

· 论 著 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2016.02.003

## 人下颌骨撞击伤三维有限元模拟及生物力学分析\*

雷 涛<sup>1</sup>, 涂文斌<sup>2</sup>, 王婷婷<sup>1</sup>, 郑加军<sup>1</sup>, 谢良宪<sup>1△</sup>

(1. 解放军第 324 医院口腔科, 重庆 400020; 2. 华东交通大学机电工程学院, 南昌 330013)

**[摘要]** **目的** 利用有限元模拟技术对人下颌骨撞击伤进行仿真, 对模拟结果进行生物力学分析, 探讨下颌骨撞击伤的致伤机制。**方法** 采用中国可视化数字人数据, 建立人下颌骨撞击伤三维有限元模型, 动态模拟不同致伤条件下人下颌骨撞击动态损伤过程, 采用 Von Mises 应力及有效应变进行生物力学分析。**结果** 建立人下颌骨撞击伤三维有限元模型并成功模拟人下颌骨撞击伤动态损伤过程及骨折, 髁状突及下颌角是应力、应变集中及骨折的好发部位。**结论** Von Mises 应力及有效应变可作为预测和判定骨组织损伤的生物力学指标之一, 利用有限元法可以有效模拟下颌骨动态撞击过程, 模拟结果可为颌面部撞击伤基础研究及临床救治提供指导和数据参考。

**[关键词]** 下颌骨; 撞击伤; 有限元分析; 生物力学**[中图分类号]** R782**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1671-8348(2016)02-0151-05

## Three-dimensional finite element simulation and biomechanical analysis of human mandible injury\*

Lei Tao<sup>1</sup>, Tu Wenbin<sup>2</sup>, Wang Tingting<sup>1</sup>, Zheng Jiajun<sup>1</sup>, Xie Liangxian<sup>1△</sup>

(1. Department of Stomatology, 324th Hospital of the People's Liberation Army, Chongqing 400020, China;

2. Mechanical and Electrical Engineering College of East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**[Abstract]** **Objective** The simulation of the human mandible injury was carried out by using the finite element simulation technology, and the biomechanical analysis of simulation results was developed to explore the mechanism of injuries. **Methods** The Chinese Visible Human digital data were used to establish the three-dimensional element model of mandible injuries, and the dynamic processes of human mandible injuries in different conditions were simulated, and the biomechanical analysis were carried out by using the Von Mises stress and effective strain. **Results** The three-dimensional element model of mandible injuries was established, the dynamic damage and fracture of human mandible were simulated successfully, the mandibular angle and condylar were the predilection parts of high-stress, high-strain and fractures. **Conclusion** The Von Mises stress and effective strain can be used to predict and judge the bone tissue injuries, the finite element method can simulate the impact injuries of mandible effectively, and the simulated results can provide guidance and reference for basic research and clinical treatment of oral and maxillofacial injuries.

**[Key words]** mandible; impact injury; finite element analysis; biomechanics

随着生活节奏的不断加快, 颌面部作为人体突出和暴露的部位, 撞击性损伤的发生率一直居高不下, 且呈逐年上升趋势, 由于颌面部毗邻颅脑、颈部等重要器官, 加之伤后对颌面影响明显, 因此颌面部撞击性损伤一直是创伤研究中的重点和难点问题<sup>[1-2]</sup>。本文通过使用计算机模拟技术(有限元法)仿真真人下颌骨撞击伤的动态损伤过程, 对模拟结果进行生物力学分析, 探讨颌面部撞击伤的致伤机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 模型数据来源** 中国可视化数字人 CVH (Chinese visible human)(年龄 22 岁, 身高 1.62 m)头颈部 CT 扫描数据。由第三军医大学基础医学部人体解剖学教研室提供<sup>[3]</sup>。

**1.1.2 建模软、硬件环境** LightSpeed 64 排螺旋 CT(美国通用电气公司), CT 影像处理软件 Mimics V10.01(比利时 Materialise 公司), 有限元前处理软件 ANSA V12.03(希腊 BETA 公司), 有限元运算分析软件 LS-DYNA(美国 LSTC 公司), 有限元分析软件 LS-PREPOST(美国 LSTC 公司), PC 电脑处理器 AMD 四核 620 Processor (2.60 GHz), 内存 4 G, 硬盘 5 T, 显卡 NVIDIA GeForce 310 M。

