

牙颌面畸形专题

替牙期无托槽隐形矫治器扩弓治疗改良设计的有限元分析

吕秦毅, 高子琦, 冯青辰, 梅宏翔, 李娟

四川大学华西口腔医院正畸科, 口腔疾病研究国家重点实验室, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 成都 610041

[摘要] **目的**·借助有限元分析揭示无托槽隐形矫治器用于替牙期扩弓治疗时单颗牙位移方向、效率及力学荷载, 并针对扩弓效率不足以及后牙颊倾等问题, 设计扩弓过矫治和转矩补偿体系。**方法**·纳入替牙期志愿者1名, 构建其颅上颌复合体三维模型以及隐形矫治体系, 模拟无托槽隐形矫治器对上颌乳尖牙到第一恒磨牙施加颊向位移(工况1~4: 分别为0.200、0.275、0.300、0.325 mm), 同时施加颊向位移和根颊向转矩(工况1: 颊向位移载荷0.200 mm, 根颊向转矩0°; 工况5: 颊向位移载荷0.275 mm, 根颊向转矩1.0°; 工况6: 颊向位移载荷0.300 mm, 根颊向转矩1.3°; 工况7: 颊向位移载荷0.325 mm, 根颊向转矩1.8°)。通过有限元分析, 计算牙齿位移以及牙周膜的等效应力分布。**结果**·无托槽隐形矫治器扩弓治疗在替牙期主要表现为牙齿颊倾的牙性扩弓效应, 且不同牙位的扩弓效率不同。在设定每侧0.200 mm的扩弓量时, 上颌第一恒磨牙扩弓效率为51.86%, 上颌第二乳磨牙为68.76%, 上颌第一乳磨牙为73.48%, 上颌乳尖牙为84.17%。通过设计扩弓过矫治(0.275、0.300、0.325 mm), 能够有效提高扩弓效果。当扩弓过矫治量达到150%(0.300 mm)时, 上颌第一恒磨牙、第二乳磨牙、第一乳磨牙和乳尖牙处扩弓效率分别提升为75.16%、99.96%、107.35%和122.37%; 上颌第二乳磨牙、第一乳磨牙、乳尖牙处扩弓效率均接近100.00%。过矫治设计会加剧扩弓的牙性效应, 使牙齿颊侧倾斜移动趋势加大, 导致牙齿颊倾、腭尖下垂, 上颌第一恒磨牙、第二乳磨牙、第一乳磨牙、乳尖牙的冠根位移差在扩弓过矫治量达到150%时, 分别为-0.109、-0.134、-0.132、-0.298 mm。对不同牙位施加对应转矩补偿, 可以对抗后牙颊倾。在扩弓过矫治量达到150%(0.300 mm)时, 添加1.3°根颊向转矩, 各牙位扩弓效率分别为56.15%、73.88%、79.49%、87.80%, 而冠根位移差减小至-0.081、-0.097、-0.095、-0.208 mm。**结论**·无托槽隐形矫治器用于替牙期扩弓治疗时, 存在后牙颊倾的不良反应, 并且在不同牙位的扩弓效率不同。应根据不同牙位, 分别设计不同的矫治策略。过矫治可以提高扩弓效率, 但是需要配合根颊向转矩, 从而实现牙齿整体颊侧移动。

[关键词] 扩弓治疗; 口腔正畸; 替牙期; 正畸矫治器, 可摘式; 透明矫治器; 有限元分析

[DOI] 10.3969/j.issn.1674-8115.2024.08.001 **[中图分类号]** R783.5 **[文献标志码]** A

Optimizing arch expansion with clear aligners in the mixed dentition based on finite element analysis

LÜ Qinyi, GAO Ziqi, FENG Qingchen, MEI Hongxiang, LI Juan

Department of Orthodontics, West China Hospital of Stomatology, Sichuan University; State Key Laboratory of Oral Diseases & National Clinical Research Center for Oral Disease, Chengdu 610041, China

[Abstract] **Objective**·To reveal the direction, efficiency, and mechanical load of single tooth displacement with clear aligners for expansion treatment during the transitional dentition period with the aid of finite element analysis. Additionally, overcorrection and torque compensation systems were designed to address insufficient expansion efficiency and buccal inclination of posterior teeth. **Methods**·One volunteer in mixed dentition period was included to construct a three dimensional cranio-maxillary complex model and an invisible orthodontic system, simulating the buccal displacement (load 1~4: 0.200, 0.275, 0.300, 0.325 mm, respectively) and root buccal torque (load 1: buccal displacement load 0.200 mm, root buccal torque 0°; load 5: buccal displacement load 0.275 mm, root buccal torque 1.0°; load 6: buccal displacement load 0.300 mm, root buccal torque 1.3° and load 7: buccal displacement load

[基金项目] 国家自然科学基金(32271364, 31971240); 四川省重大科技专项项目(2022ZDZX0031); 时代天使科研基金(SDTS21-4-01); 四川大学华西口腔医院临床研究项目(LCYJ2019-22)。

[作者简介] 吕秦毅(1999—), 男, 苗族, 学士; 电子信箱: 1375218618@qq.com。

[通信作者] 李娟, 电子信箱: lijuan@scu.edu.cn。

[Funding Information] National Natural Science Foundation of China (32271364, 31971240); Major Special Science and Technology Project of Sichuan Province (2022ZDZX0031); Angelalign Scientific Research Fund (SDTS21-4-01); Clinical Research Project of West China Hospital of Stomatology, Sichuan University (LCYJ2019-22).

[Corresponding Author] LI Juan, E-mail: lijuan@scu.edu.cn.

