

金属与非金属基防刺服材料的性能对比： 防刺效能、柔韧弯曲性及能量吸收特性

邢泽华, 李海鹏, 杨广明*, 李志豪, 赵永胜

公安部第三研究所, 上海

收稿日期: 2024年7月15日; 录用日期: 2024年8月19日; 发布日期: 2024年8月30日

摘要

本研究聚焦于典型金属与非金属防刺服的防刺层, 通过对比金属合金防刺材料与芳纶纤维机织浸胶防刺材料的测试表现, 系统分析了两者在防刺性能、弯曲性能和能量吸收性能上的差异。结果表明, 两种材质均能抵御24焦耳撞击能量的刀具穿刺, 金属合金材质能钝化刀尖但面内穿透后保护力较弱; 在弯曲性能上, 金属合金防刺层展现出更佳的柔韧性和可弯曲性, 所需弯曲力20 N~25 N显著小于芳纶纤维机织防刺层68 N~72 N。能量吸收测试中, 金属合金防刺层在钝器冲击下的能量吸收能力略胜一筹, 归因于其不可逆形变对冲击动能的有效吸收。研究为防刺服材料选择和优化设计提供了实证支持, 并指出了两种材料在不同防护需求下的优势与局限, 为防护装备的创新发展提供了科学依据。

关键词

金属防刺服, 非金属防刺服, 防刺性能, 柔软性, 能量吸收

Comparison of Performance between Metal and Non-Metal Based Anti Puncture Clothing Materials: Anti Puncture Efficacy, Flexibility and Flexibility, and Energy Absorption Characteristics

Zehua Xing, Haipeng Li, Guangming Yang*, Zhihao Li, Yongsheng Zhao

The Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai

Received: Jul. 15th, 2024; accepted: Aug. 19th, 2024; published: Aug. 30th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 邢泽华, 李海鹏, 杨广明, 李志豪, 赵永胜. 金属与非金属基防刺服材料的性能对比: 防刺效能、柔韧弯曲性及能量吸收特性[J]. 材料科学, 2024, 14(8): 1263-1269. DOI: 10.12677/ms.2024.148140

Abstract

This study focuses on the anti puncture layers of typical metal and non-metal anti puncture clothing. By comparing the test performance of metal alloy anti puncture materials and aramid fiber machine woven impregnated anti puncture materials, the differences in anti puncture performance, bending performance, and energy absorption performance between the two were systematically analyzed. The results show that both materials can withstand tool piercing with 24 joules of impact energy, while the metal alloy material can passivate the tool tip but has weaker protection after in-plane penetration; in terms of bending performance, the metal alloy anti puncture layer exhibits better flexibility and bendability, with a required bending force of 20 N~25 N significantly lower than the aramid fiber woven anti puncture layer of 68 N~72 N. In the energy absorption test, the metal alloy anti puncture layer has a slightly better energy absorption ability under blunt impact, attributed to its effective absorption of impact kinetic energy by irreversible deformation. The study provides empirical support for the selection and optimization design of anti puncture clothing materials, and points out the advantages and limitations of the two materials under different protection needs, providing scientific basis for the innovative development of protective equipment.

Keywords

Metal Stab Proof Clothing, Non Metallic Stab Proof Clothing, Anti Puncture Performance, Flexibility, Energy Absorption

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球范围内，公共安全与个人防护议题正迅速上升为国际关注的焦点，特别是在警察、军队、反恐部队以及安保行业中，这些高风险职业的从业者每日都可能遭遇由匕首、刺刀等尖锐武器带来的生命威胁[1]。鉴于此，对高效能、高可靠性个人防护装备的追求变得空前强烈。在这一领域，防刺服作为能够抵御上述致命攻击的关键装备，其重要性不言而喻。防刺服的构造与效能不仅关乎穿戴者的生命安全，同时也影响着他们的行动自由与任务执行能力[2]。防刺层，作为防刺服的核心组件，承载着抵御外部侵袭的重任，其材料选择与设计优化直接决定了防刺服整体的防护性能[3]。随着科技的不断进步，新型材料与创新技术的应用正推动着防刺服向更安全、更轻便、更舒适的方向发展，为前线工作者提供更加全面的防护保障和更加舒适的穿戴体验[4]。

