

桥基牙倾斜对牙周组织影响的有限元研究

韩景芸¹, 费仁元¹, 李彦生¹, 徐志明²

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022; 2. 解放军总医院口腔科, 北京 100081)

摘要: 为了考察桥基牙倾斜对牙周组织应力分布的影响, 相对曲面实体造型技术, 将基于三角剖分的网格实体建模方法应用于固定桥及牙周组织的三维生物模型; 同时借助三维有限元, 对 0°、12°、18°、24°、30° 不同基牙倾斜角度的牙周膜, 在 3 种典型咀嚼载荷下的应力状态进行了对比。结果表明, 基牙倾斜角度变化对未倾斜基牙受力影响微弱, 但对本身的应力极值及分布状态都有较大改变, 特别是倾斜 24° 时应力极值达到最大, 而应力集中的现象也加重。

关键词: 固定桥; 倾斜基牙; 三维有限元; 三角网格

中图分类号: TP 391; R 783

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2007)07-0713-05

固定桥^[1]是一种成熟的修复体, 但是如果邻牙向间隙侧倾斜, 不仅影响就位道和固位形的获取, 而且会超出牙周组织的支持能力, 引发多种病症。近年来, 国内外的诸多学者对此进行了研究, 但多限于二维有限元分析或对比, 特征区域少、局限性大^[2-5]。本文以标准牙齿实物模型为参考, 研究了三维有限元仿生模型的创建方法和基牙倾斜角度对牙周组织应力的影响, 为临床提供理论指导。

1 固定桥及牙周组织的三维生物模型建立

近年来, 随着医学成像技术的发展, 口腔建模方法已由过去的单一技术发展为多种技术可供选择^[6-7]。目前, 国内外采用 CT 数据进行三维有限元建模, 以期获取内部组织特征, 但这种方法误差大, 所建模型有悖于有限元“几何相似性”原则。本文根据固定桥类模型的形态特点及分析侧重点, 在建模中应用激光扫描法以更好地满足设计要求。

1.1 模型简化

理想的有限元模型应能模拟真实情况下的组织结构, 但在综合考虑计算效率及可实施性基础上, 可根据分析目的、侧重点的不同以及不同结构对外力敏感程度的不同, 对模型进行合理简化。本文重点考虑的对象是牙周膜, 因此化简如下:

- 1) 省略牙髓 对牙周膜的应力状态几乎没有影响;
- 2) 省略黏结剂 其厚度为 0.1 mm, 如果保留, 黏结层及其相邻组织的单元就要加密, 导致计算量大幅增加, 而临床已验证黏接力是安全可靠的;
- 3) 骨皮质与硬骨板建为一个整体 两者在解剖学中虽有所区分, 但在空间上是 2 个材料属性完全相同、紧密相连的物理体, 建模简化为一个, 可减少接触单元数目。

1.2 基于三角网格的实体建模

激光扫描时为了保持基牙与修复体之间的形位关系, 将两者做成一个实体单元进行测量, 所得数据属于大规模、散乱型的点, 具有以自由曲面为主的几何特征。传统多采用基于曲线的曲面重建方法, 但牙

收稿日期: 2006-02-15。

基金项目: 北京市先进制造技术重点实验室资助项目。

作者简介: 韩景芸(1977-), 女, 山东济南人, 讲师。

体模型的拓扑信息难以估计,拟合难度大,同时数据分割使面片间难以缝合成实体,因而不利于后期布尔运算.与曲面模型相比,网格化实体模型通常将数据点连接成三角面片,实现原始实物的实体表达.而且近年来边折叠法、小波分解法等算法^[8-10]的出现,在尽量保证模型逼真的同时,大幅度减少了面片的数量,实现了模型重建的自动化和少的冗余,图1是以 $\overline{6}$ 缺失、 $\overline{75}$ 为基牙的情况重构出三角网格模型.然后将模型分离成牙根、预备体和桥体3个部分^[11],分别命名为 G-tooth、Y-tooth 和 X-tooth.