0.325mm, root buccal torque 1.8°) on the maxillary deciduous teeth to the first permanent molar with a non bracket invisible orthodontic appliance. Through finite element analysis, the tooth displacement and equivalent stress distribution of the periodontal membrane can be calculated. **Results**·Expansion treatment with clear aligners in the transitional dentition phase primarily revealed the effect of buccal expansion of teeth; different teeth achieved different levels of expansion rate. At a set expansion amount of 0.200 mm per side, expansion efficiency in the maxillary first permanent molar was 51.86%, second primary molar 68.76%, first primary molar 73.48%, and primary cuspid 84.17%. By designing over-correction (0.275, 0.300, 0.325 mm), the results showed significant enhancement in expansion effect. When overcorrection length reached 150% (0.300 mm), expansion efficiency at the maxillary first permanent molar, second primary molar, first primary molar, and primary cuspid were 75.16%, 99.96%, 107.35%, and 122.37%, respectively. The expansion efficiency of maxillary second primary molar, first primary molar, and primary cuspid was close to 100.00%. The overcorrection design exacerbated the dental effects of expansion, intensifying the tendency for teeth to tilt toward the cheek side, leading to side effects such as buccal inclination and drooping of the palatal cusps. When the overcorrection amount for expansion reached 150%, the crown-root displacement in the upper first permanent molar, second primary molar, first primary molar, and primary cuspid were -0.109, -0.134, -0.132, and -0.298 mm, respectively. Applying specific torque compensation for different tooth positions can combat the buccal inclination of posterior teeth. At an overcorrection length of 150% (0.300 mm) with an added 1.3° root buccal torque, expansion efficiency was 56.15%, 73.88%, 79.49%, and 87.80%, respectively. While the crown-root displacement differences reduced to -0.081, -0.097, -0.095, and -0.208 mm. **Conclusion**·When using clear aligners for expansion treatment during a transitional dentition period, side effects such as buccal inclination of posterior teeth exist. Furthermore, various teeth realize differing levels of expansion efficiency, necessitating the design of unique adjustment strategies according to different tooth positions. Overcorrection can improve expansion efficiency but needs to be coordinated with root buccal torque for the whole tooth to move buccally.

[Key words] arch expansion; orthodontic treatment; mixed dentition; orthodontic appliance, removable; clear aligner; finite element analysis

牙弓横向发育不足导致的牙弓狭窄是口腔正畸临床中一种较为常见的错殆畸形^[1-2],严重影响口腔颌面部垂直向和矢状向的平衡^[3]。其中,上颌牙弓狭窄会限制下颌骨三维方向的生长发育,常表现为后牙反殆/反锁殆、腭盖高拱、牙列拥挤和下颌后缩等^[4-5]。这会进一步导致患者的咀嚼功能严重受损,也会影响患者的颜貌美观^[6]。因此,在各类错殆畸形的矫治中,牙弓宽度的协调是正畸治疗的首要目标。

对于上颌宽度不足的患者,正畸临床常采用上颌扩弓技术治疗^[7]。对于替牙期青少年患者,目前常用的扩弓方法为支架式螺旋扩弓器及菱形扩弓簧等活动矫治器。无托槽隐形矫治器的扩弓应用和研究较少。同时,隐形矫治技术的扩弓效率也受到一些质疑,例如实际扩弓效率低于预设值以及后牙颊倾^[8-9]。此外,由于替牙期患者尚处于生长发育期,第一恒磨牙刚萌出,牙冠高度不足,乳磨牙处于替换过程中,牙冠和牙根均短小,导致隐形矫治器对于替牙期患者的扩弓效率以及力学释放方式尚不清晰,影响了隐形矫治器在替牙期患者扩弓中的应用^[10]。因此,需要对隐形矫治器扩弓治疗的基本生物力学机制,以及如何提高替牙期隐形矫治扩弓治疗中牙齿移动效率和转矩控制行进一步研究。

一项对恒牙列期隐形矫治器扩弓治疗的三维有限元分析^[11]发现:利用交互支抗,同时移动不相邻牙齿能够增加矫治器的扩弓效率,减少支抗丧失;矫治器内部设计突起结构能够增加扩弓效率,导致更明显的倾斜移动;设计转矩补偿可以增加扩弓牙转矩控制,但随着转矩补偿角度的增加,扩弓效率随之下降。另一项研究^[12]在转矩补偿与扩弓效率上也得到相近的结论,并提出应该针对不同扩弓步幅设计相应的转矩补偿。但目前尚无针对替牙期隐形矫治器扩弓治疗患者牙齿移动效率与转矩控制的相关研究。

基于上述的问题,本研究拟采用有限元分析探究隐形矫治器对替牙列的扩弓效应,从位移探究扩弓效率,从冠根位移差探究牙齿的颊倾情况,并绘制应力分布图谱。本研究进一步针对隐形矫治器扩弓效率不佳以及后牙颊倾等问题,探究过矫治以及转矩补偿对牙齿应力分布及位移的影响,为临床替牙期隐形矫治方案提供标准化补偿设计的参考。

1 对象与方法

1.1 志愿者纳入

志愿者的纳入标准:①牙齿外形良好,有足够的临床冠高度。②上颌第一恒磨牙已经完全萌出,第一

乳磨牙牙根吸收不足 1/2。排除标准：①牙齿缺失。②乳、恒牙替换障碍（乳牙早脱、乳牙迟脱、恒牙早萌）。③牙齿龋坏严重。④牙龈肿胀严重。⑤存在锁颌。⑥存在后牙反颌。⑦存在严重骨骼畸形。⑧存在唇腭裂。最终纳入替牙期志愿者 1 名，年龄为 9 岁，牙弓狭窄，乳尖牙及乳磨牙尚未替换。

1.2 替牙期颌上颌复合体三维模型的构建

使用锥形束计算机断层成像（cone beam computerized tomography, CBCT）扫描志愿者的颌面部。扫描条件为层厚 0.2 mm，层间距 0.2 mm，管电压 80 kV，管电流 0.5 mA。扫描结果以 DICOM 格式储存。将已获得的 CBCT 数据导入医学建模软件 Mimics 20（Materialise, 美国），得到颌面部的三维图像，初步建立上颌复合体的三维模型。将上颌复合体的三维模型导入曲面重建软件 Geomagic Studio 11（Geomagic, 美国），对微小空隙进行填补及修整，降噪精修及建立曲面，构建包括骨皮质、骨松质、上

