

文章编号:1004-7220(2016)01-0056-05

V形曲力学性能的三维有限元分析

唐茜^{1,2}, 瞿杨^{1,3}, 黄思源¹, 何淦¹, 杨四维¹, 黄跃¹

(1. 四川医科大学 口腔医学院, 正畸科, 泸州 6460002; 2. 都江堰市医疗中心 口腔科, 成都 610000;

3. 重庆市沙坪坝区人民医院 口腔科, 重庆 400030)

摘要: 目的 对不同弓丝材质、尺寸、角度、形状、托槽间距的V形曲进行有限元力学分析,为V形曲的临床应用提供理论参考。**方法** 建立两种材质(不锈钢弓丝、 β 钛丝)、两种尺寸(0.43 mm \times 0.64 mm、0.48 mm \times 0.64 mm)、两种V形曲位置、两种角度(150°、165°)和两种托槽间距(7、10 mm)的V形曲有限元模型,进行模拟加载后,对比分析其力学性能。**结果** 不锈钢弓丝材质V形曲产生的最大作用力值均大于 β 钛材质V形曲,0.43 mm \times 0.64 mm弓丝弯制的V形曲作用力均小于0.48 mm \times 0.64 mm组,对称型V形曲受弓丝尺寸变化更为明显,托槽间距变化对非对称型V形曲作用力值的影响更为明显。在V形曲形状相同时,V形角度越小,其各托槽作用力越大。**结论** 弓丝材质尺寸、角度形状及托槽间距的改变均能影响V形曲力学行为。在临床应用中,可以根据托槽间距的大小,对V形曲弓丝材质尺寸、角度形状进行选择。

关键词: 有限元分析; V形曲; 力学特性**中图分类号:** R318.01 **文献标志码:** A**DOI:** 10.3871/j.1004-7220.2016.01.056

Mechanical properties of V-bends with finite element analysis

TANG Qian^{1,2}, QU Yang^{1,3}, HUANG Si-yuan¹, HE Song¹, YANG Si-wei¹, HUANG Yue¹

(1. Department of Orthodontics, Stomatology Hospital, Sichuan Medical University, Luzhou 646000, Sichuan, China; 2. Department of Stomatology, Medical Center of Dujiangyan, Chengdu 610000, China; 3. Department of Stomatology, the People's Hospital of Shapingba in Chongqing, Chongqing 400030, China)

Abstract: Objective To analyze the mechanical properties of V-bends with different materials, sizes of arch wires, angles, shapes, inter-bracket distances by using finite element method, so as to provide references for clinical practice of V-bends. **Methods** The finite element models of V-bends were established, including two kinds of materials (stainless steel, titanium-molybdenum alloy), two sizes(0.43 mm \times 0.64 mm, 0.48 mm \times 0.64 mm), two V-bend positions, two angles(150°, 165°), and two inter-bracket distances(7, 10 mm), so as to compare and analyze their mechanical properties after simulative loading. **Results** The maximum force values produced by V-bends with stainless steel arch wire were greater than that of V-bends with β titanium steel arch wire. The force produced by V-bends with 0.43 mm \times 0.64 mm arch wire was smaller than that produced by V-bends with 0.48 mm \times 0.64 mm arch wire. The size of arch wire had a more obvious impact on V-bends with symmetrical arch wire. The force of V-bends with asymmetric arch wire was more evidently influenced by the change of inter-bracket distance. For V-bends with the same shape, the smaller the V-shaped angle, the greater the force on the bracket would be. **Conclusions** The V-bends with different materials, different sizes of arch wires, different shapes and inter-bracket distances will have different mechanical behaviors. In clinical application, the materials, sizes of arch wires, shapes and angles of V-bends should be adjusted properly according to the inter-bracket distances.

