自然老化软质防弹衣对明胶靶标的防护性能试验研究

曹岩枫¹,温垚珂^{1*},孙非²,徐诚¹

(1.南京理工大学 机械工程学院,南京 210094; 2.公安部第一研究所,北京 100048)

摘要:目的 为了研究自然老化防弹衣对人体的防护能力,开展手枪弹对有防护明胶靶标的铣击效应试 验。方法 通过高速摄影拍摄铣击过程中明胶靶标内瞬时凹陷情况,以此判断自然老化是否影响防弹衣 的防护性能。结果 试验结果表明,10年自然老化防弹衣防护下的明胶靶标内平均瞬态最大凹陷深度为 23.32 mm,平均最大直径为 70.08 mm;新软质防弹衣防护下的明胶靶标内平均最大凹陷深度为 28.76 mm, 平均最大直径为 66.59 mm。结论 10年自然老化对软质防弹衣的抗弹性能没有显著影响。文中的研究给 自然老化软质防弹衣安全使用寿命的延长提供了参考。

关键词: 自然老化; 超高分子量聚乙烯材料; 软质防弹衣; 明胶; 钝性撞击

中图分类号: TQ317.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)21-0018-06 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.003

Experiment Study on the Protective Performance of Naturally Aged Soft Bulletproof Vests on Gelatin Target

CAO Yan-feng¹, WEN Yao-ke^{1*}, SUN Fei², XU Cheng¹

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
 First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: In order to study the protective performance of naturally aged bulletproof vests on human body, the work aims to conduct the impact experiment to examine the blunt impact effect of handgun bullets on gelatin targets with protective measures. The instantaneous concavity in the gelatin target during blunt impact was photographed by high-speed photography to determine whether natural aging affected the protective performance of bulletproof vests. The experimental results showed that, under the protection of bulletproof vests aged over 10 years, the average instantaneous maximum concave depth in the gelatin targets was 23.32 mm and the average maximum diameter was 70.08 mm. In comparison, for gelatin targets protected by new soft bulletproof vests, the average maximum concave depth was 28.76 mm and the average maximum diameter was 66.59 mm. The natural aging for 10 years does not significantly affect the bullet-resistant performance of the soft bulletproof vests. This study provides reference information for extending the safe service life of naturally aged soft bulletproof vests.

KEY WORDS: naturally aged; ultra-high molecular weight polyethylene; soft bulletproof vests; gelatin; blunt impact

超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE,以下简称 PE)软质防弹材料是依靠纤维使高速运动的弹丸减 速,同时使其变形的方式来防护弹丸的贯穿对人体造 成伤害,因此在弹丸减速的过程中,会将动能传递至 人体,对穿着软质防弹衣的人体的主要脏器和骨骼造 成钝击伤。由此可知,一种优秀的软质防弹材料不仅

收稿日期: 2023-09-05

基金项目:国家自然科学基金(11872215);瞬态冲击技术重点实验室基金(6142606212105) *通信作者 具有较高的防弹能力,还应满足一定的非贯穿钝击的 低损伤或无损伤要求。近年来软质防弹衣在防弹过程 中的钝击效应及非贯穿钝击伤问题受到了研究者的 广泛关注。有的学者^[1-8]通过试验获得了 PE 等防弹材 料的防弹性能,还有的学者^[9-18]通过数值仿真的方法 对不同枪弹侵彻带软质防弹衣靶标的非贯穿钝击作 用的瞬态响应过程进行了研究。但对自然老化后的软 质防弹衣其力学性能是否会下降,从而导致贯穿或钝 击效应加重,仍需要开展研究。本文通过试验对比分 析有无自然老化 PE 软质防弹衣抗弹过程钝击效应情 况,对软质防弹衣耐老化性能评估、长期安全使用以 及软防护状态钝击伤的医学诊疗具有指导意义。

1 试验对象与测量方法

试验使用的防弹衣主要分为新防弹衣和自然老 化防弹衣,防护面积为300 mm×300 mm。自然老化 防弹衣为防弹衣在日常储存条件下自然老化,使用时 距生产日期已超过10年,自然老化防弹衣照片如图 1所示。新防弹衣为近期生产的防弹衣。自然老化防 弹衣与新防弹衣均由PE UD 布、塑料板和海绵垫组 成,其中PE UD 布模块起抗弹和防护作用。为保证 试验结果对比的准确性,选取同样厚度 PE UD 布模 块的防弹衣,防弹衣规格如表1所示。



