

服用软质防刺材料研究进展

李毓陵 殷琴 马颜雪 杨馨儒

东华大学 纺织学院, 上海 201620

摘要: 综述了防刺服的发展历程, 概述了防刺材料的研究现状, 介绍了材料的防刺机理, 以及相关的防刺测试标准和方法。重点介绍了织物/剪切增稠型服用软质防刺材料的研究进展, 分析了服用软质防刺材料可能的发展趋势, 为服用软质防刺材料的进一步研究开发提供参考。

关键词: 软质防刺材料; 复合材料; 剪切增稠; 防刺性能; 防刺机理

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)06-0032-08

Research progress of soft stab resistant materials for clothing

Li Yuling, Yin Qin, Ma Yanxue, Yang Xinru

College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: The development history of stab resistant clothing was reviewed, the current research status of stab resistant materials was summarized, the stab resistant mechanism and the test standards and methods of stab resistant materials were introduced. The research progress of the fabric/shear thickening soft stab resistant materials for clothing was introduced emphatically, and the possible development trend of soft stab resistant materials for clothing was analyzed. The research can provide reference for further research and development of soft stab resistant materials for clothing.

Keywords: soft stab resistant material; composite material; shear thickening; stab resistant property; stab resistant mechanism

以防弹衣为代表的军用防护服已被大众所熟知。在和平年代, 枪支弹药管制制度逐步完善, 国内违法犯罪分子持枪伤人等暴力违法案件非常少, 而持刀犯罪较为常见^[1]。据公安部统计, 最近 10 年内, 有 3 773 名警察在执勤时身亡, 有 5 万名左右的警察在工作时受到伤害, 其中大多数是被尖锐的刀具刺伤或割伤^[2]。匕首、刺刀等锋利器具在日常生活中难以妥善管控, 其潜在危险性不容忽视, 故在国

内相关案件处理中, 防刺服更适合作为国内执法人员的人身防护装备。防护服的使用范围广泛, 功能多样, 能有效保护执法人员的人身安全, 对于维护社会治安稳定具有重要意义。

防刺服是一种能够有效保护人体不受刺伤的服装, 其主要用于抵御匕首、刀具等常见锐器从各种角度对人体的攻击^[3]。通常, 防刺服应具有一定的抗冲击性能和抗穿刺性能。随着社会的发展, 人们对

收稿日期: 2024-03-08

作者简介: 李毓陵, 男, 1963 生, 教授, 主要从事纺织品设计理论与技术相关研究, lyu@dhu.edu.cn

防刺服舒适性的要求越来越高。纵观防刺服的发展历程,根据防刺材料的柔韧灵活程度,可将防刺服大致分为硬质防刺服、半硬质防刺服和软质防刺服 3 类^[4]。

硬质防刺服^[5]最先使用青铜板材制成,后转为使用钢板、铁板、铝板等相对轻质的材料,以减小防刺服的质量。硬质防刺服仍采用盔甲形式,但将整块金属板穿着于人体,会造成极大的不便。其后,研究人员将整块金属板分割成小块,并通过小块金属板拼接的形式制作防刺服,以增加其灵活性。后经进一步改良,人们将防刺甲片制成服装的芯层,并嵌装在服装夹层中,至此,形成了真正意义上的硬质防刺服。半硬质防刺服是将硬质防刺服用甲片替换为金属环、金属圈、金属片、金属丝等软质金属材料制成的。与硬质防刺服相比,半硬质防刺服的质量减小、柔软度提高,但其提高程度有限,人体穿着后的灵活度仍然受限。软质防刺服主要由高性能纤维制成,相比于硬质、半硬质防刺服,软质防刺服具有更好的日常穿着性和隐蔽性,但其存在复合层数多、工艺复杂、灵活性不够,以及高性能纤维价格高等问题。目前,软质防刺材料的研发及其防刺性能提升是该领域的研究热点,因此,有必要对防刺服及其材料进行进一步的探索研究^[6]。为此,本文综述防刺服的发展历程,概述防刺材料的研究现状及其防刺机理,介绍相关的防刺测试标准和方法,为服用软质防刺材料的进一步研究开发提供参考。

1 服用软质防刺材料的发展

高性能纤维织物的发展,促进了软质防刺材料的进一步升级与改良。软质防刺材料的发展大致可分为下述 3 个阶段:第一阶段,通过调整高性能纤维织物的层数和组织结构等,提升织物型软质防刺材料的防刺性能;第二阶段,尝试在高性能纤维织物表面添加硬质颗粒,增强织物/硬质颗粒型软质防刺材料抵抗刺穿的能力;第三阶段,通过在高性能纤维织物上复合剪切增稠材料,增强织物/剪切增稠型软质防刺材料的防刺效果。上述一系列举措为软质防刺材料在实际应用中的性能提升奠定了基础,下面就上述 3 方面的问题展开进一步的阐述。

