

## 牙周膜弹性模量的生物力学测定

李九军<sup>1\*</sup> 张静<sup>1</sup> 陈凤山<sup>2</sup>

(1. 安阳市口腔医院正畸科 河南 安阳 455000; 2. 上海同济大学口腔医学院正畸科)

**[摘要]** 目的:探索迅速推导牙周膜生物力学属性的方法。方法:在知情同意的前提下,选取 40 名正畸治疗过程中的患者,其中男 20 名,平均年龄 23.3 岁。女 20 名,平均年龄 22.85 岁。针对每名患者建立以右侧上颌第一磨牙和第二前磨牙为支抗拉尖牙向后的三维有限元加力模块,利用牙齿的移动距离来反求不同个体的牙周膜弹性模量的大小。结果:在 100 g 正畸力的作用下,男性患者的牙周膜弹性模量在 0.09~0.43 MPa 之间,平均为 0.230 MPa;女性患者的牙周膜弹性模量在 0.14~0.41 MPa 之间,平均为 0.251 MPa,性别之间没有统计学差异。结论:提供了一个可以模拟牙周膜粘弹性和各向异性的方法和数值,使个体牙周膜的生物机械属性尽可能的量化。

**[关键词]** 三维有限元 牙周膜 弹性模量

**[中图分类号]** R783.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671—7651(2014)11—1099—04

**DOI:**10.13701/j.cnki.kqxyj.2014.11.023

**Estimation of the PDL Elastic Modulus in Chinese by Finite Element Method.** LI Jiu-jun, ZHANG Jing, CHEN Feng-san. Department of Orthodontics, Stomatologic Hospital of Anyang. Anyang 455000

**[Abstract]** **Objective:** To explore an effective way to derive the PDL biomechanical properties rapidly. **Methods:** After the informed consents were made, 40 patients in the during orthodontic treatments were selected, the average age of 20 male patients were 23.3 years old, the average of 20 female patients were 22.85 years old. For each patient, three-dimensional finite element model of the right maxillary first molar and second premolar, which were used as anchorage for pulling canine backward, were established. The tooth movement distance was used to explore the periodontal membrane elastic modulus of different individuals. **Results:** Under 100g orthodontic force, male patients PDL elastic modulus were between 0.09 and 0.43Mpa, with an average of 0.230 Mpa; female patients with PDL elastic modulus were between 0.14 and 0.41Mpa, with an average of 0.251Mpa. There was no statistically significant difference between male and female patients. **Conclusion:** The value and method to stimulate the viscoelastic and anisotropic PDL was provided, and the bio-mechanical properties of individual PDL can be quantified as far as possible.

**[Key words]** Three-dimensional finite element Periodontal ligament(PDL) Elastic modulus

牙周膜的特性是正畸牙齿移动的生物学基础,因此对牙周膜生物机械性能的探索在口腔生物力学研究中占有十分重要的地位。然而目前的研究,在对牙周膜弹性模量赋值上还存在较大的分歧。无法对每一个体进行牙周膜弹性模量差异性赋值。因此,本实验采用有限元法对牙周膜的弹性模量进行了相应的研究。

### 1 材料与方法

1.1 样本来源 在知情同意的前提下,选取 40 名正畸治疗过程中的患者,其中男 20 名,平均年龄 23.3 岁。女 20 名,平均年龄 22.85 岁。并按照性

别进行分组,一对一配对编号。选择标准:矫治拔除上颌双侧第一前磨牙,其余牙齿数目及发育正常,已完成排齐整平,处于关闭间隙阶段,剩余拔牙间隙大于 2 mm,牙周组织健康。

1.2 计算机配置 CPU:inter(R)Core(TM) Duo CPU T2350 @ 1.86GHz,内存 3G,硬盘 120G。操作系统:Windows XP Professiona。

1.3 应用软件 1) Mimics 10.01 (Materialise 公司,比利时); 2) Geomagic Studio 8.0 (Raindrop Geomagic 公司,美国); 3) Ansys 11.0 (Ansys 公司,美国)。

