

## 无托槽隐形矫治器内收上颌前牙的三维有限元分析

刘义琮<sup>1</sup>, 冯枫<sup>2</sup>, 李帅<sup>2</sup>, 商永慧<sup>2</sup>, 郭庆圆<sup>2</sup>, 刘文<sup>2</sup>

1. 青岛大学口腔医学院, 山东 青岛 266000; 2. 青岛市市立医院口腔正畸科, 山东 青岛 266000

**【摘要】目的:**通过有限元分析探讨无托槽隐形矫治器内收上颌前牙时的生物力学特性。**方法:**选取1名健康青年志愿者, 获取其上颌骨及牙齿CBCT影像资料, 构建上颌骨复合体及无托槽隐形矫治器的三维有限元模型, 分析矫治器施力控根内收(工况一)以及矫治器施力控根内收辅以微种植钉与Power arm 150 g牵引力内收(工况二)下牙齿位移趋势及牙周膜应力分布情况。**结果:**工况一, 前牙的冠根位移差分别为113.3、92.2、128.6  $\mu\text{m}$ , 最大牙周膜等效应力为79.6 kPa; 工况二, 前牙冠根位移差分别为89.3、74.3、184.2  $\mu\text{m}$ , 最大牙周膜等效应力为37.5 kPa。**结论:**无托槽隐形矫治器联合微种植钉和Power arm可改善上颌切牙倾斜移动的趋势并减少牙根吸收的风险, 但对于尖牙的控制尚不足。

**【关键词】**上颌前牙; 无托槽隐形矫治; 微种植钉; 生物力学; Power arm; 有限元分析

**【中图分类号】**R318.01

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2022)08-1030-05

### Three-dimensional finite element analysis of clear aligner for retracting maxillary anterior teeth

LIU Yicong<sup>1</sup>, FENG Feng<sup>2</sup>, LI Shuai<sup>2</sup>, SHANG Yonghui<sup>2</sup>, GUO Qingyuan<sup>2</sup>, LIU Wen<sup>2</sup>

1. School of Stomatology, Qingdao University, Qingdao 266000, China; 2. Department of Orthodontics, Qingdao Municipal Hospital, Qingdao 266000, China

**Abstract: Objective** To investigate the biomechanical characteristics of the clear aligner in retracting the maxillary anterior teeth through finite element analysis. **Methods** A healthy young volunteer was enrolled in the study, and his CBCT images of maxilla and teeth were obtained for constructing a three-dimensional finite element model of maxillary complex and clear aligner. The teeth displacement trends and periodontal membrane stress distributions in two cases were analyzed. The orthodontic force-controlled tooth root retraction was used in case 1, while orthodontic force-controlled tooth root retraction supplemented with miniscrews implant and Power arm with 150 g traction retraction was adopted in case 2. **Results** In case 1, the displacement differences of the crown root of anterior teeth were 113.3, 92.2, 128.6  $\mu\text{m}$ , and the maximum periodontal membrane equivalent force was 79.6 kPa. In case 2, the displacement differences were 89.3, 74.3, 184.2  $\mu\text{m}$ , and the maximum periodontal membrane equivalent force was 37.5 kPa. **Conclusion** Clear aligner with miniscrews implant and Power arm can improve the tendency of tilting movement of maxillary incisors and reduce the risk of root resorption, but the control of canines is insufficient.

