

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.04.028

抗弹复合材料用高性能有机纤维、树脂及其匹配性研究进展

周子言, 翟文, 董彬, 魏汝斌, 王小伟, 张文婷, 何金迎, 付思伟
(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 简述了纤维增强树脂基复合材料的抗弹机理, 介绍了装甲防护领域常用的高性能有机抗弹纤维和树脂, 分析了影响纤维复合材料抗弹性能的主要因素。从纤维/树脂协调匹配的角度出发, 揭示了匹配的各组分可以最大程度发挥增强体高强度、高模量和基体能量吸收率高的特性, 分析了纤维/树脂匹配性的发展趋势, 指出下一步研究重点在于构建恰当的纤维/树脂匹配体系, 通过调整纤维/树脂含量、树脂模量和对纤维进行表面处理等进行调控。

关键词: 纤维增强树脂基复合材料; 抗弹用高性能有机纤维; 匹配性; 抗弹机理; 弹道性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)04-0181-07

Research progress in high-performance organic fibers, resins and their compatibility for bulletproof composite materials

ZHOU Ziyang, ZHAI Wen, DONG Bin, WEI Rubin, WANG Xiaowei, ZHANG Wenting, HE Jinying, FU Siwei
(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : Bulletproof mechanism of fiber-reinforced resin based composite materials were briefly described, high-performance organic bulletproof fibers and resins commonly used in the field of armor protection were introduced, and the main factors affecting the bulletproof performance of fiber composite materials were analyzed. From the perspective of fiber/resin coordination matching, it was revealed that matched components can maximize high strength, modulus and energy absorption of the reinforcement body and matrix. The development trend of fiber/resin matching was analyzed, and it was pointed out that the next research focus was to construct an appropriate fiber/resin matching system, which could be regulated by adjusting the fiber/resin content, resin modulus, and surface treatment of the fibers.

Keywords : fiber reinforced resin based composite material ; high performance organic fibers for ballistic resistance ; compatibility ; anti ballistic mechanism ; ballistic performance

在现代战争中, 人体防护装备具有吸收和耗散弹体动能、阻止穿透从而提升士兵战场生存能力的作用。纤维增强树脂基复合材料以其优异的抗弹性能, 在防护领域中得到了广泛运用。纤维增强树脂基复合材料一般由纤维增强体和树脂基体构成^[1-2]。其中, 纤维增强体是应力主要的承载对象。在来袭弹体高速冲击的作用下, 纤维发生大面积变形、拔出和撕裂, 将弹体的动能主要转化为纤维的断裂能^[3]。树脂基体不仅影响了侵彻过程中纤维的分布和受力状态, 还可将局部应力快速传递从而吸收冲击产生的能量^[4]。界面是纤维和树脂间两相不相容却相接触的区域, 它能起到传递载

荷、阻断裂纹和吸收能量的作用。纤维、树脂和其界面性能构成了影响复合材料抗弹性能的主要内部因素^[1,5]。

纤维只有和树脂协调匹配, 才能充分发挥复合材料的综合性能。纤维/树脂匹配性体现在纤维的断裂伸长率、拉伸强度、混杂形态和树脂的种类、拉伸弹性模量、黏弹性以及纤维和树脂的含量比、二者的界面剥离强度等方面。对匹配性的研究是为了阐明新型纤维复合材料结构-工艺-性能之间的耦合作用机制。在以往的研究里, 人们更多关注的是纤维增强体和树脂基体改性的方法, 常通过对增强体和基体的结构进行改性从而提高复合材料的抗弹性能, 对于纤维/树脂

基金项目: 山东省济南市“新高校 20 条”资助项目自主培养创新团队计划(2021GXRC022)

通信作者: 翟文, 研究员, 硕士, 主要从事高效抗冲击树脂基复合材料与功能防护材料的研发与设计工作

收稿日期: 2024-01-24

引用格式: 周子言, 翟文, 董彬, 等. 抗弹复合材料用高性能有机纤维、树脂及其匹配性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 181-187.

ZHOU Ziyang, ZHAI Wen, DONG Bin, et al. Research progress in high-performance organic fibers, resins and their compatibility for bulletproof composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 181-187.

匹配性的研究却鲜有提及。笔者从弹道机理出发,介绍了防护领域中常用的几种高性能有机纤维和树脂,分析了纤维/树脂匹配性对防弹性能的影响,并对纤维增强树脂基复合材料的未来发展作了初步展望。

1 抗弹机理分析

弹丸接触到复合材料靶板后,将在短时间内对靶材完成侵彻。这一过程中,在后部靶板和背材的支撑作用下,靶板被瞬间压缩至最小厚度且接触点处于高温、高压的状态。随后靶板产生横向位移并形成锥形变形区,图1为穿甲弹侵彻二维机织物复合靶的示意图^[6]。

