论著

文章编号:1000-5404(2010)08-0770-03

人下颌骨枪弹伤的三维有限元建模与数值分析

鄢兰元[1],陈渝斌[2],张 纲[1],缪莹赟[3],谭颖徽[1] (400037 重庆,第三军医大学新桥医院口腔科[1];400042 重庆,第三军医大学大坪医院野战外科研究所口腔科[2];400044 重庆,重庆大学传动实验室[3])

[摘要] 目的 利用计算机辅助工程技术,动态仿真不同入射角度子弹侵彻三维下颌骨模型过程。**方法** 对正常志愿者颌面部进行薄层CT扫描,将获得的下颌骨数据以DICOM标准通过Mimics软件进行三维实体重建,在LS-DYNA软件中模拟7.62 mm弹丸以不同入射速度(713.8、1 400 m/s)和不同入射角度(90°、67.5°、45°)致伤下颌骨模型过程。**结果** 建立了形态细致逼真、相似性好的人下颌骨三维有限元模型,成功模拟了人下颌骨弹丸的致伤过程,当7.62 mm弹丸入射角度一致时,入射速度越大,撞击能量越大;当入射速度一致,入射角度为45°组的致伤能量明显高于90°及67.5°组。下颌骨枪弹伤模型出口面积大于入口面积。**结论** 薄层CT、DICOM标准的应用使得有下颌骨限元模型的建立更为精确,利用有限元仿真技术动态模拟人下颌骨弹丸致伤的方法是可行的。

[关键词] 枪弹伤;有限元;仿真模拟;下颌骨;DICOM

[中图法分类号] R318;R782.4;R826.62 **[文献标志码]** A

Three-dimensional finite element modeling and numerical analysis on gunshot wound of human mandible

Yan Lanyuan[1], Cheng Yubin[2], Zhang Gang[1], Miao Yingyun[3], Tan Yinghui[1] ([1]Department of Stomatology, Xinqiao Hospital, Third Military Medical University, Chongqing, 400037; [2]Department of Stomatology, Institute of Surgery Research, Daping Hospital, Chongqing, 400042; [3]Laboratory of Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

[Abstract] Objective To simulate the dynamic procedure of bullet damage to the three-dimensional (3D) finite element (FE) model of mandible from different angle with computer-aided engineering. Methods A mandible was scanned by thin-layer CT, and then CT images were analyzed and managed with Dicom standard and Mimics software. At the same time, a simulation of the 3D FE model penetrated by a 7.62-mm bullet was carried out through LS-DYNA software from different angle. Results A 3D FE model of human mandible was established with highly-identical geometric size, and the dynamic process of bullet damage to the model was successfully simulated. The results of this work indicated that the exit wounds in model tended to be larger than the entrances resulting from the same shot. Conclusion Thin-layer CT and Dicom standard can improve the efficiency of establishment of a more precise 3D FE model of mandible. The procedure of bullet damage to the mandible can be simulated by the finite element.

[Key words] ballistic penetration; finite element; dynamic simulation; mandible; Dicom

Supported by the "Eleventh Five-year Plan" of Medical Scientific Research of PLA (08G083,06Z045). Corresponding author: Tan Yinghui, Tel: 86-23-68755632, E-mail: tanyh1962@yahoo.com.cn

口腔颌面部位于身体的暴露部分,战时防护差,平时是暴力、自杀的重点部位,因此研究颌面部火器伤的生物力学问题尤为重要。有限元法(finite element method, FEM)在生物组织的力学研究中应用广泛,有限元模型的建立是有限元法的关键所在[1]。目前国内外已建立了多种牙和下颌骨的三维有限元模型,但建立的模型都较为简单,单元和节点数相对较少,边界约束条件与实际情况尚存在一定差距,而对于模拟人下颌骨枪弹伤的三维有限元模型尚少见报道。我们利用现代影像学技术和国际著名的有限元分析软件及高性能电子计算机,从多个入射角度动态模拟子弹侵彻下颌骨过程,旨在为临床治疗颌面部火器伤的生物力学研究提供可靠的基础,为进一步研究火器伤的损伤机制提供平台。

1 资料与方法

1.1 样本来源

选择1名成年男性志愿者,35岁,牙列完整,咬合关系正常,无任何颞下颌关节紊乱症的症状和体征,全身状况健康。

[基金项目] 全军医学科研"十一五"计划(08G083,06Z045)

