

文章编号:1004-7220(2013)01-0036-08

# 基于汽车碰撞损伤的人体胸部有限元模型构建与验证

蔡志华<sup>1</sup>, 兰凤崇<sup>1</sup>, 陈吉清<sup>1</sup>, 刘卫国<sup>2</sup>, 雷旦<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 汽车工程广东省重点实验室, 广州 510641;

2. 浙江吉利汽车研究院有限公司, 杭州 311228)

**摘要:** **目的** 利用胸部有限元模型预测与评估碰撞载荷下胸部生物力学响应与损伤机理。**方法** 利用 CT 和 MRI 图像数据对胸部骨骼与内部软组织进行几何重建,并划分网格。模型的生物组织材料参数与材料本构模型基于文献尸体实验与组织材料实验。**结果** 对模型进行前碰撞与侧碰撞仿真实验验证,结果表明胸部接触力、胸部位移量、力与位移曲线与尸体实验吻合较好,并利用胸部位移量、黏性准则对仿真过程进行损伤评估。**结论** 模型可满足汽车碰撞安全中胸部损伤机理与防护及医学胸部钝器损伤的仿真研究需要。

**关键词:** 有限元分析; 碰撞损伤; CT 图像; 材料参数; 生物力学; 汽车碰撞

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Development and validation for finite element model of human thorax based on automotive impact injuries

CAI Zhi-hua<sup>1</sup>, LAN Feng-chong<sup>1</sup>, CHEN Ji-qing<sup>1</sup>, LIU Wei-guo<sup>2</sup>, LEI Dan<sup>1</sup> (1. *Guangdong Key Laboratory of Automotive Engineering, School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*; 2. *Geely Automotive Research Institute, Hangzhou 311228, China*)

**Abstract: Objective** To predict and evaluate the biomechanical responses and injury mechanisms of the chest under the impact loads based on the finite element model of human thorax. **Methods** CT and MRI images were used to construct the three-dimensional finite element model of skeleton and internal organs of the chest. The material properties of biological tissues in the model were based on data of cadaver test and material test in the literature. **Results** The model was validated against the cadaver responses for both frontal and side impacts. Good correlation was found for the force, displacement and force-displacement curve of the chest between the model and the cadaver responses. Displacement and viscosity index of the chest were also used to evaluate injuries during the simulation process. **Conclusions** The model can be used for studying chest injury mechanism and protection in car crash safety test, and could meet the need for chest blunt injury simulation study.

**Key words:** Finite element analysis; Crash injury; CT images; Material parameter; Biomechanics; Automotive impact

在交通事故中,胸腹部损伤的发生率高达45%,仅次于颅脑损伤<sup>[1]</sup>。根据简明创伤定级标准(abbreviated injury scale, AIS),胸部损伤在所有损伤中 AIS 1~2 级占12%,AIS 3~6 级占29%,是造

成死亡与伤残的主要原因之一<sup>[2]</sup>。肋骨骨折是最常见的胸部损伤类型,其次是肺部、心脏和肝脏损伤<sup>[3]</sup>。近年来,研究人员主要采用尸体实验与假人实验研究汽车碰撞过程中胸部生物力学响应、损伤

收稿日期:2012-02-23; 修回日期:2012-05-15

基金项目:中央基本科研业务费重点项目(2009zz0002),浙江省汽车安全重点实验开放式基金项目(2009E10013)。

通信作者:陈吉清,教授,博士研究生导师,E-mail:chjq@scut.edu.cn; 蔡志华,讲师,E-mail:caizhishua003@163.com。

机理与组织耐受极限;然而,尸体实验存在样本获取困难及伦理问题,假人碰撞实验具有较大的破坏性、实验成本较高、仿生可靠性较差,无法模拟胸部肋骨骨折、内脏损伤、大动脉破裂等。为此,利用精确的几何和非线性材料模型建立人体胸部有限元模型是解决上述问题的最有效手段之一,它可以模拟汽车碰撞过程的肋骨骨折以及内脏器官组织的损伤,可以更好研究汽车正面和侧面碰撞下的胸部损伤机理与耐受极限,为开发与优化相关防护装置、制定与完善相关胸部保护法规、提高乘员安全性提供有效依据与参考<sup>[4]</sup>。本文利用医学 CT 和 MRI 图像数据建立具有 50 百分位中国成年男性胸部解剖学结构的精确几何模型,并进行网格划分;利用 LS-DYNA 软件模拟胸部区域的生物组织力学行为;材料本构模型与生物组织材料参数基于文献尸体实验与组织材料实验,模拟各种实验条件、不同冲击载荷条件下人体胸部的生物力学响应,并进行前碰撞与侧碰撞实验验证。

