

装甲防护衬层及相关材料研究进展

陈东¹, 包睿¹, 李鹏²

(1. 陆军装备部航空军事代表局驻成都地区航空军事代表室, 成都 610036;
2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 综述了装甲防护衬层的技术应用现状, 从防辐射、抗弹、防破片等方面分析了相关防护机理, 着重总结了玻璃纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)、聚苯并双噁唑纤维(PBO)以及混杂纤维复合材料等的研究进展, 最后指出了未来该领域的研究重点。

关键词: 装甲防护; 防护衬层; 高性能纤维; 复合材料; 二次破片; 防护机理

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)07-0009-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.002

Research Progress of Armored Lining and Materials

CHEN Dong¹, BAO Rui¹, LI Peng²

(1. Chengdu Military Representative Office of the Army Aeronautical Department, Chengdu 610036, China;
2. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The application status of advanced armored protective lining was reviewed and the related protection mechanism was analyzed from the aspects of radiation protection, bullet resistance and fragment prevention. The research progress of glass fiber, aramid fiber, ultra-high molecular weight polyethylene fiber (UHMWPE), polybenzoxadiazole fiber (PBO) and hybrid fiber composite was emphatically summarized, and the research focus in this field in the future was pointed out.

KEY WORDS: armored protection; armored protective lining; high performance fiber; composite; secondary fragment; protection mechanism

大量统计数据表明, 导致装备损毁和人员伤亡的原因 80%为破片或其引起的“二次爆炸”所致, 而枪弹直接导致的伤亡只占少数^[1-4]。坦克装甲车辆面临着各种弹药的威胁, 弹药击穿车辆基体装甲后, 基体装甲和弹头破碎, 产生高速破片或崩落破片, 并呈锥形高速前行, 从而造成车辆内部大面积人员伤亡和装备损坏^[3,5-6]。

在装甲车辆内部安装防护衬层是一种重要的防护

方案, 在地面机动装甲综合防护体系中占据重要地位。防护衬层的作用主要体现在: 当弹丸穿甲性能处在弹道极限内时, 防止弹丸碎片或装甲材料崩落的破片飞入车内, 同时其本身不产生二次破片; 当弹丸穿透装甲时, 可以有效降低弹丸破片的动能, 从而提高乘员的生存能力^[5-7]。本文将从装甲防护衬层研究现状、装甲防护衬层防护机理以及防护衬层材料 3 个方面进行阐述, 并着重总结装甲防护衬层材料研究进展。

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-10-24

Received: 2022-07-10; Revised: 2022-10-24

作者简介: 陈东(1983—), 男, 硕士。

Biography: CHEN Dong (1983-), Male, Master.

引文格式: 陈东, 包睿, 李鹏. 装甲防护衬层及相关材料研究进展[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 009-016.

CHEN Dong, BAO Rui, LI Peng. Research Progress of Armored Lining and Materials[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 009-016.

1 装甲防护衬层应用现状

为满足复杂战场中保护装甲装备和士兵安全的需求,国外率先开展了装甲防护衬层技术的研究,现已经历了3代发展,相关研究较为成熟^[8-10]。防护衬层也从单一性能逐渐朝着多功能一体化方向发展,其核心设计思想是综合应用各种防护/材料技术实现防中子辐射、防弹和防破片等多种功能^[11]。

目前,世界各国坦克装甲车辆均配备了防护衬层。例如,美国 M1A2 主战坦克、M2/M3 布莱德利战车、M113 装甲输送车等在车体和炮塔乘员舱、战斗舱内壁安装了防破片衬层(如图1所示);德国的“豹 II”A4 坦克炮塔内部也装有防破片衬层,“山猫”履带式步兵战车车辆内部采用了破片衬层,IBD 戴森罗特工程公司设计的模块化防护概念中,MAP-L 衬层系统仍是其重要组成部分。



图1 美国 M113 装甲输送车车体采用衬层防护
Fig.1 American M113 armored transport vehicle body with liner protection

2 装甲防护衬层防护原理

2.1 防辐射原理

现在战场中,装甲车将面临来自空中和地面各种反装甲武器的火力攻击,甚至面临大规模战术杀伤武器——中子弹的威胁,其爆炸会产生强辐射作用,若未采取有效措施,会对装甲车辆乘员产生极大的杀伤作用。因此,使用具有中子屏蔽功能的防护衬层可有效保护成员免受伤害^[12]。

具有中子屏蔽功能的防护衬层主要通过对快中子减速和慢中子吸收来降低中子能量,其中快中子减速是降低中子能量的主要途径。中子经过减速之后,能量大大降低,当能量降低至被特殊元素吸收时,就完成了对中子辐射的防护^[13-15]。国内外大量研究表明,中子屏蔽材料中氢含量越高,防中子辐射的效果会越好^[16-17]。

