

DOI:10.3724/SP.J.1008.2010.00335

## 逆向工程建模法在种植修复的有限元研究中的应用

### Application of reverse engineering modeling method in finite element analysis of implant restoration

朱 强,汪大林\*,周 毅,邱小倩,王少海

第二军医大学长海医院口腔科,上海 200433

**[摘要]** **目的** 利用逆向工程法快速建立含下颌第一磨牙种植义齿的颌骨三维有限元模型,并对种植体周围骨组织进行有限元分析。**方法** 通过螺旋 CT 扫描正常下颌骨,利用逆向工程法建立下颌第一磨牙种植修复的三维有限元模型,加载颊向、垂直、水平 3 组作用力,分析种植体周围骨组织应力反应。**结果** 获得了满意的正常牙槽骨高度的下颌第一磨牙种植体三维有限元模型,包括种植体冠、种植体、皮质骨、松质骨 4 个部件。种植体周围骨组织应力在垂直加载下分布均匀、大小接近,而在水平向和颊向加载下分布于颊侧颈部的皮质骨内、应力集中。**结论** 利用逆向工程法建立的模型可以真实反映下颌第一磨牙种植体周围骨组织的应力情况,使有限元分析结果更接近真实。

**[关键词]** 磨牙;种植体;三维有限元分析;应力分布;逆向工程

**[中图分类号]** R 783.6 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 0258-879X(2010)03-0335-03

近年来随着电子计算机技术的飞速发展和各种功能齐全的大型分析软件的开发利用,使有限元分析技术可以应用到各种复杂问题的力学研究,并作为一种有效工具在口腔生物力学研究领域发挥作用。作为一种运用计算机技术的数值分析方法,三维有限元方法计算组织内的应力具有使用方便、对组织无损伤和不改变组织结果的特点<sup>[1]</sup>。本研究拟将 CT 扫描技术与逆向工程软件相结合,建立包含有下颌第一磨牙种植修复的下颌骨模型,并对下颌第一磨牙种植体周围的骨组织应力进行有限元分析,以针对下颌第一磨牙种植修复的真实情况进行尽可能精确的研究,为临床种植义齿的设计和分析提供相关依据。

### 1 材料和方法

**1.1 获取下颌骨 CT 片扫描图像数据** 健康男性志愿者 1 名,35 岁,颌骨发育正常,牙列完整,咬合关系良好,无牙周疾病。利用 SIEMENS Sensation16 型螺旋 CT 机及其工作站,对志愿者进行螺旋扫描及断面图像处理。扫描时,志愿者取仰卧位,口微张,使上、下牙列间保持 2 cm 距离,扫描断面与下颌第一磨牙牙体长轴垂直。

**1.2 建立下颌第一磨牙种植体修复的三维有限元模型** 利用 Mimics 重建下颌骨模型,并提取下颌第一磨牙牙冠。在 Pro/E 软件中获得下颌第一磨牙缺失的局部下颌骨以及下颌第一磨牙牙冠的三维重建实体模型。导入 SolidWorks 2007 软件中,分别赋予下颌骨和下颌第一磨牙不同的材质参数(弹性模量、泊松比、材料密度值,表 1<sup>[2-3]</sup>),获得下颌第一磨牙缺失的局部下颌骨和第一磨牙牙冠的三维有限元模型。

参照 Replace TiUnite™ 种植体(直径 4.3 mm,长度 13

mm),利用 SolidWorks 2007 软件基于特征的参数化建模技术,建立单种植体三维实体模型。应用 SolidWorks 2007 软件成形特征工具菜单构建双圆锥体模型。并插入局部下颌骨模型(包括皮质骨和松质骨二个模型)、种植体模型和下颌第一磨牙牙冠模型,通过装配,调整至准确的空间位置,建立完整的三维有限元模型(图 1)。

