

全幅衬纬针织物/沙林树脂柔性复合材料 制备及弹道冲击性能

赵俊竹, 马丕波*

(江南大学 针织技术教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

摘要:为平衡防弹材料自重、灵活性、舒适性与防弹性能之间的关系,以芳纶纤维全幅衬纬针织物为增强体、沙林树脂为基体材料,制备3种不同规格的柔性防弹复合材料。为探究全幅衬纬针织物/沙林树脂复合材料的弹道侵彻性能,对其进行不同速度下的弹道冲击测试,并采用XCT断层扫描探究复合材料内部的损伤扩展情况,分析其损伤机理及失效模式。结果表明:3种全幅衬纬针织物/沙林树脂复合材料的弹道极限速度分别为365.31、339.76和338.29 m/s;且在弹丸冲击作用下,复合材料迎弹面倾向于发生剪切破坏,背弹面倾向于发生拉伸破坏,复合材料具体损伤模式受到弹丸入射速度的影响。研究结果验证了全幅衬纬针织物增强复合材料在防弹领域的应用潜力。

关键词:全幅衬纬针织物;沙林树脂;柔性防弹材料;损伤机理

中图分类号:TS 186.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2023)04-0283-07

Preparation and Ballistic Performance of Full-Width Weft Insertion Knitted Fabric/Surlyn Resin Flexible Composite Material

ZHAO Junzhu, MA Pibo*

(Engineering Research Center for Knitting Technology, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract:To balance the relationship between the weight, flexibility, comfort, and ballistic performance of bulletproof materials, three types of flexible bulletproof composite materials with different specifications were prepared using full-width weft insertion knitted fabric as reinforcement and Surlyn resin as matrix material. In order to investigate the ballistic penetration performance of full-width weft insertion knitted fabric/Surlyn resin composites, high velocity impact tests were conducted at different impact velocities. XCT scanning was used to explore the internal damage image of the composites, the damage mechanism and failure mode were comprehensively studied. The results show that the ballistic limit velocities of full-width weft insertion knitted fabric/Surlyn resin composites are 365.31 m/s, 339.76 m/s, and 338.29 m/s, respectively. Moreover, for the composites reinforced by weft insertion fabrics, the front layers tend to be destroyed in shear, while the back layers are more probably to fail in tension. Further, the specific damage modes of the composites are affected by the impact velocities of the projectile. It shows that the full-width weft insertion knitted fabric reinforced composites have tremendous application in the field of bulletproof.

Key words:full-width weft insertion knitted fabric, Surlyn resin, flexible bulletproof material, damage mechanism

收稿日期:2023-03-10; 修订日期:2023-04-17。

基金项目:国家自然科学基金项目(11972172);江苏省高等学校学术发展重点项目(PAP)。

作者简介:赵俊竹(1998—),女,硕士研究生。

*通信作者:马丕波(1984—),男,教授,博士生导师。主要研究方向为纺织结构材料设计与性能。

Email: mapibo@jiangnan.edu.cn

近代以来,科学技术发展日新月异,不同种类的杀伤性热兵器快速更新迭代^[1]。如何减少不必要的伤亡、避免枪支对人体的生命安全造成威胁,成为研究者关注的焦点。为了保护人体重要部位(如胸、腹、颈等),降低因弹头和碎片侵入人体骨骼、器官造成贯穿性及致命性的损伤,防弹材料的研发成为安全防护领域的重要课题。随着高性能纤维[对位芳香族聚酰胺(PPTA)纤维、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维、聚对苯撑苯并双噻唑(PBO)纤维等]合成技术的发展,防弹材料在轻量化、适体性方向有了突破性进展^[2-3]。与金属防弹材料和陶瓷防弹材料不同,高性能纤维复合材料是通过纤维拉伸断裂、纤维-基体分层损伤来耗散子弹动能并阻滞子弹^[4-5]。高性能纤维无论是单独使用,还是制成复合材料^[6],或是应用在个人防弹背心、防弹头盔上,抑或是应用于金属/陶瓷防弹材料的内层衬垫材料中,都表现出优良的抗子弹侵彻性能^[7-8]。

