

# 防弹防刺高性能纤维及复合材料研究进展

董梦杰, 郭亚飞, 王美慧, 郝新敏\*

(军事科学院 系统工程研究院, 北京 100010)

**摘要:**从纤维种类、织物结构等角度总结了防弹防刺纤维复合材料的研究概况,重点分析芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维在防弹防刺复合材料领域的应用及其防弹防刺机理;简要介绍了聚对苯撑苯并双噁唑纤维、聚(2,5-二羟基-1,4-苯撑吡啶并二咪唑)纤维和“蛛丝”纤维等新型高性能纤维的特点及应用情况。总结了国内外防弹防刺服测试标准,并探讨防弹防刺纤维复合材料的发展趋势,以期为更高性能防弹防刺复合材料的设计与制备提供参考。

**关键词:** 高性能纤维;复合材料;防弹;防刺

**中图分类号:** TS 102.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2024)02-0095-07

## Research Progress of Bulletproof and Stab-Resistant High-Performance Fibers and Composite Materials

DONG Mengjie, GUO Yafei, WANG Meihui, HAO Xinmin\*

(Academy of System Engineering, Academy of Military Science, Beijing 100010, China)

**Abstract:** In this paper, the research status of bulletproof and stab-resistant fiber composites was summarized from the perspectives of fiber types and fabric structures. The application and mechanism of aramid fibers and ultra-high molecular weight polyethylene fibers in the field of bulletproof and stab-resistant composites were analyzed in detail. The characteristics and applications of new high-performance fibers, such as poly(p-phenylene benzobisoxazole) fibers, poly(2,5-dihydroxy-1,4-phenylenepyridinediimidazole) fibers and "spider silk" fibers, were introduced briefly. It also summarized the test standards of bulletproof and stab-resistant clothing at home and abroad, then it discussed the development trend of bulletproof and stab-resistant fiber composites, in order to provide a reference for the design and fabrication of higher performance bulletproof and stab-resistant composite materials.

**Key words:** high-performance fibers, composite materials, bulletproof, stab-resistant

当今世界面临百年未有之大变局,局部战争和暴力冲突时有发生,个体防护已成为不可忽视的问题。面临不可预知的威胁时,具有单一防弹功能或防刺功能的产品,往往难以满足安全防护需求。将防弹、防刺功能合二为一的双防服逐渐成为个体防护领域的研究重点和热点。

防弹防刺材料经历了从金属材料到陶瓷材料,再到高性能纤维增强复合材料的更新换代过程,也

实现了从硬质向轻质柔性的转变。高性能纤维增强复合材料具有密度低、比吸收能高、比强度和比模量大等优点,是实现防弹防刺服轻量化、一体化的关键材料之一。

根据防护材质的不同,可将防弹衣分为硬质防弹衣和软质防弹衣。硬质防弹衣内置陶瓷夹板,不仅能够防弹,还能够防刀刺和刀砍;而软质防弹衣一般情况下无法防刺<sup>[1-2]</sup>,其主要用于防护手枪子

收稿日期:2023-11-24; 修订日期:2024-02-01。

基金项目:国防科技基础加强计划项目;装备综合研究项目。

作者简介:董梦杰(1993—),女,高级工程师,博士。

\*通信作者:郝新敏(1967—),男,正高级工程师,博士生导师。主要研究方向为功能纺织材料、生物基纤维材料、防护服装等。Email:xminhao@126.com

弹、步枪子弹以及爆炸物破片对人体的伤害,防护机理是通过弹头变形、纤维变形、纤维断裂、层间分层、基体开裂等方式将弹头或爆炸物的能量分散或消耗掉<sup>[3-5]</sup>。防刺服主要通过摩擦、变形及发热等方式吸收穿刺的能量<sup>[6]</sup>。由于能量分散范围比较小,单位纤维需吸收较多能量,因此防刺材料宜选择高剪切模量、高吸能的材料,且必须有紧密的组织使其可以抵御刀尖<sup>[7]</sup>。因此,研究既具有防弹性能又具有防刺性能,且舒适、轻便的软质防护服是个体防护领域的难点<sup>[8-11]</sup>。

## 1 防弹防刺纤维及复合材料

先进纤维复合材料是实现双防服优异性能的关键之一,其开发核心是选择具有高强、高模等特性的高性能纤维,市面上最常见的是芳纶和超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维。

### 1.1 芳纶防弹防刺材料

对位芳纶具有超高强度、高模量、高韧性,且耐高温,比强度约为钢丝的5~6倍,模量为钢丝的2~3倍,其广泛应用于防弹防刺服领域。对位芳纶工业化产品主要包括美国DuPont公司的Kevlar®、日本TEIJIN株式会社的Twaron®、韩国KELON集团的Heracron®、中国烟台泰和新材料股份有限公司的Tapararan®和中蓝晨光化工研究设计院的Staramid® F-2等。

