

无托槽隐形矫治生物力学与矫治策略研究进展

雷啸 金钊

口腔系统重建与再生全国重点实验室, 国家口腔疾病临床医学研究中心,
陕西省口腔生物工程技术研究中心, 空军军医大学口腔医院正畸科, 西安 710032

[摘要] 无托槽隐形矫治 (CAT) 技术在正畸临床中的应用日趋广泛, 然而其在复杂病例牙移动过程中的生物力学效率、实现率及治疗效果的可预测性仍有待进一步明确和提升。本文系统性回顾了当前 CAT 中推磨牙远移、扩弓、垂直向牙移动及拔牙矫治等 4 种常见复杂矫治设计的生物力学研究进展, 并对包括过矫治设计、附件应用、微种植钉支抗及颌内/颌间弹性牵引等常见的临床矫治策略应用做出了总结和讨论, 详细阐述了各类矫治设计在提高牙齿控制精度和矫治实现率方面的作用, 并对其未来发展方向作出展望, 旨在为 CAT 的临床优化提供理论依据与实践指导, 从而提升矫治效果的可控性与可预期性。

[关键词] 无托槽隐形矫治; 生物力学; 矫治策略优化

[中图分类号] R783.5 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025.2025379



本文链接 开放科学标识码

Advancements in biomechanics and orthodontic strategies for clear aligner therapy

Lei Xiao, Jin Fang

State Key Laboratory of Oral & Maxillofacial Reconstruction and Regeneration, National Clinical Research Center for Oral Diseases, Shaanxi Oral Bioengineering Technology Research Center, Dept. of Orthodontics, School of Stomatology, The Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2024YFC2510701); Special Project of the National Clinical Research Center for Oral Diseases (LCA202403)

Correspondence: Jin Fang, E-mail: jinfang@fmmu.edu.cn

[Abstract] Clear aligner therapy (CAT) is increasingly used in orthodontic practice. However, the biomechanical effectiveness and predictability of tooth movement in complex cases should be further clarified and enhanced. This article provides a systematic review of the biomechanical mechanisms underlying four common complex treatment modalities in CAT, namely, molar distalization, arch expansion, vertical tooth movement, and extraction cases, and summarizes current clinical strategies, such as overcorrection design, attachment, mini-screw-assisted anchorage, and intra-/inter-arch elastic traction. The role of these strategies in improving tooth movement control and treatment efficacy is elucidated, and potential future developments is discussed. The findings can offer a theoretical basis and practical guidance for optimizing CAT and improving the control ability and predictability of treatment outcomes.

[Key words] clear aligner therapy; biomechanics; treatment strategy optimization

无托槽隐形矫治 (clear aligner therapy, CAT)

技术始于 1945 年, 1998 年经美国食品药品监督管理局批准后广泛用于正畸治疗, 其应用与技术细节在临床实践中得到长足发展^[1-2]。CAT 在美观性、舒适性和口腔卫生维护方面的优势已为正畸医师所熟知。CAT 如今已广泛应用于拔牙和非拔牙病例、混合牙列矫治及恒牙列矫治等不同矫治情景中。CAT 方案设计不同于传统固定矫治, 不能每

[收稿日期] 2025-09-19

[基金项目] 国家重点研发计划 (2024YFC2510701); 国家口腔疾病临床医学研究中心专项课题 (LCA202403)

[第一作者] 雷啸, 主治医师, 博士, E-mail: lxfmmu2023@126.com

[通信作者] 金钊, 主任医师、教授, 博士, E-mail: jinfang@fmmu.edu.cn

次复诊根据牙齿移动的反馈而做出及时的调整。因此，在方案设计时就需要对牙齿移动做出较为长远的预测。

不同于传统固定矫治器，CAT矫治器能够将力同时施加于咬合面、颊面和舌面并产生合力，这种独特的生物力学机制被称为“西瓜籽效应”（Watermelon Seed Effect）。该效应使得CAT在实现牙齿三维方向移动方面具有一定优势，但也伴随相应的生物力学风险。其具体表现为当矫治器产生形变时，由于牙冠并非对称结构，使得CAT矫治力的分布不均匀且难以准确预测，导致矫治效率降低、牙齿压低等趋势^[3]。若能结合牙冠形态分析并精准模拟矫治过程，即可在矫治设计中个性化增设附件或压力嵴以产生额外的控制力矩，降低该效应相关的风险。例如，在前牙压低过程中，临床医生可依据预测的牙冠唇舌向倾斜趋势设计相应方向与大小的转矩补偿，从而增强对牙齿移动的控制^[4]。此外，目前CAT牙移动的矫治效率（Efficiency）及可预测性（Predictability）仍然不足。效率通常用来反映CAT矫治中牙实际移动量；而实现率或可预测性则用于指代CAT中实际牙齿移动量占初始矫治设计移动量的比例，能够反映CAT方案设计对于牙齿定向移动的预测和控制能力。相关研究充分说明，CAT中牙齿实际移动与方案设计之间存在较大差异，总体牙齿移动的实现率为50%^[5]，特别是在一些复杂错颌病例中存在转矩丢失、倾斜移动等潜在的风险^[6]。此外，不同牙移动策略、附件数量和位置、材料学性能及患者牙套更换频率均会影响到CAT的表达效率，进一步增加CAT矫治方案设计的复杂性，这要求临床医生应充分考虑不同牙移动设计所产生的正向作用与潜在风险，并通过提前预设过矫治或补偿加以预防和纠正，以提高矫治效率并实现精确的牙齿控制。为达到这一目标，需要对CAT中不同矫治设计牙齿移动的相关生物力学变化进一步明确。尽管近年来CAT矫治效率的研究层出不穷，但既往研究多聚焦于对单一特定技术（如不同种植支抗位点、牵引方式或过矫治设计）的矫治效果进行探索。本文致力于构建一个系统性的临床决策支持框架，基于推磨牙远移（Molar Distalization）、扩弓（Arch Expansion）、垂直向牙移动（Vertical Tooth Movement）及拔牙矫治（Extraction Cases）等4种常见矫治设计，阐述国内外针对CAT矫治效率与实现率偏低系列问题开展的生物力学研究、回顾性及介入性临床研究、病例报

道，探讨不同矫治类型下CAT牙移动控制的生物力学研究特点与主要风险，总结CAT在不同临床情境下的优劣势及相应的应对策略，从而直接助力于临床诊疗方案的优化与制定。

1 推磨牙远移

推磨牙远移技术通常应用于非拔牙矫治病例，旨在为轻度牙弓拥挤提供间隙，特别适用于在磨牙初始远中位置的病例中建立中性咬合关系^[7]。相较于扩弓和压低等矫治设计，CAT推磨牙远移表现出较高的矫治效率。数据显示，上颌第一磨牙远移实现率为69%，第二磨牙为75%；下颌第一磨牙为58%，第二磨牙为74%^[8]，表明CAT中磨牙矢状向位置和轴倾度控制具有良好的可预测性，但需配合合理的支抗设计以保障矫治效果。

