

文章编号: 1004-7220(2022)02-0274-06

附件磨损对牙齿移动影响的有限元分析

李文龙¹, 毕绍洋², 郭子源¹, 石广玉², 张锡忠³

(1.南开大学 医学院, 天津 300070; 2.天津大学 机械工程学院, 天津 300070; 3.天津市口腔医院 正畸科, 天津 300041)

摘要:目的 探讨隐形矫治中上颌尖牙矩形附件磨损对于尖牙移动的影响, 为提高尖牙隐形矫治效率提供参考。**方法** 用获取的牙齿 CBCT 扫描数据, 建立牙齿模型, 并分别与磨损和完整附件组装。当矫治器对牙齿施加 2° 远中扭转、0.25 mm 远中位移、0.1 mm 压低位移和 0.1 mm 伸长位移后, 比较磨损和完整附件组牙齿位移、牙周膜应力和牙根等效应力的变化。**结果** 用无托槽隐形矫治器对牙齿施加远中扭转和伸长位移时, 牙齿最大位移明显减小; 磨损附件使牙齿在发生远中平移和伸长位移时, 牙齿发生倾斜移动。磨损附件使牙齿受到远中扭转、远中平移、压低和伸长移动时, 牙周膜最大主应力和牙根等效应力均减小。**结论** 附件磨损后会影响到牙齿旋转和伸长的移动效率。当附件出现明显的磨损后, 应该及时更换新附件, 以保证附件能够正常发挥作用。

关键词: 隐形矫治; 附件磨损; 牙齿移动; 有限元分析

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.02.013

Effects of Attachment Wear on Tooth Movement: A Finite Element Analysis

LI Wenlong¹, BI Shaoyang², GUO Ziyuan¹, SHI Guangyu², ZHANG Xizhong³

(1. School of Medicine, Nankai University, Tianjin 30070, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 30070, China; 3. Department of Orthodontics, Tianjin Stomatological Hospital, Tianjin 300041, China)

Abstract: **Objective** To explore the effect of attachment wear on tooth movement in clear Aligner treatment, and to provide references for improving the efficiency of orthodontic treatment. **Methods** The tooth cone beam computed tomography (CBCT) scanning data were obtained, and the tooth model was established and assembled with the worn and complete attachment, respectively. When the appliance applied 2° distal torsion, 0.25 mm distal displacement, 0.1 mm depression displacement and 0.1 mm elongation displacement to the teeth, the changes of tooth displacement, periodontal ligament stress and root equivalent stress in the worn and complete attachment groups were compared. **Results** When the clear Aligner was used to apply distal torsion and elongation displacement to the teeth, the maximum tooth displacement decreased significantly, and the worn attachment caused the teeth to move obliquely when the distal translation and elongation displacement occurred. When the tooth was subjected to distal torsion, distal translation, depression and elongation, the maximum principal stress of periodontal ligament and the equivalent stress of tooth root decreased when the worn attachment caused the tooth to be subjected to distal torsion, distal translation, depression and elongation. **Conclusions** Attachment wear will affect the efficiency of tooth rotation and elongation. When the attachments are obviously worn, they should be replaced in time to ensure normal function of the attachments.

Key words: clear Aligner treatment; attachment wear; tooth movement; finite element analysis

收稿日期: 2021-01-16; 修回日期: 2021-03-24

基金项目: 天津市重点学科建设项目 (津卫科教[2021]492号)

通信作者: 张锡忠, 教授, E-mail: zhangxizhong9999@hotmail.com

现代无托槽隐形矫治器于1997年由美国Align Technology公司研制出来^[1]。隐形矫治技术经历20余年的发展,在国内外临床中得到广泛的应用,附件已经成为技术体系中不可或缺的一部分。附件的使用可以增加牙齿的移动效率,但是最终矫治后的牙齿排列依然不能达到计算机中设计的效果。如何提高牙齿移动效率,一直是正畸医师关注的问题^[2-4]。本课题组在临床中关注到长期佩戴矫治器患者会出现附件磨损的现象,认为附件磨损可能是影响隐形矫治效率的因素之一。但是,目前关于附件磨损后对牙齿移动效率的影响还鲜有报道。本文通过三维有限元方法,以粘接完整附件与磨损附件的牙齿为研究对象,探讨在矫治器对牙齿施加矫治力时牙齿的改变趋势和程度。

