

文章编号:1004-7220(2014)06-0543-05

# 隐形矫治中不同移动方式下颌尖牙的机械响应

蔡永清<sup>a</sup>, 杨晓翔<sup>b</sup>, 何炳蔚<sup>b</sup>

(福州大学 a. 化学化工学院; b. 机械工程与自动化学院, 福州 350000)

**摘要:** **目的** 比较隐形矫治中下颌尖牙在不同移动方式下的机械响应。**方法** 根据牙齿及其支持组织的计算机断层扫描图像,建立下颌前牙及牙周组织有限元模型,模拟尖牙在颊舌方向上的平移、倾斜、旋转,以获得这3种不同移动方式下尖牙及其牙周膜的位移和应力。**结果** 尖牙的初始运动和牙周膜的应力分布主要由尖牙的运动类型决定。在平移和倾斜移动中,牙周膜的应力分布和尖牙移动趋势相似。尖牙旋转的整体移动趋势在相同的位移幅度下远远大于平移移动的整体运动趋势。**结论** 下颌尖牙对不同移动方式的机械响应方式及程度是不同的。熟悉牙齿的这些响应的差异有助于利用不同运动方式牙齿的机械响应特点,设计更加合理的隐形矫治方案,避免损伤牙周组织,并且以最短的时间完成牙齿矫正。

**关键词:** 下颌尖牙; 隐形矫治; 有限元分析; 位移; 应力

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

## Mechanical responses from mandibular canine with different movement types in Invisalign treatment

CAI Yong-qing<sup>a</sup>, YANG Xiao-xiang<sup>b</sup>, HE Bing-wei<sup>b</sup> ( *a. Department of Chemical Engineering; b. Department of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China* )

**Abstract: Objective** To compare mechanical responses from mandibular canine with different movement types in orthodontic treatment with Invisalign. **Methods** Based on computed tomography images of the teeth and their supporting tissues, the finite element model of the mandible and periodontal ligaments was established. The translation, inclination and rotation movements of the canine in buccolingual direction were simulated to obtain displacements and stresses of the canine and periodontal ligaments under the three different movements. **Results** The initial movements of the canine and stress distributions on periodontal ligaments were mainly determined by different movement types of the canine. The stress distributions on periodontal ligaments were similar when the canine was in translation and inclination movements. The bodily movement trend of the canine was much larger in rotation movement than that in translation movement under the same displacement magnitude. **Conclusions** The mechanical responses and its degrees from canine would be different under different movement types. To get better understanding with such different responses can help design more reasonable orthodontic treatment with Invisalign, avoid the damage to periodontium and achieve the orthodontic treatment with less time.

**Key words:** Mandibular canine; Invisalign treatment; Finite element analysis; Displacement; Stress

正畸治疗的目的是获得牙齿在牙弓的适当位置,以达到最好的咬合功能和美观性能。应用于齿列矫正的装置包括支架、金属丝和其他设备,它们在

齿冠上施加作用力系,从而使得牙齿移动<sup>[1]</sup>。1997年以来,隐形矫治技术由于其美观性已经成为正畸治疗的主要方法之一<sup>[2-5]</sup>。每个矫治器都包含了所

收稿日期:2014-01-18; 修回日期:2014-02-19

基金项目:福建省教育厅 A 类科技项目(JA11010)。

通信作者:杨晓翔,教授,博士研究生导师, E-mail: yangxx@fzu.edu.cn。

需的牙齿位移,并以其他牙齿作为支抗,故牙齿通过矫治器施加的力而发生移动。大多数有关隐形矫治的研究都集中在个别病例报道<sup>[6-9]</sup>、技术和特定材料方面<sup>[10-15]</sup>,针对隐形矫治中不同牙齿移动机械响应的评估研究还较少。如果能够了解牙颌组织对所设计的矫治器的机械响应,将有助于隐形矫治方案的设计和优化。

