

文章编号: 1004-7220(2023)03-0587-07

透明矫治器压低下前牙的生物力学分析

肖圣钊¹, 冯齐平¹, 李一新¹, 袁玲君¹, 周可拓², 储飒婷^{1*}, 房兵^{1*}

(1. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔正畸科, 国家口腔疾病临床医学研究中心, 上海市口腔医学重点实验室, 上海市口腔医学研究所, 上海 200011; 2. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔正畸科, 口腔生物力学与人工智能转化医学研究平台, 上海 200011)

摘要:目的 探索透明矫治器压低下前牙过程中牙齿唇舌向倾斜度的变化规律及相应的生物力学机制, 获得牙齿垂直压低过程中的唇舌向控制策略。**方法** 建立透明矫治器垂直压低下前牙的仿真模型, 设计不同切牙下颌平面角度(incisor mandibular plane angle, IMPA), 设置常规组、唇侧压低附件组、唇侧控根嵴组及舌侧控根嵴组, 分析下前牙的位移趋势及唇舌向力矩。**结果** 在下前牙压低中, IMPA $<90^\circ$ 时牙冠受到舌向力矩; IMPA $>90^\circ$ 时, 牙冠受到唇向力矩。牙冠部添加唇侧控根嵴可以增加牙冠唇向转矩趋势, 添加舌侧控根嵴及唇侧附件增加牙冠舌向转矩趋势。**结论** 透明矫治器压低下前牙中会出现牙冠非设计性的唇舌向移动。牙冠唇倾时, 可以设计舌侧控根嵴来避免牙冠唇向移动; 牙冠舌倾时, 可以设计唇侧控根嵴来避免牙冠舌向移动。

关键词: 透明矫治器; 前牙压低; 唇倾度; 力矩

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.03.024

Analysis on Mandibular Anterior Tooth Intrusion with Clear Aligners

XIAO Shengzhao¹, FENG Qiping¹, LI Yixin¹, YUAN Lingjun¹, ZHOU Ketuo²,
CHU Fengting^{1*}, FANG Bing^{1*}

(1. Shanghai Key Laboratory of Stomatology & Shanghai Research Institute of Stomatology, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Department of Orthodontics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China; 2. Translational Medicine Research Platform of Oral Biomechanics and Artificial Intelligence, Department of Orthodontics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China)

Abstract: Objective To explore change patterns and corresponding biomechanical mechanisms of labiolingual inclination during intrusion of mandibular anterior teeth with clear Aligners, and obtain accurate labiolingual direction control strategies for vertical intrusion of the teeth. **Methods** The simulation model of the mandibular anterior tooth during vertical intrusion with clear Aligners was established. Different incisor mandibular plane angles (IMPA) of mandibular anterior teeth were designed. The conventional group, labial attachments group,

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11932012, 81400536), 上海申康医院发展中心临床创新三年行动计划(SHDC2020CR3009A), 上海交通大学医工(理)交叉基金(JYJC202130), 上海交通大学医学院附属第九人民医院博士后科研启动基金(肖圣钊-2021-科研启动经费)

通信作者: 储飒婷, 副主任医师, E-mail: quci2001@163.com; 房兵, 教授, E-mail: fangbing@sjtu.edu.cn

*为共同通信作者

labial power ridge group and lingual power ridge group were set separately, and displacement trends and labiolingual torques of mandibular anterior teeth were analyzed. **Results** During intrusion of the mandibular anterior teeth, for IMPA $<90^\circ$, the dental crowns underwent lingual torque; for IMPA $>90^\circ$, the dental crowns underwent labial torque. Adding a labial power ridge to crowns of the mandibular anterior teeth could increase the labial crown torque, whereas adding a lingual power ridge and labial attachments to crowns of the mandibular anterior teeth could increase the coronal-lingual torque trend. **Conclusions** During intrusion of the mandibular anterior tooth clear Aligners, an undesigned labiolingual movement of the dental crowns may occur. When the crown is tilted towards the labial side, the lingual power ridge can be designed to avoid the crown moving to the labial side. When the crown is tilted towards the side of the tongue, the labial power ridge can be designed to avoid the crown moving to the lingual side.