1.1 织物型软质防刺材料

软质防刺材料起初更倾向于通过增加织物的层数,改变纱线、组织结构等方法,提高防刺性能。如,王颖^[7]将高强高模聚乙烯织物和黏胶非织造布进行叠层制备防刺材料并测试其防刺性能,发现叠层层数为 27 时,所得材料满足防刺标准要求,并且黏胶非织造布的使用改善了防刺材料的舒适度。雷鹏^[8]采用 3 种不同种类的平纹织物进行叠层,研究了织物种类、叠层角度、叠层层数对所得材料防刺性能的影响,得出叠层角度为 45°、叠层层数为 50 时,高强高模聚乙烯叠层材料的动态穿刺强力达 2 432.86 N。邹画眉等^[9]使用高性能纱线制备出不同结构的织物,探究织物结构对其防刺性能的影响,最终发现在制备的不同结构织物中,平纹织物具备更好的防刺性能。李丽娟等^[10]对比了经编织物和机织物的准静态防刺性能,发现经编织物的防刺性能更好。张卓等^[11]在柔性个体防护材料抗穿刺性能的试验研究过程中发现,纬编双轴向多层衬纱(multi-layered biaxial weft knitted, MBWK)织物的结构疏松,如图 1 所示,刀刃容易穿过织物中纱线的间隙并刺穿材料,进而割断纱线,故其无法单独用作防刺材料。钟智丽等^[12]探究了三维机织物的防刺效果,发现三维机织物由于具有一定的厚度且纱线间结构紧密,因而在动态刺割测试中表现出一定的防刺性能。



图 1 MBWK 织物结构示意图^[11]
Fig. 1 Structure diagram of MBWK fabric^[11]

上述研究表明:单层织物经叠层后可以达到防刺标准要求,但叠层会增大材料的质量和厚度,使材料在使用过程中的灵活性、舒适性受到影响;仅改变织物的组织结构不能使其满足防刺标准。总体而言,尽管通过增加织物层数和改变组织结构的方法并未制备出理想的防刺材料,但这些研究为后续研究提供了一定的参考。

1.2 织物/硬质颗粒型软质防刺材料

继纯织物型防刺材料后,出现了高性能织物进行涂层或浸渍处理,制备防刺性能更优的防刺材料^[13]。如,将硬质颗粒喷涂到高性能织物上^[14],制备防刺性能更优的织物/硬质颗粒型防刺材料。Xia等^[15]在确保防刺服防刺性能的基础上,使用碳化硼(B_4C)/环氧树脂对芳纶织物进行涂层,制得不同 B_4C 颗粒质量分数的涂层织物,如图2所示。他们

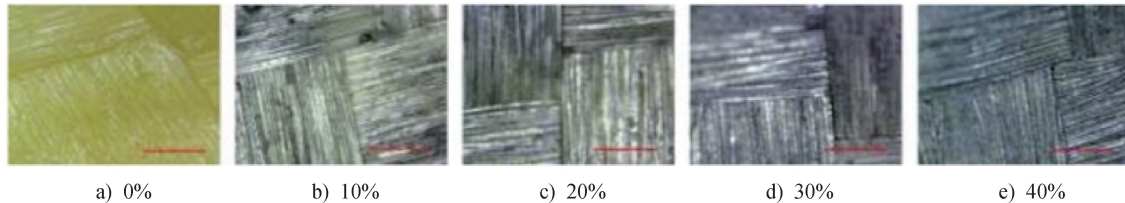


图2 不同 B_4C 颗粒质量分数的涂层芳纶织物的表面形态^[15]

Fig. 2 Surface morphology of coated aramid fabrics with different B_4C particle mass fractions^[15]

强桂燕等^[17]以涤纶织物为基布,将碳化硅(SiC)颗粒涂覆在织物表面,经热压制得柔性防刺材料,再对其进行多层叠加。试验发现叠加到12层时,所得材料满足防刺标准要求。王新厚等^[18]通过在涤纶织物上涂覆 SiC 颗粒制备防刺材料,并探究了 SiC 颗粒粒径大小、涂覆方式对材料防刺性能的影响。结果表明, SiC 颗粒粒径为 $180\ \mu m$ 时制得的复合材料防刺性能最好;当采用双涂覆时,单面双层涂覆方式更好。Nayak等^[19]对芳纶和锦纶混纺织物进行硬质颗粒(B_4C 颗粒)涂覆。研究结果显示,涂覆后的织物在防刺性能方面有了较大的提升,但透气性能下降严重,与未涂覆颗粒的织物相比透气率下降了87%。夏民民等^[20]将 B_4C 颗粒涂覆在芳纶织物上,涂覆后织物防刺性能明显提升。

