

[文章编号] 1671-587X(2026)01-0211-08

DOI:10.13481/j.1671-587X.20260122

滑动内收过程中下前牙不同转矩控制对牙齿移动影响的 三维有限元分析

杨雪桐, 杨雨坤, 马 玲, 张馨元, 侯建华
(吉林大学口腔医院正畸科, 吉林 长春 130021)

[摘 要] **目的:** 建立拔牙矫治直丝弓滑动内收下前牙的三维有限元模型, 通过在下颌前牙模拟使用不同转矩控制前牙内收, 阐明前牙不同转矩控制在滑动内收过程中对下颌牙齿移动产生的影响。**方法:** 选取 1 例拟拔除下颌第一前磨牙进行矫治的恒牙列患者的锥形束计算机断层扫描 (CBCT) 数据, 通过建模软件 Mimics 21.0、Geomagic Wrap 2021 和 Solidworks 2022 建立直丝弓滑动内收下前牙的三维有限元模型, 在有限元分析软件 Ansys Workbench 2021R1 中, 分别建立下前牙施加 -11° 、 -6° 、 -3° 、 $+3^\circ$ 、 $+6^\circ$ 和 $+11^\circ$ 6 种转矩的工况, 并加载 1.5 N 的内收力整体内收下颌前牙, 分析不同工况下下颌牙齿在唇 (颊) 舌方向、近远中方向和垂直方向上的初始位移趋势。**结果:** 在唇 (颊) 舌向和垂直方向上, 前牙转矩对中切牙与侧切牙产生唇倾和压低的趋势, 且该趋势随转矩增加逐渐明显; 对牙弓中其他牙齿则产生舌倾和伸长的趋势, 其中以尖牙和第二前磨牙受转矩变化影响最大, 其次为第一磨牙, 第二磨牙主要受内收力影响, 整体表现为近中舌侧扭转的位移趋势, 受转矩变化影响较小。近远中方向上, 前牙转矩变化对后牙近中移动量影响不显著。**结论:** 前牙的不同转矩对牙弓中其他牙齿会产生伸长和舌向倾斜移动的影响, 程度取决于牙齿在牙弓中的位置, 靠后的牙齿受转矩变化影响较小, 受内收力影响较大, 在临床上对前牙进行不同转矩控制时应施加转矩以外的其他牙齿移动给予关注。

[关键词] 转矩; 三维有限元分析; 滑动直丝弓; 牙齿移动; 拔牙矫治

[中图分类号] R783.5 **[文献标志码]** A

Three-dimensional finite element analysis on effects of different anterior torque controls on mandibular teeth movement in sliding mechanics

YANG Xuotong, YANG Yukun, MA Ling, ZHANG Xinyuan, HOU Jianhua
(Department of Orthodontics, Stomatology Hospital, Jilin University, Changchun 130021, China)

ABSTRACT Objective: To establish a three-dimensional finite element model of mandibular teeth during retraction in sliding mechanics, by simulating the application of different torque controls of anterior teeth, and to clarify the impact of different torque controls on the movement of mandibular teeth during the retraction process. **Methods:** Using cone beam computed tomography (CBCT) data from a permanent

[收稿日期] 2025-01-21 [录用日期] 2025-03-10

[基金项目] 吉林省科技厅科技发展计划项目 (20190303156SF); 吉林省财政厅骨干人才项目 (jcsz2023481-18)

[作者简介] 杨雪桐 (1997-), 女, 海南省三亚市人, 在读硕士研究生, 主要从事口腔正畸生物力学方面的研究。

[通信作者] 侯建华, 副教授, 硕士研究生导师 (E-mail: houjh@jlu.edu.cn)

©《吉林大学学报 (医学版)》编辑部, 开放获取遵循 CC BY-NC-ND 协议。

© Editorial Board of Journal of Jilin University (Medicine Edition). Open access under CC BY-NC-ND license.

dentition patient scheduled for mandibular first premolar extraction in orthodontic treatment, a three-dimensional finite element model of straight-wire sliding retraction of mandibular teeth was constructed via Mimics, Geomagic Wrap, and Solidworks software. In Ansys Workbench software, six conditions with different torques of -11° , -6° , -3° , $+3^\circ$, $+6^\circ$ and $+11^\circ$ were applied to the mandibular anterior teeth, with a 1.5 N retraction force loaded. The initial displacement trends of each mandibular teeth in the labiolingual, mesiodistal, and vertical directions were analyzed under these conditions. **Results:** In the buccolingual directions, different anterior torques exerted a tendency to procline and intrude the central and lateral incisors, with this tendency becoming increasingly evident as the torque increased. For other teeth in the lower arch, it induced a lingual tip and extrusion trend, with the canines and second premolars being the most affected by torque changes, followed by the first molars. The second molars were primarily influenced by the retraction force, exhibiting a displacement trend of mesiallingual rotation and were less affected by torque changes. In the mesialdistal direction, the changes in anterior torques had no significant impact on the posterior teeth. **Conclusion:** Different anterior torques lead to extrusion and lingual tipping movements of other teeth in the mandibular arch, with this influence also depending on the position of the teeth within the arch. Teeth located more posteriorly are less affected by torque changes but are more influenced by the retraction force. When applying different torques to control anterior teeth clinically, the clinicians should pay more attention to the movements of other teeth.

