

# 减阻牵张成骨远移尖牙的三维有限元分析

舒林径<sup>1</sup>, 薛俊杰<sup>2,3</sup>, 王璟<sup>4</sup>, 徐远志<sup>4</sup>, 王飞宇<sup>1</sup>, 唐小山<sup>4</sup> (<sup>1</sup>四川大学华西口腔医学院, 四川省成都市 610041; <sup>2</sup>口腔疾病研究国家重点实验室, 四川大学华西口腔医院正畸科, 四川省成都市 610041; <sup>3</sup>新疆医科大学第一附属医院口腔正畸科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000; <sup>4</sup>同济大学附属第十人民医院口腔科, 上海市 200072)

## 文章亮点:

实验通过 64 排螺旋 CT 收集数据与多种软件相结合, 成功模拟常规状态下及牙周膜减阻牵张成骨后及牙槽骨减阻牵张成骨后移动尖牙 3 种方式下建立的三维有限元模型, 创新性地引入三维有限元方法对它们进行量化分析。结果证实牙槽骨和牙周膜减阻牵张成骨均能有效减小牙移动阻力, 增加尖牙瞬时位移, 且去除尖牙远中骨质效果更为显著。

## 关键词:

组织构建; 组织工程; 牵张成骨; 牙齿移动; 三维有限元法; 错牙畸形; 尖牙; 牙槽间隔减阻; 生物力学; 正畸治疗; 应力分析; 数字化口腔技术; 新疆维吾尔自治区自然科学基金

## 主题词:

错牙合; 牙周膜; 有限元分析

## 基金资助:

新疆维吾尔自治区自然科学基金青年基金项目支持(2011211B35)

## 摘要

**背景:** 牙周膜牵张成骨通过力作用于牙周膜, 带动牙齿移动; 牙槽骨牵张成骨是通过整个骨盘的位移, 达到牙齿移动的效果。

**目的:** 建立基于健康成人的、3 种不同状态下的上下颌三维有限元模型, 采用三维有限元方法对比研究 3 种模型在力的加载下应力分布和瞬时位移情况。

**方法:** 模型 1 通过多种软件结合建立常规状态下、模型 2 建立牙周膜减阻牵张成骨后、模型 3 建立牙槽骨减阻牵张成骨后移动尖牙的三维有限元模型, 分别模拟力的加载。

**结果与结论:** 3 种模型的最大瞬时位移均发生在尖牙近中牙冠上 1/3 处, 其值模型 2 > 模型 3 > 模型 1; 最大等效应力均位于上颌尖牙远中侧牙槽槽处, 其值模型 2 < 模型 1 < 模型 3。说明牙槽骨和牙周膜减阻牵张成骨均能有效减小牙移动阻力, 增加尖牙瞬时位移, 且去除尖牙远中骨质效果更为显著。两种方法成功避免了支抗丧失, 但尖牙存在远中倾斜趋势, 临床工作中应采取相应措施加以控制。

舒林径, 薛俊杰, 王璟, 徐远志, 王飞宇, 唐小山. 减阻牵张成骨远移尖牙的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(11):1749-1754.

## Three-dimensional finite element analysis of canine distalization through reducing resistance and distraction osteogenesis

Shu Lin-jing<sup>1</sup>, Xue Jun-jie<sup>2,3</sup>, Wang Jing<sup>4</sup>, Xu Yuan-zhi<sup>4</sup>, Wang Fei-yu<sup>1</sup>, Tang Xiao-shan<sup>4</sup> (<sup>1</sup>West China College of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China; <sup>2</sup>Department of Orthodontics, State Key Laboratory of Oral Disease, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China; <sup>3</sup>Department of Orthodontics, First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China; <sup>4</sup>Department of Stomatology, Shanghai Tenth People's Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 200072, China)

## Abstract

**BACKGROUND:** Periodontal membrane distraction osteogenesis exerts the functions at periodontal membrane and leads to tooth movement. Alveolar bone distraction osteogenesis produces tooth movement through the displacement of the whole bone plate.

**OBJECTIVE:** To establish three-dimensional finite element model of upper and lower jaw of healthy adults under three different conditions, and to compare the stress distribution and distal movement of the models using three-dimensional finite element analysis method.

**METHODS:** Model 1: three-dimensional finite element model of the canine under normal conditions using a variety of software; Model 2: three-dimensional finite element model of the canine after distracting osteogenesis of the periodontal ligament; Model 3, three-dimensional finite element model of the canine after reducing resistance and distracting osteogenesis of the alveolar bone. The force loadings were stimulated among these models.

舒林径, 女, 1992 年生, 重庆人, 汉族, 四川大学华西口腔医学院在读硕士, 主要从事口腔正畸及口腔种植的生物力学研究。

通讯作者: 薛俊杰, 在读博士, 主治医师, 口腔疾病研究国家重点实验室, 四川大学华西口腔医院正畸科, 四川省成都市 610041; 新疆医科大学第一附属医院口腔正畸科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830000

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.

