

论著·基础研究 doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2016.14.005

种植体支抗关闭拔牙间隙磨牙位移趋势的有限元研究*

何 淞, 王亚楠, 瞿 杨, 杨四维, 黄 跃[△]

(西南医科大学口腔医学院, 四川泸州 646000)

[摘要] **目的** 运用三维有限元方法分析种植体支抗滑动法关闭拔牙间隙时上颌第一磨牙的 Von Mises 等效应力及位移变化趋势。**方法** 建立三维有限元模型, 模拟临床种植体支抗滑动法关闭拔牙间隙, 分析牵引力为 1.5 N 时, 种植体距离弓丝不同高度(6、8、10、12 mm)与牵引钩距离弓丝不同高度(1、4、7、10 mm)时, 上颌第一磨牙 Von Mises 等效应力及位移变化趋势。**结果** 当种植体高度大于或等于牵引钩高度时, 上颌第一磨牙根分叉处应力值最大; 小于牵引钩高度时, 应力分布出现在颊侧颈部, 且腭根的腭侧应力值变小。上颌第一磨牙位移趋势为: X 轴, 磨牙向远中旋转, 且旋转角度随牵引钩高度的增加而变大; Y 轴, 磨牙向远中倾斜、旋转, 且倾斜角度随牵引钩高度的增加而增大; Z 轴, 磨牙近中向颊方倾斜移动, 且倾斜位移随牵引钩高度增加而增加。**结论** 上颌第一磨牙的应力分布变化与种植体植入高度及牵引钩高度有关; 其位移变化趋势为磨牙向远中倾斜和旋转, 其倾斜的方向与种植体高度和牵引钩高度有关。

[关键词] 牙种植体; 有限元分析; 支架; 滑动法; 上颌第一磨牙; 初始位移**[中图分类号]** R783.5**[文献标识码]** A**[文章编号]** 1671-8348(2016)14-1886-03

Tree-dimensional finite element analysis of displacement tendency of maxillary molar during closing maxillary extraction space with implant anchorage*

He Song, Wang Yanan, Qu Yang, Yang Siwei, Huang Yue[△]

(Stomatology School, Southwest Medical University, Luzhou, Sichuan 646000, China)

[Abstract] **Objective** To analyse the tendency of maxillary first molar's initial stress distribution and displacement during closing maxillary extraction space in sliding mechanics with implants. **Methods** We created a three dimensional finite element model and simulated the clinic closing maxillary extraction space in sliding mechanics with implants. A protraction force of 1.5 N was applied. Implants were located at different height (6, 8, 10, 12 mm) and crampable hooks at different height (1, 4, 7, 10 mm). Then we analysed the initial displacement and the tendency of distribution. **Results** When the heights of implants were greater than or equal to crampable hooks, the maximum stress located in root furcation areas; when the heights of implants were smaller than the crampable hooks, the stress distributing in buccal cervical part, the minimum stress located in palatal side of palatal root. The displacement tendency of the first molars was as follow. X axis; the movement tendency of molar was distal rotation, the rotation angle of the first molars increased with heights of crampable hooks. Y axis; the movement tendency of molar was distal tipping and distal rotation, the rotation angle of molar increased with heights of crampable hooks. Z axis; the movement of molar was extrusion movement at mesial part and intrusion movement at distal part, the displacements of the molar were increased with heights of crampable hooks. **Conclusion** The stress changes of maxillary first molar are associated with the heights of implants and the crampable hooks. The displacement tendency of maxillary first molar is distal tip and rotation, the direction of tip is associated with the heights of implants and the crampable hooks.

