

1-18-2021

## Impact Analysis of Gun-on Target Parameters on the Blunting Effect of the Soft Protective Human Body

Sun Fei

1. *College of Mechanical Engineering, NMST, Nanjing 210094, China; ;*

Wenmin Yan

2. *Sci. & Tech. on Transient Impact Laboratory, Beijing 102202, China; ;*

Junbin Zhang

3. *Army Test and Training Base, Baicheng 137001, China;*

Yongjuan Wang

1. *College of Mechanical Engineering, NMST, Nanjing 210094, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Impact Analysis of Gun-on Target Parameters on the Blunting Effect of the Soft Protective Human Body

## Abstract

**Abstract:** In order to research the blunt impact effect of target-entry parameters of pistol bullets, the finite element models of the soft upper body of the pistol blunt with a soft-protected human body are developed. By hitting the heart, lung, liver and stomach at three target-entry velocities, the impact response of pistol bullet impacting on human torso with soft armor is numerically calculated by finite element method. *The simulation results quantitatively reveal the pressure transmission mechanism of the human body with blunt body armor at different target speeds and positions and the law of blunt impact response at different target entry parameters.* The basic data are provided for impact effect analysis and damage assessment with soft armor.

## Keywords

pistol bullet, human torso, soft armor, impact response, finite element

## Authors

Sun Fei, Wenmin Yan, Junbin Zhang, Yongjuan Wang, and Xu Cheng

## Recommended Citation

Sun Fei, Yan Wenmin, Zhang Junbin, Wang Yongjuan, Xu Cheng. Impact Analysis of Gun-on Target Parameters on the Blunting Effect of the Soft Protective Human Body[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(1): 215-221.

## 手枪弹入靶参数对软防护人体钝击影响分析

孙非<sup>1</sup>, 闫文敏<sup>2</sup>, 张俊斌<sup>3</sup>, 王永娟<sup>1\*</sup>, 徐诚<sup>1</sup>(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 瞬态冲击技术重点实验室, 北京 102202;  
3. 陆军试验训练基地, 吉林 白城 137001)

**摘要:** 为研究手枪弹入靶参数对带软防护人体钝击效应影响情况, 基于人体上躯干数字模型, 建立了手枪弹钝击带软防护人体上躯干的有限元计算模型, 分别以3种入靶速度撞击心脏、肝脏、肺脏和胃4个部位, 基于有限元法对手枪弹钝击带软防护人体上躯干的冲击响应进行数值计算, 仿真结果定量揭示了手枪弹在不同入靶速度和位置下, 钝性带防弹衣的人体产生损伤的压力传递机制及入靶参数对钝击效应影响规律, 为软防护冲击效应分析与损伤评估提供了基本数据。

**关键词:** 手枪弹; 人体上躯干; 软防护; 冲击响应; 有限元模型

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 01-0215-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0196

## Impact Analysis of Gun-on Target Parameters on the Blunting Effect of the Soft Protective Human Body

Sun Fei<sup>1</sup>, Yan Wenmin<sup>2</sup>, Zhang Junbin<sup>3</sup>, Wang Yongjuan<sup>1\*</sup>, Xu Cheng<sup>1</sup>(1. College of Mechanical Engineering, NMST, Nanjing 210094, China; 2. Sci. & Tech. on Transient Impact Laboratory, Beijing 102202, China;  
3. Army Test and Training Base, Baicheng 137001, China)

**Abstract:** In order to research the blunt impact effect of target-entry parameters of pistol bullets, the finite element models of the soft upper body of the pistol blunt with a soft-protected human body are developed. By hitting the heart, lung, liver and stomach at three target-entry velocities, the impact response of pistol bullet impacting on human torso with soft armor is numerically calculated by finite element method. *The simulation results quantitatively reveal the pressure transmission mechanism of the human body with blunt body armor at different target speeds and positions and the law of blunt impact response at different target entry parameters.* The basic data are provided for impact effect analysis and damage assessment with soft armor.

