

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.06.016

舌侧正畸牙齿移动的数值模拟

叶 铭, 姜献峰*, 孟祥陈

(特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室(浙江工业大学), 浙江 杭州 310014)

摘 要:针对目前口腔舌侧正畸中,手术方案的制定以及牙齿移动的预测主要依靠医生经验,缺少定量的数据,可预期效果差等缺点,提出了舌侧正畸牙齿移动数值计算模型,建立包括牙齿、牙周膜、皮质骨和松质骨的三维有限元模型,模拟在不同的舌侧正畸力作用下,牙齿整体移动时牙周膜内表面的应变分布,并对牙周膜颈部和根尖部的应变加权值与现有研究中牙齿移动量的实验数据进行拟合,通过颈部和根尖部的移动来确定牙齿整体的移动,在三维软件中实现对牙齿移动的过程的模拟,得到移动后的模型作为下一个阶段计算的初始模型。实现了舌侧正畸牙齿移动的动态过程的模拟,该数值模拟方法可以为舌侧正畸制定方案和预测效果提供参考。

关 键 词:牙齿移动;舌侧正畸;数值模拟;应变;有限元

中图分类号:TP391.41 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)06-0068-04

Numerical Simulation of Lingual Orthodontic Tooth Movement

YE Ming, JIANG Xianfeng*, MENG Xiangchen

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education & Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the mouth of lingual orthodontics, tooth movement and the development of programs to predict surgical doctors mainly rely on experience, the lack of quantitative data, defects and poor performance of the expected results, this paper put forward lingual orthodontic tooth movement numerical models, including the establishment of teeth, periodontal ligament, cortical bone, three-dimensional finite element model of cancellous bone, simulated under different lingual orthodontic force, while overall mobile teeth, periodontal ligament strain distribution surface, and the periodontal ligament of the neck and strain were weighted values apical tooth movement with the experimental data in the fitting amount of existing research to determine the overall movement of the teeth to move through the neck and apical and implementation process of tooth movement in three-dimensional software, the initial model obtained as the next stage of the calculation model of the moved. The simulation of dynamic process of lingual orthodontic tooth movement was realized, the numerical simulation method can provide reference for the formulation and prediction of lingual orthodontic treatment.

Key words: tooth movement; lingual orthodontic; numerical simulation; strain; finite element method (FEM)

舌侧正畸是一种应用广泛的“隐形矫治技术”,矫治器全部安装在牙齿舌侧面,外观上看不到任何正畸装置^[1]。正是由于矫治器的美观性好,舌侧正畸逐渐受到患者的青睐,但是舌侧正畸与传统的唇侧正畸相比,牙齿受力面在舌侧,由于牙齿舌侧的解剖特点比较特殊,使得正畸力的作用点更靠近牙齿的阻抗中心,所以牙齿移动的力学机制与唇侧正畸相比有很大差异。常规用于唇侧正畸的力学方法不能完全套用于舌侧正

畸,这也是制约舌侧正畸普及的一个重要因素。当前,国内外从力学角度出发对舌侧正畸进行的研究,主要方法是通过建立牙齿和牙周组织的有限元模型,分析牙齿在受到不同的正畸力作用时,各应力应变在模型上的分布情况。这是属于静态的分析,而事实上在舌侧正畸治疗过程当中,牙齿的移动是一个持续、动态的过程^[2-3]。本文旨在通过有限元的方法,计算不同加载方式下,牙周组织的应变大小,并结合牙齿的移动量,

收稿日期:2015-02-16;修回日期:2015-05-14

作者简介:叶铭(1988),男,浙江桐庐人,硕士研究生,主要研究方向为 CAD/CAE。E-mail:yeming713@126.com

构建一个牙周组织应变与牙齿移动之间的数值模型,该模型能够通过牙周组织的应变大小来预测牙齿的移动。

舌侧正畸原理主要是通过弓丝和托槽在错位牙舌侧施加矫治力,使错位牙受力后得到矫正,恢复和重建正常的牙合受力关系。舌侧正畸当中,矫治力是通过牙齿再作用于牙周支持组织,从而引起了一系列生物力学反应,最终导致了牙齿的移动。在这个过程中牙周膜扮演了重要的角色,牙周膜所受到的应力大小以及分布对于引起正畸牙齿的移动是具有决定作用的。另有研究表明,应变作为力学激励来模拟牙周组织的改建和牙齿移动比应力更合理,因此本文研究以牙周膜内表面应变作为依据,来构建数值模型。