### 1.2 方法

**1.2.1 CVH 下颌骨撞击伤三维有限元模型的建立** 将中国

可视化数字人头颈部数据导入 MIMICS 后的软件界面, 用 MIMICS 软件自带的阈值提取功能, 提取出 CVH 头面部骨质, 然后利用软件的擦拭功能, 去除下颌骨以外其他的骨组织, 只保留下颌骨, 采用手动擦拭功能, 去除下颌骨松质骨以外的其他部分, 此外使用 MIMICS 软件中的描绘功能, 手工将下颌神经管描绘出来, 通过 MIMICS 软件自带的三维重建功能建立人 CVH 颌骨、松质骨、下颌神经管三维重建模型<sup>[4]</sup>。将 MIMICS 中建立的 CVH 下颌骨模型导入有限元前处理软件 ANSA 中, 将下颌骨分成数块, 然后通过手动模拟将各块进行修整, 并使用六面体网格自动生成功能, 使各块自动形成六面体单元, 对于外形异常无法形成六面体的微小部位, 使用四面体和五面体代替, 将模型进行拼接后建立 CVH 下颌骨三维有限元模型。采用 BIM-II 型水平式生物撞击机专用撞击头为致伤物<sup>[5]</sup>, 采集其外形、质地、重量建立撞击头三维有限元模型, 将两个模型进行拼装, 建立 CVH 下颌骨撞击伤三维有限元模型。

**1.2.2 材料属性的定义** 人下颌骨材料型号为分段线弹性材料: \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY。模型各材料参数设定见表 1<sup>[6-7]</sup>。

**1.2.3 边界约束及载荷条件的设定** 将撞击点设定于下颌骨颊侧下颌角部位, 撞击方向与下颌角垂直, 撞击速度分别设定

\* 基金项目: 全军青年培育项目(13QN066); 重庆市科委自然科学基金面上项目(cstc2013jycjA10028)。 作者简介: 雷涛(1979-), 主治医师, 博士, 主要从事颌面部创伤、有限元模拟、生物力学分析。 △ 通讯作者, E-mail: 31485761@qq.com。

为 5 m/s(低速)、10 m/s(中速)、15 m/s(高速),将模型在髁状突顶部区域的单元和节点设定铰链约束,与张闭口方向一致。

表 1 模型材料参数

材料	杨氏模量(MPa)	泊松比	密度(kg/m <sup>3</sup> )
下颌骨皮质	1.42×10 <sup>6</sup>	0.31	1 740
下颌骨松质	8.04×10 <sup>3</sup>	0.26	700
撞击头	2.06×10 <sup>8</sup>	0.30	7 800

**1.2.4 动态损伤过程的运算和分析** 将人下颌骨撞击伤三维有限元模型导入有限元运算软件 LS-DYNA 中,设定撞击头与骨面之间的接触为面-面接触,为实现动态的骨质断裂过程,作者采用了单元失效运算,并将下颌骨皮质和松质的效应变量分别设定为 0.44% 和 1.50%<sup>[8]</sup>。仿真时间设定为 0.015 s。将 LS-DYNA 软件中运算的结果导入有限元处理软件 LS-Prepost 中,对模拟结果进行针对性的处理和分析。

**2 结果**

**2.1 有限元模型建立情况** 成功建立人下颌骨撞击伤三维有限元模型,如图 1 所示,CVH 下颌骨模型几何外形与实物标本基本一致,细节损失小,模型平滑,各细小解剖结构和部位清

晰,六面体单元数目多,单元大小适中,其中人下颌骨三维有限元模型单元数为 26 644 个(六面体 24 250 个,五面体 956 个,四面体 1 438 个),节点数为 38 875 个,撞击头的单元数为 24 826 个(六面体 21 796 个,五面体 1 030 个),节点数为 27 522 个。