目前,软质防弹材料的优化多集中于复合材料界面性能及混杂复合材料的叠层顺序等方面,增强体则多选用无纬布^[9-10]与二维机织布^[11-12],少有研究者聚焦于织物增强体结构的优化方面。定向针织增强结构具有良好的柔韧性和贴身性,且结构设计性强,符合软质防弹材料未来发展趋势^[13-14]。文中以芳纶全幅衬纬针织物为增强体,沙林树脂为基体材料,制备不同规格的多层柔性复合材料。根据弹道测试分析线圈结构及衬纬纱线对衬纬织物增强复合材料防弹性能的影响。通过计算机断层扫描(XCT)评估复合材料内部的损伤扩展与分层损

伤情况,深入分析全幅衬纬增强复合材料在弹丸侵彻过程中的损伤机理与失效模式,为柔性防弹复合材料的织物结构设计 with 优化提供更多思路与可能性。

1 材料与方法

1.1 原料与仪器

1.1.1 原料 芳纶长丝纱(PPTA-I)的线密度为44.4 tex,PPTA-II的线密度为66.7 tex,烟台泰和新材料有限公司生产;尼龙6单丝(细度为2.2 tex),深圳特力新材科技有限公司生产。

1.1.2 仪器 KBL型编织机,徐州恒辉编织机械有限公司制造;KSC-132型龙星双针床电脑横机,江苏金龙科技股份有限公司制造;CH型恒温热压机,深圳创佳鸿机械设备有限公司制造;X射线计算机断层扫描仪,法国Easy Tom RX Solutions公司制造。

1.2 柔性防弹材料的制备

1.2.1 编织纱的制备 在编织机上制备以芳纶长丝纱(PPTA-I)为芯纱,采用高弹性的尼龙6单丝(PA6)包缠的编织纱,编织纱(AB)外观形貌如图1所示,具体编织工艺参数见表1。

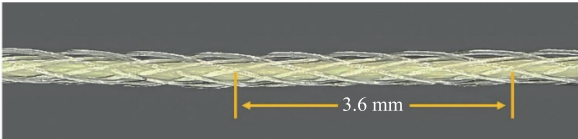


图 1 编织纱光学显微镜图像

Fig. 1 Optical microscope image of braided yarn

表 1 编织纱编织工艺参数

Tab. 1 Braiding parameters of braided yarn

原料		工作锭数/ 只	编织节距/ mm	细度/ tex	直径/ mm	编织速率/ (mm/min)
芯纱	包覆纱					
PPTA-I	PA6	8	3.6	67.8	0.42	500

1.2.2 全幅衬纬针织物设计与制备 全幅衬纬针织结构是在针织物中引入无屈曲的高性能衬纬纱线,衬纬纱夹持在地组织线圈中,平均排布且保持伸直状态。在受到冲击时,衬纬纱线能够快速传递载荷并耗散冲击动能。文中设计了3种地纱细度

及衬纬纱规格不同的全幅衬纬针织物,衬纬织物地组织采用1+1双罗纹组织,衬纬织物在机号为E14的横机上进行编织,具体组织结构与实物示意如图2所示。3种全幅衬纬针织物相关规格参数见表2。

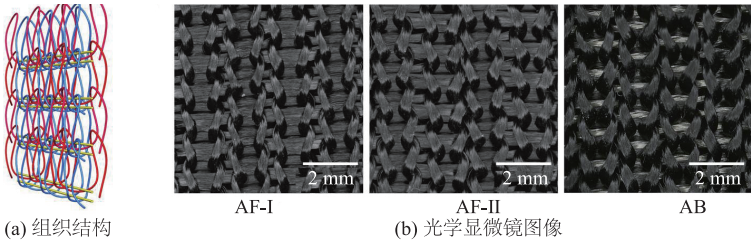


图 2 全幅衬纬针织物示意

Fig. 2 Schematic of full-width weft insertion knitted fabric

表 2 3 种全幅衬纬针织物纱线原料与规格参数

Tab.2 Raw materials and specification parameters of the three full-width weft insertion knitted fabrics				
样品	地纱	衬纬纱	厚度/ mm	面密度/(g/m ²)
AF-I	PPTA-II	3 * PPTA-II	1.49	773.9
AF-II	2 * PPTA-II	3 * PPTA-II	2.13	1 332.2
AB	2 * PPTA-II	AB	2.19	1 093.0

