

三维打印口腔修复种植体的研究进展

滑昊阳

浙江中医药大学

DOI:10.12238/bmtr.v7i1.11855

[摘要] 三维打印技术正在重塑口腔修复种植体的制造范式,传统减材工艺受几何约束难以实现复杂多孔结构,而三维打印基于逐层堆积原理,选择性激光熔化技术制备钛合金种植体,其梯度孔隙结构显著提升骨整合效率。而立体光刻与数字光处理技术凭借微米级成型精度,精准调控氧化锆全瓷修复体表面纳米级粗糙度。此外,材料体系突破显著,三维打印实现梯度设计钛合金弹性模量、控制可降解镁合金降解速率及强化纳米复合陶瓷界面。与此同时,智能闭环系统优化成形缺陷率,植入精度误差显著降低,验证了三维打印种植体的临床可靠性。

[关键词] 三维打印; 口腔修复种植体; 多材料复合打印; 形貌设计

中图分类号: R322.4+1 **文献标识码:** A

Research Progress of Three-Dimensional Printed Oral Prosthetic Implants

Haoyang Hua

Zhejiang Chinese Medical University

[Abstract] Three-dimensional printing technology is reshaping the manufacturing paradigm of dental implants and prostheses. Traditional subtractive manufacturing processes are constrained by geometric limitations and struggle to achieve complex porous structures. In contrast, three-dimensional printing, based on the principle of layer-by-layer accumulation, utilizes selective laser melting technology to fabricate titanium alloy implants. The gradient porous structures significantly enhance osseointegration efficiency. Additionally, stereolithography and digital light processing technologies, with their micron-level precision, enable precise control of the nanoscale surface roughness of zirconia all-ceramic restorations. Furthermore, breakthroughs in material systems have been remarkable. Three-dimensional printing allows for the gradient design of titanium alloy elastic modulus, controlled degradation rates of biodegradable magnesium alloys, and reinforced interfaces of nanocomposite ceramics. Meanwhile, intelligent closed-loop systems optimize the defect rate during forming, significantly reducing implantation precision errors and validating the clinical reliability of three-dimensional printed implants.

[Key words] Three-Dimensional Printing; Oral Prosthetic Implants; Multi-Material Composite Printing; Morphology Design

引言

口腔修复种植体是牙列缺损和缺失的重要治疗手段,其发展始终与材料科学和制造技术的进步紧密相连。传统制造工艺在满足个性化需求和复杂结构成形方面存在显著局限性,难以精准复制解剖形态和功能化设计。三维打印技术的出现为这一领域带来了革命性突破,凭借逐层堆积的增材制造原理,能够精确控制种植体的各个方面,为多材料复合结构和功能梯度设计提供了全新可能。

1 三维打印技术体系分析

1.1 主流三维打印技术分类

三维打印技术在口腔修复种植体制造中主要分为金属打印和非金属打印两大类。金属打印以选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)为主,其中SLM凭借其高能量密度(200-400W)和精细铺粉系统(层厚20-50 μm),在钛合金(Ti-6Al-4V)种植体制造中占据主导地位。SLM成形的种植体表面粗糙度($S_a=15-25 \mu\text{m}$)经过喷砂和酸蚀可优化至 $S_a=1.5-2.5 \mu\text{m}$,促进骨整合(6周骨接触率提升40%)^[1]。非金属打印则以立体光刻(SLA)和数字光处理(DLP)为主,其成型精度可达 $\pm 25 \mu\text{m}$,最小特征尺寸可控制在50 μm 以下,适用于氧化锆全瓷修复体和手术导板的制造。此外,熔融沉积成型(FDM)和PolyJet技术在高分子材料(如PEEK)打印

中也有一定应用,但其精度和力学性能相对较低,主要用于临时修复体和辅助器械。

1.2 三维打印技术的核心优势

三维打印技术的核心优势在于其高精度、高自由度和高效率。高精度($\pm 25\ \mu\text{m}$)会满足口腔修复体对边缘适合性(marginal fit $<50\ \mu\text{m}$)和表面粗糙度($R_a=0.5\text{--}2\ \mu\text{m}$)的要求。高自由度可以形成复杂几何结构(如仿生多孔结构、梯度孔隙设计),多孔钛合金种植体(孔隙率50%–70%)通过SLM技术梯度设计弹性模量(3–30GPa),有效降低应力遮挡效应。此外,高效率体现在快速成形能力上,如超高速激光熔覆(EHLA)技术将打印效率提升至 $500\text{cm}^3/\text{h}$,较传统SLM提升3倍,同时借助实时闭环控制系统(采样率10kHz)将成形缺陷率从5.8%降至1.2%。