图 1 10 年自然老化软质防弹衣样品 Fig.1 10-year naturally aged soft bulletproof vest sample

表 1 防弹衣规格 Tab.1 Specifications of bulletproof vest

靶板编号	反编号 靶板规格		
А	7 mm PE+1 层海绵(新)		
D	7 mm PE+1 层海绵(老化)		
G	7 mm PE (老化)		
Н	7 mm PE (新)		

对 7.62 mm 手枪弹高速撞击带 PE 软质警用防弹 衣的明胶复合靶标的过程进行研究。试验系统如图 2 所示,试验中采用手枪发射 7.62 mm 手枪弹,枪口距 离防弹衣 5 m,手枪弹垂直撞击带 PE 软质警用防弹 衣的明胶模拟靶标,靶标如图 3 所示。明胶靶标尺寸 为 300 mm×300 mm、质量分数为 10%,使 用温度为 4 ℃。以明胶迎弹面左下角为坐标原点、水 平向右为 x 正方向、竖直向上为 y 正方向、沿弹道方 向为 z 正方向建立坐标系,通过坐标系可以获得防弹 衣和明胶靶标受到手枪弹冲击时的弹着点和凹陷坐 标,从而获取瞬时凹陷尺寸。高速摄像系统被布置在 带 PE 软防护明胶靶标的侧面,通过拍摄和图像处理来 测量软防护和明胶的凹陷情况。高速摄影测试系统由一 台 Photron FASTCAM SA-X2 型彩色高速摄影机、笔记 本电脑、Nikon AF 80-200 mm 1:2.8D 光学镜头、三脚 架以及若干连接线组成。综合考虑,设置彩色高速摄像 机的分辨率为1024×672,采样频率为20000 帧/s,曝 光时间为 50 μs。控制部分主要通过电脑与 Photron 高速摄像机相连接,通过计算机与摄像机配套的 PFV 拍摄软件进行参数设置和摄像控制。



图 2 试验系统示意图 Fig.2 Schematic diagram of experiment system

2 明胶人体模拟靶标的制作

弹道明胶被广泛用来模拟人体肌肉组织。明胶人体模拟靶标的制作大概分为制备原料的选取,明胶颗粒的浸泡,明胶的熬制,准备模具、注模与贮藏,脱 模等几个步骤。明胶人体模拟靶标的制备原料为自来 水和明胶颗粒。为了便于高速摄影拍摄,所选明胶颗 粒均为照相明胶,其理化性能均符合 QB/T 1997—2010^[19]的要求。本试验中制备的明胶人体模拟 靶标的明胶质量分数为 10%,因此在制备过程中明胶 颗粒与自来水时按 1:9 的质量比称取。

明胶颗粒在水中充分浸泡软化后倒入 60 ℃恒温 水浴锅中进行明胶溶液的熬制,彻底融化后注入内尺 寸为 300 mm×300 mm×350 mm 的模具。注模后的明 胶溶液连同模具一起放置在 0~25 ℃的环境中冷却, 完全凝固后,放在恒温箱中,恒温贮藏。

3 结果与讨论

3.1 自然老化和新软质防弹衣钝击效应试 验结果

本文采用明胶靶标对自然老化和新软质防弹衣抗

弹过程进行钝击效应试验研究(如图 3)。其中,7.62 mm 手枪弹侵彻新软质防弹衣明胶复合靶标的高速摄影结 果如图 4 所示,此时弹丸的入射速度为 403.2 m/s。



图 3 带 PE 软质防弹衣的明胶靶标 Fig.3 Gelatin target with PE soft bulletproof vest



图 4 7.62 mm 手枪弹侵彻新防弹衣明 胶靶标高速摄影结果 Fig.4 High speed photography results of 7.62 mm pistol bullet penetrating gelatin target with new bulletproof vest

图 4 中, 以弹丸击中复合靶标的前一帧为 0 ms 时刻, 在防弹衣后明胶靶标内形成瞬时凹陷的鼓包并 逐渐变大。在 3.85 ms 时达到最大高度 29.09 mm, 随 后鼓包高度开始减小; 在 5.45 ms 时形成最大直径为 68.64 mm。此后鼓包收缩, 在 8.85 ms 时消失不见, 并未出现二次鼓包。

