

DOI:10.3724/SP.J.1008.2011.00845

人下颌骨颏部正中位置枪弹伤的有限元动态模拟及分析

唐震^{1,2}, 周中华², 张绍祥³, 张纲¹, 陈渝斌¹, 雷涛¹, 谭颖徽^{1*}

1. 第三军医大学新桥医院口腔科, 重庆 400037
2. 第二军医大学长海医院口腔科, 上海 200433
3. 第三军医大学基础医学部人体解剖学教研室, 重庆 400037

[摘要] **目的** 采用有限元方法建立颌面部枪弹伤模型, 并对人下颌骨颏部正中位置枪弹伤的致伤过程及损伤程度进行动态模拟和分析, 探讨建立人下颌骨枪弹伤模型的新方法。 **方法** 在以往动物实验建模方法及内置参数的基础上, 利用数字化人下颌骨的 CT 扫描数据建立人下颌骨的三维有限元模型; 动态模拟不同投射条件下下颌骨颏部正中位置枪弹伤的发生过程; 计算不同投射物以不同初速度及不同角度入射后的终末速度及其穿出下颌骨后的能量损耗数值及能量损耗率; 并对所得数据进行比较分析。 **结果** 成功模拟了 2 种投射物以 3 种初速度及 3 种入射角度击伤人下颌骨颏部正中位置的动态过程及下颌骨受损伤后各部位的应力分布情况。对模拟数据进行计算后分析发现, 致伤条件不同, 下颌骨受损伤的严重程度及投射物的致伤效率也不同。 **结论** 运用有限元的方法可动态模拟人下颌骨颏部正中位置枪弹伤的致伤过程, 并对相关数据进行比较分析, 以研究不同致伤条件下下颌骨受损伤的严重程度及投射物的致伤效率。

[关键词] 下颌骨; 创伤弹道学; 有限元分析; 数值模拟; 生物力学

[中图分类号] R 782.4 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2011)08-0845-06

Dynamic simulation and finite element analysis of gunshot wounds to the center of mandible mental region in human

TANG Zhen^{1,2}, ZHOU Zhong-hua², ZHANG Shao-xiang³, ZHANG Gang¹, CHEN Yu-bin¹, LEI Tao¹, TAN Ying-hui^{1*}

1. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Xinqiao Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400037, China
2. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China
3. Department of Anatomy, College of Medicine, Third Military Medical University, Chongqing 400037, China

[Abstract] **Objective** To establish a finite element model of gunshot wound on the maxillofacial region in human, and to conduct dynamic simulation and analysis of the injury process and degree of gunshot wounds to the center of mandible mental region, so as to explore a new method for establishing a gunshot wound model of human mandible. **Methods** Based on the existing modeling method and internal parameters, digital CT scan data of human mandible were used to establish a three-dimensional finite element model of human mandible, which was used to dynamically simulate the process of gunshot wounds to the center of mandible mental region under different shot conditions. The residual velocities of the shootings with different projectiles at different entry angles and different impact velocities were calculated; the energy loss of the projectile and the rate of energy loss after exiting the mandible were also calculated; and the obtained data were compared and analyzed. **Results** The dynamic processes of gunshot wounds to the center of mandible mental region with two projectiles, three impact velocities, and three entry angles were successfully simulated. Meanwhile, the simulation was also done for the stress distribution in different parts of mandible after injury. Computation and the analysis of the modeling data showed that the severity of injuries and the injury efficiency of projectiles differed with different injury conditions. **Conclusion** Finite element model can dynamically simulate the injury process of gunshot wounds to the center of mandible mental region. It is found that the injury severity on mandible and the injury efficiency vary under different injury conditions. The finite element model is a potentially ideal model for studying the maxillofacial gunshot wounds.

