

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.027

高性能纤维增强抗弹复合材料的研究与应用进展

张岩¹, 徐兴亚^{2,3}, 郭雁², 段婷婷², 孙金辉¹, 黄玉松², 李林¹, 闫少谦², 王玲玲², 王吉辉²

(1. 中国人民解放军32128部队, 济南 250000; 2. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 3. 西北工业大学, 西安 710072)

摘要: 简述了高性能纤维增强抗弹复合材料的研究与应用进展, 重点介绍了玻璃纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、聚对苯撑苯并二恶唑纤维等高性能纤维及混杂纤维增强复合材料在抗弹防护领域的研究与应用现状, 以及天然植物纤维等新型纤维增强抗弹复合材料的研究进展。指出纤维增强复合材料具有密度低、高效吸能、弹道性能优异等突出优点, 在轻量化和高防护力的抗弹领域得到广泛关注和研究, 可广泛应用于坦克、装甲车辆、武装直升机及单兵防护, 满足未来战争高机动、高生存力的军事需求。

关键词: 纤维; 抗弹; 轻量化; 复合材料; 研究进展

中图分类号: TQ327.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0190-07

Research and application progress of high performance fiber reinforced ballistic composites

ZHANG Yan¹, XU Xingya^{2,3}, GUO Yan², DUAN Tingting², SUN Jinhui¹, HUANG Yusong²,LI Lin¹, YAN Shaoqian², WANG Lingling², WANG Jihui²

(1. Unit 32128 of the People's Liberation Army, Jinan 250000, China; 2. Shandong Institute of Non-metal Materials, Jinan 250031, China; 3. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract : The research and application progress of high performance fiber reinforced ballistic composites were reviewed, with emphasis on the research and application status of high performance fibers such as glass fiber, aramid fiber, ultra high molecular weight polyethylene fiber, poly (p-phenylene benzothiazole) fiber and hybrid fibers reinforced composites in the field of ballistic protection, as well as the research progress of new fiber such as natural fiber reinforced ballistic composites. It was pointed out that fiber reinforced composites has the outstanding advantages of low density, high efficiency energy absorption and excellent ballistic performance. They have been widely concerned and researched in the field of lightweight and high protection, and have been widely used in tanks, armored vehicles, armed helicopters and individual protection, which can meet the military needs of high mobility and high survivability in future wars.

Keywords : fiber ; anti-ballistic ; lightweight ; composite ; research progress

随着现代武器系统向远程压制、精确打击、高效毁伤的特点发展^[1], 未来战争提出了高机动、高生存力的军事需求。研制轻量化、高防护、适应性高的装甲装备, 是提高平台的战场生存力、适应复杂多变作战环境的重要保证^[2-3]。

纤维增强复合材料具有密度低、高比强度、高比模量、可设计性强、良好的工艺性、弹道性能优异、无二次杀伤效应等特点, 在抗弹防护领域得到了广泛研究和应用^[4-6]。二十世纪六十年代, 由高性能纤维增强抗弹复合材料组成的复合装甲结构, 开始应用于国外的主战坦克, 在同等防护能力下可

实现30%~50%的减重率, 目前已广泛应用于坦克平台、装甲车辆、武装直升机及单兵防护^[7]。

笔者重点介绍了高性能纤维复合材料在抗弹防护领域的研究与应用现状, 以及新型纤维增强抗弹复合材料的研究进展。

1 高性能纤维增强复合材料在抗弹防护领域的研究与应用现状

目前抗弹防护领域常用的高性能纤维增强复合材料包括玻璃纤维增强复合材料、芳纶纤维增强复合材料、超高分

基金项目: 山东省重点研发计划“科技军民融合”项目(2022JMRH0204)

通信作者: 徐兴亚, 硕士研究生, 副研究员, 主要研究方向为抗弹复合材料和复合装甲

收稿日期: 2024-06-09

引用格式: 张岩, 徐兴亚, 郭雁, 等. 高性能纤维增强抗弹复合材料的研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 190-196.

ZHANG Yan, XU Xingya, GUO Yan, et al. Research and application progress of high performance fiber reinforced ballistic composites[J].

Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 190-196.