1 材料与方法

1.1 模型建立

1.1.1 建立尖牙模型 从医院影像数据库中,选出1名牙周健康、牙齿形态正常的成年女性,收集其DICOM格式的锥形束计算机断层(cone beam computed tomography, CBCT)扫描数据,获取图像和牙齿的各项参数,上下颌牙列一共635张图层。将DICOM文件导入Mimics软件,分离上颌左侧尖牙,将修整后得到的上颌尖牙3D模型存成STL格式文件,并导入Geomagic进行表面光滑处理和参数化建模,得到精细的上颌尖牙模型^[5-7]。输出STL格式文件,将其导入SpaceClaim。使用多个平面与STL

几何相交抽取出曲线,将几何体剥皮并拟合为更光滑的NURBS曲面,并进一步基于曲面生成牙齿的实体。设置牙齿的坐标系原点在牙尖, x 轴指向近中方向, y 轴指向唇侧, z 轴与牙齿长轴重合,由牙尖指向牙根。

用两个平面将牙齿模型切割成三部分。平面A以上的部分是牙根,将包裹上牙周膜;平面B以下部分将覆盖矫治器。在SpaceClaim中,参考实际的附件形状,建立完整附件的几何模型。旋转附件到接近临床实际的角度粘贴到牙齿上,使附件与牙齿表面完全重合[见图1(a)]。

1.1.2 建立磨损附件模型 找到1位佩戴矫治器18个月的志愿者,用3Shape Trios口腔扫描仪(3Shape公司,丹麦)获取上颌尖牙模型,导出1个包含磨损附件与牙齿表面的STL格式模型文档。然后将磨损附件部分[见图1(c)]从模型中切下来,粘贴在所建牙齿几何模型的相同位置[见图1(b)]。

1.1.3 建立牙周膜和矫治器模型 将建立好的包含完整附件的牙齿模型从SpaceClaim中导出为通用的STEP格式,再导入HyperMesh 2020。为了建立等厚度的牙周膜网格,先对牙根划分四边形网格,然后通过单元偏移生成牙周膜。同样,对面网格偏移生成矫治器的网格。在生成牙周膜和矫治器的网格以后,再使用空间四面体单元对牙齿和矫治器进行网格划分[见图1(e)、(f)]。最后,在牙周膜外生成近似形状的牙槽骨,并分为皮质骨和松质骨。

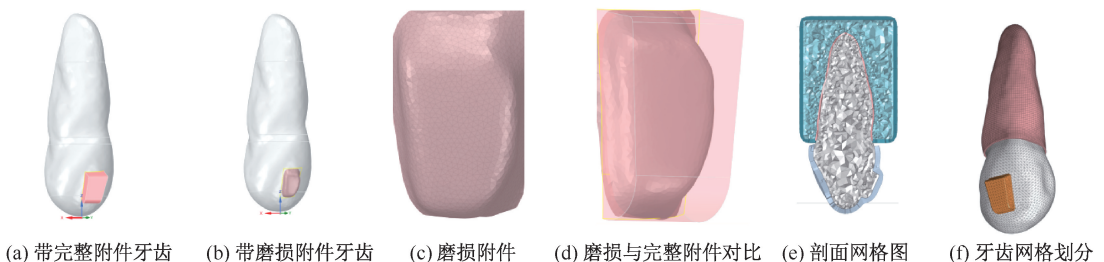


图1 完整与磨损附件及其网格划分

Fig.1 Complete attachment and worn attachment and their meshing (a) Tooth with complete attachment, (b) Tooth with worn attachment, (c) Worn attachment, (d) Comparison between worn attachment and complete attachment, (e) Section grid diagram, (f) Tooth meshing

在完整附件对应的模型网格划分结束后,将磨损附件几何模型导入HyperMesh中。保持牙周膜、牙槽骨和矫治器的网格不变,仅对附件和与之相连

的牙齿重新划分网格,以此保证磨损附件和完整附件在计算结果上具有可比性。

最终生成的模型、矫治器节点数和单元数分别为

6 627 和 4 436, 牙齿节点数和单元数分别为27 679和143 635, 完整附件节点数和单元数分别为 904 和 3 742, 磨损附件节点数和单元数分别为4 700和21 947. 牙周膜、牙体和矫治器弹性模量分别为0.68、19 600、528 MPa, 泊松比分别为0.45、0.30和0.30. 将划分好的网格导出到 ANSYS Workbench.

