

文章编号 1004-924X(2013)07-1713-06

声表面波器件测量牙种植体微扭矩的三维有限元仿真

李 伟^{1*}, 王光宗¹, 杨 峰¹, 梁玉前¹, 汪 昆²

(1. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 重庆 400030;
2. 第三军医大学 西南医院牙科, 重庆 400030)

摘要: 为了利用微扭矩准确、非破坏性地测量牙种植体的稳定性, 采用三维有限元分析方法研究了声表面波器件(SAW)检测牙种植体稳定性的可行性。首先, 在梯度剪切应力场下建立了 SAW 器件的谐振频率和扭矩之间的理论模型。然后, 利用 ANSYS 有限元软件对梯度剪切应力场下 SAW 器件的谐振频率变化情况进行谐波响应分析。最后, 对比分析了理论模型和仿真得到的数据。分析结果表明: SAW 器件谐振频率的变化量与最大剪切应力呈线性关系, 但两者之间存在 3% 的误差; 种植体的微扭矩与 SAW 器件的谐振频率呈线性关系。因此, 在理论上能够利用 SAW 器件测量种植体的微扭矩, 从而实现对种植体稳定性的检测。

关键词: 声表面波器件; 牙种植体; 扭矩测量; ANSYS; 谐振频率

中图分类号: TB931; R782.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1713

3-D finite element simulation for measurement of micro-torque of dental implant by SAW devices

LI Wei^{1*}, WANG Guang-zong¹, YANG Feng¹, LIANG Yu-qian¹, WANG Kun²

(1. *National Key Discipline Laboratory of Novel Micro-nano Devices and Systems, Chongqing University, Chongqing 400030, China;*
2. *Department of Dentistry, Southwest Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China*)
* *Corresponding author, E-mail: imeliwei@126.com*

Abstract: To achieve a non-destructive measurement of stability of a dental implant accurately, a three-dimensional finite element analysis method was used to explore the feasibility to measure the stability of the dental implant by Surface Acoustic Wave(SAW) devices. First, a theoretical model related to the resonant frequencies of SAW devices and the torque under a shear stress gradient field were researched. And then, harmonic responses about the changes of resonant frequencies of the SAW devices under the gradient shear stress field were analyzed by using ANSYS finite element software. Finally, the theoretical model and simulation results were compared. The results show that the resonant frequencies of the SAW devices are in proportion with the maximum shear stress, though there is a 3% deviation between the theory and the simulation results. Also, there is a linear relationship between the torque and the resonance frequencies of the SAW devices. Therefore, the measurement of

收稿日期: 2013-01-27; 修订日期: 2013-03-18.

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(No. CSTC2007BB3203)

micro torque of the implant is theoretically feasible by SAW devices, consequently the stability detection of the dental implant can be achieved.

Key words: Surface Acoustic Device(SAW); dental implant; torque measurement; ANSYS; resonant frequency

1 引言

在口腔医学领域,种植牙已被越来越多的人所接受,其成功的关键在于对种植体稳定性的检测。目前,临床上使用的种植体稳定性的检测方法主要是谐振频率法,如 OsstellTM[1,3],但谐振频率法只能反映种植体抗侧向力的能力,常常会带来临床判断错误,造成修复时机选择不当,导致种植体的脱落等问题。为了更准确地反映种植体稳定性,Godfredsen 等建议用共振频率(RFA)法和 torque-test 法联合测量[4],然而常用的植入扭矩和旋出扭矩测量均具有破坏性[5],且操作繁琐。因此,临床中迫切需要一种非破坏、便捷[6]的扭矩测量法。本文提出利用声表面波(SAW)器件来测量牙种植体扭矩,从而实现便捷、非破坏性扭矩测量。

近二十年来,在利用 SAW 器件测量压力[7]、气体浓度[8]和扭矩[9]等方面开展了许多研究工作,但在测量扭矩的研究中主要是针对大型转轴的扭矩测量。本文研究了利用 SAW 器件测量种植体上微扭矩的理论模型,并利用有限元分析的手段对其进行了分析验证,实现了种植体稳定性的检测。

