

# 无托槽隐形矫治技术与固定矫治技术 尖牙远中移动的有限元对比分析

白玉兴 王 凡 祁 鹏 周洁珉 厉 松 岐红恩

**【摘要】** 目的 通过对无托槽隐形矫治技术与固定矫治技术中远中移动尖牙过程的生物力学特点进行比较分析,深入探讨无托槽隐形矫治技术中牙齿移动的生物力学规律。方法 建立下颌双侧第一前磨牙拔除的三维有限元模型,模拟无托槽隐形矫治器载荷和固定矫治器载荷,比较两种载荷作用下牙齿及牙周膜的平均主应力和 Von Mises 应力的变化,以及牙齿旋转中心的变化。结果 模拟无托槽隐形矫治器载荷时下牙齿及牙周膜的平均主应力和 Von Mises 应力均小于固定矫治器载荷,同时,牙齿旋转中心更接近根尖。结论 两种矫治技术均使尖牙产生倾斜移动,但使用无托槽隐形矫治技术尖牙的旋转中心更接近根尖,且应力分布更为合理。

**【关键词】** 无托槽隐形矫治技术 有限元 尖牙 应力分布

**A comparative study of distally canine movement by finite element method between invisible aligner and conventional fixed techniques** BAI Yuxing, WANG Fan, QI Peng, et al Department of Orthodontics, Beijing Stomatological Hospital, Capital Medical University, Beijing 100050

**【Abstract】 Objective** To analyze the mechanical characteristics of the invisible aligner technique by comparison of the stress distribution of the distally canine movement by finite element method between invisible aligner and conventional fixed techniques **Methods** A three-dimensional finite element model of mandible which extracted first premolar was reconstructed. Stress distribution and rotation center of canine applied with the invisible aligner or the traditional fixed techniques were obtained. And the comparative study was made between the invisible aligner and the traditional fixed techniques **Results** Stress distribution and rotation center of canine were different when applied with the invisible aligner or the traditional fixed techniques. Significantly lower stress was seen when applied with invisible aligner and rotation center of canine was closer to root tip **Conclusion** Both the invisible aligner and the traditional fixed techniques made canine tilting movement distally, but stress distribution and rotation center of canine were more reasonable when applied with invisible aligner.

**【Key words】** Invisible aligner technique Finite element Canine Stress distribution

中图分类号: R783.5 文献标识码: A

在正畸治疗中,通过拔除第一双尖牙使尖牙远中移动,是拔牙治疗中非常常见的治疗步骤。无论使用固定矫治技术还是无托槽隐形矫治技术<sup>[1,2]</sup>,对尖牙移动过程中的生物力学研究都是非常有意义的。目前,国内外关于固定矫治技术中移动尖牙向远中的研究已经比较深入,但是有关使用无托槽隐形矫治方式移动牙齿的生物力学研究未见报道。本研究通过对无托槽隐形矫治技术与固定矫治技术远中移动尖牙过程中力学特征进行比较,了解无托槽

隐形矫治技术中移动牙齿的生物力学特性,为临床更加合理、科学、有效地应用无托槽隐形矫治技术提供理论依据。

## 资料和方法

1 三维有限元建模方法:本研究采取了中国成年女性下颌拔除第一前磨牙 CT 图像三维重构的方法获取牙颌的有限元模型。采用 Sensation Cardiac 64 (Siemens Germany) CT 机,扫描层厚 0.5mm。

牙颌畸形矫治过程所涉及的牙及牙周组织的力学本构关系做如下简化:①牙、牙周膜、牙槽骨均为均匀、连续的各向同性材料;②牙、牙周膜、牙槽骨均为线弹性材料;③牙的力学本构关系均按牙本质处理;④牙槽骨的力学本构关系均按皮质骨处理。

牙周各组织材料参数见表 1。

基金项目:国家自然科学基金项目资助(30772453);北京市科技计划项目资助(Z07050700690703)

