

文章编号: 1004-7220(2022)04-0663-06

下牙列整体远移时不同牵引钩对牙齿移动影响的有限元分析

吴晓雪¹, 刘海波², 罗晨³, 金作林⁴

(1. 广州医科大学附属口腔医院 正畸科, 广州市口腔再生医学基础与应用研究重点实验室, 广州 510182; 2. 解放军南部战区总医院 口腔科, 广州 510016; 3. 山西省长治市人民医院 口腔科, 山西 长治 046000; 4. 第四军医大学口腔医院 正畸科, 军事口腔医学国家重点实验室, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 陕西省口腔疾病临床研究中心, 西安 710032)

摘要:目的 利用三维有限元方法比较下颌外斜线区微种植钉远移下牙列时, 使用不同长度牵引钩放置不同位点时下颌牙齿的应力分布情况。方法 根据患者锥形束计算机断层扫描 (cone beam computed tomography, CBCT) 影像数据, 在侧切牙和尖牙托槽之间、尖牙和第1前磨牙托槽之间分别固定高度为2、7 mm 牵引钩, 依次构建出4种微种植钉远移全牙列的有限元模型。在牵引钩与微种植钉间加载3 N 牵引力, 观察4种工况中下颌牙齿及牙列等效应力、初始位移变化情况。结果 除高度7 mm 牵引钩置于侧切牙与尖牙间时, 下中切牙发生冠唇向根舌向的顺时针旋转外, 其他3种工况下中切牙均发生冠根均舌向的逆时针旋转趋势; 除高度7 mm 牵引钩置于尖牙与第1前磨牙间时, 下尖牙发生冠向近中移动, 其他3种工况下尖牙冠根均向远中移动趋势; 4种工况中, 下磨牙均发生冠根向远中的逆时针方向旋转趋势。结论 通过三维有限元分析阐明了下牙列整体远移时, 不同牵引钩对下颌牙齿移动影响的生物力学机制。在充分理解生物力学机制的情况下, 恰当选择牵引钩长度及放置位置可以更有效实现下颌牙列的整体远移。

关键词: 微种植钉; 支抗; 外斜线; 远移下牙列

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.014

The Influence of Different Traction Hooks on Tooth Movement During Distalization of the Lower Dentition: A Finite Element Analysis

WU Xiaoxue¹, LIU Haibo², LUO Chen³, JIN Zuolin⁴

(1. Guangzhou Key Laboratory of Basic and Applied Research of Oral Regenerative Medicine, Department of Orthodontics, Affiliated Stomatology Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510182, China; 2. Department of Stomatology, General Hospital of Southern Theater Command of the Chinese People's Liberation Army, Guangzhou 510016, China; 3. Department of Stomatology, Changzhi People's Hospital, Changzhi 046000, Shanxi, China; 4. National Clinical Research Center for Oral Diseases, State Key Laboratory of Military Stomatology, Department of Orthodontics, School of Stomatology, the Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China)

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-10-09

基金项目: 广东省医学科学技术研究基金项目 (A2019352)

通信作者: 金作林, 主任医师, 教授, E-mail: zuolinj@163.com

Abstract: Objective To study stress distributions of lower dentition distally moved with miniscrews in external oblique line area when the traction hooks with different lengths were placed at different positions by the three-dimensional (3D) finite element method. **Methods** Based on cone beam computed tomography (CBCT) data from a patient, traction hooks with the heights of 2 mm and 7 mm were constructed and fixed between the lateral incisors and the canine brackets, as well as between the canines and the first premolar brackets. Four kinds of 3D finite element models of full dentition distally moved with miniscrews were constructed. The 3 N traction force was loaded between the traction hook and the miniscrews. The maximum von Mises stress and initial displacement of the mandibular teeth and dentition under four working conditions were analyzed. **Results** When the traction hook with 7 mm-height was placed between the lateral incisor and the canine, the lower central incisor rotated clockwise, with the crown moving labially and the root moving lingually. But under the other three working conditions, the central incisor rotated counterclockwise, and the crown and root moved lingually. When the traction hook with 7 mm-height was placed between the canine and the first premolar, the lower canine crown moved proximally. But under the other three working conditions, both the crown and root moved distally. Under four working conditions, the mandibular molars all rotated counterclockwise, with the crown and root moving distally. **Conclusions** Through 3D finite element analysis, biomechanical mechanism of the effect of different traction hooks on mandibular tooth movement during distalization of the lower dentition was elucidated. With full understanding of the biomechanical mechanism, proper selection for length and placement of the traction hook can achieve distal movement of the entire mandibular dentition more efficiently.