## 1 材料与方法

### 1.1 胸部几何模型构建

通过对 1 个 30 岁、身高 170 cm、具有 50 百分位中国人体特征的男性胸部进行 CT 断层扫描与 MRI (核磁共振)扫描,获取 DICOM 数据,扫描层厚为 0.6 mm。CT 图像数据能准确区分骨骼与软组织,而 MRI 图像数据可以区分皮肤、内脏等软组织,结合两种形式的医学影像数据进行胸部几何模型的构建;利用医学建模软件 MIMICS 生成胸部骨骼点云图像(见图 1),并利用图像处理软件对 CT 点云图像进行去噪、滤波和数据平滑等处理;将点云图像按照选定

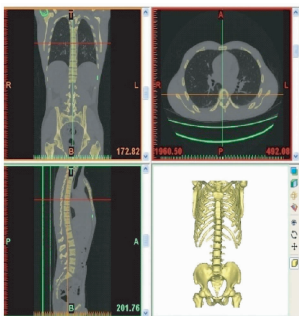


图 1 胸部点云图像

Fig. 1 Point cloud image of the chest

的精度,以最佳曲面方式在层间进行拟合,生成表面光滑的几何曲面模型<sup>[5]</sup>,以 IGES 格式存贮,其中胸腔肋骨与胸椎几何模型如图 2 所示。

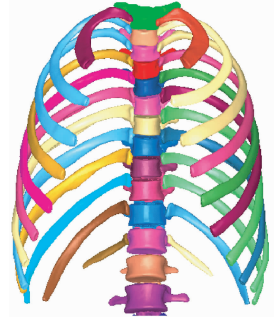


图 2 胸腔肋骨与胸椎几何模型

Fig. 2 Geometric model of the rib and spine

### 1.2 胸部有限元模型

将胸部骨骼与内脏几何模型导入 Hypermesh 10.0 软件系统中,生成实体并划分网格(见图 3)。

12 个胸椎与肋骨连接;皮肤采用壳单元模拟并定义 4 mm 厚度,皮肤的内表面为厚度 10 mm 的肌肉,用体单元模拟;胸部模型各组织之间的连接参考人体的解剖结构,胸骨与肋软骨、肋骨与肋软骨、椎间盘与椎骨、皮肤与肌肉、心脏与主动脉、肺与气管采用共节点联接,约束气管与主动脉的上沿使其能摇摆,肋骨与胸椎之间采用刚性连接,约束肋骨后端与胸椎相连接的节点  $x$ 、 $y$ 、 $z$  移动自由度与  $x$ 、 $z$  轴的转动自由度,保留  $y$  轴肋骨与椎骨之间旋转自由度。其他组织采用自由状态并与尸体实验约束相同,定义冲击器与皮肤外表面为面面接触,整个模型各组织自动单面接触。

整个胸部模型除皮肤采用壳单元外,其他各组织采用 8 节点 6 面体单元,胸部总质量 11.075 kg,由 79 个部件组成,包括 664 889 个节点、547 109 个 6 面体单元、886 个壳单元。该模型描述了胸部的主要解剖学结构,包括肋骨、胸骨、软肋骨、椎骨、皮肤、肌肉、肺、心脏等组织(见图 4)。

### 1.3 胸部材料本构模型与参数

胸部包括肋骨、胸骨、椎骨等硬骨组织与皮肤、肌肉、心脏、肺、大动脉等软组织,材料参数与本构模型根据尸体实验与组织材料实验,参考文献[6-9]实验数据,肋骨、胸骨与椎骨等硬骨组织采用可以模拟

