

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.024

# 防弹衣材料及防护性能研究进展

王金梅

(济南工程职业技术学院, 济南 250010)

**摘要:**通过对硬质防弹衣、软质防弹衣、软硬防弹衣以及液体防弹衣防弹机理的研究,厘清研制新型防护材料的需求和发展方向。通过分述高性能纤维复合材料、石墨烯防护材料、聚对苯撑苯并二噁唑纤维复合防弹材料、混杂结构防弹复合材料、无纺布防护材料、液体防护材料的性能特点、结构种类、应用方向、防护效果等,为制作不同功能的防弹衣有效选用不同种类的防护材料提供依据。阐述了各种类型防弹衣的应用前景和发展趋势,充分考虑穿戴者的生理状态、环境变化和袭击威胁等多种情境,概述了现代战争对多功能防弹衣的迫切需求与广泛的应用空间,并结合电子防弹衣、新型智能防弹衣,现代数字化技术不断升级,物联网和智能传感器实时监测技术的未来发展趋势,挖掘和探索防弹衣结构设计、外观设计与内在质量、防护效果的协调作用,实现防弹衣防护效能和穿着舒适美观的统一,为现代新型防弹衣的设计、制造和应用,提供充分的理论支持和实践指导。

**关键词:** 防弹衣; 防弹材料; 防护性能; 应用现状; 发展趋势

**中图分类号:** TG353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0165-08

## Research progress of body armor materials and protective properties

WANG Jinmei

(Jinan Engineering Polytechnic, Jinan 250010, China)

**Abstract :** Aiming to clarify the demand and development direction of new protective materials by studying the bulletproof mechanism of hard body armor, soft body armor, soft and hard body armor and liquid body armor. The performance characteristics, structural types, application directions and protective effects of high-performance fiber composite materials, graphene protective materials, fiber composite bulletproof materials, hybrid structure bulletproof composite materials, non-woven protective materials and liquid protective materials were described, which provided a basis for the effective selection of different types of protective materials for the production of different functions of body armor. The application prospect and development trend of various types of body armor were elaborated in depth, fully considering the wearer's physiological state, environmental changes and attack threats and other situations, and the urgent need for multi-functional body armor and a wide range of application space in modern war were outlined, combined with electronic body armor, new intelligent body armor, modern digital technology continues to upgrade. The internet of things and smart sensors real-time monitoring of the future development trend of technology, mining and exploring the coordination of body armor structural design, appearance design and internal quality, protective effect, to achieve the unity of body armor protective effectiveness and wearing comfort and beauty, for the design, manufacturing and application of modern new body armor, to provide sufficient theoretical support and practical guidance.

**Keywords :** body armor ; bulletproof material ; protection performance ; application status ; development tendency

为适应现代战争及防暴反恐的新需求,防弹衣对有效保护人体、减少伤害至关重要,被广泛应用于军事、警用以及民用领域。现代以来,随着枪炮等新型武器的持续迭代更新,

对有生力量的杀伤力也日益增强,因此,“如何有效减少有生力量的损耗”成为一个必须面对的课题。这给防弹衣的飞速发展及更新换代提供了广阔的发展空间,对防弹衣材料及其

**基金项目:** 山东省艺术教育专项课题项目(YJ201811161)

**通信作者:** 王金梅,教授,主要从事纺织服装教育教学与功能性服装研究

**收稿日期:** 2024-08-17

**引用格式:** 王金梅. 防弹衣材料及防护性能研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10): 165-172.

WANG Jinmei. Research progress of body armor materials and protective properties[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(10): 165-172.

防护性能进行深入研究,具有极为重要的研究价值和深远的社会意义。

枪、炮等攻击性武器与防弹衣是矛与盾的关系,攻击性武器的发展必然带动防护材料及防弹衣的发展,因此,世界各国也越来越重视防弹衣的研究<sup>[1]</sup>。笔者阐明了高强度轻量化防弹衣材料的发展历程,概述了防弹衣材料的国内外研究现状,展望了防弹材料与防弹成衣的发展前景<sup>[2]</sup>。

### 1 防弹衣的防弹机理探究

防弹衣的防弹机理是通过高性能纤维的变形,使快速飞行的射体在受到瞬间冲击的情况下,分散并吸收绝大部分动能,减震缓冲层则吸收剩余的动能,迫使快速飞行的射体被阻止在防弹衣的毁弹层,并形成蘑菇状或饼状,进而实现防弹的效果<sup>[3]</sup>。

目前,防弹衣防弹机理的类型大致可分为以下几种。

#### 1.1 硬质防弹衣防弹机理

硬质防弹衣防弹机理属于“阻挡型”<sup>[4]</sup>,依靠坚硬的材料弹开子弹及碎裂的破片,通过防弹材料自身一定程度的破坏和子弹、炮弹破片等投射物体本身的形变、碎裂而使得射体动能被耗散,能量被吸收,起到防止贯穿的目的,进而实现有效防护的效果<sup>[5]</sup>。

#### 1.2 软质防弹衣防弹机理

软质防弹衣防弹机理属于“擒拿型”<sup>[4]</sup>,通过高密度纺织将高性能纤维重叠20~40层,利用多层重叠材料的破裂、摩擦和拉伸形变,吸收消耗子弹、破片等冲击物的动能,达到防止非贯穿性损伤的目的,进而实现有效防护的效果<sup>[5]</sup>。

Billon等<sup>[6]</sup>研究表明,软质防弹衣吸收能量有以下5种方式:①抗弹材料自身的形变,包括射体入射点附近区域的拉伸变形与射体侵入方向的改变;②抗弹材料本体被破坏,如纤维断裂、纤维原纤化、纱线和织物本体的破坏;③热能,以摩擦转变成热能的方式而散发;④声能,通过射体受到冲击爆发响声而耗费能量;⑤采用软硬复合式防弹衣,综合运用两者的优势来提高防弹能力,可以巧妙地用“软硬兼具,相得益彰”来概括防弹机理。