1.4 CT 扫描 分别对每一位患者进行 CT 扫描,扫描对象取仰卧位,头部固定,前牙区轻咬一厚度约 4 mm 的蜡片,以解除上下颌牙列的重叠影像。扫描平面与眶耳平面平行。

作者简介 李九军(1981~),男,河南安阳人,硕士,主治医师,主要从事口腔正畸学的临床和基础研究工作。

\* 通讯作者 李九军, E-mail:jiujun\_2005@163.com

1.5 建立加力单位的有限元模型 通过 mimics, geomagic 软件建立以上颌右侧第一磨牙和第二前磨牙为支抗拉尖牙向远中的实体模型。然后再 Ansys 软件中进行网格划分,并设定边界条件,从而形成了三维有限元加力模块。

1.6 加力位移的测定见图 1 在未加力状态下,对男 20 名和女 20 名患者进行 CT 扫描,利用 mimics 软件分别测量第一磨牙与尖牙间的距离。然后对每名患者施加 100 g 拉尖牙向后的作用力,并对每名患者再次进行 CT 扫描,同样利用 mimics 软件分别在加力后 CT 图层上测量第一磨牙与尖牙间的距离。两者相减得出加力后牙齿移动的距离。测量方法:在 mimics 软件中,分别对加力前和加力后的 CT 固定截面图层进行处理,提取出第一磨牙、第二磨牙和尖牙的外形轮廓,然后分别在尖牙远中和第一磨牙和第二磨牙的近中作 3 条相互平行的外形轮廓线的切线 a、b 和 c,利用 mimics 软件中的测量工具分别对 a、c 和 b、c 之间的距离进行测量,然后两数值相减计算出第一磨牙和尖齿之间的距离。然后把加力前后测量出的第一磨牙和尖牙之间的距离相减,得出加力后牙齿移动的距离(即  $ac - bc$ )。

1.7 牙周膜弹性模量的黑箱测定

1.7.1 赋予材料属性见表 1 分别赋予牙槽骨、牙齿、托槽、弓丝材料属性和泊松比<sup>[1~3]</sup>。

表 1 材料属性  
Table 1 Material properties

材料	E/MPa	泊松比
牙槽骨	12200	0.3
牙齿	20000	0.3
牙周膜	x	0.45
托槽	200000	0.3

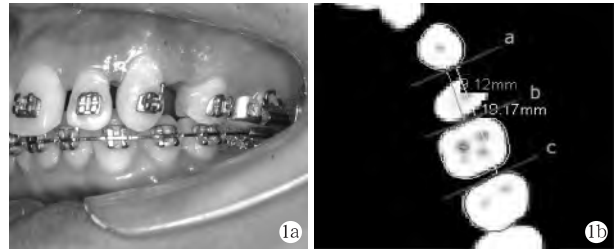
2 结果

2.1 男性牙周膜弹性模量的测定 牙周膜的泊松比设置为 0.45,其弹性模量从 0.2 开始反复测试,使牙齿实际移动距离和计算结果近似相等。误差控制在 0~0.05 mm 以内,见图 2、图 3。测得男性牙周膜的弹性模量,见图 4。