图1 三角网络模型

Fig.1 Model of triangular mesh

1.3 牙周组织外围轮廓的正向设计

以上述模型为参照物,根据牙周组织的解剖学关系,采用正向设计法来构建皮质骨、松质骨、牙周膜、硬骨板的外围轮廓模型,分别命名为 Pi-bone-w、So-bone-w、Zhm-w 和 Guyb-w,然后通过布尔运算得到不同组织的最终数学模型^[11],如图2所示.

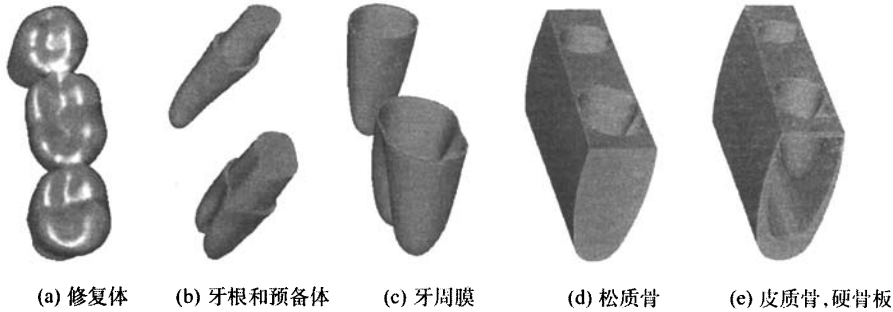


图2 布尔运算得到的 Brep 模型

Fig.2 Brep model calculated by boolean operation

2 有限元分析的前处理

重建后的三维模型不能直接用于计算,需要进行离散、定义本构关系、建立约束等前期工作.

2.1 基于拆分法的有限元网格划分

在固定桥的三维几何模型中,相邻组织的接触面以自由曲面为主.若采用一般方法各自划分网格,则接触面单元间易产生空隙或相互穿透,导致后期计算迭代次数增长或结果不收敛.

所谓拆分法就是一种由零变整的网格划分方法,其具体操作为:提取相邻组织的接触面,并以相同的密度对接触面和非接触面划分面网格;然后将隶属于同一组织的面网格进行整合,并微调边界结点至其完全重合,以形成封闭的面网格;最后面网格由表及里生长成四面体单元.由此可保证相邻组织在接触区上的节点一一对应,实验证明,计算速度可提高40%,而计算精度也可得到进一步提高.

2.2 本构关系定义与边界约束

目前牙体组织的本构关系尚未确定,但大量的研究显示^[12],在牙颌咀嚼载荷作用下,对材料进行均匀、弹性、线性的简化,不会对计算结果的可信度与可靠性产生明显影响,尤其是对定性研究的计算结果.还可以大大节省计算成本.鉴于此,将各组织材料的性能参数设定为如表1所示.

对于载荷采用3种加载方式:①尖窝点载荷;②殆面均匀轴向往点载荷;③颊尖斜向点载荷,方向与牙长

轴成 45°角,由颊侧指向舌侧.而边界约束则施加在牙槽骨底部,设定为 6 个自由度的全约束.同时另一个重要边界条件是确定固定桥与预备体、牙根与牙周膜等邻接组织间的相互作用关系.参考实际口腔环境,将有限元模型中相邻组织接触面上的节点粘接在一起,以模拟牙体不同组织在咀嚼咬合力的作用下,相邻界面上运动位移的一致性.

