

# 高分子复合材料在装甲防护领域的 研究与应用进展

Research and application progress of polymer  
composites in armor protection

魏化震, 钟蔚华, 于 广

(中国兵器工业集团 第五三研究所, 济南 250031)

WEI Hua-zhen, ZHONG Wei-hua, YU Guang

(Institute 53 of China Ordnance Industry Group, Jinan 250031, China)

**摘要:** 具有高比强度和高比吸能特点的纤维增强树脂基复合材料等非金属材料是装甲装备实现轻量化、强防护的关键材料。针对装甲装备防护构件对高性能抗弹材料的需求, 本文综述了高分子复合材料在装甲防护领域的技术进展、应用现状及发展趋势, 重点讨论了高性能纤维增强树脂基复合材料在复合装甲、结构装甲、多功能防护构件及聚合物透明材料在透明装甲上的应用, 对比分析了我国芳纶Ⅱ、芳纶Ⅲ、PBO、PIPD 等高级有机纤维的研发及应用现状, 提出依据纤维技术成熟度和制造成本不同实行系列化发展, 用于近、中、远期装甲装备防护结构的基本设想, 以及未来加强石墨烯抗弹材料、智能装甲材料等前沿新兴装甲防护材料及其机理研究, 建立完善材料评价方法、作用机制模型和数据库。

**关键词:** 纤维; 复合材料; 装甲防护; 透明装甲; 研究进展

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000207

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)08-0025-08

**Abstract:** Non-metallic materials such as fiber reinforced resin matrix composites with high specific strength and high specific energy absorption are the key material technologies to realize lightweight and strong protection of armor equipment. Aiming at the requirement of armored equipment protective components for high-performance ballistic materials, the technical progress, application status and development trend of polymer composite in the field of armor protection were summarized. The application of fiber reinforced resin matrix composites in composite armor, structural armor, multi-functional protective components and transparent polymer materials in transparent armor was discussed. Comparative analysis on the development and application status of high-grade organic fibers such as aramid Ⅱ, aramid Ⅲ, PBO, PIPD in China was carried out. A series of developments based on the maturity of fiber technology and different manufacturing costs, meeting the requirements of the near-term, mid-term, long-term armored equipment protection structure were proposed, and suggestions to strengthen the research on graphene ballistic materials, smart armor materials and other cutting-edge emerging protective materials and their mechanisms, and to establish and improve material evaluation methods, mechanism models and databases in the future were put forward.

**Key words:** fiber; composite material; armor protection; transparent armor; research progress

轻量化与强防护是装甲装备发展的永恒主题, 而同时又是一对相互制约的矛盾。纤维增强树脂基复合材料具有高比强度、高比模量、正向的复合效应、性能和功能的可设计性等特点。其密度只有装甲钢的  $1/8 \sim 1/4$ , 比强度却是装甲钢的  $4 \sim 10$  倍<sup>[1-2]</sup>。其防护机理不同于装甲钢和陶瓷依靠高硬度抵御弹丸侵彻, 而主要是能量吸收机制, 即通过材料塑性变形和断裂吸收能量<sup>[3]</sup>, 不仅具有良好的防穿甲性能, 还具有优异的防碎

片、防爆轰波性能。因此, 将高性能纤维抗弹复合材料用于装甲防护, 能够大幅度地减轻装甲质量, 或在相同质量条件下提供更高的抗弹性能, 是解决装甲装备轻量化与强防护矛盾的关键材料技术<sup>[4-5]</sup>。国外从 20 世纪 60 年代起已将高性能纤维及其抗弹复合材料应用于主战坦克的复合装甲结构中, 实现了同等防护能力下的减重 ( $30\% \sim 50\%$ ), 目前已广泛应用于坦克装甲车辆、舰船、飞机、武装直升机及单兵防护。本文重点

介绍了各类纤维增强树脂基复合材料在复合装甲、结构装甲、多功能防护构件上的研究与应用进展,以及具有类似高吸能特点的高分子聚合物材料在透明装甲上的研究状况。

1 装甲防护用纤维复合材料研究与应用进展

纤维复合材料是采用高性能纤维织物或混杂纤维织物,在一定的工艺条件下与树脂基体复合而制得的具有较高防弹性能、能满足特定防护需求的材料<sup>[6]</sup>。其抗弹性能一般用单位面密度复合材料对特定弹种(或碎片模拟弹)的能量吸收值来表征,通常简称为比吸能(specific energy absorption,SEA)。

目前用于制备高性能抗弹复合材料的增强纤维主要有玻璃纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、玄武岩纤维、聚对苯撑苯并双噁唑(poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole,PBO)纤维等。所用树脂基体可以是热固性树脂,也可以是热塑性弹性体,其中使用较多的是聚烯烃树脂、改性酚醛树脂、乙烯基树脂、聚酯树脂等。也可几种树脂基体混合使用,以得到最佳的防护性能<sup>[7-8]</sup>。