Key words: clear Aligners; anterior tooth intrusion; labial inclination; torque

前牙深覆殆是错殆畸形中常见的牙殆特征表现,主要是由上下牙弓及颌骨的垂直向发育异常所导致。临床表现为上颌前牙区牙齿过度萌出及牙槽骨发育过度,或下颌后牙区的牙齿萌出不足及牙槽骨发育不足,上颌发育正常或发育过度中伴有下颌发育不足,下颌在升颌肌群的作用下,向逆时针方向旋转,导致下颌平面角的减小,从而表现为深覆殆。面型上通常表现为上唇和下唇之间闭合不全,下颌后缩,面下部过短从而影响美观^[1]。深覆殆与口腔的功能和健康密切相关,若深覆殆不进行矫治,可能会引起创伤性龈炎、牙周炎、牙槽骨吸收,也可能出现颞下颌关节症状^[2-3]。深覆殆矫正往往是复杂病例的关键步骤,成功地打开和咬合是关闭拔牙间隙的重要前提。因此,解除深覆殆对患者健康、咬合功能及美观的影响意义重大。

前牙压低是治疗深覆殆的一种常用方式,是指将牙齿压入牙槽骨中,减少牙齿在口腔中的暴露量^[3]。按照压入方向,一般分为唇倾压低、舌倾斜压低和真性垂直压低。真性垂直压低是指牙齿在压入牙槽骨过程中,没有发生唇舌侧偏斜^[4]。关于成人打开咬合的机制,Grabner 等^[5]强调,由于成人缺少面颌的垂直生长,需要通过压低前牙来实现。固定矫治中,多采用摇椅弓、多用途弓或者配合使用微种植支抗来压低前牙^[6-7];由于其矫治器在唇侧加力,多为唇倾压低^[8]。透明矫治器(clear Aligners)作为 20 世纪逐渐发展起来的正畸治疗技术,是一种用特殊塑料经热压工艺制作而成的个性化透明矫治器。该矫治器具有易清洁、美观、可摘等特点,在临床上已广泛使用^[9]。由于其包裹式的

加力方式、压入力的合力方向更接近牙齿长轴,理论上比较容易实现真性垂直压低(牙齿沿牙长轴无偏斜压低)^[10-11]。研究表明,透明矫正器的压低效率为 41.3%~79.0%^[12-13],可实现前牙 0.72~2.10 mm 的压低量^[14-15]。

正畸治疗的常见并发症之一是骨开窗和骨开裂。骨开裂是指牙齿唇颊侧或舌腭侧牙槽骨 V 形骨缺损,并造成颈部 1/3 牙根暴露;而尚未累及牙槽嵴顶的牙槽骨缺损称为骨开窗^[16]。在前牙压低的过程中,如果患者牙槽骨条件不佳或者牙齿压入方向控制不好,容易出现唇侧或舌侧骨开窗^[17]。由于隐形矫正的相关生物力学研究较少,对于下前牙压低的方向控制尚没有科学依据可以遵循。本课题组在临床研究发现,在使用透明矫治器进行下前牙有效压低的同时,前牙区骨开窗的发生率较高,且多出现在唇侧。为分析此现象的生物力学机制,本文设计并构建下切牙不同倾斜角度透明矫治器整体压低下前牙的三维有限元仿真模型,分析透明矫治器下前牙压低过程中牙根的唇舌向移动趋势,以及这种现象产生的生物力学机制,为下前牙压低过程中透明矫治器的设计提供指导。

