文章编号:1000-5404(2010)07-0669-03

论著

微种植体支抗整体内收上颌前牙阻抗中心的三维有限元研究

王华桥[1],邓 锋[1],张 磊[2],樊瑜波[3],张 翼[1] (400015 重庆,重庆医科大学附属口腔医院正畸科[1];610044 成都,四川大学建筑与环境学院生物力学工程实验室[2];100083 北京,北京航空航天大学生物工程系[3])

[摘要] 目的 探讨用微种植体支抗整体法内收上颌前牙时组牙的复合阻抗中心位置以及牙齿的初始移动规律。**方法** 用多层螺旋CT对干颅进行扫描,经MIMICS8.0,ABAQUS6.5构建"微种植体支抗-上颌前牙整体内收力系"的三维有限元模型,数值模拟从不同高度平面施以水平向内收载荷,并分别计算上颌中、侧切牙、尖牙的初始位移以及初始旋转角度,从而推算牙齿的阻抗中心位置。**结果** 整体内收力作用下上颌前牙段的阻抗中心高度为距离牙槽嵴顶5.1 mm处。在微种植体支抗整体内收上颌前牙力系中,中切牙、侧切牙以及尖牙的旋转中心常数分别为50.26、57.30、132.73 mm^2。**结论** 运用微种植体支抗技术整体内收上颌前牙时通过改变力的作用点可以有效控制牙齿的整体移动或倾斜移动方式。

[关键词] 三维有限元;微种植体支抗;整体内收;阻抗中心
[中图法分类号] R318.01; R783.1; R783.3 **[文献标志码]** A

Determing centre of resistance of maxillary anterior teeth in en masse retraction with micro-implant anchorage: a finite element analysis

Wang Huaqiao[1], Deng Feng[1], Zhang Lei[2], Fan Yubo[3], Zhang Yi[1] ([1]Department of Orthodontics, Affiliated Hospital of Stomatology, Chongqing Medical University, Chongqing, 400015; [2]Biomechanical Engineering Laboratory, College of Architecture and Environics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan Province, 610044; [3]Faculty of Bioengineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, China)

[Abstract] Objective To investigate the centre of resistance of the maxillary anterior teeth and the accompanied initial displacement of teeth in en masse retraction with micro-implant anchorage. Methods A dry skull was scanned with high resolution spiral CT, and the obtained data were used to construct the three dimensional finite element model of "the micro-implant-segmented maxillary anterior teeth en masse retraction" force system. A 2 N horizontal retraction force by micro-implant were added to segmented maxillary teeth in every 2-mm interval from the archwire level and the initial displacement were calculated. Results The centre of resistance was located in the position of 5.1 mm above alveolar ridge. The centre of rotation constants were different among the central incisor, lateral incisor and canine. Conclusion The bodily movement or tipping movement can be easily achieved by altering the horizontal height of the retraction force using the "micro-implant-segmented maxillary anterior teeth en masse retraction" force system.

[Key words] three-dimensional finite element analysis; micro-implant anchorage; en masse retraction; centre of resistance

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10572160) and the Natural Science Foundation of Chongqing (CSTC2008BB5222).
Corresponding author: Zhang Yi, E-mail:cqumszy1978@163.com

上颌前牙的位置是影响口腔颌面部软组织侧貌的重要因素之一,在正畸治疗中往往需要对前突的上颌前牙进行适度的组牙内收[1]。正畸力的作用点、作用方向与牙齿阻抗中心的位置关系是决定牙齿移动方式的关键[2]。在传统的直丝弓技术中上颌前牙内收采用的是滑动法,力的作用线难以通过组牙的阻抗中心。因此,牙齿容易产生倾斜移动,很难达到组牙的整体移动。

微种植体支抗技术(micro-implant anchorage, MIA)的出现为上颌前牙内收的方式带来了根本的变化[3]。由于微种植体支抗可以方便地选择植入的部位和高度,因此结合牵引钩高度的变化可以方便地选择前牙内收力的方向和作用点,从而为组牙移动控制提供多样化选择。微种植体支抗整体内收上颌前牙的关键在于力的作用方式与组牙阻抗中心的位置关系。本研究将通过建立"微种植体支抗整体内收上颌前牙"的三维有限元生物力学模型对该力系作用下上颌前牙阻抗中心的位置进行相关探讨。

