

文章编号:1004-7220(2017)01-0054-06

不同槽沟方向舌侧托槽转矩控制性能三维有限元分析

黄跃¹, 黄思源^{1*}, 瞿杨¹, 何焘¹, 白丁²

(1. 西南医科大学 口腔医学院, 正畸科, 泸州 646000; 2. 四川大学华西口腔医院 正畸科, 成都 610065)

摘要: **目的** 分析不同槽沟方向的舌侧托槽转矩控制性能以及不同弓丝尺寸、材质对其转矩的影响规律。**方法** 建立上颌前牙垂直槽沟及水平槽沟舌侧托槽、3种材质(不锈钢弓丝、 β 钛丝、镍钛丝)、2种尺寸(0.43 mm \times 0.56 mm、0.41 mm \times 0.56 mm)弓丝的有限元模型,对左上颌中切牙施以 $\pm 20^\circ$ 的转矩加载,分析对比其力学性能。**结果** 随着弓丝弹性模量的增大,不同槽沟方向的舌侧托槽转矩力矩逐渐增大;槽沟方向对舌侧托槽的转矩性能有影响,但小于弓丝尺寸及材质变化带来的影响。相同转矩角度下,垂直槽沟舌侧托槽产生约为水平槽沟舌侧托槽1~2倍的转矩力。弓丝尺寸对两种托槽转矩控制的影响小于弓丝材质,两者协同变化影响最大。**结论** 槽沟方向、弓丝尺寸、材质改变均能影响舌侧托槽转矩控制性能。临床应用中,可以根据所需转矩力大小,对舌侧托槽槽沟方向及弓丝尺寸、材质组合进行选择。

关键词: 槽沟方向; 舌侧托槽; 转矩; 有限元分析; 力学性能

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2017.01.009

Three-dimensional finite element analysis on torque performance of lingual brackets with slot in different directions

HUANG Yue¹, HUANG Si-yuan^{1*}, QU Yang¹, HE Song¹, BAI Ding² (1. Department of Orthodontics, School of Stomatology, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China; 2. Department of Orthodontics, Huaxi Hospital of Stomatology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: **Objective** Objective To analyze the torque performance of lingual brackets with slots in different directions and the influence pattern of arch wires with different sizes and materials on torque of these lingual brackets.

Methods The finite element models of the anterior maxilla lingual brackets with vertical and horizontal slot were constructed, using 3 kinds of materials (stainless steel, beta-titanium, nickel-titanium) and two sizes of arch wires (0.43 mm \times 0.56 mm, 0.41 mm \times 0.56 mm), so as to compare and analyze their mechanical properties after the application of torque load on the left upper central incisors with a rotation angle of $\pm 20^\circ$. **Results** With the increase in elastic modulus of the arch wire, torque moments of lingual brackets with horizontal and vertical slot both increased gradually. Torque performance of lingual brackets was affected more by the sizes and materials of arch wires than the directions of slots. The lingual bracket with vertical slot produced 1-2 times of torque force than that with horizontal slot under the same degree of torque angle. The effect of arch wire sizes was smaller than that of arch wire materials, while the synergistic change in sizes and materials of arch wires had the largest influence on torque performance of lingual brackets. **Conclusions** The torque performance of lingual bracket will be influenced with its different slot directions, the sizes and materials of arch wires. In clinical application, slot directions of lingual brackets as well as sizes and materials of arch wires should be adjusted properly according to the required torque force.

Key words: Slot direction; Lingual bracket; Torque; Finite element analysis; Mechanical properties

收稿日期:2016-01-19; 修回日期:2016-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(81300903),川大-泸州战略合作项目(2013CDLZ-S22),泸州医学院科研基金项目(泸医医院科[2009]5号)。

