

[文章编号] 1000-1182(2007)02-0192-03

# “微植体-上颌骨”三维有限元模型的建立

邓 锋<sup>1</sup>, 张 磊<sup>2</sup>, 张 翼<sup>2</sup>, 宋锦璘<sup>2</sup>, 樊瑜波<sup>1</sup>

(1.四川大学建筑与环境学院 生物力学工程实验室, 四川 成都 610044;

2.重庆医科大学附属口腔医院 正畸科, 重庆 400015)

[摘要] 目的 探索基于Mimics医学图像处理系统的CT法快速建模新思路, 建立几何相似性好、可灵活组装、含微植体的上颌骨三维有限元模型。方法 以牙列完整的成人上颌骨为标本, 作螺旋CT扫描后将图像传输至Mimics系统进行三维重建, 再运用Abaqus对三维模型进行网格划分后建立有限元模型。结果 获得几何相似性好、可拆卸的三维有限元模型; 探索出一条基于Mimics的生物力学模型快速建模新方法。结论 应用高精度螺旋CT成像、Mimics和Abaqus相结合的方法建立含微植体的上颌骨三维有限元模型是切实有效和可行的。Mimics系统有助于快速建模及提高模型的几何相似性。

[关键词] 三维有限元; 微植体; 支抗; Mimics软件

[中图分类号] R783.5 [文献标识码] A

Construction of the Three-dimensional Finite Element Model of Micro-implant-maxilla DENG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, SONG Jin-lin<sup>2</sup>, FAN Yu-bo<sup>1</sup>. (1. Biomechanical Engineering Laboratory, College of Architecture and Environics, Sichuan University, Chengdu 610044, China; 2. Dept. of Orthodontics, Affiliated Hospital of Stomatology, Chongqing University of Medical Sciences, Chongqing 400015, China)

[Abstract] Objective To explore a new method to construct the three-dimensional finite element model of micro-implant-maxilla using Materialise's interactive medical image control system(Mimics). Methods The maxilla with all teeth was scanned with Spiral CT and the images were transferred into the Mimics 9.0 software to obtain the three-dimensional images. The Abaqus 6.5 software was used to mesh the three-dimensional model and to establish the finite element model. Results A detachable three-dimensional finite element model of micro-implant-maxilla based on Mimics was constructed rapidly, which can be flexibly re-assembled. Conclusion The method of constructing the three-dimensional finite element model of micro-implant-maxilla is available and effective. The geometrical analogy of the model was greatly improved by using the Mimics system.

[Key words] three-dimensional finite element; micro-implant; anchorage; Mimics software

微植体支抗(micro-implant anchorage)是近年来出现的一种新型正畸支抗形式, 它因可为正畸牙移动提供所谓的“绝对支抗”<sup>[1-2]</sup>而被越来越广泛地运用。由于支抗微植体的直径、长度、植入部位的力学特征以及其载荷加力方式等均与传统牙科种植体存在较大差异<sup>[3]</sup>。因此有必要建立一个能灵活重构、含微植体的上颌骨三维有限元模型, 使之能方便地研究微植体植入上颌某一区域时的生物力学性质。本研究旨在建立含微植体的上颌骨三维有限元模

型, 并拟通过该研究探索出由高精度CT成像、Mimics软件三维重建、Abaqus有限元计算建立快速、开放型生物力学模型的新思路。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

经防腐处理的成人头颅标本1例, 其牙弓形态基本对称, 牙列完整, 咬合关系良好, 牙冠解剖形态及牙根长度正常。

### 1.2 头颅标本螺旋CT扫描和三维重建影像的获取

应用美国GE公司的64排lightspeed VCT从颅顶至下颌骨下缘对头颅标本进行连续扫描, 扫描参数为: 间距0.5 mm, 每两层之间重叠0.2 mm, 共得到784张断层图像, 以DICOM3格式存储。在Hp workstation xw6200计算机上使用Mimics 9.0软件

[收稿日期] 2006-04-04; [修回日期] 2006-10-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(10572160); 重庆市科委科研基金资助项目(CSTC2005BB5265); 重庆市卫生局科研基金资助项目(04-2-001)

[作者简介] 邓 锋(1963-), 男, 四川人, 教授, 学士

[通讯作者] 樊瑜波, Tel: 13520075501

(Materialise公司, 比利时)读取CT断层图像数据, 根据图像数据中各种组织的灰度值(gray value)差异及相关解剖学特征, 在Mimics 9.0里通过阈值化操作, 分别提取上颌骨及各个牙齿的相关结构信息, 并重建其精确的3D表面体模型(图1)。将上述模型分别以STL文件格式输出到逆向工程软件中去除掉噪点和边缘部分, 利用点云数据运算出无缝的多边形, 再以IGES格式输出。