子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维增强复合材料、聚对苯撑苯并二恶唑(PBO)纤维增强复合材料、混杂纤维增强复合材料等。

1.1 玻璃纤维增强复合材料

玻璃纤维增强复合材料是第一代用于装甲防护的抗弹复合材料,高性能玻璃纤维具有优异的抗冲击性能^[8-9],其断裂伸长率在5%以上,在所有抗弹纤维中最高。对同口径、同种类弹丸,玻璃纤维增强复合材料的抗弹能力为钢3倍以上,且具备弯曲破甲弹射流、使其不规则断裂失稳的能力^[10]。

目前广泛使用的高强玻璃纤维主要有美国的S-2纤维、日本的T玻纤、俄罗斯的BMJ玻纤、法国的R玻纤和国产的HS系列玻纤^[11-12],玻璃纤维的性能见表1。从表1可以看出,几种高强玻璃纤维的性能较无碱玻璃纤维(E玻纤)明显提升。

表1 玻璃纤维的性能^[12]

Tab. 1 Properties of glass fibers^[12]

Fiber type	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa
S-2	4 500~4 890	84.7~86.9
R	4 400	83.8
T	4 650	84.3
BMJ	4 500~5 000	95
HS-2	4 020	82.9
HS-4	4 600	86.4
E glass fiber	3 445	72

二十世纪八十年代初,美国S-2高强玻璃纤维出现,标志着高性能玻璃纤维增强复合材料成为第一代较廉价的抗弹装甲材料^[13],其在M113装甲输送车上得到了应用^[14]。

国内开展玻璃纤维防弹板研制的单位主要有兵器五三所、洛阳总参三所,研制了681、682等多种复合装甲,以及以玻璃纤维增强抗弹复合材料作为止裂层的轻型复合装甲,现已成功应用于多种型号的坦克、装甲车辆等陆战平台。

国内外多家单位对玻璃纤维增强抗弹复合材料进行了持续深入研究。Kim等^[15]研究了玻璃纤维增强热塑性聚丙烯复合材料在高应变率条件下的力学性能,采用霍普金森压杆试验技术结合仿真技术,研究了应变率对拉伸、压缩、剪切等力学性能的影响,研究表明玻璃纤维增强复合材料具有明显的应变率效应。王威等^[16]采用仿真技术,研究了玻璃纤维增强复合材料夹芯层与高强度钢面层组成的复合结构装甲抗柱状弹体侵彻的性能,研究表明,提高玻璃纤维增强复合材料的面密度配比,可有效提高复合结构的抗弹性能。李金柱等^[17]开展了玻璃纤维增强环氧树脂复合材料-聚氨酯夹芯结构抗破片侵彻的性能研究,其中玻璃纤维的抽拔、拉伸断裂是玻璃纤维复合材料的主要吸能机制。

玻璃纤维增强复合材料具有优良的比承载性能和比防护性能,除应用于披挂装甲外,还可作为炮塔和车体的基体装甲,即复合材料炮塔和车体技术。美国针对S-2高强玻璃纤维增强的树脂基复合材料进行了相关研究和不断优化,形成了军用标准MIL 46197和MIL 46197A^[17],并将其用于“布

雷德利”步兵战车、“悍马”轮式车辆和CAV-1000型陆上漫步者的车身装甲。美国、英国成功研制了以复合材料车体为代表的复合材料装甲平台,并完成M1114 HUMVEE高机动、多用途轮式步兵战车、SPV400超轻型战车等多种战车用复合材料防护构件的研制^[14]。

1.2 芳纶纤维增强复合材料

芳纶纤维的密度约为玻璃纤维的一半,作为第二代装甲防护用抗弹复合材料,芳纶纤维增强复合材料在相同面密度条件下,抗弹性能较钢提升约4倍,较玻璃纤维增强复合材料有较大提升。

应用在抗弹领域的对位芳纶纤维,于二十世纪七十年代由美国杜邦公司首先开发研制^[18-19],目前广泛应用的芳纶纤维包含美国Dupont公司Kevlar纤维、俄罗斯Armos等品牌的芳纶、日本Teijin公司Technora纤维和Twaron纤维、韩国Kelon公司HF纤维及我国晨光院Staramid F-2纤维、泰和新材Tapanar纤维等^[20-21]。

芳纶纤维增强复合材料最初由美国应用于防弹头盔,然后又与钢板或陶瓷材料制成复合结构,用作坦克的防护装甲。其与钢板复合制备的“钢+Kevlar复合材料+钢”复合装甲,可有效防护破甲厚度约700 mm的反坦克导弹,同时具有高效的冲击波衰减效能,可降低破甲弹近距爆炸导致的舱内的瞬时超压,在美国M1坦克上得到应用。后续将Kevlar纤维增强复合材料用于M1A1改进型坦克的主装甲,可防护穿甲弹和破甲弹。

日本研制了多种包含芳纶纤维增强复合材料的复合装甲结构,并在坦克、装甲车辆上得到了应用。90式坦克上,采用了“高强度钢+芳纶纤维增强复合材料蜂窝约束的陶瓷+高强度钢”的层合复合结构装甲。88式步兵战车的炮塔复合装甲,采用了碳纤维与芳纶纤维增强的复合材料。M548弹药运输车上,采用了模压工艺制备的玻璃纤维、Kevlar纤维增强的环氧树脂、不饱和聚酯树脂复合材料,作为其防护装甲。