2.2 抗弹、防破片机理

作为防护产品,防弹、防破片性能为防护衬层最基础且最重要的功能。在此基础上,进行多功能协同

设计,确保防弹、防破片性能和防辐射等性能兼具。因此,对防护性能相关机理的研究仍是学者们研究的重点。

在防弹、防破片方面,装甲防护衬层通常采用多层复合结构,层与层间通过粘接或夹层等方式连接起来,防护机理更复杂。为提升防护衬层的性能,学者在防护机理上做了大量的研究。Naik 等^[18]和陈磊等^[19]对弹体、破片在侵彻过程中的机理进行了研究。弹体、破片接触防护衬层的瞬间,与衬层内部纤维触点间会产生强烈的应力波,能量会以沿纤维轴向的横波和沿厚度方向的纵波2种形式传递^[20-21],传播形式如图2所示。脉冲形式的横波传播至基体与纤维交错点,两者的相互作用使得能量向多个方向上扩散开来,从而大面积损耗更多的能量^[22]。厚度方向的纵波首先对防护衬层起压缩作用,并在纤维与基体的界面产生使压缩应力转化的放射作用,转化后拉伸应力波的传递会通过纤维分层、断裂及界面失效形式将能量消耗^[18]。

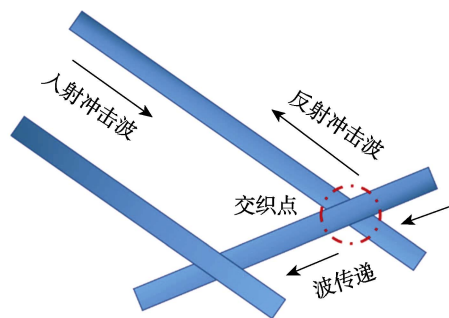


图2 冲击应力波在纤维复合材料中的传播形式
Fig.2 Propagation mode of impact stress wave in fiber composites

随着弹体、破片对防护衬层更加深入侵彻,纤维受到拉伸作用,来自弹体、破片的动能转化为纤维弹性势能,能量被进一步消耗。当纤维的应变大于其极限应变时,则纤维断裂^[20,23]。如弹体、破片动能仍未被耗尽,则进一步侵彻下一层,直至被完全消耗。从防护衬层的损伤形式分析,防弹体、破片的过程可分为3个连续的阶段,如图3所示^[24]。首先,防护衬层出现冲塞剪切破坏;其次,材料局部变形,纤维拉伸断裂失效;最后,纤维与基体间的部分界面失效,扩大后形成分层,同时纤维受拉断裂仍然存在^[25-26]。

综上所述,装甲防护衬层的防辐射、抗弹、防破片机理是通过材料选择、结构设计以及参数调整等方式来实现的。深入研究其防护机理,并针对性进行结构设计可以最大限度地提升衬层的防护能力,为装甲车辆和士兵提供全面的防护保障。

3 装甲防护衬层材料研究进展

高性能纤维复合材料技术的发展推动了防护衬

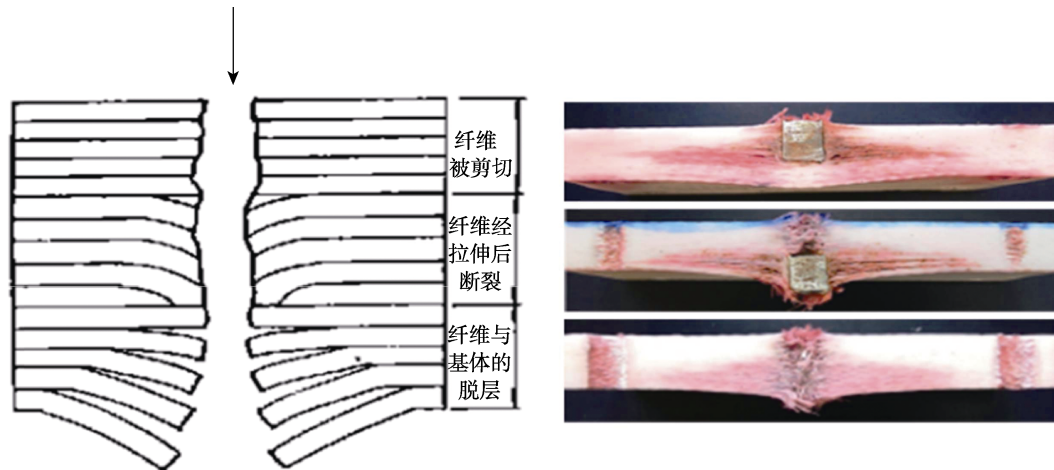


图 3 弹击后复合材料的破坏过程
Fig.3 Damage process of composite after projectile impact

层的升级换代。使用高强、低密度的纤维作为增强体,低弹性模量的韧性树脂作为基体,复合制备的衬层可赋予其优异的防护性能^[27-28]。由于增强体和树脂基体之间的力学性能呈数量级别差距,增强体性能的少量提升可以显著提高防护衬层的防护性能,因此更多国家和学者将研究重点聚焦在高性能纤维的研究与开发上。随着武器装备对轻量化、高防护性能衬层的迫切需求,研究高性能纤维复合材料迅速成为解决轻量化与高防护这一矛盾的重要措施之一,也是近几十年来装甲防护材料技术发展的重点^[11,29]。目前,用于制备高性能防护衬层的纤维主要有玻璃纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)、聚苯并双噁唑纤维(PBO)等^[8,10,28]。