采用硬质颗粒如 SiC 、 B_4C 等对织物进行涂层处理后,刀具穿刺过程中,硬质颗粒能够起到钝化刀尖、消耗部分能量的作用,从而降低刀具造成的伤害,达到提高柔性防刺材料防刺性能的效果。但要达到防刺标准,通常需要叠加比较多的层数,这造成了防刺材料重量和厚度增加,影响穿着舒适性和灵活性。同时,织物的透气性和柔软性有所下降,服用性能受到影响。此外,长期使用过程中,还存在硬质颗粒脱落的问题,造成防刺性能下降。尽管采用这种方法也未获得理想的防刺材料,但其为后续研究提供了一定的思路。

还对制得的织物进行准静态穿刺试验,发现颗粒粒径与质量分数的变化对织物的防刺性能有显著影响:颗粒粒径越小,质量分数越大,织物的防刺性能越好。杨婉秋等^[16]将硬质 B_4C 颗粒涂覆在超高模聚乙烯织物上,探讨了 B_4C 颗粒粒径、涂层厚度、 B_4C 颗粒含量对涂覆后织物防刺性能的影响。研究结果表明,涂层厚度与 B_4C 颗粒粒径的比值越大,织物防刺效果越好。

1.3 织物/剪切增稠型软质防刺材料

剪切增稠指体系黏度随着剪切速率或剪切应力的增加而增加的一种非牛顿流体行为。剪切增稠的特征是一旦外部施加的剪切应力的应变率超过临界剪切速率,剪切增稠材料黏度会急剧增加,消除外部施加的剪切应力后,其黏度将恢复为初始状态。由于剪切增稠材料具有很好的非线性力学性能,并且应用时不需要外部磁场或电场,因此其在缓冲、抗震及人体防护等方面具有良好的应用前景^[21]。剪切增稠材料分为剪切增稠液(shear thickening fluid, STF)和剪切增稠胶(shear thickening gel, STG)2种。

常态下STF多呈液体状,不宜封装、不便携带,且长期放置后容易因体系不稳定而出现分层现象^[22]。与STF相比,STG易于封装、便于携带,其整体性能更加稳定。同时,STG的制备较简单,成本较低,可实现工业化生产^[22]。但目前针对STG力学性能表征和性能改善的研究尚处于起步阶段,尤其是对其能量吸收能力与力学性能对应关系的认识还不够透彻。

1.3.1 织物/STF

STF与织物的复合通常采用浸渍/浸轧法,使STF附着于织物表面,实现织物/STF复合材料的制备。复合的织物多采用芳纶织物、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)织物与玻璃纤维织物等。经STF浸渍/浸轧处理后,织物经纬纱之间的摩擦力大

幅增加,交织点处的纱线滑移受限,受力一致性得以改善,所受的力能够在织物中很好地传递,防刺性能有所提升^[23]。

俞科静等^[24]研究发现,采用 STF 处理后的不同纤维,耐刺伤性的改善程度不同,这主要与纤维的表面能等因素有关。当芳纶、UHMWPE 和玻璃纤维织物的面密度相同时,使用 STF 可以有效增强织物抗刺性能,使其断裂强度较未处理的分别提高了 16.13%、13.37% 和 16.47%。蒋玲玲等^[25]制备了 STF-玻璃纤维织物复合材料,并对其进行准静态防刺性能测试。研究发现,STF 可以有效地改善织物的防刺性能。Qin 等^[26]用二氧化硅(SiO_2)和聚乙二醇(PEG)制备的 STF 对芳纶织物进行浸渍处理,提升了织物的防刺性能。Decker 等^[27]用 SiO_2 和 PEG 制备的 STF 对芳纶织物进行浸渍处理,然后将浸渍处理过的芳纶织物叠层用于落塔测试。结果显示,STF 能够改善 Kevlar 织物的防刀刺性能(图 3)。Li 等^[28]在 STF 中加入氧等离子体改性的多壁碳纳米管(M-MWNTs)用以提升 STF 的性能,再用其对 Kevlar 织物进行浸渍处理,制得的织物防刺性能得以提高(图 4)。沙晓菲等^[29]通过向 SiO_2 /PEG 体系的 STF 中加入新型分散相石墨烯(GNs)与碳纳米管(CNTs),制备多相 STF,再用该 STF 浸渍芳纶织物。结果表明,加入质量分数为 2% 的 CNTs 和 1% 的 GNs 后,体系的剪切增稠效果最明显,用其制备的复合材料防刺穿性能最优。Gürgeç 等^[30]以不同粒度的 SiC 添加剂和 PEG 为原料,合成了 SiO_2 /PEG 基 STF,再用其与超细对位芳纶(Twaron)织物复合,并对原芳纶织物(NT)、STF 浸渍的芳纶织物(T/STF)以及添加 SiC 粒子的 STF 浸渍的芳纶织物(T/SiC-A)进行防刺性能测试。结果表明,STF 处理显著提高了织物的耐锥刺性能,但防刀刺性能提高不明显(图 5)。刘星等^[31]对 SiO_2 粒子进行等离子体处理后,与 PEG 200 混合制备 STF 体系,再将其与芳纶织物复合。结果显示,所得复合材料的防锥刺性能明显提高,但防刀刺效果仍有待完善。