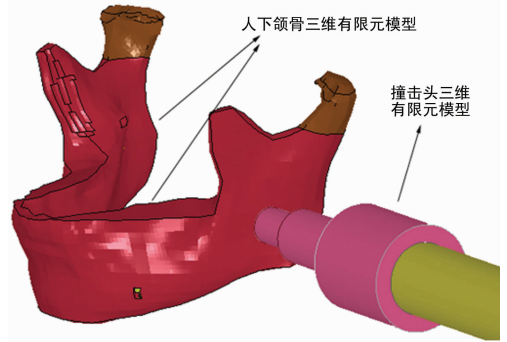


图 1 人下颌骨撞击伤三维有限元模型

**2.2 成功进行人下颌骨撞击伤动态模拟** 如图 2 所示,损伤过程逼真,实现了下颌骨的骨质破坏和骨折。

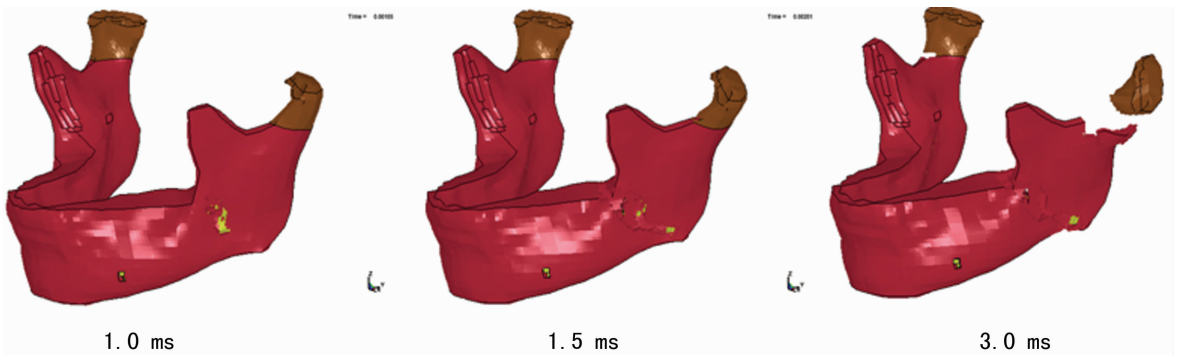


图 2 人下颌骨撞击伤动态损伤过程

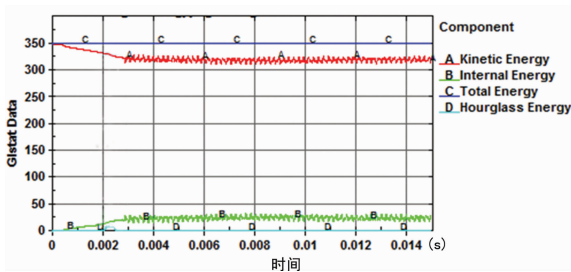


图 3 人下颌骨投射伤动态模拟能量守恒检验

程进行了能量守恒检验<sup>[9]</sup>,如图 3 所示,其中 Kinetic Energy 为动能,Internal Energy 为内能,Hourglass Energy 为沙漏能,Total Energy 为总能量。整个撞击过程中总能量保持不变,沙漏能小于 5.00%,撞击物的部分动能转化为下颌骨的内能,符合能量守恒定律。

**2.3 模拟过程能量守恒的检查** 撞击模拟过程中能量是否守恒,将大大影响模拟结果的可靠性,本研究对整个动态模拟过

**2.4 损伤形态对比分析** 如图 4 所示,在 5 m/s 速度撞击的情况下,撞击侧髁状突颈部出现了明显的骨折和移位,在 10 m/s 时,除了撞击侧髁状突出现了明显的骨折外,在撞击点的下颌角部位出现了一定的骨质断裂和破坏,但未出现明显移位,到了 15 m/s 时,撞击侧下颌角及髁状突均出现了明显的骨折和移位,对侧髁状突也出现了部分的骨质破坏。