1.1 CAT推磨牙远移的生物力学及风险因素

与传统固定矫治中磨牙远移常伴随明显的牙冠远中倾斜不同，CAT磨牙远移在矢状向上基本呈现整体移动。例如，Ravera等^[9]的研究显示，上颌磨牙远移2.25 mm时并未引起轴倾度的显著改变，这可能得益于CAT附件及矫治器对牙齿的全面包裹作用^[10]。然而，CAT推磨牙远移产生的反作用力可导致前牙出现唇向倾斜和伸长的趋势，该效应还会通过颌间牵引传递至对颌前牙。基于锥形束CT（cone beam computed tomography, CBCT）的病因分析进一步表明，磨牙远移及近中倾斜与下颌切牙区牙槽骨缺损的加重显著相关，因此临床矫治设计中需将前牙纳入整体考量，通过增设支抗和转矩补偿以控制前牙位置^[11]。另一方面，即使仅设计磨牙在矢状向远中移动，磨牙仍可能出现非预期的颊舌向和垂直向移动。其临床表现主要包括：远移磨牙颊向倾斜、近中颊向旋转及压低等趋势^[12]。值得注意的是，CAT技术对前磨牙及磨牙的转矩控制能力较为有限，即便配合使用腭侧/颊侧附件并设置过矫治，其效果仍不理想^[13]。此外，在上颌磨牙远移时，应特别注意牙根与上颌窦之间的位置关系，尽管研究^[14]认为上颌窦与磨牙根尖的距离与牙根吸收无直接相关性，临床中仍需谨慎评估相关风险。

1.2 CAT推磨牙远移矫治策略优化

通常来说，CAT推磨牙远移临床设计中需要第一、第二磨牙实际远移量达2~3 mm。为应对前牙可能出现的唇向倾斜与伸长、磨牙转矩控制不足等问题，并进一步提高磨牙远移的实现率，研

究者们从增强支抗、牙齿移动路径及垂直向控制的优化设计等多个方面提出了相应的矫治策略。

首先，使用骨性支抗或颌间牵引等方式加强支抗是CAT推磨牙远移实现率的重要保证，能够有效控制前牙及前磨牙牙根的矢状向位置^[15]。不同植入部位的种植钉具有不同的支抗效应。例如，在腭侧植入种植钉更有利于提升磨牙远移效率并改善转矩控制，而在牙弓后段颊侧（如颧牙槽嵴或磨牙区牙间隙）植入则更有利于保护前牙支抗^[16]，其生物学原理在于腭侧种植钉弹性牵引时存在腭向的分力，相比于颊侧牵引更有助于磨牙远移时牙冠颊倾的预防和控制。此外，由于腭侧种植钉的牵引位置相较于颊侧种植钉更加接近磨牙（通常在第一前磨牙处放置舌侧扣或精密切割），因此具备更高的磨牙远移效率。在磨牙或支抗牙（如尖牙）上配合使用舌侧垂直矩形附件，可在一定程度上提高远移效率^[17]；同时在颊、腭两侧放置附件，则有助于实现更稳定的磨牙横向控制^[18]。与垂直附件相比，水平附件对磨牙支抗的保护作用更强，因此可在磨牙远移到位后将垂直矩形附件更换为水平矩形附件以维持远移矫治效果。相对而言，颌间牵引在增强支抗方面的效果通常不如种植钉可靠^[19]，且可能引起前牙伸长、舌向倾斜或对颌磨牙支抗丧失等不良反应^[20]，临床中需谨慎选择牵引方式与角度。此外，Tang等^[21]提出将上颌磨牙远移与横腭杆联合使用，研究证实该设计可通过腭部支抗增强前牙支抗，并促进磨牙远移。

其次，CAT序列远移和同时远移的策略在磨牙远移实现率、牙齿控制等方面存在显著差别。在上颌，第一磨牙与第二磨牙远移的力学模式基本一致，但每次仅移动单颗磨牙往往具有更高的表达率和更好的控制效果，并有助于减轻前牙受反作用力而唇倾伸长的趋势^[10]。此外，磨牙远移到位后的支抗保护是提高实现率的另一关键。尤其在序列远移过程中，第一磨牙的远移会对已就位的第二磨牙产生较大的近中向反作用力^[22]。针对该问题，多名学者建议采用半包裹或开放式末端的CAT矫治设计，可在移动第一磨牙或前磨牙时有效维持远端磨牙的矢状向位置，但需配合更强的增强支抗手段以保护前牙支抗^[23-24]。因此，尽管CAT推磨牙远移的实现率相对较高，仍建议在设计中纳入一定磨牙远移量、磨牙及前牙冠腭向转矩的过矫治设计，同时减小步距以确保矫治器内应力充分释放、提高牙齿移动的可控性^[25]。

另外，推磨牙远移矫治中垂直向控制尤为关键。尤其在高角病例中，传统固定矫治常引起磨牙伸长，进而导致下颌平面角增大。尽管三维有限元分析预测磨牙在远移中存在伸长趋势，但临床研究^[26]表明CAT在实际应用中展现出良好的垂直向控制能力。在不使用种植支抗的情况下，CAT中上颌磨牙远移时磨牙垂直高度及下颌平面角可基本维持稳定，这可能得益于矫治器的包裹限制了牙齿的垂直向位移^[27]。此外，在配合种植钉进行上磨牙主动压低的病例中观察到FMA角度与下面高的显著减小^[28]。关于下颌垂直向变化的研究相对较少，但现有结论与上颌类似^[8]，表明下磨牙在远移过程中垂直距离保持稳定，甚至伴随磨牙的被动压低^[29]，仅有1例伴有牙周炎的下颌磨牙远移病例报道显示下颌平面角增大^[30]。以上结论提示应用CAT推磨牙远移时应依据实际矫治需要设计垂直向过矫治。

最后，CAT推磨牙远移矫治需充分考虑牙弓后段骨容量及牙齿阻力因素。例如，在混合牙列期不同发育阶段的第二磨牙会显著影响第一磨牙的远移效率^[31]。此外，磨牙远移前需要常规拔除已萌或未萌的第三磨牙。Kuguoglu等^[18]通过有限元分析进一步阐述了拔除第三磨牙的必要性，证实第三磨牙的存在会导致第二磨牙发生非预期旋转和伸长，使磨牙总体远移效率降低17%，并增加矫治器局部应力与变形风险。

总而言之，CAT推磨牙矫治在复杂牙齿移动中表现出较高的实现率和相对明确的生物力学机制。其主要风险包括磨牙在颊舌向或垂直向上的失控，以及前、后牙的转矩丢失。在临床应用中，通常需结合合理的支抗设计与转矩补偿手段，并综合考虑磨牙远移量的需求及前牙的初始位置与角度，从而在牙齿控制精度、实现率、矫治效率与治疗周期之间做出平衡，以制定更加个体化的矫治策略。

2 扩弓

CAT扩弓矫治主要适用于上颌轻度牙列拥挤及横向发育不足的病例。在各类CAT复杂牙移动中，CAT扩弓虽具有较高的效率，但牙齿整体移动的实现率普遍较低，且易出现明显的牙冠倾斜等不良反应。如何有效提高扩弓实现率、预防和减轻扩弓中磨牙颊向倾斜等非期望移动，是提高CAT扩弓矫治临床效果需要解决的基本问题。