2014.11.018

[http://www.crter.org]

中图分类号:R318

文献标识码:A

文章编号:2095-4344

(2014)11-01749-06

稿件接受: 2014-01-12

Shu Lin-jing, Studying for master's degree, West China College of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China

Corresponding author: Xue Jun-jie, Studying for doctorate, Attending physician, Department of Orthodontics, State Key Laboratory of Oral Disease, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610041, Sichuan Province, China; Department of Orthodontics, First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Accepted: 2014-01-12

**RESULTS AND CONCLUSION:** The biggest displacements on those three models occurred in canine crown on 1/3, and the displacement quantity on canine was model 2 > model 3 > model 1. The biggest equivalent stress concentrated in distal alveolar crest, and the equivalent stress was model 2 < model 1 < model 3. In the process of canine distal movement, reducing bone resistance and distracting osteogenesis, especially distal alveolar crest of canine, can accelerate the tooth moving speed effectively. And the two ways successfully avoid the loss of anchorage. We should notice that the canine has distal motion tendency under the action of force, appropriate measures should be taken to control it in clinical work.

**Subject headings:** malocclusion; periodontal ligament; finite element analysis

**Funding:** the Natural Science Foundation for the Youth of Xinjiang Uygur Autonomous Region, No. 2011211B35

Shu LJ, Xue JJ, Wang J, Xu YZ, Wang FY, Tang XS. Three-dimensional finite element analysis of canine distalization through reducing resistance and distraction osteogenesis. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2014;18(11):1749-1754.

## 0 引言 Introduction

错颌畸形对广大患者的身心健康存在巨大危害, 以往的研究表明, 常规正畸牙齿移动速率约为1 mm/月<sup>[1]</sup>, 拔牙矫治患者仅尖牙后移即需6-8个月, 整个错颌畸形治疗时间长达2年左右。如果在拉尖牙向远中移动的过程中, 支抗磨牙受到反作用力出现向前移动, 则称为出现了“支抗丧失”现象。如何加快正畸牙齿移动速度, 同时减少支抗丧失成为众多学者关注的焦点。

1998年, “牙周膜牵张成骨”的概念首次由Liou等<sup>[2]</sup>提出, 他认为牙周膜可以看作是牙槽骨和牙齿间的“缝隙”, 受矫治力作用的张力侧牙周膜因牵张而出现牙槽骨沉积现象。在临床试验中, 他首先拔除患者第1前磨牙, 为了减小尖牙远中移动的阻力, 去除了尖牙远中的部分间隔骨, 设计固位于牙齿的牵张装置, 尖牙21 d内向拔牙窝移动的均值为6.5 mm, 速度达到了0.5-1.0 mm/d, 支抗未出现明显丧失。同时临床上未见明显的牙根吸收、牙髓坏死等不良反应。

Allgayer等<sup>[3]</sup>对应用此方法的1例患者进行了2年的临床随访, 结果显示美学效果和咬合稳定性俱佳。娄新田<sup>[4]</sup>, 陈曦<sup>[5-8]</sup>, 王爽等<sup>[9-11]</sup>在Liou研究的基础上建立了牙周膜牵张成骨牙齿快速移动的动物实验模型, 并通过组织学观察手段佐证了牙周膜牵张成骨的有效性和安全性<sup>[12]</sup>。

2002年Kişnişci等<sup>[13]</sup>根据Liou的实验基础提出了牙槽骨减阻牵张成骨技术。该技术借鉴了输送盘的概念, 首先拔除第1前磨牙, 然后去除其颊侧骨板(舌侧骨板不去除)。于尖牙牙根颊侧垂直切牙骨皮质, 于舌侧松解骨松质, 形成可移动的包含尖牙及颊侧骨皮质的骨块。牵引此骨块, 尖牙动度可达5.6 mm/周, 而磨牙作为支抗, 前移和伸长不明显。牙周膜牵张成骨通过力作用于牙周膜, 带动牙齿移动; 牙槽骨减阻牵张成骨技术是通过整个骨盘的位移, 在骨盘的牵张部位形成新骨, 达到牙齿移动的效果。

Kurt等<sup>[14]</sup>、Kharkar等<sup>[15]</sup>、Iseri等<sup>[16]</sup>通过临床研究证实牙槽骨减阻牵张成骨技术可以显著减少正畸治疗时间, 对牙周组织未见不良影响, 且不需要其他方式加强支抗, 是一种高效、可行的方式。

