

文章编号:1004-7220(2013)05-0542-06

# 动态咬合下牙周膜的生物力学分析

刘旺玉<sup>1</sup>, 陈雪林<sup>1</sup>, 蔡斌<sup>2</sup>, 项露赛<sup>2</sup>, 吴华锋<sup>1</sup>, 何旭顺<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641;

2. 中山大学光华口腔医学院·附属口腔医院, 广东省口腔医学重点实验室, 广州 510055)

**摘要:** **目的** 分析动态咬合下加载时间、角度因素对牙周膜应力和位移的影响。**方法** 采用逆向工程技术建立牙周膜厚度为0.2 mm的下颌前牙—牙周膜—牙槽骨的三维模型,在与牙体长轴分别成0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°,由颊侧向舌侧的动态咬合载荷作用下,分析不同周期下牙周膜的应力、位移变化状况。**结果** 在单周期下,由不同角度载荷引起的牙周膜最大残余应力极大值与最小值之比为5.5,最大位移极值之比为8.1;由5周期引起的最大位移极大值与极小值之比在1.02~1.35内随载荷角度增加;由不同角度载荷引起的最大残余应力极大值与极小值之比在1.86~3.00内随咬合周期数增加;不同角度下最大应力均集中在颈缘舌侧区域,最大残余应力位置分布随时间在颈缘不同部位间变动;0°载荷下牙根的应力累积最严重。**结论** 下前牙固定桥基牙选择的临床应用中,应注意牙周膜应力累积情况以及最大残余应力分布的不确定性;临床治疗中,应避免对牙齿施加大角度载荷,尽量减少连续咬合较硬食物。

**关键词:** 牙周膜; 动态咬合; 有限元分析; 载荷; 生物力学

**中图分类号:** R 783.5 **文献标志码:** A

## Biomechanical analysis on periodontal ligament in dynamic jaw

LIU Wang-yu<sup>1</sup>, CHEN Xue-lin<sup>1</sup>, CAI Bin<sup>2</sup>, XIANG Lu-sai<sup>2</sup>, WU Hua-feng<sup>1</sup>,HE Xu-shun<sup>2</sup> (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guanghua School of Stomatology, Hospital of Stomatology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510055, China)

**Abstract: Objective** To investigate the influences of loading time and loading angle on the stress, displacement of human periodontal ligament in dynamic jaw. **Methods** The three-dimensional assembly model of the mandible front teeth, periodontal ligament and alveolar bone was reconstructed by using the reverse engineering technology. The thickness of periodontal membranes was 0.2 mm. The stress, displacement at different positions of the periodontal ligaments during different jaw cycles were analyzed under dynamic load in the direction from bucca to tongue side with 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° angle to the long axis of the tooth. **Results** During one jaw cycle, the ratio of the maximum to minimum value of the maximum residual stress due to different loading angles was 5.5, and the ratio of the maximum to minimum value of the maximum displacement was 8.1. The ratio of the maximum to minimum value of the maximum displacement which was caused by five jaw cycles was increased in the range from 1.02 to 1.35 with the increase of loading angles. The ratio of the maximum to minimum value of the maximum residual stress which was caused by different loading angles was increased in the range from 1.86 to 3.00 with the increase of jaw cycles. The location of the maximum stress was at the tongue side of the cervical margin at different loading angles, and the location of the maximum residual stress was distributed at different positions of the cervical margin. Most stress was accumulated at the root of the periodontal ligament under the 0° dynamic load. **Conclusions** The situation of the accumulated residual stresses and the uncertainties in the distribution of the maximum residual stresses should be observed in the clinical choice of mandible incisors fixed by bridge abutments; large angle force applied to the tooth was harmful to the periodontal ligament and rapid succes-

收稿日期:2012-10-29; 修回日期:2012-11-23

基金项目:广东省教育部产学研结合项目(2010B080701101)。

通信作者:蔡斌,副教授, Tel: (020) 83802802; E-mail: bincai37@gmail.com。

sion of chewing hard food should be avoided as much as possible during the clinical treatment.