KEYWORDS Torque; Three-dimensional finite element analysis; Sliding straight wire; Tooth movement; Extraction treatment

前牙的转矩在正畸治疗中非常重要,其不仅直接关系到患者的面部美观,还影响前牙覆殆覆盖的正常建立以及牙周组织和颞下颌关节的健康与稳定,特别是在拔牙矫治病例中对前牙转矩的精准调控更为关键^[1]。在拔牙矫治前牙内收过程中,前牙易发生牙冠舌向倾斜移动造成转矩丢失。为消除上述不良影响,临床医生使用不同方法对前牙进行额外的转矩控制,以期牙齿可以在合理的范围内进行移动^[2]。如在前牙内收过程中施加正转矩,这种转矩作用减少了内收过程中前牙牙冠舌向倾斜的移动趋势,使牙齿更趋近于整体移动^[3-4]。根据牛顿第三定律,作用力与反作用力同时存在,且两者大小相等,方向相反。若在一颗牙齿上施加转矩,该转矩将产生一大小相等、方向相反的反作用力,牙齿与牙齿之间通过弓丝相连接,则该力将通过弓丝传递,在相邻牙齿上产生相反的作用效果。ISAACSON等^[5]研究显示:在双力偶系统中,即弓丝仅通过切牙和第一磨牙托槽时,在切牙上施加一个冠唇向转矩,会导致切牙的唇向倾斜和伸长作用,其反向力在后牙区产生垂直方向的分力,使后牙压低。采用滑动直丝弓矫治技术内收前牙时,所有牙齿通过弓丝连接成整体,不再局限于简单的双力偶系统,加之内收力的影响,前牙转矩作用更加复杂化。以往关于直丝弓矫治系统前牙转矩的研究

多针对不同前牙转矩在内收过程中对前牙移动方式的影响,鲜有文献提及前牙的转矩作用对牙弓中其他牙齿产生的影响。本实验通过三维有限元分析法,不仅进一步分析了下颌前牙在转矩和内收力作用下的移动趋势,还着重研究了后牙的移动规律,实现了对下颌前牙与后牙生物力学效应的全面分析,为临床上精准调控下切牙转矩并有效预测牙齿整体移动规律提供理论支持。

1 资料与方法

1.1 一般资料 and 主要设备

本研究选择1例就诊于本院正畸科,牙列完整,牙齿大小形态正常,拟拔除下颌第一前磨牙进行正畸治疗的成年女性患者作为研究对象。获取患者的锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)数据。主要设备:新亚标准型网底直丝弓托槽1副(杭州新亚公司),CBCT仪(芬兰Pro Max 3D公司),DELL笔记本电脑工作站(2.10 GHz, Windows 11),Mimics 21.0软件(比利时Materialise公司),Geomagic Wrap 2021软件(美国3D Systems公司),Solidworks 2022软件(法国Dassault Systems公司),Ansys Workbench 2022R1软件(美国ANSYS公司)。

1.2 建模方法

1.2.1 建立牙列-下颌骨模型 获取上述研究对象

的CBCT数据,以Dicom格式保存并导入Mimics软件中,通过划分阈值初步分离颌骨及牙列的模型,使用“擦除”、“动态区域增长”和“修补填充”等命令去除与本实验无关的干扰结构并对颌骨及牙齿空隙区域进行填充,使用“Calculate 3D”命令分别生成下颌骨和下颌牙列(除两侧下颌第二前磨牙外)的初步三维模型,以STL格式保存。将上述生成的模型导入Geomagic Wrap软件中,去除模型锐利边缘、噪点、自相交面 and 不符合颌骨及牙齿解剖结构的钉状物,使模型进一步光滑。通过网格划分生成符合各模型解剖结构的网格曲面,随后拟合曲面,生成下颌骨和下颌各牙的曲面实体,以STP格式储存。

1.2.2 建立牙周膜模型 牙周膜为厚度0.15~0.38 mm、紧贴牙根和牙槽窝的解剖结构。由于CBCT精度问题难以准确界定牙齿与颌骨交界处的牙槽窝形态,并提取厚薄一致的牙周膜模型,而牙周膜作为牙齿受力后发生形变的重要结构,其模型构建与后续分析的准确性密切相关,本研究参考以往常见方法^[6-7],使用Geomagic Wrap软件中的偏移命令,将牙齿均匀向外偏移0.2 mm,提取出均匀且厚度一致的牙周膜模型,该操作有利于简化分析流程。12颗牙齿的牙周膜模型在软件中按上述步骤进行曲面拟合后,同牙齿和颌骨模型一并以STP格式导出。