在正畸力作用下,牙齿的瞬时转动中心和牙周膜的应力分布趋势直接影响牙槽骨的重建和牙齿的移动。正畸牙齿的移动方式可以概括为平移、旋转和它们的组合。这些移动可以用正畸牙齿的瞬时旋转中心来区分<sup>[16]</sup>,取决于使用的矫治力体系和根、冠长度。牙槽骨是高度可塑性组织,也是人体自身骨骼中变化最活跃的部分,它的变化与牙齿的发育和萌出、乳牙替换、恒牙移动和咀嚼功能均有关系<sup>[17]</sup>。矫治装置的外部机械作用会引起牙周膜的应力变化,从而影响牙槽骨的重塑。骨的重塑包括受压部位引起的骨吸收在受拉部位形成新骨沉积,从而完成牙槽骨的重塑和牙齿的移动<sup>[18-21]</sup>。因此,牙周膜中的应力对于评价牙齿移动十分重要。一般认为,主应力能客观反映物体所受应力的情况。

本文以 Von Mises 应力和第 1 主应力作为衡量应力水平的主要指标。Von Mises 应力是按照第 4 强度理论定义的一种等效应力,其计算公式为

$$\sigma_{\text{Von}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

其中: $\sigma_{\text{Von}}$ 为 Von Mises 应力; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第 1、2、3 主应力。

有限单元方法已经成为位移、应力和应变分析的有效数值分析技术。本文旨在建立模拟计算的矫治模型,研究尖牙在颊舌方向上平移、倾斜、旋转 3 种不同移动类型时的初始位移、旋转中心及应力分布情况。

## 1 材料与方法

### 1.1 有限元建模

以下颌骨组织作为研究对象,建立下颌前牙及牙周组织三维模型(见图 1)。选取一名牙颌没有疾病、畸形和损伤的志愿者,在其下颌以 0.5 mm 间隔进行计算机断层扫描(Philips/Brilliance 64)。前牙和牙槽骨的几何形状由 Mimics 和 Geomagic Studio

软件根据 CT 图像重建。在 Materialise 3-Matic 软件中将牙齿稍微平移,以使得相邻的牙齿没有相互接触。然后,三维模型被导入到有限元软件 ABAQUS 做进一步分析。与其他研究相似<sup>[22-24]</sup>,将牙周膜模拟为牙根周围 0.25 mm 的薄层。本文中下颌尖牙被作为需要矫正的牙齿。隐形矫治器的厚度设为 0.8 mm<sup>[25]</sup>。

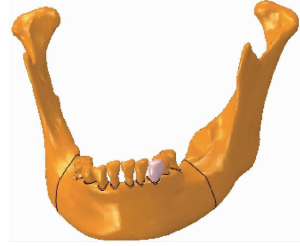


图 1 下颌前牙列及所要移动尖牙的三维模型

Fig. 1 3D mandible model of the anterior section and the canine designed to move

正畸矫正器的建模过程如下:①在牙颌模型中,牙冠(其中尖牙被移动到所需的位置)在冠外表面的法线方向上增厚 0.8 mm,②将所有获得的增厚牙冠合并(布尔加法运算),③步骤②中获得的模型用来减去增厚前的牙齿模型(布尔运算),以获得矫治器模型。

牙齿、牙周膜和牙槽骨设为各向同性、均匀、线性弹性材料,有限元模型选取 10 节点 4 面体单元。材料属性及有限元模型的单元和节点数见表 1。

表 1 材料属性<sup>[25]</sup>和有限元模型的单元数和节点数

Tab. 1 Material properties, unit and node numbers of the finite element model

材料	弹性模量/MPa	泊松比	单元数	节点数
牙体	18 600	0.31	16 243	27 635
牙槽骨	13 700	0.30	50 878	79 098
牙周膜	0.68	0.49	12 467	25 517
矫治器	816.31	0.30	19 274	37 047

### 1.2 载荷和边界条件

牙颌模型(矫正前)和矫治器模型以牙颌模型(矫正前)的坐标系为基准进行装配,模拟矫治器的佩戴。牙冠和矫正器的相互作用设为无摩擦,将下颌骨底部表面固定。

### 1.3 模拟计算

本文中3种基本的位移方式分别为:① 平移,即尖牙从唇侧到舌侧平移0.15 mm。② 旋转,即尖牙远端侧绕尖牙长轴从唇侧到舌侧旋转2°。③ 倾斜,即倾斜牙冠从舌侧至唇侧倾斜移动2°。每种移动类型有3例,其不同之处在于尖牙的初始位置(见表2)。

