

· 论 著 ·

## 骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入三维有限元生物力学模型的建立\*

王 焱, 张 赫<sup>△</sup>, 张 翼, 邓 锋, 黄倩倩, 王华桥

(重庆市口腔疾病与生物医学研究中心/重庆医科大学附属口腔医院正畸科 400015)

**摘要:**目的 基于 CT 建立三维有限元模型, 研究骨皮质切对上颌磨牙组牙压入移动生物力学效应的影响。方法 以高精度 CT 扫描获得牙齿、颌骨二维断层图像, 运用 Mimics 软件进行三维重建, 在 ANSYS 软件中建立生物力学模型, 并采用临床工况对其进行检验。结果 建立了高仿真骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元模型; 在压应力作用下, 上颌磨牙出现初始压入移动, 根分叉及根尖区出现压应力集中区。结论 本研究所建立的骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元模型具有高度几何相似性和力学相似性, 可用于上颌磨牙组牙压入的生物力学研究。

**关键词:** 体层摄影术, 螺旋计算机; 有限元分析; 成像, 三维; 磨牙; 生物力学

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2012.26.007

文献标识码: A

文章编号: 1671-8348(2012)26-2697-03

## 3-DFE based biomechanical model for corticotomy-assisted intrusion of maxillary molar\*

Wang Yao, Zhang He<sup>△</sup>, Zhang Yi, Deng Feng, Huang Qianqian, Wang Huaqiao

(Department of Orthodontics, Chongqing Research Center for Oral Diseases and Biomedical Science/Affiliated Stomatological Hospital, Chongqing Medical University, Chongqing 400015, China)

**Abstract:** **Objective** To construct the three-dimensional finite element(3-DFE) model based on CT for the corticotomy-assisted intrusion movement of upper molars, and to investigate the influence of corticotomy on the biomechanical effects of the intrusion movement of maxillary molars. **Methods** 2D series section images of teeth and jaw were obtained through CT scan, and the three-dimension reconstruction was performed by Mimics. 3-DFE based biomechanical model for the corticotomy-assisted intrusion of upper molars was constructed with the ANSYS software, and tested in clinical practice. **Results** The simulation 3-DFE model for the corticotomy-assisted intrusion movement of maxillary molars was established; the intrusion movement of maxillary molars was observed under compressive stress, large stress concentration region can be found in root furcation and apical area. **Conclusion** 3-DFE model established in this study shows high geometrical and mechanical similarity, and provides the basis for the future biomechanical study of maxillary molar intrusion.

**Key words:** tomography, spiral computed; finite element analysis; imaging, three-dimensional; molar; biomechanics

正畸治疗过程中, 磨牙的压入移动是临床医师面临的难点之一。而在伴有骨性开骀的严重错骀畸形病例中, 能否获得良好治疗效果的关键在于上颌磨牙的压入量。传统方法如口外弓、横腭杆(TPA)等对于上颌磨牙的移动控制多表现在矢状方向上, 而针对垂直方向的压入作用则效果非常有限。虽然近年来微螺钉支抗的采用为磨牙压低这一问题的解决带来突破<sup>[1-2]</sup>, 但对于较为严重的骨性开骀患者, 单纯依赖微螺钉种植体支抗往往也难以满足上颌磨牙的压低需求。有学者曾在临床治疗过程中尝试联合应用骨皮质切开术辅助磨牙压入移动<sup>[3-4]</sup>, 但该方法的生物力学效应、生物安全性及其所引起的组织学效应的相关研究尚有待深入。本研究通过建立高精度骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元生物力学模型, 就骨皮质切开术辅助下, 运用微种植体支抗进行上颌磨牙组牙压入展开相应的生物力学评价。

## 1 材料与方法

## 1.1 建立“上颌骨-组牙-直丝弓”三维几何模型

**1.1.1 样本采集** 取成人防腐处理头颅标本 1 例, 其牙列长度完整, 双侧牙弓形态基本对称, 临床牙冠解剖形态正常, 牙龈

覆盖完整, 无明显牙槽骨及牙龈萎缩和损坏, 牙弓内牙齿排列位置正常, 咬合关系良好, 邻牙接触关系正常。

**1.1.2 头面部螺旋 CT 断层扫描** 采用美国 GE 公司生产的新一代 64 排 lightspeed VCT, 对标本头颅模型自颅顶到下颌骨进行快速连续的扫描。颅骨标本在扫描时, 自颅骨顶部开始, 至下颌骨颏部下缘进行横断面扫描, 固定方法采用扫描标志线平行于扫描平面。工作条件: 电压 120 kV, 电流 160 mA。螺旋扫描层距 0.50 mm, 每两层之间重叠 0.20 mm, 速度 0.40 s/r, 时间分辨率 44 ms, 矩阵 512×512, 点距 0.50 mm。总共获得 784 副断层扫描图像。CT 扫描得到的影像数据以标准的 DICOM3 格式进行存储和导出。