2.1 CAT扩弓的生物力学及风险因素

CAT扩弓实现率整体呈现近中牙位高于远中牙位、下颌高于上颌、混合牙列高于恒牙列的特点。在恒牙列中，尖牙及前磨牙区显示出最大的扩弓效率与实现率，而第一磨牙区的实现率较低^[32]。多项研究^[33]显示，CAT扩弓的实现率自牙弓近中向远中逐渐递减，如尖牙及前磨牙区扩弓实现率分别为70%、50%，而磨牙区实现率仅为29%，这可能是由于矫治器形变从近中向远中逐步累积^[34]。混合牙列中扩弓实现率普遍高于恒牙列（接近80%），且相比于传统上颌快速扩弓方法有助于改善上颌牙弓形态^[35]。此外，CAT扩弓实现率在下颌通常高于上颌^[36]，这可能与下颌磨牙长轴初始舌侧倾斜相关。需指出的是，由于初始扩弓量、步距等参数在不同研究中并不统一，各研究结论中实现率的具体数值可能存在较大差异。

CAT扩弓的主要风险在于，磨牙容易发生非预期的颊向倾斜移动（临床常表现为腭尖下垂）及旋转，从而导致磨牙区颊侧咬合接触丧失^[37]。例如，Zhou等^[34]指出，CAT扩弓主要是通过牙齿倾斜移动实现的，模型分析显示牙冠扩弓实现率为70%，而基于CT重叠测量的牙齿整体移动实现率平均仅为36.35%。Lione等^[38]的研究进一步证实，CAT扩弓中上颌第一磨牙颊侧移动的同时绕其腭根发生了显著的旋转，因此其牙冠近中表现出更高的扩弓效率。另有研究^[39]初步表明，CAT也可能具备一定程度的骨性扩弓潜力。例如，韦梦瑶等^[40]提出一种基于CAT的混合支持式扩弓设计，该方案所实现的骨性扩弓效果介于传统Haas扩弓器与上颌骨骨性扩弓器（maxillary skeletal expander, MSE）之间，但相关结论仍需更多临床研究进一步验证。最后，同样需要关注的是，CAT扩弓对于前牙转矩及位置也存在显著的影响，笔者团队通过三维有限元研究^[41]分析指出，在CAT扩弓矫治过程中，同颌前牙存在舌侧倾斜及切牙伸长的趋势，且该趋势随着预设扩弓量的增大更为显著。

2.2 CAT扩弓矫治策略优化

如前所述，上颌扩弓存在磨牙颊侧倾斜、前牙舌侧倾斜及切牙伸长的趋势；为预防和纠正扩弓中牙齿的非期望移动，研究者从添加转矩补偿、过矫治设计、附件使用等方面提出各自的矫治策略优化理念。

首先，常通过设置一定的扩弓过矫治量以提高整体扩弓效率。例如，吕秦毅等^[42]提出，将扩

弓过矫治量设置为1.5倍时，各牙位的扩弓效率可从原始水平（上颌第一恒磨牙51.86%，上颌第二乳磨牙68.76%，上颌第一乳磨牙73.48%，上颌乳尖牙84.17%）分别提升至75.16%、99.96%、107.35%和122.37%。需要注意的是，过矫治可能加大CAT扩弓中的牙性效应，导致磨牙牙冠颊倾及腭尖下垂等风险。通过增加冠舌向转矩补偿，可一定程度上抵抗颊倾趋势，使磨牙更接近整体移动。然而，转矩补偿所形成的力偶作用会与过矫治设计的冠颊向移动相互干扰，显著影响扩弓效率。例如，吕秦毅等^[42]研究发现，配合1.3°冠舌向转矩补偿后上述各牙位的扩弓效率分别降至56.15%、73.88%、79.49%和87.80%。Zhang等^[41]进一步指出，为磨牙设置部分根颊向转矩补偿（如步距0.1 mm配合0.5°转矩，或步距0.2 mm配合1.5°转矩）有助于提高整体移动比例，但也会相应降低扩弓实现率。此外，过大的步距（0.3 mm）即使添加转矩补偿也无法有效限制上颌磨牙颊侧倾斜。

此外，通过合理使用附件、增加矫治器厚度等方式增强CAT中牙齿控制能力也有利于提高扩弓矫治效果。例如，增加矫治器厚度可在一定程度上提高扩弓效率，但需要关注可能伴随的牙周膜应力增大^[43]。Tang等^[44]指出，在颊侧设置附件并结合转矩补偿，更有利于实现磨牙的整体移动式扩弓；若在舌侧放置附件，则需施加更大的根颊向转矩补偿才能达到相近的控制效果，其所需补偿量甚至可能高于不使用附件的情况。牙列初始拥挤度也会显著影响扩弓效果，因其直接关系到矫治器对牙齿的包裹与控制效果。Duncan等^[45]研究表明，在轻中度拥挤的扩弓病例中，适量进行邻面片切（interproximal enamel reduction, IPR）有助于预防前牙在扩弓过程中出现唇倾和伸长等不良反应。最后，Yao等^[46]提出采用前磨牙与磨牙交替移动的矫治策略，相比于磨牙整体扩弓策略下的扩弓效率（10.38%~13%），交替移动策略能够有效提高CAT扩弓效率（21.35%），并有助于保护磨牙支抗。

总体而言，CAT扩弓主要表现为牙性扩展，在实际扩弓效果中，磨牙牙冠的倾斜移动占比较高。在制定具体矫治方案时，应结合临床实际所需的扩弓量及对牙冠倾斜的容许量，合理设计过矫治，并配合转矩补偿以增加磨牙整体颊向移动的比例，从而在扩弓效率与实现率之间达到理想平衡。

3 垂直向牙移动

在深覆殆与开殆的矫治中，通常需要通过主动设计牙齿的伸长或压低来改善前牙覆殆关系，并辅助纠正下颌平面角。垂直向牙齿移动是CAT中实现难度较大的移动类型之一，研究报道其平均实现率通常低于50%。因此，在临床中本类型病例需谨慎选用CAT，并结合微种植钉支抗、转矩补偿等辅助手段加强牙齿控制，同时关注该牙移动类型所伴随较高的牙周风险。

3.1 CAT垂直向牙移动的生物力学及风险因素

首先，与固定矫治类似的，CAT中伸长、压低等垂直向牙齿移动是实现难度较大的移动类型之一^[47]。以深覆殆病例为例，CAT对下前牙压低的平均实现率为34%，而上颌中切牙的压低实现率仅为13%^[48]；磨牙伸长的实现率为35%~40%^[49]。相比于前牙，磨牙压低的实现率相对较高，但有限元分析表明上颌全牙列压低时磨牙存在冠颊侧倾斜移动的趋势，这可能是压低增加了牙弓长度导致的^[50]。此外，在开殆病例中，有学者^[51]提出矫治器“殆垫效应”使得CAT在开殆矫治中具备优势，但临床证据仍提示磨牙压低的效果不稳定而难以预测，覆殆的纠正更多依赖于前牙的伸长^[52]，其中下颌磨牙压低及前牙伸长对覆殆改善的贡献为上颌的2倍^[53]。CAT垂直向牙移动困难的一个重要原因是，方案设计中垂直向形变往往在矫治器戴入口内时更多地表现为矢状向形变，如在前牙压低设计时矫治器整体缩短，并由此引发前牙舌侧倾斜与磨牙近中移动的非期望移动趋势^[54]。

另外，区别于固定矫治，CAT矫治器的包裹作用使磨牙压低相比于伸长更容易实现。由于三角隙效应（或称楔形效应）的存在，这一力学特点在开殆矫治中具有生物力学优势，但在深覆殆矫治中则较为不利。例如，在CAT深覆殆矫治中，Spee's曲线整平的平均实现率仅为52.9%，其中包含了前牙的压低与磨牙伸长共同作用^[55]。CAT开殆矫治效果更多来源于前牙的舌倾及伸长，磨牙的平均压低效率仅为1 mm^[52]。