我国多家高校和研究所开展了芳纶纤维增强抗弹复合材料的研究。兵器五三所采用芳纶纤维、改性环氧树脂,采用模压工艺制备了芳纶纤维增强复合材料,防护穿甲弹、破甲弹的抗弹性能优异,可作为夹层材料用于重型复合装甲;采用芳纶纤维、高性能抗弹树脂研制了芳纶纤维增强层合复合材料,具有良好的弹道性能和吸能特性,可作为中小口径枪弹、炮弹、破片及爆炸冲击波的防护装甲。马铭辉等^[22]研究了12.7 mm穿燃弹侵彻条件下,陶瓷-Kevlar纤维/环氧复合材料的抗弹性能,子弹侵彻后,复合材料正面出现原纤化和纤维拉伸失效,背面出现塑性形成鼓包,吸收弹体的剩余动能。杨洋等^[23]研究了芳纶纤维预微纤化对复合材料抗弹性能的影响。李雪等^[24]研究了平纹、斜纹、缎纹、方平四种织物形式的芳纶纤维机织物增强复合材料的抗弹性能,缎纹复合材料靶板表现出最快的应变传递速率和更优异的弹道性能。

芳纶纤维复合材料除了可用于复合装甲外,还可用作坦克车辆的多功能内衬。美M1A2坦克、M2/M3布雷德利战车、M113A3运输车,采用芳纶纤维/酚醛复合材料,作为战斗舱和乘员舱的内衬,在穿甲弹、破甲弹侵彻时,对车体和炮塔提供后效防护,避免二次效应。芳纶纤维增强复合材料防崩落内衬,成功应用于俄BTR-90装甲车、瑞士“锯脂鲤”Ⅲ和“锯脂鲤”Ⅳ装甲车及瑞典CV90装甲车^[7,10]。

芳纶纤维复合材料还可用于武装直升机座椅等要害部位的装甲防护。目前芳纶纤维配合高性能抗弹陶瓷的使用,是直升机装甲产品的主流设计形式。美国AH-64型阿帕奇直升机座舱周围(如图1所示)、UH-60系列直升机的驾驶舱座椅、驾驶舱外侧和机身地板等关键部位,广泛采用了碳化硼陶瓷/芳纶复合材料装甲^[25]。



图1 AH-64型阿帕奇直升机被动防护示意图

Fig. 1 Diagram of passive protection of AH-64 Apache elevator

国内多所机构开展了武装直升机用防护装甲的研究。王东东等^[26]报道了一种主要由碳化硼陶瓷、高模量Kevlar层、低模量Kevlar层、吸能层组成的轻质复合装甲,其中高模量Kevlar纤维层,可支撑陶瓷、快速传递子弹冲击能量,低模量Kevlar纤维层可高效吸能。田志鹏等^[27]公开了一种直升机集成装甲地板,主要由芳纶纤维增强复合材料、蜂窝夹芯等通过缠绕工艺制备而成。

1.3 PE-UHMW 纤维增强复合材料

PE-UHMW纤维的密度仅为芳纶的2/3,在所有高强高模纤维中密度最低。作为第三代抗弹纤维,在子弹侵彻时,PE-UHMW纤维增强复合材料具有更高的能量吸收特性和应力波传递特性,同等面密度条件下,其抗弹性能较芳纶纤维增强复合材料提高约25%^[9]。目前商品化的PE-UHMW纤维主要有美国Honeywell公司湿法凝胶纺丝工艺的Spectra纤维和荷兰DSM公司干法凝胶纺丝工艺的Dyneema纤维^[21]。

采用Dyneema纤维制备的复合材料,现已在芬兰轻型轮式装甲车、德国“豹2”坦克新车型以及荷兰XA-188 6×6装甲输送车等多种坦克、装甲车辆平台。美军目前所装备的拦截者(IBA)防弹衣系统用软质防弹背心(OTV),采用Spectra PE-UHMW纤维,较之前使用杜邦Kelvar的PASGT防弹衣轻巧,且防护效果更好。2012年,Ceradyne为美国陆军提供的

增强型战术头盔(ECH),采用DSM公司Dyneema HB80 PE-UHMW纤维,较美军之前使用Kelvar纤维的先进战斗头盔(ACH)轻28-112 g,且破片防护性能提高35%以上。

国内多家高校和研究对PE-UHMW纤维增强复合材料的抗弹性能和应用方式开展了研究。陆军工程大学曹铭津等^[28]建立了一种适用于三维层合复合材料抗侵彻分析计算的有限元方法,与PE-UHMW纤维增强复合材料侵彻过程的损伤破坏情况吻合度高。李永鹏等^[29]研究了12.7 mm穿燃弹侵彻条件下,SiC陶瓷/PE-UHMW纤维复合结构的厚度对比对抗弹性能的影响,随着陶瓷与复合材料厚度比增大,抗弹性能先增强后减小,厚度比为0.2-0.4时,抗弹性能最佳。王江涛等^[30]开展了BN/PE-UHMW纤维增强复合材料防护7.62 mm穿甲弹的抗弹机理研究,并进行复合结构的优化设计。