**Keywords:** maxillary anterior teeth; clear aligner; miniscrews implant; Power arm biomechanics; finite element analysis

### 前言

在拔牙中, 固定矫治器通过增加前牙转矩, 设计摇椅弓, 更贴合槽沟的不锈钢钢丝等方法来维持前牙正常的唇舌向倾斜度<sup>[1-2]</sup>。使用隐形矫治器内收上

颌前牙通常会产生多种副作用例如咬合加深、咬合面旋转、后牙支抗丧失以及“过山车”效应。现阶段临床医师在设计隐形矫治时通过增设前牙唇舌向转矩, 垂直向过矫治等方式可以在一定程度上缓解前牙倾斜移动的程度, 但因矫治器缺乏足够的刚度, 使其在关闭拔牙间隙的过程不能维持原始形状, 前牙的整体移动或可控的倾斜移动仍难以实现<sup>[3-5]</sup>。基于临床的实际操作, 隐形矫治器辅以微种植钉与Power arm联合使用可以较好地控制前牙移动。本研究拟通过建立两种载荷下无托槽隐形矫治器内收上颌前牙的三维有限元模型, 对比分析在两种不同的作用

**【收稿日期】**2022-02-20

**【基金项目】**山东省医药卫生科技发展计划项目(202008030332)

**【作者简介】**刘义琮, 硕士研究生, 研究方向: 口腔正畸学, E-mail: liuyc930623@163.com

**【通信作者】**刘文, 副主任医师, 研究方向: 口腔正畸学, E-mail: 1048744782@qq.com

力下上颌前牙的生物力学效应, 以期在设计隐形矫治拔牙病例方案提供临床指导意义。

1 资料与方法

1.1 建立三维有限元模型

通过锥形束CT(KaWo公司, 德国)对1名身体健康志愿者头颅进行扫描, 扫描层厚度为0.45 mm, 获得上颌骨及上颌牙列CT图像513张, 将所得的数据以DICOM格式导入Mimics 17.0 (Materialise Software公司, 比利时), 初步生成完整的上颌骨、上颌牙列实体模型, 保存后以STL格式导入Geomagic Studio 2013 (3D System公司, 美国), 同时采用沿牙根外表面法均匀向外增厚0.25 mm生成牙周膜模型, 精确曲面处理后保存为IGES格式(图1a)。在Geomagic Studio 2013中将上颌牙列均匀向外扩大0.75 mm(参考隐形矫治器膜片参数)后, 通过布尔运算与牙冠进行相应的计算后得到相应厚度的矫治器, 优化操作后进行精确曲面处理, 存储为IGES格式。使用Solidworks(Dassault公司, 法国)建立8 mm高的Power Arm及1.5 mm×10 mm MIA(参考Ormco微种植钉参数)模型并装配所有零件, 将所得的模型以SLDPRT格式存储并导入Ansys Workbench 16.0 (Swanson Analysis公司, 美国), 最终生成无托槽隐形矫治有限元模型(图1b)。总体节点和单元划分为421 652节点数和385 694单元数

1.2 工况设计

工况一: 将上颌前牙以切端为旋转轴向舌侧旋转15°, 根向压低0.15 mm后整体内收0.2 mm; 工况二: 在工况一的基础上, 在上颌第二前磨牙与第一磨牙之间, 距牙槽嵴顶6 mm处植入MIA, Power arm置于尖牙牙颈部1/3处, 同时添加150 g水平向后的牵引力<sup>[6-7]</sup>(图1c)。

1.3 材料特性及边界载荷

牙齿、牙周膜、牙槽骨及矫治器的材料属性设置为均质、连续, 其材料弹性模量及泊松比采用相关研究参考值(表1)<sup>[8-9]</sup>。对上颌骨设置为固定约束, 牙齿与牙周膜、牙槽骨共享有限元节点, 因此牙齿在牙周膜的约束下可于牙槽骨内任意移动; 微种植钉与上颌骨、牙与牙周膜、上颌骨与Power arm均设定为Bond接触关系, 矫治器与牙齿之间设置为Frictional接触关系, 摩擦系数为0.2<sup>[10]</sup>; 隐形矫治器不施加任何载荷及约束条件。