**Keywords:** pistol bullet; human torso; soft armor; impact response; finite element

## 引言

枪弹冲击带防弹衣的有生目标钝性损伤及其机理研究, 不仅为提高枪弹威力提供理论依据, 而且为防弹衣的优化、改进及医治钝性损伤提供技术途径, 因此, 倍受学者的重视。早期研究, 主要集中在对带防护的生物体或模拟生物靶标的试验。随着计算机技术发展, 有限元方法开始在有生目标钝性损伤力学机理研究中广泛应用。Roberts 等<sup>[1-2]</sup>构建了人体上躯干模拟模型(Human

Surrogate Torso Model, HSTM), 对手枪弹撞击有软质防护的上躯干进行了数值计算; 南理工与第三军医大学联合<sup>[3-5]</sup>构建了数字化人体上躯干模型, 并采用有限元法模拟了步枪弹撞击带防护的人体上躯干的动态响应, 计算结果与试验基本一致, 为采用有限元模型进行参数影响规律研究奠定了基础。

本文采用上躯干有限元模型研究手枪弹“入靶速度和撞击位置”对人体上躯干关键器官钝击效应

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-07-02

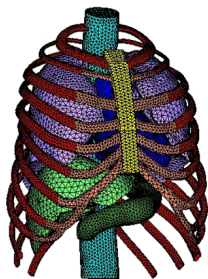
基金项目: 装备预研重点实验室基金(61426060102)

作者简介: 孙非(1973-), 男, 博士, 高工, 研究方向为警用装备技术、个人防护技术。E-mail: 13910823492@163.com; 王永娟(通讯作者 1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向为轻型装备技术、单兵防护技术。E-mail: 13951643935@139.com

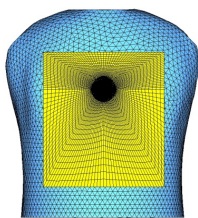
的影响规律,为认识软防弹衣后钝性损伤的力学机制和损伤评估提供科学依据。

## 1 计算模型

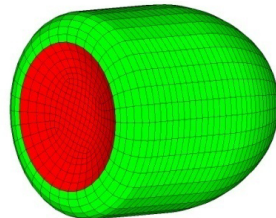
计算模型见图1,人体上躯干有限元模型与文献[5]相同,由肌肉、皮肤、“心脏、肝脏、肺脏和胃”等4个内脏器官、“胸骨、软骨、肋骨和脊柱”等胸廓骨骼和纵膈组成。骨骼、脏器、纵膈采用线性四面体实体单元,皮肤和肌肉采用三角形壳单元,共计695812个单元,其中壳单元9612个,在人体上躯干中胸廓骨骼和“心脏、肝脏、肺脏和胃”等4个内脏器官定义为自动单面接触。接触定义见表1。



(a) 含胸廓骨架和内脏器官的人体上躯干有限元模型<sup>[4]</sup>



(b) 含软防护的人体上躯干有限元模型<sup>[4]</sup>



(c) 手枪弹有限元模型

图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

表1 各部位接触定义

Tab. 1 Contact definition

接触部位	接触类型
手枪弹和防弹衣	面面侵蚀接触
防弹衣各层	单面接触
皮肤、4个内脏器官和纵膈与骨架	单面接触
防弹衣与人体躯干	面面接触

软体防弹衣厚度为9.2 mm,分为46层,采用Belytschko-Tsay薄壳单元,骨骼材料特性定义为弹性材料,胸骨和肋骨的模型参数借用文献[6]的实验

数据,脊柱的模型参数采用文献[7-8]的实验数据。皮肤、4个内脏器官和纵膈的模型采用粘弹性材料,参数来自文献[9]的实验数据,见表2。用高聚乙烯复合纤维材料的MAT\_COMPOSITE\_DAMAGE定义防弹衣材料模型,参数见表3。以手枪弹撞击有生目标的碰撞点为中心,在弹头横截面的5倍圆形区域内,采用密集、均匀的网格,其余区域均采用汇聚型映射网格。9 mm手枪弹弹头的钢套和铅芯采用Johnson-Cook材料模型<sup>[10-17]</sup>,分别为3108和12628个实体单元。

表2 人体上躯干结构各组织的材料特性参数

Tab. 2 Material property parameters of various tissues of human upper torso structure