作者单位:100050 北京,首都医科大学北京口腔医学院正畸科(白玉兴、王凡、周洁珉、厉松);北京时代天使生物科技有限公司(祁鹏、岐红恩)

通讯作者:白玉兴 E-mail byuxing@263.net

牙颌畸形矫治过程的约束如下:取下牙颌中线左侧的部分进行分析,同时牙槽骨仅取至第二磨牙远中附近。确定牙颌中牙槽骨的实际位移约束为牙颌中线对称面约束(X向位移约束)和牙颌底面在牙齿高度方向的位移约束(Z向位移约束),同时,为了固定牙颌使其不会因为小的不平衡载荷作用产生大位移,两约束交界处施加固定约束(X、Y、Z三向约束)。

表 1 牙周各组织材料参数

	弹性模量 (MPa)	泊松比
牙本质	19600	0.30
牙槽骨皮质骨	14700	0.28
牙周膜	3	0.45

2 加载方式和应力分析方法:模拟固定矫治技术中的矫治载荷(以下简称固定),于临床冠的中心位置加载一集中力,加载力量约为 100g。

模拟无托槽隐形矫治技术中的矫治载荷(以下简称隐形),于尖牙近中加载一组力量约为 100g 水平向远中的矫治力,均布于牙冠高度的 2/3 部分。

比较两种矫治方式对牙齿及牙周膜的平均主应力和 Von Mises 应力的变化,以及牙齿旋转中心的变化。

### 结 果

1 两种矫治技术尖牙远中移动过程中牙齿及牙周组织平均主应力的比较:研究结果表明,模拟无托槽隐形矫治载荷加载后应力分布与固定矫治方式基本相似(图 1、2),其共同特点为,牙根应力值较大的部位集中在根尖区及牙槽嵴顶部位,根尖附近近中表现为压应力,远中表现为拉应力,牙槽嵴顶附近近中表现为拉应力,远中表现为压应力。牙齿近远中拉应力及压应力的转换位于牙根中 1/3 与跟 1/3 交界附近。牙周膜、牙槽骨受力规律相似,但是,应力绝对值有所减小(图 3)。

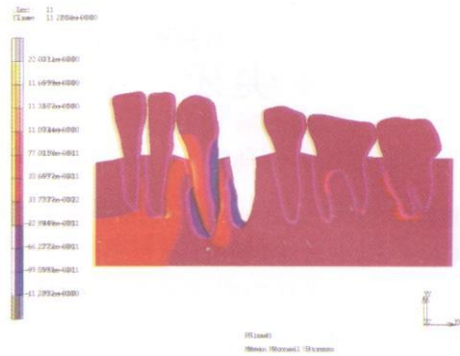


图 2 模拟隐形矫治器载荷加载后应力分布

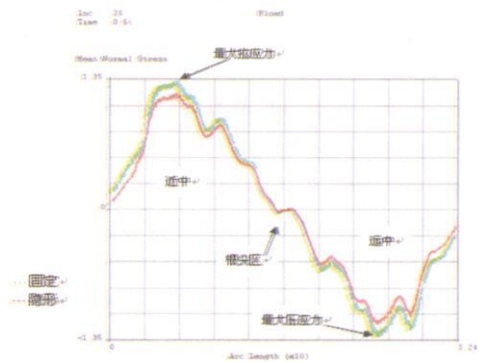


图 3 两种加力方式牙根受到的平均主应力的比较

通过对两种加力方式最大主应力力值的比较(表 2)可以看出,使用无托槽隐形矫治技术牙根所受到的最大拉应力及最大压应力均较使用固定矫治技术小 10% 左右。

表 2 两种加力方式最大主应力的比较

	最大拉应力	最大压应力
固定矫治	1.315MPa	1.297MPa
隐形矫治	1.198MPa	1.178MPa

同时,由图 4、5 可以看出使用无托槽隐形矫治技术与使用固定矫治技术相比,牙根远中受到的最大压应力及近中受到的最大拉应力的区域都较小。即使用无托槽隐形矫治方式应力分布更为均匀,更为合理。

