

文章编号:1004-7220(2014)06-0567-05

手枪弹冲击下有防护生物靶标多参数测量与分析

黄珊¹, 徐诚¹, 王双平², 赖西南³

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国兵器装备研究所, 北京 102202;
3. 第三军医大学 野战外科研究所, 重庆 400042)

摘要: **目的** 研究手枪对有防护生物靶标的致伤情况与原因,为揭示人体在防护条件下的致伤机理和医学治疗提供参考。**方法** 选择体重 60 kg 的活猪作为生物靶标,参照防护条件下单兵头部和胸部的易损情况确定生物靶标内的测试物理量和具体位置。在 25 m 射距下分别对防护条件下生物靶标的头部和胸部射击 3 发 9 mm 巴拉贝鲁姆手枪弹,综合测量手枪弹冲击对有防护生物靶标钝性损伤起重要作用的加速度、压力、载荷力等多个力学量。**结果** (1) 手枪弹对生物靶标头部的钝性损伤使颅内产生负压脉冲并伴随产生远达效应,在其脊柱和颈动脉内出现脉冲压力;(2) 手枪弹对生物靶标胸部的钝性损伤使心脏承受高加速度冲击,肺部承受高压波作用。**结论** 测量结果为定量认识手枪弹对防护条件下有生目标致伤机理提供依据。

关键词: 手枪弹; 生物靶标; 冲击; 压力波; 致伤机理

中图分类号: TG 303.4 文献标志码: A

Comprehensive measurement and analysis on multi-parameters of armored biological target under pistol impact

HUANG Shan¹, XU Cheng¹, WANG Shuang-ping², LAI Xi-nan³ (1. *College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*; 2. *Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China*; 3. *Research Institute of Field Surgery, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China*)

Abstract: **Objective** To study the injury cases of armored biological target by bullet and its causes, and provide references for revealing the wound mechanism of armored human by bullet and the corresponding medical treatment. **Methods** A 60 kg live pig was selected as the biological target, and the testing physical quantity and specific location within the biological target were identified by reference to the vulnerability in the head and chest of the soldier with armor. Three rounds of 9 mm Bala Baerum pistols in 25 meter-range were shot, respectively, on the head and chest of the biological live target with armor, and the multi-mechanical parameters (acceleration, pressure, loads, etc.) that played an important role in blunt trauma of armored biological target under pistol impacts were measured. **Results** (1) Blunt injury to the head of the biological target by pistol generated negative pressure pulse inside the calvarium with far reaching effects, and pressure pulse appeared in the spine and carotid; (2) Blunt injury to the chest of the biological target by pistol caused high-G impact on the heart, with high pressure wave in the lungs. **Conclusions** The measurement results in this study provided the basis for quantitatively understanding the injury mechanism of the pistol impacted by live armored target.

Key words: Pistol; Biological target; Impact; Pressure wave; Wound mechanism

创伤弹道学研究既有军事技术价值,又有临床医学治疗意义,因而受到各国的普遍重视。对人体创伤机理的研究由于受到各种条件的限制,只能用模拟的方法预估抛射物对人体的致伤过程。目前,除采用非生物介质(水、肥皂和明胶等)进行各种模拟实验外,往往需要用活体动物来模拟各种投射物对人体的杀伤效应,以研究不同投射物的致伤机理、组织损伤特点及局部和全身的创伤反应^[1-2]。有关枪弹和破片侵彻生物体致伤机理方面的研究现已大量开展^[3-5],发现了切割致伤、瞬时空腔致伤和压力波致伤现象,并提出了瞬时空腔致伤理论,但是瞬时空腔理论不适用于解释枪弹对防护条件下人体钝击损伤的机理。随着防弹装具的大量配备,迫切需要研究防护条件下人体钝击损伤问题,提出新的杀伤作用物理量和杀伤机理。目前,国内外针对枪弹撞击防护材料后对人体致伤机理的研究较少^[6-7],而对于汽车碰撞的致伤机理研究很多^[8-10]。为研究手枪弹高速撞击头盔和防弹衣后致人体钝性损伤的作用,本文通过在防护条件下的生物靶标内埋设多个力学传感器,综合测量和分析与钝性损伤相关的物理参量(冲击加速度、压力和载荷力),研究防护条件下人体头部和胸部受冲击后加速运动以及压力波在颅内和体内传播的特征,为揭示防护条件下人体致伤机理和医学治疗提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 实验方案

