

文章编号: 1004-7220(2023)05-0864-10

口腔正畸生物力学的研究进展

经典, 王瑞清, 房兵

(上海交通大学医学院附属第九人民医院 口腔正畸科; 上海交通大学口腔医学院; 国家口腔医学中心;
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)

摘要: 口腔生物力学是口腔正畸学的重要基础学科之一。在传统正畸力学系统稳定运行的基础上, 矫治理念仍在不断更新发展, 随着各类新型矫治器不断研发, 矫治技术不断提出, 对不同矫治体系的生物力学效应探索是正畸领域的关注重点。口腔生物力学技术的不断优化、突破与创新也为更加真实模拟和理解矫治中的生物力学效应提供了重要途径。本文主要对近年来固定矫治、隐形矫治、矫形治疗 3 个矫治体系相关的生物力学研究进行综述, 包括正畸新理念和正畸新技术的生物力学分析、生物力学新技术在正畸中的应用等。

关键词: 口腔正畸; 口腔生物力学; 固定矫治; 隐形矫治; 矫形治疗

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.05.003

Progress of Biomechanics in Orthodontics

JING Dian, WANG Ruiqing, FANG Bing

(Department of Orthodontics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine; College of Stomatology, Shanghai Jiao Tong University; National Center for Stomatology; National Clinical Research Center for Oral Diseases; Shanghai Key Laboratory of Stomatology; Shanghai Research Institute of Stomatology, Shanghai 200011, China)

Abstract: Oral biomechanics, an important fundamental discipline within orthodontics, continually evolves and expands upon traditional orthodontic mechanical systems. As advancements in new orthodontic devices and techniques persist, interest within the field progressively focuses on the investigation of biomechanical effects of various orthodontic systems. Furthermore, relentless optimization, innovation, and breakthroughs in oral biomechanics technology offer an essential pathway to simulate and understand the biomechanical impacts within orthodontic treatment more accurately. This review primarily summarized the research development from recent years across three principal orthodontic treatment systems: fixed orthodontics, invisible orthodontics, and orthopedic treatment, including orthodontic concepts, emergence of new technologies, and implementations of novel biomechanical techniques within these systems.

Key words: orthodontics; dental biomechanics; fixed orthodontic treatment; clear Aligner treatment; orthopedic treatment

收稿日期: 2023-10-20; 修回日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(11932012), 上海市浦江人才计划项目(22PJ1409200)

通信作者: 房兵, 教授, 主任医师, E-mail: fangbing@sjtu.edu.cn

基于百余年的探索与发展,正畸学将生物学、生物力学、材料学等相互融合渗透,在矫治原理和理念、矫治器设计与应用、矫治器材材料研发等方面已获得跨时代发展。明确力和力矩的正确控制,不同力学系统与牙、牙列、牙周、颌骨、骨缝、关节等受力组织的适应性,是影响牙移动和矫形治疗准确性、高效性和安全性的重要基础。由于口腔颌面部组织生物学反应及矫治力学系统复杂^[1],大量生物力学探索为口腔正畸临床实践提供重要指导思想。

1 固定矫治的生物力学

传统正畸牙移动主要通过固定矫治器和弓丝产生的滑动力学原理进行牙列排齐、整平和移动,不同比例的力和力矩是控制不同类型牙移动的关键,这一比例控制的核心即在于弓丝与托槽的摩擦力分析、力与牙齿阻抗中心关系分析。

1.1 弓丝-托槽摩擦力

为探索不同矫治托槽系统、不同托槽 θ 角、不同弓丝移动方式、不同结扎方式等滑动效率,学者们通过三维有限元分析、自主研发的国产摩擦力测试仪、三维数学方程等方法开展系列研究^[2-3],为推进新型和个性化托槽研发以及实现轻力牙移动提供基础。基于此,被动式自锁托槽由于其具有与托槽的更小接触面积和最大静摩擦力,更有利于提升矫治效率,而主动式自锁托槽更优于控制转矩表达^[4],均被广泛应用于临床不同类型病例。随机对照试验结合模拟实验发现,治疗过程中使用草药抗菌漱口水或定期碳酸氢钠喷雾处理更有利于维持弓丝托槽表面形态,洗必泰漱口反而增加装置粗糙度而降低摩擦力^[5-6],口腔卫生环境入手增加矫治效率是可考虑方向之一。为进一步将固定矫治精准化,近年来计算机辅助设计和制造技术(CAD/CAM)已用于构建个性化唇侧托槽系统,然而不同中心临床随机对照研究均显示该系统具有与传统技术相似的疗效及疗程^[7-8],横向控制、打开咬合、支抗和转矩控制仍然是直丝弓矫治技术难点和重点课题,可见增加矫治效率核心仍在于力系优化、力的精准控制和力学生物学反应调控。

1.2 舌侧矫治的力学分析

舌侧矫治同样采用个性化托槽系统,但由于力系不同,探索其生物力学特点成为近年来焦点^[9]。

由于垂直向施力更接近通过阻抗中心长轴,舌侧矫治更利于前牙整体压入内收;由于托槽间距更小,更利于病例转矩控制;但由于内收施力位于阻抗中心舌侧,拔牙病例前牙内收的正转矩则更易丢失,三维有限模型研究中牙冠舌倾和伸长以及牙周受力较唇侧托槽矫治更明显,然而这一结果并不受到种植体支抗是否单独使用的影响^[10]。因此,维持牙弓宽度和额外转矩施加仍是控制拔牙内收的关键,牵引臂(power arm)和摇椅弓等辅助装置是临床可选的有效手段^[11]。将微种植置于上颌腭侧第一、第二磨牙间距牙槽嵴顶6~8 mm,配合9 mm牵引臂进行内收,使得施力点接近经过阻抗中心,更有利于抵抗以上的不利受力而整体移动^[12]。