1.2 接触关系

设置牙周膜和牙槽骨之间的连接为绑定接触, 在矫治器和牙齿、矫治器和附件之间使用摩擦接触, 摩擦因数为0.1.

1.3 力学加载及其运算

4种加载方式如下: ① 将矫治器以牙体长轴为旋转中心轴, 向远中扭转 2°; ② 将矫治器向远中位移 0.25 mm; ③ 将矫治器向根向位移 0.1 mm; ④ 将矫治器向冠向位移 0.1 mm. 牙槽骨外侧都设置为固定(见图2).

2 结果

对应每1种加载方式, 分别计算牙齿总位移、牙周膜最大主应力、牙根 von Mises 应力. 其中, 牙齿总位移是指牙齿和附件整体在矫治器作用下产生的真实位移; 牙周膜最大主应力能有效反映受拉区和受压区; 牙根 von Mises 应力则能够在一定程度

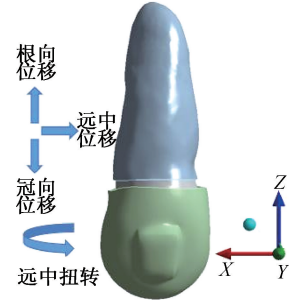


图2 矫治器对牙齿加载力示意图
Fig.2 Schematic of orthodontic force loading on the tooth

上体现牙根上的应力集中区域.

2.1 完整与磨损附件对远中扭转尖牙模型的影响

在矫治器施加远中扭转尖牙的力时, 两组模型最小位移均集中在根尖, 但是完整附件组最大位移达到 117.2 μm, 磨损附件组最大位移仅为 54.3 μm. 完整、磨损附件组牙周膜最大主应力均集中在腭侧, 趋势一致. 完整附件组牙周膜最大压应力达到 0.45 MPa, 最大拉应力为 0.59 MPa; 磨损附件组最大压应力为 0.13 MPa, 最大拉应力为 0.20 MPa. 牙根 von Mises 应力显示, 两组模型都是从牙颈部向根尖部应力逐渐减小, 完整、磨损附件组最大 von Mises 应力分别为 3.16、1.17 MPa (见图3).

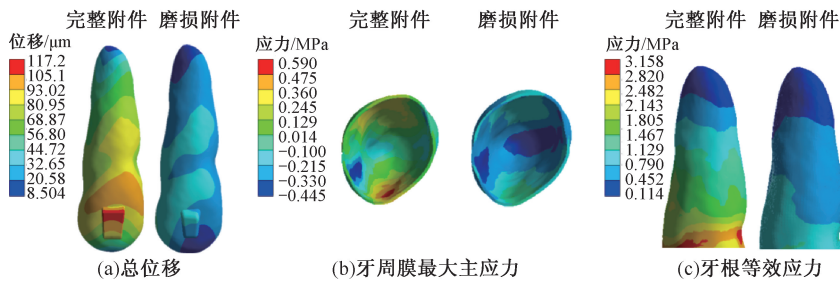


图3 远中扭转时完整与磨损附件组对比
Fig.3 Comparison between complete attachment group and worn attachment group during distal torsion

(a) Total displacement, (b) Maximum principal stress of periodontal ligament, (c) Von Mises stress of tooth root

2.2 完整与磨损附件对远中移动尖牙模型的影响

在矫治器施加远中位移的力时, 两组模型最大位移均集中在牙尖处, 最小位移均集中在根尖处, 趋势一致. 与临床实际情况一致, 牙齿发生倾斜移动. 完整、磨损附件组的最大位移分别为 243.3、251.8 μm. 牙周膜最大主应力均集中在近中颈部,

趋势一致. 完整附件组牙周膜最大压应力 1.13 MPa, 最大拉应力为 1.24 MPa; 磨损附件组最大压应力为 1.08 MPa, 最大拉应力为 1.11 MPa. 牙根 von Mises 应力显示, 两组模型应力都集中在近远中方向, 完整、磨损附件组最大 von Mises 应力分别为 7.84、7.40 MPa(见图4).