[Key words] dental implants; finite element analysis; stents; sliding mechanics; maxillary first molar; initial displacement

滑动法关闭拔牙间隙作为直丝弓矫治技术的特征之一, 已被广泛地应用于正畸临床治疗中。种植体支抗作为绝对支抗被临床公认为是一种可以有效增强支抗的方法^[1]。对于需要最大限度内收前牙的患者, 使用种植体支抗关闭拔牙间隙时也应注意上颌支抗磨牙的应力变化。以往对滑动法关闭拔牙间隙的三维有限元研究主要集中在前牙^[2-3], 很少关注支抗磨牙的位移, 在使用种植体支抗时, 支抗磨牙是否发生三维方向的位移变化, 以及它的受力情况值得研究。因此, 本研究应用三维有限元方法模拟临床不同种植体高度及不同牵引钩高度, 滑动法关闭拔牙间隙时上颌第一磨牙的 Von Mises 等效应力及位移变化趋势, 以为临床应用提供参考。

1 材料与方

1.1 材料 建模对象为 1 名健康成年男性志愿者, 该男子颌颌面发育正常, 牙周状况无异常, 个别正常胎, 且上颌第一恒磨

牙完整健康, 无颞下颌关节病及正畸治疗史。实验用软件: Mimics 10.01 软件 (Materialise 公司, 比利时); Geomagic Studio 10.0 (Geomagic 公司, 美国); ProE Wildfire 4.0 软件 (Parametric Technology Corporation 公司, 美国); MSC. Marc. Patran 2005R3 (MSC 公司, 美国); MSC. Marc. Mentat 2005R3 (MSC 公司, 美国)。

1.2 方法

1.2.1 建立有限元模型 使用螺旋 CT 扫描机对成年男性志愿者全头颅进行连续扫描。将获得的扫描图像导入 Mimics 10.01 软件, 应用 Geomagic Studio 10.0 软件、PRO/E. Wildfire 4.0 软件建立种植体-牵引钩-托槽-弓丝-上颌牙列的实体模型, 弓丝尺寸为 0.46 mm×0.64 mm (0.019 in×0.025 in) 不锈钢方丝。将种植体支抗距离弓丝 6、8、10、12 mm 的高度植

* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(81300903); 川大-泸州战略合作项目(2013CDLZ-S22)。 作者简介: 何淞(1989-), 在读硕士, 主要从事口腔正畸生物力学研究。 [△] 通讯作者, E-mail: yue-huang@hotmail.com。

入上颌第二前磨牙及第一磨牙间,分别与不同牵引钩高度(1、4、7、10 mm)等元件组装,生成 4 组模型。将各元件网格划分后导入 MSC. Marc. Mentat 2005R3 软件中进行参数定义、边界设定,最终得到种植体-牵引钩-托槽-弓丝-上颌牙列的有限元模型。

1.2.2 材料属性和力学加载 设定所建模型为连续、均质、各向同性的线弹性材料,假设弓丝牵引钩、颊面管的材料属性一致。各模型弹性模量及泊松比见表 1^[4]。

表 1 相关材料的弹性模量和泊松比

| 组织 | 弹性模量(MPa) | 泊松比 |
|------------|-----------|------|
| 皮质骨 | 13 700 | 0.30 |
| 牙齿 | 20 000 | 0.30 |
| 弓丝、牵引钩及颊面管 | 200 000 | 0.30 |
| 种植体 | 103 400 | 0.30 |
| 牙周膜 | 0.68 | 0.45 |

1.2.3 载荷 将不同高度的种植体及牵引钩进行两两组合,共计 16 种工况。在各工况的牵引钩高度上沿着种植体方向施加 1.5 N 的力。

1.3 计算 在上颌第一磨牙上选取以下点:近中颊尖点、远中颊尖点、近中舌尖点、远中舌尖点、近中颊根根尖点、远中颊根根尖点、腭根根尖点。在 MSC. Marc. Mentat 2005R3 软件中分别收集这 7 点在 X 轴、Y 轴、Z 轴三维方向上的位移变化趋势(X 轴代表矢状向,Y 轴代表冠状向,Z 轴代表垂直向)^[5-6]。