#### 1.3 软硬结合防弹衣防弹机理

软硬结合防弹衣防弹机理集成了软质防弹材料与硬质防弹材料两种防护材料的轻柔与坚硬,发挥了两种防护机理的优势,在提高其抗贯穿能力的同时,还提升了抗非贯穿损伤能力,软硬结合,发挥最大的防护效能<sup>[4-5]</sup>。通常情况下,广泛应用的软硬组合式防弹衣,以普通软体防弹衣为基体,分别在前面、背面填充使用硬质防弹复合材料防弹衬板,有效提高其防护性能。

#### 1.4 液体防弹衣防弹机理

液体防弹衣主要由一种特制“剪切增稠液体(STF)”组成。液体防弹材料作为一种新型战略性功能材料,是由在无毒聚乙烯醇流体中大量悬浮的硬质纳米级硅胶微粒组成<sup>[7]</sup>,剪切增稠液体和特种纤维织物复合制备的一种高性能柔性防护复合材料。一般情况下,STF防弹材料与普通液体一

样,柔软且可流动,采用该液体防护材料制备的防弹衣在通常环境下仍具有柔软和可挠曲性,不会影响人体的活动。当遇到子弹、炮弹碎片、刀剑等硬物撞击时,液体防弹材料可以在极短时间内转变为一种硬质防弹材料,阻止射体的贯穿,快速提高防弹材料抵抗冲击的能力,且沿织物快速分散冲击力,大大降低防弹材料单位面积的压强,阻碍子弹或刀剑等尖锐物的侵袭。当子弹、刀剑等入侵物体的冲击力消散后,该液体防弹材料就会立即恢复其原来的液体状态,有效解决穿着舒适性与高效防护之间的冲突,满足液体防弹衣穿着灵活、舒适、轻柔与高效防护的综合需求。

### 2 防弹衣材料及其防护性能的现状和发展方向

防弹衣的发展在一定程度上会受到防弹衣防护材料发展的制约,同时又要确保不能影响武器装备发展的前景。从藤甲材料、铁、铜等金属材料,发展到陶瓷材料、高性能纤维复合材料,再到剪切增稠材料和纳米级材料,防弹衣防护材料的发展方向非常明确,不断提高作战人员的机动性、战斗力、生存力,因此,实现防护材料的飞速发展是全面提高作战人员综合能力的基础和前提<sup>[8]</sup>。

#### 2.1 防弹衣材料的起源

“矛与盾”是不可分割、永远联系在一起的,因此,自从有了战争,就有了防护,也就有了“盔甲”。在冷兵器时代,受制于当时防护材料的局限性,利用藤甲不怕水且具有良好的透气性属性,成为制作“盔甲”的材料,并在实际应用中,逐步对这种藤甲“盔甲”进行改造,用桐油泡过的藤甲,在其外面涂上一层大漆,从而制作出防护性能和穿着性能更加优良的防护“盔甲”。但因为藤甲属于木质材料,防火性能极差,较易遇火燃烧,引发火灾,失去了防护效能,也就到达使用的终点,最终被具有阻燃性能的材料所取代<sup>[11]</sup>。后来,随着青铜等金属材料的出现,又开始使用这些金属材料制作盔甲,同时,也就有了青铜等金属材料制成的刀、剑等攻击性更强的武器,于是,在这种“矛与盾”相互克制、相互促进中,防弹材料和防弹衣也得到了发展。后来,既要考虑防护性能,又要考虑穿着性能,研制出防刺材料和软垫相结合的现代防刺服,这就是现代防弹衣的前身——明光铠甲<sup>[11]</sup>。

#### 2.2 高性能复合材料在防弹衣材料中的应用研究

适用于防弹衣的材料多种多样,许多新型高性能复合材料不断涌现,如碳纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维、玄武岩纤维、聚对苯撑苯并二噁唑(PBO)纤维等。目前,世界上公认的三大高性能纤维,碳纤维、芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维,被广泛应用于防弹防刺材料领域<sup>[12]</sup>。PBO纤维质地柔软,冲击性强、耐高温、阻燃、不易老化、耐摩擦、稳定性强,具有优异的物理和化学性能,作为制作新一代防弹材料的基础材料,被誉为“21世纪超级纤维”<sup>[13]</sup>。

##### 2.2.1 芳纶纤维复合材料

芳纶纤维最早于1972年在美国研制成功,是由芳香族聚酰胺树脂织成的纤维,随后俄罗斯、中国、荷兰、日本也研制出具有抗弹性能的高性能芳纶纤维。我国学术界将芳纶

纤维划分为三类:芳纶Ⅰ也称芳纶 14,也就是聚对苯甲酰胺(PBA)纤维;芳纶Ⅱ,也叫芳纶 1414,也就是聚对苯二甲酰对苯二胺(PPTA)纤维;芳纶Ⅲ,也叫杂环芳纶,也就是杂环芳香族聚酰胺纤维。

作为抗弹复合材料的一种,芳纶防弹复合材料是通过芳纶或织物增强树脂基体复合而成的,其中应用最为普遍的是采取高速干湿法纺丝工艺生产的芳纶Ⅲ。主要品牌产品包括中国生产的 Taparan OOR 系列、俄罗斯生产的 Terlon OR 系列、美国杜邦公司生产的 KevlarOR 系列、美国杜邦公司研制的凯芙拉纤维<sup>[16]</sup>、日本帝人公司生产的 Twaro 等。芳纶Ⅲ具有超高的品质,大幅提升了高性能纤维复合防弹材料的防弹性能。我国于 2015 年已经将芳纶纤维应用于军队、警察、民用防护装备中,标志着我国在芳纶关键技术和产业化方面取得了较大进展<sup>[8]</sup>。

橡胶基芳纶纤维复合材料的抗冲击性能优良,为橡胶基芳纶纤维复合材料在防弹衣和头盔等抗冲击领域的广泛应用奠定了基础。芳纶纤维因密度低、模量高、强度特性高、耐高温、蠕变小<sup>[17]</sup>、具有良好的冲击吸收能力等优点,被作为防弹材料,广泛用于军工防护服及其它特殊领域<sup>[18-20][11]</sup>。

