

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.01.016

隐形矫治内收上颌前牙生物力学特性有限元分析

李珂, 洪蕾蕾

(扬州市口腔医院, 江苏 扬州 225100)

[摘要]目的 分析牙周炎情形下隐形矫治内收上前牙颌系统相关生物力学特性,旨在为此类患者隐形矫治方案提供理论基础与临床指导。方法 采用三维有限元分析方法,基于志愿者颌面部CT数据与医学/工程软件,提取并建立志愿者佩戴隐形矫治器的口腔上颌组织三维模型,即无牙周炎(A组)、轻度牙周炎(B组)和中度牙周炎(C组)。在有限元分析结果中,分别在A、B和C组中监测左侧上颌前牙位移情况和牙周膜受力情况。结果 在矫治载荷下,A、B、C三组上颌前牙均产生了有效位移,即随牙周炎程度加重,牙冠切端和尖牙牙尖处附近总位移呈先增加后略减少趋势,根尖位移随牙周炎程度增加而不断减小,牙冠和牙根之间整体位移差持续增加。上颌前牙颈部附近牙周膜(应力集中区)所受应力值随牙周炎程度呈先增加后略有下降趋势,但仍大于无牙周炎情况。结论 对于牙周炎患者隐形矫治内收上前牙,可通过增加根舌扭矩和减少内收载荷等方式,促使牙齿整体移动,且最大限度减少对牙周膜的应力损伤,以获得更加安全有效的隐形矫治效果。

[关键词] 口腔正畸; 隐形矫治器; 有限元分析; 应力分布

[中图分类号] R783.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949(2025)01-0062-04

Finite Element Analysis of Biomechanical Properties in Maxillary Anterior Teeth Retraction Under Invisible Appliance

LI Ke, HONG Leilei

(Yangzhou Stomatological Hospital, Yangzhou 225100, Jiangsu, China)

[Abstract]**Objective** To analyze the biomechanical properties of the oral and maxillofacial system of the maxillary anterior teeth in the case of periodontitis, and to provide theoretical basis and clinical guidance for the invisible orthodontic treatment of such patients. **Methods** Based on volunteers' maxillofacial CT data and medical/engineering software, a three-dimensional finite element analysis method was used to extract and establish a three-dimensional model of oral maxillary tissue of volunteers under invisible appliance, namely, no periodontitis (group A), mild periodontitis (group B) and moderate periodontitis (group C). In the finite element analysis results, the displacement of the left maxillary anterior teeth and the stress of the periodontal ligament were monitored in groups A, B and C, respectively. **Results** Under the correction load, the maxillary anterior teeth of the three groups A, B and C all produced effective displacement, that is, with the increase of periodontitis, the total displacement near the incisal end of the crown and the cusp of the canine increased first and then decreased slightly. The displacement of the root tip decreased with the increase of periodontitis, and the overall displacement difference between the crown and the root continued to increase. The stress value of periodontal ligament (stress concentration area) near the neck of maxillary anterior teeth increased first and then decreased slightly with the degree of periodontitis, but it was still greater than that without periodontitis. **Conclusion** For periodontitis patients with maxillary anterior teeth retraction under invisible appliance, the overall movement of the teeth can be induced by increasing the root-lingual torque and reducing the internal retraction load, and the stress damage to the periodontium can be minimized, so as to obtain a more safe and effective invisible correction effect.

[Key words] Orthodontics; Invisible appliance; Finite element analysis; Stress distribution

