

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2026.15.044

临时支抗装置 (TADs) 在口腔正畸中稳定性的影响因素及应用进展

张宇轩

(暨南大学口腔医学院, 广东 广州 510632)

[摘要] 支抗控制是口腔正畸治疗的核心环节, 传统支抗手段如口外弓、横腭杆等虽能在一定程度上增强支抗, 但往往依赖患者配合, 且难以提供真正意义上的“绝对支抗”。临时支抗装置 (Temporary Anchorage Devices, TADs) 凭借体积小、植入灵活等优势, 已成为现代正畸的重要支抗方式, 其临床稳定性仍是制约疗效的关键因素。本文从TADs稳定性的基本概念出发, 系统归纳了患者因素、微种植体设计与材料、植入操作、加载条件及皮质骨微损伤等主要影响因素, 并简要综述了其在磨牙远移、前牙内收、磨牙压低等临床应用中的进展, 以期临床合理应用TADs及进一步提高其稳定性提供参考。

[关键词] 临时支抗装置; 微种植体; 口腔正畸; 稳定性; 皮质骨微损伤; 植入扭矩

[中图分类号] R783

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2026) 15-0184-05

Influencing Factors of Stability of Temporary Anchorage Devices (TADs) in Orthodontics and Their Application Progress

ZHANG Yuxuan

(School of Stomatology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

[Abstract] Anchorage control is the core link of orthodontic treatment. Although conventional anchorage methods such as extraoral arch and transpalatal arch can enhance anchorage to a certain extent, they usually depend on patient compliance and cannot provide genuine “absolute anchorage”. Temporary Anchorage Devices (TADs) have become an important anchorage modality in modern orthodontics owing to their small size and flexible insertion. Nevertheless, clinical stability remains a key factor restricting treatment effects. Starting from the basic concept of TADs-related stability, this paper systematically summarizes major influencing factors, including patient factors, mini-implant design and materials, insertion procedures, loading conditions and cortical bone micro-damage. It also briefly reviews its clinical application progress in molar distalization, anterior teeth retraction and molar intrusion, so as to provide references for rational clinical application of TADs and further improvement of their stability.

[Key words] Temporary anchorage devices; Mini-implants; Orthodontics; Stability; Cortical bone micro-damage; Insertion torque

支抗控制 (anchorage control) 是口腔正畸治疗的核心问题之一, 传统支抗手段如口外弓、横腭杆、Nance弓等, 虽能在一定程度上增强支抗, 但往往依赖患者配合, 舒适度欠佳, 且难以提供真正意义上的“绝对支抗”^[1]。20世纪60年代, Brånemark PI等^[2]提出骨组织可与金属钛钉形成稳定的骨整合, 为口腔种植体系统的发展奠定了基础, 也为正畸支抗治疗打开了新思路。临时支抗

装置 (Temporary Anchorage Devices, TADs), 又称微种植钉、微型种植体, 是指在颌面部骨组织中植入微型钛钉, 辅以橡皮筋、拉簧等正畸加载装置, 以实现定向移动牙齿的目的^[3]。TADs具有成本低、体积小、植入位置灵活、操作便利、不依赖患者配合等突出优点, 与牙种植体植入后需形成骨结合以获得长期稳定性不同, 正畸微种植钉在口内留存时间相对短暂, 且可支持即刻或早

期负载,其稳定性主要来源于微种植钉与周围皮质骨之间的机械嵌合^[4]。尽管TADs的临床应用已日趋成熟,但相较于口腔修复用传统种植体,临床上的植入成功率仍然偏低。植入失败不仅增加患者痛苦,还提升治疗成本、延长治疗时间。因此,深入理解TADs稳定性的影响因素并优化临床应用策略,具有重要的理论价值与临床意义。基于此,本文就TADs稳定性的影响因素及临床应用进展作一综述。