[Key words] mandible; wound ballistics; finite element analysis; numerical simulation; biomechanics

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2011, 32(8): 845-850]

颌面部处于身体的暴露位置, 无论是自伤还是 他伤, 都是枪弹伤的好发部位。由于枪弹本身的形

[收稿日期] 2011-04-11 **[接受日期]** 2011-07-19

[作者简介] 唐震, 博士生, 讲师、主治医师。E-mail: tangzhen1999@sohu.com

* 通信作者(Corresponding author). Tel: 023-68755632, E-mail: tanyhome@yahoo.cn

状、质量,入射角度、速度的不同,颌面部枪弹伤不仅能导致颌面部的严重损伤,而且还可能造成邻近器官的损伤,使伤情更加复杂化^[1-3]。然而,目前对于颌面部枪弹伤的研究主要集中在创伤的救治及修复重建上,对于枪弹伤模型的建立及生物力学分析等弹道学的基础研究相对较少。传统的枪弹伤模型虽然可以较真实地模拟人体组织遭受枪弹打击时的损伤情况,但是随着科技和社会的发展,也逐渐表现出自身的缺陷。因此,我们需要采用新的方法来建立更加理想的致伤模型。

我们在以往动物实验建模^[4]的基础上,建立了人下颌骨枪弹伤的三维有限元模型,以动态模拟下颌骨枪弹伤的发生过程及下颌骨遭受不同速度及不同入射角度的子弹及钢珠打击时各部位的受力情况;并通过计算,比较不同形状、质量的投射物以不同速度及不同入射角度致伤后下颌骨的损伤程度及投射物的致伤效率。采用有限元的建模方法研究人颌面部枪弹伤具有许多优势,也许能够成为研究颌面部枪弹伤的理想的新方法。在我们前期研究中,运用此模型模拟并分析了下颌角位置的枪弹伤致伤过程及应力分布情况^[5];本研究进一步对下颌骨颈部正中位置的枪弹伤进行有限元动态模拟及结果分析。

1 材料和方法

1.1 有限元模型 采用我们前期实验建立的人下颌骨枪弹伤三维有限元模型^[5],在这里再作一个简要的介绍。我们采用中国首例女性可视化数字人^[6](22岁,1.62 m)头颈部CT的扫描数据,层厚为 1.0×10^{-2} m。以医学数字图像和通讯(digital imaging and communications in medicine, DICOM)标准保存并导出。共获取头颈部原始数据217张,其中涉及下颌骨的79张。将这些数据导入MIMICS软

件中(MIMICS 10.0, Materialise Inc., Belgium),获得下颌骨的面网格,用相同的方法获得下颌松质骨及下颌神经管的面网格。接着,将这些下颌骨的面网格化模型输入到结构分析软件 ANSA 里自动生成网格(ANSA 12.03, BETA CAE Systems S. A., Greece)。在网格的基础上划分单元和节点,为使模型的计算精确度更高,整个下颌骨基本采用六面体单元,为了使单元在枪弹多角度投射时形成动态的分离和飞溅效果,我们将下颌骨体部的所有单元进行节点分离。根据下颌松质骨面网格的范围定义单元的性质,以确定皮质骨与松质骨的界限。依据下颌神经管的面网格走向,去除模型内部分单元形成下颌神经管,使模型更接近于真实的解剖情况。由于牙齿不是我们主要关注的对象,我们假设其为下颌骨的一部分并具有与皮质骨相同的机械性能。最终我们得到的下颌骨模型有275 216个单元(其中四面体单元30 024个,六面体单元245 192个),1 387 101个节点,并将其设定为各向同性的均质材料。

直径 7.62×10^{-2} m尖鼻子弹(7.92×10^{-3} kg)的有限元模型由4 692个8节点的六面体单元及5 076个节点组成。直径 6.3×10^{-2} m钢珠(1.03×10^{-3} kg)的有限元模型由3 584个8节点的六面体单元及3 817个节点组成。下颌骨、子弹及钢珠的单元大小为 $0.2 \times 10^{-2} \sim 3.0 \times 10^{-2}$ m,在网格中单元的最大长宽比不超过5。由于子弹是由碳素钢内芯及铜金属外壳组成,因此在本分析中子弹与钢珠均被分类为低碳钢材料。在将有限元模型导入LS-DYNA 970中计算时,定义下颌骨、子弹和钢珠的材料型号采用 τ -MAT type 24中的 τ -MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTI-CITY命令。下颌骨、子弹及钢珠的材料性质参数见表1所示。