通信作者:白丁,教授,博士研究生导师,Tel:(028)85501480;E-mail:baiding@scu.edu.cn。

* 为共同第一作者

错颌畸形影响患者颜面美观,甚至影响口颌系统的正常发育,降低咀嚼功能^[1]。随着社会和经济的发展,越来越多的人意识到颜面美观的重要性,不仅对正畸医生技术水平的要求增高,而且对口腔矫治器美观的要求也逐步提升。因此,舌侧正畸应运而生。最初的舌侧正畸托槽同唇侧托槽一样,为水平槽沟;经过多年的发展,目前临床应用较多的水平槽沟舌侧托槽系统为第7代 Kurz 舌侧托槽,因其更为合理的外形和舒适感,得到广大患者的青睐。但舌侧托槽粘接于患者牙齿舌侧,水平槽沟使临床医生操作视线不佳,增加了椅旁操作时间;同时,由于牙齿舌面复杂多变的解剖外形,影响托槽粘接的精确位置^[2-3]。为了改善这些缺点,在21世纪初,德国 Wiechmann 等^[4]医师设计了个性化舌侧矫治系统,即目前临床应用非常广泛的 Incognito 舌侧矫治系统。该系统将托槽前牙的槽沟方向改为垂直向,并且按照患者的舌面解剖形态设计个性化的托槽底板,增加了托槽粘接面积,同时减轻了对舌体的刺激,使临床医生前牙段弓丝放置操作可视化,节约了椅旁操作时间^[5-6]。Incognito 舌侧托槽相较第7代 Kurz 托槽而言,除了底板外形与患者舌面更为贴合以外,最大的改变来自于前牙槽沟方向,这对前牙转矩控制可能会产生影响。有研究认为,垂直槽沟的舌侧托槽相较于水平槽沟的舌侧托槽具有更好的转矩控制效能;但也有研究表明,垂直向槽沟并不能增加前牙的转矩控制效能^[7-9]。目前关于不同槽沟方向的舌侧托槽对比研究报道较少,尚无定论。因此,本文建立了两种系统舌侧托槽的三维有限元模型,通过对比两种槽沟方向舌侧托槽在不同尺寸与材质弓丝因素影响下转矩控制性能的差异,从生物力学角度为临床舌侧矫治中的转矩控制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验设备

Windows XP 系统,三维建模软件 Pro/E. Wildfire 5.0(PTC 公司,美国),有限元软件 MSC. Patran、MSC. Marc. Mentat2005R3(MSC. Software 公司,美国)。

1.2 两种舌侧托槽三维有限元模型建立

选择槽沟系统均为 0.56 mm 的两种舌侧托槽, Incognito(3M Unitek, 美国)舌侧托槽(垂直槽沟)和第7代 Kurz(Ormco, 美国)舌侧托槽(水平槽沟),在

Pro/E. Wildfire 5.0中以计算机辅助测量数据为参考,建立从左上至右上颌尖牙对应的两种舌侧托槽,并分别与3种不同材质:不锈钢(stainless steel, SS)丝、 β -钛(beta-titanium, TMA)丝、镍钛(nickel-titanium, NiTi)丝,以及2种尺寸:0.41 mm×0.56 mm和0.43 mm×0.56 mm的方丝弓实体模型进行装配,结扎丝均装配直径为0.2 mm的SS丝。

将实体模型导入 MSC. Patran 中,对两种舌侧托槽、结扎丝、弓丝选取四面体单元进行网格划分,共计 29 023 节点和 95 537 单元。将网格划分完成后的实验模型(见图1)导入 MSC. Marc. Mentat2005R3 中进行物理参数设定。



图1 实验模型 (a)两种槽沟舌侧托槽三维有限元模型,(b)水平槽沟舌侧托槽,(c)垂直槽沟舌侧托槽

Fig.1 Experimental models (a) 3D finite element model for two types of lingual brackets, (b) Lingual brackets with horizontal slot, (c) Lingual brackets with vertical slot

1.3 模型分组与材料参数设定

假定所建立的有限元模型为均质、各向同性的线弹性材料,根据托槽、弓丝尺寸、弓丝材质不同,建立12个实验模型(见表1)。设定托槽、结扎丝、SS丝、TMA丝、NiTi丝的弹性模量分别为200、200、200、50、60 GPa,泊松比均为0.30;托槽与弓丝之间、结扎丝与弓丝之间摩擦力系数 $\mu=0.2$ 。

1.4 实验转矩加载

在 MSC. Marc. Mentat2005R3 中将结扎丝与托槽设定为粘合关系,弓丝与托槽之间^[10]、结扎丝与弓丝之间均设定为接触关系。建立坐标系以左上颌中切牙为基准,X轴指向托槽近远中方向,近中向为正,远中向为负;Y轴为合龈方向,龈向为正,合向为负;Z轴为唇舌方向,舌向为正,唇向为负。

