文章编号:1000-5404(2009)06-0535-03

论著

人体胸部有限元模型研究

张治纲,李曙光,范立冬,肖 南 (第三军医大学大坪医院野战外科研究所第九研究室,创伤、烧伤与复合伤国家重点实验室,重庆 400042)

摘 要:目的 建立人体胸部的三维有限元模型,以用于单兵防护工程研究。**方法** 以CT的扫描数据为重建源图像,利用医学图像重建软件Mimics进行三维重建;在有限元前处理软件ANSYS ICEM CFD中进行单元网格划分,并为模型各部分指定相应的材料特性参数;在有限元软件ANSYS LS-DYNA中完成有限元模型建模,并参照既往尸体实验数据检验模型有效性。**结果** 建立了近似人体胸部解剖结构的有限元模型,模型的模拟计算结果和既往尸体实验结果基本相符。**结论** 利用人体断层数据和专业软件,能够完成有限元模型的重建,模型能够满足单兵防护工程研究中进行人体胸部冲击相关数值分析的需要。

关键词: 人体胸部;有限元模型;有效性检验
中图法分类号: R318;R655;R82 **文献标识码:** A

Establishment of finite element model for human thorax

ZHANG Zhi-gang, LI Shu-guang, FAN Li-dong, XIAO Nan (State Key Laboratory of Trauma, Burns and Combined Injury, Department 9, Institute of Surgery Research, Daping Hospital, Third Military Medial University, Chongqing 400042, China)

Abstract: Objective To build a finite element model (FEM) of human thorax for individual protection research. Methods Materialise Mimics medical imaging software was used to rebuild 3D model of human thorax based on CT images. The model was meshed and the material properties of various parts of the model was defined in ANSYS ICEM CFD. The FEM was completed and validated by ANSYS LS-DYNA. Results The human thorax FEM with approximately topology was developed. The simulative result was consistent with the result of existing cadaveric experiment. Conclusion The FEM is rebuilt with human tomography images in professional software and meets the requirement of numerical analysis that simulating the impact on human thorax in personal protection research.

Key words: thorax; finite element analysis; validation

枪弹伤是战场中士兵所面临的主要威胁,各种爆炸物在爆炸后产生的高速冲击波到达人体时会产生猛烈的加速度,对人体,特别是空腔脏器产生伤害。防弹衣的使用可有效地减少枪弹造成的贯穿性损伤,但装甲后钝伤(behind armour blunt trauma,BABT)却仍有发生[1],且目前装备的防弹衣对冲击波的致伤作用也缺乏防护。利用有限元模型能够对BABT的发生机制、胸腔对冲击波作用的力学响应和组织损伤的关系进行研究,可为防弹衣/防护服的设计研究提供帮助。

作者简介: 张治纲,男,河南省潢川县人,研究实习员,主要从事单兵防护工程方面的研究。电话:(023)68757490, E-mail: fmmu_zhangzg@sohu.com
通信作者: 李曙光,E-mail: lisg@tmmu.edu.cn
收稿日期: 2008-07-15;**修回日期:** 2008-10-22