表1 有限元模型材料力学参数

Tab 1 Mechanical parameters of the finite element model

Material properties	Cortical bone	Trabecular bone	Bullet and steel ball (low-carbon steel)
Young's modulus p /MPa	13 700	1 370	210 000
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.284
Yield stress p /MPa	50	1.8	260
Failure strain (%)	0.44	1.5	0.33

1.2 数值模拟 数值模拟采用非线性有限元代码LS-DYNA 970。具体方法参照以往的实验^[5]。节点的塑性失效应变参数为0.1。骨-金属界面摩擦系数设定为0.44。LS-DYNA分析中需要的失效参数如表1所示。

在我们的模拟中,髁状突区域的有限元单元在X、Y、Z方向上都是固定不动的。整个模拟过程时长 5.0×10^{-4} s,时间间隔为 1.0×10^{-6} s。使用LS-DYNA的后处理软件LS-PREPOST模拟并测量子弹及钢珠击中模型后各部位的受力情况。所有的有

限元分析都由个人电脑完成,采用英特尔酷睿 2 四核处理器 Q8200,4 G 内存。数值模拟时 CPU 的平均运算时间是 32~38 h。

在模拟过程中,我们为子弹及钢珠设定了 3 种入射角度,以下颌骨颞部正中位置为入射点,入射方向分别与下颌骨的冠状面成 90° 、 67.5° 、 45° 角。我们为子弹及钢珠设定了 3 种初速度,分别为 400、734、1 109.185 m/s,734 m/s 是建立猪下颌骨模型时所采用的初速度的平均值,选择 400 m/s 是为了研究投射物低速投射时下颌骨的受力情况,1 109.185 m/s 速度的确定是为了比较下颌骨在受到初始动能相同,但质量、初速度及形状不同的物体投射时的受力情况(根据动能的计算公式 $E = mv^2/2$, 1.03×10^{-3} kg 的钢珠以 1 109.185 m/s 的初速度入射与 7.92×10^{-3} kg 的子弹以 400 m/s 的初速度入射时产生的动能相同)。

通过模拟,我们分别计算出了子弹及钢珠以不同初速度及不同角度穿过下颌骨颞部正中时的终末速度,并运用公式 $\Delta E = m(v_1^2 - v_2^2)/2$ 计算出投射物的能量损耗数值(ΔE 为能量损耗数值, m 代表投

射物质量, v_1 代表初速度, v_2 代表终末速度),以研究子弹及钢珠以不同速度及不同角度击穿下颌骨颞部正中位置后对下颌骨造成的破坏力的大小。在此基础上,我们还可以计算出能量损耗率,以研究投射物的致伤效率。能量损耗率 = $\Delta E / \text{投射物初始动能} \times 100\%$ 。

1.3 数据分析 表 2 列出了子弹及钢珠以不同初速度及不同角度入射后的终末速度、初始动能及其穿出下颌骨后的能量损耗数值及能量损耗率。我们将表 2 中的数据加以整理并以柱形图的方式进行了以下分析:(1)当入射初速度相同时,比较不同的投射物以不同角度投射时,能量损耗数值及损耗率是否存在差异。(2)当入射角度相同时,比较不同的投射物以不同初速度投射时,能量损耗数值及损耗率是否存在差异。(3)当入射初速度及投射角度均相同时,比较不同投射物投射时能量损耗数值及损耗率是否存在差异。(4)当入射初始动能及入射角度相同时(子弹 400 m/s 入射与钢珠 1 109.185 m/s 入射初始动能相同),比较子弹及钢珠的能量损耗数值及损耗率是否存在差异。

表 2 子弹及钢珠在不同投射条件下入射下颌颞部正中位置时的剩余速度、初始动能、能量损耗及能量损耗率

Tab 2 Residual velocity, initial kinetic energy, energy loss and rate of energy loss of the bullet and steel ball under different shot conditions to the center of human mandible mental region

