

DOI:10.3724/SP.J.1008.2011.00745

## Micro-CT 技术结合逆向工程软件建立上颌第一前磨牙的三维有限元模型

蔚一博, 朱 强, 曹志中\*

第二军医大学长海医院口腔科, 上海 200433

**[摘要]** **目的** 利用简便有效的方法建立离体上颌第一前磨牙三维有限元模型, 为生物力学研究提供数学模型基础。**方法** 使用 Micro-CT 对离体、完整的左侧上颌第一前磨牙进行牙体扫描, 将获得的 CT 影像转化格式, 通过 Mimics10.0 软件采集釉质、本质及髓腔的点数据, 导入 Imageware 12.0 软件中进行点云处理和曲线反求, 通过 Ansys 11.0 软件完成曲面拟合形成牙体组织的三维实体模型并进行布尔运算, 整合釉质、牙本质及髓腔系统; 建立牙周膜以及牙槽骨的实体模型, 分别进行网格划分, 同时对模型进行力学加载。**结果** 建立了包含髓腔、牙周膜、牙槽骨的上颌第一前磨牙的精细三维有限元模型, 网格划分后的牙体三维有限元模型: 釉质具有 26 685 个单元, 牙本质具有 114 082 个单元, 牙髓腔具有 11 843 个单元, 牙周膜具有 22 004 个单元, 牙槽骨具有 66 767 个单元, 共有 241 381 个 10 节点四面体单元。模型具有非常高的精确度, 真实反映了釉牙骨质界的形态。从应力分布来看釉质上应力主要集中在 面中央窝和釉质与本质交界的边缘; 同样牙本质的应力集中部分也在釉牙本质界处。**结论** 通过 Micro-CT 技术与逆向工程软件相结合的方法建立了左侧上颌第一前磨牙的三维有限元模型, 该模型具有良好的几何相似性和力学相似性。

**[关键词]** 前磨牙; Micro-CT; 逆向工程; 有限元分析

**[中图分类号]** R 781 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 0258-879X(2011)07-0745-04

### Micro-CT technology combined with reverse-engineering software in establishing a three-dimensional finite element model of maxillary first premolar

WEI Yi-bo, ZHU Qiang, CAO Zhi-zhong\*

Department of Stomatology, Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

**[Abstract]** **Objective** To explore a simple and effective method for establishing three-dimensional finite element model of the maxillary first premolar, so as to provide a mathematic model for future biomechanic research. **Methods** Micro-CT was used to scan the extracted, intact left maxillary first premolar and the obtained images were transferred for use. The point data of the enamel, dentin, and pulp were collected by Mimics 10.0 software and were fed into Imageware12.0 software for treatment with point cloud data and inverse algorithm of curve. After surface fitting, the tooth solid model was accomplished by Ansys 11.0 software. Then the enamel, dentin, and pulp were integrated through Boolean operation using Ansys 11.0. The solid models of periodontium and alveolar bone were constructed and the 3D meshes were created separately; and the models were tested with loading. **Results** A fine three-dimensional finite element model of the maxillary first premolar, including the pulp, periodontium and alveolar bone was established. After 3D meshing, the enamel had 26 685 tetrahedral elements, the dentin had 11 082 tetrahedral elements, the pulp had 11 843 tetrahedral elements, the periodontium had 22 004 tetrahedral elements, and the alveolar bone had 66 767 tetrahedral elements. The model had a total of 241 381 10-node-tetrahedral elements; it had a high precision and exactly demonstrated the morphology of the tooth and the curvilinear shape of enamel-cemental junction. The stress distribution of enamel focused on the middle of occlusal face and enamel-cemental junction; the stress distribution of dentin also focused on the enamel-cemental junction. **Conclusion** A three-dimensional finite element model of maxillary first premolar has been established by combining the Micro-CT technology and reverse-engineering software; the model has satisfactory geometric and mechanical comparability.