PE-UHMW纤维还可作为芳纶纤维的主要替代品,用于武装直升机防弹装甲产品。北京安达维尔航空设备有限公司研制了一种用于直升机座椅的防弹装甲,由抗弹陶瓷、碳纤维中间板和PE-UHMW复合材料板构成,可有效减小直升机座椅装甲的密度和体积^[31]。

1.4 PBO 纤维增强复合材料

PBO纤维是一种具有芳杂环结构、高度共轭的刚性棒状聚合物,在二十世纪九十年代由日本Toyobo公司首先进行开发,具有强度和模量高、耐热和阻燃性能好等突出优势^[32-35],其强度、模量比芳纶高一倍以上,在目前应用的高性能有机纤维中,具有最高的强度和最好的综合性能^[36-37]。

PBO纤维的高强韧特性赋予其优异的能量吸收特性,微纤化结构特点使得PBO纤维增强复合材料可通过原纤化吸收冲击能量,同时较低的界面结合强度使其可通过分层吸收冲击能量^[38],因此PBO纤维在抗弹防护领域具有广泛的应用前景,被视为新一代装甲防弹纤维^[39-40]。Cunniff和Auerbach指出纤维增强树脂基复合材料抗弹性能和纤维的Cunniff速度呈正相关,Phoenix和Portwal建立了评判纤维性能的理论公式^[41]:

$$[U^*]^{1/3} = \left[\frac{\sigma \varepsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right]^{1/3} \quad (1)$$

其中, σ 为纤维的拉伸强度, ε 为纤维的断裂伸长率, ρ 为纤维密度, E 为纤维的弹性模量。表2给出了几种高性能纤维的力学性能,从表2可知,PBO纤维的 $[U^*]^{1/3}$ 最高,其抗弹性能最好。

美国、瑞典、日本等国家开展了PBO纤维增强复合材料的抗弹性能和应用研究。美国国防部发展中科技与技术清单(DSTL)提到,采用PBO纤维研制防护密集打击、面密度14.7~19.5 kg/m²的轻质装甲,从而实现装甲系统的显著减重。

瑞典防务研究所制备了ZYLON AS纤维织物/环氧树脂、ZYLON AS纤维织物/聚乙烯醇缩丁醛增韧酚醛树脂,研

表2 高性能纤维力学性能^[42]Tab. 2 Mechanical properties of high performance fiber^[42]

Fiber type	Fiber brand	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/ GPa	Elongation at break/%	Tensile modulus/ GPa	[U'] ^{1/3} / (m·s ⁻¹)
PBO fiber	AS PBO	1.56	5.20	3.10	169	813
PE-UHMW fiber	Spectra 1000	0.97	2.57	3.50	120	801
Aramid fiber	600-line-density Kevlar	1.44	3.40	3.55	82.6	682
Aramid fiber	KM2850-line-density Kevlar	1.44	3.24	3.80	73.7	681
Aramid fiber	KM2840-line-density Kevlar	1.44	3.24	3.25	99.1	672
Aramid fiber	1291500-line-density Kevlar	1.44	2.90	3.28	74.4	625
Aramid fiber	29200-line-density Kevlar	1.44	2.97	2.95	91.1	624
Aramid fiber	291000-line-density Kevlar	1.44	2.87	3.25	78.8	621
Aramid fiber	291140-line-density Kevlar	0.91	3.04	1.20	120	612
Carbon fiber	49 carbon fiber	1.80	3.80	1.76	227	593
Glass fiber	E glass fiber	2.89	3.50	4.70	74	559
Nylon fiber	Nylon fiber	/	0.91	N/A	9.57	482
M5 fiber	M5(2001 sample)	1.74	3.96	1.40	271	583
M5 fiber	M5(conservative goal)	1.70	8.50	2.50	300	940
M5 fiber	M5(ideal goal)	1.70	9.50	2.50	450	1043