3.1 玻璃纤维

玻璃纤维是最先应用于防弹、防破片领域的纤维,由其制备的复合材料具有比强度高、耐腐蚀性好等优点,兼具优异的抗弹、隔热、降噪等功能^[27,30]。因此,广泛应用于装甲车体和防护衬层的制造,提高乘员和车内设备的安全性和防护性能。

刘国权等^[31]使用 S-2 型高强玻璃纤维作为增强体,制备了环氧树脂基复合材料,在 40 kg/m² 面密度情况下,进行 56 式冲锋枪 7.62 mm 钢芯弹侵彻试验。通过对测试后的样件微观组织研究分析发现,复合材料主要通过分层和纤维断裂来吸收能量,纤维与树脂基体的合理匹配可大幅提升其抗弹性能^[32]。Santanu Choudhury 等^[33]对低温下的玻璃纤维增强树脂基复合材料的抗弹性能进行了评估,结果表明,低温下复合材料吸收能量和损伤程度相差不大,这一结果也为玻璃纤维制备的防护衬层在低温下的使用提供了依据。

杜忠华等^[34]对玻璃纤维复合层压板的抗弹性能进行了研究,并给出了此类层合板弹道性能 v_{50} 的预

测公式,建立了纤维层合板与防护性能的关系,见式(1)。

$$v_{50} = \frac{0.07(1-\mu^2)\sigma_T(3.5h_0+0.6D)(5h_0+1.2D)^2}{(mEh_0^3)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中: v_{50} 为弹道极限速度; μ 为材料的泊松比; σ_T 为背板的动态屈服应力; D 和 m 分别为弹径和质量; E 为材料的弹性模量。

李中泽等^[35]运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了射流侵彻玻璃纤维复合装甲模型,采用测量剩余穿深 DOP 的方法分析了复合靶板在不同夹层厚度、不同倾角的情况下对射流的干扰能力。结果表明,在增大玻璃纤维层厚度的情况下,抗侵彻性能提升较小,同一角度下不同玻璃纤维层厚度的剩余穿深差值仅为标准穿深的 4.2%。同一夹层厚度情况下,复合装甲的抗侵彻性能随着倾角增大显著提升。倾角为 68° 时,防护性能最佳。同时,由于玻璃纤维的密度较高,随着装备对轻量化需求的提升,一定程度上制约了其在防护衬层领域的应用。

3.2 芳纶纤维

芳纶纤维全称芳香族聚酰胺纤维(Aramid Fiber, AF),其分子链上有超过 85% 的酰胺键与苯环结构直接相连,特殊的共轭结构赋予了芳纶纤维更高的拉伸强度和耐热性。

芳纶纤维主要分为 2 种,分别为对位芳酰胺纤维以及间位芳酰胺纤维。其中对位芳酰胺纤维具高度取向分子链结构以及高结晶度,所以纤维具有高强度和高模量的特性,在抗弹、防破片材料上得到了广泛应用,其结构式如图 4 所示^[36]。此外,相较玻璃纤维,芳纶纤维的密度进一步降低,而防护性能却进一步提高。良好的防碎片性能、优异的阻燃性能,且纤维本身较高的含氢量,可以保证由其制备的防护衬层具备

良好的防中子辐射性能^[5,10]。这一系列的优点,使得芳纶纤维在提高装甲车辆的机动性和防护能力上起着日益重要的作用,是用于装甲防护材料的主要选择之一,也引起了国内外防护学者的兴趣^[10]。

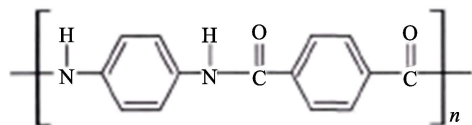


图4 对位芳酰胺纤维分子结构式
Fig.4 Molecular structure of para aramid

马武伟等^[37]利用4.5 g的FSP破片模拟弹对不同芳纶纤维制备的防护衬板的防弹性能进行了研究,结果表明,在破片冲击下,防护衬板主要以鼓包和纤维拉伸断裂破坏的形式吸能,同时纱线的线密度与织物断裂强度和样件防护性能呈线性关系^[38]。Wang等^[39]通过模拟仿真加实验的形式研究了不同旋转角度下芳纶复合材料的冲击吸能情况,结果表明,随着纤维铺设角度的增加,基于厚度方向上更多主纤维参与冲击吸能作用,同时平面内的基体以增加纤维相互作用面积有效降低局部冲击能,并利于能量的吸收耗散。