**[Key words]** premolar; micro-computed tomography; reverse engineering; finite element analysis

[Acad J Sec Mil Med Univ, 2011, 32(7): 745-748]

有限元法 (finite element method, FEM) 是力学分析中的数值法, 工作方式是将弹性物体的整体结

构看作是由有限个单元的集合体来代替原来的连续体, 并逐一研究每个单元的性质, 而获得整个弹性体

**[收稿日期]** 2011-02-26

**[接受日期]** 2011-06-23

**[作者简介]** 蔚一博, 硕士. E-mail: weiyibo1982@126.com

\* 通信作者 (Corresponding author). Tel: 021-81873830, E-mail: caozhizh@263.net

的性质,近年来在口腔生物力学领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。对于牙体牙髓病学的研究更重视的是单个牙齿以及牙齿内部的生物力学状况。因此,细化牙齿的有限元模型就有着重要的意义。本研究选择运用高分辨率的 Micro-CT (micro-computed tomography)对单个离体牙进行扫描,并结合逆向工程软件建立了上颌第一前磨牙的精细三维有限元模型,对牙体组织各部分结构做出了精确的模拟,为今后力学分析以及临床研究奠定基础。

### 1 材料和方法

1.1 材料和设备 选自因正畸拔除的左侧上颌第一前磨牙(图 1A),征得患者同意,患者年龄 19 岁,女性。去除周围牙周膜,将牙根固定在蜡基托之上。Micro-CT(Explore Locus, GE healthcare, London, Ontario, Canada),惠普台式电脑(XW6600 workstation,内存 8 G,硬盘 500 G)。DicomWorks1.3.5, Mimics10.0 软件(Materialise, Belgium), Imageware 12.0 软件(EDS, USA), Ansys11.0 分析软件(Ansys, USA)。

1.2 Micro-CT 扫描数据的获得及三维外形的重建 首先运行 explore Warmup 软件进行 Micro-CT 的球管预热,将固定好的离体牙放在碳纤维动物检查床上并保持牙体长轴与检查床平行;开启 explore Scan Control 软件,设定扫描条件为管电压 80 kVp,管电流 450 μA,扫描旋转模式 200 degrees,曝光时间 2 000 ms;扫描自牙尖至根尖,层厚间距 27 μm;用时

88 min。扫描完毕后消除噪声,运用 explore Reconstruction Utilities 软件,采用锥体束方法(Cone Beam)进行重建,共获得 Vff 格式的图片 400 张,并通过 Micro-CT 自带的视图软件 MicroView 2.0(GE healthcare, London, Ontario, Canada)对第一前磨牙的外形进行重建(图 1B),并将二维图像转化为 Dicom 格式,共 1 150 张图片(图 1C),刻录存盘。

1.3 数据图像的处理 以 Dicom 格式存盘的 CD 在 Hp xw6600 workstation 中打开,通过 Dicom Works 1.3.5 软件调整对比度并转化为 BMP 格式存盘。将断层影像导入 Mimics V10.0 软件中,选取 CGS 坐标系(采用毫米制),同时选择矢状线为 Z 轴,颊舌水平线为 X 轴,近远中水平线为 Y 轴;在 Thresholds 中调整阈值,使根管系统、牙体组织区分更加明显,通过软件得到不同牙体组织的点数据,在轮廓形态变化较大的地方取较多的边界点,而对于形状相对规则的地方边界点取少一些,获取点云图像(图 1D),以 STL 格式导入 Imageware12.0 软件中。删除一些无用的杂点后,重新光滑过滤点云,对每个薄层点云进行断层封闭曲线的拟合,根据相邻点最短距离的原则对点云中的点进行排序,形成点和点之间具备矢量关系的点云。根据这些点云的矢量特性,获得质量较好的断层截面的封闭曲线,显示各牙体组织的线框结构(图 1E),最终从 Imageware 中输出 IGES 格式的有限元分析软件可识别的模型文件。

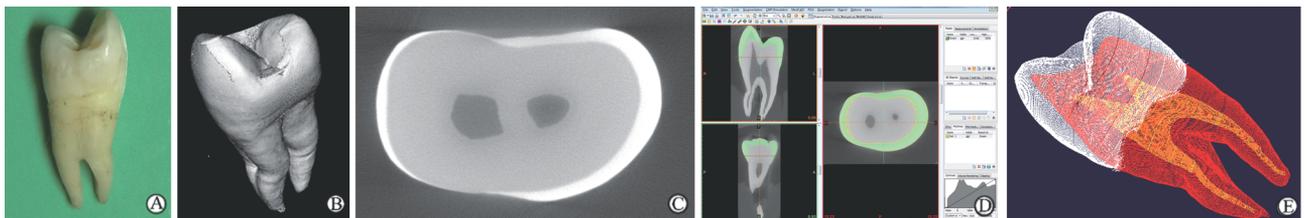


图 1 Micro-CT 扫描数据的获得及图像处理

Fig 1 Collecting and processing of Micro-CT

A: Maxillary first premolar; B: Reconstruction by Micro-CT; C: Image of Dicom form; D: The data were fed into Imageware 12.0 software for treatment with point cloud data; E: Imageware model of inverse algorithm of curve

