

## • 综 述 •

## 无托槽隐形矫治研究进展

文 雅, 王胜国<sup>△</sup>

(重庆医科大学附属第二医院, 重庆 400010)

**[摘要]** 无托槽隐形矫治是越来越热门的矫治方式。有限元法是构建模型, 在模型上施加应力, 用离散法计算应变, 显示受力分布的方法。用有限元分析无托槽隐形矫治施力、受力有着无创、可重复、可视化等优点。该文通过查询近年来关于无托槽隐形矫治的有限元研究, 并将其分类, 将从前牙内收、磨牙远移、扩弓、前牙压低 4 个方面作一综述, 以期为临床实践、科研学习提供方向和参考。

**[关键词]** 无托槽隐形矫治; 有限元法; 综述

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-5519.2025.07.040

**中图法分类号:** R783.5

**文章编号:** 1009-5519(2025)07-1725-04

**文献标识码:** A

### New advances in the application of finite element method in bracket-free clear aligner treatment

WEN Ya, WANG Shengguo<sup>△</sup>

(The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

**[Abstract]** Bracket-free clear aligner treatment is an increasingly popular orthodontic modality. The finite element method is a computational technique that constructs models, applies stresses to them, calculates strain using discretization, and visualizes stress distribution. Applying finite element analysis to study force application and biomechanical responses in bracket-free clear aligner treatment offers advantages such as non-invasiveness, repeatability, and visualization. This article reviewed recent FEM studies on clear aligner therapy, categorized the findings, and synthesized the evidence across four key treatment movements: anterior retraction, molar distalization, arch expansion, and anterior intrusion in order to provide direction and reference for clinical practice and academic research.

**[Key words]** Bracket-free clear aligner treatment; Finite element method; Review

无托槽隐形矫治具有美观、舒适、复诊时间灵活、椅旁操作时间短、便于矫治期间口腔卫生护理等突出优势<sup>[1]</sup>。在无托槽隐形矫治器(CAs)面世的初期仅能解决轻度拥挤或个别牙轻微扭转等简单情况。但随着热压膜材料的改进, 生物力学认识的加深及微种植钉的广泛应用, CAs 能够应用于各种复杂病例。归功于 CAs 的显著优势和短板问题的改善, 隐形矫治逐渐成为未来的趋势。

三维有限元法是 1973 年 THRESHER 等<sup>[2]</sup>首次引入口腔生物力学的研究范畴中, 因其分析生物力学具有无可比拟的优越性而在口腔医学的许多方面得到广泛应用<sup>[3]</sup>。本文从前牙内收、磨牙远移、扩弓和前牙压低 4 个方面作一综述, 旨在搭建矫治思路框架, 借助有限元办法熟悉隐形矫治生物力学分析, 指引新手入门, 在科研学习及临床应用中取得进步。

#### 1 前牙内收

针对面凸的患者, 拔牙矫治能够提供足够的内收

间隙。但 CAs 的流行和大量内收前牙是一对矛盾, 近年来针对这个问题涌现了许多研究。CAs 内收前牙是拔牙间隙段膜片缩短来完成的, 又因膜片刚度不佳会出现弓形效应, 随即造成“过山车”<sup>[4]</sup>。孟欢雪等<sup>[5]</sup>通过有限元研究, 观察牙齿的移动趋势发现, 拔牙模型内收时前牙区的牙齿呈牙冠舌向移动, 牙根唇向移动的倾斜移动趋势, 且前牙都有伸长移动的趋势。后牙则呈牙冠近中倾斜, 牙根远中倾斜移动的倾斜移动趋势。这也符合前牙早接触, 后牙咬合不紧的临床症状。

为了抵抗过山车效应, 避免后牙失支抗, 临床上常设计分步内收, 曹世陶等<sup>[6]</sup>研究发现, 对于整体内收前牙而言, 分步内收前牙可以减轻后牙区段牙周膜所受应力峰值, 并使得后牙具有更小的初始位移趋势, 证实了分步内收相较于整体内收的优点。此外, 辅助微种植钉内收前牙也不失为一个好方法。范丽梅等<sup>[7]</sup>的有限元研究通过构建牵引微种植钉内收前牙和不牵引的模型, 对比牙周膜应力分布发现了 2 种