表 2 给出了 3 发 7.62 mm 手枪弹分别侵彻有海绵 垫的自然老化和新软质防弹衣过程中明胶复合靶标 的钝击效应试验数据。其中,弹丸侵彻新软质防弹衣 的平均入射速度为 398.4 m/s,侵彻自然老化防弹衣 的平均入射速度为 408.1 m/s。在冲击过程中,新软 质防弹衣防护下的明胶内产生瞬时鼓包,平均最大瞬 时鼓包高度为 28.76 mm,平均最大直径为 66.59 mm; 自然老化软质防弹衣的平均最大瞬时鼓包高度为 21.76 mm,平均最大直径为 70.08 mm。

此外,由于防弹衣年代不同,单层 PE 无纬布的 厚度也不同,无法简单地通过被穿透层数进行防护性 能对比。因此对侵彻后被穿透的防弹衣进行了穿透厚 度测量,将被穿透靶板的厚度作为反映防弹衣防侵彻 能力的指标之一。新软质防弹衣平均被穿透厚度为 0.81 mm,自然老化软质防弹衣平均被穿透厚度为 2.03 mm。通过对比试验结果可以看出自然老化防弹 衣的最大瞬时鼓包的高度值更小,但是最大鼓包直径 和平均被穿透厚度更大。

图 5 为入射速度为 403.2 m/s 时,自然老化防弹 衣和新防弹衣防护下明胶靶标的鼓包最大高度随时 间变化的曲线。从图 5 中得知,相同入射速度下,新 防弹衣防护下明胶靶标的最大鼓包高度相对较大,而 自然老化防弹衣防护下明胶靶标的最大鼓包高度相 对较小。在图 5 中可以明显看出,在 1.25 ms 时鼓包高 度达到第 1 个峰值 17.80 mm,此后鼓包在短暂收缩后, 在 5.75 ms 时,鼓包高度达到另一个峰值 23.75 mm。此 外,虽然新防弹衣的鼓包高度的峰值相较于自然老 化防弹衣更大,但是新防弹衣的鼓包收缩更快,在 8.85 ms 时鼓包消失,但是自然老化防弹衣则在 12.75 ms 时消失。从钝击损伤角度分析,10 年自然老化的作用影 响较小。10 年自然老化防弹衣尽管对人体有损伤,但 仍符合安全使用要求。

表 2 软质防弹衣钝击效应试验结果 Tab.2 Blunt impact effect results of soft bulletproof vest

序号	入靶速度/(m·s ⁻¹)	被穿透靶板厚度/mm	明胶内最大鼓包高度/mm	明胶内最大鼓包直径/mm
		0.50		
A-1	381.7	0.70	29.30	70.69
A-2	410.4	0.70	27.90	60.45
A-3	403.2	1.02	29.09	68.64
D-1	410.5	2.07	26.20	75.40
D-2	403.2	2.13	23.75	73.00
D-3	410.5	1.95	20.00	61.85



Fig.5 Curve of maximum bulging height changing with time

3.2 自然老化和新PE防弹靶板钝击效应试 验结果

在 7.62 mm 手枪弹高速撞击自然老化和新 PE 防 弹靶板(防弹衣去除海绵与塑料板)防护下明胶靶标 的试验中,每个靶标分别射击 3 发 7.62 mm 手枪弹, 弹着点位置如图 6 所示,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 弹丸侵彻新 PE 防弹靶板的平均入 射速度为 419.6 m/s, 侵彻自然老化防弹靶板的平均 入射速度为 414.1 m/s。在冲击过程中,在新软质防弹 靶板防护下的明胶内产生的瞬时鼓包的平均最大瞬时 鼓包高度为 29.86 mm、平均最大直径为 68.43 mm; 而 自然老化软质防弹靶板防护下明胶内的平均最大瞬时鼓包高度为 33.01 mm、平均最大直径为 68.08 mm。 此外,新软质防弹靶板平均被穿透厚度为 1.66 mm, 自然老化软质防弹靶板平均被穿透厚度为 2.07 mm。 其中,在编号为 G-3 组试验结果中,明胶最大鼓包高 度为 44.56 mm,结合弹着点示意图可以发现,G-3 组试验弹着点位于防弹靶板和明胶靶标的边缘位置, 因此试验结果远大于其他 2 组数据。不考虑 G-3 组数 据,自然老化软质防弹靶板防护下明胶内的最大瞬时 鼓包高度为 27.24 mm,明显小于新 PE 防弹靶板。