李英建等^[40]对环氧树脂增强芳纶纤维复合材料进行了抗弹测试,在弹击的相邻区域取样,研究了弹击对复合材料拉伸性能和弯曲性能的影响。结果表明,弹击对复合材料结构性能有不同程度的影响,相对于拉伸性能,弯曲性能的下降幅度更大。相对于离弹击区域最远的部位,材料离弹击区域最近的部位,拉伸强度和拉伸弹性模量分别降低了14.6%和6.4%,弯曲强度和弯曲弹性模量分别降低了45.3%和57.3%。距离弹击点30~60 mm外的区域,材料的结构性能基本不受影响。

李茂等^[41]使用面密度为60 kg/m²的芳纶纤维复合材料和钢板组成多种夹心式复合装甲结构,并研究了其在初速为1 630 m/s的破片下的抗侵彻性能。研究发现,当芳纶复合材料和钢板间存在一定间隙时,可以更有效地分散破片的动能,降低破片整体的侵彻力,这一研究结果为防护衬层的安装提供了重要的技术支撑。杨小兵等^[42]研究了影响芳纶复合材料抗弹性能的主要因素,结果表明,在等厚度条件下,预浸料铺层的层数与靶板密度成正比。

虽然芳纶纤维复合材料由于其优异的性能被广泛应用在装甲防护领域,但其存在耐水性较差、耐紫外线照射持久度较低等问题。这些都会影响装甲防护材料的使用寿命,特别是在一些严酷的战场环境中(比如阳光暴晒、湿热等)更会加速芳纶复合材料衬层的失效。鉴于此,目前以UHMWPE纤维作为主要材质的装甲防护材料逐渐成为研究的热点。

3.3 UHMWPE 纤维

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维为聚烯烃纤维的一种,其分子量通常在500万到600万之间,是继芳纶纤维之后又一高性能纤维^[43]。UHMWPE纤维具有很多优点,如纤维密度低,仅0.97 g/cm³,这为装备轻量化提供了更多可能性;比强度、断裂伸长率高,具有良好的抗冲击性能和防弹性能,同等面密度下,其防弹能力比芳纶的装甲结构高2.5倍左右^[22,29];稳定性良好,耐化学性好,耐酸耐碱和耐候性也格外优异,无论是在日晒下还是在低温下使用,仍能保持优良的力学性能^[44-45],具有良好的环境适应性,现已在防弹产品中得到广泛应用。

目前对UHMWPE纤维织物抗弹、防破片复合材料的研究主要集中在抗弹材料的冲击响应和破坏机理方面^[44]。UHMWPE纤维复合材料的冲击响应和破坏机理复杂,主要与织物结构、铺设角度、冲击速度等因素有关^[46]。高恒等^[44]采用UHMWPE单向无纬布(UD布)、2D织物及UD/2D织物制备了高性能复合衬板,研究了织物结构对抗弹性能影响。研究发现,UD/2D织物复合结构在弹击之后,复合衬板结构完整、背凸较小,同时背凸位置附近纤维排列有序,利于衬板抗多次打击。余毅磊等^[47]研究了UHMWPE背板铺设角度对抗弹性能的影响,结果表明,复合靶板整体结构刚度与铺设角度存在相关性,角度越小,刚度越大,并且随着铺层角度的减小,背板能在较大面积上分散吸收能量,表现为锥形角度较大,背凸高度降低。UHMWPE纤维虽然具有较高的韧性以及比模量,但其自身也存在刚性较差的问题,特别是在较高温度下的蠕变会使得制品在受到冲击时的背凸值变大,从而影响士兵生命或装甲防护材料的正常使用。

3.4 聚苯并双噁唑纤维(PBO)

PBO纤维作为21世纪超性能纤维,具有十分优异的物理力学性能和化学性能,其强度、模量、耐热性和阻燃性都远远超过UHMWPE和芳纶纤维,且耐冲击性能较芳纶纤维和碳纤维要高很多,被视为新一代装甲防弹纤维^[48-49]。另外,PBO纤维还具有热稳定性高、耐化学性优良、质轻而柔软等特性^[50]。PBO纤维增强复合材料有可能成为继玻璃纤维、聚乙烯纤维、芳纶纤维之后的第四代抗弹纤维复合材料,也是未来最具有竞争力的抗弹纤维之一^[51]。由于其价格高昂及制备复杂,使得PBO纤维在装甲防护方面的应用只是处于实验性研究阶段,具体应用还未见报道,但有可能成为今后装甲防护衬层材料的发展趋势之一^[52]。

3.5 混杂纤维复合材料

单一纤维在使用过程中存在各种各样的问题,为

了解决这一问题,学者们开始采用多种纤维混杂编织技术^[53]。将多种纤维复合,可以弥补单一纤维的性能缺陷,利于提升材料的综合性能^[54]。另外,低成本纤维和高性能、高成本纤维混杂进行防护衬层的制备,可以降低材料成本,更具有实用性^[11,54]。