1 材料与方法

1.1 模型的数据来源及结构

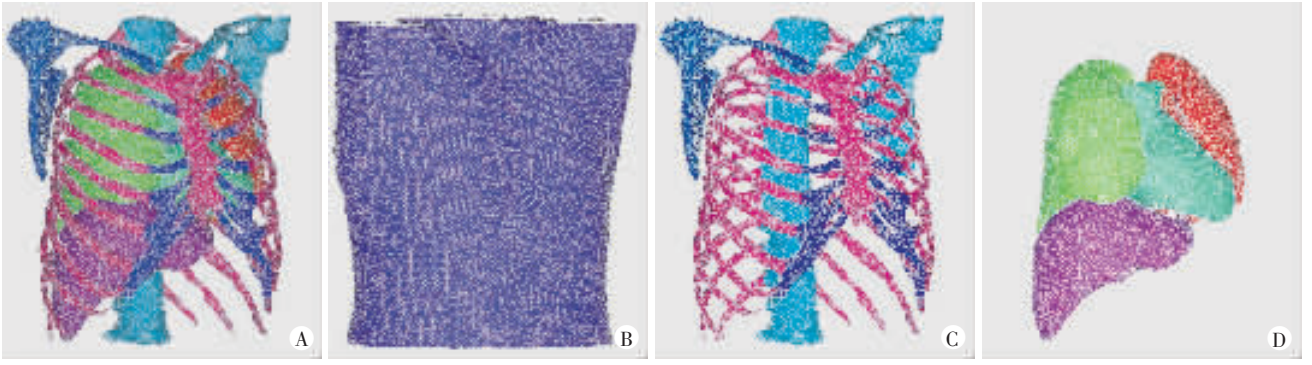
利用CT扫描影像并参照第三军医大学"中国可视化人体"断层照片[2],建立人体胸部的三维有限元模型,模型主要包括3部分:内脏,包括心脏、肺和肝脏;肌肉组织;内脏和肌肉中间的肋骨、肋软骨、胸骨等骨性组织。

1.2 建模图像的选用和处理

为获得比较高精度的三维模型及有限元模型,同时选择"中国可视化人体"项目的一套男性彩色断层数据集和一套健康成年男性国人躯干部的CT扫描数据,其中彩色断层数据分辨率为3 072×2 048×24 bit,层厚为1.0 mm。CT(GE公司,64排CT)扫描数据为DICOM格式,为分辨率512×512×8 bit的灰度图像。扫描层厚0.6 mm。

1.3 人体胸部三维模型的重建

由MIMICS软件(Materialise公司,比利时)完成。将CT扫描数据输入MIMICS,通过调整灰度限值,结合布尔运算(加、减、



A:MIMICS 重建表面模型;B:肌肉组织有限元模型;C:骨骼有限元模型;D:内脏有限元模型

图1 三维表面模型及有限元模型

相交)和形态学(膨胀、腐蚀)运算,为不同组织和器官的区域分别创建 mask。对于灰度范围比较接近的区域,如心脏和肝脏无法通过上述运算进行分割,为了得到尽量准确的器官边界,采用了先调整灰度获得大致的范围,再参照可视化人断层照片进行人工分割的方法完成。对每个单独的 mask 进行计算,得到由大量三角形面片组成的各部分的三维表面模型(图 1A)。为便于后续的有限元模型建模,将三维表面模型导出为 STL 文件。

1.4 有限元模型的构建及材料参数

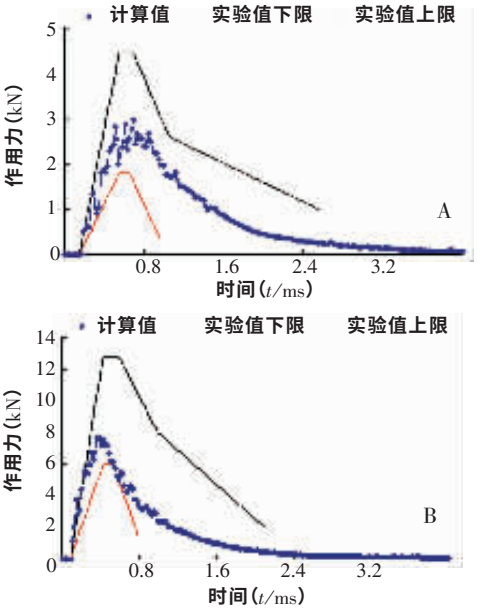
将 STL 文件导入 ANSYS ICEM CFD 软件,选择四面体单元完成体网格划分,并采用 1 个四面体分割为 4 个六面体的算法将四面体单元网格转换为六面体单元网格。不同组织和器官表面之间采用共节点的方式连接。将划分后的网格导出为 ANSYS lis 文件。最终的有限元模型由 ANSYS LS-DYNA 程序完成(图 1)。模型由体单元 solid 164 组成,把胸骨、肋骨等骨性组织定义为线弹性物质,内脏和肌肉组织定义为粘弹性物质,参考文献[3]方法确定各组织与器官材料特性参数。