芳纶无纺布通常是由芳纶纤维在特种胶黏剂中浸透后,经过加热烘干而制成的,具有比质量较小、抗弹比吸收能大、阻燃性好、抗化学腐蚀性好和耐老化、舒适性好、隐蔽性强等特点,在防弹衣材料中应用越来越广泛<sup>[21]</sup>。

刘元坤等<sup>[22]</sup>研究表明,树脂基体不同,防弹复合材料吸收能量的能力存在有较大差异,树脂基体的选择及配比工艺对于抗高速冲击的防弹复合材料性能的影响极为重要,在这种复合材料中,树脂基所起的作用,主要有三个<sup>[4][44]</sup>:①黏结原料,通过黏结在一起的纤维,使复合材料作为一个整体来承受外部载荷;②反射应力波,通过将能量上下表面传递、前后传导发挥作用;③能量吸收,基体沿着水平方向扩展,在高速冲击下产生裂纹,进而吸收部分的能量。此外,在基本因素不变的情况下,冲击阻抗随着复合材料树脂基体厚度的增加而提高,复合材料的冲击防护能力也随着其厚度的增加而增强。防弹复合材料性能优异,具备较高的弯曲强度,由于贯穿于结构厚度方向上的纵向约束为防弹复合材料提供了整体稳定性,大大增加了层与层之间剪切强度,有效减少了层与层之间的分层现象。

### 2.2.2 超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)纤维材料

荷兰 DSM 公司通过凝胶纺丝法首先制成 PE-UHMW 纤维<sup>[24-25]</sup>,具有质量轻、强度高、耐光照、吸湿性小的特点<sup>[25]</sup>,在防弹衣领域获得了广泛应用<sup>[27]</sup>。PE-UHMW 纤维抗弹复合材料和无纬(UD)布抗弹复合材料的防弹性能与其拉伸强度、结晶度、拉伸弹性模量以及分子量成正比关系;断裂伸长率与其凹陷深度相关,较小的断裂伸长率更易于形成较小的凹陷深度<sup>[26]</sup>。

马华菁等<sup>[40]</sup>研究表明,由经过特定工艺处理的芳纶或 PE-UHMW 复合材料按照横向和纵向交叉胶合而成的 UD 布

防弹材料是制作高性能复合材料软质防弹衣的重要材料。具有较好的耐疲劳性、耐磨性、耐冲击性和耐药品性,耐紫外线,吸湿性小,在防弹衣领域占据重要位置,具有广阔的市场前景<sup>[18][28]</sup>。王怀颖等<sup>[8]</sup>研究显示,PE-UHMW 纤维的力学性能好,是当前应用最为广泛的三大高性能纤维,又因其质轻而备受青睐。由其复合而成的防弹复合材料,在高速射体冲击下,有较强的吸收或耗散能量的能力,能量吸收率几乎是芳纶Ⅱ的两倍,抗弹性能极好;同时,它几乎不受外界环境的影响,化学性能极其稳定,还有较高的耐光性,在酸、碱、水等介质环境中表现稳定。王绪财等<sup>[29]</sup>通过靶试试验探究了 PE-UHMW 复合材料抗多发弹的防护性能,结果表明,经过多发弹冲击后,样品靶板结构会发生显著变化,分数性变大,致使其抗弹能量减弱,抗弹效果受到较大影响。从试验结果可以看出,影响抗弹效果的不仅是防弹材料本身,结构设计对抗弹效果的影响显而易见,因此,优化结构设计是提升软质防弹材料抗多发弹的有效途径之一。孙非等<sup>[30]</sup>试验表明,研究了 PE-UHMW 软质防弹材料在各种条件下的老化情况,对经过高湿热、氙弧灯照射及高温 3 种人工加速老化的结果进行分析,通过横向和纵向比较,利用线性回归方程进行较为准确的预判,为科学合理使用储存防弹衣提供了理论依据。石凌飞等<sup>[31]</sup>研究表明,通过电子束或紫外光辐照,可以改善界面性,使其面密度降低,在不明显降低力学性能的情况下,通过对 PE-UHMW 纤维复合材料合理设计、完善工艺、实验方法改进,能够有效提高其防弹性能。周熠等<sup>[32]</sup>实验表明,当 PE-UHMW 纤维复合材料层数较少时,子弹、炮弹破片等射体能够比较容易地通过剪切作用使纤维断裂吸收能量,其相对松散的结构有益于抵抗冲击物的剪切作用,表现出较为显著的能量吸收性能,且随着材料层数增多,处于冲击面远端的材料横向拉伸作用会减弱;而单向铺层结构因其纤维被黏合剂固定,致使抵抗子弹等冲击物的拉伸作用增强,单向铺层复合材料的抗弹性能越好。当抗弹复合材料机织物靠近冲击物一侧,单向铺层处于冲击物远端时,抗弹复合材料防弹性能较好。经实验研究,单向铺层材料质量为机织物质量的 3 倍时,复合材料防弹性能最优,且比单一单向铺层复合材料防弹效果更优。

### 2.2.3 石墨烯材料

石墨烯是由碳原子构成的一种新型纳米材料,被称为 21 世纪划时代意义的材料,厚度仅为 0.335 nm,是当今世界上最薄的二维材料<sup>[33]</sup>。石墨烯与其它纳米材料相比,强度高,远超钢强度的百倍,而质量则只有一张纸的 0.001,具有硬度高、热膨胀系数低、长径比极高和比表面积大等优点,拉伸弹性模量高达 1 TPa,极限强度达到 130 GPa 以上,是力学性能极高的材料<sup>[35-36]</sup>。石墨烯柔性复合材料推动了传统防护材料防弹性能的跨越式提升,作为未来制造防弹材料的极佳原材料之一,为高性能防弹衣、防弹插板的设计制造提供基本遵循。

碳纳米管和石墨烯制备的纳米复合材料,成为弹道装甲

车辆的绝佳选择,有望成为具有优异的刚度和强度、轻密度的新型纳米复合材料,大的抗断裂性能和高能量吸附增加了其在未来防弹衣中的潜在用途。

#### 2.2.4 PBO纤维

PBO纤维具有优异的力学性能,阻燃性好、耐高温、不易导电、绝缘性能好、柔软、质轻、抗氧化性能好、较高的化学稳定性、良好的拉伸强度和刚度,能够有效阻挡子弹、炮弹碎片的贯穿,因此,被广泛用于制造防弹衣、防弹头盔等防护装备<sup>[24]</sup>。但其存在纤维与涂层结合力较弱、抗光老化能力极差、纤维表面光滑且惰性大等弱点<sup>[38-39]</sup>。