肖文莹等^[55]利用 LS-DYNA 非线性动态显示有限元软件建立了芳纶/UHMWPE 混杂纤维单元模型,通过试验加仿真的形式验证了混杂比对抗弹性能的影响。研究发现,当芳纶和 UHMWPE 混杂比为 1:1 时,更能很好发挥混杂纤维的协同效应。Muhi 等^[56]对混合 E-glass/Kevlar 29 复合层压板的弹道性能进行了实验和分析研究,结果表明,加入凯夫拉纤维杂化 E-玻璃纤维能有效提高复合材料层合板的吸能能力。易凯等^[54]利用热压罐成形工艺制备了几种具有不同面密度及铺层结构的混杂纤维层板,并考察了其抗弹冲击性能。曹俊超等^[57]研究了混杂纤维自动铺丝对环氧树脂复合材料层合板高速冲击时效行为的影响,并建立了高速冲击有限元模型,接着建立了复合材料层合板的渐进损伤本构模型。研究结果表明,混杂纤维可以大幅提升环氧树脂复合材料层合板在高速冲击下的防护性能。此外,他们还研究了不同混杂比层合板的高速冲击模拟,分别得到了相应的临界穿透速度。

4 结语

从装甲车辆防护衬层产品和研究情况来看,仍有很多需要完善和攻关的技术问题,建议在以下几个方面发展与提升。

1) 加强新型防弹、防破片纤维材料的研发。装备发展,材料先行,高性能纤维研发是推动防护衬层升级换代的重要抓手。紧跟国外步伐,追踪 PBO 纤维、M5 超级纤维、纳米纤维等高性能纤维研发情况,特别是目前强度最高、综合性能较好的 PBO 纤维,突破其低成本制备难点及关键点,加大难点与核心技术攻关力度。

2) 加强新型防弹、防破片纤维材料工程化应用研究。目前可用于防弹和防破片的高性能纤维仍存在力学性能低、批次稳定性差、生产成本高等问题,限制了其在防护领域的广泛使用。因此,亟需优化其制备工艺,持续突破当前其力学性能极限,提升批次稳定性,降低生产成本。

3) 加强新型防护衬层结构设计的研究。现代坦克装甲车辆对防护衬层的功能需求越来越高,从最开始的单一功能发展到了现在的集多功能于一体。多功能集成对新型防护衬层的结构设计提出了更高的要求,应加强加快层间混杂、旋转铺层等新型结构设计研发进度。

参考文献:

- [1] 蓝肖颖. 含能破片毁伤效应研究现状[J]. 飞航导弹, 2020(11): 90-94.
LAN Xiao-ying. Research Status of Damage Effect of Energetic Fragments[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(11): 90-94.
- [2] 王丹, 姬建荣, 孔霖, 等. 实战中爆破弹药攻击目标毁伤威力准确评估[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 31-34.
WANG Dan, JI Jian-rong, KONG Lin, et al. Accurate Evaluation of Explosive Ammunition Attacking Target in Actual Combat[J]. Computer Simulation, 2018, 35(5): 31-34.
- [3] 陈伟, 赵文天, 王健, 等. 钨铝合金破片毁伤过程研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(2): 108-111.
CHEN Wei, ZHAO Wen-tian, WANG Jian, et al. Study of Damaging Process for W-Zr Alloy Fragment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(2): 108-111.
- [4] 蒋国谦. 美军在沙漠风暴行动中因收集战场遗留物所致的人员伤亡分析[J]. 解放军医学情报, 1994(4): 41.
JIANG Guo-qian. Analysis of Casualties Caused by the Collection of Battlefield Remnants by US Troops in Operation Desert Storm[J]. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army, 1994(4): 41.
- [5] 李树成. 试析火炮炮塔衬层防护[J]. 包头职业技术学院学报, 2006, 7(3): 39-42.
LI Shu-cheng. Analysis of Turret Liner Protection of Cannons[J]. Journal of Baotou Vocational & Technical College, 2006, 7(3): 39-42.
- [6] 黄经伟. 破片式战斗部破片规律及破片对步兵战车的侵彻作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
HUANG Jing-wei. Study on Fragmentation Law of Fragmentation Warhead and Penetration of Fragmentation into Infantry Fighting Vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [7] 卢莉萍, 张晓倩, 李翰山. 破片对地面装甲车毁伤评估计算方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(5): 19-23.
LU Li-ping, ZHANG Xiao-qian, LI Han-shan. Research on the Damage Evaluation Calculation Method of Warhead Fragment to Ground Armored Vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(5): 19-23.
- [8] 张成. 防弹插板用高性能纤维复合技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
ZHANG Cheng. Research on the Compounding Technology of High Performance Fiber for Bulletproof Laminate[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [9] LI P P, BROUWERS H J H, YU Q. Influence of Key Design Parameters of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete on In-Service Bullet Resistance[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 136: 103434.
- [10] 王怀颖, 彭涛, 王煦怡. 芳纶III材料在防弹装备领域的应用[J]. 警察技术, 2017(1): 63.