2 三维打印口腔修复种植体临床应用进展

2.1 三维打印金属种植体

2.1.1 金属打印技术及材料

三维打印金属种植体主要采用选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM)技术,其中SLM凭借其高能量密度(200–400W)和精细铺粉系统(层厚 $20\text{--}50\ \mu\text{m}$),在钛合金(Ti-6Al-4V)种植体制造中占据主导地位。SLM技术用高能激光束(波长 1064nm)逐层熔化金属粉末,让复杂几何结构高精度成形(尺寸精度 $\pm 0.05\text{mm}$)^[2]。SLM成形的Ti-6Al-4V种植体其抗拉强度 $>900\text{MPa}$,屈服强度 $>800\text{MPa}$,断裂韧性 $>60\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,完全满足口腔种植体的力学要求。此外,SLM成形的种植体表面粗糙度($S_a=15\text{--}25\ \mu\text{m}$)经过喷砂和酸蚀处理后,可进一步优化至 $S_a=1.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$,促进骨整合(6周骨接触率提升40%)。

近年来,钽(Ta)和镁(Mg)合金因其独特的生物相容性和可降解性受到广泛关注,Mg-Zn-Ca合金种植体通过微弧氧化或氟化处理这一表面涂层技术将降解速率控制在 $0.2\text{--}0.5\text{mm}/\text{年}$,同时释放的镁离子(Mg^{2+})促进成骨细胞增殖。此外,多孔钛合金(孔隙率50%–70%)通过SLM技术实现弹性模量(3–30GPa)的梯度设计,有效降低应力遮挡效应。多孔结构的孔径($100\text{--}500\ \mu\text{m}$)和连通性(连通率 $>90\%$)经过优化设计,能够促进血管化和骨长入(血管化实验显示新生血管密度提升60%)。在临床应用中,采用SLM技术制备的个性化钛合金种植体,其植入精度误差 $<0.3\text{mm}$,术后3个月ISQ值稳定在75以上(传统种植体ISQ值 >65),验证了其临床可靠性。

2.1.2 种植体形貌设计

三维打印技术为金属种植体的形貌设计提供了前所未有的自由度,通过精确控制几何结构和表面特征,显著提升了种植体的生物力学性能和骨整合效果^[3]。仿生多孔结构设计(孔径 $100\text{--}500\ \mu\text{m}$)是当前研究的重点,这种结构能够模拟天然骨组织的微观形貌,调节孔隙率(50%–70%)和孔隙连通性(连通率 $>90\%$)优化机械性能与生物活性的平衡。具有梯度孔隙结构的钛合金种植体在植入6周后,骨接触率较传统种植体提高40%。此外,功能性表面设计如微沟槽(宽度 $50\text{--}100\ \mu\text{m}$,深度 $20\text{--}50\ \mu\text{m}$)和纳米级粗糙表面($R_a=0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$)进一步增强了成骨细胞的粘附与增

殖。研究表明,微沟槽结构能够引导细胞定向生长,促进骨基质沉积,而纳米级粗糙表面通过增加比表面积和表面能,显著改善细胞的早期附着和分化。采用SLM技术制备的个性化钛合金种植体,其植入精度误差 $<0.3\text{mm}$,远优于传统种植体(误差 $0.5\text{--}0.7\text{mm}$),术后3个月ISQ值稳定在75以上(传统种植体ISQ值 >65),这得益于三维打印技术能够精确复制术前设计的根形仿生设计、螺纹优化(螺距 $0.6\text{--}0.8\text{mm}$,螺纹深度 $0.3\text{--}0.5\text{mm}$)以及颈部微结构等种植体形态,从而实现了更好的初期稳定性和长期骨整合效果。此外,多材料复合打印技术的应用(如钛-羟基磷灰石梯度界面)进一步提升了种植体的生物活性,使其在复杂骨缺损修复中表现出显著优势。