Projectile and impact velocity	Residual velocity $v/(m \cdot s^{-1})$			Initial kinetic energy E/J	Energy loss E/J			Rate of energy loss (%)		
	45°	67.5°	90°		45°	67.5°	90°	45°	67.5°	90°
1	368.992	379.811	386.976	633.600	94.426	62.345	40.588	14.90	9.84	6.41
2	705.035	712.534	721.334	2 133.474	165.059	122.963	72.995	7.74	5.76	3.42
3	1 080.320	1 088.420	1 096.440	4 871.954	250.272	180.708	111.318	5.14	3.71	2.28
4	232.547	264.807	309.616	82.400	54.550	46.287	33.031	66.20	56.17	40.09
5	563.159	578.061	634.858	277.459	114.128	105.370	69.891	41.13	37.98	25.19
6	956.097	964.180	1 001.540	633.600	162.827	154.834	117.013	25.70	24.44	18.47

1: Bullet at 400 m/s; 2: Bullet at 734 m/s; 3: Bullet at 1 109.185 m/s; 4: Steel ball at 400 m/s; 5: Steel ball at 734 m/s; 6: Steel ball at 1 109.185 m/s

2 结果

2.1 模型建立情况 成功模拟出 7.62×10^{-2} m 子弹及 6.3×10^{-2} m 钢珠以不同速度及不同入射角度击穿下颌骨颞部正中位置时的动态过程以及下颌骨各部位所受应力的动态变化情况。截选了子弹及钢珠以 734 m/s 初速度,3 种不同角度击穿下颌骨后(时间为 1.8×10^{-4} s)下颌骨损伤状态及应力分布情况的图像(图 1、2)。

2.2 数据分析结果 通过对表 2 的数据进行分析,我们可以直观地比较得出以下结果:(1)在投射物入射初速度相同的条件下(无论是子弹还是钢珠),当入射角度为 45° 时,能量损耗数值及能量损耗率最

大, 67.5° 次之, 90° 入射时,能量损耗数值及能量损耗率最小(图 3A,图 4A)。(2)在投射物入射角度相同的条件下(无论是子弹还是钢珠),入射初速度越大,能量损耗的数值越大,但能量损耗率却越小(图 3B,图 4B)。(3)在投射物入射初速度及入射角度都相同的条件下,子弹的能量损耗数值在以 45° 及 67.5° 入射时均大于钢珠,但在入射角度为 90° 时,随着入射初速度的增加,钢珠的能量损耗数值大于子弹。但当入射初速度及入射角度相同时,钢珠的能量损耗率都明显大于子弹(图 3C,图 4C)。(4)在投射物入射初始动能及入射角度相同的条件下,钢珠的能量损耗数值及损耗率均大于子弹(图 3D,图 4D)。