### 1.4 三维有限元模型的建立和分析

1.4.1 牙体组织三维实体模型 将分别读取的牙釉质、牙本质和牙髓腔模型的 IGES 数据导入 Ansys 软件中,采用自下而上的方法建模。先封闭每一薄层的曲线形成横断面,再连接两层横断面之间的轮廓曲线,最后拟合的曲面围成了牙釉质、牙本质及牙髓腔的实体模型。

1.4.2 牙周膜三维实体模型 在 Imageware12.0 软件中读取的线模型上,用 OFFSET 命令截取釉牙

本质线以下 1 mm 的牙根轮廓线均匀向外扩展 0.25 mm 得到牙周膜的曲线模型,以 IGES 格式导入 Ansys 进行实体建模。

1.4.3 牙槽骨三维实体模型 用同样的方法将已形成的牙周膜线轮廓外形在 Imageware 软件上,用 OFFSET 命令向外扩展形成圆柱体(高 14 mm,直径 17 mm)的曲线模型,以 IGES 格式导入 Ansys 进行实体建模。

1.4.4 模型的组合 在 Ansys 11.0 软件中进行布

尔运算,将釉质和本质的实体模型粘合以后减去髓腔的实体模型得出带有牙髓腔的第一前磨牙的实体模型,再与牙周膜、牙槽骨的实体模型相加,获得第一前磨牙的实体模型。

1.4.5 定义材料属性 将各种材料属性定义为各向同性的线性弹性材料,各材料的力学参数见表 1<sup>[2-3]</sup>。

1.4.6 网格划分 采用 Solid92(10 节点四面体单元)分别对釉质、本质、髓腔、牙周膜及牙槽骨进行自动划分网格,Ansys11.0 可自动根据模型类型及其复杂程度来决定单元尺寸。本实验中釉质、本质、髓腔、牙周膜单元边长设为 0.3 mm;牙槽骨内层单元边长设为 0.3 mm,外层单元边长设为 2.0 mm。

表 1 各材料的力学参数

Tab 1 Mechanical properties of each material

Material	Elasticity modulus $p$ /GPa	Poisson ratio
Enamelum	72.7	0.33
Dentin	18.6	0.31
Dental pulp	0.002	0.45
Periodontium	0.05	0.45
Alveolar bone	8.3	0.35

1.4.7 实验条件假设 假设各种组织、材料是连续、均匀、各向同性的线弹性材料。假设材料受力变

形为小变形。假设各部分结构在加载条件下不发生相对滑。

1.4.8 载荷及边界条件 通过牙体长轴方向在面分散垂直加载 200 N<sup>[4]</sup>;受力时牙槽骨周围为刚性约束;各解剖结构之间假设为固定接触(Bonded)<sup>[5]</sup>。

## 2 结果

2.1 模型基本情况 建立了带有牙髓腔的第一前磨牙的实体模型,包括牙釉质、牙本质、牙髓腔、牙周膜、牙槽骨 5 个部件(图 2A)。对模型各个组织进行细致的网格划分:釉质具有 26 685 个单元、43 222 个节点(图 2B),牙本质具有 114 082 个单元、167 462 个节点(图 2C),牙髓腔具有 11 843 个单元、19 718 个节点(图 2D),牙周膜具有 22 004 个单元、44 049 个节点(图 2E),牙槽骨具有 66 767 个单元、97 930 个节点(图 2F)。该模型共具有 242 530 个单元,372 381 个节点,模型划分细,与实体相比外形逼真,图像好,具有良好的几何相似性。

2.2 模型应力分析结果 模型初步计算,与 Z 轴(牙体长轴)一致加载 200 N 的应力分析结果如图 3 所示。从应力分布来看釉质上应力主要集中在面中央窝和釉质与本质交界的边缘,牙本质的应力集中部分也在釉牙本质界处。

