

中文摘要

无托槽隐形矫治器近中移动下颌第一磨牙的三维有限元研究

研究目的：

通过建立下颌骨-下颌牙列-牙周膜-无托槽隐形矫治器三维有限元模型，研究模拟拔除下颌第二前磨牙后，无托槽隐形矫治器在一个步距下近中移动下颌第一磨牙时，不同附件设计、不同角度的备抗设计对牙体、牙周组织等效应力和牙齿位移趋势的影响。以期为正畸医生使用无托槽隐形矫治器近移下颌第一磨牙时合理设计附件和备抗角度提供有价值的参考。

研究方法：

选取一位个别正常骀的成年女性志愿者，对其颌面部进行 CBCT 扫描，将扫描后收集到的影像数据保存为 DICOM 格式，导入 Mimics 20.0 软件，再使用 Geomagic Studio 2015 和 Unigraphics NX 1911 建立拔除下颌第二前磨牙并使用无托槽隐形矫治器近移下颌第一磨牙的三维有限元模型。通过 Ansys Workbench 2019 软件分析以下 8 种工况下牙体、牙周组织等效应力和牙齿位移趋势的变化。

工况设计：工况 1：在下颌尖牙、第一前磨牙和第二磨牙的临床冠中心添加矩形附件，下颌第一磨牙上不放置任何附件。模拟隐形矫治器加力近中移动下颌第一磨牙，使矫治器在第一磨牙的近中缩短 0.25 mm。工况 2：在工况 1 的基础上，在下颌第一磨牙的颊侧临床冠偏近中放置一枚垂直矩形附件。工况 3：在工况 1 的基础上，在下颌第一磨牙的颊侧临床冠近中放置双垂直矩形附件。工况 4：在工况 1 的基础上，在下颌第一磨牙的颊、舌侧临床冠偏近中各放置一枚垂直矩形附件。工况 5：在工况 1 的基础上，在下颌第一磨牙的颊侧临床冠偏近中放置一枚水平矩形附件。工况 6：在工况 1 的基础上，在下颌第一磨牙的颊、舌侧临床冠偏近中各放置一枚水平矩形附件；工况 7：在工况 1 的基础上，将下颌第一磨牙远中倾斜 1° 后生成的无托槽隐形矫治器模型戴回原本的牙齿模型上。工况 8：在工况 1 的基础上，将下颌第一磨牙远中倾斜 2° 后生成的无托槽隐形矫治器模型戴回原本的牙齿模型上。

研究结果：

- 1、成功建立无托槽隐形矫治器近中移动下颌第一磨牙的三维有限元模型，

工况模型精确度高、仿真度较好，能够较好的模拟实物本身特性，利于实验结果的分析。

2、本实验模拟的磨牙近移过程中，使用附件和磨牙备抗都无法使牙齿在矢状向上实现整体移动，第一磨牙呈近中倾斜移动趋势，第二磨牙呈远中倾斜移动趋势。

3、对比不同附件设计的工况发现，牙周膜最大等效应力始终集中于第一磨牙近、远中牙颈部区域，牙根最大等效应力集中在第一磨牙根分叉处和牙根根中区域。附件的添加使牙齿倾斜移动趋势减小，但会导致牙列中大多数牙齿的牙根和牙周膜最大等效应力增加。

4、颊舌侧同时设计附件组（工况 4、工况 6）与仅在颊侧设计附件（工况 2、工况 3 和工况 5）区别较为明显，颊舌侧设计不同附件的两组、仅在颊侧设计不同附件的三组之间均无明显差异。

5、对第一磨牙设计备抗后，牙齿近中倾斜移动趋势减小，牙根、牙周膜最大等效应力减小，备抗 2° 优于备抗 1° 。

研究结论：

1、矩形附件可以有效增加固位，提高隐形矫治器对牙齿移动的控制能力，但会导致牙列中大多数牙齿的牙根和牙周膜最大等效应力增加，提示在临床上设计附件时要考虑患者的牙周健康情况以及应力集中区域发生牙根吸收的可能。