1.5 有限元模型的有效性检验

为确定所选材料参数的可信性,需对有限元模型进行有效性验证。选择了 Bir 等[4]的尸体实验数据进行比较,实验共使用了 13 例标本,其中男性 7 例,女性 6 例。使用质量为 140 g、直径为 37 mm、不可压缩的 PVC 棒对尸体胸骨进行冲击,用安装在 PVC 棒上的传感器记录加速度并计算出作用力,用高速摄像以 6 000 ~9 000 帧/s 记录胸壁的变形。在 ANSYS LS-DYNA 中模拟 PVC 棒对尸体的冲击作用,PVC 棒使用线弹性材料模拟,冲击速度分别为 20、40 米/秒。模拟计算得出的力-时间曲线和胸部变形-时间曲线,与实验数据进行对照。

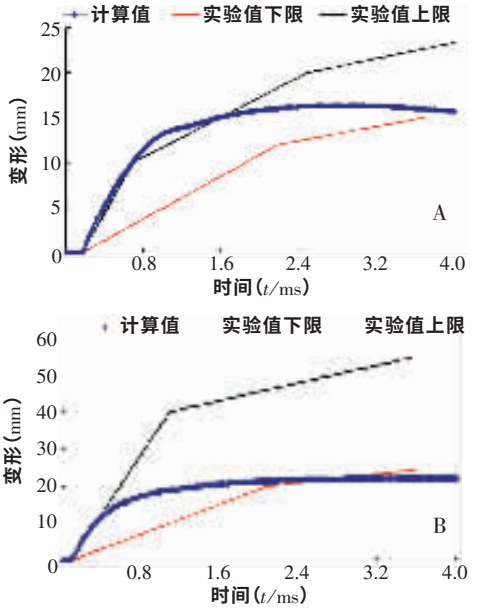
2 结果

模拟计算的结果与尸体试验的结果的趋势一致,曲线具有一定的相似性。其中力-时间曲线的计算值和试验值吻合较好(图 2)。变形-时间曲线的计算值与实验值比较,增加的速度较快,到达峰值的时间也较短(图 3),表明相对于尸体实验的标本而言,有限元模型的粘弹性材料特性参数弹性更大而粘性较小。考虑到尽管 Bir 等[4]的实验使用的是未经防腐处理的尸体,与活组织相比其力学特性仍会有一定改变。结合上述因素对实验结果的影响分析,本研究所选择的有限元模型的材料特性参数在模拟该冲击条件时是可靠的。



A: 冲击速度为 20 m/s; B: 冲击速度为 40 m/s

图2 模拟计算的力-时间曲线与实验值



A: 冲击速度为 20 m/s; B: 冲击速度为 40 m/s

图3 模拟计算的变形-时间曲线与实验值

3　讨论

3.1　既往胸部有限元模型

有限元模型是将整个物体结构划分成由有限个单元相互连接而成的几何实体,每个单元的力学特性的合成为整个结构的力学特性[5]。利用有限元模型可以研究人体胸部在高速钝性冲击下的响应,评估防弹衣/防护服的防护效果,分析 BABT 的致伤机制及预测 BABT 的伤情。

第一个胸部有限元模型由 Roberts 和 Chen 在 1970 年制作完成,忽略了软组织特性而使用了线弹性属性,仅在胸骨上施加了静态载荷。Sundaram 和 Feng (1977)建立了两种不同的胸部有限元模型,使用了对称技术以节约计算时间。一个模型包括脊柱、1 ~ 10 肋骨、胸骨等骨性组织,另一个模型则包括肌肉和内脏,所有的材料均假定为线弹性。Plank 和 Eppinger 等 1991 年建立的胸部有限元模型具有更真实的胸部解剖结构,包括肋骨、胸骨、脊柱、肌肉和一些软骨均分别建模,但内部脏器没有独立建模。除内部单元使用粘弹性材料,其它均用线弹性材料模拟。Wang 等建立的有限元模型包括完整的肌肉结构和内部脏器,Jolly (2000)等建立的有限元模型包括骨骼和肌肉组织,二者均为骨组织赋予线弹性属性,为肌肉组织和内脏器官赋予粘弹性属性[3]。