**Key words:** Periodontal ligament; Dynamic jaw; Finite element analysis; Load; Biomechanics

行使咀嚼功能的口颌系统在功能性与控制性肌肉力系作用下运动,其运动过程中的生物力学系统以及牙周膜的力学性能都较为复杂。直接力学实验无法作用于人体,而计算机技术的发展使得有限元法能够分析临床治疗中关心的任何位置较贴近实际的受力情况<sup>[1-3]</sup>。

动态咬合时,各肌肉力系是保持人体各肌肉力的激活函数<sup>[4]</sup>,建立的计算各肌肉束输出力的评价函数<sup>[5]</sup>主要与人体关节力、肌力总和或与肌肉方向、横截面积、咀嚼加速度导数、最小能耗等相联系,以建立不同目标值的评价函数<sup>[6-9]</sup>,求解咀嚼时肌肉的输出力。其产生的咬合力主要通过牙齿作用在牙周膜上,而牙周膜的反应最为敏感。现有学者针对牙周膜的受力分析主要集中在牙齿固定桥基牙牙周膜、不同静态载荷下对牙周膜的应力位移<sup>[10]</sup>,也有研究厚度、牙位、属性等因素对牙周膜在不同载荷下的影响<sup>[11-14]</sup>。只有部分学者采用动态分析法分析牙周膜在咀嚼运动中的受力情况<sup>[12,15]</sup>,而针对牙周膜模拟人体行使咀嚼功能下动态咬合载荷作用下的生物力学分析鲜有报道,其中下颌前牙牙周膜受到的咬合载荷与个人、食物等因素相关联。Iramaneerat 等<sup>[12]</sup>采用动态有限元分析的方法,分析不同模型随时间变化的牙周膜动力响应,结果显示高阻尼的 ISW 模型能够承受咬合时转换的冲击力;马达等<sup>[15]</sup>对下颌前牙固定桥基牙牙周膜在动态载荷下的三维有限元分析,结果显示动态载荷、静态载荷下牙周膜的应力变化达到 60% ~ 75%。由此可见,人体咬合过程各肌肉力的输出产生动态载荷,通过下前牙作用在牙体组织中最敏感的牙周膜,而口腔的修复体都是在动态中行使功能的;下前牙作为固定桥基牙,其牙周膜的位移与应力情况直接影响固定桥修复治疗效果。因此,分析下颌前牙牙周膜在动态咬合下的应力、位移状况能够为临床治疗提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 三维模型的建立

选择 1 名牙周组织完整、下颌前牙牙齿排列完整的成年健康女性作为采集数据对象。使用螺旋扫

描 CT 机采集人体头部三维信息获得 DICM 格式数据,采用逆向工程的方法建立下颌前牙—牙周膜—牙槽骨的三维有限元装配模型,其中牙周膜的厚度为 0.2 mm<sup>[16]</sup>(见图 1)。

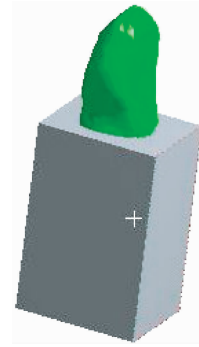


图 1 三维装配模型  
 Fig. 1 3D assembly model

### 1.2 参数的设置与加载

本文所涉及的生物材料属性都简化为连续、各项同性、均质,线弹性材料,其中考虑牙周膜的黏性阻尼,阻尼系数为 0.3<sup>[17]</sup>。具体属性设置见表 1。

表 1 材料属性<sup>[17-19]</sup>

Tab. 1 Material parameters of the finite element model

部位	弹性模量/MPa	泊松比	阻尼系数
牙冠(包括牙釉质、牙本质)	51 720	0.3	—
牙根(牙本质)	18 620	0.3	—
牙周膜	3.45	0.45	0.3
牙槽骨	13 800	0.3	—

