

# 人体易损性建模及其评估技术研究

张金洋<sup>1</sup>, 温垚珂<sup>1</sup>, 陈 箐<sup>2</sup>, 王亚平<sup>1</sup>, 朱一辉<sup>1</sup>, 刘苏苏<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094; 2. 第三军医大学 大坪医院野战外科研究所, 创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室, 重庆 400042)

**摘要:**考虑人体结构的复杂性、非均质性,提出了建立具有解剖学结构的人体组织几何模型及其相应的损伤评估算法。利用 CVH 数据集,应用 Photoshop 和 Matlab 建立了基本单位为 2mm 的立方体、包含 123 种人体主要组织器官,约 652 万个单元的高分辨率人体易损性模型。根据实验数据,建立了常规枪弹破片不同速度下侵入人体形成典型瞬时空腔模型,提出了基于解剖学的损伤评估算法 SDI、CDI 和 NISS。运用 HVAssess 人体易损性计算程序,获得了典型杀伤元侵入人体时,各器官的损伤情况,并绘制了损伤分布图。结果表明具有解剖学结构人体易损性模型可用于枪弹、破片侵入下人体损伤评估,评估结果可为轻武器弹药杀伤效能评价和人体防护设计提供依据。

**关键词:**易损性;人体组织模型;损伤;评估

**本文引用格式:**张金洋,温垚珂,陈箐,等. 人体易损性建模及其评估技术研究[J]. 兵器装备工程学报,2016(4):165-168.

**Citation format:**ZHANG Jin-yang, WEN Yao-ke, CHEN Jing, et al. Study on Human Vulnerability Modeling and Assessment Technology[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(4):165-168.

中图分类号:TP391.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2016)04-0165-04

## Study on Human Vulnerability Modeling and Assessment Technology

ZHANG Jin-yang<sup>1</sup>, WEN Yao-ke<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>,  
WANG Ya-ping<sup>1</sup>, ZHU Yi-hui<sup>1</sup>, LIU Su-su<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Institute of Surgery Research, Daping Hospital,  
Third Military Medical University, Chongqing 400042, China)

**Abstract:** Considering the complexity and heterogeneity of human anatomy, human body vulnerability model with anatomical structures and assessment algorithm was proposed. Based on the CVH (Chinese Visible Human) data set and using Photoshop and Matlab, high-resolution model of human vulnerability was constructed. It contains 123 kinds of human tissues and about 6.52 million cube units which length is 2 mm. Based on experiment data, the typical cavity model of bullet penetrating body at different speeds was established. Injury assessment algorithm SDI, CDI and NISS were proposed. Using the vulnerability calculation program HVAssess, injury level and distribution diagram of organs was obtained when typical kill elements penetrate body. The result shows that human body vulnerability model with anatomical structural could be used to human body injury assessment under bullets and fragments penetrating. Assessment results could provide a basis for weapon effectiveness evaluation, human body protection design and survivability design.

**Key words:** vulnerability; human tissue model; injury; assessment

收稿日期:2015-11-12;修回日期:2015-11-30

基金项目:国家自然科学基金(11502119)