1 材料与方法

1.1 微种植体支抗-上颌前牙整体内收力系三维有限元模型的建立

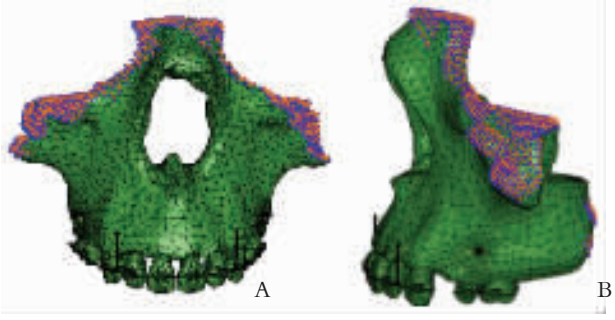
1.1.1 上颌前牙-直丝弓矫治器模型的建立 取个别正常𬌗的成人干颅1例,采用美国GE公司的64排LightSpeed VCT

[基金项目] 国家自然科学基金(10572160);重庆市自然科学基金(CSTC2008BB5222)
[通信作者] 张 翼, E-mail:cqumszy1978@163.com

自颅顶至下颌骨对头颅模型进行连续扫描,使用 MIMICS 软件读取 CT 数据进行三维重建,直丝弓矫治器的生成以及组装具体方法参照张翼等[4]的研究,并生成上颌骨-组牙-直丝弓矫治器三维有限元模型。

1.1.2 微种植体有限元模型的建立及装配 根据临床上植入这一区域的微种植体常规尺寸。微种植体定义为骨内段长度 8 mm,直径 1.3 mm, 螺纹高度 0.1 mm,螺纹顶角 60°,螺距 0.5 mm。微种植体模型在 ABAQUS 软件的前处理程序中获得。

将微种植体模型植入到上述有限元模型上颌第二前磨牙和第一磨牙之间,植入高度与牵引钩高度平齐,最终生成"微种植体支抗-上颌前牙整体内收力系"的三维有限元模型(图 1)。



A:正面观;B:侧面观

图 1 "微种植体支抗-上颌前牙整体内收力系"模型的正、侧面观

1.2 材料属性和网格划分

该有限元模型区分为 7 种材料属性,分别是骨皮质、骨松质、牙齿、牙周膜、弓丝、牵引钩和托槽。各种材料的属性以及弹性模量和泊松比参见文献[4-6]。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。

在本研究中,弓丝采用 C3D8 单元(一阶减缩六面体单元),骨松质、牙齿、托槽和牵引钩均用 C3D4 单元(一次四面体单元)模拟,牙周膜和骨皮质使用 S3 单元(3 节点壳单元),正畸 Ni-Ti 拉簧使用只受拉的桁架单元。模型被划分为大约 25 540 个单元和 58 890 个节点。

1.3 载荷和约束

为避免弓丝从托槽槽沟中脱落,在临床中常用细丝将托槽和弓丝绑结。本研究的生物力学模型中使用非线性弹簧元连接托槽和弓丝[7],以避免计算中它们之间的背离运动。模拟微种植体整体内收上颌前牙的临床实际情况,在上颌骨上方和后方施加固定约束。在数值模拟过程中,即加载后牙齿、直丝弓矫治器和上颌骨不发生相对滑动。以弓丝所在的平面为基准平面,每隔 2 mm 为力的作用点取一组数据。载荷为平行于弓丝平面向后的水平作用力,大小为 2 N。

1.4 阻抗中心的位置和旋转中心常数

阻抗中心是指当作用力通过某一水平高度时,牙齿产生整体平动,而不发生旋转(即旋转角度为零)[8]。临床上常用距离牙槽嵴顶的高度来描述阻抗中心的位置。本实验中弓丝平面在中切牙、侧切牙以及尖牙处与牙槽嵴顶的距离分别为 6.39、5.30、4.41 mm。旋转中心常数 S^2 是指载荷至牙齿阻抗中心的距离(a)与阻抗中心至旋转中心的距离(b)的乘积[9],即 $S^2 = a \times b$。旋转中心常数越大,抵抗旋转的能力越强。

2 结果

2.1 上颌中、侧切牙以及尖牙的阻抗中心高度

在不同高度的水平向后牵引力作用下,上颌中切牙、侧切牙以及尖牙的阻抗中心的位置参见图 2。横坐标表示牵引钩的高度(弓丝所在平面为零),纵坐标表示牙齿初始旋转角度。当纵坐标为零时,横坐标的数值即表示牙齿阻抗中心距离弓丝平面的高度。中切牙、侧切牙以及尖牙的阻抗中心高度分别为距牙槽嵴 2.94、4.34、9.30 mm。