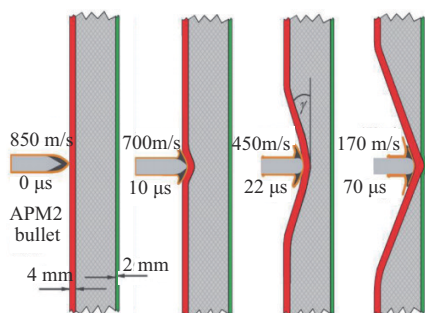


图1 穿甲弹侵彻二维机织物复合靶过程侧视图

Fig. 1 Side view of armor piercing projectile penetrating a two-dimensional woven composite target

图2为纵波和横波在纱线中的传播示意图。由图2可见,在这一过程中,冲击力会以应力波的形式从接触点传播开来,按传播方向的不同可分为以连续脉冲沿纤维轴向传播的纵波和沿靶板的厚度方向传播的横波。图3为应力波在防弹复合材料中传播示意图。由图3可见,应力波沿纤维轴向传播时,在基体和交错点的相互作用下,应变波会在未直接受击的纤维上传播开来,从而降低受击点压强,达到吸能和减少背凸的效果;沿靶板厚度方向传播时,应力波会在增强体和基体的界面及靶板自由面内产生连续的反射波,将靶板所受一部分压力变为拉应力,在不断的反射后,应力波被减弱并继续沿厚度方向传播。其传递速度与靶材的模量、密度、子弹的速度和纤维与树脂的层间响应时间等有关,应力

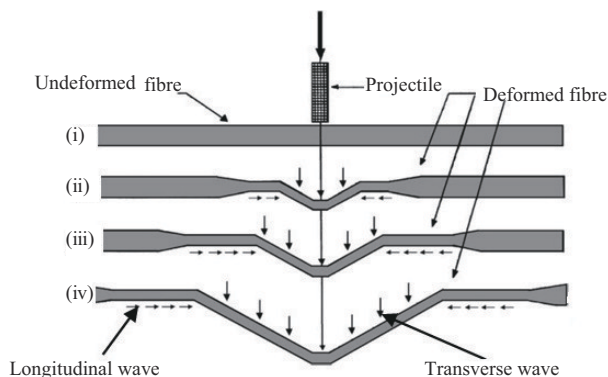


图2 纵波和横波在纱线中的传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the propagation of longitudinal and transverse waves in yarn

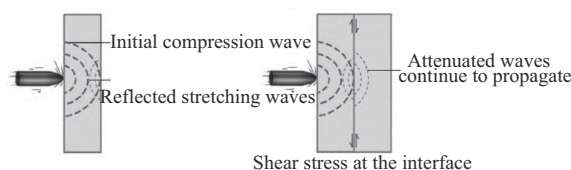


图3 应力波在防弹复合材料中传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of stress wave propagation in bulletproof composite materials

波传播速度越快,靶板性能和抗弹效果就越好^[7]。

研究表明,在弹体侵彻过程中,子弹的大多数动能会以以下几种方式转变为靶板的内能和纤维的断裂能:迎弹面的纤维在剪切力的作用下,发生剪切破坏断裂,同时部分靶材颗粒在剪切力的作用下与整体分离^[8];冲击区域的靶材在摩擦作用下急速升温,部分纤维会存在熔融破坏^[9];当应力超过纤维与树脂之间的黏结力时,靶板发生层裂。因此,靶材的抗弹性能是纤维、树脂和界面等多方面综合作用的结果。要兼顾纤维与树脂的匹配性,选择使用合适的纤维/树脂体系,提高应力波的传播速度,从而最大限度地吸收能量,达到弹道防护的效果。

2 抗弹用高性能有机纤维

抗弹用高性能有机纤维以其高拉伸弹性模量、高断裂伸长率、高韧性和高吸能性被广泛运用于弹道领域^[10-11]。不同纤维的能量吸收率(R)可以近似用式(1)表示:

$$R=WC \quad (1)$$

式中: W 为纤维断裂能; C 为应力波速。

式(1)中 C 和材料的拉伸弹性模量有关,因此需要使用断裂能和模量优异的纤维。目前应用最为广泛的有芳纶纤维、超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维、聚酰亚胺(PI)纤维、聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维以及聚苯撑吡啶并二咪唑(PIPD)纤维等^[12]。

2.1 芳纶纤维

芳纶纤维是芳香族聚酰胺纤维的简称,是含有质量分数85%以上的芳香环与酰胺键相连接的大分子线性聚合物^[13-14]。芳纶纤维可分为全芳香族聚酰胺和杂环芳香聚酰胺纤维两大类,主要工业化产品包括Kevlar[®], Twaron[®]^[15]和Rusar[®]^[16]。以Kevlar[®]为例,完全芳香的棒状结构使得其热稳定温度高于500℃,从而具有良好的耐高温和阻燃的性能^[17]。因其具备高强度、高拉伸弹性模量、耐高温、阻燃的优异性能,被广泛运用在防护领域中,表1为目前市场上主要生产的芳纶纤维的产品性能。

Talib等^[18]结合实验和仿真研究了Kevlar-29与Al₂O₃粉末/环氧树脂(EP)复合材料在高速冲击下的耐冲击性能。结果表明,在质量为5.2g、直径8mm的子弹以400m/s的速度撞击下,30层的靶材按照0°/90°堆叠结构可以有效拦截弹丸,拥有良好的耐高温和耐冲击性能。Nitin等^[19]使用纳米二氧化硅和液体橡胶增强Kevlar/EP复合材料并对其静态性能和弹道性能进行测试。结果表明,纳米填料增强的靶材具有