2、在磨牙近中移动过程中，颊舌侧同时设计附件在矢状向上的控制能力优于仅在颊侧设计附件，且水平矩形附件和垂直矩形附件之间无明显差异。

3、在磨牙近中移动过程中，将备抗角度添加到隐形矫治器中的方法是可行的，通过此种备抗方式可以有效减少磨牙倾斜移动趋势，并降低牙根及牙周膜最大等效应力，使应力分布更加均匀。

4、仅通过添加附件或磨牙备抗均难以实现磨牙在矢状向上的整体移动，必要时应配合其他辅助装置进行治疗。

关键词：

无托槽隐形矫治器；有限元分析；近中移动；附件设计；备抗；生物力学

Abstract

Three-dimensional finite element analysis of mandibular first molar mesial movement by clear aligners

Objective:

By establishing a three-dimensional finite element model of the mandible mandibular dentition, periodontal membrane, clear aligners, the effects of different attachment designs and different angles of anchor resistance on the equivalent stress and tooth displacement trend of the tooth and periodontal tissue were studied when clear aligner moved the first molar mesially at one step after simulating the extraction of the mandibular second premolar. The purpose of this study is to provide valuable references for orthodontists in the rational design of attachments and angles of anchor resistance when using clear aligners to move the mandibular first molar mesially.

Method:

Select an individual adult female volunteer who is in normal condition, sign an informed consent form with the patient, and then perform CBCT scanning of their maxillofacial region. Save the image data collected after scanning in DICOM format, and import it into Mimics 20.0 software, Geomagic Studio 2015 software, and Unigraphics NX 1911 software to establish a three-dimensional finite element model that simulates the extraction of the mandibular second premolar and mesial movement of the mandibular first molar using clear aligner. The changes in the equivalent stress and tooth displacement trends of the tooth and periodontal tissue under the following 8 working conditions were analyzed using Ansys Workbench 2019 software.

Configuration design: Configuration 1: Add rectangular attachments

to the clinical crown centers of the mandibular canine, first premolar, and second molar, and do not place any attachments on the mandibular first molar. Simulate the use of clear aligner to move the mandibular first molar mesially, shortening the appliance's mesial length by 0.25 mm. Configuration 2: Based on configuration 1, a vertical rectangular attachment was placed in the buccal clinical crown of the mandibular first molar. Configuration 3: Based on configuration 1, a double vertical rectangular attachment was placed in the buccal clinical crown of the mandibular first molar. Configuration 4: Based on configuration 1, place a vertical rectangular attachment in the buccal and lingual clinical crowns of the mandibular first molar. Configuration 5: Based on configuration 1, a horizontal rectangular attachment was placed in the buccal clinical crown of the mandibular first molar. Configuration 6: Based on configuration 1, place a horizontal rectangular attachment in the buccal and lingual clinical crowns of the mandibular first molar respectively; Configuration 7: Based on configuration 1, the clear aligner model generated after the mandibular first molar was tilted at a distal angle of 1° was worn back onto the original dental model. Configuration 8: Based on configuration 1, the clear aligner model generated after the distal inclination of the mandibular first molar by 2° was worn back onto the original dental model.

Result:

1. Successfully established a three-dimensional finite element model of the first molar mesial movement using clear aligners, which has high accuracy and good simulation degree, and can better simulate the characteristics of the physical object. It is conducive to the analysis of experimental results.

2. In the process of the molar mesial movement simulated in this

experiment, the overall movement of teeth in the sagittal direction cannot be achieved by using different attachment designs or different angles of anchor resistance. The first molar shows a trend of mesial tilt displacement, and the second molar has distal displacement trend.

3. Compared with the configurations of different attachments, it is found that the maximum equivalent stress of periodontal membrane is always concentrated in the neck area of the mesial and distal of the first molar, and the maximum equivalent stress of the root is concentrated at the bifurcation of the root of the first molar and the middle area of the root. The addition of attachments reduces the tendency of teeth to move obliquely, but it causes an increase in effect forces such as roots and periodontal membranes of most teeth in the dentition.

4. The difference between the groups of designing attachment at both buccal and lingual sides (configuration 4, configuration 6) and the groups of designing attachment at only the buccal side (configuration 2, configuration 3 and configuration 5) is obvious, and there is no obvious difference between the two groups of different accessories designed on buccal and lingual sides and the three groups with different accessories designed only on the buccal side.