上述研究表明:经 STF 及改性 STF 处理后,织物的防刺效果得以提升,但提升程度有限,并且受分散相颗粒大小、种类^[32]以及分散介质种类等的影响;经 STF 及改性 STF 处理后,织物防刺效果提升的同时,柔软度下降;STF/织物防刺复合材料存在

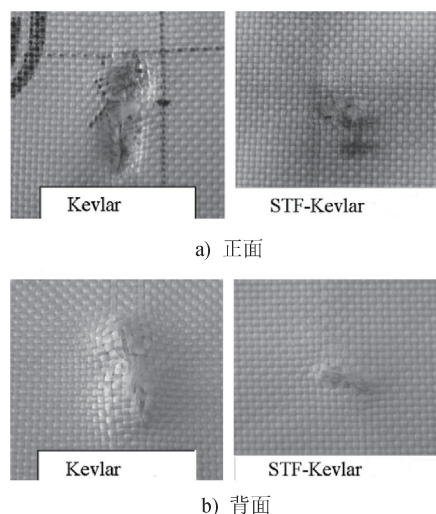


图 3 Kevlar 织物和 STF-Kevlar 织物的防刺性能测试结果^[27]

Fig. 3 Stab test results of Kevlar fabric and STF-Kevlar fabric^[27]

分散相颗粒易脱离,以及 STF 与织物复合后难以保持长期稳定性等问题^[33-34]。目前,采用这种方法也尚未获得理想的防刺材料,但这些研究对后续研究具有一定的参考价值。

1.3.2 织物/STG

目前,绝大多数研究是通过涂层方式将 STG 涂覆在纤维表面,制备复合材料以提升材料的防刺性能的,此法能够有效添加的剪切增稠材料较少,复合材料性能提高程度受限。为提高剪切增稠材料的添加量,使其成为防刺材料的主体材料,可以制备内部空间或孔洞较大的三维立体结构织物,如经编间隔织物、立体结构机织物等。并且,织物特殊的三维立体结构还能够使其更充分地、更充分地与剪切增稠材料复合,其中骨架支撑效果更佳^[35]。目前,将 STG 与三维织物复合用于防刺的研究较少,所得材料的防刺性能也较差,但其他方面的性能尤其是防冲击性能较好,同时还具有良好的服用性能。

王世娜^[36]对工字型织物进行了改良设计,其通过中间立衬层连接上下层的形式使三层连接成一体,制备了侧面呈工字型的方格立衬立体织物,用于羽绒被产品的设计制备。这种织物结构使传统工字型织物主体部分厚度减小,内部空间更大,可容纳性更强,可作为 STG 的封装织物。他们还将掺杂短绒的 STG 与工字型结构三维机织物复合,经测试发现,所得复合材料具有良好的抗冲击性能,但防刺性