Key words: Finite element analysis; V-bend; Mechanical properties

收稿日期:2015-07-14; 修回日期:2015-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(81300903),厅、市、校联合基金(2014TSX-0060),四川省科技厅国际合作项目(2012HHZ001),川人社办发[2015]93号(编号31)。

通信作者:黄跃,副教授, E-mail: yue-huang@hotmail.com。

在现代固定正畸治疗中,正畸医生通过在弓丝上设计各种弯曲从而控制牙齿移动。在临床上,通常单独或组合应用各种基本曲使矫治力到达理想水平。其中,V形曲作为基本曲在正畸治疗中应用广泛,可根据其位置及作用不同分为后倾曲、屋顶曲以及前牙曲的艺术曲等。因此,研究V形曲的生物力学性能对合理使用矫治力、精确控制牙齿移动具有指导意义。国内外学者从不同角度对V形曲开展研究,而以往关于V形曲力学性能的研究主要是使用传统力学方法进行测量,例如:使用力学材料试验机测量镍钛及 β 钛材质弓丝弯制的V形曲力值^[1-2]。而传统力学方法测量多为静态和二维方向^[3],故需要寻找一种更为准确、直观的方法研究V形曲的力学性能。三维有限元法自1970年代以来即被广泛用于正畸生物力学方面的研究,例如:Techalertpaisarn等^[4]利用三维有限元法分析关闭曲的力学性能,但应用三维有限元法研究V形曲的力学性能鲜有报道。因此,本文建立托槽-V形曲弓丝-结扎丝的三维有限元模型,利用有限元分析法明确不同托槽间距时不同角度形状、弓丝尺寸材质V形曲的力学原理,以期将试验结果用于指导临床,为有效控制正畸力、提高疗效提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 建立托槽-V形曲弓丝-结扎丝实体模型

利用三维建模软件 ProE Wildfire 5.0 软件,以 Discovery[®] (Dentaurum 公司,德国)唇侧托槽计算机辅助测量数据为参考,根据托槽尺寸、槽沟深度、预置轴倾度转矩角度等参数,建立右上颌尖牙和右上颌第2前磨牙托槽。两托槽槽沟尺寸均为 558.8 μm 。结扎丝模型直径为 0.2 mm。不同形状的V形曲以V形曲顶点到15托槽中心距(a)与13、15两托槽中心距(L)的比值(a/L)表示。建立V形曲弓丝模型,两种尺寸(0.43 mm \times 0.64 mm, 0.48 mm \times 0.64 mm)、两种V形曲位置($a/L=0.50, 0.33$)、两种角度($150^\circ, 165^\circ$)以及两种托槽间距(7, 10 mm)相互两两组合,共计16根。将建立的托槽、V形曲弓丝以及结扎丝实体模型于 ProE Wildfire 5.0 中以V形曲弓丝平面为基准平面进行装配。首先,将右上颌尖牙托槽及右上颌第2前磨牙托槽槽沟与V形曲弓丝匹配;其后,将4个结扎丝模型分别装配在

右上颌尖牙托槽及右上颌第2前磨牙托槽近远中侧,完成V形曲三维模型的装配。

1.2 建立托槽-V形曲弓丝-结扎丝三维有限元模型

将装配好的模型导入 MSC. patran 软件中分组进行网格划分,划分单元类型为四面体单元,共计 82 35 节点、32 588 单元。将网格划分完成后模型导入在 MSC. Marc. Mentat 2005 R3 软件进行物理参数设定。假定所建立的有限元模型为均质、各向同性的线弹性材料,将托槽、结扎丝材料均设定为不锈钢材质,V形曲弓丝设定为不锈钢(stainless steel, SS)和 β 钛(titanium-molybdenum alloy, TMA)两种材质,托槽与弓丝之间、结扎丝与弓丝之间摩擦力因数 $\mu=0.2$ ^[5-8]。托槽、结扎丝、SS弓丝、TMA弓丝的弹性模量分别为200、200、200、80 GPa,泊松比均为0.3。

1.3 实验模型分组

建立8组模型,第1组为0.43 mm \times 0.64 mm的不锈钢弓丝,在托槽间距均为10 mm时两种V形曲位置(1-1、1-2)及两种V形曲角度(1-3、1-4)4个工况;第2组为0.43 mm \times 0.64 mm的TMA丝,在托槽间距均为10 mm时两种V形曲位置(2-1、2-2)及两种V形曲角度(2-3、2-4)4个工况;第3组为0.43 mm \times 0.64 mm的SS弓丝,在托槽间距均为7 mm时两种V形曲位置(3-1、3-2)及两种V形曲角度(3-3、3-4)的4个工况;第4组为0.43 mm \times 0.64 mm的TMA丝,在托槽间距均为10 mm时两种V形曲位置(4-1、4-2)及两种V形曲角度(4-3、4-4)4个工况。第5~8组与第1~4组工况设计相同,只改变弓丝尺寸,即0.48 mm \times 0.64 mm。共计32种工况(见表1)。因工况较多,抽取每组模型中某一组工况的有限元模型示意(见图1)。