金属合金防刺服，凭借其重量轻、硬度和强度大的特点，能够有效抵御尖锐物体的穿透，为穿戴者提供坚实保护[5]。然而，金属材料的固有属性往往导致防刺服整体刚性较大，穿戴后运动时会发出金属翘曲的声音，也存在屏蔽无线电信号的风险，影响穿戴者的战术活动[6]。同时，金属材料的高导热性也是一个需要考虑的因素，在高温环境下，金属防刺服可能会吸收并传导热量，导致穿戴者感到不适；相反，在低温环境中，金属的导热性可能会使穿戴者感到寒冷，影响其保暖性。这些因素都可能对穿戴者的舒适度和任务执行能力产生负面影响[7]。另一方面，非金属防刺服，特别是以芳纶纤维和超高分子量聚乙烯纤维为代表的高性能纤维材料，以其高强韧性逐渐成为防刺服领域的另一选择[8]。芳纶纤维和超

高分子量聚乙烯纤维通过机织并结合浸胶工艺[9], 不仅具备了良好的防刺性能, 还可能在穿戴舒适性上取得优势[10], 然而, 纤维浸胶防刺层也面临耐久性、吸湿性和厚度控制等挑战, 需要进一步的技术改进来解决[11]。

鉴于上述背景, 本研究旨在通过实验设计, 系统比较金属合金防刺材料与芳纶纤维机织防刺材料在防刺性能、弯曲性能及能量吸收性能方面的表现, 为材料选择和设计优化提供实证支持。研究选取了典型金属合金防刺层和芳纶纤维机织浸胶防刺层作为实验样品, 并按照 GA 68-2024 [12]和 GA 420-2021 [13]标准进行了专业性能测试。这项研究有助于深入理解不同材质防刺服的性能特点, 并为防刺服的研发和应用提供重要参考, 旨在推动防护装备行业的科技进步, 确保一线工作人员的生命安全。

2. 实验部分

本研究选取了两种典型的防刺层进行对比分析, 一种是金属合金材料的防刺层, 另一种则是以芳纶纤维机织并浸胶处理的防刺层。为了全面评估这两种防刺层的性能, 我们依据标准 GA 68-2024《警用防刺服》和标准 GA 420-2021《警用防暴服》, 设计了一系列测试来衡量它们的防刺性能、弯曲性能和能量吸收性能, 其中, 防刺性能和弯曲性能分别参照 GA 68-2024 标准附录 B 和附录 D, 能量吸收性能参照 GA 420-2021 标准附录 A, 具体如下:

防刺性能测试: 采用标准 D1 刀具以 24J 能量撞击防刺层, 在有效穿刺情况下记录穿透深度和样品的损伤程度, 以此评价防刺层的防刺效果。

弯曲性能测试: 通过测量防刺层在弯曲至一定程度时所需要施加的力的大小, 评估其弯曲性能。弯曲性能是衡量防刺服穿戴舒适性的重要指标。

能量吸收性能测试: 将防刺层平置于背衬材料上, 使用标准球头型落锤以 100J 的能量冲击防刺层表面, 记录防刺层受到冲击后传递至基座的冲击力, 以此评估防刺层对钝器冲击的能量吸收能力。

3. 结果与讨论

3.1. 防刺性能

对金属合金防刺层进行防刺性能测试, 结果显示该防刺层成功阻止了刀具的穿刺, 迎刺面首层金属片正面形貌见图 1(左), 刀具在穿刺位置对金属片造成近似三角形凹坑, 该形貌与刀头形状吻合, 这是刀具与金属片之间相互碰撞挤压造成的。凹坑中存在不规则的划痕, 这与穿刺过程中刀头与金属片之间的撕扯滑动有关。底层金属片的凹坑呈现光滑的纺锤形, 其纵向深度约为 0.2 mm, 正面形貌见图 1(右)。