2 结果

2.1 上颌第一磨牙的 Von Mises 等效最大应力分布 (1)模型 1 是不同牵引钩高度在种植体高度为 6 mm 时上颌第一磨牙的应力变化。其 Von Mises 等效最大应力分别为:工况 A 为 1.16×10^{-4} KP;工况 B 为 1.24×10^{-4} KP;工况 C 为 1.31×10^{-4} KP;工况 D 为 1.37×10^{-4} KP。(2)模型 2 是不同牵引钩高度在种植体高度为 8 mm 时上颌第一磨牙的应力变化。其 Von Mises 等效最大应力分别为:工况 A 为 1.16×10^{-4} KP;工况 B 为 1.19×10^{-4} KP;工况 C 为 1.27×10^{-4} KP;工况 D 为 1.33×10^{-4} KP。(3)模型 3 是不同牵引钩高度在种植体高度为 10 mm 时上颌第一磨牙的应力变化。其 Von Mises 等效最大应力分别为:工况 A 为 1.05×10^{-4} KP;工况 B 为 1.16×10^{-4} KP;工况 C 为 1.22×10^{-4} KP;工况 D 为 1.29×10^{-4} KP。(4)模型 4 是不同牵引钩高度在种植体高度为 12 mm 时上颌第一磨牙的应力变化。其 Von Mises 等效最大应力分别为:工况 A 为 0.98×10^{-4} KP;工况 B 为 1.08×10^{-4} KP;工况 C 为 1.33×10^{-4} KP;工况 D 为 1.43×10^{-4} KP。当种植体高度大于或等于牵引钩高度时,上颌第一磨牙 Von Mises 等效最大应力分布主要集中在近中面颈部、腭根腭侧及根分叉处,其中根分叉处最大;当种植体高度小于牵引钩高度时(即模型 1 的工况 C、D,模型 2 的工况 D),Von Mises 等效最大应力分布

主要集中在近中面颈部、颊侧颈部及根分叉处,其中根分叉处最大,见图 1~4。

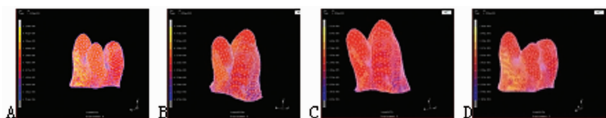


图 1 模型 1 种植体高度为 6 mm 时上颌第一磨牙 Von Mises 等效应力分布云图

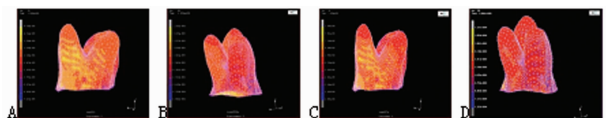


图 2 模型 2 种植体高度为 8 mm 时上颌第一磨牙 Von Mises 等效应力分布云图

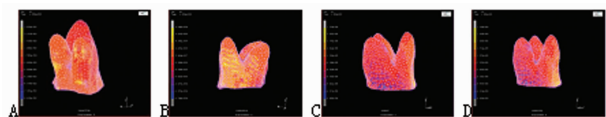


图 3 模型 3 种植体高度为 10 mm 时上颌第一磨牙 Von Mises 等效应力分布云图

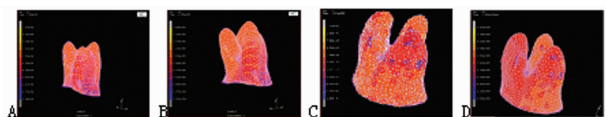


图 4 模型 4 种植体高度为 12 mm 时上颌第一磨牙 Von Mises 等效应力分布云图

2.2 上颌第一磨牙位移变化趋势

2.2.1 牙齿颊舌向位移变化趋势 X 轴的位移:近颊尖与近舌尖均为负值,远颊尖与远舌尖均为正值,远颊根位移大于近颊根,且随着牵引钩高度的增加位移值随之变大。当种植体高度大于或等于牵引钩高度时,近颊尖的位移小于近舌尖,远颊尖的位移小于远舌尖;小于牵引钩高度时,近颊尖的位移大于近舌尖,远颊尖的位移大于远舌尖,见图 5。