其次，在使用CAT进行切牙压低时，常伴随牙冠向舌侧倾斜的趋势。与固定矫治中压低常引起牙冠唇倾不同，CAT矫治中切牙压低往往导致牙冠发生不同程度的舌倾^[56]，且该趋势随初始IMPA角减小而加剧；仅当IMPA角大于110°时，牙冠倾斜方向才可能逆转为唇倾。此外，在切牙压

低过程中，牙根唇侧往往承受持续而集中的应力，临床上易引发切牙唇侧牙根吸收或骨开窗等风险^[57]。

最后，深覆殆病例中需要额外关注前磨牙的控制。Wen等^[58]提出，拔牙病例中前磨牙的伸长移动极易出现失控：一方面，伸长移动相比于压低具有更强的支抗需求，而拔牙病例中邻近前磨牙的缺失导致矫治器难以精确传递前磨牙伸长所需的局部应力。另一方面，拔牙为前磨牙的压低及倾斜移动提供了充足空间，因此在此类病例中，容易出现前磨牙伸长失败、倾斜而导致的局部脱套。

3.2 CAT垂直向牙移动策略优化

针对前述CAT矫治深覆殆病例的常见风险因素，矫治策略主要包括设计前牙压低过矫治、使用种植钉辅助压低及配合前牙区平面导板装置。首先，基于CAT前牙压低实现率普遍较低的情况，研究者^[58-59]建议为下前牙添加适量压低过矫治设计，配合1.2°的冠唇向转矩，以提高整平效果并维持前牙切缘矢状向位置。此外，在前牙区颊侧植入种植钉并结合弹性牵引可有效提升压低效率，同时产生前牙冠唇向转矩，避免因牙冠舌倾与伸长的“钟摆效应”削弱压低效果^[60]。种植钉植入的位置对压低效率具有重要影响：正中唇侧植入对中切牙的压低增强效果最显著，而随着植入点向后移动，侧切牙和尖牙的压低量逐渐增加，但对前牙整体唇倾压低的辅助作用减弱^[60]。其次，在压低策略方面，采用尖牙-切牙交替压低可显著提高切牙的压低实现率，但会一定程度降低尖牙的压低效率^[61]。需要注意的是，提升磨牙及前磨牙的伸长实现率对深覆殆矫治同样关键，因此，从纠正深覆殆整平Spee's曲线的作用评价，下前牙整体压低的整平效果优于分步压低，因为前者对磨牙伸长的效果更为显著^[58]，尤其在低角深覆殆病例中，整体压低前牙不仅有助于磨牙伸长与咬合打开，还可减小前牙区应力。此外，通过在前牙区使用类似固定矫治中平面导板的装置，有助于打开咬合并减弱矫治器的“包裹效应”，从而促进磨牙伸长^[51]。最后，在整平Spee's曲线过程中需特别注意前磨牙的控制，如在前磨牙区额外设置舌钮配合弹性牵引以辅助伸长，尤其是在拔牙病例中，以预防矫治器形变导致的前磨牙伸长失败^[51]。

如前所述，由于CAT矫治器的包裹作用使磨牙压低相对容易实现，单纯CAT矫治对于轻度牙

性开殆具备良好矫治效果，配合切牙伸长实现显著的覆殆改善^[62]。但对于中重度开殆病例，CAT常需联合种植钉支抗、过矫治设计、附件优化、前牙区颌间弹性牵引及咬合垫等辅助手段改善垂直向关系^[63]。首先，磨牙区使用种植钉能够一定程度上提高磨牙压低的实现率；虽然CAT对于磨牙的平均压低效率仅为1 mm且实现率不甚理想^[52]，考虑到三角隙效应能够放大磨牙压低的矫治效果（其比例为1:1.2），因此在CAT开殆矫治中设计少量磨牙压低同样是有必要的。笔者团队研究表明，在上颌磨牙的颊侧与腭侧同时植入种植钉，可提升磨牙压低效率，实现1~2 mm的绝对压低量^[64]，但相应地会增加腭侧牙根吸收的风险^[65]，因此，建议配合使用磨牙根颊向转矩的过矫治设计以控制牙根位置。此外，Greco等^[66]报道在磨牙区域配合牙槽骨穿孔手术可实现2.5 mm的磨牙压低，并且未观察到显著的牙根吸收现象。另外，在压低磨牙的近远中支抗牙上放置附件，相比于在磨牙上直接放置附件更有利于磨牙压低的实现^[67]。最后，类似于前牙平面导板的机制，在磨牙殆方放置超出息止殆间隙高度的咬合垫（Bite Block）可辅助磨牙压低并促进前牙伸长^[51]。

总体而言，当前CAT垂直向牙齿移动的生物力学机制研究不够明确，矫治器易出现难以预测的形变与位移，导致前牙舌倾、磨牙近中移动，且伴随较高的牙根吸收和骨开窗风险。针对深覆殆，应考虑升高磨牙结合整体压低下前牙，配合种植钉、过矫治设计与前牙导板装置提高整平效率；对于开殆，可利用CAT矫治器包裹效应联合磨牙区种植钉、颌间牵引及咬合垫等策略辅助前牙伸长与磨牙压低，同时注意控制牙冠倾斜与根颊向转矩，在临床具体应用中应结合患者初始覆殆情况、垂直骨面型及牙周条件，合理制定个体化垂直控制方案。

4 拔牙矫治

在拥挤的牙弓中，拔除前磨牙可为前牙内收和排齐提供充足空间。然而，CAT矫治器材料硬度低的特点，导致其在拔牙间隙处存在较明显的形变与局部应力中断^[68]，使得CAT拔牙矫治中存在较高的支抗和转矩丢失、拔牙间隙丧失等风险^[69]。当涉及前牙内收量较大的情况时，如何实现CAT矫治期望的牙齿整体移动仍是一大难题。本部分以上颌牙弓拔除2颗前磨牙的情况为例，

探讨CAT拔牙矫治中的生物力学特点及相应的矫治策略。

4.1 CAT拔牙矫治的生物力学及风险因素

CAT拔牙矫治的主要挑战包括远距离牙齿移动的实现、磨牙支抗管理及合理的前牙转矩控制。通常来说，拔除前磨牙提供的间隙除用于排齐整平外，多设计用于内收前牙以改善前突面型。CAT内收前牙的生物力学机制依赖于矫治器的总长度缩短，从而闭合拔牙间隙实现的，产生的收缩应力集中在矫治器的前牙段和远中游离端^[70]。在没有额外支抗增强措施的情况下，矫治器产生的收缩力会迫使前牙和游离端磨牙以倾斜的方式移动^[17]，在牙弓前部导致前牙牙冠舌向和远中方向倾斜、伸长的“钟摆效应”，磨牙区支抗丧失则表现为磨牙牙冠近中倾斜占据部分拔牙间隙。同时，矫治器的压缩形变趋势在前磨牙区域产生压低力^[54]，而当前、后牙都存在早接触时，牙弓中段出现咬合不紧密甚至开殆的现象，称为过山车效应（Roller Coaster Effect）^[71]。此外，上、下颌牙弓在支抗丧失的位置和程度上存在明显差异。上颌更易发生前牙舌倾，切牙转矩与尖牙轴倾度丧失可达10°；上颌磨牙的近中倾斜幅度也大于下颌，磨牙近中移动量可超过2 mm，为下颌的1.24~2.28倍^[72]。下颌的支抗丧失风险主要集中在前牙区，磨牙支抗通常较为稳定^[73]。造成该差异的原因一方面在于上颌牙槽骨结构更为疏松，支抗控制难度较高；另一方面，下颌磨牙与前牙的牙周膜面积差异更大，因此磨牙更不易发生严重的支抗丧失^[74]。