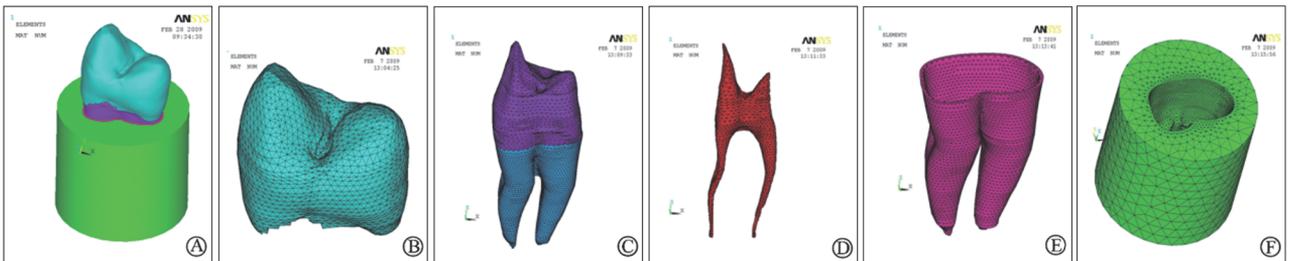


图 2 实体模型及网格划分

Fig 2 Solid model and the 3D meshes

A: The solid model; B: 3D meshes of enamel; C: 3D meshes of dentin; D: 3D meshes of pulp; E: 3D meshes of periodontium; F: 3D meshes of alveolar bone

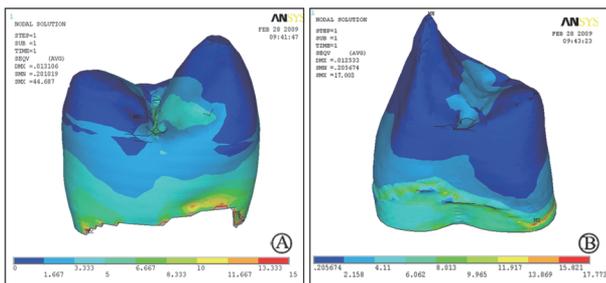


图 3 牙釉质(A)和牙本质(B)应力分布云图

Fig 3 Cloud picture of stress distribution of enamel(A) and dentin(B)

## 3 讨论

有限元分析是从变形入手,利用应力与应变间的关系以及静力学条件,从几何、物理和力学方面进行综合分析,其关键在于所建模型的相似性。本实验有限元模型的相似性包括以下几点:(1)载荷相似性。本实验设定载荷为静态载荷,面加载,加载方向与牙体长轴一致,载荷为 200 N,与实际情况有较好的相似性。目前许多研究倾向于采用动态加载,而 Stegaroiu 等<sup>[6]</sup>认为下颌骨运动速度较快时,若不经

意咬到硬物,这时需要用动态分析,而模拟紧咬牙、碾磨及大部分咀嚼情况用静态分析比较合适,所以本实验采用静态加载。由于磨牙面形态结构复杂,故选择整个面受力,即面节点加载。后牙的功能包括捣碎和碾磨实物,捣碎食物时牙面主要承受垂直载荷,碾磨食物时牙面主要承受侧向载荷<sup>[7]</sup>,本实验选择了垂直载荷。根据报道正常人的力平均为 22.4~68.3 kg (219.52~669.34 N),一般情况下日常食物所需的力范围约为 3~30 kg (29.4~294 N),而绝大多数为 10~23 kg (98~225.4 N)<sup>[8]</sup>。Bakke 等<sup>[9]</sup>得出女性的最大咀嚼力为 441 N,男性为 522 N。本实验参照上述文献,选择了加载力为 200 N。(2)几何相似性。本实验中牙体原始形态获得是通过 Micro-CT 扫描技术获取的二维图像,故获得的模型结构完整,形态准确。(3)边界约束相似性。有限元模型需要根据实体结构周围的限制作用添加一些约束条件,其与实体约束的接近程度称为边界约束相似性。本实验边界约束条件根据模型状况、实验内容及相关的文献资料<sup>[10-11]</sup>边界约束条件设定为牙槽骨外周固定约束,各解剖结构之间假设为固定接触,具有较好的边界约束相似性。(4)力学相似性。大多数的生物材料都是非均匀性、各向异性,模拟和计算非常复杂。大量的研究报告已证实,当进行小变形、静力分析时,可将其简化为连续、均匀、各向同性的线弹性材料,因此,本实验将牙体各组织假设为连续、均匀、各向同性的线弹性体,所获取的应力仍能与实际情况保持较好的力学相似性。

