

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2025.16.045

口腔种植修复中骨替代材料的生物力学分析

娜菲莎·吾甫尔, 尼加提·吐尔逊

(新疆医科大学第二附属医院, 新疆 乌鲁木齐 830063)

[摘要] 随着口腔种植技术在牙缺失修复中的广泛应用, 骨替代材料作为改善骨缺损、补充骨量的关键辅助材料, 其生物力学性能直接影响种植体-骨界面整合质量与修复远期效果, 而生物力学因素亦是提升种植修复长期成功率的重要保障。因此, 系统分析骨替代材料的生物力学特性对优化临床治疗方案具有重要意义。本文对口腔种植修复中骨替代材料的生物力学研究进展作一综述, 总结不同类型骨替代材料的力学性能特点及种植修复中的生物力学表现, 探讨影响其生物力学效果的关键因素, 以期为临床中骨替代材料的选择与使用提供理论参考。

[关键词] 口腔种植修复; 骨替代材料; 生物力学; 种植体稳定性

[中图分类号] R78

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2025) 16-0184-06

Biomechanical Analysis of Bone Substitute Materials in Oral Implant Restoration

Nafeisha·Wufuer, Nijati·Tuerxun

(The Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

[Abstract] With the wide application of oral implant technology in the restoration of tooth loss, bone substitute materials, as key auxiliary materials for improving bone defects and supplementing bone volume, their biomechanical properties directly affect the quality of implant-bone interface osseointegration and the long-term effect of restoration. Moreover, biomechanical factors are also important guarantees for improving the long-term success rate of implant restoration. Therefore, a systematic analysis of the biomechanical characteristics of bone substitute materials is of great significance for optimizing clinical treatment plans. This paper reviews the research progress on the biomechanics of bone substitute materials in oral implant restoration, summarizes the mechanical properties of different types of bone substitute materials and their biomechanical performance in implant restoration, and discusses the key factors affecting their biomechanical effects, in order to provide theoretical reference for the selection and application of bone substitute materials in clinical practice.

[Key words] Oral implant restoration; Bone substitute materials; Biomechanics; Implant stability

口腔种植技术 (oral implant technology) 是通过外科手术将人工牙根 (种植体) 植入颌骨, 以支持义齿修复的现代牙科治疗手段, 其核心在于实现种植体与骨组织的稳定结合 (骨整合)。伴随着口腔种植技术的发展与完善, 实践中发现, 种植体周围骨组织的三维空间条件会影响种植体的长期稳定。研究表明^[1], 当种植区牙槽嵴宽度 >5.5 mm, 且种植体植入后唇腭侧骨量厚

度 >1 mm 时, 可以保证种植体的稳定性; 否则, 在临床治疗过程中极有可能发生种植体种植微动增加、边缘骨吸收等情况, 严重时会出现种植体失败的情况。由此可见, 只有达到一定骨量支撑才可以保证种植体的顺利种植和后续的功能恢复以及长期稳定性。为此, 骨替代材料作为用于修复、重建或替代缺损骨组织的一类生物医学材料被广泛应用于骨增量手术。大多研究认为^[2-4], 当

基金项目: 1. 国家自然科学基金项目 (编号: 8236030252、81460103); 2. 新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目面上项目 (编号: 2012211A1029、2016D01C192); 3. 中华口腔医学会西部行口腔医学临床科研基金项目 (编号: CSA-W2015-05)

第一作者: 娜菲莎·吾甫尔 (1999.6-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要从事口腔种植和口腔牙列缺损疾病方面研究

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, 硕士生导师, 主要从事口腔种植医学相关研究

种植体周围骨缺损间隙 $<2\text{ mm}$ ，无须植骨；当骨缺损间隙 $>2\text{ mm}$ 无法完全愈合且获得良好骨结合，则需植入骨替代材料或合并应用屏障膜。目前，骨替代材料成为临床解决种植修复区骨组织缺损的主要选择。为保障种植体在复杂口腔生物力学环境中的长期稳定性并获得理想修复效果，骨替代材料不仅要具有良好的生物相容性和骨诱导性等优点^[5]，更要具备优秀的生物力学性能。本文对口腔种植修复中骨替代材料的生物力学方面的研究进展作一综述，分析不同骨替代材料的力学性能特点及在种植修复中的生物力学表现，并探讨影响其生物力学效果的因素，以期对口腔种植临床实践中骨替代材料的选择和使用提供一定的参考依据。