在实验模型中,右侧弓丝末端及除左上中切牙以外的所有托槽底板均选择4点在三维方向上固

表1 实验模型分组

Tab. 1 Grouping of experimental models

模型名称	弓丝尺寸/(mm × mm)	弓丝材质
41SS-VS	0.41 × 0.56	SS
41SS-HS	0.41 × 0.56	SS
41TMA-VS	0.41 × 0.56	TMA
41TMA-HS	0.41 × 0.56	TMA
41NiTi-VS	0.41 × 0.56	NiTi
41NiTi-HS	0.41 × 0.56	NiTi
43SS-VS	0.43 × 0.56	SS
43SS-HS	0.43 × 0.56	SS
43TMA-VS	0.43 × 0.56	TMA
43TMA-HS	0.43 × 0.56	TMA
43NiTi-VS	0.43 × 0.56	NiTi
43NiTi-HS	0.43 × 0.56	NiTi

注:VS表示垂直槽沟,HS表示水平槽沟

定。加载点为左上中切牙托槽底板中心点,定义底板边缘8个节点与此中心点运动轨迹一致,在Z轴上转矩加载 $\pm 20^\circ$ 。记录加载点的转矩力值,以力值数据图的方式输出结果。图2所示为模型加载 20° 前后左上中切牙托槽位移变化云图。

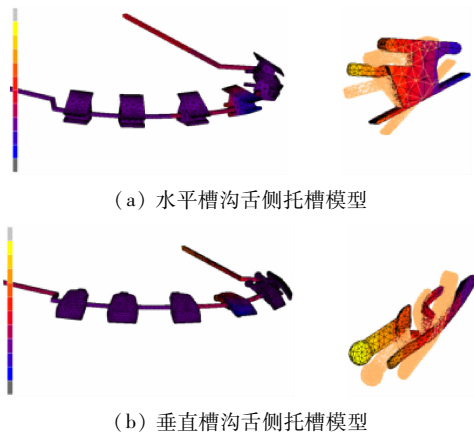
图2 模型加载 20° 前后左上中切牙托槽位移变化云图

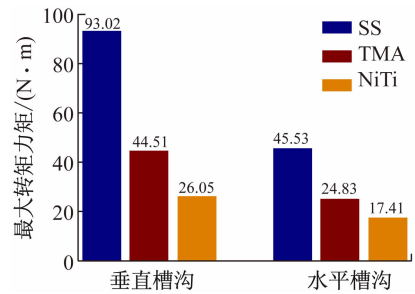
Fig. 2 Displacement contours of the left upper incisor brackets before and after application of 20° torque load on the model
(a) Model of lingual brackets with horizontal slot, (b) Model of lingual brackets with vertical slot

2 结果

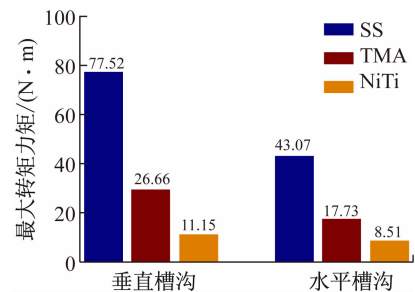
2.1 弓丝因素改变、槽沟方向不变时两种舌侧托槽转矩控制性能变化

2.1.1 弓丝尺寸改变 当弓丝尺寸不同、材质相同

时,同一转矩角度下,两种舌侧托槽转矩力矩的变化相似,均与弓丝尺寸相关;尺寸越大,转矩力矩越大。在垂直槽沟舌侧托槽中,0.43 mm × 0.56 mm 尺寸弓丝的转矩力矩约为0.41 mm × 0.56 mm 尺寸弓丝的1.0 ~ 2.5 倍,而在水平槽沟舌侧托槽中为1 ~ 2 倍(见图3)。



(a) 0.43 mm × 0.56 mm



(b) 0.41 mm × 0.56 mm

图3 两种舌侧托槽不同尺寸弓丝转矩力矩最大值比较

Fig. 3 Comparison of the maximum torque moment for two kinds of lingual brackets with arch wires of different sizes