2.2 女性弹性模量的测定

2.2.1 女性患者牙齿加力后位移 按照男性患者加力方式对女性患者进行加力 100 g,测量加力后牙齿的位移。

2.2.2 按照同样的方法测量女性牙周膜的弹性模量,见图 5。



加力后的位移=未加力距离-加力后距离  
图 1 测量方法

Fig. 1 Measurement method

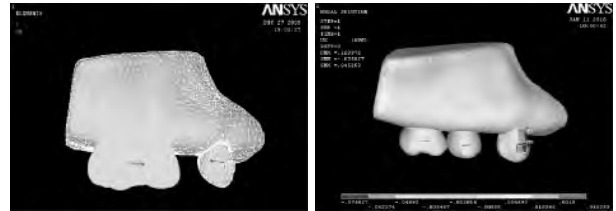


图 2 加力模型 图 3 加力后结果

Fig. 2 Force model Fig. 3 Forced result

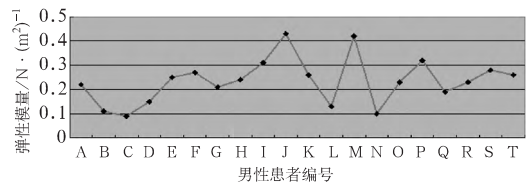


图 4 男性牙周膜弹性模量

Fig. 4 Results of male PDL elastic modulus

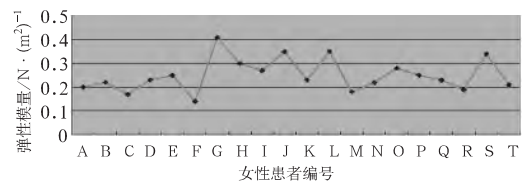


图 5 女性患者牙周膜弹性模量

Fig. 5 Results of female PDL elastic modulus

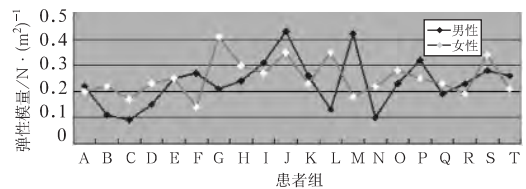


图 6 男女右侧牙周膜弹性模量对比

Fig. 6 Contrast of PDL elastic modulus between male and female

2.2.3 男性和女性牙周膜弹性模量的对比见图 6

对男性和女性的牙周膜弹性模量进行独立样本的 t 检验,验证男女牙周膜弹性模量是否有明显差异。经计算得  $t = -0.615$  对应  $P = 0.542 > 0.05$ ,说明男女之间弹性模量的差别没有统计学意义,也就是说牙周膜的弹性模量在男女之间没有性别差异。同时,从数据统计可以得出,中国人牙周膜弹性模量的

平均值为 0.24 MPa。

### 3 讨论

本实验通过逆向工程软件和力学分析软件建立了包括牙齿和牙周组织的牙齿移动的黑箱模型,通过对牙齿移动三维有限元模型施加载荷,来分析牙周支持组织的生物力学反应,并通过运算结果来反求个体牙周膜的弹性模量,从而实现了对于牙周膜的物理机械属性的初步探索。为模拟牙齿运动提供精确的数据,从而为牙齿移动的个体化有限元研究打下了初步的基础。

3.1 牙周膜属性的探讨 本实验模拟了临床上经常遇到的拉尖牙向后的加力模式。尽管牙周膜是一种粘弹性的生物学材料<sup>[4,5]</sup>,但是为了简化问题和计算,利用牙周膜的线弹性表现来反映正畸牙齿初始移动时牙周膜的非线性表现是有意义的<sup>[6]</sup>。所以本实验进行两项假设<sup>[7,8]</sup>:1)将模型中的各种材料和组织考虑为连续、均质、各向同性的线弹性材料。2)牙周膜的厚度是均匀一致的。

在实验加力的过程中发现第一次对牙齿施加载荷后,牙齿的位移总是显著大于第二次及随后加力后的移动位移,并且去除载荷后牙齿仍需 20 秒左右的时间恢复到原来的位置,这可能是与牙周膜材料的粘附性有关。所以对牙齿的第一次加力后的位移被去除,以减小牙周膜的粘附性对位移的影响。Parfitt<sup>[9]</sup>认为在对牙齿第一次加力时,牙齿的位移往往是较大的,随后的加力会遇到较大的牙周膜的抵抗,能近似反应牙周膜的线弹性,主要是因为第一次加力后牙齿的位移受到牙周膜的粘附性的影响。

本实验经过逆向推导计算,男性牙周膜的弹性模量在 0.09~0.43 MPa 之间,其平均值为 0.230 MPa,女性牙周膜得弹性模量在 0.14~0.41 MPa 之间,其平均值为 0.251 MPa,经过统计学分析显示男女的弹性模量没有明显差异,无统计学意义。同时男女患者的牙周膜弹性模量呈现明显的个体差异性。说明牙周膜的弹性模量与男女性别无关,同时个体之间存在着明显的个体差异性。这一结果得到了日本著名学者 Noriaki Yoshida<sup>[10]</sup>的证实,牙周膜的弹性模量约为 0.25 MPa,与本实验一致。然而,有的学者却得出不同的实验结果,Nishihira 和 J. S. Rees<sup>[11]</sup>分别认为牙周膜的弹性模量为 2.0~2.9 MPa,0.7 MPa 和 50 MPa。这些数值明显比本实验所得牙周膜弹性模量的数值大,这是因为他们分别选择的人类尸体或动物的牙周膜或牙齿—牙周膜—颌骨作为其研究样本的。由于牙周膜生物机械性能