1 资料和方法

本文为回顾性临床研究,取得上海交通大学医学院附属第九人民医院医学伦理委员会审查批准。

1.1 建立透明矫治器整体压低下前牙三维有限元仿真模型

选取上海交通大学医学院附属第九人民医院口腔正畸科志愿者上颌骨锥形束计算机断层扫描

数据[见图 1(a)],建立透明矫治器下前牙压低的有限元仿真模型。使用 Atreat Processor 软件(时代天使医疗器械有限公司)对照侧位片对该初始模型进行坐标定义、牙齿表面修复和切分,生成牙齿 3D 形态模型[见图 1(b)]。基于牙齿解剖形态确定牙长轴,以牙长轴方向作为 z 轴;牙冠与牙龈的交界线形成曲面,以该曲面与 z 轴交点作为坐标原点;基于牙齿解剖形态确定近中面和远中面,以牙齿近远中方向作为 x 轴;基于直角坐标系各个坐标轴相互垂直的关系,确定 y 轴(即牙齿的颊舌向)[见图 1(c)]^[18]。使用 HyperMesh 14.0 软件(Altair 公司,美国),沿牙根表面法向均匀向外扩展 0.3 mm^[19],得到简化的牙周膜形态模型;使用 Atreat Designer 软件(时代天使医疗器械有限公司)进行数字化矫治设计,实现矫治方案的管理和设计。使用 Atreat Manufacture 软件(时代天使医疗器械有限公司)对矫治器牙间隙结构进行自动填充,并通过 MasterForce 软件(时代天使医疗器械有限公司)的热压膜成型工艺仿真模块计算生成矫治器模型。根据临床实际情况将已建立的牙齿模型、牙周膜与透明矫治器三维模型按照设定的组合条件建立多个装配组合模型,并导入 MasterForce 软件,最终生成佩戴在牙齿上的透明矫治器三维有限元仿真模型。

1.2 材料参数定义与网格划分

牙齿、牙周膜与矫治器的材料特性均设定为均质、各向同性^[20],弹性模量分别为 20.6 GPa、0.689 MPa、2.0 GPa,泊松比分别为 0.30、0.49、0.30^[21]。牙周膜采用六面体实体单元,矫治器采用三角形壳体单元,模型其余部分均采用四面体实体单元。模型的网格尺寸通过收敛分析确定的,逐渐增加网格密度,直到估计应力的偏差小于 5%。确定模型网格密度为 0.3 mm,整个模型划分为 747 183 个单元和 981 581 个节点。

1.3 边界条件设定及计算方法描述

牙齿与透明矫治器、牙齿与牙周膜的接触定义为面-面接触,牙周膜外侧设置为绑定约束^[22]。沿颌骨剖面形态的对称中心线对 31 牙压低 0.2 mm。使用 ABAQUS 求解器,迭代计算牙齿在接触受力后发生位移变化过程中每一瞬间的平衡状态,直至整个系统的力系达到平衡状态,并输出牙齿在沿唇舌向的力和力矩。

1.4 实验工况设计

设计切牙下颌平面角度(incisor mandibular plane angle, IMPA)分别为 75°、80°、85°、90°、95°、100°、105°、110°[见图 1(d)],并设置 4 组工况(常规、唇侧压低附件、唇侧控根嵴、舌侧控根嵴)[见图 1(e)]。31 牙距牙槽嵴顶 2/5、距根尖 3/5 处为阻抗中心^[23],分析下前牙位移趋势及牙冠部受到的力矩。

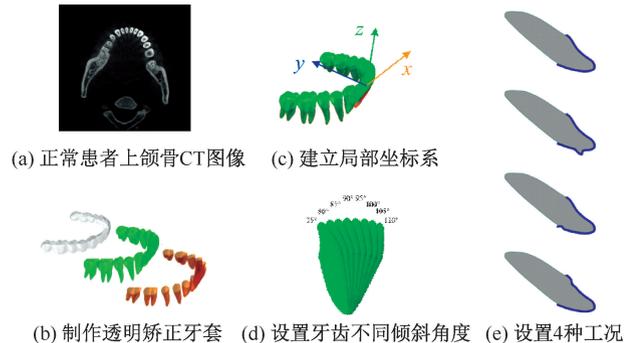


图 1 透明矫治器下前牙压低有限元模型建立

Fig. 1 Establishment of finite element model of the mandibular anterior teeth during intrusion with clear Aligners

(a) CT images of the maxilla of normal patients, (b) Fabricating clear Aligners, (c) Establishing the local coordinate system, (d) Setting different inclination angles of the tooth, (e) Setting four working conditions

2 结果

下前牙压低加载后,常规组中 31 牙 IMPA = 75° 时舌侧移动趋势最大,IMPA = 110° 时唇侧移动趋势最大,IMPA = 90° 时位移变化不明显。添加唇侧压低附件和舌侧控根嵴均可以增加牙冠向舌侧移动趋势,舌侧控根嵴增加舌倾趋势较唇侧附件更明显。添加唇侧控根嵴可以增加牙齿向唇侧移动趋势(见图 2)。