隐形矫治器主要由高分子聚合物材料热压制作，当患者佩戴矫治器时，通过其弹性形变预设的载荷对牙齿施加矫治力^[1-3]。从生物力学角度探索矫治力传递引起的位移与应力相关规律已成为正畸学的重要研究课题^[4, 5]。目前，对隐形矫治生物力学研究主要采用有限元分析法。口颌系统三维建模和静力学仿真可以预测患者佩戴矫治器后的牙齿移动和各组织受力情况，这对指导矫治器设计和矫治方案制定具有重要意义^[6-9]。有研究发现^[10]，在隐形矫治中使用较厚矫治器会增加牙周膜所受的主应力。另有研究发现^[11]，矫治器弹性模数越大，牙周膜和矫治器所受应力越大。Kim WH等^[12]通过有限元分析确定了圆柱体为隐形矫治器附件最佳结构。由于隐形矫治器的独特优势，其在牙周炎患者牙齿矫治中的应用更有利于降低口腔中的菌斑指数，控制牙龈出血和维护牙周健康^[13, 14]。然而，矫治力传递至牙周膜将导致其应力集中，不同程度牙周炎患者牙周支持条件不同，这将影响牙齿位移趋势和各种组织间受力情况。因此，有必要进一步阐明牙周炎患者隐形矫治口颌系统生物力学特征。本研究建立了在隐形矫治下的口颌系统三维有限元模型，通过有限元方法分析口颌系统生物力学特征，探讨牙周炎程度对隐形矫治安全有效性的影响规律及作用机制，现报道如下。

1 对象与方法

1.1 研究对象 于2024年3月在扬州市口腔医院选择1名29岁健康男性作为志愿者，其口腔卫生良好、上颌前牙存在少量散在间隙、研究区域牙齿形态发育，不存在口腔健康问题。该志愿者对此项研究知情且签署知情同意书。

1.2 应用软件 Mimics Research 21.0（比利时Materialise公司）、Geomagic Wrap 2021（美国3D Systems公司）、SolidWorks 2021（法国Dassault Systemes公司）和Ansys Workbench 2020（美国ANSYS公司）。

1.3 口颌系统三维模型构建 使用Mimics软件对志愿者颌面部CT轴向位图数据进行三维重建。使用Geomagic软件修复颌骨、牙齿模型，并构建牙周膜和隐形矫治器三维模型，见图1。使用SolidWorks软件对各模型进行装配，获得包括矫治器的口颌系统完整三维模型。

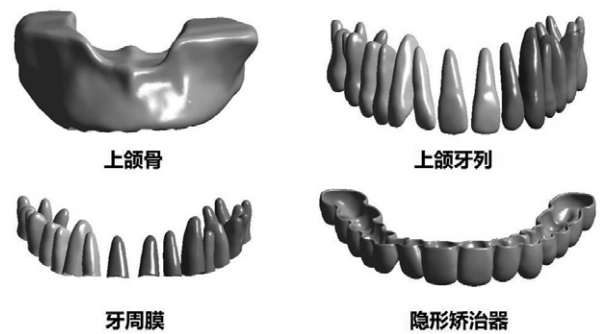
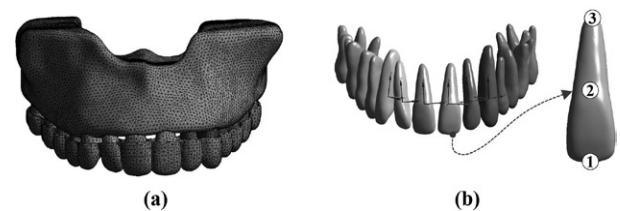


图1 上颌骨、牙齿、牙周膜、隐形矫治器三维模型

1.4 网格划分与参数设置 使用Ansys软件静态结构模块进行隐形矫治生物力学有限元分析。模型中各组织材料弹性模量和泊松比见表1^[12]。使用六面体网格划分模型区域（图2a）。在上颌前牙各牙齿几何中心建立局部坐标系（图2b），X轴（水平向）正方向指向远中，Y轴（矢状向）正方向指向舌侧，Z轴（垂直向）正方向指向牙根。对于接触条件，牙齿和牙周膜、牙周膜和上颌骨之间为绑定接触，矫治器和牙齿之间为摩擦接触。对于载荷条件，在上颌前牙部位的矫治器外侧施加0.2 mm内收位移载荷。