1 TADs稳定性的基本概念

TADs的稳定性可分为初期稳定性(primary stability)和长期稳定性(secondary stability)两个阶段。初期稳定性是指微种植体植入后即刻获得的机械固位,主要依赖于微种植体与周围皮质骨之间的机械嵌合。皮质骨是微种植钉获得初期稳定性的关键结构,相比于松质骨,皮质骨与最大植入扭矩呈更强的相关性,因此初期稳定性是决定TADs植入成功与否的关键因素^[5, 6]。长期稳定性则涉及微种植体在正畸力作用下的持续固位,与后期施加载荷的方式、骨整合程度以及骨组织对微种植体的适应性改建密切相关。有学者将长期稳定性进一步细分为骨愈合期的稳定性和加载后的稳定性。初期稳定性为长期稳定性的建立奠定基础,二者共同决定TADs的临床表现。

2 TADs稳定性的影响因素

2.1 患者相关因素

2.1.1 年龄 年龄是影响TADs稳定性的主要因素。青少年患者的植入风险明显高于成人,植入成功率也更低,这可能与青少年骨密度较低、骨皮质较薄以及骨代谢活跃有关。不同年龄阶段骨组织的矿化程度和改建能力存在差异,直接影响微种植体与骨组织的机械嵌合强度。

2.1.2 骨密度 骨密度是决定TADs初期稳定性的核心因素,不同个体的骨质、骨量存在广泛变异。TADs的初期固位主要来源于微种植体螺纹与周围骨组织的机械嵌合:骨密度越高,单位体积内的矿化骨基质越多,骨组织对螺纹的握持力越强,植入时可获得的扭矩越大,微种植体在正畸载荷下发生微动的风险也相应降低;反之,低密度骨

质中小梁稀疏、结构松软,微种植体难以形成牢固的机械锁结,在持续正畸力作用下更易出现微动,并诱发周围骨组织的吸收改建,最终导致微种植体松动、脱落^[7]。就口内分布而言,颌骨骨密度亦存在明显的区域差异:下颌前牙区骨质较为致密,上颌后牙区骨质相对疏松,相同规格的微种植体在不同位点所能获得的初期固位并不相同,这也是临床选择植入部位时需重点考虑的因素。据此,术前宜采用锥形束CT等影像学手段评估植入位点的骨质情况;对骨密度较低的患者,可选用较大直径的微种植体以增加骨-种植体接触面积,并适当控制加载力值、延长加载前间隔,以弥补骨质条件不足对稳定性的不利影响。

2.1.3 骨皮质厚度 骨皮质厚度是影响TADs初期稳定性的另一核心因素,充足的骨皮质厚度能提供更强的机械嵌合效应,是TADs获得初期稳定性的重要保障。骨皮质厚度并非恒定不变,可因年龄、口内区域及面型等不同而发生变化。就面型而言,低角型患者的骨皮质厚度最大,其次为均角型和高角型。这是由于低角型患者所受咀嚼压力较大,根据结构与功能相适应的原理,需要更大的骨量进行应力分散和支撑,从而使其骨皮质厚度较大;相对应地,高角型患者因骨皮质较薄,TADs的初期稳定性较差,脱落率相对较高^[8]。在植入区域方面,骨皮质厚度呈现规律性分布,是临床选择植入位点的重要解剖学依据。就口内部位而言,上颌与下颌在前牙区的骨皮质厚度无明显差异,但由前向后均呈现逐渐增厚的趋势,其中上颌尖牙近中至远中段的骨皮质厚度最大,下颌则从前牙区至后牙区逐渐增大;垂直方向上,距牙槽嵴顶2 mm处骨皮质厚度较大,4 mm处最小,其后随距离增加而增大^[9]。上述规律提示,后牙区及特定垂直高度通常能提供更优的初期稳定性,术前结合影像学检查评估植入位点的骨皮质厚度,有助于优化植入位点的选择、提高植入成功率。

2.2 微种植体设计、材料与表面处理影响因素

2.2.1 几何设计参数 微种植体的尺寸(直径与长度)直接影响其稳定性。增加微种植体的直径和长度通常可提高其与骨组织的接触面积,从而增强机械嵌合强度。然而,过大的尺寸可能增加牙

根损伤的风险,尤其在牙根间植入时需谨慎权衡。不同直径微种植体的植入转矩与周围骨量密切相关,直径越大,植入时所需扭矩越高,初期稳定性也随之提高^[10]。螺纹设计是影响稳定性的另一重要几何参数,其形态、深度、螺距等几何特征决定了微种植体与骨组织之间的机械锁合效果^[11]。合理的螺纹设计可增大骨-种植体接触面积,分散咬合及正畸力产生的应力,从而提高机械嵌合强度与长期稳定性。