图 4 不同撞击速度下人下颌骨损伤后形态对比

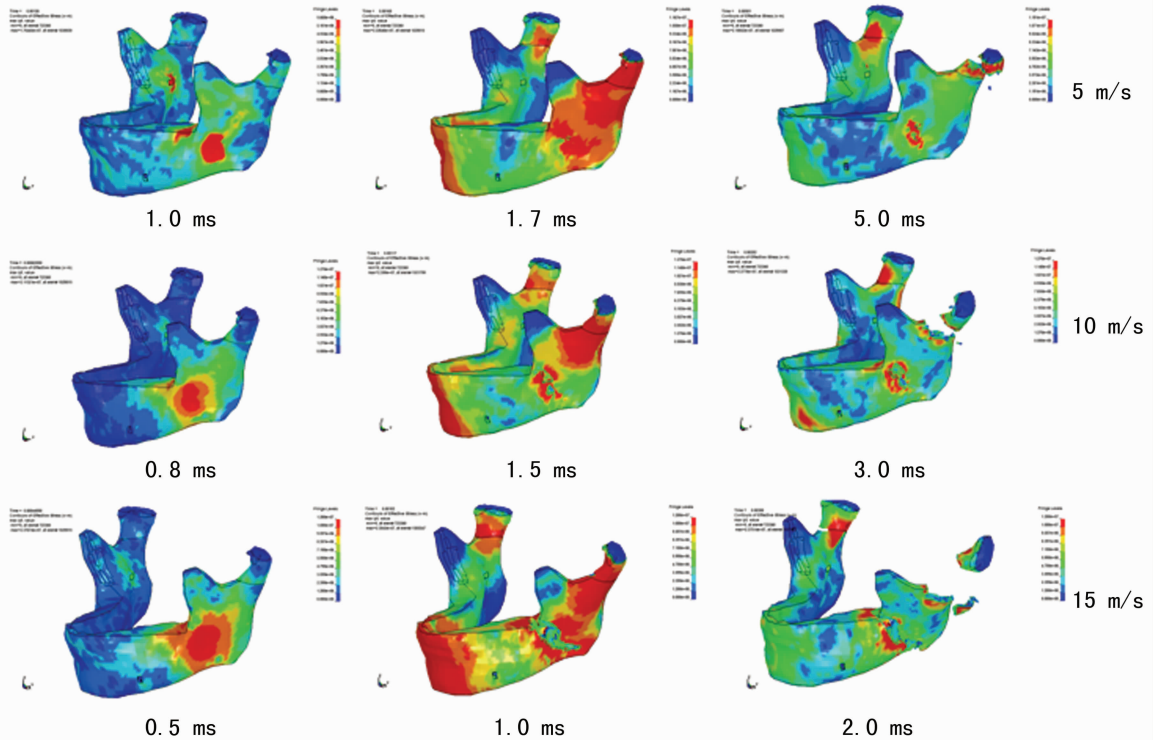


图 5 不同撞击速度下人下颌骨 Von Mises 应力动态分布对比

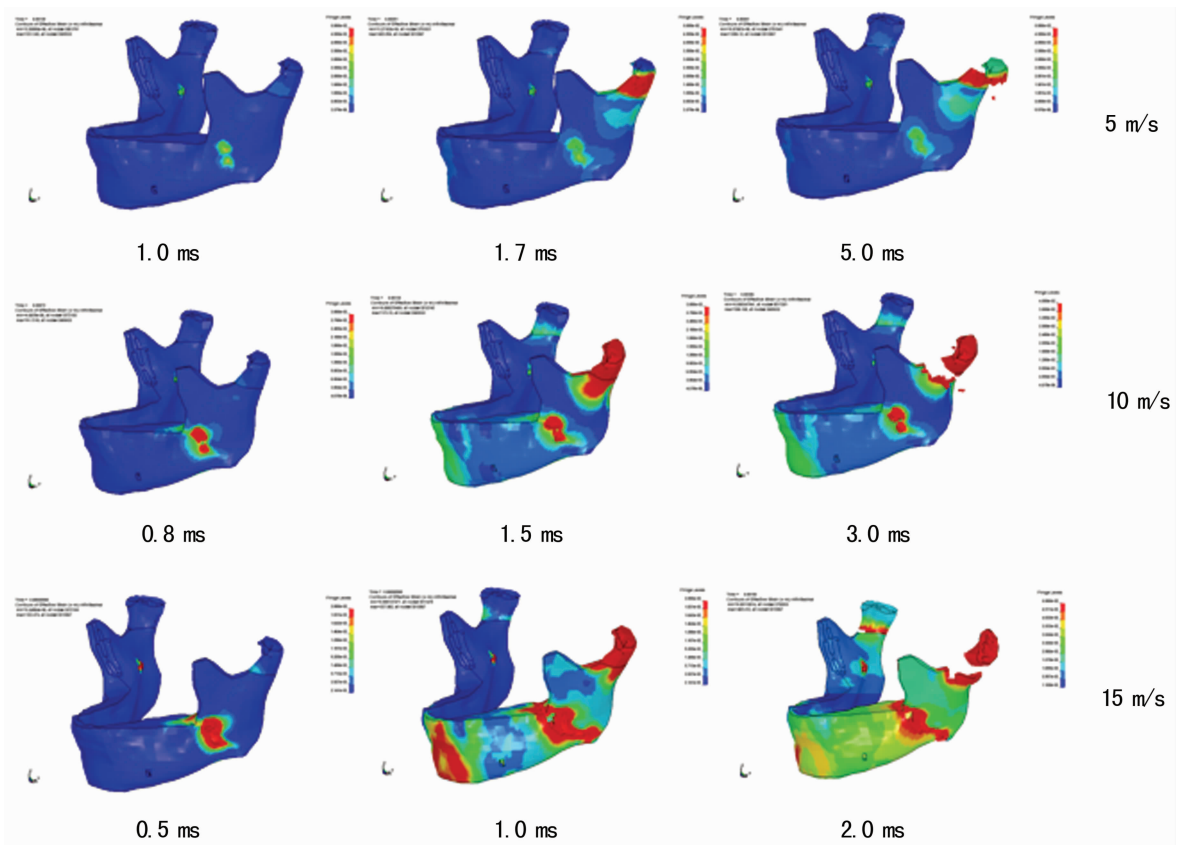


图 6 不同撞击速度下人下颌骨有效应变动态分布对比

**2.5 生物力学指标动态对比分析** 不同时间点下颌骨整体 Von Mises 应力分布云图如图 5, Von Mises 应力范围设定为  $0 \sim 1.5 \times 10^7$  Pa, 颜色越接近红色, 表明值越大, 越靠近蓝色, 表明值越小。在 5.0 m/s 撞击的情况下, 在撞击头撞击到下颌骨表面瞬间于撞击部位快速出现应力并迅速转变为高应力区 (红色区域), 随后应力快速向四周扩散, 于撞击侧髁状突部位

出现高应力集中区域, 随后应力快速减弱并逐渐消失。