表 1 材料的力学参数

材 料	弹性模量 $p$ /GPa	泊松比
皮质骨	14.8	0.3
松质骨	1.85	0.3
种植体(钛)	105	0.33
金合金	100	0.3

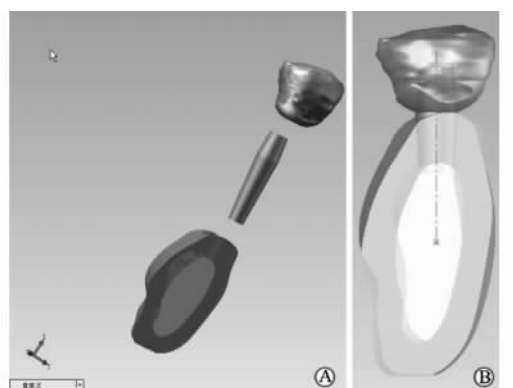


图 1 下颌第一磨牙种植体三维有限元模型

A: 装配前; B: 装配后

**[收稿日期]** 2009-09-01 **[接受日期]** 2009-12-14

**[作者简介]** 朱 强,硕士,主治医师, E-mail: txzdq@hotmail.com

\* 通讯作者(Corresponding author). Tel: 021-81873832, E-mail: txzdq@hotmail.com

1.3 有限元分析 以牙槽骨底部质量中心定一基准面作为固定约束面,在 X、Y、Z 三个方向的移动均受约束,各截面之间不产生滑动。根据文献对咬合力方向及大小的研究结果<sup>[4-5]</sup>,选择下颌第一磨牙种植体冠模型的近中颊尖舌斜面作为加载部位,在模型上分别加以垂直、颊向和水平 3 组载荷工况。利用 SolidWorks 软件的 COSMOSWORKS 模块对已建成模型进行网格划分,并进行有限元分析,观察种植体冠受载时种植体周围骨组织的应力变化;种植体的 von Mises 应力分布及大小;牙体组织的最大拉、压应力分布及大小。

## 2 结果

2.1 模型基本情况 建立了下颌第一磨牙种植体修复的实体模型,包括种植体冠、种植体、皮质骨、松质骨 4 个部件。

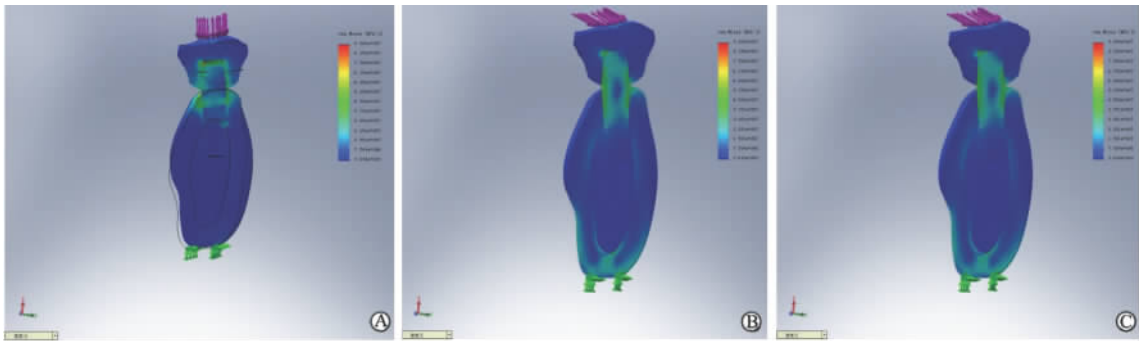


图 2 三种加载下的种植体周围骨组织应力云图

A:垂直向;B:颊向;C:水平向

## 3 讨论

进行三维有限元研究的前提是建立精确、最接近真实情况的三维有限元模型。本实验采用通过螺旋 CT 扫描与逆向工程法建模,对下颌第一磨牙种植体周围骨组织应力变化进行有限元分析,成功重建了正常牙槽骨高度的下颌第一磨牙种植体三维有限元模型。

当代最常用的三维数据采集的方法是 CT 图像处理法。CT 建模具有以下优点:(1)CT 断层影像间形变小,获得的信息全面、准确,并能反映较细致复杂的结构;(2)扫描无创伤和破坏性,保存了被检对象的完整;(3)每一断层的二维信息定位准确,且空间位置依次排列;(4)分辨率高,利于图像分割和力学参数的应用;(5)数据、图形、图像可重复使用。将 CT 技术和有限元方法有机地结合起来,重现牙颌组织形态,结构相似性好,适应了口腔组织结构复杂的要求<sup>[6-9]</sup>。本研究建立三维有限元模型的原始数据,来自螺旋 CT 断层扫描二维图像数据。即通过 CT 技术,以间隔较密的层面进行平行扫描,各截面之间平行,扫描标本固定,能保证各截面三维直角坐标系可靠。本实验利用 DICOM 文件将 CT 的二维数字图像成功地转换为三维图像,获得较满意的三维模型。