在体外与体内存在显著的差异,所以导致实验结果的巨大差异性。牙周膜主要有牙周膜胶原纤维、细胞成分和组织液组成,当外界对牙周膜施加载荷后,牙周膜的变形是由胶原纤维的牵拉和细胞及组织液的压力等综合因素所决定。当把牙周膜制成标本后,组织液流出,胶原纤维和细胞被破坏,牙周膜不能表现出其原有的生物机械性能,处于一种病理的状态,所以体外的牙周膜生物机械性能的数值是不准确的。本实验采用临床治疗过程中的患者作为研究对象,保证了实验样本的可靠和真实性,并且患者牙周组织健康,从而确保了实验数据的合理性。

Tanner<sup>[12]</sup>认为年龄和疾病影响牙周膜的生物机械性能。Noriaki Yoshida<sup>[13]</sup>则认为牙周膜作为一种粘弹性材料,牙周膜的弹性模量与施加载荷的大小有关,在对上颌中切牙分别施加 0~0.25 N、0.5~1.0 N、1.0~1.5 N、1.5~2.0 N 范围的载荷时,牙周膜弹性模量分别设定为 0.12 MPa、0.25 MPa、0.44 MPa、0.69 MPa 是合适的。本实验是以临床上正畸治疗过程中的牙齿移动模型为研究对象,所选患者处于同一年龄段并且身体健康,从而保证了实验样本的年龄一致性和样本的组织健康性,所以不存在样本的取材差异,同时对所有个体施加的载荷均为 100 g,从而保证所有的加力模型是在同一前提下进行加力分析的。从结果上看,个体牙周膜的弹性模量存有较大范围的差异,从而证明不同个体牙周膜的弹性模量存在个体差异性。个体牙周膜的弹性模量在男女性别之间没有统计学差异,证明了牙周膜的弹性模量与性别无关。

### 参考文献

- [1] Shirin S, Richard V, Behnam M, et al. Effect of the crown design and interface lute parameters on the stress—state of a machined crown—tooth system: A finite element analysis [J]. *Dental Materials*, 2013, (29): e123—e131
- [2] Gallas M M, Abeleira M T, Fernandez J R, et al. Three—dimensional numerical Simulation of dental implants as orthodontic and chorage [J]. *European of Journal of Orthodontics*, 2005, 27(1): 12—16
- [3] Yukio Kojima, Hisao Fukui, Kuniaki Miyajima, et al. The effects of friction and flexural rigidity of the archwire on canine movement insliding mechanisms: A numerical simulation with a 3—dimensional finite element method [J]. *Am J Orthod Dentofacial orthop*, 2006, 130(3): 275. e1—10
- [4] Qian L, Todo M, Morita Y, et al. Deformation analysis of the periodontium considering the viscoelasticity of the periodontal ligament [J]. *Dent Mater*, 2009, 25(10): 1285—92
- [5] Papadopoulou K, Hasan I, Keilig L, et al. Biomechanical time dependency of the periodontal ligament: a combined ex-

- perimental and numerical approach [J]. Eur J Orthod, 2013, 35(6) : 811-8
- [6] Cattaneo P M, Dalstra M, Melsen B. The Finite Element-Method: a Tool to Study Orthodontic Tooth Movement [J]. J Dent Res, 2005, 84 (5) : 428-433
- [7] 吴佩蓉,朱宪春,闫森,等.上颌种植钉配合摇椅曲内收前牙的三维有限元应力分析[J].口腔医学研究,2012,28(9) : 888-890
- [8] 翟敬梅,常琛扬,夏琴香,等.基于逆向工程的个性化舌侧正畸矫治体系数字化设计[J].口腔医学研究,2012,28(9) : 900-902
- [9] Parfitt GJ. Measurement of the physiological mobility of individual teeth in an axial direction [J]. J Dent Res, 1960, 39 : 608-18
- [10] Noriaki Yoshida, Yoshiyuki Koga, Chien-Lun Peng, et al. In vivo measurement of the elastic modulus of the human periodontal ligament. Medical Engineering & Physics, 2001, 23 : 567-572
- [11] J. S. Rees, P. H. Jacobsen, Elastic modulus of the periodontal ligament [J]. Biomaterials, 1997, 18 : 995-999
- [12] Tanne, K., Yoshida, S., Kawata, T. et al, An evaluation of the biomechanical response of the tooth and periodontium to orthodontic forces in adolescent and adult subjects [J]. British Journal of Orthodontics, 1998, 25 : 109-15
- [13] Noriaki Yoshida, Yoshiyuki Koga, Chien-Lun Peng, et al. In vivo measurement of the elastic modulus of the human periodontal ligament [J]. Medical Engineering & Physics, 2001, 23 : 567-72
- [收稿日期:2014-03-04] (本文编辑 汪喻忠)