1.4 载荷设定及分析项目

在有限元软件 MSC. Marc. Mentat 2005 R3 软件中将模型设定托槽与结扎丝为黏合关系,V形曲弓丝与结扎丝以及V形曲弓丝与托槽之间均设定为接触关系。建立坐标系以右上颌尖牙为基准(X 轴指向托槽近远中方向,以近中向为正,远中向为负; Y 轴为牙合龈向方向,龈向为正,牙合向为负; Z 轴唇舌向方向,舌向为正,唇向为负)。于V形曲弓丝右上颌尖牙侧弓丝末端截面以及右上颌尖牙托

表1 模型分组情况

Tab. 1 Model grouping

模型 分组	工况 名称	间距/ mm	弓丝尺 寸/mm	弓丝 材质	V形曲 角度/(°)	V形曲位 置/(a/L)
1	1-1	10	0.43 × 0.64	SS	150	0.50
	1-2	10	0.43 × 0.64	SS	150	0.33
	1-3	10	0.43 × 0.64	SS	165	0.50
	1-4	10	0.43 × 0.64	SS	165	0.33
2	2-1	10	0.43 × 0.64	TMA	150	0.50
	2-2	10	0.43 × 0.64	TMA	150	0.33
	2-3	10	0.43 × 0.64	TMA	165	0.50
	2-4	10	0.43 × 0.64	TMA	165	0.33
3	3-1	7	0.43 × 0.64	SS	150	0.50
	3-2	7	0.43 × 0.64	SS	150	0.33
	3-3	7	0.43 × 0.64	SS	165	0.50
	3-4	7	0.43 × 0.64	SS	165	0.33
4	4-1	7	0.43 × 0.64	TMA	150	0.50
	4-2	7	0.43 × 0.64	TMA	150	0.33
	4-3	7	0.43 × 0.64	TMA	165	0.50
	4-4	7	0.43 × 0.64	TMA	165	0.33
5	5-1	10	0.48 × 0.64	SS	150	0.50
	5-2	10	0.48 × 0.64	SS	150	0.33
	5-3	10	0.48 × 0.64	SS	165	0.50
	5-4	10	0.48 × 0.64	SS	165	0.33
6	6-1	10	0.48 × 0.64	TMA	150	0.50
	6-2	10	0.48 × 0.64	TMA	150	0.33
	6-3	10	0.48 × 0.64	TMA	165	0.50
	6-4	10	0.48 × 0.64	TMA	165	0.33
7	7-1	7	0.48 × 0.64	SS	150	0.50
	7-2	7	0.48 × 0.64	SS	150	0.33
	7-3	7	0.48 × 0.64	SS	165	0.50
	7-4	7	0.48 × 0.64	SS	165	0.33
8	8-1	7	0.48 × 0.64	TMA	150	0.50
	8-2	7	0.48 × 0.64	TMA	150	0.33
	8-3	7	0.48 × 0.64	TMA	165	0.50
	8-4	7	0.48 × 0.64	TMA	165	0.33

槽底板各选4点,在X、Y、Z轴3个方向均设为固定约束。加载节点为右上颌第2前磨牙托槽底板中心点,在该底板边缘各顶点选取4个节点,定义此4节点与中心点运动轨迹一致。加载方向为:加载X向

