

不同加载方式对高角Ⅱ类骨面型患者种植钉压低上颌后牙的三维有限元研究

周炼¹ 徐海涛¹ 倪霞²

¹东莞健力口腔医院正畸科, 东莞 523000; ²东莞健力口腔医院修复种植科, 东莞 523000

通信作者: 周炼, Email: oracle0902@qq.com

【摘要】 目的 使用三维有限元方法, 研究不同加载方式对种植钉压低高角Ⅱ类骨面型患者上颌后牙的生物力学影响, 为正畸临床提供参考。**方法** 建立1例高角Ⅱ类骨面型患者的含有上牙列、牙槽骨和牙周膜及临床矫治器的压低上颌后牙的三维有限元模型, 设置不同加载工况。工况1: 在第一与第二磨牙之间的颊腭侧各放置1枚种植钉; 工况2: 在第一与第二磨牙之间的颊侧放置1枚种植钉, 左右两侧第一磨牙通过横腭杆连接; 工况3: 在第一与第二磨牙之间的颊侧放置1枚种植钉, 左右两侧第一磨牙通过横腭杆连接, 第二磨牙腭侧设计一由腭杆伸出的牵引钩; 工况4: 在第一磨牙对应的腭中缝处植入1枚种植钉, 左右两侧第一磨牙通过横腭杆连接, 在两侧腭杆中点处设计一牵引钩; 工况5: 在第一磨牙对应的腭中缝处植入1枚种植钉, 左右两侧第一磨牙通过横腭杆连接, 第二磨牙腭侧设计一由腭杆伸出的牵引钩, 在两侧腭杆中点处设计一牵引钩, 研究不同工况下后牙的牙周膜应力分布与位移趋势。**结果** 工况1第二前磨牙、第一磨牙与第二磨牙的应力梯度(颈缘区应力均值与根尖区应力均值的比值)在5种工况中最小, 分别为2.10、2.09和2.26, 且应力分布最为均匀, 能最大程度地避免后牙的颊腭侧倾斜与近远中倾斜, 其次是工况4。工况3中第二磨牙腭侧设计的牵引钩能抑制其颊侧倾斜, 工况5中第二磨牙腭侧设计的牵引钩会加重其腭侧倾斜程度。**结论** 在上颌第一与第二磨牙之间的颊腭侧均植入种植钉是最理想的压低上颌后牙方式, 其次是腭中缝植入种植钉搭配横腭杆。使用颊侧种植钉搭配横腭杆压低上颌后牙时, 需在第二磨牙腭侧设计牵引钩以抑制其颊侧倾斜; 使用腭中缝植入种植钉搭配横腭杆可无需在第二磨牙腭侧再设计牵引钩。

【关键词】 种植钉; 上后牙压低; 高角Ⅱ类骨面型; 三维有限元研究

基金项目: 东莞市社会发展科技项目(20231800937722)

引用著录格式: 周炼, 徐海涛, 倪霞. 不同加载方式对高角Ⅱ类骨面型患者种植钉压低上颌后牙的三维有限元研究[J/OL]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2026, 20(3): 201-209.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.005

Three-dimensional finite element analysis of the effects of different loading modalities on maxillary posterior teeth intrusion with miniscrews in a patient with high-angle Class II skeletal pattern

Zhou Lian¹, Xu Haitao¹, Ni Xia²

¹Department of Orthodontics, Jianli Stomatological Hospital of Dongguan, Dongguan 523000, China;

²Department of Prosthodontics and Implantology, Jianli Stomatological Hospital of Dongguan, Dongguan 523000, China

Corresponding author: Zhou Lian, Email: oracle0902@qq.com

【Abstract】 Objective This study utilized a three-dimensional finite element method to investigate the biomechanical effects of various loading modalities on the intrusion of maxillary posterior teeth using orthodontic miniscrews in a patient with high-angle Class II skeletal pattern, aiming to provide guidance for clinical orthodontic practice. **Methods** A three-dimensional finite element model was developed for a patient with a high-angle Class II skeletal pattern, incorporating the maxillary dentition, alveolar bone, periodontal ligament, and clinical orthodontic appliances for the maxillary posterior teeth. The following loading conditions were configured: Condition 1: One miniscrew was placed on both the buccal and palatal sides between the first and second molars. Condition 2: One miniscrew was placed on the buccal side

between the first and second molars, and the left and right first molars were connected via a transpalatal arch. Condition 3: One miniscrew was placed on the buccal side between the first and second molars, the left and right first molars were connected via a transpalatal arch, and a traction hook was designed extending from the palatal bar on the palatal sides of the second molars. Condition 4: One miniscrew was placed at the midpalatal suture region corresponding to the first molars, the left and right first molars were connected via a transpalatal arch, and midpoint traction hooks were designed on both sides of the palatal bar. Condition 5: One miniscrew was placed at the midpalatal suture region corresponding to the first molars, the left and right first molars were connected via a transpalatal arch, a traction hook was designed extending from the palatal bar on the palatal sides of the second molars, and midpoint traction hooks were added on both sides of the palatal bar. The stress distribution in the periodontal ligament and the displacement trends of the posterior teeth were investigated under these conditions. **Results** In Condition 1, the stress gradients (defined as the ratio of mean stress in the cervical region to that in the apical region) for the second premolar, first molar, and second molar were 2.10, 2.09, and 2.26, respectively, the lowest among the five conditions. This setup exhibited the most uniform stress distribution and minimized the buccopalatal and mesiodistal inclination of the posterior teeth to the greatest extent, followed by Condition 4. In Condition 3, the hook designed on the palatal side of the second molar helped restrain its buccal inclinations, whereas in Condition 5, the palatally designed hook aggravated the degree of palatal inclination. **Conclusions** The most ideal method for intruding the maxillary posterior teeth is to place miniscrews on both the buccal and palatal sides between the maxillary first and second molars, followed by the use of a transpalatal arch combined with miniscrews placed in the midpalatal suture. When intruding the maxillary posterior teeth using buccal miniscrews with a transpalatal arch, a hook should be designed on the palatal side of the second molar to restrain buccal inclination. However, when using a midpalatal suture miniscrew with a transpalatal arch, it is unnecessary to design an additional hook on the palatal side of the second molar.