与金属防护材料相比,纤维复合材料具有以下显著优点:(1)密度低、比强度和比模量高。高性能纤维抗弹复合材料的密度一般为 0.9~2.0 g/cm<sup>3</sup>,是装甲钢的 1/8~1/4,是铝合金的 1/3~1/2,其比强度是装甲钢的 4~10 倍,比模量是装甲钢的 3~5 倍<sup>[9-10]</sup>。(2)可设计性强。通过改变增强纤维、树脂基体种类及纤维含量、纤维集合形式及排列方式、铺层结构等材料 and 结构参数,高性能抗弹复合材料可以满足复合材料结构和性能的各种设计要求。因此,在一定的约束条件下,可以设计得到最佳强度和抗弹性能的纤维复合材料,这是单一均质材料无法比拟的。(3)良好的工艺性。抗弹复合材料的制备工艺简单,适合于一次整体成型,一般不需要焊、铆、切割等二次加工。同时,复合材料具有良好的挠曲性能,易加工成各种形状复杂的构件。

根据纤维复合材料采用的增强纤维种类不同,目前装甲防护领域常用的纤维复合材料可分为玻璃纤维复合材料、芳纶纤维复合材料、超高分子量聚乙烯纤维复合材料、PBO 纤维复合材料、混杂纤维复合材料等。

1.1 玻璃纤维复合材料

玻璃纤维复合材料是第一代装甲防护用抗弹复合材料,其价格比较低廉、抗弹性能良好<sup>[11]</sup>,并兼具优良的结构性能。对同一口径、同一种类的弹丸,玻璃纤维复合装甲的抗弹能力可达到等重薄钢板的 3 倍以上,

并具有使破甲弹射流弯曲、不规则断裂失稳的能力。

由于玻璃纤维复合材料具有很好的性价比,因而在装甲防护中得到大量的应用,其应用主要分为两个方面:一方面,作为非金属夹层材料与金属装甲、抗弹陶瓷组成复合装甲结构,用于装甲车辆的主装甲和附加装甲;另一方面,由于玻璃纤维复合材料具有较好的结构强度,而且生产工艺简单、成本较低,因此越来越多地作为结构装甲材料用于装甲车体及结构件的制造。

目前用于玻璃纤维复合材料的玻璃纤维主要包括高强玻璃纤维和无碱玻璃纤维(E 玻纤)两种<sup>[12]</sup>,其中高强玻璃纤维有美国的 S-2 玻纤、日本的“T”玻纤、俄罗斯的“BMJI”玻纤、法国的 R 玻纤和国产的 HS 系列玻纤(见表 1<sup>[13]</sup>)。

表 1 玻璃纤维的性能<sup>[13]</sup>  
Table 1 Properties of glass fiber<sup>[13]</sup>

Fiber type	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
S-2	4500-4890	84.7-86.9
R	4400	83.8
T	4650	84.3
BMJI	4500-5000	95
HS-2	4020	82.9
HS-4	4600	86.4
E glass fiber	3445	72

在复合装甲应用方面,20 世纪 60 年代初苏联生产的 T-64 主战坦克最早将玻璃纤维复合材料用于装甲防护,该坦克的炮塔和车体采用了“装甲钢+玻璃纤维复合材料+装甲钢”的“三明治”复合装甲结构,成为世界上第一款全面使用复合装甲的主战坦克。后来生产的 T-72,T-80 和 T-95 等系列主战坦克的复合装甲结构中也都延用高强玻纤作为装甲夹层防护材料。美国 M113 装甲输送车采用 S-2 玻纤复合材料制备防碎片内衬,能够显著降低穿甲弹、破甲弹击中车辆后产生崩落碎片的数量和散射角,减少对车内乘员和设备的伤害。

在结构装甲应用方面,美国在 20 世纪 80 年代初研制成功了以 S-2 高强玻璃纤维增强的树脂基复合材料,证明该材料具有优良的比承载性能、比防护性能,可以作为轻型装甲车辆的基体装甲结构。并且美国形成了该材料的军用标准:MIL 46197,后续对该标准也进行了修改和完善(MIL 46197A)。该类型玻纤复合材料已用于美国“悍马”高机动多用途轮式车辆、CAV-1000 装甲车的车身装甲。

美国和英国较早开始了将玻纤复合材料应用于复合材料炮塔和复合材料战车的技术研究。美国陆军材料与力学研究中心(AMMRC)最早用玻璃纤维复合材

料制造炮塔结构件。复合材料制造的炮塔不仅满足了结构强度和防弹性能要求,而且还使车体的质量减轻了约 12.5%。此后,美国的联合防务公司分别于 1989 年和 1997 年制造了“布雷德利”复合装甲型步兵战车和复合装甲型装甲车(CAV),均采用 S-2 型高强玻纤和聚酯树脂模压工艺制备结构装甲材料,并在车辆外侧可再镶嵌高硬度陶瓷以提高装甲防护能力。2000 年,原英国防务鉴定及研究局(DERA)和维科斯防务系统公司合作,也制造出了先进复合材料装甲试验车,其车体采用 E 玻纤增强的树脂基复合材料,车体前部和两侧附加被动式装甲,进一步提高了防护水平。