<sup>△</sup> 通信作者, E-mail: wangshengguo76@163.com。

网络首发 <https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250619.1110.011>

情况下牙周膜等效应力分布相似,但牵引微种植钉内收时牙周膜的最大等效应力减小,最大主应力也减小,且应力集中范围减小。对比 2 种工况的初始位移值发现,牵引微种植钉时各牙标志点位移距离均减小,且倾斜运动趋势也减小。这表明后牙区辅助牵引微种植钉可减小前牙、前磨牙的倾斜移动,保护磨牙支抗,同时还减轻了牙周膜应力,降低了牙根吸收的风险。唐云等<sup>[8]</sup>研究了牵引不同高度微种植钉对前牙内收的影响,对比不同高度下前牙矢状向、垂直向初始位移距离和整体位移趋势发现植入部位距离牙槽嵴顶低于 4 mm 时前牙的倾斜移动加剧,但大于或等于 5 mm 时植入高度越高,前牙移动冠根差越小,对前牙倾斜移动的控制越好,建议临床选择植入部位时尽量远离牙槽嵴顶。白煜等<sup>[9]</sup>的研究比较了微种植钉牵引到尖牙精密切割处和尖牙颈部舌钮处的不同效果,结果发现牵引舌钮时切牙矢状向冠根位移差更小,更接近整体移动,垂直向伸长移动量更少。这可能是因为前者力通过矫治器传递,力施加在矫治器上也会产生一定形变,后者先传递给尖牙,当尖牙移动到位后再传递给矫治器再给其余牙齿。但无论哪种牵引方式均较不牵引时尖牙倾斜移动和伸长趋势更严重,这提示在临床上牵引微种植钉内收前牙时应增加对尖牙的轴向及垂直向控制。与刘义琮等<sup>[10]</sup>研究结果一致。

李晓梅等<sup>[11]</sup>对比分析了等高牵引和高位牵引对前牙控制的差异,通过比较牙周膜应力分布和牙齿位移趋势发现 2 种工况下产生的效应差异较小,均不能完全解决“过山车”问题。理论上牵引力与前牙组牙的阻抗中心在一条线上就能实现整体内收,这适用于传统固定矫治器,但并不适用于无托槽隐形矫治器,CA 施加力于牙齿上的点或面难以界定,再加上牵引力更加难以分析。李晓梅等<sup>[12]</sup>还对比了不同大小牵引力的影响,结果发现 200 g 与 450 g 表现出的牙齿移动趋势仍无明显差异,由此调转思路,对抗“过山车”是否应从过矫治方向考虑。宋云鹏等<sup>[13]</sup>研究发现,后牙远中备抗可有效对抗前牙内收时后牙近中倾斜,但备抗时会引起前牙舌倾、伸长,导致覆颌进一步加深,因此深覆颌患者慎用。安世英等<sup>[14]</sup>模拟切牙内收时添加 5°根舌向转矩,发现切牙牙周膜唇侧张应力及舌侧压应力集中区的范围均增大,切牙倾斜移动有所改善。此外,LIU 等<sup>[15]</sup>也发现了上前牙转矩过矫治可以提高前牙内收的整体移动趋势,但过矫治的数值应具体问题应参考 CBCT 牙根在牙槽骨中的位置具体分析。

除了辅助微种植钉,过矫治抵抗过山车效应外,附件的设计也很重要。王建凯等<sup>[16]</sup>研究发现,在侧切牙放置附件有助于前牙整体内收的表达。

## 2 远移磨牙

使用无托槽隐形矫治技术时,面对前突,拥挤,需要纠正磨牙关系的病例,可优先考虑推磨牙向后获得间隙的方案,因为 CA 相对于传统固定矫治器推磨牙向后更具舒适性,牙齿包裹面积大,整体移动效果较固定矫治更佳<sup>[17]</sup>。推磨牙向后获得间隙的方案避免了拔除牙弓中段的牙齿,通常只需要拔除智齿,更容易被广大患者所接受。

