论著

文章编号:1000-5404(2014)05-0466-04

上颌前牙舌侧差动内收力系三维有限元模型的建立

朱亚玲[1,2],李闻颖[1,2],张 翼[1,2],邓 锋[1,2],王 超[1,2],董 妮[1,2] (400015 重庆,重庆医科大学附属口腔医院正畸科[1];401147 重庆,重庆医科大学附属口腔医院口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室[2])

[摘要] **目的** 基于CT法建立上颌前牙舌侧差动内收力系的三维有限元模型,对这一复杂正畸矫治力系的生物力学效应进行系统性分析。**方法** 通过高精度螺旋CT扫描获得精确的组牙和颌骨图像信息,运用MIMICS软件进行三维重建,同时在Solidworks中建立舌侧托槽与弓丝的三维几何模型,并进行装配,导入ANSYS软件划分网格生成上颌前牙舌侧差动内收力系的三维有限元模型。最后对模型进行加载检测。**结果** 建立了细致、逼真的上颌前牙舌侧差动内收的三维有限元模型,在0.015 N·m的力矩和56.6 g的Ⅱ类牵引力作用下上颌前牙牙周膜应力-应变在生理性范围之内。**结论** 本研究建立的上颌前牙舌侧差动内收力系三维有限元生物力学模型保证了高度的几何相似性和力学相似性,可用于这一复杂正畸矫治力系生物力学效应的系统研究。

[关键词] 三维有限元;舌侧内收力系;应力-应变

[中图法分类号] R318.01; R319; R78 [文献标志码] A

Construction of 3-D finite element model of maxillary anterior teeth in lingual differential retraction force system

Zhu Yaling[1,2], Li Wenying[1,2], Zhang Yi[1,2], Deng Feng[1,2], Wang Chao[1,2], Dong Ni[1,2] ([1]Department of Orthodontics, Hospital of Stomatology, Chongqing Medical University, Chongqing, 400015; [2]Chongqing Key Laboratory for Oral Diseases and Biomedical Sciences, Hospital of Stomatology, Chongqing Medical University, Chongqing, 401147, China)

[**Abstract**] **Objective** To construct the three-dimensional (3-D) finite element model of maxillary anterior teeth in lingual differential retraction force system and to determine the biomechanical effect of the maxillary anterior teeth. **Methods** The geometrical information of the maxillary bone and teeth were obtained from a dry skull, and the lingual appliance were from Solidworks CAD software. The MIMICS software was used to construct the three-dimensional finite element model of maxillary bone. ANSYS were used to mesh the model and construct the 3-D finite element model. **Results** Our 3-D finite element model of maxillary anterior teeth in lingual differential retraction force system was constructed successfully with details and verisimilitude. Under the 0.015 N·m moment by tip back bend and 56.6 g class Ⅱ elastics force, the stress and strain distribution were demonstrated within physical remodeling range. **Conclusion** The 3-D finite element model of maxillary teeth lingual retraction differential force system is proved with high similarity in geometry, and able to be used to investigate the biomechanical effect of such complex force system.

[**Key words**] three-dimensional finite element; lingual retraction force system; stress-strain

Supported by the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC2008BB5222, CSTC2009BB5263), the Key Project of Chongqing Municipal Health Bureau (2008-1-49) and the Project Foundation of Sci & Tech Committee of Yubei District (2011-31). Corresponding author: Li Wenying, E-mail:liwenyingbaibai@163.com

[基金项目] 重庆市自然科学基金(CSTC2008BB5222,CSTC2009BB5263);重庆市卫生局重点项目(2008-1-49);重庆市渝北区科委基金(渝北财教2011-31号)

[通信作者] 李闻颖, E-mail:liwenyingbaibai@163.com

[优先出版] http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1095.R.20140102.1434.015.html(2014-01-02)