逆向工程(reverse engineering, RE)是对产品设计过程

网格单元数及节点数见表 2。

表 2 三种加载下的网格单元数、节点数及最大 von Mises 值

加载	方向	量级 F/N	网格单元数	节点数	最大 von Mises 值 $\rho$ /MPa
载荷 1	垂直	70	27 979	40 283	51.90
载荷 2	颊向 60°	35	27 920	40 202	40.61
载荷 3	水平	14	38 007	25 659	13.59

2.2 种植体及周围骨组织应力分布及大小 由应力云图(图 2)可见种植体周围骨组织应力在垂直加载下分布均匀、大小接近,而在水平向和颊向加载下分布于颊侧颈部的皮质骨内、应力集中。根据应力云图获得种植体周围骨组织的最大应力点及最大 von Mises 值(表 2)。

的一种描述<sup>[10-11]</sup>。逆向工程产品设计可以认为是一个“从有到无”的过程。将逆向工程运用到口腔种植修复中来,不仅节约了时间,保证了生物力学研究建模的快速、精确完成,提高了有限元模型的准确性;也为进一步的研究奠定了基础。本实验采用 Mimics10.0 软件进行逆向工程建模、Magics 软件对模型进行优化,其优点有:(1)建成模型准确度高;(2)在短时间内可完成模型的建立;(3)可重复性强,可以及时将患者 CT 图像转换成三维有限元模型,为下颌第一磨牙种植修复的应力分析设计打下了良好基础。以往的研究中有关种植体骨界面应力分析的模型大多采用部分下颌骨替代整个下颌骨,建模时将颌骨简化为规则的几何体,或者采取直接提取所需的部分颌骨轮廓线来建立颌骨模型。但是颌骨是较为复杂的不规则的几何体,皮质骨和松质骨的厚度都是不均匀的,这些因素都会影响到模型的准确性。本实验将下颌骨模型通过 CT 扫描获得的 DICOM 格式文件输入 Mimics 软件进行逆向工程建模,将二维的 CT 图像建成精确、真实的三维图像,并通过 Magics 软件进行有限元网格优化,获得了满意的三维模型,最大限度的保证了模型的准确性,模拟了下颌骨,所建模型更接近真实的人体下颌骨结构。利用 Mimics 软件逆向建模可以在极短的时间内(操作熟练的话 1 个工作日)完成建模,确保了数据最大限度的利用。其优点

有:(1)建成模型准确度高;(2)在短时间内可完成模型的建立;(3)可重复性强,可以及时将患者CT图像转换成三维有限元模型,为下颌第一磨牙种植修复的应力分析设计打下了良好基础。

有限元分析是从变形入手,利用应力与应变间的关系以及静力学条件,从几何、物理和力学方面进行综合分析,其关键在于所建模型的相似性。本实验有限元模型的相似性包括以下几点:(1)载荷相似性。本实验设定载荷为静态载荷、面加载,加载部位为下颌第一磨牙种植体冠模型的近中颊尖舌斜面,加载方式为3种:垂直加载70 N和颊向60°加载35 N及水平加载14 N。因此本实验所施加的载荷与实际情况具有较好的载荷相似性。(2)几何相似性。本实验中下颌骨及下颌第一磨牙原始形态获得是通过薄层CT扫描技术获取的二维图像,截面形态结构完整,形态准确。所选牙齿形态基本符合我国人牙的测量和统计报告中人体牙齿形态平均值,种植体模块的形态参数依照临床形态设置。通过局部单元细化、拆分、合并使所建模型光滑、无锐角。因此本实验建立的下颌第一磨牙种植修复有限元模型与实物相比有较好的几何相似性。(3)边界约束相似性。有限元模型需要根据实体结构周围的限制作用添加一些约束条件,其与实体约束的接近程度称为边界约束相似性。本实验边界约束条件根据模型状况、实验内容及相关的文献资料<sup>[12-14]</sup>边界约束条件设定为牙槽骨外周固定约束,各解剖结构之间假设为固定接触,具有较好的边界约束相似性。(4)力学相似性。大多数的生物材料都是非均匀性、各向异性,模拟和计算非常复杂。大量的研究报告已证实,当进行小变形、静力分析时,可将其简化为连续、均匀、各向同性的线弹性材料,因此,本实验将牙体各组织假设为连续、均匀、各向同性的线弹性体,所获取的应力仍能与实际情况保持较好的力学相似性。