1.4 分析指标

在矫治系统中设定全局系统坐标系, X轴为水平向, 右侧为正向; Y轴为矢状向, 向后为正向; Z轴为垂直向, 向下为正向。观察分析: ①前牙的位移趋

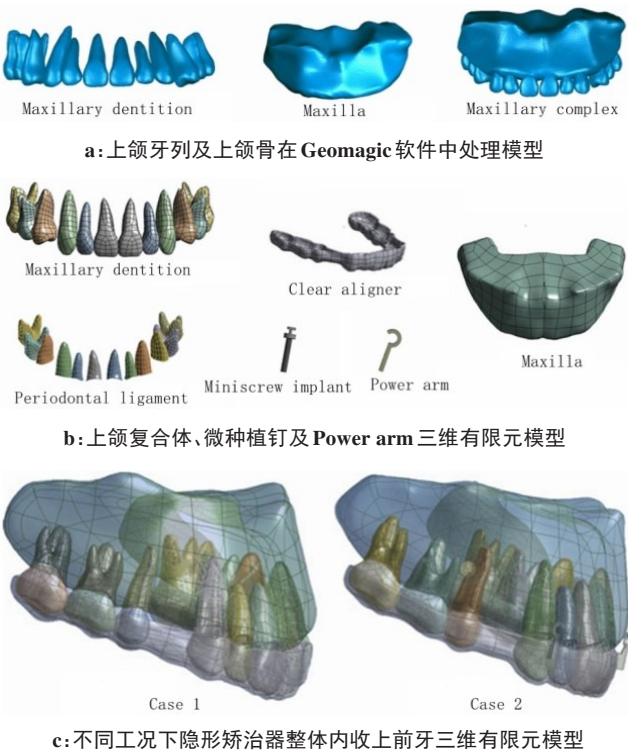


图1 三维有限元模型

Figure 1 Three-dimensional finite element models

表1 各组分杨氏模量及泊松比

Table 1 Young modulus and Poisson's ratio of each component

组分	杨氏模量/MPa	泊松比
牙齿	19 600	0.30
牙槽骨	1 370	0.30
牙周膜	0.066 7	0.45
矫治器	528	0.36
微种植钉	201 000	0.33
Power arm	201 000	0.33

势; ②前牙位于X、Y、Z轴方向的位移; ③牙周膜的应力分布及最大应力。

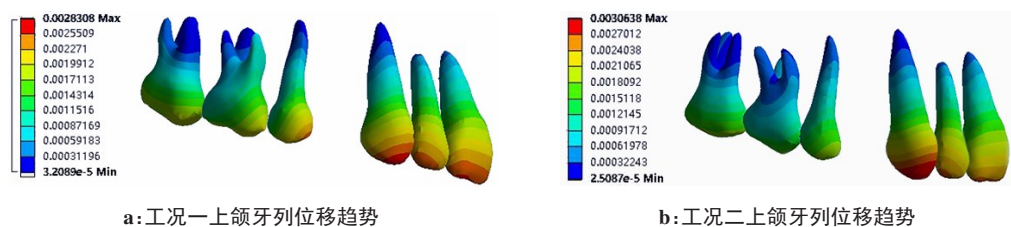
2 结果

2.1 上颌牙列整体位移变化

两种工况下, 上颌前、后牙均成倾斜移动趋势(图2)。前牙呈远中倾斜移动趋势, 后牙呈近中移动趋势。工况一下, 尖牙倾斜移动趋势最为明显, 其次为侧切牙。在辅以MIA及Power arm的情况下, 前、后牙倾斜移动的趋势除尖牙外均明显减小, 但尚不能完全解决前牙倾斜移动及后牙支抗丧失等问题。

2.2 前牙在X、Y、Z轴方向的位移变化

在两种不同的加力方式下, 前牙在矢状向上的位移均呈向舌侧倾斜移动, 其中切牙、侧切牙倾斜移动趋势逐渐减小, 尖牙倾斜移动趋势明显增大。工



a:工况一上颌牙列位移趋势  
b:工况二上颌牙列位移趋势

图2 牙列位移趋势

Figure 2 Displacement trend of dentition

况一前牙冠根在矢状向位移差分别为 113.3、92.2、128.6  $\mu\text{m}$ ;工况二前牙冠根在矢状向位移差分别为 89.3、74.3、184.2  $\mu\text{m}$ (图 3、4)。在垂直向上,切牙与尖牙均呈牙冠伸长,牙根呈压低的运动趋势;侧切牙