[通信作者] 谭颖徽,电话:(023)68755632,E-mail: tanyh1962@yahoo.com.cn

1.2 试验设备

CT 扫描机:采用美国 GE 公司 LightSpeed Ultra SYS 64 排螺旋 CT 机及 AW4.3CT 工作站;试验所用计算机系统硬件配置:酷瑞 2 四核(2.2 Hz)处理器,4 G 内存,640 G 硬盘。试验用计算机操作系统:Windows XP Professional;试验用软件:Mimics10.0 (Materialism's Interactive Medical Image Control System);Ansys11.0 (Analysis System)。

1.3 方法

1.3.1 CT 扫描　扫描条件为 120 kV,300 mA,扫描层厚为 0.625 mm,扫描层间隔 0.625 mm。扫描时头颅固定架对患者头颅进行固定,使下颌合平面与地面垂直,扫描中线与矢状线对齐,将下颌合平面定为扫描平面,下颌息止颌位时进行扫描。从下颌骨下缘开始至髁状突顶端为止进行扫描,共获得 159 张断层图像。所得图像经 AW4.3CT 工作站处理为 DICOM 格式数据文件,刻录存盘。

1.3.2 CT 图像的处理　将获得的 CT 图像以 DICOM 格式导入 Mimics 软件,重建成下颌骨三维表面轮廓,经过阈值分析和数据优化,完成人下颌骨三维数字模型。见图 1。



图 1　Mimics 软件中重建的人下颌骨三维图像

1.3.3 人下颌骨枪弹伤三维有限元模型的建立　将建立的下颌骨三维模型在 MIMICS 软件中自动进行面网格划分,然后导入 ANSA 软件中进行体网格划分,并手动对畸形网格进行修改,由封闭表面构建实体,从而生成三维实体模型。

1.3.4 材料属性的定义[2,3]　为简化模型,提高计算效率,将下颌骨定义为由骨皮质、骨松质 2 种组织组成,并均将其假定为各向同性、均质、连续的线弹性材料。具体力学参数见表 1。

表 1　模型材料参数

材料	弹性模量(MPa)	泊松比
下颌骨皮质	1.37×10^4	0.31
下颌骨松质	1.37×10^3	0.26
7.62 mm 子弹弹头	2.01×10^5	0.30

1.3.5 边界约束及载荷条件的设定　模型将颞下颌关节以铰链支撑处理,作为模型的边界约束条件。载荷条件:将子弹入射点设定为左侧下颌角,弹头侵彻速度采用以往动物实验测量入射速度 713.8、1 400 m/s[4,5],入射角度分别设定为 90°、67.5°、45°,共 6 组电脑模拟情况:A 组 713.8 m/s,90°;B 组 713.8 m/s,67.5°;C 组 713.8 m/s,45°;D 组 1 400 m/s,90°;E 组 1 400 m/s,67.5°;F 组 1 400 m/s,45°。

2 结果

建立了几何外形高度相似的人下颌骨枪弹伤三维有限元模型,总共包括 30 497 个单元(其中四面体 5 927 个,五面体 78 个,六面体 23 480 个),164 613 个节点。见图 2。成功模拟 7.62 mm 制式子弹以 713.8 m/s 分别从 90°、67.5°、45°侵彻下颌骨的动态损伤过程。见图 3~5。

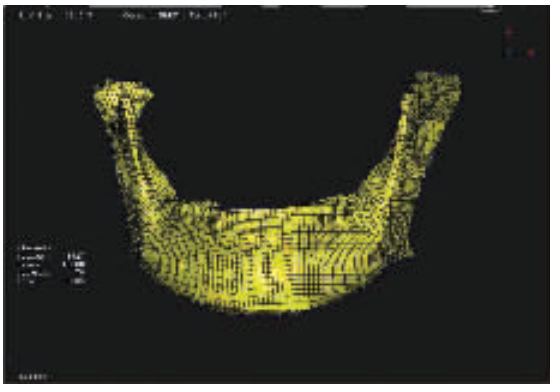
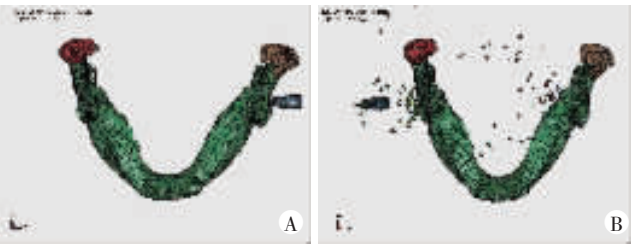
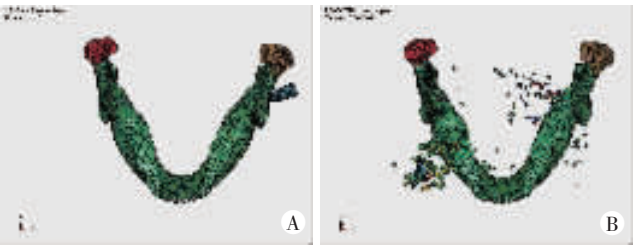