1 有限元模型的建立

运用逆向工程方法对下颌骨及牙齿进行三维重建^[4-5]。首先,通过双螺旋 CT 对人体口腔进行断层扫描,层间距为 0.5 mm,下颌骨及牙齿共生成 65 个断面,扫描图像以 DICOM 格式存储,并导入 Mimics 15.0 软件,通过调整合适的 CT 灰度值范围,区分不同的组织。密度大的物质对 X 线衰减大,CT 灰度值也大,密度小的物质,CT 灰度值小。CT 灰度值从小到大,反映在图像上从黑到白显示。据此,可以去除冗余数据,拾取下颌骨和牙齿部分,并进行三维重建得到下颌骨和牙齿的几何模型。再通过逆向工程软件 Geomagic Studio 12.0 和 Rhinoceros 4.0 进行曲面修补和重建,偏置 1.5 mm 区分开皮质骨和松质骨,并构建牙周膜模型,现有研究表明牙周膜厚度为 0.20~0.35 mm,取 0.25 mm 作为牙周膜的平均厚度,最后通过 UG NX 7.5 进行曲面缝合生成实体模型,将模型导入三维有限元分析软件 Abaqus6.11 中,假设模型中各组织为连续、均质、各向同性的线弹性体材料,并赋予各部分相应的材料属性,模型各部分的材料属性如表 1 所示^[6]。采用 C3D10 十节点四面体单元对模型进行网格划分,划分网格后,模型共生成 23 455 个节点,15 902 个单元,各部件网格图如图 1 所示。

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
牙齿	20 000.00	0.30
牙周膜	0.68	0.49
松质骨	345.00	0.38
皮质骨	13 800.00	0.26

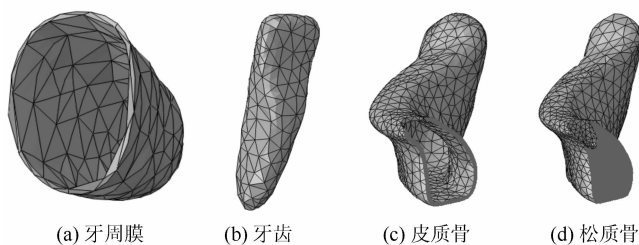


图 1 各部分有限元网格图

Figure 1 Finite element grid of each part

2 边界条件和加载

2.1 边界条件

模型的边界条件采取对牙槽骨的底部和两边固定约束。

2.2 加载部位

在牙齿舌侧面牙长轴距切缘 5 mm 位置,沿远中方向。

2.3 加载方式

牙齿移动方式受施加力矩与力的比值 M/F 与力的作用点到牙齿阻抗中心的距离 D 的大小关系决定^[7-8]。通过不同形式的 M/F 加载,实现牙齿不同的移动方式。当 $M/F = D$ 时,牙齿实现整体移动。另外,关于最佳正畸力的大小这个话题在正畸领域一直存有争议,至今也没有一个统一的意见。钱应莉^[9]等的研究建议施加在单个牙齿上的正畸力值取值应该为 0.1~3.0 N。力太小不足以引起牙齿的移动,力太大容易使牙周组织产生透明性变,引起牙周组织和牙槽骨不可逆的损伤或改变。考虑最佳正畸力范围内牙齿的移动情况,加载方式如表 2 所示。

表 2 加载方式

Table 2 Applied force system

$(M/F)/\text{mm}$	F/N	$M/(\text{N} \cdot \text{mm})$
10	0.5	5
10	1.0	10
10	1.5	15
10	2.0	20
10	2.5	25
10	3.0	30

2.4 计算

在牙周膜内表面的颈部和根尖部各均匀的选取 8 个参考点,提取每个参考点在不同载荷下的正应变值,将 8 个点的正应变大小的绝对值相加,这样就得到牙齿颈部和根尖部的一个加权数据^[10],作为牙齿移动的计算依据。

3 结果

根据有限元应变云图,分析在各种正畸力作用下,牙周膜上参考点在 x, y, z 的3个方向的正应变值。图2所示为 $F=2\text{ N}$, $M=20\text{ N}\cdot\text{mm}$ 时,牙周膜参考点及正应变分布情况。

