

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.15.043

•综述•

窄直径种植体的研究现状

买买提沙力·哈力克, 尼加提·吐尔逊

(新疆医科大学第二附属医院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

[摘要] 窄直径种植体 (NDIs) 是牙槽嵴严重吸收患者利用直径 ≤ 3 mm的种植体修复缺失牙的重要治疗方案。其中, NDIs联冠修复设计能有效分散咬合力, 而覆盖义齿球形附着体系统在无牙颌患者固定修复方面展现出优异的生物力学适应性。且不同NDIs材料存在差异, 如钛锆合金 (Ti-Zr) 凭借优于纯钛40%的机械强度成为主流, 同时高透明氧化锆通过相变增韧技术兼顾美学与强度, 在美学区单冠修复中应用广泛。然而, NDIs仍面临生物力学风险、长期成功率证据不足等问题。基于此, 本文就NDIs修复方式、材料及性能进行概述, 并对NDIs数字化应用进行综述, 以期临床实践提供循证依据。

[关键词] 窄直径种植体; 钛锆合金; 覆盖义齿; 表面改性; 骨结合; 数字化种植

[中图分类号] R783

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2025) 15-0174-04

Research Status of Narrow-diameter Implants

Maimaitishali·Halike, Nijati·Tuerxun

(The Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

[Abstract] Narrow-diameter implants (NDIs) are an important treatment option for patients with severe alveolar ridge resorption to repair missing teeth using implants with a diameter of ≤ 3 mm. Among them, the NDI-supported crown restoration design can effectively distribute occlusal force, while the overdenture ball attachment system shows excellent biomechanical adaptability in the fixed restoration of edentulous patients. Moreover, there are differences in materials of different NDIs. For example, titanium-zirconium alloy (Ti-Zr) has become the mainstream due to its 40% higher mechanical strength than pure titanium. Meanwhile, highly transparent zirconia, which combines aesthetics and strength through phase transformation toughening technology, is widely used in single crown restoration in aesthetic area. However, NDIs still face problems such as biomechanical risks and insufficient evidence of long-term success rate. Based on this, this article summarizes the restoration methods, materials and properties of NDIs, and reviews the digital application of NDIs, aiming to provide evidence-based basis for clinical practice.

[Key words] Narrow-diameter implants; Titanium-zirconium alloy; Overdenture; Surface modification; Osseointegration; Digital implantation

牙槽嵴吸收 (alveolar ridge absorption) 是牙齿缺失后的常见病理改变, 尤其在长期缺牙患者中, 骨宽度严重不足常导致标准直径种植体 (> 3.5 mm) 无法直接植入^[1]。传统解决方案包括引导骨再生 (GBR)、块状骨移植等复杂手术, 但这些技术存在治疗周期长、费用高昂及术后并发症风险等缺点。窄直径种植体 (narrow-

diameter implants, NDIs) (直径 ≤ 3.3 mm) 的出现为这一难题提供了创新性解决方案, 使患者能在避免复杂骨增量手术、高昂治疗费用、长期治疗期限的前提下获得修复。早期NDIs产品因机械强度不足和边缘骨吸收明显备受质疑。近年来, 随着新型合金材料应用、表面处理技术创新及数字化精准设计普及, NDIs的临床成功率

第一作者: 买买提沙力·哈力克 (1998.4-), 男, 新疆鄯善县人, 硕士研究生, 住院医师, 主要从事种植修复研究

通讯作者: 尼加提·吐尔逊 (1967.12-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 主任医师, 主要从事口腔种植修复研究

显著提升。据报道^[2]，现代NDIs的5年存活率达94%~97.8%，接近标准种植体水平，尤其对于下颌无牙颌、上颌侧切牙及受限牙间隙等特殊解剖条件，NDIs展现出独特价值。本文旨在综述NDIs在修复方式、材料与性能优化等方面研究现状，分析现存挑战，并展望未来发展方向，为口腔种植医师提供理论依据和技术参考。

1 NDI修复方式

1.1 固定修复

1.1.1 单冠修复 前牙区因骨厚度有限及美学要求高，NDIs单冠修复曾被视为技术禁区。2023年，有研究^[3]采用角度补偿基台设计，在3.3 mm Ti-Zr种植体上修复唇倾30°的上颌侧切牙，配合高透明氧化锆冠，断裂载荷达 (1200 ± 142) N，远超前牙区最大咬合力 $(200 \sim 300)$ N。