作者简介:张金洋(1990—),男,硕士,主要从事基础理论与应用研究。

目标易损性是指在战斗状态下,目标被发现并受到攻击而损伤的难易程度<sup>[1-2]</sup>。人体易损性,即人员目标易损性是指在战斗状态下,人员作为受攻击的对象,研究其受到破片、枪弹和冲击波等攻击时人体受损伤的难易程度。枪弹、破片伤是战争和反恐行动中人员面临的主要威胁,当人员目标被枪弹或破片击中时,如何评估人体损伤程度不仅是医生所关心的问题,也是武器研发人员所关心的问题。从70年代开始,国外就开始了对人体易损性方面的研究,美军弹道研究实验室 Charles A. Stanley 等建立了计算机人体模型及程序 Computer Man,展开了系统的人体易损性研究<sup>[3-4]</sup>。美国人员伤亡工作小组开发了 ORCA 软件,该软件也是以医学评估为基础,针对不同的战场任务和不同的毁伤元,选择不同的模块和算法进行人体损伤评估<sup>[5]</sup>。德国国防科技办公室组织开发了 VeMo-S,通过程序可计算出每一人体组织结构的损伤情况<sup>[3,6]</sup>。Eisler 等进行了小质量高速枪弹或破片下的骨骼损伤仿真研究<sup>[7]</sup>。William B 等利用射击线技术和门特卡罗方法模拟了枪弹破片杀伤下人体不同器官的损伤<sup>[8]</sup>。Benjamin J. Flanders 等在 Computer Man 模型数据基础上开发了 FragFly model 模型和程序<sup>[9]</sup>。国内对人体易损性的研究还处在起步阶段<sup>[2,10]</sup>,与国外存在较大差距。考虑人体结构的复杂性、非均质性,利用正常国人成年男性的横断面切片数据集 CVH,提出了建立具有解剖学结构的人体组织几何模型及其相应的损伤评估算法。对枪弹、破片侵彻下的人体损伤情况进行评估。

## 1 人体易损性模型建立

人体易损性模型由人体组织几何模型、典型瞬时空腔模型、损伤准则和评估算法构成。本文重点研究用于人体易损性研究的基于解剖学结构的人体组织几何模型建立和典型空腔模型建立。

### 1.1 基于解剖学结构的高分辨人体几何建模

CVH 数据集,即正常成年中国男性横断面切片,源于可视化中国人体切片数据集中的一例男性尸体。原始切片图像大小 3 072 pix × 2 048 pix,像素大小 0.176 mm。为获得以 2 mm 为单位的单元组织代码,在保持原图尺寸不变的条件下,采用最邻近插值法 nearest,将图像缩放为 2 709 pix × 1 806 pix,像素大小为 0.2 mm。

#### 1.1.1 人体组织代码的提取

应用数字图像处理技术对原始图像(图1(a))进行预处理(增加对比度、边缘检测和提取、图像分割等),完成组织器官的标识配色(图1(b))。

借助 Matlab 矩阵计算,利用 rgb2gray 函数将彩色图像转化为灰度图像,然后对图像每个 10 pix × 10 pix 的区域内像素进行计算,获取颜色值大于 50% 的像素值,从而获得人体组织代码表(图1c)。该代码表实为一大大小为 270 pix × 180 pix 的二维矩阵,矩阵中的元素即为构成人体组织器官的代码,空白处的元素为图像背景,不包含任何组织器官。表1为部分代码与组织对应关系。

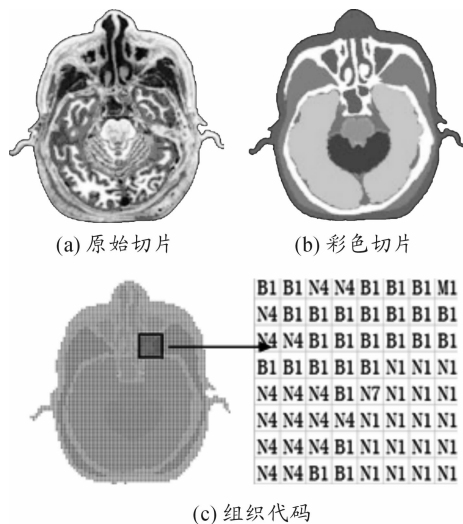


图1 典型人体头部切片处理过程

表1 组织代码与组织对应关系

组织名称	大脑	脑部空腔	脑脊液	脑颅	脑部肌肉
组织代码	N1	N4	N7	B1	M1

#### 1.1.2 人体模型建立

以下肢最后一张切片的左上角为坐标原点,切片宽度方向为 X 轴,切片高度方向为 Y 轴,身高方向为 Z 轴,按右手系建立坐标系。根据层间距和研究对象身高,选取了 877 张切片数据,利用 1.1.1 获得的组织代码表,建立了大小为 270 × 180 × 878 的三维矩阵,该矩阵即为本文所建立的基于解剖学结构的人体易损性模型的数据集,该矩阵中每个单元代表相应坐标下的人体组织,通过自编的可视化建模程序,可获得各组织部位三维可视化模型。图2为1.1.1中图片所建立的模型,通过逐层叠加原理,建立了人体组织几何模型(图3)。