在 Workbench 软件中的 Mesh 模块中设置牙周膜体、与牙周膜接触的表面网格尺寸为 0.1 mm,整体模型网格尺寸为 0.8 mm 划分网格,牙齿、牙周膜、牙槽骨之间的接触为摩擦,牙周膜变形为小变形<sup>[20]</sup>。

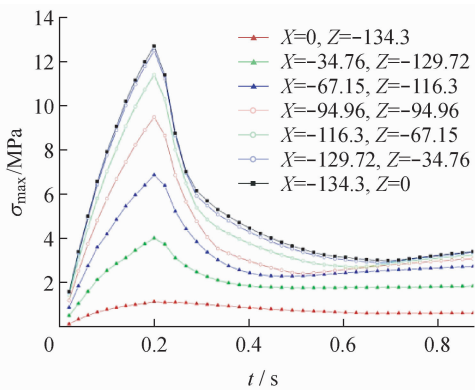
环境设置中,有限元模型中牙槽骨底面的自由度全部约束。为了避免计算咬合力评价函数的不同带来咬合力的差异,且口颌系统咀嚼时产生的咬合载荷值与牙位排列、食物韧性、个人健康状况相关<sup>[6-8]</sup>,依据中国正常青年合力平均加载量情况,设定下前牙动态咬合加载量为 134.3 N<sup>[21]</sup>;咬合载荷

设定为冲击载荷<sup>[22]</sup>、作用在通过牙齿质心的牙体长轴与牙齿顶部相交处,方向为从颊侧向舌侧<sup>[15,22]</sup>,分别与牙体长轴成 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$ ;咀嚼周期平均时间为 $0.875\text{ s}$ <sup>[21]</sup>,其中咬合接触平均时间为 $0.2\text{ s}$ ,在连续5个周期内加载。求解中以临床关心的牙周膜颈缘唇侧、舌侧、近中、中部、根尖位置的 Von Mises 应力以及牙周膜的极值应力与位移作为输出项。

## 2 结果

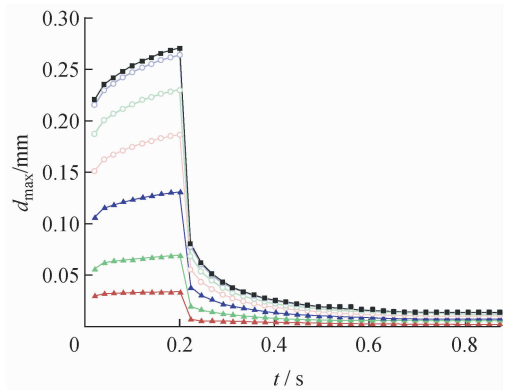
### 2.1 牙周膜在单周期内动态载荷的最大应力、位移以及分布情况

在不同角度载荷作用下,牙周膜的最大应力 $\sigma_{\max}$ 随时间的变化趋势一致,即在加载时间 $0.2\text{ s}$ 之



(a) 最大应力-时间曲线

前,应力随时间增加而显著上升;在卸载时间 $0.2\sim 0.3\text{ s}$ ,应力呈现快速下降趋势,其中下降的幅度随着加载角度增加而增加;在卸载时间 $0.3\sim 0.875\text{ s}$ ,应力值有略微上升趋势后较为平稳(见图2(a))。随着角度的增加, $\sigma_{\max}$ 分别为 $1.13$ 、 $4.00$ 、 $6.85$ 、 $9.47$ 、 $12.36$ 、 $12.47$ 、 $12.67\text{ MPa}$ ,其中 $\sigma_{\max}$ 极大值与极小值之比为 $11.2$ ;残余应力分别为 $0.62$ 、 $1.84$ 、 $2.72$ 、 $3.07$ 、 $3.25$ 、 $3.36$ 、 $3.39\text{ MPa}$ ,残余应力极大值与极小值之比为 $5.5$ 。最大位移 $d_{\max}$ 呈现与应力类似的趋势(见图2(b)),由不同角度引起的 $d_{\max}$ 极大值是极小值的 $8.1$ 倍;咬合结束后残余位移的极值相比达到 $7.2$ 倍。故加载角度对最大应力(位移)、残余应力(位移)均有较大的影响,且该影响随着角度的增加而减少。