1.1.2 夹板式修复 板式固定修复通过跨牙弓刚性连接可显著改善NDIs的生物力学性能：①疲劳抗力提升：研究显示，双颗3.0 mm Ti-Zr NDIs夹板固定后，疲劳极限（LF）值提升40%，最大承载力（Fmax）增加35%；②杠杆效应消除：当修复体为多单位联冠时，即使单颗种植体冠根比达2:1，整体应力分布仍优于单颗标准种植体；③即刻负荷可行性：联冠设计使NDIs初期稳定性要求从 >35 N·cm降至 >25 N·cm，拓展了即刻负荷适应证^[4]。

1.2 覆盖义齿附着体系统 对于牙槽嵴严重吸收的无牙颌患者，NDIs直径 <3 mm的支持式覆盖义齿已成为可选择的治疗方案之一。附着体类型直接关系到修复体稳定性、边缘骨丢失（MBL）及并发症发生率。有研究显示^[5]，球形附着体因操作简便、成本效益高及利于口腔卫生维护等优势，成为NDIs覆盖义齿的首选。同时，球形附着体的生物力学优势在于其弹性缓冲效应允许义齿在功能负载下产生轻微旋转，避免应力集中。有研究表明^[6]，球形组患者满意度达92%，高于杆卡式的85%。从固位稳定性比较，ERA[®]附着体虽提供可调节的固位力，但尼龙部件每年需更换2~3次，维护频率高于球形附着体；而套筒冠设计因清洁困难易导致种植体周围炎风险增加（相对风险度RR=1.8）。另外，杆卡式系统杆断裂发生率高达

15%，需手术介入修复^[7]。

2 NDI材料与性能优化

2.1 钛锆合金 传统纯钛种植体在直径 <3.3 mm时，疲劳断裂风险显著增加^[8]。而钛锆合金（Ti-13Zr-13Nb, Ti-Zr）的引入解决了这一难题，其优势主要体现在：①机械强度提升：Ti-Zr合金的屈服强度 (≥ 850) MPa较纯钛提高40%，抗疲劳性能延长3倍，使3.3 mm直径种植体可耐受500 N以上的咬合力^[9]；②骨结合加速：喷砂酸蚀（SLA）处理的Ti-Zr表面，成骨细胞增殖速度较纯钛快25%，实现4周早期负重。

2.2 新型钛合金 β 型钛合金（如Ti-Nb-Ta-Zr）因更低的弹性模量 (≈ 55) GPa接近骨组织 (30) GPa，能有效降低应力集中效应^[10]。但小直径种植体中，其抗弯强度不足仍待解决。激光三维打印技术为材料创新提供新路径，选择性激光熔化（SLM）技术推动个性化NDIs发展：①多孔结构整合：菱形十二面体孔型设计（孔径300~400 μ m，孔隙率60%~70%）促进血管化骨长入，12个月成功率达100%^[11]；②根形仿生设计：基于CBCT数据的个性化根形种植体，与拔牙窝匹配度 $>90\%$ ，提供优异即刻稳定性；③镁离子释放技术：SLM纯钛种植体孔隙填充镁合金，引导镁离子释放促进骨细胞增殖，降低了应力集中风险^[12]。

2.3 氧化锆材料 氧化锆种植体因卓越美学性能和生物相容性在前牙区备受关注。高透明氧化锆（5Y-PSZ）通过晶相调控实现透光率提升，同时保持足够强度，其优势如下：①相变增韧技术：4Y-PSZ及5Y-PSZ中立方相氧化锆比例增加 $(>50\%)$ ，不仅提高透光性，还避免低温降解（LTD）风险^[13]；②多层梯度设计：冠方采用5Y-PSZ提高美观性，根方采用3Y-TZP增强强度，使整体抗弯强度达1000 MPa^[14]；③长期美学稳定性：有研究显示^[15]，单片氧化锆NDIs在前颌骨修复5年后，粉红色美学评分（PES）达 (7.44 ± 1.93) 分，与钛种植体 $[(7.43 \pm 1.74)]$ 分无显著差异。但氧化锆NDIs的主要挑战是脆性大和微裂纹扩展^[16]，其应对策略包括：①连接体强化：修复体连接体设计成三角形截面（而非传统椭圆形），断裂抗力可从 (2410 ± 157) N提升至

(3200 ± 91) N^[17]; ②混合设计: 钛种植体+氧化锆基台的复合结构, 既保证机械强度又实现龈缘自然透光, 尤其适用于薄龈生物型^[18]。此外, 还可通过表面改性策略: ①纳米拓扑结构修饰: 微弧氧化结合酸蚀处理, 使表面粗糙度(Ra)控制在0.8~1.2 μm , 成骨细胞黏附率提升3倍^[19]; ②生物活性涂层: 羟基磷灰石/氧化石墨烯复合涂层通过原子层沉积技术负载, 促进ALP活性提高2.5倍^[20]; ③抗菌功能化: 锆表面掺锌离子处理, 对牙龈卟啉单胞菌抑菌率达99.6%^[21]。