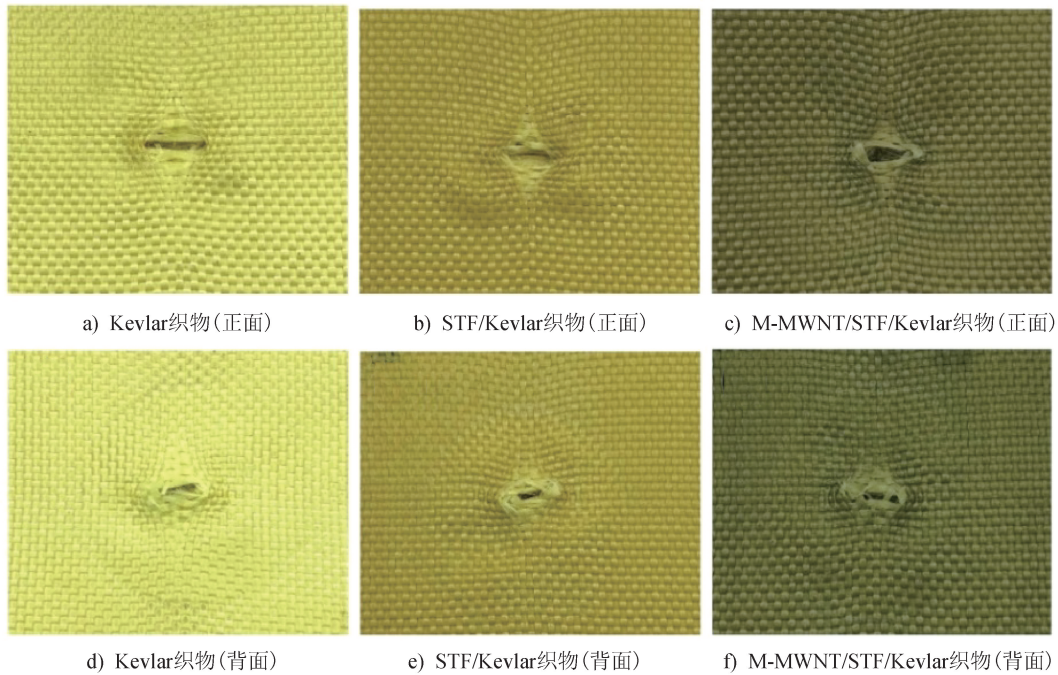


图4 准静态测试后的试样^[28]
Fig. 4 Samples after the quasi-static tests^[28]

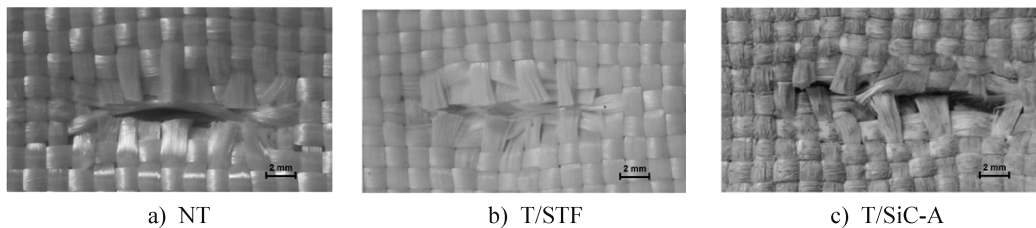


图5 NT、T/STF 和 T/SiC-A 刀刺后的损伤图^[30]
Fig. 5 Images of damage to NT, T/STF and T/SiC-A after knife drops^[30]

能不佳。封然然^[6]通过灌注的方法将 STG 与褶裥结构机织物复合,但所得材料并未达到很好的防刺效果。吴风帆^[35]将掺杂短绒的 STG 与褶裥结构机织物复合,测试发现,所得复合材料具有良好的抗冲击性能,但防刺性能不佳。为提升防刺性能,改进 STG 与三维机织物的复合方式还有待进一步研究。

1.4 其他类型软质防刺材料

刘娟等^[37]使用黏结成型工艺将圆形树脂颗粒离散排列在织物基布上,探讨圆形树脂颗粒间隙变化对试样柔软性和防刺性能的影响,发现随着空隙率的减小,试样防刺性能提升,柔软性变差。当空隙率为 21.03%时,所得试样兼具较好的柔软性与防刺性能。艾青松等^[38]将芳纶织物与水性胶黏剂结

合,制得芳纶无纬布,并通过准静态穿刺测试发现当树脂含量为 24%~27%时,芳纶无纬布具有良好的防刺性能,此时织物的面密度为 225 g/m²,但芳纶无纬布仍需叠加 34 层并与乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)泡沫结合,才能满足防刺标准要求。

综上,有关软质防刺服材料的研究越来越多,但多数情况下,织物防刺性能的实现需建立在其他性能变差的基础上。因此,如何平衡软质防刺服材料各方面的性能是一个亟需解决的问题。