1.2.3 柔性复合材料制备 采用薄膜镶嵌法的预浸料制备工艺和热压复合工艺,将全幅衬纬针织物 AF-I ,AF-II 和 AB 以 0°/90°进行正交铺叠,每层织物之间及整体结构最外侧铺设沙林树脂薄膜,再进行热压复合。当树脂含量过低时,复合材料在冲击中易发生分层脱黏;树脂含量过高时,会限制纤维抽拔、断裂及背部变形,导致层合板能量吸收能

力的下降,通常防弹复合材料中树脂质量分数控制在 15% ~ 20% 之间为宜^[15-16]。制得规格不同的 3 种复合材料层合板,命名为 AF-10/Surlyn、AF-6/Surlyn 和 AB/Surlyn,图 3 为层合板叠层示意。设置复合材料热压工艺温度为 150 ℃、热压压力为 4 MPa,预热 3 min,保压 10 min。复合材料相关参数见表 3。

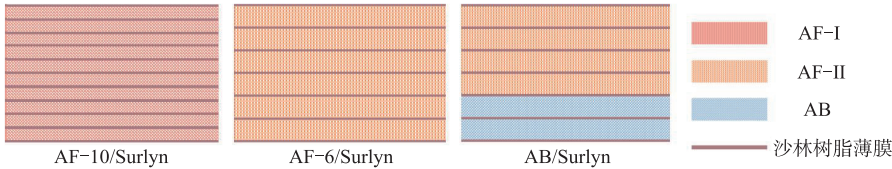


图 3 3 种复合材料层合板叠层示意

Fig.3 Schematic representation of the three kinds of composite laminates

表 3 3 种复合材料层合板相关参数

Tab.3 Parameters for the three kinds of composite laminates				
样品	面密度/(kg/m ²)	树脂质量分数/ %	纤维质量分数/ %	厚度/ mm
AF-10/Surlyn	9.727	17.04	82.96	11.3
AF-6/Surlyn	9.329	17.82	82.18	11.1
AB/Surlyn	9.249	18.74	81.26	10.9

1.3 测试与表征

1.3.1 弹道冲击测试 图 4 为弹道冲击系统示意。

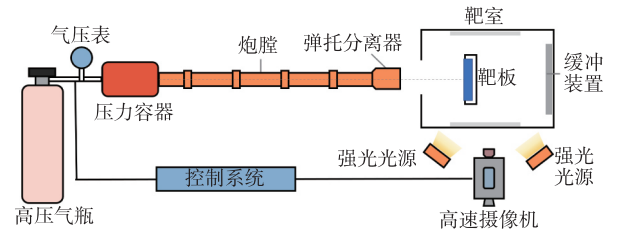


图 4 弹道冲击系统

Fig.4 High velocity impact test system

弹道冲击测试所用的球形弹丸直径为 8.02 mm,质量为 2.08 g,弹丸密度为 7.7 g/cm³,在冲击过程中弹丸的变形可以忽略不计。将弹丸入射速度控制在 310 ~ 540 m/s 范围内,每种规格层合板进行 6 次不同入射速度的弹道冲击实验。实验完成后,对复合材料背部的冲击变形量进行测量。

在将球形弹丸视作刚体时,弹道极限速度 v_{50} 可以采用下式进行计算

$$v_{50} = \sqrt{v_i^2 - v_r^2} \quad (1)$$

式中: v_i 为弹丸入射速度 (m/s); v_r 为弹丸剩余速度 (m/s)。

弹丸损失的动能几乎全由靶板吸收、耗散,因此靶板吸收能量 E_a 可由弹丸冲击过程中的入射速度与剩余速度近似估算,即

$$E_a = \frac{1}{2} m_p (v_i^2 - v_r^2) \quad (2)$$

式中: E_a 为靶板吸收能量 (J); m_p 为弹丸质量 (kg)。

由于靶板的面密度存在一定差异,当弹丸穿透靶板时,通常可采用贯穿比吸能评价材料的抗弹道冲击性能。贯穿比吸能

$$e_a = \frac{E_a S}{m_i} \quad (3)$$

式中: S 为靶板面积 (m²); m_i 为靶板质量 (kg)。

1.3.2 XCT 断层扫描 弹道冲击测试后,选择 5 种典型的层合板进行 XCT 断层扫描,以弹孔为原点建立坐标系,扫描区域为 100 mm × 100 mm × 11 mm,即复合材料层合板的主要损伤区域。通过层合板内部的损失扩展情况探究复合材料的损伤破坏机理与失效模式。