1.2 芳纶纤维复合材料

芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维复合材料是第二代装甲防护用抗弹复合材料,与玻璃纤维复合材料相比,其材料密度进一步降低,而防护性能得到较大提升<sup>[14]</sup>,目前主要用于复合装甲和多功能内衬。芳

纶纤维包括对位芳纶纤维和间位芳纶纤维两大类,其中在抗弹复合材料领域应用的主要是对位芳纶纤维<sup>[15]</sup>。对位芳纶纤维是对位芳香族聚酰胺纤维的简称,它是美国杜邦公司在 20 世纪 70 年代开发的一种高性能纤维材料<sup>[16]</sup>。目前工业化生产的对位芳纶纤维主要是聚对苯二甲酰对苯二胺(poly(paraphenyleneterephthalamide),PPTA)纤维。对位芳纶纤维具有刚性棒状的分子结构和高度取向的分子链结构,赋予纤维高强度、高模量、耐高温特性,同时还具有耐化学腐蚀、耐疲劳等优点,是一种理想的抗弹材料<sup>[17]</sup>。

目前国外工业化生产的对位芳纶纤维主要有美国杜邦公司的 Kevlar 纤维、日本帝人公司的 Twaron 纤维和 Technora 纤维、韩国科隆公司的 HF 系列纤维等(见表 2<sup>[18]</sup>)。根据纤维的力学特性不同,对位芳纶纤维可分为普通型、高强型、高模型 3 类,其中适用于抗弹防护领域的主要是高强型对位芳纶纤维。

表 2 国外对位芳纶纤维产品性能<sup>[18]</sup>  
Table 2 Performance of foreign para-aramid fiber products<sup>[18]</sup>

Fiber product		Feature	Tensile strength/ (cN · dtex <sup>-1</sup> )	Tensile modulus/ GPa	Elongation at break/%
DuPont	Kevlar29	Ordinary	20.3	74	3.6
	Kevlar49	High modulus	19.3	113	2.4
	Kevlar129	High strength	23.4	99	3.3
	Kevlar149	Ultra high modulus	15.9	143	1.5
Teijin	Twaron standard	Ordinary	19.5	70	3.6
	Twaron CT	High strength	23.0	90	3.3
	Twaron HM	High modulus	19.5	121	2.1
KOLON	HF200	High strength	20.3	91	3.2
	HF300	High modulus	19.4	118	2.5

美国将芳纶纤维复合材料层压板与陶瓷或钢板复合,用作坦克装甲,如美国 M1 主战坦克采用“钢+Kevlar 芳纶复合材料+钢”结构的复合装甲,能够防护中子弹以及破甲厚度约为 700 mm 的反坦克导弹,还能减少因被破甲弹击中而在驾驶舱内形成的瞬时压力效应。在随后的改进型坦克 M1A1 上的主装甲也采用 Kevlar 芳纶复合材料制造。

日本 90 式坦克采用的多层复合装甲是采用冷轧含钛高强度钢的两层结构,中间使用了芳纶复合材料/蜂窝状陶瓷复合的夹层材料,其抗弹能力与美国 M1A1 主战坦克相当。日本 88 式机械化步兵战车的炮塔也采用了由碳纤维和芳纶复合材料制成的复合装甲结构。

美国 M1A2 主战坦克、M2/M3 布雷德利战车、M113A3 装甲输送车,在其车体和炮塔的乘员舱、战斗

舱内壁安装了芳纶纤维增强酚醛树脂复合材料内衬,可对破甲弹、穿甲弹和杀伤弹的冲击和侵彻提供后效装甲防护,其厚度为 20 mm,面密度为 25.4 kg/m<sup>2</sup>,弹道极限速率 V<sub>50</sub> 达到 860 m/s,冲击波衰减率达到 50%,中子衰减系数为 6.5,防“陶”式破甲弹二次崩落碎片锥角为 50°,防脱壳穿甲弹崩落碎片锥角为 20°。俄 BTR-90 装甲车、瑞士“锯脂鲤”Ⅲ装甲车和“锯脂鲤”Ⅳ基型车以及瑞典 CV90 履带式装甲战车族,也采用芳纶复合材料作为防崩落衬层。此外,美国伯克级驱逐舰使用了近 70 t Kevlar 材料用于装甲防护,法国航母戴高乐号的关键部位、丹麦的 SF300 多功能舰艇也敷设了 Kevlar 装甲。

1.3 超高分子量聚乙烯纤维复合材料

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维在所有高强、高模纤维中密度最小<sup>[19]</sup>,与芳纶纤维相比,超高分