2 理论模型

采用 SAW 传感器对种植体上的扭矩进行测量,通过将 SAW 传感器的敏感单元固定到种植体上,实现对种植体上扭矩的间接测量。SAW 扭矩传感器的敏感单元为带有 SAW 谐振器的圆柱体,其一端需要与种植体相连接。其中,声表面波器件被粘接在结构的凹槽上,如图 1 所示。当种植体发生扭转时,假设 SAW 器件与圆柱体接触的边受到线性梯度剪切应力场 $\tau = kx$ 的作用,如图 2 所示。以图中原点为参考点,可得到 SAW 器件基底上各点的弯矩为:

$$M = \frac{kl^2}{2}x - \frac{k}{6}x^3. \quad (1)$$

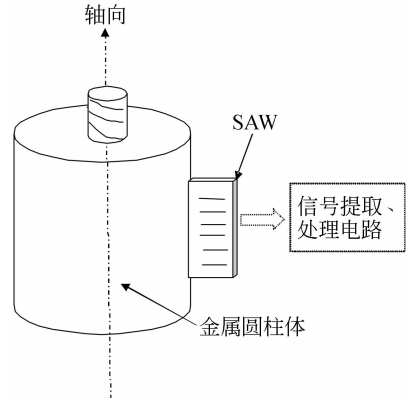


图 1 SAW 传感器测量系统结构示意图

Fig. 1 Framework of SAW sensor measuring system

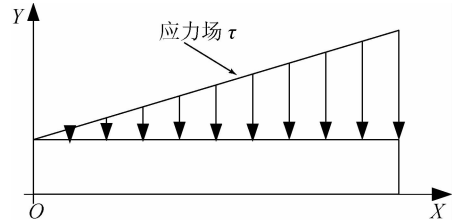


图 2 SAW 上等效的梯度应力场

Fig. 2 Equivalent gradient stress field on SAW

由于 SAW 基底表面上产生的应变非常小,因此,假设在 SAW 基底表面的传播方向上产生均匀分布的应变,根据 $\epsilon = Mh/2EI_z$ ($I_z = bh^3/12$),可得到平均应变($\bar{\epsilon}$)为:

$$\bar{\epsilon} = \frac{5l^3}{4Ebh^2}k = \frac{5l^2}{4Ebh^2}\tau_{\max}, \quad (2)$$

其中: E 为压电基底材料的 C_{21} 参数, τ_{\max} 为梯度剪切应力最大值, l 、 b 、 h 分别为 SAW 器件的长、宽、高。当表面声波器件发生应变时,其谐振频率为^[10]:

$$f(\epsilon) = f_0[(1 + k_v\epsilon)/(1 + \epsilon)], \quad (3)$$

其中: k_v 为压电材料参数,一般小于 0, ϵ 为 SAW 器件基底表面产生的应变, $f(\bar{\epsilon})$ 、 f_0 分别为 SAW 器件受到载荷影响和未受到载荷影响时的谐响应频率。以 $\bar{\epsilon}$ 替代式(3)中的 ϵ ,可以得到 SAW 谐振频率与最大剪切应力的关系为:

$$f(\bar{\epsilon}) = f_0 \frac{1 + k_v \bar{\epsilon}}{1 + \bar{\epsilon}} = \frac{4Ebh^2 + 5k_v l^2 \tau_{\max}}{4Ebh^2 + 5l^2 \tau_{\max}}, \quad (4)$$

由式(4)可得 SAW 器件谐振频率的变化量与最大剪切应力的关系为:

$$|\Delta f| = f(\bar{\epsilon}) - f_0 \approx f_0 \bar{\epsilon} (k_v - 1) = \frac{5l^2 f_0 (1 - k_v)}{4Ebh^2} \tau_{\max}. \quad (5)$$