骨折的外层密质骨与内层松质骨的弹塑性材料模型,材料参数如表1所示。皮肤、肋软骨、血管、支气管

管等采用线弹性材料,椎间盘、肌肉、心脏、肺等软组织采用黏弹性材料(见表2)<sup>[10-12]</sup>。

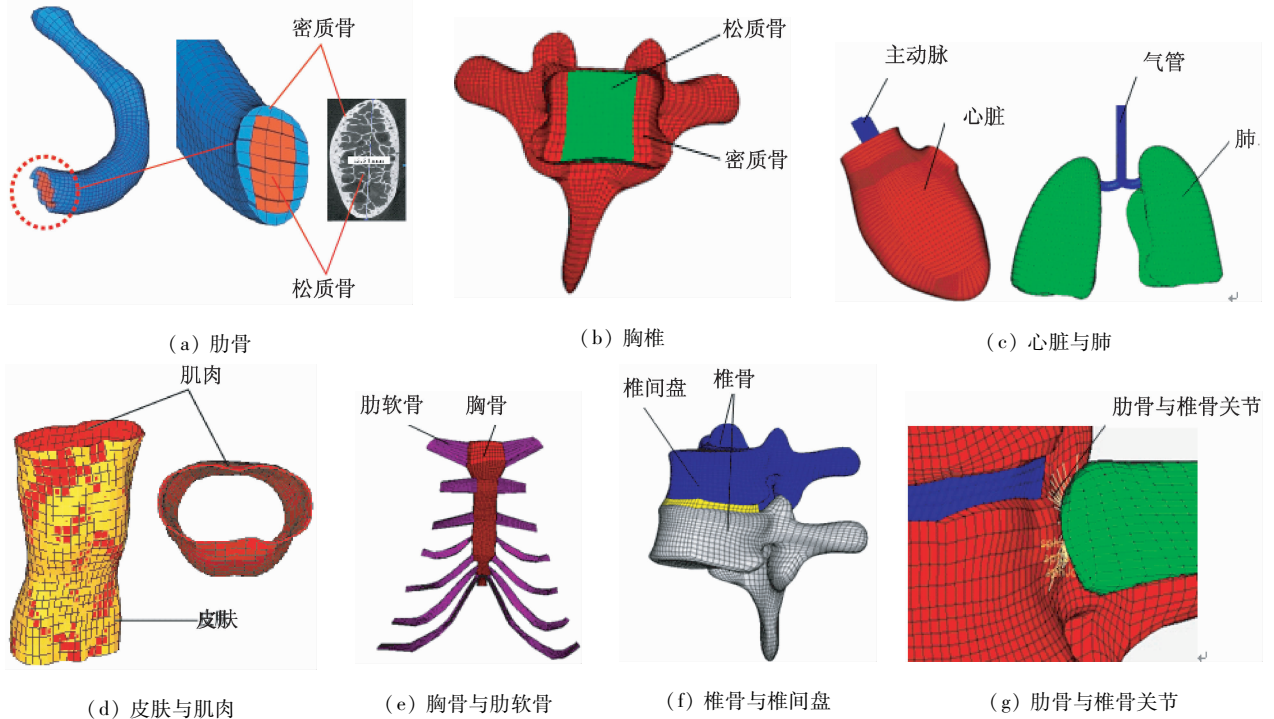


图3 胸部各组织有限元模型

**Fig. 3 Finite element model of organs in the chest** (a) Rib, (b) Spine, (c) Heart and lung, (d) Skin and muscle, (e) Sternum and costal cartilage, (f) Intervertebral disc and vertebral, (g) Rib and vertebrae joints

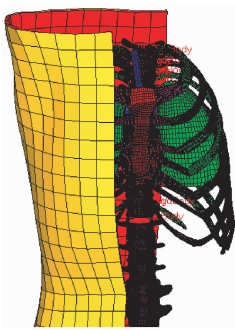


图4 胸部整体有限元模型

**Fig. 4 Finite element model of the chest**

## 1.4 胸部模型验证与边界条件加载

**1.4.1 胸部正面碰撞实验验证** 胸部有限元模型验证主要参考文献尸体撞击实验,通过对比实验与仿真的撞击力、胸部变形量、加速度、应力与应变等参数来评估模型有效性。对于低速、大质量的汽车碰撞问题,主要参考 Kroell等<sup>[13-14]</sup>利用质量

表1 肋骨与胸骨及椎骨弹塑性材料参数

**Tab. 1 Elastic-plastic material parameters of the rib, sternum and vertebrae**

	材料	
	密质骨	松质骨
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2	1
$E / \text{GPa}$	11.5	0.04
$\nu$	0.3	0.45
屈服极限/MPa	88	2.2
切线模量/GPa	1.15	0.001
硬化参数	0.1	0.1
Cowper-Sigmunds 模型	$C$	$C$
	$P$	$P$
塑性失效应变/%	2	3

23.59 kg、直径15.24 cm的圆柱形冲击器对尸体进行低速撞击实验。实验以6.7 m/s的初速度撞击尸

表2 胸部其他各组织线弹性/黏弹性材料参数

Tab.2 Material parameters of tissues in the chest

组织	材料类型	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$E/GPa$	$\nu$	短时剪切 模量/kPa	长时剪切 模量/kPa	弹性体积 模量/MPa
肋软骨	弹性	1 600	1.2	0.2	-	-	-
血管/支气管	弹性	1 000	0.5	0.45	-	-	-
皮肤	弹性	1 000	0.031 5	0.42	-	-	-
肌肉	黏弹性	1 100	-	-	140	40	1.33
心脏	黏弹性	1 000	-	-	20	75	0.22
肺	黏弹性	600	-	-	67	65	2.19
椎间盘	黏弹性	1 040	-	-	32	18	307