表1 主要公司生产的芳纶纤维牌号及性能

Tab. 1 Aramid fiber grades and properties produced by major companies

Manufacturer	Trade names	Tensile strength/ (cN·dtex ⁻¹)	Modulus of elongation/ (cN·dtex ⁻¹)	Elongation at break/%	Density/(g·cm ⁻³)
US Dupont	Kevlar®129	22	680	3.3	1.44
	Kevlar®KM2	24	550	4.3	1.44
Japan Teijin	Twaron®	23	840	2.0	1.44
Russian Chemical Fiber Institute	Rusar®-S	28	1 200	2.5	1.44
	Rusar®-NT	35	1 200	2.6	1.44
China BlueStar Chengrand Research Institute of Chemical Industry	Staramid®F-3	30	850	3.0	1.44

更高的拉伸强度(13.50%)、拉伸弹性模量(14.7%)、层间剪切应力(41.6%)和巴氏硬度(36), 10 mm厚的该靶板能抵挡430 m/s全金属被甲弹的侵彻。同时,芳纶纤维也存在着一些缺点,包括:紫外照射下易降解;分子间氢键的作用力弱,导致其压缩强度仅有拉伸强度的1/5,抗剪切强度也弱;表面呈惰性,结构活性低,需要对其进行表面改性。

表2 国外主要公司生产的PE-UHMW纤维牌号及性能

Tab. 2 PE-UHMW fiber grades and properties produced by major foreign companies

Manufacturer	Trade names	Specifications/(dtex·f ⁻¹)	Performance/(cN·dtex ⁻¹)		Elongation at break/%	Density/(g·cm ⁻³)
			Tensile strength	Modulus of elongation		
Holland DSM	Dyneema SK77	154/36	40	1 300	3.8	0.97
US Honeywell	Spectra1000	722/120	39	1 400	2.9	0.97
Mitsui, Japan Mitsui	Tekmilon I	1 111/200	28	943	3.0	0.97

Zhang等^[22]建立了PE-UHMW层压板分析模型,将弹丸侵彻过程分为局部破坏和膨胀变形两个连续阶段,分别用局部冲击压实下的应变集中模型和改进的膜拉伸模型表征。该分析模型能够揭示PE-UHMW层压板在弹丸冲击下变形/失效过程的物理机制,可以准确预测弹道极限和残余射弹速度。Cao等^[23]基于数据驱动分析,提出了一个误差在5%以内的计算PE-UHMW层压板弹道极限速度的方程。研究结果表明,PE-UHMW纤维具有超过10 km/s的理论确定的纵波速度,并表现出极强的应力扩散能力。PE-UHMW层压板的抗穿透机制和性能同时受到层压板厚度、射弹速度和外界温度影响。同时,PE-UHMW纤维也存在一些缺点,包括:摩擦系数低,高速冲击下会使纤维发生大量偏移,无法有效承载冲击载荷,产生较大的背凸;熔点低,高温易熔融从而破坏其结构,并且在燃烧过程中还会释放烟雾^[24];表面化学惰性,常用表面改性等手段来增强其与树脂的界面结合强度。

2.3 PI纤维

PI纤维指的是含有亚胺环的高分子聚合物。其分子主链由刚性共轭结构组成,亚胺环和芳香环的结构使其具备高强、高韧、耐高温、阻燃的性能。PI含有堆叠的分子链,能够通过链运动吸收和耗散大量的能量^[25-27]。

贾文星等^[28]将PI纤维和PE-UHMW纤维混杂,研究了混杂靶板的铺层结构和混杂比例对其抗弹性能的影响。结果表明,将PI纤维铺设于背弹面可以有效降低靶材的背部突起值(BFS),当PI/PE-UHMW的混杂质量比为5:12时,靶板的BFS最小,同时具有良好的抗贯穿性能和抗凹陷能力。

2.2 PE-UHMW纤维

PE-UHMW纤维的分子量在100万~500万,目前市场上主要生产的PE-UHMW纤维产品性能列于表2,其拉伸强度高、拉伸弹性模量高以及密度低,通常以单向片材运用在防护用品的制备中,有学者提出当下研究的重点在于通过实验和仿真相结合的方式量化其抗穿透性能^[20-21]。

Wang等^[29]研究了高强高模PI纤维的应变率效应,发现PI纤维的力学性能受应变速率影响较大,随着应变速率的增加,纤维断裂应力、拉伸强度和拉伸弹性模量均得到显著提高,靶材破坏模式也从塑性延展性破坏向原纤化劈裂形式转变。

2.4 PBO纤维

PBO纤维结合了直线形刚性链芳香族聚酰胺(PBA)纤维和聚苯并咪唑(PBI)的研究成果,是一种刚棒状液晶芳香族杂环聚合物,具有高强、高模、抗蠕变、耐高温和耐化学介质等优异性能^[30-31]。PBO纤维由美军某研究室合成,由东洋纺公司实现工业连续生产,注册商标为Zylon®,其拉伸强度可达5.8 GPa,拉伸弹性模量为270 GPa。国内山东非金属材料研究所也完成了PBO纤维的自主研发,拥有百吨级生产线,实现了连续化稳定生产。表3为目前市场上主要生产的PBO纤维产品性能。