在 5 ms 时, 下颌骨表面除撞击点及双侧髁状突颈部外, 其他大部分区域均无明显高应力出现, 随着撞击速度的增加, 高应力区域 (红色区域) 面积逐渐增加, 越是骨质破坏明显的区域, 高应力区域面积越大, 停留时间越长。

不同时间点下颌骨整体有效应变动态分布云图如图 6, 有

效应范围设定为  $0 \sim 0.05 \epsilon$ , 颜色越接近红色, 表明值越大, 越靠近蓝色, 表明值越小。在 5 m/s 撞击的情况下, 在撞击头撞击到下颌骨表面瞬间于撞击部位快速出现应变并迅速转变为小范围的高应变区(红色区域), 随后应变快速向四周扩散, 于撞击侧髁状突部位出现高应力集中区域, 随后应变缓慢减弱并逐渐消失, 在 10 m/s 撞击的情况下, 除撞击侧髁状突外, 撞击点处也出现了明显的高应变区域, 对侧髁状突也出现了一定强度的应变区域(绿色区域), 到了 15 m/s 时, 不但撞击点及撞击侧髁状突高应变区面积增大, 对侧髁状突部位也出现了明显的高应变区, 高应变区均出现在骨质破坏部位, 破坏越严重, 高应变区域面积越大, 持续时间越长。