图 6 弹着点位置示意图 Fig.6 Schematic diagram of the impact point

图 7 为试验组编号为 G-2 的弹丸侵彻自然老化防 弹靶板的试验过程, 靶板为去除海绵与塑料板的 7 mm PE 防弹靶板。以弹丸击中靶板的前一帧为 0 ms 时刻, 防护下的明胶靶标内出现了 2 个鼓包, 第 1 个鼓包在 1.85 ms 时达到最大高度 22.51 mm, 随后第 1 个鼓包

序号	入靶速度/(m·s ⁻¹)	被穿透靶板厚度/mm	明胶内最大鼓包高度/mm	明胶内最大鼓包直径/mm
G-1	396.0	1.52	26.34	64.93
G-2	418.7	1.48	28.14	66.60
G-3	427.7	3.22	44.56	72.71
H-1	403.0	1.65	27.75	70.12
Н-2	427.5	1.65	30.78	59.90
Н-3	428.6	1.68	31.05	75.29

表 3 PE 软质防弹靶板钝击效应试验结果 Tab.3 Blunt impact effect results of PE soft bulletproof target



图 7 7.62 mm 手枪弹侵彻自然老化防弹靶板明胶靶标高速摄影结果(G-2) Fig.7 High speed photography results of 7.62 mm pistol bullet penetrating gelatin target with naturally aged bulletproof target (G-2)

开始收缩,第2个鼓包形成并出现2个鼓包共存现象。 在 8.7 ms 时第2个鼓包达到最大高度28.14 mm;最 大直径为66.60 mm。此后鼓包开始变小直至消失不 见,未出现反复现象。

由于 PE 纤维老化,防弹材料硬度增加,弹丸在 侵彻过程中防弹材料变形减小,在侵彻一定深度形成 第1个鼓包后运动轨迹开始变化,第1个鼓包高度停 止增大,在弹丸减速过程中进一步释放能量,形成了 第2个鼓包。因此,与新软质防弹材料相比,自然老 化防弹材料吸收能量的过程更长,形成的最大鼓包高 度相对较小,恢复时间较长。

4 结语

本文开展了手枪弹侵彻新、老防弹衣对明胶靶标 的防护性能试验研究。试验发现 7.62 mm 手枪弹高速 撞击 PE 软质防弹衣对明胶靶标钝击效应产生的瞬态 凹陷会对人体产生损伤。在新 PE 软质防弹衣与 10 年自然老化 PE 软质防弹衣防护下,明胶复合靶标产 生的钝击效应基本相同,10 年自然老化 PE 软质防弹 衣的抗弹性能没有明显下降。本文研究对自然老化软 质防弹衣安全使用寿命的延长提供了参考。

参考文献:

[1] 郑震,施楣梧,周国泰.超高分子量聚乙烯纤维增强
 复合材料及其防弹性能的研究进展[J].合成纤维,
 2002, 31(4): 20-23.

ZHENG Zhen, SHI Mei-wu, ZHOU Guo-tai. Progress in Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber Reinforced Composites and Its Bulletproof Property[J]. Synthetic Fiber in China, 2002, 31(4): 20-23.

- [2] JACOBS M J N, DINGGEN J L J V. Ballistic Protection Mechanism in Personal Armor, Journal of Materials Science[J]. 2001, 36(13): 3137-3142.
- [3] CHEN Li, CAO Ming-jin, FANG Qin. Ballistic Performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Laminate with Different Thickness[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103931.
- [4] 许倞,温垚珂,陈爱军,等.基于 3D-DIC 的
 UHMWPE 软质防弹衣性能测试[J]. 兵器装备工程学
 报,2023,44(7):77-84.

XU Liang, WEN Yao-ke, CHEN Ai-jun, et al. Performance Tests of UHMWPE Soft Bullet-Proof Vests Based on 3D-DIC[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(7): 77-84.