冠与牙根均呈压低的运动趋势,且压低量呈增长趋势(表 2)。综上所述,在辅以 MIA 及 Power Arm 内收前牙的情况下,隐形矫治器对切牙在矢状向与垂直向的控制具有一定的优势,但对尖牙的控制欠佳。

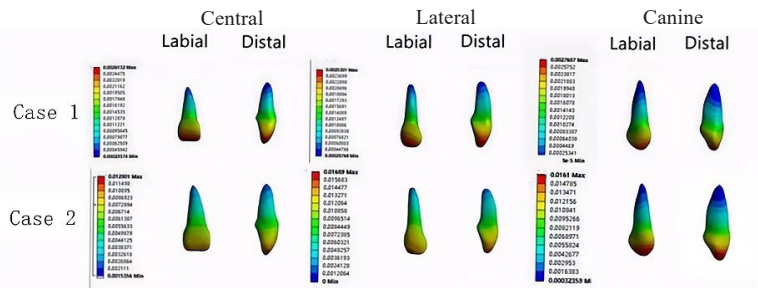


图3 上颌前牙位移趋势

Figure 3 Displacement trends of the maxillary anterior teeth

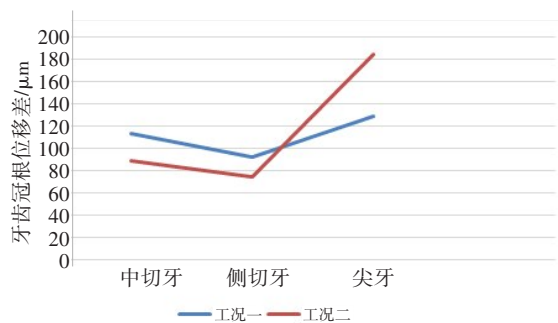


图4 前牙矢状向冠根位移差

Figure 4 Displacement differences of the crown root of anterior teeth in sagittal direction

2.3 牙周膜等效应力分布与最大应力

两种工况下,前牙牙周膜的应力集中区域集中在切牙舌侧根尖区、侧切牙舌侧颈部区及尖牙远中颈部区。工况一下,大面积牙周膜等效应力分布范围为 0.35~79.6 kPa;工况二下,大面积牙周膜等效应力范围为 0.45~37.5 kPa,随着 MIA 与 Power arm 的联合应用,牙周膜等效应力及最大应力均明显减小(图 5,表 3)。

3 讨论

隐形矫治器因其相对于传统固定矫治器具有美

表 2 上颌前牙在垂直向位移变化( $\mu\text{m}$ )  
Table 2 Displacement of anterior teeth in vertical direction ( $\mu\text{m}$ )

工况	中切牙		侧切牙		尖牙	
	牙冠	牙根	牙冠	牙根	牙冠	牙根
一	20.1	-24.3	-7.9	-13.6	12.2	-12.7
二	10.9	-16.7	-13.6	-15.2	22.9	-13.9

观、简便等优势而吸引了越来越多的正畸患者<sup>[11]</sup>。在固定矫治中,弓丝和托槽互相作用产生的矫治力传递至牙齿的固定位点,进而使牙齿产生位移。在隐形矫治中牙齿的移动是牙齿与矫治器目标位不匹配的结果,矫治力的大小、方向及矫治位点都难以确定<sup>[12-15]</sup>;另外,由于无托槽隐形矫治器复杂的力学系统,矫治力传递机制尚未得到完全的阐明,因此临床医生无法对多数牙齿的移动进行精准预测<sup>[16]</sup>。本实验通过三维有限元分析法对上颌前牙的移动进行生物力学分析。与应力测量及位移测量相比,有限元法不仅可以研究牙齿、颌骨、矫治器任何部位的应力,还可以测量分析牙周组织的应力分布及大小,其分析结果可为正畸生物力学提供不同见解,且辅助临床医生制定更为可靠的正畸治疗方案。