组织	$\rho/$ (kg/m <sup>3</sup> )	$K/$ GPa	$G_0/$ kPa	$G_\infty/$ kPa	$\beta$	$E/$ GPa	$\nu$
胸骨	1250	/	/	/	/	9.5	0.25
软骨	1070	/	/	/	/	0.0025	0.4
肋骨	1080	/	/	/	/	9.5	0.2
脊柱	1330	/	/	/	/	0.355	0.26
心脏	1000	0.744	67	65	0.1	/	/
肺脏	600	0.744	67	65	0.1	/	/
肝脏	1060	0.744	67	65	0.1	/	/
胃	1050	0.744	67	65	0.1	/	/
纵膈	600	1.03	200	195	0.1	/	/
皮肤/肌肉	1200	2.9	200	195	0.1	/	/

注: $\rho$ 为密度; $K$ 为体积模量; $G_0$ 为短期剪切模量; $G_\infty$ 为长期剪切模量; $\beta$ 为衰变常数; $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比

表3 高聚乙烯复合纤维复合材料模型参数

Tab. 3 High polyethylene composite fiber composite model parameters

$\rho$	$E_1$	$E_2$	$G_1$	$G_2$	$\nu$	$X_T$	$X_C$	$Y_T$	$Y_C$	$S_T$
1.85	4.2	79	1.21	3.01	0.3	966	292	966	292	11.8

注: $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ 分别为纵、横向拉伸模量、剪切模量; $\nu$ 为泊松比; $X_T$ ,  $X_C$ ,  $Y_T$ ,  $Y_C$ ,  $S_T$ 分别为复合材料的纵向拉伸强度、纵向压缩强度、横向拉伸强度、横向压缩强度和面内剪切强度

## 2 仿真结果与特征数据分析

### 2.1 手枪弹撞击带软防护人体靶标的胸骨正中位置计算结果

图2~5是9 mm手枪弹以360 m/s速度撞击带软防护人体靶标的胸骨位置的典型计算结果,计

算获得的加速度峰值为 23 638 g, 仿人靶标试验获得加速度峰值为 19 563 g, 两者基本一致, 证实了计算模型的正确性。计算结果表明: 在手枪弹钝击带软防护的有生目标过程后, 等效应力场以撞击点为峰值中心, 高应力区峰值不断增加, 影响区域也随之扩大; 离弹着点越远的区域, 出现等效应力的时间越晚; 压力场的传播情况与应力场相似。在  $t=88 \mu\text{s}$  时, 软防护表面等效应力圆直径约为 9.5 cm, 截面积约为  $70.85 \text{ cm}^2$ 。人体靶标的皮肤在  $t=236 \mu\text{s}$  时, 应力斑最大, 此时最大应力值为 0.36 MPa。骨架在  $t=128 \mu\text{s}$  时, 应力斑最大, 此时最大应力值为 62.8 MPa。内部器官在  $t=128 \mu\text{s}$  时, 压力斑最大, 此时最大压力值为 10.9 MPa。

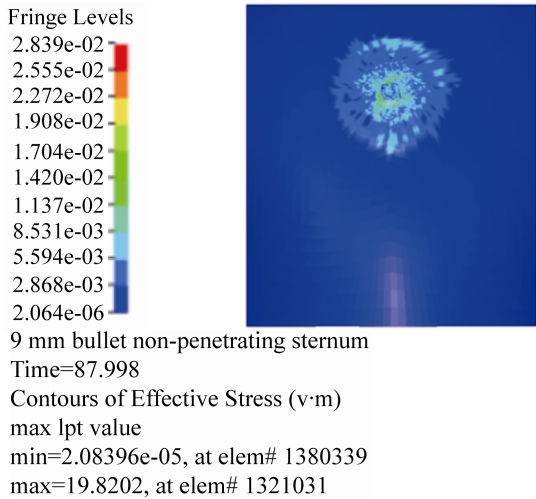


图 2 防弹衣等效应力场( $t=88 \mu\text{s}$ )

Fig. 2 Equivalent stress field of body armor ( $t=88 \mu\text{s}$ )