体胸骨中间处,尸体在碰撞过程中可以自由移动与转动。利用安装在撞击物上的测力传感器测得撞击力,用高速摄像机记录胸部变形量,正面碰撞仿真模拟与原实验边界条件一致,撞击器定义为刚体,加载条件以6.7 m/s初速度撞击尸体胸部的胸骨1/4处。仿真模拟时间为60 ms,胸部模型各组织处于自由状态,无约束。图5为胸部正面摆锤撞击仿真验证,图6为撞击器撞击胸部在0、15、30、45 ms时的仿真状态,图7为胸部受最大冲击力时肋骨与软组织的应力云图。

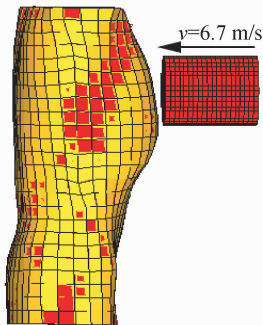


图5 胸部正面碰撞仿真验证

Fig.5 Thoracic frontal impact simulation

仿真输出冲击锤与胸部的接触力-时间曲线、胸骨位移量-时间曲线、胸骨力与位移曲线、胸部黏性指数(viscous criterion, VC)  $v_{VC}$ ,输出节点为冲击器中心和胸骨中心处。仿真与实验的对比结果如图8所示。

1.4.2 胸部侧面碰撞验证 前期研究人员开展了尸体在不同条件下的侧面碰撞实验研究<sup>[15-17]</sup>。Chung等<sup>[15]</sup>开展的尸体侧面碰实验可用于胸部侧

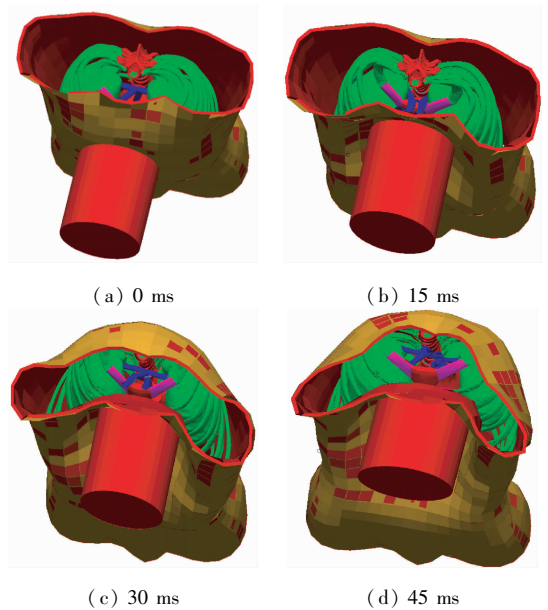


图6 胸部前碰撞仿真

Fig.6 Thoracic frontal impact simulation at different time

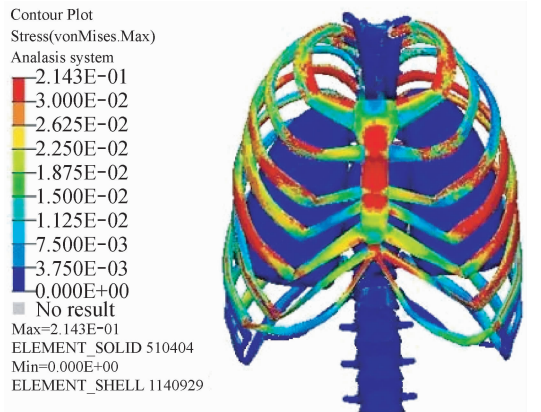
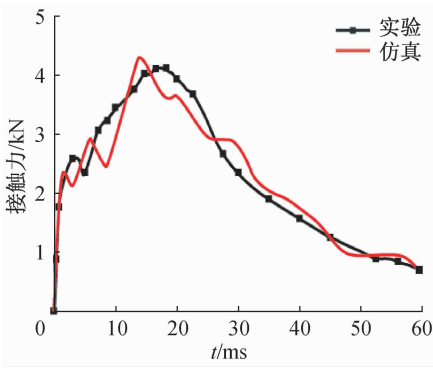
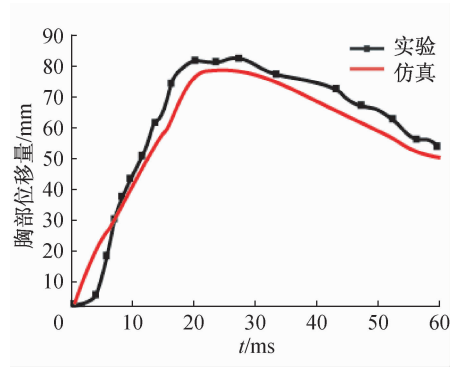