1 口腔种植修复中常用的骨替代材料分类及特点

目前，临床常用的骨替代材料包括自体骨、同种异体骨、异种骨、人工合成骨代替材料，不同材料各有优缺点，需根据患者个体情况选择。

1.1 自体骨 自体骨因具备皮质骨的机械阻力和支撑作用以及髓质骨的成骨功能，其力学性能与受区天然骨相似，能很好地适应种植体周围的生物力学环境，具有最佳的生物相容性和骨诱导性、骨传导性及成骨性，故被认作是骨移植的金标准^[6]。自体骨来源于患者自身的髂骨、颅骨等部位，因此取材存在增加患者创伤、供区可能出现感染、神经损伤、血肿等并发症以及取材量有限等缺点^[7-8]，限制了其广泛应用。

1.2 同种异体骨 同种异体骨是取自他人的骨组织，经去除免疫原性物质、保留骨诱导和骨传导功能等处理后的骨替代材料。在制备过程中经最大限度去除免疫原性成分，因此骨组织细胞成分大多死亡而丧失直接成骨能力，但在处理过程中保留了具有成骨诱导作用的BMP等生物活性因子促进间充质干细胞向成骨细胞分化，同时保留了天然的骨孔隙结构可为新生骨组织提供三维生长支架^[9]。但不同的供体及处理方式会改变其力学性能。如冻干同种异体骨，抗压强度会小于新鲜骨，在高负载区域使用时需谨慎评估其生物力学适应性。虽然经过处理，但同种异体骨可能存在的传染性疾病及免疫排斥反应的风险也使得此材料的应用存在一定争议^[10]。

1.3 异种骨 异种骨多采用动物骨源（牛骨等）经过特殊脱蛋白处理后用于临床，有来源广、易获

得的优点，异种骨的微观结构可以为骨细胞的附着及生长提供一定的基础^[11]；但是异种骨也存在不能彻底去除免疫原性以及与人体的天然骨的力学匹配度较差等问题^[12]，因而较多应用于牙周外科小范围骨缺损的修复，选用时应全面考虑其在复杂口腔受力环境下的长期稳定性。

1.4 人工合成骨替代材料

1.4.1 磷酸钙类材料 磷酸钙类材料（如羟基磷灰石、磷酸三钙等）是目前应用较多的人工合成骨替代材料，具有良好的生物相容性和骨传导性。羟基磷灰石的弹性模量相对较高，接近人体的皮质骨^[13]，在承受垂直方向的咬合力时能较好地维持种植体周围骨组织的稳定性；磷酸三钙则具有较好的降解性，其在降解过程中能逐渐被新生骨组织替代，力学性能会随时间发生变化^[14]，在早期需要考虑其对种植体初始稳定性的影响。

1.4.2 生物活性玻璃 生物活性玻璃可以诱导周围的组织生成骨组织，具有较为特殊的力学性能，有一定的脆性，但可以通过调节成分以及调整制备工艺，在一定程度上提高其强度和韧性^[15]，使之适应口腔种植修复中不同部位及不同受力情况的需求。该材料能够在与种植体结合面起到增强骨整合的作用，促进骨细胞的附着和生长，改善整个种植体的生物力学环境，从而提高种植成功率^[16]。

1.4.3 聚合物类材料 聚合物类骨替代材料（如聚乳酸等）的优势在于具有良好的生物降解性能以及可调的弹性和塑形性^[17]，其弹性模量可以通过聚合物的组成及结构进行调节，在需要缓冲应力的一些种植修复场景中适配性更佳，例如在前牙区进行种植修复时能够起到分散侧向咬合力的作用。但由于这类材料的力学强度较低，在高负载区域应用受到一定的限制，降解产物为酸性则不利于组织的修复^[18]，还需要进一步优化改进。