Song等^[32]将碳纳米管高密度均匀接枝到PBO纤维表面以提高复合材料的界面附着力、硬度和拉伸弹性模量。改性后PBO/EP复合材料的冲击强度比原材料增加了56.24%,其界面失效模式从黏附失效转变为内聚失效和基体失效,在抗弹领域拥有十分广阔的前景。PBO纤维在抗弹领域的运用仍需克服以下难题:对可见光和紫外光敏感,制成的产品无法长时间有效使用^[33];表面化学活性低,与树脂基体的黏附性差,需对其进行等离子体改性和 γ 射线辐照等表面改性^[34];纤维微纤化所导致其压缩性能差,需要在制备过程中采用注入、共聚等方法,使其浓度变化平缓,改善其压缩性能。

表3 国内外主要公司生产的PBO纤维牌号及性能
Tab. 3 PBO fiber grades and properties produced by major domestic and foreign companies

Manufacturer	Trade names	Performance/(cN·dtex ⁻¹)		Elongation at break/%	Density/(g·cm ⁻³)
		Tensile strength	Modulus of elongation		
China Houdelen	XCHS-11	36	1 150	3.5	1.54
	XCHS-12	30	850	3.5	1.54
	XCHM	36	1 720	2.5	1.56
Japan Toyobo	Zylon®-AS	38	1 170	3.5	1.54
	Zylon®-HM	37	1 800	2.5	1.56

2.5 PIPD纤维

PIPD纤维(M5纤维)是一种新型液晶芳族杂环聚合物。PIPD纤维的分子结构呈现刚棒状,且具有良好的耐高温性能。其分子间N—H…O和O—H…N氢键连接在主链上形成了三维网络结构,使PIPD纤维具有较为优异的抗压和抗剪切性能^[35]。PIPD纤维大分子链上羟基的存在,使其与树脂基体结合能力较好,制备成的复合材料不会出现界面层^[36]。目前PIPD纤维仍处于理论研究和实验开发阶段,其在抗弹领域的应用具有广阔的前景。

3 抗弹用树脂基体

虽然纤维沿轴向拉伸强度极大,但沿径向面内拉伸强度很低,需要树脂对其力学性能进行改善^[37]。树脂基体可以起到固结纤维结构、传递和分散冲击载荷,以及确保纤维被充分拉伸变形的作用。因而树脂基体应具备适当模量和界面剥离强度、较好的黏结力和较大的断裂伸长率,应具备和纤维相适应的动态力学响应,从而使复合材料最大程度吸收弹体的冲击能量。当下常用抗弹树脂基体可分为热塑性树脂基体和热固性树脂基体^[38]。

3.1 热塑性树脂

选用热塑性树脂基体,可以得到弹道断裂韧性、抗损伤性和抗冲击性优异的复合材料^[39]。弹道领域常用的热塑性树脂有水性聚氨酯树脂(WPU)和聚烯烃树脂(PO)等。

3.1.1 WPU

聚氨酯(PUR)树脂是一种含有氨基甲酸酯基的聚合物, WPU则指的是以水代替传统PUR中的有机溶剂,将PUR溶于水形成的二元胶态体系。WPU相较于溶剂型PUR具备无毒和不污染环境的优点,柔性分子链的结构使其具有优异的弯曲、冲击性能、耐低温和稳定性能,在防弹芯片水性胶黏剂领域中得到广泛应用^[40]。何业茂等^[41]采用缠绕-复合-热压工艺得到了抗多发打击性能优异的单向正交结构的PE-UHMW/WPU复合材料,其被侵彻造成严重破坏的区域仅限于以受击点为圆心、半径35 mm的圆内。李焱等^[42]对WPU浸渍的PE-UHMW无纬布进行0°/90°铺层,再将织物热压得到靶板,测试了靶板的弹道性能。结果表明:含胶量23%~26%,面密度120~150 g/m²的靶板弹道性能最优。

3.1.2 PO

PO树脂是聚乙烯、聚丙烯及其共聚合的一类热塑性树脂的总称。相较于PUR而言,PO与PE-UHMW纤维的润湿性和界面性能更好,制得的防弹衣具备高防护性和轻量化的

特点,且其来源广泛造价低廉,在成本上具有显著优势^[43-44]。Russo等^[45]使用马来酸酐接枝回收的PO制得了复合材料板,并对其进行了抗冲击实验。通过扫描电子显微镜观察证实,以PO为基体的复合材料界面性能优异,有效阻止纤维断裂,且不存在典型的耗散损伤机制。Zamani等^[46]采用熔融复合和注射成型工艺得到了弹道性能优异的多壁碳纳米管(MWNTs)增强聚丙烯纳米复合材料,所得的靶板质轻且抗弹性能优异。