临床中为了最恰当地使用正畸力, 避免不需要甚至有害力的干扰, 保证正畸治疗快速、准确完成, 必须对牙齿

移动的生物力学和生物学进行全面的了解。为了深入了解这两种方式的生物力学特性, 文章引入了三维有限元分析法对其进行分析。有限元分析法原理是将无限维空间转化到有限维空间, 把连续系统转化为离散型结构, 即通过将连续的具有弹性的物体视为若干个力学单元, 用所分割的所有单元的整体代替原物体, 依次剖析各个单元的性质, 以此了解整个弹性体的力学特性的数值方法。它具有快速易行、安全无创的特点, 并且可反复使用同一模型进行各种加载状况的计算, 保证了模型的完全相似。此种方法不仅可以准确研究各种材料的性质和形态轮廓, 还可以客观详细地了解到不同加载方式和复杂的支持条件下牙齿及牙周的应力分布情况, 近年在口腔生物力学研究中发挥了重要作用<sup>[17-24]</sup>。

这两种方式在试验中均明显提高了尖牙移动速度<sup>[6,7,14,25-30]</sup>, 为解决疗程较长这一临床难题提供了一条新的思路。实验于牙周膜牵张成骨和牙槽骨减阻牵张成骨作用状态下, 首次揭示上颌牙受单侧力加载时移动的生物力学特征, 避免不需要甚至有害力的干扰, 文章借助先进的口腔影像学技术和大型通用有限元分析软件, 建立了3种条件下移动尖牙的理想三维有限元模型, 利用其分析不同条件下尖牙过程中尖牙及其牙周组织的生物力学行为, 为临床工作的充分发挥提供可靠的依据。

## 1 材料和方法 Materials and methods

**设计:** 建立上下颌三维有限元模型。

**时间及地点:** 实验于2009年12月至2014年8月在新疆医科大学第一附属医院完成。

**设备及软件:**

美国通用公司GE light speed VCT 64排螺旋CT机

联想笔记本电脑(Intel p4 2.0 G CPU, 2 G内存, Windows XP系统)

Dell图形工作站(Interl p4 2.8 G CPU, 4 G内存, Windows 2000系统)

Mimics10.01软件(Materialise, Belgium)

Geomagic Studio 8.0软件(Raindrop Geomagic, USA)

Unigraphics NX 6.0软件

Ansys11.0 软件

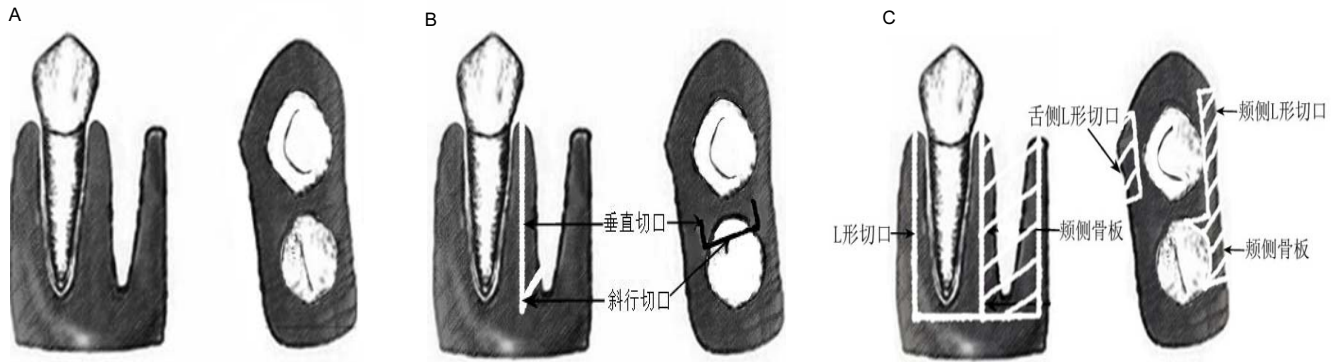


图1 模拟常规状态、牙周膜减阻牵张成骨及牙槽骨减阻牵张成骨远移尖牙

Figure 1 Canine distalization under different models

图注: A 为模拟常规状态下远移尖牙; B 为模拟牙周膜减阻牵张成骨快速移动尖牙; C 为模拟牙槽骨减阻牵张成骨快速移动尖牙。

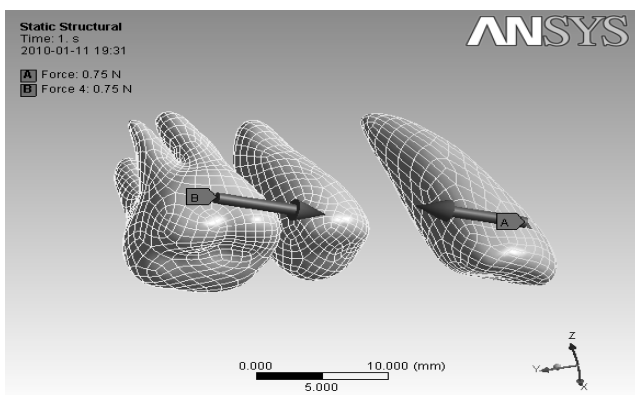


图2 模型1的第1磨牙和尖牙的颊侧施加向近远中方向上的力

Figure 2 Forces on the first molar and canine teeth in model 1

图注: 图中力值的加载为0.75 N, 时长为1 s。

模拟常规状态、牙周膜减阻牵张成骨及牙槽骨减阻牵张成骨远移尖牙:

模型1: 模拟常规状态下远移尖牙(图1A);

模型2: 模拟牙周膜减阻牵张成骨快速移动尖牙(图1B);

模型3: 模拟牙槽骨减阻牵张成骨快速移动尖牙(图1C)。

**对象:** 成年男性志愿者1例, 受试者对实验方法及目的知情同意, 实验方案得到医院批准。

**纳入标准:** ①安氏 I 类磨牙关系, 无正畸治疗史。②牙弓形态良好, 无牙体缺损。③牙周组织健康。

**排除标准:** 颞下颌关节疾病。

**方法:**

**CT扫描:** 使用GE light speed VCT 64排螺旋CT, 对志愿者进行头颅CT断层扫描。患者呈仰卧位, 全身放松, 头架固定头颅位置, 扫描平面平行于地平面, 从眼眶下缘最低点至颈部下缘最低点不间断扫描, 共获得196层影像, 每层厚度 500 μm, 将 DICOM (Digital imaging and Communications in Medicine) 数据导出。

**建立3D模型:** 利用模块化结构软件(Materialise's interactive medical image control system, Mimics)提取颌面部形态的图像后, 通过阈值设定, 区分颌面部骨骼、牙

表1 牙齿材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the dental materials

信息	模型 1	模型 2	模型 3
节点数	82 138	83 577	83 149
单元数	42 966	43 477	43 427

表注: 本实验所涉及的材料假定为均质、连续、各向同性的线弹性材料。

表2 模拟常规状态、牙周膜减阻牵张成骨及牙槽骨减阻牵张成骨远移尖牙三维有限元模型网格划分信息

Table 2 Net division in three-dimensional finite element models under different models

材料	弹性模量(kg/mm <sup>2</sup> )	泊松比
牙齿	1.86×10 <sup>3</sup>	0.31
皮质骨	2.37×10 <sup>3</sup>	0.30
松质骨	8.00×10 <sup>2</sup>	0.30
牙周膜	7.03×10 <sup>2</sup>	0.45

表注: 模型1为模拟常规状态下远移尖牙; 模型2为模拟牙周膜减阻牵张成骨快速移动尖牙; 模型3为模拟牙槽骨减阻牵张成骨快速移动尖牙。

齿和牙周组织。将3部分的3D实体以多面体形式分别再塑造。转为STL格式, 应用逆向工程和三维检测软件(Geomagic Studio 8.0)修整、优化3D模型。将STP格式模型导入三维CAD设计软件Unigraphics NX中<sup>[31-32]</sup>。

**三维有限元模型的建立:** 应用Ansys软件分别划分3种三维几何模型单元。假设本研究所涉及的材料均为线弹性体, 材料内部均质、连续、各向同性。其泊松比、弹性模量均选自有关文献<sup>[33-36]</sup>(表1)。所建模型具有良好的几何相似性和力学相似性, 可任意旋转或者加减组件, 进行约束和加载分析。