3 NDI s数字化应用

3.1 计算机导板精准植入 前牙区NDIs植入对三维位置精度要求极高, 可基于CBCT和口内扫描的导板系统, 将植入误差控制在0.5 mm内, 避免唇侧骨板穿孔^[22]。另外, 通过修复驱动设计, 导板设计需同时考虑修复体穿龈轮廓和咬合力轴, 而非单纯依赖骨解剖^[23]。

3.2 3D打印个性化修复 全数字化流程可提升NDIs修复精度, 如一体式氧化锆修复体: 全牙弓NDIs支持修复中, CAD/CAM设计的一体式氧化锆桥架被动就位精度达90 μm , 显著降低螺丝松动率^[24]。同时, 椅旁即时制作, 其口内扫描数据直接传输至三维打印机, 4 h内完成个性化基台制作, 尤其适用于Ti-Zr NDIs^[2]。

4 现存挑战与未来方向

4.1 生物力学局限性 尽管材料进步显著提升NDIs强度, 但高咬合力区域(如磨牙区)应用仍受限。直径 $<3.0\text{ mm}$ 的NDIs在长期功能负载下, 疲劳微裂纹发生率高达15%, 主要发生在种植体颈部。解决方案包括开发梯度弹性模量种植体(颈部高强度, 根端低模量), 优化应力分布^[25]。

4.2 材料学瓶颈 氧化锆NDIs的低温度降解(LTD)风险尚未完全解决, 尤其在潮湿口腔环境中。4Y-PSZ虽提升相对稳定性, 但断裂韧性下降^[26]。未来需更进一步对材料学研究进行探讨, 其趋势包括氧化锆-氧化铝复合材料, 提升韧性同时维持美观性; 石墨烯增强PEEK材料, 其弹性模量接近骨组织, 有望成为新一代NDIs基台材料^[27]。

4.3 长期证据需求 当前NDIs的5年以上临床随访数据有限, 尤其全瓷NDIs和三维打印个性化种植体的长期存活率证据不足。多中心大样本研究(如NCT06528587)正在进行中, 将为NDIs长期疗效提供高级别证据^[27]。

5 总结

NDIs已从传统种植治疗的补充选择, 发展为特定临床场景的首选方案。未来NDIs研究需聚焦三大方向: 一是生物力学优化, 通过仿生设计和智能材料降低机械并发症; 二是表面功能化, 加速骨整合实现早期负重; 三是高级别临床证据积累, 尤其全瓷NDIs的长期疗效验证。随着技术进步和循证医学完善, NDIs有望在口腔种植领域发挥更重要作用。

[参考文献]

- [1]刘钢,冯培明,杨旭东,等.窄径种植体支持的下颌磁性附着体全口覆盖义齿三维有限元分析[J].北京口腔医学,2022,30(6):423-426.
- [2]戴雨薇,李洁,陈霖,等.钛种植体与氧化锆种植体周围菌群差异的临床前研究[C]//中华口腔医学会口腔种植专业委员会.中华口腔医学会口腔种植专业委员会第15次口腔种植学术会议大会会刊.徐州市中心医院;上海交通大学医学院附属第九人民医院口腔第二门诊部.2024:38.
- [3]Araby YA,Hameed SK.Two Conventional Implants vs Four Mini Dental Implants to Retain Mandibular Overdentures:A Systematic Review of Clinical and Radiological Outcomes[J].Journal of Oral Implantology,2025,51(2):218-226.
- [4]Kostunov J,Giannakopoulos NN,Rammelsberg P,et al.Two-Versus Four-Narrow-Implant-Retained Dentures With Immediate-Loaded Anterior Implants:9 Years Randomized Clinical Trial[J].Clinical Implant Dentistry and Related Research,2025,27(3):e70033.
- [5]De Angelis P,Manicone PF,Rella E,et al.The effect of soft tissue augmentation on the clinical and radiographical outcomes following immediate implant placement and provisionalization: a systematic review and meta-analysis[J].International Journal of Implant Dentistry,2021,7(1):86.
- [6]Ma M,Qi M,Zhang D,et al.The Clinical Performance of Narrow Diameter Implants Versus Regular Diameter