当种植体发生扭转变形时,种植体上的扭矩和其圆周面上的剪切应力 τ 之间的关系为:

$$T = \tau I_p / R, \quad (6)$$

其中: R 为圆柱体的半径, $I_p = \pi D^4 / 32$ 是圆柱体的极惯性矩. D 为圆柱体的直径;由式(5)和(6)可得到扭矩和 SAW 谐振频率之间的关系:

$$|T| = \frac{\pi E b h^2 D^3}{20 l^2 (1 - k_v)} \left| 1 - \frac{f(\bar{\epsilon})}{f_0} \right|. \quad (7)$$

由式(7)可知,只要测得 SAW 的谐振频率,即可计算出相应种植体的扭矩。

3 有限元分析

从式(4)、(6)可知,SAW 器件的谐振频率与最大梯度剪切应力间存在线性关系,因此,可通过 ANSYS 有限元分析软件对其进行验证分析^[11]。在 ANSYS 的三维仿真模型中,SAW 器件的压电材料选用 $128^\circ \text{YX LiNO}_3$, 电极选用金属铝。其基底尺寸为:长 $490 \mu\text{m}$, 宽 $420 \mu\text{m}$, 厚 $104.64 \mu\text{m}$, 叉指电极周期为 $35 \mu\text{m}$, 孔径宽度为 $192.5 \mu\text{m}$, 谐振频率为 114 MHz ^[12]。在建模过程中,为了使 SAW 传播方向与晶体的剪切方向相互垂直,采用了坐标旋转的方法。在 SAW 有限元模型传播方向上的单元尺寸为 $4.375 \mu\text{m}$ 。