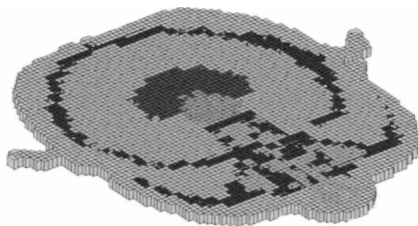


图2 头部切片对应模型

#### 1.2 典型空腔模型的建立

枪弹、破片等小质量高速投射物击中人体后,会在体内形成一个最大直径为投射物直径近十倍到几十倍的瞬时空腔<sup>[11-13]</sup>(图4(a))。瞬时空腔会使人体组织器官压缩、撕裂,从而对器官造成损伤。本文所建立的最大空腔模型数据来源于典型枪弹、破片侵彻 10% 质量分数弹道明胶实验(表2)。为建模简便,对空腔形态做适当简化,假定步枪弹的瞬时最大空腔近似为一个球体、手枪弹的瞬时最大空腔近似为一圆柱、破片的瞬时最大空腔近似为一圆锥。程序根据表2

中数据建立的典型投射物最大瞬时空腔模型(图4(b))。

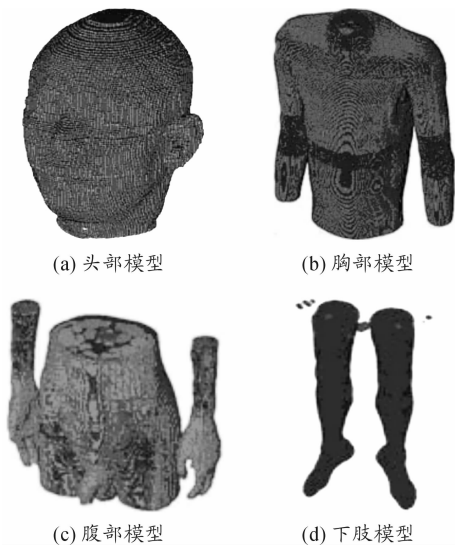


图3 人体易损性模型

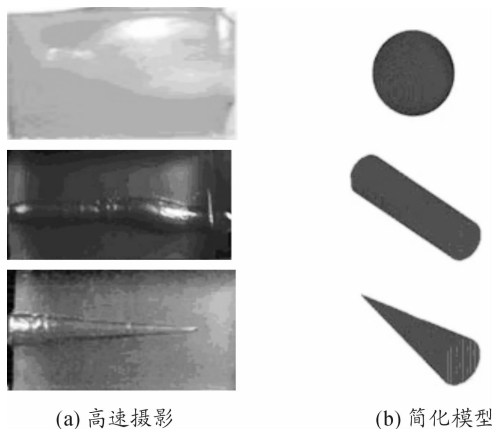


图4 典型投射物最大空腔模型

表2 典型空腔模型的弹道明胶实验参数

杀伤元	入靶速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	空腔最大 直径 $D/mm$	是否圆锥 穿透	圆锥 角	近似 形状
7.62 mm 步枪弹	625	185	是	/	球体
9 mm 手枪弹	360	81	是	/	圆柱体
4.8 mm 球形破片	939	76.2	是	8.5°	圆锥体

## 2 人体易损性评估算法

人体受枪弹、破片伤,其伤道一般包含多个人体器官组织,换句话说,每次命中人体,造成的损伤是多个器官组织。因此,提出了对每一个器官组织的损伤情况进行判定评估得到单个器官组织的损伤等级 SDI (Single Damage Index)<sup>[14]</sup>;采用平方根,用综合损伤指数 CDI (Comprehensive Damage Index) 来表征单次杀伤的综合损伤情况。另外,参考医学对多发伤的评价,采用当前使用较为广泛的新损伤严重程度评分来