4.2 CAT拔牙矫治策略优化

如前所述，CAT拔牙矫治的主要挑战包括磨牙近中倾斜移动及压低、尖牙远中舌侧倾斜、切牙舌侧倾斜及伸长，需要为上述牙位设计合理的支抗增强措施与适当的过矫治，以控制和消除这些非期望牙移动^[75]。

首先，有效的前牙垂直向控制是实现前牙内收、避免深覆殆导致磨牙支抗丢失的前提。例如，Ren等^[72]通过回顾性临床研究指出，前牙覆殆每增加1 mm，第一磨牙平均会额外向近中倾斜1.5°并占据拔牙间隙。关于牙齿垂直向移动的矫治策略进展已在第二部分进行了讨论。

其次，磨牙支抗的有效控制是合理分配与利用拔牙间隙的基础。理想情况下，CAT矫治希望通过增强磨牙支抗，尽可能实现前牙的最大程度内收从而改善患者面型。采用磨牙预设远中倾斜

的“备抗”(Anchorage Preparation)策略,有助于引导磨牙趋向于整体移动^[76],对磨牙支抗的保护效果显著,特别是在拔除上颌第二前磨牙的病例中^[77]。备抗量的设计需综合考虑牙齿初始轴倾度、计划移动距离及牙弓长度缩短量。Feng等^[78]建议,磨牙备抗量通常应达到 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (对应移动1~2 mm),尖牙备抗量宜设为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (对应移动6 mm),以有效抵抗倾斜移动趋势。在CAT矫治中,备抗设计可分散于移动步骤中同步进行,一定程度上避免了牙冠的往复运动^[79]。此外,种植钉是CAT拔牙矫治中前牙、磨牙支抗增强和转矩控制的有效方式。Yan等^[80]研究表明,在安氏Ⅱ类2分类患者中,配合使用唇侧种植钉可使上前牙在唇倾和远中移动中分别达到69.8%和53.3%的实现率。然而,不同研究中种植钉的支抗增强效果存在一定差异,这可能与支抗力的施加方向及其传递效率有关。例如,直接支抗有助于减少因磨牙倾斜而导致的咬合平面顺时针旋转,而间接支抗则更有利于控制前牙的轴倾度。但值得注意的是,间接支抗会显著削弱种植钉对磨牙支抗的保护作用,这可能是由于局部开窗设计引起矫治器形变增加^[79]。

此外,对前牙进行转矩控制以预防钟摆效应。与磨牙备抗类似,CAT前牙内收时预设冠唇向转矩补偿可以有效减少切牙及尖牙的舌侧和远中倾斜,但会减少前牙整体内收距离^[81]并加重磨牙的支抗负担^[82]。在前牙的转矩控制方面,诸如压力嵴(Power Ridge)和附件等措施的影响并不显著^[83]。需要指出的是,磨牙支抗增强会加重前牙支抗负担,反之亦然,因此需要根据病例实际需要前牙与磨牙的备抗设计作为整体考虑,并在前牙与磨牙支抗管理间做出策略性协调。另外,在前牙区使用种植钉是CAT拔牙矫治中增强支抗、保护前牙转矩的有效方式。研究^[54]表明,在中切牙间唇侧植入种植钉,并配合腭侧跨骀垂直牵引(橡皮筋越过中切牙切缘),相比于单纯垂直牵引控制前牙转矩更为有效;而在中切牙远中植入种植钉则更有利于实现前牙的压低移动^[84]。此外,与扩弓和压低移动类似,增加矫治器刚性有助于提升前牙内收控制,常见策略包括增加矫治器整体厚度及在拔牙区域设计填充式连接桥体^[85]。最后,前牙内收的牙齿移动路径主要包括分步内收与整体内收两种方式,目前尚无直接证据表明分步内收更具支抗保护或更利于前牙转矩控制^[86]。为增强CAT中前牙在三维方向上的移动控制,有

学者尝试不同内收设计,如笔者团队首次提出的“前牙散开内收”策略:通过依次远移尖牙、侧切牙,在前牙区形成均匀分布的间隙,可在不延长矫治时间的前提下,改善上前牙的转矩和垂直向控制,并可与转矩补偿等措施联合应用^[87-88]。

最后,维持和控制尖牙轴倾度对于CAT拔牙病例矫治效果十分关键,其不仅直接影响前牙内收的效率,也显著影响前牙转矩和垂直向控制的表达。例如,尖牙牙冠舌侧倾斜时,其牙根将更靠近唇侧骨皮质,可能形成骨皮质支抗,阻碍整个前牙段的内收移动^[72]。此外,增加尖牙相对于切牙的内收量,有助于减少切牙唇倾的趋势^[89];相较于磨牙,前牙区转矩补偿所产生的矫治力更易作用于尖牙,导致其牙冠远中倾斜,同时可能削弱前牙转矩的实际表达效果。因此,不同病例中尖牙的初始倾斜度应作为重要因素纳入支抗设计考量,例如初始远中倾斜的尖牙在拔除第二前磨牙的病例中能为第一前磨牙远中移动提供支抗^[17],而初始近中倾斜的尖牙则有利于前牙内收时前牙转矩的保护。此外,尖牙还是常见的牵引位点,常通过龈方精密切割或牵引钩施加内收力^[72]。Liu等^[59]建议在CAT拔牙矫治中常规于尖牙上放置垂直矩形附件,以增强前牙区转矩和垂直高度的控制。最后,在腭侧使用Power Arm有助于抑制尖牙远中移动时伴随的旋转,但对其他非预期移动的控制作用较为有限^[90]。

综上所述,CAT拔牙矫治的主要挑战在于矫治器材料强度不足造成的形变,以及由此引发的前牙支抗、转矩丢失。临床应用中,需综合运用备抗设计、种植钉支抗、过矫治与附件优化等策略,协调前牙内收与磨牙支抗的合理分配,增强前牙内收时的垂直向高度与转矩控制,以实现精确的拔牙间隙管理。

5 思考及展望

CAT技术作为正畸领域的革命性进展,凭借其美观、舒适等优势已广泛应用于临床。然而,由于其独特的矫治力加载模式使其在生物力学机制上与传统固定矫治存在较大差异,不同病例中的矫治策略仍需进一步探索与优化。基于前文所回顾讨论的CAT生物力学及策略研究现状与发展瓶颈,笔者认为,CAT技术未来应在以下两个方向持续发力。

其一,推动人工智能辅助下的CAT个体化矫

治方案设计。随着深度学习算法的进步,基于大数据的人工智能技术在CAT诊疗各环节展现出广阔前景。例如,通过分析影像数据中的牙根-牙槽骨关系等软硬组织特征,可预测不同牙位、不同牙移动模式的移动难度,并结合牙齿初始位置,在计算机辅助下实现定量支抗控制与三维过矫治设计,从而协助医生制定更精准的个体化方案,还有助于实现复诊过程的智能化监控,并为生物力学研究提供更贴近临床实际的数据反馈。