图 2　人下颌骨三维有限元模型



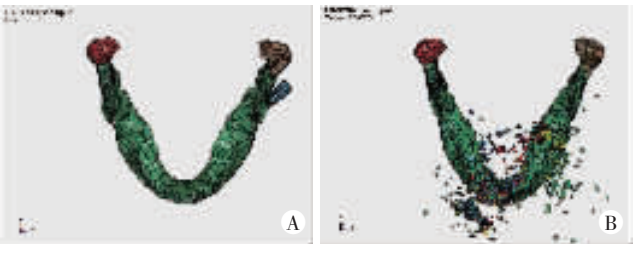
A:入射前; B:入射后

图 3　子弹以 713.8 m/s 从 90°入射前后下颌骨损伤情况



A:入射前;B:入射后

图 4　子弹以 713.8 m/s 从 67.5°入射前后下颌骨损伤情况



A:入射前;B:入射后

图 5　子弹 713.8 m/s 从以 45°入射前后下颌骨损伤情况

电脑模拟不同情况下的下颌骨损伤情况:当 7.62 mm 弹丸入射角度一致时,入射速度越大,撞击能量越大;当入射速度一致,入射角度为 45°组的致伤能量明显高于 90°及 67.5°组。弹

丸致伤后,伤道出口面积明显大于入口面积。伤道出入口面积比值介于1.59~7.91,其中C组比值最高。见表2。

表2 电脑模拟损伤指标

组别	剩余速度(m/s)	撞击能量(J)	致伤能量(J)	入口面积(mm^2)	出口面积(mm^2)	出口/入口
A	654.5	2 012.6	320.5	37.55	102.16	2.72
B	575.6	2 012.6	703.8	62.95	187.83	2.98
C	278.0	2 012.6	1 707.3	142.87	1 131.10	7.91
D	1 291.6	7 742.0	1 152.5	61.90	98.95	1.59
E	1 141.8	7 742.0	2 592.3	75.46	283.92	3.76
F	701.0	7 742.0	5 801.0	230.40	566.00	2.45

3 讨论

FEM是适应高速电子数字计算机而发展起来的一种有效的数值方法,用于模拟并解决各种工程力学、热学、电磁学等物理场问题。由于通常的力学实验方法基本上无法直接应用于人体,对人体的力学行为进行有限元数值模拟就成为深化对人体认识的一种有效手段。自从1956年Turner等提出有限元的概念以来,有限元法在口腔医学生物力学研究中的地位愈来愈重要。目前,人们普遍认为它是生物力学研究中最先进有效的方法之一[6]。

有限元法分析中,数据的采集、模型的建立是其至关重要的步骤。在口腔医学领域常用的建模方法主要包括:①磨片、切片法[7];②三维测量法[8,9];③CT图像处理法;④DICOM数据直接建模法等[10]。其中CT图像处理法是目前最常用的方法,但需要花费大量的人力、物力,而且在通过胶片扫描传递数据的过程中容易丢失很多信息,对位的不准确也直接影响着所建立模型精确性[11,12]。而DICOM数据直接建模法则是近年来出现的方法[13]。本实验使用64排螺旋CT,扫描层厚仅为0.625 mm,利用DICOM格式数据文件直接建模不需将数据进行转换,可以直接读取数据并处理,避免反复操作造成的数据失真或丢失,大大提高了模型的精确度,简化了有限元模型的建立过程,所得到的有限元模型具有很好的几何相似性和可重复性,可以及时将患者CT图像转换成三维有限元模型,为今后个体化火器伤应力分析打下了良好基础。