1.3 阻抗中心与力学设计

除了舌侧或唇侧托槽位点或动力臂等辅助装置引起力与阻抗中心关系变化外,单颗牙阻抗中心本身也与牙根长度和牙槽高度相关,整体牙列移动的阻抗中心同样与牙周状态相关,故确定不同牙移动模式下单颗牙或多牙组合的阻抗中心位置对牙移动控制也很重要。通过三维有限元研究分割下颌区域,下颌切牙整段阻抗中心位于根尖下13.0 mm、牙弓舌侧6 mm,下颌切牙与尖牙整段则位于根尖下13.5 mm、牙弓舌侧8.5 mm^[13];后牙段阻抗中心则位于牙槽嵴顶以下0.48~0.53 mm,随着不同牙位组合(4~7、5~7、6~7、6号牙)而变化,矢状向位置主要位于第一磨牙根部^[14]。

在唇侧固定矫治滑动内收的模型研究中发现,颌内牵引会引起前牙明显舌倾、且摩擦力增高会进一步减少牙周组织应力分布^[15],但前牙靠近根方的托槽配合8 mm牵引臂使用微种植钉辅助内收前牙相比于牙冠中心或靠近切端的托槽位置更有利,由于内收力更接近阻抗中心,更利于获得前牙整体移动、牙周组织应力分布更均匀,且这一考虑比增加弓丝尺寸更加有效(0.018×0.025英寸~0.021×0.025英寸)^[16-17]。另一研究通过模拟制作前牙段0.021×0.025英寸和后牙段0.018×0.025英寸双尺寸弓丝,托槽置于牙冠中心位,显示在无种植钉辅助时,8~10 mm牵引臂即可有效控制前牙内收产生整体移动,而0.019×0.025英寸弓丝则需14 mm牵引臂才可达到同样效果^[18]。通过设计新型Burstone三段式弓丝,并采用体外力学分析发现,经

过下切牙阻抗中心的受力可避免下切牙在压低过程中唇倾,利于整体压低^[19]。针对牙根吸收短的牙,阻抗中心更靠近牙冠、牙周维持力不足,各类矫治更需谨慎,尤其当牙根吸收至小于根长1/2时,三维模拟结果提示不建议压低^[20]。如将阻抗中心位置定位与力系结合,并综合应用于根骨数字化系统,将为矫治设计及自动预测提供重要辅助手段。

2 隐形矫治的生物力学

在传统正畸矫治的生物力学和力学生物学原理基础之上,隐形矫治自21世纪进入临床,尤其近10年来新兴发展,随着对生物力学原理和应用的理解加深,隐形矫治适应症由简单矫治到拔牙病例等复杂矫治不断拓展,矫治理念不断更新,矫治实现度不断增加。

2.1 隐形矫治的有效性评估

隐形矫治的可预测性一直是研究热点,近10年来有效性评估平均准确率已从41%上升至50%~72%,整体水平已有显著提升,由于研究方法差异,对于隐形矫治实现度仍没有统一结论^[21-24]。具体而言,磨牙远移(57%~87%)、限度内横向扩弓(上颌72.8%,下颌87.7%)以及冠唇舌向控制(50%~56%)可达最高预测,其中侧切牙唇舌向控制可达70%^[25];尖牙远移和磨牙伸长约为45%;下颌切牙压入约为35%;扭转牙纠正为最低预测,其中前磨牙扭转约为45%,上颌尖牙远中扭转(37%)和下颌第一磨牙近中扭转(28%)最难实现^[22]。由于隐形矫治器使用具有回弹性的树脂膜片包裹牙齿产生力量,且初始应力最大并逐渐衰减^[26],因此矫治力大小和方向更加复杂。尽管隐形矫治总体研究量极大,但隐形矫治的生物力学研究仍处于初步探索和新兴阶段。基于上述准确率评估研究,从生物力学视野来探寻材料特性优化、牙移动模式、矫治器形变位移和方向、附件形态和位置等均是指导临床实践的考虑方向。

2.2 隐形矫治的生物力学研究方法

压力薄膜传感器作为一种物理探测器,置于牙列模型单颗牙冠表面和隐形矫治器之间,可在体外检测力和力矩,近10年来已被用于评估新型研发热塑性材料机械性能的重要手段。为更真实模拟体内牙移动变化,正畸模拟器(OSIM)通过构建全牙

列传感系统可检测全牙列及单颗牙在不同正畸装置及施力模式下的应力感知^[27]。设计应用于OSIM的隐形矫治器,测试中切牙、尖牙、第2前磨牙分别舌向移动0.2 mm所受应力和力矩,结果显示尖牙的颊舌向力和冠唇向力矩均最大,说明移动相同位移的正畸施力和力矩均需考虑牙位所处牙弓位置及与邻牙关系,且移动牙相邻所有牙都会收到明显的反作用力和力矩^[28-29]。为优化这一系统的复杂性和高成本,Roser等^[30]研发了一款新型体外模拟器,结合CAD/CAM技术打印3D模型模拟牙槽底座,纤维增强复合材料制作牙冠,牙冠可通过支架自由安置于底座,巧妙通过支架高度来轻松调整牙齿回弹力,是未来研究高/低动度牙模型隐形矫治受力分析的重要工具。除这一优化外,由于体外检测无法真实模拟体内变化,牙体、牙周膜、牙槽骨、牙髓等与力学性质的结合是未来体外检测实现更真实模拟体内变化的重要研发方向。