5. After the first molar is designed to anchor resistance, the tendency of mesial tilt of the teeth decreases, the maximum equivalent stress of the root and periodontal membrane decreases, and the anchor resistance of 2° is better than that of 1°.

Conclusion:

1. Rectangular attachment can effectively increase the retention, improve the ability of clear aligners to control tooth movement, but can lead to an increase in the maximum equivalent stress of the root and periodontal membrane of most teeth in the dentition. It is suggested that

when designing attachments, it is necessary to consider the patient's periodontal health and the possibility of root resorption in stress concentrated areas.

2. During the mesial movement of molars, about the control ability in the sagittal direction, designing attachment on both buccal and lingual sides of the molar is better than designing attachment only on the buccal side, and there is no obvious difference between the horizontal rectangular attachment and the vertical rectangular attachment.

3. During the mesial movement of molars, the method of adding the anchor resistance angle to the clear aligners is feasible, through which the tendency of tooth tilt movement can be effectively reduced, and the maximum equivalent stress of the tooth root and periodontal membrane can be reduced, so that the stress distribution is more uniform.

4. It is difficult to achieve the ideal overall movement of molars in the sagittal direction only through attachment design or anchor resistance design. If necessary, other auxiliary devices should be used for treatment.

Key words:

Clear aligners, Finite element analysis, Mesial movement, Attachment design, Anchor resistance, Biomechanics

关于学位论文使用授权的声明

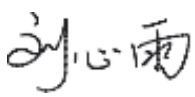
本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别： ☒ 硕士 ☐ 博士

学科专业： 口腔医学

论文题目： 无托槽隐形矫治器近中移动下颌第一磨牙的三维有限元分析

作者签名： 

指导教师签名： 

2023 年 5 月 26 日

缩略语表

缩略词	英文	中文
CA	Clear Aligner	无托槽隐形矫治器
PM1	First Premolar	第一前磨牙
PM2	Second Premolar	第二前磨牙
CBCT	Cone Beam Computed Tomography	锥形束计算机断层扫描
FEA	Finite Element Analysis	有限元分析法
3D-FEA	Three Dimensional-Finite Element Analysis	三维有限元分析法
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine	医学数字影像和通讯
MIMICS	Materialise's Interactive Medical Image Control System	Materialise 公司交互式医学图像控制系统
STL	Stereo Lithographic	立体光刻格式
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines	非均匀有理 B 样条曲线

目 录

第 1 章 研究背景.....	1
1.1 无托槽隐形矫治技术的研究进展.....	1
1.1.1 无托槽隐形矫治技术的发展背景	1
1.1.2 无托槽隐形矫治技术的适应证	1
1.1.3 无托槽隐形矫治技术中的附件应用	2
1.1.4 无托槽隐形矫治拔牙病例方案设计要点.....	3
1.2 拔除第二前磨牙在正畸治疗中的应用	4
1.2.1 拔除第二前磨牙方案的提出	4
1.2.2 拔除第二前磨牙的适应证	5
1.2.3 拔除第二前磨牙对颌面部软硬组织影响的研究	6
1.2.3.1 拔除第二前磨牙后垂直向的变化	6
1.2.3.2 拔除第二前磨牙后软组织的变化	7
1.2.3.3 拔除第二前磨牙对于第三磨牙的影响.....	7
1.3 三维有限元分析在口腔正畸学领域的应用	8
1.4 立题依据和研究意义	10
第 2 章 构建无托槽隐形矫治器近中移动下颌第一磨牙的三维有限元模型.....	12
2.1 材料	12
2.1.1 建模对象	12
2.1.2 实验设备及软件.....	12
2.1.2.1 实验设备	12
2.1.2.2 主要的应用软件.....	12
2.2 建模方法.....	13