2 两种矫治技术尖牙向远中移动过程中 Von Mises 应力的比较: Von Mises 应力是综合考虑正应力和剪切力的一个参量,常用于表示某种材料承受的总应力情况,可作为判断材料哪里会出现磨损或衰竭的可靠指标<sup>[3]</sup>。

由图 6、7 可见,使用无托槽隐形矫治技术时,牙根各处受到 Von Mises 应力的力值均小于固定矫治技术,应力的峰值及峰值出现的区域都较小,即在相同矫治力的作用下,矫治力对牙根的机械刺激较

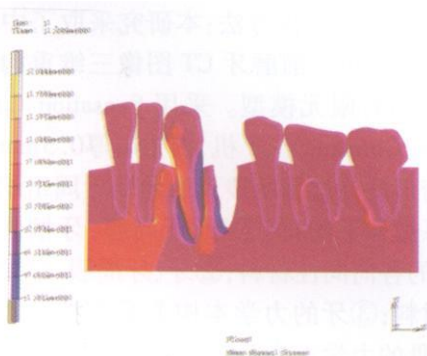
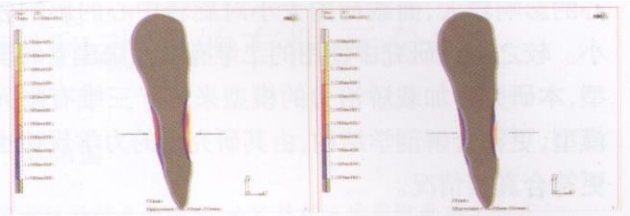


图 1 模拟固定矫治加载后应力分布

小,因此,基于此结果表明,使用无托槽隐形矫治方式对牙齿更为安全。牙槽骨受力规律相似。

3 两种矫治技术旋转中心的比较: 当选择位移量 0~ 0.0007mm之间时,可以显示整个牙齿相对位移量最小的部份,可将其看作牙齿的旋转中心,两种矫治方式旋转中心均位于根中 1/3与根尖 1/3交界附近,使用固定矫治方式时,旋转中心距根尖 4.41976mm,使用无托槽隐形矫治方式时,旋转中心距根尖 4.29652mm,据根尖较近。

在尖牙的牙长轴上,自根尖向牙颈部任取五个点,比较这五个点在固定矫治技术与无托槽隐形矫治技术下的位移量(图 8),结果发现,使用无托槽隐形矫治技术在这五个点的位移量均小于固定矫治方式,表明使用无托槽隐形矫治尖牙远中移动时,牙根上各点的位移量均小于使用固定矫治技术,即使用无托槽隐形矫治方式移动牙齿时的倾斜量小于固定矫治,更接近整体移动。



固定矫治方式最大 Von Mises 应力区域 隐形矫治方式最大 Von Mises 应力区域  
图 7 两种矫治方式最大 Von Mises 应力区域的比较

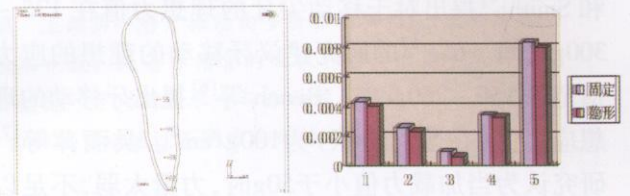
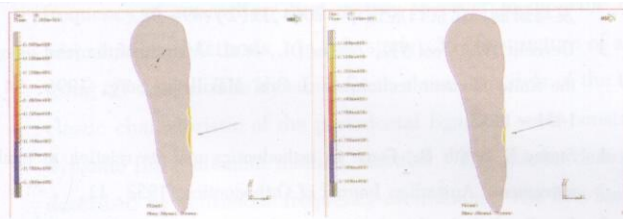