下前牙压低加载后,各组位移变化如图 3 所示。IMPA = 75°、80°、85°,牙齿舌侧向位移明显;IMPA = 100°、105°、110°,牙齿唇侧向位移明显。

不同唇倾度下前牙牙冠唇舌向力矩如图 4 所示。添加唇侧压低附件增加牙冠向舌侧移动趋势。添加唇侧控根嵴增加牙齿向唇侧移动趋势,舌倾(IMPA = 80°)的牙齿在压低过程中受到的舌向力矩减小,唇倾(IMPA = 110°)的牙齿在压低的过程中受到唇向力矩增大。添加舌侧控根嵴增加牙冠舌侧移动趋势,且增

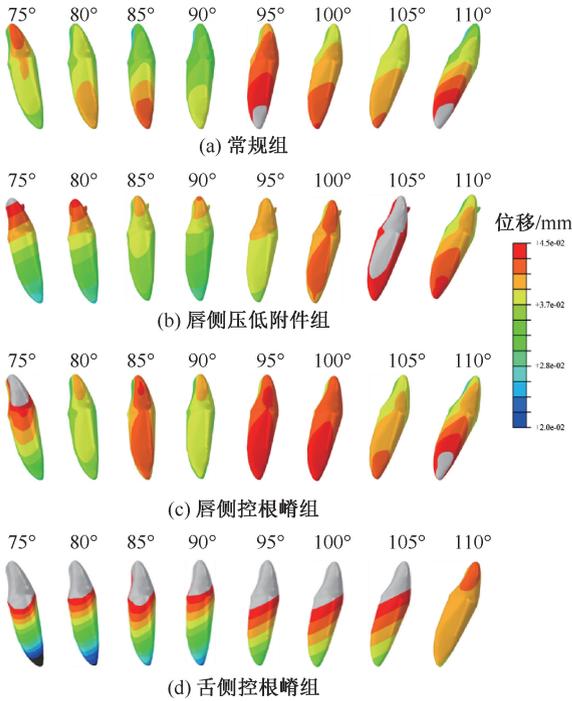


图2 下前牙压低中位移云图

Fig. 2 Displacement nephogram during intrusion of the mandibular anterior teeth (a) Conventional group, (b) Labial intrusion attachment group, (c) Labial root control ridge group, (d) Lingual root control ridge group

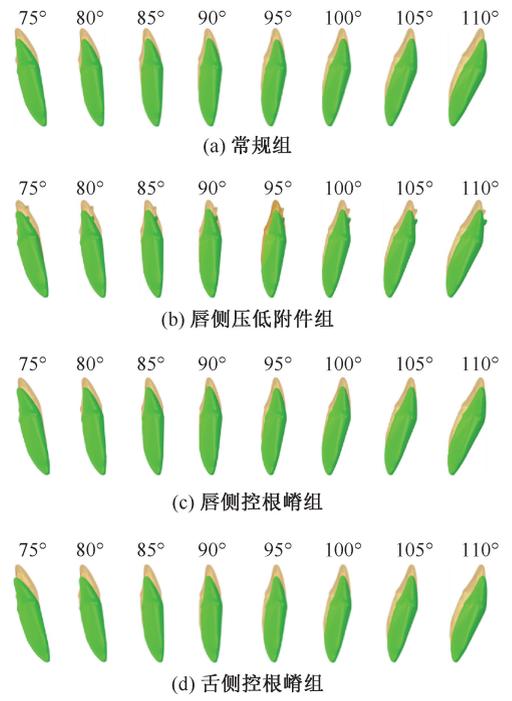


图3 下前牙压低中位移变化趋势

Fig. 3 Variation trend of displacement during intrusion of the mandibular anterior teeth (a) Conventional group, (b) Labial intrusion attachment group, (c) Labial root control ridge group, (d) Lingual root control ridge group

注:橙色是牙齿压低变化前的位置,绿色是压低变化后的位置;位移变化放大30倍。

加的趋势较唇侧压低附件组更明显。

唇侧压低附件组不同唇倾度下接触力如图5所示。IMPA = 80°、85°、90°,在切端唇侧出现舌向受力,倾斜度越大,舌向受力越大。IMPA = 95°、100°、105°、110°,在切端舌侧出现唇向受力,倾斜度越大,唇向受力越大。唇侧附件的受力主要在附件的唇侧面,方向为舌向。