【Key words】 Miniscrew; Intrusion of maxillary posterior teeth; High-angle Class II skeletal pattern; Three-dimensional finite element analysis

Fund program: Social Science and Technology Development Program of Dongguan(20231800937722)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2026.03.005

高角Ⅱ类骨面型患者的主要颌面形态为下颌升支偏短,下颌平面陡,后面高较小,前面高偏大,颈部后缩,上颌体和上颌磨牙牙槽突的垂直生长过度是形成高角骨面型的最主要原因,因此控制上颌磨牙高度是治疗高角骨面型的关键^[1]。已有不少研究和报道表明种植钉能有效压低上颌后牙,诱导下颌逆时针旋转,极大改善颈部的后缩与高角Ⅱ类骨面型^[2-4]。

三维有限元研究作为可靠的实验分析方法,具有操作简单、经济、耗时少的优点^[5],已被多项研究成功应用于评估上颌后牙压低过程中牙周组织应力分布与牙齿移动效率^[6-8],但既往研究对种植钉数目变化与横腭杆的构型变异下的上颌后牙生物力学响应探讨较少。本研究建立包含上颌骨-牙列-牙周膜-矫治器的三维有限元模型,在此基础上分析:在第一与第二磨牙之间的颊侧腭侧各放置1枚种植钉(共4枚)压低两侧上颌后牙时;在第一与第二

磨牙之间的颊侧放置1枚种植钉(共2枚),配合使用2种不同横腭杆构型压低两侧上颌后牙;在第一磨牙对应的腭中缝处植入1枚种植钉(仅1枚),配合使用2种不同横腭杆构型压低两侧上颌后牙时,不同力系组合对牙周组织安全性及牙齿位移控制效率的调控规律,为高角Ⅱ类骨面型患者的个性化力学方案设计提供理论依据。

材料与方法

一、研究对象

本研究选取于2023年10月就诊于东莞健力口腔医院正畸科的1例高角Ⅱ类骨面型成人患者作为研究对象,患者为恒牙列,牙列完整,牙齿排列基本整齐,牙齿解剖形态正常,无明显龋坏及牙体缺损,牙周状况良好。应用NewTom VG锥形束CT(cone-beam computed tomography, CBCT; QR, 意大利)对患者进行头颅扫描。拍摄时患者处于自然放松头位,

眶耳平面与地平面平行,共获得508张断层图像,保存为DICOM格式。本研究经东莞健力口腔医院医学伦理委员会批准(批准文号:莞口医伦审【2023】051001号),患者知情同意。

二、三维有限元模型建立

将DICOM格式文件导入Mimics 21.0软件(Mimics, Materialise, 比利时),提取生成包含皮质骨、松质骨和上颌牙列的模型,利用Geomagic Studio 2021软件对生成模型进行光滑化和实体化处理,得到上颌牙列、牙周膜和牙槽骨实体模型,为模拟真实临床中的拔牙矫治场景,双侧上颌第一前磨牙从模型中剔除。借助Solidworks 2023软件建立托槽、颊管、弓丝、种植钉和横腭杆等模型并完成装配,其中托槽和颊管的内部槽沟尺寸均为0.022英寸 $\times$ 0.028英寸(1英寸=25.4 mm),弓丝尺寸为0.019英寸 $\times$ 0.025英寸,种植钉长度为8 mm,直径为1.4 mm,横腭杆直径为1.0 mm。最后将装配好模型导入ANSYS Workbench 2023进行网格划分,建立三维有限元模型。

三、材料参数

对牙槽骨、牙周膜、牙齿、托槽、颊管、弓丝、横腭杆与种植钉的弹性模量及泊松比赋值参考以往文献[6,9],具体见表1。所有材料均被认为是均质、各向同性的线性弹性体。

表1 高角Ⅱ类骨面型患者种植钉压低上颌后牙三维有限元模型各部分材料参数

材料	杨氏弹性模量(MPa)	泊松比
牙槽骨	13 700	0.26
牙周膜	0.689	0.45
牙齿	18 600	0.30
托槽、颊管、弓丝、横腭杆	200 000	0.30
种植钉	110 000	0.30

四、边界条件及约束

将上颌骨模型的顶部进行边界约束,使受力条件下上颌骨固定。牙根、牙周膜和牙槽骨之间,牙槽骨与种植钉间,牙齿与颊管、托槽和横腭杆之间选择“绑定”类型,弓丝与槽沟选择“接触”类型,弓丝可滑动。

五、加载方式

本研究中,对两侧上颌的后牙同时压低,拟分别建立使用4枚种植钉、2枚种植钉及1枚种植钉的三维有限元模型并进行分析,并在使用2枚种植钉

及1枚种植钉时搭配不同构型横腭杆。根据Rai等^[10]的报道,对磨牙施加1.96 N的压低力可以使磨牙每月成功压低0.5~1 mm,牙根不会发生明显吸收,本研究参考使用相同力值。