为具体探索不同隐形矫治移动模式下牙及牙列受力情况,三维有限元仿真模型仍然是首要研究方法。通常采用CBCT对牙弓和矫治器进行分开和整体扫描,构建基础模型,再使用ABAQUS或ANSYS软件对部件进行拟合及牙-矫治器表面处理,以获得完整模型。通过CBCT和双摄像头数字图像相关系统(digital image correlation, DIC)进行验证,发现牙-矫治器间隙和矫治器表面应力在预测结果和测量结果一致性高,说明此类模型可靠性^[31]。除直接扫描获得隐形矫治器部件而外,也可通过使用Geomagic Studio偏移功能将每颗牙延表面向外偏移0.2 mm获得牙周膜模型,并进一步使模型整体内收0.2 mm以获得牙间间隙并与原模型相减以获得隐形矫治器部件,称为热收缩法^[32-33]。较传统衔接法而言,该方法能模拟材料弹性收缩应变,能更准确拟合实际临床中牙套形变。近年来,隐形矫治三维有限元模型也逐渐精细化,通过将高精度口内扫描与CBCT数据结合可进一步获取高精密度牙移动模型。另外,从常规单颌模型分析拓展到双颌模型共同分析,有助于阐明上下颌生物力学差异、指导临床施力及临床设计原则^[33]。

2.3 非拔牙隐形矫治的力学分析

通过种植体支抗辅助上颌牙列整体远移虽被认为实现度最高,但仍需考虑控制牙齿远移的生物

力学变化。通过模拟对比使用舌侧扣、精密切割以及腭侧粘接式牵引臂,发现均会发生上颌切牙舌倾及前磨牙远中倾斜,且牵引臂方式最显著^[34],故临床需根据实际情况选择辅助方案。对固定矫治全牙列远移而言,受力角度仍然是影响牙列远移的重要因素,尖牙与前磨牙间施加向远中根尖 30° 可基本实现上颌整体远移。但由于弓丝与全尺寸托槽的余隙角仍会导致明显的前牙舌倾^[35],故在隐形和固定矫治过程中均需注意控制前牙转矩。

隐形矫治器由于其包裹式加力,理论上更容易实现真性垂直前牙压低^[36]。然而,下切牙压入实现率较平均值低,前牙区骨开窗的发生率反而较高,多出现在唇侧^[37]。通过模拟骨性 II 类错殆畸形深 Spee 曲线下颌牙列, Li 等^[38]构建了不同初始唇倾度 (IMPA) 的下切牙压低模型,发现当下切牙垂直位于牙槽骨时,压入移动可产生冠舌向转矩,当 IMPA 增大为 100° 后,中切牙转变为冠唇向转矩,且侧切牙唇倾风险更大,同时尖牙也产生了向唇侧移动和近中倾斜趋势。由于牙周条件不佳,切牙最易显露黑三角区域,通过模拟构建三维开放性龈外展隙 (open gingival embrasure, OGE) 分析发现,当唇侧骨板薄或增加 IMPA,前牙压低均会引起 OGE 区域牙槽嵴顶及牙根应力增大,易发生牙根吸收及骨开窗、骨开裂^[39]。上述研究结果均提示临床需根据初始 IMPA 值和牙槽骨板唇侧厚度来判断压低风险,保证有足够的压低间隙,并合理使用唇侧压力嵴 (power ridge) 产生反向力矩以防不良移动。

隐形矫治中扭转纠正实现率最低,尤其针对圆锥形下颌前磨牙,通过对第二前磨牙附件仿真激活,结果显示单个附件与 1.2° 矫治器激活,或连续 3 颗牙设置相同激活角度附件,均对纠正 30° 内扭转具有明显效果,因此临床建议使用 1.2° 激活角度,更大激活角度无明显优势^[40]。为增加实现度,通过将前瞻性临床矫治结果与生物力学预测仿真模型分析相结合,发现每 14 天更换矫治器比 7 天更换可增加 12% 实现度,但扭转牙预测度仍然最低^[41]。

2.4 拔牙隐形矫治的力学分析

对于隐形矫治减数治疗,需严格掌握适应症^[42]。对于牙列重度拥挤或唇倾度及突度较大患者,可个性化采用对称拔除前磨牙或其他拔牙组合进行矫治。但对于前牙直立的骨性前突或后牙需

整体近中移动病例,隐形矫治通常控制力有限。对拔除第一前磨牙矫治的回顾性临床研究发现,前牙内收时由于拔牙区产生应力中断效应,隐形材料无法维持刚度,极易发生“钟摆效应”,即前牙转矩丢失和前牙覆殆加深、尖牙远中倾斜和舌倾、上颌第一磨牙近中倾斜、近移和压入^[43-44]。严重程度依次为中切牙舌倾、尖牙远中倾斜、侧切牙舌倾、侧切牙远中倾斜和中切牙远中倾斜,且上下颌同时发生。与上前牙相比,下前牙具有更少伸长量、更大内倾量和内收量;与上后牙相比,下后牙具有更大平均压低量、更小前倾量和近移量,整体而言下牙列前后牙具有更大支抗差异^[45]。为分析上下颌差异, Liu 等^[45]通过上下切牙模型进行数字化分析,结果表明,当牙齿越长,牙冠旋转半径越大;当牙尖水平移动相同距离时,则会出现更大垂直向位移。因此,上前牙内收更易伸长,下切牙内收更易内倾,明确这一差异提示上前牙垂直向控制和下前牙转矩控制是减数隐形矫治的设计和监控要点。

为减少前牙内收副效应,应在方案设计上进行充足补偿,包括前后牙段的转矩补偿及垂直向压低。Jiang 等^[46]设计前牙压入以减少前牙内收舌倾,模拟发现内收 0.2 mm 配合 0.15 mm 压入以及内收 0.1 mm 配合 0.23 mm 压入可维持或增加冠唇向转矩,是对抗“过山车效应”的有利手段。此外,上颌内收的移动步距可能也会影响前牙内收效果,通过构建分步内收组、整体内收组,并设置切牙平移或切牙过矫治的亚组,结果表明分步内收组后牙初始近移量均小于整体内收组,但各分步内收亚组的总体后牙近移量均大于相应整体内收组后牙移动。由此可见,设计整体内收和切牙过矫治有利于切牙的转矩控制,但分步内收或许并不能保护后牙支抗^[46-47]。为防止前牙转矩丢失,前牙区微种植钉配合双侧中切牙舌侧扣或中切牙腭侧精密切割,形成唇侧或包括唇舌侧的三角形弹性牵引,均可有效控制前牙整体内收,且后者同时呈现明显的压低效果^[48],提示临床可根据不同力学设计原理选择辅助方案。