有研究表明,下颌磨牙远移效率达到了 76%,上颌磨牙远移实现率更是高达 86%。下颌磨牙远移较上颌难,这可能与下颌骨骨质密度,患者垂直骨面型,磨牙牙根根形有关。远移磨牙每侧一般能获得 3~6 mm 间隙,生物个体有差异,最大限度主要参考上颌结节的长度,磨牙后垫的长度。针对下颌磨牙远移还应注意磨牙牙根与舌侧骨皮质的距离<sup>[18]</sup>。有研究发现,有第三磨牙的患者远移极限大于无第三磨牙的患者。磨牙远移后的目标位应距下颌升支前缘有一定距离,这才有利于患者日常磨牙远中面口腔卫生维护。

远移磨牙一般采用“V”型磨牙远中移动序列,即先远移第二磨牙至计划量一半时再远移第一磨牙,第一磨牙远移一半时远移第二前磨牙,以此类推<sup>[15]</sup>。有限元建模远移磨牙发现牙齿移动趋势为前牙唇侧倾斜、前磨牙近中和颊侧倾斜、磨牙远中和颊侧倾斜。李慧等<sup>[19]</sup>研究发现,“V”型远移效率不高,她提出先移动需要排齐位置的牙齿,单侧象限一般同时移动一颗前牙和一颗后牙,每颗牙齿不连续移动,采用整体微调的周期规律,称为 ZC 推磨牙远中序列(专利号:CN113499153)。建立下颌前牙轻度拥挤需要远移磨牙的模型,通过特定公式迭代计算成骨破骨情况,将 2 种不同移动方式下完成的模型与原模型重叠,计算发现采用 ZC 序列对比“V”型序列第二磨牙远移距离提高了 13.34%,远端倾斜角度减小了 54.1%,磨牙远移率更高,更利于磨牙平动。

从有限元模拟远移磨牙生物力学的支抗角度来看,远移磨牙时受到反作用力的支抗磨牙和前磨牙表现为近中倾斜,升高趋势,反作用力对支抗前牙的作用应重点关注;对于上颌前牙来说,反作用力控制不当引起前牙唇向移动趋势破坏面型,引起不必要的医疗纠纷。对于下颌前牙来说,前牙牙槽骨薄,不当的反作用力容易引起下前牙牙周膜应力集中在唇侧颈部,从而引起骨开窗骨开裂。王诗雨等<sup>[20]</sup>研究发现,尖圆形、卵圆形牙弓远移磨牙时的反作用力对前牙的影响明显,方圆形牙弓的影响较小。有限元模拟显示,因在牙弓尖牙拐角处,方圆形牙弓拐角大,牙周膜应力集中面积及应力峰值最小,反作用力的传递被分散,传递给前牙的力小,有利于前牙支抗的保护。

为了增大磨牙远移的量,提高磨牙远移的效率,保护前牙支抗,微种植钉辅助磨牙远移也是临床常采用的方法。有限元研究发现,添加微种植钉作为辅助支抗时,前牙唇倾趋势较单纯 CAs 后推减少,且向远中的磨牙牙周膜应力分布范围更大。微种植钉植入部位选择考虑甚多,包括相邻牙根的关系、颊侧牙槽骨的厚度、软组织活动度,部分植入部位还应考虑系带的活动度。邓闻文等<sup>[21]</sup>研究发现,上颌磨牙远移时微种植钉植入部位越靠龈方,切牙的唇倾移动量越小,有利于保护切牙转矩;但越高位的微种植钉牵引时,尖牙唇侧位移量越大,所以针对尖牙唇侧骨量不足的患者可考虑低位的微种植钉牵引。王宋义等<sup>[22]</sup>模拟下颌磨牙远移时得出的结果与邓闻文等<sup>[23]</sup>研究一致。康芙嘉等<sup>[24]</sup>研究发现,微种植钉在矢状向越往后,产生的磨牙远移压低效应越明显,同时磨牙远移实现率更高,这提示如需磨牙远移的同时逆旋下颌骨,微种植钉植入部位可尽量选择靠后的位置。GUO 等<sup>[25]</sup>研究发现,微种植钉植入在腭侧提供支抗时,前磨牙表现出最小的颊倾移动趋势,且表现出最大的磨牙远移效果,这提出了一种新的支抗选择部位。