**1.1.1 芳纶无纬布** 无纬布是将纤维浸润树脂基材后单向排列于薄膜上,再经0°与90°双正交复合层压而成,其结构如图1<sup>[8]</sup>所示。由图1可以看出,无纬布层内和层间纤维均无交织,无屈曲现象,纤维自身的力学性能保持率较高,其受到弹击后应力波和能量由着弹点向外传播的速率快,因此被广泛应用于防弹领域<sup>[12]</sup>。对芳纶无纬布而言,树脂的种类及模量、复合材料的面密度、使用的环境温度等因素对其防弹防刺性能都有着重要的影响。吴中伟等<sup>[13]</sup>系统分析了芳纶无纬布的树脂模量、面密度和使用环境等因素对防弹防刺性能的影响。结果表明,树脂模量必须适中才能兼顾防弹和防刺性能要求;单层双防布面密度在210~215 g/m<sup>2</sup>时,织造的无纬布综合防护效果最佳;合适的低温环境有利于提升防刺性能,温度升高则有助于提升防弹性能。方心灵等<sup>[14]</sup>对比了聚氨酯、丙烯酸酯、改性聚氨酯和改性丙烯酸酯等胶黏剂用于芳纶无纬布树脂体系时的防弹防刺效果,发现改性聚氨酯性能最优,并进一步研究了芳纶无纬布/改性聚氨酯复合材料的成型工艺。

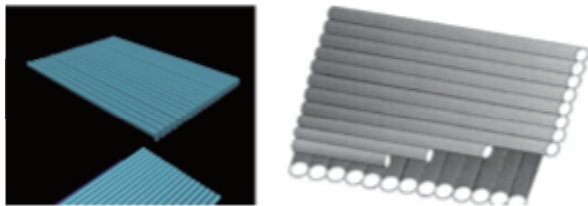


图1 无纬布的结构

Fig. 1 Structure of weft-free fabric

**1.1.2 芳纶二维机织物** 二维机织物是芳纶在防弹防刺复合材料领域应用较多的织物形式。高晓清等<sup>[15]</sup>对比了3种芳纶机织物/改性环氧树脂复合材料的防弹防刺性能,以优选出的芳纶织物作为增强体织物,分析了改性环氧树脂、聚氨酯树脂和聚氯乙烯树脂的黏合强度、流动渗透性和防刺性能,发现改性环氧树脂与优选出的芳纶织物复合时,其防护性能最佳。李亚滨等<sup>[16]</sup>通过落锤冲击实验分析了不同涂层工艺对芳纶平纹织物/热塑性聚氨酯防刺性能的影响。结果表明,与直接使用干法涂层和湿法涂层工艺相比,采用转移涂层工艺制备的复合织物,其束纤维拔脱力和撕裂强力均较高,说明其具有更优异的防刺效果。他进一步通过动态穿刺实验分析了不同聚氨酯对芳纶平纹涂层布的影响,发现与常规聚酯型和聚醚型聚氨酯相比,高模量聚碳酸酯型聚氨酯复合芳纶织物的防刺性能更优,穿透层数为31层,如使用双侧涂层工艺,穿透层数可降至27层,能够进一步提升防刺性能。闫学军等<sup>[17]</sup>利用剪切增稠液体(STF)浸渍芳纶织物,弹道测试结果表明,随着复合材料中STF含量的增加,吸能也不断增加,完全浸渍STF的复合材料的子弹侵彻深度明显降低,意味着在复合材料质量和弹道性能相同的情况下,浸渍STF的复合材料更为轻便。

**1.1.3 芳纶三维织物** 三维织物在传统二维织物基础上,沿织物厚度方向引入一层捆绑纱(Z-yarn),使织物无论在层内还是层与层之间,都有纱线相互交织。三维织物在受力拉伸时具有良好的调节能力,可有效抑制因分层被破坏而引发的局部变形,具有较好的吸能性。

叶明琦<sup>[18]</sup>设计了一种新型三维正交织物,并将其防刺性能与二维织物和无纬布进行对比。落锤冲击实验结果表明,在织物质量相同的条件下,二维织物和无纬布均被直接穿透,而三维织物未被直接穿透,说明三维织物防刺性能更优。YANG Y X等<sup>[19]</sup>对比了叠层二维平纹织物与三维间层角联锁织物的抗冲击性能及机理,结果表明,三维织物吸能效果明显优于二维织物,其面密度吸能比(SEA)

较叠层二维织物提高 77%。此外研究发现,适当引入衬垫经纱有利于提升三维角联锁织物的弹道性能<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 UHMWPE 防弹防刺材料

