

## 不同致伤条件下人下颌骨投射伤计算机仿真模拟和对比分析\*

雷涛, 郑加军, 王婷婷, 李瑛, 谢良宪<sup>△</sup>  
(解放军第三二四医院口腔科, 重庆 400020)

**[摘要]** **目的** 利用有限元数字模拟技术动态仿真不同致伤条件下人下颌骨颞部投射伤动态致伤过程, 通过生物力学分析探讨下颌骨投射伤致伤机制。**方法** 建立人下颌骨投射伤三维有限元模型, 动态模拟在不同致伤条件下(高、中、低三种投射速度)投射物致伤下颌骨颞部的动态过程, 对模拟结果进行生物力学对比分析。**结果** 成功模拟不同致伤条件下人下颌骨投射伤动态致伤过程, 模拟结果逼真, 投射速度越高, 下颌骨损伤更为严重。**结论** 利用数字模拟技术可以有效地仿真下颌骨投射伤, 为口腔颌面部战创伤基础研究、临床救治提供参考和指导。

**[关键词]** 颞部; 投射伤; 有限元模拟; 生物力学分析

**[中图分类号]** R782.4

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1671-8348(2015)30-4252-03

## Simulation and comparison analysis of human mandible projectile injury in different injury conditions\*

Lei Tao, Zheng Jiajun, Wang Tingting, Li Ying, Xie Liangxian<sup>△</sup>

(Department of Stomatology, 324 Hospital of the PLA, Chongqing 400020, China)

**[Abstract]** **Objective** Finite element numerical simulation technique was applied to simulate the dynamic projectile injury process of human chin in different injury conditions and the mechanism of injury was discussed by using biomechanical analysis.

**Methods** The 3D finite element model of human mandible projective injury was established to simulate the dynamic projectile injury process of human chin in different injury conditions (high, medium and low speeds), and the simulation results were used to comparative analysis of biomechanics. **Results** The dynamic damage process of human chin projectile injury was simulated successfully in different injury conditions, and the more serious injury of mandible was caused by faster speed. **Conclusion** The finite element method can simulate the projectile injury of mandible effectively, and can provide a new thought and method for basic research and clinical treatment of oral and maxillofacial war injury.

**[Key words]** chine; projectile injury; finite element simulation; biomechanical analysis

下颌骨部位位置暴露, 无论是战时还是平时都是创伤损伤中的重点部位, 特别是在以投射伤为代表的火器性损伤中, 下颌骨占有较大的损伤比例, 加之下颌骨损伤后对面部外形以及咀嚼功能影响较大, 因此下颌骨投射伤一直都是军事和日常创伤研究领域的重点和难点问题<sup>[1-2]</sup>。由于传统的投射伤实验方法存在致伤条件控制、实验数据采集以及数据分析等方面存在困难, 特别是医学伦理等问题, 大大限制了投射伤致伤机制的研究, 本文采用有限元数字模拟技术对人下颌骨投射伤进行动态仿真, 模拟不同致伤条件下投射物致伤下颌骨的动态损伤过程, 并对模拟结果进行对比分析, 探讨下颌骨投射伤致伤机制。

## 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(Chinese visible human, CVH)(年龄 22 岁, 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 人下颌骨投射伤三维有限元模型的建立** 将 CVH 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, 此外笔者使用 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。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, 笔者使用四面体和五面体代替, 将模型进行拼接后建立了人下颌骨三维有限元模型。根据 7.62 mm 制式子弹弹头(质量 7.92 g)外形尺寸建立投射物三维有限元模型, 将人下颌骨三维有限元模型和投射物模型进行拼装, 建立人下颌骨投射伤三维有限元模型。

**1.2.2 材料属性的定义** 将人下颌骨材料型号设定为各项同性的分段线塑性材料: \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, 模型各材料参数设定见表 1<sup>[4]</sup>。为模拟损伤后伤道和骨质破坏, 本文对下颌骨各单元节点进行分离然后进行约束的方式, 约束失效方式设定为应变失效, 即当单元的某一节点产生的应变超过了设定的阈值, 此节点约束失效, 释放