1.工况1:在第一与第二磨牙之间的颊腭侧距离嵴顶6 mm的位置各放置1枚种植钉(合计4枚种植钉),颊腭两侧同时加载压低力值0.98 N。

2.工况2:在第一与第二磨牙之间的颊侧距离牙槽嵴顶6 mm的位置放置1枚种植钉(合计2枚种植钉),左右两侧第一磨牙设计横腭杆连接,种植钉加载后牙压低力值为1.96 N。

3.工况3:在工况2基础上,两侧第二磨牙腭侧距离牙槽嵴顶6 mm处再各设计一由腭杆伸出的牵引钩,第二磨牙通过腭侧牵引钩接受腭侧加载压低力值为0.98 N。

4.工况4:在第一磨牙对应的腭中缝处植入1枚种植钉(合计1枚种植钉),左右两侧第一磨牙通过横腭杆连接,在第一磨牙腭侧设计牵引钩作种植钉压低用,种植钉两侧加载压低力值为1.96 N。

5.工况5:在工况4基础上,左右两侧第二磨牙腭侧距离牙槽嵴顶6 mm处再各设计一由腭杆伸出的牵引钩,第二磨牙通过腭侧牵引钩接受腭侧加载压低力值为0.98 N。

6.坐标轴设置:以 x 轴代表水平方向,指向左方为正;以 y 轴代表矢状方向,指向后方为正;以 z 轴代表垂直方向,指向上方为正。各工况及坐标轴设置见图1。

六、观测指标

1.后牙牙周膜应力分布观测:观测5种工况下,上颌第二前磨牙、第一磨牙、第二磨牙牙周膜的Von Mises等效应力分布,按解剖位点划分为3个区域:(1)颈缘区。釉牙骨质界向根方延伸2 mm范围内的牙周膜。(2)根中/根分叉区。磨牙为根分叉处向冠方、根方各延伸1.5 mm范围,单根第二前磨牙以牙根中1/3区段匹配磨牙根分叉区垂直高度,实现同区段应力横向对比。(3)根尖区。根尖孔向冠方延伸3 mm范围内的牙周膜。统计指标为各区域应力的均值 $\pm$ 标准差、全牙位最大应力值和应力梯度(颈缘区应力均值/根尖区应力均值)。

牙周膜的安全应力阈值参考既往研究,石慧等^[11]研究指出正畸力学最常引用的牙周膜生理安全阈值为不超过26 kPa,而Moga等^[12]则认为最大生理静水压(maximum physiological hydrostatic pressure,

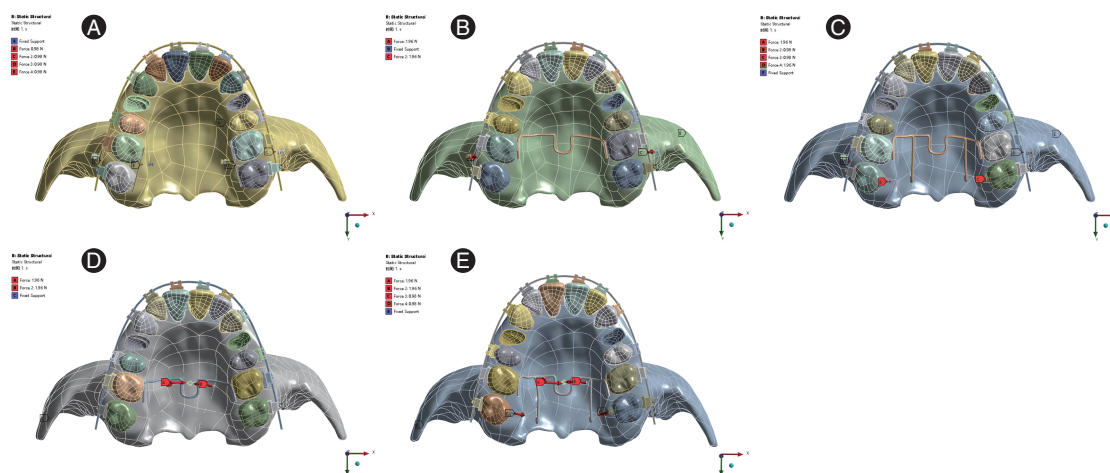


图1 高角Ⅱ类骨面型患者种植钉压低上颌后牙三维有限元模型各工况示意图 A:工况1;B:工况2;C:工况3;D:工况4;E:工况5。

MHP)阈值范围为2~16 kPa。当牙周膜应力超过MHP阈值时,可能导致牙周膜缺血、坏死及牙根吸收。本研究以MHP阈值16 kPa作为安全阈值上限,对各工况下牙周膜应力安全性进行评估。

2. 后牙的三维位移趋势。选取牙齿位移标志点:第二前磨牙颊尖点(牙冠)、根尖点(牙根),上颌第一、第二磨牙近中颊尖点(牙冠)、腭根根尖点(牙根)。统计各标志点 x 、 y 、 z 轴的三维位移值,解读不同工况下牙齿移动的临床意义。因模型左右两侧对称且施加力值一致,本研究仅对模型右侧上颌后牙不同工况下的观测指标进行分析。

本研究为三维有限元仿真分析,采用标准化模型及工况设置,无临床随机样本,仅通过对比各组应力、位移峰值及均值分布规律进行分析,不进行统计学检验。

结 果

一、不同工况下上颌后牙牙周膜应力分布

不同工况下上颌后牙牙周膜 Von Mises 应力分布图见图2,各工况牙周膜 Von Mises 应力数据统计结果见表2。从牙周膜安全性角度分析,本研究各工况下牙周膜最大 Von Mises 应力范围为0.6412~5.2211 kPa,低于牙周膜最大静水压上限16 kPa,表明本研究所设计的压低力值(0.98~1.96 N)均在牙周组织安全范围内。