舌侧矫治技术是一种将托槽黏结在牙齿的舌面，从而不影响外部美观的固定矫治技术，在成人正畸中应用日益广泛[1-2]。尽管与传统的唇侧矫治技术相比，舌侧矫治技术在美观方面表现突出，但由于舌侧矫治力系的生物力学效应与唇侧矫治力系迥异，其应用受到极大限制。在舌侧矫治力系统中，由于托槽间距的减小，使得相同外力作用下牙齿所受应力大为增加，从而导致了牙根吸收风险的增加。此外，托槽间距的减小还使得弓丝与托槽间的摩擦力增加，从而阻碍了牙齿的快速移动[3]。上颌前牙的内收是影响正畸治疗效果的关键环节，由 Begg 医师提出的唇侧细丝轻力技术在上前牙内收过程中被证明具有牙齿移动快，组织损伤小的特点[4-5]。如果能够将这一唇侧力系应用于舌侧以解决其固有的牙齿受力大、移动速度慢等缺点，无疑具有广泛的临床应用前景。本研究旨在建立具有高度几何相似性和力学相似性的上颌前牙舌侧差动内收力系三维有限元模型，对这一复杂的正畸矫治力系的生物力学效应进行系统研究。

1 材料与方法

1.1 实验材料

经防腐处理的成人干颅 1 例，要求具有个别正常殆，牙列保留完整、牙面无明显磨耗。

1.2 上颌骨-组牙三维几何模型的建立

将符合标准的成人干颅用 64 排 LightsPeed VCT（GE company, American）对颅顶至下颌骨部分进行连续扫描，扫描间距 0.50 mm，每 2 层间重叠 0.20 mm，共得到 784 张断层图像。

将以 DICOM3.0 格式存储的二维 CT 断层图像文件导入至 Mimics 10.0 软件（Materialise, Leuven, Belgium），而后通过阈值化操作，提取上颌骨及各个牙齿的相关结构信息。利用软件中图像分割模块，进行图像的分割和精炼处理。最后使用 Calculate 3D 工具条，生成颌骨及牙齿的三维显示图，并检查其轮廓线准确性。最终输出包含牙齿及颅骨点云格式的数据文件。

将上述模型输出到逆向工程软件 Geomagic（Geomagic Co., Morrisville, USA），去除掉噪点和边缘部分，运用软件中松弛命令对颌骨及牙齿的表面进行优化，进行自动曲面化处理。利用转向 CAD 阶段选项将 NURBS 模型转化为 CAD 实体模型，最终生成 STL 模型出无接缝的多边形。上颌牙齿通过运用偏移命令均匀向外扩展 0.25 mm，从而获得牙周膜的前体模型。以 IGES 格式输出，得到颌骨，牙齿和牙周膜的 3D 几何模型。

1.3 舌侧矫治器三维几何模型的建立

在 CAD 软件 Solidworks2007（Solidworks Corp, Dassault Systemes Concord, MA, USA）中建立舌侧托槽及弓丝模型：导入上颌全部牙列，以距离中切牙切缘 3.50 mm、双侧尖牙牙尖 4.00 mm 的 3 个点建立基准平面，所建托槽槽沟的中线经过基准平面。根据托槽的实际数据制作舌侧托槽（图 1），并调整托槽的位置。利用扫掠命令画出各槽沟内的圆形弓丝，使用桥接曲线命令连接各部分弓丝，弓丝的直径为 0.41 mm，模型以 IGES 文件格式保存（图 2）。