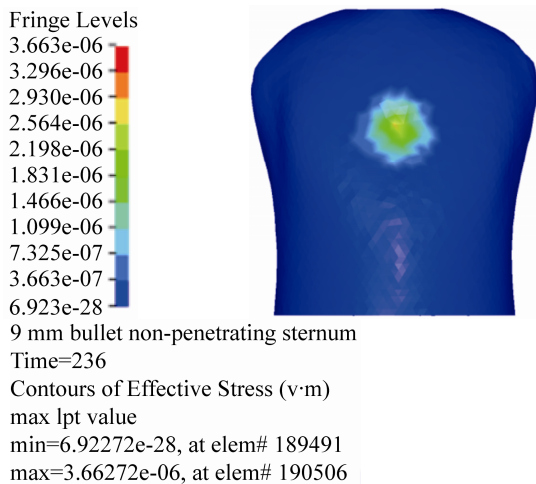


图 3 皮肤等效应力场( $t=236 \mu\text{s}$ )

Fig. 3 Equivalent stress field of skin ( $t=236 \mu\text{s}$ )

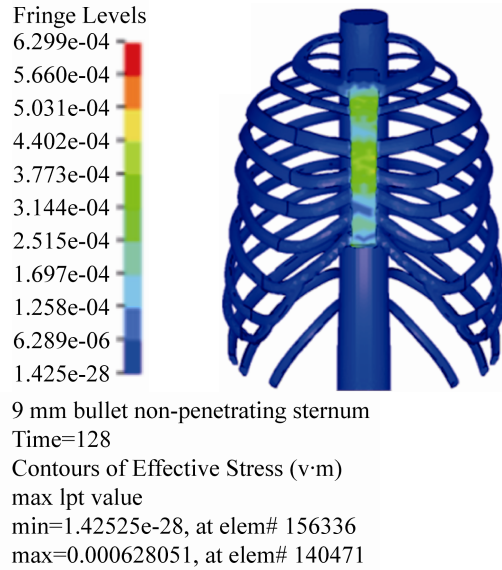


图 4 骨架等效应力场( $t=128 \mu\text{s}$ )

Fig. 4 Equivalent stress field of skeletal ( $t=128 \mu\text{s}$ )

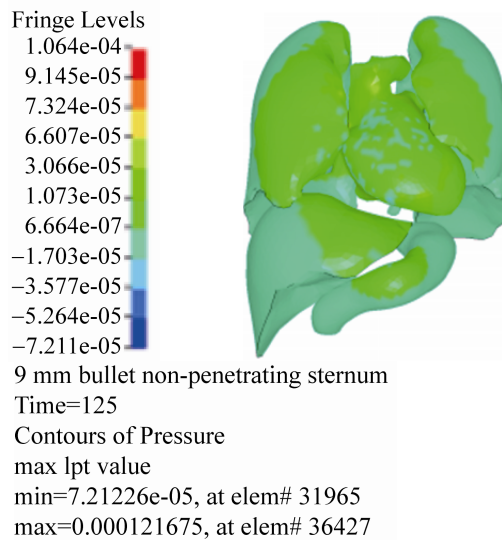


图 5 各脏器压力场( $t=128 \mu\text{s}$ )

Fig. 5 Pressure field of each organ ( $t=128 \mu\text{s}$ )

## 2.2 入射速度和撞击位置对有软防护内脏钝击效应的影响

(1) 入射速度和撞击位置对心脏钝击效应的影响

不同速度撞击胸骨位置, 防护后心脏测量点的钝击压力随时间变化情况如图 6 所示, 不同速度状态心脏压力峰值以及出现时间为: 420 m/s 速度在  $104 \mu\text{s}$  时刻出现最大值 5.685 MPa, 360 m/s 速度在  $120 \mu\text{s}$  时刻出现最大值 4.020 MPa, 280 m/s 速度在

112  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 2.419 MPa。可以看出随着入射速度的增加，最大压力也随之增加。