2 结果与分析

2.1 复合材料的能量吸收

对高速冲击实验数据进行计算得到高速冲击实验结果,具体见表 4。由表 4 可以看出,在弹丸穿

透靶板情况下,AF-10/Surlyn 的靶板贯穿比吸能高于 AF-6/Surlyn 和 AB/Surlyn。当弹丸的入射速度变化时,贯穿比吸能会有所波动。靶板对弹丸能量的吸收能力随着弹丸入射速度的增大,呈现先增加后下降的趋势。由此可以推测,随着弹丸动能增加,靶板可以吸收的能量增加;随着入射速度的增

加,靶板吸能值持续增加。但存在着速度临界值,当入射速度超过临界值时,弹丸快速穿透靶板,受复合材料形变响应速度的限制,靶板吸收能量的能力下降。因此,衬纬织物增强复合材料层合板会存在最适宜使用的弹丸入射速度区间,在此速度范围内,复合材料的抗弹性能较好。

表 4 高速冲击实验结果

Tab. 4 Experimental data of high velocity impact test

靶板	类型	面密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	入射速度 $v_i/(\text{m}/\text{s})$	剩余速度 $v_r/(\text{m}/\text{s})$	吸收能量 E_a/J	贯穿比吸能 $e_a/(\text{J} \cdot \text{m}^2/\text{kg})$
A ₁	AF-10/Surlyn	9.733	311.3	0	100.78	
A ₂		9.730	361.9	0	136.21	
A ₃		9.724	366.4	12.5	139.46	14.34
A ₄		9.727	380.1	95.8	140.71	14.47
A ₅		9.729	408.1	167.9	143.89	14.79
A ₆		9.726	518.1	383.2	126.45	13.00
B ₁	AF-6/Surlyn	9.329	313.0	0	101.89	
B ₂		9.334	354.9	113.9	117.50	12.59
B ₃		9.326	368.4	133.4	122.64	13.15
B ₄		9.330	379.2	191.5	111.41	11.94
B ₅		9.327	407.5	246.6	109.45	11.74
B ₆		9.331	492.1	367.7	111.24	11.92
C ₁	AB/Surlyn	9.244	315.3	0	103.39	
C ₂		9.246	344.6	97.0	113.71	12.30
C ₃		9.231	358.5	107.2	121.71	13.16
C ₄		9.249	366.0	131.5	121.33	13.12
C ₅		9.233	413.5	256.2	109.56	11.86
C ₆		9.249	533.0	439.5	94.57	10.22

复合材料的弹道曲线如图 5 所示。弹道曲线是根据弹道极限速度预测的弹丸剩余速度随入射速度的变化曲线。经计算 AF-10/Surlyn,AF-6/Surlyn 和 AB/Surlyn 的弹道极限速度分别为 365.31,339.76 和 338.29 m/s。

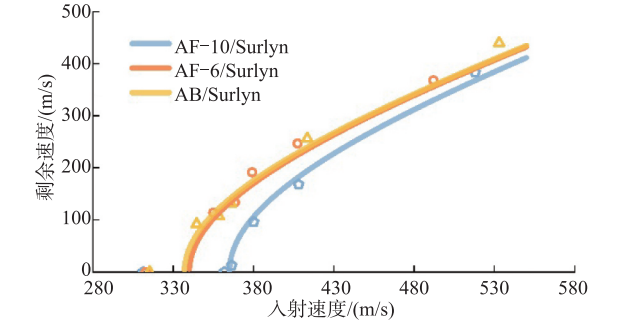


图 5 复合材料层合板弹道曲线

Fig. 5 Ballistic curves of composite laminates

结合表 4 可知,当弹丸以弹道极限速度冲击 3 种不同规格的层合板时,AF-10/Surlyn 吸收的能量与 AF-6/Surlyn 和 AB/Surlyn 的相比,分别多 13.5% 和 14.2%。AB/Surlyn 和 AF-6/Surlyn 具有相似的