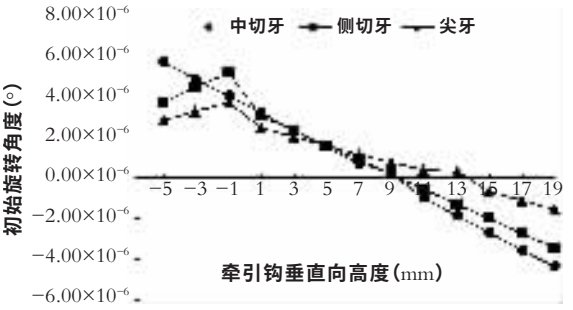


图 2 上颌中切牙、侧切牙以及尖牙的阻抗中心位置

2.2 上颌前牙段内收时的阻抗中心

通过对上颌中切牙、上颌侧切牙以及上颌尖牙的旋转角度进行算术平均数求解,得到上颌前牙段在内收时的阻抗中心高度为距离牙槽嵴顶 5.1 mm(图 3)。

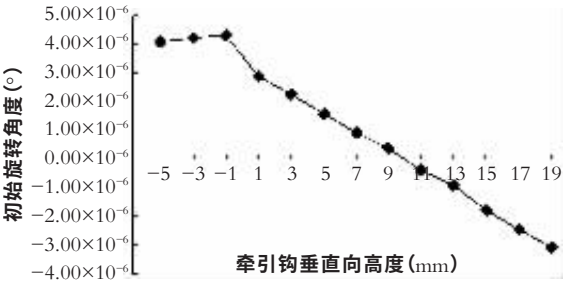


图 3 上颌前牙组阻抗中心位置

2.3 上颌中、侧切牙以及尖牙的旋转中心常数

上颌中切牙、侧切牙以及尖牙的旋转中心常数 S^2 分别为 50.26、57.30、132.73 mm^2。

3 讨论

牙齿的阻抗中心是影响正畸牙齿移动的重要力学参数。牙齿阻抗中心的位置与牙齿的形态、牙槽嵴高度以及周围环境对牙齿的约束有关[10,11]。关于单个牙齿的阻抗中心位置已有诸多生物力学研究。然而在临床实际工作中,很少有对单个牙齿进行移动控制。在单个牙齿移动的同时,周围的牙齿、正畸矫治器均可能对牙齿产生一定的约束,从而改变牙齿的阻抗中心位置。因此,将牙齿放在具体的力学环境以及约束关系中予以整体考虑对于正确理解正畸牙移动规律极为重要。

正畸牙移动按照移动方式主要分为整体移动和倾斜移动。由于临床加力点位于牙齿阻抗中心的切方,因此牙齿往往容易产生倾斜移动。只有当正畸力通过组牙的阻抗中心时,组牙才可能产生整体移动,而这在以往的矫治力系中很难达到。近年来,微螺钉种植体支抗的出现为组牙的整体移动提供了技术上的可能

性[12]。本研究在模型设计过程中一方面采用高精度的螺旋CT扫描,并根据Materialize公司的MIMICS软件对不同组织灰度值进行阈值化(Threshold)操作,从而避免了人工划分组织所产生的误差,保证了整个模型的几何相似性。托槽的粘结、正畸弓丝以及牵引钩的放置,微种植体的植入均参照临床实际情况。因此,建立的"微种植体支抗-上颌前牙整体内收"三维有限元模型与临床实际模型具有高度的仿真性。

目前关于组牙内收的阻抗中心研究主要有全息激光干涉法[13]、磁感应系统[14]、光弹法[15]等方法。值得注意的是:全息激光干涉法与光弹法采用的是硅橡胶作为牙周膜的仿真材料,可能与牙周膜的真实力学性能存在一定差异。此外,上述方法没有设计正畸矫治器,很难反映真实临床实际约束条件。而运用磁感应系统虽然可以反映组牙受力后的牙齿初始移动,但却很难反应牙周膜的应力-应变分布状况,而后者正是牙齿产生继发性牙移动的始动因子。用三维有限元法研究上颌前牙的阻抗中心在力学环境的仿真程度以及对牙齿继发性移动的预测方面具有一定的优势。