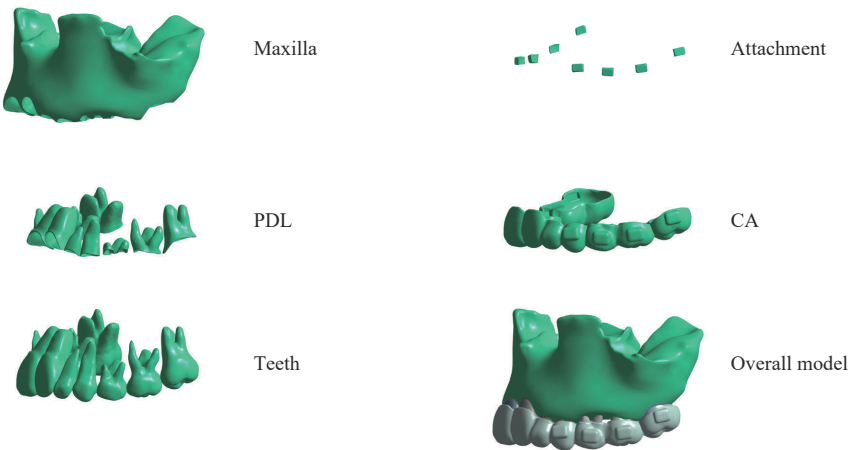
颌牙列和牙周膜的颌上颌复合体曲面模型。志愿者上颌各牙位牙齿长度见表 1。

表 1 志愿者三维模型上颌各牙根长度
Tab 1 Length of maxillary teeth of the volunteer's 3D model

Tooth	Length/mm	
	Right	Left
1st permanent molar	14.4	13.7
2nd deciduous molar	10.3	11.6
1st deciduous molar	9.4	9.1
Deciduous canine	16.8	15.5

1.3 有限元模型的建立

沿牙冠向外沿法线均匀扩展 0.75 mm，分割切除牙齿之间相互交叉重叠部分，同时沿牙齿颈缘弧度去除龈方多余的部分，得到远移上颌磨牙的无托槽隐形矫治模型数据。在 Solidworks 2020 软件中将已建立的颌上颌复合体曲面模型和无托槽隐形矫治模型进行装配（图 1）。



Note: PDL—periodontal ligament; CA—clear aligner.
图 1 有限元模型组成

Fig 1 Finite element model establishment process

1.4 三维有限元分析

将上述三维模型导入有限元分析软件 Ansys Workbench 2021R（ANSYS, 美国），设定组成模型的各部分材料参数及网格大小并进行边界约束，同时建立三维坐标系及设定位移测量标记点，最终得到无托槽隐形矫治扩弓治疗三维有限元模型。参考以往的研究设定本研究有限元模型各材料的杨氏模量和泊松比（表 2）。在材料属性设定中，将牙周膜定义为超弹性材料，牙齿、附件、牙槽骨及隐形矫治器被设

定为各向同性的均质线弹性材料。牙齿设定为近似均匀的结构，不区分牙釉质和牙本质，而牙槽骨的杨氏模量设定中分别对皮质骨及松质骨进行区分，以尽可能地模拟其真实的力学特性。

1.4.1 材料参数与网格划分 本研究材料及组织力学性能参数如表 2 所示。对所构建的三维有限元模型均采用四面体进行网格划分，牙齿和无托槽隐形矫治器网格尺寸均为 1.00 mm，牙周膜为 0.15 mm，牙槽骨为 2.00 mm。

表2 材料及组织力学性能参数

Tab 2 Mechanical properties of materials and tissues

Component	Young's modulus/MPa	Poisson ratio
Tooth	1.96×10^4	0.30
Periodontal ligament	0.68	0.45
Cortical bone	1.37×10^4	0.30
Cancellous bone	1.37×10^3	0.30
Clear aligner	528	0.36
Attachment	1.25×10^4	0.36

1.4.2 约束和接触条件 在三维有限元软件中将牙齿与牙周膜、牙齿与附件、牙周膜与牙槽骨之间设定为固定约束，牙冠和其表面的附件与无托槽隐形矫治器之间设定为摩擦接触（摩擦系数 $\mu=0.2$ ），相邻牙冠之间的接触界面设置为不分离关系。

1.4.3 坐标系建立 采用整体坐标系与牙齿局部三维坐标系。整体坐标轴中，X、Y、Z轴分别代表牙列的颊舌向、近远中向、骀龈向；局部坐标轴中，X、Y、Z轴分别代表牙齿的近远中、唇舌方向及牙龈方向。设定指向牙齿近中、颊向以及龈方分别为X、Y、Z轴的正方向。

1.4.4 工况设计 设计隐形矫治器扩弓步幅为0.200 mm，通过Ansys Workbench 2021R软件设计以下工况，模拟隐形矫治器扩弓治疗设计中常规扩弓、扩弓过矫治、转矩补偿的治疗效果。①工况1~4：对上颌乳尖牙至第一恒磨牙处隐形矫治器分别施加颊向位移载荷0.200、0.275、0.300、0.325 mm。②工况5：对上颌乳尖牙至第一恒磨牙处隐形矫治器施加颊向位移载荷0.275 mm，根颊向转矩1.0°。③工况6：对上颌乳尖牙至第一恒磨牙处隐形矫治器施加颊向位移载荷0.300 mm，根颊向转矩1.3°。④工况7：对上颌乳尖牙至第一恒磨牙处隐形矫治器施加颊向位移载荷0.325 mm，根颊向转矩1.8°。