弹道极限速度,但均低于 AF-10/Surlyn。AB/Surlyn 与 AF-6/Surlyn 的差别在于,其背部两层织物是引入了抗拉伸性能更优异的编织纱作为衬纬纱的纬编织物,且 AB/Surlyn 的面密度略低于 AF-6/Surlyn。由此可以说明,采用更轻质、抗拉伸的材料作为背弹面增强织物是可行的,这种编织纱纬编衬纬织物具有较大的能量吸收潜力。此外,AF-10/Surlyn 与 AF-6/Surlyn 相比,其衬纬纱的含量更高。这说明在复合材料中,地组织纱线的主要作用是连接并串套衬纬纱,过量引入地纱以限制衬纬纱的滑移对复合材料防弹性能的增强效益并不明显,可能会降低复合材料的贯穿比吸能。因此,可以通过改善并优化衬纬纱性能,进一步提高纬编衬纬织物增强复合材料的防弹性能。

此外,当弹丸入射速度大于 480 m/s 时,弹丸穿透靶板后的实际剩余速度均高于弹道曲线计算值。这是由于随着弹丸入射速度的增加,复合材料将无法在较大面积内作出动态响应,损伤破坏更加局部化,对弹丸动能的吸收与耗散则呈现下降趋势。

2.2 损伤破坏模式与失效机理

在不同入射速度下复合材料层合板迎弹面的宏观损伤形貌如图 6 所示。

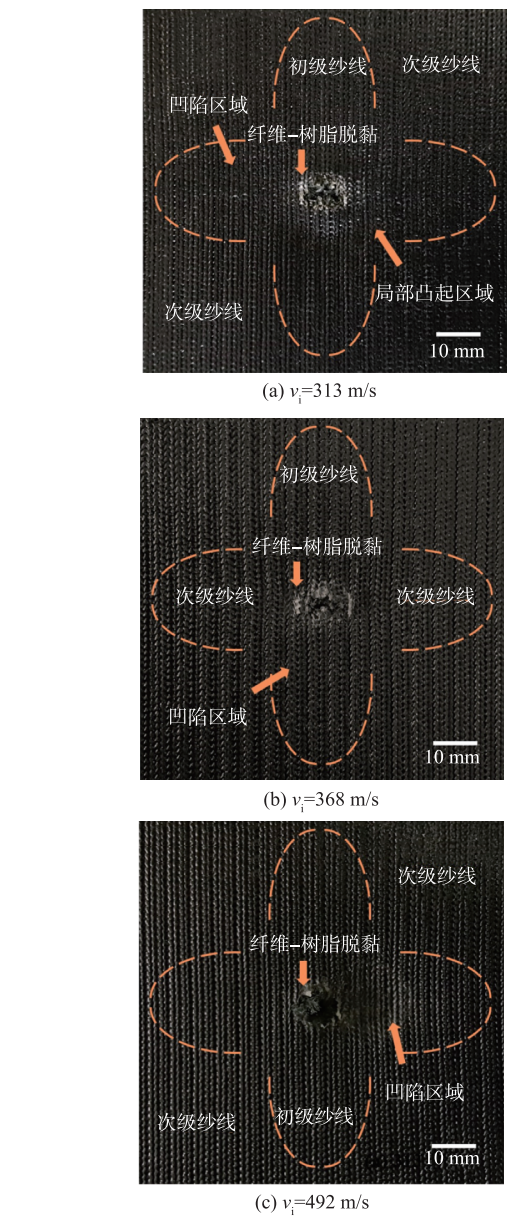


图 6 复合材料层合板迎弹面损伤形貌

Fig. 6 Appearance of impact damage at the front side of composite laminates

由图 6 可以看出,复合材料迎弹面主要变形区域呈现十字形状,该区域出现明显的凹陷情况。这是因为衬纬织物是以正交方式进行铺叠的,应力波沿着无屈曲的衬纬纱线传递较快,而复合材料中衬纬纱线呈正交垂直配置,即应力主要沿着 0° 和 90° 两个方向进行扩散。在弹丸高速冲击作用下,应力横波在初级纱线上产生张力,初级纱线产生横向偏移,随着弹丸侵入复合材料,弹丸推动初级纱线使其产生弹丸运动方向上的位移,当诱发的应力大于纱线极限应力时,织物结构解体、纱线发生断裂;次