### 3 讨 论

下颌骨占据面下 1/3 区域, 由于其位置突出, 易遭受外界撞击的损伤, 而不同的致伤条件会导致截然不同的下颌骨损伤形态, 在临床救治中也要采取不同的措施<sup>[10]</sup>。创伤基础研究中致伤机制的研究是基础和重点, 为临床救治提供必要的指导和参考<sup>[11]</sup>, 而理想的实验模型则是进行致伤机制研究的前提。但目前传统的撞击伤模型多以实验动物、尸头及仿真材料为主, 这些模型存在数据采集困难、重复性差、价格昂贵及医学伦理学等问题, 从而限制了撞击伤致伤机制的研究。而利用有限元法进行撞击伤生物力学分析研究则避免了传统实验的不足, 它在实验数据采集、实验结果重复性及实验条件要求等方面有着明显的优势, 且无医学伦理学问题等, 而且在电脑上可以对模型的局部、整体、内部等各个部位进行详细、直观、动态的观察, 数据保存和分析方便, 更为重要的是建立好的三维有限元模型可以随意搭配不同的致伤方式并进行计算机模拟, 以上优势均是传统撞击伤模型和方法所不具备的<sup>[12]</sup>。

骨组织创伤计算机模拟中骨质破坏断裂效果的实现一直都是难点问题, 本实验为了实现在撞击过程中骨组织的断裂, 采取了以下步骤。首先, 将下颌骨的材料属性设定为分段线弹性材料; 其次, 在算法中增加了 \* MAT\_ADD\_EROSION(材料失效算法); 然后, 将材料失效设定为应变失效并设定失效值<sup>[13]</sup>。通过以上设定, 在有限元仿真计算软件 LS-DYNA 进行运算时, 当软件检测到某个单元受到的应变超过了设定的应变值, 该单元则会直接被删除, 从而实现了骨质的破坏和断裂, 在破坏严重的区域即会出现明显的骨折。从图 2 可以看出, 模拟过程逼真, 实现了下颌骨的骨质破坏和骨折, 且损伤部位和程度具有较高的真实性。与此同时, 单元的消失会带走一部分能量, 从而影响模拟结果, 为此, 本研究还特意加入了 \* CONTACT\_ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE 接触算法<sup>[14]</sup>, 即当一个单元被删除后, 该单元所受到的能量会自动传递到周围其他的单元上, 从而保证了该单元接收到的能量将会自动传递到邻近的下一个单元, 从而保证了能量无明显丢失。从图 3 看, 动能和内能之和与总能量相等, 沙漏能小于 5.00%, 没有明显的能量丢失, 能量检查结果说明本次模拟结果可靠。从模拟结果来看, 本实验采用的模拟方法能够实现大范围骨质断裂仿真, 模拟结果真实性较高, 该方法在骨组织撞击伤生物力学分析和伤情预判上均具有良好的分析和和预判能力。

创伤生物力学分析中, 力学指标的选择十分重要, 本次实验选取了 Von Mises 应力和有效应变进行分析, Von Mises 应力是一个综合性应力指标, 主要用于反应组织总体应力和在应力作用下的组织屈服断裂情况<sup>[15]</sup>, 而有效应变指物体在综

合性应力作用下产生的形变, 主要用于判断骨组织的屈服和断裂<sup>[16]</sup>。从图 5 可以看出, 在 5 m/s 的撞击速度下, Von Mises 应力主要表现为在撞击部位快速出现并转化为高应力区域, 随即向四周扩散, 然后迅速减弱并消失, 在整个撞击过程中, 出现骨折的撞击侧髁状突颈部高应力范围最广且持续时间最长, 这也与该处骨组织破坏最为严重一致, 随着撞击速度的增加, 也就是撞击能量的加大, 下颌骨整体的 Von Mises 应力值也变大, 在 10 m/s 时, 除撞击侧髁状突颈部外, 在撞击点周围也出现了大面积的高应力区, 表面该处骨质出现了破坏, 而到了 15 m/s 时, 对侧髁状突颈部也出现了一定面积的高应力区域。从图 6 可以看出, 有效应变的动态分布情况与 Von Mises 应力存在一定的相似, 也是先出现在撞击点, 然后快速向四周扩散, 后逐渐减弱并消失, 但与 Von Mises 应力不同的是, 有效应变更集中地表现在出现明显骨质破坏的区域, 且在该部位停留的时间较长, 也就是说有效应变较 Von Mises 应力更能体现骨质破坏情况, 但无法全面反应骨组织的受力情况, 因此在进行系统的骨组织生物力学分析中, 需将这两个治疗综合起来进行分析。从以上的生物力学分析情况可以看出在低速撞击情况下, 受力和损伤主要集中在髁状突颈部部位, 随着撞击速度的增加, 撞击点部位的受力进一步加大并出现骨质损伤和破坏, 在 15 m/s 的撞击情况下, 除了撞击侧髁状突颈部和撞击点外, 对侧髁状突颈部也出现了骨质的破坏。因此 Von Mises 应力及有效应变可应用于评判骨组织受力和损伤程度, 并成为预测和判定骨组织损伤的生物力学指标之一<sup>[17]</sup>。