表 1 牙体及牙周组织材料属性

Table 1 Mechanical properties of dentin, periodontal ligament etc

各向同性	固定桥	牙周膜	牙冠	牙根	骨硬板	松质骨	骨皮质
弹性模量/MPa	18 600	50	51 800	17 600	14 700	490	14 700
ν	0.31	0.49	0.30	0.25	0.30	0.30	0.30

3 数值分析

固定桥的基牙牙周膜在支持义齿、调节咀嚼力的大小以及缓冲、传递应力等方面起到了重要的作用,是固定桥修复生理学研究的基础内容之一.而基牙的倾斜直接改变了修复系统的受力状态,在牙周膜上反映为应力峰值的改变和应力分布的转移.为确定固定桥修复的适应症,本文选择了口腔领域较为敏感的倾斜角度为 0°、12°、18°、24°、30°的基牙为分析对象.

3.1 基牙倾斜对牙周膜应力极值的影响

在有限元数值分析中,模拟了基牙、缺失牙位同时受力和缺失牙位单独受力 2 种情况(见图 3、图 4).

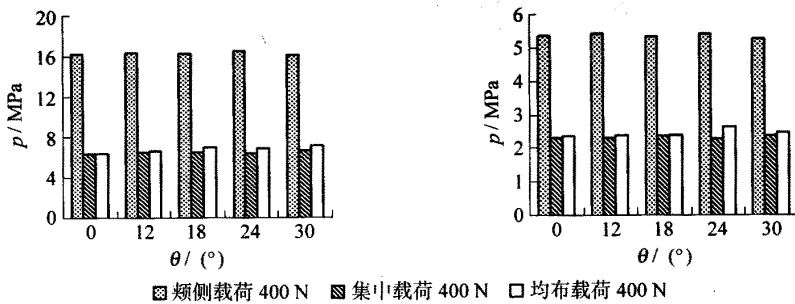


图 3 第 2 前磨牙牙周膜的应力极值

Fig. 3 Max principal stress of composite resin of the second premolars

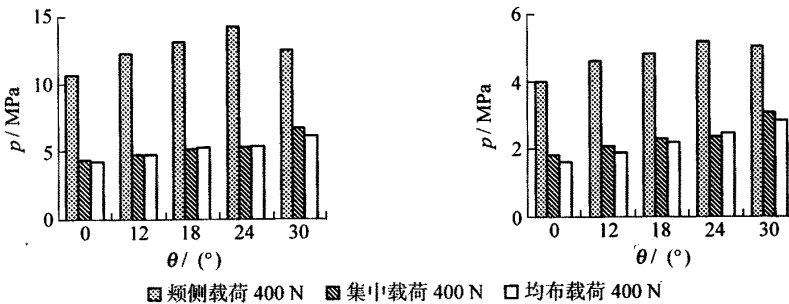


图 4 咀嚼力 400 N 时第 2 磨牙牙周膜的应力极值

Fig. 4 Max principal stress of composite resin of the second molar

由图 3 可见,不管是基牙、缺失牙位同时受力还是缺失牙位单独受力,当第 2 磨牙倾斜角度变化时,第

2 前磨牙牙周膜上的应力值起伏都不大. 其中在集中和均布咀嚼力下, 牙周膜上的应力极值有随第 2 磨牙倾斜角增加而增长的趋势, 可见咬合力通过桥体的介导面而向前传递给第 2 前磨牙, 动用了它的牙周储备力. 而在相同大小的颊侧载荷下, 牙周膜上的应力成倍增加, 说明基牙能承受较大的沿牙轴方向的载荷, 但对沿近远中方向的扭矩很敏感, 即颊侧咀嚼力更容易对牙周膜造成创伤, 所以在临床上应该尽量避免此种咀嚼力的产生; 当倾斜角度变化时, 应力极值并无太多变化.