微种植钉也被普遍应用于增强隐形矫治拔牙间隙的关闭能力,通过配合精密切割/隐形矫治扣 (直接) 或前磨牙牙面舌侧扣 (间接) 来加强后牙支抗,而这 3 种支抗是否均可获得理想效果并产生何

种生物力学差异还无明确定论。Zhu 等^[33]通过构建不同支抗模型发现,种植钉支抗在加强前牙内收和舌倾的同时,间接强支抗会引起前牙压低增加和第二前磨牙压低,加剧殆平面顺时针旋转,而直接强支抗可减少前牙的伸长及后牙压低,对于维持殆平面有利,但磨牙颊倾会更加明显,这一研究为临床减数治疗的隐形矫治技术支抗选择提供重要理论基础。

除加强支抗而外,弱支抗方案或磨牙前移并非隐形矫治首选适应征,尤其下颌后牙整体近中移动难度更大,在牵引臂基础上,通过优化设计垂直型牵引臂舌侧扣配合 II 类牵引,提供了远中倾斜和伸长力矩,可获得后牙整体前移^[49],这一新型设计也提示将生物力学与隐形矫治结合可提升矫治效率及实现率。

2.5 隐形矫治附件应用和边缘设计

过往研究已明确隐形附件的形态和位置均会影响对牙的三维方向控制。当对不同形态和颊舌侧位置的附件进行比较时,模型分析展示附件位置可能较附件形态更为重要,腭侧矩形附件较颊侧矩形或圆形附件对前牙伸长更为高效^[50]。尤其对于下颌尖牙而言,腭侧附件较唇侧不同形态附件具有更强的转矩控制能力^[51]。当对矩形附件进行进一步长、宽、厚三向的增加,可持续增加力和力矩,且形成更大力矩/力比值^[52],有利于实现理想移动。另外,为增加前磨牙扭转矫正,Ferlias 等^[53]使用体外传感器力识别系统对不同形态和不同放置方向的 12 种附件类型进行检测,发现垂直矩形附件可获得最强的近远中去扭转能力,但同时表现出压入、转矩和倾斜等副作用。

隐形矫治器的厚度也可能影响牙移动过程中应力分布。研究发现,0.75 mm 矫治器比 0.5 mm 矫治器产生更大的牙周应力,但更厚的矫治器对牙齿移动控制对牙移动控制无明显优势^[54]。矫治器边缘高度和形态反而对牙齿受力影响更为显著,边缘高于龈缘 2 mm 矫治器的牙周膜应力明显低于低边缘组;当齐平牙龈边缘高度相同时,平直边缘的矫治器比扇形边缘矫治器产生更高应力,但在 2 mm 高边缘组无差异^[55]。因此,这一生物力学分析也可指导针对不同移动阶段的牙套边缘设计。一项新型体外生物力学研究方法通过对牙齿和牙套间放

置显色压力薄膜、Fiji 软件对照片颜色强度进行分析,以获得应力分布谱,这一简化研究可迅速发现扇形设计牙套边缘在牙颈部及整个牙表面的应力传递和分布更加均匀^[56]。

3 矫形治疗的生物力学

3.1 上颌扩弓的力学分析

传统扩弓治疗疗效主要取决于骨缝快速打开程度,即骨缝嵌合程度,青春期后随着腭中缝逐渐融合钙化,通常持续到发育晚期,直至成年前闭合。传统扩弓仅能引起牙齿颊向移动,无法骨性扩弓,微种植钉辅助上颌快速扩弓(miniscrew assisted rapid palatal expansion, MARPE)的研发应用为骨缝即将或已闭合的患者提供了扩弓可能。MARPE 通过将种植钉穿透双层腭骨骨皮质,从而使用重力将全厚层骨缝扩开。由于成年患者除了腭中缝外,后部翼腭缝和上部颧颌缝更加紧密,故骨性扩弓装置靠后牙放置、双侧微种植钉平行扩开可获得最大扩弓效应。尽管如此,针对 MARPE 的不同设计和微种植钉不同植入部位产生的生物力学效应仍有争议。

通过评估将牙齿纳入扩弓系统是否增强扩弓固位或扩弓效应,三维模型分析提示骨支抗式与骨-牙支抗式扩弓能获得相似扩弓量和应力分布^[57]。对骨-牙支抗式扩弓器不同位置及与牙的不同连接部位的 9 个模型进行分析发现,当扩弓器位于矢状向颧骨间相应位置时,扩弓后骨缝应力分布较前置或后置组更均匀^[58],但模型由于难以模拟上颌后部骨缝结构,可能引起结果不可靠性;进一步模拟单纯骨支抗式扩弓器中不同微种植钉固位位置,力学评估结果显示,当微种植钉离骨缝 6 mm 时,较 3 mm 组可增加更多扩弓量,但也增加了微种植钉的不平行度;当微种植钉位于上颌 4~5、6~7 号牙牙根之间时,可获得更大的扩弓量,虽然仍不平行但应力参数均较低,可见远离腭中缝的微种植钉可能获得更大扩弓效应^[59]。

3.2 前牵引矫治的力学分析

尽管传统方法通过构建颅颌面复合体模型已初步获得上颌复合体阻抗中心及前牵引最佳牵引方向和力值,即 30°~40° 殆平面交角牵引角度和每侧 500 g 力可获得上颌骨平移,过大力值或过小角