综上所述, 本研究通过利用中国可视化数字人的头颈部 CT 扫描数据建立人下颌骨撞击伤三维有限元模型, 动态模拟不同撞击速度致伤下颌骨下颌角部位的损伤过程, 并对模拟结果进行生物力学对比分析, 从而探讨了撞击物与下颌骨骨组织之间的力学作用和效应, 整个模拟过程逼真, 真实反映出下颌骨在撞击物作用下的动态损伤情况, 模拟结果可为颌面部撞击伤基础研究及临床救治提供指导和数据参考。

### 参考文献

- [1] Ramalingam S, Nooh N, Neelakandan R. The impact of maxillofacial trauma scoring systems in predicting maxillofacial injury severity in developing countries[J]. *Oral Maxillofac Surg*, 2013, 42(10): 1232-1233.
- [2] Bertram A, Hyam D, Hapangama N. Out-of-hours maxillofacial trauma surgery: a risk factor for complications? [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2013, 42(2): 214-217.
- [3] Rong JJ, Wang QH, Liu KJ, et al. A new Atlas localization approach for subthalamic nucleus utilizing Chinese visible human head datasets[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): 57-64.
- [4] Olmez S, Dogan S, Pekedis M, et al. Biomechanical evaluation of sagittal maxillary internal distraction osteogenesis in unilateral cleft lip and palate patient and noncleft patients A three-dimensional finite element analysis[J]. *Angle Orthodontist*, 2014, 84(5): 815-824.
- [5] 黄一, 吴秋平, 余祖滨, 等. 胸部撞击伤致心肺联合损伤动物模型的建立[J]. *重庆医学*, 2012, 41(30): 3188-3191.
- [6] Tang Z, Tu WB, Zhang G, et al. Dynamic simulation and

- preliminary finite element analysis of gunshot wounds to the human mandible[J]. *Injury*,2012,43(5): 660-665.
- [7] Chen YB, Miao YY, Xu C, et al. Wound ballistics of the pig mandibular angle: a preliminary finite element analysis and experimental study[J]. *J Biomech*, 2010, 43(6): 1131-1137.
- [8] Lei T, Xie LX, Tu WB, et al. Development of a finite element model for blast injuries to the pig mandible and a preliminary biomechanical analysis[J]. *J Trauma Acute Care Surg*,2012,73(4): 902-907.
- [9] Combescure A, Gravouil A, Gregoire D, et al. X-FEM a good candidate for energy conservation in simulation of brittle dynamic crack propagation[J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*,2008,197(5): 309-318.
- [10] Tutela JP, Verbist DE, Kelishadi S, et al. Traumatic dislocation of the mandibular condyle into the middle cranial fossa in an elderly patient[J]. *J Craniofac Surg*,2013,24(5): 1703-1705.
- [11] Bege T, Menard J, Tremblay J, et al. Biomechanical analysis of traumatic mesenteric avulsion[J]. *Med Biol Eng Comput*,2015,53(2): 187-194.
- [12] Vavalle NA, Moreno DP, Rhyne AC, et al. Lateral impact validation of a geometrically accurate full body finite element model for blunt injury prediction[J]. *Ann Biomed Eng*,2013,41(3): 497-512.
- [13] 雷涛. 下颌骨爆炸伤有限元模型的建立、仿真模拟及生物力学机制的初步研究[D]. 重庆: 第三军医大学, 2012.
- [14] Di Capua D, Agelet De Saracibar C. A direct elimination algorithm for quasi-static and dynamic contact problems[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2015, 93(1): 107-125.
- [15] Nekkanty S, Yerramshetty J, Kim DG, et al. Stiffness of the endplate boundary layer and endplate surface topography are associated with brittleness of human whole vertebral bodies[J]. *Bone*,2010,47(4): 783-789.
- [16] Liu X, Cao D, Mei H, et al. Effect of particle shapes on effective strain gradient of SiC particle reinforced Aluminum composites[J]. *J Phys Conf Ser*, 2013, 419(1): 5293-5304.
- [17] Green JO, Nagaraja S, Diab T, et al. Age-related changes in human trabecular bone: relationship between microstructural stress and strain and damage morphology[J]. *J Biomch*,2011(12): 2279-2285.