对于减数拔牙的正畸患者,临床中大多数情况



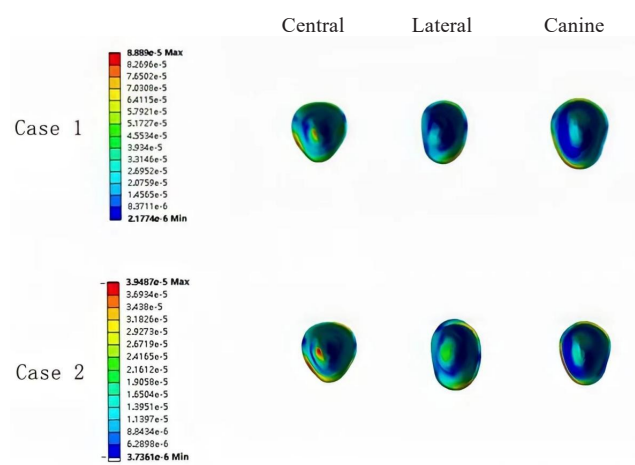


图5 前牙牙周膜等效应力图

Figure 5 Von Mises stress distributions in periodontal membrane of the maxillary anterior teeth

下,对于前牙所期待的移动方式为整体移动或可控的倾斜移动。在滑动力学中内收上颌前牙时,Power arm 配合 MIA 可调整与前牙阻抗中心相关的“力线”,进而提高前牙转矩表达的效果。根据文献[17-18],将 MIA 植入上颌后牙段颊侧的安全区域位于第二前磨牙与第一磨牙牙根之间且距牙槽嵴顶 5~8 mm 处。当 Power Arms 高度为 8 mm 时,前牙的运动趋势近乎于整体运动<sup>[19-21]</sup>。因此本实验的工况二设计基于临床实际及以往研究确定 MIA 与 Power arm 的高度,此时通过牵引钩的牵引力方向大致通过上颌前牙段的阻抗中心。本实验结果显示,在两种工况下内收上颌前牙时,上颌前牙在矢状向均表现为冠根相反的倾斜移动,在垂直向除侧切牙外均存在伸长的趋势。

表3 前牙牙周膜最大与最小应力值(kPa)

Table 3 Maximum and minimum Von Mises stress distributions in periodontal membrane of the maxillary anterior teeth (kPa)

工况	中切牙		侧切牙		尖牙	
	最大应力	最小应力	最大应力	最小应力	最大应力	最小应力
一	79.6	0.35	59.4	0.63	46.1	0.39
二	37.5	0.52	29.7	0.49	26.5	0.45

相较矫治器施力控根内收前牙,Power arm 与 MIA 联合矫治器控根内收前牙可减小切牙在矢状向的倾斜移动并在垂直向减小牙冠伸长的趋势;但是对于尖牙的运动趋势未有明显的改善甚至有加重其倾斜移动趋势,增加“过山车”效应发生的概率。其原因可能为隐形矫治力与施加的牵引力为两个截然不同的力学系统,牵引力一般为 100~200 g(正畸力范围为 50~300 g),远小于初期佩戴隐形矫治器所产生的形变力,此时矫治力起主导作用;而在矫治力衰减后,牵引力逐渐在内收过程中起主导作用。因此在临床中,在对尖牙采用牵引时,正畸医师要根据临床的实际情况分步或整体内收前牙、增加牵引力的力值、设计尖牙控根附件等,从而增强对尖牙牙轴的控制。