2 骨替代材料在口腔种植修复中的生物力学作用机制

2.1 对种植体稳定性的影响 种植体的稳定性可以分两种：一种是种植体初期稳定性，另一种是长期稳定性。骨替代材料在初期如果能够具有合适的孔隙率和颗粒度，使骨替代材料填满种植窝和种植体之间的空隙，对种植体进行良好的机械锁合，则可提高种植体的初期稳定性^[19]，比如颗粒状磷酸三钙在填入后，能使种植体在牙槽骨内更好地固定，减少其微动。而从整个种植修复的生

化反应过程来看,骨替代材料由于骨传导和骨诱导作用促进新骨形成并与种植体形成牢固的骨结合,又随着骨替代材料自身的降解,与种植体自身负载的力量相匹配,从而实现种植体的长期稳定性^[20]。

2.2 应力分布与传导 在口腔的咀嚼运动及其他功能活动过程中,种植体及种植体周围的组织会承受复杂的应力。因此,骨替代材料的弹性模量、硬度等力学性能会直接影响力学的传导与分布^[21]。如果骨替代材料的弹性模量与种植体周围天然骨组织的弹性模量相差太大,则不利于应力在种植体周围的分布及传导,造成应力集中,进而引发种植体周围骨吸收等一系列不良后果,影响种植体的长期稳定性。例如,羟基磷灰石材料应用于种植体颈部周围时,因具有合适的弹性模量可以合理分散垂直向咬合力,使种植体周围的牙槽骨应力处于相对正常状态而免受过高应力的冲击^[22]。

2.3 与周围骨组织的力学适配性 骨替代材料必须与周围的骨组织在生物力学性能上相适应,也就是要能在不同的愈合期分别符合不同的力学条件。在骨愈合初期,要有足够的机械强度提供支撑力,以保证种植体及周围的骨组织愈合修复^[23];在骨愈合后期,材料的降解或重塑要与新骨形成的速度相匹配,以维持整体的力学平衡^[20]。因此像生物活性玻璃这类材料接触骨组织之后,不仅会因自身化学反应而出现局部溶解和再沉积现象,还会因不断诱导骨组织生成,在机械性能上与周围逐渐长出的新骨相匹配^[24],以保证整个修复的过程中种植体一直处于良好的力学环境下。

3 影响骨替代材料生物力学性能的因素

3.1 材料自身的物理化学性质

3.1.1 化学成分 不同的化学成分决定着骨替代材料基本的力学性能,磷酸钙类材料中钙磷比的不同使得其结晶度、硬度等均有差别。高钙磷比的羟基磷灰石硬度更高,在承受较大咬合力部位的种植修复中更具有优势^[25];生物活性玻璃中硅、钙等元素的比例影响其反应活性及形成的凝胶层特性^[24],从理论上来说也会改变其在种植体-骨界面上力学传递的结果。

3.1.2 孔隙结构 孔隙率、孔隙大小及连通性等孔隙结构特征会很大程度上影响骨替代材料的生物力

学性能。王大平等^[26]研究表明,合适的孔隙率不仅影响材料的弹性模量和抗压强度等力学参数,更有利于营养物质和细胞的进入,促进骨组织的生长。高孔隙率的材料弹性模量会相对较小,更有利于种植体周围应力的缓冲,但可能在承受较大压力时容易变形;低孔隙率材料弹性模量较大、硬度较高,不易变形,但不利于骨组织长入,所以不同的受力条件下可以根据不同孔隙率以及相应力学性质对骨替代材料进行选择。

3.1.3 微观形貌 表面粗糙和有无微纳结构等微观表面形貌会影响材料的细胞黏附、增殖等行为,进而间接影响材料的生物力学性能^[27]。例如表面粗糙的骨替代材料可以为细胞提供更多附着位点^[28],利于骨组织在其表面生长,在长时间内能够更好地促进其与周围骨组织的整合,提高整体力学强度;具有纳米结构的材料可能通过影响细胞的信号传导等机制,促进骨细胞更好地发挥功能^[29],优化种植修复区域的力学环境。

