

基于弹道明胶靶标的防暴服防护效能评估研究

赵永胜, 李海鹏, 杨广明*, 王 征

公安部第三研究所, 上海

收稿日期: 2024年8月20日; 录用日期: 2024年9月16日; 发布日期: 2024年9月23日

摘 要

本研究旨在评估防暴服的防护效能, 通过引入弹道明胶靶标作为测试介质, 并结合内嵌式传感器技术, 实现对防暴服在暴力冲击下的能量吸收、分散及传递机制的精准评估。实验选取内嵌金属板型和无金属板型两组防暴服进行对比分析。采用自由落锤冲击试验机模拟暴力冲击场景, 分别进行了背衬胶泥实验和弹道明胶靶标实验。结果表明, 在无金属板状态下, 防暴服前胸区域的胶泥凹陷深度显著低于后背区域, 而加入金属板后, 前胸与后背的凹陷深度均显著降低, 展示了金属板对防护效能的增强作用。在弹道明胶靶标实验中, 内嵌金属板的防暴服显著降低了冲击过程中的压力峰值, 进一步验证了金属板在分散和吸收冲击能量中的关键作用。本研究为防暴服防护效能的评估提供了更加科学、客观的数据支持, 为防暴服的设计优化提供了有力依据。

关键词

弹道明胶, 防暴服, 防护效能, 能量吸收

The Study on the Evaluation of Anti-Riot Suit Protection Effectiveness Based on Ballistic Gelatin Targets

Yongsheng Zhao, Haipeng Li, Guangming Yang*, Zheng Wang

The Third Research Institute, The Ministry of Public Security, Shanghai

Received: Aug. 20th, 2024; accepted: Sep. 16th, 2024; published: Sep. 23rd, 2024

Abstract

This study aims to evaluate the protective effectiveness of riot gear by introducing ballistic gelatin

*通讯作者。

文章引用: 赵永胜, 李海鹏, 杨广明, 王征. 基于弹道明胶靶标的防暴服防护效能评估研究[J]. 应用物理, 2024, 14(9): 648-653. DOI: 10.12677/app.2024.149069

targets as the testing medium and combining this with embedded sensor technology. This approach allows for a precise assessment of the energy absorption, dispersion, and transfer mechanisms of riot gear under violent impact. The experiment compares two types of riot gear: one with embedded metal plates and one without. A free-falling weight impact testing machine is used to simulate violent impact scenarios, conducting both backing clay tests and ballistic gelatin target tests. The results indicate that, without metal plates, the indentation depth in the chest area of the riot gear is significantly less than in the back area. However, when metal plates are added, the indentation depths in both the chest and back areas are significantly reduced, demonstrating the enhancing effect of metal plates on protective effectiveness. In the ballistic gelatin target tests, riot gear with embedded metal plates significantly reduces the peak pressure during impact, further validating the critical role of metal plates in dispersing and absorbing impact energy. The study provides more scientific and objective data to support the evaluation of the protective effectiveness of riot gear, offering robust evidence for design optimization.

Keywords

Ballistic Gelatin, Anti-Riot Suit, Protective Effectiveness, 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

在维护公共安全与秩序的过程中,防暴服作为一线执法人员的重要防护装备,扮演着“生命盔甲”的角色[1]-[3]。防暴服能量吸收性能是衡量防暴服防护效能的关键指标之一,直接关系到防暴服能否在遭遇暴力冲击时有效分散并吸收冲击能量,进而保护执法人员免受伤害[4]。尤其是在处理高风险、高强度的暴力事件时,防暴服必须能够迅速且有效地应对突如其来的冲击,以确保执法人员的生命安全。