Key words: miniscrews; anchorage; external oblique line; distalization of the lower dentition

由于微种植钉具有很多传统方法无法比拟的优点,正畸医生尝试使用微植钉整体远移下牙列来代偿治疗成人轻、中度骨性Ⅲ类错合,取得了良好而稳定的效果^[1-4]。临床上将微种植钉植入下颌双侧外斜线区,在微种植钉与施力点间加载约 3 N 牵引力,实现下牙列的整体远中移动。近年来,本课题组在临床上也采用此方法对大量Ⅲ类错合病例进行治疗,获得明显的治疗效果,并吸取了大量临床经验。但目前国内外关于此项技术的理论支撑还相对缺乏,关于加载时施力点的选取问题,即牵引钩长短、放置位置的选择还存在不明确性和盲目性^[5]。为探讨以上不同选择对下牙列整体远移的影响及其生物力学机制,本文利用三维有限元方法对外斜线区微种植钉远移下牙列时不同牵引钩对下颌牙齿移动影响的生物力学机制进行研究,以期对相关临床实践提供指导。

1 材料与方法

1.1 建立外斜线区微种植体钉远移下颌全牙列三维有限元模型

1.1.1 研究对象 在临床中筛选 1 名 22 岁成年女性,其牙列为轻、中度骨性Ⅲ类错合,磨牙为近中

关系,且该受试者为非拔牙矫治的正畸患者。研究对象为前排齐整平下牙列,且已拔除下颌双侧第 3 磨牙。受试者签署知情同意后,对其行头面部锥形束计算机断层扫描 (cone beam computed tomography, CBCT) (VGi 高端锥形束 CT, NewTom 公司,意大利)。为了避免上下牙列接触时影响下牙列数据提取的准确性,嘱患者扫描时下颌张开至略大于息止颌位。以眶耳平面平行作为参考平面,连续无间隔从髁突上缘到下颌骨下缘进行断层扫描,扫描参数为 110 kV, 0.07 mA, 扫描层厚为 0.3 mm, 获取 100 张影像图像,以 DICOM 格式储存。

1.1.2 三维模型构建 启动 Mimics 17.0 软件 (Materialise 公司,比利时),选择“File-Import Images”命令,将 100 张 DICOM 格式扫描数据导入 Mimics 17.0 软件。利用软件里的图像调整功能调节各组织的分辨率,之后筛选影像图片。调整灰度值范围在 1 400~3 071 HU 之间提取牙槽骨影像数据,在 1 553~8 000 HU 之间提取牙齿影像数据,并通过布尔运算方法获得牙槽骨影像轮廓。使用 Edit Masks 中的擦除功能去除托槽和弓丝,以不需要的组织结构和所产生的伪影。将三维图像数据转化为 STL 格式,得到牙齿的三维点云文件,导入 Catia

软件中。设计尽量小的三角形面片边长,边长长度限制在 0.05~0.10 mm 之间,逐一准确拟合出下颌骨、下牙列等结构的三维实体模型。运用 Offset 命令将牙齿外侧均向外扩张 0.3 mm,获得牙周膜三维模型^[6]。牙周膜 CAD 模型构件在 Simcenter 3D 建模工具中完成。本文选择正畸临床中的方丝弓托槽,其槽沟尺寸为 457.2 μm \times 635 μm 。使用 Simcenter 3D 绘图功能构建托槽三维模型。设计后牙为 457.2 μm \times 635 μm 颊面管。通过装配命令将托槽底面与牙表面贴合,粘贴位置为距离中切牙切缘 4 mm、尖牙 4.5 mm 所建立的基准平面。通过扫描命令和曲线功能建立尺寸为 457.2 μm \times 635 μm 不锈钢方丝,分别在侧切牙与尖牙托槽之间、尖牙与第 1 前磨牙托槽间的弓丝上建立临床常用 2.7 mm 高牵引钩,弓丝与牵引钩间为一体式结构。将直径 2 mm、高度 3 mm 圆柱形模拟成微种植钉。根据本课题组前期实验结论进行微种植钉的装配,即下颌第 1 磨牙与第 2 磨牙间,距牙槽嵴顶 5~7 mm 处^[7]。