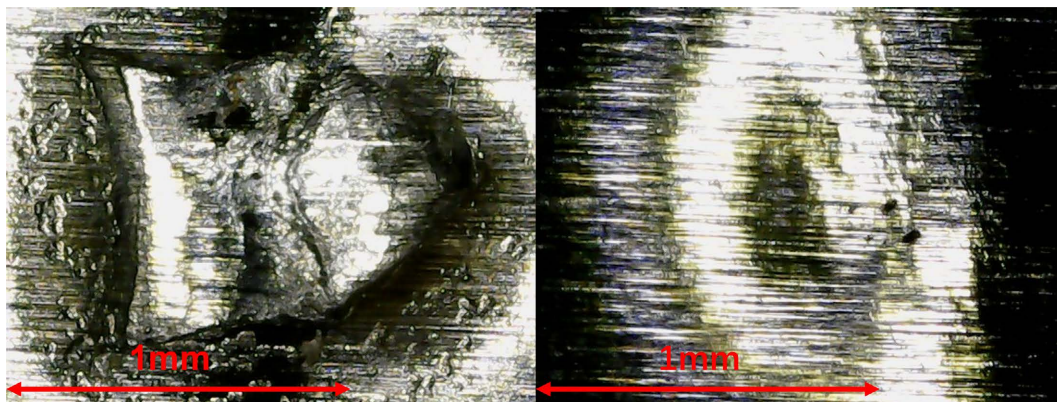


Figure 1. Front appearance of the first layer (left) and bottom layer (right) of metal material
图 1. 金属防刺层首层正面形貌(左)金属防刺层底层正面形貌(右)

刀具对防刺层造成的凹坑属于不可逆变形，表示金属材料通过自身发生拉伸、弯曲、剪切等形变的方式吸收刀具的动能，这主要依赖自身的硬度和塑性变形能力。检查发现金属合金防刺层的各层金属片均未发生穿透现象，这表明金属防刺层在穿刺过程中，各金属片互相组合成一个整体对抗刀具，而金属的塑性变形非常小，这限制了刀具在防刺层中的穿刺行进，所以在未穿刺成功时，防刺层中的任何一层都不会被穿透。金属防刺层在有效防护范围内可以完全阻断刀头的刺入，展现出了良好的防刺效果。

实验结果表明，由芳纶机织纤维浸胶片构成的防刺层也成功阻止了刀头的穿透，在刀具刺入点，形成一个与刀尖形状相一致的三角形切口，见图 2(左)，表明刀具已穿透防刺层首层。该切口由外及内逐渐缩小，证明非金属防刺层不仅能提供垂直方向的抵抗力量，还能在防刺层内部提供阻力，可有效防止刀尖的进一步侵入。非金属防刺层通过自身纤维被拉伸断裂的方式吸收能量，主要依赖于自身的弹性和拉伸强度，同时胶粘剂基体也会将刀具能量向面内横向传递。穿刺时，非金属防刺层自外向内一层一层的发生断裂而逐步吸收刀具的动能，直至刀具无法穿透下一层纤维。经检查，在防刺层中发现阻断刀头的临界层，临界层的缺口呈现半透明状态，表明刀头已进入该层但未完全穿透该层，其形貌见图 2(右)。