UHMWPE 纤维是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种高性能纤维,常采用凝胶纺丝法制备,其密度低,轴向比强度和模量均较高,能量吸收性和耐磨损性优于芳纶,断裂伸长率高于高强碳纤维<sup>[22]</sup>,耐光、热老化性能优良,特别适用于防护材料,一度被认为是超越芳纶的“神奇纤维”。目前商品化产品有荷兰 DSM 公司生产的 DYNEEMA 纤维、美国 Honeywell 公司开发的 Spectra 纤维等。

**1.2.1 UHMWPE 无纬布** 由于 UHMWPE 纤维存在熔点较低(约为 150 ℃)、浸润性差等缺点,限制了聚合物基体的选择,因此研究人员开始探究适用于 UHMWPE 无纬布的基体树脂。李焱等<sup>[23]</sup>研究了水性聚氨酯含量对 UHMWPE 纤维无纬布复合材料防弹性能的影响,发现当树脂质量分数为 24% 时,复合材料防弹性能最优。梁子青等<sup>[24]</sup>研究表明,聚氨酯和低密度聚乙烯作为基体树脂时,复合材料的界面黏合强度适当,防弹性能较优。

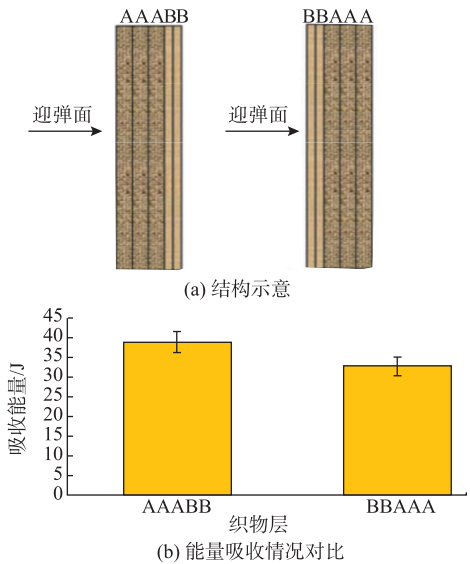
针对 UHMWPE 无纬布复合材料的防弹机制,顾冰芳等<sup>[25]</sup>研究发现,靶板的防弹性能随着 UHMWPE 无纬布层数的增加而提升,弹道极限速度( $v_{50}$ )与样品面密度呈正相关,弹道吸能值与面密度呈二次抛物线关系。VAN DER WERFF H 等<sup>[26]</sup>分析发现,子弹穿透无纬布的层数和子弹冲击速度呈正相关,子弹每穿透 1 层无纬布,就会损失一定的冲量。王绪财等<sup>[27]</sup>研究了 UHMWPE 复合材料在多发子弹射击下的防护效能变化,结果表明,其初始纤维结构紧密,纤维层间协同作用较强,表现出较好的防弹性能;经多发子弹侵彻后,样品结构变得松散且纤维层出现高低不平的现象,UHMWPE 复合材料的防弹性能减弱且不均匀性增大。

**1.2.2 UHMWPE 机织物** 田鹭新等<sup>[28]</sup>研究了平纹 UHMWPE 纤维织物的静态防割性能和动态防刺性能,发现织物纬向的静态防割性能优于经向;对于动态防刺性能,穿刺力到达第 1 个波峰时对应的作用时间为 303 ms,总响应时间为 497 ms。张肖<sup>[29]</sup>以 UHMWPE 纤维为纱线原材料,在重磅宽幅产业用片梭织机上试织了厚度达 8 mm 的织物,研发了多层经纬纱一次交织成型技术,为双纬锁心三维机织物的量化生产提供可能。该研究还发现,当经纬密度平衡或者经纱密度略大于纬纱,且织物结构紧密时,其防刺性能优异;相同材料、相同经纬密

度条件下,方平组织织物纱线的屈曲次数是平纹组织的一半,因而其扩散能力更强,防刺效果更好。

**1.2.3 复合结构** UHMWPE 无纬布在防弹领域应用广泛,机织物则多用于提升防刺性能,因此,为提升织物的防弹防刺综合性能,常将无纬布和机织物复合使用。

袁子舜等<sup>[30]</sup>设计并试制了不同铺层顺序的 UHMWPE 平纹织物和无纬布复合靶板(见图 2),发现铺层顺序对复合靶板防弹性能有较大的影响,平纹织物位于迎弹面时,复合靶板的吸收能量较位于背弹面时提高约 20% [见图 2(b)],防弹性能更优。吴道正<sup>[31]</sup>研究了 3 种国产 UHMWPE 纤维机织布、无纬布和非织造布的防刺性能,通过准静态穿刺实验发现,3 种织物的防穿刺性能依次为机织布 > 无纬布 > 非织造布;他进一步研究了机织布和非织造布混杂体系的动态穿刺性能,发现与单一组分的防刺服相比,两种织物混杂铺层制成的防刺服防刺性能更优。顾肇文<sup>[32]</sup>通过 UHMWPE 无捻长丝织造了细支平纹布与非织造布,并将两种织物交替叠加,制成了防刺性能佳,且厚度适中、质量较轻的复合防刺服,提升了防刺服柔软性和舒适性。