### 3 扩弓

无托槽隐形矫治器扩弓也是获得间隙的一种方式,常用于轻微拥挤的牙列或后牙牙轴向腭侧倾斜的情况。林青等<sup>[26]</sup>的实验设计模拟了上颌双侧第一磨牙第二磨牙组牙扩弓 0.2 mm 的有限元分析。研究结果显示,第一磨牙相对于第二磨牙有较大的颊侧倾斜移动趋势,但第一前磨牙和第二前磨牙则受到较大的腭侧倾斜移动反作用力趋势,尖牙无明显移动趋势,但前牙有明显唇倾的趋势。杨莹等<sup>[27]</sup>研究发现,隐形矫治器扩弓,附件的设计有一定影响,相对于传统的水平矩形附件和垂直矩形附件,更推荐使用颊侧优化扩弓附件,并且在颊腭侧均添加附件时,后牙冠根的最大位移值和最小位移值的比值最小,更接近整体移动,并且扩弓时,前磨牙的控根效果会更优于磨牙。唐倩等<sup>[28]</sup>通过测量超过 80 例病例扩弓前后的比较得出结果与杨莹等<sup>[29]</sup>的研究结果基本一致。上述研究均通过有限元研究发现扩弓其实是后牙牙冠向颊侧的倾斜移动,这可能与施力部位位于牙冠,与阻抗中心不重合有关。苏涛等<sup>[30]</sup>研究了无托槽隐形矫治器不同刚度对扩弓的影响,分别列举了弹性模量为 415.6、816.3、2 400 MPa 的热压膜材料实施扩弓时对牙列的作用,结果 2 400 MPa 材料扩弓时牙周膜应力集中面积最大,最大应力也最大,且旋转中心距离根尖的距离最大,证明了 2 400 MPa 的热压膜材料较其他 2 种移动效率较高。但值得注意的是,大的弹性模量有利于矫治器产生矫治力量,但刚度过大也会引起矫治器断裂,且不利于牙周健康。

### 4 压低前牙

除了间隙获得外,近年来针对无托槽隐形矫治的有限元分析研究还集中在 CAs 的垂直控制能力上。在临床实践中整平 Spee 曲线,内收前牙,矫治深覆殆均需要压低前牙或升高后牙来打开咬合。

在单独使用 CAs 打开咬合时前牙压低的实现率较低,仅约 42%。CAs 在前磨牙减数病例中常出现过山车效应,需要垂直向的良好控制才能完成矫治。陈琳等<sup>[31]</sup>以前牙区尖牙不移动时压低切牙为对照组,设立尖牙远移 1 mm 组和远移至拔牙间隙 1/3 组分别压低切牙,发现切牙压低的效率并不相同。结果显示,上颌尖牙远移 1 mm 时再压低切牙是 3 组中垂直位移量最大、效率最高的。因为尖牙远中移动后创造了间隙,让牙套能够更多地包裹牙齿传递矫治力。再者尖牙远移后,与侧切牙并未直接紧邻,所以垂直向的移动阻力减小。但当尖牙远移到拔牙间隙的 1/3 时再压低前牙,其垂直位移量较移动 1 mm 组下降。这是因为分步压低时尖牙切牙交互支抗,距离太远不利于矫治力的传递,此研究提示尖牙远移时分步压低是提高效率的有效手段。压低前牙时还需注意牙槽骨的唇侧厚度,下颌前牙压低尤甚。因为下颌骨前牙区唇侧骨板菲薄,CAs 的压低移动多为倾斜移动,设计不当会增加骨开窗骨开裂的风险。黄钊等<sup>[32]</sup>有限元研究认为,压低下前牙时添加根舌向负转矩过矫治,尖牙位移方向保持不变,直立在基骨中的下前牙压低时随着过矫治度数的增加,冠越往唇向,根越往舌向移动,过矫治 1° 为最适度数,下前牙压低趋近于整体压低,这提示评估牙根与牙槽骨的位置关系非常重要。