- WANG Huai-ying, PENG Tao, WANG Xu-yi. Application of Aramid III Material in Bulletproof Equipment Field[J]. Police Technology, 2017(1): 63.
- [11] 曾毅, 赵宝荣. 装甲防护材料技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- ZENG Yi, ZHAO Bao-rong. Armor Protection Material Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [12] 尹瑞涛. 资本主义炸弹——中子弹的防护原理(九)[J]. 器知识, 2019(6): 79-81.
- YIN Rui-tao. Protection Principle of Capitalist Bomb—Neutron Bomb (9)[J]. Ordnance Knowledge, 2019(6): 79-81.
- [13] 刘蕾, 崔建国, 蔡建明. 中子辐射损伤效应、机制及防护措施研究进展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(8): 635-640.
- LIU Lei, CUI Jian-guo, CAI Jian-ming. Research Progress of Effect, Mechanism and Protection Measures of Neutron Damage[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2017, 37(8): 635-640.
- [14] 王玉容, 赵勇, 蒋明忠, 等. 功能/结构一体化中子屏蔽材料的研究现状[J]. 精密成形工程, 2019, 11(3): 166-172.
- WANG Yu-rong, ZHAO Yong, JIANG Ming-zhong, et al. Research Status in Neutron Shielding Materials with Combined Functional and Structural Performance[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(3): 166-172.
- [15] 韩毅, 陈法国, 沈华亚. 中子屏蔽材料研究现状[C]//中国力学大会-2015 论文摘要集. 上海: [出版者不详], 2015.
- HAN Yi, CHEN Fa-guo, SHEN Hua-ya. Investigation of the Research Status of Neutron Shielding Materials[C]//Proceedings of 2015 China General Assembly Mechanics. Shanghai: [s. n.], 2015.
- [16] 李利娜, 孙润军, 陈美玉, 等. 辐射防护材料的研究进展[J]. 合成纤维, 2019, 48(10): 21-25.
- LI Li-na, SUN Run-jun, CHEN Mei-yu, et al. Research Progress on Radiation Protection Materials[J]. Synthetic Fiber in China, 2019, 48(10): 21-25.
- [17] BSI. 中子辐射防护屏蔽. 设计原则和选择适用材料的考虑[S].
- BSI. Neutron Radiation Protection Shielding-Design Principles and Considerations for the Choice of Appropriate Materials[S].
- [18] NAIK N K, DOSHI A V. Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies[J]. Composite Structures, 2008, 82(3): 447-464.
- [19] 陈磊, 徐志伟, 李嘉禄, 等. 防弹复合材料结构及其防弹机理[J]. 材料工程, 2010, 38(11): 94-100.
- CHEN Lei, XU Zhi-wei, LI Jia-lu, et al. Structure and Bullet-Proof Mechanism of Ballistic Composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(11): 94-100.
- [20] 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.
- [21] YANG E C, NGO T D, RUAN Dong, et al. Impact Resistance and Failure Analysis of Plain Woven Curtains[J]. International Journal of Protective Structures, 2015, 6(1): 113-136.
- [22] 付杰, 李伟萍, 黄献聪, 等. 新型超高分子量聚乙烯膜材料防弹性能及机理[J]. 兵工学报, 2021, 42(11): 2453-2464.
- FU Jie, LI Wei-ping, HUANG Xian-cong, et al. Bullet-Proof Performance and Mechanism of New Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Film[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(11): 2453-2464.
- [23] SEYED YAGHOUBI A, LIAW B. Influences of Thickness and Stacking Sequence on Ballistic Impact Behaviors of GLARE 5 FML Plates: Part II — Numerical Studies[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 48(19): 2363-2374.
- [24] GAMA B A, GILLESPIE J W. Punch Shear Based Penetration Model of Ballistic Impact of Thick-Section Composites[J]. Composite Structures, 2008, 86(4): 356-369.
- [25] GAMA B A, GILLESPIE J W. Finite Element Modeling of Impact, Damage Evolution and Penetration of Thick-Section Composites[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(4): 181-197.
- [26] 李典, 侯海量, 朱锡, 等. 舰船装甲防护结构抗弹道冲击的研究进展[J]. 中国造船, 2018, 59(1): 237-250.
- LI Dian, HOU Hai-liang, ZHU Xi, et al. Review on Ballistic Impact Resistance of Ship Armor Protection Structure[J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(1): 237-250.
- [27] 王波. 高性能纤维防弹材料的基本种类、结构及其防弹性能[J]. 轻纺工业与技术, 2010, 39(4): 22-24.
- WANG Bo. Basic Types, Structures and Bulletproof Properties of High-Performance Fiber Bulletproof Materials[J]. Light and Textile Industry and Technology, 2010, 39(4): 22-24.
- [28] 杨坤, 朱波, 曹伟伟, 等. 高性能纤维在防弹复合材料中的应用[J]. 材料导报, 2015, 29(13): 24-28.
- YANG Kun, ZHU Bo, CAO Wei-wei, et al. Application of High-Performance Fiber in Bulletproof Composite Materials[J]. Materials Review, 2015, 29(13): 24-28.
- [29] 魏化震, 钟蔚华, 于广. 高分子复合材料在装甲防护领域的研究与应用进展[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 25-32.
- WEI Hua-zhen, ZHONG Wei-hua, YU Guang. Research and Application Progress of Polymer Composites in Armor Protection[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 25-32.
- [30] 董鹤崑, 凌根华. 高强度玻璃纤维装甲复合材料的研发与应用[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(5): 41-46.
- DONG He-yin, LING Gen-hua. Study, Development and Application of High-Strength Glass Fiber Armour Composites[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(5): 41-46.