图7 正面碰撞肋骨与软组织应力云图

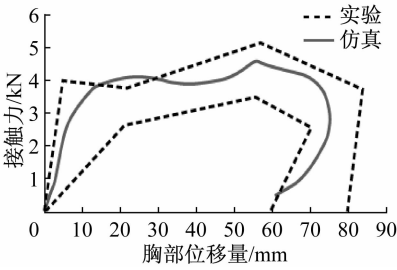
Fig.7 Stress contours of the ribs and soft tissues for frontal impact



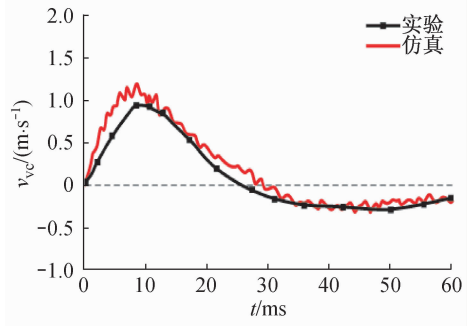
(a) 胸骨接触力-时间曲线



(b) 胸骨位移量-时间曲线



(c) 胸部接触力-位移曲线



(d) 胸部黏性指数

图8 前碰撞仿真与实验对比

Fig.8 Comparison between the simulation and test for frontal impact (a) Force-time history, (b) Displacement-time history, (c) Force-displacement history, (d) Viscous criterion

面碰模型验证,该实验模拟两车相碰的情形,使用直径为 15.24 cm 的木质圆柱形撞击器,撞击器质量 50 kg,以速度为  $(5.6 \pm 0.3)$  m/s 撞击胸部,撞击中心点位于胸部第 6 根肋骨处,实验输出撞击器与胸部接触力、胸骨压缩量,仿真模拟与实验一致的约束与边界条件,撞击器定义为刚体,加载以速度 5.6 m/s 撞击右侧第 6 根肋骨处。图 9 为侧面碰撞仿真验证,仿真模拟时间为 60 ms;图 10 为撞击器撞