1.4.5 测量标记点和指标 在Ansys Workbench 2021R软件中对模型中牙冠、牙根分别定点，以乳尖牙牙尖点作为上颌乳尖牙牙冠标记点，以中央点隙作为上颌第一乳磨牙、第二乳磨牙和第一恒磨牙牙冠标记点；以乳尖牙根尖点作为上颌乳尖牙牙根标记点，以根分叉点作为上颌第一乳磨牙、第二乳磨牙和第一恒磨牙牙根标记点。

使用实际扩弓量（actual expansion）、扩弓效率（expansion efficiency）衡量扩弓治疗效果，通过冠根

位移差（horizontal displacement difference between crown and root）判断牙齿倾斜程度。实际扩弓量为双侧同名牙牙冠标记点与牙根标记点水平向位移之差的平均值，扩弓效率为实际扩弓量与计划扩弓量之比，冠根位移差为双侧同名牙牙冠标记点与牙根标记点水平向位移之差的平均值。

在Ansys Workbench 2021R软件中绘制牙周膜应力分布云图，使用牙周膜应力分布云图探究扩弓治疗对牙弓中单颗牙的应力作用方式。

2 结果

2.1 无托槽隐形矫治器扩弓治疗的有限元分析

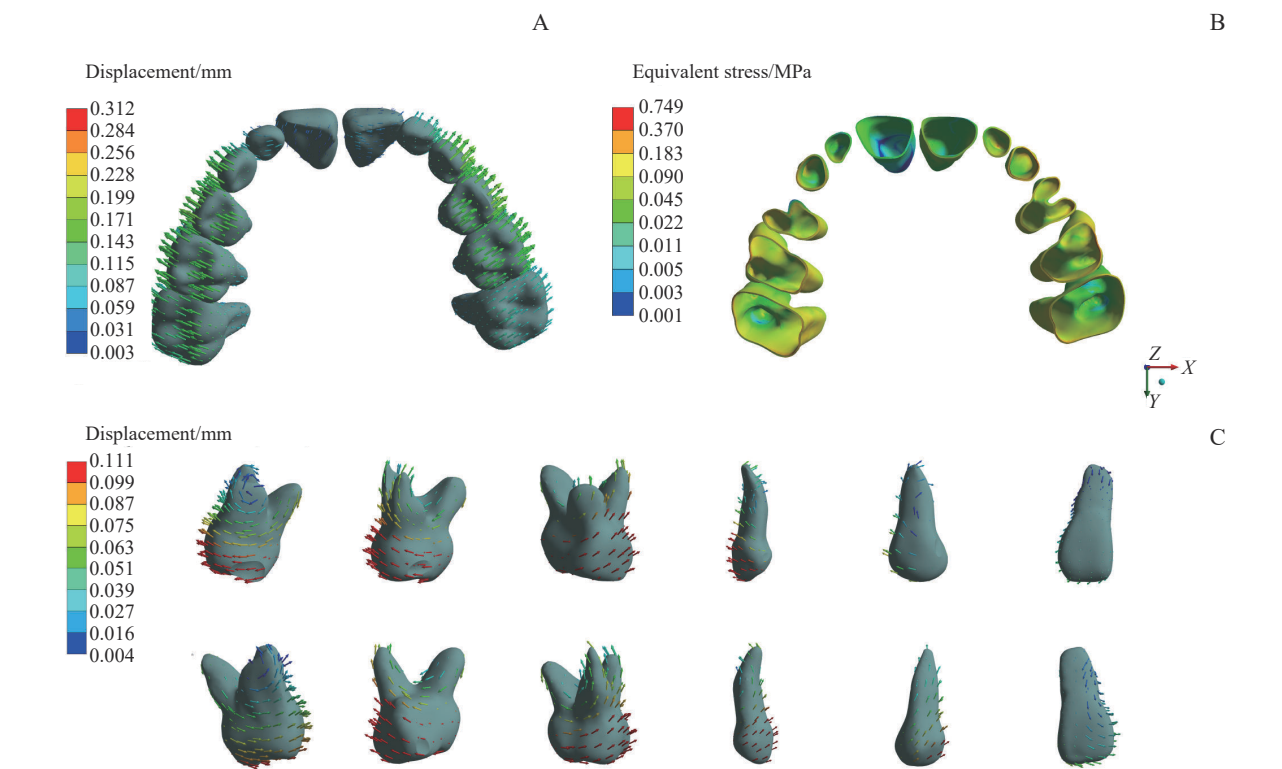
在常规扩弓治疗（工况1，不设计扩弓过矫治）中，乳尖牙至第一恒磨牙段整体表现为颊向倾斜的移动趋势，每颗牙齿表面各点由牙冠至牙根方向移动量逐渐减小。乳切牙则表现为牙冠向远中的倾斜移动（图2和表3）。同时，在牙弓前端的牙齿扩弓效率低于牙弓后端的牙齿。扩弓后牙列可见乳尖牙至第一恒磨牙均表现为牙冠颊倾（-Y），牙根舌倾（+Y）的倾斜移动（图2C）。不同部位牙齿颊倾程度不同。根据牙冠标记点，第一乳尖牙牙冠颊向移动0.164 mm，第一乳磨牙牙冠颊向移动0.142 mm，第二乳磨牙牙冠颊向移动0.140 mm，第一恒磨牙颊向移动0.126 mm。

进一步通过牙周膜应力分布云图探究无托槽隐形矫治器常规扩弓对于牙弓中单颗牙的应力作用方式。乳尖牙以及第一乳磨牙的牙周膜等效应力较大，最大牙周膜等效应力出现在乳尖牙牙周膜颈部。各牙位等效应力均主要集中在牙周膜颈部（图2B）。

根据上述结果可知，无托槽隐形矫治器扩弓治疗扩弓效率低，治疗效果主要表现为牙齿颊倾的牙性效应，且不同牙位的扩弓效率不同。

2.2 无托槽隐形矫治器扩弓过矫治的有限元分析

对3种扩弓过矫治（工况2~4）进行有限元分析，通过两侧同名牙牙冠点水平向位移之和计算实际扩弓量。在未设计扩弓过矫治时（工况1），各牙位扩弓效率均较低，其中第一恒磨牙处扩弓效率仅为51.86%（表4）。添加过矫治后（工况2~4），可见各



Note: A. Trend of tooth movement after maxillary expansion orthodontic treatment under load 1. B. Stress distribution of periodontal ligament after maxillary expansion orthodontic treatment under load 1. C. Trend of each tooth movement after maxillary expansion orthodontic treatment under load 1.