3.2 临床应用相关因素

3.2.1 植入部位 基于口腔解剖结构特点,牙槽嵴及其周围组织具有不同的组织承力能力、功能及生物力学需求,因此口腔内不同的植入部位,其受力情况差异很大^[30],例如:磨牙区承受的咬合力远远大于前牙区。因而,在临床应用骨替代材料时需要考虑其在不同部位的生物力学适应性。同时,董海东等^[31]研究表明,对于磨牙区,需要力学性能更好、强度更高的骨替代材料,如块状的自体骨或者高强度的磷酸钙陶瓷材料;而前牙区则主要承受侧向力,且咬合力也相对较小,这时则需要更多地考虑材料的弹性和应力缓冲能力,应选用聚合物类材料或具备一定韧性的生物活性玻璃等作为骨替代材料。

3.2.2 植入方式与技术 骨替代材料的植入方式,如块状植入还是颗粒状填充,以及植入时的操作技术等均会影响材料的生物力学效果。块状植入时材料的定位和固定对种植体的初期稳定性至关重要^[32],如果固定不牢,在术后早期就容易出现微动,影响后续的骨结合;而颗粒状材料填充时需保证填塞得均匀且充分,才能充分发挥材料对于种植体的支撑以及应力分散的作用。如果颗粒过于松散或者操作不当则容易造成局部应力集中,反而不利于种植修复的长期稳定^[33]。

3.2.3 种植体类型与设计 不同类型和设计的种植体,其表面处理、螺纹形态等都会改变种植

体与骨替代材料以及周围骨组织之间的力学相互作用^[34]。例如表面经过粗糙化处理的种植体能够增强与骨替代材料的机械嵌合,更好地传递应力^[35];具有特殊螺纹设计的种植体在植入骨替代材料填充的种植窝时,可以通过螺纹的挤压作用进一步提高初期稳定性^[36],并且使应力在种植体周围更合理地分布,所以骨替代材料的选择和应用要结合具体种植体的特点来综合考虑。

4 骨替代材料生物力学性能的检测方法

4.1 体外实验方法

4.1.1 力学测试 将万能材料试验机用于测试骨替代材料的抗压强度、弹性模量、剪切强度等基本力学性能^[37, 38]。先将制备好的骨替代材料样本制成标准试件,然后以一定的加载速率测量其抗压强度。此实验中所施加的压力不仅类似于咬合力,同时还可以模拟口腔内的环境温度和湿度等条件,进行更贴合实际的力学性能测定,为分析其在种植修复中的应用提供基础数据^[39-42]。

4.1.2 有限元分析 有限元分析是一种常用的计算机模拟方法,通过建立包含种植体、骨替代材料、周围骨组织等的三维模型,赋予各部分相应的力学参数,模拟咀嚼等不同工况下的应力分布情况^[43]。它可以直观地显示应力集中区域、应力传递路径等,对比不同骨替代材料或不同应用场景下的力学差异^[44-47],帮助研究人员优化材料选择和种植修复方案设计,同时可以在不进行大量实际动物或临床试验的情况下,对多种假设情况进行快速分析。

4.2 体内实验方法

4.2.1 动物实验 在动物模型上进行种植修复并使用骨替代材料,通过在不同的时间节点处死动物,获取相应的材料后通过影像学方法(如Micro-CT等)来观察骨替代材料周围骨组织的生长情况及种植体的稳定性;或者进行组织学切片观察,了解材料与骨组织的力学界面以及整合情况^[48-50]。常见的动物模型是犬、兔等,不同动物的骨骼结构和生理特点均与人有一定的相似性,但也存在差异,因此实验动物的选择和结果的解读均应根据具体情况而定,将其外推到临床应用时要综合考虑多方面因素。

4.2.2 临床试验 在临床试验中,通过对应用骨替代材料进行口腔种植修复的患者进行长期随访观察,除了使用X光或CBCT等影像学手段查看种

植体周围骨组织的变化,还需进行专科查体判断修复效果,如有无松动、疼痛等情况发生^[51-53]。临床试验能够最真实地反映骨替代材料在实际临床应用中的生物力学表现,但存在实施难度大、周期长、影响因素多等问题,所以需严谨的试验设计与规范的操作流程,以保证最终得到可靠的结果。