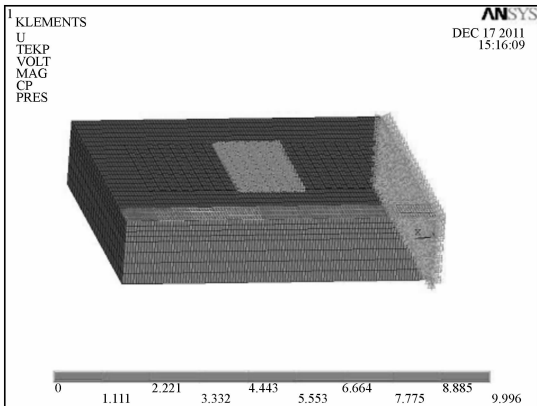


图 3 声表面波加载荷图

Fig. 3 Figure of excitation and stress gradient effect

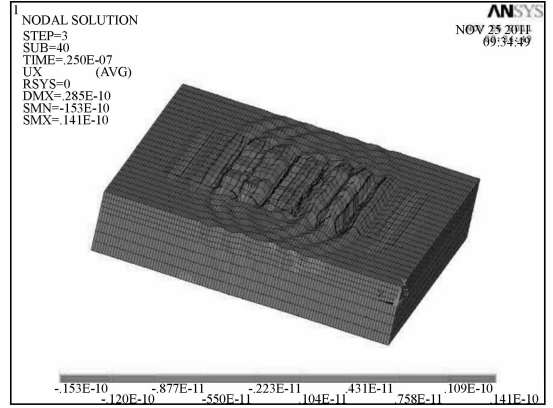


图 4 声表面波频率响应云图

Fig. 4 3-D graphical representation of wave propagation on SAW surface

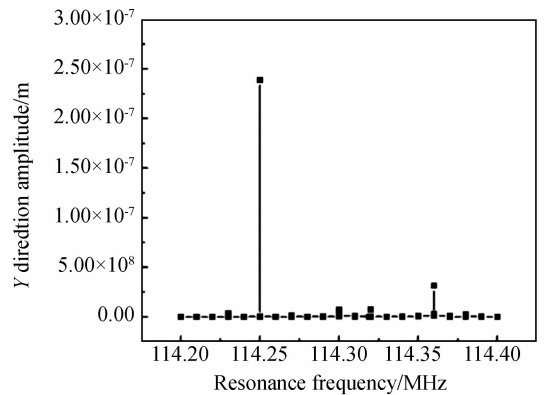


图 5 3144 节点未受力声表面波频率响应图

Fig. 5 Amplitude-frequency without force field on 3144 node

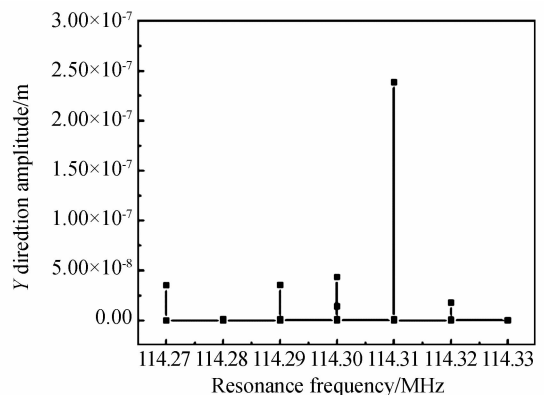


图 6 3144 节点受 150 Pa 应力声表面波频率响应图

Fig. 6 Amplitude-frequency with 150 Pa stress on 3144 node

本文主要研究 SAW 器件谐振频率稳态时的力学效应,因此,为了减少仿真数据和时间,采用谐响应分析研究了不同梯度应力场下 SAW 器件响应频率的变化规律。图 3 显示了施加给 SAW 模型的载荷和激励,图 4 给出了 SAW 传播云图。图 5 给出了 SAW 在未受力时的频谱图,而图 6 给出了 SAW 受 150 Pa 压力时的频谱图。

4 结果与讨论

根据第二部分理论,其中 SAW 器件相应的参数分别取为: $E=5.784 \times 10^{10}$ 、 $K_{v2}=4.5$,在仿真 SAW 力学效应时,对 0~150 Pa 梯度剪切应力场的 7 组不同的梯度剪切应力场进行了仿真。根据式(4)可以由最大剪切应力计算出表面声波器件中心频率的理论值,如图 7(a)中曲线 A 所示,而曲线 B 是两者的仿真结果,可见不论是理论值还是仿真值,他们的趋势是相同的,即 SAW 器件的

谐振频率与最大剪切应力之间呈线性关系,但理论值比相应的仿真结果略大;由式(5)可以用最大剪切应力计算出谐振频率的变化量的理论值,如图 7(b)中拟合曲线 A 所示,两者间的仿真结果如图 7(b)中曲线 B 所示,由图 7(b)可知:SAW 器件的谐振频率的变化量与最大剪切应力成正比。但随着最大剪切应力的增大,谐振频率的变化量的理论值与仿真值的偏差也增大,这是因为在理论模型中采用了平均应变的假设;根据式(6)可以计算出在不同剪切应力下种植体扭矩的理论值,如图 9(c)中曲线 A 所示,而将不同梯度应力场下的 SAW 谐振频率的仿真结果代入式(7)式就得到扭矩的仿真结果,如图 9(c)中 B 曲线所示,由图 9(c)可知,圆柱体上的微扭矩和 SAW 器件上受到的最大剪切应力呈线性关系;将式(4)计算出的 SAW 器件的谐振频率代入式(7)可以得到扭矩的理论值,如图 9(d)中拟合曲线 B 所示,而图 9(d)中拟合曲线 A 反映的是将 SAW 谐振频率的