图2 常规扩弓载荷下(工况1)的上颌扩弓矫治后牙齿移动趋势及牙周膜应力分布

Fig 2 Trend of tooth movement after maxillary expansion treatment and stress distribution of periodontal ligament under traditional expansion (load 1)

表3 扩弓治疗(工况1)前后牙冠、牙根定点水平方向移动情况
Tab 3 Horizontal movement of crown and root points before and after arch expansion treatment (load 1)

Tooth	Horizontal displacement/mm	
	Right	Left
1st permanent molar		
Crown	-0.126	-0.081
Root	-0.034	-0.022
2nd deciduous molar		
Crown	-0.140	-0.135
Root	-0.048	-0.043
1st deciduous molar		
Crown	-0.142	-0.152
Root	-0.056	-0.058
Deciduous canine		
Crown	-0.164	-0.173
Root	+0.031	+0.042

Note: The horizontal displacement was determined by the respective coordinate systems of each tooth. Buccal (-), Lingual (+).

牙位扩弓效率提高,并随过矫治量的增加而不断升高。在扩弓过矫治量达到扩弓目标位的150.00%(工况3)时,第一恒磨牙扩弓效率为75.16%,第二乳磨

牙扩弓效率为99.96%,第一乳磨牙扩弓效率为107.35%,乳尖牙扩弓效率为122.37%,其中乳磨牙、乳尖牙均能完全达到目标位(0.200 mm)。添加过矫治后(工况2~4),从乳尖牙到第一恒磨牙,单颗牙的实际扩弓量、扩弓效率表现逐渐减少,且第一恒磨牙扩弓效率较乳磨牙、乳尖牙明显降低。

根据模拟结果中牙冠定点与牙根定点之差计算冠根位移差,发现在颊舌方向上,乳尖牙至第一恒磨牙均表现为牙冠颊向位移大于牙根颊向位移的倾斜移动(表3、图3)。从乳尖牙、乳磨牙到第一恒磨牙,牙齿的冠根位移差逐渐减小,但第二乳磨牙冠根位移差较第一乳磨牙大(表4、图3)。随着过矫治量的增加,冠根位移差逐渐增加,在过矫治量达到162.50%(工况4)时,第一恒磨牙、第二乳磨牙、第二乳磨牙、乳尖牙处冠根位移差均超过扩弓无过矫治组(工况1)冠根位移差的2倍。

根据牙列中各牙周膜应力分布,牙周膜所受应力随过矫治量增加而有所增加,基本分布情况与常规扩弓治疗(工况1)中应力分布情况相近。各牙位牙周膜等效应力分布均集中于牙颈部牙周膜(图4)。

表4 扩弓过矫治疗效果

Tab 4 Therapeutic effect of arch over-expansion

Tooth	Load 1			Load 2			Load 3			Load 4		
	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm
16-26	0.207	51.86	-0.075	0.277	69.33	-0.101	0.301	75.16	-0.109	0.324	81.04	-0.203
55-65	0.275	68.76	-0.092	0.369	92.15	-0.124	0.400	99.96	-0.134	0.431	107.79	-0.204
54-64	0.294	73.48	-0.090	0.395	98.86	-0.121	0.429	107.35	-0.132	0.463	115.86	-0.193
53-63	0.337	84.17	-0.204	0.451	112.81	-0.275	0.489	122.37	-0.298	0.528	131.94	-0.441

Note: Tooth numbering according to the Fédération Dentaire Internationale (FDI) tooth numbering system. AE—actual expansion; HD—horizontal displacement difference between crown and root; EE—expansion efficiency. Buccal (−), Lingual (+). The designed load of load 1 (e=0. 200 mm), load 2 (e= 0. 275 mm), load 3 (e=0. 300 mm), load 4 (e=0. 325 mm). e—designed arch expansion amount of one side.