相邻单元的共节点,与此同时本研究在设定节点失效的同时还设定了单元应变失效,即当某单元收到的应变超过了设定值,该单元即消失,从而实现骨质破坏和伤道。

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
投射物	2.06×10 <sup>8</sup>	0.30	7 800

**1.2.3 边界约束及载荷条件的设定** 将人下颌骨设定为双侧髁状突铰链固定(下颌骨可沿张闭口方向转动,其余方向设定为完全约束),投射物的投射速度分别设定为低速 400 m/s、中速 700 m/s 和高速 1 100 m/s,投射点设定为下颌骨颈部正中联合的中点。

**1.2.4 动态损伤过程的运算** 将设定好边界约束条件及载荷条件的人下颌骨投射伤有限元模型导入有限元运算软件 LS-DYNA 中,设定投射物与骨面之间的接触为面-面接触,节点失效阈值设定为 0.08,下颌骨皮质和松质的单元失效应变阈值分别设定为 0.44% 和 1.5%<sup>[5]</sup>。仿真时间设定为 1 s。将 LS-DYNA 软件中运算的结果导入到有限元后处理软件 LS-Prepost 中,对模拟结果进行针对性的处理和分析。

**1.2.5 模拟结果的分析** 将 LS-DYNA 软件中运算的结果导入到有限元后处理软件 LS-Prepost 中,采集不同致伤条件下下颌骨的动态损伤过程、应力、应变动态分布云图,并根据公式计算能量损耗数值  $\Delta E = m(v_1^2 - v_2^2) / 2$  ( $m$  代表投射物的质量,  $v_1$  代表投射物的初速度,  $v_2$  代表投射物的终末速度以及能量损耗率 =  $\Delta E /$  投射物初始动能  $\times 100\%$ 。

**2 结 果**

**2.1 有限元模型建立情况** 成功建立人下颌骨投射伤三维有限元模型(图 1),人下颌骨模型几何外形逼真,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,无畸形单元。其中人下颌骨三维有限元模型单元数为 275 216 个(六面体 245 192 个,四面体 30 024 个),节点数为 1 387 101 个,投射物(7.62 mm 弹头)的单元数为 4 692 个(全六面体),节点数为 5 076 个。

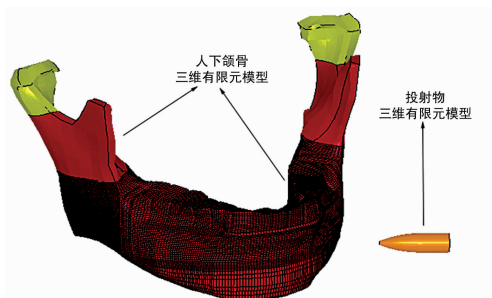


图 1 人下颌骨颈部投射伤三维有限元模型

**2.2 模拟过程能量守恒的检查** 投射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程进行了能量守恒检验,整个投射撞击过程中总能量保持不变,投射物的部分动能转化为下颌骨的内能,符合能量守恒定律,模拟结果可靠,见图 2。

**2.3 不同致伤速度下人下颌骨投射伤动态模拟情况** 成功进行在不同致伤速度下人下颌骨颈部投射伤的动态损伤过程,损伤过程逼真,实现了伤道和骨碎块飞溅的效果,见图 3。

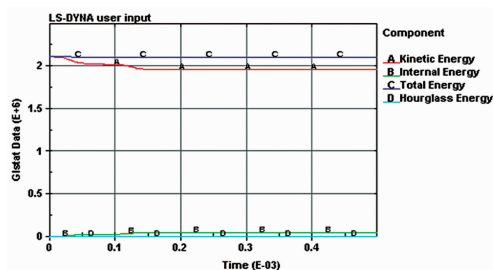


图 2 人下颌骨投射伤动态模拟能量守恒检验



图 3 人下颌骨投射伤动态损伤过程

**2.4 模拟结果数据对比分析** 不同投射数据致伤下颌骨颈部的初始速度、剩余速度、能量损耗值、能量损耗率。速度越快,弹头消耗的能量值越高,即说明投射物杀伤力更高,组织受损更为严重,与此同时,投射物的能量损耗率却随着速度的增加而降低,说明初始速度越快,投射物本身能量损耗越小,越能保持稳定的投射穿透效果,见表 1。