近年来,防暴服的研究与发展主要集中在通过材料的不断创新和结构设计的不断优化,达到防护性能不断提升的目的,同时通过人体工学设计兼顾防暴服舒适性的问题。在材料方面,杨杰等研究者对聚碳酸酯的冲击力学性能进行了研究,分析了其破坏和防护机理,表明其具有良好的能量吸收性能,可以很好地应用于防暴领域[5]。刘志等研究者发现采用双螺杆挤出加工工艺得到中黏搭配低黏 PA6 材料(超韧无卤阻燃尼龙),其可获得优异的抗冲击性能[6]。方心灵等研究者对 SAS-TEC 公司的慢回弹低频阻尼材料(发泡聚氨酯材料)在防暴服的应用进行了深入研究,发现其具有良好的力学性能,具有优异的能量吸收性能,但是其仿刺性能较差[7]。因此有研究者使用内插金属板来解决防刺问题。在结构设计上,背心采用 3D 网眼衬垫设计,由柔性泡沫材料制成并覆盖合成织物,提供舒适性,硬部件选用 ABS 材料镂空设计,能够承受重击,均匀分散冲击力,同时兼顾散热舒适性问题,但是镂空的设计成为防刺的短板。在防暴服性能评估方面,长期以来,防暴服的防护性能(能量吸收性能)测试主要采用胶泥作为模拟背衬介质,依据 GA 420-2021《警用防暴服》等标准[5][8],通过测量胶泥凹陷深度来评估防护效果。然而,随着科技的进步和防护需求的提升,这种传统测试方法的局限性日益明显[9][10]。胶泥材料在物理特性和生物力学响应上与真实人体组织存在显著差异,无法全面、准确地反映防暴服在实际应用中的防护效能。此外,胶泥测试结果的判断依赖于人工测量和主观评估,这不仅增加了测试结果的误差和不确定性,还难以实现对冲击过程中动态变化的精确捕捉。

为了克服这些局限,本研究提出了一种创新性的测试方法,即采用弹道明胶靶标作为测试介质,并

结合内嵌式传感器技术,实现了对防暴服防护效能的数字化、精准化评估[10][11]。弹道明胶靶标因其独特的物理和化学性质,如良好的可塑性、粘弹性和生物相似性,能够更加真实地模拟人体组织在暴力冲击下的反应[12][13]。同时,内嵌式传感器能够实时、准确地记录冲击过程中的压力参数,为防暴服防护效能的评估提供了更加全面、深入的数据支持。

2. 实验部分

根据 GA 420-2021 等标准,防暴服的能量吸收性能要求其前胸、后背防护部件能够承受 100 焦耳(J) 能量冲击,且胶泥压痕深度小于或等于 20 毫米(mm)。本研究所选用的弹道明胶靶标尺寸为 300 mm × 300 mm × 150 mm,确保了测试结果的通用性和可比性。为了保证测试结果的准确性和可重复性,本研究严格遵循了标准弹道明胶靶标的制备和储存条件,即在 4℃ 环境下保存,并保持明胶浓度为 10%,以确保靶标在测试过程中具有稳定的物理和化学性质。实验材料与设备具体如下。

2.1. 实验材料与设备

1) 防暴服样品:本实验采用的防暴服符合 GA 420-2021 标准要求,材质为高强度尼龙工程塑料。为进行对比分析,防暴服样品分为两组:一组为内嵌金属板型,金属板厚度为 2 mm,材质为铝合金,旨在评估其增强的防护性能;另一组为无金属板型,作为基准参考。具体如下图 1 和图 2。



Figure 1. The front and back of police anti-riot suit
图 1. 防暴服前胸和后背



Figure 2. Inserted metal plates
图 2. 内插金属板

2) 冲击装置: 采用自由落锤冲击试验机, 直径为 $\Phi 96$ mm、质量为 7.5 kg 的球头型钢柱作为冲击源, 该装置设计用于模拟暴力冲击场景。实验时, 钢柱将从预设的 1.360 m 高度自由下落, 确保冲击能量的一致性。

3) 背衬胶泥与弹道明胶靶标:

背衬胶泥: 按照传统测试方法, 使用标准背衬胶泥(1#模型胶泥)进行初步的能量吸收性能实验, 以验证防暴服的基本防护能力。

弹道明胶靶标: 特制 4℃, 10%浓度的弹道明胶靶标, 尺寸为 300 mm × 300 mm × 150 mm。靶标内部嵌入高精度传感器, 传感器受力面与靶标受冲击面保持平行, 且垂直安装于靶标内部约 40 mm 深处, 以确保能够准确获取冲击过程中的力学动态特征, 具体如下图 3。

4) 数据采集系统: 采用高性能瞬态采集仪, 设置采集频率为 10 kHz, 以实现对冲击过程中瞬态冲击力的精确捕捉和记录。传感器量程设定为 0~2 MPa, 确保能够覆盖实验过程中的全部压力范围。



Figure 3. Ballistic gelatin
图 3. 弹道明胶

2.2. 实验步骤

1) 背衬胶泥实验

将防暴服样品平铺在标准背衬胶泥上, 确保样品中央区域(距边缘不小于 100 mm)暴露于冲击范围内。使用球头型钢柱从 1.360 m 高度自由下落, 垂直撞击防暴服样品中央区域。