3.2 热固性树脂

选用热固性树脂基体,可以得到热性能、力学性能和刚度较好的复合材料,适用于作为结构/抗弹复合材料基体树脂使用。由于热固性树脂基体交联固化后形成三维网格结构,脆性较大,抗冲击和抗损伤的能力较差,需要对其进行改性^[39-40]。弹道领域常用的热固性树脂有EP、酚醛树脂(PF)和乙烯基酯树脂(VE)等。

3.2.1 EP

EP是一类分子中以脂肪族或芳香族为主链,含有两个或两个以上环氧基团的有机高分子化合物。其分子中羟基、环氧基、醚键等官能团的存在使得固化产物具有较好的物化性能^[47]。但其交联固化后形成三维网格结构,脆性大,抗冲击和抗损伤的能力差,常选用PUR、聚醚砜(PES)树脂和聚醚醚酮(PEEK)树脂等对其进行增强增韧改性^[48]。Lee等^[49]对PES颗粒进行超声处理后对EP进行改性。结果表明,适当添加的PES颗粒对EP的拉伸弹性模量、断裂强度和耐热性的提升起到显著作用。郭宇婷^[50]设计制备了端羟基聚氨酯(PUIC)和系列非异氰酸酯聚氨酯改性固化剂(NIPU)对EP进行改性。检测分析了改性后材料的黏接性能和力学性能。随着PUIC和NIPU的加入,断裂面由脆性断裂向韧性断裂过渡,增韧效果显著。

3.2.2 PF

PF是酚与醛在催化剂的作用下缩聚而成的一类树脂性聚合物。其具有高强、高耐热、高阻燃及性能稳定等特点。PF和EP一样,存在脆性高以及抗冲击性差等缺点。改性后的PF对纤维黏结能力好、界面剥离强度高,具有良好的弹道性能^[51-53]。许国娟等^[54]选用聚乙烯醇缩丁醛(PVB)等对PF进行增韧改性。研究发现,改性后材料在受到外力冲击时呈现出典型的韧性断裂,且采用15% PVB改性PF靶板的耐冲击能力最佳,其冲击点处的破坏呈现出一种纤维无规则发散形貌,界面为“浪花状”纹路,该断裂纹路可以显著降低裂纹的

扩展速度,使材料吸能效果达到最大,为23.71 J。

3.2.3 VE

VE是一类兼具环氧树脂和不饱和聚酯树脂优点的热固性树脂,在较低温度下即可固化,并且其固化产物具有良好的化学稳定性和柔韧性。VE分子中的仲羟基使其可以很好地与纤维黏结,从而得到抗弹性能很好的复合材料^[55-57]。李英建等^[58]制备了玄武岩纤维增强VE复合材料,发现用体积分数30%的纤维,188 g/m²面密度的织物的复合材料具有优异的抗弹性能。

4 纤维/树脂匹配性

纤维增强树脂基复合材料抗弹性能的优劣由多方面因素同时决定,包括纤维和树脂的性能、二者含量及其界面性能、来袭弹体的角度及其速度和靶板被固定的方式等。来袭弹体对靶板的侵彻是一个极快速的过程,这就要求纤维和树脂之间要有匹配的动态力学性能,即一致的动态模量、较短的层间响应时间和较大的损耗角正切值^[59]。

4.1 纤维性能

抗弹用高性能有机纤维以其高强、高模以及适当断裂伸长率的性能,在侵彻过程中作为力的主要承载者,可以快速传递应力波,从而使复合材料具有高能量吸收的能力。其防护性能和拉伸弹性模量、拉伸强度、断裂伸长率和纤维表面性能等因素有关,不同的纤维侵彻机理也不同。芳纶纤维呈轴向排列的有规则褶皱结构,侵彻过程中会沿纤维纵向撕裂吸收大量的动能,但其横向强度低,易受压缩和剪切力破坏失效;PE-UHMW纤维有高比强度、比模量和较高的断裂伸长率,可有效防护低速破片冲击及其二次杀伤效应。但其低熔点(约138℃)的特性使纤维受到子弹冲击破坏时会出现熔融破坏的现象,导致靶材失效。

Wu等^[60]对PE-UHMW纤维表面进行氧等离子体处理,并对改性纤维的物理化学性质进行分析。改性后纤维的拉伸强度提高了10.67%,抗冲击损伤投影面积降低了51.93%,凹坑深度降低了24%。改性复合材料形成了以纤维断裂为主的能量耗散模式,最大限度地发挥了纤维增强效应,提高了耐冲击性能。付杰等^[21]对两类不同拉伸强度、拉伸弹性模量和断裂伸长率的PE-UHMW材料叠层靶片进行了弹道实验。通过观察弹着点宏观形貌图对其抗弹机理进行分析可得,纤维的拉伸强度和拉伸弹性模量与其防弹性能成正比,一定范围内较低的断裂伸长率有利于减少背凸,提高材料的弹道性能。焦亚男等^[61]用不同强度和拉伸弹性模量的PE-UHMW纤维增强PO树脂,并通过装甲板侵彻破坏形貌分析其抗弹侵彻机制。结果表明,在一定范围内,复合材料的抗弹性能与纤维强度和拉伸弹性模量成正比。随着纤维拉伸弹性模量的增加,其对复合材料抗弹性能的影响逐渐减弱。