注:A 表示平纹织物层;B 表示无纬布织物层。

图 2 UHMWPE 平纹织物与无纬布复合  
Fig. 2 Composite of UHMWPE plain fabric and weft-free fabric

在防弹防刺复合材料领域,对位芳纶纤维和 UHMWPE 纤维是应用较多的高性能纤维,且 UHMWPE 纤维的应用日益广泛。近几年,中国的对位芳纶纤维和 UHMWPE 纤维发展很快,但与国际高性能纤维技术水平和市场占有率相比,仍有较大



差距,我国的相关科研人员和企业研发部门还需不断提升两种纤维的综合性能,扩大国际市场占有率。

1.3 其他高性能纤维

除了芳纶和 UHMWPE 纤维,科研人员也在不断探寻新型高性能纤维,如聚对苯撑苯并双噁唑(PBO)纤维、聚(2,5-二羟基-1,4-苯撑吡啶并二咪唑)(PIPD)纤维、“蛛丝”纤维等。

1.3.1 PBO 纤维 PBO 纤维商品名为 Zylon,是一种新型高性能纤维,其强度、模量、耐热性在所有的纤维中均遥遥领先。据报道<sup>[33]</sup>,高端 PBO 纤维产品的强度为 5.8 GPa,模量为 270 GPa,耐热温度超过 600 ℃,极限氧指数高达 68%。尽管 PBO 纤维性能优异,但由于其耐老化性能较弱,且纤维表面光滑,惰性大<sup>[34]</sup>,严重限制了其在防弹防刺服领域的大规模应用。

1.3.2 PIPD 纤维 PIPD 纤维是 Akzo Nobel 公司在 20 世纪末研发的一种超高性能纤维,其分子结构是材料学家根据高性能材料的结构与性能关系设计而来。PIPD 纤维具有比模量高、比强度高、抗

紫外老化等优点。在防弹要求相同的条件下,使用试制的 PIPD 纤维(强度 3.96 GPa,模量 271 GPa,断裂伸长率 1.7%)替代对位芳纶,可使装备质量减轻 42%~63%<sup>[35]</sup>。但经过 20 余年的发展,只有荷兰、美国、中国等少数国家开展 PIPD 纤维制备的初步研发工作,尚未形成系统的单体、聚合与纤维制备技术,距其规模化应用还有一定距离。

1.3.3 “蛛丝”纤维 美国麻省理工的陆军生物化学指挥中心和加拿大某生物科技公司研究人员提取了蜘蛛的基因,并植入山羊体内,使羊奶具有蜘蛛丝蛋白,再利用特殊的纺丝程序,把蜘蛛丝蛋白纺成人造基因蜘蛛丝(“蛛丝”纤维)<sup>[36]</sup>。“蛛丝”纤维的强度是钢丝的 4~5 倍,未来有望用于制造超强防护服装。但是,目前“蛛丝”纤维价格较高,因此降低开发成本是其未来工业化生产的关键。中国科学家通过转基因蚕合成了“蛛丝”纤维,其拉伸强度为 1 299 MPa,韧性为 319 MJ/m<sup>3</sup>,是凯夫拉纤维韧性的 6 倍<sup>[37]</sup>。图 3<sup>[37]</sup>为蚕吐“蛛丝”示意。蚕的饲养技术已十分完善,该技术为“蛛丝”纤维的低成本、规模化生产提供了新方法。