表1 各组织材料相关参数

组织	弹性模量 (MPa)	泊松比
牙齿	19600	0.3
上颌骨	1370	0.3
牙周膜	0.0667	0.45
隐形矫治器	528	0.36



注：a：模型六面体网格划分；b：局部坐标系建立和标记点标注；①为切缘中点，②为根颈1/3点，③为根尖点。

图2 隐形矫治口颌系统三维模型

1.5 模型分组与观察指标 由于本研究选取的志愿者无显著牙周炎特征故作为空白对照组，即无牙周炎情形。基于志愿者上颌骨模型参数，参考胥鹏飞等^[15]和Ma Y等^[16]方法，在上颌骨建模过程中通过将牙槽骨高度降低至根骨段长度1/3和1/2分别模拟轻度牙周炎和中度牙周炎情形，并结

合上述条件与参数设置, 构建三组隐形矫治内收上前牙三维有限元模型, 即无牙周炎 (A组)、轻度牙周炎 (B组) 和重度牙周炎 (C组)。在有限元分析结果中, 分别在A、B和C组中监测左侧上颌前牙位移情况和牙周膜受力情况。

2 结果

2.1 三组总体位移趋势及位移量情况 在矫治载荷下, A、B、C三组上颌前牙均产生了有效位移。随牙周炎程度加重, 牙冠切端和尖牙牙尖处附近总位移呈先增加后略减少趋势, 根尖位移随牙周

炎程度增加而不断减小, 牙冠和牙根之间整体位移差持续增加, 见图3。左侧中切牙切缘中点和根颈1/3点在水平向均发生了远中移动, 而根尖点发生了近中移动; 牙齿在矢状向发生了舌侧运动, 且随牙周炎加重, 各标记点矢状向位移量差值逐渐增大; 牙齿在垂直向发生了冠向移动, 且随牙周炎加重, 各标记点冠向位移量绝对值呈现先增加后减少趋势, 见图4。