子量聚乙烯纤维具有更高的强度、模量、比强度、比模量及声波传递速度<sup>[20-21]</sup>,其耐气候老化性也优于芳纶纤维,并且不吸水、不吸潮,因而对环境的适应性更好<sup>[22-23]</sup>。缺点是纤维的耐热性低和阻燃性较差,最高应用温度不超过 120 ℃,极限氧指数只有 17。目前国外工业化生产的超高分子量聚乙烯纤维主要有荷兰 DSM 公司的“Dyneema”纤维和美国 Honeywell 公司的 Spectra 纤维等,主要性能见表 3<sup>[18]</sup>。

表 3 国外超高分子量聚乙烯纤维性能<sup>[18]</sup>  
Table 3 Properties of foreign ultra high molecular mass polyethylene fibers<sup>[18]</sup>

Fiber product		Tensile strength/ (cN•dtex <sup>-1</sup> )	Tensile modulus/ GPa	Elongation at break/ %
DSM	Dyneema SK60	28	88	3.5
	Dyneema SK65	31	94	3.6
	Dyneema SK66	33	98	3.7
	Dyneema SK75	35	107	3.8
	Dyneema SK76	37	116	3.8
	Dyneema SK77	40	136	3.8
Honeywell	Spectra 900	27	73-79	3.6-3.9
	Spectra 1000	32	97-113	2.9-3.5
	Spectra 2000	34	116	2.8-2.9

德国“豹”Ⅱ A5 主战坦克采用超高分子量聚乙烯纤维复合材料制备炮塔内的多功能内衬,可明显减少装甲被击穿后的弹片数量,并具有隔热、降噪效应。超高分子量聚乙烯纤维复合材料厚度为 20 mm,防碎片极限穿透速度可达 1200 m/s,爆炸冲击波衰减率大于 50%,中子衰减系数大于 7.0,导热系数小于 500 mW/(m·K)。

1.4 PBO 纤维复合材料

聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维特有的由苯环和芳杂环组成的刚棒形分子结构和高度取向的分子链结构使纤维具有极佳的力学性能<sup>[24-25]</sup>,并具有很好的耐热性能和阻燃性能,因此被认为是目前强度最高、综合性能最好的高性能有机纤维<sup>[26-27]</sup>。

PBO 纤维突出的性能优势主要体现在:(1)力学性能高,强度达 5.8 GPa,模量达 280 GPa,为有机纤维中最高的<sup>[28]</sup>;(2)耐热性能好,热分解温度达到 650 ℃,是有机纤维中最高的,其工作温度比芳纶纤维高 100 ℃左右<sup>[29]</sup>;(3)阻燃性能好,极限氧指数为 68(芳纶纤维氧指数仅为 29)。

PBO 纤维突出的高强、高韧性能使其具有极佳的能量吸收特性,同时其微纤化结构和较低的界面粘接性能使其复合材料可通过原纤化和分层变形进一步吸收冲击能量<sup>[30]</sup>,因此特别适合用于防护领域的抗弹、

抗冲击材料。在相同的条件下,PBO 纤维复合材料的最大冲击载荷和能量吸收远高于芳纶和碳纤维:PBO 纤维复合材料的最大冲击载荷可达 3.5 kN,能量吸收达 20 J;T300 碳纤维复合材料的最大冲击载荷为 1 kN,能量吸收约为 5 J;芳纶复合材料的最大冲击载荷约为 1.3 kN,能量吸收略大于碳纤维<sup>[31-32]</sup>。

美国、瑞典等国对 PBO 纤维在装甲防护领域的应用进行了研究,并已得到一定应用。美国国防部发展中科技与技术清单(DSTL)中把高性能 PBO 纤维在聚合物复合装甲材料系统中的应用列为关键材料技术,用于研制面密度为 14.7~19.5 kg/m<sup>2</sup>、具有抗多发弹能力的超轻装甲,以大幅减轻装甲系统质量。该超轻装甲可用于地面车辆、飞机的防护及人体防护,并可作为附加装甲用于保护重要装备。

1.5 混杂纤维复合材料

混杂纤维复合材料可以弥补单一纤维材料的性能缺陷,使复合材料具有良好的综合性能<sup>[33]</sup>,同时,可以合理利用价格昂贵的纤维和低成本的纤维混杂,增强同一树脂基体,使材料成本降低,更具有实用性<sup>[34-35]</sup>。为达到最佳的混杂效果,混杂方式可以采用层内混杂、层间混杂、层内混杂并层间混杂等。

瑞典防务研究所采用 PBO 纤维与碳纤维混杂,制备兼具抗弹和结构性能的结构轻质装甲,研究了不同纤维配比、树脂基体和排列结构等因素对混杂装甲材料抗弹及结构性能的影响,在此基础上分别采用 ZYLON AS 织物/环氧树脂和真空 RTM(resin transfer molding)工艺、ZYLON AS 织物/聚乙烯醇缩丁醛增韧酚醛树脂膜和模压工艺两条技术路线制备了热固性、热塑性结构装甲材料,可用于装甲车辆、战斗机和战斗舰船<sup>[36]</sup>。