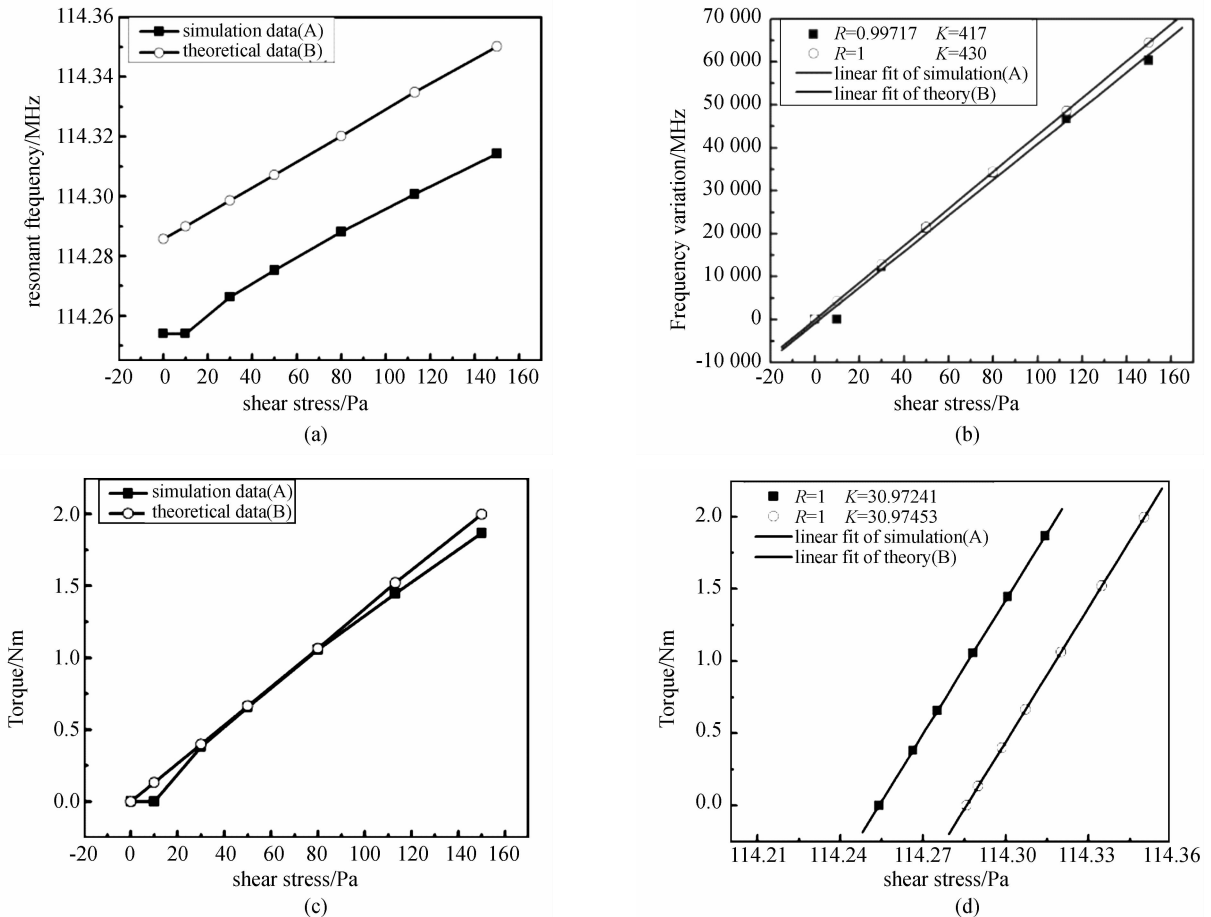


图 7 仿真数据和理论数据对比图

Fig. 7 Comparison chart of simulation and theoretical data

仿真值代入式(7)得到的扭矩的仿真结果,由图9(d)可知,扭矩和SAW器件的频率响应呈线性关系。从图9(a)、(d)中可看出,SAW器件谐振频率的理论值比仿真值大,约有3%的误差,其误差来源主要有两个方面:(1)在ANSYS网格划分时,为节约计算机的计算量,划分的网格数量相对较少;(2)在理论推导过程中,利用了很多假设,如平均应变,这也使得理论和模拟数据间的误差增大。

5 结 论

文中给出了在梯度场下,SAW器件谐振频率

变化量与最大梯度剪切应力之间的理论模型,并通过有限元分析方法对表面声波器件的谐振频率变化量与所受的最大梯度剪切应力之间的关系进行了仿真。仿真结果表明:SAW器件的谐振频率变化量与所受的最大梯度剪切应力之间存在正比关系。因此,理论模型和仿真结果相一致。而理论上扭矩与剪切应力成正比,因此,通过测量SAW器件的谐振频率,可以得到相应的剪切应力,即SAW器件谐振频率和种植体上扭矩呈线性关系,进而计算出对应的扭矩是可能的。仿真结果与理论值的比较也证实了这点,理论值与仿真结果存在3%的误差。