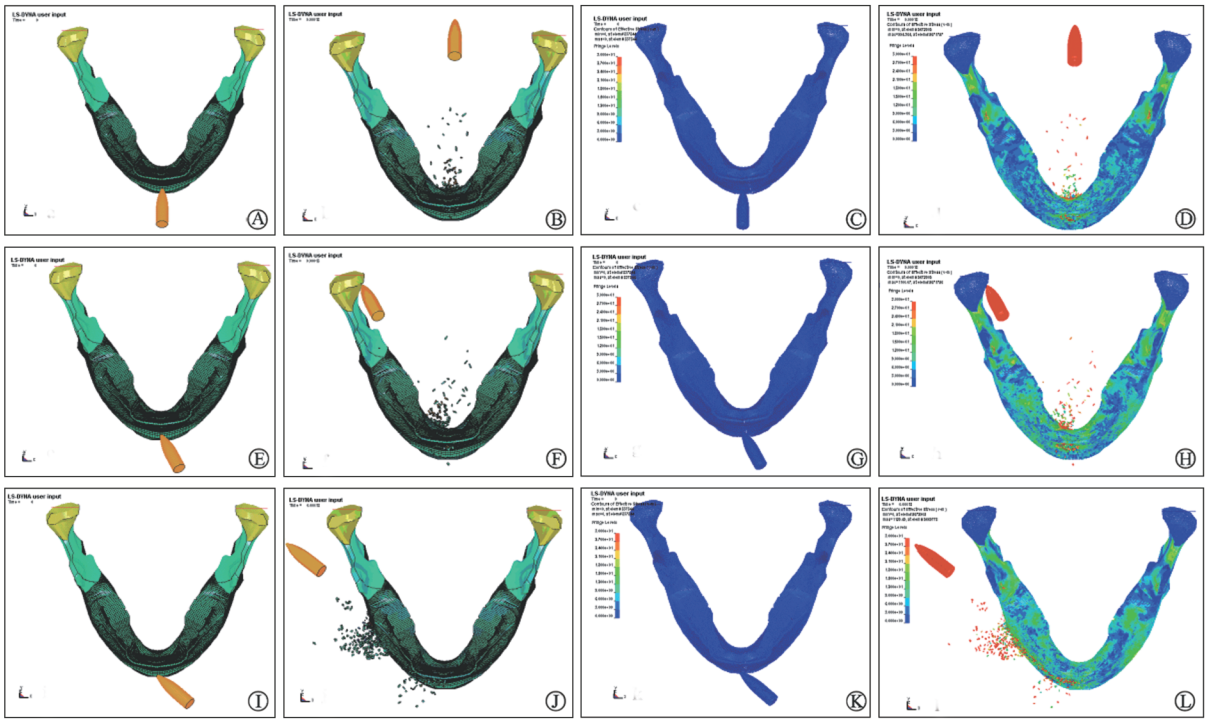


图 1 下颌颈部正中位置入射时,子弹以 3 种投射角度入射后下颌骨的损伤状态及应力分布情况

Fig 1 Damage of mandible and stress distribution after bullet penetrating mandible

at an impact velocity of 734 m/s with three different entry angles to the center of mandible mental region

A, E, and I: The initial states before the bullet penetrating the mandible with entry angles of 90° , 67.5° , and 45° , respectively; B, F, and J: The damage states after the bullet penetrating the mandible with entry angles of 90° , 67.5° , and 45° , respectively; C, G, and K: The stress distribution before the bullet penetrating the mandible with entry angles of 90° , 67.5° , and 45° , respectively; D, H, and L: The stress distribution after the bullet penetrating the mandible with entry angles of 90° , 67.5° , and 45° , respectively

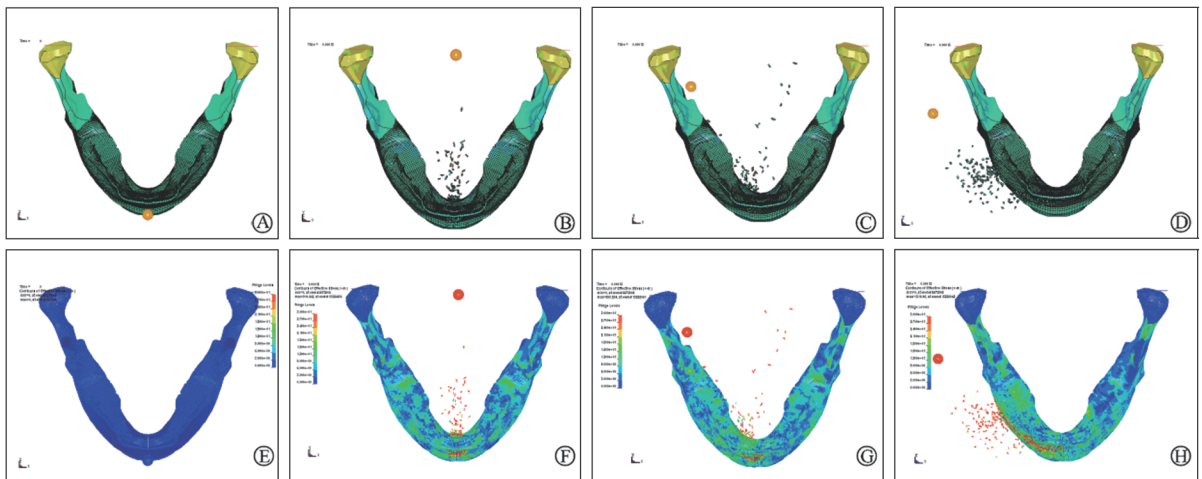


图 2 下颌颈部正中位置入射时,钢珠以 3 种投射角度入射后下颌骨的损伤状态及应力分布情况

Fig 2 Damage of the mandible and stress distribution after steel ball penetrating mandible

at an impact velocity of 734 m/s with three different entry angles to the center of mandible mental region