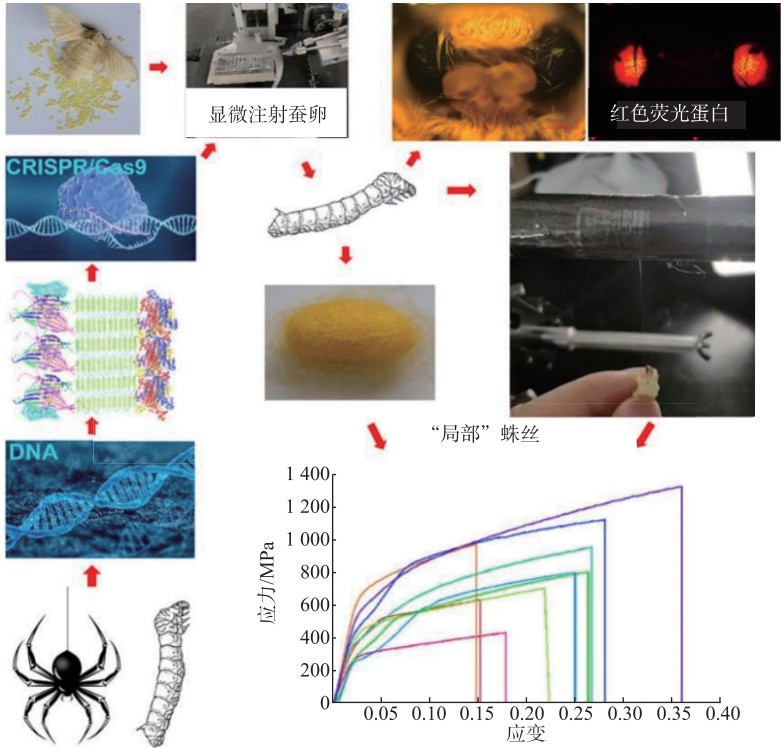


图 3 蚕吐“蛛丝”示意

Fig. 3 Diagram of silkworm spitting "spider silk"

表 1 为 5 种防弹防刺纤维的特点对比。由表 1 可以看出,每种纤维各有其优缺点,因此很多学者根据不同材料的优点,将纤维混合制成复合材料,以提升其防护性能<sup>[38-39]</sup>。例如,UHMWPE 纤维可以很好地弥补芳纶纤维在耐紫外性能和耐水性能方

面的不足,因此芳纶纤维和 UHMWPE 纤维的复合材料为当前研究的热点<sup>[40]</sup>。由表 1 可知,PBO 纤维不耐老化,“蛛丝”纤维不耐水,未来可以将两者复合,解决复合材料耐候性差的问题,同时实现 PBO 纤维和“蛛丝”纤维的规模化应用。

表 1 防弹防刺纤维特点对比		
Tab. 1 Comparison of the characteristics of bulletproof and stab-resistant fibers		
种类	优点	缺点
芳纶纤维	高强、高模、高韧,耐高温,化学稳定性好	耐紫外性差,耐水性差
UHMWPE 纤维	高强、高模,低密度,耐低温,耐腐蚀,冲击吸收能量高,耐紫外线,耐水性强	熔点低,与树脂的黏合性差
PBO 纤维	高强、高模,耐高温	耐老化性差,与树脂的黏合性差
PIPD 纤维	高强、高模,抗紫外老化	价格高,工业化水平低
“蛛丝”纤维	高强、高韧	耐水性较差,成本高

## 2 防弹防刺服相关标准

随着防弹防刺纤维复合材料的发展,防弹防刺服相关标准也在不断修订完善。

张洋洋等<sup>[41]</sup>归纳了国内外常用的防弹衣标准:美国发布的 NIJ 0101. 06 于 2018 年修订为 NIJ 0101. 07,是目前世界范围内防弹衣防护等级评定最常用的标准之一<sup>[42]</sup>;俄罗斯应用较广泛的标准为 GOST 34286—2017《防弹衣分类和一般规范》;英国防弹衣最新标准是 HOSDB《警用防弹衣标准》;德国应用最多的是 SCHUTZKLASS—2008《防弹标准—SK1》;北约制定了 STANAG 2920《个人装甲材料和防弹衣弹道测试方法》;中国防弹衣标准现行版本为 GA 141—2010《警用防弹衣》。马文俊等<sup>[43]</sup>对国内外典型防刺服标准进行了分析,得出国外较权威的防刺性能测试标准是美国的 NIJ 0115. 00《个体装甲防刺技术标准》和英国的 HOSDB 2007《防刺服技术标准》;德国应用的是 VPAM 2011《防刺服技术标准》;欧洲标准化委员会制定了 PREN 法;中国防刺服现行标准是 GA 68—2019《警用防刺服标准》。

综上所述,目前国内外防弹衣、防刺服标准较多,但两者兼具的个体防护标准极少,迫切需要制定既满足防弹需求又满足防刺需求的统一标准。基于此,吴中伟等<sup>[44]</sup>于 2021 年起草制定了《软质芳纶无纺布防弹防刺服规范》团体标准。可以预见,随着防弹防刺服的发展和实际需要,兼顾防弹和防刺性能的行业标准或国家标准将会逐步制定。

## 3 结 语

防弹防刺纤维复合材料作为个体防护的关键,其高防护性与轻量化始终是研究人员不断追求的目标。因此,为了研发综合性能更为优异的防弹防刺服,未来需从以下 3 方面开展深入研究。