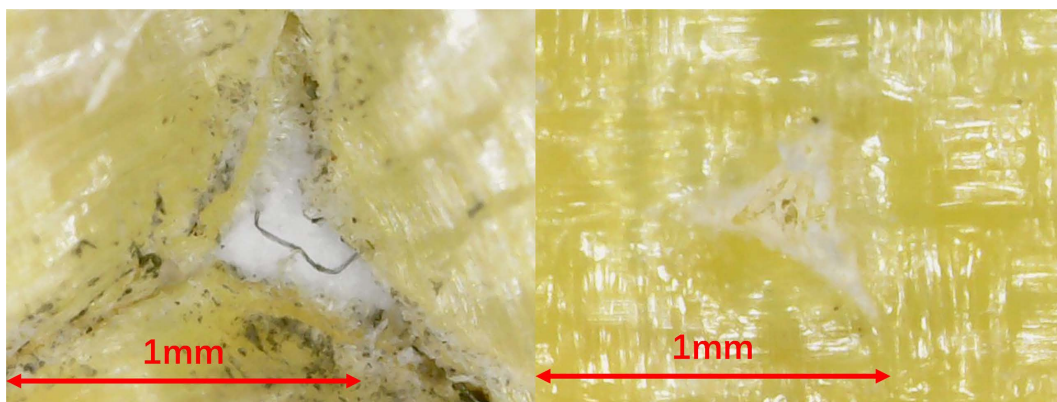


Figure 2. Front appearance of the first layer (left) and bottom layer (right) of non-metallic material
图 2. 非金属防刺层首层正面形貌(左)非金属防刺层临界层正面形貌(右)

在深入的实验分析中，我们对防刺层的极限防护效能展开了探究，首先，将金属防刺层减少 1 层进行防刺测试，发现防刺层被完全贯穿，贯穿缺口呈现脆性断裂特征，当外力引起的凹陷深度超越了金属材料自身的塑性变形阈限，材料将不再通过塑性形变来吸收能量，而是发生脆性断裂，这导致了防刺层在断裂点附近的防护能力急剧下降。实验中，刀具的刃口部位完全透过金属防刺层，直观地展示了在接近防护极限的情况下，金属防刺层存在的潜在风险，即一旦冲击能量超过其承载极限，将对穿戴者的安全构成严重威胁。与此同时，我们对非金属防刺层的极限防护能力也进行了相应的考察，将非金属防刺层的层数减少至临界层进行对比观察。结果表明非金属防刺层同样被穿透，但穿透的程度和方式却迥异于金属防刺层，仅有刀尖的极小部分穿透了非金属防刺层的底层，而刀具的主体部分仍被防刺层有效阻挡，未能进一步穿透。这一结果有力地证实了非金属防刺层在平面方向上展现出的优秀防御特性，即便在遭受高强度穿刺时，也能显著限制刀具的穿透深度，从而为穿戴者提供更高级别的防护保障。

在实验中，对撞击后的刀具进行了观察分析。结果显示，与金属合金防刺层撞击后的刀具头部出现了显著的弯曲变形，其尖端被挤压至近乎 90 度的侧向角度(参见图 3 左侧视图)。这种变形显著增加了刀具行进的阻力，并有效降低了刀具在穿透过程中可能引发的二次伤害风险。相比之下，与芳纶纤维机织浸胶防刺层撞击的刀具头部仅呈现轻微磨损，并未观察到明显的弯曲变形。因此，撞击后该刀具仍保持较高的伤害潜力。这一现象表明，金属合金防刺层在抵御同一尖锐物体多次穿刺方面具有显著优势，而

芳纶纤维机织浸胶防刺层在组织刀具穿刺后，可能未能有效降低刀具的二次伤害能力。



Figure 3. Knife-tip morphology after testing of metal and non-metallic material
图 3. 金属防刺层测试后刀头形貌(左)非金属防刺层测试后刀头形貌(右)

3.2. 弯曲性能

在依据 GA 68-2024《警用防刺服》标准 5.11 节的规定进行的弯曲性能测试中，对金属合金防刺层与芳纶纤维机织防刺层在受到外力作用时的弯曲能力进行了定量评估，测试结果显示，金属防刺层弯曲 20 mm 时所需的作用力范围为 20N~25N，而芳纶纤维机织防刺层则需 68N~72N，因此金属合金防刺层的弯曲性能明显优于芳纶纤维机织防刺层。进一步分析两种材料的受力 - 位移曲线(参见图 4)，在 0 mm 至 30 mm 的弯曲变形范围内，金属合金防刺层所承受的压力值始终低于芳纶纤维机织防刺层，大约为其三分之一。这一现象可能归因于金属防刺层的厚度较薄且层数较少，从而赋予了其更佳的弯曲性能。这种优异的弯曲性能对于提升穿戴者在执行任务时的身体灵活性和机动性具有至关重要的意义，有助于保障其在复杂环境下的行动自由和任务执行效率。