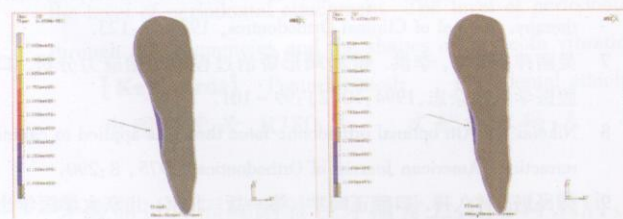
图 8 两种矫治方式位移量的比较

### 讨 论

1 有限元模型的建立及其特点: 本研究使用由牙颌三维模型上沿牙弓曲线将牙颌展开成平面得到各部分二维有限元模型加力,可以有效避免使用三维有限元模型过程中由于各种组织复杂的接触关系而带来的计算结果的误差,同时,又可以比较准确的模拟牙弓在近远中方向上的力学关系。任何一颗牙齿的移动都可以看作是其在近远中向、唇舌向及龈颌向分别移动的总效果,本研究只分析尖牙在近远中方向上的应力分布及牙齿的移动规律,其力学规律亦可用于对于唇舌向的研究。而由于忽略了唇舌向上的分力,可能会引起误差,导致得到的应力值略大,但影响较小,相对于使用三维有限元模型复杂的接触关系带来的较大误差,进行合理的简化,使用二维模型是可行的。Takahashi等用二维有限元法分析了不同载荷下上中切牙、下第二双尖牙和下第一磨牙的反应。研究的内容包括牙的挠曲变形、旋转中心、牙周膜的应力分布、牙的旋转力矩和牙周膜的支持力等。Williams等采用二维有限元法计算上中切牙瞬时转动中心的位置,发现当牙周膜泊松比在 0~ 0.45的范围变化时,转动中心的位置对其变化不敏感,转动中心的位置与载荷大小无关,而与其作用点有关,当载荷向牙颈部移动时,转动中心越接近根尖。在这一研究的基础上,Williams等又用二维有限元法研究了活动矫治器移动尖牙的情况,并且用临床上病例的实际测量值与有限元法的理论计算值作比较,两种方法都发现载荷的角度对旋转中



固定矫治方式最大压应力区域 隐形矫治方式最大压应力区域  
图 4 两种矫治方式最大压应力区域比较



固定矫治方式最大拉应力区域 隐形矫治方式最大拉应力区域  
图 5 两种矫治方式最大拉应力区域比较

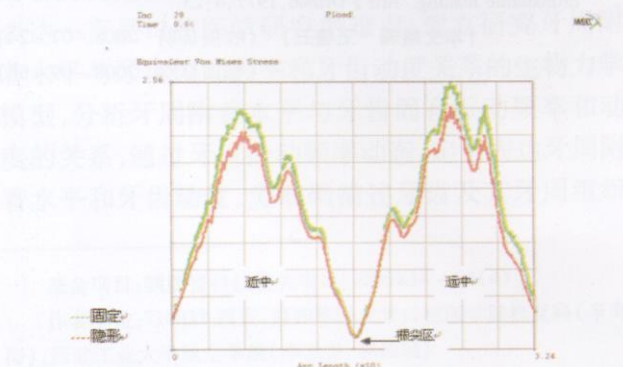


图 6 两种矫治方式牙根受到 Von Mises 应力的比较

心的影响较大,而载荷的大小对旋转中心的影响较小。较之以往研究中使用的二维有限元法建立的模型,本研究中加载矫治力的模型来源于三维有限元模型,更符合解剖学结构,由其研究出的力学规律也更符合真实情况。