所有工况应力分布规律均呈现颈缘区>根中/根分叉区>根尖区的垂直向应力梯度,应力集中主要发生于磨牙颈缘区,根尖区应力水平最低、分布最均匀。

工况1各牙位各区域应力均值最低,应力梯度

最小,应力分布最均匀;工况4次之,各区域应力均值与梯度均明显低于工况2、3、5;工况3与工况2相比,全牙位最大应力峰值升高,但第二磨牙颊侧颈缘区应力均值由2.147 kPa降至1.632 kPa,应力分布更均匀;工况5与工况4相比,全牙位最大应力峰值升高,第二磨牙腭侧颈缘区应力均值由0.726 kPa升至1.863 kPa,应力集中程度显著加重,分布均匀性下降。

二、不同工况下第二前磨牙位移趋势

1. x 轴水平方向:如表3及图3A所示。第二前磨牙在工况1、工况2下表现为牙齿的颊侧倾斜移动,在工况4下表现为牙齿的腭侧倾斜移动。从倾斜程度观察,工况1最小,工况3次之,工况2最大;工况3与工况2比较,牙齿同样向颊侧倾斜移动,颊侧趋势略有减小;工况5与工况4相比,牙齿同样向腭侧倾斜移动,腭倾趋势略有减小。

2. y 轴矢状方向:如表3及图3B所示,第二前磨牙在工况1表现为冠向近中移动的远中倾斜,工况2下表现为冠向近中移动的近中倾斜,工况4下表现为冠向远中移动的远中倾斜。从倾斜度观察,工况1最小,工况2次之,工况4最大;工况3与工况2相比,牙冠移动方向与牙齿倾斜方向均相反,牙齿的倾斜程度增大;工况5与工况4相比,牙冠的移动方向相同,牙齿倾斜程度基本一致。

3. z 轴垂直方向:如表3及图3C所示。5组工况第二前磨牙冠、根均表现出压低趋势。冠、根压低量在工况1、工况4与工况2中依次增大;工况3较工况2压低量更小,工况5较工况4压低量略有减小,无明显差异。所有工况的初始压低位移动均符合临床有效压低的力效对应关系。

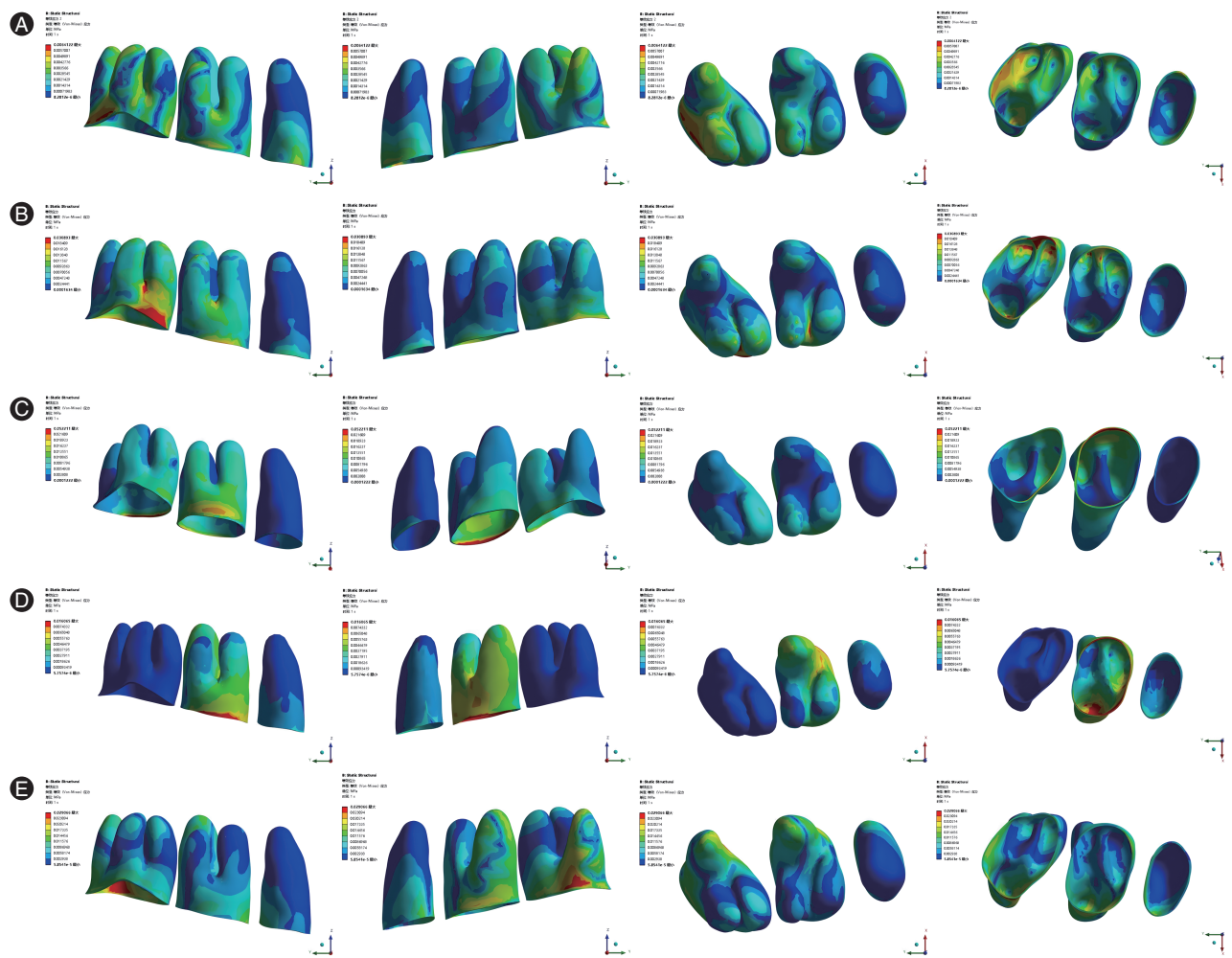


图2 不同工况下牙周膜 Von Mises 应力分布组图 A:工况 1;B:工况 2;C:工况 3;D:工况 4;E:工况 5。

表 2 不同工况下各牙位牙周膜 Von Mises 应力统计表($\bar{x}\pm s$)