2.2.2 牙齿近远中向位移变化趋势 Y 轴的位移:只有腭根点为负值,且远中颊舌尖点均小于近中颊舌尖点,其位移值随牵引钩高度的增加而增大;但当种植体高度小于牵引钩高度时,其位移值随之减小。腭根的位移小于近颊根,见图 6。

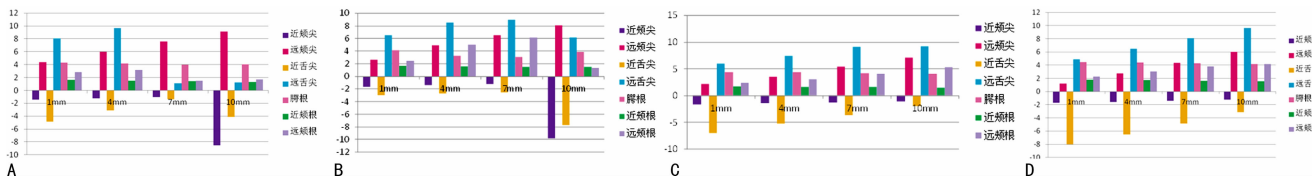
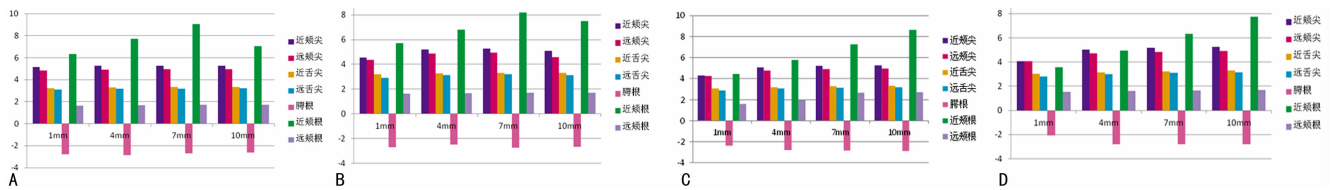


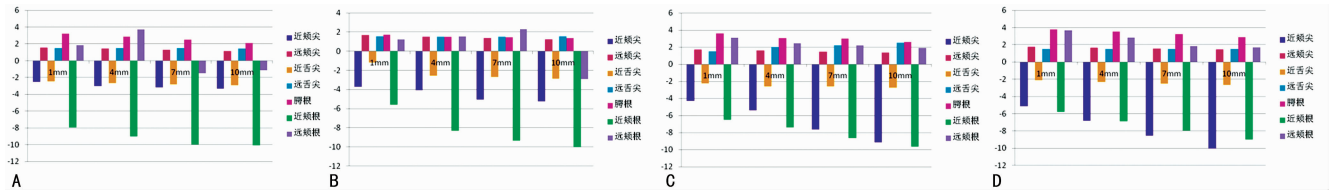
图 5 X 轴位移趋势图(×E-06rad)

A:种植体高度为 6 mm,上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm;B:种植体高度为 8 mm,上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm;C:种植体高度为 10 mm,上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm;D:种植体高度为 12 mm,上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm。



A: 种植体高度为 6 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; B: 种植体高度为 8 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; C: 种植体高度为 10 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; D: 种植体高度为 12 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm。

图 6 Y 轴位移趋势图(×E-06rad)



A: 种植体高度为 6 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; B: 种植体高度为 8 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; C: 种植体高度为 10 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm; D: 种植体高度为 12 mm, 上颌第一磨牙在牵引钩高度分别为 1、4、7、10 mm。

图 7 Z 轴位移趋势图(×E-06rad)