在常规组,没有任何辅助结构时,直立(IMPA = 90°、95°)牙齿在压低过程中发生非常小的唇舌向力矩,唇倾(IMPA = 100°、105°、110°)牙齿在压低过

程中伴随较大的唇向力矩,舌倾(IMPA = 70°、80°、85°)的牙齿在压低过程中伴随较大的舌向力矩。越唇倾或者越舌倾的牙齿,这种趋势越明显。

添加唇侧压低附件增加牙冠往舌侧移动趋势。IMPA = 110°的牙齿在压低的过程中仍然伴随唇向力矩,但力矩变小;IMPA = 95°的牙齿在压低的同时受到舌向力矩,与常规组状态相反;IMPA = 75°、80°、85°、90°的牙齿在压低的同时仍然受到舌向力

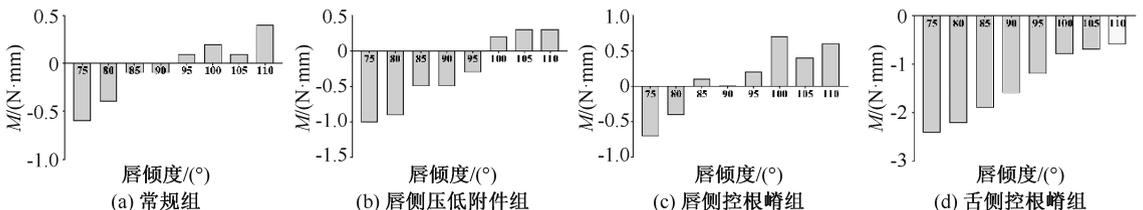


图4 不同唇倾度下前牙牙冠唇舌向力矩

Fig. 4 Labiolingual torque of anterior tooth crowns under different labial inclinations (a) Conventional group, (b) Labial intrusion attachment group, (c) Labial root control ridge group, (d) Lingual root control ridge group

注:力矩正值代表唇向,力矩负值代表舌向。

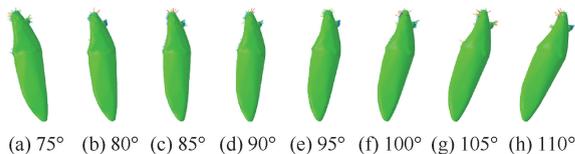


图5 唇侧压低附件组不同唇倾度下接触力

Fig. 5 Contact force of labial intrusion attachment group

under different labial inclinations (a) At 75° labial inclination, (b) At 80° labial inclination, (c) At 85° labial inclination, (d) At 90° labial inclination, (e) At 95° labial inclination, (f) At 100° labial inclination, (g) At 105° labial inclination, (h) At 110° labial inclination

矩,但较常规组状态舌向力矩变大。

添加唇侧控根嵴增加牙齿往唇侧移动趋势,让舌倾($IMPA = 80^\circ$)的牙齿在压低的过程中受到舌向力矩较常规组减小。但唇倾($IMPA = 110^\circ$)的牙齿在压低的过程中受到唇向力矩较常规组状态增大。

添加舌侧控根嵴增加牙冠舌侧移动趋势,且增加的趋势较唇侧压低附件更明显。 $IMPA = 95^\circ$ 、 100° 、 105° 、 110° 牙齿在压低的同时受到舌向力矩,这与常规组的受力方向相反; $IMPA = 75^\circ$ 、 80° 、 85° 、 90° 牙齿在压低的同时仍然受到舌向力矩,但较常规组力矩值显著增加,增加的趋势较唇侧压低附件组更明显。

3 讨论

临床治疗中发现,在透明矫治器压低下前牙过程中,下前牙容易出现非设计的位移,尤其是唇舌向的移动。这种下前牙在压低过程中出现非设计性位移的原因目前尚不清楚。关于压低下前牙的临床研究大多集中于牙齿压低的有效性、压低策略(分步或整体压低)^[24],鲜有研究关注下前牙压低过程中非设计的位移变化。本文推测,非设计的牙根与牙冠唇舌向移动风险可能与下切牙的初始唇舌向倾斜度、透明矫治器压低的加力方向以及透明矫治器的一些局部附加设计(如附件、控根嵴等)等因素相关。因此,本课题组设计了下切牙不同倾斜角度的透明矫治器整体压低下前牙的三维有限元模型,分析前牙压低过程中牙根与牙冠的唇舌向移动趋势,以分析这种现象产生的生物力学机制。