1)更高性能的原材料。研发人员需设计开发更高性能的新型高性能纤维材料;突破近些年高性能纤维的发展瓶颈,为防弹防刺纤维复合材料的开发奠定基础。

2)更优化的组织结构。研发人员需分析不同种类纤维材料之间的匹配度;探究不同织物结构复合使用时的最佳铺层顺序和配比,以实现更好的协同防弹防刺效果。

3)更客观的测试标准。通过修订现行标准,保证测试评价的准确性;并制定更加完善的防弹防刺性能测试国家标准,用高标准助力防弹防刺双防服高质量发展。

### 参考文献:

[ 1 ] 虎龙, 艾青松, 陈虹, 等. 新型双防服的研究与制备 [J]. 中国个体防护装备, 2019(1): 4-6.  
HU Long, AI Qingsong, CHEN Hong, et al. Research and preparation of new bulletproof and stab-resistance vest [J]. China Personal Protective Equipment, 2019(1): 4-6. (in Chinese)

[ 2 ] 闫卫星, 郭艳文, 陈红霞, 等. 防弹防刺面料研究概况 [J]. 产业用纺织品, 2022, 40(7): 1-7, 32.  
YAN Weixing, GUO Yanwen, CHEN Hongxia, et al. Research overview of bulletproof and stab-resistant fabrics [J]. Technical Textiles, 2022, 40(7): 1-7, 32. (in Chinese)

[ 3 ] HE Y M, JIAO Y N, ZHOU J Q, et al. Ballistic response of ultra-high molecular weight polyethylene laminate impacted by mild steel core projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 169: 104338.

[ 4 ] 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 Zhiwei, LI Jialu, et al. Structure and bullet-proof mechanism of ballistic composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(11): 94-100. (in Chinese)

[ 5 ] PATHAK R K, PATEL S, GUPTA V K, et al. A computational analysis of the high-velocity impact performance of lightweight 3D hybrid composite armors [J]. Applied Composite Materials, 2023, 30(3): 727-751.

[ 6 ] 马飞飞. 柔性防刺材料及其制品的研究现状与进展 [J]. 产业用纺织品, 2020, 38(5): 1-4, 21.  
MA Feifei. Study status and progress of flexible stab-resistant materials and their products [J]. Technical Textiles, 2020, 38(5): 1-4, 21. (in Chinese)