5 目前骨替代材料生物力学研究存在的问题与挑战

5.1 个性化需求难以满足 不同患者的口腔解剖结构、骨质条件、咬合力情况等存在很大差异,目前的骨替代材料很难做到完全个性化的生物力学适配。虽然有一些通用的筛选原则,但要精准地根据每个患者的具体情况选择最适宜的具有理想生物力学性能的骨代材料还面临诸多困难,需要进一步发展精准医疗相关技术,如基于患者个体数据的材料定制等,来解决这一问题。

5.2 多因素复杂作用机制研究不足 在口腔种植修复过程中,骨替代材料的生物力学性能受材料自身、临床应用等多方面因素的共同影响,并且上述各种因素间是相互影响的,形成复杂的机制。目前关于骨替代材料的多因素耦合作用下的生物力学变化规律还不够深入,例如在不同植入部位、不同种植体类型同时结合特定骨替代材料时,很难准确地预测和分析其长期的生物力学效果,因此限制了临床应用中更优化方案的制定。

5.3 长期生物力学性能评估的局限性 动物实验和临床试验对骨替代材料长期生物力学性能的评价均有一定的局限性,因动物寿命较短,同时不同种属之间也存在一定的生理差异,动物实验无法模拟人类几十年的口腔使用情况;临床试验虽最为接近真实情况,但由于在长年随访时会出现患者的依从性差、失访等现象,因此会对部分结果的完整性造成影响;并且现有检测手段对于长期、微小的生物力学变化监测的灵敏度还有待提高,导致难以精确、客观地反映出骨替代材料的长期生物力学表现。

6 总结

口腔种植修复的骨替代材料的生物力学性能影响着种植修复的成功率及远期效果。目前临床上常用的各类骨替代材料——自体骨、同种异体骨、异种骨以及人工合成骨替代材料等各有其生物力学特性、优势和不足之处。骨替代材料在种

植修复中的生物力学作用机理,主要围绕种植体稳定性获取、应力分散传递,以及与周围骨组织的力学适配等方面展开。骨替代材料的生物力学性能会受多种因素影响,在现有的各种检测方式下,虽然可以实现一定程度的体外与体内试验,但是还有很多不足之处。未来,随着材料学、生物力学和临床医学等多学科的不断发展与进步,有望通过研发新型的、具有更优生物力学性能的骨替代材料,并在研究多因素复杂作用机制的基础上,不断完善骨替代材料的长期生物力学性能评价体系,实现根据患者个体情况精准选择和应用骨替代材料,进一步提高口腔种植修复的质量和长期成功率,为广大口腔种植患者带来更好的治疗效果。

[参考文献]