(收稿日期:2015-08-10 修回日期:2015-09-22)

(上接第 150 页)

- busulfan and cyclophosphamide conditioning regimen for allogeneic hematopoietic stem cell transplantation in the treatment of patients with hematologic malignancies[J]. *Transplant Proc*,2014,46(5):1531-1535.
- [5] Jiang Q, Xu LP, Liu DH, et al. Imatinib mesylate versus allogeneic hematopoietic stem cell transplantation for patients with chronic myelogenous leukemia in the accelerated phase[J]. *Blood*,2011,117(11):3032-3040.
- [6] Lu DP, Dong L, Wu T, et al. Conditioning including anti-thymocyte globulin followed by unmanipulated HLA-mismatched/haploidentical blood and marrow transplantation can achieve comparable outcomes with HLA-identical sibling transplantation[J]. *Blood*,2006,107(8):3065-3073.
- [7] Huang XJ, Xu LP, Liu KY, et al. Partially matched related donor transplantation can achieve outcomes comparable with unrelated donor transplantation for patients with hematologic malignancies[J]. *Clin Cancer Res*,2009,15(14):4777-4783.
- [8] Takahashi S, Ooil J, Tomonari A, et al. Comparative single-institute analysis of cord blood transplantation from unrelated donors with bone marrow peripheral blood stem-cell transplants from related donors in adult patients with hematologic malignancies after myeloablative conditioning regimen[J]. *Blood*,2007,109(3):1322-1330.
- [9] Paiano S, Roosnek E, Tirefort Y, et al. Comparing Two Types of Rabbit ATG prior to Reduced Intensity Conditioning Allogeneic Hematopoietic SCT for Hematologic Malignancies[J]. *Bone Marrow Res*,2015:980924.
- [10] Holtan SG, DeFor TE, Aleksandr L, et al. Composite end point of graft-versus-host disease-free, relapse-free survival after allogeneic hematopoietic cell transplantation[J]. *Blood*,2015,125(8):1333-1338.
- [11] Soiffer RJ, Lerademacher J, Ho V, et al. Impact of immune modulation with anti-T-cell antibodies on the outcome of reduced-intensity allogeneic hematopoietic stem cell transplantation for hematologic malignancies[J]. *Blood*,2011,117(25):6963-6970.
- [12] Alyea E, Neuberger D, Mauch P, et al. Effect of total body irradiation dose escalation on outcome following T-cell-depleted allogeneic bone marrow transplantation[J]. *Biol Blood Marrow Transplant*,2002,8(3):139-144.
- [13] 黄文荣, 李红华, 金香淑, 等. 人类白细胞抗原单倍型相合外周血造血干细胞移植治疗血液系统疾病的疗效与安全性[J]. *中华内科杂志*, 2013, 52(5): 390-394.
- [14] Kröger N, Stübiger T, Atanackovic D. Immune-modulating drugs and hypomethylating agents to prevent or treat relapse after allogeneic stem cell transplantation[J]. *Biol Blood Marrow Transplant*,2014,20(2):168-172.
- [15] 周洁, 周海侠, 张日, 等. 17 例 Ph 染色体阳性急性淋巴细胞白血病患者单倍体异基因造血干细胞移植疗效分析[J]. *中华血液学杂志*, 2014, 35(2): 170-172.

(收稿日期:2015-08-10 修回日期:2015-09-26)