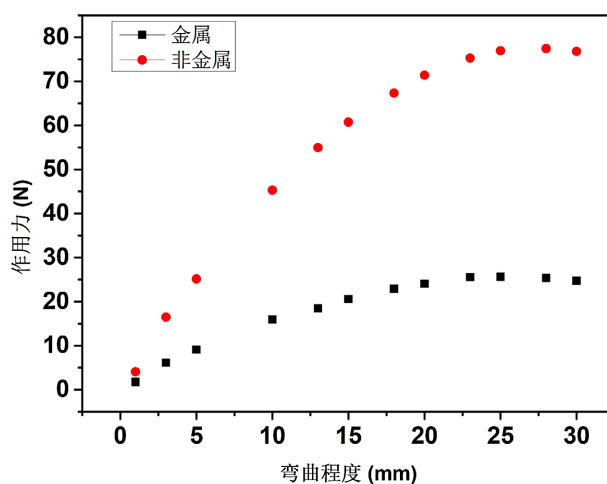


Figure 4. Flexibility of the metal (black) and non-metallic (red) material
图 4. 金属防刺层(黑色)和非金属防刺层(红色)弯曲性能测试曲线

3.3. 能量吸收性能

在对两种防刺服的能量吸收性能进行测试时，采用了空白实验作为对照组，以评估在没有防刺

层保护时基座所承受的最大冲击力，测得基座受到的最大冲击力为 8463 牛顿(图 5 左)，当引入金属合金防刺层或芳纶纤维机织防刺层后，基座受到的最大冲击力分别降至 5887 牛顿和 6136 牛顿(参见图 5 中间与右侧)，与对照组相比，冲击力分别下降了 30.4% 和 27.5%。这一结果表明，无论是金属合金防刺层还是芳纶纤维机织防刺层，在抵御钝器的冲击时均具备一定的能量吸收能力，以保护穿戴者。

进一步分析发现，金属合金防刺层在受到冲击后，其内部产生了不可逆的凹陷变形，这一变形过程有效地吸收了部分冲击动能。相比之下，芳纶纤维机织防刺层由于其良好的弹性，在受到冲击后产生的形变能够恢复至原始状态，这导致其对冲击动能的吸收效率略低于金属合金防刺层。因此，金属合金防刺层在能量吸收性能方面表现出略优于芳纶纤维机织防刺层的特性，这对于提高穿戴者在面对钝器攻击时的防护效果具有重要意义。

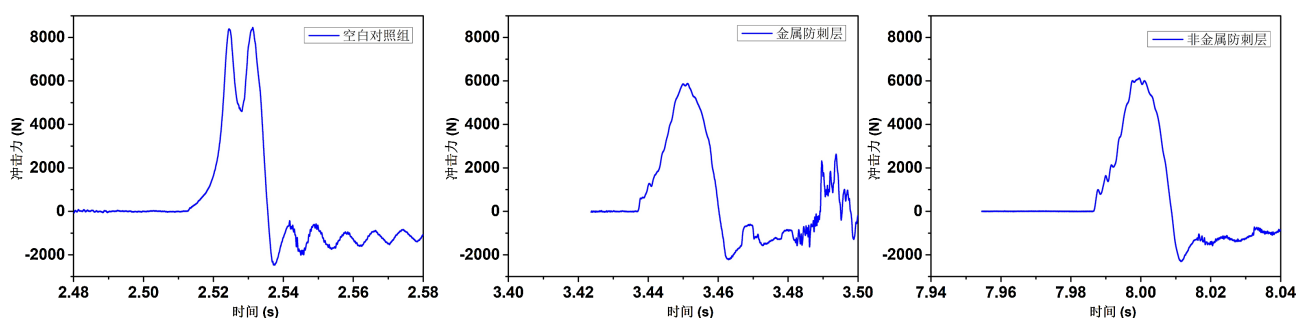


Figure 5. Energy absorption of blank control (left), metal (middle) and non-metal (right) material