需要大量压低或单纯 CAs 压低不能完成的病例,辅助微种植体压低是一种有效的手段。微种植体植入的位置应根据解剖条件选择合适的植入部位。当然不同部位有不同的影响,施则安等<sup>[33]</sup>研究发现,在上颌中切牙间植入微种植钉辅助可有效压低上前牙,同时内收时控制上前牙转矩。这提示本研究针对上前牙直立或内扣的患者进行垂直向控制时,植入微种植钉部位推荐上颌中切牙间。康芙嘉等<sup>[34]</sup>的研究结果也与之一致。当植入在上颌双侧中切牙与侧切牙间时,切牙垂直向位移量较前者更大,但上颌中切牙冠唇向位移量减少,说明此方案对中切牙转矩控制不如前者。当植入在上颌双侧侧切牙与尖牙间时,前牙压低为最接近牙体长轴方向的整体移动,尖牙压低量较前两者明显增大,相应地对中切牙与侧切牙转矩控制不佳。

针对牙周病的患者,上前牙扇形散开,下前牙伸长是常见的临床表现。配合正畸治疗建立正常的覆殆覆盖有利于牙周病患者的长期健康,其中前牙压低

是牙齿移动的重、难点。牙周病患者因其牙槽骨吸收, 阻抗中心改变, 移动设计步距应减小。张羽彤等<sup>[35]</sup>模拟研究发现, 步距为 0.1 mm 时牙周膜等效应力分布较均匀, 且牙周膜最大应力在安全范围内。该研究还提出, 矫治器包裹面积应超过 50%, 有利于提高矫治效率。但作者在临床实践中发现牙周病患者牙槽骨吸收, 牙龈退缩后, 邻间隙明显, 如果矫治器过分进入此处倒凹, 则每次取戴矫治器时都会对本就脆弱的牙齿产生巨大的拉拔力, 这不利于牙周病患者的牙齿移动及长期牙周健康, 合理的矫治器包裹面积有待进一步研究。

## 5 小 结

近年来, 无托槽隐形矫治基于有限元的研究主要集中在前牙内收、磨牙远移、扩弓及前牙压低板块。这侧面反映了矫治思路首先应从间隙获得入手, 微量间隙需求可考虑牙齿唇倾和邻面去釉; 牙弓宽度不调伴拥挤考虑扩弓; 少量间隙需求伴磨牙近中或远中关系考虑磨牙远移; 明显面凸需要大量内收的患者考虑拔牙矫治。其中又穿插着垂直向控制的问题, 深覆殆, Spee 曲线深, 抵抗过山车效应均需考虑前牙压低。

有限元研究可以模拟出矫治中牙齿、牙周膜、牙槽骨的生物力学分布, 有利于复杂力学系统的分析, 提示临床上补偿设计。但有限元分析也有弊端, 其仅反映了矫治器的瞬时施力, 并不能代表真正的牙齿移动。现有的有限元研究通过模拟佩戴牙套过程演算出动态受力, 但尚不能证实其准确性。大量的有限元研究结果只能将力的方向定性, 其意义是提示临床医生有所为有所不为, 至于所需力的大小尚不能通过有限元研究来准确判定。国内应用有限元方法对生物力学的研究如火如荼, 这归功于有限元法所需设备易得, 相关软件功能强大、有无创性、可重复性, 可研究复杂力学系统, 力的可视化表达等优点, 值得临床推广应用。

## 参 考 文 献

[1] MORADINEZHAD M, ABBASI MONTAZERI E, HASHEMI ASHTIANI A, et al. Biofilm formation of streptococcus mutans, streptococcus sanguinis, staphylococcus epidermidis, staphylococcus aureus, lactobacillus casei, and candida albicans on 5 thermoform and 3D printed orthodontic clear aligner and retainer materials at 3 time points: an in vitro study[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 1-13.