(a) 0.43 mm × 0.56 mm, (b) 0.41 mm × 0.56 mm

2.1.2 弓丝材质改变 当弓丝尺寸相同、材质不同时,同一转矩角度下,随着弓丝材质弹性模量的增大,两种舌侧托槽的转矩力矩均逐渐增大。以两种舌侧托槽3种材质0.41 mm × 0.56 mm 尺寸弓丝转矩力矩最大值为例,SS 丝 > TMA 丝 > NiTi 丝,弹性模量差异越大,则两者转矩力矩值倍数变化越大;在垂直槽沟舌侧托槽中变化倍数为2.5 ~ 7.0 倍,而水平槽沟舌侧托槽中变化倍数为2 ~ 5 倍,均大于仅弓丝尺寸改变带来的转矩力矩倍数变化(见图3)。

2.1.3 弓丝尺寸及材质均改变 当弓丝尺寸及材质均发生变化时,将2种尺寸、3种材质弓丝的转矩力矩最大值相比,均使用0.43 mm × 0.56 mm / 0.41 mm × 0.56 mm 尺寸,可以发现,不同弓丝因素

组合垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩最大值改变为3~8倍,水平槽沟舌侧托槽转矩力矩最大值改变为2.5~5.5倍,高于仅弓丝尺寸或仅弓丝材质改变带来的倍数变化(见图3)。

2.2 槽沟方向改变,两种舌侧托槽转矩控制性能变化对比

2.2.1 槽沟方向改变,弓丝因素不变 当弓丝材质及尺寸不变时,两种舌侧托槽转矩力矩随着转矩角度的变化规律相同。随着转矩角度增大,转矩力矩也相应增大,但两者增大的斜率略有不同,垂直槽沟舌侧托槽增大大幅度大于水平槽沟舌侧托槽。以0.41 mm×0.56 mm尺寸3种材质弓丝转矩力矩/转矩角度曲线为例,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩是水平槽沟舌侧托槽的1~2倍(见图4)。

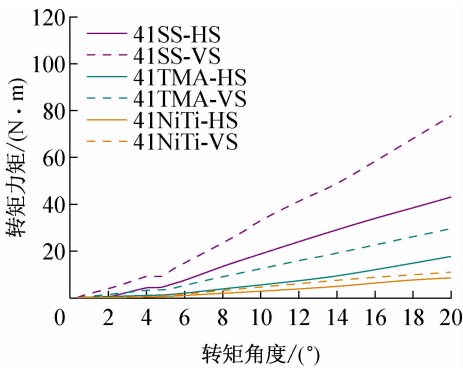


图4 两种舌侧托槽0.41 mm×0.56 mm尺寸弓丝转矩力矩-转矩角度曲线

Fig.4 Torquemoment-torque angle curves for two kinds of lingual brackets with 0.41 mm×0.56 mm arch wires

2.2.2 槽沟方向和弓丝因素均改变 对比垂直和水平槽沟舌侧托槽最大转矩力矩值,结果发现,当槽沟方向改变时,若弓丝尺寸也发生改变,但材质不变,0.43 mm×0.56 mm尺寸弓丝转矩力矩值大于0.41 mm×0.56 mm尺寸弓丝,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩为水平槽沟的2~3倍,大于仅槽沟方向改变带来的转矩力矩变化;若弓丝材质发生改变,尺寸不变,随着弓丝材质弹性模量的增大,最大转矩力矩相应增大,弹性模量相差越大,最大转矩力矩倍数差异越大,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩变化为水平槽沟的3~9倍;若弓丝尺寸及材质均发生改变,垂直槽沟舌侧托槽的转矩力矩变化是水平槽沟的5~10倍,远大于弓丝尺寸及材质改变带来的倍数变化。

综上所述,两种舌侧托槽转矩力矩随转矩角度变化的规律相同,均随着转矩角度的增大而增大;托槽槽沟方向改变对舌侧托槽转矩控制性能有影响,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩大于水平槽沟舌侧托槽,但其影响小于弓丝因素改变对两者产生的影响;弓丝因素对两种舌侧托槽产生的影响规律相同,弓丝尺寸的改变对舌侧托槽转矩变化的影响小于弓丝材质,而两者协同对转矩力矩的影响最大。