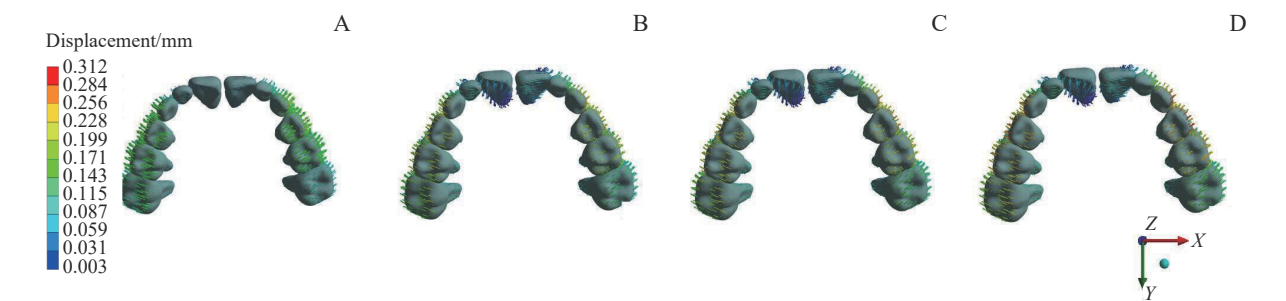
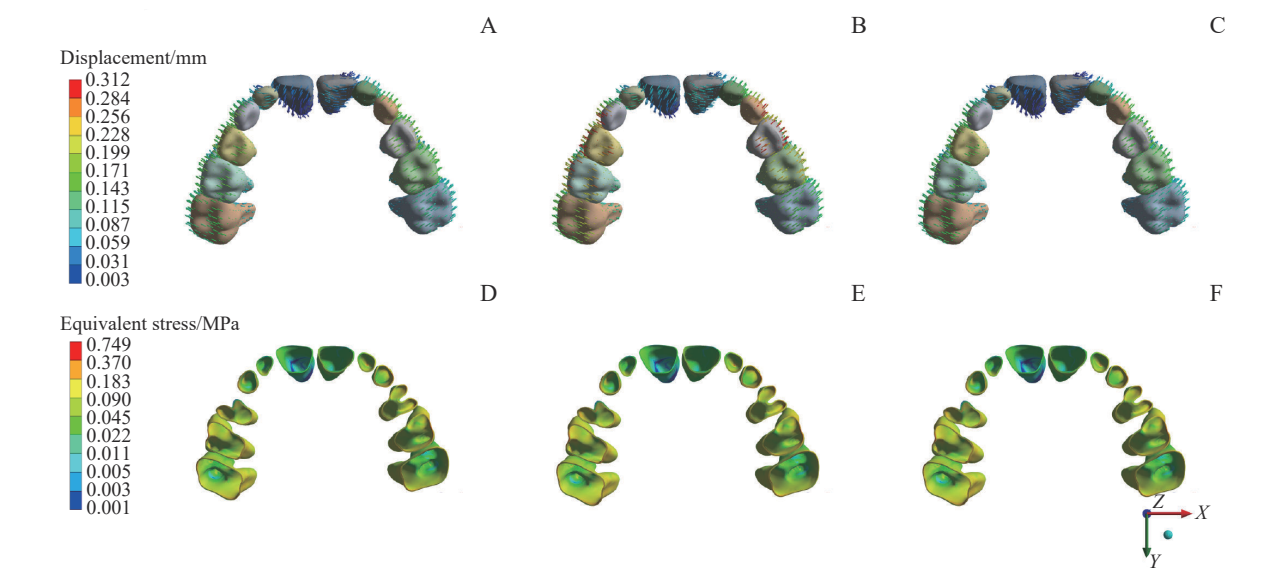


图3 扩弓过矫载荷下的上颌扩弓矫治后牙齿移动趋势

Fig 3 Trend of tooth movement after maxillary expansion treatment under load of over-expansion



Note: A–C. Trend of tooth movement after maxillary expansion treatment under load of over-expansion and torque compensation. Load 5 (A), load 6 (B), load 7 (C). D–F. Stress distribution of periodontal ligament after maxillary expansion orthodontic treatment under different loads. Load 5 (D), load 6 (E), load 7 (F).

图4 上颌扩弓过矫结合转矩补偿治疗后牙齿移动趋势及牙周膜应力分布

Fig 4 The trend of tooth movement and distribution of periodontal membrane stress under load of over-expansion and torque compensation

从模拟结果发现，在无托槽隐形矫治器扩弓治疗中设计过矫治，能够有效提高扩弓效果，扩弓效率随过矫治量的增加而逐渐提高。但过矫治设计同样会加剧扩弓的牙性效应，使牙齿颊侧倾斜移动趋势加大，导致牙齿颊倾、腭尖下垂。同时，不同牙位牙齿对扩弓过矫治的表达效率不同，提示需要对各牙位牙齿设计相对应的扩弓过矫治量。

2.3 无托槽隐形矫治器扩弓过矫治联合转矩补偿的有限元分析

为提高扩弓效率的同时减小牙性效应,实现牙齿倾向整体移动,需在增大扩弓过矫治量的同时对于牙齿施加根颊向转矩,抵消牙冠颊倾。工况5~7对不同的扩弓过矫治量匹配不同的根颊向转矩补偿。

表5 过矫治结合转矩补偿载荷下上颌扩弓治疗效果

Tab 5 Therapeutic effect of maxillary expansion under over-expansion combined with torque compensation

Tooth	Load 1			Load 5			Load 6			Load 7		
	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm	AE/mm	EE/%	HD/mm
16~26	0.207	51.86	-0.075	0.221	55.25	-0.081	0.225	56.15	-0.081	0.225	56.13	-0.080
55~65	0.275	68.76	-0.092	0.288	71.93	-0.095	0.296	73.88	-0.097	0.289	72.19	-0.094
54~64	0.294	73.48	-0.090	0.311	77.64	-0.093	0.318	79.49	-0.095	0.308	76.96	-0.091
53~63	0.337	84.17	-0.204	0.346	86.43	-0.205	0.351	87.80	-0.208	0.334	83.58	-0.195

Note: Tooth numbering according to the FDI tooth numbering system. AE—actual expansion; HD—horizontal displacement difference between crown and root; EE—expansion efficiency. Buccal (-), Lingual (+). The designed load of load 1 (e=0.200 mm, t=0°), load 5 (e=0.275 mm, t=1°), load 6 (e=0.300 mm, t=1.3°), load 7 (e=0.325 mm, t=1.8°). e—Designed arch expansion amount of one side. t—buccal root torque degree.