A: The initial states before the steel ball penetrating the mandible with three entry angles; B, C, and D: The damage states after the steel ball penetrating the mandible with entry angle of 90° , 67.5° , and 45° , respectively; E: The stress distribution before the steel ball penetrating the mandible with three entry angles; F, G, and H: The stress distribution after the steel ball penetrating the mandible with entry angles of 90° , 67.5° , 45° , respectively

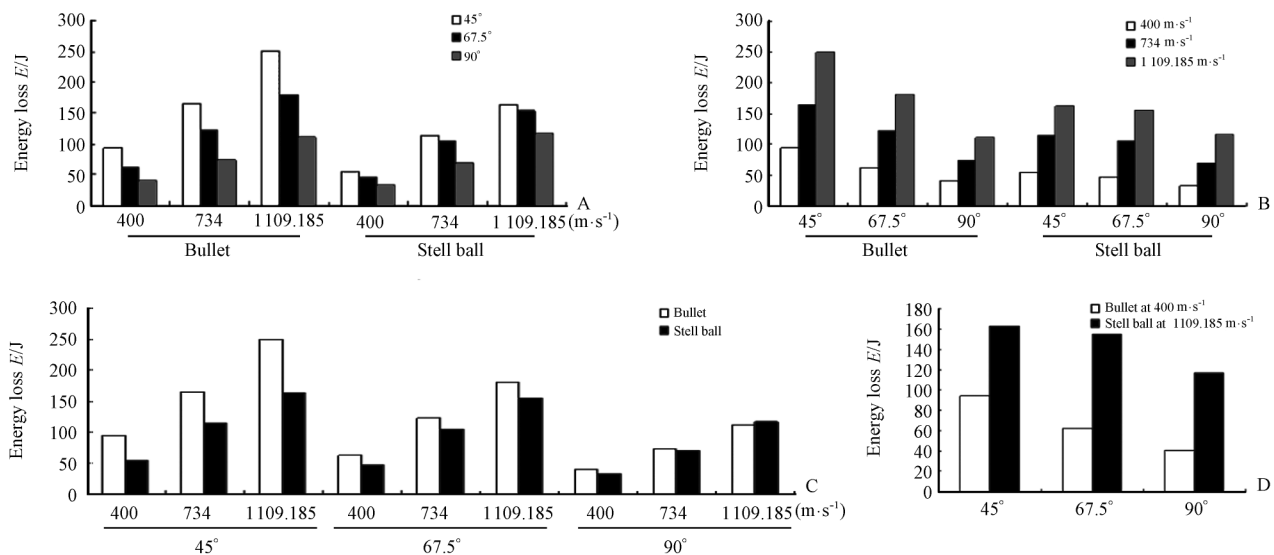


图 3 下颌颈部正中位置入射时,不同投射条件下投射物能量损耗数值比较的柱形图

Fig 3 Comparison of energy losses of projectiles under different shot conditions in the center of human mandible mental region

A: Comparison of the energy losses of bullet and steel ball with same impact velocity and different entry angles; B: Comparison of the energy losses of bullet and steel ball with different impact velocities and same entry angle; C: Comparison of the energy losses of bullet and steel ball with same impact velocity and same entry angle; D: Comparison of the energy losses of bullet and steel ball with same initial kinetic energy and same entry angle