表2 尖牙治疗前的初始位置

Tab.2 Initial displacements of the canine in each case

		治疗前尖牙的位置
平移移动	Tr1	初始位置
	Tr2	相对初始位置远中端绕牙长轴由唇侧向舌侧旋转2°
	Tr3	相对初始位置牙冠由舌侧向唇侧倾斜2°
旋转移动	Ro1	初始位置
	Ro2	相对初始位置由唇侧向舌侧平移0.15 mm
	Ro3	相对初始位置牙冠由舌侧向唇侧倾斜2°
倾斜移动	Ti1	初始位置
	Ti2	相对初始位置由唇侧向舌侧平移0.15 mm
	Ti3	相对初始位置远中端绕牙长轴由唇侧向舌侧旋转2°

## 2 结果

### 2.1 尖牙的初始位移

所有模拟的初始位移大小和冠根初始位移的比值( $R_{cr}$ )见表3。

表3 不同移动方式下尖牙初始位移

Tab.3 Initial displacements of the canine in each case

	牙冠的初始 位移/ $\mu\text{m}$	牙根尖端初始 位移/ $\mu\text{m}$	$R_{cr}$
Tr1	72.39	22.86	3.17
Tr2	77.40	30.41	2.55
Tr3	80.08	26.85	2.98
最大偏差/%	9.60	24.80	19.60
Ro1	105.3	8.68	12.13
Ro2	101.7	5.94	17.12
Ro3	100.5	9.28	10.83
最大偏差/%	4.56	36.00	36.74
Ti1	52.30	17.60	2.97
Ti2	55.32	22.38	2.47
Ti3	44.03	22.33	1.97
最大偏差/%	20.4	21.4	33.6

相同移动方式下牙冠与牙根位移的最大偏差值计算公式为

$$d_{\text{md}} = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{d_{\text{max}}} \times 100\%$$

其中: $d_{\text{md}}$ 为同一移动牙冠或牙根位移最大偏差; $d_{\text{max}}$ 为位移最大值; $d_{\text{min}}$ 为位移最小值。

表4总结了尖牙初始的运动趋势和方向。

表4 尖牙的初始移动趋势

Tab.4 Initial movement trends of the canine in each case

尖牙初始移动趋势		移动方向
平移	倾斜	牙冠自唇侧向舌侧
旋转	旋转	远中端自唇侧向舌侧
倾斜	倾斜	牙冠自舌侧向唇侧

### 2.2 尖牙牙周膜的 Von Mises 应力和主应力

表5列出了所有算例牙周膜最大 Von Mises 应力值。由于牙周膜中3个主应力的分布相似,本文只讨论牙周膜第1主应力( $S_1$ )的分布趋势。表6列出了所有算例牙周膜最大主应力值。表7总结了牙周膜 Von Mises 应力和主应力的集中区域。

表5 所有算例牙周膜最大 Von Mises 应力

Tab.5 The maximum Von Mises stresses of periodontal ligaments in each case

		最大 Von Mises 应力/MPa
平移移动	Tr1	0.480 5
	Tr2	0.583 9
	Tr3	0.609 8
旋转移动	Ro1	0.549 6
	Ro2	0.344 0
	Ro3	0.606 3
倾斜移动	Ti1	0.413 1
	Ti2	0.502 2
	Ti3	0.362 7

表6 不同移动方式下牙周膜第1主应力最大拉、压应力

Tab.6 The maximum tensile and compressive  $S_1$  of periodontal ligaments in each case

		$S_1$ 最大拉应力/MPa	$S_1$ 最大压应力/MPa
平移移动	Tr1	1.375	1.461
	Tr2	0.857	1.340
	Tr3	1.334	1.784
旋转移动	Ro1	1.188	1.164
	Ro2	1.245	1.057
	Ro3	1.188	0.975
倾斜移动	Ti1	1.168	0.962
	Ti2	1.888	1.875
	Ti3	0.713	0.973