工况	牙位	颈缘区 (kPa)	根中/根分叉区 (kPa)	根尖区 (kPa)	应力梯度 (颈缘/根尖)	全牙位最大应力 (kPa)	最大应力分布位点
1	第二前磨牙	0.214±0.032	0.187±0.025	0.102±0.018	2.10	—	—
	第一磨牙	0.326±0.041	0.275±0.033	0.156±0.021	2.09	—	—
	第二磨牙	0.412±0.052	0.328±0.039	0.182±0.024	2.26	0.641 2	第二磨牙远中颈缘区
2	第二前磨牙	0.872±0.103	0.624±0.078	0.215±0.032	4.06	—	—
	第一磨牙	1.526±0.187	1.142±0.135	0.328±0.041	4.65	—	—
	第二磨牙	2.147±0.242	1.863±0.209	0.412±0.053	5.21	3.089 3	第二磨牙颊侧颈缘区/根分叉处
3	第二前磨牙	0.725±0.089	0.542±0.067	0.203±0.029	3.57	—	—
	第一磨牙	2.874±0.315	1.926±0.213	0.387±0.046	7.43	5.221 1	第一磨牙颊侧颈缘区
	第二磨牙	1.632±0.194	1.247±0.148	0.364±0.042	4.48	—	—
4	第二前磨牙	0.412±0.053	0.326±0.041	0.142±0.022	2.90	—	—
	第一磨牙	0.874±0.105	0.642±0.079	0.217±0.031	4.03	1.606 5	第一磨牙颊、腭侧颈缘区
	第二磨牙	0.726±0.088	0.538±0.066	0.194±0.027	3.74	—	—
5	第二前磨牙	0.524±0.064	0.417±0.052	0.156±0.024	3.36	—	—
	第一磨牙	1.142±0.136	0.874±0.104	0.242±0.035	4.72	—	—
	第二磨牙	1.863±0.208	1.247±0.149	0.326±0.041	5.71	2.906 6	第二磨牙腭侧颈缘区

注:应力梯度为颈缘区应力均值与根尖区应力均值的比值,比值越大代表应力分布越不均匀;单根第二前磨牙以牙根中 1/3 区段匹配磨牙根分叉区垂直高度,实现同区段应力横向对比;-为无数据。

表3 不同工况下第二前磨牙三维位移($\times 10^{-4}$ mm)

工况	x轴		y轴		z轴	
	冠	根	冠	根	冠	根
1	-2.71	1.52	-0.22	-1.97	1.03	1.42
2	-7.02	3.57	-4.65	-0.86	6.39	4.45
3	-6.58	3.29	4.38	-2.07	4.53	2.30
4	6.03	1.51	4.27	-2.53	1.42	2.87
5	5.39	1.30	4.04	-2.26	1.26	2.19

注:x轴正值代表腭向位移,负值代表颊向位移;y轴正值代表远中位移,负值代表近中位移;z轴正值代表根方压低位移,负值代表伸长位移。

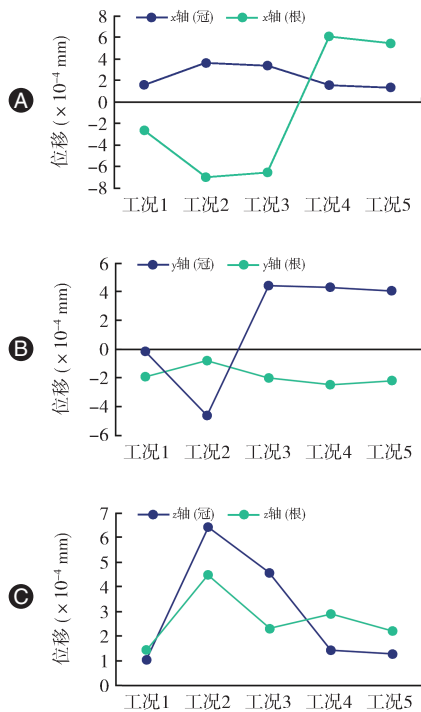


图3 不同工况下第二前磨牙三维方向位移组图 A:x轴方向位移图;B:y轴方向位移图;C:z轴方向位移图。

三、不同工况下第一磨牙位移趋势

1. x轴水平方向:如表4及图4A所示。第一磨牙在工况1、工况2下表现为牙齿的颊侧倾斜移动,在工况4下表现为牙齿的腭侧倾斜移动。从倾斜程度上观察,工况1最小,工况4次之,工况2最大;工况3与工况2比较,牙齿同样向颊侧倾斜移动,但颊侧倾斜移动程度减小;工况5与工况4相比,牙齿同样向腭侧倾斜移动,但腭侧倾斜移动程度得到一定程度限制。

2. y轴矢状方向:如表4及图4B所示。第一磨牙在工况1、工况4下均表现为冠向远中移动的远中倾斜趋势,在工况2下表现为冠向近中移动的近中倾斜趋势。从倾斜程度观察,工况1最小,工况2与