2 尖牙移动力值的确定:关于牙齿移动的适宜力值一直是多年来正畸界关注的领域之一。Storey和 Smith<sup>[4]</sup>提出对于移动尖牙的理想力值在 175~300g之间。Lee<sup>[5]</sup>的研究建议牙移动的理想应力值范围 150~260g/cm<sup>2</sup>, Bench等<sup>[6]</sup>提出牙移动的理想应力值(在牙周组织)为 100g/cm<sup>2</sup>。吴丽萍等<sup>[7]</sup>研究认为当加载力值小于 50g时,力量太弱,不足以引起牙周组织的明显反应,牙体无明显移动;而力值高于 200g时,容易导致软组织的血液循环因受压迫而停滞,影响其正常的生理性的破骨与成骨活动。Nokola<sup>[8]</sup>提出:评价最佳力不应以加载牙冠的力为准,而应考虑牙周膜的应力状况才是推动骨重建和正畸牙移动的关键。目前多数的观点认为<sup>[9]</sup>,牙齿移动的最适力值有一个较宽的范围,每个人每颗牙都不相同,临床上尖牙远中移动使用的矫治力值为 50~120g,而在对尖牙的有限元研究中最多选用的加载力值是 100g和 150g,本研究所采用的 100g是基于临床上许多医师认可的矫治力值,且目前在使用无托槽隐形矫治时,使用的正畸力值为 100g,以确保正畸矫治力对牙周组织健康无明显影响。

3 两种矫治技术尖牙远中移动生物力学特性:正畸力作用下牙齿的瞬间转动中心(Instantaneous Center of Rotation, ICR)及牙周膜和牙槽骨的应力分布与骨组织的改建及牙齿移动的方式直接相关。因此,了解牙齿受正畸力后的瞬间移动情况以及牙周膜、牙槽骨的应力分布是我们了解正畸力系统与正畸牙齿移动之间关系的前提。当旋转中心位于无穷远点时,牙齿呈现整体移动。Yettanm<sup>[10]</sup>在对上颌中切牙的研究中,发现牙齿的 ICR 均在根尖 1/3附

近。Takahashi等的研究认为单根牙在受到水平力的作用下,ICR 位于根中 1/3与根尖 1/3交界处。本研究结果与他们相同。当牙齿的旋转中心越靠近根尖,牙齿的移动方式就越接近整体移动。本研究中,使用无托槽隐形矫治技术比使用固定矫治方式移动牙齿时,牙齿更接近整体移动。

从两种不同矫治技术引起尖牙远中移动的牙及其周围组织的平均主应力、Von Mises应力和对于牙齿的旋转中心的分析综合来看,使用无托槽隐形矫治方式移动牙齿时,其应力值相对较小,且分布更为合理,对牙齿更为安全。在临床应用中,尤其在用于牙周病患者的正畸治疗时,可以更为有效的保护牙周组织的健康。

参 考 文 献

- 1 王邦康. 口腔正畸矫治方法的新进展-无托槽隐形矫治器的研究与展望. 北京口腔医学, 2005, 13(1): 2-5.
- 2 白玉兴, 周洁琨, 王邦康. 国产无托槽隐形正畸矫治系统的开发与研制. 北京口腔医学, 2004, 12(2): 89-92
- 3 Devocht JW, Goel VK, Zeidler DL, et al. A study of the joint using the finite element technique. J Oral Maxillofac Surg. 1996, 54: 1431-1437.
- 4 Storey E, Smith R. Force in orthodontics and its relation to tooth movement. Australian Journal of Orthodontics. 1952, 11.
- 5 Lee B. Relationship between tooth movement rate and estimated pressure applied. Journal of Dental Research, 1965, 4: 1053.
- 6 Bench RW, Gugino CF, Hilgers JJ. Forces used in bioprogressive therapy. Journal of Clinical Orthodontics. 1978, 2: 123.
- 7 吴丽萍, 梁悦, 李洪. 错颌畸形矫治过程中初始应力分析. 口腔医学纵横杂志, 1994, 10(2): 99-101.
- 8 Nikoki RJ. On optimal orthodontic force theory as applied to canine retraction. American Journal of Orthodontics. 1975, 8: 290.
- 9 傅民魁, 林久祥. 口腔正畸学. 第一版. 北京: 北京大学医学出版社, 2005.
- 10 Yettanm AL. Center of rotation of a maxillary center incisor under orthodontic loading. Brit J Orthod, 1977, 4: 23.

(本文编辑 王植三) (收稿日期 2008-07-24)  
(修回日期 2008-09-08)