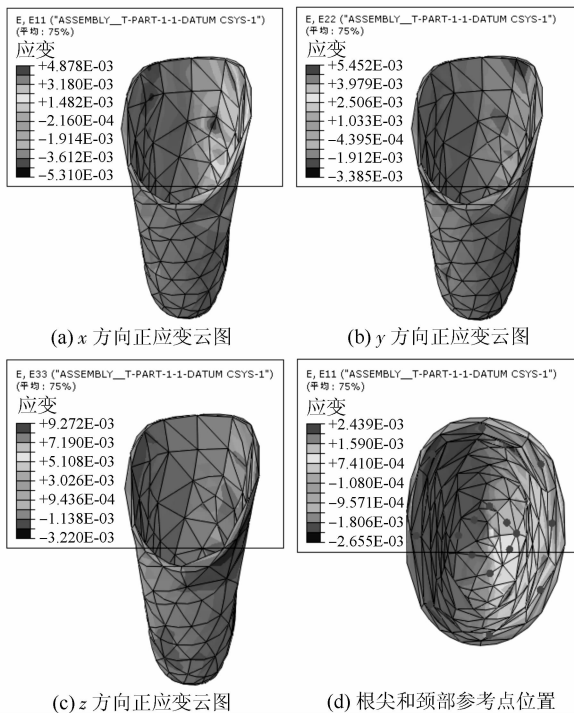


图2 牙周膜参考点及正应变分布云图

Figure 2 Reference point and normal strain distribution in periodontal ligament

Quinn^[11-12]等已经通过实验,对牙齿施加不同的正畸力,测出牙齿整体移动的位移量,研究利用上述实验结果,建立牙周膜参考点正应变值与牙齿移动量之间的关系,曲线拟合结果如图3所示。

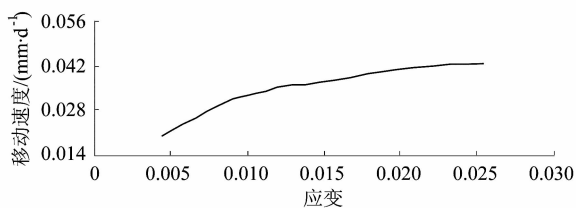


图3 应变-位移曲线

Figure 3 Curve of strain-displacement

该曲线表明随着牙周膜应变的增大,牙齿移动速度也增大。当应变为0.005时,牙齿移动速度为0.020 mm/d;当应变增大一倍为0.010时,牙齿移动速度变为0.030 mm/d,增加了55%;当应变越大,移动速度的变化却越来越小,当应变为0.020~0.025时,

移动速度几乎不再改变。曲线拟合结果给出了实现舌侧正畸牙齿快速移动的应变范围。

在舌侧正畸过程中,将牙齿运动简化为颈部和根部两个点的运动,在一定时间内,不考虑正畸力的衰减,通过有限元模拟不同正畸力下牙周膜在颈部和根部参考点的应变值,利用应变-位移图计算牙齿颈部和根部的移动量,实现正畸牙齿的移动,计算模型流程如图4所示。

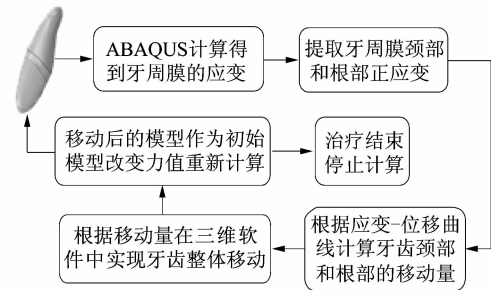


图4 牙齿移动计算流程图

Figure 4 Process of tooth movement

4 结语

本文结合力学方法和有限元的手段对舌侧正畸的牙齿移动建立了一种计算方法。通过建立舌侧正畸应变值及其对应的牙齿移动速度的关系模型,并将正畸力值在有限元软件中通过静力加载的形式作用在牙齿上,计算出牙周膜周围的应变分布,根据应变-位移曲线计算牙齿移动量,实现舌侧正畸牙齿移动的连续滚动计算。为舌侧正畸牙齿移动动态过程的总体研究做出了初步探索,积累了经验以及参考数据。研究得到的数值计算模型可以用来作为预测舌侧正畸牙齿移动的疗效和评估可行性的一种手段,能够反映出牙齿移动过程牙周膜上的应力应变的分布规律,为制定舌侧正畸方案提供了一定参考。

参考文献:

- [1] 徐宝华. 舌侧正畸矫治技术[J]. 口腔正畸学, 1999, 6(2): 80 - 82.
- [2] 钱英莉, 樊瑜波, 刘展. 一个治疗周期内尖牙倾斜移动过程模拟的应力分析[J]. 四川大学学报, 2007, 39(6): 66 - 70.
- [3] 钱英莉, 樊瑜波, 蒋文涛. 正畸力作用下上颌尖牙生物组织应力的三维有限元分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2004, 21(2): 196 - 199.
- [4] 郑文青, 李俊源, 姜献峰. 基于逆向工程技术的牙齿三维模型构建及其应用[J]. 轻工机械, 2011, 29(5): 95 - 97.
- [5] 黄兵锋. 汽车零部件逆向设计中的参数化建模方法研究[J]. 机电工程, 2013, 30(11): 1345 - 1349.

(下转第74页)