其次,促进CAT技术与材料学、工程学等多学科的深度融合。除方案设计的精准化与个性化外,CAT矫治效果的进一步提升亟需依托材料力学性能的优化。以CAT矫治器的3D打印技术为例,该技术通过直接数字化制造实现更高的矫治精准度与个性化控制,允许医生在矫治器层面实现个性化设计,根据不同区域的矫治需要个性化调整膜片的厚度与力学性能,使牙齿实际移动更贴近设计方案,从而缩小虚拟设计与临床显示之间的差距。

展望未来,CAT技术将在人工智能与多学科交叉融合的推动下,朝着更精准、高效和个性化的正畸治疗方向持续发展。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance[J]. Am J Orthod Oral Surg, 1945, 31(6): 297-304.
- [2] Caruso S, De Felice ME, Valenti C, et al. An evaluation of the Invisalign® Aligner Technique and consideration of the force system: a systematic review[J]. Syst Rev, 2024, 13(1): 43.
- [3] Brezniak N. The clear plastic appliance[J]. Angle Orthod, 2008, 78(2): 381-382.
- [4] Hahn W, Engelke B, Jung K, et al. Initial forces and moments delivered by removable thermoplastic appliances during rotation of an upper central incisor[J]. Angle Orthod, 2010, 80(2): 239-246.
- [5] Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles[J]. J World Fed Orthod, 2022, 11(1): 12-21.
- [6] Sachdev S, Tantidhnazet S, Saengfai NN. Accuracy of tooth movement with in-house clear aligners[J]. J World Fed Orthod, 2021, 10(4): 177-182.
- [7] Gazzani F, Pavoni C, De Razza FC, et al. Clear aligner treatment in adult patients with class III malocclusion: lower distalization and class III elastics vs class III elastics alone—a RCT[J]. Eur J Orthod, 2025, 47(4): cjad052.
- [8] Martina H, Stefano Adriana A, Ernesto B, et al. Lower molar distalization using clear aligners: Is it effective? A systematic review[J]. J Orthod Sci, 2024, 13: 11.
- [9] Ravera S, Castroflorio T, Garino F, et al. Maxillary molar distalization with aligners in adult patients: a multi-center retrospective study[J]. Prog Orthod, 2016, 17: 12.
- [10] Elfouly D, El-Harouni NM, Ismail HA, et al. Tip, torque and rotation of maxillary molars during distalization using Invisalign: a CBCT study[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 797.
- [11] Jiang T, Wang JK, Jiang YY, et al. How well do integrated 3D models predict alveolar defects after treatment with clear aligners[J]. Angle Orthod, 2021, 91(3): 313-319.
- [12] Miao Z, Yang Y, Zhang H, et al. Anchorage loss in maxillary premolar and anterior teeth during maxillary molar distalization in clear aligner treatment[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2025, 167(6): 690-702.
- [13] Li L, Guo R, Zhang L, et al. Maxillary molar distalization with a 2-week clear aligner protocol in patients with Class II malocclusion: a retrospective study[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2023, 164(1): 123-130.
- [14] Elfouly D, El-Harouni NM, Ismail HA, et al. Does maxillary sinus proximity affect molar root resorption during distalization using Invisalign? A CBCT study[J]. BMC Oral Health, 2023, 23(1): 905.
- [15] 程鑫焱, 桑婷, 伍军. 种植体间接支抗辅助无托槽隐形矫治远移磨牙效果的锥形束CT分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2022, 57(7): 724-732.
- Cheng XY, Sang T, Wu J. Cone-beam CT evaluation of the effect of indirect anchorage of mini-screw assisted clear aligner on molar distalization[J]. Chin J Stomatol, 2022, 57(7): 724-732.
- [16] Guo R, Li L, Lam XY, et al. Tooth movement analysis of maxillary dentition distalization using clear aligners with buccal and palatal mini-screw anchorages: a finite element study[J]. Orthod Craniofac Res, 2024, 27(6): 868-876.
- [17] Mao B, Tian Y, Zhou H, et al. The effect of canine lingual attachments during maxillary arch distalization with clear aligner: a 4D finite element analysis and *in vitro*

- simulator study[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 707.
- [18] Kuguoglu A, Akarsu-Guven B. Evaluation of the effects of the third molar on distalization and the effects of attachments on distalization and expansion with clear aligners: three-dimensional finite element study[J]. Korean J Orthod, 2025, 55(1): 69-81.
- [19] Song B, Qi Y, Sun J, et al. Force distributions associated with different elastic traction methods for maxillary dentition distalization by clear aligners: an *in-vitro* study[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 587.
- [20] Gao H, Luo L, Liu J. Three-dimensional finite element analysis of maxillary molar distalization treated with clear aligners combined with different traction methods [J]. Prog Orthod, 2024, 25(1): 47.
- [21] Tang X, Wang M, Hu X, et al. The effects of palatal anchorage device on molar distalization with clear aligner: three-dimensional finite element analysis[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2025, 168(4): 413-422.
- [22] 胡忆戎, 宋保龙, 李博, 等. 无托槽隐形矫治磨牙远中移动不同设计方式上颌牙列的三维受力分析[J]. 中华口腔医学杂志, 2023, 58(3): 265-270.
- Hu YR, Song BL, Li B, et al. Three-dimensional analysis of maxillary dentition during molar distalization with clear aligners under different movement designs: an *in vitro* experiment[J]. Chin J Stomatol, 2023, 58(3): 265-270.
- [23] Zhang Y, Wang P, Jiang C, et al. Biomechanical effects of clear aligners with different distal coverage designs combined with Class II elastic traction for maxillary first molar distalization: a finite element study[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 1033.
- [24] Mao B, Tian Y, Liu D, et al. The effect of maxillary premolar distalization with different designed clear aligners: a 4D finite element study with staging simulation[J]. Prog Orthod, 2024, 25(1): 46.
- [25] Ma Y, Fan X, Liu X, et al. Biomechanical effects of periodontal status on molar sequential distalization with clear aligners: a finite element study[J]. Prog Orthod, 2025, 26(1): 15.
- [26] Lione R, Balboni A, Di Fazio V, et al. Effects of pendulum appliance versus clear aligners in the vertical dimension during Class II malocclusion treatment: a randomized prospective clinical trial[J]. BMC Oral Health, 2022, 22(1): 441.
- [27] Auladell A, De La Iglesia F, Quevedo O, et al. The efficiency of molar distalization using clear aligners and mini-implants: two clinical cases[J]. Int Orthod, 2022, 20(1): 100604.
- [28] Balboni A, Cretella Lombardo E, Balboni G, et al. Vertical effects of distalization protocol with Clear aligners in Class II patients: a prospective study[J]. Minerva Dent Oral Sci, 2023, 72(6): 291-297.
- [29] Lin G, Chen M, Guo N, et al. Three-dimensional measurement and analysis of Mandibular Molar Distalization assisted by micro-implant anchorage combined with clear aligner[J]. Pak J Med Sci, 2024, 40(3Part- II): 455-460.
- [30] Almagrami I, Almaqrani M, Zhu L, et al. Class III correction and enhanced periodontal health with aligner treatment in a 53-year-old patient[J]. Angle Orthod, 2024, 95(4): 452-463.
- [31] Li Y, Wu M, Xing X, et al. Effects of maxillary molar distalization using clear aligners during the mixed dentition and early permanent dentition with 3 types of Class II traction: a three-dimensional finite element analysis [J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 717.
- [32] Rocha AS, Gonçalves M, Oliveira AC, et al. Efficiency and predictability of coronal maxillary expansion repercussion with the aligners system: a retrospective study [J]. Dent J (Basel), 2023, 11(11): 258.
- [33] 赵祥, 汪虹虹, 杨一鸣, 等. 无托槽隐形矫治上颌扩弓效率及其影响因素初探[J]. 中华口腔医学杂志, 2017, 52(9): 543-548.
- Zhao X, Wang HH, Yang YM, et al. Maxillary expansion efficiency with clear aligner and its possible influencing factors[J]. Chin J Stomatol, 2017, 52(9): 543-548.
- [34] Zhou N, Guo J. Efficiency of upper arch expansion with the Invisalign system[J]. Angle Orthod, 2020, 90(1): 23-30.
- [35] Cretella Lombardo E, Paoloni V, Fanelli S, et al. Evaluation of the upper arch morphological changes after two different protocols of expansion in early mixed dentition: rapid maxillary expansion and Invisalign® first system[J]. Life (Basel), 2022, 12(9): 1323.
- [36] Loberto S, Pavoni C, Fanelli S, et al. Predictability of expansion movements performed by clear aligners in mixed dentition in both arches: a retrospective study on digital casts[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 694.
- [37] Bowman E, Bowman P, Weir T, et al. Evaluation of the predicted vs. achieved occlusal outcomes with the Invi-