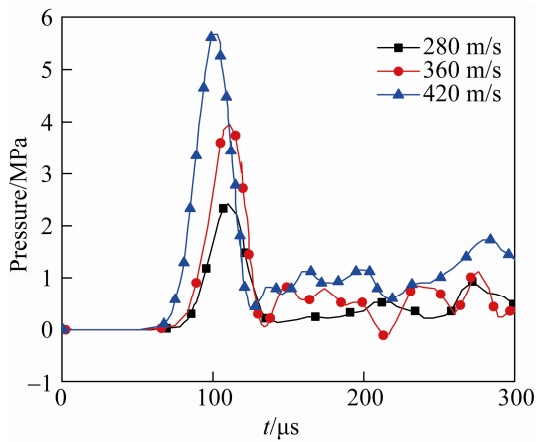


图6 不同撞击速度心脏测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 6 Pressure curve of heart measurement point at different impact speeds

360 m/s 的速度撞击不同位置时，心脏测量点的压力随时间变化情况如图 7 所示，不同速度状态心脏压力峰值以及出现时间为：撞击心脏防护位置时，在 120  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 4.020 MPa；撞击肺脏防护位置时，在 200  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.804 MPa；撞击胃防护位置时，在 216  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.563 MPa；撞击肝脏防护位置时，在 244  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.363 MPa。从计算结果看出，撞击位置离心脏越近，心脏最大钝击压力越大。

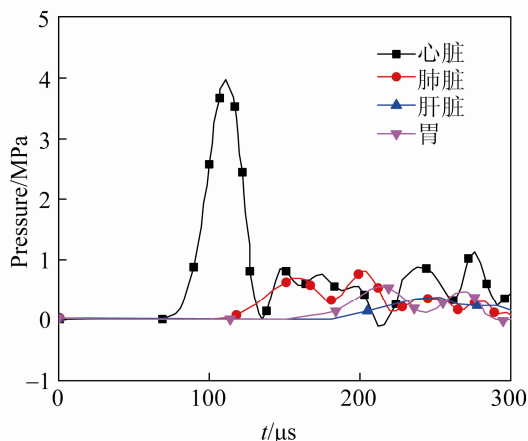


图7 不同撞击位置心脏测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 7 Pressure curve of heart measurement point at different impact locations

(2) 入射速度和撞击位置对肺脏钝击效应的影响

在肺脏防护撞击位置，不同速度对肺脏测量点的钝击压力影响如图 8 所示，不同速度状态肺脏压力峰值以及出现时间为：420 m/s 速度在 116  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 1.649 MPa，360 m/s 速度在 124  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 1.251 MPa，280 m/s 速度在 128  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.817 MPa。

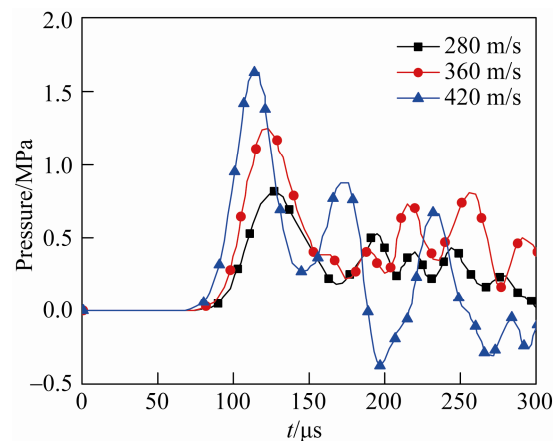


图8 不同速度撞击肺脏防护后肺脏测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 8 Pressure curve of lung measurement point after lung protection at different impact speeds

360 m/s 的速度撞击不同位置时，肺脏测量点的压力随时间变化情况见图 9，不同撞击位置状态肺脏压力峰值以及出现时间为：撞击肺脏防护位置时，在 148  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 5.245 MPa；撞击心脏防护位置时，在 124  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 1.252 MPa；撞击肝脏防护位置时，在 236  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.323 MPa；撞击胃防护位置时，在 272  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.307 MPa。从计算结果看出，撞击位置离肺脏越近，肺脏最大钝击压力越大。

(3) 入射速度和撞击位置对肝脏钝击效应的影响

在肝脏防护撞击位置，不同速度对肝脏后测量点的钝击压力影响如图 10 所示，不同速度状态肝脏压力峰值以及出现时间为：420 m/s 速度在 180  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 1.286 MPa，360 m/s 速度在 188  $\mu\text{s}$