实验结束后, 轻轻取下防暴服样品, 使用深度尺精确测量背衬胶泥上的压痕深度, 记录数据。

2) 弹道明胶靶标实验

在进行弹道明胶靶标实验前, 确保靶标已在 4℃ 环境下稳定保存, 并达到 10% 的明胶浓度要求。

将内嵌传感器的弹道明胶靶标置于测试平台上, 调整传感器位置, 确保其与冲击方向一致。

同样使用球头型钢柱从 1.360 m 高度自由下落, 对靶标进行垂直冲击。

冲击过程中, 开启瞬态采集仪, 实时记录传感器传回的瞬态冲击力数据。

实验结束后, 迅速但轻柔地处理靶标和防暴服样品, 避免对实验结果造成额外影响。注意保持实验环境温度为室温, 以减少温度对实验结果的影响。

3. 结果与讨论

3.1. 胶泥凹陷

在无金属板状态下, 前胸区域的凹陷深度(6.5 mm)显著低于后背区域(10.8 mm), 这一显著差异归因

于前胸设计的弧度优势，其独特的结构能够有效吸收并分散冲击能量，而后背区域则因缺乏类似机制而表现出较弱的抗冲击性能。进一步地，当我们引入铝合金金属板作为增强层后，前胸与后背的凹陷深度均实现了大幅度降低，分别减少至 2.1 mm 和 5.4 mm。这一显著变化深刻揭示了金属板在防护体系中的关键作用，其高强度与刚性特性有效阻隔了冲击能量的传递路径，减少了锤头与内部胶泥的直接接触，从而显著降低了凹陷深度，提升了防暴服的整体防护效能。

3.2. 明胶靶标瞬态响应

在图示的明胶靶标瞬态响应分析中，我们观察到一系列显著的变化，这些变化深刻揭示了不同防护条件下对冲击压力的影响。压力曲线展现出急剧的上升沿，随后迅速衰减并趋于零，这反映了冲击能量的直接且集中的作用效果。

当仅采用防暴服前胸盔甲进行防护时，记录到的压力峰值显著下降至 0.607 Mpa。然而，进一步嵌入金属板后，这一峰值进一步锐减至 0.073 Mpa，展现出了显著的防护增强效果，图 4(a)和图 4(b)。这一现象可归因于金属板的引入促进了冲击载荷的广泛分散与传递。锤头与防暴服接触后，冲击能量不仅被防暴服材料吸收，还通过金属板传递至更广阔的区域，从而有效减轻了局部冲击效应，使得防暴服能够更大面积地分担和吸收冲击载荷。

类似地，在仅使用防暴服后背盔甲防护的情况下，靶标测得的压力峰值较高，达到 0.904 Mpa。但嵌入金属板后，压力峰值同样大幅降低至 0.082 Mpa，图 4(c)和图 4(d)，再次印证了金属板在载荷分散与吸收中的关键作用。这一系列实验结果表明，加入金属板作为辅助防护层，能够显著抑制冲击响应，提升整体防护性能。