Micro-CT 是一类采用 X 线成像原理进行超高分辨率三维成像的设备,成像原理和 CT 相同,它采集空间距离很近的平行断面图像,对样本进行单个或者用数字方式对堆积的断面进行分析以及体积结构的重构。Bergmans 等<sup>[12]</sup>利用 Micro-CT 扫描离体牙以获取牙体组织内外结构的精确解剖信息。Micro-CT 的测量结果与实际测量的结果非常一致,能够以非破坏性方式进行根管成像和高精度形态分析,是研究牙根管的良好工具<sup>[13]</sup>。本实验对于单个离体牙的有限元模型的建立选用了 GE healthcare 公司 Explore Locus Micro-CT,最小分辨率可以达到 27  $\mu\text{m}$ ,在提供精确外形数据的同时,对牙体组织内部的不同结构进行区分,即能使牙釉质与牙本质的灰度差异得到最大程度的体现。

逆向工程(reverse engineering, RE)也称反求工程,它是从一个存在的零件或原型入手,首先对其进行数字化处理,然后进行数据处理、曲面重建、构造 CAD 模型等,最后制造出产品的过程。逆向

工程的主要步骤是样品的数字化、数据分割和实体建模。本实验首先运用 DicomWorks 1.3.5 软件将 CT 扫描后获得的 DICOM 格式的影像文件转化成位图格式(Bitmap-File, BMP),然后运用 Mimics 10.0 软件通过调节阈值获取不同牙体结构清晰的点数据,通过 Imageware 12.0 软件完成曲线的连接,最后利用 Ansys 11.0 有限元分析软件建立模型并对其进行初步的力学检验。

本实验所建立的模型共具有 372 381 个节点,242 530 个单元,模型划分细,与实体相比外形逼真,图像好,能真实代表实物外形特点,具有良好的几何相似性。尤其是对釉牙本质界的处理,真实反映了上颌第一前磨牙釉牙本质界的解剖形态。该模型单个网格质量高,单元数量适中,能较好地模拟上颌第一前磨牙受载时的力学应力分布情况,为今后的生物力学研究奠定了良好的基础。

## [参考文献]

- [1] 陈新民,赵云凤. 口腔生物力学[M]. 北京:科学出版社,2010:385.
- [2] McGuinness N J, Wilson A N, Jones M L, Middleton J. A stress analysis of the periodontal ligament under various orthodontic loadings[J]. Eur J Orthod, 1991, 13: 231-242.
- [3] Farah J W, Craig R G, Meroueh K A. Finite element analysis of three- and four-unit bridges[J]. J Oral Rehabil, 1989, 16: 603-611.
- [4] Yang H S, Lang L A, Guckes A D, Felton D A. The effect of thermal change on various dowel-and-core restorative materials [J]. J Prosthet Dent, 2001, 86: 74-80.
- [5] Dejak B, Mlotkowski A. Three-dimensional finite element analysis of strength and adhesion of composite resin versus ceramic inlays in molars[J]. J Prosthet Dent, 2008, 99: 131-140.
- [6] Stegaroiu R, Yamada H, Kusakari H, Miyakawa O. Retention and failure mode after cyclic loading in two post and core systems[J]. J Prosthet Dent, 1996, 75: 506-511.
- [7] 易新竹. 学[M]. 北京:人民卫生出版社,2003:12-16.
- [8] Tortopidis D, Lyons M F, Baxendale R H, Gilmour W H. The variability of bite force measurement between sessions, in different positions within the dental arch [J]. J Oral Rehabil, 1998, 25: 681-686.
- [9] Bakke M, Michler L, Möller E. Occlusal control of mandibular elevator muscles[J]. Scand J Dent Res, 1992, 100: 284-291.
- [10] Lee S K, Wilson P R. Fracture strength of all-ceramic crowns with core elastic moduli[J]. Aust Dent J, 2000, 45: 103-107.
- [11] 魏斌,张富强. 牙颌系统三维有限元建模方法的进展[J]. 口腔材料器械杂志, 2002, 11: 86-87.
- [12] Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Wevers M, Lambrechts P. A methodology for quantitative evaluation of root canal instrumentation using microcomputed tomography[J]. Int Endod J, 2001, 34: 390-398.
- [13] Peters O A, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F. Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography[J]. J Dent Res, 2000, 79: 1405-1409.