颌面部具有骨组织多,软组织少,血运丰富的解剖特点,高速投射物致伤时除具有火器伤的一般特点外,还有着与身体其他部位所不同的创伤弹道学特点,颌面部高速投射伤与肢体伤道的基本形态是一致的,弹丸伤入口小、出口大,但其出入口面积比值差异较大。一般认为,弹丸致伤时的出入口面积比值基本反映了致伤能量的大小。本研究电脑模拟中这一比值为1.59~7.91,与谭颖徽等[5]报道的12.9差别较大,但与国内学者7.62 mm子弹致伤犬后肢时的出、入口面积比1.4~2.7[14]近似。这主要是由于本次电脑模拟去除下颌骨表面软组织,弹丸以90°入射快速侵彻骨质未发生明显偏航和翻滚,致伤能量消耗明显减少,且致伤条件的设定与数据采集的方法上均与动物实验有较大差别。

总之,本研究利用薄层CT技术,将DICOM数据直接导入Mimics 10.0软件直接生成下颌骨三维模型,再将其直接导入Ansys 11.0软件,在短时间内完成建模,确保了数据最大限度的利用。该模型几何形态逼真,可分辨下颌小舌、颏孔等解剖结构,并且获得高精度的下颌牙槽骨形态。该三维模型的建立具有快速、准确的优点,建模步骤简单,时间短,建立的模型能充分反映出不同患者的个体差异。由于具备以上特点,该技术可以应用于临床医学实践,针对不同颌面部火器伤患者进行枪弹伤的生物力学分析已成为可能。

参考文献:

[1] 汪昆, 李德华, 周继祥, 等. 螺纹型牙种植体即刻负载有限元模型的建立[J]. 第三军医大学学报, 2006, 28(11): 1246-1248.

[2] Daas M, Dubois G, Bonnet A S, *et al*. A complete finite element model of a mandibular implant-retained overdenture with two implants: comparison between rigid and resilient attachment configurations[J]. Med Eng Phys, 2008, 30(2): 218-225.

[3] Sevimay M, Turhan F, Kilicarslan M A, *et al*. Three-dimensional finite element analysis of the effect of different bone quality on stress distribution in an implant-supported crown[J]. J Prosthet Dent, 2005, 93(3): 227-234.

[4] Tan Y, Zhou S, Jiang H. Biomechanical changes in the head associated with penetrating injuries of the maxilla and mandible: an experimental investigation[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2002, 60(5): 552-558.

[5] 谭颖徽, 周树夏. 不同种类高速投射物颌面损伤特点的实验研究[J]. 华西口腔医学杂志, 1997, 15(2): 105-107.

[6] 尹伟, 李四群. 口腔医学中有限元分析法模型的建立方法及其应用[J]. 国际口腔医学杂志, 2007, 34(2):125-126, 130.

[7] 潘炜娟, 张保卫, 叶少波, 等. 牙齿与桩核三维有限元建模的初步探讨[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2000, 1(3): 143-144, 138.

[8] 韩强, 张富强. 应用于口腔医学领域的三维测量技术[J]. 口腔材料器械杂志, 2003, 12(1): 39-41.

[9] 颜功兴, 刘占芳. Forsus矫治力前导下颌有限元仿真及最佳施力角度探讨[J]. 第三军医大学学报, 2009,31(19): 1890-1893.

[10] 赵峰, 高勃, 刘震侠, 等. Dicom标准和Mimics软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. 西南国防医药, 2005, 15(5): 479-481.

[11] Jang S H, Kim W Y. Defining a new annotation object for DICOM image: a practical approach[J]. Comput Med Imaging Graph, 2004, 28(7): 371-375.

[12] Escott E J, Rubinstein D. Free DICOM image viewing and processing software for your desktop computer: what's available and what it can do for you[J]. Radiographics, 2003, 23(5): 1341-1357.

[13] 沈毅, 孙坚, 李军, 等. 正常人上颌骨的生物力学分析[J]. 组织工程与重建外科杂志, 2009, 5(1): 25-28.

[14] 王正国, 刘荫秋, 吴炳杰, 等. 创伤弹道的病理形态学观察[J]. 第三军医大学学报, 1981, 3(1): 58-64.

(**收稿**:2009-10-23;**修回**:2009-12-03)

(编辑 汪勤俭)