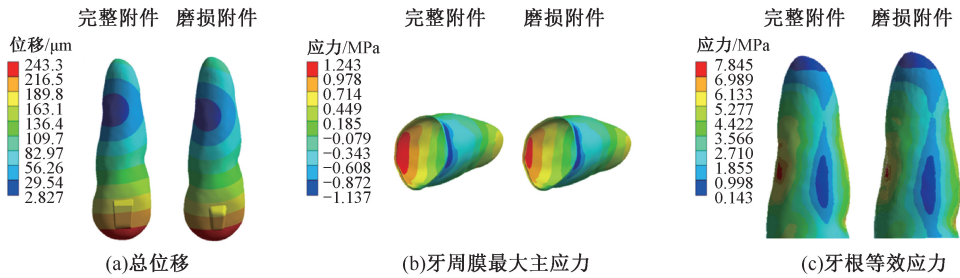


图4 远中平移时完整与磨损附件组对比

Fig.4 Comparison between complete attachment group and worn attachment group during distal translation (a) Total displacement, (b) Maximum principal stress of periodontal ligament, (c) Von Mises stress of tooth root

2.3 完整与磨损附件对压低移动尖牙模型的影响

在矫治器施加压低位移的力时,两组模型最大位移均集中在牙冠部分,最小位移均集中在牙根尖处,趋势一致。完整、磨损附件组的最大位移分别为 87.5、86.6 μm 。牙周膜最大主应力均集中在牙颈部,趋势一致。完整附件组牙周膜最

大压应力 0.87 MPa,最大拉应力为 0.41 MPa;磨损附件组最大压应力为 0.81 MPa,最大拉应力为 0.36 MPa。牙根 von Mises 等效应力显示,两组应力都集中在唇侧颈部位置,完整、磨损附件组最大 von Mises 应力分别为 1.81、1.36 MPa (见图 5)。

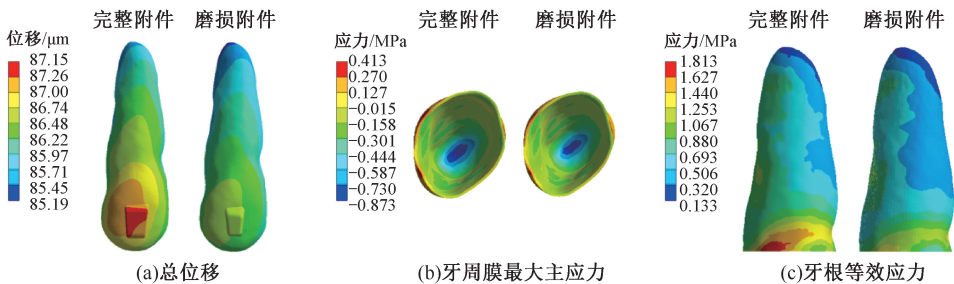


图5 压低移动时完整与磨损附件组对比

Fig.5 Comparison between complete attachment group and worn attachment group during depression displacement

(a) Total displacement, (b) Maximum principal stress of periodontal ligament, (c) Von Mises stress of tooth root

2.4 完整与磨损附件对伸长移动尖牙模型的影响

在矫治器施加伸长移动尖牙的力时,完整附件组最大位移在唇侧附件位置,为 57.9 μm ;而磨损附件组最大位移在近中位置,为 23.4 μm 。完整、磨损附件组牙周膜最大主应力均集中在根尖部,趋势一致。完整