- align® appliance: a retrospective investigation of adult patients[J]. *Int Orthod*, 2023, 21(2): 100746.
- [38] Lione R, Cretella Lombardo E, Paoloni V, et al. Upper arch dimensional changes with clear aligners in the early mixed dentition: a prospective study[J]. *J Orofac Orthop*, 2023, 84(1): 33-40.
- [39] Macri M, Medori S, Festa F. Evaluation of maxillary dentoalveolar expansion with clear aligners: a retrospective CBCT study[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2025, 15(13): 1586.
- [40] 韦梦瑶, 胡心怡, 李暄. 无托槽隐形矫治对替牙期上颌横向发育不足患者扩弓的骨性效应[J]. *山西医科大学学报*, 2023, 54(5): 702-706.
- Wei MY, Hu XY, Li X. Skeletal expansion effect of clear aligners in mixed dentition patients with constricted maxilla[J]. *J Shanxi Med Univ*, 2023, 54(5): 702-706.
- [41] Zhang Y, Hui S, Gui L, et al. Effects of upper arch expansion using clear aligners on different stride and torque: a three-dimensional finite element analysis[J]. *BMC Oral Health*, 2023, 23(1): 891.
- [42] 吕秦毅, 高子琦, 冯青辰, 等. 替牙期无托槽隐形矫治器扩弓治疗改良设计的有限元分析[J]. *上海交通大学学报 (医学版)*, 2024, 44(8): 935-943.
- Lü QY, Gao ZQ, Feng QC, et al. Optimizing arch expansion with clear aligners in the mixed dentition based on finite element analysis[J]. *J Shanghai Jiao Tong Univ (Med Sci)*, 2024, 44(8): 935-943.
- [43] Li N, Wang C, Yang M, et al. Effects of different tooth movement patterns and aligner thicknesses on maxillary arch expansion with clear aligners: a three-dimensional finite element study[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1424319.
- [44] Tang Z, Long H, Liu L, et al. Influence of attachment position and torque overcorrection on arch expansion in clear aligner treatment: a three-dimensional finite element analysis[J]. *Angle Orthod*, 2025, 95(4): 397-404.
- [45] Duncan LO, Piedade L, Lekic M, et al. Changes in mandibular incisor position and arch form resulting from Invisalign correction of the crowded dentition treated non-extraction[J]. *Angle Orthod*, 2016, 86(4): 577-583.
- [46] Yao S, Jiang W, Wang C, et al. Improvements of tooth movement efficiency and torque control in expanding the arch with clear aligners: a finite element analysis[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2023, 11: 1120535.
- [47] Olteanu ND, Romanec C, Cernei ER, et al. Scoping review—The effectiveness of clear aligners in the management of anterior open bite in adult patients[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2025, 61(6): 1113.
- [48] Shahabuddin N, Kang J, Jeon HH. Predictability of the deep overbite correction using clear aligners[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 163(6): 793-801.
- [49] Goh S, Dreyer C, Weir T. The predictability of the mandibular curve of Spee leveling with the Invisalign appliance[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022, 162(2): 193-200.
- [50] Geramy A, Safari F. Effect of clear aligner type on maxillary full-arch intrusion: 3D analysis using finite element method[J]. *BMC Oral Health*, 2024, 24(1): 231.
- [51] Harris K, Ojima K, Dan C, et al. Evaluation of open bite closure using clear aligners: a retrospective study[J]. *Prog Orthod*, 2020, 21(1): 23.
- [52] Finkleman S, Cohanin B, Tai SK, et al. Does planned molar intrusion with aligners assist with closure of anterior open bite[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2024, 166(4): 330-349.e1.
- [53] Moshiri S, Araújo EA, McCray JF, et al. Cephalometric evaluation of adult anterior open bite non-extraction treatment with Invisalign[J]. *Dental Press J Orthod*, 2017, 22(5): 30-38.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Tang Z, He K, Shen Y, et al. Evaluating the effectiveness of clear aligner therapy in leveling the curve of spee: a comparative study of extraction vs. non-extraction patients[J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1): 629.
- [57] 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.
- [58] Wen S, Han X, He X, et al. Predictability of curve of Spee levelling and vertical tooth movements in the lower arch with clear aligners based on cone-beam computed tomography[J]. *Clin Oral Investig*, 2025, 29(7): 336.