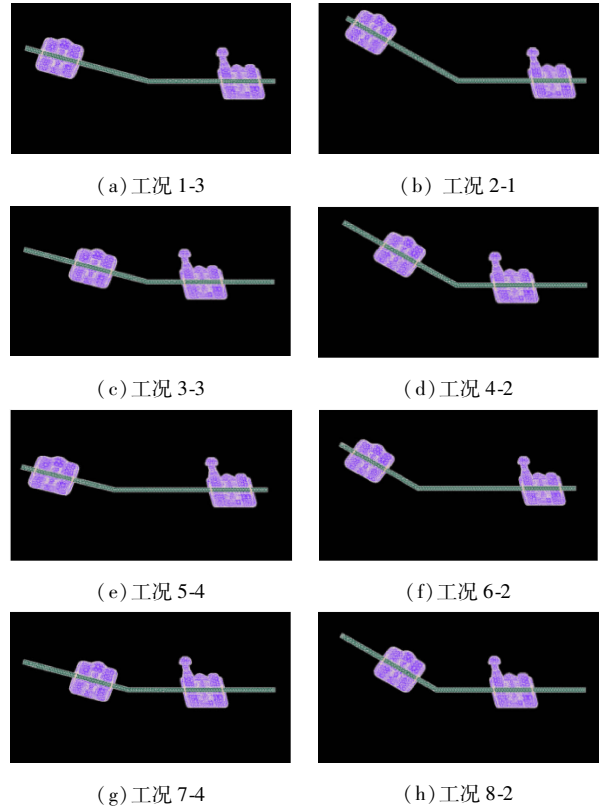


图1 每组模型其中一组工况的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of one case in each group

(a) The case 1-3, (b) The case 2-1, (c) The case 3-3,
(d) The case 4-2, (e) The case 5-4, (f) The case 6-2,
(g) The case 7-4, (h) The case 8-2

位移使右上颌尖牙托槽及右上颌第2前磨牙托槽在X轴高度一致,加载Z向旋转位移使两托槽在Z轴向平行,以模拟临床V形曲弓丝加载的力学过程。在设定完成后,对各工况分别进行计算。选取右上颌尖牙托槽及右上颌第2前磨牙托槽槽沟中心处节点,记录其所受力值,使用力值数据图的方式输出结果。

2 结果

2.1 有限元的模型建立

使用有限元分析软件,成功建立了模拟不同类型V形曲临床加载各种工况的三维有限元模型,为进一步研究正畸临床上使用V形曲移动牙齿过程中的生物力学变化规律提供理论参考。

2.2 不同材质V形曲力学性能比较

不同位置及角度V形曲弓丝有限元模型加载

后,各组 SS 材质 V 形曲托槽所受作用力的最大力值 F_{max} 均大于 TMA 材质 V 形曲; 而对称型 V 形曲角度较小时, 两种材质 V 形曲托槽所受作用力的最大值差异更为明显。以第 1、2 组右上颌第 2 前磨牙托槽所受作用力的 F_{max} 值为例说明(见图 2)。

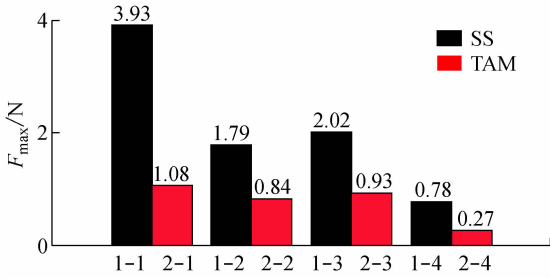


图 2 不同弓丝材质 V 形曲第 2 前磨牙所受最大力值比较

Fig. 2 Comparison of the maximum force of the second premolar produced by V-bend with different wire material

2.3 不同弓丝尺寸 V 形曲力学性能比较

相同弓丝材质、形状及角度以及托槽间距, 不同弓丝尺寸 V 形曲有限元模型加载后, 其结果表明, 0.43 mm × 0.64 mm 组 V 形曲托槽所受作用力的 F_{max} 均小于 0.48 mm × 0.64 mm 组, 对称型 V 形曲 F_{max} 均大于非对称性 V 形曲。以第 1、5 组右上颌第 2 前磨牙托槽所受作用力的 F_{max} 为例说明(见图 3)。