2.2.2 材料特性 钛合金因其良好的生物相容性和力学性能,是目前TADs的主流材料。材料的弹性模量、抗拉强度等力学性能影响微种植体在正畸力作用下的变形与断裂风险,是决定其在口内长期服役安全性的基础^[12]。

2.2.3 表面处理技术 表面处理技术是提升TADs稳定性的重要途径。近年来,表面改性技术受到广泛关注。将喷砂酸蚀(SLA)表面改性技术应用于正畸微种植体,可增加表面粗糙度,促进成骨细胞黏附与骨组织长入,使其骨结合、稳定性及移除转矩三者之间达到平衡,防止正畸治疗后期移除过程对微种植体造成疲劳或破坏^[6]。此外, RGD多肽仿生修饰、rhBMP-2等生物活性涂层的应用研究也显示出增强骨-种植体界面的潜力。

2.3 植入操作因素

2.3.1 植入角度与深度 植入角度与深度对稳定性有显著影响。植入角度不佳会降低微种植钉与骨组织的机械结合,影响其稳定性与使用寿命。三维有限元分析表明^[13],不同植入角度及载荷方向对微种植体周围的应力分布有显著影响,植入角度从30°增至90°时,皮质骨内应力逐渐增大,提示适当倾斜植入有助于分散应力、保护皮质骨。理想的植入角度应使微种植体长轴与骨皮质表面垂直或呈适当角度,以最大化皮质骨的机械嵌合效应。

2.3.2 植入扭矩 植入扭矩是评估初期稳定性的重要指标。过高的植入扭矩可能导致皮质骨过度微损伤,反而影响长期稳定性;过低的扭矩则无法提供足够的初期固位。有限元研究表明^[14],植入扭矩与皮质骨内应变及微损伤范围呈正相关,可作为评估骨组织损伤程度的可靠参考指标。

2.3.3 医生经验与操作技术 医生经验与操作技术

是影响TADs成功率的关键变量。研究显示^[15],78.45%的种植钉失败由手术因素导致,植入位点定位错误可损伤邻近牙根等结构。操作者的经验直接影响植入部位的选择、角度和深度的把控以及术中并发症的处理能力。

2.4 加载因素

2.4.1 加载时机 加载时机是影响TADs稳定性的关键临床决策。现有研究表明^[16],延期加载(植入后4~6周)相较于即刻加载更有利于微种植体周围骨结合的形成,从而为正畸支抗提供更稳固的基础。临床研究也显示^[17],延期加载组的成功率呈升高趋势,尽管与即刻加载组相比尚未达到统计学显著性差异。基于现有证据,建议在TADs植入后的前4~6周内仅施加轻力(约50 g),为骨组织提供必要的愈合期,以增强微种植体的长期稳定性。

2.4.2 加载力值与方向 加载力值的大小与方向同样影响TADs的稳定性。过大的正畸力可能导致微种植体周围骨组织过度受压,引起骨吸收和微种植体松动。三维有限元分析^[18]可用于模拟不同载荷条件下微种植体周围的应力分布,为临床加载方案的设计提供理论依据。

2.4.3 受力持续时间 受力持续时间也是影响稳定性的因素之一。持续的正畸力作用于微种植体,可能引起骨组织的渐进性改建,若改建速度与受力不匹配,则可能导致稳定性下降。

2.5 皮质骨微损伤 皮质骨微损伤是指TADs植入过程中,微种植钉对皮质骨产生的压应力导致骨组织发生的机械变形和微结构改变。皮质骨微损伤可通过荧光显微镜、共聚焦激光显微镜进行观察, Micro-CT和光学相干断层扫描技术已可实现对微损伤分布特征及严重程度细节的观察。组织学上,皮质骨微损伤可分为弥漫性损伤和线状微裂纹两种类型。弥漫性损伤表现为局部骨组织的剧烈变形及大量微小裂纹的聚集,主要集中在骨-微种植钉界面附近;较大的线状微裂纹(长度通常超过10 μm)则自骨-微种植钉界面向外延伸。两类微损伤的形成机制不同:植入扭矩产生的高能量快速释放形成较大的线状裂纹,剩余能量则产生微小裂纹聚集,形成弥漫性损伤^[9]。