度均会引起逆时针旋转趋势,且过大力值引起牙弓变窄^[60]。目前,现代计算机运算提升和新型矫治器设计仍在不断优化前牵引矫形治疗。

通过构建传统双轴面弓(Delaire 面弓)的三维有限元模型,给予不同力值和角度的前方牵引,从装置视角展示面弓应力分布和形变与力值增加及前下方牵引角度增加呈正相关,但临床每侧 3.9~4.9 N 和 30°牵引不会引起面弓塑形形变^[61]。进一步将面弓部件与前颌和颏部部件相结合,可观察到 9.8 N 力、30°前下方牵引后前颌应力均较小,但 Delaire 面弓应力集中于下唇和下切牙龈缘区域,而中心单轴(Petit 面弓)应力广泛分布在颏部上缘和中心区域,较 Delaire 高出约 1 倍应力^[62]。这一结果提示双轴面弓应力分布更加均匀,但可能由于压迫下切牙而引起切牙舌倾等副作用,个性化颏部形态更有利于前牵引对面部的反向应力分布。

由于前牵引矫治的年龄限制及对伴发唇腭裂畸形等严重牙弓狭窄患者的矫治效果有限,上颌快速扩弓配合前牵引目前被认为是增强前牵引疗效的临床手段之一。一方面从力学生物学角度分析发现,由于扩弓时骨缝牵张、骨缝细胞激活,可能增加上颌骨整体改建活性;另一方面从生物力学分析发现,由于单纯前牵引会引起骨缝压缩,扩弓对维持上颌牙弓发育有利^[63],且在腭中缝扩开的同时前牵引,鼻上颌缝、颧颞缝、颧上颌缝等应力更加集中,鼻上颌复合体在矢状向、垂直向和横向的位移均大于单独前牵引,更易发生向前平移。将骨支抗式扩弓器与前牵引装置结合,为临床成年上颌发育不足患者提供了可选方案。通过构建不同类型扩弓器与前牵引结合,应力分析可见单纯骨支抗式上颌扩弓(bone-borne MARPE)配合牵引引起的骨缝应力最大,各部分骨块位移最大,微种植钉辅助骨-牙混合式扩弓组(hybrid MARPE)其次,传统 Hyrax 组的应力分布最小、位移最小^[64],提示单纯骨支抗式扩弓是难治性上颌后缩前牵引治疗中可获骨效应最大、副效应最小的治疗模式。

除上述骨支抗式扩弓器配合前牵引而外,单纯微种植钉或钛种植板辅助前牵引也成为增强疗效的可行方法,骨支抗具有避免前牙唇倾、牙列前移等副作用,且研究表明不同位置微种植钉或钛板以及不同方向施力均会引起不同骨效应^[60]。将两种

骨支抗手段同时使用,即钛种植板辅助支抗式 III 类牵引和 MARPE 结合似乎能进一步增强疗效。模型对比显示,尽管确实引起了更多各部分骨块移动趋势,但 MARPE 的使用可能引起上颌顺时针旋转^[65-66],提示对合并开骀的患者可能更有利。

3.3 下颌后缩矫治的力学分析

功能性矫治器常规用于促进青少年下颌生长,除了不同种类的改良矫治器仍在不断研发而外,目前矫形治疗和矫治器改良的关注要点更侧重于探讨颞下颌关节的受力改变以及对气道的改善状况。

尽管 Twin-block 理念已被引入隐形矫治,如 MA 及 A6 等通过改变矫治器形态导下颌向前,但仍受到年龄和矫治难度限制。Zhu 等^[67]将 Herbst 理念与隐形矫治相结合,研发一种新型金属下颌加力杆(advanced mandibular spring, AMS),高效引导下颌向前同时有助于控制骀平面高度,拓展了隐形矫治在矫形治疗中的限度。通过建模分析显示,AMS 应力分布到整个牙列,牙周膜受到的应力分布均匀。进一步对髁突进行力学分析发现,下颌姿势位时髁突顶面和后斜面产生压力,当 AMS 导下颌前移时,上述压力得到释放,使髁突前部和关节盘均匀受力,并在关联窝上产生张应力,为髁突软骨细胞生长改建创造了有利的生物力学环境。另一研究对传统 Twin-block 导下颌向前治疗完成的关节应变分析也得出类似结果,下颌前伸时应力主要集中在髁突颈部和下颌内侧,髁突后上缘远离关节窝,重叠分析证实了髁突新骨形成^[68]。

为了明确导下颌向前中影响咬合力的因素,咬合力与髁突 CBCT 变化的回归分析表明,关节结节斜率以及颞肌后束与骀平面角度,尤其后者在下颌位置变化时起着重要作用^[69]。在所测量的肌肉中,用于将拉伸的颞肌恢复到其原始长度的力是功能性矫治器产生的力,故通过咬合力结合髁突变化评估治疗的安全性和限度是未来优化矫形治疗的重要方向。

阻塞性睡眠呼吸暂停(obstructive sleep apnea, OSA)通常由多因素引起,部分患者下颌后缩和气道狭窄相关,尤其严重下颌后缩患者,包括半侧颜面短小畸形等,易诱发 OSA。因此针对这类患者,功能矫形治疗或者下颌前导装置,甚至下颌牵张成骨等手术治疗可增加气道通气、改善 OSA。王等通过

模拟完整呼吸周期中的气体流动,结合呼吸道气流流速和压强信息进行流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)计算,可无创定量分析气道改善情况,并于体外验证气流模拟真实性。研究发现,除了最狭窄的口咽部在矢状向和冠状向均得到扩张,且下颌骨牵张成骨术后鼻腔及上呼吸道各部分气道阻力均明显下降,为评估颌骨改建或手术疗效及对气道影响提供生物力学依据^[70]。另一研究通过对不同固位方式的下颌前导装置进行力学分析,表明侧方 Herbst 式或 TB 式前导方式较中心卡锁方式使整个牙列受力方式更加均匀,长期使用对牙列具有安全性依据^[71]。

