts[J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, 96: 14-28.
- [12] MCKEE P J, SOKOLOW A C, YU J H, et al. Finite element simulation of ballistic impact on single jersey knit fabric[J]. *Composite Structures*, 2017, 162: 98-107.
- [13] GURGEN S, KUSHAN M C. The ballistic performance of aramid based fabrics impregnated with multiphase shear thickening fluids[J]. *Polymer Testing*, 2017, 64: 296-306.
- [14] MAJUMDAR A, LAHA A, BHATTACHARJEE D, et al. Tuning the structure of 3D woven aramid fabrics reinforced with shear thickening fluid for developing soft body armor[J]. *Composite Structures*, 2017, 178: 415-425.
- [15] PALTA M, GUTOWSKI M, FANG H B. A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017: 1-16.
- [16] 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 interlaminar hybrid composite armor plate[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 837-847 (in Chinese).
- [17] National Institute of Standards and Technology. Ballistic resistance of personal body armor: NIJ standard—0101. 04 [S]. Washington: National Law Enforcement and Corrections Technology Center, 2004.
- [18] VARGAS-GONZALEZ L R, GURGANUS J C. Hybridized composited architecture for mitigation of non-penetrating ballistic trauma[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 295-306.
- [19] ZHANG B, NIAN X Z, JIN F N, et al. Failure analyses of flexible ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber reinforced anti-blast wall under explosion[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 759-774.
- [20] 董慧民, 益小苏, 安学锋, 等. 纤维增强热固性聚合物基复合材料层间增韧研究进展[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(2): 273-285.
- DONG Huimin, YI Xiaosu, AN Xuefeng, et al. Development of interleaved fiber-reinforced thermoset polymer matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(2): 273-285 (in Chinese).
- [21] LIU S H, WANG J, WANG Y P, et al. Improving the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene fiber reinforced composites using conch particles[J]. *Materials and Design*, 2010, 31: 1711-1715.
- [22] 赵宏, 邓安仲, 张静静, 等. 纳米 SiO₂ 增韧改性环氧乙烯基酯树脂的性能研[J]. *后勤工程学院学报*, 2014, 30(4): 49-54.
- ZHAO Hong, DENG Anzhong, ZHANG Jingjing, et al. Study on the properties of epoxy vinyl ester resin toughened and modified by Nano-SiO₂ [J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2014, 30(4): 49-54 (in Chinese).
- [23] LIN S P, HAN J L, YE H J T, et al. Composites of UHMWPE fiber reinforced PU/epoxy grafted interpenetrating polymer networks[J]. *European Polymer Journal*, 2007, 43: 996-1008.
- [24] 焦亚男, 何业茂, 周庆, 等. 纤维增强树脂基复合材料防弹性能影响因素及破坏机制[J]. *复合材料学报*, 2017, 34(9): 1960-1972.
- JIAO Ya'nan, HE Yemao, ZHOU Qing, et al. Influence factors on ballistic performance and failure mechanism of fiber reinforced resin matrix composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(9): 1960-1972 (in Chinese).