2 防刺机理

防护性能主要包括防弹、抗冲击、防刺等性能。防弹性能的研究发展较早并且已经形成了较成熟的

理论体系^[39-40]。近几年,防刺性能的研究成为热点,穿刺速度、刺入时的接触面积等因素使得防刺机理与防弹机理存在很大不同^[41]。

软质防刺服抵御尖锐物体伤害的作用机理主要分为压缩侵入形变作用、碰撞阻挡钝化作用和反向切割作用^[13],如图 6 所示。

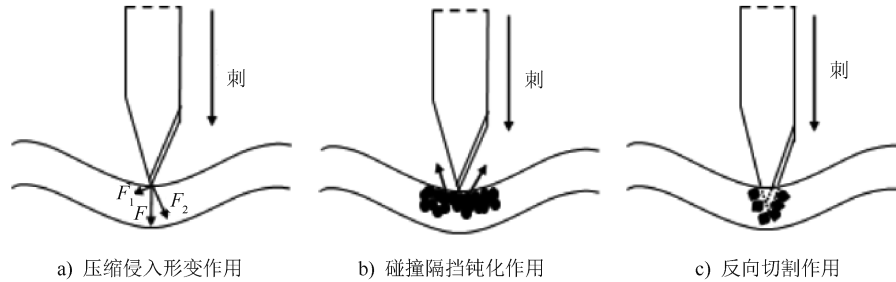


图 6 软质防刺服抵御尖锐物体伤害的作用机理

Fig. 6 Mechanism of soft stab resistant clothing against sharp object injury

2.1 压缩侵入形变作用

当织物受到切入、挤压等复合作用时,会产生相应的各类形变与滞后性,其中主要的是挤压和摩擦作用及其滞后性,这使其在受到尖锐物体作用时,能够通过材料本身的弯曲形变、挤压作用和摩擦作用来吸收尖锐物体的能量,避免被尖锐物体刺穿^[13]。涂覆 STF 可减少纱线之间的滑移,增大纤维与纱线之间的内聚力,增加纱线之间的摩擦,使更多的纤维参与到穿刺过程中,从而提高防刺性能^[42]。Du 等^[43]将轻质聚乳酸(PLA)与碳纤维增强聚合物(CFRP)结合,制备防刺复合材料,并采用高速摄像技术和显微成像技术研究了复合材料结构的破坏过程和损伤形态。研究发现,复合材料结构的最终损伤模式为 PLA 材料的断裂损伤和塑性变形。

2.2 碰撞阻挡钝化和反向切割作用

在材料表面或内部添加硬质颗粒,可以增加刚性碰撞,增大下移面积,使尖锐物体在刺入材料时尖端被硬质颗粒高概率碰撞阻挡,刀尖受阻转为颗粒受阻,从而增大阻隔力,消耗刀具刺入的能量。同时,硬质颗粒还会直接导致刀具尖端钝化,增大刀具本身的受力面积,减小刺入压强,减缓冲击速度,并且还会使刀具偏移,在增大下移面积的同时,延长了行进路程,从而使阻隔效果呈数量级增加^[44]。

Zhang 等^[45]将芳纶织物和非织造布复合成三明治结构,再将复合材料浸渍 STF 后涂覆热塑性聚氨酯制备防刺复合材料,探究了防刺复合材料的防刺机理。研究表明,穿刺过程中,由于穿刺应力作

用,STF 中的纳米 SiO₂ 颗粒在穿刺头周围结块形成颗粒团簇,导致材料变硬(图 7),从而对刀具起到碰撞阻挡钝化的作用。

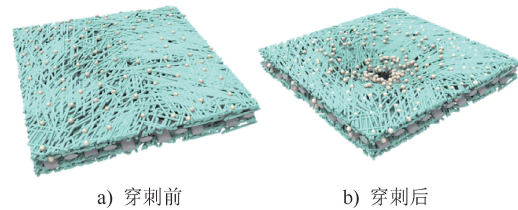
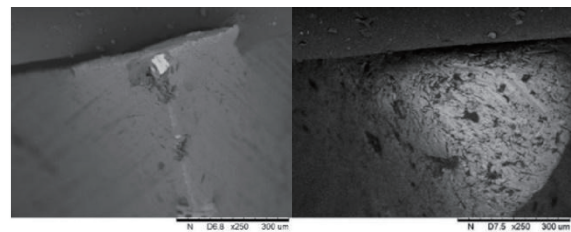


图 7 防刺机理示意图^[45]

Fig. 7 Schematic diagrams of stab resistant mechanism^[45]

在尖锐物体刺入材料的过程中,当材料表面或内部添加有硬质颗粒时,硬质颗粒会对刺入物体进行反向刮削、割划等,这会增大刀具的刺入面积和摩擦、切割作用,进而成倍增大刺入阻力,迅速减缓刀具刺入的速度^[44]。图 8 所示为刺入测试前后刀具的表现形貌。从图 8 可以看出,刺后刀具表面出现有明显的“沟壑”。



a) 刺入前刀具表面光滑 b) 刺后刀具表面粗糙

图 8 刀具刺入前的光滑形态和刺后受硬质颗粒反向切割粗糙化

Fig. 8 The smooth shape of the cutter before penetration and the roughening of the cutter by the reverse cutting of particles after penetration