4 总结和展望

本文综述了口腔正畸不同矫治体系的生物力学研究进展,尤其近年来在该领域的研究进展和关注重点,主要包括固定矫治中力和力矩的准确使用和有效控制、隐形矫治中不同类型牙移动的生物力学变化以及增强控制的原理和措施、矫形治疗中新型矫治器的改良研发和应用原理。一方面,在传统正畸力学系统已运行百年基础上,矫治理念仍在更新发展,尤其当新型矫治器和矫治技术不断被研发、试验、应用、再试验,对颌面部组织及矫治器本身的受力分析使得医生对生物力学效应更加清晰。另一方面,生物力学检测技术不断创新,例如三维有限元对于口腔复杂结构以及矫治器复杂部件的建模方法不断在提升、对于模拟范围和精确性不断增加、对于应力-应变计算方法也在不断探索中,尤其是将骨骼硬组织的黏弹性特质纳入模型可能增加对长期反应和位移预测的真实性^[72];最新研究通过结合机器人手臂,构建新型体外检测系统 ROSS 可切动态检测施加到牙齿模型的精确力和力矩,为深入探索牙移动初始应力刺激后的精确变化提供重要模型^[73]。更突破性的生物力学新技术方向是将体外力学检测技术转向为体内力学检测,通过研发手持式传感器装置,可实时检测功能矫形装置的咬合负荷,并关联关节健康因素以评估矫形治疗安全性^[69];通过将新型研发的超微压力传感器与实体托槽相结合,可检测口内真实固定矫治条件下的受力情况^[74],为安全、快速且有效地检测或监测治疗中的真实生物力学变化提供前沿性思考。未

来,在正畸生物力学领域仍有机遇和挑战,如何进一步将口腔正畸学、生物力学、生物学、材料学、计算机科学等融合,更真实有效地模拟、检测和预测不同矫治体系中的力学效应及生物学反应,将为未来更有效、便捷、精准、安全的正畸临床治疗提供思考方向。

参考文献:

- [1] LI Y, ZHAN Q, BAO M, *et al.* Biomechanical and biological responses of periodontium in orthodontic tooth movement: Up-date in a new decade [J]. *Int J Oral Sci*, 2021, 13(1): 20.
- [2] COZZANI M, AZIZI A, ESLAMI S, *et al.* 3-dimensional finite element analysis of the outcomes of Alexander, Gianelly, Roth and MBT bracket prescription [J]. *Int Orthod*, 2019, 17(1): 45-52.
- [3] 刘晓默, 张梦琦, 林久祥. 正畸托槽与弓丝间摩擦力性能的实验研究[J]. *中国医科大学学报*, 2019, 48(1): 23-28.
- [4] IRIARTE AJ, ORTIZ S, CUBIDES-FLECHAS K, *et al.* Sliding resistance of rectangular vs. beveled archwires in two self-ligating brackets: A finite element study [J]. *Acta Odontol Latinoam*, 2018, 31(3): 149-155.
- [5] CURY SEN, BELLINI-PEREIRA SA, ALIAGA-DEL CASTILLOA, *et al.* Prophylaxis protocols and their impact on bracket friction force [J]. *Angle Orthod*, 2019, 89(6): 883-888.
- [6] RAZAVI ESE, NIK TH, HOOSHMAND T, *et al.* Surface characterization and frictional force between stainless steel brackets and archwires in orthodontic patients using chlorhexidine- and Persica-containing mouthrinses: A randomized controlled trial [J]. *Dent Res J*, 2021, 18: 21.
- [7] HEGELE J, SEITZ L, CLAUSSEN C, *et al.* Clinical effects with customized brackets and CAD/CAM technology: A prospective controlled study [J]. *Prog Orthod*, 2021, 22(1): 40.
- [8] PENNING EW, PEERLINGS RHJ, GOVERS JDM, *et al.* Orthodontics with customized versus noncustomized appliances: A randomized controlled clinical trial [J]. *J Dent Res*, 2017, 96(13): 1498-1504.
- [9] 叶菁楠, 唐国华. 舌侧矫治的生物力学特点及其临床应用[J]. *口腔医学*, 2019, 39(7): 664-667.
- [10] EL KHOURY T, KARAM R, DIB E, *et al.* Three-dimensional comparison of the effects of sliding mechanics in labial and lingual orthodontics using the finite element method [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022, 162(1): 24-32.
- [11] KOMAKI H, HAMANAKA R, TOMINAGA JY, *et al.*