1.1.3 各部分模型装配 根据临床实际情况,将所建的下颌骨、下牙列、托槽、弓丝等模型均导入 Simcenter 3D 进行组装,生成微种植钉远中移动下颌全牙列实体模型。

1.2 实验条件设定

1.2.1 参数定义与网格划分 在髁突关节面施加固定约束,下颌骨保持位置不变。托槽与牙的接触为相对位置保持不变,即固定约束^[8]。托槽与弓丝间的接触方式为在少量无摩擦情况下,弓丝沿着托槽槽沟移动,但不会在垂直向发生分离。各相邻牙齿之间始终保持接触,且接触位置无大的变化。牙

齿、牙周膜、牙槽骨采用网格较大四面体单元,而对弓丝和托槽因为其涉及相互之间的接触和计算,采用六面体单元的小网格,模型采用三角形壳单元和五面体实体单元,可划分为 75 558 个单元和 19 138 个节点。有限元模型按照实际各生物组织特性划分为 5 种材料,分别是牙齿、牙槽骨、牙周膜、弓丝和托槽,所有材料都被简化为均质、各向同性、线性弹性体,材料变形为小变形。设定托槽、弓丝、牙齿、牙周膜、牙槽骨弹性模量分别为 206 000、200 000、20 700、0.068 9、14 700 MPa;泊松比除牙周膜为 0.45,其余均为 0.3^[9-11]。

1.2.2 边界和计算条件设定 牵引模拟正畸临床实际情况,使用 3 N 牵引力远移下牙列。设定如下 4 种工况。工况 1:将高度 2 mm 牵引钩固定于下颌侧切牙与尖牙托槽间;工况 2:将高度 7 mm 牵引钩固定于下颌侧切牙与尖牙托槽间;工况 3:将高度 2 mm 牵引钩固定于下颌尖牙与第 1 前磨牙托槽间;工况 4:将高度 7 mm 牵引钩固定于下颌尖牙与第 1 前磨牙托槽间(见图 1)。本模型共包含除智齿以外全副牙齿共 14 颗,为简化计算,仅选择 4 颗牙齿(单侧牙弓下中切牙、下尖牙、下第 1 磨牙、下第 2 磨牙)为研究对象。测量观察点包括:下切牙切缘中点和根尖点、下尖牙牙尖和根尖点、第 1 磨牙及第 2 磨牙近颊尖和近中根尖点。上牙列补偿曲线曲度假设为 0°^[6]。本文使用 Simcenter 3D 进行分析,计算不同工况中各测量点加载瞬间近远中以及垂直向的移动趋势。确立三维坐标系,设定 X 轴为水平向移动,向左侧移动为正;Y 轴为矢状向移动,向远中移动为正;Z 轴为垂直向移动,向上移动为正。

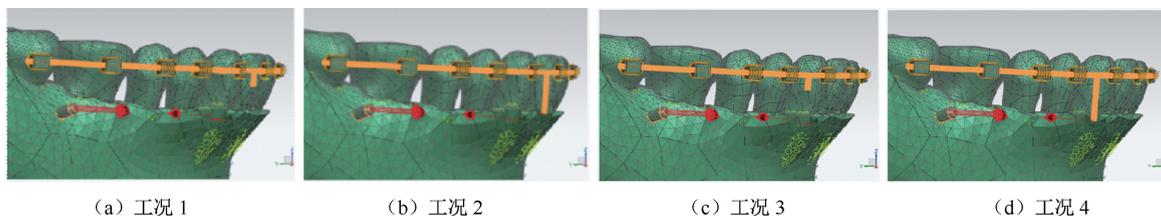


图 1 不同工况中微种植钉远移下牙列三维有限元模型

Fig. 1 Three-dimensional finite element models for distalization of the lower dentition by miniscrew under different working conditions (a) Working condition 1, (b) Working condition 2, (c) Working condition 3, (d) Working condition 4