2.2 三组牙周膜应力分布及大小情况 三组上颌前牙牙周膜应力主要集中在牙颈部附近, 见图5。B、C组各前牙牙周膜应力较A组增加, 见表2。

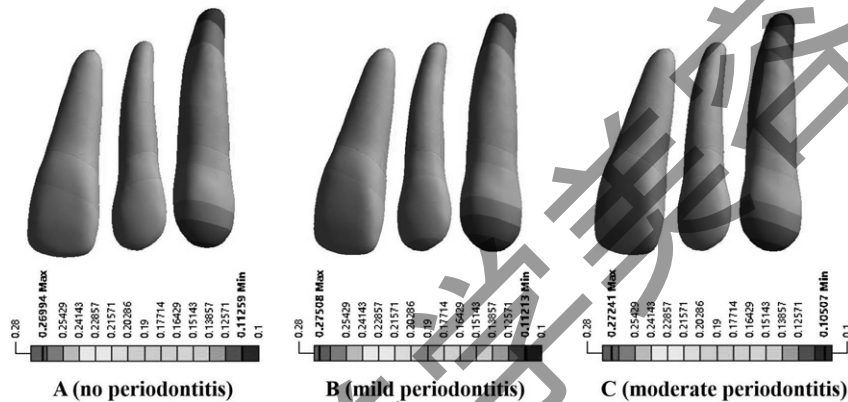


图3 三组左侧上颌前牙整体位移趋势图

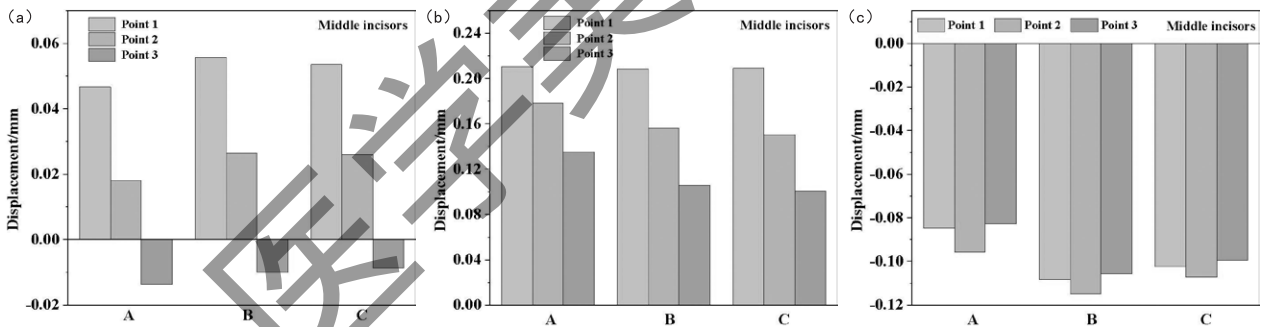


图4 三组下上颌中切牙在 (a) 水平向、(b) 矢状向和 (c) 垂直向位移量图

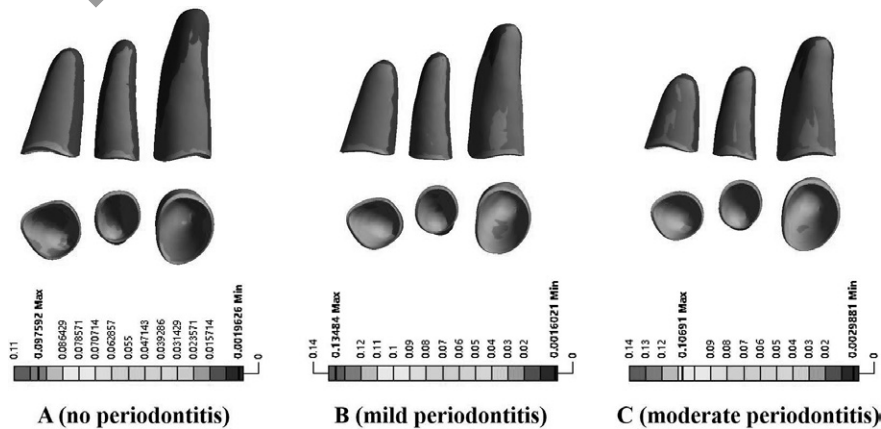


图5 三组下左侧上颌前牙牙周膜的Von-Mises应力分布

表2 三组下上颌前牙牙周膜Von-Mises应力值范围 (kPa)

牙齿	A	B	C
中切牙	2.0~97.6	1.6~134.8	3.0~104.4
侧切牙	2.0~97.6	2.2~100.9	3.3~106.7
尖牙	4.7~95.3	8.1~111.0	7.3~106.9

3 讨论

对于牙周炎患者正畸治疗,使用隐形矫治器更有利于降低口腔中的牙菌斑指数、控制牙龈出血和维持牙周健康^[13, 14]。然而,矫治力仍会导致牙周膜上的应力集中,而不同程度牙周炎患者的牙周支持条件不同,这将影响牙齿位移规律和各种组织之间应力效应。

本研究结果表明,随牙周炎程度加重,患者牙槽骨高度的降低导致牙齿阻抗中心向牙根方移动,与牙槽高度正常牙齿相比,在隐形矫治中牙齿更易发生倾斜移动。例如在矢状向上,上颌前牙各牙齿上三个标记点的舌侧位移差随牙周炎程度加重而增加。因此,在内收上前牙隐形矫治中,隐形矫治器仍需预设根舌向转矩并配合使用控根附件,以控制牙齿的唇舌向倾斜,且对于牙周炎患者,应根据牙周炎程度控制施加载荷大小。另本研究发现,上颌前牙牙周膜应力主要集中在牙颈部附近,随牙周情况恶化,最大应力值也会受到影响。当患有轻度牙周炎时,与无牙周炎情况相比,各牙齿牙周膜最大应力值增加。当牙周炎加重时,即患有中度牙周炎时,最大应力值呈下降趋势,但仍大于无牙周炎情形。因此,对于牙周炎患者,更应关注牙周膜的应力集中,以及骨开窗、骨破裂和牙槽骨吸收的风险,可通过减少内收载荷等方式减少对牙周膜的应力损伤。