3 防刺测试标准和方法

3.1 防刺测试标准

防刺测试标准主要参考美国联邦司法协会等机构共同开发的 NIJ Standard-0115.00《个体装甲防刺测试》、英国内政部科学发展处(HOSDB)的英国警方防刺服标准以及我国制定的 GA 68—2019《警用防刺服》标准^[46]。冯浩等^[47]对国内外防刺标准进行对比,得出结论:对于常用的防刺测试标准而言,我国采用的 GA 68—2019《警用防刺服》标准相较于美国和英国的标准,缺少对防刺等级细分的规定。这亟待相关学者深入研究,并在未来的标准更新中补充修订。

3.2 防刺测试方法

防刺测试一般采用与防刺服产品标准类似的落锤式冲击设备,以表征防刺服抵抗动态穿刺的性能。测试过程为:穿刺测试的刀具从一定高度自由落体下降,以一定的角度冲击放在背衬材料上的防刺材料。各标准采用的落锤式冲击设备在固定穿刺器具装置、背衬材料等方面也存在差异^[48]。梁高勇等^[49]总结了国内外主流材料防刺测试的主要方法,得出结论:由于穿刺物、试样固定夹具尺寸和穿刺速度等试验条件存在差异,试验结果往往需要分类讨论,且不同研究者的试验数据难以进行横向比较。因此,有必要制定相关标准对防刺服性能测试方法进行规范。此外,当前的防刺测试主要采用落锤式冲击设备,防刺测试过程中,由于落锤自身质量较大,即使冲击停止,刀具仍会继续刺入复合材料中,影响防刺性能的评判。因此,落锤式冲击设备可能不适用于软质防刺材料的测试。软质防刺材料防刺性能测试方法有待进一步开发。

4 结束语

本文综述了防刺服的发展历程,概述了防刺材料的发展现状,介绍了其防刺机理以及防刺测试标准和方法的研究现状。分析结果显示:

硬质、半硬质防刺服的防刺性能好,但产品厚重、刚硬且灵活性差。

添加硬质颗粒的软质防刺产品,由于硬质颗粒

的碰撞阻挡钝化作用,材料的防刺性能提高。但目前硬质颗粒与织物结合主要通过浸渍或涂层方式实现,存在硬质颗粒易脱落等不足。

剪切增稠材料具有剪切增稠效果,在用于制备防护产品方面取得了一定的成效。其中,STG 相比 STF 性能更优,但目前关于使用 STG 作为主体防刺材料的研究较少。基于此,进行此类试验并探究其复合材料的防刺性能将是一个有益的尝试。

添加硬质颗粒和使用剪切增稠材料均可提高软质防刺材料的防刺性能,但关于将这两方面结合起来提高材料防刺性能的研究较少,这可能是今后的一个发展方向。

为更深入地探究织物/STG 型软质防刺材料的性能,必须进一步研究材料的防刺机理。

此外,当前常用的防刺性能测试标准和方法均存在一定的不足,防刺材料的测试方法与测试标准有待进一步开发。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 刘硕. 警用防刺服标准研究与发展趋势浅析[J]. 中国安全防范技术与应用, 2022(1): 49-54.
- [2] 毛利洲, 马岩, 严雪峰, 等. 防刺材料的研究现状与发展[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(2): 15-19.
- [3] 郭静荷, 姜亚明. 防刺个体装甲材料的发展与现状[J]. 产业用纺织品, 2004, 22(6): 5-8.
- [4] 张建春, 张华鹏. 军用盔甲[M]. 北京: 长城出版社, 2003: 178.
- [5] 张政. 硬质 SiC 粒子涂层防刺织物的制备及防刺性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2018.
- [6] 封然然. 剪切增稠流体增强整体褶裥结构织物的防刺性研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [7] 王颖. 多层复合高性能材料防刺性能的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [8] 雷鹏. 多层织物复合材料的制备及防刺性能研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- [9] 邹画眉, 刘新金, 谢春萍, 等. 组织结构对 UHMWPE 短纤纱织物防刺性能的影响[J]. 丝绸, 2020, 57(5): 11-15.