**力的加载:** 在模型1的第1磨牙和尖牙的颊侧临床冠中心施加向近远中方向上的力, 力值的加载为0.75 N, 时长为1 s(图2)。模型2、3力的加载同模型1。

**主要观察指标:** ①不同工况下等效应力比较。②不同工况下瞬时位移比较。③不同工况下最大主应力比较。④不同工况下剪切应力比较。

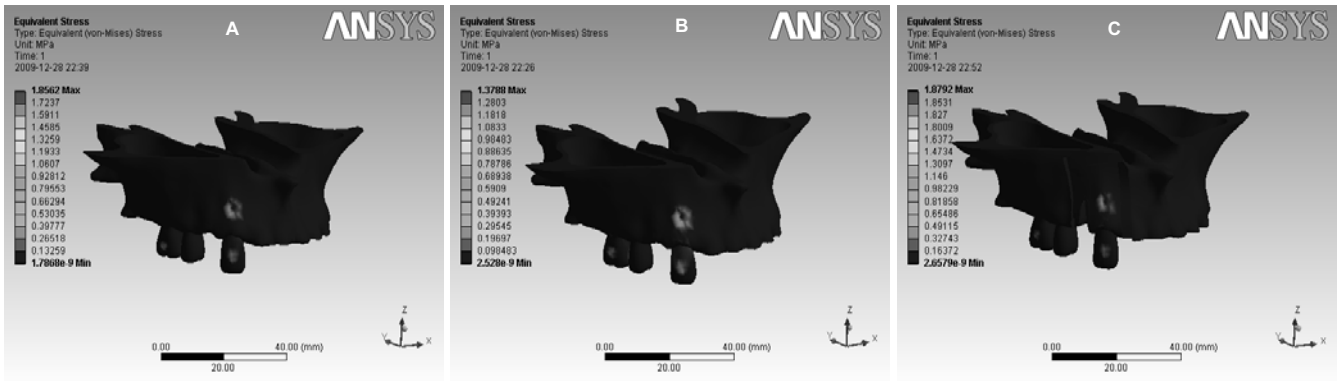


图3 常规状态、牙周膜减阻牵张成骨及牙槽骨减阻牵张成骨远移尖牙状态下的等效应力分布情况

Figure 3 Equivalent stress distribution of canine distalization under different models

图注: 图中 A 为模型 1 模拟常规状态下远移尖牙等效应力分布情况; B 为模型 2 模拟牙周膜减阻牵张成骨快速移动尖牙等效应力分布情况; C 为模型 3 模拟牙槽骨减阻牵张成骨快速移动尖牙等效应力分布情况。最大等效应力集中区都位于上颌尖牙远中侧牙槽嵴处。

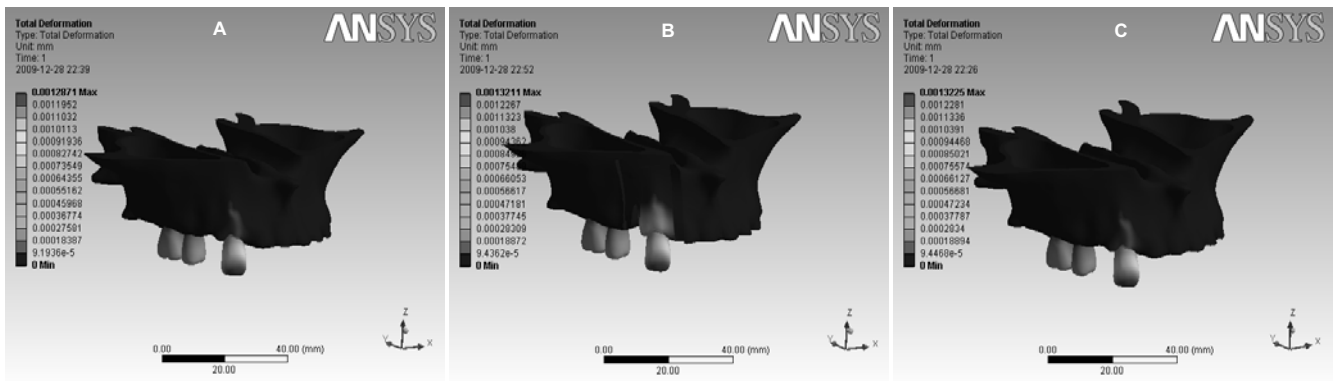


图4 常规状态、牙周膜减阻牵张成骨及牙槽骨减阻牵张成骨远移尖牙状态下的瞬时位移分布情况

Figure 4 Canine displacement distribution under different models

图注: 图中 A 为模型 1 模拟常规状态下远移尖牙瞬时位移分布情况; B 为模型 2 模拟牙周膜减阻牵张成骨快速移动尖牙瞬时位移分布情况; C 为模型 3 模拟牙槽骨减阻牵张成骨快速移动尖牙瞬时位移分布情况。瞬时位移从尖牙牙冠到根尖逐渐减小。

## 2 结果 Results

2.1 三维有限元模型网格划分信息 模型1、模型2、模型3三维有限元模型网格划分信息(表2)。

2.2 不同工况下等效应力比较 等效应力反映材料内部各点的综合应力情况, 是压应力、拉应力、剪应力在三围坐标上的不同分量, 用数学方法综合为1个独立的一维标量(图3)。3种模型在力的加载后, 最大等效应力集中区都位于上颌尖牙远中侧牙槽嵴处。最大等效应力在模型1为1.856 2 MPa, 在模型2为1.378 8 MPa, 在模型3为1.879 2 MPa。

2.3 不同工况下瞬时位移比较 初始应力下(图4), 3种模型中尖牙最大瞬时位移处都位于近中牙冠的切1/3处, 尖牙在模型1的最大瞬时位移为 $1.287 1 \times 10^{-3}$  mm; 在模型2中最大瞬时位移为 $1.322 5 \times 10^{-3}$  mm; 在模型3中最大瞬时位移为 $1.321 1 \times 10^{-3}$  mm。瞬时位移从尖牙牙冠到根尖逐渐减小。3种模型第1磨牙牙根均无可见瞬时位移。