表征损伤评估 NISS (New Injury Severity Score)。

(1) 单个器官受枪弹伤后损伤等级 SDI, 公式如下:

$$SDI(i) = D_{\min}(i) + F(i) \cdot (D_{\max}(i) - D_{\min}(i)) \quad (1)$$

其中:

$$F(i) = \begin{cases} \frac{\Delta V(i)}{\alpha \cdot V_i(i)} & \Delta V(i) \leq \alpha \cdot V_i(i) \\ 1 & \Delta V(i) \geq \alpha \cdot V_i(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $F(i)$  为体积系数;  $\Delta V(i)$  为第  $i$  组织的损伤体积;  $\alpha$  为第  $i$  组织的临界体积系数;  $V_i(i)$  为第  $i$  组织的总体积;  $D_{\min}(i)$  为第  $i$  组织的最小损伤等级,可由损伤数据表查得;  $D_{\max}(i)$  为第  $i$  组织的最大损伤等级,可由损伤数据表查得。

SDI 的范围为 1 ~ 6, 分别对应轻度伤、中度伤、较重伤、严重伤、危重伤和极重伤。

(2) 综合损伤指数 CDI (Comprehensive Damage Index)

$$CDI = \sqrt{\sum_{i=0}^n SDI(i)^2} \quad (3)$$

CDI 值越大,表示人体组织器官损伤越严重,反之,表示损伤越不严重。

(3) 新损伤严重程度评分 NISS (New Injury Severity Score)

$$NISS = SDI_{\max 1}^2 + SDI_{\max 2}^2 + SDI_{\max 3}^2 \quad (4)$$

NISS 分值的范围从 1 ~ 75。分值 75 可见于两种损伤情况:三个 AIS 分值都是 5, 或者一个 AIS 分值为 6。只要有一个 AIS 分值为 6, 不论其他的损伤情况如何,其 NISS 分值就自动确定为 75。当  $NISS < 16$  时,为轻伤;  $NISS \geq 16$  时,为重伤,  $NISS \geq 25$  时,为严重伤。该方法可迅速判定单次杀伤人体损伤情况,实用性较强。

## 3 算例

使用人体易损性评估程序 HVAssess [X], 以  $\varnothing 4.8$  mm 破片侵彻头部为例,程序运行界面如图 5, 计算并评估人体损伤情况。

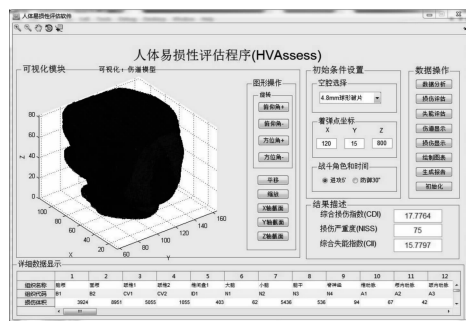


图5 人体易损性评估软件界面

### 3.1 初始条件设置

条件设置: 杀伤元为  $\varnothing 4.8$  mm 破片, 着弹点坐标为 (120, 15, 800), 入靶速度为 1 051 m/s, 战斗角色为: 进攻 5'。

### 3.2 评估结果

通过计算可知, 获得了头部损伤组织信息, 包括头部组织损伤种类、损伤数目、形状等, 输出伤道损伤单元可视化数

据(6),并依据易损性模型中的损伤准则和评估算法计算此次综合损伤指数 CDI、损失严重度 NISS(图7),得到了人体损伤情况的定量描述,各组织详细损伤体积分布如表3。