究了其弹道极限速度等装甲性能(如图2所示),可用于装甲车辆、武装直升机、人体防护等^[43]。

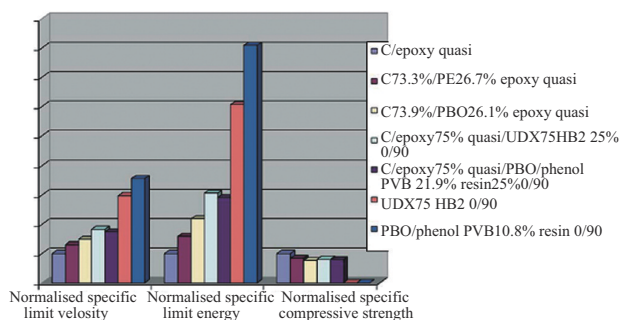


图2 PBO纤维/碳纤维结构轻质装甲性能

Fig. 2 Properties of PBO fiber/carbon fiber lightweight armor

1.5 混杂纤维增强复合材料

目前,装甲装备提出了轻量化、高防护、适应性高的需求,单一的抗弹材料难以满足防护性能需求^[44],装甲防护材料逐渐从单一组向多组分混杂发展。混杂纤维增强复合材料能够充分发挥各种材料的性能优势,同时弥补单一材料性能缺陷,从而提高复合材料的弹道性能^[45-46]。Ingle^[47]、易凯^[48]等研究表明,侵彻过程中抗弹复合材料在厚度方向呈现不同的损伤破坏模式,根据不同位置的抗侵彻机理,合理调整各种材料的组合顺序,可有效提高抗弹性能。同时,可通过低成本纤维的混杂使用,降低材料成本^[49-50]。

碳纤维因不具备应变率效应,基本不单独用于装甲防护领域,常与玻璃纤维、芳纶纤维、PE-UHMW纤维、PBO纤维等进行混杂,用于防弹复合材料。Bao^[51]等制备了碳纤维、芳纶纤维混杂增强的环氧树脂复合材料,与芳纶纤维增强环氧树脂复合材料进行了抗弹性能对比,结果表明当碳纤维增强复合材料质量比为20%~30%时,混杂纤维增强环氧树脂复合材料的

抗弹性能较芳纶纤维增强环氧树脂复合材料有所提高。瑞典防务研究所采用PBO纤维和碳纤维,制备了混杂纤维增强的轻质复合材料装甲,研究了树脂基体、纤维配比和排列顺序等因素对抗弹性能的影响。张佐光等^[52-53]针对军机的防护需要,采用玻璃纤维和碳纤维混杂增强的复合材料作为面板,PE-UHMW纤维增强复合材料作为背板,研发了一种轻质防弹板,可有效防护54式手枪和79式冲锋枪。王海雷等^[54]采用真空辅助树脂浸渍法制备了玻璃纤维和碳纤维混杂增强的复合材料,研究了混杂比和混杂方式对冲击性能的影响,结果表明,碳纤维的少量加入即可改善复合材料冲击性能。

目前,芳纶纤维增强复合材料、PE-UHMW纤维增强复合材料在装甲防护领域均已广泛应用^[55],将两者混杂使用可充分发挥协同效应,提升抗弹性能^[56]。肖文莹等^[57]研究了芳纶/PE-UHMW层间混杂结构的复合材料的抗弹性能,研究表明,芳纶纤维作为迎弹面、芳纶纤维:PE-UHMW纤维厚度比为1:2时,可充分发挥两种纤维协同效应,从而提高复合材料整体抗弹性能。

混杂纤维增强复合材料还可与抗弹陶瓷材料配合使用,用于穿燃弹的防护。武一丁等^[58]以碳化硼陶瓷和碳纤维、Kevlar纤维、PE-UHMW纤维为主要原材料,研究了陶瓷-混杂纤维增强复合材料背板防护12.7 mm穿燃弹的抗弹性能,结果表明陶瓷后面碳纤维板的存在可改善复合装甲的抗弹性能。路文成等^[59]研制了一种由碳化硅陶瓷和混杂纤维复合材料组成的防护12.7 mm穿燃弹的装甲,优化出“9 mm碳化硅+4 mm碳纤维增强复合材料+10 mm PE-UHMW纤维增强复合材料”的最优的厚度组合。王东哲等^[60]研究了碳化硼陶瓷和碳纤维、PE-UHMW纤维混杂增强复合材料装甲结构防护7.62 mm穿燃弹的抗弹性能,揭示了各层材料的抗弹机

理。

2 新型纤维增强抗弹复合材料的研究进展

2.1 天然植物纤维增强复合材料

随着人们对绿色材料关注度提高,将天然植物纤维用于装甲防护领域得到广泛研究^[61-64]。植物纤维具有来源广泛、可再生、具有生物降解性、生产过程污染小等特点。不同于合成纤维,该种纤维在加工过程中耗能较小^[65]。而且,天然纤维增强复合材料具有质轻、高强、优异的冲击韧性等性能优势,且成本更低,更具环保性。

Wambua等^[63,66]系统研究了天然纤维/聚合物复合材料的抗弹性能,制备了亚麻纤维/聚丙烯、黄麻织物/聚丙烯、大麻类植物纤维/聚丙烯复合材料,并研究了受侵彻条件下的能量吸收特性。