2.4 不同工况下最大主应力比较 最大主应力反映材料内部各点的最大可拉伸应力。模型1最大主应力位于第1磨牙颊面中1/3处, 为0.477 9 MPa; 模型2部位与模型1相同,

为0.482 9 MPa; 模型3位于第1磨牙颊面中1/3和尖牙颊面中1/3处, 为0.510 6 MPa。

2.5 不同工况下剪切应力比较 应力相切于截面的分量为剪切应力。不同工况下剪切应力最大值均位于尖牙远中牙槽嵴处。模型1最大剪切应力为1.007 4 MPa, 模型2为0.751 7 MPa, 模型3为1.006 7 MPa。

## 3 讨论 Discussion

实验中在力的加载下, 3种模型尖牙的最大等效应力和剪切应力集中区都在尖牙远中牙槽嵴处, 此处产生牙槽骨的吸收、沉积、改建, 从而产生远中移位。尖牙的最大时位移量模型2 > 模型3 > 模型1, 提示牙周膜牵张成骨与槽骨减阻牵张成骨的方法在相同的大小、相同作用时间的力作用下, 尖牙移动量大于传统方法, 且牙周膜牵张成骨速度更佳, 这可能与两种术式去骨的部位和量不同有关<sup>[37]</sup>。这与马文盛等<sup>[38]</sup>的研究结果相一致, 他对比发现牙周膜牵张成骨与牙槽骨减阻牵张成骨的移动距离明显大于拔牙固定矫治, 加力第2周, 牙周膜牵张成骨移动距离大于牙槽骨减阻牵张成骨。

传统的正畸牙移动是通过机械力刺激牙周组织, 从而产生生物学反应。正畸力作用刺激牙齿受牵张处(即张力侧)沉积新生骨, 受压处(即压力侧)破骨细胞吸收陈骨, 牙周组织通过改建使得牙齿出现移动。研究表明, 当牙齿受到较大的力后会在压力侧牙槽骨产生透明性变<sup>[39]</sup>, 使牙齿移动停滞, 而人类的透明性变期通常持续两三周。当透明性变的骨组织未被完全吸收时, 牙齿无法产生移动, 这一现象无疑严重地限制了牙齿的移动速度。减阻牵张的方法同时解决了压力侧和张力侧的问题, 压力侧应用使牙齿和压力侧的牙槽骨一起移动的方法, 而张力侧的骨形成主要是靠牙周膜所受的张力, 使牙齿快速移动成为可能。

临床研究和动物实验中均发现尖牙在远中移动过程中存在远中倾斜的趋势<sup>[2,25-26,38]</sup>, Liou等<sup>[2]</sup>报道对受试者尖牙进行牙周膜牵张成骨后形成约17°的远中倾斜。Sayin等<sup>[26]</sup>报道牙周膜牵张成骨远移尖牙后, 尖牙呈11.47°远中倾斜。Sukurica等<sup>[25]</sup>报道尖牙倾斜为9.1°。马文盛<sup>[38]</sup>报道牙槽骨减阻牵张成骨方式远移尖牙, 尖牙倾斜仅为3.97°, 这可能因为相较于其他方式, 牙槽骨减阻牵张成骨增加了包含移动牙的骨盘的动度, 减小了其移动阻力。

实验也发现尖牙具有远中倾斜趋势。模型2和模型3云图显示最大瞬时位移量从尖牙牙冠到根尖逐渐减少, 最大等效应力集中区都在在尖牙远中牙槽嵴处, 提示尖牙受力初牙冠远中移动量更大。从应力的分布发现在尖牙牙颈部牙槽骨存在应力集中区, 易产生较大的应力值。Liou<sup>[2]</sup>和Sayin<sup>[26]</sup>一致认为应该保留一定程度的倾斜移动。适当的倾斜移动可以防止机械力对根尖处的神经和血管的过分牵拉刺激, 从而有利于减少对牙髓的刺激。在临床使用中可通过调整连接杆的高度使尽可能接近移动牙的阻力中心, 充分去除牙槽间隔的阻力减少尖牙因为支点的存在而倾斜, 从而达到适量减少远中倾斜的目的。

支抗可理解为“正畸过程中, 牙齿为抵抗受力后的移动而产生的大小相等, 方向相反反作用力”<sup>[40]</sup>。支抗磨牙在远移尖牙过程中容易前移, 这是临床中应该尽可能避免的情况。实验未发现支抗牙发生明显移位, 这与Kumar等<sup>[27]</sup>、马文盛<sup>[38]</sup>、刘燕等<sup>[41]</sup>的研究结果相一致。支抗的控制对正畸矫治效果起着决定性作用, 这两种术式可有效节约支抗。一般认为, 支抗的丢失是由于支抗牙受到超过迟滞期(约3周)的持续力量<sup>[2]</sup>。因此理论而言, 在支抗单位移动前完成移动牙的后退移动可有效避免支抗丧失。这两种术式在支抗控制上的优势, 使得它特别适合于前牙重度拥挤、上牙槽严重前突等需要大支抗的患者。