3 讨论

在正畸治疗中,良好的前牙转矩控制是保持患者面部美观、保证矫治效果稳定的前提。大量研究表明,转矩受多种因素的影响,包括托槽的制作过程、粘接位置、弓丝的材质、硬度、结扎方式、托槽之间的距离等^[11-13]。本文从舌侧托槽的生物力学特性出发,通过三维有限元方法研究不同槽沟方向对舌侧矫治器的转矩控制影响,并阐明在不同弓丝因素组合条件下,两种舌侧托槽转矩控制性能的差异。

由于舌侧托槽粘接在牙齿舌面,复杂的舌面形态使舌侧矫治相比传统矫治更加困难;同时,较小的托槽间距离增加了舌侧弓丝的刚性^[14],加大了舌侧托槽转矩控制性能。本实验发现,Incognito舌侧托槽相较于第7代Kurz托槽而言,前牙部分由水平槽沟改为垂直槽沟,使得弓丝的形态改变像一条带子,其转矩控制性能更好,这与Sifakakis等^[15]的研究结果一致;后者对4种托槽(Incognito舌侧托槽、STb舌侧托槽、In-Ovation L舌侧自锁托槽、Gemini唇侧托槽)转矩力矩进行实验测量发现,Incognito舌侧托槽产生的转矩力矩最大。

有研究认为,上颌中切牙的有效转矩力矩为10~20 N·mm,最小转矩力矩为5 N·mm^[16-19]。本实验发现,当转矩角度为20°时,所有模型均能达到中切牙所需的转矩力矩。两种舌侧托槽在弓丝因素影响下,对比两者的转矩力矩最大值发现,当垂直槽沟舌侧托槽在弓丝尺寸及材质均不发生变化时,其转矩力矩为水平槽沟舌侧托槽的1~2倍;当弓丝尺寸发生变化、弓丝材质不变时,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩为水平槽沟舌侧托槽的2~3倍;而弓丝材质发生变化、弓丝尺寸不变时,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩为水平槽沟舌侧托槽的3~9倍;当两者均发生变化时,垂直槽沟舌侧托槽转矩力矩为水平槽沟

舌侧托槽的5~10倍。虽然槽沟方向改变会使舌侧托槽的转矩力矩发生变化,但是此变化带来的影响小于弓丝因素改变所带来的变化,其中弓丝尺寸对转矩力矩的影响小于弓丝材质,更小于两者协同影响带来的变化。而单独对于垂直或水平槽沟舌侧托槽,弓丝因素带来的影响也是如此。Eleni等^[20]研究表明,转矩的表达和弓丝的特性相关,转矩角度/转矩力矩的大小是由弓丝的特性决定的。

同时,Eleni等^[20]认为,针对托槽选择适宜的弓丝对正畸结束阶段转矩的表达效率将会起决定性的作用。弓丝单位形变所产生的回复力矩大小称为弓丝的抗扭刚度,它与弓丝材质的弹性模量及弓丝的尺寸成正比,与弓丝的长度成反比。抗扭刚度低的弓丝转矩力变化小,衰减慢,更有利于精确传递转矩力;而抗扭刚度高的弓丝转矩力变化大,衰减快,不利于精确控制转矩力^[21-22],同时也不利于牙周组织的健康。本实验固定了弓丝长度,仅考虑弓丝材质及尺寸改变对抗扭刚度的影响。黄宁等^[23]固定弓丝的有效长度及托槽间距,研究弓丝尺寸及材质改变对弓丝抗扭刚度的影响;结果发现,相同尺寸SS丝抗扭刚度远大于NiTi丝,而不同尺寸NiTi丝抗扭刚度相差很小,SS丝则相差很大。结合本实验测得数据,当弓丝材质为SS时,0.43 mm×0.56 mm及0.41 mm×0.56 mm尺寸弓丝最大转矩力矩在垂直槽沟舌侧托槽分别为93.02、77.52 N·mm,在水平槽沟舌侧托槽分别为45.53、43.07 N·mm,而NiTi丝尺寸为0.43 mm×0.56 mm及0.41 mm×0.56 mm时,在垂直槽沟舌侧托槽产生的最大转矩力矩分别为26.05、11.15 N·mm,在水平槽沟舌侧托槽则分别为17.41、8.51 N·mm。在弓丝尺寸相同、材质不同时,以0.43 mm×0.56 mm尺寸弓丝、垂直槽沟舌侧托槽为例,SS丝转矩力矩为NiTi丝的3.57倍,在弓丝材质相同、尺寸不同时(0.43 mm×0.56 mm/0.41 mm×0.56 mm),垂直槽沟舌侧托槽SS丝转矩力矩比为1.20,远小于3.57,说明弓丝尺寸越大,弓丝抗扭刚度越大,弓丝材质弹性模量越大,弓丝抗扭刚度也越大,但是尺寸对抗扭刚度的影响小于弓丝材质,与黄宁等^[23]的研究结果一致。再结合临床建议中切牙使用的转矩力矩为10~20 N·mm,SS丝抗扭刚度较大,产生的转矩力矩也大,不利于转矩的精确控制;NiTi丝抗扭刚度小,转