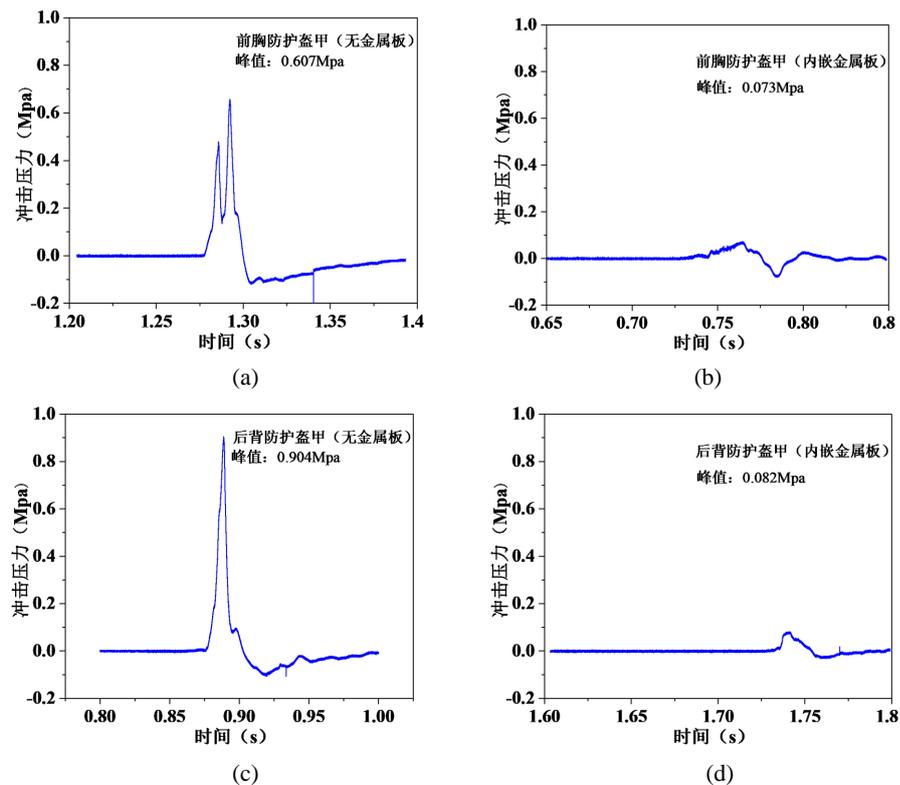


Figure 4. Transient response of ballistic gelatin targets
图 4. 弹道明胶靶标瞬态响应

进一步分析, 前胸盔甲相较于后背盔甲在防护效能上表现出一定的优势, 这可能与前胸盔甲在设计与结构上的优化有关, 使其具备更佳的能量吸收与分散能力。总体而言, 本实验所揭示的压力变化规律与先前关于胶泥凹陷的研究结果相吻合, 共同强调了金属板在防护装备中的重要作用, 以及结构设计对于提升防护效能的深远影响。

4. 结论

本研究通过引入弹道明胶靶标和内嵌式传感器技术, 对防暴服的防护效能进行了全面评估, 得出以下结论:

1) 防护效能提升显著: 使用铝合金增强板防暴服显著提升防护效果, 前胸胶泥凹陷从 6.5 mm 减至 2.1 mm, 后背从 10.8 mm 降至 5.4 mm。

2) 能量吸收与分散机制优化: 金属板的存在显著降低了冲击过程中的压力峰值, 前胸压力峰值由 0.607 Mpa 降至 0.073 Mpa, 后背则由 0.904 Mpa 降至 0.082 Mpa。这表明金属板有效促进冲击载荷的分散与吸收, 减轻局部冲击效应, 实现大面积地分担和吸收冲击载荷。

3) 结构设计的重要性: 对比分析显示, 前胸盔甲因结构设计优化, 展现更佳能量吸收与分散能力, 证明结构设计对提升防暴服性能的关键作用, 为未来设计提供参考, 强调结构与材料选择结合的重要性以提高防护效能。

综上所述, 本研究验证了内嵌传感器技术在防暴服评估中的有效性, 并揭示了金属板增强与结构设计优化对提升防护性能的关键作用, 为未来防暴服研发提供了重要理论与实践指导。

参考文献

- [1] 杨阳, 许文飞, 刘馨阳. 基于需求分析的防暴服设计[J]. 中国个体防护装备, 2023(4): 8-12.
- [2] 马帅. 仿生鳞片防暴防护服的发展现状及关键技术分析[J]. 中国设备工程, 2023(8): 208-209.
- [3] 李硕. 防暴装备落锤冲击试验系统及碰撞分析研究[M]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [4] 梁志. 缓冲层对防暴头盔吸收碰撞能量性能的影响研究[J]. 化纤与纺织技术, 2022 51(2): 58-60.
- [5] 杨杰, 文弋, 邱日祥. 聚碳酸酯冲击力学响应规律及防暴性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(5): 88-91.
- [6] 刘志, 马璐, 宋航. 超韧无卤阻燃尼龙 6 防暴服专用料的研制[J]. 工程塑料应用, 2015(3): 50-53.
- [7] 方心灵, 王瑞岭, 常浩. 警用防暴用具材料的研究与应用[J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45(1): 45-49.
- [8] 中华人民共和国公安部. 警用防暴服: GA 420-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [9] Liu, L., Fan, Y. and Li, W. (2014) Viscoelastic Shock Wave in Ballistic Gelatin behind Soft Body Armor. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **34**, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.02.011>
- [10] 金永喜, 买瑞敏, 张敬敏, 等. 基于瞬时空腔效应的明胶靶标与肌肉目标等效性研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 935-939.
- [11] Wang, Y., Shi, X., Chen, A. and Xu, C. (2015) The Experimental and Numerical Investigation of Pistol Bullet Penetrating Soft Tissue Simulant. *Forensic Science International*, **249**, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2015.02.013>
- [12] 蒋明飞, 许辉, 黄陈磊, 等. 弹道明胶动态力学性能试验与本构模型研究[J]. 兵工学报, 2022, 43(9): 2113-2120.
- [13] 薛本源, 温焱珂, 徐诚, 等. 弹道明胶力学性能测试[J]. 医用生物力学, 2018, 33(3): 262-266.