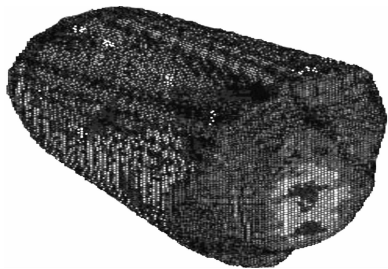


图6 直径4.8 mm球形破片侵彻头部伤道



图7 评估结果

表3 组织详细损伤体积分布

序号	1	2	3	4	5
组织名称	脑颅	面颅	颈椎1	颈椎2	椎间盘1
损伤体积	3 924	8 951	5 055	1 055	403
序号	6	7	8	9	10
组织名称	大脑	小脑	脑干	脊神经	椎动脉
损伤体积	62	5 436	536	94	67
序号	11	12	13	14	15
组织名称	颅内动脉	颈内动脉	颈外动脉	颈总动脉	颈静脉
损伤体积	42	150	75	121	605
序号	16	17	18	19	20
组织名称	窦道系统	咽喉	面部肌	颈部肌	头部皮肤软组织
损伤体积	664	2 227	56 277	26 232	10 644

### 3.3 结果分析

由评估结果可知,破片命中杀伤人体面颌部位,损伤了多达20种组织。其中,包括致命性的大脑、脑干、小脑和颅内动脉,并且损伤体积较大,从而导致总体损伤非常严重。CDI计算结果为17.7764,数值较大,也说明了损伤较为严重。NISS计算结果为75,主要是脑干、大脑、小脑的SDI都为6,直接判断为极重,计算结果与实际符合。

## 4 结论

本文利用CVH数据集,建立了基于解剖学结构的高分

辨率中国人人体组织几何模型、典型瞬时空腔模型;参考医学损伤评估,提出了基于解剖学的损伤评估算法SDI、CDI和NISS。依据人体损伤准则、评估算法进行枪弹、破片侵彻下人体各器官损伤分析。结果与实验数据具有可比性,与专家评估结果基本吻合。本文建立的基于解剖学结构的人体易损性模型可用于枪弹破片侵彻下人体易损性评估研究,评估结果可为武器杀伤效能评价,人体防护设计和生存力设计提供依据。同时,通过建立其他杀伤元(如冲击波)损伤等级与器官损伤之间的映射关系,该模型亦可作为其他杀伤元人体易损性研究。

## 参考文献:

- [1] BRUCE EDWARD REINARD. Target Vulnerability to Air Defense Weapons [R]. Naval Postgraduate School Monterey. California, 1984.
- [2] 李向东,杜忠华. 目标易损性[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [3] KNRUBUEHL B P. Wound Ballistics[M]. Springs, 2007.
- [4] CHARLES A. STANLEY, Michael Brown. A Computer Man Anatomical Model[R]. US Army Ballistic Research Laboratory, 1978.
- [5] OWEN P. LITT. Recommendations for a New and Improved ORCA Modeling System Blast Module[R]. US Army Ballistic Research Laboratory, 2004.
- [6] ANDRAS NELBJEBEL, Wolfgang Paul. Soldier Vulnerability Model[C]//27th International symposium on Ballistics, 2013.
- [7] EISLER, ROBERT D, CHARRERJEE. Simulates the Tissue Damage from Small Arms Projectiles and Fragments Penetrating the Musculoskeletal System [R]. U. S. Army Research Laboratory, 1998.
- [8] WILLIAM B, BEVERLY. A Human Ballistic Mortality Model[R]. US Army Research Laboratory, 1978.
- [9] BENJAMIN J. FLANDERS. Computer Model for Manipulation of a Multi-body System Using MATLAB[R]. US Army Research Laboratory. 2013.
- [10] 任常群,周树夏. 颌面部高速投射物伤研究进展[J]. 西北国防医学杂志, 2010, 31(1): 51-54.
- [11] 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.
- [12] 温焱珂,徐诚,陈爱军. 步枪弹侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 14-19.
- [13] 温焱珂,徐诚,陈爱军. 球形破片高速侵彻明胶靶标的数值模拟[J]. 弹道学报, 2012, 24(3): 24-30.
- [14] 美国机动车医学促进会. 简明损伤定级标准 2005[M]. 重庆市急救中心,译. 重庆:重庆出版社, 2005.
- [15] 沈黎文,魏薇萍,朱晓燕. 创伤评分对严重创伤患者伤情反应及急诊救治效果的影响[J]. 实用临床医药杂志, 2014, 18(9): 36-40. (责任编辑 杨梅梅)