- [7] ALY N M, HAMOUDA T. Stab, spike and knife resistant textiles [M]//Advances in healthcare and protective textiles. Amsterdam: Elsevier, 2023: 355-385.
- [8] 翟文, 魏汝斌, 甄建军, 等. 高性能复合材料在人体防弹防刺技术领域的应用与展望[J]. 纺织导报, 2017(S1): 66-72.
- ZHAI Wen, WEI Rubin, ZHEN Jianjun, et al. Application and prospect of high-performance composites in human body protection technology field[J]. China Textile Leader, 2017(S1): 66-72. (in Chinese)
- [9] MAWKHLIENG U, MAJUMDAR A, LAHA A. A review of fibrous materials for soft body armour applications[J]. RSC Advances, 2020, 10(2): 1066-1086.
- [10] 陈虹, 崔正浩, 虎龙, 等. 国际化双防服产品的轻量化研究[J]. 合成纤维, 2021, 50(2): 39-42.
- CHEN Hong, CUI Zhenghao, HU Long, et al. Research on lightweight of international bullet and stab proof vest [J]. Synthetic Fiber in China, 2021, 50(2): 39-42. (in Chinese)
- [11] 汪勇峰, 蒋培清, 张波等. 背板层间黏结性能对 SiC/UHMWPE 复合装甲防弹性能影响的数值分析[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(5): 1-11.
- WANG Yongfeng, JIANG Peiqing, ZHANG Bo, et al. Numerical analysis of the effects of interlayer bonding properties of backplates on the ballistic performance of SiC/UHMWPE composite armor [J]. Advanced Textile Technology, 2023, 31(5): 1-11. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 吴中伟, 高沛, 陈虹, 等. 基于城市安全单警防弹防刺材料研究[J]. 高科技纤维与应用, 2017, 42(6): 25-29.
- WU Zhongwei, GAO Pei, CHEN Hong, et al. Study on police bullet and stab proof material based on city security [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2017, 42(6): 25-29. (in Chinese)
- [14] 方心灵, 常浩, 许冬梅, 等. 芳纶无纬布防弹防刺性能的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(3): 45-48.
- FANG Xinling, CHANG Hao, XU Dongmei, et al. The study of bullet-proof and stab-resistant performance of aramid UD cloth [J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2015, 40(3): 45-48. (in Chinese)
- [15] 高晓清, 左向春, 袁承军, 等. 树脂基防弹防刺材料的研究[J]. 中国个体防护装备, 2012(6): 12-14.
- GAO Xiaqing, ZUO Xiangchun, YUAN Chengjun, et al. The research of resin based bullet and puncture proof materials [J]. China Personal Protective Equipment, 2012(6): 12-14. (in Chinese)
- [16] 李亚滨, 徐玲玲. 聚氨酯复合芳纶织物的防刺性能[J]. 天津工业大学学报, 2017, 36(4): 27-31.
- LI Yabin, XU Lingling. Stab resistance of polyurethane/aramid composite fabric [J]. Journal of Tiangong University, 2017, 36(4): 27-31. (in Chinese)
- [17] 闫学军, 白勇, 朱晨瑜. 利用剪切增稠液体的先进防弹衣的弹道冲击性能研究[J]. 中国个体防护装备, 2016(4): 43-48.
- YAN Xuejun, BAI Yong, ZHU Chenyu. The ballistic impact characteristics of kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid [J]. China Personal Protective Equipment, 2016(4): 43-48. (in Chinese)
- [18] 叶明琦. 三维高密防刺织物的开发及其性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [19] YANG Y X, ZHANG X Q, CHEN X G, et al. Numerical study on the effect of Z-warps on the ballistic responses of para-aramid 3D angle-interlock fabrics [J]. Materials, 2021, 14(3): 479.
- [20] 王芳, 杨莹雪, 闵胜男, 等. 经向衬垫结构对三维角联锁织物弹道性能的影响[J]. 上海纺织科技, 2022, 50(9): 31-34.
- WANG Fang, YANG Yingxue, MIN Shengnan, et al. Effect of warp wadding on the ballistic performance of 3D layer-to-layer angle-interlock fabrics [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2022, 50(9): 31-34. (in Chinese)
- [21] HE Y F, MIN S N, CHEN S, et al. Effect of Z-binding depths on the ballistic performance of 3D woven through-the-thickness angle-interlock fabrics in a multiply system [J]. Journal of Industrial Textiles, 2023, 53: 1-33.
- [22] 叶卓然, 罗靓, 潘海燕, 等. 超高分子量聚乙烯纤维及其复合材料的研究现状与分析[J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4286-4309.
- YE Zhuoran, LUO Liang, PAN Haiyan, et al. Research status and analysis of ultra-high molecular weight polyethylene fiber and its composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4286-4309. (in Chinese)
- [23] 李焱, 黄献聪. 水性聚氨酯/UHMWPE 纤维防弹复合材料无纬布预浸料成型工艺研究[J]. 中国个体防护装备, 2007(6): 5-8.
- LI Yan, HUANG Xiancong. Forming process study of the water soluble polyurethane/UHMWPE fiber UD for ballistic composite [J]. China Personal Protective Equipment, 2007(6): 5-8. (in Chinese)
- [24] 梁子青, 周庆, 邱冠雄, 等. 超高分子量聚乙烯纤维防弹复合材料的研究[J]. 天津工业大学学报, 2003, 22(2): 6-9.
- LIANG Ziqing, ZHOU Qing, QIU Guanxiong, et al. Study on ultra-high molecular weight polyethylene antiballistic composites [J]. Journal of Tiangong University, 2003, 22(2): 6-9. (in Chinese)