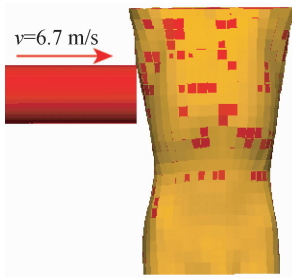


图9 胸部侧面碰撞仿真验证  
Fig.9 Thoracic side impact simulation

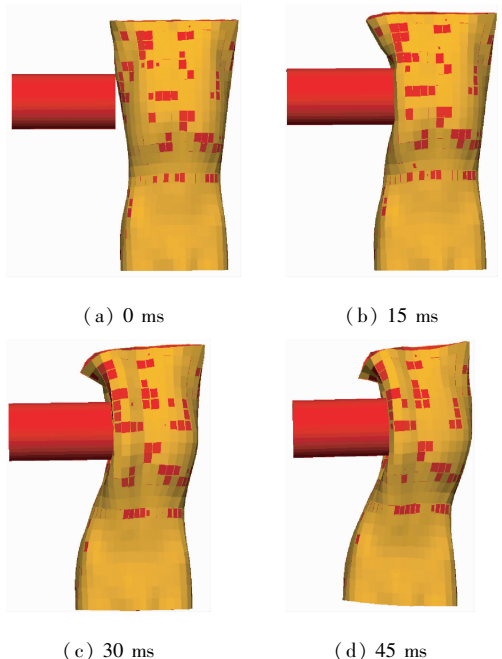


图10 胸部侧面碰撞仿真  
Fig.10 Thoracic side impact simulation at different time

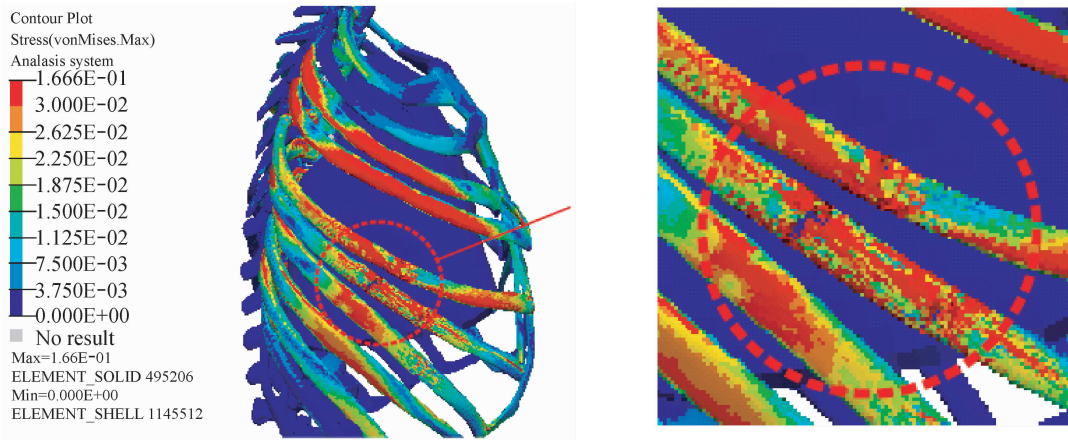


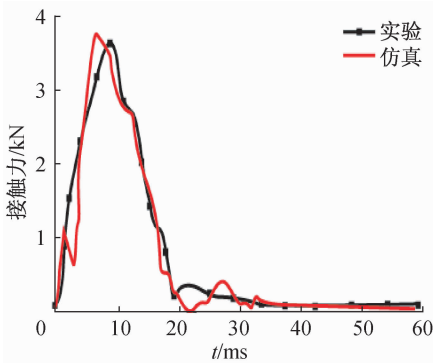
图 11 胸部侧碰撞仿真应力云图

Fig.11 Stress contours of the chest for side impact

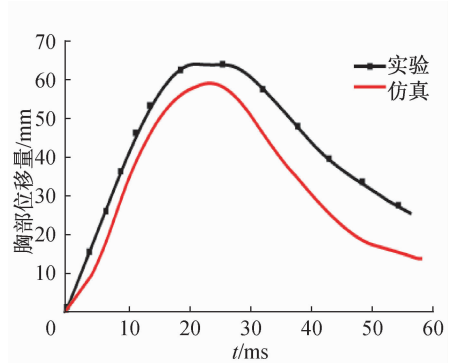
击胸部的仿真状态;图 11 为胸部受最大冲击力时的应力云图。

仿真输出冲击器与胸部的接触力-时间曲线、位

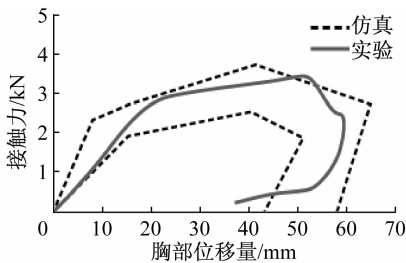
移量-时间曲线、力-位移曲线、 $v_{VC}$ 等,输出节点为冲击器中心、第 6 肋骨中心处,仿真与实验的对比结果如图 12 所示。



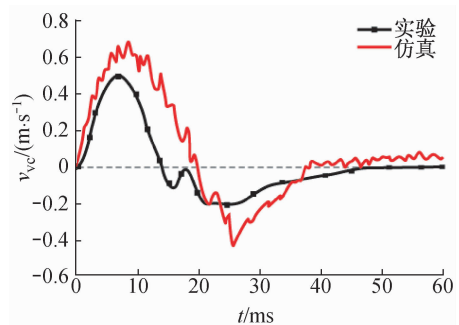
(a) 胸部接触力-时间曲线



(b) 胸部位移量-时间曲线



(c) 胸部接触力-位移曲线



(d) 胸部黏性指数

图 12 侧面碰撞实验与仿真对比

Fig.12 Comparison between the simulation and test for side impact (a) Force-time history, (b) Displacement-time history, (c) Force-displacement history, (d) Viscous criterion

## 2 结果

### 2.1 模型有效性分析

比较上述仿真与实验曲线可知:胸部接触力在碰撞 15 ~ 20 ms 时出现峰值,实验峰值为 4.1 kN,仿真峰值 4.25 kN,峰值偏差小于 5% (见图 8(a));仿真冲击器与胸骨接触力-时间曲线与实验趋势一致,在 20 ~ 25 ms 出现峰值位移量,实验位移峰值 82 mm,仿真位移峰值 79 mm,峰值差值小于 5%,实验与仿真变化趋势一致 (见图 8(b));仿真冲击力-位移量曲线在实验上下限值之间 (见图 8(c))。正面碰撞过程中第 2、3 根肋骨出现了骨折现象 (见图 7),与尸体实验描述一致,表明本模型对正面碰撞具有较好的有效性。