实验中采用体重 60 kg 的活猪作为生物靶标,因为猪的皮肤组织结构,以及血液学、生物化学等各种指标都和人相近,而且该体重也与人近似,肺脏容积与人大体一致。生物靶标的测试物理量、测试位置和量程范围见表 1,其中各物理量的量程范围根据先前生物试验数据确定。实验全程猪处于全身麻醉状态,头部和胸部分别覆盖防弹头盔板和软质防弹衣,杀伤元选用 9 mm 巴拉贝鲁姆手枪弹,弹道枪射击,防弹头盔和软质防弹衣具体规格见表 2。根据主要测试的物理参数——靶前速度、压力和加速度搭建综合测量系统,测速设备采用高灵敏度光幕靶,有效靶面为 330 mm × 400 mm;测量系统由数据采集仪、应变放大仪和传感器组成,数据采集仪选用 NI PXI-6133 多功能 8 通道同步采集卡,模拟通道最

高采样率可达 2.5 MHz,分辨率为 14 bit,实验中各通道采样频率为 1 MHz,当弹丸飞过测速靶的 2 靶时,输出电压信号触发 PXI 数据采集仪,实现多参数的同步采集。应变放大仪选用 KD6003 型 4 通道信号调理器,配有 0.5 MHz 低通滤波器,实现对压阻传感器的信号调理。

表 1 生物靶标多物理量的测试要求

Tab. 1 Test requirements for the biological target

测试项目	测试位置	传感器类型	量程范围要求
头部	颅骨	加速度	6 000 g
	颅内	压力	200 kPa
	颈动脉	压力	100 kPa
	脊柱	压力	100 kPa
胸部	心脏	压力	500 kPa
	肝脏	压力	500 kPa
	肺脏	压力	500 kPa
	胸腔	压力	500 kPa
	胸骨 T6	加速度	6 000 g
	胸骨中心	载荷质量	1 818 kg

表 2 防弹头盔和软质防弹衣规格

Tab. 2 Specifications of bulletproof helmet and soft body armor

	防弹头盔板	软质防弹衣
材料	芳纶	超高分子量聚乙烯
形状	平面	平板
尺寸/mm ²	350 × 350	300 × 300
质量/kg	0.72	0.9
防弹性能	GA293-2001 II 级	GA141-2001 II 级

1.2 传感器的布置

在生物靶标头部相应位置布置传感器如下:
① 在头颅侧面开口放置压力传感器;② 头颅后部打洞,螺纹安装加速度传感器;③ 在颈动脉和脊柱处放置压力传感器。在生物靶标胸部相应位置布置传感器如下:① 在心脏、肝脏和肺脏内布置压力传感器,测量生物靶标在受弹后各脏器内部的压力变化;② 在左肋骨或右肋骨处布置加速度传感器,测量靶标在受弹后胸壁的加速度值;③ 在胸骨中心布置力传感器,测量靶标在受弹时胸骨瞬间所承受的载荷力。

1.3 压力传感器的选型和安装方法

生物体内环境很复杂,由血液、皮肤和骨骼等组成,为测量生物体受弹后内部物理参量的变化,要求传感器满足以下几点:①能够在这种复杂环境中正常工作;②体积要尽量小,能够保证生物体的生命体征,而且量程还要满足需要;③传感器安装要牢固,能够保证传感器敏感面的方向。根据上述生物体内安装传感器的实际情况,为在生物体内尽可能保证物理量测试的精度,对压力传感器的选型和埋设方法进行设计。弹头撞击防弹装具后在生物体内形成的压力幅值较高,上升时间也很快,要求传感器具备高频响、大量程的特点;而颈动脉等处的血液压力脉动,压力幅值较低,要求传感器具有较高灵敏度和优良低频性能;综合上述要求选择兼具高、低频响应特性、高灵敏度和防水功能的扩散硅 CM-92 型微型压阻压力传感器,量程为 0 ~ 2 MPa,固有频率范围为 0 ~ 500 kHz,非线性度 $\leq 0.5\%$,这款压力传感器体积小且具备优良的生理兼容性和 0 ~ 200 kHz 的宽频响特性,可以满足测试要求。但是由于特殊增加了防水功能,导致回程时反应较慢,温度漂移特性受到不同程度影响,故实验前对每个压力传感器均进行动态标定。