2 结果

2.1 牙周膜等效应力

在微种植钉支抗远移下牙列的过程中,4种

工况中,牙周膜等效应力变化主要集中在下前牙区,即下切牙切缘、尖牙的牙尖等效应力最大,前磨牙牙冠次之,磨牙牙冠及下前牙根尖再次之(见图2)。

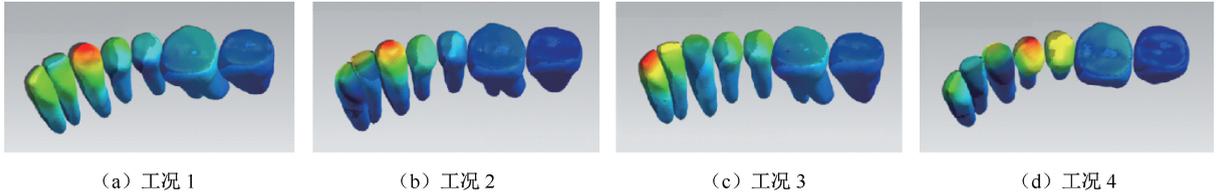


图2 不同工况中各牙齿等效应力分布

Fig. 2 Von Mises stress distributions of different teeth under different working conditions (a) Working condition 1, (b) Working condition 2, (c) Working condition 3, (d) Working condition 4

2.2 牙齿移动趋势

2.2.1 下前牙移动趋势 在矢状向,下中切牙在工况2中发生冠唇向、根舌向移动以及冠根位移差为负值的顺时针旋转移动;而在其他3种工况中发

生下中切牙冠、根均舌向移动以及冠根位移差均为正值的逆时针旋转移动。下尖牙在工况4中发生冠向近中移动;而在其余3种工况中,下尖牙冠根均向远中移动(见表1、图3)。

表1 不同工况中下前牙矢状向位移

Tab. 1 Displacement of lower anterior teeth in sagittal direction under different working conditions

单位: μm

牙齿	工况1			工况2			工况3			工况4		
	牙冠	牙根	冠根位移差	牙冠	牙根	冠根位移差	牙冠	牙根	冠根位移差	牙冠	牙根	冠根位移差
中切牙	1.300	0.437	0.863	-2.120	0.476	-2.600	2.410	0.375	2.040	2.180	0.332	1.850
尖牙	2.130	0.350	1.780	3.580	0.414	3.170	0.476	0.366	0.110	-1.270	0.390	-1.660

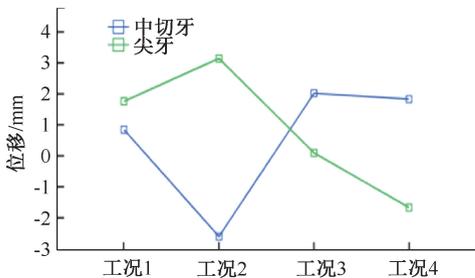


图3 不同工况中下前牙矢状向冠根位移差

Fig. 3 Displacement differences in crown and root of lower anterior teeth in sagittal direction under different working conditions

表2 不同工况中下前牙垂直向位移

Tab. 2 Displacement of lower anterior teeth in vertical direction under different working conditions

单位: μm

牙齿	工况1		工况2		工况3		工况4	
	牙冠	牙根	牙冠	牙根	牙冠	牙根	牙冠	牙根
中切牙	0.078	-0.316	-1.840	0.507	0.520	-0.437	0.280	-0.549
尖牙	0.522	-0.305	0.670	-0.275	-0.782	-0.443	-1.850	-0.449

在垂直向,下前牙牙冠在工况2中表现为压低,而在其他3种工况中均表现为少量伸长(见表2)。

2.2.2 下后牙移动趋势 在矢状向,4种工况中,下后牙均表现为冠、根均向远中移动以及冠根位移差为正值的逆时针旋转移动(见表3、图4)。

在垂直向,4种工况中,下后牙均压低。工况1压低位移量最大,其他3种工况中压低位移量依次减小。总体来看,4种工况对后牙在矢状向和垂直向的控制基本一致,无明显差别(见表4)。

表3 不同工况中下后牙矢状向位移

Tab. 3 Displacement of lower posterior teeth in sagittal direction under different working conditions

单位: μm

牙齿	工况 1			工况 2			工况 3			工况 4		
	牙冠	牙根	冠根位移差									
第1磨牙	0.660	0.245	0.415	0.616	0.266	0.350	0.639	0.245	0.394	0.789	0.235	0.554
第2磨牙	0.203	0.084	0.119	0.210	0.100	0.110	0.213	0.092	0.121	0.230	0.095	0.135

表4 不同工况中下后牙垂直向位移

Tab. 4 Displacement of lower posterior teeth in vertical direction under different working conditions

单位: μm

牙齿	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
	牙冠	牙根	牙冠	牙根	牙冠	牙根	牙冠	牙根
第1磨牙	-0.123	-0.213	-0.091	-0.194	-0.053	-0.237	-0.022	-0.176
第2磨牙	-0.146	-0.091	-0.136	-0.104	-0.122	-0.108	-0.130	-0.097