矩力矩适合于中切牙的转矩控制,但是由于NiTi丝硬度小,弹性大,可成形性差,临床也仅用于早期排齐整平;而TMA丝转矩力矩值介于SS丝和NiTi丝之间,抗扭刚度适中。0.43 mm×0.56 mm及0.41 mm×0.56 mm尺寸TMA弓丝时,垂直槽沟舌侧托槽最大转矩力矩分别为44.51、29.66 N·mm,水平槽沟则分别为24.83、17.73 N·mm,转矩力矩值虽略大,但弓丝有一定的硬度,成形性好,建议用于舌侧托槽的转矩精细控制^[24-26]。由于相同转矩角度下垂直槽沟舌侧托槽产生的转矩力矩更大,则在临床使用时,垂直槽沟舌侧托槽更小的力即可达到较好的转矩控制效果。

综上所述,在正畸治疗中,转矩的表达受多种因素影响,托槽槽沟方向对舌侧托槽转矩性能有一定的影响,但其影响小于弓丝因素带来的影响,临床上转矩表达主要靠弓丝的特性及相应托槽的配合来实现。

4 结论

两种舌侧托槽转矩角度/转矩力矩变化趋势相同,随着转矩角度的增大,转矩力矩逐渐增大;弓丝尺寸及弹性模量增大,两种舌侧托槽转矩也增大,但增大斜率略有不同;槽沟方向对舌侧托槽的转矩性能有影响,但小于弓丝因素改变带来的影响;垂直槽沟舌侧托槽产生了为水平槽沟舌侧托槽1~2倍的转矩力;弓丝尺寸对两种托槽转矩控制的影响小于弓丝材质,两者协同影响最大,提示在临床上垂直槽沟舌侧托槽转矩控制性能优于水平槽沟舌侧托槽。但是弓丝因素的选择对转矩力矩的影响更大,两种尺寸SS丝产生的转矩力矩较大,不适于临床前牙转矩的精细控制;NiTi丝产生的转矩力轻柔,但其成形性差,仅适于正畸早期排齐整平阶段;而TMA丝产生的转矩力适宜,0.41 mm×0.56 mm及0.43 mm×0.56 mm尺寸均可用于临床前牙转矩的精细调控。

参考文献:

- [1] 刘展, 牟雁东, 钱英莉, 等. 下颌全牙列-直丝弓矫治器的生物力学建模[J]. 医用生物力学, 2012, 27(5): 556-561.
LIU Z, MU YD, QIAN YL, et al. Biomechanical modeling of dentulous mandible-straight wire appliance [J]. J Med Biomech, 2012, 27(5): 556-561.