压力传感器头部安装方法:在颅脑左侧正中开一个直径为 4 mm 的孔洞,然后将压力传感器由颅脑左侧垂直插入脑实质 5 mm,最后将传感器与颅骨固定。压力传感器胸部安装方法:气管插管以呼吸机行人工呼吸,然后将压力传感器由猪鼻孔放入食管,放置后行胸腔闭式引流,以此测定胸腔内压;在心脏、肝脏和胃处开长约 5 cm 的切口,分层切开,暴露脏器后钝性打开,将压力传感器放入脏器内,最后缝合伤口并将传感器固定。

1.4 加速度传感器的选型和安装方法

弹头撞击防弹装具后会导致颅脑和胸壁加速运动,为了能够在生物体上安装,所选传感器体积要足够小,而压电型的加速度传感器体积都很大,故选择压阻型加速度传感器。为准确测量加速度,必须考虑安装的牢固性,故选择在颅骨和肋骨上开螺纹孔,然后将传感器固定在其上。通过调研,美国生产的 MEANS 64B 型加速度传感器采用先进的微机电系统技术,具有优越的动态范围和稳定性,量程为 $6 \times 10^3 g$,固有频率 2.6 MHz,非线性度 $\leq 1\%$,具体安装

方法如下:①头部安装方法。在颅脑正上方按照传感器固定座的 4 个位置,分别开直径为 2 mm 的孔洞,然后将螺钉拧入螺纹孔中,最后将传感器与颅骨固定住;②胸部安装方法。固定在左侧第 5 肋骨中点和胸骨及脊柱的同等水平处,具体安装方式同上。

2 实验结果

在 25 m 射距下,分别对附着防护材料生物靶标的头部和胸部各射击 3 发巴拉贝鲁姆手枪弹,头部的实验瞄准点为颅骨正中心,胸部的实验瞄准点为胸骨正中(对应第 6 胸椎 T6)。实验中因为信号调理器只有 4 个通道,所以只对 4 个位置的物理参量进行测试,并分别对头部和胸部试验数据进行处理和分析。

2.1 生物靶标头部试验结果

头部试验中分别测试脊柱、颅内和颈动脉的压力以及头骨的加速度,分别对应 5、6、7、8 通道曲线,典型实验曲线如图 1 所示,3 组试验结果数据见表 3。3 发弹丸的入靶平均速度和动能分别为:345 m/s, 476 J;333 m/s,444 J;340 m/s,462 J。

表 3 头部试验结果

Tab. 3 Results of head test

	通道号			
	5	6	7	8
测试部位	脊柱	颅脑	颈动脉	颅骨
测试物理量	压力/kPa	压力/kPa	压力/kPa	加速度/g
峰值(试验 1)	30.7	-19.6	-4.9	964
峰值(试验 2)	30.2	-16.6	-10.2	426
峰值(试验 3)	37.0	-11.2	-2.1	371
平均值	32.6	-15.8	-5.7	587

从试验结果可知,尽管头盔防弹材料没有被手枪弹击穿,但仍对头部产生强烈钝击作用,颅骨受到的冲击加速度高达 587 g,弹丸冲击作用使颅脑产生负压,峰值压力为 -15.8 kPa,作用时间约为 10 μ s,颅脑负压经过第 1 个负压峰值后,出现多次振荡。弹丸钝击作用对生物靶标产生远达效应,使得靶标脊柱和颈动脉都出现冲击压力,脊柱冲击压力为正压力,峰值压力 32.6 kPa,脉宽小于颅骨冲击加速度脉宽;颈动脉为负压,峰值压力 -5.7 kPa,波形与颅脑负压相似。