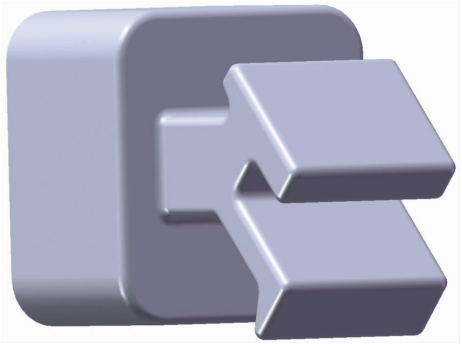


图 1 Solidworks 中生成的舌侧托槽

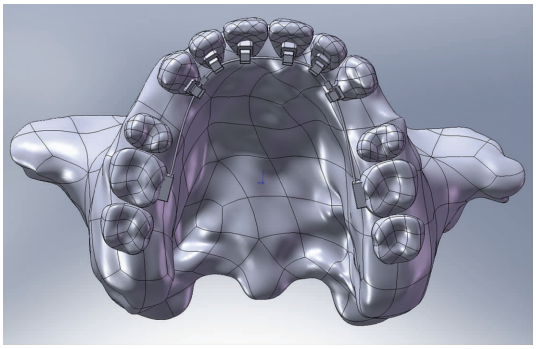


图 2 上颌骨-组牙-舌侧矫治器的三维有限元模型

1.4 上颌前牙舌侧差动内收三维有限元模型的建立

将几何模型导入三维有限元计算软件 ANSYS12.0 中，使用 Solid189 单元对其进行网格划分，骨皮质与牙周膜分别用厚度为 2、0.25 mm 的壳单元进行模拟，共生成的单元数为 262 164，节点数为 158 321。接触关系定义：骨皮质和骨松质、牙齿与牙周膜、牙槽骨与牙周膜以及牙齿和托槽之间用 Bonded 连接，托槽和弓丝之间用 No Separation 连接（图 3）。不允许法向位移，只允许发生小量切向位移；弓丝与舌侧管之间采用 Cylindrical Joint 连接，只允许弓丝沿舌侧管轴向的平移及轴向旋转，同时约束其他 4 个的自由度。为研究牙齿的初始位移，定义 X 轴为冠状方向，Y 轴为矢状方向，Z 轴为垂直方向（图 4）。

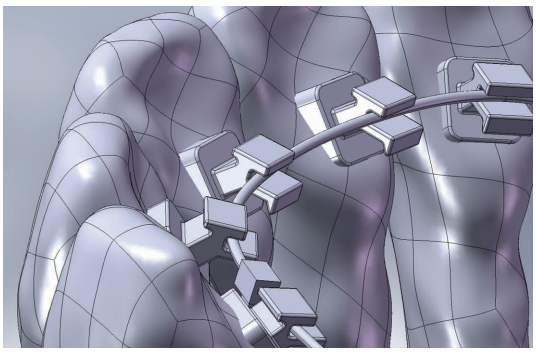


图 3 弓丝和托槽的接触关系

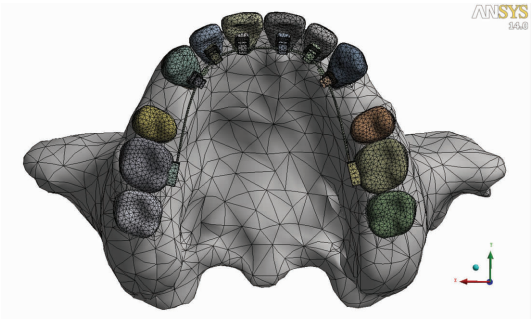


图4 舌侧上颌前牙内收三维有限元模型殆面观

1.5 材料属性与载荷设置

模型中各种材料均假设为各向同性、均质的线弹性材料，材料变形为小变形[6]。上述各种材料的弹性模量与泊松比见表1。

表1 模型的材料参数

材料	杨氏弹性模量(MPa)	泊松比
皮质骨	13 700	0.3
松质骨	1 370	0.3
牙齿	20 700	0.3
牙周膜	68.9	0.45
弓丝、牵引钩	176 000	0.3
托槽	206 000	0.3

2 结果

2.1 建立了高精度的“舌侧差动上颌前牙内收”三维有限元模

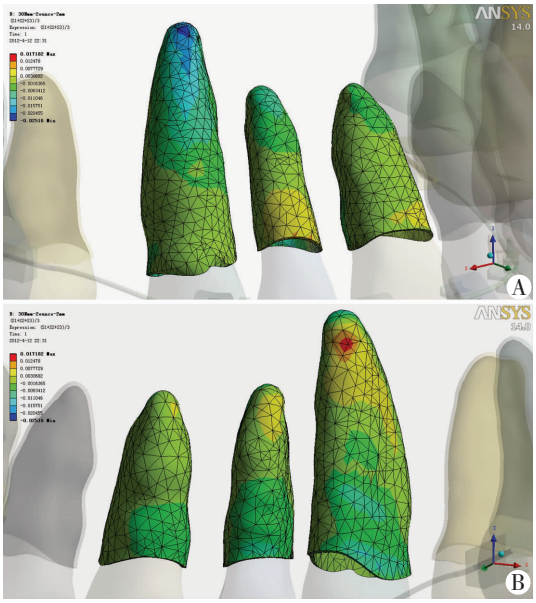
通过高精度的CT扫描，MIMICS三维重建软件所建立的上颌骨-组牙三维有限元模型具有较高精度。而经由Solidworks软件所建立的矫治弓丝以及舌侧矫治器系统三维数值模型则完全按照实际尺寸生成。因此，两者通过布尔运算生成的上颌前牙舌侧差动内收力系三维有限元数值分析模型具有高度的几何相似性。此外，临床中弓丝与托槽、弓丝与颊面管之间的力学约束关系为弓丝可以沿托槽做小量的滑动以及转动。本研究通过在三维有限元分析软件ANSYS中设置了No Separation以及Cylindrical Joint等接触关系真实还原了这一临床力学关系，从而保证了这一数值分析模型的力学相似性。