- [2] CHATOO A. A view from behind: A history of lingual orthodontics [J]. *J Orthod*, 2013, 4(40): S2-S7.
- [3] 徐佳瑛, 蔡中. 舌侧正畸的进展[J]. *口腔材料器械杂志*, 2007, 16(2): 86-90.
- [4] WIECHMANN D, RUMMEL V, THALHEIM A, *et al.* Customized brackets and archwires for lingual orthodontic treatment [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2003, 124(8): 593-599.
- [5] 柳大为, 周彦恒, 雷菲菲. Incognito 个体化舌侧矫治器的结构和特点综述[J]. *中华口腔正畸学杂志*, 2010, 17(3): 172-175.
- [6] 周林曦, 姚政铎, 沈刚. 个性化舌侧技术现状与进展[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2015, 8(2): 124-128.
- [7] 李凯, 刘琳. 舌侧矫治技术研究进展[J]. *中国实用口腔科志*, 2014, 7(2): 120-124.
- [8] 于岚. 舌侧托槽不同槽沟方向对矫治器力学性能影响的对比研究[D]. 北京: 北京协和医学院硕士学位论文, 2009: 1-42.
- [9] 张瑾. 舌侧托槽摩擦力的实验研究[D]. 北京: 北京协和医学院硕士学位论文, 2010: 1-75.
- [10] 夏琴香, 常琛扬, 蔡斌, 等. 个性化舌侧自锁矫治器咬合过程瞬态动力学分析及优化[J]. *医用生物力学*, 2013, 28(6): 659-664.
- XIA QX, CHANG CY, CAI B, *et al.* Transient dynamic analysis and optimization of a new customized lingual self-locking appliance during occluding [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(6): 659-664.
- [11] MORINA E, ELIADES T, PANDIS N, *et al.* Torque expression of self-ligating brackets compared with conventional metallic, ceramic, and plastic brackets [J]. *Eur J Orthod*, 2008, 30(8): 233-238.
- [12] HUANG Y, KEILIG L, RAHIMI A, *et al.* Numerical modeling of torque capabilities of self-ligating and conventional brackets [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2009, 136(5): 638-643.
- [13] ARCHAMBAULT A, MAJOR TW, CAREY JP, *et al.* A comparison of torque expression between stainless steel, titanium molybdenum alloy, and copper nickel titanium wires in metallic self-ligating brackets [J]. *Angle Orthod*, 2010, 80(5): 884-889.
- [14] MORAN KI. Relative wire stiffness due to lingual versus labial interbracket distance [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1987, 92(1): 24-32.
- [15] SIFAKAKIS I, PANDIS N, MAKOU M, *et al.* A comparative assessment of torque generated by lingual and conventional brackets [J]. *Eur J Orthod*, 2012, 35(9): 375-380.
- [16] HARZER W, BOURAUUEL C, GMYREK H. Torque capacity of metal and polycarbonate brackets with and without a metal slot [J]. *Eur J Orthod*, 2004, 26(4): 435-441.
- [17] MELENKA GW, LACOURSIERE RA, CAREY JP, *et al.* Comparison of deformation and torque expression of the orthos and orthos Ti bracket systems [J]. *Eur J Orthod*, 2011, 36(4): 381-388.
- [18] MAJOR TW, CAREY JP, NOBES DS, *et al.* Mechanical effects of third order movement in self-ligated brackets by the measurement of torque expression [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2011, 139(4): e31-44.
- [19] MAJOR TW, CAREY JP, NOBES DS, *et al.* An investigation into the mechanical characteristics of select self-ligated brackets at a series of clinically relevant maximum torquing angles: Loading and unloading curves and bracket deformation [J]. *Eur J Orthod*, 2013, 35(6): 719-729.
- [20] KATSIKOGIANNI EN, REIMANN S, WEBER A, *et al.* A comparative experimental investigation of torque capabilities induced by conventional and active, passive self-ligating brackets [J]. *Eur J Orthod*, 2015, 20(11): 440-446.
- [21] 祖青, 米从波. 正畸治疗中转矩表达的研究进展[J]. *中华口腔医学研究杂志*, 2010, 4(5): 518-522.
- [22] 姜春苗, 安舒, 王军. 正畸治疗过程中影响转矩的因素[J]. *国际口腔医学杂志*, 2011, 38(1): 115-118.
- [23] 黄宁, 辜岷, 韩向龙, 等. 正畸方丝转矩力的分析[J]. *华西口腔医学杂志*, 2008, 26(2): 152-155.
- [24] KAPILA S, SACHDEVA R. Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 1989, 96(2): 100-109.
- [25] SIFAKAKIS I, PANDIS N, MAKOU M, *et al.* Torque efficiency of different archwires in 0.018- and 0.022-inch conventional brackets [J]. *Angle Orthod*, 2014, 84(1): 149-154.
- [26] MELENKA GW, LACOURSIERE RA. *et al.* Comparison of deformation and torque expression of the orthos and orthos Ti bracket systems [J]. *Eur J Orthod*, 2014, 36(10): 381-388.