张忠峰等<sup>[71]</sup>研究表明,PBO纤维抗弹复合材料具有抗拉伸、耐冲击、化学稳定性好等防弹综合性能,作为一种新兴的防弹复合材料纤维,不仅广泛应用于防弹防刺领域,实现了现代防弹防刺服安全性、舒适性和经济性的多方面需求,而且在体育用品、船体建材、航天工程、医学医疗等领域得到了广泛应用。

#### 2.2.5 UD布

UD布作为一种制作高性能复合材料柔性防弹衣的关键材料,在柔性防弹衣设计中应用非常广泛<sup>[41-42]</sup>。UD布不同于其他形式的柔性复合材料,它是单向铺层结构,纱线相互间平行排列,利用树脂黏合剂实现层与层之间的黏合,纱线之间由于平行排列而没有交织点,可以达到快速吸收能量、扩散能量,分散子弹的高速冲击波,防弹性能较为优异。Karaham<sup>[43]</sup>研究了对位芳纶机织物与不同织物层数的UD布防弹性能,靶板弹道试验表明,在厚度相同的情况下,UD布靶板吸收能量的性能优于机织物靶板,其吸收效率比机织物靶板高约12.5%~16.5%。

UD布结构织物由KEVLAR,PE-UHMW等高性能纤维与热塑性树脂复合制备而成,具有较好的防弹性能,兼具优良的力学性能和良好的动能吸收性,是当前防弹织物使用较多的一种结构<sup>[44]</sup>。如今,水性胶黏剂技术的发展及生产工艺的改进使UD布在防刺产品中的应用越来越广泛<sup>[45]</sup>。虎龙等<sup>[46]</sup>研究发现,UD结构防弹防刺服兼具防弹和防刺性能,可在军队、警察及民用防弹衣领域得到广泛应用。Zhang等<sup>[47]</sup>试验研究表明,经过热压固化法制备的各种复合材料中,经测试单向预浸料、双向平纹织物和立体正交织物增强了PE-UHMW复合材料防弹性能,防弹性能最好的是单向预浸料增强的PE-UHMW复合材料。

芳纶UD布的防弹性能与胶黏剂种类、硬度、固含量,单层无纬布的面密度、芯片的整体面密度等因素相关,所选用的胶黏剂必须与纤维表面的油剂充分相溶,织造的UD布软硬度适中,材料的凹陷及安全裕度才能满足相应的要求。试验数据显示,当胶黏剂的固含量约20%~22%时,UD布的防弹性能最佳。当UD布层数达28层时,产品的性价比更高<sup>[21]</sup>。

#### 2.2.6 混杂结构防弹复合材料

混杂结构设计是在充分发挥各种不同性能材料优势的

情况下,经工艺优化,根据弹道冲击中材料厚度方向上各部位的受力特点,在发挥自身性能的同时,协同提升复合结构的整体防弹性能<sup>[48-50]</sup>。当单一纤维不能满足防弹复合材料性能的要求时,采取工艺优化复合混杂纤维是制成防弹、防刺性能材料的一种重要渠道<sup>[24]</sup>。Bandaru等<sup>[50]</sup>研究表明,混杂复合材料的防弹性能与混杂材料的种类、混杂顺序、铺层顺序设计等因素密切相关。当混杂复合材料厚度相同时,采用芳纶纤维与碳纤维组合形成的混杂复合材料防弹性能优异,且在高应变芳纶纤维处于后端时,而高性能的玻璃纤维和碳纤维处于末端时,抗弹性能最好。混杂防弹复合材料的防弹性能与混杂纤维的种类、比例、混杂方式、成型工艺以及树脂的组合选用等诸多因素有关,试验表明,PE-UHMW纤维复合材料与碳纤维复合材料混杂制成的新型防弹复合材料防弹性能更好<sup>[51]</sup>。

Bao等<sup>[52]</sup>研究表明,混杂复合材料的防弹性能明显优于单纯使用碳纤维的复合材料或单纯使用芳纶的复合材料,尤其在混杂复合材料首先接受冲击的方向使用碳纤维复合材料,而在最后接受撞击的方向使用芳纶纤维复合材料混杂而成的制品,防弹效果最好。Cheon等<sup>[53]</sup>研究发现,混杂复合材料防弹性能优于使用单一材料的防弹性能,特别是当碳纤维复合材料处于铺层表面时,其背面铺层为芳纶纤维的混杂复合材料时,防弹防刺性能较佳。艾青松等<sup>[54]</sup>研究表明,在控制凹陷方面,面密度较大的防弹织物效果更好,当芳纶机织布处于防弹复合材料前部时,防弹效果增幅明显,尤其是在采取防弹织物与21层防弹芳纶无纬布结构时,防弹效果更佳,能有效抵御美国防弹衣标准中ⅢA级别冲击物的撞击。且能通过柔软度测试,面密度仅为5.2 kg/m<sup>2</sup>。孙杰等<sup>[12]</sup>研究表明,混杂纤维复合材料防弹性能与各种不同种类的混杂纤维、混杂方式等息息相关,通过改变纤维间分子晶度方向,可以有效提高混杂复合材料的力学性能;通过改善树脂基体与纤维的黏接,进一步优化界面黏接性能,可以增强混杂复合材料吸收或耗散冲击能量的能力。优化设计混杂纤维复合材料,改变纤维的混杂种类、方式和比例等,取长补短,充分发挥各自材料的优势,达到提升混杂纤维复合材料防弹性能的效果。

#### 2.2.7 液体防弹材料

液体防弹材料具有环保性、无毒害、阻燃性、防爆性等特点,是一种新型智能纳米材料。其最突出的特点是,在一般情况下,该材料与普通液体无异,具有流动性和可变性,当遇到子弹、炮弹破片、刀剑等外力撞击时,会迅速变得无比坚硬,能有效抵御外来物的贯穿,起到缓冲减震、防弹、防刺、防贯穿的作用<sup>[55]</sup>。