时刻出现最大值 1.096 MPa, 280 m/s 速度在 180  $\mu$ s 时刻出现最大值 0.709 MPa。

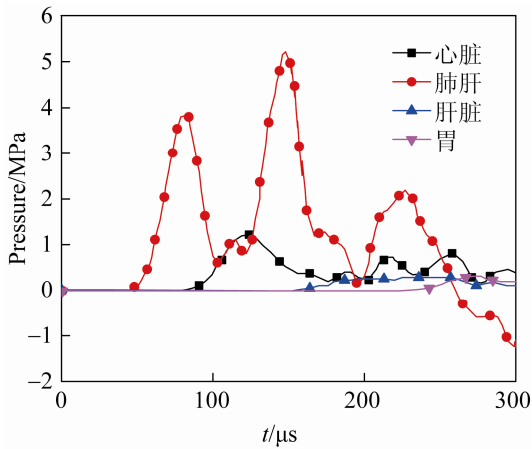


图 9 撞击不同位置肺脏测量点的压力随时间变化  
Fig. 9 Pressure curve of lung measurement point at different impact locations

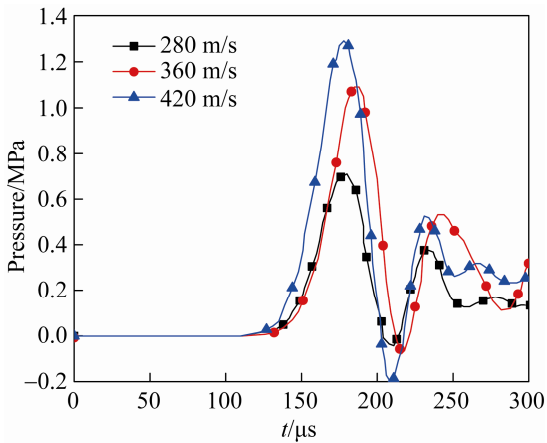


图 10 不同速度撞击肝脏防护后肝脏测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 10 Pressure curve of liver measurement points after liver protection at different impact speeds

360 m/s 的速度撞击不同位置时肝脏测量点的压力随时间变化情况图 11 所示, 不同撞击位置肝脏压力峰值以及出现时间为: 撞击肝脏防护位置时, 在 140  $\mu$ s 时刻出现最大值 1.999 MPa; 撞击肺脏防护位置时, 在 172  $\mu$ s 时刻出现最大值 1.038 MPa; 撞击胃防护位置时, 在 184  $\mu$ s 时刻出现最大值 1.548 MPa; 撞击心脏防护位置时, 在 188  $\mu$ s 时刻出现最大值 1.096 MPa。从计算结果看出, 撞击位置离肝脏越近, 肝脏最大钝击压力越大。

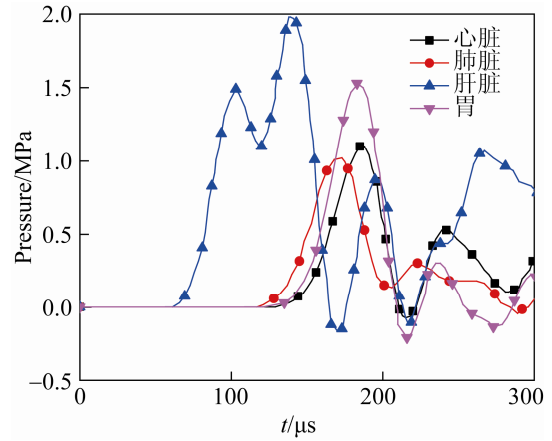


图 11 撞击不同位置肝脏测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 11 Pressure curve of liver measurement point at different impact locations

(4) 入射速度和撞击位置对胃钝击效应的影响  
在胃撞击位置, 不同速度对胃测量点的钝击压力如图 12 所示, 不同速度状态胃的压力峰值以及出现时间为: 420 m/s 速度在 204  $\mu$ s 时刻出现最大值 0.698 MPa, 360 m/s 速度在 196  $\mu$ s 时刻出现最大值 0.597 MPa, 280 m/s 速度在 204  $\mu$ s 时刻出现最大值 0.454 MPa。