巴西材料学军事研究所^[67]采用菠萝族植物纤维、锦葵属植物纤维、巴西桐纤维为原材料,制备了三种植物纤维增强复合材料,作为中间层用于单兵装甲,研究表明,该种复合材料与芳纶纤维增强复合材料的抗弹性能相当,且更具性价比,在装甲防护领域具有广阔的应用前景。

巴西安蒂奥基亚大学军事研究所^[62]开展了天然纤维增强复合材料在陶瓷复合装甲中的研究,主要研究了陶瓷-菲奎叶纤维/聚乙烯复合材料防护7.62 mm口径子弹的抗弹性能,研究表明,该复合结构与陶瓷-芳纶纤维/聚乙烯复合材料的抗弹性能相当,且在复合结构中16~20 mm厚的菲奎叶纤维/聚乙烯复合材料,即可替代23 mm厚的芳纶纤维/聚乙烯复合材料。

2.2 蜘蛛丝防弹纤维

美国生物学家研究发现,黑寡妇蜘蛛丝具有密度低、强度高、弹性和韧性好等性能特点,其韧性为芳纶纤维的三倍,强度为钢的五倍,断裂伸长率高,断裂时可以高效吸能,适于做质轻、高抗弹的高级防弹衣,或拓展应用于坦克、装甲车辆、武装直升机及军事工事用复合装甲^[68]。目前,美国通过转基因桑蚕培育出了转基因蜘蛛丝(如图3所示),在高性能抗弹材料领域具有巨大的应用潜力^[69]。



图3 转基因桑蚕培育出的转基因蜘蛛丝

Fig. 3 Spider silk from genetically modified silkworms

Yu等^[70]模拟蜘蛛丝刚性晶体和柔性非晶态蛋白区,制备了有机、无机复合的具有多级结构的人造蛛丝纤维,拉伸强度达950 MPa、断裂伸长率为80%,与天然蜘蛛丝性能相当;Zhu等^[71]采用湿法纺丝工艺制备了韧性 (249 ± 22) MJ/m³的人造蛛丝纤维,为蜘蛛丝防弹纤维的制备提供了技术基

础,有利于其推广应用。

3 结论

纤维增强复合材料因其质轻、高效吸能、弹道性能优异等优点,在高防护力、轻量化、高适应性为特点的抗弹防护领域得到广泛关注和研究,并应用于坦克、装甲车辆等陆战平台、武装直升机以及单兵防护。近年来,在高性能抗弹纤维领域,我国通过国家、科研院所、企业、民营力量等多层级、多方面引导、多渠道投入和持续跟踪发力,材料及工艺技术水平与国外差距明显缩小,但与国外先进水平相比,还有较大差距。为满足日益提高的抗弹防护性能和轻量化需求,亟需完成高性能抗弹纤维的自主化研发与生产,并完成高性能纤维及其复合材料的系列化、标准化。另外,对于纤维增强抗弹复合材料的抗侵彻机理、侵彻过程中仿真技术等研究仍需增强,以便为高性能纤维抗弹复合材料的发展提供理论基础和技术支撑。

参考文献

- [1] 高颂. 新型陶瓷复合装甲抗14.5 mm穿甲燃烧弹侵彻性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
GAO Song. Studies of penetration of new ceramic composite armor against 14.5 mm armor-piercing incendiary[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019.
- [2] JEFFERSON A J, et al. Composite Structures, 2019, 224. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111007.
- [3] 杨洪忠, 等. 装甲车辆上用轻质装甲材料综述[C]. 北京: 玻璃钢学会第15届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集, 2003: 341-345.
YANG Hongzhong, et al. Application of light weight structural materials in combat armored vehicles[C]. Beijing: Proceedings of the 15th Annual Conference of FRP/Composite Materials Society, 2003: 341-345.
- [4] 张元豪, 等. 爆炸与冲击, 2019, 39(12). DOI: 10.11883/bzycj-2019-0270.
ZHANG Yuanhao, et al. Explosion and Shock Waves, 2019, 39 (12). DOI: 10.11883/bzycj-2019-0270.
- [5] 张婷婷, 等. 产业用纺织品, 2019, 37: 20-24.
ZHANG Tingting, et al. Technical Textiles, 2019, 37: 20-24.
- [6] 李洪鑫, 等. 防护工程, 2020, 42(6): 67-72.
LI Hongxin, et al. Protective Engineering, 2020, 42(6): 67-72.
- [7] 魏化震, 等. 材料工程, 2020, 48(8): 25-32.
WEI Huazhen, et al. Journal of Materials Engineering, 2020, 48 (8): 25-32.
- [8] ABTEW M A, et al. Composite Structures, 2019, 223. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.110966.
- [9] MASSAQ A, et al. Composite Structures, 2019, 214: 114-122.
- [10] 朱新成, 等. 弹道学报, 2021, 33(3): 82-88.
ZHU Xincheng, et al. Journal of Ballistics, 2021, 33(3): 82-88.
- [11] 陈东, 等. 装备环境工程, 2023, 20(7): 9-16.
CHEN Dong, et al. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 9-16.