4.2 树脂性能

不同性能的树脂基体使纤维在来袭弹体作用下的受力状态不同,从而影响材料的破坏模式和防弹性能。低模量树脂的吸能性和减振效果良好;热塑性树脂具备高韧性和高抗

冲击性,其弹道防护能力良好。树脂的拉伸弹性模量、断裂伸长率和冲击强度等性能对复合材料的防护性能具有显著的影响。

Lin等^[62]合成了PUR改性EP树脂,降低了基体树脂的拉伸弹性模量,提高了其拉伸强度和冲击强度。将改性树脂与PE-UHMW纤维和杂环芳纶纤维进行复合后,测试了其力学性能和弹道性能。结果表明,改性树脂制得的复合材料比未改性树脂制得的复合材料在拉伸强度和耐冲击强度上有了显著提高。Han等^[63]通过调节硬段(HS)含量得到不同模量的PUR,和芳纶纤维制备得到了复合材料靶板并研究了其弹道机理。结果表明,随着HS含量的降低,层压板的防弹性能呈现S形增长趋势。较低模量的树脂基体有助于减少分层损伤,从而促使更多的纤维相互结合而吸收能量。此外,较低拉伸弹性模量的树脂基体可以降低复合材料的拉伸弹性模量,使基体在侵彻过程中与纤维一起变形,提高了弹道性能。

4.3 界面性能

纤维和树脂的界面性能是影响复合材料性能的重要因素,不同的界面结合强度会使复合材料产生不同的失效模式。随着界面结合强度的不断增强,复合材料的主要失效模式从纤维脱黏和分层裂纹到纤维拔出再到纤维断裂和基体变形。当界面结合强度较低时,纤维极易脱黏,且脱黏过程中吸收的能量有限,这也导致界面无法将应力波有效地传递开来,应力主要集中在受击点上,从而产生破坏和损伤;而当界面结合强度较高时,纤维形变吸能受限且织物之间很难进行分层,从而导致复合材料对能量吸收的能力减弱^[64]。因此要对纤维进行表面改性并调控出合适的界面结合强度,从而提高复合材料对能量吸收的能力,这对于材料抗弹性能的优化具有重要意义。

Rakeshkumar等^[65]在芳纶纤维和EP间使用聚乙二醇涂层纳米填料,增强了树脂与纤维之间的界面附着力。结果表明,随着树脂纤维间界面附着力的提高,复合材料的抗弹性能和能量吸收能力均得到显著提高。Pragati等^[66]采用等离子体处理和酸处理两种方法及其协同效应对PE-UHMW纤维进行改性。结果表明,采用等离子体处理的PE-UHMW纤维与树脂的润湿性最好,复合材料黏接剪切强度最高,抗弹性能最好。Raouf等^[67]使用硅烷表面改性氧化铝纳米颗粒对氧化PE-UHMW纤维表面进行改性,调控了纤维和树脂间的界面结合力,制备了一种新型高性能杂化材料并对其弹道冲击性能进行了表征。结果表明,质量分数为5%纳米氧化铝含量材料的能量吸收比未经处理的材料提升了14%。

4.4 纤维与树脂的含量和纤维混杂效应

组分比例不同的复合材料的各项力学性能会存在明显的差异。当使用单种纤维和树脂组成复合材料时,纤维与树脂的含量指的是纤维或树脂在复合材料中的成分占比。Shi等^[68]采用压缩树脂传递模塑法制备了3种纤维体积分数的对位芳纶增强PUR复合材料。当纤维体积分数由63.4%增

加到76.2%时,弹道极限速度、比能吸收、单位厚度能量吸收分别增加3.5%,18.5%和28.8%。Han等^[69]设计了不同基体含量的芳纶纤维增强聚碳酸酯复合材料,对其进行弹道冲击试验和数值模拟研究。结果表明,随着基体含量的增加,材料的弯曲强度、弯曲弹性模量和层间剪切强度均增加,但压缩强度降低,其主要弹道损伤机制从以分层破坏和拉伸破坏为主到以压剪破坏为主。

而当复合材料由两种或两种以上不同的纤维使用相同的树脂基质制成时,混杂纤维的性质对复合材料抗弹性能也具有很大的影响^[70]。Li等^[71]将芳纶纤维和PE-UHMW纤维以及少量的碳纤维进行混杂,得到了不同混杂比的混杂层合板,并对其进行了弹道冲击实验和仿真模拟研究。弹道冲击实验结果表明,芳纶纤维和PE-UHMW纤维的体积分数之比为3:2制得的层合板吸能效果最好。仿真模拟研究表明,材料性能和杂化率对应力波传播行为存在影响,导致冲击侵彻过程中产生了不同冲击损伤模式和能量吸收方式。