附件组牙周膜最大压应力为 0.13 MPa,最大拉应力为 0.63 MPa;磨损附件组最大压应力为 0.01 MPa,最大拉应力为 0.17 MPa。牙根 von Mises 应力显示,两组模型应力都集中在唇侧颈部,完整、磨损附件组最大 von Mises 应力分别为 2.90、0.44 MPa (见图 6、表 1)。

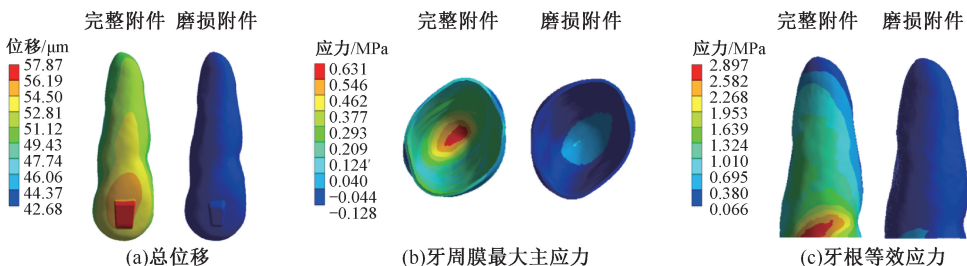


图6 伸长移动时完整与磨损附件组对比

Fig.6 Comparison between complete attachment group and worn attachment group during elongation displacement (a) Total displacement, (b) Maximum principal stress of periodontal ligament, (c) Von Mises stress of tooth root

表1 完整与磨损附件组牙齿移动结果比较

Tab.1 Comparison of tooth movement results between complete attachment group and worn attachment group

加载	最大位移/mm		最大压应力/MPa		最大拉应力/MPa		牙根最大等效应力/MPa	
	完整附件组	磨损附件组	完整附件组	磨损附件组	完整附件组	磨损附件组	完整附件组	磨损附件组
远中扭转	0.12	0.05	0.45	0.13	0.59	0.20	3.16	1.17
远中平移	0.24	0.25	1.13	1.08	1.24	1.11	7.84	7.40
压低移动	0.09	0.09	0.87	0.81	0.41	0.36	1.81	1.36
伸长移动	0.06	0.02	0.13	0.01	0.63	0.17	2.90	0.44

3 讨论

附件通常由复合树脂制作,在临床中常常能观察到口腔中的附件在使用一段时间后,会出现磨损的现象。本文分析认为,附件在口腔内主要受到3种磨损机制的影响:磨料磨损主要发生在刷牙的过程中,由于牙膏中含有较硬的材料,牙刷与附件之间形成三体磨损;疲劳磨损主要源于矫治器每天反复的摘戴,这种重复性、间歇性的压力施加到附件上,会使得附件部分剥脱;侵蚀性磨损主要发生在患者每天进食过程中,由于食物、饮料以及患者口腔内唾液和微生物环境对附件的侵蚀,使得附件发生变化。在人工唾液中进行的磨损实验结果表明,pH降低会导致复合树脂磨蚀量增加、耐磨性能降低^[8]。附件磨损真实存在,但是鲜有研究探讨磨损后附件对牙齿移动效率产生的具体影响。本文通过构建完整与磨损附件模型,模拟各种牙齿移动情况下牙齿受力的改变,期望可以指导临床应用,让医生决定附件磨损后在何时何种情况下应该更换附件,保证牙齿移动效率。

对于隐形矫治而言,解决牙齿扭转是一件比较困难的事情。Charalampakis等^[9]研究表明,隐形矫治中实现率最低的牙齿移动类型是尖牙的旋转移动。Kravitz等^[3]研究发现,隐形矫治器对于纠正尖牙扭转的平均准确率仅为35.8%。本文结果提示,在矫治器施加给牙齿旋转的力时,需要通过附件将力传递给牙齿。完整附件能够较好地与矫治器贴合,而磨损后的附件厚度减小,与矫治器之间出现间隙,矫治器的力无法完全传递给牙齿,牙齿受力减小,最终导致位移量减少,牙周膜最大应力减小。陈周艳等^[10]研究表明,在扭转尖牙时,最大位移随着矩形附件厚度的减小而减小,该结果与本文结果一致。因为旋转尖牙实现率较低,临床医师在纠正扭转尖牙时,最好配合辅助装置,例如唇舌侧粘接舌扣,给扭转牙施加力偶辅助旋转。若单纯使用矫治器纠正扭转牙,在附件使用一段时间后出现磨损情况时,应及时更换或修整成