1.2.3 建立托槽和牵引钩模型 在Solidworks软件中,根据浙江新亚医疗科技股份有限公司提供的标准型网底直丝弓托槽数据,建立简化长方体托槽模型。并根据临床常用游离牵引钩尺寸,建立游离牵引钩的简化模型,高度为2 mm。上述模型分别以SLDRPT格式保存。

1.2.4 模型组装和弓丝的生成 将上述生成的颌骨、牙列和牙周膜STP格式的模型导入Solidworks软件中。本实验研究对象为使用直丝弓矫治器排齐整平后拔牙间隙关闭前的牙列状态,受试者的牙齿排列不符合实验要求,需对牙齿位置进行手动调整。参考OPA-K下颌弓形对牙齿进行初步排列^[8],并根据研究对象的牙弓进行调整。根据三维空间上3点确定一平面的原理,选取两侧下颌第一磨牙近中颊尖顶点与两侧下颌中切牙近中切点连线的中点3点生成殆平面,过一侧下颌第一磨牙的临床冠中心点做该平面的平行面。在该平面上使用软件中的样条曲线功能,连接各牙齿临床冠中心点建立弓丝辅助

线,并在水平面上调整弓形。形成的弓丝辅助线为与各牙临床冠中心距离相等,形状接近标准弓形、左右对称且平滑的曲线^[9]。使用放样功能沿弓丝曲线生成0.48 mm×0.64 mm的方形弓丝模型,移动托槽模型使弓丝曲线穿过托槽内部,并调整托槽位置使之靠近各牙齿临床冠中心。使用移动面和组合删减功能,对弓丝和托槽进行布尔运算,得到包含0.56 mm×0.71 mm槽沟和0.48 mm×0.64 mm弓丝的模型。牵引钩放置于两侧侧切牙托槽远中1 mm处,垂直于弓丝平面。

使用组合-删减功能,对牙齿、牙周膜、下颌骨和托槽进行布尔运算,确保各部分零件之间无干涉。最终得到符合临床实际的包含下颌骨、下颌牙列、下颌牙周膜和方形弓丝及托槽在内的有限元分析模型,以XT格式保存。见图1。

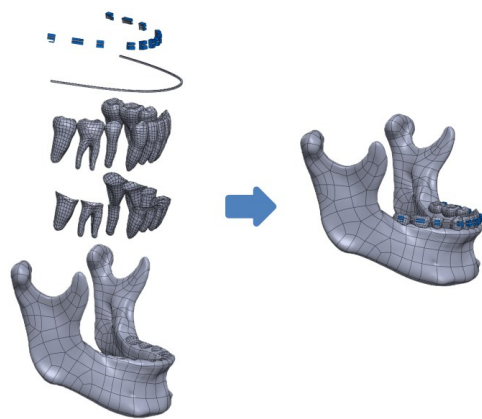


图1 三维有限元模型的建立和组装示意图

Fig.1 Schematic diagram of establishment and assembly of finite element model

1.3 三维有限元分析的前处理

1.3.1 材料赋值和网格划分 将上述XT格式模型导入Ansys Workbench软件中,所有材料均假设为均质和各向同性的线弹性材料,各材料的具体力学参数参考文献^[10]。见表1。

本实验中,根据不同结构的大小界定了不同的网格划分尺寸^[11],对外形不规则的下颌骨、牙齿和牙周膜采用四面体网格划分技术生成四面体十节点单元,并在对实验影响较为关键的牙槽窝区域进行网格加密。对外形较规则的弓丝、托槽和牵引钩采用六面体划分方法。模型网格划分完成后共得到单元数为575 805,节点数为1 003 644。

1.3.2 边界约束和接触条件 对下颌骨髁突及下颌正中联合处表面进行固定约束,在施加任何矫治

表1 各材料的力学参数

Tab. 1 Properties of various materials

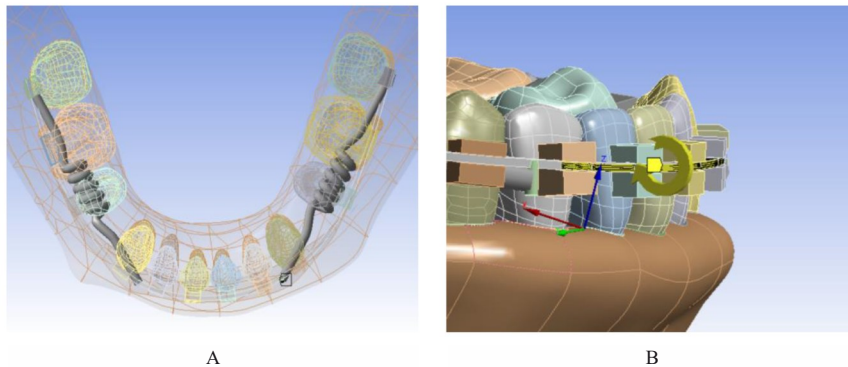
Material	Young's Modulus (P/MPa)	Poisson's ratio
Tooth	2.0×10^4	0.30
Periodontal ligament	68	0.49
Alveolar bone	1.37×10^4	0.30
Bracket/Traction hook	2.14×10^5	0.30
Stainless steel wire	2.00×10^5	0.30