2.2.3 牙齿殆龈向位移变化趋势 Z 轴的位移: 近颊尖、近舌尖及近颊根为负值, 其余为正值, 且其位移随牵引钩高度增加而增加。当种植体高度小于牵引钩高度时, 远颊根转为负值, 见图 7。

3 讨 论

3.1 支抗磨牙位移的研究 头影测量是以往学者对于种植体支抗滑动法关闭拔牙间隙时牙齿的位移变化研究的常用方法。其中, Park 等^[7]和 Poberts^[8]发现磨牙颊面管与弓丝之间的摩擦力会导致磨牙向远中移动。寻春雷等^[9]学者提出在滑动法关闭间隙中磨牙会向近中移动。头影测量存在影像重叠、无法精确定位等缺点, 影响结果的准确性。三维有限元可从三维方向分析牙齿移动的生物力学机制, 比以往测量方法更精准。本研究采用三维有限元方法, 分析种植体支抗滑动法关闭拔牙间隙时上颌第一磨牙的生物力学变化, 推断上颌第一磨牙的受力情况, 为临床矫治提供理论依据。

3.2 上颌第一磨牙最大应力分布情况的讨论 本研究选用的 Von Mises 等效应力对牙周膜应力分布进行力学性能分析^[10], 发现第一磨牙的最大应力均出现在根分叉处, 当种植体高度大于或等于牵引钩高度时, 应力集中于近中面颈部、腭根腭侧及根分叉处; 小于牵引钩高度时, 应力分布在牙周膜颊侧颈部, 这与张菊菊等^[11]的研究结果“上颌第一磨牙在根分叉处可见高的应力集中”相似。结果中应力分布从大到小依次是磨牙表面、牙槽骨、牙周膜, 这主要与材料的弹性模量有关, 弹性模量越大, 应力越大, 这与 Vicilli 等^[12]的研究结果一致。Xue 等^[13]指出 Von Mises 等效应力最大值为 26×10^3 Pa, 超出此应力值牙周膜将发生坏死。本研究结果中应力值均小于 26×10^3 Pa。

3.3 上颌第一磨牙的位移变化趋势讨论 在 X 轴上变化趋势为: 牙冠向远中旋转, 旋转角度随牵引钩高度的增加而变大。当种植体高度大于或等于牵引钩高度时, 牙冠颊侧倾斜; 小于牵引钩高度时, 牙冠舌侧倾斜。这可能与种植体高度大于或等于牵引钩高度时有向龈方的分力有关, 而颊面管位于磨牙颊侧, 因而磨牙颊侧受到的滑动摩擦压入力大于腭侧, 磨牙远中旋转并向颊侧倾斜; 同理, 当小于牵引钩高度时有向殆方的分力, 磨牙远中旋转并向舌侧倾斜。在 Y 轴上变化趋势为: 牙冠远中倾斜、旋转, 且支抗磨牙有整体向远中移动的趋势, 倾斜角

度随牵引钩高度的增加而增大, 但当种植体高度小于牵引钩高度时, 倾斜角度随之减小。Solem 等^[14]发现, 种植体支抗产生的磨牙支抗丢失显著小于传统支抗, 甚至有一定程度的磨牙远中移动, 这结果符合 Tweed 理论所主张的稳定殆的标准。因此本研究亦证明种植体有增强支抗的作用。在 Z 轴上变化趋势为: 牙冠近中向殆方倾斜移动, 且倾斜位移随牵引钩高度增加而增加。而牙冠冠中被压低, 与 Koyama 等^[15]实验结果相似, 原因可能是由种植体产生的内收力的作用线低于上颌牙列阻抗中心点。本研究结果也与有些学者的研究结果不一致^[16], 二者结果出现差异可能和是否使用种植体作为支抗有关。因为以种植钉为支抗, 前牙内收时不会对磨牙产生近中移动的反作用力, 而是将力作用于种植体上, 磨牙受到的力只有颊面管与弓丝之间的滑动摩擦力。因此种植体支抗成为目前最有效的强支抗, 以防磨牙在滑动法关闭拔牙间隙时前移, 达到增强支抗, 防止支抗丢失的目的。