综上所述, 牙周膜牵张成骨和牙槽骨减阻牵张成骨技术可以大幅提高牙移动速度, 并有效的节约支抗, 在短期内未观察到严重副作用, 是两种有效的快速牙移动方式。牙周膜减阻可在拔牙同期进行, 创伤相对较小, 耗时短。

牙槽骨减阻需两次手术, 在二次手术时进行牙龈翻瓣, 创伤相对较大, 耗时相对较长。

此研究仍存在一定局限性。三维有限元进行牙移动的分析仍为理想化模型, 考虑的是瞬时作用力使单颗牙齿移动的情况, 假设模型中各材料和组织均为各向同性线弹性材料, 与临床实际情况存在一定差异。在实际治疗中, 力的加载是一个连续的过程, 且涉及多颗牙齿的移动, 在其过程中不仅会有牙齿之间的相互作用, 牙周膜状态不同, 还会涉及血管、骨重建等过程。为使得三维有限元法能更好地模拟生物状况, 得出更为准确的数据, 还有待进一步研究。

**作者贡献:** 设计、实施、评估为本文作者, 均受过专业培训。

**利益冲突:** 文章及内容不涉及相关利益冲突。

**伦理要求:** 参与实验的个体为自愿参加, 对实验方法及目的知情同意, 实验方案得到医院批准。

**学术术语:** 支抗-正畸矫治过程中, 任何施于施治牙使其移动的力必然同时产生一个方向相反、大小相同的力, 而支持这种移动矫正牙体引起的反作用力的情况称作“支抗”。

**作者声明:** 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

#### 4 参考文献 References

- [1] H?slar R, Schmid G, Ingervall B, et al. A clinical comparison of the rate of maxillary canine retraction into healed and recent extraction sites-a pilot study. *Eur J Orthod.* 1997;19(6): 711-719.
- [2] Liou EJ, Huang CS. Rapid canine retraction through distraction of the periodontal ligament. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1998;114(4):372-82.
- [3] Allgayer S, Rosenbach G, Tavares CA, et al. Periodontal ligament distraction: esthetics and occlusal stability at the 2-year follow-up. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013; 143:535-546.
- [4] 姜新田, 房兵, 沈国芳, 等. 牵张成骨区牙移动动物模型的建立[J]. *上海口腔医学* 2011, 20(1): 21-25.
- [5] 陈曦, 周洪, 王静. 牙周膜牵张成骨正畸牙快速移动规律与牙龈组织变化的光镜观察[J]. *西安交通大学学报: 医学版*, 2002, 23(5): 496-498.
- [6] 陈曦, 林珠, 张晓东. 减阻牵张正畸牙移动过程中牙周组织超微结构的变化[J]. *牙体牙髓牙周学杂志*, 2004, 14(11): 615-617.
- [7] 陈曦, 林珠, 张晓东, 等. 减阻牵张矫治法正畸牙快速移动牙周组织改建的研究[J]. *第四军医大学学报*, 2005; 26(8): 685-687.
- [8] 陈曦, 杜红梅, 韩冰. 牙周膜牵张成骨快速牙移动动物模型的建立[J]. *西安交通大学学报: 医学版*, 2004, 25(5): 449-452.
- [9] 王爽, 叶湘玉, 周洪, 等. 牙周膜牵张正畸过程中牙根吸收的研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2003, 38(3): 202.
- [10] 王爽, 叶湘玉, 周洪, 等. 犬牙周膜牵张成骨正畸牙移动中牵张侧的组织学变化[J]. *上海口腔医学*, 2004, 13(4): 312-314.
- [11] 祁涛, 卢嘉静, 葛振林, 等. 减阻牵张快速牙齿移动的组织学变化[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2010, 14(50): 9370-9373.
- [12] Lv T, Kang N, Wang C, et al. Biologic response of rapid tooth movement with periodontal ligament distraction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009; 136: 401-411.