- Biomechanical features of tooth movement from a lingual appliance in comparison with a labial appliance during space closure in sliding mechanics [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022, 162(3): 307-317.
- [12] 许凡宇, 荆璇, 都冰丽, 等. 三维有限元法在舌侧正畸生物力学研究中的应用 [J]. *临床口腔医学杂志*, 2018, 34(2): 118-120.
- [13] JO AR, MO SS, LEE KJ, *et al.* Finite-element analysis of the center of resistance of the mandibular dentition [J]. *Korean J Orthod*, 2017, 47(1): 21-30.
- [14] OH MB, MO SS, HWANG CJ, *et al.* The 3-dimensional zone of the center of resistance of the mandibular posterior teeth segment [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2019, 156(3): 365-374.
- [15] LIU Z, SUN T, FAN Y. Biomechanical influence of anchorages on orthodontic space closing mechanics by sliding method [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2020, 58(5): 1091-1097.
- [16] WU J, WANG X, JIANG Y, *et al.* Effect of archwire plane and archwire size on anterior teeth movement in sliding mechanics in customized labial orthodontics: A 3D finite element study [J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 33.
- [17] QIE H, KONG L, ZHANG F, *et al.* Three-dimensional finite element analysis on en-masse retraction of the maxillary anterior teeth with quantitative combined loading control [J]. *J Oral Implantol*, 2020, 46(3): 214-220.
- [18] HAMANAKA R, CANTARELLA D, LOMBARDO L, *et al.* Dual-section versus conventional archwire for en-masse retraction of anterior teeth with direct skeletal anchorage: A finite element analysis [J]. *BMC Oral Health*, 2021, 21(1): 87.
- [19] ELKHOLY F, WULF S, JÄGER R, *et al.* Mechanical loads exerted by different configurations of Burstone's 3-piece segmented mechanics during a simulated intrusion of the mandibular incisors [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 164(1): 106-115.
- [20] ZHANG X, LI M Q, GUO J, *et al.* An analysis of the optimal intrusion force of the maxillary central incisor with root horizontal resorption using the finite element method and curve fitting [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2022, 25(13): 1471-1486.
- [21] 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.
- [22] HAOUILI N, KRAVITZ ND, VAID NR, *et al.* Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2020, 158(3): 420-425.
- [23] ROBERTSON L, KAUR H, FAGUNDES NCF, *et al.* Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: A systematic review [J]. *Orthod Craniofac Res*, 2020, 23(2): 133-142.
- [24] GALAN-LOPEZ L, BARCIA-GONZALEZ J, PLASENCIA E. A systematic review of the accuracy and efficiency of dental movements with Invisalign® [J]. *Korean J Orthod*, 2019, 49(3): 140-149.
- [25] HOULE JP, PIEDADE L, TODESCAN R, *et al.* The predictability of transverse changes with Invisalign [J]. *Angle Orthod*, 2017, 87(1): 19-24.
- [26] TAMBURRINO F, D'ANTÒ V, BUCCI R, *et al.* Mechanical properties of thermoplastic polymers for Aligner manufacturing: *In vitro* study [J]. *Dent J (Basel)*, 2020, 8(2): 47.
- [27] OWEN B, GULLION G, HEO G, *et al.* Measurement of forces and moments around the maxillary arch for treatment of a simulated lingual incisor and high canine malocclusion using straight and mushroom archwires in fixed lingual appliances [J]. *Eur J Orthod*, 2017, 39(6): 665-672.
- [28] KAUR H, TRUONG J, HEO G, *et al.* An *in vitro* evaluation of orthodontic aligner biomechanics around the maxillary arch [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2021, 160(3): 401-409.
- [29] KAUR H, KHURELBAATAR T, MAH J, *et al.* Investigating the role of Aligner material and tooth position on orthodontic aligner biomechanics [J]. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 2023, 111(1): 194-202.
- [30] ROSER CJ, ZENTHÖFER A, LUX CJ, *et al.* A new CAD/CAM tooth mobility simulating model for dental *in vitro* investigations [J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(9): 5131-5140.
- [31] YE N, BROWN BE, MANTELL SC, *et al.* Validation of finite element models for orthodontic aligners [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2022, 134: 105404.
- [32] 孟雪欢, 王春娟, 王超, 等. 无托槽隐形矫治整体内收减数正畸患者前牙的三维有限元分析 [J]. *中华口腔医学杂志*, 2019, 54(11): 753-759.
- [33] ZHU GY, ZHANG B, YAO K, *et al.* Finite element analysis of the biomechanical effect of clear aligners in extraction space closure under different anchorage controls [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 163(5): 628-644. e11.
- [34] JIA L, WANG C, LI L, *et al.* The effects of lingual buttons, precision cuts, and patient-specific attachments during maxillary molar distalization with clear aligners: Comparison of finite element analysis [J]. *Am J Orthod*

- Dentofacial Orthop, 2023, 163(1): e1-e12.
- [35] KAWAMURA J, PARK JH, KOJIMA Y, *et al.* Biomechanical analysis for total distalization of the maxillary dentition: A finite element study [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2021, 160(2): 259-265.
- [36] MORTON J, DERAKHSHAN M, KAZA S, *et al.* Design of the Invisalign system performance [J]. Seminars in Orthodontics, 2017, 23(1): 3-11.
- [37] AL-BALAA M, LI H, MA MOHAMED A, *et al.* Predicted and actual outcome of anterior intrusion with Invisalign assessed with cone-beam computed tomography [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2021, 159(3): e275-e280.
- [38] LI Y, XIAO S, JIN Y, *et al.* Stress and movement trend of lower incisors with different IMPA intruded by clear aligner: A three-dimensional finite element analysis [J]. Prog Orthod, 2023, 24(1): 5.
- [39] ZHANG Y, GAO J, WANG X, *et al.* Biomechanical factors in the open gingival embrasure region during the intrusion of mandibular incisors: A new model through finite element analysis [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2023, 11: 1149472.
- [40] 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, 2020, 90(2): 247-254.
- [41] CASTROFLORIO T, SEDRAN A, PARRINI S, *et al.* Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: Effect of treatment design [J]. Prog Orthod, 2023, 24(1): 2.
- [42] 潘晓岗. 透明矫治器的减数正畸治疗[J]. 口腔医学, 2019, 39(11): 978-981.
- [43] DAI FF, XU TM, SHU G. Comparison of achieved and predicted crown movement in adults after 4 first premolar extraction treatment with Invisalign [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2021, 160(6): 805-813.
- [44] UPADHYAY M, ARQUB SA. Biomechanics of clear aligners: Hidden truths & first principles [J]. J World Fed Orthod, 2022, 11(1): 12-21.
- [45] LIU JQ, ZHU GY, WANG YG, *et al.* Different biomechanical effects of clear aligners in closing maxillary and mandibular extraction spaces: Finite element analysis [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2023, 163(6): 811-824. e2.
- [46] JIANG T, WU RY, WANG JK, *et al.* Clear aligners for maxillary anterior en masse retraction: A 3D finite element study [J]. Sci Rep, 2020, 10(1): 10156.
- [47] 唐昕月, 须敏依, 华滢婕, 等. 无托槽隐形矫治上颌前牙分步内收和整体内收的三维有限元分析 [J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(7): 669-675.
- [48] LIU L, ZHAN Q, ZHOU J, *et al.* Effectiveness of an anterior mini-screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear Aligners [J]. Angle Orthod, 2021, 91(6): 794-803.
- [49] LYU X, CAO X, CHEN L, *et al.* Accumulated biomechanical effects of mandibular molar mesialization using clear aligners with auxiliary devices: An iterative finite element analysis [J]. Prog Orthod, 2023, 24(1): 13.
- [50] SAVIGNANO R, VALENTINO R, RAZIONALE AV, *et al.* Biomechanical effects of different auxiliary-Aligner designs for the extrusion of an upper central incisor: A finite element analysis [J]. J Healthc Eng, 2019, 2019: 9687127.
- [51] KIM W H, HONG K, LIM D, *et al.* Optimal position of attachment for removable thermoplastic aligner on the lower canine using finite element analysis [J]. Materials, 2020, 13(15): 3369.
- [52] AHMAD W, JIANG F, XIONG J, *et al.* The mechanical effect of geometric design of attachments in invisible orthodontics [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2023, 164(2): 183-193.
- [53] FERLIAS N, DALSTRA M, CORNELIS MA, *et al.* *In vitro* comparison of different Invisalign® and 3Shape® attachment shapes to control premolar rotation [J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 840622.
- [54] SEO JH, KIM MS, LEE JH, *et al.* Biomechanical efficacy and effectiveness of orthodontic treatment with transparent aligners in mild crowding dentition-a finite element analysis [J]. Materials (Basel), 2022, 15(9): 3118.
- [55] LYU X, CAO X, YAN J, *et al.* Biomechanical effects of clear aligners with different thicknesses and gingival-margin morphology for appliance design optimization [J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2023, 164(2): 239-252.
- [56] ELSHAZLY TM, KEILIG L, SALVATORI D, *et al.* Effect of trimming line design and edge extension of orthodontic Aligners on force transmission: An *in vitro* study [J]. J Dent, 2022, 125: 104276.
- [57] GUERRERO-VARGAS JA, SILVA TA, MACARI S, *et al.* Influence of interdigitation and expander type in the mechanical response of the midpalatal suture during maxillary expansion [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2019, 176: 195-209.
- [58] 郑稚榛. 微种植钉辅助上颌快速扩弓对颌颌面骨生物力学效果的三维有限元分析[D]. 福州: 福建医科大学, 2021.
- [59] SERMBOONSANG C, BENJAKUL S, CHANTARAPANICH N, *et al.* Effects of miniscrew location on biomechanical performances of bone-borne rapid palatal expander to midpalatal suture: A finite element study [J]. Med Eng Phys, 2022, 107: 103872.