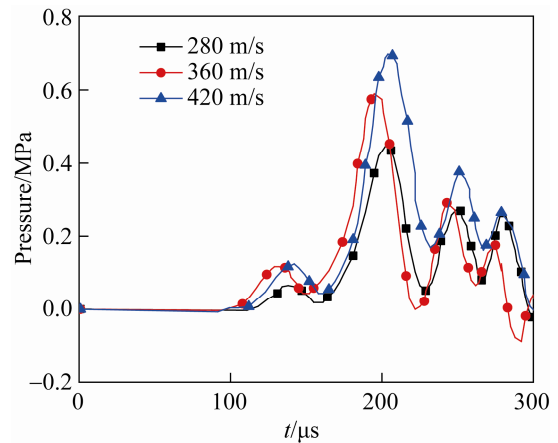


图 12 不同速度撞击胃后胃测量位置的压力随时间变化曲线  
Fig. 12 Pressure curve of the stomach measurement point at different impact speeds

360 m/s 速度撞击不同位置后, 胃测量点的压力随时间变化情况如图 13 所示, 不同撞击位置胃压力峰值以及出现时间为: 撞击胃防护位置时, 在 80  $\mu$ s 时刻出现最大值 10.989 MPa; 撞击肝脏防护

位置时, 在 156  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.883 MPa; 撞击心脏防护位置时, 在 196  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.597 MPa; 撞击肝脏防护位置时, 在 264  $\mu\text{s}$  时刻出现最大值 0.263 MPa。从计算结果看出, 撞击位置离胃越近, 胃最大钝击压力出现时刻越早, 峰值越大。

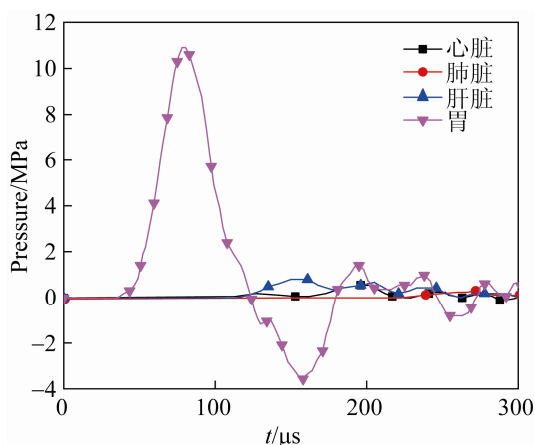


图 13 不同撞击位置胃测量点的压力随时间变化曲线  
Fig. 13 Pressure curve of stomach measurement points at different impact locations

### 3 结论

本文计算了 9 mm 手枪弹以“280 m/s, 360 m/s 和 420 m/s 3 种入靶速度”, 在不同撞击部位钝击带软防护人体上躯干时, “皮肤、胸骨、心脏、肝脏和肝脏”等的动态冲击响应情况, 数值计算结果表明: (1) 随着入射速度的增加, 器脏钝击压力也随之增加; (2) 以相同速度撞击, 撞击位置离器脏位置越近, 器脏钝击压力越大; (3) 以相同速度直接撞击各器脏位置, 胃钝击压力最大, 肝脏次之, 心脏最小。这是由于胃器脏没有外骨骼的保护, 正面撞击时直接承受外部冲击, 因此出现最大钝击压力时刻也最早; (4) 直接撞击各器脏位置时, 除肝脏外, 被撞器脏的钝击压力较非撞击器脏大得多。

### 参考文献:

[1] Roberts J C, Merkle A C, Biermann P J, et al. Computational and Experimental Models of the Human Torso for Non-penetrating Ballistic Impact[J]. J Biomech (S0021-9290), 2007, 40(1): 125-136.

[2] 蔡志华, 兰凤崇, 陈吉清, 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 Zhihua, Lan Fengchong, Chen Jiqing, et al. Development and Validation for Finite Element Model of Human Thorax based on Automotive Impact Injuries[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(1): 36-43.