剪切增稠液体防护材料——第四代防护材料,是一种可逆相变材料,适合用于制作轻质防弹衣或防护部件,关键特性是可以依据外力的冲击与消失,在液体与固体之间迅速互变<sup>[56]</sup>。剪切增稠液体材料与其它高性能纤维材料复合可以制成一种低成本且应用前景广泛的新型材料,防弹效果较

好,不弱于高性能纤维织物防弹复合材料,且因无需使用叠层过多的普通织物而有效减轻了质量,同时具有普通服装的舒适性、灵活性,可用于人体各个部位的防护,且该材料具有相变可逆性,还具有液体防弹材料的柔韧性和坚韧性的优点<sup>[57-58]</sup>。

“液体防护材料”的设想是由美国 Delaware 大学的 Wagner 教授首次提出的,其运用新型纳米技术成功研制出 STF 液体防弹材料,并与美国武器原料研究理事会 Eric Wetzel 博士联手推进了新型装甲材料的应用实践,在 STF 的基础上,采用浸渗工艺,与高性能纤维材料复合制成一种质量轻、可变形好的新型液体防弹复合材料,既增加了个体防护装甲的柔软性,又有效减轻了装备的质量。

软质防弹衣采用 STF 技术,既满足了穿着舒适、灵活、轻便的需求,又提高了防护性能。防护机理为,材料受冲击后,能量分散区域较宽,可有效防御普通软质防弹衣在人体被击中后可能造成的瘀伤疼痛、皮肤损伤、骨肉伤害甚至内脏创伤。衡量传统防弹衣的标准是能否阻挡住直径 6.3 mm、质量 1.04 g、飞行速度 526 m/s 的圆珠的打击,俄罗斯研究人员发现,由 STF 材料制成的复合材料液体防弹衣则可抵挡飞行速度 558 m/s 的圆珠的打击。另外,由剪切增稠液体与凯夫拉纤维复合制成的软质防弹衣,具有防刺、防碎片、防弹、防贯穿等防护性能,还兼具质量轻、灵活性高等优点<sup>[59]</sup>。

祝成炎等<sup>[60]</sup>研究表明,将丙纶加入 Kevlar 纤维织物与剪切增稠液体复合制成的防弹复合材料,由于丙纶的加入,材料纤维间结合得更加牢固,加大了纱线间的摩擦力,能够有效提高织物的交织阻力,从而提高其抵抗冲击的能力,进而提高了复合材料的防弹性能。

### 3 防弹衣的发展历程及未来发展趋势

随着科技的进步以及现代战争、警察防暴需求的变化,对防弹衣的要求越来越高,满足轻量化、低成本、舒适化、多功能化的需求越来越迫切。在不降低防护性能的前提下,减轻防弹衣质量与厚度、降低防弹衣成本、提升防弹衣舒适度、增强防弹衣防水性能、阻燃性能等功能成为防弹衣未来的发展趋势<sup>[61]</sup>。随着防弹衣的发展,在注重防弹的同时,更加注重防弹衣的外观设计符合人体工程学的理念,使穿着更加舒适、隐蔽、环保、轻盈,满足经济性、审美性、实用性等更高层次的要求。例如,当身穿防弹衣受到子弹、破片等冲击时,能够达到凹陷接近为零、受创伤最小的防护效能<sup>[62]</sup>,外观设计更具美观性,局部结构与功能更有创新性。

#### 3.1 防弹衣的起源

世界上第一件防弹衣的设计灵感来自于蜘蛛网,1893 年,爱尔兰移民用手枪击中芝加哥市长卡特,卡西米萨格兰牧师非常痛心,看到蜘蛛在蜘蛛网上的行动,受到蜘蛛丝的启发,制作了第一件防弹背心,卡西米萨格兰也因此被称为“防弹衣之父”<sup>[63]</sup>。

#### 3.2 基于仿生学防弹材料制作的防弹衣

龙虾尾巴下部是由分开成数万层的小薄膜叠加而成的,

每层薄膜都有与稻草细丝相似的甲壳素纤维,相互交织形成非常密集的微观网络结构,非常坚韧,耐受刮擦和切割。研究人员发现,在一定程度上,龙虾利用这种膜的弹性,通过尾巴的前后摆动,利用其天然的尾部钳状构造,使捕食者难以下嘴,成功地保护尾部。其尾部薄膜属于自然界最坚硬的水凝胶材料,随着薄膜的拉长,它的硬度与强度不仅不会降低,反而会不断增加,直至达到它原始长度的 2 倍,变得更加坚硬、柔韧。由于龙虾薄膜具有弹性大、韧性好的特点,为提高防弹衣的舒适、轻便、灵活提供了设计灵感和依据。科研人员从中得到启发,模仿其制作出仿生学材料防弹衣,实现了灵活性和安全性于一体的防护效果<sup>[64]</sup>。

借助壁虎自我恢复功能的设计理念,制作了一种可以自我修复的智能模拟穿山甲鳞片防弹衣。它不同于传统的凯夫拉纤维复合材料防弹衣,其被子弹、刀剑等冲击后仍能反复使用,增强了抵挡连续打击和抗多发弹的综合防护效能,避免了传统的内置钢板或陶瓷受到子弹打击即失去其防护效能的尴尬。穿山甲鳞片分子结构以一种奇特的方法相连,具有记忆功能,能够记忆最初形状,使鳞片的抗冲击能力更强,实现自我修复的目的。穿山甲智能防弹衣,无论破坏多么严重,只需要用水对其进行处理,3~5 min 内,其所有凹陷、形变等损伤都会进行自我弥合,恢复到原始状态<sup>[64]</sup>。