- [60] 常收, 王凡, 梁舒然, 等. 上颌前方牵引的三维有限元研究进展 [J]. 北京口腔医学, 2018, 26(3): 175-177.
- [61] GAZZANI F, PAVONI C, GIANCOTTI A, *et al.* Facemask performance during maxillary protraction: A finite element analysis (FEA) evaluation of load and stress distribution on Delaire facemask [J]. *Prog Orthod*, 2018, 19(1): 21.
- [62] GAZZANI F, PAVONI C, COZZA P, *et al.* Stress on facial skin of Class III subjects during maxillary protraction: A finite element analysis [J]. *BMC Oral Health*, 2019, 19(1): 31.
- [63] TANAKA OM, SAGA AY, PITHON MM, *et al.* Stresses in the midpalatal suture in the maxillary protraction therapy: A 3D finite element analysis [J]. *Prog Orthod*, 2016, 17: 8.
- [64] BALAKRISHNAN R, SENGOTTUVEL N, ALTAF SK, *et al.* Three-dimensional finite element analysis of maxillary protraction using diverse modes of rapid palatal expansion [J]. *Cureus*, 2023, 15(3): e36328.
- [65] SURESH S, SUNDARESWARAN S, SATHYANADHAN S. Effect of microimplant assisted rapid palatal expansion on bone-anchored maxillary protraction: A finite element analysis [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2021, 160(4): 523-532.
- [66] SHYAGALI TR, PATIDAR R, GUPTA A, *et al.* Evaluation of stresses and displacement in the craniofacial region as a reaction to bone-anchored maxillary protraction in conjugation with posterior bite plane and rapid maxillary expansion in patients with Class III malocclusion: A finite element analysis study [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 164(2): 253-264.
- [67] ZHU C, LI R, YUAN L, *et al.* Effects of the advanced mandibular spring on mandibular retrognathia treatment: A three-dimensional finite element study [J]. *BMC Oral Health*, 2022, 22(1): 271.
- [68] ZHANG Y, ZHENG X, ZHANG Q, *et al.* Clinical finite element analysis of mandibular displacement model treated with twin-block appliance [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 164(3): 395-405.
- [69] ONIMARU M, TAKAHASHI M, SHIMAZAKI A, *et al.* Verification of mechanical load generated by functional orthodontic appliances [J]. *J Biomech*, 2020, 113: 110079.
- [70] 王荣阳. 儿童半侧颜面短小畸形牵引成骨后上呼吸道形态及流体力学研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [71] CARAGIULI M, MANDOLINI M, LANDI D, *et al.* A finite element analysis for evaluating mandibular advancement devices [J]. *J Biomech*, 2021, 119: 110298.
- [72] ZADI ZH, BIDHENDI AJ, SHARIATI A, *et al.* A clinically friendly viscoelastic finite element analysis model of the mandible with Herbst appliance [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2021, 160(2): 215-220. e2.
- [73] DOTZER B, STOCKER T, WICHELHAUS A, *et al.* Biomechanical simulation of forces and moments of initial orthodontic tooth movement in dependence on the used archwire system by ROSS (Robot Orthodontic Measurement & Simulation System) [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2023, 144: 105960.
- [74] XIE Q, PEILUN L, ZHITAO Z, *et al.* Fabrication of three-dimensional orthodontic force detecting brackets and preliminary clinical test for tooth movement simulation [J]. *Heliyon*, 2023, 9(9): e19852.