完整的附件。

在拔除前磨牙内收前牙的病例中,常需要尖牙远中移动关闭间隙。在矫治器对牙齿施加远中移动的力时,两组模型最大位移均集中在牙尖处,最小位移均集中在根尖处,说明牙齿均发生倾斜的移动。该结果与何林等^[11]的研究结果一致,即单个附件不能使得尖牙发生整体的远中移动,但会发生倾斜移动。在垂直矩形附件远中移动过程中,附件应力集中在近中的龈端和远中的殆方,在这两个应力集中区域形成力偶,对尖牙产生控根作用,抵抗尖牙远中移动过程中的倾斜移动。因此,矩形附件长度越长,力偶的力臂越大,力偶越大,控根效果也更好。随着尖牙上面粘接的垂直矩形附件长度越长,尖牙的倾斜移动程度越低,尖牙会更倾向于整体移动。而完整和磨损附件组位移、牙周膜最大应力和牙根等效应力均近似,这是因为在远中移动时,矫治器能够较好地包裹住整个牙冠,受力面积较大,最大受力位置都位于牙冠的近中部分,故附件磨损对于牙齿移动的影响较为轻微。该结果提示,临床医师在远中移动尖牙时,当附件出现龈方和殆方明显磨损,如果尖牙需要控根,最好重新恢复附件外形,这样会更利于控根;如果无需控根,则附件磨损对于牙齿远中移动的影响较小。

对于一些深覆殆的患者,常常需要压低前牙、伸长后来纠正深覆殆,故牙齿的压低效率对深覆殆的治疗具有关键意义。宋保龙等^[12]研究发现,在牙齿不进行内收而压低时,隐形矫治器的平均压低效率为46.9%,其中压低上颌尖牙效率最低(28.8%)。在矫治器压低牙齿时,完整附件组最大位移集中在附件上,而磨损附件组最大位移多集中在牙冠近中的位置。本文认为,当压低牙齿时,矫治器力首先传递给附件,再传递给牙齿;当附件磨损时,矫治器力不能有效传递给附件,则传递给牙齿,而整个传递的力变小,使得牙周膜最大应力和牙根等效应力均减小。蔡永清等^[13]研究表明,压低位移的主要影响因素是矫治器弹性模量、矫治器厚度和压低位移量,而矫治器材

料目前已经基本固定,能改变的是压低位移量。但压低位移量也是有限制的,一般在 0.15~0.35 mm。另外,想要加强压低效果,就需要采取加种植钉支抗等一些辅助措施。本文结果提示,临床医师设计压低时,应有适量的过矫治,并且附件磨损对于压低移动量影响有限,可以不做处理。

临床中,对于开骀的患者,常常需要伸长牙齿,隐形矫治器伸长牙齿的效率问题便成为关乎矫治成功的关键要素之一。Garnett 等^[15]比较固定矫治器和隐形矫治器对前牙开骀的治疗效果,认为隐形矫治器治疗开骀能够达到和固定矫治一样的效果。在隐形矫治器伸长牙齿时,首先着力点在附件上,当附件磨损时,矫治器力无法完整地通过附件传递给牙齿,则矫治器首先接触到的附件位置就可能会导致力量集中在某个点,从而传递力量不均匀,产生别的方向的移动。本文发现,完整附件组最大位移集中在附件位置,而磨损附件组集中在近中牙冠的位置,完整附件组最大位移、压应力、最大拉应力分别是磨损附件组的 3、13、3.7 倍;两组模型的牙根等效应力都集中在唇侧颈部,但完整附件组是磨损附件组的 6.8 倍。田珊珊等^[15]研究表明,矩形附件尺寸的减小会使牙齿受力在一定范围内减小,伸长的效果会减弱。上述结果提示,临床医师在隐形矫治进行牙齿伸长时,要密切关注附件的磨损情况,因其对伸长效果影响较大,一旦出现明显磨损,要及时更换或修复附件。