2 聚合物透明装甲材料研究与应用进展

透明装甲是指兼具透光、透像功能和一定防弹能力的透明防护材料/结构,主要用于各种窗口和观瞄部位的防护。它最早应用于军用飞机的前风挡及尾舱观察窗,后来逐渐发展到各种军用设施和装甲车辆上。除少数低级别防护可使用单层透明聚合物材料外,透明装甲一般采用多层叠合结构以提高抗弹性能,一般由面板、背板以及起粘接作用的中间层组成。其防弹原理是通过高硬度、高强度的面板受冲击后破裂来吸收一部分入射能量,同时击碎子弹弹头或使其变形,降低穿透能力,继而通过中间层和背板的变形及黏滞作用来吸收剩余能量,防止穿透并避免产生崩落碎片,从而达到防护的目的。与传统装甲不

同,透明装甲选用的材料必须对可见光透明,这就明显限制了材料选择的范围。目前透明装甲使用的防护材料主要包括聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)、聚氨酯(PU)等有机聚合物透明材料,以及浮法玻璃、透明陶瓷等无机透明材料,使用的夹层粘接材料主要包括聚乙烯醇缩丁醛、聚氨酯、有机硅、丙烯酸酯等。

根据材料的物理特性和热-力特性的不同,聚合物透明材料可分为热塑性聚合物和热固性聚合物两大类。其中热塑性聚合物材料是线状或分支聚合物,在加热时变软且可塑,如聚甲基丙烯酸甲酯、聚碳酸酯等;而热固性聚合物材料在加热后即硬化,且具有能限制流动的三维网络结构,如聚氨酯、CR-39 烯丙基二乙二醇碳酸酯等。和无机玻璃不同,有机透明材料的物理属性会随着温度和形变速率的不同而产生很大变化。一般来说,聚合物的材料特性在加热到玻璃化温度以上时,会从刚硬的玻璃态转变成缠卷的类似橡胶的结构,该临界温度意味着这些有机透明材料的使用温度达到上限。

2.1 聚甲基丙烯酸甲酯透明装甲材料

聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)即有机玻璃,作为一

种热塑性材料,它比大多数种类的无机玻璃拥有更好的抗冲击性<sup>[37]</sup>。有机玻璃在军事领域的应用可以追溯到第二次世界大战,它是当时飞机上轻型顶盖罩和座舱盖的唯一可选材料。

有机玻璃材料应用于透明装甲,一般采用浇铸或挤压工艺制成片状薄板,随后对薄板进行加热形成各种复杂的制品形状,也可采用整体浇铸的方法来制备较厚的板材<sup>[38]</sup>。但整体浇铸的有机玻璃十分易碎,在某些抗冲击能力要求严苛的领域中,新型聚碳酸酯材料已经替代了有机玻璃。

2.2 聚碳酸酯透明装甲材料

聚碳酸酯(PC)的冲击强度是有机玻璃的 20 倍,而且比有机玻璃拥有更高的玻璃化温度和更强的耐火性,因而可更好地满足透明装甲提高防弹性能和减重的要求<sup>[39-40]</sup>。表 4 是聚碳酸酯材料和有机玻璃材料的防弹性能对比(以钢珠为子弹)。可以看出,3 mm 厚的聚碳酸酯材料和 10 mm 厚的有机玻璃材料的防弹性能基本相当,同时聚碳酸酯中弹后只是局部产生直径小于 10 mm 的“鼓包”变形,而其他部分无任何损伤,具有典型的韧性材料特征;而有机玻璃有大面积的裂纹产生,并有碎片溅出,具有脆性破坏特征。

表 4 PC 与 PMMA 的防弹性能比较

Table 4 Comparison of bulletproof performance between PC and PMMA

Material	Thickness/mm	Ballistic limit velocity $V_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Shot in the state	Damage area diameter/ mm
PC	3	240	The bullet place produces "bulge", without crack and fragment	<10
PMMA	10	250	Large area of cracks and debris spatter	>50

聚碳酸酯是目前制造透明装甲最常用的有机透明材料,它易于塑型或铸模,且具有极强的防小碎片能力<sup>[41]</sup>。在航空航天领域,聚碳酸酯被用于制备飞机的座舱罩和挡风玻璃<sup>[42]</sup>。美国空军 F-111 战斗机采用 Sierracin 公司生产的两层聚碳酸酯层合成的 F-16 透明件,其表面采用先进的涂层保护,可耐 1.82 kg 飞鸟 1000 km/h 的撞击并具有最低的寿命周期成本。美国 Lucas Aero-space 中心采用丙烯酸材料将聚碳酸酯包夹,能明显提高座舱的耐撞击程度。Wang 等将聚碳酸酯、丙烯酸、聚亚胺酯和硅树脂等材料压合在一起,作为航空玻璃的材料<sup>[43]</sup>。同时,在面临更高防护等级威胁时,聚碳酸酯需要与无机玻璃、透明陶瓷等无机透明材料组合,用作透明装甲的背板材料。