(b) 最大位移-时间曲线

图2 牙周膜单周期的最大应力、位移分布

Fig.2 Maximum stress and displacement distribution of the periodontal ligament in one cycle (a) Maximum stress-time curve, (b) Maximum displacement-time curve

在不同角度的载荷下,牙周膜 $\sigma_{\max}$ 集中在牙周膜舌侧方向。 $0^\circ$ 载荷下, $\sigma_{\max}$ 集中在牙周膜舌侧颈缘与牙槽骨一侧;加载角度大于 $15^\circ$ , $\sigma_{\max}$ 在牙周膜的牙齿一侧;残余应力随着加载角度变化在牙周膜的唇侧与舌侧变动。 $d_{\max}$ 与 $\sigma_{\max}$ 的分布有着类似的规律,但是残余位移在牙周膜颈缘舌侧、近中与唇侧的中部、唇侧移动;极值应力、位移都在牙周膜的颈缘部位。这与文献[11]中牙周膜应力集中在颈缘的结果一致。

### 2.2 牙周膜颈缘舌侧、唇侧、近中、中部、根尖的应力状况分析

随着加载角度的增加,应力在牙周膜颈缘舌侧、唇侧、近中位置的趋势大致相同(见图3(a)~

(c))。牙周膜舌侧应力累积最大值增加; $0^\circ$ 载荷下,舌侧应力相对比较均匀,最大值为 $0.91\text{ MPa}$ ,最小值为 $0.45\text{ MPa}$ ;  $15^\circ$ 载荷下,牙周膜颈缘舌侧应力为 $1.31\text{ MPa}$ 。唇侧颈缘处的应力: $0^\circ$ 载荷下, $\sigma_{\max}$ 为 $0.86\text{ MPa}$ ,最小值为 $0.48\text{ MPa}$ ;  $90^\circ$ 载荷下,第4周期咬合接触结束达到最大值 $4.87\text{ MPa}$ ;  $75^\circ$ 载荷下,第5周期结束时的最大残余应力值为 $2.69\text{ MPa}$ 。小角度载荷下,牙周膜近中颈缘处应力在整个咬合过程中都相对比较均匀;  $90^\circ$ 载荷下,对牙周膜近中颈缘处应力影响最大,残余应力最大值为 $2.94\text{ MPa}$ ,咬合的累积为 $360\%$ 。故多周期加载时,不同时间点对应的残余应力极值与加载角度之间的关系由于牙周膜的阻尼作用<sup>[15]</sup>造成不确定,但不同载荷引起

的应力累积随着咬合周期的增加明显上升;不同角度载荷引起的应力在不同的时间点达到最大值; $\sigma_{\max}$ 随着角度的增加而增加。

牙周膜中部应力结果(见图3(d)):  $t = 0.875\text{ s}$ ,  $30^\circ$  载荷下残余应力  $1.04\text{ MPa}$  为极大值;随后咬合结束时,  $0^\circ$  载荷下残余应力分别为  $0.87$ 、 $0.89$ 、 $0.89$ 、 $0.42\text{ MPa}$ ;  $45^\circ$  载荷下出现应力最大值为  $1.5\text{ MPa}$ ;  $90^\circ$  载荷下应力最大值为  $0.86\text{ MPa}$ 。由加载角度引起的在不同时间点中部应力随时间的变化

没有一致的规律。

牙周膜根尖的应力值随着角度增加先减少、后增加(见图3(e))。由加载角度改变引起  $\sigma_{\max}$  分别为  $1.42$ 、 $1.19$ 、 $0.91$ 、 $0.74$ 、 $0.68$ 、 $0.6$ 、 $0.89\text{ MPa}$ , 极大值与极小值之比为  $2.47$ ;  $0^\circ$  载荷下, 第2个咬合周期内应力达到最大值  $1.42\text{ MPa}$ , 残余应力极大值与极小值之比为  $1.9$ , 牙根的应力一直处于较大值, 造成牙周膜损伤<sup>[20]</sup>。