5 总结与展望

在纤维增强树脂基复合材料的研究中,不仅仅需要对纤维和树脂的改性研究,还需要研究纤维和树脂的匹配性,这涉及到纤维和树脂界面的微观结构以及弹丸冲击过程中的破坏机制等多方面综合作用。针对目前已经广泛生产运用的纤维和树脂,应加强多方面综合研究,将多种纤维和树脂结合起来,选择或改性得到最匹配的纤维-树脂体系。可以通过以下几个方面对匹配性进行深入研究。

(1)对于既定的纤维增强树脂基复合材料体系,应通过控制变量的方法,改变其内部某一组分含量或性能,探明参数数值-组织结构-防护性能关联机制,为解决匹配性瓶颈问题提供科学支撑。

(2)采用实验和模拟相结合的方法,用实验数据来印证模拟结果的正确性,再通过模拟软件探寻抗弹机理,着重研究侵彻过程中的应力分布云图,针对性改变各组分的性质,提高实验效率和研究深度。

(3)对匹配性研究建立标准,在此基础上推导完善经验公式,将大量数据整合,构建完整的匹配性研究体系,为将来更深层次的研究提供平台和基础研究。

参考文献

- [1] ABTEW A M, et al. Composite Structures, 2019, 223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110966.
- [2] 董彬,等.兵器材料科学与工程,2022,45(4):125-132.
DONG Bin, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2022, 45(4):125-132.
- [3] 贾子琪,等.化工新型材料,2023,51(4):77-81.
JIA Ziqi, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(4):77-81.
- [4] 李英建,等.工程塑料应用,2017,45(6):101-104.
LI Yingjian, et al. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6): 101-104.
- [5] 董彬,等.工程塑料应用,2020,48(9):150-154.
DONG Bin, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 150-154.
- [6] RACHEL Z. Effects of crimp and slip on laminar and woven fabrics subjected to ballistic impact[D]. New York: Cornell University, 2013.
- [7] 贾子琪.聚酰亚胺纤维增强热塑性树脂基复合材料制备及其防弹性能研究[D].北京:北京化工大学,2022.
JIA Ziqi. Preparation and bulletproof performance of polyimide fiber reinforced thermoplastic resin matrix composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [8] 周玄,等.爆炸与冲击,2024,44(1):49-61.
ZHOU Xuan, et al. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(1): 49-61.
- [9] 苏罗川,等.化工新型材料,2019,47(1):198-201.
SU Luochuan, et al. New Chemical Materials, 2019, 47(1): 198-201.
- [10] 张颖异,等.工程塑料应用,2015,43(10):137-140.
ZHANG Yinyi, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43 (10):137-140.
- [11] DHARANI K S, et al. Ballistic studies on synthetic fibre reinforced polymer composites and it's applications-A brief review [J]. Materials Today: Proceedings, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.03.679.
- [12] 董彬,等.复合材料科学与工程,2023(1):116-123.
DONG Bin, et al. Composites Science and Engineering, 2023(1): 116-123.
- [13] ZHANG Qianyu, et al. Composite Structures, 2021, 266. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113806.
- [14] 唐易.剪切增稠Kevlar纤维复合材料的力学性能研究[D].成都:成都大学,2023.
TANG Yi. Study on the mechanical properties of shear thickened Kevlar fiber composite materials[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.
- [15] XU Yaojie, et al. Composite Structures, 2022, 279. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114754.
- [16] TIKHONOV I, et al. Fibre Chemistry, 2013, 45(1):1-8.
- [17] 胡锦澜,等.工程塑料应用,2023,51(4):36-41.
HU Jinlan, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 36-41.
- [18] TALIB A A, et al. Materials Design, 2012, 35:12-19.
- [19] NITIN S M, et al. Engineering Failure Analysis, 2022, 142. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106845.
- [20] 解亚宸,等.兵工学报,2022,43(9):2 152-2 163.
XIE Yachen, et al. Acta Armamentarii, 2022, 43(9):2 152-2 163.
- [21] 付杰,等.兵工学报,2021,42(11):2 453-2 464.
FU Jie, et al. Acta Armamentarii, 2021, 42(11):2 453-2 464.
- [22] ZHANG Rui, et al. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 245. DOI:10.1016/j.ijmeosci.2023.108132.
- [23] CAO Mingjin, et al. Thin-Walled Structures, 2024, 196. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111438.
- [24] YANG Zhiming, et al. Composite Structures, 2019, 229. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111434.
- [25] CHANG Jingjing, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(34). DOI:10.1002/app.42474.
- [26] 尹宇航,等.复合材料学报,2022,39(12):5 699-5 710.
YIN Yuhang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39