牙齿移动的主要原因是施加在牙齿上的矫治力,这种矫治力通过矫治器产生并作用于牙冠进而传递至牙周组织,在牙周韧带(Periodontal Ligament, PDL)吸收和增生后进行适应性牙槽骨重建<sup>[22-23]</sup>。PDL 对牙齿的移动起着至关重要的作用,PDL 静水压作为牙齿移动的重要指标,其范围约为 0.47~16 kPa<sup>[24-26]</sup>。如果静水压低于 0.47 kPa,牙齿的移动只能以较低的速率移动从而延长正畸治疗的周期;若静水压高于 16 kPa,则可能会引起牙周组织透明样变甚至牙槽骨潜行性吸收,不仅会减缓牙齿移

动的速率,而且会增加牙根吸收的风险。本实验显示工况一中牙周膜的等效应力为 0.35~79.6 kPa,工况二牙周膜等效应力为 0.45~37.5 kPa。尽管有研究通过有限元分析并推测牙周组织中存在相关因素可以降低超过 PDL 静水压最大值所带来牙根吸收的风险<sup>[25]</sup>,但为减少牙根吸收的风险并提高牙齿移动的速率,应减少牙齿的移动量,使用弹性模量更优的膜片等更为安全有效治疗方法。

本实验根据有限元分析的结果发现相比直接矫治器加力控根内收前牙,矫治器施力控根内收辅以微支抗钉与 Power arm 可明显改善切牙的倾斜运动趋势,但对于前牙整体移动的控制尤其是尖牙的移动尚不能达到令人满意的效果。因此正畸医师对错颌畸形适应症的把控是必不可少的,尤其对于前牙唇侧骨皮质较薄的拔牙患者,应警惕骨开窗及骨开裂等并发症的出现。尽管三维有限元法被广泛证明是从生物力学的角度模拟牙齿位移趋势及牙周膜应力分布的最有效方法之一,但此方法仅分析患者佩戴矫治器时牙齿、牙周膜的瞬时位移及应力,忽略牙龈、肌肉等软组织对牙齿移动的影响。因此笔者将进一步研究矫治力随时间衰减并纳入更多研究对象的动态模型,以便更深入地理解隐形矫治的生物力学特征。