2.3 聚氨酯透明装甲材料

聚氨酯(PU)分子由硬、软段组成,可以通过调节硬、软段的组成或结构对聚氨酯的特性进行调整,以满

足不同的应用要求<sup>[44]</sup>。近年来,聚氨酯材料在透明装甲上的应用越来越广泛。由它制成的产品既可以是坚硬易碎的(用于面板),也可以是柔软易曲的(用于背板)。对一种聚氨酯面罩进行的弹道实验结果显示,在同等质量的基础上,它比由聚碳酸酯和 PMMA 制成的面罩的防弹性能要强得多;同时,多种透明的聚氨酯已经表现出比聚碳酸酯更好的耐折能力,同时还具有更强的耐久性和抗划伤能力<sup>[45]</sup>。热固性聚氨酯可以通过浇铸或液体注模法进行加工。即使将其制成很厚的形状时,它仍具有很强的透光性和抗冲击能力。

3 结束语

从装甲防护领域高分子复合材料技术发展及装备应用情况来看,具有高比强度、高吸能特点的高分子复合材料已成为装甲装备实现轻量化、强防护的关键材

料,在装甲车辆、舰船、飞机等的复合装甲、多功能内衬、透明装甲上得到了广泛的应用,并呈规范化、系列化发展趋势。

综合国外非金属装甲防护材料研究与应用情况分析,结合我国装甲装备发展需求,提出以下发展建议:

(1)加快 K129 和 KM2 级芳纶 II 纤维、芳纶 III 纤维、PBO 纤维、PIPD 纤维等高级有机纤维研发进程,并相应开展其抗弹复合材料应用研究。

芳纶 II、芳纶 III、PBO、PIPD 等有机纤维属于不同代次的抗弹复合材料增强纤维,其目前国内技术成熟度和制造成本差异很大,可分别满足不同代次装备和防护部位的需求:芳纶抗弹复合材料已大量应用,抗弹纤维主要采用国内已经批产、技术成熟的对位芳纶 1414,性能相当于杜邦的 K29 级;K129 级芳纶 II 纤维,国内技术已基本成熟,其应用研究和验证工作尚需进一步开展;KM2 级芳纶纤维具有高强、高韧特性,其拉伸强度大于 3.4 GPa,伸长率大于 4.3%,在芳纶纤维中伸长率最高,具有很好的吸能性,是目前国外人体防护和先进装甲装备重点应用的芳纶纤维,国内目前正在进行研制;芳纶 III 纤维的抗弹性能优于芳纶 II 纤维,但成本较高,急须开展工程化研究;PBO 纤维是目前世界上最为先进的抗弹复合材料增强纤维,国内尚处于小指试制阶段;PIPD 纤维(即 M5 纤维)是继 PBO 纤维之后更新一代的有机纤维,既具有与 PBO 纤维相类似的高力学性能、高耐热性能,又由于其分子间和分子内的  $N-H\cdots O$  和  $O-H\cdots N$  氢键结构,具有更优异的抗压缩性能、抗剪切性能和与树脂的黏结性能,使其更容易与各种树脂粘接,无须进行表面处理,因此在结构/抗弹复合材料领域具有更为广阔的应用前景,目前国内仅处于探索研究阶段。

(2)进一步开展兼具抗弹/结构/隐身功能的结构装甲复合材料及其在大型承载构件上的应用研究,促进装备轻量化和全频谱防护的跨越发展。

结构装甲复合材料进一步的发展体现在 3 个方面:1)研发更低黏度、更高成型效率的低成本抗弹树脂和配套的高效成型工艺,进一步降低结构装甲复合材料成本,提高生产效率,满足装备批量应用的成本要求;2)混杂使用更高防护性能和力学性能的芳纶 III 纤维和 PBO 纤维复合材料等,不断提高材料的减重率,改善综合性能;3)开展大型复合材料构件的结构/功能一体化设计和成型技术研究。

(3)加强前沿与新兴装甲防护材料技术研究,为未来发展提供技术支撑,如:石墨烯等纳米增强树脂基复合材料,对来袭弹丸具有探测/分析、主动响应、抗侵略、自修复功能的智能装甲材料,能源/结构一体化装

甲复合材料、可见光/近红外/热红外隐身材料于一体的未来士兵柔性防护材料,复合增韧型仿生装甲材料,分子抗弹材料,强冲击条件下具有泊松比特性的复合材料,高冲击韧性聚合物柔性透明装甲材料等。