力时该部位绝对不变形。托槽与弓丝之间的接触定义为 No separation, 弓丝可沿托槽槽沟滑动, 但垂直向上不分离。为防止施加转矩力时牙齿之间移动发生渗透, 设定牙齿与牙齿之间接触类型为 No separation。牙齿与牙周膜、牙周膜与颌骨、托槽与牙齿之间的接触类型均为 Bonded。

1.3.3 坐标系的建立 本实验共建立2组坐标系: 全局坐标系和各牙局部坐标系。①全局坐标系: 以

下颌两侧中切牙接触点为原点建立坐标系, 其中Y轴代表近远中向, 远中为正; ②各牙局部坐标系: 以右侧中切牙、侧切牙、尖牙、下颌第二前磨牙、第一磨牙和第二磨牙等牙齿几何中心为原点建立6组坐标系, 其中X轴代表唇(颊)舌方向, 舌向为正; Y轴代表近远中方向, 远中为正; Z轴代表垂直方向, 向上为正。

1.3.4 力的加载 本实验在模型上共加载2种力: 内收力和转矩力。①内收力: 使用接触条件中的 Spring 弹簧单元模拟内收力^[12], 方向沿两侧牵引钩分别指向同侧第二磨牙颊面管, 弹簧单元两端均为刚性连接, 在弹簧单元上加载预应力值1.5 N, 模拟1.5 N滑动内收力^[13]。②转矩力: 在两侧下颌侧切牙间的弓丝施加转矩力, 受力点为该段弓丝的几何中心^[14], 以全局坐标系中的Y轴方向为旋转轴, 沿Y轴顺时针旋转为正转矩、逆时针旋转为负转矩。见图2。



A: Retraction force; B: Torque force(Positive torque).

图2 模型上加载的力

Fig. 2 Force loaded on model

1.4 工况设计

根据在下前牙施加不同的转矩力, 本实验共设计6种工况, 工况1~6前牙转矩分别为 -11° 、 -6° 、 -3° 、 $+3^\circ$ 、 $+6^\circ$ 和 $+11^\circ$ 。