- [31] 刘国权, 杨大峰, 梅树清. 高强玻璃纤维复合材料防弹性能的微观研究[J]. 纤维复合材料, 2001, 18(3): 21-23.
LIU Guo-quan, YANG Da-feng, MEI Shu-qing. Microscopic Study on Bulletproof Properties of High Strength Glass Fiber Composites[J]. Fiber Composites, 2001, 18(3): 21-23.
- [32] 刘国权, 杨大峰, 梅树清. 防弹用纤维复合材料最佳树脂含量研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(2): 13-15.
LIU Guo-quan, YANG Da-feng, MEI Shu-qing. Study on the Optimal Resin Content of High Strength Bulletproof Glass Fiber Reinforced Plastics[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2001(2): 13-15.
- [33] CHOUDHURY S, RAMAGIRI B, SHAH B K, et al. Ballistic Response of Woven Glass Fabric-Epoxy Composites at Low Temperatures: Experimental Investigation[J]. Composites Part C: Open Access, 2022, 8: 100263.
- [34] 杜忠华, 赵国志, 杨玉林. 陶瓷/玻璃纤维/钢板复合靶板抗弹性能的研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(2): 219-221.
DU Zhong-hua, ZHAO Guo-zhi, YANG Yu-lin. A Study on the Performance of a Composite Armour Plate of Ceramic/GRFP/Steel[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(2): 219-221.
- [35] 李中泽, 高旭东, 董晓亮. 玻璃纤维复合装甲抗射流侵彻的性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 126-131.
LI Zhong-ze, GAO Xu-dong, DONG Xiao-liang. Performance of Glass Fiber Composite Armor Against Shaped Charge Jet[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(9): 126-131.
- [36] 魏忠仁, 杜文泽, 王树伦, 等. 芳纶纤维抗弹复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(1): 75-78.
GUO Zhong-ren, DU Wen-ze, WANG Shu-lun, et al. Research Development in Aramid Antiballistic Composite[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(1): 75-78.
- [37] 马武伟, 李想, 张笑梅, 等. 芳纶复合材料抗破片模拟弹性能研究[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(6): 24-28.
MA Wu-wei, LI Xiang, ZHANG Xiao-mei, et al. Research on the FSP-Proof Property of Different Aramid Composite[J]. Development and Application of Materials, 2013, 28(6): 24-28.
- [38] 顾冰芳, 龚烈航, 徐国跃. Kevlar 纤维叠层织物防弹机理和性能研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2007, 31(5): 638-642.
GU Bing-fang, GONG Lie-hang, XU Guo-yue. Bullet Proof Mechanism and Performance of Kevlar Multi-Layers Textile[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2007, 31(5): 638-642.
- [39] WANG Ying, CHEN Xiao-gang, YOUNG R, et al. A Numerical Study of Ply Orientation on Ballistic Impact Resistance of Multi-Ply Fabric Panels[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 68: 259-265.
- [40] 李英建, 甄建军, 魏汝斌, 等. 弹击对环氧树脂/芳纶复合材料结构性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(6): 101-104.
LI Ying-jian, ZHEN Jian-jun, WEI Ru-bin, et al. Effect of Bullet Penetration on Structural Properties of Epoxy Resin/Aramid Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6): 101-104.
- [41] 李茂, 侯海量, 朱锡, 等. 结构间隙对芳纶纤维增强复合装甲结构抗侵彻性能的影响[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1797-1805.
LI Mao, HOU Hai-liang, ZHU Xi, et al. Influence of Structural Interspace on Anti-Penetration Performance of Para-Aramid Fiber-Reinforced Composite Armor System[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9): 1797-1805.
- [42] 杨小兵, 姜文娟, 程晓农. 芳纶纤维复合材料抗弹性能研究[J]. 化工新型材料, 2007, 35(2): 35-36.
YANG Xiao-bing, JIANG Wen-juan, CHENG Xiao-nong. Study on Anti-Bullet Properties of Aramid Fiber Reinforced Composites[J]. New Chemical Materials, 2007, 35(2): 35-36.
- [43] 肖文莹, 郭万涛, 李想. 超高分子量聚乙烯纤维增强防弹复合材料研究进展[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(2): 131-138.
XIAO Wen-ying, GUO Wan-tao, LI Xiang. The Progress of UHMWPE Fiber-Reinforced Ballistic Composites[J]. Development and Application of Materials, 2019, 34(2): 131-138.
- [44] 高恒, 杨宏伟, 杜建华. UHMWPE 纤维织物复合靶板抗弹性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28(5): 91-93.
GAO Heng, YANG Hong-wei, DU Jian-hua. Research on the Ballistic Performance of UHMWPE Fiber Fabric Composite Targets[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014, 28(5): 91-93.
- [45] 郑震, 施楣梧, 周国泰. 超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料及其防弹性能的研究进展[J]. 合成纤维, 2002, 31(4): 20-23.
ZHENG Zhen, SHI Mei-wu, ZHOU Guo-tai. Progress in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites and Its Bulletproof Property[J]. Synthetic Fiber in China, 2002, 31(4): 20-23.
- [46] 莫根林, 刘静, 金永喜, 等. 超高分子量聚乙烯纤维防护机理研究综述[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(10): 23-28.
MO Gen-lin, LIU Jing, JIN Yong-xi, et al. Review on Protective Mechanism of UHMWPE Fiber[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(10): 23-28.
- [47] 余毅磊, 王晓东, 任文科, 等. UHMWPE 背板铺层角度对陶瓷复合靶板抗弹性的影响[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(6): 612-619.
YU Yi-lei, WANG Xiao-dong, REN Wen-ke, et al. Effect of UHMWPE back Plate Layering Angle on the Anti-Elasticity of Ceramic Composite Target Plate[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(6): 612-619.