- [25] 顾冰芳, 龚烈航, 徐国跃. UHMWPE 纤维复合材料防弹机理和性能[J]. 纤维复合材料, 2006, 23(1): 20-23.  
GU Bingfang, GONG Liehang, XU Guoyue. Ballistic resistance mechanism and performance of UHMWPE composites[J]. Fiber Composites, 2006, 23(1): 20-23. (in Chinese)
- [26] VAN DER WERFF H, HEISSERER U. High-performance ballistic fibers[M]//Advanced Fibrous Composite Materials for Ballistic Protection. Amsterdam: Elsevier, 2016: 71-107.
- [27] 王绪财, 王伟, 陈春晓, 等. 超高分子量聚乙烯复合材料抗多发弹性能试验研究[J]. 中国测试, 2018, 44(10): 145-150.  
WANG Xucai, WANG Wei, CHEN Chunxiao, et al. Experimental study on the multi-hit performance of UHMWPE composite material[J]. China Measurement and Test, 2018, 44(10): 145-150. (in Chinese)
- [28] 田鹭新, 曹海建, 黄晓梅, 等. 相同紧度的 Kevlar 纤维织物与 UHMWPE 纤维织物的防刺性能对比[J]. 产业用纺织品, 2019, 37(10): 30-34.  
TIAN Luxin, CAO Haijian, HUANG Xiaomei, et al. Comparison of the stab resistance between Kevlar fiber fabric and UHMWPE fiber fabric with the same tightness[J]. Technical Textiles, 2019, 37(10): 30-34. (in Chinese)
- [29] 张肖. UHMWPE 纤维双纬锁心三维机织物研发[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- [30] 袁子舜, 陆振乾, 许玥, 等. 超高分子量聚乙烯纤维平纹织物-单向布混合堆叠板的防弹机制[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2707-2715.  
YUAN Zishun, LU Zhenqian, XU Yue, et al. Ballistic mechanism of the hybrid panels with UHMWPE woven fabrics and UD laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2707-2715. (in Chinese)
- [31] 吴道正. 柔性复合防刺材料的研制[J]. 合成纤维, 2011, 40(8): 32-34.  
WU Daozheng. The development of complex stab-resistant body armor[J]. Synthetic Fiber in China, 2011, 40(8): 32-34. (in Chinese)
- [32] 顾肇文. 柔性复合防刺服机理研究[J]. 纺织学报, 2006, 27(8): 80-84.  
GU Zhao wen. Study on the principle of soft complex stab-resistant body armor[J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(8): 80-84. (in Chinese)
- [33] ZHANG J T, JIN N R, GAO J R. Superior comprehensive performance of a rigid-rod poly(hydroxy-p-phenylenebenzobisoxazole) fiber[J]. Polymer, 2018, 149: 325-333.
- [34] ZENG J, KONG H, DU X, et al. Surface modification of PBO fibers with 2,2-bis(3-amino-4-hydroxyphenyl) hexafluoropropane in supercritical carbon dioxide for enhancing interfacial strength[J]. Materials Today Chemistry, 2021, 20: 100426.
- [35] CUNNIFF P, VETTER E, SIKKEMA D J. High performance "M5" fiber for ballistics structural composites[C]//23th Army Science Conference. Orlando: ASC, 2002:1-8.
- [36] 晓曾. 可拦截战斗机的人造基因蜘蛛丝[J]. 民防苑, 2002(2): 30.  
XIAO Zeng. Synthetic genetic spider silk that can intercept fighter jets[J]. Civil Defense Realm, 2002(2): 30.
- [37] MI J P, ZHOU Y Z, MA S Y, et al. High-strength and ultra-tough whole spider silk fibers spun from transgenic silkworms[J]. Matter, 2023, 6(10): 3661-3683.
- [38] LI Z Y, XUE Y S, SUN B Z, et al. Ballistic penetration damage for hybrid carbon/Kevlar/UHMWPE fiber laminated composites: experimental and numerical techniques[J]. Composite Structures, 2023, 316: 117037.
- [39] 贾文星, 贾子琪, 田国峰, 等. 聚酰亚胺/超高分子量聚乙烯纤维混杂增强复合材料防弹性能[J]. 复合材料学报, 2023, 40(7): 3921-3927.  
JIA Wenxing, JIA Ziqi, TIAN Guofeng, et al. Bulletproof performance of polyimide/UHMWPE fiber hybrid reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(7): 3921-3927. (in Chinese)
- [40] 李伟, 韩林, 刘伟, 等. 防弹防刺涂覆芳纶材料的选型及其应用研究[J]. 玻璃纤维, 2023(3): 31-35.  
LI Wei, HAN Lin, LIU Wei, et al. Research on the selection and application of bullet-proof and stab-proof coated aramid materials[J]. Fiber Glass, 2023(3): 31-35. (in Chinese)
- [41] 张洋洋, 赵洪山, 彭伟, 等. 国内外防弹标准防护等级的研究与对比[J]. 兵工学报, 2022, 43(9): 2017-2036.  
ZHANG Yangyang, ZHAO Hongshan, PENG Wei, et al. Research and comparison of protection rating in domestic and foreign bulletproof standards[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(9): 2017-2036. (in Chinese)
- [42] KOOHESTANI A S, BASHARI A. Advanced bulletproof and stab- and spike-resistant textiles[M]//Advances in functional and protective textiles. Amsterdam: Elsevier, 2020: 261-289.
- [43] 马文俊, 周鑫, 滕飞, 等. 警用防刺服国内外标准关键技术指标对比探析[J]. 中国安全防范技术与应用, 2021(1): 9-12.  
MA Wenjun, ZHOU Xin, TENG Fei, et al. Comparative analysis of key technical indexes of domestic and foreign standards for police stab-resistant clothing[J]. China Security Protection Technology and Application, 2021(1): 9-12. (in Chinese)
- [44] 吴中伟, 刘元坤, 张中英, 等. 软质芳纶无纬布防弹防刺服规范: T/QLKZSH 2—2021[S]. 北京: 全联科技装备业商会, 2021. (责任编辑: 沈天琦)