1.5 分析项目

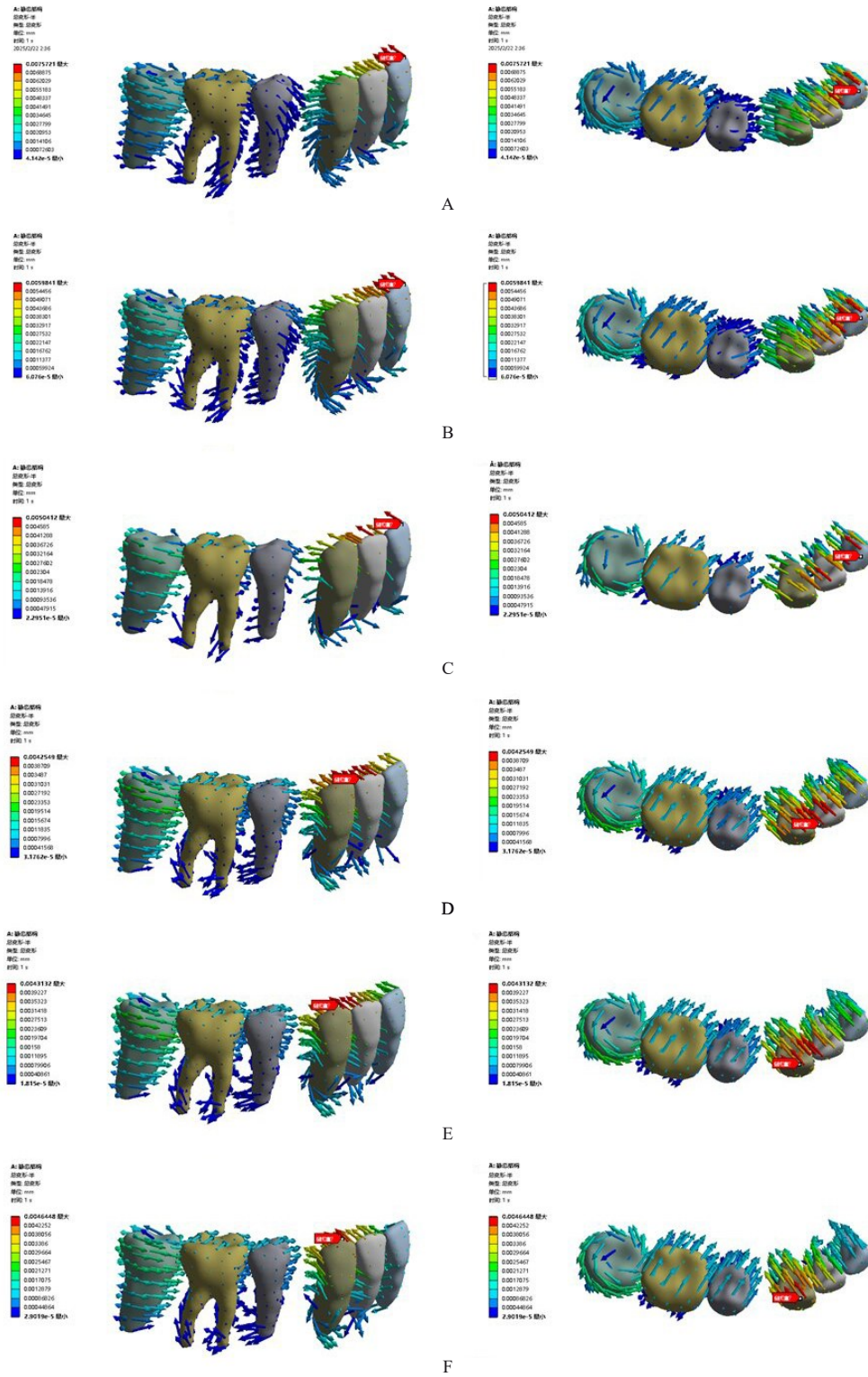
由于弓丝、托槽、牙列和颌骨左右基本对称, 为简化实验并降低计算量, 虽然两侧同时加力, 但仅对右侧进行分析。选取中切牙、侧切牙切缘中点、尖牙牙尖顶点、第二前磨牙颊尖顶点、第一磨牙、第二磨牙近中颊尖顶点和远中颊尖顶点, 共8个点作为牙冠位移参考点。选取中切牙、侧切牙、尖牙、第二前磨牙根尖顶点、第一磨牙近中颊根尖顶点和第二磨牙根尖顶点, 共6个点作为牙

根位移参考点。使用 Ansys Workbench 软件分别计算在6个工况下, 各牙参考点在对应的局部坐标系上X、Y和Z轴3个方向的牙冠和牙根初始位移量, 导出其数据并绘制折线图, 对比不同工况下牙齿在三维方向上的位移趋势的不同以及同工况下不同牙齿位移量的差距。

2 结果

2.1 牙齿整体位移趋势

下颌右侧6颗牙齿在工况1~6中的初始位移趋势如图3所示。图片左侧的颜色梯度代表牙齿初始位移的大小, 红色代表最大值, 蓝色代表最小值。



A: Condition 1; B: Condition 2; C: Condition 3; D: Condition 4; E: Condition 5; F: Condition 6.

图3 各工况下的牙齿位移云图

Fig. 3 Displacement trend nephograms of each tooth in various conditions

2.2 前牙在三维方向的位移趋势

在唇舌方向上, 随转矩增加, 直接施加转矩的中切牙和侧切牙牙冠向舌侧的位移趋势逐渐减弱,

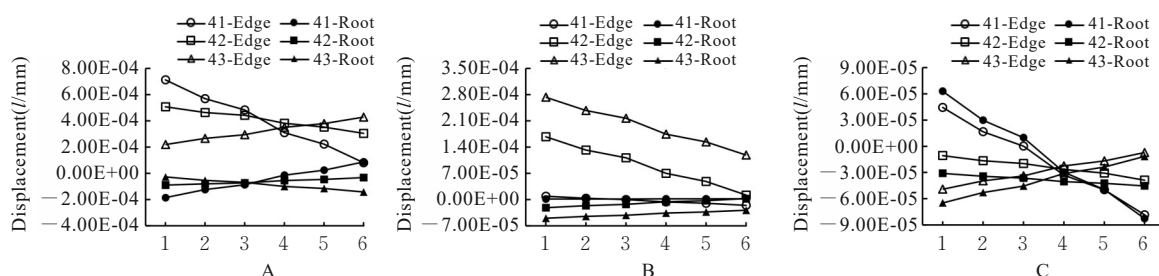
牙根向舌侧位移趋势逐渐增加, 主要表现为冠根位移差逐渐减小。尖牙则表现为牙冠舌向倾斜趋势逐渐增加。在垂直方向上中切牙和侧切牙压低趋势随