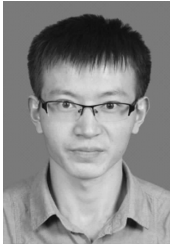
参考文献:

- [1] LUKAS C, ANTONIN S, RADOVAN S. Influence of the orientation of the osstell transducer during measurement of dental implant stability using resonance frequency analysis: A numerical pooorach [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2009, 31(7): 764-769.
- [2] FRIBERG B, SENNERBY L, LINDEN B. Stability measurements of one-stage Branemark implants during healing in mandibles [J]. *International Journal of Oral & Maxillofacial Surgery*, 1999, 28(4): 266-272.
- [3] QUESADA M P, PRADOS S E, OLMEDO G M V. Measurement of dental implant stability by resonance frequency analysis: A review of the literature [J]. *Med. Oral. Patol Oral Cir Bucal*, 2009, 14(10): 538-546.
- [4] GODFREDSSEN K, BERGLUNDH T, LINDHE J, et al. Anchorage of titanium implants with different surface characteristics: an experimental study in rabbits [J]. *Clin. Impl. Dent. Relat Res.*, 2000, 2(3): 120-128.
- [5] LEE J H, YANG J H. A study on the correlation between implant stability values and initial insertion torque [J]. *Journal of Korean Academy of Prosthodontics*, 2006, 44(3): 314-324.
- [6] 韩轲, 施文康. 声表面波器件在无线传感系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6): 576-579.
- [7] HAN T, SHI W K. Applications of the SAW devices in a wireless sensor system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6): 576-579. (in chinese)
- [8] BENETTI M, CANNATA D, PIETRANTONIO F D. Pressure sensor based on surface acoustic wave resonators [C]. *Sensors, IEEE Conference*, 2008: 1024-1027.
- [9] ANISIMKIN V I, FEDOSOV V I, KRYSTAL R G. Integrated array of SAW sensors for gas analysis [C]. *Proceedings. IEEE, Sendai, Ultrasonics Symposium*, 1998: 529-533.
- [10] LIN CH J, HUANG CH W, LIN H P. A study of wireless torque sensing based on SAW sensors [C]. *Computer Communication Control and Automation, Tainan*, 2010: 211-214.
- [11] CHEN L, XU CH G, HAO J. Study on passive torque sensor based on SAW resonator [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(10): 73-75.
- [12] ZHANG J F, LI Y G, HUI CH. Design and fabrication of floating electrode unidirectional SAW actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1300-1305.
- [13] ABDOLLAHI A, ZHONG W J. Evaluation on mass sensitivity of SAW sensors for different piezoelectric materials using finite element analysis [J]. *IEEE Trans., Ferroelectr*, 2007, 54: 2446-2455.

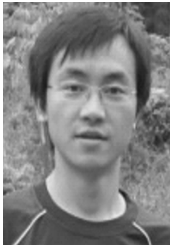
作者简介:



李 伟(1962—),男,福建福州人,副教授,1983 年于山东师范大学获得学士学位,1991 年于武汉大学获得硕士学位,1998 年于山东大学获得博士学位,2004 年~2007 年在清华大学微电子学研究所作博士后研究,主要从事 GMR 传感器、压电材料及 MEMS 器件方面的研究。E-mail: imeliwei@cqu.edu.cn



王光宗(1986—),男,四川巴中人,硕士,2006 年于四川文理学院获得学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: wgz097@126.com



杨 峰(1986—),男,四川巴中人,硕士,2006 年于四川文理学院获得学士学位,主要从事巨磁阻传感器方面的研究。E-mail: 455510655@qq.com



梁玉前(1964—),男,河北井陘人,工程师,1986 年于湖南大学获得学士学位,1989 年于北京航空航天大学获硕士学位。主要从事 MEMS 结构与仿真、嵌入式系统及数字信号处理等方面的研究。E-mail: lyuqian@cqu.edu.cn



汪 昆(1976—),男,陕西户县人,主治医师,讲师,2000 年、2005 年、2010 年于第四军医大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事口腔牙种植生物力学方面的研究。E-mail: dentalimplants@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)