图 5. 空白对照组(左)、金属防刺层(中)和非金属防刺层(右)能量吸收性能

综合分析金属合金防刺层与非金属芳纶纤维机织防刺层在防刺性能、弯曲性能以及能量吸收性能方面的测试结果，可以发现两种材料在各自领域均展现出独特的优势。金属合金防刺层在弯曲性能方面具有显著的优越性，同时在能量吸收性能上也显示出轻微的优势。此外，金属防刺层在遭受撞击时能有效钝化刀具尖端，降低二次伤害风险。而芳纶纤维机织防刺层则在面内阻力上表现更佳，对阻断刀具进一步刺入具有更高的效能。

4. 结论

本研究通过系统性对比金属合金防刺层与芳纶纤维机织防刺层在防刺性能、弯曲性能及能量吸收性能方面的性能表现，得出以下关键结论：

1) 防刺性能方面，实验结果表明，在结构设计合理情况下，金属合金防刺材料与芳纶纤维机织防刺材料均能有效抵御 24 焦耳撞击能量的刀具穿刺。金属合金防刺材料在一次穿刺后能够显著钝化刀尖，降低刀具的二次伤害能力。然而，金属防刺材料在面内方向的阻力相对较小，一旦发生穿透，其对穿戴者的保护能力可能不及芳纶纤维机织防刺材料。

2) 在弯曲性能方面，金属合金防刺材料在弯曲至 20 mm 所需的作用力显著低于芳纶纤维机织防刺材料，显示出金属合金防刺材料在保持结构完整性的同时，具有更佳的柔韧性和可弯曲性。

3) 能量吸收性能方面，面对钝器冲击，金属合金防刺材料展现出略优于芳纶纤维机织防刺材料的能量吸收能力。这种性能优势可能源于金属合金材料在受到冲击时的不可逆形变，有效吸收了冲击动能。

综上所述，本研究为防刺服材料的选择和优化设计提供了实证支持，强调了在不同防护需求下，金属合金与芳纶纤维材料各自的优势与局限性，为未来防护装备的创新发展提供了科学依据。

参考文献

- [1] 邱日祥, 韩启龙. 防刺服的现状与发展[J]. 警察技术, 2020(5): 77-81.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 梁高勇, 崔中雪, 张晓彤, 等. 警用防刺服的产品标准与研究方法[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(12): 9-17.
- [5] 庄水. 防刺服的分类及特点[J]. 派出所工作, 2020(11): 77-78.
- [6] 冯浩, 汪泽幸, 何斌, 等. 防刺服的研究与发展现状[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(2): 8-13, 17.
- [7] 王颖, 徐伯俊. 防刺服的现状及发展趋势[J]. 纺织导报, 2011(1): 83-84.
- [8] 冯凯阳, 楼泽, 杨修羽, 等. 轻薄柔性防刺材料性能测试分析[J]. 轻纺工业与技术, 2021, 50(6): 1-3.
- [9] 许冬梅, 陈虹, 艾青松, 等. 一种新型软质防刺服的防刺性及柔软性研究[J]. 合成纤维, 2019, 48(2): 26-28.
- [10] 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.
- [11] 龙莎, 孙润军, 王秋实, 等. 防护服动态防刺性测试标准的研究[J]. 合成纤维, 2019, 48(4): 39-43.
- [12] 中华人民共和国公安部. GA 68-2024 警用防刺服[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [13] 中华人民共和国公安部. GA 420-2021 警用防暴服[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.