力矩是力对物体作用时所产生的转动效应的

物理量。正畸治疗过程中,牙齿受到的力矩愈大,其转动状态就愈容易改变。因此,本文采用下切牙所受力矩来分析牙齿的移动趋势。

三维有限元模型分析中,整个实验设计按照下前牙唇倾角度,分为8组(75° 、 80° 、 85° 、 90° 、 95° 、 100° 、 105° 、 110°)。在没有添加任何附加设计的常规组, $IMPA < 90^\circ$ 的4组($IMPA = 75^\circ$ 、 80° 、 85° 、 90°)出现牙冠舌向移动, $IMPA > 90^\circ$ 的4组($IMPA = 95^\circ$ 、 100° 、 105° 、 110°)出现牙冠唇向移动。即在 90° 、 95° 组出现牙冠唇舌向的逆转,既往研究指出下前牙倾斜角度欧美人正常值为 90° ^[25]、亚洲人为 95° ^[26],代表牙齿在牙槽骨内是比较直立的状态。即下切牙处于唇倾状态($IMPA = 95^\circ$ 、 100° 、 105° 、 110°)并同时进行压低时,出现下切牙继续唇向的移动趋势。当下切牙处于舌倾($IMPA = 75^\circ$ 、 80° 、 85° 、 90°)的状态时,在压低的同时会出现非预期的牙冠舌倾趋势。

分析这种非设计的唇舌向移动原因,本文推测是以下3种因素的综合作用:①初始唇舌向倾斜度不同的前牙,实际的阻抗中心会有差异;②深覆合患者下切牙压低的过程就是整平Spee曲线的过程,Spee曲线压低的过程实际会导致牙套的缩短,牙套缩短会对前牙产生一个舌向移动的力量;③设计软件中的坐标系与临床中牙齿实际的受力方向不一致,导致初始角度不同时受到的压低力量方向略有不同。

当在矫治器上添加唇侧控根嵴时,牙冠向唇侧移动趋势增加。在 $IMPA = 85^\circ$ 组出现牙冠向唇侧移动趋势,而常规组在 $IMPA = 95^\circ$ 才出现牙冠向唇侧移动趋势。即唇侧控根嵴确实可以帮助牙冠向唇侧移动、牙根向舌侧移动,出现正转矩的效应。因此,临床上对于初始角度比较舌倾的牙齿,可以设计此类附件来达到唇倾压低的效果。但当 $IMPA = 75^\circ$ 、 80° 时,唇侧控根嵴只能减弱这种牙冠舌向(牙根唇向)的趋势,而不能逆转。本文认为,这可能需要辅助其他的设计。在唇侧控根嵴 $IMPA = 100^\circ$ 组产生了偏移,原因尚不明确,可能存在非线性的变化。

添加舌侧控根嵴组中,所有组内都出现牙冠向舌侧移动趋势,即对于临床中已经唇倾的牙齿(常见于骨性II类),为了避免进一步的唇倾,可以增加

舌侧控根嵴。但是当患者下前牙唇倾的同时唇侧牙槽骨菲薄时,则应谨慎添加舌侧控根嵴,否则容易出现冠舌倾,根往唇侧突破骨皮质的移动。骨性Ⅲ类的患者,下切牙往往代偿性舌倾,这类患者的掩饰性正畸治疗往往希望维持下切牙舌倾状态,应避免使用舌侧控根嵴装置,尽量维持原位压低。

唇侧附件组结果与实验前预想有偏差。预期添加唇侧附件后会产生唇侧的加力面,其压低效果更类似于唇侧托槽的固定矫治,但本文结果显示,添加唇侧附件后,牙冠更易于向舌侧倾斜。IMPA = 80°、90°时在切端的唇侧出现舌向受力,倾斜度越大,舌向的受力越大。IMPA = 95°、100°、105°、110°时在切端舌侧出现唇向的受力,倾斜度越大,唇向受力越大。唇侧附件的受力主要在附件的唇侧面,方向为舌向。有限元仿真分析结果显示,添加唇侧附件后,受力点不在唇侧附件的水平面中,反而增加了牙套局部的不贴合,没有起到预期的效果。本文认为,该结果与透明矫正器的特殊包裹性作用机制相关,提示下切牙涉及到附件时,在附件和牙套之间的龈方会产生不贴合的脱套效应,反而产生牙冠向舌向倾斜的挤压效应,可以考虑改良唇侧附件斜面的倾斜度或者改良牙套的局部形态。