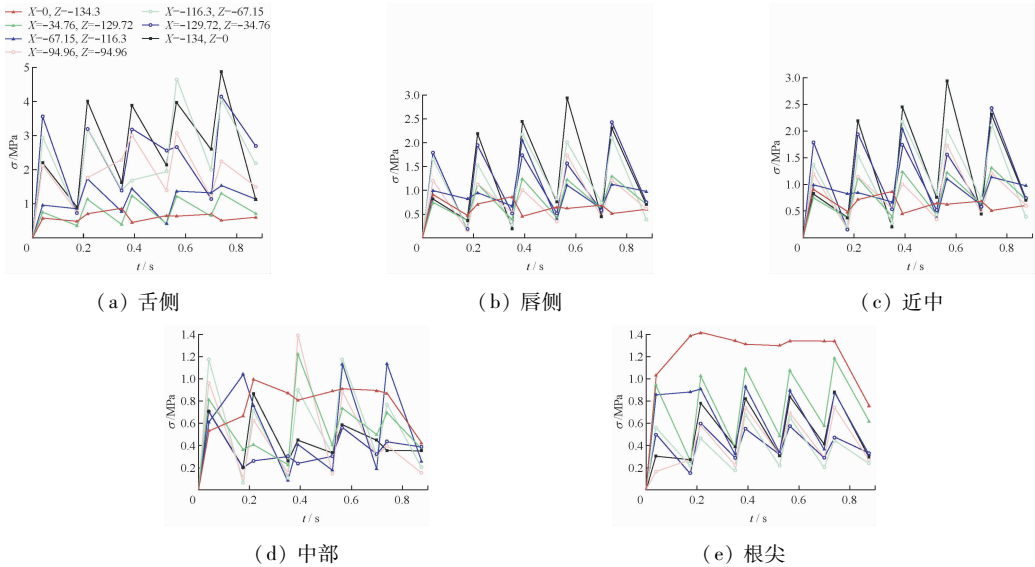


图3 牙周膜不同位置应力—时间曲线

Fig.3 Stress-time curves of the periodontal ligament in different positions (a) In tongue side, (b) In bilabial side, (c) In mesial side, (d) In the middle, (e) In the bottom

### 2.3 牙周膜在多个周期的最大位移、应力及分布

牙周膜的  $d_{\max}$  随着角度增加而增加,但增加的速度变缓,这可能与牙体长轴垂直方向的力增加幅度变小相关<sup>[13]</sup>(见图4)。在5个周期内不同角度载荷下的最大位移极大与极小值之比分别为  $1.02$ 、 $1.25$ 、 $1.33$ 、 $1.34$ 、 $1.35$ 、 $1.35$ 。咬合接触结束时  $\sigma_{\max}$  为极大值,位移均增加  $0.2\ \mu\text{m}$ ;由不同角度引起的在每个咬合周期内的最大残余位移有  $1.2\% \sim 35\%$  增加,且随载荷角度的增加,增加幅值减少,更加不均匀。第1周期内位移累积值达到  $35\%$ ,随后累积量减小;  $90^\circ$  载荷下位移累积最大,  $d_{\max}$  增加  $5\ \mu\text{m}$ ;最大残余位移累积  $12\ \mu\text{m}$ ,累积幅度达  $252\%$ 。牙周膜在多个周期内的应力变化状况与位移类似:随着载荷角度的增加,在5个周期内的最