根据不同工况下冠根位移差可见,在添加了不同程度扩弓过矫治后,施加相应的转矩补偿量能够使冠根位移差接近无过矫治组(工况1)。此时,牙齿移动趋势更接近整体移动,有利于上牙列的整体扩弓。

综合上述转矩补偿以及扩弓过矫治的有限元分析结果,为实现牙齿的均衡扩弓,治疗设计中需要对不同牙位设计对应扩弓量的同时,施加对应转矩补偿,实现更好的牙齿三维方向上的移动控制,从而使得牙列的整体扩弓。

3 讨论

无托槽隐形矫治器已经被广泛应用于扩弓治疗。ZHOU等^[13]将成年患者隐形矫治前后的模型和CBCT进行重叠,计算实际扩弓量,并与计划扩弓量进行对比,发现上尖牙、第一前磨牙、第二前磨牙和第一磨牙的牙冠平均扩弓效率分别为(79.75±15.23)%、(76.1±18.32)%、(73.27±19.91)%和(68.31±24.41)%,同时计划扩弓量与扩弓效率存在负相关,而上颌第一磨牙初始转矩与扩弓效率也存在负相关。LEVRINI等^[14]则使用治疗前后的模型重叠探究无托槽隐形矫治器对于替牙期患者的扩弓效率,认为无托槽隐形矫治器能够达到传统慢速扩弓的效果,即在增加牙弓宽度和周长的同时,降低牙弓高度。然而,SOLANO-MENDOZA等^[15]指出,无托槽隐形矫治器进行扩弓治疗时治疗目标位与实际牙齿

同时添加过矫治和转矩补偿时,扩弓效率有一定程度提高。当扩弓量为0.275、0.300、0.325 mm时,以第一恒磨牙为例,扩弓效率分别提升3.39%、4.29%、4.27%,但相较对应的单纯扩弓过矫治,扩弓效率分别下降14.08%、19.01%、24.91%(表5)。

移动情况存在差异,说明无托槽隐形矫治器并不能使牙齿向预想的方向移动。本研究从有限元分析的角度,为替牙期患者的扩弓治疗提供了新的理论依据。我们发现,在使用无托槽隐形矫治器对于替牙期患者进行扩弓后,上颌的乳尖牙、第一乳磨牙、第二乳磨牙和第一恒磨牙的扩弓效率分别为84.17%、73.48%、68.76%和51.86%,但是这些牙齿均表现出明显的颊倾效应。在进行过矫治扩弓后,牙齿的扩弓效率提高,但是冠根位移差也明显增加。这些结论与之前的研究一致,即无托槽隐形矫治器更多通过后牙的颊倾实现扩弓。

无托槽隐形矫治器对牙弓不同段的扩弓效率不同。一项对替牙期患者扩弓前后的模型进行重叠的研究^[16]发现,上颌实际扩弓量最大处为上颌第一乳磨牙,其次是第二乳磨牙和乳尖牙,而上颌第一恒磨牙主要表现为颊倾。我们的研究也发现,从牙弓前部到牙弓后部,扩弓效率逐渐减少,且第一恒磨牙扩弓效率较乳磨牙、乳尖牙明显降低。隐形矫治器扩弓治疗中牙弓不同部位扩弓效率的差异可能源于以下几点:第一,随着乳尖牙、乳磨牙、第一恒磨牙的牙周膜面积增加,牙齿移动难度也随之增加;第二,替牙期患者牙根已发生不同程度的吸收,乳牙与第一恒磨牙的扩弓效率差距可能进一步加大;第三,由于隐形矫治器材料性能的刚度限制,在牙弓的末端更难以实现对牙齿移动的控制。这提示在临床诊疗中,针对替牙期需扩弓矫治的患者,在设计矫治方案时应考量替牙期

各牙位的扩弓效率, 添加必要的过转矩以满足实际治疗需要的扩弓量。

本研究中对于施加不同扩弓过矫治的有限元分析显示, 在对各牙位施加不同程度的过矫治后, 扩弓效率增加。当设计过扩弓量为所需扩弓量的150%时, 乳尖牙、乳磨牙区扩弓效率均接近100%。但该扩弓效果主要表现为牙齿颊倾, 牙冠显著向颊侧方向移动, 而牙根位移较少或者向舌侧位移。这种牙齿移动趋势可能是因为无托槽隐形矫治器扩弓时仅对牙冠施力, 导致对牙根移动的控制力差。另外, 乳牙牙周膜面积较小, 牙冠受力增加时牙齿倾斜移动程度相较恒牙更大。这在实际治疗过程中可能会导致后牙段腭尖下垂和后牙局部开骀的现象。由于腭尖下垂产生的早接触点会导致下颌骨出现顺时针转动。因此, 对骨性Ⅱ类高角患者扩弓治疗时需要更加谨慎^[15]。这提示在实际治疗中, 为提升牙齿扩弓效率而单纯增加扩弓量, 可能会导致较为严重的以牙齿颊倾为主的不良反应。为对抗不必要的颊倾, 在设计扩弓过矫治的同时, 应考虑不同牙位的扩弓效率差异, 设计合理的转矩过矫治量, 实现更为均衡的扩弓效果。另外, 相应增加根颊向的转矩补偿, 减小颊侧倾斜移动趋势, 增加牙根位移量。

本研究存在一些局限性。第一, 模型来自1例志愿者模型, 由于存在个体差异, 且目前可行的数字化模拟过程需要对模型进行一定程度的简化处理, 故无法完全还原临床实际情况; 第二, 本研究主要聚焦于生物力学问题, 未全面考虑生物学问题, 牙齿运动还受到其他因素的影响, 包括矫治器材料在口腔环境中的性能变化、牙槽骨密度差异和其他生物因素等, 模拟分析难以完全还原生理环境的影响; 第三, 本研究仅讨论了牙齿在水平方向上的移动趋势, 在实际情况中, 隐形矫治器扩弓同样存在牙齿扭转等其他三维方向上可能出现的扩弓不良反应。

本研究提供了一种基于三维有限元分析的替牙期扩弓病例治疗设计思路。根据本研究结果, 无托槽隐形矫治器用于替牙期扩弓治疗时, 应根据不同牙位分别设计不同的矫治策略: 牙列后段相对中段牙列应设计更多的扩弓过矫治量, 而转矩补偿角应随扩弓矫治量的增加相应增加, 从而增加扩弓效率和实现牙齿整体颊侧移动。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

伦理批准和知情同意/Ethics Approval and Patient Consent

本研究获取的锥形束计算机断层成像资料已通过四川大学华西口腔医院伦理委员会审批(审批号: SDTS21-4-01)。试验过程均遵照《涉及人的生物医学研究伦理审查规范》的条例进行, 受试对象已经签署知情同意书。

The cone beam computerized tomography data obtained in this study have been approved by the Ethics Committee of West China Hospital of Stomatology, Sichuan University (Number: SDTS21-4-01). The experimental protocols were carried out by following *The Operational Guideline for The Ethic Review of Biomedical Research Involving Human Subjects*. Subjects have signed informed consent.