皮质骨微损伤对TADs稳定性的影响是多方面

的。首先,微损伤的程度与范围直接影响微种植体的初期稳定性。其次,弥漫性损伤可通过耗散能量延缓骨折的发生,反而是骨骼抗骨折能力较强的标志。然而,过度的微损伤会造成骨组织形态和结构的不可逆改变,影响骨组织的力学特性及后期的修复过程,最终降低微种植钉的长期稳定性。因此,在植入操作中应尽量减少不必要的骨组织损伤,通过优化植入方案(如选择适当直径、控制植入扭矩、采用自攻方式等)为骨愈合创造良好条件,从而提高TADs的临床成功率。

3 TADs的临床应用进展

3.1 磨牙远移 在磨牙远移中,TADs实现了矫治力的直接骨性传递,从根本上改变了过去依赖口外弓、头帽等装置时因患者依从性差而导致的疗效不确定性,同时也避免了摆式矫治器等口内装置常引发的前牙唇倾等副作用^[1]。研究证实^[4],在控制上颌磨牙实际远移距离方面,TADs显著优于传统支抗手段,其疗效的确定性和可预测性为临床治疗提供了坚实保障。近年来,颧牙槽嵴和下颌颊棚区等新植入位点的开发,进一步拓展了TADs辅助磨牙远移的适应证范围,甚至在成年患者中亦能实现下颌磨牙的远移^[7,9]。未来,数字化导板技术的引入有望进一步提升磨牙远移的精度与效率。

3.2 前牙内收与关闭拔牙间隙 在前牙内收与关闭拔牙间隙方面,TADs的核心价值在于能够提供真正意义上的“绝对支抗”,使后牙无需承担反作用力,从而最大化前牙的内收效率。对照研究显示^[6],TADs组上切牙切缘平均内收量(6.2 mm)远超传统口外弓组(4.5 mm),且能将上颌第一磨牙前移量控制在1 mm以内,拔牙间隙关闭周期亦显著缩短。在具体实施层面,不同加力方式的研究表明,采用长牵引钩配合直接支抗法可获得更理想的前牙控根移动和整体压低效果,进一步优化了前牙内收的美学与功能结局。在拔牙病例中,TADs所提供的强大支抗保障了前牙最大限度内收的可能,其临床优势尤为突出。

3.3 压低伸长磨牙与纠正深覆𪙇 对于伸长磨牙的压低这一正畸难点,TADs提供了不依赖邻牙的可靠骨性支抗,以微创方式实现稳定而持续的力学传导,从而避免了传统方法对健康牙体的潜在损

伤。临床研究表明^[20],采用TADs进行磨牙压入可获得显著的覆𪙇改善,平均压低量可达4.8 mm。当前,该领域的研究重点已从单纯的疗效验证转向并发症的防控及新技术的应用。TADs的应用不仅解决了磨牙压低的效能问题,更为复杂的垂直向不调矫治提供了全新的治疗路径。

4 总结

TADs已成为现代正畸治疗中不可或缺的支抗工具。其稳定性受多维度因素共同调控。患者骨量与皮质骨厚度是基础,微种植体设计决定机械嵌合上限,植入操作精度影响初期固位质量,加载时机与力值调控长期骨改建方向,而皮质骨微损伤则是贯穿植入与加载全过程的重要中间环节。临床应用方面,TADs在磨牙远移、前牙内收、磨牙压低及骨性错𪙇等矫治中均已被证实具有可靠的临床疗效。随着数字化导板技术的普及,TADs植入精度有望进一步提升;生物活性涂层材料的开发或可加速骨愈合、缩短加载等待期;人工智能辅助的个体化植入方案设计及加载力值优化,将进一步提高TADs的临床成功率。此外,目前关于皮质骨微损伤与TADs长期稳定性之间量效关系的研究仍较有限,未来需结合显微CT及有限元分析等技术手段开展深入研究,为临床操作规范提供更精确的循证依据。

[参考文献]