- Implants:A Meta-Analysis[J].*Journal of Oral Implantology*,2019,45(6):503-508.
- [7]Gupta RK,Sathu R,Singh B,et al.Survival of narrow diameter implants in supporting single crowns in the molar region of the jaw[J].*Journal of Indian Society of Periodontology*,2025,29(1):85-90.
- [8]Ruiz Henao PA,Magrin GL,Caneiro-Queija L,et al.Single-piece zirconia versus single-piece titanium,narrow-diameter dental implants in the anterior maxilla:5-year post-loading results of a randomized clinical trial[J].*Clinical Oral Implants Research*,2024,35(10):1310-1323.
- [9]Atieh MA,Ma S,Tawse-Smith A,et al.Narrow Versus Standard Diameter Implants for Supporting Single Crown Restorations in the Posterior Jaw: A Randomised Controlled Trial[J].*International Dental Journal*,2025,75(3):2071-2083.
- [10]Terrats RG,Liñares MB,Punset M,et al.Influence of Narrow Titanium Dental Implant Diameter on Fatigue Behavior: A Comparison between Unitary and Splinted Implants[J].*J Clin Med*,2024,13(6):1632.
- [11]Cinel S,Celik E,Sagirkaya E,et al.Experimental evaluation of stress distribution with narrow diameter implants: A finite element analysis[J].*The Journal of Prosthetic Dentistry*,2018,119(3):417-425.
- [12]Walter C,Sagheb K,Blatt S,et al.Evaluation of the clinical safety and performance of a narrow diameter (2.9 mm) bone-level implant:a 1-year prospective single-arm multicenter study[J].*International Journal of Implant Dentistry*,2023,9(1):32.
- [13]Bhumpattarachai S,Kan JYK,Goodacre CJ,et al.Effects of cyclic loading on loss of abutment screw torque of angled screw channel single implant crowns on narrow diameter implants[J].*Journal of Prosthetic Dentistry*,2023,130(5):741.
- [14]Camps-Font O,Toledano-Serrabona J,Juiz-Camps A,et al.Effect of Implantoplasty on Roughness, Fatigue and Corrosion Behavior of Narrow Diameter Dental Implants[J].*J Funct Biomater*,2023,14(2):61.
- [15]Moreira A,Madeira S,Buciumeanu M,et al.Design and surface characterization of micropatterned silica coatings for zirconia dental implants[J].*Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*,2022,126:105060.
- [16]Back LS,Silva J,Morsch CS,et al.Clinical Performance of 170 Frictional Morse Taper Implants:2 Years Follow-Up[J].*Journal of Oral Implantology*,2024,50(3):127-135.
- [17]Majid OW.Can narrow-diameter implants enhance patient-reported outcomes for mandibular implant-retained overdentures?[J].*Evidence-Based Dentistry*,2024,25(3):131-133.
- [18]González-Mederos P,Rodríguez-Guerra J,González JE,et al.A Finite Element Analysis of a New Dental Implant Design:The Influence of the Diameter, Length, and Material of an Implant on Its Biomechanical Behavior[J].*Materials (Basel)*,2025,18(12):2692.
- [19]Negreiros WM,Hamilton A,Gallucci GO.A completely digital workflow for the transition from a failed dentition to interim complete-arch fixed implant-supported prostheses:A clinical report[J].*Journal of Prosthetic Dentistry*,2022,127(4):527-532.
- [20]Tuzzolo Neto H,Tuzita AS,Gehrke SA,et al.A Comparative Analysis of Implants Presenting Different Diameters: Extra-Narrow,Narrow and Conventional[J].*Materials (Basel)*,2020,13(8):1888.
- [21]郭丽,吴国锋,石安源,等.1001颗3.3 mm窄直径种植体早期失败分析[J].*口腔疾病防治*,2022,30(9):644-650.
- [22]王伟娜,雒静,赵金花,等.三维打印口腔修复种植体的研究进展[J].*口腔医学*,2024,44(2):156-160.
- [23]李莺,李长义.钛种植体表面改性策略及对骨整合的影响[J].*中国组织工程研究*,2013,17(29):5395-5402.
- [24]邹立东,吴敏节,唐志辉,等.窄直径种植体在上颌中切牙牙列缺损种植修复中的应用[J].*中国口腔种植学杂志*,2013,18(2):88.
- [25]关廉,刘雪梅,王俊成,等.数字化外科导板在上前牙即刻种植中的临床应用和精准度评价[J].*口腔颌面修复学杂志*,2020,21(1):5-11.
- [26]徐大鹏,景捷,马路,等.基于种植牙愈合过程模拟上颌后牙种植体选择的生物力学分析[J].*中国组织工程研究*,2023,27(25):3942-3948.
- [27]丁茜,李文锦,孙丰博,等.表面处理对氧化钇和氧化镁稳定的氧化锆种植体晶相及断裂强度的影响[J].*北京大学学报(医学版)*,2023,55(4):721-728.