作者贡献/Authors' Contributions

吕秦毅参与试验设计、试验操作和初稿撰写; 高子琦、梅宏翔参与图片整理和论文修改; 冯青辰参与数据整理; 李娟参与试验设计与监督, 并提供经费支持。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

Lǚ Qinyi designed the experiments, carried out the study, and wrote the draft manuscript. GAO Ziqi and MEI Hongxiang performed the picture management and revised the manuscript. FENG Qingchen performed the data analyses. LI Juan designed the experiments, supervised the study and funded the experiments. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

• Received: 2024-03-05

• Accepted: 2024-06-05

• Published online: 2024-08-28

参 · 考 · 文 · 献

- [1] RICKETTS R M. A detailed consideration of the line of occlusion[J]. *Angle Orthod*, 1978, 48(4): 274-282.
- [2] LEE R T. Arch width and form: a review[J]. *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 1999, 115(3): 305-313.
- [3] OCAK I, KARSLI N, ALTUG A T, et al. Relationship between vertical facial morphology and dental arch measurements in class II malocclusion: a retrospective study[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e16031.
- [4] KUNTZ T R, STALEY R N, BIGELOW H F, et al. Arch widths in adults with Class I crowded and Class III malocclusions compared with normal occlusions[J]. *Angle Orthod*, 2008, 78(4): 597-603.
- [5] TERVAHAUTA E, NOKELA J, VUOLLO V, et al. Associations of sagittal malocclusions with dental arch characteristics and crowding in Northern Finland Birth Cohort 1966[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2022, 25(4): 468-475.
- [6] SAGHIRI M A, EID J, TANG C K, et al. Factors influencing different types of malocclusion and arch form: a review[J].

- J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2021, 122(2): 185-191.
- [7] LIONE R, PAOLONI V, BARTOLOMMEI L, et al. Maxillary arch development with Invisalign system[J]. Angle Orthod, 2021, 91(4): 433-440.
- [8] GALAN-LOPEZ L, BARCIA-GONZALEZ J, PLASENCIA E. A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with Invisalign®[J]. Korean J Orthod, 2019, 49(3): 140-149.
- [9] PHAN X, LING P H. Clinical limitations of Invisalign[J]. J Can Dent Assoc, 2007, 73(3): 263-266.
- [10] HOULE J P, PIEDADE L, TODESCAN R Jr, et al. The predictability of transverse changes with Invisalign[J]. Angle Orthod, 2017, 87(1): 19-24.
- [11] YAO S, JIANG W, WANG C J, et al. Improvements of tooth movement efficiency and torque control in expanding the arch with clear aligners: a finite element analysis[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2023, 11: 1120535.
- [12] ZHANG Y Q, HUI S Y, GUI L Y, et al. Effects of upper arch expansion using clear aligners on different stride and torque: a three-dimensional finite element analysis[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 891.
- [13] ZHOU N, GUO J. Efficiency of upper arch expansion with the Invisalign system[J]. Angle Orthod, 2020, 90(1): 23-30.
- [14] LEVRINI L, CARGANICO A, ABBATE L. Maxillary expansion with clear aligners in the mixed dentition: a preliminary study with Invisalign® First system[J]. Eur J Paediatr Dent, 2021, 22(2): 125-128.
- [15] SOLANO-MENDOZA B, SONNEMBERG B, SOLANO-REINA E, et al. How effective is the Invisalign® system in expansion movement with Ex30' aligners? [J]. Clin Oral Investig, 2017, 21(5): 1475-1484.
- [16] LIONE R, CRETELLA LOMBARDO E, PAOLONI V, et al. Upper arch dimensional changes with clear aligners in the early mixed dentition: a prospective study[J]. J Orofac Orthop, 2023, 84(1): 33-40.

[本文编辑] 包 玲

学术快讯

上海交通大学医学院附属新华医院龚伟团队发现可变剪切产物 对胆囊癌免疫逃逸的调控作用

上海交通大学医学院附属新华医院普外科龚伟教授团队通过多组学联合分析,发现可变剪切因子多嘧啶区结合蛋白3 (polypyrimidine region-binding protein 3, PTBP3) 在胆囊癌中呈高表达,并促进白介素-18 (interleukin-18, IL-18) 的外显子跳跃,从而产生肿瘤相关特异表达的 Δ IL-18。体内外的功能实验显示 Δ IL-18能下调CD8⁺T细胞中FBXO38 (F-box only protein 38) 的转录水平以减少程序性死亡受体1 (programmed death-1, PD-1) 的泛素化降解,从而促进胆囊癌的免疫逃逸。研究人员也开发了一系列针对IL-18外显子跳跃的寡核苷酸药物 (antisense oligonucleotide, ASO),以阻断胆囊癌细胞中 Δ IL-18的产生;发现其中ASO4能够加强抗PD-1药物的疗效,且小鼠体内实验表明其具有良好的生物安全性。相关研究成果于2024年8月8日以“*PTBP3 Mediates IL-18 exon skipping to promote immune escape in gallbladder cancer*”为题,发表在*Advanced Science*上。该研究的完成有助于阐明胆囊癌发生过程中可变剪切异常导致免疫逃逸的机制,为临床工作提高胆囊癌免疫治疗的效果提供新的视角和作用靶点。