表7 不同移动方式下牙周膜 Von Mises 应力和第1主应力集中区域  
Tab. 7 Von Mises stresses and  $S_1$  concentrated areas of periodontal ligaments in each case

	Von Mises 应力集中区域	$S_1$ 集中区域
平移移动	牙周膜颈缘和根尖底部	拉应力:唇侧上部 压应力:舌侧上部
旋转移动	内表面:唇侧和舌侧面	拉应力:远中面靠近舌侧部分和 近中面底部靠近唇侧部分
	外表面:近中和远中侧面	压应力:近中面靠近舌侧部分和 远中面底部靠近唇侧部分
倾斜移动	牙周膜颈缘和根尖底部	拉应力:远中面上部 压应力:近中面上部和根尖部

### 3 讨论

#### 3.1 初始位移

在平移和旋转移动中,根尖的初始位移差异明显大于牙冠的初始位移。其中,最大的根尖初始位移偏差为36%,位于旋转移动中;而牙冠初始位移最大偏差为20.4%,位于倾斜移动中。这表明在旋转和倾斜运动中,尖牙的位置对根尖初始位移的影响要大于牙冠的。然而,在倾斜移动中,牙冠和根尖初始位移的差异很接近。因此,倾斜移动中尖牙的初始位置对牙冠和根尖初始位移的影响相近。

冠根初始位移的比值  $R_{cr}$  越大,旋转中心越靠近根尖,从而尖牙的移动更接近整体移动。平移和倾斜移动中,  $R_{cr}$  很接近。然而,旋转移动  $R_{cr}$  远远大于平移和倾斜  $R_{cr}$ 。旋转移动的牙冠最大初始位移约为平移移动牙冠最大位移的1.31倍,而旋转移动  $R_{cr}$  约为平移移动最大  $R_{cr}$  的5.40倍。因此,在相同的位移量下,旋转移动的整体运动趋势比平移移动更为明显。

平移和倾斜移动中尖牙的初始运动趋势都是倾斜移动。尖牙的最大位移位于牙冠,最小位移位于牙根距根尖1/3根长的区域,这说明平移和倾斜移动的旋转中心位于尖牙长轴距根尖约1/3根长的点。然而,该旋转中心在矫治过程中不断变化,故可以认为尖牙是通过分段的倾斜移动以达到平移移动。

#### 3.2 应力

Von Mises 应力和主应力的分布趋势在相同移动方式的例子中相似,表明应力分布主要由尖牙的

移动方式决定。平移和倾斜移动的应力分布趋势相似。旋转移动中,Von Mises 应力集中区域面比平移和倾斜移动大得多,证明尖牙旋转的整体运动趋势比平移移动更强。

相同移动方式不同例子的最大应力不同,说明尖牙的初始位置和牙周膜的几何形状对应力有较大的影响。

对于一定的牙颌组织,牙齿的移动主要取决于牙周组织的机械响应。本研究结果表明,牙齿的机械响应主要由牙齿的移动方式和移动量决定。了解不同移动方式下牙齿的机械响应,将有助于隐形矫治方案的设计和优化。例如,在某种情况下,要达到最终相同的矫治效果,其实可以有很多种移动方案选择,这时可以根据各种方式的机械响应选择更为合适的方案,以减少牙周组织的损伤,并在最短时间内完成矫治,如需要整体移动时应该首先考虑旋转移动。

### 4 结语

尖牙的位置对尖牙的初始位移影响很大,尤其是牙根的位移。牙周膜中的应力分布趋势和尖牙的运动趋势主要是由尖牙的移动方式决定。在平移和倾斜移动中,牙周膜的应力分布和尖牙的运动趋势相似。在旋转移动中,尖牙最初的整体移动趋势比平移移动更强。

### 参考文献:

- [1] Proffit WR, Ackerman JL. Diagnosis and treatment planning in orthodontics [M]. Philadelphia: WB Saunders Company, 1994: 3-13.
- [2] Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the invisalign appliance for moderate to complex malocclusions [J]. J Dent Educ, 2008, 72(8): 948-967.
- [3] Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, et al. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 135(1): 27-35.
- [4] Kuo E, Miller RJ. Automated custom-manufacturing technology in orthodontics [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2003, 123(5): 578-581.
- [5] Meier B, Wiemer KB, Miethke RR. Invisalign-patient profiling. Analysis of a prospective survey [J]. J Orofac