级纱线受初级纱线牵拉,也会产生一定的应变,进一步耗散弹丸动能。此外,受弹丸冲击作用,树脂基体受到压缩、剪切作用力,在弹孔周围区域,纤维与树脂出现剥离与分层情况。且在弹丸入射速度为 313 m/s 时,弹孔周围的局部区域有凸起现象,这是由于在集中应力迅速消散后,弹孔周围局部区域的纤维发生弹性反冲,造成局部区域的凸起。

在不同入射速度下复合材料层合板背弹面的宏观损伤形貌如图 7 所示。

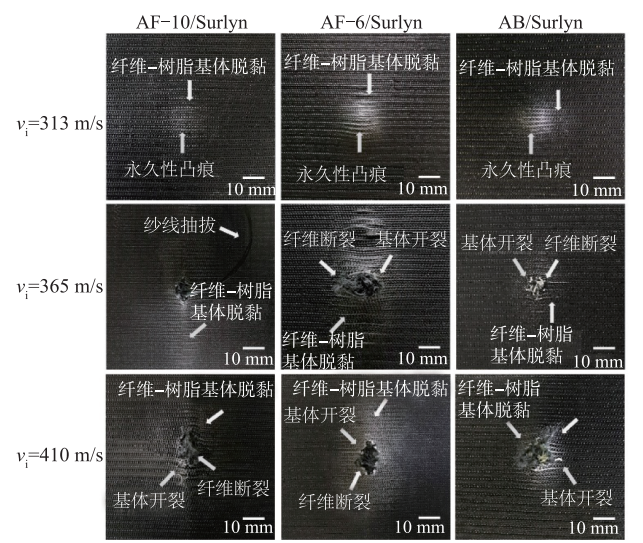


图 7 复合材料层合板背弹面损伤形貌

Fig. 7 Appearance of impact damage at the back side of composite laminate

由图 7 可以看出,在弹丸入射速度为 313 m/s 时,弹丸在冲击过程中速度明显下降,并被阻滞在复合材料层合板内部,层合板没有出现贯穿的弹孔;局部纤维与基体出现剥离、脱黏现象,背弹面出现永久性凸起痕迹。随着弹丸入射速度的增加,复合材料层合板上出现了贯穿的弹孔。在冲击载荷作用下,树脂基体发生拉伸变形,与纤维之间发生脱黏,在弹孔周围树脂基体出现开裂情况。由于衬纬织物是正交叠层的,背弹面的主要损伤区域同样呈十字形状。当弹丸入射速度较大,弹丸可以贯穿层合板时,背弹面在纵向上的损伤扩展距离大于横向上的损伤扩展距离,且纤维与树脂基体的脱黏情况更加明显。复合材料层合板背弹层的最外侧是沿纵向引入衬纬纱线,由此可以推测,衬纬纱的拉伸变形可以耗散弹丸的动能;地组织的线圈结构夹持衬纬纱,避免了纱线滑移和出现“开窗效应”导致的过早失效,并通过拉伸变形吸收冲击能量,阻碍了衬纬纱线中纤维的抽拔。

对比图 7 中 AF-6/Surlyn 与 AB/Surlyn,两种规格的复合材料中织物叠层数量相同,迎弹面织物结

构相同,区别在于 AB/Surlyn 中背弹面的两层衬纬织物之间的衬纬纱线为抗拉强度更高的编织纱。结合表 4 可知,在弹丸入射速度约为 365 m/s 时,弹丸贯穿这两种织物后剩余速度大小相似,只是 AB/Surlyn 的背部冲击变形及纤维-树脂脱黏情况均没有 AF-6/Surlyn 明显。由此可以推测,AB/Surlyn 中编织纱在较小的拉伸变形下可以耗散更多的弹丸动能。当弹丸入射速度约为 410 m/s 时,由于弹丸入射速度较高,AB/Surlyn 损伤相对集中,背部冲击变形量小,对弹丸动能的吸收与耗散能力较差。

5 种典型衬纬织物增强柔性复合材料层合板试样的 XCT 扫描图像如图 8 所示。其中,图 8(b)、图 8(c)和图 8(d)展示了 3 种复合材料层合板在入射速度约为 365 m/s 时的截面损伤形貌,AF-10/Surlyn 的纤维和树脂基体脱层失效扩展面积最大。