(4)加强先进复合材料用于防护单元中与各类毁伤单元的相互作用机制和防护性能、毁伤性能的研究,建立完善评价方法、作用机制模型和数据库。

## 参考文献

- [1] BENZAIT Z, RABZON L. A review of recent research on materials used in polymer-matrix composites for body armor application[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(23): 3241-3263.
- [2] 高华,熊超,殷军辉.纤维增强复合材料防弹装甲抗侵略性能研究[J]. 飞航导弹, 2018(2): 91-94.  
GAO H, XIONG C, YIN J H. Research on penetration resistance of fiber reinforced composite bulletproof armor[J]. Air Missile, 2018(2): 91-94.
- [3] 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 Y N, HE Y M, ZHOU Q, et al. Factors influencing the bulletproof performance of fiber-reinforced resin matrix composites and failure mechanism[J]. Journal of Composites, 2017, 34(9): 1960-1972.
- [4] 周亮,肖精华,黄叶萍.复合装甲材料研究新动向[J]. 国防技术基础, 2017(1): 29-33.  
ZHOU L, XIAO J H, HUANG Y P. New trends in composite armor materials research[J]. Foundation of National Defense Technology, 2017(1): 29-33.
- [5] 曹凌宇,罗兴柏,刘国庆,等.国外新型装甲防护技术综述[J]. 飞航导弹, 2018(9): 74-78.  
CAO L Y, LUO X B, LIU G Q, et al. Review of new foreign armored protection technology[J]. Air Missile, 2018(9): 74-78.
- [6] LIU X, LI M, LI X, et al. Ballistic performance of UHMWPE fabrics/EAMS hybrid panel[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53(10): 7357-7371.
- [7] SHEN Z, HU D, ZHANG Y, et al. Continuous twice-impacts analysis of UHMWPE laminate fixed with bolted joints[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109: 293-301.
- [8] DOGAN A, ARIKAN V. Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 127: 63-69.
- [9] 徐鲁杰,李想,马武伟.纤维增强复合材料装甲防护性能影响因素分析研究[J]. 材料开发与应用, 2017, 32(2): 47-53.  
XU L J, LI X, MA W W. Analysis and research on influencing factors of armor protection performance of fiber reinforced composites[J]. Materials Development and Application, 2017, 32(2): 47-53.
- [10] BOGETTI T A, WALTER M, STANISZEWSKI J, et al. Interlaminar shear characterization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 98: 105-115.
- [11] NAGHIZADEH Z, FAEZIPOUR M, POL M H, et al. Improve-