转矩增加逐渐明显,尖牙则表现为伸长趋势逐渐明显。见图4。

2.3 后牙在三维方向位移趋势

在颊舌方向上,第二前磨牙和第一磨牙随转矩增加牙冠向舌侧的位移趋势逐渐增加,第一前磨牙这种趋势最为明显,在工况1~6中由单纯冠向舌侧移动逐渐变为冠向舌侧根向颊侧的倾斜移动。第一磨牙近远中颊尖位移差值逐渐减小,牙冠从远中舌侧扭转趋势逐渐表现为牙冠整体向舌侧的移动。

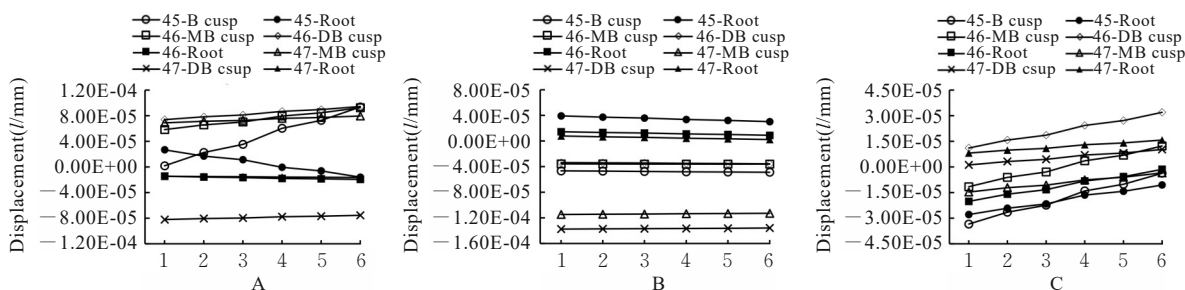
第二磨牙表现为冠近中舌向扭转伴整体舌向倾斜移动趋势,该趋势随转矩增加变化不明显。在近远中方向上,后牙均表现为冠近中、根远中的倾斜移动趋势,但各牙的牙冠位移变化量随转矩增加变化不明显,根部位移随转矩增加向远中的位移量有轻微减少。在垂直方向上,后牙的伸长趋势均随转矩增加逐渐增加,第二前磨牙表现为压低量逐渐减少,第一磨牙在工况4中由压低变为伸长趋势。第二磨牙在所有工况中均表现为伸长趋势。见图5。



1: Condition 1; 2: Condition 2; 3: Condition 3; 4: Condition 4; 5: Condition 5; 6: Condition 6. A: X-axis direction; B: Y-axis direction; C: Z-axis direction.

图4 前牙在三维方向的位移变化趋势

Fig. 4 Displacement change trends of anterior tooth in three dimensional directions



1: Condition 1; 2: Condition 2; 3: Condition 3; 4: Condition 4; 5: Condition 5; 6: Condition 6. A: X-axis direction; B: Y-axis direction; C: Z-axis direction. B cusp: Buccal cusp; MB cusp: Mesio Buccal cusp; DB cusp: Distobuccal cusp.

图5 后牙在三维方向的位移变化趋势

Fig. 5 Displacement change trends of posterior tooth in three dimensional directions

3 讨论

ISAACSON等^[15]研究显示:切牙转矩控制主要通过2种基本力学原理来实现,即力偶矩和力矩,其中,力偶矩是通过在牙齿上施加一对大小相等、方向相反的平行力来实现的,能够使牙齿围绕阻抗中心旋转,这种方式可在前牙托槽处实现最大的力偶矩,从而实现切牙的冠唇/根舌旋转。

在简单的双力偶系统中,当在其中一颗牙齿上施加转矩力时,力系统两侧(组)的牙齿均受到力偶的作用,力的方向相反。这可以在临床上用V型

曲的效应解释,V型曲在2个托槽间的位置影响两端托槽所受作用力及力偶矩的大小与方向,当V型曲位于两托槽间距中心时,两牙受到一对大小相等、方向相反的力偶矩,没有垂直向作用力^[16]。但V型曲位置改变时,其偏离程度越大,其在垂直向的力变化越明显。本研究在前牙上施加1个冠唇向转矩并将弓丝在前牙段入槽时,此时后部弓丝位于磨牙颊管的龈方,这就相当于形成了1个位置在侧切牙远中的V型曲,在仅有转矩作用的双力偶系统中,会使切牙受到伸长及冠唇向的作用力,而磨

牙受到压低力。这是由于在施加正转矩时, 前部弓丝有向前移动的趋势, 使牙弓长度增加, 切牙伸长。这种伸长力在V型曲的作用下, 在后牙产生了压低力。贾一凡等^[17]使用有限元方法分析了2×4矫治系统中前倾弯弓丝不同弯折位置对牙齿产生的生物力学影响, 结果显示: 当前倾弯弓丝弯折位置靠近侧切牙时, 第一磨牙垂直方向上表现为伸长趋势。