与第 2 前磨牙相比, 第 2 磨牙牙周膜上的应力极值随倾斜角度的变化有明显的起伏. 由图 4 可以看出: 在集中和均布咀嚼力下, 倾斜角度的增加引发了牙周膜上应力极值的增长, 其中最大增长率为 71.1%; 在颊侧咀嚼力下, 牙周膜承受的应力也成倍增加, 但最危险的应力状态不是出现在基牙倾斜 30° 的时候, 而是在 24° 时. 由此可以推断, 从 0° 开始, 随着基牙倾斜角度的增大, 第 2 磨牙牙周膜上的应力极值会逐步提高, 但随着倾斜角度进一步加大, 基牙牙根近似横卧于槽骨中, 因此对沿近远中向扭矩的敏感性渐渐减退, 牙周膜上的应力极值随之减小. 但是基牙倾斜角度过大, 就不可能获取就位道和固位形.

3.2 基牙倾斜对牙周膜应力分布的影响

基牙倾斜前, 在颊侧咀嚼力的作用下, 第 2 磨牙牙周膜的等效应力主要集中在舌侧与近中侧的牙槽嵴顶. 基牙倾斜后, 虽应力集中区域未发生变化, 但应力值沿牙轴方向递减增快, 即应力梯度增大, 表明牙周膜随基牙倾斜角度的增大, 应力分布趋向不均匀, 从而有损牙周膜健康.

在集中载荷与均布载荷下, 第 2 磨牙牙周膜的等效应力在近中牙槽嵴顶和根尖存在应力集中, 但整个牙周膜应力分布均匀, 梯度变化不大, 如图 5(a) 所示. 随着基牙倾斜角度的增大, 应力集中面积向近中方向退缩, 此时应力主要集中在近中侧, 而远中区域应力值较小, 整个牙周膜的应力梯度变化增大.

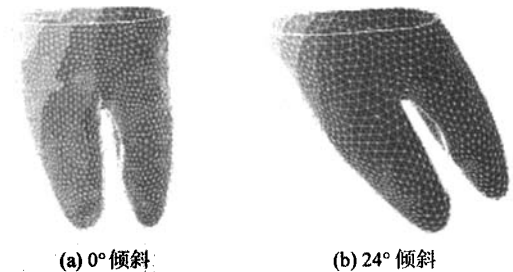


图 5 基于不同角度倾斜时牙周膜应力分布状态
Fig. 5 Stress distribution on tilted abutment of 0° and 24°

4 结论

后牙缺失后, 大约有 98% 的磨牙会发生不同程度的倾斜. 本文以反求网格实体、合理简化、正向再设计等方式建立了几何相似性模型; 同时, 以基于三角网格剖分的数据拆分法, 获得了邻接区域节点对应的有限元离散四面体模型, 为力学分析奠定基础.

在三维有限元分析中, 对比了典型基牙倾斜角度对牙周膜应力峰值和分布规律的影响. 证明非倾斜端基牙牙周膜应力状态对倾斜角度的变化不敏感. 而倾斜端基牙对均布、集中载荷, 特别是近远中方向的扭矩非常敏感, 基牙角度在 $18^\circ \sim 24^\circ$ 倾斜时, 牙周膜上的应力极值一方面过大, 另一方面应力分布趋向于局部集中. 由此可见, 在采用固定桥进行义齿修复时, 基牙的倾斜角度不要过大; 在修复后, 患者要避免用桥体的单侧大力咀嚼, 以免对基牙牙周膜造成创伤.

参考文献:

- [1] 徐君伍. 口腔修复学[M]. 第 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 1994: 1-401.
- [2] HOOD J A, FARAH J W, CRAIN R G. Modification of stresses in alveolar bone induced by a tilted molar[J]. J Prosthet Dent, 1975, 34(4): 415-421.
- [3] YANG H S, THOMPSON V P. A two-dimensional stress analysis comparing fixed prosthodontic approaches to the tilted molar abut[J]. Int J Prosthodont, 1991, 4(5): 416-424.
- [4] 李长义, 史书俊, 侯晓明, 等. 倾斜基牙固定修复中牙周组织受力与倾斜角度关系的实验研究[J]. 天津医药, 2000, 28(12): 732-734.
- LI Chang-yi, SHI Shu-jun, HOU Xiao-ming, et al. Relationship between angle of tilted abutment and stress distribution of