2.2 上颌前牙舌侧差动内收三维有限元模型的验证

当后倾曲位置距离上颌第一磨牙颊面管近中2 mm，Ⅱ类颌间牵引力斜向后下，大小为56.6 g，后倾曲扭矩为0.015 N·m时计算上颌中切牙、侧切牙以及尖牙的初始位移，牙周膜的应力-应变分布。在上颌前牙舌侧差动内收力系作用下，上颌中、侧切牙以及尖牙的根尖和颈缘均出现2个压应力-应变区以及牵张应力-应变区。上述牙齿的舌侧颈缘和颊侧根尖出现压应力区，在唇侧颈缘和舌侧根尖则出现牵张应力-应变集中区。

上中切牙舌侧颈缘的静水压应力为3.748 4 kPa，唇侧颈缘静水牵张应力为4.181 4 kPa，舌侧根尖静水牵张应力为3.724 2 kPa，唇侧根尖静水压应力为2.995 3 kPa。上述值均显著小于毛细血管压16 kPa(图5)。

在Ⅱ类颌间牵引力以及后倾曲扭矩的作用下，上颌中侧切牙出现冠舌向、根唇向的初始位移，即在内收时出现顺时针方向的旋转移动。在垂直方向上，切缘出现伸长、而根尖出现压入移动。



A：唇侧观；B：舌侧观

图5 0.015 N·m力矩时上前牙牙周膜静水压

3 讨论

上颌前牙内收是正畸治疗的关键步骤，上颌前牙在正畸力作用下的所产生牙槽骨的改建以及牙齿移动轨迹直接影响矫治疗效。因此，对于上颌前牙内收的生物力学问题一直是正畸学研究的热点。近年来，Kim等[7]在舌侧设计了C-lingual retractor装置对上颌前牙进行内收；Hong等[8]则采用Lever-arm和mini-implant技术，通过调整牵引钩的高度以及种植体植入高度，改变力的作用方向和作用点，从而达到上颌前牙转矩控制的目的。在理论研究上，Geron等[9]对舌侧矫治技术建立相应的数学模型进行受力分析；Liang等[10]则建立了上颌骨以及上颌切牙的三维有限元模型，比较分析颊舌侧施加力和力矩时牙齿的初始位移以及牙周膜应力应变分布的区别。上述研究均证明了与唇侧矫治系统相比，舌侧矫治系统在上颌前牙内收过程中所产生的生物力学效应是完全不同的。

运用差动力理念(differential force)对牙齿进行快速移动在唇侧矫治Tip-Edge系统中已经广为应用。那么这一理念能否应用于更为复杂的舌侧矫治力系，从而有效减少舌侧矫治的不良反应和加速牙齿移动？本研究通过建立高精度的舌侧上颌前牙内收力系的三

维有限元模型对这一矫治力系的系统生物力学效应进行了有益探索。三维有限元法(FEA)是研究正畸牙移动的经典数值模拟分析法,它将分析的连续实体离散成有限个单元,然后以各个单元的结合体代替原连续体,通过逐个研究每个单元的力学性质,建立其相应单元刚度方程,根据设定的载荷条件将其组合成总体刚度的方程。最后按照给定的边界位移条件,求解总体方程组,从而得到单元所有节点位移,并据此计算单元的应力和内力[11]。因此,三维有限元法可以对复杂的几何形态、材料性质及加载方式进行分析,同时保证了模型计算结果的可重复性,是研究复杂正畸矫治力系的理想生物力学研究方法。

随着CT三维成像技术的进步,以高精度CT扫描的图像为素材,结合MIMICS三维重建软件对复杂的口腔硬组织器官进行三维重建已经探索成为一条成熟的建模思路。本研究运用这一建模思路,保证了模型的几何相似性。复杂正畸力系统力学约束关系的仿真是三维有限元建模的另一难点,本研究中将托槽与弓丝之间的接触关系定义为No Separation,也就是说,弓丝可以沿着托槽做小量的滑动而不能与托槽完全分离;而将颊面管与弓丝之间的接触关系定义为Cylindrical Joint,即弓丝可以在颊面管内做切向的滑动而四周被约束。这一接触设计基本符合临床实际情况,从而提高了模型的力学仿真程度。