- [59] Liu L, Song Q, Zhou J, et al. The effects of aligner over-treatment 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.
- [60] 康芙嘉, 张茜雅, 余磊, 等. 微种植体辅助无托槽隐形矫治器压低上颌前牙的三维有限元分析[J]. *口腔医学*, 2023, 43(9): 796-802.
- Kang FJ, Zhang XY, Yu L, et al. Three-dimensional finite element analysis of maxillary anterior teeth intrusion by clear aligner assisted with micro-implant[J]. *Stomatology*, 2023, 43(9): 796-802.
- [61] 黄钰钰, 王诗语, 刘浩, 等. 无托槽隐形矫治下前牙压低过矫治的回归分析研究[J]. *口腔医学*, 2024, 44(5): 329-333.
- Huang YY, Wang SY, Liu H, et al. A regression analysis of the overcorrection for the mandibular anterior teeth in intrusion with clear aligners[J]. 2024, 44(5): 329-333.
- [62] Alawdi GM, Al Fahad MF, Al Muzher SB, et al. Does Invisalign outperform fixed appliance in treating vertical discrepancies[J]. *Cureus*, 2024, 16(8): e65973.
- [63] Chamberland S, Nataf N. Noninvasive conservative management of anterior open bite treated with TADs versus clear aligner therapy[J]. *Clin Oral Investig*, 2024, 28(4): 236.
- [64] 陈达, 徐国祥, 刘露, 等. 隐形矫治中上颌第一磨牙压低的生物力学分析[J]. *实用口腔医学杂志*, 2022, 38(4): 479-485.
- Chen D, Xu GX, Liu L, et al. Biomechanical analysis of the maxillary first molar intrusion with clear aligners[J]. *J Pract Stomatol*, 2022, 38(4): 479-485.
- [65] Liu J, Wei T, Zhao Y, et al. Efficacy of maxillary molar intrusion and quantification of related external apical root resorption—A comparison of two approaches[J]. *Orthod Craniofac Res*, 2024, 27(5): 733-739.
- [66] Greco M, Rossini G, Rombolà A. Simplifying the approach of open bite treatment with aligners and selective micro-osteoperforations: an adult case report[J]. *Int Orthod*, 2021, 19(1): 159-169.
- [67] 曹丽, 方东煜, 张莉, 等. 附件位置对上颌伸长磨牙压低效果影响的有限元分析[J]. *北京口腔医学*, 2025, 33(3): 164-169.
- Cao L, Fang DY, Zhang L, et al. The effect of different attachment positions for maxillary first molar intrusion: a finite element analysis[J]. *Beijing J Stomatol*, 2025, 33(3): 164-169.
- [68] Sawamura M, Nakano H, Shioyama M, et al. Using digital image correlation to measure displacement and strain during involving distal movement of anterior teeth with clear aligner[J]. *Dent Mater J*, 2023, 42(4): 493-500.
- [69] Song JH, Lee JH, Joo BH, et al. Treatment outcome comparison of Invisalign vs fixed appliance treatment in first premolar extraction patients[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2024, 165(4): 399-413.
- [70] Qiang R, Gao J, Wang Y, et al. Anchorage loss of the posterior teeth under different extraction patterns in maxillary and mandibular arches using clear aligner: a finite element study[J]. *BMC Oral Health*, 2024, 24(1): 1204.
- [71] Qian Y, Tang Z, Chen Y, et al. The 'roller coaster effect' in premolar extraction cases: clear aligners vs. straight-wire appliance[J]. *Eur J Orthod*, 2024, 47(1): cjae072.
- [72] Ren L, Liu L, Wu Z, et al. The predictability of orthodontic tooth movements through clear aligner among first-premolar extraction patients: a multivariate analysis [J]. *Prog Orthod*, 2022, 23(1): 52.
- [73] 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.
- [74] Qiang R, Wu J, Gao J, et al. An integrated approach to posterior anchorage preparation and incisor torque compensation in premolar extraction cases using clear aligners[J]. *BMC Oral Health*, 2025, 25(1): 558.
- [75] Yang Y, Tang Z, Yan X, et al. Determination of optimal incisor overtreatment and molar anchorage preparation for first-premolar extraction patients treated with clear aligners[J]. *Eur J Orthod*, 2025, 47(4): cjaf049.
- [76] Li J, Yang Y, Tang Z, et al. Biomechanical analysis of the effect of Class II traction configurations and aligner overtreatment on molar distalization: a finite-element study[J]. *Eur J Orthod*, 2024, 46(6): cjae055.
- [77] Yang Y, Yang R, Liu L, et al. The effects of aligner anchorage preparation on mandibular first molars during premolar-extraction space closure with clear aligners: a finite element study[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2023, 164(2): 226-238.
- [78] Feng X, Jiang Y, Zhu Y, et al. Comparison between the designed and achieved mesiodistal angulation of maxillary canines and posterior teeth and influencing factors:

- first premolar extraction treatment with clear aligners[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2022, 162(2): e63-e70.
- [79] 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.
- [80] Yan X, Zhang X, Ren L, et al. Effectiveness of clear aligners in achieving proclination and intrusion of incisors among Class II division 2 patients: a multivariate analysis[J]. Prog Orthod, 2023, 24(1): 12.
- [81] Kang F, Wu Y, Cui Y, et al. The displacement of teeth and stress distribution on periodontal ligament under different upper incisors proclination with clear aligner in cases of extraction: a finite element study[J]. Prog Orthod, 2023, 24(1): 38.
- [82] Zhu Y, Hu W, Li S. Force changes associated with differential activation of en-masse retraction and/or intrusion with clear aligners[J]. Korean J Orthod, 2021, 51(1): 32-42.
- [83] Tang Z, Chen W, Mei L, et al. Relative anchorage loss under reciprocal anchorage in mandibular premolar extraction cases treated with clear aligners[J]. Angle Orthod, 2023, 93(4): 375-381.
- [84] 施则安, 夏恺, 罗良语, 等. 无托槽隐形矫治器联合微种植体内收并压低上前牙的三维有限元分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2022, 40(5): 589-596.
- Shi ZA, Xia K, Luo LY, et al. Three-dimensional finite element analysis of upper anterior teeth retraction and intrusion using clear aligners and mini-implants[J]. West China J Stomatol, 2022, 40(5): 589-596.
- [85] Baek SE, Kim K, Choi YK, et al. Effects of clear aligner edentulous space design on distal canine movement: an iterative finite element analysis in cases involving extraction[J]. Korean J Orthod, 2025, 55(3): 193-201.
- [86] 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]. 华西口腔医学杂志, 2023, 58(7): 669-675.
- Tang XY, Xu MY, Hua YJ, et al. Three-dimensional finite element study on the effects of maxillary anterior two-step retraction and en-masse retraction with clear aligners[J]. Chin J Stomatol, 2023, 58(7): 669-675.
- [87] Li N, Lei X, Cao Y, et al. The effect of increasing the gaps between the front teeth on torque and intrusion control of the incisors for anterior retraction with clear aligners: a prospective study[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 115.
- [88] Liang L, Liu L, Cao Y, et al. The effects of anterior spaces on the intrusion of mandibular incisors with clear aligners in extraction cases: a finite-element analysis[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 1097.
- [89] Tang XY, Jiang T, Su H, et al. Effects of canine movement on maxillary anterior en-masse retraction with clear aligners: a finite element study[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 337.
- [90] Eurutairat S, Vongtiang N, Wonghinkong S, et al. Predictability of maxillary canine retraction comparing power arm and non-power arm using 24 sets of In-house clear aligner in premolar extraction case: a randomized controlled trial[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 719.

· 专家简介 ·



金钊, 教授、主任医师、博士研究生导师, 现任空军军医大学口腔医学院正畸科主任, 正畸教研室主任。空军高层次科技人才, 军队优秀专业人才津贴获得者。中华口腔医学会正畸专业委员会副主任委员, 陕西省口腔医学会第四届理事会理事。美国密歇根大学牙医学院正畸科访问教授。《中国口腔正畸学杂志》等杂志编委。研究方向为口腔正畸生物学与牙周组织改建和再生。已发表论文70余篇, 其中SCI收录40余篇, 最高影响因子18.56分。获批发明专利1项, 主译有外文专著《Textbook of Orthodontics》, 编著有《口腔正畸临床技术大全》《口腔颌面组织胚胎学》《组织工程学原理与技术》等口腔正畸学与生物医学专著14部。获得陕西省教学团队, 陕西省优秀教学资源共享课等教学奖项。负责国家自然科学基金面上项目5项, 国家重点研发项目子课题负责人1项, 国家口腔疾病临床医学研究中心专项课题1项, 负责经费600余万元。获得陕西省一等奖3项、二等奖1项。培养博士研究生10余名、硕士研究生30余名。

(本文编辑 杜冰)