- [10] 李丽娟,蒋高明,缪旭红. 经编防刺织物的结构与性能[J]. 纺织学报,2011,32(4):48-51.
- [11] 张卓,任忠海,杨声强. 柔性个体防护材料抗穿刺性能的试验研究[J]. 产业用纺织品,2012,30(10):36-39.
- [12] 钟智丽,薛兆磊,孙涵,等. 三维机织物防刺性能研究[J]. 纺织科学与工程学报,2018,35(4):19-23.
- [13] 王天增,于伟东,周胜. 金刚石颗粒体积分数与刺碰概率和防刺性能的关系探讨[J]. 产业用纺织品,2023,41(9):39-45.
- [14] 张政,刘晓艳,于伟东. 涂层防刺织物的制备及其防刺机制[J]. 纺织学报,2018,39(3):108-113.
- [15] XIA M, QUAN Z, WANG X, et al. Preparation and characterization of B₄C particle coated composites for stab-resistance[J]. Composite Structures, 2019, 228:111370.
- [16] 杨婉秋,刘晓艳. 硬质颗粒织物的防刺性能研究[J]. 纺织科学与工程学报,2019,36(2):17-20.
- [17] 强桂燕,王新厚,张琳梅. 表面涂覆防刺纺织材料的设计与优化[J]. 产业用纺织品,2018,36(1):40-43.
- [18] 王新厚,张琳梅,孙晓霞. 柔性防刺涤纶/碳化硅织物的制备及其防刺性能[J]. 纺织学报,2019,40(6):172-176.
- [19] NAYAK R, KANESALINGAM S, WANG L, et al. Stab resistance and thermophysiological comfort properties of boron carbide coated aramid and ballistic nylon fabrics[J]. The Journal of The Textile Institute, 2018, 110(8):1159-1168.
- [20] 夏国民,谷秋瑾,权震震,等. 碳化硼涂层防刺织物的制备及其性能表征[J]. 产业用纺织品,2020,38(11):21-28.
- [21] 刘小可,俞科静,钱坤. 剪切增稠胶/聚氨酯泡沫复合材料的制备与力学性能[J]. 材料导报,2018,32(18):3255-3260.
- [22] 夏艳丽. 基于剪切增稠胶的柔性防护复合材料的制备及低速抗冲击性能研究[D]. 无锡:江南大学,2018.
- [23] 马池,陈明辉,徐炎炎,等. 剪切增稠材料在防护纺织品领域的应用进展[J]. 中国个体防护装备,2022(5):16-22.
- [24] 俞科静,沙晓菲,曹海建,等. 剪切增稠液/高性能纤维复合材料防刺性能的研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(6):47-51.
- [25] 蒋玲玲,钱坤,俞科静,等. 剪切增稠液体对织物防刺性能的影响[J]. 材料导报,2011,25(增刊1):231-234.
- [26] QIN J, ZHANG G, ZHOU L, et al. Dynamic/quasi-static stab-resistance and mechanical properties of soft body armour composites constructed from Kevlar fabrics and shear thickening fluids[J]. RSC Advances, 2017, 7(63):39803-39813.
- [27] DECKER M J, HALBACH C J, NAM C H, et al. Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3/4):565-578.
- [28] LI D Y, WANG R, LIU X, et al. Shear-thickening fluid using oxygen-plasma-modified multi-walled carbon nanotubes to improve the quasi-static stab resistance of Kevlar fabrics[J]. Polymers, 2018, 10(12):1356.
- [29] 沙晓菲. 剪切增稠液体的制备与性能研究[D]. 无锡:江南大学,2013.
- [30] GÜRGEN S, KUŞHAN M C. The stab resistance of fabrics impregnated with shear thickening fluids including various particle size of additives[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 94:50-60.
- [31] 刘星,霍俊丽,李婷婷,等. 等离子体处理 SiO₂ 对剪切增稠液体含浸芳纶织物防刺性能的影响[J]. 材料导报,2019,33(16):2799-2803.
- [32] 陈红霞,曹海建,黄晓梅. 剪切增稠液流变性能的影响因素研究[J]. 化工新型材料,2019,47(11):137-140.
- [33] 景晓颖,陆振乾. 不同浓度和溶剂对剪切增稠液流变性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(3):32-35.
- [34] 陈潜,何倩云,刘梅,等. 剪切增稠液的力学性能与机理[J]. 固体力学学报,2016,37(6):518-537.
- [35] 吴风帆. 护膝用掺杂短绒 STG/褶裥机织物复合材料的开发[D]. 上海:东华大学,2023.
- [36] 王世娜. 立体化机织羽绒面料的织造技术研究[D]. 上海:东华大学,2019.
- [37] 刘娟,王新厚. 树脂成型柔性防刺材料空隙率对防刺性能的影响[J]. 产业用纺织品,2015,33(5):7-10.
- [38] 艾青松,虎龙,吴中伟,等. 芳纶无纺布防刺性能初探[J]. 玻璃钢/复合材料,2019(5):106-109.
- [39] 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(11):94-100.
- [40] 王丽娟,俞科静,张典堂,等. 纺织结构/STF 柔性复合材料的机械防护性能[J]. 材料科学与工程学报,2019,37(6):1022-1029.
- [41] 田明月. 基于多相剪切增稠液的防刺复合材料的制备及研究[D]. 西安:西安工程大学,2020.

(下转第 47 页)