- [1] Grunder U, Gracis S, Capelli M. Influence of the 3-D bone-to-implant relationship on esthetics[J]. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 2005, 25(2): 113-119.
- [2] Acocella A, Bertolai R, Sacco R. Modified insertion technique for immediate implant placement into fresh extraction socket in the first maxillary molar sites: a 3-year prospective study[J]. *Implant Dent*, 2010, 19(3): 220-208.
- [3] Pereira FP, Hochuli-Vieira E, Maté Sánchez de Val JE, et al. Bone Ceramic® at Implants Installed Immediately into Extraction Sockets in the Molar Region: An Experimental Study in Dogs[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2016, 18(2): 360-368.
- [4] Prosper L, Gherlone EF, Redaelli S, et al. Four-year follow-up of larger-diameter implants placed in fresh extraction sockets using a resorbable membrane or a resorbable alloplastic material[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2003, 18(6): 856-864.
- [5] Haugen HJ, Lyngstadaas SP, Rossi F, et al. Bone grafts: which is the ideal biomaterial?[J]. *J Clin Periodontol*, 2019, 46 Suppl 21: 92-102.
- [6] Prein J, Manson P, Futran ND, et al. Advanced Craniomaxillofacial Surgery: Tumor, Corrective Bone Surgery and Trauma[M]. New York: Thieme, 2020.
- [7] Gorgis R, Qazo L, Bruun NH, et al. Lateral Alveolar Ridge Augmentation with an Autogenous Bone Block Graft Alone with or without Barrier Membrane Coverage: a Systematic Review and Meta-Analysis[J]. *J Oral Maxillofac Res*, 2021, 12(3): e1.
- [8] Donkiewicz P, Benz K, Kloss-Brandstätter A, et al. Survival Rates of Dental Implants in Autogenous and Allogeneic Bone Blocks: A Systematic Review[J]. *Medicina (Kaunas)*, 2021, 57(12): 1388.
- [9] 刘昌奎, 谭新颖, 罗金超, 等. 同种异体骨支架复合自体骨髓间充质干细胞修复下颌骨节段缺损动物模型的建立[J]. *口腔医学研究*, 2015, 31(1): 27-30.
- [10] 李雅巍, 孙晓梅, 滕利, 等. 牙齿种植骨量不足的相关研究进展[J]. *组织工程与重建外科杂志*, 2015, 11(1): 50-54.
- [11] 陈学英. 异种骨移植材料的制备与实验研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2008.
- [12] 张承旻, 廖文波. 异种骨去抗原处理的研究进展[J]. *遵义医学院学报*, 2013, 36(2): 170-173.
- [13] 傅立. 使用临界尺寸骨缺损模型对两种骨修复材料修复效果的评价[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [14] 贾倩倩, 赵雪妮, 袁海泉, 等. 钙磷生物陶瓷支架的常温自强式3D打印技术与工艺研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2025, 43(1): 126-135.
- [15] 王建军. 颌骨骨修复材料生物活性玻璃的制备及矿化性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古医科大学, 2022.
- [16] 范子露, 罗翔伟, 谢永林. 牙槽骨缺损修复的组织工程新进展[J]. *西部医学*, 2025, 37(3): 463-468.
- [17] 吴子炜, 罗诒财, 韦银格, 等. 聚乳酸-羟基乙酸共聚物在口腔医学领域的应用[J]. *中国组织工程研究*, 2025, 29(34): 7393-7404.
- [18] 沈其孝. 聚乳酸及其复合材料在骨组织工程中的应用[J]. *生物骨科材料与临床研究*, 2011, 8(2): 33-35.
- [19] 商红国, 李宁毅, 贾暮云. 组织工程骨修复颌骨缺损的实验研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2005(2): 200-203.
- [20] Urban IA, Monje A, Lozada JL, et al. Long-term Evaluation of Peri-implant Bone Level after Reconstruction of Severely Atrophic Edentulous Maxilla via Vertical and Horizontal Guided Bone Regeneration in Combination with Sinus Augmentation: A Case Series with 1 to 15 Years of Loading[J]. *Clin Implant Dent Relat Res*, 2017, 19(1): 46-55.
- [21] 安尼卡尔·安尼瓦尔, 艾孜买提江·赛依提, 阿迪力·麦木提敏, 等. 唇侧植骨不同种植修复体的三维有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2020, 35(4): 436-442.
- [22] 庞恋苏, 李萌崛, 曹剑飞, 等. 碳纳米管增强的羟基磷灰石/聚醚醚酮牙种植体材料的理化性质研究[J]. *塑料科技*, 2023, 51(5): 42-46.
- [23] 闫明, 高飞, 朱珊珊, 等. 矿化胶原材料及其在口腔临床中应用研究进展[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2019, 12(4): 245-248.
- [24] 孟永春. 胶原与生物活性玻璃作用机理及其复合骨修复材料的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