4 结论

透明矫治器下前牙牙齿真性垂直压低过程中,牙冠会出现非设计性的唇舌向移位。牙冠唇倾时可以设计舌侧控根嵴来避免牙冠唇向移动,牙冠舌倾时可以设计唇侧控根嵴来避免牙冠舌向移动,但对于初始角度比较舌倾的牙齿,唇侧控根嵴逆转牙冠舌倾的效果不明显,需要探寻新的方式。唇侧压低附件不能增加唇倾压低的趋势,反而由于局部牙套的不贴合,产生微弱的冠舌倾趋势。

参考文献:

[1] FUJIYAMA K, KERA Y, YUJIN S, *et al.* Comparison of clinical outcomes between Invisalign and conventional fixed appliance therapies in adult patients with severe deep overbite treated with nonextraction [J]. *Am J Orthod Dentofac*, 2022, 161(4) : 542-547.

[2] BERNHARDT O, KREY KF, DABOUL A, *et al.* New insights in the link between malocclusion and periodontal disease [J]. *J Clin Periodontol*, 2019, 46(2) : 144-159.

[3] ISAACSON JR, ISAACSON RJ, SPEIDEL TM, *et al.* Extreme variation in vertical facial growth and associated variation in skeletal and dental relations [J]. *Angle Orthod*, 1971, 41(3) : 219-229.

[4] WILSON AN, MIDDLETON J, JONES ML, *et al.* The finite element analysis of stress in the periodontal ligament when subject to vertical orthodontic forces [J]. *Br J Orthod*, 1994, 21(2) : 161167.

[5] GRABER TM, SWAIN BF, VAN ARSDALL RL. *Orthodontics current principles and techniques* [M]. St Louis: CV Mosby Company, 1985: 733.

[6] 卢小妹, 尹京湘, 安志毅, 等. 直丝弓矫治技术配合前牙平导打开咬合的临床应用[J]. *现代口腔医学杂志*, 2005, 19(2) : 154-154.

[7] 白煜, 赵贺剑, 杨富刚, 等. Power Arm 在隐形矫治器联合微种植钉整体内收上前牙中的作用[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(1) : 79-84.

BAI Y, ZHAO HJ, YANG FG, *et al.* The role of Power Arm by combined use of clear aligner and miniscrew in en-masse retraction of maxillary anterior teeth [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(1) : 79-84.

[8] KE Y, ZHU Y, ZHU M. A comparison of treatment effectiveness between clear aligner and fixed appliance therapies [J]. *BMC Oral Health*, 2019, 19(1) : 24.

[9] 杜庆玲, 李伯休, 王栋才, 等. 不同控根附件对无托槽隐形矫治远移尖牙的影响[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2) : 257-263.

DU QL, LI BL, WANG DC, *et al.* Influences of different root control attachments on canine distal translation with plastic Aligner [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2) : 257-263.

[10] 李光辉, 潘晓岗. 双膜透明矫治器移动免下颌中切牙的效果评价[J]. *上海口腔医学*, 2021, 30(1) : 38.

[11] MORTON J, DERAKHSHAN M, KAZA S, *et al.* Design of the Invisalign system performance [J]. *Semin Orthod*, 2017, 23(1) : 3-11.

[12] KRAVITZ N D, 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 Dentofac*, 2009, 135(1) : 27-35.

[13] 杜丽玲, 陈红, 匡博渊, 等. Invisalign 矫治器牙齿移动效率的研究进展[J]. *口腔医学*, 2017, 37(2) : 166-169.

[14] ROSSINI G, PARRINI S, CASTROFLORIO T, *et al.* Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review [J]. *Angle Orthod*, 2014, 85(5) : 881-889.

[15] 胡炜, 刘洋, 陈贵. 无托槽隐形矫治深覆(牙合)的临床初步研究[J]. *中华口腔正畸学杂志*, 2017, 24(2) : 65-69.