而在滑动内收系统中, 指向牙弓后部的内收力限制了弓丝向前的位移趋势, 前牙的移动趋势发生变化。邢斌等^[4]和解传亮等^[18]对滑动内收过程中前牙加载不同转矩进行有限元研究, 结果显示: 前牙唇倾压低的趋势随转矩增加逐渐增加, 与本研究结果一致。其机制可能是由于滑动内收过程中, 前牙受到的转矩力与内收力的共同影响, 限制了前牙向前的位移趋势, 牙齿旋转中心向根方移动, 牙根向舌侧移动趋势增加, 从而使牙齿产生压低效果。

本研究结果显示: 在殆龈方向上, 随着转矩角度逐渐加大, 后部牙齿的伸长趋势均逐渐增加。研究^[19]显示: 切牙的根舌向转矩单纯用磨牙做支抗会造成磨牙伸长, 如将前磨牙包括在内时, 这种伸长作用则会减弱。根据V型曲的力学原理, 当前牙发生了唇倾及压低运动时, 三维空间内后部牙主要受到垂直方向上的作用力, 表现为与前牙相反的伸长力。第二前磨牙和第一磨牙所处的牙弓位置, 不仅受到了这种伸长力的影响, 同时加在第二磨牙颊管上的内收力使第二磨牙向近中倾斜, 这种近中作用力使第二前磨牙和第一磨牙向拔牙间隙倾斜并压低, 第二前磨牙位于弓丝中部, 所受到的压低趋势更为明显。因此这2颗牙齿在垂直方向上呈现出的最终效果取决于前部转矩给予的反作用力大小以及内收产生的压低力。当前部转矩增大时, 对后部伸长作用逐渐增加, 第二前磨牙主要表现为压低, 但这种压低量随转矩增大逐渐减少, 而第一磨牙由于受到的压低趋势不如第二前磨牙明显, 当转矩增加到+6°时, 开始由压低变为伸长。

在本实验中, 第二磨牙主要表现为近中舌侧扭转伴不明显的伸长趋势, 这可能是由于内收力直接作用于第二磨牙, 但第二磨牙距离产生转矩力的切牙较远。研究^[20-21]表明: 转矩作用力会随着弓丝向远端的磨牙传递而逐渐衰减, 因此, 第二磨牙的变化主要来自内收力, 转矩作用对其影响不明显。

本实验结果表明: 在颊舌方向上, 第二前磨牙

和第一磨牙均有向舌侧倾斜移动的趋势, 且随着转矩增加逐渐明显。滑动内收过程中, 弓丝向后方移动, 较窄的前部弓丝要与较宽的后部牙弓相匹配, 会导致后牙段牙弓宽度的减少, 同时对磨牙牙冠有舌侧倾斜的作用^[22]。垂直向作用力的作用点位于磨牙颊管处, 在阻抗中心颊侧, 在磨牙上会形成1个使牙冠舌侧倾斜的趋势, 与前述的作用相结合, 使牙齿舌侧倾斜移动的趋势逐渐增加。

本实验结果表明: 在近远中方向上, 随转矩的增加各牙齿在矢状向的位移变化不明显, 这与既往研究^[3, 23]的结果一致, 即高转矩托槽并不会增加对磨牙支抗的消耗。

由于相邻牙齿的相互作用, 转矩产生的效果十分有限, 在1组包含多颗牙齿的直线片段弓系统中, 如果在第一颗牙齿上施加转矩力, 仅在第一颗和最后一颗牙齿上产生了大小相等、方向相反的转矩力, 中间段其他牙齿所受的净转矩为零。田军等^[24]使用Typodont水浴法研究发现同一牙弓中相邻牙齿的作用影响转矩的表达。

综上所述, 前牙转矩对牙弓中其他牙齿的影响效果极为复杂, 不仅受到作用力与反作用力的影响, 还受到相邻牙齿之间作用力的影响。在进行正畸治疗时, 当医师想要通过施加某种力对某颗牙齿进行移动时, 必须考虑到其带来的反作用力以及对相邻牙齿产生的作用效果^[25]。只有这样才能更准确地预测和控制牙齿的移动方向, 从而达到理想的矫治效果。

本实验中仅对作用力加载瞬间的牙齿位移趋势进行分析且未考虑弓丝与托槽的摩擦力及余隙角的影响。此外, 滑动内收的力学系统极为复杂, 一旦中间单个牙齿出现移动, 牙弓中的力学系统即刻发生改变, 新的作用力系统将使牙齿发生新一轮的移动。本实验针对前牙转矩这一变量进行研究, 结果显示: 不同的前牙转矩会对牙弓中其他牙齿产生不同的力学效果, 临床医生在实施滑动内收矫治内收前牙时, 需系统评估前牙施加的转矩对牙弓中其他牙齿产生的生物力学影响, 以实现精准的力学控制。

利益冲突声明:

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明:

杨雪桐和杨雨坤参与文献检索、实验设计及论文撰写, 马玲和张馨元参与数据分析及结果讨论, 侯建华参与论文写作指导和审校。

[参考文献]

- [1] 赵志河. 数字化正畸中前牙转矩设计的比较[J]. 国际口腔医学杂志, 2021, 48(1): 1-6.
- [2] 陈扬熙. 《口腔正畸学》: 基础、技术与临床[J]. 实用口腔医学杂志, 2016, 32(3): 324.
- [3] 陈双喜, 唐国华, 蒋雨楠, 等. 高转矩自锁托槽拔牙矫治上颌前突的效果评价[J]. 上海口腔医学, 2015, 24(6): 739-742.
- [4] 邢 斌, 汪钰程, 冯 枫, 等. 托槽转矩对上颌前牙整体内收影响的三维有限元分析[J]. 口腔医学, 2018, 38(5): 440-444.
- [5] ISAACSON R J, REBELLATO J. Two-couple orthodontic appliance systems: torquing Arches [J]. *Semin Orthod*, 1995, 1(1): 31-36.
- [6] ZALAUQUETT R, KARAM R, KADDAH F, et al. Effect of power arm length combined with additional anterior torque on the axial orientation of the maxillary incisors during en-masse retraction: a finite element analysis [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2024, 165(2): 220-231.
- [7] KANG F J, WU Y M, CUI Y C, et al. The displacement of teeth and stress distribution on periodontal ligament under different upper incisors proclination with clear aligner in cases of extraction: A finite element study[J]. *Prog Orthod*, 24(1): 38.
- [8] 小坂肇, 张晓东, 黄 统, 等. 平直弓丝矫治技术适合东方人的滑动机制矫治理论与临床[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014: 61.
- [9] 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.
- [10] WU J H, WANG X T, JIANG Y Y, et al. Effect of archwire plane and archwire size on anterior teeth movement in sliding mechanics in customized labial orthodontics: a 3D finite element study [J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 33.
- [11] 李海峰, 吴冀川, 刘建波, 等. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 368-377.
- [12] LIU Z, SUN T H, FAN Y B. Biomechanical influence of anchorages on orthodontic space closing mechanics by sliding method [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2020, 58(5): 1091-1097.
- [13] MCLAUGHLIN R P, BENNETT J C, TREVISI H J. 系统化正畸治疗技术[M]. 曾祥龙, 许天民, 译. 天津: 天津科技翻译出版公司, 2002: 258.
- [14] HARIKRISHNAN P, MAGESH V, AJAYAN A M, et al. Finite element analysis of torque induced orthodontic bracket slot deformation in various bracket-archwire contact assembly [J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 197: 105748.
- [15] ISAACSON R J, LINDAUER S J, RUBENSTEIN L K. Moments with the edgewise appliance - Incisor torque control [J]. *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 1993, 103(5): 428-438.
- [16] 林新平. 临床口腔正畸生物力学机制解析[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 40-41.
- [17] 贾一凡, 胡 敏. “2×4”矫治系统中前倾弯弓丝弯折位置变化对其力学行为影响的三维有限元分析[J]. 吉林大学学报(医学版), 2018, 44(6): 1249-1255.
- [18] 解传亮, 郭 杰. 滑动法和T型关闭曲法加载不同转矩内收上前牙的三维有限元对比分析[J]. 全科口腔医学电子杂志, 2018, 5(30): 12-13.
- [19] CREEKMORE T D, Thomas D. creekmore on torque [J]. *J Clin Orthod*, 1979, 13(5): 305-310.
- [20] 张 磊, 樊瑜波. 转矩作用对微植体矫治力系内收上前牙影响的三维有限元研究 [J]. 医用生物力学, 2007, 22(2): 151-155.
- [21] SCHRODY D W. A mechanical evaluation of buccal segment reaction to edgewise torque [J]. *Angle Orthod*, 1974, 44(2): 120-126.
- [22] ABOHABIB A, VIÑAS M J, USTRELL J M. Effect of orthodontic premolar extraction on maxillary teeth angulation and arch dimensions in adolescent patients: A 3-D digital model analysis [J]. *J Clin Exp Dent*, 2024, 16(2): e137-e144.
- [23] 徐宝华. 滑动直丝MBT矫治器与Roth矫治器对咬合关系及后牙支抗影响的比较研究 [J]. 口腔正畸学, 2003(2): 73-75.
- [24] 田 军, 柳忠豪, 张 丁, 等. 槽沟尺寸对转矩控制影响的实验研究 [J]. 华西口腔医学杂志, 2009, 27(6): 629-632.
- [25] BURSTONE CHARLES J. Charles J. Burstone, DDS, MS. Part 2: Biomechanics. Interview by Dr. Nanda [J]. *J Clin Orthod*, 2007, 41(3): 139-147.