- ment in impact resistance performance of glass/epoxy composite through carbon nanotubes and silica nanoparticles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2018, 232(9): 785-799.
- [12] BALALI E, KORDANI N, SADOUGH V A. Response of glass fiber-reinforced hybrid shear thickening fluid (STF) under low-velocity impact[J]. The Journal of the Textile Institute, 2017, 108(3): 376-384.
- [13] 刘建勋, 祖群, 朱建勋, 等. 新型高强度玻璃纤维制备及其增强环氧树脂性能[J]. 航空制造技术, 2010(17): 75-77.  
LIU J X, ZU Q, ZHU J X, et al. Preparation of new high-strength glass fiber and performance of reinforced epoxy resin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 75-77.
- [14] 陈虹, 虎龙, 艾青松, 等. 芳纶复合材料在防弹车上的应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2017(2): 5-8.  
CHEN H, HU L, AI Q S, et al. Research on the application of aramid fiber composites in bulletproof vehicles[J]. China Individual Protective Equipment, 2017(2): 5-8.
- [15] BANDARU A K, AHMAD S, BHATNAGAR N. Ballistic performance of hybrid thermoplastic composite armors reinforced with Kevlar and basalt fabrics[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 97: 151-165.
- [16] 李亚锋, 礼嵩明, 黑艳伟, 等. 太阳辐照对芳纶纤维及其复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(4): 39-46.  
LI Y F, LI S M, HEI Y W, et al. Effects of solar irradiation on the properties of aramid fiber and its composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(4): 39-46.
- [17] XU C, WANG Y, WU J, et al. Anti-impact response of Kevlar sandwich structure with silly putty core[J]. Composites Science and Technology, 2017, 153: 168-177.
- [18] VALLEE P, ENG P. Armour system literature and industry survey for ballistic protection[M]. Quebec, Canada: CMC, 1998: 50-60.
- [19] ROY R, LAHA A, AWASTHI N, et al. Multi layered natural rubber coated woven P-aramid and UHMWPE fabric composites for soft body armor application[J]. Polymer Composites, 2018, 39(10): 3636-3644.
- [20] Da SILVA F A B-H, JUNIOR L, PEREIRAÉ, et al. Response to ballistic impact of alumina-UHMWPE composites[J]. Materials Research, 2018, 21(5): 131-144.
- [21] ZHOU Y, LI G, FAN Q, et al. Study on protection mechanism of 30CrMnMo-UHMWPE composite armor[J]. Materials, 2017, 10(4): 405-416.
- [22] PRIYANKA P, DIXIT A, MALI H S. High-strength hybrid textile composites with carbon, Kevlar, and E-glass fibers for impact-resistant structures. a review[J]. Mechanics of Composite Materials, 2017, 53(5): 685-704.
- [23] HU D, ZHANG Y, SHEN Z, et al. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 10368-10376.
- [24] LAI X, GUO R, XIAO H, et al. Flexible conductive copper/reduced graphene oxide coated PBO fibers modified with poly (dopamine)[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 1169-1176.
- [25] LAI X, GUO R, LAN J, et al. Flexible reduced graphene oxide/electroless copper plated poly (benzo)-benzimidazole fibers with electrical conductivity and corrosion resistance[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(3): 1984-1992.
- [26] HAO W Z, ZHANG X J, TIAN Y H. Thermal, mechanical, and microstructural study of PBO fiber during carbonization[J]. Materials, 2019, 12(4): 608.
- [27] LI M, DONG J, ZHENG S, et al. Fabrication of poly (bis-benzimidazole imide) fibers with enhanced mechanical properties and high limit oxygen indexes[J]. Polymer Testing, 2019, 76: 222-231.
- [28] TANG Y S, DONG W C, TANG L, et al. Fabrication and investigations on the polydopamine/KH-560 functionalized PBO fibers/cyanate ester wave-transparent composites[J]. Composites Communications, 2018, 8: 36-41.
- [29] LUO L, HONG D, ZHANG L, et al. Surface modification of PBO fibers by direct fluorination and corresponding chemical reaction mechanism[J]. Composites Science and Technology, 2018, 165: 106-114.
- [30] HU Z, SHAO Q, HUANG Y, et al. Light triggered interfacial damage self-healing of poly (p-phenylene benzobisoxazole) fiber composites[J]. Nanotechnology, 2018, 29(18): 526-529.
- [31] LI J, WANG W, ZHAO L, et al. *In situ* synthesis of PBO- $\alpha$ -(amino phthalocyanine copper) composite fiber with excellent UV-resistance and tensile strength[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(48): 46870.
- [32] 何焯, 肖建文, 姚灿威, 等. 碳纤维表面物理结构对复合材料界面剪切强度的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(2): 146-152.  
HE Y, XIAO J W, YAO Z W, et al. Effects of surface physical structure of carbon fiber on interfacial shear strength of composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(2): 146-152.
- [33] YANG Y, CHEN X. Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design[J]. Composite Structures, 2017, 174: 233-243.
- [34] HARO E E, ODESHI A G, SZPUNAR J A. The effects of micro- and nano-fillers' additions on the dynamic impact response of hybrid composite armors made of HDPE reinforced with Kevlar short fibers[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2018, 57(7): 609-624.
- [35] SAFRI S N A, SULTAN M T H, JAWAID M, et al. Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 133: 112-121.
- [36] LARSSON F, SVENSSON L. Carbon, polyethylene and PBO hybrid fibre composites for structural lightweight armour[J]. Composites, Part A, 2002, 33: 221-231.
- [37] SHIH Y F, CHOU M Y, LIAN H Y, et al. Highly transparent and impact-resistant PMMA nanocomposites reinforced by cellulose nanofibers of pineapple leaves modified by eco-friendly methods[J]. Express Polymer Letters, 2018, 12(9): 844-854.
- [38] JIANG L, HE J, SUN J. Sample width and thickness effects on

upward flame spread over PMMA surface[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 342: 114-120.

[39] SNYDER R L, FORTMAN D J, De HOE G X, et al. Reprocessable acid-degradable polycarbonate vitrimers [J]. Macromolecules, 2018, 51(2): 389-397.

[40] LUO F, LIU X, SHAO C, et al. Micromechanical analysis of molecular orientation in high-temperature creep of polycarbonate [J]. Materials & Design, 2018, 144: 25-31.

[41] DURANTE M, FORMISANO A, LAMBIASE F. Incremental forming of polycarbonate sheets [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 253: 57-63.

[42] DANILAEV M P, BOGOSLOV E A, KUKLIN V A, et al. Structure and mechanical properties of a dispersedly filled transparent polycarbonate [J]. Mechanics of Composite Materials, 2019, 55(1): 53-62.

[43] WANG X, ZHANG W, QIN Z, et al. Optically transparent and flame-retarded polycarbonate nanocomposite based on diphenylphosphine oxide-containing polyhedral oligomeric silsesquioxanes [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 117: 92-102.

[44] CHANG K, JIA H, GU S. A transparent, highly stretchable, self-healing polyurethane based on disulfide bonds [J]. European Polymer Journal, 2019, 112: 822-831.

[45] JIAN X, HU Y, ZHOU W, et al. Self-healing polyurethane based on disulfide bond and hydrogen bond [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(1): 463-469.

---

**收稿日期:**2020-03-12; **修订日期:**2020-04-22

**通讯作者:**钟蔚华(1975—),男,研究员,研究方向:抗弹复合材料,联系地址:山东省济南市天桥区田家庄东路3号第五三研究所一室(250031),E-mail:13854195750@163.com

(本文责编:王 晶)