胸部在侧面碰撞过程中接触力在碰撞 8 ~ 12 ms 时出现峰值,实验峰值为 3.6 kN,仿真峰值 3.76 kN,峰值偏差小于 5% (见图 12(a));实验与仿真的胸骨位移量变化趋势一致,在 20 ~ 25 ms 出现峰值位移,位移峰值 64 mm,仿真位移峰值 58 mm,峰值偏差小于 8% (见图 12(b));仿真力-位移量曲线在实验上下限值之间 (见图 12(c))。侧面碰撞过程中第 6 根肋骨出现了骨折现象,断裂明显 (见图 11),与实验描述一致,表明本模型对侧面碰撞具有较好的有效性。

### 2.2 损伤分析

胸部损伤机理主要有两类:① 胸部冲击压缩力产生的硬骨组织创伤;② 惯性载荷对胸腔内的软组织造成黏性组织的损伤。冲击压缩力可导致肋骨骨折、胸骨骨折、血胸和气胸。惯性载荷可引起肺挫伤和心血管破坏。在冲击载荷条件下,胸部创伤经常是多种损伤机理联合作用的结果。胸部位移量与黏性指数作为胸部钝器冲击伤的评估标准, $v_{vc}$ 由瞬间产生的肋骨压缩量和肋骨变形速率计算求得,是一个时间函数,是胸腔变形的瞬时速度  $v$  和胸腔压缩变形率  $C$  的乘积。研究表明,胸部的最大压缩变形量是肋骨骨折的决定因素,当肋骨位移量超过 76 mm 时,肋骨可能发生骨折;而当变形小于 58 mm 时,则基本不发生骨折。当  $v_{vc} \geq 1$  m/s 时,将造成内脏损伤,AIS 3 级以上损伤的发生机率是 50%。结合图 7 ~ 12,正面碰撞过程中位移量大于 76 mm,胸部第 2、3 根肋骨出现骨折,无断裂,胸部

$v_{vc}$  峰值为 1.2 m/s,大于 1 m/s 将使内脏造成 AIS 3 级以上损伤的机率是 50%。在侧面碰撞过程中胸部位移量为 58 mm,小于 76 mm,胸部  $v_{vc}$  峰值为 0.72 m/s,肋骨出现骨折,并且第 6 根肋骨断裂,表明正面碰撞对内脏损伤风险较高,侧面碰撞肋骨位移量较小但骨折风险较高。

## 3 结论与讨论

本研究建立了具有人体解剖学结构的 50 百分位成年男性胸部有限元模型,材料模型能比较准确地模拟胸部肋骨骨折及软组织的损伤特性。模型验证参考尸体实验数据,并进行前碰撞和侧面碰撞的仿真验证,碰撞中接触力、胸骨位移量、力-位移响应与实验吻合较好,模型具有一定的有效性与生物逼真度。通过对模型实验过程进行损伤分析表明,正面碰撞  $v_{vc}$  大于 1 m/s,对胸部内脏的损伤较大,正面碰撞胸骨位移量大于侧面碰撞位移量,但侧面骨折比正面骨折严重;因此,利用胸部位移量作为汽车碰撞过程中胸部损伤指标的准确性有待进一步研究。

本模型可用于汽车碰撞安全中胸部的损伤机理、胸部肋骨骨折与软组织的耐受极限的研究,能为汽车被动安全装置设计提供参考,同时也可用于医学胸部损伤的仿真研究。

本研究也存在一定的局限性。碰撞过程中冲击速度、皮肤与肌肉的材料参数、冲击器与皮肤的接触算法等对胸部接触力的大小有一定影响。因此,本模型通过适当调整相关参数,获得与实验吻合的接触力。由于文献所采用的材料参数存在较大的差异,参数的合理范围还有待进一步研究,后续将开展一定的组织材料实验来准确定义材料的本构关系与相关参数属性,提高生物力学模型的有效性。同时,由于尸体实验的开展条件不足,模型参考西方人体的尸体实验进行验证与分析,仿真与实验通过对比存在一定的差异,主要体现在实验与仿真条件不能确保完全一致,冲击器的材料参数在实验中没有明确说明,只能通过质量与接触力进行参数反求,在后续的研究中应开展具有中国人体特征的尸体碰撞实验,并结合有限元模型研究中国人体生物力学响应与损伤机理、以及组织的耐受极限,通过完善相关交通安全法规、改善汽车安全性,减少死伤率。