[16] CHOI JY, CHAUDHRY K, PARKS E, *et al.* Prevalence

- of posterior alveolar bony dehiscence and fenestration in adults with posterior crossbite: A CBCT study [J]. *Prog Orthod*, 2020, 21(1): 1-14.
- [17] SHENG Y, GUO HM, BAI YX, *et al.* Dehiscence and fenestration in anterior teeth [J]. *J Orofac Orthop*, 2020, 81(1): 1-9.
- [18] XIAO S, KONG X, YAO J, *et al.* Differences in root stress and strain distribution in buccal and lingual orthodontics: A finite element analysis study [J]. *Med Novel Technol Devices*, 2022, 14: 100119.
- [19] JEON PD, TURLEY PK, TING K. Three-dimensional finite element analysis of stress in the periodontal ligament of the maxillary first molar with simulated bone loss [J]. *Am J Orthod Dentofac*, 2001, 119(5): 498-504.
- [20] 李淑娴, 马宗民, 高文波, 等. 动静组合载荷加速正畸牙移动的动力学分析[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 251-256.
LI SX, MA ZM, GAO WB, *et al.* Dynamic analysis on static-vibration coupled loading in accelerating orthodontic tooth movement [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 251-256.
- [21] AMMAR HH, NGAN P, CROUT RJ, *et al.* Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement[J]. *Am J Orthod Dentofac*, 2011, 139(1): e59-e71.
- [22] CORTONA A, ROSSINI G, PARRINI S, *et al.* Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study [J]. *Angle Orthod*, 2019, 90(2): 247-254.
- [23] BURSTONE CJ. The biomechanics of tooth movement [M]//KRAUS BS, REIDEL RA, eds. *Vistas in orthodontics* [M]. Philadelphia: Lea & Febiger, 1962: 197-213.
- [24] PUTRINO A, BARBATO E, GALLUCCIO G. Clear Aligners: Between evolution and efficiency—A scoping review [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(6): 2870.
- [25] KUFTINEC MM, INMAN GO. A comparison of plain versus multilooped arch wires in Stage I of Begg therapy [J]. *Am J Orthod*, 1980, 78(1): 81-88.
- [26] 程佳秀, 杨彤彤. 不同矢状骨面型下颌联合形态与下切牙角度和位置的特点及相关性研究[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2021, 14(6): 719-722.

(上接第 586 页)

- [19] 王新亭, 吴永红, 王鸥, 等. 老年人手提重物时不同停止方式对步态稳定性的影响[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(2): 297-303.
WANG XT, WU YH, WANG O, *et al.* Influences of different stop modes on gait stability of the elderly carrying heavy objects [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(2): 297-303.
- [20] FORD MP, WAGENAAR RC, NEWELL KM. Arm constraint and walking in healthy adults [J]. *Gait Posture*, 2007, 26(1): 135-141.
- [21] LI SSW, ZHENG YP, CHOW DHK. Changes of lumbosacral joint compression force profile when walking caused by backpack loads [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 66: 164-172.
- [22] 赵功赫, 曲峰, 杨辰, 等. 躯干负重对步态的影响及相应补偿策略的试验研究[J]. *天津体育学院学报*, 2016, 31(6): 524-529.
- [23] LIEW B, MORRIS S, NETTO K. The effect of backpack carriage on the biomechanics of walking: A systematic review and preliminary meta-analysis [J]. *J Appl Biomech*, 2016, 32(6): 614-629.
- [24] BIRRELL SA, HASLAM RA. Subjective skeletal discomfort measured using a comfort questionnaire following a load carriage exercise [J]. *Mil Med*, 2009, 174(2): 177-182.
- [25] 朱婷, 王雅, 林金鹏, 等. 三踝骨折术后患者不同步行状态时的足底压力特征[J]. *医用生物力学*, 2021, 36(4): 625-632.
ZHU T, WANG Y, LIN JP, *et al.* Plantar pressure features under different walking conditions in patients after trimalleolar fracture surgery [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 625-632.
- [26] PIROZZI K, MCGUIRE J, MEYR AJ. Effect of variable body mass on plantar foot pressure and off-loading device efficacy [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2014, 53(5): 588-597.