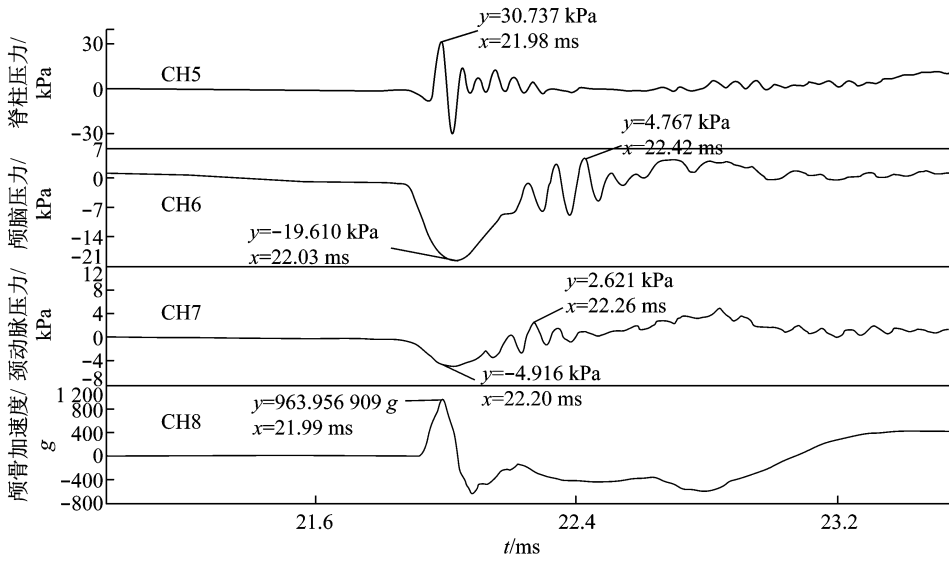


图1 多物理量测试波形图

Fig. 1 Waveform graph of the multi-parameters measurement

2.2 生物靶标胸部试验结果

胸部试验中分别测试肺脏、胸腔压力和心脏加速度以及肝脏压力,分别对应5、6、7、8通道,典型的试验结果波形如图2所示,3组试验结果数据见表4(实验中通道8出现故障,肝脏压力未获得有效数据)。3发弹丸的入靶平均速度和动能分别为:334 m/s,446 J;337 m/s,454 J;341 m/s,465 J。

由于3发弹丸的入靶速度和动能有差异,着靶

点和生物体状态不完全相同,每发弹的压力和加速度峰值有一定差异,但压力和加速度变化规律及数量级相同。试验结果表明,尽管手枪弹没有穿透软质防弹材料,但仍然对生物靶标产生强烈的冲击作用,心脏承受的冲击加速度高达409.7 g;肺部受到了正脉冲压力作用,峰值压力为6.8 kPa,脉宽约为10 μs;胸腔也受到了正脉冲压力作用,峰值压力为11.4 kPa,波形与肺部压力波形不完全相同,原因是

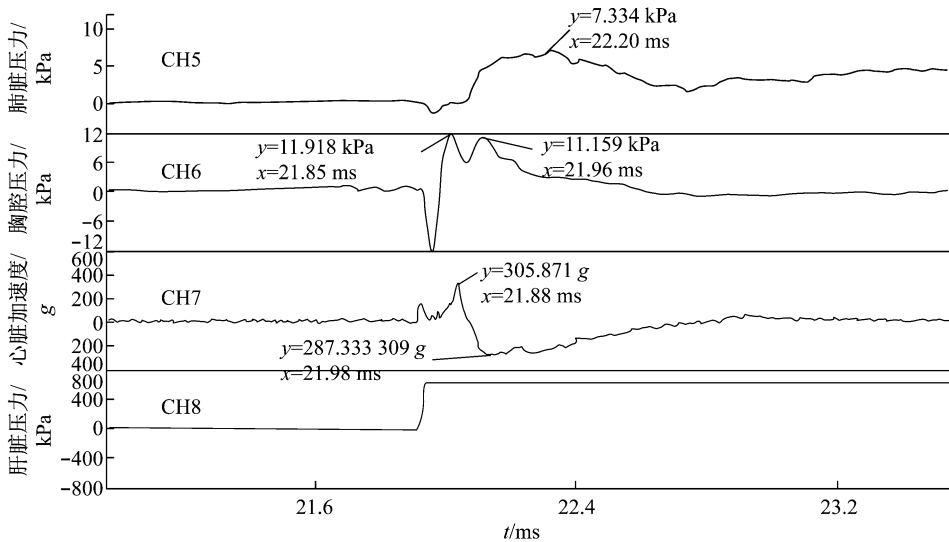


图2 胸部试验典型波形图

Fig. 2 Typical waveform graph of chest test

表 4 胸部试验结果数据

Tab. 4 Results of chest test

	通道号		
	5	6	7
测试部位	肺脏	胸腔	心脏
测试物理量	压力/kPa	压力/kPa	加速度/g
峰值(试验 1)	7.3	11.9	306
峰值(试验 2)	3.4	13.7	416
峰值(试验 3)	9.8	8.6	508
平均值	6.8	11.4	410