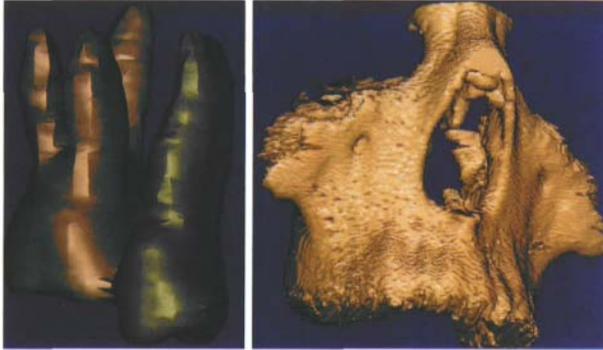


图1 基于Mimics 9.0构建的牙齿及上颌骨3D表面体模型

Fig 1 The three-dimensional surface volume model of teeth and maxilla made by Mimics 9.0

### 1.3 含微植体的上颌骨三维有限元模型的建立

在Abaqus 6.5软件中读取所建立的IGES格式的上颌骨及牙齿模型数据, 通过布尔运算将颌骨与所选牙齿组合到一起, 得到了包括牙齿的上颌骨模型。因微植体形状比较规则, 故可在Abaqus 6.5软件的前处理程序中获得其几何模型。根据临床上常用微植体的外形尺寸, 定义模型中微植体骨内段长度为7 mm, 直径1.3 mm。微植体植入位置选在上颌骨第二前磨牙和第一磨牙牙根之间、距离牙颈部垂直距离为6 mm处, 微植体的长轴与皮质骨表面垂直。

模型中的各种材料都假设为均质、各向同性的线弹性材料, 材料变形为小变形。在模拟过程中, 使用束缚(tie)约束将牙齿和微植体约束在上颌骨上, 各种结构在加载后不发生相对滑动。材料的弹性模量和泊松比如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 模型中各组成部分的材料特性

Tab 1 The ingredients material characteristics of the three-dimensional finite element model

材料	杨氏弹性模量(MPa)	泊松比( $\mu$ )
皮质骨	13 700.00	0.30
松质骨	1 370.00	0.30
釉质	69 000.00	0.28
牙本质	18 600.00	0.31
牙周膜	68.90	0.45
牙髓	2.07	0.45
微植体	103 000.00	0.35

选用C3D4单元对模型主体部分进行自动网格划分。因上颌皮质骨薄且不均匀, 不能从图像上准确分辨, 因此在颊侧皮质骨用1.3 mm壳单元模拟, 腭侧的用1.7 mm壳单元模拟; 牙周膜厚度假设为0.25 mm, 也用壳单元模拟。考虑到微植体附近区域可能产生的应力集中, 为保证计算结果的准确性, 对微植体及附近上颌骨区域进行了网格细化。最后得到了含有微植体和牙齿的上颌骨三维有限元模型。

## 2 结果

### 2.1 获得的三维有限元生物力学模型

获得了几何相似性优良、可根据需要快速进行组合、含微植体及部分牙的上颌三维有限元生物力学模型。最后的模型共得到41 065个节点, 225 629个单元, 其中含18 366个壳单元(图2)。在实际计算中为减小计算量, 通常只取上颌骨的一部分并将这部分的四周完全固定约束。

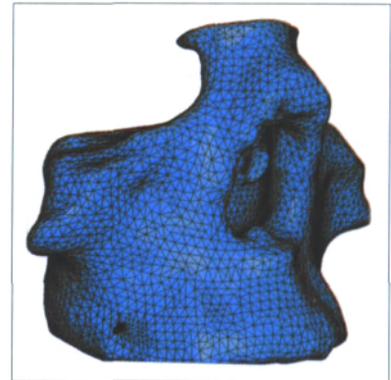


图2 含有微植体和第二前磨牙、第一磨牙的部分上颌骨三维有限元模型

Fig 2 The three-dimensional finite element model with micro-implant and the second bicuspid and the first molar

### 2.2 生物力学建模的新思路

探索出基于高精度CT成像-Mimics 9.0三维重建-Abaqus 6.5的生物力学建模的新思路。依照该技术路线可以得到颅面部任何部位的, 能区分颌骨组织、釉质、牙本质、牙髓腔等不同组织材料的, 几何相似性优良的三维有限元生物力学模型。每一部位的模型又可以分别建成各种器官的素材库, 在需要时可根据不同的研究目的, 通过布尔运算或其他假设将有关素材重新装配生成相应的模型。