表4 不同工况下第一磨牙三维位移($\times 10^{-4}$ mm)

工况	x轴		y轴		z轴	
	冠	根	冠	根	冠	根
1	-1.14	1.58	0.14	-4.61	1.62	1.56
2	-8.41	3.98	-5.53	2.86	7.10	-5.82
3	-8.81	2.62	5.25	2.33	5.26	5.27
4	6.89	1.72	5.16	-3.49	2.82	5.16
5	6.19	1.43	4.85	-2.98	2.25	4.85

注:x轴正值代表腭向位移,负值代表颊向位移;y轴正值代表远中位移,负值代表近中位移;z轴正值代表根方压低位移,负值代表伸长位移。

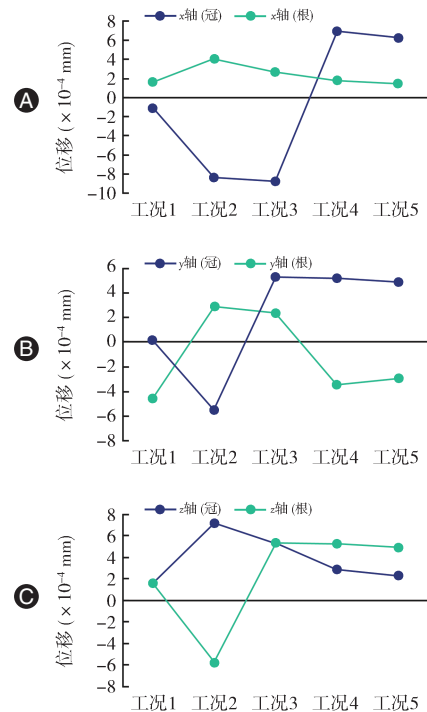


图4 不同工况下第一磨牙三维方向位移组图 A:x轴方向位移图;B:y轴方向位移图;C:z轴方向位移图。

工况4无明显差异;工况3与工况2相比,牙齿移动方向相反,且倾斜程度减小;工况5与工况4相比,牙齿的移动方向相同,倾斜程度也基本一致。

3. z轴垂直方向:如表4及图4C所示。工况1与工况4第一磨牙冠、根均表现为压低趋势,工况2表现为冠压低、根伸长趋势。从压低程度观察,工况1、工况2与工况4依次增大;工况3较工况2牙冠压低幅度减小,牙根由伸长转为压低;工况5较工况4冠、根压低幅度均略有减小。

四、不同工况下第二磨牙位移趋势

1. x轴水平方向:如表5及图5A所示。第二磨牙在工况1、工况4下表现为牙齿的腭侧倾斜移动,在工况2下表现为牙齿的颊侧倾斜移动。从倾斜程

度观察,工况1最小,工况4次之,工况2最大;工况3与工况2相比,两种工况下第二磨牙冠均颊侧倾斜,但工况3颊侧倾斜受到抑制;工况5与工况4相比,两种工况下第二磨牙冠均腭侧倾斜,工况5倾斜程度更大。

2. y轴矢状方向:如表5及图5B所示,工况1、工况2与工况4第二磨牙均表现为冠向近中移动的近中倾斜。从倾斜程度观察,工况1最小,工况4次之,工况2最大;工况3与工况2相比,牙齿移动方向相同,倾斜程度减小;工况5与工况4相比,牙齿移动方向相同,倾斜程度略减小。

3. z轴垂直方向:如表5及图5C所示。工况1与工况4第二磨牙冠、根均表现为压低趋势,工况2

表现为冠压低、根伸长趋势。从位移幅度观察,工况1、工况4与工况2依次增大;工况3较工况2牙冠压低幅度减小,牙根由伸长转为压低;工况5与工况4压低幅度基本一致。

讨 论

一、使用不同数量种植钉压低上颌后牙分析

针对高角Ⅱ类骨面型患者上颌后牙垂直向控制,Wang等^[13]使用植入两侧后牙区颊腭侧的共4枚种植钉,刘月华^[14]使用了植入两侧后牙区颊侧的2枚种植钉配合横腭杆,Paik等^[4]仅使用了植入腭中缝的1枚种植钉搭配横腭杆均成功压低了上颌后牙,实现了下颌逆时针旋转。故本实验参考以上报道,设计了工况1的4枚种植钉,工况2的2枚种植钉搭配横腭杆,与工况4的1枚种植钉搭配横腭杆压低上颌后牙的模型,探讨比较3种不同工况下后牙的生物力学反应及差别。

本实验结果显示,在工况1条件下,即两侧上颌第一与第二磨牙间颊、腭侧均植入种植钉共4枚压低上颌后牙的情况下,上颌后牙牙周膜最大 Von Mises 应力在3种工况中最小,且应力分布最为均匀。上颌后牙虽出现颊腭侧倾斜近远中倾斜程度也最小,垂直向上压低,但在垂直向上的压入幅度也最小。

在工况2条件下,即两侧上颌第一与第二磨牙间颊侧植入种植钉共2枚,配合使用横腭杆压低上颌后牙的情况下,上颌后牙牙周膜最大 Von Mises 应力在3种工况中最大,且应力分布最不均匀。上颌后牙出现颊腭侧倾斜近远中倾斜程度也最大,在垂直向上的压入幅度也最大。

在工况4条件下,即仅腭中缝植入1枚种植钉,配合使用横腭杆压低上颌后牙的情况下,上颌后牙牙周膜最大 Von Mises 应力在3种工况中最小。上颌后牙出现颊腭侧倾斜及近远中倾斜程度较工况2小,在垂直向上的压入幅度也居中。