**1.1.3 运用 Mimics 进行三维重建** Mimics 为 Materialise 公司产品。本实验采取自动提取和手动操作相结合, 在所有 CT 断层片上按照颅骨骨缝连接, 提取上颌骨的相关图像信息, 再通过 Mimics 三维重建后得到上颌骨的 3D 模型。同时利用骨、牙组织骨密度不同, 在 Mimics 中的灰度值差异性, 采用阈值化操作(Thresholding), 运用不同阈值的最小值, 对上颌骨及其牙齿结构的相关图像信息分别进行提取。然后选择需要重

建的范围,通过 Calclute 3D 功能对所选区域进行三维重建,以获得精确的 3D 模型。运用 Geomagic Studio 逆向工程软件对初始模型进行表面光滑处理。然后将原模型从 Mimics 中导出,以 STL 格式导入 Geomag Studio 软件中,局部采用点云、除噪光滑处理,以得到更加精确的三维几何模型。最后再将得到的“上颌骨-组牙”实体模型以 IGES 格式导出。

**1.1.4 Solidworks 软件生成托槽** 将上述已建好的“上颌骨-组牙”模型导入计算机辅助设计(CAD)软件 Solidworks 中,首先根据 Roth 弓形要求,结合理想正常殆对每个牙齿凸度、轴倾度和转矩的要求,调整模型中上颌牙列每颗牙齿的空间位置,并要求所有牙齿处于牙槽嵴的中央,以模拟完全排齐整平牙列后牙齿的正确位置。然后在 Solidworks 软件中生成标准直丝弓托槽和弓丝,将其装配到“上颌骨-组牙”的三维几何模型上。

**1.1.5 骨皮质切开** 对模型右侧磨牙区颊腭侧骨皮质进行全层切开。在 Solidworks 软件中,首先,在距上颌第一磨牙和第二磨牙根方 3 mm 处进行横切口,切开全层骨皮质,然后在第二前磨牙和第一磨牙之间,第二磨牙远中做两条竖直切口,也要求骨皮质全层切开,并与横切口相连,见插图 1、2。

**1.2 “上颌骨-组牙-直丝弓”三维有限元模型的建立** 将 CT 扫描后所获得的几何模型数据导入 ANSYS 软件并建立“上颌骨-组牙-直丝弓”有限元分析(FEA)模型,设定参数后进行计算。模型划分为 6 种材料,即骨皮质、骨松质、牙釉质、牙本质、牙髓腔、牙周韧带。其中骨皮质用厚度为 2.00 mm 的壳单元,牙周韧带用厚度为 0.25 mm 的壳单元进行模拟。共生成 264 143 个单元、336 375 个节点,其中含 174 922 个壳单元、89 221 个接触单元。

**1.3 模型材料的属性假设条件** 从力学性能角度讲,生物组织严格意义上均是非均质性与各向异性的,且为非线性体。而目前为止,生物材料的相关基础研究还尚未能提供各种材料组织的本构方程。生物力学领域中,有限元分析的应用多数是以建立均质连续、各向同性的线弹性体的假设为基础<sup>[5-7]</sup>。本研究中假设牙齿、牙周膜、牙槽骨均为各向同性、均质的线弹性体材料。材料受力形变为小变形状态。模拟过程中的接触关系:牙齿与牙周膜、牙周膜与牙槽骨、松质骨与皮质骨及托槽与牙齿之间采用 bonded 连接。加载后各结构不发生相对滑动与分离,以齿槽骨外界面为固定约束面。托槽和弓丝之间以 No Separation 连接,不允许发生颊向位移,但允许发生小范围的龈向位移。颊面管与弓丝之间以 Cylindrical Joint 连接,仅允许颊面管发生轴向平移与轴向旋转,同时约束其他 4 个方向自由度。材料的弹性模量与泊松比<sup>[8]</sup>,见表 1。

表 1 上颌骨三维有限元模型材料的弹性模量与泊松比

模型材料	杨氏弹性模量(Mpa)	泊松比(%)
骨	13 700.00	0.30
松质骨	1 370.00	0.30
牙齿	20 000.00	0.30
牙周膜	68.90	0.45
弓丝/托槽	200 000.00	0.30