2.2.1 获取信息数据	13
2.2.2 初步建立下颌骨、下颌牙列模型	13
2.2.3 下颌骨、下颌牙列及牙周膜的曲面重建.....	13
2.2.4 三维有限元模型的建立	14
2.2.4.1 附件模型的建立.....	14
2.2.4.2 无托槽隐形矫治器模型的建立	14
2.2.4.3 拔除下颌第二前磨牙模型的建立	15
2.2.4.4 实验工况模型的组装	15
2.2.5 实验条件的设定.....	18
2.2.5.1 材料力学参数和网格划分	18
2.2.5.2 约束及边界条件的设定	19
2.2.5.3 坐标系的建立.....	20
2.2.6 加载方式和数据观察指标	20
第 3 章 结果.....	21
3.1 建立工况模型的结果	21
3.2 近中移动下颌第一磨牙时不同附件设计的结果	21
3.2.1 牙周膜 von-Mises 应力分布	21
3.2.2 牙根 von-Mises 应力分布	25
3.2.3 牙列初始位移趋势.....	28
3.2.4 下颌磨牙近远中向位移趋势	30
3.2.5 下颌磨牙颊舌向位移趋势	31
3.2.6 下颌磨牙𬌗龈向位移趋势	33
3.3 近中移动下颌第一磨牙时不同备抗角度设计的结果.....	33
3.3.1 牙周膜 von-Mises 应力分布	34

3.3.2 牙根 von-Mises 应力分布	36
3.3.3 牙列初始位移趋势.....	38
3.3.4 下颌磨牙近远中向位移趋势	39
3.3.5 下颌磨牙颊舌向位移趋势	40
3.3.6 下颌磨牙𪙇𪙇向位移趋势	41
第 4 章 讨论.....	43
4.1 近中移动下颌第一磨牙时不同附件设计的影响	43
4.2 近中移动下颌第一磨牙时不同备抗角度设计的影响.....	45
4.3 无托槽隐形矫治器近移下颌第一磨牙方案设计的考量.....	46
4.4 本研究的优势与不足	47
第 5 章 结论.....	49
参考文献.....	50
作者简介及在学期间所取得的科研成果	56
致谢.....	57

第 1 章 研究背景

1.1 无托槽隐形矫治技术的研究进展

随着社会的发展，正畸患者们的需求不断提高，人们不仅仅关注正畸结束后的颜面部美观改善，也开始追求正畸过程中的美观与舒适度的提升^[1]。虽然陶瓷托槽、舌侧矫治技术的出现一定程度上满足了患者在正畸过程中的美观需求，但因舒适性等方面的问题没有得到大规模普及。而无托槽矫治器的出现满足了患者的需求，不仅美观舒适，还具有临床操作时间短、易清洁、可摘戴矫治器吃饭、刷牙和使用牙线等优点，在临床得到大量医生和患者的青睐^[2-4]。

1.1.1 无托槽隐形矫治技术的发展背景

20 世纪 80 年代，透明热塑性膜片被应用于正畸领域，最初被用于制作保持器。但很快人们发现可以使用这种材料进行牙齿的少量移动，实现调整咬合的目的。1999 年，美国 Align Technology 公司推出 Invisalign 隐适美无托槽隐形矫治器，这是全球首款应用于临床的隐形矫治器，其工作原理是利用数字化技术设计一系列矫治器，每幅矫治器都与牙列形态存在微小差别，佩戴过程中弹性材料发生形变产生矫治力使牙齿产生小范围的移动，通过逐步更换矫治器达成矫治目标。近年来，无托槽隐形矫治技术的适应证越来越广泛^[5,6]，相关理论研究也逐渐完善，但有关于力学机制方面的研究依然很少^[7,8]。

1.1.2 无托槽隐形矫治技术的适应证

无托槽隐形矫治器（Clear Aligner, CA）材料的刚度有限，在计算机中可视的个性化矫治方案中的牙齿移动过程仅为隐形矫治器的变化，而非矫治过程中牙齿的真实移动，因此隐形矫治的疗效与正畸医生的临床经验息息相关，关于其适应证也一直存在争议。随着膜片材料和 CAD/CAM 技术的发展，其适用范围也不断发生着变化。最初 CA 被认为只能应用于治疗简单的错颌畸形病例^[9]，例如：轻度牙列不齐，仅有少量拥挤或间隙；可通过牙性扩弓解决的宽度不调；可通过压低或唇展解决的深覆颌；固定矫治后的轻度复发。而对于开颌、扭转牙、拔牙病例等较为复杂的病例则被列为隐形矫治禁忌证。然而临床中的不断摸索和相关

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/286130225133010102>