- periodontal tissue in fixed prosthesis[J]. Tianjin Medical Journal, 2000, 28(12): 732-734. (in Chinese)
- [5] 段媛媛, 王忠义, 张少锋, 等. 固定义齿倾斜斜牙牙周应力分布的三维有限元研究[J]. 临床口腔医学杂志, 2003, 19(11): 667-669.
- DUAN Yuan-yuan, WANG Zhong-yi, ZHANG Shao-feng, et al. Stress distribution in the dental surrounding tissues of the tilted mandibular molar as a fixed bridge abutment: a three-dimensional finite element analysis[J]. Journal of Clinical Stomatology, 2003, 19(11): 667-669. (in Chinese)
- [6] 闫贺庆, 尚鹏, 于力牛. 用层切法反求牙冠殆面[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(1): 37-43.
- YAN He-qing, SHANG Peng, YU Li-niu, et al. Reconstruction of the occlusal surface by layer scan method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(1): 37-43. (in Chinese)
- [7] 熊亚茸, 陈新, 刘洪臣, 等. 种植体在上颌骨复合体应力的三维有限元分析[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2002, 3(1): 8-11.
- XIONG Ya-rong, CHEN Xin, LIU Hong-chen, et al. Comparison of stresses of implant and natural teeth in maxillary complex[J]. Chinese Journal of Prosthodontics, 2002, 3(1): 8-11. (in Chinese)
- [8] GARLAND M, HECKBERT P. Surface simplification using quadric error metrics[C]// Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics. New York: ACM, 1997: 209-216.
- [9] LOUNSBERRY M, DEROSE T D, WARREN J. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type[J]. ACM Transactions on Graphics, 1997, 16(1): 34-73.
- [10] CAO W Q, BAO H J, PENG Q S. A level of detail model by merging near-coplanar faces on Gauss spheres[J]. Journal of Software, 2000, 11(12): 1607-1612.
- [11] 韩景芸, 李彦生, 费仁元, 等. 后牙复合树脂黏接桥三维有限元建模方案研究与分析[J]. 北京生物医学工程, 2006, 25(3): 231-234.
- HAN Jing-yun, LI Yan-sheng, FEI Ren-yuan, et al. The three dimensional modeling of composite resin-bonded fixed partial dentures for FEA analysis[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2006, 25(3): 231-234. (in Chinese)
- [12] SCHNEIDER J, GEIGER M, SANDER F G. Numerical experiments on long-time orthodontic tooth movement[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2002, 121: 257-265.

Action of Abutment Tilted on the Periodontical Ligament: 3-D Finite Element

HAN Jing-yun¹, FEI Ren-yuan¹, LI Yan-sheng¹, XU Zhi-ming²

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Department of Stomatology, PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

Abstract: This paper conducts a three-dimensional finite element analysis of stress distribution of the periodontical ligament as abutment tilts. Comparing with surface solid modeling method, mesh modeling technology is applied to reconstruction of fixed partial denture and periodontal tissues. Through this method, comparability of model with really biologic model has been proved and models of different tilted angles can be easily derived from the model constructed first. To investigate the stress distribution of periodontical ligament on different tilted angle of abutments by using three-dimensional finite element method, four team of models are constructed when tiled abutments is 0 degree, 12 degrees, 18 degrees, 24 degrees and 30 degrees separately. Meanwhile three types of occlusal forces are loaded respectively and the following conclusions were drawn: 1) Varieties of tilted angle in the same loadcase have small influence on stress distribution of non-tiled pre-molar; 2) For tiled molar, stress value of periodontical ligament is the biggest when the tiled angle is 24°; 3) Stress concentration is more remarkable on periodontical ligament of molar when tiled angle increases.

Key words: fixed partial denture; tilted abutment; three dimensional finite element analysis; triangular mesh