2.2 三维打印全瓷种植体

2.2.1 全瓷打印技术及材料

全瓷种植体的三维打印主要采用立体光刻(SLA)和数字光处理(DLP)技术,这两种技术基于光聚合原理,通过紫外光源(波长 $385\text{--}405\text{nm}$)逐层固化光敏树脂浆料,其成型精度可达 $\pm 25\ \mu\text{m}$,最小特征尺寸可控制在 $50\ \mu\text{m}$ 以下,能够精确复制复杂的解剖形态。氧化锆(ZrO_2)因其高弯曲强度($900\text{--}1200\text{MPa}$)、断裂韧性($5\text{--}10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)和优异的生物相容性成为全瓷种植体的主流材料^[4]。通过SLM技术成形的氧化锆种植体,其表面粗糙度($R_a=0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$)经过喷砂和酸蚀处理后,可进一步优化至 $R_a=1.5\text{--}2\ \mu\text{m}$,促进软组织附着。此外,羟基磷灰石(HA)涂层通过激光辅助冷喷涂技术(LACS)实现与氧化锆基体的高强度结合(结合强度 $>30\text{MPa}$),涂层厚度控制在 $20\text{--}50\ \mu\text{m}$,既保证了生物活性,又避免了因过厚涂层导致的界面应力集中问题。抗菌功能则借助掺杂银离子(Ag^+)或锌离子(Zn^{2+})实现,抗菌率可达99.6%(金黄色葡萄球菌24h抑制实验),且离子释放速率通过纳米封装技术控制在 $0.1\text{--}0.5\ \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{day}$,确保长期抗菌效果。

然而,全瓷材料的脆性仍是限制其广泛应用的一大问题,通过纳米复合技术(如 $\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ 复合材料),可将断裂韧性提升至 $12\text{--}15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$,同时保持弯曲强度在 1000MPa 以上。此外,梯度材料设计(如 $\text{ZrO}_2\text{--}$ 玻璃复合材料)通过优化界面结合强度($>50\text{MPa}$)和热膨胀系数匹配($\Delta\alpha<1\times 10^{-6}/\text{K}$),进一步提高了全瓷种植体的抗疲劳性能。在临床应用中,采用DLP技术制备的个性化氧化锆种植体,其边缘适合性可控制在 $20\text{--}50\ \mu\text{m}$,显著优于传统烧制工艺的 $50\text{--}100\ \mu\text{m}$,且术后6个月成功率高达98.5%,验证了其临床可靠性。

2.2.2 种植体形貌设计及表面修饰

全瓷种植体的形貌设计通过三维打印技术实现了高度个性化,能够精确匹配患者的解剖结构,从而优化生物力学性能和美学效果。仿生牙根形态设计通过数字化扫描(如CBCT)和逆向工程技术,复制天然牙根的几何特征(如根尖锥度、颈部轮廓和表面纹理),并结合多级孔隙结构(孔径 $50\text{--}300\ \mu\text{m}$,孔隙率40%–60%)显著提升骨整合效果。具有梯度孔隙结构的氧化锆种植体在植入后3个月的骨接触率较传统种植体提高35%,这得益于孔隙梯度设计能够更好地模拟天然骨的力学性能(弹性模量 $15\text{--}30\text{GPa}$),

同时促进血管化和骨长入(血管化实验显示新生血管密度提升50%)。表面修饰技术如微弧氧化(MAO)和等离子喷涂(PS)进一步增强了种植体的生物活性。MAO处理的氧化锆表面形成纳米级多孔结构(孔径50-100nm, 表面粗糙度 $R_a=0.8-1.2\mu\text{m}$), 显著提升成骨细胞活性(ALP活性检测显示提升3倍, 细胞粘附密度提升80%)。

PS技术则通过沉积羟基磷灰石(HA)或生物玻璃涂层(厚度20-50 μm), 优化了种植体的表面化学活性(接触角降低至20°以下), 促进早期骨沉积(4周骨矿化密度提升40%)。此外, 功能性表面修饰如抗菌涂层(如银离子掺杂HA)和抗炎涂层(如载药纳米颗粒)进一步拓展了种植体的临床应用范围。采用DLP技术制备的个性化氧化锆种植体, 其植入精度误差 $<0.2\text{mm}$ (传统技术为0.5-0.7mm), 边缘适合性控制在20-50 μm , 显著降低了微渗漏风险(细菌渗透实验显示渗透率降低60%)。术后6个月成功率高达98.5%, 这是因为三维打印技术能够精确控制种植体的宏观形态(如平台转移设计、颈部微螺纹)和微观结构(如表面纳米纹理), 从而实现了更好的初期稳定性和长期功能效果。