- Orthop, 2003, 64(5): 352-358.
- [6] Miller RJ, Derakhshan M. The invisalign system: Case report of a patient with deep bite, upper incisor flaring, and severe curve of spee [J]. *Semin Orthod*, 2002, 8(1): 43-50.
- [7] Honn M, Goz G. A premolar extraction case using the Invisalign system [J]. *J Orofac Orthop*, 2006, 67(5): 385-394.
- [8] Turatti G, Womack R, Bracco P. Incisor intrusion with Invisalign treatment of an adult periodontal patient [J]. *J Clin Orthod*, 2006, 40(3): 171-174.
- [9] Marcuzzi E, Galassini G, Procopio O, *et al.* Surgical-Invisalign treatment of a patient with Class III malocclusion and multiple missing teeth [J]. *J Clin Orthod*, 2010, 44(6): 377-384.
- [10] Robert LB, Vicki W. Three-dimensional diagnosis and orthodontic treatment of complex malocclusions with the invisalign appliance [J]. *Semin Orthod*, 2001, 7(4): 274-293.
- [11] Bollen AM, Huang G, King G, *et al.* Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2003, 124(5): 496-501.
- [12] Wheeler TT. Invisalign material studies [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2004, 125(3): 19A.
- [13] Miller RJ, Kuo E, Choi W. Validation of Align Technology's Treat III digital model superimposition tool and its case application [J]. *Orthod Craniofac Res*, 2003, 6(Suppl 1): 143-149.
- [14] Eliades T, Pratsinis H, Athanasiou AE, *et al.* Cytotoxicity and estrogenicity of Invisalign appliances [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2009, 136(1): 100-103.
- [15] Melkos AB. Advances in digital technology and orthodontics: A reference to the Invisalign Method [J]. *Med Sci Monit*, 2005, 11(5): 39-42.
- [16] Chen J, Katona TR. The limitations of the instantaneous center of rotation in joint research [J]. *J Oral Rehabil*, 1999, 26(4): 274-279.
- [17] 窦宁, 郭晓宁, 何炳蔚. 隐形矫正器作用下牙颌组织的生物力学实验分析[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(6): 454-458.
- Dou N, Guo XN, He BW. Biomechanics experimental analysis on dental cast under orthodontic forces with invisaligner [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(6): 454-458
- [18] Burstone CJ. Application of bioengineering to clinical orthodontics [M]. Philadelphia: WB Saunders Company, 1994: 235-267.
- [19] Roberts WE. Bone physiology, metabolism, and biomechanics in orthodontics practice [M]. Philadelphia: WB Saunders Company, 1994: 193-233.
- [20] Tanne K, Inoue Y, Sakuda M. Biomechanical behavior of the periodontium before and after orthodontic tooth movement [J]. *Angle Orthod*, 1995, 65(2): 123-128.
- [21] Smith RJ, Burstone CJ. Mechanics of tooth movement [J]. *Am J Orthod*, 1984, 85(4): 294-307.
- [22] McGuinness N, Wilson AN, Jones M, *et al.* Stresses induced by edgewise appliances in the periodontal ligament—A finite element study [J]. *Angle Orthod*, 1992, 62(1): 15-22.
- [23] Wilson AN, Middleton J, Jones ML, *et al.* The finite element analysis of stress in the periodontal ligament when subject to vertical orthodontic forces [J]. *J Orthod*, 1994, 21(2): 161-167.
- [24] McGuinness NJ, Wilson AN, Jones ML, *et al.* A stress analysis of the periodontal ligament under various orthodontic loadings [J]. *Eur J Orthod*, 1991, 13(3): 231-242.
- [25] 唐娜, 赵志河, 王军, 等. 无托槽隐形矫治技术生物力学效应的有限元法研究[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 399-405.
- Tang N, Zhao ZH, Wang J, *et al.* Biomechanical effects of bracketless appliance technology: A finite element method study [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 399-405.