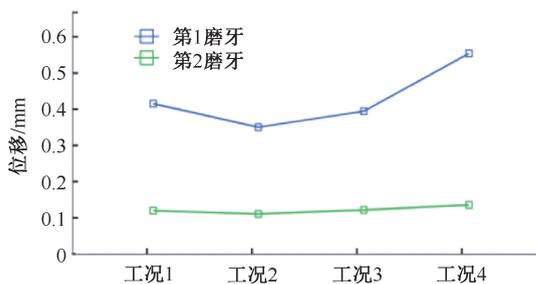


图4 不同工况中下后牙牙冠矢状向位移量

Fig. 4 Crown displacement of lower posterior teeth in sagittal direction under different working conditions

3 讨论

骨性Ⅲ类错合畸形是临床常见的错合畸形之一。据统计,骨性Ⅲ类错合畸形在我国的发病率为12.8%,远高于西方国家^[12]。其临床表现为前牙反牙合、侧貌凹面型,严重影响了患者的颜面美观、咬合功能,甚至心理健康及社会交往等^[13]。对于骨性Ⅲ类错合,最佳的治疗方法是正畸-正颌联合治疗。然而考虑到正颌手术风险以及高昂的手术费用等原因,许多轻中度成人骨性Ⅲ类错合患者拒绝正畸-正颌联合治疗,希望通过正畸掩饰性治疗最大限度地改善咬合问题。因此,恒牙期骨性Ⅲ类错合畸形的掩饰性矫治成为正畸研究的热点,更是临床研究的难点。

相关研究数据表明,外斜线区骨皮质厚度相对较厚,CBCT 测量该区骨皮质厚度为2.81~3.82 mm^[14]。Park 等^[15]研究认为,下颌外斜线区骨皮质较厚,完全满足微种植钉植入后不阻挡牙列向远中整体移动,且能提供足够支抗力。因此,该团队应用微种植

钉成功矫治了骨性Ⅲ患者的错合问题,得到满意的效果。近年来,利用外斜线区微种植钉辅助远移下颌全牙列成为改善轻中度骨性Ⅲ类正畸掩饰性治疗的有效方法之一。了解下牙列远移过程的牙齿力学分布情况,对于获得更好的矫治效果具有重要临床意义。

Reimann 等^[6]研究认为,在整体内收前牙的过程中,即便将所有牙齿用弓丝连为一体,不同的牙齿依然有不同的运动趋势,它们有各自的阻抗中心。本文发现,不同高度的牵引钩放置在不同的加力位点对于下前牙移动趋势不完全相同。当高度为2 mm的牵引钩位于下颌侧切牙与尖牙间时,下中切牙发生逆时针方向旋转移动;而当牵引钩高度为7 mm时,下中切牙发生了冠唇向、根舌向的顺时针旋转移动。本文推测,导致上述现象发生的原因是牵引力与牙齿的阻抗中心位置关系密切相关^[16]。通常当阻抗中心高于牵引力时,下前牙发生冠唇向(顺时针)倾斜移动;当阻抗中心低于牵引力时,下前牙发生冠舌向(逆时针)倾斜移动。由此可以推测,下中切牙的阻抗中心位于弓丝龈方2~7 mm。由于全牙列远移时,下前牙内收量有限,加上轻中度骨性Ⅲ类错合患者常伴有下前牙的过于直立或者代偿舌倾,故在临床中常选择置于下颌侧切牙与尖牙之间的长牵引钩,这样在远移全牙列过程中既能改善磨牙关系,又能同时恢复前牙正常的唇倾度,建立稳定的覆合覆盖关系。本文结果显示,在垂直向上,下前牙牙冠在工况2中表现为压低,在其他3种工况中均表现为伸长,这是由于远移全牙列前要排齐下牙列,此时下中切牙切端稍向唇侧倾斜。当加力内收时,工况1、3、4下中切牙向逆时针

方向旋转,则表现为牙冠切缘有升高趋势,而牙根根尖有压低趋势;虽然均受到垂直向分力的压低效应,相互抵消后,最终下中切牙牙冠呈现伸长趋势,而牙根呈现压低趋势。而在工况2下中切牙发生了顺时针方向旋转,则表现为牙冠呈现压低趋势。鉴于临床情况错综复杂,正畸医师应结合不同工况牙齿移动趋势以及患者个体化牙槽骨型及颌骨生长型综合评定,有计划地选择具体加载工况,从而达到个体化治疗的最佳效果。