3 三维打印口腔修复种植体前沿发展方向

3.1 材料创新：从单一材料到多功能复合材料

材料创新是三维打印口腔修复种植体发展的核心驱动力之一。目前的研究重点已从单一材料(如钛合金、氧化锆)转向多功能复合材料。例如, 钛-羟基磷灰石(Ti-HA)梯度复合材料通过SLM技术实现界面结合强度 $>30\text{MPa}$, 同时兼具钛合金的力学性能和HA的生物活性, 显著提升了骨整合效果(6周骨接触率提升50%)。此外, 可降解镁合金(如Mg-Zn-Ca)通过表面涂层技术(如微弧氧化)将降解速率控制在0.2-0.5mm/年, 同时释放的镁离子(Mg^{2+})能够促进成骨细胞增殖(细胞实验显示增殖率提升60%)^[5]。在非金属材料方面, 氧化锆-氧化铝($\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)纳米复合材料会优化界面结合强度($>50\text{MPa}$)和热膨胀系数匹配($\Delta\alpha < 1 \times 10^{-6}/\text{K}$), 显著提高全瓷种植体的抗疲劳性能(ISO 6872标准测试循环次数 $>10^7$ 次)。未来, 智能材料(如形状记忆合金、pH响应水凝胶)的应用将进一步拓展种植体的功能边界。

3.2 制造技术升级：从静态成形到动态智能制造

制造技术的升级是三维打印口腔修复种植体发展的另一重要方向。当前的研究重点包括多物理场耦合制造和智能感知系统的深度融合。多物理场耦合制造技术(如电磁场辅助定向结晶)引入外部场(如磁场、电场)调控材料微观结构, 显著提升打印效率和材料性能。例如, 磁场辅助SLM技术可将钛合金种植体的晶粒尺寸从50 μm 细化至10 μm 以下, 从而提升其力学性能(抗拉强度提升20%)。智能感知系统实时监测熔池温度(采样率10kHz)和缺陷预测算法(卷积神经网络准确率92.7%), 将成形缺陷率从5.8%降至1.2%。此外, 4D打印技术的应用(如形状记忆陶瓷)通过

智能材料实现种植体的功能自适应, 在体温刺激下实现形状恢复或力学性能调整。

3.3 功能拓展：从结构修复到生物功能重建

功能拓展是三维打印口腔修复种植体发展的最终目标, 当前的研究重点已从单纯的结构修复转向生物功能重建。例如, 仿生多孔结构设计(孔径100-500 μm , 孔隙率50-70%)通过优化孔隙连通性(连通率 $>90\%$)和力学性能(弹性模量3-30GPa), 显著促进血管化和骨长入(血管化实验显示新生血管密度提升60%)。功能性表面修饰技术(如微弧氧化、等离子喷涂)通过构建纳米级多孔结构(孔径50-100nm)和生物活性涂层(如HA、生物玻璃), 显著提升了种植体的生物活性(ALP活性提升3倍, 细胞粘附密度提升80%)。此外, 抗菌和抗炎功能的引入(如银离子掺杂HA、载药纳米颗粒)进一步拓展了种植体的临床应用范围。未来, 结合组织工程和生物打印技术, 三维打印种植体有望实现细胞载药支架的血管化构建和类器官打印, 从而推动口腔修复从“结构替代”向“功能重建”的跨越。

4 结语

三维打印技术在口腔修复种植体领域的应用, 标志着口腔医学从传统制造向数字化、个性化制造的跨越。通过高精度打印技术、多功能材料创新以及智能化制造系统的深度融合, 三维打印不仅显著提升了种植体的力学性能和生物相容性, 还实现了复杂结构的个性化定制和生物功能的精准重建。尽管在平衡精度与效率、多材料界面优化及长期可靠性验证等方面仍存在一些技术壁垒, 但随着材料科学、制造技术和临床医学的协同创新, 三维打印口腔修复种植体正朝着更高效、更智能、更功能化的方向快速发展。未来, 这一技术有望为患者提供更加精准、持久和功能化的修复解决方案, 推动口腔医学进入全新的数字化时代。

[参考文献]

- [1] 晋茹. 3D打印生物陶瓷材料在口腔修复中的应用研究[J]. 广州医科大学学报, 2024, 52(04): 72-76.
- [2] 唐天弘, 朱陈元, 翁维民. 数字化印模技术应用于口腔种植修复的精度分析[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2024, 25(2): 97-102.
- [3] 肖燕萍, 谢胜芬. 口腔修复用金属三维打印件夹杂物和孔隙率问题分析[J]. 口腔材料器械杂志, 2023, 32(04): 261-265.
- [4] 李晓雪, 樊世锋, 侯晓薇. 3D打印生物陶瓷材料在口腔修复领域的研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2023, 33(04): 39-45.
- [5] 丁金聚, 金乐, 刘斌, 等. 口腔修复用三维打印金属材料性能评价研究介绍[J]. 中国食品药品监管, 2022, (02): 43-50.

作者简介:

滑昊阳(1999--), 男, 汉族, 河南洛阳人, 研究生在读, 研究方向: 口腔医学。