## 参考文献:

- [1] Ruan J, El-Jawahri R, Chai L, et al. Prediction and analysis of human thoracic impact responses and injuries in cadaver impacts using a full human body finite element model [J]. *Stapp Car Crash J*, 2003, 47: 299-321.
- [2] Zhou Q, Rouhana S, Melvin J. Age effect on thoracic injury tolerance [C]// *Proceedings of 40th Stapp Car Crash Conference*. Albuquerque, USA: [s. n.], 1996: 13-30.
- [3] 刘利, 陈海斌, 乐中耀, 等. 侧碰假人颈部标定系统的实验研究[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(2): 173-180.  
Liu L, Chen HB, Yue ZY, et al. Experimental study on calibration system of side-impact dummy neck [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(2): 173-180.
- [4] Lee L, Huber LC, Mao HJ. Review of thoracic injury criteria [J]. *BME*, 2006, 11: 30-36.
- [5] 王野平, 林小英, 周慧峰. Mimics 和 Geomagic 辅助下建立自定义齿的有限元模型[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 433-438.  
Wang YP, Lin XY, Zhou HF. Finite element model of fixed denture aided by Mimics & Geomagic [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 433-438.
- [6] Charpail E, Trosseille X, Petit P. Characterization of PMHS ribs: A new test methodology [J]. *Stapp Car Crash J*, 2005, 49: 183-198.
- [7] Choi HY, Lee IH. Advanced finite element modeling of the human body for occupant safety simulation [J]. *Europam*, 1990, 12: 30-45.
- [8] Kimpara H, Lee JB, Yang KH, et al. Development of a three-dimensional finite element chest model for the 5th percentile female [J]. *Stapp Car Crash J*, 2005, 49: 251-269.
- [9] Kimpara H, Iwamoto M, Watanabe I, et al. Effect of assumed stiffness and mass density on the impact responses of the human chest using a three-dimensional FE model of the human body [J]. *J Biomed Eng*, 2006, 128(5): 772-776.
- [10] Deng Y, Kong W, Ho H. Development of a finite element human thorax model for impact injury studies [C]// *Proceedings 43rd Stapp Car Crash Conference*. San Diego, USA: [s. n.], 1999.
- [11] Roberts JC, Merkle AC, Biermann EE, et al. Computational and experimental models of the human torso for non-penetrating ballistic impact [J]. *J Biomech*, 2007, 40(1): 125-136.
- [12] Shen W, Niu Y, Mattrey RF, et al. Development and validation of subject-specific finite element models for blunt trauma study [J]. *J Biomech Eng*, 2008, 130(2): 1-13.
- [13] Kroell CK, Schneider DC, Nahum AM. Impact tolerance and response of the human thorax [C]// *Proceedings of 15th Stapp Car Crash Conference Warrendale, USA*: [s. n.], 1971.
- [14] Kroell CK, Schneider DC, Nahum AM. Impact tolerance and response of the human thorax II [C]// *Proceedings of 18th Stapp Car Crash Conference Ann Arbor, USA*: [s. n.], 1974: 383-457.
- [15] Chung J, Cavanaugh JM, King AI, et al. Thoracic injury mechanisms and biomechanical responses in lateral velocity pulse impacts [C]// *Proceedings of 43rd Stapp Car Crash Conference San Diego, USA*: [s. n.], 1999.
- [16] Neathery R. Analysis of chest impact response data and scaled performance recommendations [C]// *Proceedings of 18th Stapp Car Crash Conference Ann Arbor, USA*: [s. n.], 1974.
- [17] Development of a human thorax model: Human cadaver thorax impact response, Wayne State University Annual Report [R]. GM/DOT Settlement Research Docket GMRSRCH, 1998.

## · 消息 ·

# 《医用生物力学》在《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》 基础医学类期刊中核心影响因子列第1位

2012年12月7日,中国科学技术信息研究所在北京发布了2012年版《中国科技期刊引证报告》。《中国科技期刊引证报告(核心版)》是中国科技信息研究所期刊学术影响力的指标(总被引频次、影响因子、他引率等)为依据,结合专家评审,每年评选一次的专门用于期刊引用分析研究的重要检索评价工具。根据《2012年版中国科技期刊引证报告(核心版)》的统计:《医用生物力学》2012年的核心总被引频次388(在基础医学类47种期刊中列第30位),核心影响因子0.689(在基础医学类47种期刊中列第1位),核心他引率0.61,基金论文比0.80,平均引文数18.14,综合评价总分45.3(在基础医学类47种期刊中列第8位),各项指标较2011年都有了大幅提高。

在此,衷心感谢一直关心、支持《医用生物力学》的各级领导,以及陪伴杂志一路成长的编委会专家、读者、作者!