综合以上,可判断出工况1颊腭侧同时使用种植钉压低后牙能最大程度地避免后牙的颊腭侧倾斜与近远中倾斜,应力分布最为均匀,这与马志祥^[6]和 Bharadwaj 等^[8]的研究结果相似,但考虑压低效率,可相应增加压低力值。其次是工况4的腭中缝植入1枚种植钉,配合使用横腭杆压低上颌后牙时,上颌后牙颊腭侧倾斜与近远中倾斜的程度比较小,牙周膜的应力分布也较工况2更为均匀,压低效果也能得到保障。

表5 不同工况下第二磨牙三维位移($\times 10^{-4}$ mm)

工况	x轴		y轴		z轴	
	冠	根	冠	根	冠	根
1	2.24	1.14	-2.76	-0.63	1.49	2.11
2	-9.59	4.18	-6.46	3.62	8.32	-7.21
3	-6.35	3.50	-5.99	-3.16	5.76	5.70
4	6.26	1.89	-5.64	-2.30	1.84	4.89
5	8.60	1.54	-4.83	-2.64	1.78	4.28

注:x轴正值代表腭向位移,负值代表颊向位移;y轴正值代表远中位移,负值代表近中位移;z轴正值代表根方压低位移,负值代表伸长位移。

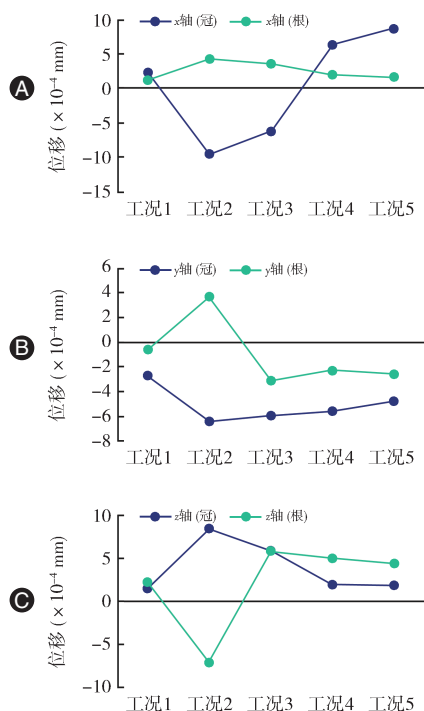


图5 不同工况下第二磨牙三维方向位移组图 A:x轴方向位移图;B:y轴方向位移图;C:z轴方向位移图。

二、腭侧牵引钩施加压低力对于第二磨牙的影响

在 Kawamura 等^[7]的三维有限元研究中,即使在种植钉搭配第一磨牙处横腭杆对上颌后牙进行压低的情况下,第二磨牙也会出现明显的颊侧倾斜,文中虽然提到了可以在弓丝上增加舌侧收缩弯曲或者冠舌侧转矩减少这种情况的发生,但弓丝的形变可能会影响弓形及增大托槽与弓丝间的滑动阻力。第二磨牙上增加使用横腭杆也可以控制其颊侧倾斜度^[15],但双横腭杆的使用可能会在临床中明显增加患者的不适感。朴孝尚^[16]与 Noh 等^[17]通过第一磨牙横腭杆处腭侧部分对第二磨牙施加腭侧压低力成功对其进行了腭倾控制,此方法兼顾了临床效率与患者舒适度。

本研究结果显示,工况2的第二磨牙颊倾,而工况3在第二磨牙腭侧增设牵引钩后,颊侧倾斜趋势得到显著抑制,且第二磨牙颊侧颈缘区应力集中明显缓解,应力分布更均匀,提示该改良方式可有效提升颊侧单一种植钉+横腭杆方案的临床安全性与可控性。

而工况4的第二磨牙本身仅存在轻微腭倾,工况5在第二磨牙腭侧增设牵引钩后,腭侧倾斜程度显著加重。因此,使用腭中缝种植钉搭配横腭杆时,无需额外增设第二磨牙腭侧牵引钩,避免加重其腭侧倾斜。

三、本实验存在的局限性与未来研究方向

本研究通过三维有限元方法分析了不同加载方式对高角Ⅱ类骨面型患者上颌后牙压低的生物力学效应,但仍存在以下局限性。

第一,本研究选取1例典型高角Ⅱ类骨面型患者构建模型,虽能反映该类人群上颌后牙压低的核心生物力学规律,但不同高角Ⅱ类骨面型患者的上颌骨解剖形态、磨牙牙根形态与数目、牙槽骨密度和牙周膜厚度等均存在显著个体差异,单例模型无法完全覆盖该类患者的生物力学特征,研究结果向不同解剖特征的临床个体推广时,需充分考量患者个性化解剖结构对力系响应的影响。

第二,本研究未开展多例患者有限元模型的验证与对比分析,无法明确不同加载方式的生物力学效应是否存在显著的个体响应差异,因此本研究结论的临床普适性仍需后续大样本临床对照研究、多例个性化有限元模型分析进一步验证。

第三,本研究中对于患者的咬合力、颊舌肌力

量等口腔功能载荷,由于个体差异大且缺乏有效的文献数据支撑,本研究中未设计加载。咬合力与正畸压低力协同作用于后牙及牙周组织,该生理性载荷可能会改变压低位移及牙周膜应力的分布梯度。此外,颊肌与舌肌的持续静息压力对后牙颊舌侧位移的影响,随矫治周期延长将逐渐显现,而本研究仅模拟瞬时力学效应,未纳入该长期调控因素,可能导致牙齿位移趋势的评估存在一定偏差。