- [1]徐卫华,臧悦,王洪伟.微种植体支抗与口外弓支抗在口腔正畸治疗中的疗效对比研究[J].中国美容医学,2022,31(5):126-129.
- [2]Brånemark PI,Adell R,Breine U,et al.Intra-osseous anchorage of dental prostheses.I.Experimental studies[J].Scand J Plast Reconstr Surg,1969,3(2):81-100.
- [3]Sun H,Guo Q,Huang R,et al.Clinical efficacy of micro-implant anchorage in orthodontic treatment[J].Am J Transl Res,2025,17(9):7449-7457.
- [4]李梦瑶,冯旭,郑博文,等.口腔正畸微种植体支抗的数字化设计与应用[J].中国实用口腔科杂志,2025,18(2):142-146,152.
- [5]唐华菁,崔星宇,李昱林,等.微种植钉植入致皮质骨微损伤的相关因素及对稳定性影响的研究进展[J].中国实用口

- 腔科杂志,2025,18(1):85-91.
- [6]Ioana TR,Boeru FG,Antoniac I,et al.Surface Analysis of Orthodontic Mini-Implants after Their Clinical Use[J].J Funct Biomater,2024,15(9):244.
- [7]蒋佳珍,蒋晓鸽,陈嵩.颧牙槽嵴区微种植钉成功率的影响因素[J].国际口腔医学杂志,2024,51(6):677-686.
- [8]何方林,蒋立辉,吴萍,等.口腔正畸患者种植体支抗钉稳定性的危险因素及预防措施[J].现代临床医学,2023,49(1):4-6.
- [9]吴斯媛,宗丽,郑骏明,等.微种植体支抗不同植入部位对患者牙科焦虑症和疼痛的影响[J].广东医学,2017,38(12):1885-1888.
- [10]Ogura H,Numazaki K,Oyanagi T,et al.Three-Dimensional Evaluation of Treatment Effects and Post-Treatment Stability of Maxillary Molar Intrusion Using Temporary Anchorage Devices in Open Bite Malocclusion[J].J Clin Med,2024,13(10):2753.
- [11]Huang TH,Li CS,Chen YH,et al.Long-term stability of maxillary molar intrusion using temporary anchorage devices:A 17-year case report[J].J Dent Sci,2025,20(4):2561-2563.
- [12]郭鑫炜.基于三维有限元分析的微螺钉种植体支抗稳定性的研究[D].锦州:锦州医科大学,2025.
- [13]于海璐,蔡兴伟,马龙,等.不同植入角度及载荷方向对微种植体稳定性影响的三维有限元分析[J].解放军医学院学报,2016,37(3):261-265,270.
- [14]Hoenig T,Ackerman KE,Beck BR,et al.Bone stress injuries[J].Nat Rev Dis Primers,2022,8(1):26.
- [15]Naya-Imai H,Uchida Y,Inaba M,et al.Age dependence of the maturation of the midpalatal suture in the stability of orthodontic anchoring screws[J].Am J Orthod Dentofacial Orthop,2022,161(6):809-819.
- [16]Selvaraj S,Tandon A,Chandrasekaran D,et al.Anchorage and Stability of Orthodontic Mini Implants in Relation to Length and Types of Implants[J].Cureus,2024,16(11):e73056.
- [17]辜娟,尹乐峰,戴征志.微种植体支抗在青少年口腔正畸治疗中的效果及对支抗稳定性的影响因素分析[J].中国美容医学,2023,32(8):144-147.
- [18]Panaite T,Romanec CL,Dragomir BR,et al.The Effect of Biomechanical Loading Parameters on the Stress and Strain Behavior of Orthodontic Mini-Implants:A Finite Element Study[J].J Funct Biomater,2026,17(3):114.
- [19]Chang B,Liu X.Osteon:Structure,Turnover,and Regeneration[J].Tissue Eng Part B Rev,2022,28(2):261-278.
- [20]Omidkhoda M,Bardideh E,Jahanbin A,et al.Effects of posterior intrusion using skeletal anchorage on treating anterior open bite:A systematic review and meta-analysis[J].J Dent Res Dent Clin Dent Prospects,2023,17(4):196-210.

收稿日期: 2026-7-7 编辑: 张蕊