## 【参考文献】

- [1] Jung MH, Kim TW. Biomechanical considerations in treatment with miniscrew anchorage. Part 3: clinical cases[J]. J Clin Orthod, 2008, 42(6): 329-337.
- [2] Hahn W, Zapf A, Dathe H, et al. Torquing an upper central incisor with aligners-acting forces and biomechanical principles[J]. Eur J Orthod, 2010, 32(6): 607-613.
- [3] Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, et al. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review[J]. Angle Orthod, 2015, 85(5): 881-889.
- [4] Uribe F, Cutrera A, Nanda R. A segmented appliance for space closure followed by Invisalign and fixed appliances[J]. Orthodontics, 2011, 12(4): 386-395.
- [5] 范丽梅, 刘若曦, 徐宝华. 无托槽隐形矫治器联合微种植钉牵引内收上前牙的三维有限元研究[J]. 中日友好医院学报, 2022, 36(3): 152-155.  
Fan LM, Liu RX, Xu BH. Three-dimensional finite element analysis of retracting maxillary anterior teeth with clear aligner combined with miniscrew[J]. Journal of China-Japan Friendship Hospital, 2022, 36(3): 152-155.
- [6] 李晓梅, 宋云鹏, 徐宝华. 牵引方向对无托槽隐形矫治器联合种植支抗内收上前牙的生物力学影响[J]. 临床口腔医学杂志, 2022, 38(3): 152-156.  
Li XM, Song YP, Xu BH. The mechanical effects of traction direction on the clear aligner combined with implant anchorage for en-masse retraction of upper anterior teeth[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2022, 38(3): 152-156.
- [7] Robertson L, Kaur H, Fagundes NC, et al. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: a systematic review[J]. Orthod Craniofac Res, 2020, 23(2): 133-142.
- [8] Castroflorio T, Garino F, Lazzaro A, et al. Upper-incisor root control with Invisalign appliances[J]. J Clin Orthod, 2013, 47(6): 346-351.
- [9] Drake CT, McGorray SP, Dolce C, et al. Orthodontic tooth movement with clear aligners[J]. ISRN Dent, 2012, 2012: 657973.
- [10] 安世英, 张继武, 马俐丽, 等. 无托槽隐形矫治技术内收上前牙的三维有限元分析[J]. 临床口腔医学杂志, 2020, 36(10): 583-586.  
An SY, Zhang JW, Ma LL, et al. The biomechanical mechanism of invisible appliance in retracting the maxillary incisors[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2020, 36(10): 583-586.
- [11] Womack WR. Four-premolar extraction treatment with Invisalign[J]. J Clin Orthod, 2006, 40(8): 493-500.
- [12] Hamanaka R, Cantarella D, Lombardo L, et al. Dual-section *versus* conventional archwire for en-masse retraction of anterior teeth with direct skeletal anchorage: a finite element analysis[J]. BMC Oral Health, 2021, 21(1): 87.
- [13] Jiang T, Wu RY, Wang JK, et al. Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: a 3D finite element study[J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 10156.
- [14] 李晓梅, 宋云鹏, 徐宝华. 牵引方向对无托槽隐形矫治器联合种植支抗内收上前牙的生物力学影响[J]. 临床口腔医学杂志, 2022, 38(3): 152-156.
- [15] 白煜, 赵贺剑, 杨富刚, 等. Power Arm在隐形矫治器联合微种植钉整体内收上前牙中的作用[J]. 医用生物力学, 2021, 36(1): 79-84.  
Bai Y, Zhao HJ, Yang FG, et al. The role of Power Arm by combined use of clear aligner and miniscrew in en-masse retraction of maxillary anterior teeth[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2021, 36(1): 79-84.
- [16] 林海, 尤金朝, 赵亮. 上颌前牙不同内收方式相关牙槽骨改建的CBCT研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2020, 36(11): 686-691.  
Lin H, You JZ, Zhao L. A CBCT study of alveolar bone remodeling related to the different ways of maxillary anterior teeth adduction[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2020, 36(11): 686-691.
- [17] Jung MH, Kim TW. Biomechanical considerations in treatment with miniscrew anchorage. Part 1: the sagittal plane[J]. J Clin Orthod, 2008, 42(2): 79-83.
- [18] 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.  
Zhang Y, Zhang L, Fan YB, et al. Three dimensional finite element analysis of maxillary anterior teeth retraction with micro-implant anchor-age and sliding mechanics [J]. West China Journal of Stomatology, 2009, 27(5): 557-560.
- [19] Parashar A, Aileni KR, Rachala MR, et al. Torque loss in en-masse retraction of maxillary anterior teeth using miniimplants with force vectors at different levels: 3D FEM study[J]. J Clin Diagn Res, 2014, 8(12): Zc77-80.
- [20] 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 Dentofac, 2010, 137(5): 639-647.
- [21] 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.
- [22] Wu JL, Liu YF, Peng W, et al. A biomechanical case study on the optimal orthodontic force on the maxillary canine tooth based on finite element analysis[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2018, 19(7): 535-546.
- [23] Machado RM. Space closure using aligners[J]. Dental Press J Orthod, 2020, 25(4): 85-100.
- [24] Lombardo L, Stefanoni F, Mollica F, et al. Three-dimensional finite-element analysis of a central lower incisor under labial and lingual loads[J]. Prog Orthod, 2012, 13(2): 154-163.
- [25] Hohmann A, Wolfram U, Geiger M, et al. Periodontal ligament hydrostatic pressure with areas of root resorption after application of a continuous torque moment[J]. Angle Orthod, 2007, 77(4): 653-659.
- [26] Hohmann A, Wolfram U, Geiger M, et al. Correspondences of hydrostatic pressure in periodontal ligament with regions of root resorption: a clinical and a finite element study of the same human teeth[J]. Comput Meth Prog Biol, 2009, 93(2): 155-161.

(编辑:谭斯允)