- [13] Kisinisci RS, Iseri H, Tuz HH, et al. Dentoalveolar distraction osteogenesis for rapid orthodontic canine retraction. *J Oral Maxillofac Surg.* 2002;60:389-394.
- [14] Kurt G, Iseri H, Kisinisci R. Rapid tooth movement and orthodontic treatment using dentoalveolar distraction (DAD). Long-term (5 years) follow-up of a Class II case. *Angle Orthod.* 2010;80:597-606.
- [15] Kharkar VR, Kotrashetti SM. Transport dentoalveolar distraction osteogenesis-assisted rapid orthodontic canine retraction. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;109:687-693.
- [16] Iseri H, Kisinisci R, Bzizi N, et al. Rapid canine retraction and orthodontic treatment with dentoalveolar distraction osteogenesis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005;127:533-541; quiz 625.
- [17] 赵广敏, 陈奎孚, 李岩峰. 正畸方丝弓与多曲方丝弓简单受力的有限元对比研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2009, 26: 1126-1129.
- [18] Liang W, Rong Q, Lin J, et al. Torque control of the maxillary incisors in lingual and labial orthodontics: a 3-dimensional finite element analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;135:316-322.
- [19] Yan X, He W, Lin T, et al. Three-dimensional finite element analysis of the craniomaxillary complex during maxillary protraction with bone anchorage vs conventional dental anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2013;143:197-205.
- [20] da Silva BR, Moreira Neto JJ, da Silva FI Jr, et al. Three-dimensional finite element analysis of the maxillary central incisor in two different situations of traumatic impact. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2013;16:158-164.
- [21] Fatalla AA, Song K, Du T, et al. A three-dimensional finite element analysis for overdenture attachments supported by teeth and/or mini dental implants. *J Prosthodont* 2012;21:604-613.
- [22] Dalkiz M, Zor M, Aykul H, et al. The three-dimensional finite element analysis of fixed bridge restoration supported by the combination of teeth and osseointegrated implants. *Implant Dent.* 2002;11:293-300.
- [23] Ammar HH, Ngan P, Crout RJ, et al. Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011;139:e59-71.
- [24] Li P, Mao J, Peng Z. Three-dimensional finite element analysis of the mechanical stress on root from orthodontic tooth movement by sliding mechanics. *J Huazhong Univ Sci Technolog Med Sci.* 2007;27:745-747.
- [25] Sukurica Y, Karaman A, Gurel, H.G. et al. Rapid canine distalization through segmental alveolar distraction osteogenesis. *Angle Orthod* 77, 226-36 (2007).
- [26] Sayin S, Bengi AO, Gurton AU, et al. Rapid canine distalization using distraction of the periodontal ligament: a preliminary clinical validation of the original technique. *Angle Orthod.* 2004;74:304-315.
- [27] Kumar KV, Umashankar K, Kumar DP. Evaluation of canine retraction through distraction of the periodontal ligament: a clinical study. *J Contemp Dent Pract.* 2012;13:799-805.
- [28] Prabhat KC, Maheshwari S, Gupta ND, et al. Periodontal ligament distraction: A simplified approach for rapid canine retraction. *J Indian Soc Periodontol.* 2012;16:123-125.
- [29] Wilmes B, Drescher D. Vertical periodontal ligament distraction—a new method for aligning ankylosed and displaced canines. *J Orofac Orthop.* 2009;70:213-223.
- [30] Long H, Pyakurel U, Wang Y, et al. Interventions for accelerating orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod.* 2013;83:164-171.
- [31] 赵峰, 高勃, 刘震侠. Dieom标准和Mimics软件辅助建立下颌骨三维有限元模型[J]. *西南国防医药*, 2005, 15(5):479-481.
- [32] Gross MD, Arbel G, Hershkovitz I. Three-dimensional finite element analysis of the facial skeleton on simulated occlusal loading. *J Oral Rehabil.* 2001;28:684-694.
- [33] Wagner A, Krach W, Schicho K, et al. A 3-dimensional finite-element analysis investigating the biomechanical behavior of the mandible and plate osteosynthesis in cases of fractures of the condylar process. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002;94:678-686.
- [34] Katada H, Arakawa T, Ichimura K, et al. Stress distribution in mandible and temporomandibular joint by mandibular distraction: a 3-dimensional finite-element analysis. *Bull Tokyo Dent Coll.* 2009;50:161-168.
- [35] 周学军, 赵志河, 赵美英. 下颌骨三维有限元模型的边界约束设计[J]. *华西口腔医学杂志*, 1999, 17(1):29-32.
- [36] 白石柱, 李涤尘, 赵敏民, 等. 多层螺旋CT在建立上颌骨三维有限元模型中的应用[J]. *中国临床康复*, 2006, 10(41):90-92.
- [37] 赵玺, 薛俊杰, 米从波. 减阻牵张成骨术快速移动尖牙的三维有限元分析[J]. *中华医学美学美容杂志*, 2012, 18(4):294-297.
- [38] 马文盛. 牵张成骨快速正畸牙齿移动的实验与应用研究[D]. 石家庄市: 河北医科大学. 2009.
- [39] 傅民魁. 口腔正畸专科教程[M]. 北京: 人民卫生出版社出版, 2007:124.
- [40] 徐芸译. 口腔正畸学-现代原理与技术[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司出版, 1996:175.
- [41] 刘燕, 丁寅, 张明, 等. 犬牙槽骨牵张成骨快速移动牙齿的实验研究[J]. *口腔医学研究*, 2007, 23(2):151-153.