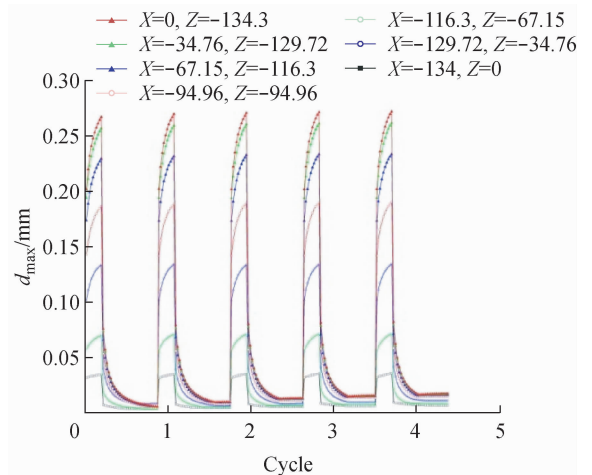


图4 牙周膜多周期最大位移-时间曲线

Fig.4 Maximum displacement-time curves of the periodontal ligament during multi-cycle

大残余应力极大值与极小值之比分别为 1.86、2.37、2.77、2.93、3.00。因此,临床治疗中应注意对牙齿施加载荷的方向对残余应力的影响较大。

由加载角度变化引起咬合周期接触结束时  $d_{\max}$  的位置在颈缘舌侧的近中、远中方向之间移动,随咬合周期的数目增加,  $d_{\max}$  的位置由牙周膜舌侧向牙周膜颈缘舌侧偏下处、或者颈缘唇侧移动;由加载角度改变引起最大残余位移的位置在牙周膜的颈缘远中与颈缘舌侧的中部、颈缘远中移动,随咬合周期的增加,  $d_{\max}$  累积的位置由颈缘舌侧向唇侧移动。在动态咬合时,牙周膜  $d_{\max}$  位置集中的舌侧颈缘,最大残余位移分布在颈缘。

### 3 讨论

本文采用 CT 进行超薄扫描采集数据,以标准 Dicom 格式存储传输到 Mimics 软件中建立有限元模型,在逆向软件中对牙齿、牙周膜以及牙槽骨模型进行细致划分,完成复杂实体的重建,保证模型与实物有较高的几何相似性<sup>[23]</sup>。将各种组织组织假设为连续、均质、同性、线弹性的材料,分析牙周膜各部位的瞬间应力、位移是能基本满足要求的<sup>[2]</sup>;基于冲击载荷较大时会引起牙齿在牙周膜内的滑移<sup>[13,24]</sup>,将牙周膜与牙齿、牙槽骨的连接方式设置为摩擦;在网格的划分中尤其注意了牙周膜体网格的划分与接触面网格尺度的一致性,减少了网格的畸变;载荷设定为冲击载荷 134.3 N,周期咬合接触周期为 0.2 s,能够准确地动态模拟咀嚼时牙周膜的受力<sup>[22]</sup>;考虑到具体模型阻抗中心的差异,加载部位设置在通过牙体质心长轴与牙齿顶部交界点,这与马达等<sup>[15]</sup>当加载部位为牙体与桥体切缘中央等部位时,与牙体长轴平行对牙周膜颈缘应力较垂直载荷下应力要小的结论一致。因此,有限元模型、参数设置能够较准确完成模拟动态咀嚼下对前牙的生物力学分析。

牙周膜应力-时间分析结果显示,牙周膜  $\sigma_{\max}$  分布随着角度的增加依次下降,与牙体长轴平行载荷比垂直载荷位移要少,  $\sigma_{\max}$  均分布在颈缘,这与文献[14-15]中的研究结论一致。牙周膜  $\sigma_{\max}$  位置接近牙周膜的最高点,0°载荷对牙周膜影响比其他载荷要少;另外在 15°载荷下的位移为 0.07 mm,已经能够引起牙周膜损伤<sup>[25]</sup>,若要改善牙周膜的受力情