- [12] 刘建勋,等.航空制造技术,2010(17):75-77.
LIU Jianxun, et al. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 75-77.
- [13] 张婷婷,等.纺织导报,2020(8):78-81.
ZHANG Tingting, et al. China Textile Leader, 2020(8): 78-81.
- [14] GUO Y, et al. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2460 (1). DOI:10.1088/1742-6596/2460/1/012126.
- [15] KIM D H, et al. Composites Part B, 2019, 166: 483-496.
- [16] 王威,等.振动与冲击,2022,41(18):16-24.
WANG Wei, et al. Journal of Vibration And Shock, 2022, 41 (18): 16-24.
- [17] 李金柱,等.北京理工大学学报,2021,41(2):121-129.
LI Jinzhu, et al. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(2): 121-129.
- [18] 谢宜轩,等.化工新型材料,2023,51(增刊2):42-47.
XIE Yixuan, et al. New Chemical Materials, 2023, 51(S2): 42-47.
- [19] 李亚锋,等.材料工程,2019,47(4):39-46.
LI Yafeng, et al. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(4): 39-46.
- [20] TEPEDUZU B, et al. Ceramics International, 2019, 45(2): 1 651-1 660.
- [21] 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.
- [22] 马铭辉,等.高压物理学报,2023,37(6).DOI: 10.11858/gywlxb.20230736.
MA Minghui, et al. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6).DOI: 10.11858/gywlxb.20230736.
- [23] 杨洋.芳纶纤维的预微纤化及其对复合材料力学性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
YANG Yang. Pre-micofibrillation of aramid fibers and its effect on mechanical properties of composite materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [24] 李雪.国产芳纶纤维性能测试及其复合材料抗侵略性能研究[D].武汉:武汉纺织大学,2023.
LI Xue. Performance testing of domestic aramid fibers and the study of fiber-reinforced composites anti-penetration performance [D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2023.
- [25] 杨彬.中国设备工程,2021(1)(下):179-182.
YANG Bin. China Plant Engineering, 2021(1) (volume two): 179-182.
- [26] 王东东,等.一种轻质复合防护装甲:CN 202010872097.0[P]. 2021-01-15.
WANG Dongdong, et al. A kind of lightweight composite protective armor: CN202010872097.0[P]. 2021-01-15.
- [27] 田志鹏,等.一种直升机集成装甲地板:CN202010193725.2[P]. 2020-07-03.
TIAN Zhipeng, et al. A kind of integrated armored floor for helicopter:CN202010193725.2[P]. 2020-07-03.
- [28] 曹铭津,等.含能材料,2021,29(2):132-140.
CAO Mingjin, et al. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 132-140.
- [29] 李永鹏,等.兵工学报,2022,43(6):1 355-1 364.
LI Yongpeng, et al. Acta Armamentarii, 2022, 43(6): 1355 - 1 364.
- [30] 王江涛.B₄C陶瓷/UHMWPE纤维层合结构复合材料防弹机理与衰减规律研究[D].太原:中北大学,2023.
WANG Jiangtao. B₄C ceramics/UHMWPE fiber laminated structural composite Research on bulletproof mechanism and attenuation law of materials[D]. Taiyuan: North University of China, 2003.
- [31] 葛永红,等.一种用于直升机座椅的防弹装甲及其制造方法:CN 201610849664.4[P]. 2016-12-14.
GE Yonghong, et al. Bulletproof armor for elevator seat and manufacturing method thereof: CN 201610849664.4[P]. 2016-12-14.
- [32] 王宁,等.纺织导报,2021(5):54-58.
WANG Ning, et al. Fiber Technology, 2021(5): 54-58.
- [33] LAI X, et al. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(3): 1 984-1 992.
- [34] 林晓凤,等.高科技纤维与应用,2024(1):34-38.
LIN Xiaofeng, et al. Hi-Tech Fiber and Application, 2024(1): 34-38.
- [35] TANG L, et al. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(2): 659-668.
- [36] 张殿波,等.现代纺织技术,2024:1-11.<https://link.cnki.net/urlid/33.1249.TS.20240521.1157.00>.
ZHANG Dianbo, et al. Advanced Textile Technology, 2024: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/33.1249.TS.20240521.1157.00>.
- [37] LI M, et al. Polymer Testing, 2019, 76: 222-231.
- [38] 杨超杰,等.表面技术,2024,53(1):48-55.
YANG Chaojie, et al. Surface Technology, 2024, 53(1): 48-55.
- [39] 白金旺,等.化工新型材料,2024,52(3):22-27.
BAI Jinwang, et al. New Chemical Materials, 2024, 52(3): 22-27.
- [40] 杨文良,等.合成纤维,2023,52(9):21-24.
YANG Wenliang, et al. Synthetic Fiber in China, 2023, 52(9): 21-24.
- [41] PHOENIX S L, et al. International Journal of Solids and Structures, 2003,40: 6 723-6 728.
- [42] 华兰,等.化学分析计量,2011,20(增刊):117-119.
HUA Lan, et al. Chemical Analysis and Meterage, 2011, 20(S): 117-119.
- [43] LARSSON F, et al. Composites: Part A, 2002, 33: 221-231.
- [44] 孔鲁鹏,等.河北工业大学学报,2024,53(2):11-21.
KONG Lupeng, et al. Journal of Hebei university of technology, 2024, 53(2): 11-21.
- [45] 王震,等.兵器装备工程学报,2021,42(10):267-271.
WANG Zhen, et al. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10): 267-271.