## 3 讨论

### 3.1 经高精度CT成像、Mimics图像处理系统、Abaqus 6.5建模新思路的探讨

在现有的三维有限元生物力学模型建模方法中, 标本二维断面的生成与处理是决定模型几何相

似程度和结构相似性高低的关键。传统的建模方法多将标本进行切片、磨片或CT扫描后,再逐层测绘断面外形轮廓或者直接测取标本图像的三维形态坐标。其二维断面的建立与处理大多复杂粗糙、耗时耗力,且主观性较大。本研究所用的64排CT的图像空间分辨能力比以往的CT提高了近40倍。标本扫描的层厚为0.5 mm,再减去重叠的0.2 mm,其实际层间隔仅为0.3 mm,断面形态结构完整准确。在影像上能准确分辨出牙齿、髓腔、牙槽骨和颌骨等主要结构,因此三维重建所得的图像细致逼真,与生物实体真实结构具有良好的几何相似性,为进一步的计算提供了很好的基础。但另一方面,大量的CT图像靠人工根本无法处理,只能借助计算机及相关软件来进行三维重建。Mimics 9.0是比利时Materialise公司开发的交互式医学图像控制系统,它可以根据灰度值的差异直接识别CT断层图像的信息。Macchi等<sup>[6]</sup>利用Mimics 9.0快速三维重建以及模块化的特点,在为正畸治疗计划的制定提供精确的三维数字化模型方面进行了研究。本研究通过利用Mimics 9.0重建上颌骨三维模型,不但简化了以往研究中对CT断层图像处理 and 转化以提取其边缘轮廓线等繁琐过程,而且尽可能地减少了主观因素所造成的数据和信息的丢失,提高了模型的几何精度和结构相似性。

自从1973年Thresher<sup>[6]</sup>和Farah<sup>[7]</sup>将有限元分析法应用于口腔领域以来,该方法被广泛应用于口腔医学各个领域,显示出极大的优越性。在本研究中应用的Mimics和Abaqus软件均具备模块化的功能特点:1)在Mimics中重建三维模型时,可以从任意方向对图像进行切割,对各个器官分别进行单独重建,并方便地提取任何感兴趣的研究区域、部位的图像数字化信息。2)在Abaqus中,可以选择研究者感兴趣的方式去对模型素材进行组装;可以根据不同的研究内容,对模型的组装方式进行假设;能够直观地分析观察模型内部应力的分布状况;模型还可以按照给定的条件,完成添加单元的要求。这样不但避免了不必要的重复建模的麻烦,达到了生物力学模型模块化的目的,为进一步的生物力学研究提供了良好的研究平台,而且可以重复利用CT扫描信息,达到节约资源的目的。3)在本研究建立的模型中,上颌骨、上颌各牙齿和微植体等相互独立,可根据研究内容的实际需要任意调整微植体的植入位置和方向以模拟临床上各种不同的实际情况;也可以根据需要任意选取所需牙齿、任意调整牙齿的位置和方向以模拟临床中的正畸实例。这为以后的研究工作提供了极大的便利。

### 3.2 含微植体和部分牙的上颌骨三维有限元模型网格划分的考虑

有限元单元类型的选择和网格划分的精细程度决定了分析结果的准确性。一般情况下网格划分越密结果越好,然而有限元分析的负担也相应地加重。单元类型一般选择六面体和五面体,尽量避免使用四面体单元,特别是在可能存在应力变化梯度巨大的情况时,这样有利于提高计算精度和准确性。但是,由于上颌骨形状不规则,划分成六面体或五面体是非常困难的,故本模型仍选择了使用四面体和三角形单元。采用Abaqus 6.5的自由网格划分方式,在划分之前设置单元的尺寸控制。对釉质、牙本质、松质骨、微植体选择同一单元类型C3D4,C3D4是三维一次四面体单元,适合于不规则几何体的网格划分。对皮质骨和牙周膜采用壳单元模拟,使用S3单元,它是三角形壳单元。考虑到微植体附近区域可能产生的应力集中,对微植体及附近区域进行了网格细化。从图2可以看出,本模型的整体网格质量好,网格分布均匀,单个网格的质量高,边长相差悬殊的单元很少,这为保证取得良好的计算结果提供了基础。

#### [参考文献]

- [1] Kanomi R. Mini-implant for orthodontic anchorage[J]. J Clin Orthod, 1997, 31(11):763-767.
- [2] Deguchi T, Takano-Yamamoto T, Kanomi R. The use of small titanium screws for orthodontic anchorage[J]. J Dent Res, 2003, 82(5):377-381.
- [3] Ohmae M, Saito S, Morohashi T. A clinical and histological evaluation of titanium mimi-implants as anchors for orthodontic intrusion in the beagle dog[J]. Am J Orthod Dentofac Orthop, 2001, 119(5):489-497.
- [4] 樊瑜波, 张晓峰, 唐高妍. 生理载荷作用下上颌中切牙牙周膜应力分布的三维有限元研究[J]. 生物医学工程学杂志, 1999, 16(1):23-26.  
(FAN Yu-bo, ZHANG Xiao-feng, TANG Gao-yan. Three-dimensional finite element study on periodontal membrane of central maxillary incisor under physiological load[J]. J Biomedical Engineering, 1999, 16(1):23-26.)
- [5] Macchi A, Carrafiello G, Cacciafesta V, et al. Three-dimensional digital modeling and setup[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2006, 129(5):605-610.
- [6] Thresher RW. The stress analysis of human teeth[J]. J Biomech, 1973, 6(5):443-449.
- [7] Farah JW. Photoelastic and finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar[J]. J Biomech, 1973, 6(5):551-520.

(本文编辑 汤亚玲)