**1.4 加载与计算分析** 在骨皮质切开侧(右侧)与非骨皮质切开侧(左侧)均施加 100 g 颊腭侧根方的垂直压入力。计算牙

齿的初始压入位移以及牙周膜的应力应变分布。

## 2 结 果

**2.1 成功建立骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元生物力学模型** 将以高精度 CT 扫描、Mimics 系统三维重建、Solidworks 托槽生成及三维图像处理获得的数据导入 ANSYS 软件,生成了高仿真的骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元生物力学模型。本模型中,分别通过 CT 扫描重建与 CAD 软件直接生成获得几何尺寸,其几何相似性高度一致。此外,切口的形态、位置、深度设计及弓丝和托槽间接触关系均以临床实际情况为模板,具备高度力学相似性。

**2.2 临床工况验证** 以 100 g 大小、垂直于颊舌方向的压入力作用下,双侧均可见牙齿初始位移,其中颊侧根尖初始位移略小于腭侧根尖初始位移,而骨皮质切开侧牙齿位移量明显大于非切开侧(插图 3)。在非骨皮质切开侧,磨牙根分叉及颊、腭侧根颈部均可见明显应力集中分布区,而切开侧的相应区域应力集中不明显,且应力值明显小于非骨皮质切开侧,见插图 4。

## 3 讨 论

联合骨皮质切开术以加快牙齿移动速度是近几年来正畸牙移动研究的热点。Iino 等<sup>[9]</sup>通过对 Beagle 犬动物实验模型进行研究,探讨了骨皮质切开术对其牙齿移动及移动过程中周围牙槽骨改建情况的影响。发现联合骨皮质切开术使牙齿移动速度明显加快。牙齿移动初期,牙槽骨多为单纯性吸收,在直接加力状态下,牙齿移动时吸收更为活跃,且牙周膜内玻璃样变组织较少并能较快清除。Mostafa 等<sup>[10]</sup>在以 6 条 Beagle 犬为对象的动物实验中,拔除其上颌第二前磨牙后,分别将实验侧拔牙处的颊侧与舌侧骨皮质钻开,在双侧以种植体为支抗远中移动第一前磨牙,发现骨皮质切开侧牙齿移动速度更快,且张力侧和压力侧骨组织改建都更为活跃。Kim 等<sup>[11]</sup>在以猫为实验研究对象,研究正畸治疗中骨皮质切开对于牙周改建的影响和生物学效应,发现骨皮质切开后可见束状骨大量广泛吸收,牙周玻璃样变组织发生时间短,范围小。综上所述研究结果表明,骨皮质切开术利于加快正畸牙移动,但就牙齿移动过程中所发生的牙根吸收等组织损伤尚缺乏相关生物力学评价。

正畸过程中牙齿移动包括生物力学与力生物学两个阶段<sup>[12]</sup>。其中,前者是牙齿在外力作用下的初始反应,一般表现为外作用力通过粘结在牙齿表面的正畸矫治器传递到牙齿,而在牙根表面与牙周膜内发生应力-应变分布,进而使牙齿发生初始位移。力生物学阶段则是牙齿与牙周组织在应力-应变作用下所发生的一系列应答,如牙周膜与牙槽骨改建等。因此,生物力学阶段是牙齿移动的始动因素,其中作用力的大小、方向及传递方式均对牙齿与牙周组织的应力-应变分布有重要影响作用。

目前,三维有限元法已成为牙齿移动生物力学领域研究中所采用的重要方法<sup>[13-14]</sup>。它将分析对象连续弹性体分解为有限个单元,以各子单元结合体模拟原实体,研究各单元力学特点,构建其刚度方程,并依照所限定的载荷条件进行组集,建立总体刚度方程,并且按照边界位移的限定条件对总体方程组求解,得到单元节点位移,进而计算单元的应力和内力。因此,有限元法可对不同材料性质、几何形态及各种复杂的加载方式、支持条件进行分析模拟,并确保了模型的可重复性。

本研究所建立的骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元模型运用 64 排 lightspeed VCT 获得牙齿以及颌骨的三维信息,它应用真正各向同性体素的数据作重组处理,图像在冠状面、矢状面、斜面和曲面的分辨率达到了原始横断面图像相同的分辨率,从而保证高质量的影像数据。并采用 Mimics 软件进行三维重建。该软件是一款基于医学影像学的逆向工程软件、计算机辅助设计软件及 3D 图像生成、编辑处理软件。软件的功能包括显示和分割 CT、MRI 和超声医学图像,自动设置图像像素间距、识别范围、图像层距等参数,建立 3D 模型进行编辑,然后输出通用的 CAD、FEA、快速成型(RP)格式,可以在计算机上进行大规模数据的转换处理,获得高质量图片信息,从而保证了模型的几何相似性。同时对初始模型进行表面处理的 Geomagic Studio 逆向工程软件,能够将三维扫描数据和多边形网络转换成精确的三维数字模型,并可以输出各种行业标准格式,它将数字与物理世界完美地衔接起来,自动延伸和剪裁曲面功能使模型在 CAD 中能更快、更方便地被修改,从而使模型更加完美。