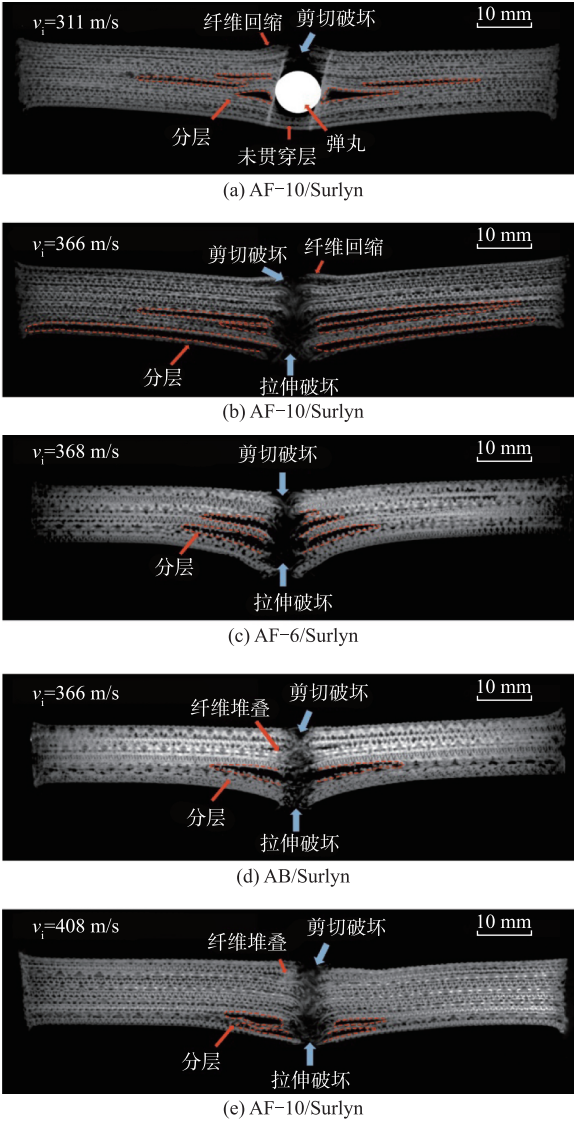


图 8 复合材料层合板 XCT 扫描图像

Fig. 8 XCT scan images of composite laminates

从图 8 中可以观察到,以衬纬织物为增强材料的柔性层合板,前层更倾向于在剪切作用下破坏失效,后层倾向于拉伸作用而导致破坏失效。在 XCT 图像损伤形貌上的具体表现为前层变形较小,后层变形较大,且背部区域出现明显的分层现象。复合材料层合板发生分层破坏的主要原因是,在弹丸侵彻作用下会产生横向压缩梯度,由此产生层间剪切载荷,当层间剪切载荷大于层合板的层间剪切强度时,复合材料出现分层现象。此外,在迎弹面的纤维断裂、织物解体后,部分纤维弯曲堆叠在一起,部分纤维在应力消散后反冲回缩堆积在一起,从而形成局部凸起区域。层合板背弹面的主要损伤模式则为纤维的拉伸断裂、衬纬织物的拉伸破坏和织物与基体的分层破坏。

图 8(a)、图 8(b)和图 8(e)分别为不同入射速度下抗子弹侵彻性能最佳的 AF-10/Surlyn 截面损伤形貌。当弹丸入射速度小于极限速度时,弹丸大部分动能被弹丸侵入迎弹面时前层板的剪切堵塞作用力所耗散,或是被层间的局部分层损伤和背弹面的拉伸变形所吸收、耗散。当弹丸入射速度接近极限速度时,复合材料层合板的破坏主要体现为迎弹面的剪切破坏、背弹面的拉伸破坏和分层损伤,其中纱线受弹丸推动而拉伸破坏为重要能量吸收机制。随着弹丸入射速度的增加,基体拉伸破坏模式被激活,复合材料层合板会出现严重的分层损伤。当弹丸入射速度继续增加时,复合材料层合板会因为沒有足够时间在较大范围内产生变形响应,而导致复合材料的损伤更加集中化、局部化,背弹面的冲击变形量显著降低。