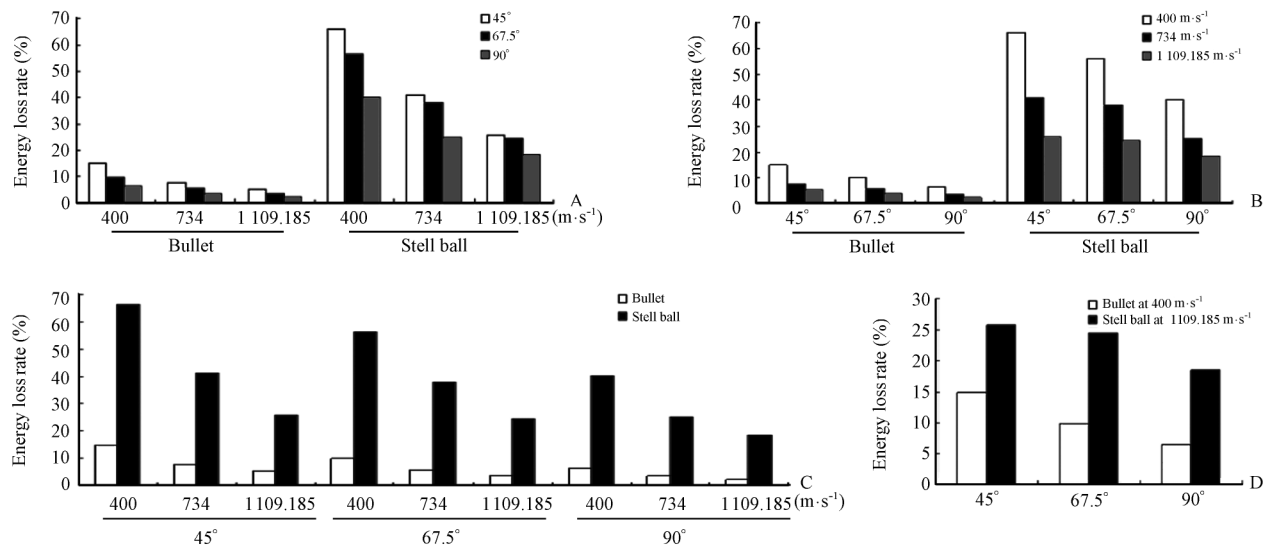


图 4 下颌颈部正中位置入射时,不同投射条件下投射物能量损耗率比较的柱形图

Fig 4 Comparison of energy loss rates of projectiles under different shot conditions in the center of human mandible mental region

A: Comparison of the energy loss rates of bullet and steel ball with same impact velocity and different entry angles; B: Comparison of the rates of energy loss of bullet and steel ball with different impact velocities and same entry angle; C: Comparison of the rates of energy loss of bullet and steel ball with same impact velocity and same entry angle; D: Comparison of the rates of energy loss of bullet and steel ball with same initial kinetic energy and same entry angle

3 讨论

目前关于枪弹伤救治的研究不少,主要集中在

躯干、四肢及头颈部,而关于颌面部枪弹伤的研究较少。由于颌面部位置暴露,是自伤和他伤的好发部位,此部位的枪弹伤无论是救治还是修复重建都极

具挑战性^[7-9]。因此,颌面部的枪弹伤更应当引起我们的高度重视。然而,要透彻地研究枪弹伤的致伤过程和生物力学机制,必须建立理想的致伤模型。理想的模型应当具备以下特性:(1)它应当具有与人体相似的解剖结构及生物力学性质;(2)直观动态,易于观察分析各部位的受力情况,可以再现致伤的全过程;(3)模型具有可重复性,结果易于储存;(4)实验数据易于采集,方便计算。

有限元法是在工程科学技术领域广泛应用的数学方法。1973年,Thresher等^[10]首先将有限元法应用于口腔医学生物力学研究,经过近40年的发展,有限元法已经成为口腔生物力学研究中一种有效的分析工具,被广泛应用于口腔医学的各个领域。Maurer等^[11]认为:有限元法适用于颌面部复杂的力学分析,既节约时间,结果又可靠,避免了动物实验的不足。

在运用三维有限元模型动态模拟下颌骨枪弹伤的过程中,我们发现有限元模型的优势在于:(1)可以任意调整投射物的入射部位、入射角度及初速度;在已知投射物材料参数及几何形状等数据时,还可以模拟不同投射物入射的情况。(2)可以选择模型中任意部位作为研究对象,甚至可以剖开模型,选择其中的任何一个单元,动态观察其在枪击过程中的受力情况。这就使我们有条件快速模拟真实情况下,下颌骨任何部位在遭受任何方向、任何速度、任何类型的投射物射击时的致伤情况。(3)建立的有限元模型可反复使用,无论加载的条件发生何种改变,所选定研究对象的初始状态始终保持不变,保证了各研究模型间的结果具有可比性。这是其他传统模型所不能企及的。因此,我们认为三维有限元模型具备成为理想的人颌面部枪弹伤研究模型的条件。