综上所述, 上颌第一磨牙在 X 轴、Y 轴、Z 轴上的整体位移变化趋势为: 当种植体高度大于或等于牵引钩高度时, 牙冠出现远中旋转并向远中、颊侧倾斜; 小于牵引钩高度时, 牙冠出现远中旋转并向远中、舌侧倾斜。亦提示在临床矫治时为防止磨牙过度的倾斜, 应注意对磨牙转矩的控制。

参考文献

- [1] Upadhyay M, Yadav S, Nagaraj K, et al. Dentoskeletal and soft tissue effects of mini-implants in Class II division 1 patients[J]. Angle Orthod, 2009, 79(2): 240-247.
- [2] 安晓莉, 陈宏伟, 司庆宗. 摇椅弓滑动法整体内收上颌前牙的三维有限元分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2013, 32(1): 21-25.
- [3] Sung SJ, Jang GW, Chun YS, et al. Effective en-masse retraction design with orthodontic mini-implant anchorage: a finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010, 137(5): 648-657.
- [4] Tominaga JY, Tanaka M, Koga Y, et al. Optimal loading conditions for controlled movement of anterior teeth in sliding mechanics[J]. Angle Orthod, 2009, 79(6): 1102-1107.

综上所述,糖尿病大鼠骨骼肌 visfatin 的基因及蛋白表达均明显增高,可能在 IR 及糖尿病的发生、发展中发挥一定的作用。visfatin 可能通过 PI3K 途径参与骨骼肌糖脂代谢的调节,进一步深入研究可能为糖尿病预防和治疗提供新的思路。