- (12):5 699–5 710.
- [27] ALFURJAN M S, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19:2 930–2 959.
- [28] 贾文星,等. *复合材料学报*, 2023, 40(7):3 921–3 927.
- [29] JIA Wenxing, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(7):3 921–3 927.
- [30] Wang Boyao, et al. *High Performance Polymers*, 2020, 32(7): 842–848.
- [31] LIU Zheng, et al. *Composites Part A*, 2021, 150. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2021.106596.
- [32] LIU Zhide, et al. *Applied Surface Science*, 2020, 512. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145719.
- [33] SONG Bo, et al. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2021, 598:113–125.
- [34] 孙宗保,等. *工程塑料应用*, 2022, 50(6):111–116.
- [35] SUN Zongbao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(6):111–116.
- [36] TAMARGO M, et al. *Journal of Chromatography A*, 2020, 1634. DOI:10.1016/j.chroma.2020.461655.
- [37] 魏化震,等. *材料工程*, 2020, 48(8):25–32.
- [38] WEI Huazhen, et al. *Materials Engineering*, 2020, 48(8):25–32.
- [39] 毛娇. PBO/PIPD 复合纤维的制备及其性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [40] MAO Jiao. Preparation and properties of PBO/PIPD composite fibers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [41] ZANINI B M, et al. *Polymers*, 2023, 15(15). DOI: 10.3390/polym15153220.
- [42] VILIS J, et al. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2382(1). DOI:10.1088/1742-6596/2382/1/012024.
- [43] SUNDARAM S, et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2017, 17(6):1 260–1 267.
- [44] 何业茂,等. *复合材料学报*, 2022, 39(4):1 570–1 581.
- [45] HE Yemao, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(4): 1 570–1 581.
- [46] 何业茂,等. *复合材料学报*, 2021, 38(5):1 455–1 467.
- [47] HE Yemao, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1 455–1 467.
- [48] 李焱,等. *中国个体防护装备*, 2007(6):5–8.
- [49] LI Yan, et al. *China Personal Protective Equipment*, 2007(6):5–8.
- [50] WU Shuangyan, et al. *Results in Materials*, 2023, 18. DOI: 10.1016/J.RINMA.2023.100389.
- [51] PRAMITH P, et al. *Waste Management*, 2023, 171:393–400.
- [52] RUSSO P, et al. *Procedia Engineering*, 2014, 88:165–172.
- [53] ZAMANI M, et al. *Iranian polymer journal*, 2012, 21(12): 887–894.
- [54] DENG Yunfei, et al. *Polymer Composites*, 2022, 43(12): 8 956–8 973.
- [55] CAMPOSO A P, et al. *Composite Structures*, 2022, 282. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2021.115023.
- [56] LEE S, et al. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2016, 33:73–79.
- [57] 郭宇婷. 聚氨酯改性环氧树脂的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江省科学院石油化学研究院, 2023.
- [58] GUO Yuting. Research on polyurethane modified epoxy resin[D]. Harbin: Petrochemical Research Institute of Heilongjiang Academy of Sciences, 2023.
- [59] 张红颖,等. *工程塑料应用*, 2023, 51(6):151–156.
- [60] ZHANG Hongying, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(6):151–156.
- [61] RAMA G R, et al. *Defence Technology*, 2021, 17(5). DOI: 10.1016/J.DT.2021.08.014.
- [62] WANG Mengjie, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26:5 225–5 235.
- [63] 许国娟,等. *复合材料科学与工程*, 2022(4):104–110.
- [64] XU Guojuan, et al. *Composites Science and Engineering*, 2022(4): 104–110.
- [65] 何业茂. 高性能纤维增强树脂基复合材料防弹装甲的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [66] HE Yemao. Research on high-performance fiber reinforced resin matrix composite materials for bulletproof Armor[D]. Tianjin: Tiangong University, 2017.
- [67] ZHANG Xin, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 207. DOI:10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2022.110209.
- [68] PAGNONCELLI M, et al. *Journal of Composite Materials*, 2018, 52(3):289–299.
- [69] 李英建,等. *工程塑料应用*, 2006, 34(9):5–7.
- [70] LI Yingjian, et al. *Engineering Plastics Application*, 2006, 34(9): 5–7.
- [71] 陈强. 芳纶/酚醛复合材料防弹性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [72] CHEN Qiang. Research on the bulletproof performance of aramid/phenolic composite materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [73] WU Mengjin, et al. *Composite Structures*, 2022, 292. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.115663.
- [74] 焦亚男,等. *复合材料学报*, 2017, 34(9):1 960–1 972.
- [75] JIAO Yanan, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(9): 1 960–1 972.
- [76] LIN Shipin, et al. *European Polymer Journal*, 2007, 43:996–1 008.
- [77] HAN Feilong, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478. DOI:10.1016/J.CEJ.2023.146391.
- [78] ELAMVAZHUDI B, et al. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 135. DOI:10.1016/j.matpr.2023.02.135.
- [79] RAKESHKUMAR C, et al. *Materials Research Express*, 2023, 10(2). DOI:10.1088/2053-1591/ACBD1D.
- [80] PRAGATI B, et al. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(4):1 431–1 440.
- [81] RAOUF B, et al. *High Performance Polymers*, 2021, 33(4): 440–450.
- [82] SHI Xiaoping, et al. *Polymers*, 2023, 15(5). DOI: 10.3390/POLYM15051170.
- [83] HAN Feilong, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453. DOI:10.1016/J.CEJ.2022.139470.
- [84] 曹俊超,等. *复合材料学报*, 2022, 39(10):4 935–4 948.
- [85] CAO Junchao, et al. *Acta Armamentarii*, 2022, 39(10): 4 935–4 948.
- [86] LI Zhiyong, et al. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 258. DOI:10.1016/J.IJMECSCI.2023.108585.