总之,本研究将CT技术与逆向工程建模法相结合,快速建立了种植修复下颌第一磨牙模型,为下颌骨骨量不足情况下<sup>[15]</sup>种植修复的相关实验奠定了三维有限模型的基础。重现的种植体及周围骨组织形态、结构相似性好,建立的三维有限元模型有很好的重复性,可以扩展到颌面部其他各个部位三维有限元模型的建立。

#### [参考文献]

- [1] 朱以文,韦庆如,顾伯达. 微机有限元前后处理系统 ViziCAD 及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1993:42-81.
- [2] Holmes D C, Loftus J T. Influence of bone quality on stress distribution for endosseous implants[J]. J Oral Implantol, 1997,23:104-111.
- [3] Tepper G, Haas R, Zechner W, Krach W, Watzek G. Three-dimensional finite element analysis of implant stability in the atrophic posterior maxilla: a mathematical study of the sinus floor augmentation[J]. Clin Oral Implants Res, 2002, 13: 657-665.
- [4] Graf H, Graseel H, Aeberhard H J. A method for the measurement of occlusal forces in three direction[J]. Helv Odont Acta, 1974, 18: 7-11.
- [5] Mericske-Stern R, Geering A H, Burgin W B, Graf H. Three-dimensional force measurements on mandibular supporting overdentures[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 1992, 7: 185-194.
- [6] 孙建, 焦婷, 洪凌斐, 铁瑛, 王冬梅. 单侧上颌骨缺损闭合式重建时颞复体的三维有限元分析[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2007, 8: 122-123.
- [7] 郑元俐, 张富强, 陈笠, 王成焘. 采用牙CT技术建立完整下颌骨三维有限元模型[J]. 实用口腔医学杂志, 2000, 16: 31-33.
- [8] Miyasaka J, Tanne K, Tsutsumi S, Sakuda M. [Finite element analysis of the biomechanical effects of orthopedic forces on the craniofacial skeleton. Construction of a 3-dimensional finite element model of the craniofacial skeleton][J]. Osaka Daigaku Shigaku Zasshi, 1986, 31: 393-402.
- [9] Jensen S S, Brogini N, Hjørtting-Hansen E, Schenk R, Buser D. Bone healing and graft resorption of autograft, anorganic bovine bone and beta-tricalcium phosphate. A histologic and histomorphometric study in the mandibles of minipigs[J]. Clin Oral Implants Res, 2006, 17: 237-243.
- [10] Pietrokovski J, Starinsky R, Arensburg B, Kaffe I. Morphologic characteristics of bony edentulous jaws [J]. J Prosthodont, 2007, 16: 141-147.
- [11] 金涛, 陈建良, 童水光. 逆向工程技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2002, 13: 1430-1436.
- [12] 周峰, 盛祖立, 刘鹏飞. 不同材料桩核修复后的牙本质应力分析[J]. 浙江医学, 2004, 26: 903-907.
- [13] Al-Bayaty F H, Wahid N A, Bulgiba A M. Tooth mortality in smokers and nonsmokers in a selected population in Sana'a, Yemen[J]. J Periodontal Res, 2008, 43: 9-13.
- [14] 魏斌. 牙颌系统三维有限元建模方法的进展[J]. 口腔材料器械杂志, 2002, 11: 86-87.
- [15] 郑苍尚, 周立伟, 沈倍勇. 颌骨骨量不足的牙种植术研究新进展[J]. 口腔医学研究, 2007, 23: 109-111.

[本文编辑] 孙岩