况,需要减少加载角度或者载荷。随着加载角度的变化,牙周膜  $\sigma_{\max}$  由牙周膜内部向外移动,  $\sigma_{\max}$  大小呈递减分布,依次为颈缘、中部、牙根;这与马达等<sup>[14]</sup>报道牙周膜表面应力分布为根中最大、颈缘次之、牙根最小有所差别,可能是由有限元模型参数取值差异造成的;但与樊瑜波等<sup>[26]</sup>牙周膜高应力出现在牙颈部与牙根中部之间的结论一致,并不影响本文对动态咬合下牙周膜生物力学分析。咬合周期结束都存在残余应力,残余应力的大小随着角度改变而不同。随着加载角度的增加,最大应力(位移)与残余应力(位移)均由牙周膜舌侧外部向内部移动,造成牙体组织的松动在牙槽骨移向牙齿一侧。

在角度大于 15°的载荷作用下,牙周膜颈缘各位置应力的累积与释放都具有相似的规律;90°载荷下应力为极大值,但不同时间残余应力的极值与加载角度关联较小,这与牙周膜对冲击载荷较强的缓冲作用相关<sup>[24]</sup>;0°载荷下,咬合接触结束时牙周膜的应力仍有所增加,这与文献[15]报道冲击载荷在较短的时间未完全作用到牙周膜的结果类似。咬合周期结束时残余应力极值大小随时间有所增加,这与文献[15]结果一致。显然不同位置应力累积会造成牙周膜损伤,在临床治疗时应注意动态咬合对牙周膜根尖、中部、颈缘处的应力累积影响。连续咬合时最大位移均有较大的增加;应力分布随着时间在牙周膜不同位置移动,  $\sigma_{\max}$  集中在舌侧,最大残余应力在颈缘的不同位置,说明连续咬合下牙周膜的受力情况与非连续咬合下或采用静态载荷模拟咀嚼时牙周膜的受力情况<sup>[15]</sup>均不同,连续快速动态咬合增加牙周膜的位移,牙齿的松动随加载角度增加,影响固定桥修复治疗效果<sup>[27]</sup>,增加牙齿矫正、口腔修复的难度。

### 4 结论

(1) 加载角度对动态咬合下牙周膜  $\sigma_{\max}$  影响较大。0°载荷下,牙周膜的应力累积与释放作用较为明显;当载荷角度大于 45°时,  $\sigma_{\max}$  增加变缓;90°载荷下,牙周膜的最大应力、位移值最大。

(2) 加载时间对牙周膜的最大残余应力影响较大。30°、75°载荷下,牙周膜颈缘唇侧、舌侧、近中的应力较大;0°、45°载荷下,牙周膜根部与中部残余应力较大;加载角度对牙周膜不同位置的应力累积影响较小。

(3) 随加载角度增大,牙周膜  $\sigma_{\max}$  与  $d_{\max}$  的分布区域由牙周膜舌侧的外表面向内表面转移;随加载时间增加,最大残余应力极值部位在舌侧与唇侧之间变动,最大残余应力集中部位具有不确定性。