3 结 语

文中设计并制备了 3 种不同规格的全幅衬纬针织物/沙林树脂柔性复合材料,并对其开展弹道冲击实验。研究表明:当衬纬织物增强复合材料受到弹丸冲击时,地组织的线圈结构锁住衬纬纱线,避免因纱线滑移和“开窗效应”导致的过早失效,衬纬纱则较快耗散弹丸动能。采用轻质、抗拉伸性能优良的织物作为背弹层具有更大的能量吸收潜力。柔性复合材料层合板,迎弹面主要损伤模式为剪切破坏,背弹面损伤模式主要是拉伸破坏及分层脱黏。此外,弹丸入射速度会影响层合板的具体损伤模式。文中探究了柔性复合材料弹道侵彻性能,以及弹道冲击中的损伤机理与破坏模式,有利于拓展定向针织增强结构在防弹领域的应用,为定向增强针织物柔性防护材料的结构改进提供参考。

参考文献:

- [1] 张倩玉, 秦志刚, 阎若思, 等. 剪切增稠液/纤维复合材料防弹性能的研究进展[J]. 纺织学报, 2021, 42(6): 180-188.
- ZHANG Qianyu, QING Zhigang, YAN Ruosi, et al. Research progress on bulletproof properties of shear thickening fluid/high performance fiber composites[J]. Journal of Textile Research, 2021, 42(6): 180-188. (in Chinese)
- [2] ZHANG Rui, HAN Bin, ZHONG Junyang, et al. Enhanced ballistic resistance of multilayered cross-ply UHMWPE laminated plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 159: 104035.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] XIANG Yuhang, ZHANG Zhongwei, YANG Xiaoning, et al. Failure mechanism of carbon/ultra-high molecular weight polyethylene twill fiber reinforced hybrid laminates under ballistic impact[J]. Materials and Design, 2022, 216: 10578.
- [6] 何业茂, 焦亚男, 周庆, 等. 弹道防护用先进复合材料弹道响应的研究进展[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1331-1347.
- HE Yemao, JIAO Yanan, ZHOU Qing, et al. Research progress on ballistic response of advanced composite for ballistic protection[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(5): 1331-1347. (in Chinese)
- [7] DONG Yalun, YANG Lihong, JIN Ziqi, et al. Experimental and numerical analysis of ballistic impact response of fiber-reinforced composite/metal composite target[J]. Composite Structures, 2022, 294: 115776.
- [8] WU Kaikuang, CHEN Yuliang, YEH J N, et al. Ballistic impact performance of SiC ceramic-dyneema fiber composite materials[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 1-9.
- [9] 马华菁, 时娟娟, 沈文东, 等. 防弹无纬布的研究概况[J]. 棉纺织技术, 2021, 49(5): 14-18.
- MA Huajing, SHI Juanjuan, SHEN Wendong, et al. Research overview of bulletproof unidirectional cloth[J]. Cotton Textile Technology, 2021, 49(5): 14-18. (in Chinese)
- [10] PARK J L, CHI Y S, KANG T J. Ballistic performance of hybrid panels composed of unidirectional/woven fabrics[J]. Textile Research Journal, 2013, 83(5): 471-486.
- [11] WANG Ying, CHEN Xiaogang. A numerical and experimental analysis of the influence of crimp on ballistic impact response of woven fabrics[J]. Composite Structures, 2016, 140: 44-52.
- [12] NUNES S G, SCAZZOSI R, MANES A, et al. Influence of projectile and thickness on the ballistic behavior of aramid composites: experimental and numerical study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132: 103307.
- [13] MOUSAVI M V, KHORAMISHAD H. Investigation of energy absorption in hybridized fiber-reinforced polymer composites under high-velocity impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 146: 103692.
- [14] ALUBEL ABTEW M, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Ballistic impact performance and surface failure mechanisms of two-dimensional and three-dimensional woven p-aramid multi-layer fabrics for lightweight women ballistic vest applications[J]. Journal of Industrial Textiles, 2021, 50(9): 1351-1383.
- [15] 吴中伟, 张慧, 艾青松, 等. 芳纶防弹防刺材料研究[J]. 合成纤维, 2021, 50(6): 36-40.
- WU Zhongwei, ZHANG Hui, AI Qingsong, et al. Study on bullet-proof and stab-proof aramid materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(6): 36-40. (in Chinese)
- [16] SAPOZHNIKOV S, KUDRYAVTSEV O, ZHIKHAREV M. Fragment ballistic performance of homogenous and hybrid thermoplastic composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 81: 8-16.

(责任编辑:邢宝妹)