- [48] 斯奎. PBO 纤维的耐热性和耐紫外光特性的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
SI Kui. Study on Heat Resistance and Ultraviolet Resistance of PBO Fiber[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [49] 孙杰, 赵娟. 纤维增强防弹复合材料的应用及研究现状[J]. 化纤与纺织技术, 2021, 50(1): 7-11.
SUN Jie, ZHAO Juan. Application and Research Status of Fiber Reinforced Bulletproof Composites[J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2021, 50(1): 7-11.
- [50] 刘夏清, 邹德华, 牛捷, 等. PBO 纤维复合材料的研究及进展[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(3): 138-141.
LIU Xia-qing, ZOU De-hua, NIU Jie, et al. Research and Development of PBO Fiber Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3): 138-141.
- [51] 宫平, 段剑, 虢忠仁, 等. PBO 纤维复合材料抗弹性能研究[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(4): 21-24.
GONG Ping, DUAN Jian, GUO Zhong-ren, et al. Study on Anti-Bullet Properties of PBO Fabrics Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(4): 21-24.
- [52] 汪家铭. PBO 纤维发展概况与应用前景[J]. 合成技术及应用, 2010, 25(2): 23-28.
WANG. Development Survey and Application Prospect of Poly-p-Phenylene Benzobisoxazazole(PBO) Fiber[J]. Synthetic Technology & Application, 2010, 25(2): 23-28.
- [53] 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 Ye-mao, LIU Ting. Bulletproof Performance and Bulletproof Mechanism of Interlaminar Hybrid Composite Armor Plate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(4): 837-847.
- [54] 易凯, 孙建波, 杨智勇, 等. 混杂纤维复合材料层板的抗弹冲击性能[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(1): 82-85.
YI Kai, SUN Jian-bo, YANG Zhi-yong, et al. Ballistic Impact Resistance of Hybrid Composite Materials[J]. Aerospace Materials & Technology, 2019, 49(1): 82-85.
- [55] 肖文莹, 李想, 郭万涛, 等. Kevlar/UHMWPE 混杂纤维复合材料抗弹性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(9): 79-84.
XIAO Wen-ying, LI Xiang, GUO Wan-tao, et al. Resistance Performance of Kevlar/Uhmwpe Fiber Hybrid Composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(9): 79-84.
- [56] MUHI R J, NAJIM F, DE MOURA M F S F. The Effect of Hybridization on the GFRP Behavior under High Velocity Impact[J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(8): 798-803.
- [57] 曹俊超, 孙建波, 曹勇, 等. 混杂纤维增强环氧树脂复合材料高速冲击损伤行为[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4935-4948.
CAO Jun-chao, SUN Jian-bo, CAO Yong, et al. High-Velocity Impact Damage Behavior of Hybrid Fiber Reinforced Epoxy Composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4935-4948.

责任编辑: 刘世忠