#### 3.3 石墨烯材料防弹衣

石墨烯以  $sp^2$  杂化键合成单层蜂窝晶格状结构,在材料学、微纳加工、生物学等领域广泛应用,被认为是一种未来革命性的材料。美国纽约市立大学 Elisa Riedo 教授等研究的双层石墨烯防弹复合材料,由两个石墨烯片组成的碳化硅基板,厚度非常小,硬度非常高,强于钻石,被称为 Diamene 的新材料。在通常情况下,其轻便灵活,当受到突然施加的机械压力时,就会瞬间变得无比坚硬。该材料性能独特,其硬化效应只发生在具有两层石墨烯片的材料中,多或少于两层都没有这种效果,在科学上可以用类比非牛顿流体来帮助解释这一现象。故而,对该材料的研究和探索,还需要投入更大的成本和精力,研究如何通过合理的配置,使其性能达到最优<sup>[33]</sup>。

英国 Planar Tech 公司与泰国 IDEATI 公司,利用了石墨烯能够显著提升强度的特性,联合推出 2AM 石墨烯系列防护用品。2AM 是一种防弹复合材料,由 PE-UHMW 纤维与石墨烯复合而成。其中 A-10418 产品,是目前世界上最薄(20 mm)、最轻(1.8 kg)且获得美国国家司法协会(NIJ)弹测认证合格的 IV 级独立防弹板<sup>[34]</sup>。

#### 3.4 液体材料防弹衣

目前,应用较为普遍的一种超级液体防弹衣,于 2010 年由英国航空航天系统成功研发制成,由于其具有与果冻类似的形状而被命名“防弹奶油冻”新型液体防弹衣。其主要由凯夫拉尔纤维与 STF 材料复合而成,随着剪切率的增加,这种特殊液体的黏度会随之提高。美国也在科技创新博览会中推出新型液体防弹衣,在确保穿着者安全的情况下,以凯

美拉纤维材料为基体复合而成的液体防弹衣厚度大大减少,仅为传统防弹衣的厚度的一半左右,而其防弹性能却提升了三分之一左右,满足了士兵穿着舒适且能有效防弹的要求<sup>[55]</sup>。

### 3.5 多功能防弹衣

电子防弹衣能够在极短的时间内捕捉处置危险信号,同时快速反应产生干扰破坏信号,能够将来袭的炮弹等引入偏离目标的轨道,引导炮弹在远离目标几百米处发生爆炸,从而起到有效防护的作用<sup>[63]</sup>。目前,研究人员成功研制出一种新型智能防弹衣,由多条具有求助功能的预拉伸弹性纱与聚氨酯涂层纤维集成电路板组。该防弹衣被目标击中后,能够在第一时间发出求助信息,准确回复中弹者的具体位置。试验表明,该电路板可反复使用而不影响其功能,在被拉伸100万次、清洗30次的情况下,性能不受影响;当其受到子弹、刀剑等冲击,纤维电路板迅速作出反应,及时将信号传回控制中心,便于有效掌控士兵受伤的信息,并及时给予救治,大大提高了战士的作战效能。

自制充气防护结构防弹衣,可有效减少人体与防弹衣覆盖区域直接接触的表面积,同时增加人体与防弹衣之间的接触距离,不仅能起到良好的缓冲作用,还能够减少抗外伤深度,从而减缓非贯穿性伤害<sup>[65]</sup>。

防弹衣多功能化发展,新型衣、被两用防弹衣得到广泛的应用。采用国产轻质芳纶无纺布防弹材料,从人体工程学角度出发,反复研究其结构和工艺,创新设计出新型衣、被两用防弹衣,在战时可充当防弹衣使用,在平时休息中则可充当防弹被,用于御寒、防潮湿、防止意外伤害等<sup>[66]</sup>。

适应复杂多变的外部环境,具有防弹、防刺、防贯穿等多功能综合防护防弹衣已然成为当前防弹衣研究领域的重点和热点,特别是穿着柔软、轻便、舒适,又兼具高防护性能的柔性防弹防刺服在部队、警察、民用领域越来越受到青睐<sup>[67]</sup>。

便携式轻量化隐蔽式防弹衣具有质量轻、舒适度高和机动性强等特点,能够在不被发现的情况下起到防护作用,还可以根据战士的实际需要,适时拆装防弹或添加防刺功能。同时,根据不同的使用环境设计特制的防弹款式,例如适应重要外交场所的防弹衣,设计制作具有仿真纽扣的服装,从外观上与普通的西服款无异,不会引起敌对势力的关注,从而更好地起到防弹防刺效能<sup>[68]</sup>。

2020年11月,美国Citizen Armor公司使用一种专有的纳米增强高拉伸强度纳米材料制成新型防弹衣,相比于传统防弹衣,质量减轻66%,且材料柔软、穿着舒适,还具有防水性,大大提高了防弹衣的耐用性、稳定性和可贮存性,还有效提高了防弹衣抗多发弹持续不断射击的能力,实现了更好的抗弹效果<sup>[72]</sup>。

俄罗斯成功研制出一种由杂环芳纶制作的防弹衣,由外套、芯片和防钝伤材料等部分组成。采用填充式结构,防弹芯片与外套之间不缝制,外套采用普通的服装材料制成,防钝伤材料采用泡沫和织物相结合的方式,使用这种材料制成

的防弹衣具有良好的防钝伤效果,穿着舒适,既轻又柔,凹陷深度较小<sup>[69]</sup>,更能满足人体需求。

为适应不同的气候条件,以防战士在高温、高湿条件下穿着防弹衣出汗发热,瑞士联邦材料试验和科研研究所与日本东丽-杜邦公司合作开发了一种新型防弹衣,在防弹背心中心安装冷却系统,满足战士在高温等特殊条件下的应用需求,该防弹衣已取得瑞士警方认证<sup>[70]</sup>。

### 3.6 新型防弹衣的综合研发设计,将引领防弹衣的未来发展趋势

防弹衣的发展历程充分展现了人类对生命安全的不懈追求,设计关注防弹材料及其防护性能的同时,更加注重外观设计艺术性与审美性相结合。如:依据GA 141-2021警用防弹衣标准设计,首先面料选择采用针织与梭织优化组合,柔软服帖且挺括,保型性好,减轻防弹衣的质量,提高穿戴者的舒适性和机动性,同时提高防弹衣的防护效果。还可实施模块化设计,使防弹衣更加灵活多变,穿戴者根据实际需求进行组装和调整。如设计不同等级的防护模块,可以根据任务需要自由搭配,实现个性化的防护需求。其次,内在结构创新设计强调要以人为本,充分考虑人的生理、心理和行为特点,注重人体工程学(也称为人体工学或人体因素工程学)的研究,使防弹衣更加贴合人体曲线,减少穿戴者的束缚感,提高舒适性和机动性。同时,针对不同部位和不同任务需求,可以采用不同的尺寸设计,提高防弹衣的针对性和实用性。另外,随着数字化技术不断升级,物联网和传感器技术的发展,未来的防弹衣可能会集成智能传感器,能够实时监测穿戴者的生理状态、环境变化和袭击威胁等信息,提供更加精确的预警和保护。