- [46] 周庆,等.复合材料学报,2019,36(4):837-847.
ZHOU Qing, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(4): 837-847.
- [47] INGLE S, et al. *Mechanics of Materials*, 2022, 170. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104324.
- [48] 易凯,等.宇航材料工艺,2019,49(1):82-85.
YI Kai, et al. *Aerospace Materials & Technology*, 2019, 49(1): 82-85.
- [49] 马潮禾,等.兵工学报,2024. DOI:10.12382/bgxb.2023.1164.
MA Chaohe, et al. *Acta Armamentarii*, 2024. DOI: 10.12382/bgxb.2023.1164.
- [50] MAHMOUD B, et al. *Composite Structures*, 2019, 209: 606-615.
- [51] BAO Jiawei, et al. *Defence Technology*, 2022, 18: 1822-1833.
- [52] 张佐光,等.轻质复合材料防弹板:CN 99210986.8[P]. 2001-01-24.
ZHANG Zuoguang, et al. *Lightweight composite bulletproof plate:CN99210986.8[P]. 2001-01-24.*
- [53] 张佐光,等.一种先进复合材料防弹板:CN99244133.1[P]. 2000-11-15.
ZHANG Zuoguang, et al. *A kind of advanced composite bulletproof plate:CN 99244133.1[P]. 2000-11-15.*
- [54] 王海雷,等.复合材料科学与工程,2021(2):102-109.
WANG Hailei, et al. *Composites Science and Engineering*, 2021(2): 102-109.
- [55] 傅耀宇,等.兵器装备工程学报,2023,44(11):110-117.
FU Yaoyu, et al. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(11): 110-117.
- [56] 周越松,等.兵器装备工程学报,2022,43(1):243-248.
ZHOU Yuesong, et al. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(1): 243-248.
- [57] 肖文莹,等.玻璃钢/复合材料,2019,9:79-84.
XIAO Wenying, et al. *FRP/CM*, 2019, 9: 79-84.
- [58] 武一丁,等.爆炸与冲击,2023,43(9).DOI:10.11883/bzycj-2023-0133.
WU Yiding, et al. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(9). DOI:10.11883/bzycj-2023-0133.
- [59] 陆文成,等.复合材料学报,2025,42. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20240508.003.
LU Wencheng, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica(in Chinese)*, 2025, 42. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240508.003.
- [60] 王东哲,等.材料导报,2021,35(18):18216-18221.
WANG Dongzhe, et al. *Materials Review*, 2021, 35(18): 18216-18221.
- [61] DODDAMANI S, et al. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2023(6): 450-468.
- [62] PEREIRA A C, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(5): 4221-4226.
- [63] BRAGA F D O, et al. *Journal of Materials Research & Technology*, 2017, 6(4): 417-422.
- [64] NASCIMENTO L F C, et al. Springer International Publishing, 2017, (A48): 44-45.
- [65] AMIANDAMHEN S O, et al. *Fibers and Polymers*, 2020, 21: 677-689.
- [66] MONTERIRO S N, et al. *Materials & Design*, 2016, 96(4): 263-269.
- [67] 唐平,等.兵器装备工程学报,2020,41(8):222-227.
TANG Ping, et al. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 222-227.
- [68] 陈瑶,等.现代纺织技术,2006(6):53-56.
CHEN Yao, et al. *Advanced Textile Technology*, 2006(6): 53-56.
- [69] SU Yupei, et al. *Nano Today*, 2024, 55. DOI: 10.1016/j.nantod.2024.102188.
- [70] YU Y, et al. *Advanced Functional Materials*, 2019, 30(6). DOI: 10.1002/adfm.201908556.
- [71] ZHU H, et al. *Biochimie*, 2020, 175: 77-84.