## 参考文献:

- [1] Thresher RW. The stress analysis of human teeth [J]. *J Biomech*, 1973, 6(5): 443-449.
- [2] 徐雪军,郑育峰. 口腔生物力学问题有限元分析的研究进展[J]. *北京大学学报*, 2006, 42(3): 412-419.
- [3] Yamaguchi GT, Moran DW, Sit J. A computationally efficient method for solving the redundant problem in biomechanics [J]. *J Biomech*, 1995, 28(8): 999-1005.
- [4] Van Eijden TM, Korfage JA, Brugman P. Architecture of the human jaw-closing and jaw-opening muscles [J]. *Anat Rec*, 1997, 248(3): 464-474.
- [5] de Groot JH, Rozendaal LA, Meskers CG. Isometric shoulder muscle activation patterns for 3-D planar forces: A methodology for musculo-skeletal model validation [J]. *Clin Biomech*, 2004, 19(8): 790-800.
- [6] Osborn JW, Baragar FA. Predicted pattern of human muscle activity during clenching derived from a computer assisted model: Symmetric vertical bite forces [J]. *J Biomech*, 1985, 18(8): 599-612.
- [7] Flash T. The coordination of human movements: An experimentally confirmed mathematical model [J]. *J Neurosci*, 1989, 5(7): 1688-1703.
- [8] Medler S, Hulme K. Frequency-dependent power output and skeletal muscle design [J]. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 2008, 152(3): 407-417.
- [9] Davy DT, Audu ML. A dynamic optimization technique for predicting muscle forces in the swing phase of gait [J]. *J Biomech*, 1987, 20(2): 187-201.
- [10] 牟雁东,樊瑜波,刘展. 基牙数目对游离端附着体义齿支持组织应力分布的影响[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(2): 141-145.
- Mu YD, Fan YB, Liu Z. Influence of various abutment number on stress distribution in the attachment denture supporting tissue [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(2): 141-145.
- [11] Poppe M, Bourauel C, Jager A. Determination of the elasticity parameters of the human periodontal ligament and the location of the center of resistance of single-rooted teeth a study of autopsy specimens and their conversion into finite element models [J]. *J Orofac Orthop*, 2002, 63(5): 358-370.
- [12] Iramaneerat K, Hisano M, Soma K. Dynamic analysis for clarifying occlusal force transmission during orthodontic archwire application: Difference between ISW and stainless steel wire [J]. *J Med Dent Sci*, 2004, 51(1): 59-65.
- [13] 张山川,陈新民,周玘,等. 不同牙周膜厚度对桩核-牙根联合体抗折力学性能的影响[J]. *华西口腔医学杂志*, 2007, 25(1): 93-96.
- [14] Hobmann A, Kober C, Radtke T. et al. Feasibility Study about finite element simulation of the dental periodontal ligament in vivo [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(1): 26-30.
- [15] 马达,唐亮,潘燕环. 动态载荷下下前牙固定桥基牙牙周膜的三维有限元法分析[J]. *华西口腔医学杂志*, 2007, 25(6): 591-594.
- [16] 郭玉杰,汤文成,林汤毅. 基于有限元法的前牙内收牙周膜应力分析[J]. *CAD/CAM与制造业信息化*, 2010, 10: 60-62.
- [17] Ward IM. 固体高聚物的力学性能[M]//徐懋,漆宗能,译. 2版. 北京: 科学出版社, 1988: 92.
- [18] 李明勇,李斌,马轩祥,等. 模型转化法构建牙齿的三维有限元模型[J]. *实用口腔医学杂志*, 2003, 19(2): 151-153.
- [19] 周书敏,吴仲谋. 应用有限单元法对下颌磨牙不同高度的牙周组织的应力分析[J]. *北京医学院学报*, 1984, 16(4): 293-298.
- [20] 潘燕环,马达,唐亮,等. 牙周膜动力分析的几个问题[J]. *实用口腔医学杂志*, 2004, 20(6): 661-664.
- [21] 皮昕. 口腔解剖生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004: 250-258
- [22] 李晓宇,左雯鑫,朱嘯,等. 静、动态载荷下牙种植体骨内段位移比较的三维有限元分析[J]. *暨南大学学报(医学版)*, 2010, 31(4): 397-402.
- [23] 王野平,林小英,周慧峰. Mimics 和 Geomagic 辅助下建立固定义齿的有限元模型[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6): 433-438.
- Wang YP, Lin XY, Zhou HF. Finite element model of fixed denture aided by Mimics & Geomagic [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6): 433-438.
- [24] 李天豪,束蓉. 牙周膜有限元分析的研究现状[J]. *口腔医学研究*, 2009, 25(2): 232-233.
- [25] 孙珍,于海洋. 牙体种植动度的研究进展[J]. *国际口腔医学杂志*, 2006, 33(4): 314-316.
- [26] 樊瑜波,张晓峰,唐高岩. 生理荷载作用下上颌中切牙牙周膜的应力分布的有限元研究[J]. *生物医学工程杂志*, 1999, 16(1): 21-24.
- [27] 樊瑜波. 口腔生物力学[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(2): 119-120.
- Fan YB. Dental biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(2): 119-120.