组织结构不同造成的,但压力波的峰值基本可以分辨弹丸的杀伤威力。

实验结束后立即放血活杀,进行解剖观察,未见肋骨骨折,各层缝合线未见断裂,肺脏饱满但有损伤;传感器也未见明显脱落、移位现象,传感器包装完好,相同射击条件下加速度和压力波形重复性较好,传感器的选型合适,量程范围基本可以满足测试要求。

3 结论与讨论

本文通过在生物靶标体内布置压力和加速度传感器,测试与有防护生物靶标钝性损伤相关的物理量,并建立综合测量系统;分别对有防护生物靶标的头部和胸部进行手枪弹射击试验,测量生物靶标中典型部位的压力和加速度,为定量认识手枪弹对防护条件下有生目标致伤机理提供依据。实验结果表明:

(1) 手枪弹冲击生物靶标头部,在未穿透芳纶头盔板情况下,仍对头部产生强烈钝击作用;有生靶标颅骨受到强烈冲击加速度作用,峰值高达 587 g,使颅脑产生负压脉冲;弹丸钝击作用对生物靶标产生远达效应,使得生物靶标脊柱和颈动脉都出现冲击压力。

(2) 手枪弹冲击生物靶标胸骨正中位置,尽管没有穿透软质防弹材料,但仍然对生物靶标胸部产生强烈的冲击作用,使心脏承受高加速度冲击,峰值高达 410 g,肺部承受高压波作用,使生物靶标致伤。

本文提出的有防护条件下生物靶标易损部位多

物理量综合测量方法,经过实践证明具有一定可信度和工程应用价值。但是由于实验中样本量只有 1 例,并不具备统计学意义,后续实验中将增加通道数和样本数,进一步提高数据的信息量和可信性,为揭示防护条件下人体致伤机理提供更有价值的参考数据。

参考文献:

- [1] Kneubuehl BP, Coupland RM, Rothschild MA, *et al.* Wound ballistics: Basics and applications [M]. USA: Springer-Verlag GmbH, 2011.
- [2] Maiden N. Historical overview of wound ballistics research [J]. *Forensic Sci Med Pathol*, 2009, 5(2): 85-90.
- [3] Koene L, Papy A. Experimental and numerical study of the impact of spherical projectiles on ballistic gelatin at velocities up to 160 m/s [C]//Proceedings of 25th International Symposium on Ballistics. Beijing, China: [s. n.], 2010: 1573-1579.
- [4] Schyma CW. Colour contrast in ballistic gelatin [J]. *Forensic Sci Int*, 197(1-3): 114-118.
- [5] 黄珊,王浩圣,王舒,等. 典型小口径枪弹侵彻明胶压力波特性的实验研究[J]. *弹道学报*, 2013, 5(1): 62-67.
- [6] 黄艺峰. 手枪弹击中防弹头盔致颅脑损伤特点及机理的实验研究[D]. 重庆: 第三军医大学硕士学位论文, 2012.
- [7] 张波. 步枪弹致背部复合防弹衣后脊柱脊髓钝性损伤特点及损伤机理研究[D]. 重庆: 第三军医大学博士学位论文, 2012.
- [8] 蔡志华, 兰凤崇, 陈吉青, 等. 基于汽车碰撞损伤的人体胸部有限元模型构建与验证[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(1): 36-43.
Cai ZH, Lan FC, Chen JQ, *et al.* Development and validation for finite element model of human thorax based on automotive impact injuries [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(1): 36-43.
- [9] 冯建成, 王富平, 徐臣, 等. 基于车人碰撞事故重建的行人头部动力学响应[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(2): 164-170.
Feng CJ, Wang FP, Xu C, *et al.* Head dynamic response based on reconstruction of vehicle-pedestrian accidents with video [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(2): 164-170.
- [10] 孟昊业, 马沁巍, 汪爱媛, 等. 基于显微 CT 的骨微观三维变形场测量系统的研究[J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 21-26.
Meng HY, Ma QW, Wang AY, *et al.* Three-dimensional deformation field measurement system based on micro-CT images [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 21-26.