[3] 董萍, 陈菁, 张启宽, 等. 利用有限元研究非贯穿弹道冲击防弹衣后人体躯干的力学响应[J]. 医用生物力学, 2012, 27(3): 270-275.  
Dong Ping, Chen Jing, Zhang Qikuan, et al. Using Finite Element Method to Study The Mechanical Response of Human Trunk After Non-penetrating Ballistic Impact Bullet-proof Vest[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2012, 27(3): 270-275.

[4] 唐刘建, 温焱珂, 徐诚, 等. 手枪弹侵彻软防护人体胸部靶标的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(1): 107-110, 117.  
Tang Liujian, Wen Yaoke, Xu Cheng, et al. Numerical Simulation of Pistol Bullets Penetrating into Soft Bulletproof Vest Covered Human Chest Target[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(1): 107-110, 117.

[5] 徐诚, 陈菁, 张启宽, 等. 步枪弹对复合防护人体上躯干冲击有限元分析[J]. 弹道学报, 2014, 26(3): 92-97.  
Xu Cheng, Chen Jing, Zhang Qikuan, et al. Finite Element Analysis of the Impact of Rifle Ammunition on Composite Upper Body Torso[J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(3): 92-97.

[6] 董萍. 手枪弹对带软体防弹衣人体躯干靶标钝击作用的建模与仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
Dong Ping. Modeling and Simulation of the Blunting Effect of Handguns on Human Torso Targets with Soft Body Armor[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[7] Caruso K S, Hijuelos J C, Biermann P J, et al. Development of Synthetic Cortical Bone for Ballistic and Blast Testing[J]. Journal of ADV MATER (S1070-9789), 2006, 38(3): 27-36.

[8] Wang H C. Development of a Side Impact Finite Element Human Thoracic Model[D]. Detroit, MI: Wayne State University, 1995.

[9] Duck F A. Physical properties of tissue[M]. London: Academic Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, 1990.

[10] Saraf H, Ramesh K T, Lennon A M, et al. Mechanical Properties of Soft Human Tissues Under Dynamic



- Loading[J]. *Journal of Biomechanics* (S0021-9290), 2007, 40(9): 1960-1967.
- [11] 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*, 2012, 27(3): 270-275.
- Sun Fei, Ma Li, Zhu Yihui, et al. Numerical Analysis of Impact Effect of Handguns on UHMWPE Soft Protective Gelatin Target[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 27(3): 270-275.
- [12] 刘坤, 吴志林, 宁建国, 等. 手枪弹对带软防护的明胶靶标侵彻机理与实验研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(1): 1-17.
- Liu Kun, Wu Zhilin, Ning Jianguo, et al. Investigation on the Mechanism and Experiment of Pistol Cartridge Penetrating into Gelatin Target with Soft Body Armor[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(1): 1-17.
- [13] Luo S, Xu C, Wang S, et al. Transient Pressure Wave in the Behind Armor Blunt Trauma: Experimental and Computational Investigation[J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* (S1025-5842), 2017, 20(3): 308-318.
- [14] 唐刘建, 温焱珂, 薛本源, 等. 手枪弹侵彻有防护仿生人体躯干靶标试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(4): 245-249.
- Tang Liu Jian, Wen Yaoke, Xue Benyuan, et al. Pistol Bullet Impact Soft Body Armor Covered Bionic Human Torso[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(4): 245-249.
- [15] Luo S, Xu C, Chen A, et al. Experimental Investigation of the Response of Gelatine Behind the Soft Body Armor[J]. *Forensic Science International* (S0379-0738), 2016, 266: 8-13.
- [16] 孙非, 曲一, 徐诚. 超高分子量聚乙烯材料软质防弹衣抗弹性能老化衰减规律研究[J]. *兵工学报*, 2018, 39(11): 172-178.
- Sun Fei, Qu Yi, Xu Cheng. Study on Attenuation Law of Anti-elasticity Aging of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Material Soft Body Armor[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(11): 172-178.
- [17] Wen Y, Xu C, Wang S, et al. Analysis of Behind the Armor Ballistic Trauma[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* (S1878-0180), 2015, 45: 11-21.