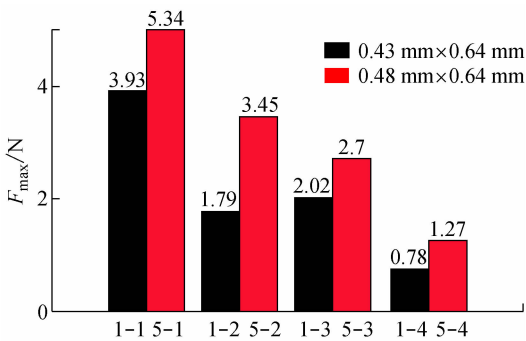


图 3 不同弓丝尺寸 V 形曲第 2 前磨牙所受最大力值比较

Fig. 3 Comparison of the maximum force of the second premolar produced by V-bend with different wire sizes

2.4 不同托槽间距 V 形曲力学性能比较

相同材质、弓丝尺寸、形状及角度, 不同托槽间距的 V 形曲弓丝有限元模型加载后, 其结果表明, 托槽间距为 7 mm 模型组 V 形曲托槽所受作用力均大于 10 mm 组, 以第 1、3 组右上颌第 2 前磨牙托槽

所受作用力的 F_{max} 为例说明(见图 4)。非对称型 V 形曲组作用力比值均大于对称组。

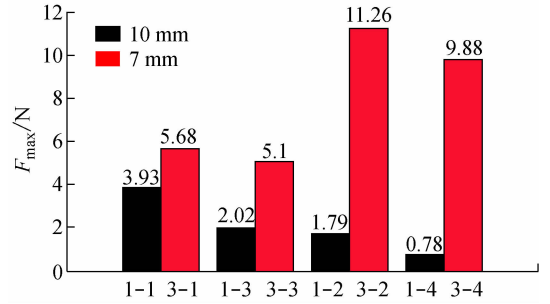


图 4 不同托槽间距 V 形曲第 2 前磨牙所受最大力值比较

Fig. 4 Comparison of the maximum force of the second premolar produced by V-bend with different inter-bracket distances

2.5 不同形状及角度 V 形曲力学性能比较

不同形状 V 形曲各托槽作用力的 F_{max} 对比结果表明, 对称型 V 形曲尖牙托槽所受作用力大于第 2 前磨牙托槽受力, 而非对称型尖牙托槽所受作用力则小于第 2 前磨牙托槽受力。在 V 形曲形状相同时, V 形曲角度越小, 其各托槽所受作用力越大。对称型 V 形曲尖牙托槽所受作用力与第 2 前磨牙托槽受力相近, 而非对称型 V 形曲尖牙托槽所受作用力小于第 2 前磨牙托槽受力。以第 1 组 V 形曲为例说明(见图 5、6)。

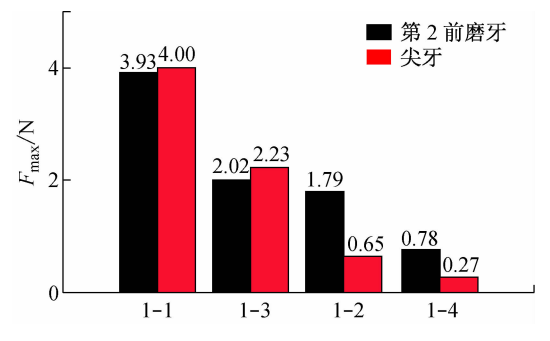


图 5 不同形状/角度 V 形曲各托槽所受最大力值比较

Fig. 5 Comparison of the maximum force of each bracket produced by V-bend with different V-bend angles/shapes

3 讨论

3.1 实验方法的选择

V 形曲在临床应用广泛, 在多种矫治技术都有应用, 但应用三维有限元法研究 V 形曲力学性能鲜有报道。本实验通过建立托槽-V 形曲弓丝-结扎丝

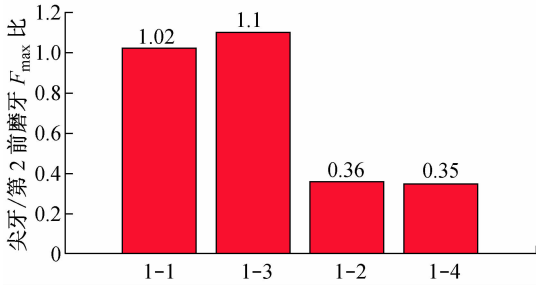


图6 不同形状/角度V形曲尖牙托槽与第2前磨牙托槽最大力值对比

Fig. 6 Comparison of the ratio of the maximum force between the canine bracket and the second premolar bracket produced by V-bend with different V-bend angles/shapes