综上所述,牙周炎患病程度将影响隐形矫治内收上前牙的安全性及有效性。对于接受隐形矫治的牙周炎患者,可通过增加根舌向转矩和减小内收载荷等方式,使前牙内收更倾向于整体运动,并减少对牙周膜的应力损伤,以获得更加安全、有效的隐形矫治效果。

[参考文献]

[1] Tania M, Veerasankar S, Ponniah H, et al. Comparison of Patient Satisfaction between Invisible Appliance and Fixed Orthodontic Appliances—A Systematic Review[J]. *J Pharm Bioallied Sci*, 2024, 16(Suppl 2):S1017-S1021.

[2] Bichu YM, Alwafi A, Liu X, et al. Advances in orthodontic clear

aligner materials[J]. *Bioact Mate*, 2023, 22:384-403.

[3] Macri M, Murmura G, Varvara G, et al. Clinical performances and biological features of clear aligners materials in orthodontics[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9:819121.

[4] Crofts SB, Smith SM, Anderson PSL. Beyond description: the many facets of dental biomechanics[J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2020, 60(3):594-607.

[5] Al-Khatib AR, Al-Hafidh NN. An overview on the applications of finite element analysis in orthodontic[J]. *Al-Rafidain Dental Journal*, 2021, 21(2):185-192.

[6] 王禹, 李惠琴, 杨敏, 等. 三维有限元法在口腔正畸中的研究进展[J]. *中外医学研究*, 2023, 21(7):166-169.

[7] Seo JH, Kim MS, Lee JH, et al. Biomechanical efficacy and effectiveness of orthodontic treatment with transparent aligners in mild crowding dentition—a finite element analysis[J]. *Materials*, 2022, 15(9):3118.

[8] Elshazly TM, Bourauel C, Aldesoki M, et al. Computer-aided finite element model for biomechanical analysis of orthodontic aligners[J]. *Clinical Oral Investigations*, 2023, 27(1):115-124.

[9] 唐昕月, 须敏依, 华滢婕, 等. 无托槽隐形矫治上颌前牙分步内收和整体内收的三维有限元分析[J]. *中华口腔医学杂志*, 2023, 58(7):670-676.

[10] Seo JH, Eghan-Acquah E, Kim MS, et al. Comparative analysis of stress in the periodontal ligament and center of rotation in the tooth after orthodontic treatment depending on clear aligner thickness—finite element analysis study[J]. *Materials*, 2021, 14(2):324.

[11] 苏涛, 王星星, 向彪, 等. 不同刚度的无托槽隐形矫治器扩大上颌牙弓的有限元分析[J]. *口腔医学研究*, 2020, 36(5):454-458.

[12] Kim WH, Hong K, Lim D, et al. Optimal position of attachment for removable thermoplastic aligner on the lower canine using finite element analysis[J]. *Materials*, 2020, 13(15):3369.

[13] Dai Q, Xu W. Invisible orthodontic appliance therapy is beneficial to the alleviation of periodontitis and maintenance of oral health in periodontitis patients[J]. *International journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2020, 13(8):5637-5644.

[14] 谢思洪, 蒋倩, 陈虹, 等. 错颌畸形不同矫治器患者菌斑微生物多样性及群落分析[J]. *四川大学学报(医学版)*, 2022, 53(2):250-255.

[15] 胥鹏飞, 张闯, 范智博, 等. 无托槽隐形矫治中牙周炎患者下切牙压低的三维有限元研究[J]. *口腔医学研究*, 2022, 38(8):757-761.

[16] Ma Y, Li S. The optimal orthodontic displacement of clear aligner for mild, moderate and severe periodontal conditions: an in vitro study in a periodontally compromised individual using the finite element model[J]. *BMC Oral Health*, 2021, 21(1):1098.