## 《广东牙病防治》杂志征稿及征订启事

《广东牙病防治》杂志(月刊)是由广东省口腔医院·南方医科大学附属口腔医院、广东省牙病防治指导中心主办的中华预防医学会系列杂志,是华南地区第一本也是目前唯一一本公开发行的纸质口腔医学专业学术期刊。刊号为 ISSN 1006-5245, CN 44-1407/R。已被中文科技期刊数据库、中国科技期刊综合评价指标体系数据库等收录。

本刊设有热点访谈、医案精粹、百花齐放、基础及应用研究、预防与社会医学、防治实践、口腔颌面外科、修复与正畸、新技术应用、护理、病例报告、综述等栏目。其中百花齐放栏目,为有显著创新性的文章开通快速发表通道。随正刊附赠的《牙科信息》副刊,开设牙科市场动态、晋升园地、医疗纠纷论坛等特色栏目,为读者提供多方面的牙科资讯。

欢迎广大作者来稿。《广东牙病防治》杂志网上投稿平台网址为 <http://gdyb.cbpt.cnki.net>。作者可以通过网站投稿并查询稿件处理情况。投稿步骤:登录《广东牙病防治》采编服务平台网站→点击左上方“作者投稿系统”→注册→填写个人资料→登录“作者投稿系统”即可。

欢迎广大读者订阅。全国各地邮局均可订阅,邮发代号 46-225。每月 20 日出版,定价为每册 5.00 元,全年 60 元。如错过邮局订阅时间,编辑部可办邮购。来款寄:广州市江南大道南 366 号《广东牙病防治》杂志编辑部(邮编 510280),请写清楚订阅者邮政编码、详细地址、姓名、订阅年度和份数。编辑部电话:020-84403311,传真:020-84445386, e-mail: [gdybfz@126.com](mailto:gdybfz@126.com)。

## 《口腔医学》杂志 2015 年征订启事

《口腔医学》杂志创刊于 1981 年,2003 年杂志进入中国科技论文统计源期刊,成为中国科技核心期刊,并被“中国科技期刊引证报告”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国科学引文数据库”、“中文科技期刊全文数据库”、“中国科技期刊全文数据库”、“万方数据库”、美国《化学文摘》(CA)及俄罗斯《文摘杂志》等国内外重要数据库收录。

本刊将继续遵循理论与实践相结合,普及与提高相结合的办刊方针,既注重基础研究,又注重实践经验,对有基金项目资助的论文,开辟“绿色通道”,优先发表,同时也优先选用对临床有指导意义的研究论文、经验体会、新技术交流等。本刊设有基础研究、临床研究、调查研究、病案分析、综述等栏目,欢迎投稿。

本刊为月刊,页码为 80 页,采用铜版纸图片彩色印刷,定价为 9.00 元/期。欢迎广大读者到当地邮局订阅,邮发代号 28-78。如未能及时订阅,也可直接与本刊编辑部联系。

地址:江苏省南京市汉中路 136 号,南京医科大学口腔医学院《口腔医学》杂志编辑部。邮政编码:210029;电话/传真:(025)86658322,85031902;E-mail: [kqyx@njmu.edu.cn](mailto:kqyx@njmu.edu.cn);网址: <http://www.stomatology.cn/>或 <http://kqyx.chinajournal.net.cn/>。