在本研究中,上颌中切牙的阻抗中心距离腭侧牙槽嵴顶约为2.94 mm,小于Yoshida等[8]用磁感应法测得的3.6 mm。这可能与在实验设计中Yoshida等的矫治力是直接作用在上中切牙上,而本研究是通过在侧切牙和尖牙间的牵引钩施加正畸力有关。此外,在本研究中,我们将牙齿的三维方向的角度根据理想𬌗的要求进行数值模拟排列,所有牙齿均达到正常的转矩度。而在Yoshida等研究中,选择的患者为错𬌗畸形患者,上前牙明显唇倾,而这一差异也将导致阻抗中心位置的不同。本研究结果表明,在运用微种植体支抗进行上颌前牙的组牙内收时,上颌中切牙、侧切牙以及尖牙的阻抗中心位置是不同的:上颌尖牙的阻抗中心最靠近根尖,其次是上颌侧切牙,最后才是中切牙。

旋转中心常数S^2代表牙齿抵抗倾斜移动的能力,较大的S^2值表示该牙齿抵抗倾斜移动的能力较强。牙根的长度、形态以及角度均可能影响旋转中心常数的值。本研究结果表明,上颌中切牙与上颌侧切牙的旋转中心常数比较接近,而上颌尖牙的旋转中心常数明显大于切牙。这说明上颌尖牙比切牙在整体内收时更能抵抗倾斜移动。此外,与以往单个牙的旋转中心常数比较,本研究中、侧切牙的旋转中心常数显著大于Choy等[9]的研究(17.5 mm^2)。旋转中心常数大小的差异一方面与研究方法的选择、模型本身几何尺寸的差异有关,另一方面也提示前牙段作为一个整体内收时比单个牙的内收更能抵抗牙齿的倾斜移动。

本研究结果较好地反映了种植体支抗整体内收上颌前牙过程中牙齿受力时发生的瞬间位移与作用力高度的关系,为这一力系的临床应用提供了生物力学依据。然而,牙齿的移动是牙周膜组织对于外力作用的长期反应,基于骨重建原理的长期正畸牙移动规律尚值得进一步研究。

参考文献:

[1] Ramos A L, Sakima M T, Pinto-Ados S, *et al*. Upper lip changes correlated to maxillary incisor retraction—a metallic implant study[J]. Angle Orthod, 2005, 75(4): 499-505.

[2] Cattaneo P M, Dalstra M, Melsen B. Moment-to-force ratio, center of rotation, and force level: a finite element study predicting their interdependency for simulated orthodontic loading regimens[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008, 133(5): 681-689.

[3] Park H S, Kwon T G. Sliding mechanics with microscrew implant anchorage[J]. Angle Orthod, 2004, 74(5): 703-710.

[4] 张翼, 张磊, 樊瑜波, 等. 微植体支抗滑动法内收上颌前牙的三维有限元研究[J]. 华西口腔医学杂志, 2009, 27(5): 557-560.

[5] Vasquez M, Calao E, Becerra F, *et al*. Initial stress differences between sliding and sectional mechanics with an endosseous implant as anchorage: a 3-dimensional finite element analysis[J]. Angle Orthod, 2001, 71(4): 247-256.

[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): 23-24, 28.

[7] Kojima Y, Fukui H. Numerical simulation of canine retraction by sliding mechanics[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2005, 127(5): 542-551.

[8] Yoshida N, Koga Y, Mimaki N, *et al*. *In vivo* determination of the centres of resistance of maxillary anterior teeth subjected to retraction forces[J]. Eur J Orthod, 2001, 23(5): 529-534.

[9] Choy K, Kim K H, Burstone C J. Initial changes of centres of rotation of the anterior segment in response to horizontal forces[J]. Eur J Orthod, 2006, 28(5): 471-474.

[10] Geramy A. Initial stress produced in the periodontal membrane by orthodontic loads in the presence of varying loss of alveolar bone: a three-dimensional finite element analysis[J]. Eur J Orthod, 2002, 24(1): 21-33.

[11] Vanden-Bulcke M M, Burstone C J, Sachdeva R C, *et al*. Location of the centers of resistance for anterior teeth during retraction using the laser reflection technique[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 1987, 91(5): 375-384.

[12] 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, 2005, 75(1): 129-141.

[13] Burstone C J, Pryputniewicz R J. Holographic determination of centers of rotation produced by orthodontic forces[J]. Am J Orthod, 1980, 77(4): 396-409.

[14] Sia S, Koga Y, Yoshida N. Determining the center of resistance of maxillary anterior teeth subjected to retraction forces in sliding mechanics. An *in vivo* study[J]. Angle Orthod, 2007, 77(6): 999-1003.

[15] Matsui S, Caputo A A, Chaconas S J, *et al*. Center of resistance of anterior arch segment[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2000, 118(2): 171-178.

(**收稿**:2009-10-14;**修回**:2009-12-01)
(编辑 张 维)