然而,我们目前建立的人下颌骨枪弹伤的三维有限元模型也存在自身的不足:首先,由于医学伦理学的限制,无法采用尸体模型来获得枪弹伤的实验数据,因此,无法对此模型进行验证。我们只能以动物实验验证后的猪下颌骨枪弹伤有限元模型的内置参数为基础来完成模型的建立。因此,我们建立的人下颌骨枪弹伤三维有限元模型计算得到的具体数值与真实状态下的测量数值可能存在差异,但是有限元分析法的优势在于能够对力传导的趋势进行准确的模拟。因此,我们的结论对于枪弹伤情况下,下颌骨损伤趋势的描述接近于真实。其次,真实的人体颌面部既有骨组织也有软组织,受到枪弹伤后的受力情况更加复杂,我们建立的模型只有下颌骨的硬组织,且设定的状态是髁状突固定不动的。因此,

模型对于枪弹伤发生过程的模拟与真实情况存在差异。但是,由于目前个人电脑的软硬件功能有限,只能适当的简化模型,以初步研究枪弹伤情况下颌骨的应力分布情况及受损伤的严重程度。我们需要在今后的研究中不断修正这些缺陷,完善模型。

综上所述,本研究建立的人下颌骨枪弹伤的三维有限元模型可以动态模拟出不同投射物以不同速度及不同角度投射下颌颌部正中时下颌骨受损伤的过程及下颌骨各部位在任意时间点的应力分布情况,同时也可以模拟出投射物及碎骨片在致伤过程中的运行轨迹。三维有限元模型在下颌骨枪弹伤的生物力学分析方面具有诸多优点,也许可以成为研究颌面部枪弹伤的理想模型。

[参考文献]

- [1] Glapa M, Kourie J F, Doll D, Degiannis E. Early management of gunshot injuries to the face in civilian practice [J]. *World J Surg*, 2007, 31: 2104-2110.
- [2] Tan Y, Zhou S, Liu Y, Li Z. A gross and microscopic study of cerebral injuries accompanying maxillofacial high-velocity projectile wounding in dogs [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 1998, 56: 345-348.
- [3] 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: 552-556.
- [4] Chen Y, Miao Y, Xu C, Zhang G, Lei T, Tan Y. Wound ballistics of the pig mandibular angle: a preliminary finite element analysis and experimental study [J]. *J Biomech*, 2010, 43: 1131-1137.
- [5] Tang Z, Tu W, Zhang G, Chen Y, Lei T, Tan Y. Dynamic simulation and preliminary finite element analysis of gunshot wounds to the human mandible [J]. *Injury*, 2011 Apr 13. [Epub ahead of print] (DOI: 10.1016/j.injury.2011.03.012).
- [6] Zhang S X, Heng P A, Liu Z J, Tan L W, Qiu M G, Li Q Y, et al. The Chinese Visible Human (CVH) datasets incorporate technical and imaging advances on earlier digital humans [J]. *J Anat*, 2004, 204 (Pt 3): 165-173.
- [7] Labb D, Nicolas J, Kaluzinski E, Soubeyrand E, Delcampe P, Sabin P, et al. Gunshot wounds: two cases of midface reconstruction by osteogenic distraction [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2009, 62: 1174-1180.
- [8] Stuehmer C, Essig H, Schramm A, Rücker M, Eckardt A, Gellrich N C. Intraoperative navigation assisted reconstruction of a maxillo-facial gunshot wound [J]. *Oral Maxillofac Surg*, 2008, 12: 199-203.
- [9] Laure B, Sury F, Martin T, Chabut A, Goga D. Reconstruction of bony mandibular and maxillary defects with one single transfer of a free fibula osteocutaneous flap [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2008, 61: 200-203.
- [10] Thresher R W, Saito G E. The stress analysis of human teeth [J]. *J Biomech*, 1973, 6: 443-449.
- [11] Maurer P, Knoll W D, Schubert J. Comparative evaluation of two osteosynthesis methods on stability following sagittal split ramus osteotomy [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2003, 31: 284-289.