参考文献

- [1] Fukuhara A, Matsuda M, Nishizawa M, et al. Visfatin: a protein secreted by visceral fat that mimics effects of insulin[J]. *Science*, 2005, 307(5708): 426-430.
- [2] 郑妙艳, 常宝成. 肾上腺疾病中的骨骼肌胰岛素抵抗现象[J]. *国际内分泌代谢杂志*, 2011, 31(6): 412-414.
- [3] Harasim E, Chabowski A, Górski J. Lack of downstream insulin-mimetic effects of visfatin/eNAMPT on glucose and fatty acid metabolism in skeletal muscles[J]. *Acta Physiol*, 2011, 202(1): 21-28.
- [4] Krzysik-Walker SM, Ocón-Grove OM, Maddineni SR, et al. Is visfatin an adipokine or myokine? Evidence for greater visfatin expression in skeletal muscle than visceral fat in chickens[J]. *Endocrinology*, 2008, 149(4): 1543-1550.
- [5] Samuel VT. Fructose induced lipogenesis: from sugar to fat to insulin resistance[J]. *Trends Endocrinol Metab*, 2011, 22(2): 60-65.
- [6] Ognjanovic S, Bao S, Yamamoto SY, et al. Genomic organization of the gene coding for human pre-B-cell colony enhancing factor and expression in human fetal membranes[J]. *J Mol Endocrinol*, 2001, 26(2): 107-117.
- [7] Brent J, Kloting N, Kralisch S, et al. Plasma visfatin concentrations and fat depot-specific mRNA expression in humans[J]. *Diabetes*, 2005, 54(10): 2911-2916.
- [8] Kloting N, Kloting I. Visfatin: gene expression in isolated adipocytes and sequence analysis in obese WOKW rats compared with lean control rats[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2005, 332(4): 1070-1072.
- [9] Amin MM, Asaad GF, Abdel-Salam RM, et al. Novel CoQ10 antidiabetic mechanisms underlie its positive effect: modulation of insulin and adiponectin receptors, tyrosine kinase, PI3K, glucose transporters, sRAGE and visfatin in insulin resistant/diabetic rats [J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e89169.
- [10] Christ CY, Hunt D, Hancock J, et al. Exercise training improves muscle insulin resistance but not insulin receptor signaling in obese Zucker rats[J]. *J Appl Physiol*, 2002, 92(2): 736-743.
- [11] 袁海瑞, 牛燕媚, 刘效磊, 等. 高脂饮食诱导胰岛素抵抗小鼠骨骼肌胰岛素信号通路相关基因表达的变化[J]. *中国康复医学杂志*, 2011, 26(4): 357-362.
- [12] Haider DG, Schaller G, Kapiotis S, et al. The release of the adipocytokine visfatin is regulated by glucose and insulin[J]. *Diabetologia*, 2006, 49(8): 1909-1914.
- [13] 魏元元, 张绍维, 王巍, 等. 2 型糖尿病大鼠骨骼肌葡萄糖转运蛋白-4 和磷脂酰肌醇-3-激酶与内脂素的关系[J/CD]. *中华临床医师杂志(电子版)*, 2013, 7(12): 5378-5381.
- (收稿日期: 2015-11-15 修回日期: 2016-01-25)
-
- (上接第 1888 页)
- [5] Wang CY, Su MZ, Chang HH, et al. Tension-compression viscoelastic behaviors of the periodontal ligament[J]. *J Formos Med Assoc*, 2012, 111(9): 471-481.
- [6] Aversa R, Apicella D, Perillo L, et al. Non-linear elastic three-dimensional finite element analysis on the effect of endocrown material rigidity on alveolar bone remodeling process[J]. *Dent Mater*, 2009, 25(5): 678-690.
- [7] Park HS, Bae SM, Kyuang HM, et al. Micro-implant anchorage for treatment of skeletal Class I alveolar protrusion[J]. *J Clin Orthod*, 2001, 35(7): 417-422.
- [8] Poberts WE. When planning to use an implant for anchorage, how long do you have to wait to apply force after implant placement [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2002, 121(1): 14A.
- [9] 寻春雷, 曾祥龙, 王兴. 微型自攻钛钉种植体支抗压低切牙的初步应用研究[J]. *口腔正畸学*, 2004, 11(1): 29-31.
- [10] Ashish H, Nikhil H, Vinay PR, et al. Effect of the thread pitch of orthodontic mini-implant on bone stress—a 3d finite element analysis[J]. *J Dent*, 2011, 1(4): 91-96.
- [11] 张菊菊, 段银钟, 霍娜, 等. 3 种不同施力方式远移上颌第一磨牙牙周膜应力的三维有限元分析[J]. *口腔医学研究*, 2006, 22(2): 166-168.
- [12] Viecilli RF, Budiman A, Burstone CJ. Axes of resistance for tooth movement: does the center of resistance exist in 3-dimensional space? [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013, 143(2): 163-172.
- [13] Xue J, Ye N, Yang X, et al. Finite element analysis of rapid canine retraction through reducing resistance and distraction[J]. *J Appl Oral Sci*, 2014, 22(1): 52-60.
- [14] Solem RC, Marasco R, Guiterrez-Pulido L, et al. Three-dimensional soft-tissue and hard-tissue changes in the treatment of bimaxillary protrusion[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2013, 144(2): 218-228.
- [15] Koyama I, Iino S, Abe Y, et al. Differences between sliding mechanics with implant anchorage and straight-pull headgear and inter-maxillary elastic in adults with bimaxillary protrusion[J]. *Eur J Orthod*, 2011, 33(2): 126-131.
- [16] 卢燕勤, 高雪梅. 直丝弓矫治器滑动法关闭间隙的三维非线性有限元研究[J]. *天津医药*, 2010, 39(6): 461-463.
- (收稿日期: 2015-11-28 修回日期: 2016-01-24)