- [25]洪咏龙,刘宝林,卢军.羟基磷灰石牙槽嵴加高与骨融合式种植体同期植入的有限元分析[J].华西口腔医学杂志,1996(4):266-268,344.
- [26]王大平,熊建义,朱伟民,等.纳米羟基磷灰石人工骨在骨缺损修复中的临床应用研究[J].中国临床解剖学杂志,2014,32(2):206-209.
- [27]魏冀荣,章莹,林永亮.异种松质骨修复兔桡骨节段性骨缺损[J].中国组织工程研究,2012,16(29):5379-5383.
- [28]胡石琼.材料表面特性对内皮细胞附着和增殖性能的影响研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [29]赵灿灿.微纳米结构羟基磷灰石对骨髓间充质干细胞成骨分化的调控研究[D].上海:中国科学院大学(中国科学院上海硅酸盐研究所),2018.
- [30]邱淑婷,弗朗斯,张晓,等.口腔内窥镜在口腔解剖标志识别中的应用[J].北京大学学报(医学版),2023,55(1):120-123.
- [31]董海东,汤春波,周储伟,等.6颗种植体支持的上颌无牙颌固定义齿应力分布研究[J].实用口腔医学杂志,2016,32(5):659-663.
- [32]何修全,李玉山,水宇豪,等.条形自体块状骨联合GBR在水平骨增量中的应用研究[J].口腔医学,2023,43(5):451-455.
- [33]赵宁波.透明质酸复合骨替代材料促进成骨效果及机制研究[D].西安:中国人民解放军空军军医大学,2016.
- [34]Tada S, Stegaroiu R, Kitamura E, et al. Influence of implant design and bone quality on stress/strain distribution in bone around implants: a 3-dimensional finite element analysis[J]. Int J Oral Maxillofac Implants, 2003, 18(3):357-368.
- [35]Velasco-Ortega E, Ortiz-García I, Jiménez-Guerra A, et al. Comparison between Sandblasted Acid-Etched and Oxidized Titanium Dental Implants: In Vivo Study[J]. Int J Mol Sci, 2019, 20(13):3267.
- [36]Lekholm U. Immediate/early loading of oral implants in compromised patients[J]. Periodontol 2000, 2003, 33:194-203.
- [37]刘晓鹏.振动辅助骨材料微细铣削力学性能研究[D].天津:河北工业大学,2022.
- [38]蔡均.骨修复材料高效精密锯冲系统与关键加工技术研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2022.
- [39]韩莹.低频振动辅助骨钻削机理及损伤控制方法研究[D].济南:山东大学,2023.
- [40]孙佳月.镁合金表面羟基磷灰石涂层的制备及长期耐腐蚀性能研究[D].天津:天津大学,2019.
- [41]杨立华.去抗原牛骨骨修复材料的制备及性能研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [42]李延报.可生物降解磷酸钙及复合材料的制备及性能研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [43]安尼卡尔·安尼瓦尔.唇侧植骨种植修复体在不同咬合关系中的三维有限元研究[D].乌鲁木齐:新疆医科大学,2020.
- [44]文抑西,石冰,杨壮群.牙槽突和硬腭全裂隙植骨修复对腭裂上颌骨模型生物力学影响[J].华西口腔医学杂志,2006(2):117-120.
- [45]蒋延波.上颌窦三维有限元模型的建立及上颌窦底提升术植骨材料的应力分析[D].南宁:广西医科大学,2020.
- [46]杨云贺.骨质条件及种植体尺寸对不同骨结合率短种植体应力分布影响的有限元分析[D].大连:大连医科大学,2023.
- [47]袁佳,吴新中,李春生,等.植骨对种植体骨界面应力影响的有限元分析[J].中华全科医学,2010,8(4):417-419.
- [48]常晓峰,杜良智,刘少丽,等.上颌窦底提升及人工骨粉植入的动物实验研究[J].实用口腔医学杂志,2010,26(4):441-444.
- [49]丁鸿才,汪阿冬,毛天球,等.冷冻异体骨移植的实验研究[J].华西口腔医学杂志,1988(1):18-20,78.
- [50]余科,刘文佳,陈河林,等.自体骨环植骨并同期种植的动物实验研究[J].口腔医学研究,2016,32(4):347-351.
- [51]杨雯琦,楚德国,刘苗.上颌窦底提升术后植骨材料三维体积变化研究[J].医学综述,2017,23(16):3261-3264.
- [52]赵慧,肖娟,张琪,等.在口腔种植上颌窦提升中植骨材料与影像学 and 器械应用的研究进展[J].中国组织工程研究与临床康复,2011,15(29):5479-5482.
- [53]王金.单纯脱蛋白牛骨材料用于开窗法上颌窦底提升延期种植前瞻性临床研究-三年以上随访[D].西安:中国人民解放军空军军医大学,2020.

收稿日期: 2025-7-22 编辑: 扶田