3.2　三维模型重建

为了获得具有近似人体解剖结构的胸部三维有限元模型,本研究采用了断层图像立体重建的方式建模,所选的断层图像数据集包括可视化人体彩色断层数据和 CT 扫描影像。由于常用的图像分割软件对彩色图像的支持均不甚理想,而 CT 图像在低密度空腔脏器和高密度骨组织区域对比明显,应用于骨组织有限元模型建模更具优势[6],因此本研究中主要使用了 CT 影像进行三维重建。同时由于心脏、肝脏和肋间肌肉组织在 CT 图像上灰度范围比较接近,仅使用 CT 图像不易分割精确,研究中利用彩色断层图像精度高、边界清晰的优点,采用参照彩色断层图像手工分割的方法较好地解决了上述问题。模型的重建工作主要由 MIMICS 软件完成,作为一款专业的医学图像处理软件,MIMICS 在原始图像输入、建模的便捷性以及与有限元分析软件之间的接口方面功能强大,大大提高了本文中模型的建模效率。

3.3　有限元模型建模及有效性检验

尽管全部生物组织都是粘弹性的,但其中一些组织如骨组织,由于其硬度很高,应变范围又比较小(约 1%),在应变的有限范围内可以看作线弹性材料而应用虎克定律[7],因此本研究把胸骨、肋骨等骨性组织定义为线弹性,而内脏和肌肉组织仍定义为粘弹性。在确定生物组织材料特性参数时,充分考虑了高压缩应变率和大变形条件下生物软组织的率相关特性。由于所建的模型形状极不规则,难以划分规则的六面体网格,本研究采用了先使用四面体单元划分,再分割转换为六面体单元的方法。经过我们的模拟计算,将 1 个四面体单元拆分为 4 个六面体单元后,其响应与规则六面体相比虽仍有少量差距(< 10%),但相对四面体有很大改善。

为检验模型在高速钝性冲击下的有效性,本研究使用相关文献中获得的既往尸体实验数据对模型进行了验证。对于人体胸部有限元模型而言,常用的正碰尸体试验是由 Kroell 等于 1971、1974 年完成以及 Bir 等[4]于 2004 年完成的。其中前者主要模拟的是质量相对较大、速度相对较低的汽车碰撞问题。Bir 等[4]的尸体实验模拟的是质量相对较小、速度较高的非穿透性弹道冲击。相对于本研究目的,选择后者的实验数据更为合适。

3.4　有限元模型研究展望

本研究所建的有限元模型为单兵防护工程研究中进行模拟分析和计算提供了一种手段,但目前的有限元模型还比较简单。在下一步研究中,首先需要建立更接近真实人体结构的模型,特别是肌肉、内脏器官等软组织结构。其次,需要完善组织、器官的材料特性参数的设置,使模型更符合真实人体的属性,如考虑材料的各向异性特性、使用带失效模式的材料、按照一定的函数关系为不同的冲击条件定义系列对应的材料特性参数等。

参考文献:

[1] Grimal Q, Gama B A, Naili S, *et al*. Finite element study of high-speed blunt impact on thorax: linear elastic considerations[J]. Int J Impact Eng, 2004, 30(6): 665 - 683.

[2] 张绍祥, 王平安, 刘正津. 中国数字化可视人体图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[3] 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, 2007, 40(1): 125 - 136.

[4] Bir C, Viano D, King A. Development of biomechanical response corridors of the thorax to blunt ballistic impacts[J]. J Biomech, 2004, 37(1): 73 - 79.

[5] 张　良. 人体胸部三维有限元模型研究进展[J]. 野战外科通讯, 2007, 32(5): 7 - 9.

[6] 万　磊, 李义凯, 原　林, 等. 基于中国数字人 CT 数据重建膝关节有限元模型[J]. 中国骨与关节损伤杂志, 2006, 21(4): 271 - 273.

[7] 冯元桢. 生物力学-活组织的力学特性[M]. 戴克刚, 鞠烽炽, 译. 长沙: 湖南科技出版社, 1986: 435 - 437.

(编辑　邓强庭)