临床中恢复附件的形状,一种方式是可以选择重新粘接;另一种方式是在附件模板上用细车针打孔,然后注入流动树脂,在磨损附件上干燥、隔湿、涂布粘接剂后套上附件模板,之后多余的树脂会随孔溢出,固化后能够较为简便地恢复附件形状。

4 结论

本文模拟研究矩形附件磨损后对尖牙不同移动方式的影响。结果表明,患者佩戴矫治器一段时间后确实会出现附件磨损,并且附件磨损会明显降低牙齿旋转和伸长的移动效率。本文建议,当附件出现明显磨损后,应该及时更换新的附件,保证附件能够正常地发挥作用。

参考文献:

[1] MELKOS AB. Advances in digital technology and orthodontics: A reference to the Invisalign method [J].

Med Sci Mon Int Med J Exp Clin Res, 2005, 11(5): P139.

[2] KRAVITZ ND, KUSNOTO B, BEGOLE E, et al. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 135(1): 27-35.

[3] KRAVITZ ND, KUSNOTO B, AGRAN B, et al. Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with invisalign [J]. Angle Orthod, 2008, 78(4): 682-687.

[4] SIMON M, KEILIG L, SCHWARZE J, et al. Treatment outcome and efficacy of an aligner technique: Regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization [J]. BMC Oral Health, 2014, 14: 68.

[5] 路苗苗, 赵凝. 不同移动方式下隐形矫治器的三维有限元分析[J]. 医用生物力学, 2019, 34(5): 522-528.

LU MM, ZHAO N. Three-Dimensional finite element analysis on invisible dental appliance under different moving modes [J]. J Med Biomech, 2019, 34(5): 522-528.

[6] 满斌, 傅波, 白林, 等. 基于 4 种软件的牙周病患者牙齿建模和受力分析[J]. 医用生物力学, 2017, 32(5): 454-457.

MAN B, FU B, BAI L, et al. Modeling and analysis for teeth of a patient with periodontal diseases based on four kinds of software [J]. J Med Biomech, 2017, 32(5): 454-457.

[7] 汤磊, 钱建国, 朱翊. 基于 Geomagic Studio 的点云处理与三维建模研究 [C]//中国测绘学会 2012 年学术年会论文集. 西安: [s.n], 2012.

[8] 李长春, 胡欣, 刘亚林. pH 值对复合树脂磨损性能的影响 [J]. 天津医药, 2012, 40(8): 790-792.

[9] ORFEAS C, ANNA I, HIROSHI U, et al. Accuracy of clear aligners: A retrospective study of patients who needed refinement [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2018, 154: 47-54.

[10] 陈周艳, 周容, 何淞, 等. 矩形附件厚度与位置变化对矫正尖牙扭转的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(16): 2513-2519.

[11] 何林, 吴稀, 何淞, 等. 不同大小的矩形附件对隐形矫治远移尖牙影响的三维有限元分析 [J]. 安徽医科大学学报, 2019, 54(1): 143-146.

[12] 宋保龙, 王鹏, 李丹, 等. 无托槽隐形矫治技术压低前牙的效率分析 [J]. 中华口腔正畸学杂志, 2018, 25(4): 186-190.

[13] 蔡永清, 杨晓翔, 何炳蔚. 无托槽隐形矫治器各参数对尖牙压低移动治疗的影响 [J]. 医用生物力学, 2017, 32(1): 60-65.

CAI YQ, YANG XX, HE BW. Effects on canine intrusion treatment with different Invisalign parameters [J]. J Med Biomech, 2017, 32(1): 60-65.

[14] GARNETT BS, MAHOOD K, NGUYEN M, et al. Cephalometric comparison of adult anterior open bite treatment using clear aligners and fixed appliances [J]. Angle Orthod, 2019, 89: 3-9.

[15] 田珊珊, 白蕊, 徐晓梅, 等. 上颌尖牙在无托槽隐形矫治中伸长运动的三维有限元分析 [J]. 中国组织工程研究, 2019, 23(10): 1489-1495.