[2] THRESHER R W, SAITO G E. The stress analysis of human teeth[J]. J Biomechan, 1973, 6(5): 443-449.

[3] TRIVEDI S. Finite element analysis: a boon to dentistry[J]. J Oral Biol Craniofac Res, 2014, 4(3): 200-203.

[4] LIU J Q, ZHU G Y, WANG Y G, et al. Different biomechanical effects of clear aligners in bimaxillary space clo-

sure under two strong anchorages: finite element analysis[J]. Prog Orthod, 2022, 23(1): 41.

- [5] 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.
- [6] 曹世陶, 杨宜靓, 徐宝华. 无托槽隐形矫治器整体内收与分步内收下颌前牙的三维有限元对比分析[J]. 中日友好医院学报, 2022, 36(4): 207-210.
- [7] 范丽梅, 刘若曦, 徐宝华. 无托槽隐形矫治器联合微种植钉牵引内收上前牙的三维有限元研究[J]. 中日友好医院学报, 2022, 36(3): 152-155.
- [8] 唐云, 罗思阳, 郑之峻, 等. 不同高度种植钉辅助隐形矫治器内收前牙的三维有限元分析[J]. 贵州医科大学学报, 2024, 49(4): 569-574.
- [9] 白煜, 冯雪, 刘冬梅, 等. 无托槽隐形矫治器联合微种植钉整体内收上前牙的三维有限元研究[J]. 实用口腔医学杂志, 2019, 35(1): 71-76.
- [10] 刘义琼, 冯枫, 李帅, 等. 无托槽隐形矫治器内收上前牙的三维有限元分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(8): 1030-1034.
- [11] 李晓梅, 宋云鹏, 徐宝华. 牵引方向对无托槽隐形矫治器联合种植支抗内收上前牙的生物力学影响[J]. 临床口腔医学杂志, 2022, 38(3): 152-156.
- [12] 李晓梅, 徐宝华. 无托槽隐形矫治器联合种植支抗内收上前牙的三维有限元研究[J]. 中日友好医院学报, 2021, 35(4): 211-215.
- [13] 宋云鹏, 徐宝华. 无托槽隐形矫治技术整体内收前牙时后牙不同备抗角度的三维有限元分析[J]. 中日友好医院学报, 2021, 35(5): 284-287.
- [14] 安世英, 张继武, 马俐丽, 等. 无托槽隐形矫治技术内收上前牙的三维有限元分析[J]. 临床口腔医学杂志, 2020, 36(10): 583-586.
- [15] LIU L, SONG Q, ZHOU J, et al. The effects of aligner overtreatment on torque control and intrusion of incisors for anterior retraction with clear aligners: a finite-element study[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2022, 162(1): 33-41.
- [16] 王建凯, 胡铮, 陆珮珺, 等. 附件对隐形矫治器内收上前牙影响的三维有限元分析[J]. 中国实用口腔科杂志, 2022, 15(4): 420-424.
- [17] 赖文莉. 无托槽隐形矫治技术推磨牙向后的临床应用策略[J]. 国际口腔医学杂志, 2019, 46(4): 373-382.
- [18] 郭学强, 刘新强, 王铮. 成人下颌磨牙后间隙与第三磨牙关系的三维研究[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2021, 28(2): 74-79.
- [19] 李慧, 张栋梁. 两种隐形正畸序列磨牙远移的有限元比较[J]. 医用生物力学, 2024, 39(2): 326-331.
- [20] 王诗语, 黄钰钰, 刘浩, 等. 不同牙弓形态和第二前磨牙缺失对上颌磨牙远移中支抗的影响[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(28): 4541-4546.
- [21] 邓闻文, 刘琳. 无托槽隐形矫治器配合微种植钉远移磨牙的三维有限元研究[J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17(1): 50-55.