[5] 赵玉芬,田歌,王艺臻,等. UHMWPE 防弹复合材料

正交试验设计与分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(8): 104-110.

ZHAO Yu-fen, TIAN Ge, WANG Yi-zhen, et al. Orthogonal Experimental Design and Analysis of UHMWPE Bulletproof Composite[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(8): 104-110.

- [6] 常利军,黄星源,袁圣林,等. 压缩载荷下 UHMWPE 纤维复合材料层合板的力学性能与失效分析[J]. 高压 物理学报, 2023, 37(1): 52-61.
 CHANG Li-jun, HUANG Xing-yuan, YUAN Sheng-lin, et al. Mechanical Properties and Failure Analysis of UHMWPE Fiber Composite Laminates under Compressive Loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 52-61.
- [7] 何业茂, 焦亚男, 周庆, 等. 弹道防护用超高分子量 聚乙烯纤维增强热塑性树脂基复合材料的拉伸力学 行为[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 119-130.
 HE Ye-mao, JIAO Ya-nan, ZHOU Qing, et al. Tensile Mechanical Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Reinforced Thermoplastic Resin Matrix Composites for Ballistic Application[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 119-130.
- [8] CAO Ming-jin, CHEN Li, XU Rong-zheng, et al. Effect of the Temperature on Ballistic Performance of UHMWPE Laminate with Limited Thickness[J]. Composite Structures, 2021, 277: 1-11.
- [9] 孙非,马力,朱一辉,等. 手枪弹对带 UHMWPE 软防 护明胶靶标冲击效应的数值分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 20-26.
 SUN Fei, MA Li, ZHU Yi-hui, et al. Numerical Analysis for Impact Effects of a Pistol Bullet on a Gelatin Target Covered with UHMWPE Fiber Armor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13): 20-26.
- [10] LUO Shao-min, XU Cheng, WANG Shu, et al. Transient Pressure Wave in the Behind Armor Blunt Trauma: Experimental and Computational Investigation[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2017, 20(3): 308-318.
- [11] 温垚珂,郑浩,张俊斌,等.基于三维数字图像相关 技术的防弹衣性能测试与评估[J]. 兵工学报, 2021, 42(6):1121-1127.
 WEN Yao-ke, ZHENG Hao, ZHANG Jun-bin, et al. Test and Evaluation of Body Armor Performance Based on 3D Digital Image Correlation Technology[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(6): 1121-1127.
- [12] LUO Shao-min, WEN Yao-ke, LI Juan. Experimental

Investigation on the Characteristics of Temporary Cavity in BABT with 9 mm Projectiles[J]. Forensic Science International, 2021, 323: 110772.

- [13] GOODE T, SHOEMAKER G, SCHULTZ S, et al. Soft Body Armor Time-Dependent back Face Deformation (BFD) with Ballistics Gel Backing[J]. Composite Structures, 2019, 220: 687-698.
- [14] HAN Rui-guo, QU Yong-jie, YAN Wen-min, et al. Experimental Study of Transient Pressure Wave in the Behind Armor Blunt Trauma Induced by Different Rifle Bullets[J]. Defence Technology, 2020, 16(4): 900-909.
- [15] GILSON L, RABET L, IMAD A, et al. Experimental and Numerical Assessment of Non-Penetrating Impacts on a Composite Protection and Ballistic Gelatine[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 136: 103417.
- [16] 姜荃, 温垚珂, 张俊斌, 等. 步枪弹对有防护明胶靶

标钝击作用传递模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(4): 31-36.

JIANG Quan, WEN Yao-ke, ZHANG Jun-bin, et al. Research on Transfer Model of Rifle Projectile Blunt Impact on Protected Gelatin Target[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2021, 42(4): 31-36.

- [17] CRONIN D S, BUSTAMANTE M C, BARKER J, et al. Assessment of Thorax Finite Element Model Response for Behind Armor Blunt Trauma Impact Loading Using an Epidemiological Database[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2021, 143(3): 031007.
- [18] LI Y Q, GAO X L, HALLS V A, et al. A New Constitutive Model for Ballistic Roma Plastilina No. 1 Clay[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 27(24): 2027-2034.
- [19] QB/T 1997—2010,照相明胶[S]. QB/T 1997-2010, Photographic Gelatin[S].

责任编辑:曾钰婵