**2.5 Von Mises 应力、有效应变动态分布对比分析** Von Mises 应力范围设定为 0~30 pa,颜色越接近红色,表明值越大,越靠近蓝色,表明值越小,在投射物撞击下颌骨时于投射点部位出现应力并迅速出现高应力区,随即应力快速向四周快速扩散,并于下颌角、髁状突颈部等部位出现高应力区,当投射物穿透下颌骨后,应力迅速减弱并消失,投射速度越大,高应力范围越大,应力停留时间越长,见图 4。有效应变范围设定为 0~0.02 ε,颜色越接近红色,表明值越大,越靠近蓝色,表明值越小,在投射物撞击下颌骨瞬间于投射点出现应变并迅速转变为高应变区域,但与应力分布不同,高应变区域主要集中在投射点四周,其余部位无明显高应变区域出现,且高应变区域存在时间较长,减弱消退缓慢,见图 5。投射速度对应变的影响与应力一致,但不及应力明显。

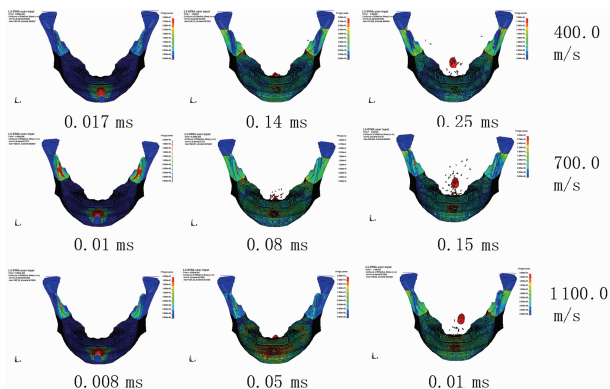


图 4 人下颌骨投射伤应力动态分布云图

表 2 模拟结果数据对比

初始速度(m/s)	终末速度(m/s)	能量损耗值(J)	能量损耗率(%)
400.0	384.1	49.37	7.8
700.0	686.8	72.49	3.7
1 100.0	1 082.3	146.90	3.1

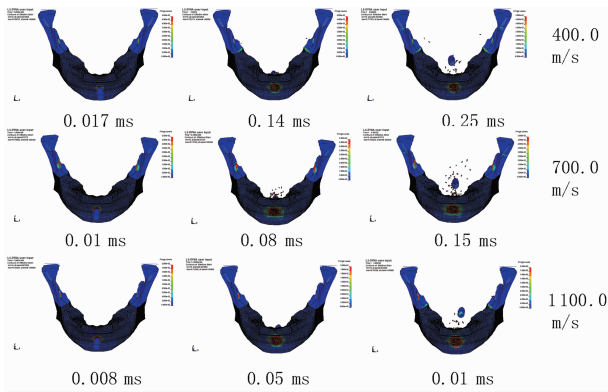


图 5 下颌骨投射伤有效应变动态分布云图

### 3 讨 论

颌面部部位特殊,无论是在战时还是平时均为暴力、自伤的重点部位,加上颌面部特殊的解剖位置,加大了颌面部投射伤的救治难度。而在创伤基础研究中,损伤机制是其研究的基础,而其中最为核心内容就是投射物与机体之间的力作用(致伤生物力学分析)<sup>[6]</sup>,但目前传统的动物实验存在实验条件高,风险大,重复性差,数据采集困难等,特别是伦理问题,使得投射伤的研究越来越无法满足基础研究和临床救治的需要,而利用有限元仿真模拟技术进行人体生物力学研究具有实验条件要求低,风险小,实验重复性好,数据采集分析便利等优势,特别是可以针对人体进行研究,不存在伦理问题,弥补了传统生物力学实验方法的不足。本研究即通过实验 CVH 头面部 CT 扫描数据建立人下颌骨投射伤有限元模型并进行了动态损伤模拟和生物力学对比分析,该模型与真实人体具有很高的解剖结构及生物力学性质,可以真实反映人体的损伤过程,其次该模型可以随意装配不同的致伤条件和方式,进行动态模拟和生物力学分析,使用范围广泛,与此同时,相关模拟实验要求较低,一般家用 PC 电脑均能进行,且可以重复使用,实验数据采集分析方便,结果直观且易于储存。