从模型的工况验证来看,非骨皮质切开侧的应力分布主要集中在根分叉区域附近,这一结果与 Daimaruya 等<sup>[15]</sup>学者的研究具有一致性。该实验结果显示骨皮质切开侧的初始位移明显大于非骨皮质切开侧,这可能是由于骨皮质切开后牙齿的约束状态发生了改变,从而出现上述变化。同时,磨牙根分叉区域的应力分布骨皮质切开侧较非骨皮质切开侧减小,且分布更均匀。以上结果均表明,骨皮质切开对上颌磨牙组牙压入的初始移动产生极大的影响,具有显著的生物力学效应,本研究建立的骨皮质切开辅助上颌磨牙组牙压入的三维有限元模型能够很好地满足对上述力系进行系统的生物力学研究的需要,因此,本实验生物力学模型的成功建立,为后续的生物力学研究提供了广阔的基础。

#### 参考文献:

- [1] Sherwood KH, Burch J, Thompson W. Intrusion of supererupted molars with titanium miniplate anchorage[J]. Angle Orthod, 2003, 73(5): 597-601.
- [2] Kravitz ND, Kusnoto B, Tsay PT, et al. Intrusion of overerupted upper first molar using two orthodontic miniscrews. A case report[J]. Angle Orthod, 2007, 77(5): 915-922.
- [3] Oliveria DD, de Oliveira BF, de Araujo Brito HH, et al. Selective alveolar corticotomy to intrude overerupted molars [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008, 133(6): 902-908.
- [4] Kanno T, Mitsugi M, Furuki Y, et al. Corticotomy and compression osteogenesis in the posterior maxilla for treating severe anterior open bite[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007, 36(4): 354-357.
- [5] Tominaga JY, Tanaka M, Koga Y, et al. Optimal loading conditions for controlled movement of anterior teeth in sliding mechanics[J]. Angle Orthod, 2009, 79(6): 1102-1107.
- [6] Kojimaa Y, Fukui H. A numerical simulation of tooth movement by wire bending[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2006, 130(4): 452-459.
- [7] Baek SH, Shin SJ, Ahn SJ, et al. Initial effect of multiloop edgewise archwire on the mandibular dentition in Class III malocclusion subjects. A three-dimensional finite element study[J]. Eur J Orthod, 2008, 30(1): 10-15.
- [8] Noda K, Arai C, Nakamura Y. Root resorption after experimental tooth movement using superelastic forces in the rat[J]. Eur J Orthod, 2010, 32(6): 681-687.
- [9] Iino S, Sakoda S, Ito G, et al. Acceleration of orthodontic tooth movement by alveolar corticotomy in the dog[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2007, 131(4): 448, e1-8.
- [10] Mostafa YA, Mohamed Salah Fayed M, Mehanni S, et al. Comparison of corticotomy-facilitated vs standard tooth-movement techniques in dogs with miniscrews as anchor units[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 136(4): 570-577.
- [11] Kim SJ, Park YG, Kang SG. Effects of corticision on paradental remodeling in orthodontic tooth movement[J]. Angle Orthod, 2009, 79(2): 284-291.
- [12] Melsen B. Tissue reaction to orthodontic tooth movement—a new paradigm[J]. Eur J Orthod, 2001, 23(6): 671-681.
- [13] Sung SJ, Jang GW, Chun YS, et al. Effective en-masse retraction design with orthodontic mini-implant anchorage: a finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010, 137(5): 648-657.
- [14] Kim T, Suh J, Kim N, et al. Optimum conditions for parallel translation of maxillary anterior teeth under retraction force determined with the finite element method[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010, 137(5): 639-647.
- [15] Daimaruya T, Nagasaka H, Umemori M, et al. The influences of molar intrusion on the inferior alveolar neurovascular bundle and root using the skeletal anchorage system in dogs[J]. Angle Orthod, 2001, 71(1): 60-70.

(收稿日期:2012-05-07 修回日期:2012-05-15)

**启事:本刊对院士及 863、973 项目文章开通绿色通道,欢迎投稿。**