第四,本研究仅模拟了正畸压低力作用下的瞬时初始力学效应,将所有材料设定为均质、各向同性的线性弹性体,未纳入牙周膜的黏弹性、骨改建动态过程、牙周膜适应性重塑等长期生物行为,无法动态模拟整个矫治周期内的牙齿移动过程,因此研究结果与临床长期矫治的实际效果可能存在偏差。

基于以上局限性,未来研究可从以下方向进一步完善:(1)纳入多例不同解剖特征的高角Ⅱ类骨面型患者构建个性化有限元模型,开展多组间对比验证,提升研究结论的普适性;(2)纳入咀嚼咬合力、颊舌肌压力等口腔功能载荷,构建更贴合临床生理状态的有限元模型;(3)整合骨改建动力学模型与牙周膜黏弹性模型,实现正畸压低过程的动态生物力学模拟,完成从“瞬时机械位移”到“长期生物适应”的研究升级,进一步提升研究结果的临床转化价值。

综上所述,在上颌第一与第二磨牙之间的颊腭侧均植入种植钉是最为理想的压低上颌后牙方式,其次是腭中缝植入种植钉搭配使用横腭杆。使用颊侧种植钉搭配横腭杆压低上颌后牙时,需在第二磨牙腭侧设计牵引钩以抑制其颊倾;使用腭中缝植入种植钉搭配使用横腭杆可无需在第二磨牙腭侧再设计牵引钩。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献声明 周炼:酝酿和设计实验、实施研究、论文撰写;徐海涛:采集、分析、解释数据;倪霞:对文章的知识性内容作批评性审阅、指导、支持性贡献

参 考 文 献

- [1] 白丁,赵志河. 口腔正畸策略、控制与技巧[M]. 北京:人民卫生出版社, 2015:239,242.
- [2] 邵佳琪,钟冲,俞洋洋,等. 1例成年骨性Ⅱ类高角患者正畸掩饰性治疗[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2021,28(3):177-179. DOI:10.3760/cma.j.cn115797-20200422-21313.
- [3] Tian Y, Mao B, Cui S, et al. Effects of orthodontic camouflage treatment vs orthodontic - orthognathic surgical treatment on condylar stability in Class II hyperdivergent patients with severe

- temporomandibular joint osteoarthritis: A retrospective observational study [J]. *Angle Orthod*, 2023, 93(4): 458-466. DOI:10.2319/090622-622.1.
- [4] Paik CH, Ahn HW, Yu H, et al. Orthodontic retreatment for vertical control in a patient with skeletal Class II long face [J]. *AJO-DO Clinical Companion*, 2023, 3(1): 30-42. DOI: 10.1016/j.xaor.2022.07.001.
- [5] 闫麒安,周静文,米丛波.有限元在口腔正畸学中的研究新进展[J]. *临床医学进展*, 2024, 14(2): 3818-3824. DOI:10.12677/ACM.2024.142532.
- [6] 马志祥.微种植体支抗压低上颌后牙的三维有限元分析[D].大连:大连医科大学, 2021.
- [7] Kawamura J, Park JH, Tamaya N, et al. Biomechanical analysis of the maxillary molar intrusion: A finite element study [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022, 161(6): 775-782. DOI: 10.1016/j.ajodo.2020.12.028.
- [8] Bharadwaj A, Ahuja S, Bhambri E, et al. A 3D Finite Element Analysis of biomechanical effects on teeth and bone during true intrusion of posteriors using miniscrews [J]. *Int Orthod*, 2024, 22(1): 100819. DOI:10.1016/j.ortho.2023.100819.
- [9] 王文栋,王云龙,姚瑶,等.不同位置微种植支抗压入整个上牙列的三维有限元分析[J]. *中华口腔正畸学杂志*, 2023, 30(2): 86-91. DOI:10.3760/cma.j.cn115797-20220802-23206.
- [10] Rai D, Bhasin SS, Rai S. Orthodontic microimplants assisted intrusion of supra-erupted maxillary molar enabling osseointegrated implant supported mandibular prosthesis: Case reports [J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2014, 14 (Suppl 1): 238-242. DOI: 10.1007/s13191-013-0306-2.
- [11] 石慧,陆胜男,夏文倩,等.螺旋器分裂基托式矫治装置远移上颌第一磨牙的三维有限元分析[J]. *口腔医学*, 2023, 43(11): 1002-1007. DOI:10.13591/j.cnki.kqyx.2023.11.007.
- [12] Moga RA, Olteanu CD, Botez M, et al. Assessment of the maximum amount of orthodontic force for pdl in intact and reduced periodontium (Part I) [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2023, 20(3): 1889. DOI:10.3390/ijerph20031889.
- [13] Wang XD, Zhang JN, Liu DW, et al. Nonsurgical correction using miniscrew-assisted vertical control of a severe high angle with mandibular retrusion and gummy smile in an adult [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2017, 151(5): 978-988. DOI: 10.1016/j.ajodo.2016.04.034.
- [14] 刘月华.突面畸形的正畸策略及技术[M].北京:人民卫生出版社, 2024:202-211.
- [15] Yañez-Vico RM, Perula MCL, Solano-Reina E. Vertical and transverse management with transpalatal arches in an adult with Class III malocclusion [J]. *Case Rep Dent*, 2017: 1-7. DOI: 10.1155/2017/4062105.
- [16] 朴孝尚.微种植体支抗在正畸治疗中的应用基础[M].白玉兴,等,译.北京:人民卫生出版社, 2018:186.
- [17] Noh HK, Park HS. Considerations for vertical control with microimplants in a idiopathic condylar resorption patient: A case report [J]. *J Orthod*, 2021, 48(2): 172-182. DOI: 10.1177/14653125211002211.

(收稿日期:2025-10-12)

(本文编辑:王嫚)