生物力学动态模拟过程中能量是否守恒是保证模拟运算正常进行和模拟结果真实可靠的前提,如模拟过程中出现能量不守恒,则将会大大降低模拟结果的可信度<sup>[7]</sup>。本研究对整个投射过程中的能量守恒进行了验证,由图 2 可以看出,整个模拟过程是一个动能明显下降,内能明显上升的过程,也就是投射物动能转化为下颌骨内能的过程,整个过程中总能量无明显降低,沙漏能小于 1%,表面本次模拟过程符合真实情况下能量转化和守恒规律,从而保证了模拟结果的可信度。

生物力学分析中力学指标的采用十分重要,由于传统实验条件的限制,使得以往投射伤生物力学分析的指标大多为单向应力、单向应变、压力、损伤后形态等,无法全面反映和分析投射过程中的动态损伤过程,本实验采用了 Von Mises 应力、有效应变、能量损耗值和能量损耗率等治疗进行生物力学对比分析,Von Mises 应力是一个综合性应力指标,主要用于反映组织屈服断裂和总体应力情况,在骨组织生物力学分析研究中应用十分广泛<sup>[8]</sup>,如图 4 所示,在投射物撞击到下颌骨颏部瞬间,于撞击部位出现应力并迅速形成高应力区域,随后应力快速向四周扩散,并于下颌角、髁状突等部位出现部分的高应力区,随着投射物穿透下颌骨后,应力迅速减弱并消失,投射速度越快,高应力范围越广,持续时间越久。有效应变又称为 Von Mises 应变,是指物体在 Von Mises 应力作用下产生的形变<sup>[9]</sup>,它与 Von Mises 应力一样,是一个综合性的指标,主要用于判断骨

组织的屈服和断裂。如图 5 所示,有效应变的动态分布趋势与应力相似,但高应变区域主要集中在伤道周围,其他部位无明显大范围高应变区域出现,且应变持续时间较应力长,减弱和消失速度较应力慢。从能量消耗值和能量消耗率的对比来看,速度越快,弹头消耗的能量值越高,即说明投射物杀伤力更高,组织受损更为严重,而投射物的能量损耗率却随着速度的增加而降低,说明初始速度越快,投射物本身能量损耗越小,越能保持稳定的投射穿透效果。

综上所述,随着计算机模拟技术在医学领域的广泛使用,使得传统生物力学方法无法解决的问题得到了有效的解决,本研究通过利用 CVH 头面部 CT 扫描数据建立人下颌骨投射伤三维有限元模型,设定了高、中、低等 3 种不同的投射速度,动态模拟 7.62 mm 弹头投射下颌骨颏部的动态损伤过程,并选取了 Von Mises 应力、有效应变、能量损耗值和能量损耗率等生物力学治疗进行生物力学对比分析,探讨了投射物与下颌骨之间的相互力学作用及效应,为口腔颌面部投射伤基础研究、临床救治提供新的思路和数据参考。

### 参考文献

- [1] Xavier SP, Pontes Cde D, Silva ER, et al. Three-stage mandible reconstruction after firearm injury[J]. *J Craniofac Surg*, 2013, 24(1): 34-37.
- [2] Rancic N, Erceg M, Radojevic N, et al. Medicolegal characteristics of firearm homicides in belgrade, serbia: before, during, and after the war in the former yugoslavia [J]. *J Forensic Sci*, 2013, 58(6): 1549-1553.
- [3] Rong J, Wang Q, Liu K, 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] Tang Z, Tu W, 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.
- [5] Chen Y, Miao Y, 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.
- [6] Bège T, Ménard J, Tremblay J, et al. Biomechanical analysis of traumatic mesenteric avulsion[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2014, 53(2): 187-194.
- [7] Tang X, Paluszny AW, Zimmerman R. Energy conservative property of impulse-based methods for collision resolution[J]. *Inter J Numeric Meth Engin*, 2013, 95(6): 529-540.
- [8] 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.
- [9] Liu XF, Cao D, Mei H, et al. Effect of particle shapes on effective strain gradient of Sic particle reinforced aluminum composites [J]. *J Phy Confer Ser*, 2013, 419(1): 5293-5304.