在后倾曲力矩为0.015 N·m、56.6 g的Ⅱ类牵引力作用下,上中切牙舌侧颈缘的静水压应力(hydrostatic stress)为3.748 4 kPa,唇侧颈缘静水牵张应力为4.181 4 kPa,舌侧根尖静水牵张应力为3.724 2 kPa,唇侧根尖静水压应力为2.995 3 kPa,上述值均显著小于毛细血管压(16 kPa)。根据Schwarz的组织学实验结果可知,在外力作用下牙周膜毛细血管压的大小是影响牙根吸收的重要因素。从本模型加载的结果可知,在舌侧运用差动力系统对上颌前牙进行内收时,上颌前牙牙周膜的应力显著小于牙周膜毛细血管压,因此可以推断在该力系统作用下牙齿不会发生显著的牙根吸收。

在经典的唇侧差动内收力系中,Ⅱ类牵引力的大小以及后倾曲力矩的大小比值将决定上颌前牙矢状向及垂直向的移动方式。在本研究中,后倾曲与Ⅱ类牵引力共同作用下,上颌前牙出现显著的舌向倾斜初始位移。在垂直方向上,随着冠根的直立,切缘出现伸长,牙根出现压入移动,说明上颌前牙产生可控的舌向倾斜移动。因此,可以初步认为将唇侧上颌前牙内收力系运用到舌侧是安全、有效的。同时,逐步力学加载试验也证明了本研究所建立的上颌前牙舌侧差动内收三维有限元模型可以用于这一复杂力系的生物力学效应系统性分析。

本研究通过使用高精度的CT获得三维几何模型,并通过Mimics软件进行快速三维重建,同时结合CAD软件Solidworks形成弓丝、托槽等矫治器的三维模型。组装后形成了具有高度几何相似性和力学相似性的"舌侧差动上颌前牙内收"三维有限元模型。该模型为进一步阐述这一力系的临床效应提供了良好的力学模拟平台。

参考文献:

[1] McCrostie H S. Lingual orthodontics: the future[J]. Semin Orthod, 2006, 12(3): 211-214.

[2] Romano R. Concepts on control of the Anterior Teeth Using the Lingual Appliance[J]. Semin Orthod, 2006, 12(3): 178-185.

[3] Sifakakis I, Pandis N, Makou M, *et al*. A comparative assessment of forces and moments generated by lingual and conventional brackets [J]. Eur J Orthod, 2013, 35(1): 82-86.

[4] Chhibber A, Upadhyay M, Shetty V S, *et al*. Cephalometric comparison of vertical changes between Begg and preadjusted edgewise appliances[J]. Eur J Orthod, 2011, 33(6): 712-720.

[5] Mauran G, Mauran-Plas H, Plas F. The Begg and Tip-Edge technic [J]. Orthod Fr, 1999, 70(1): 89-95.

[6] 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): 21-24.

[7] Kim J S, Kim S H, Kook Y A, *et al*. Analysis of lingual en masse retraction combining a C-lingual retractor and a palatal plate[J]. Angle Orthod, 2011, 81(4): 662-669.

[8] Hong R K, Heo J M, Ha Y K. Lever-arm and mini-implant system for anterior torque control during retraction in lingual orthodontic treatment [J]. Angle Orthod, 2004, 75(1): 129-141.

[9] Geron S, Romano R, Brosh T. Vertical forces in labial and lingual orthodontics applied on maxillary incisors - a theoretical approach[J]. Angle Orthod, 2004, 74(2): 195-201.

[10] Liang W, Rong Q, Lin J, *et al*. Torque control of the maxillary incisors in lingual and labial orthodontics: a 3-dimensional finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 135(3): 316-322.

[11] Cattaneo P M, Dalstra M, Melsen B. The finite element method: a tool to study orthodontic tooth movement[J]. J Dent Res, 2005, 84(5): 428-433.

(**收稿**:2013-10-21;**修回**:2013-12-09)

(编辑 张 维)