总之,创造性地创新研发与制作现代新型防弹衣,需要从材料、结构、功能和生产工艺等多个方面进行综合考虑和创新,不断优化和探索防弹衣的外观设计与内在质量,一直是防弹衣设计领域的重要研究方向。

## 4 结语

通过对防弹衣材料的发展历程、技术原理、应用现状以及防弹性能的研究,综述了多种防弹复合材料的防弹机理、防护效能,并对当前防弹衣的现状与发展前景进行了展望,紧密结合现代战争对防弹衣多功能的要求,对多种不同功能的防弹衣进行分析研究,尤其对防弹衣的结构设计、服装设计以及二者的有机融合进行了独到的研究剖析,为促进高性能防弹衣材料的研制和开发提供理论依据和实践基础。

## 参考文献

- [1] 陈智勇,等.中国陶瓷.2018,54(11):1-8.  
CHEN Zhiyong, et al. Chinese Ceramics. 2018, 54(11):1-8.
- [2] 胡晓蕾,等.模型世界.2020,12:28-30.  
HU Xiaolei, et al. Model World. 2020, 12:28-30.
- [3] 张佐光,等.复合材料学报.1998,15(2):74-81.  
ZHANG Zuoguang, et al. Journal of Composite Materials. 1998, 15(2):74-81.

- [4] 袁红,等.数字化用户.2017,24:217.  
YUAN Hong, et al. Digital users.2017,24:217.
- [5] 杨坤,等.材料导报.2015,29(7):23-28.  
YANG Kun, et al. Materials Review, 2015, 29 (7):24-28.
- [6] BILLON H H, et al. Interational Jorl of Impact Engineering, 2001,25(4). DOI: 10.1016/s0734-743x(00)00049-x.
- [7] 志原.纺织装饰科技,2011(1):27.  
ZHI Yuan. Textile Decoration Technology, 2011(1):27.
- [8] 王怀颖,等.警察技术.2017(1):63-71.  
WANG Huaiying, et al. Police Technology.2017(1):63-71.
- [9] 乔咏梅,等.中国公共安全.2018(1):129-132.  
QIAO Yongmei, et al. Chinese Public Security.2018 (1):129-132.
- [10] 乔咏梅,等.警察技术.2017(3):81-84.  
QIAO Yongmei, et al. Police Technology.2017(3):81-84.
- [11] 陈鉴菲.中国科技纵横.2019(1):252-253.  
CHEN Jianfei. China Science & Technology Overview. 2019(1): 252-253.
- [12] 孙杰,等.科研与实践.2021(1):7-11.  
SUN Jie, et al. Research and Practice.2021(1):7-11.
- [13] LIU Z D, et al. Applied Surface Science, 2020, 512.DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.145719.
- [14] 孙西超,等.浙江理工大学学报(自然科学版).2014, 31(2): 127-131.  
SUN Xichao, et al. Journal of Zhejiang University of Science and Technology (Natural Science Edition).2014, 31(2):127-131.
- [15] CHEESEMAM B A, et al. Composite Structures, 2003, 61(1): 161-173.
- [16] 江洁,等.材料导报.2013,27(6):70-75.  
JIANG Jie, et al. Materials Review, 2013, 27(6):70-75.
- [17] 刘克杰,等.合成纤维工业, 2014, 37(5): 75. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0 041.2014.05.019.  
LIU Kejie, et al. Synthetic Fiber Industry, 2014, 37 (5). .DOI: 10.3969/j.issn.1001-0041.2014.05.019.
- [18] 黄乃科,等.高科技纤维与应用,2001,26(1):23-27.  
HUANG Naike, et al. High-tech Fibers and Applications, 2001, 26 (1):23-27.
- [19] 牛鹏霞,等.河北纺织,2010(1):16-21.  
NIU Pengxia, et al. Hebei Textile, 2010(1):16-21.
- [20] 李金宝,等.中国造纸,2004,23(10):54-57.  
LI Jinbao, et al. China Paper, 2004, 23(10): 54-57.
- [21] 吴中伟,等.防护装备技术研究.2016(3):5-8.  
WU Zhongwei, et al. Research on Protective Equipment Technology.2016(3):5-8.
- [22] 刘元坤,等.高科技纤维与应用.2022(3):18-23.  
LIU Yuankun, et al. High-tech fibers and applications. 2022 (3): 18-23.
- [23] 闫卫星,等.产业用纺织品.2022(7):1-6.  
YAN Weixing, et al. Industrial textiles.2022 (7):1-6.
- [24] 罗益锋.新材料产业.2016(3):10-15.  
LUO Yifeng. New Materials Industry.2016(3):10-15.
- [25] 王浩.高科技纤维与应用,2001,26(5):21-23.  
WANG Hao. High-tech Fibers and Applications, 2001, 26(5): 21-23.
- [26] 付杰,等.兵工学报.2021,42(11):2 453-2 464.  
FU Jie, et al. Journal of Ordnance Engineering. 201, 42(11):2 453-2 464.
- [27] 莫根林,等.兵器装备工程学报.2021,42(10):23-28.  
MO Genlin, et al. Journal of Ordnance Engineering. 201, 42(10): 23-28.
- [28] 肖文莹,等.材料开发与应用,2019,34(2):131-138.  
XIAO Wenying, et al. Materials Development and Application, 2019, 34(2):131-138.
- [29] 王绪财,等.中国测试.2018,44(10):145-150.  
WANG Xucai, et al. China Test. 2018, 44(10):145-150.
- [30] 孙非,等.兵工学报.2018,39(11):2 249-2 255.  
SUN Fei, et al. Journal of Ordnance Engineering. 2018, 39(11): 2 249-2 255.
- [31] 石凌飞,防护装备技术研究.2015(2):8-14.  
SHI Lingfei, et al. Research on Protective Equipment Technology.2015(2):8-14.
- [32] 周熠,等.纺织学报.2016,39(4):60-64.  
ZHOU Yi, et al. Chinese Journal of Textiles, 2016, 39(4):60-64.
- [33] 陈济桁.新材料产业.2021(4):44-48.  
CHEN Jiheng. New Materials Industry.2021(4):44-48.
- [34] GUPTA N, et al. Carbon Letters, 2019, 29(5):419-447.
- [35] PAPAGEORGIOU D G, et al. Progress in Material Science, 2017, 90:75-127.
- [36] LEE X J, et al. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 98:163-180.
- [37] 王哲,等.兵工学报.2024,45(1):35-43.  
WANG Zhe, et al. Journal of Ordnance Engineering. 2019, 45(1): 35-43.
- [38] ZENG J, et al. Materials Today Chemistry, 2021, 20(4):100426.
- [39] 孟进方,等.华中师范大学学报(自然科学版), 2021, 55(2): 231-237.  
MENG Jinfang, et al. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2021, 55(2):231-237.
- [40] 马华菁,等.棉纺织技术,2021,49(5):14-18.  
MA Huajing, et al. Cotton Textile Technology, 2021, 49(5):14-18.
- [41] MATHEUS P R, et al. Polymers, 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14204357.
- [42] 陈晓钢.纺织学报,2019,40(6):159-165.  
CHEN Xiaogang. Journal of Textile Research, 2019, 40(6): 159-165.
- [43] KARAHAN M. Textile Research Journal, 2008, 78(8):718-730.
- [44] 翟文,等.纺织导报,2017(B10):66-72.  
ZHAI Wen, et al. Textile Review, 2017(B10):66-72.
- [45] 艾青松,等.玻璃钢/复合材料,2019(5):106-109.