的三维有限元模型,利用有限元分析法明确不同角度形状的V形曲,在不同托槽间距时各种尺寸材料弓丝进入托槽时力学变化。实验结果证实,三维有限元法对V形曲的研究实用可行,为临床研究V形曲提供理论依据。

3.2 弓丝材质、尺寸及托槽间距对V形曲力学性能的影响

V形曲作为基本曲在正畸临床上较为常用,在患者不同托槽间距的情况下,对于其弓丝材质及尺寸的选择显得尤为重要。

本实验V形曲弓丝材质选择临床常用的SS和TMA弓丝,TMA弹性模量小于SS,传统力学实验表明,TMA具有较好的可成形性和回弹性^[9-10]。结果显示,SS弓丝材质V形曲产生的最大作用力值均大于TMA材质V形曲;进一步对比不同材质V形曲最大力值比显示,当对称型V形曲角度较小时,其比值较大,说明在对称型V形曲角度越小时,两种材质V形曲作用力力值差异越为明显。因此,在正畸临床上,如需使用角度较小的V形曲,可以选择弹性模量较小的TMA材质V形曲,因为其作用力较为柔和。在弓丝尺寸的选择上,本实验选择正畸临床常用0.43 mm×0.64 mm和0.48 mm×0.64 mm弓丝尺寸,实验结果显示,0.43 mm×0.64 mm弓丝弯制的V形曲作用力均小于0.48 mm×0.64 mm组,对称型V形曲受弓丝尺寸变化影响更为明显。因此,临床上在使用对称型V形曲时,应首先考虑到弓丝尺寸对作用力的影响。本实验根据拔除第1前磨牙的平均宽度设定托槽间距为7和10 mm。两种托槽间距V形曲产生的作用力力值比较结果表

明,非对称型组的作用力比值大于对称型组,说明托槽间距的变化对非对称型V形曲作用力力值变化的影响更为明显,故在临床操作中应考虑托槽间距对V形曲托槽受力的影响。当托槽间距较小时,建议选用对称型V形曲,因为其作用力更为柔和。

3.3 V形曲形状及角度对其力学性能的影响

V形曲形状和角度对其力学性能的影响较大,故在临床应用中对于其形状及角度的选择显得尤为重要。Kojima等^[11]研究发现,使用对称型V形曲时,其尖牙倾斜量是第1磨牙的2倍。对于非对称型V形曲,其靠近V形曲顶点的牙的倾斜度和受到的力均较大。本实验结果表明,在V形曲形状相同时,V形曲角度越小,其各托槽作用力越大。在采用较小角度V形曲时,应考虑选择弹性模量较小的材质或尺寸较小的弓丝以减小作用力。对称型V形曲尖牙托槽作用力与第2前磨牙托槽作用力比值接近为1,尖牙托槽作用力与第2前磨牙相近,而非对称型V形曲比值接近0.33,第2前磨牙靠近V形曲顶点,其所受作用力约为尖牙的3倍。V形曲尖牙托槽作用力与第2前磨牙托槽作用力比值受V形曲形状影响较大,与V形曲角度关系较小。本实验结果表明,托槽离V形曲顶点越近,其受力越大,这与Kojima等^[11]实验结果相似。因此,在实际正畸临床操作中,在需要使用非对称型V形曲时,应充分考虑靠近V形曲顶点的牙所能承受的作用力,可以通过改变V形曲顶点的位置或减小V形曲角度以减小靠近V形曲顶点的牙受力的方法,避免牙体所受作用力较大产生牙根吸收等并发症。

综上所述,应用三维有限元方法研究V形曲性能有效可靠,且三维有限元方法灵活多变、效率高,能够方便地设置托槽及V形曲角度、形状等属性,值得在以后的研究中推广。

致谢:感谢四川医科大学口腔颌面修复重建和再生实验室对实验的支持。

参考文献:

- [1] Quick AN, Lim Y, Loke C, et al. Moments generated by simple V-bends in nickel titanium wires [J]. Eur J Orthod, 2011, 33(4): 457-460. (下转第72页)