Nakamura 等^[17]研究证实,下颌第1、2磨牙同步远移时牵引方向为向后下,有助于磨牙区的压低,这对于维持骨性Ⅲ类错合高角及伴开合倾向患者矫治效果的稳定性更有益。本文发现,4种不同工况加载时,对于后牙段的移动趋势基本相似,即垂直向冠、根初始位移均被压低,矢状向冠、根初始位移均向远中,牙体长轴均发生逆时针方向旋转。以上应力分布及初始位移情况有利于对轻中度骨性Ⅲ类错合进行正畸掩饰性治疗。另外,本文与课题组先前实验保持一致,选用四面体与六面体单元的混合网格,保证了计算结果的精确性,为后续的有限元求解提供良好的平台^[18]。

4 结论

本文通过三维有限元分析,阐明外斜线区微种植钉远移下颌全牙列时不同牵引钩对牙齿移动影响的生物力学机制,得出以下结论:①下牙列整体远移时可以通过选择不同长度牵引钩和(或)不同放置位置来控制牙齿移动形式。②在远移下颌全牙列过程中,牵引钩的长度和(或)放置位置将使前牙产生不同的移动趋势。

参考文献:

[1] CHUNG K, KIM S, CHOO H, *et al.* Distalization of the mandibular dentition with mini-implants to correct a Class III malocclusion with a midline deviation [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2010, 137(1): 135-146.

[2] CHAIMANEE P, SUZUKI B, SUZUKI EY. "Safe zones" for miniscrew implant placement in different dentoskeletal patterns [J]. *Angle Orthod*, 2011, 81(3): 397-403.

[3] KOOK YA, PARK JH, BAYOME M, *et al.* Distalization of the mandibular dentition with a ramal plate for skeletal Class III malocclusion correction [J]. *Am J Orthod*

Dentofacial Orthop, 2016, 150(2): 364-377.

[4] JING Y, HAN XL, GUO YW, *et al.* Nonsurgical correction of a Class III malocclusion in an adult by miniscrew-assisted mandibular dentition distalization [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013, 143(6): 877-887.

[5] 王彬, 谈龙, 施洁珺. 微种植支抗远移下牙列的临床研究 [J]. *实用口腔医学杂志*, 2013, 29(2): 236-240.

[6] REIMANN S, KEILIG L, JAGER A, *et al.* Biomechanical finite-element investigation of the position of the centre of resistance of the upper incisors [J]. *Eur J Orthod*, 2007, 29(3): 219-224.

[7] LIU H, WU X, TAN J, *et al.* Safe regions of miniscrew implantation for distalization of mandibular dentition with CBCT [J]. *Prog Orthod*, 2019, 20(1): 45-48.

[8] 卢燕勤, 高雪梅, 韩景芸, 等. 直丝弓矫治器滑动法关闭间隙的三维非线性有限元建模及数值分析 [J]. *医用生物力学*, 2008, 23(4): 301-305.

LU YQ, GAO XM, HAN JY, *et al.* Space closure using preadjusted appliance and sliding mechanics: The 3D nonlinear finite element modeling and numerical analysis [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(4): 301-305.

[9] AMMAR HH, NGAN P, CROUT RJ, *et al.* Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2011, 139(1): 59-71.

[10] 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): 97-84.

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]. *J Med Biomech*, 2021, 36(1): 97-84.

[11] 吕晶晶, 米丛波. 牙周膜的生物力学性能 [J]. *国际口腔医学杂志*, 2014, 41(3): 362-364.

[12] CHAN GK. Class III malocclusion in Chinese (Cantonese): Etiology and treatment [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1974, 65(1): 152-157.

[13] CADOGANA J, LAN B. Face value: An exploration of the psychological impact of orthognathic surgery [J]. *Brit J Oral Maxill Surg*, 2011, 49(5): 376-380.

[14] 赵弘, 刘洪臣, 顾晓明. 骨皮质厚度及植入角度对支抗种植钉影响的三维有限元分析 [J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2010, 11(1): 24-27.

[15] PARK HS, HYO-KYUNG L, OH-WON K, Group distal movement of teeth using miniscrew implant anchorage [J]. *Angle Orthod*, 2005, 75(4): 602-609.

[16] 蔡永清. 数值分析力矩比对尖牙平移移动的影响 [J]. *医用生物力学*, 2020, 35(5): 449-454.