- AI Qingsong, et al. Glass Fiber Reinforced Plastic/Composite Materials, 2019(5):106–109.
- [46] 虎龙,等.合成纤维.2019,48(2):23–25.  
HU Long, et al. Chinese Journal of Synthetic Fibers, 2019, 48(2): 23–25.
- [47] ZHANG D T, et al. Materials and Design, 2014, 54:315–322.
- [48] SWOLFS Y, et al. Materials & Design, 2016, 93:39–45.
- [49] PANDYA K S, et al. Materials & Design, 2013, 44:128–135.
- [50] BAMDARU A K, et al. Composites Part B:Engineering, 2015, 76: 300–319.
- [51] 叶统双.科学论坛.2020(15). DOI: 10.12253/j. issn. 2096-3661.2020.15.711.  
YE Tongshuang. Science Forum. 2020 (15). . DOI: 10.12253/j. issn.2096-3661.2020.15.711.
- [52] BAO J W, et al. Investigation of the mechanical and ballistic properties of hybrid carbon/aramid woven laminates[EB/OL]. [2021-12-20].DOI:10. 1016/j. dt. 2021. 09. 009.
- [53] CHEON J, et al. Composite Structures, 2020, 234.DOI: 10.1016/j. compstruct.2019.111690.
- [54] 艾青松,等.高科技纤维与应用.2022(1):27–31.  
AI Qingsong, et al. High-tech Fibers and Applications. 2022(1): 27–31.
- [55] 宋庆庆,等.现代制造技术与装备.2016(10):53–54.  
SONG Qingqing, et al. Modern Manufacturing Technology and equipment. 2016(10):53–54.
- [56] 张倩玉,等.纺织学报.2021,42(6):180–188.  
ZHANG Qianyu, et al. Journal of Textile Science and Technology. 2018, 42(6):180–188.
- [57] WAGNER N J, et al. Physics Today, 2009, 62(10):27–32.
- [58] GALINDOROSALES F J, et al. Materials & Design, 2015, 82(3): 26–34.
- [59] 吕胜涛,等.警察技术.2014(1):54–56.  
LV Shengtao, et al. Police Technology.2014(1):54–56.
- [60] 祝成炎,等.浙江理工大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 312–315.  
ZHU Chengyan, et al. Journal of Zhejiang University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 33(3):312–315.
- [61] 吴中伟,等.防护装备技术研究.2014(6):5–9.  
WU Zhongwei, et al. Research on Protective equipment technology.2014(6):5–9.
- [62] 乔咏梅,等.检验与测试技术.2016(5):36–38.  
QIAO Yongmei, et al. Inspection and Testing Technology.2016(5): 36–38.
- [63] 赵凯,等.国防科技,2012,33(5):58–60.  
ZHAO Kai, et al. Defense Science and Technology, 2012, 33(5): 58–60.
- [64] 吴敏.轻纺工业与技术.2021(6):114–115.  
WU Min. Textile Industry and Technology.2021(6):114–115.
- [65] 李金鹿,等.工程塑料应用,2020,48(11):100–103.  
LI Jinlu, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 100–103.
- [66] 贺智,等.中国急救复苏与灾害医学杂志,2015,10(1):49–51.  
HE Zhi, et al. Chinese Journal of Emergency Resuscitation and Disaster Medicine, 2015, 10(1):49–51.
- [67] 裴鹏英,等.纺织导报,2017增刊:62–65.  
PEI Pengying, et al. Textile Review, 2017 Supplement :62–65.
- [68] 吴煜,等.警察技术,2020(5):74–76.  
WU Yu, et al. Police Technology, 2020(5):74–76.
- [69] 袁承军.警用防弹衣,2006(5):56–57.  
YUAN Chengjun. Police body armor, 2006(5):56–57.
- [70] 罗益锋.新材料产业,2016(3):10–15.  
LUO Yifeng. New Materials Industry, 2016(3):10–15.
- [71] 张忠锋,等.塑料包装,2021,31(2):51–55.  
ZHANG Zhongfeng, et al. Plastic Packaging, 2019, 31(2):51–55.