

三维打印可摘局部义齿支架设计与工艺优化的研究进展

傅丹 李昊

广西医科大学口腔医学院·附属口腔医院口腔修复科 广西口腔颌面修复与重建研究重点实验室
广西壮族自治区口腔虚拟现实技术工程研究中心 南宁 530021

[摘要] 三维打印技术亦称为3D打印技术，是一种基于计算机辅助设计的先进制造工艺，通过逐层叠加材料构建复杂的三维结构。该技术凭借材料利用率高、生产效率快、可成型复杂几何结构以及支持个性化定制等优势，已广泛应用于可摘局部义齿支架的制造领域。然而，3D打印可摘局部义齿支架的质量与性能受多种因素影响，包括材料特性、工艺参数、结构设计及后处理工艺等。本文综述了当前3D打印技术在可摘局部义齿支架制造中的关键影响因素及其优化策略，以期为临床应用提供理论依据和技术参考。

[关键词] 3D打印；可摘局部义齿支架；工艺参数；设计优化

[中图分类号] R783.2 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026110



本文链接

OSID 码

Research progress on the design and process optimization of 3D-printed removable partial denture frameworks

Fu Dan, Li Hao

Dept. of Prosthodontics, College & Hospital of Stomatology, Guangxi Medical University, Guangxi Key Laboratory of Oral and Maxillofacial Rehabilitation and Reconstruction, Guangxi Stomatological Virtual Reality Engineering Research Center, Nanning 530021, China

Supported by: Guangxi Medical and Health Appropriate Technology Development and Promotion Application Project (S2022118)

Correspondence: Li Hao, Email: sherrylee2011@126.com

[Abstract] 3D printing is an advanced manufacturing process based on computer-aided design, which builds complex 3D structures through the layer-by-layer addition of materials. Owing to its high material utilization, rapid production efficiency, ability to fabricate intricate geometries, and support for personalized customization, this technology has been widely applied in the fabrication of removable partial denture (RPD) frameworks. However, the quality and performance of 3D-printed RPD frameworks are influenced by multiple factors, including material properties, process parameters, structural design, and postprocessing techniques. This review summarizes the key influencing factors and optimization strategies in the application of 3D printing for RPD framework fabrication, aiming to provide theoretical guidance and technical reference for clinical practice.

[Key words] 3D printing; removable partial denture frameworks; process parameters; design optimization

三维打印技术（3D-printing technology），亦称为3D打印技术或增材制造技术，是一种通过逐

层添加材料来制造物理零件的先进制造工艺。该技术基于数字模型，结合多种材料和工艺，实现高效、灵活的生产模式，逐步替代传统制造模式，成为制造领域的重要创新力量^[1]。目前，主流的3D打印技术包括选择性激光熔化（selective laser melting, SLM）技术、熔融沉积成型（fused deposition modeling, FDM）技术、选择性激光烧结

[收稿日期] 2024-12-12；**[修回日期]** 2025-07-16

[基金项目] 广西医疗卫生适宜技术开发与推广应用项目（S2022118）

[第一作者] 傅丹，硕士，Email: FD116870@163.com

[通信作者] 李昊，教授，博士，Email: sherrylee2011@126.com

(selective laser sintering, SLS) 技术, 它们因具备优良的制造精度和高效的制造效率, 已在航空航天工业、个性化医疗以及口腔医学等众多学科中应用^[2]。

在口腔医学领域, 3D打印技术的应用涵盖了口腔颌面外科、口腔修复、口腔种植及口腔正畸等多个子领域^[3]。在口腔修复领域, 3D打印多被用于金属牙冠、内冠、可摘局部义齿支架、卡环等修复体的制作^[4-7]。多项研究^[8-12]表明, 3D打印制作的可摘局部义齿支架表现出良好的精度、表面粗糙度、显微硬度、抗腐蚀性能以及临床适合性, 能够满足临床使用需求。

近年来, 研究者们不断对3D打印可摘局部义齿支架的材料、制作工艺和支架结构设计进行创新研究, 从而提升支架性能。本文旨在综合国内外的研究, 聚焦于3D打印在可摘局部义齿支架制作中的优化策略, 探讨其在提升支架性能的潜力, 以期对相关领域的研究者和临床医生提供有价值的参考。

1 3D打印技术

目前, 常应用于可摘局部义齿支架制作的3D打印技术为SLM、FDM。

1.1 SLM技术

SLM是一种利用高能激光束作为能量源, 依据计算机辅助系统预先构建的三维模型, 通过软件将其切片分层, 逐层熔化金属粉末, 随后冷却、固化, 生成精密制件的技术^[13-15]。

SLM打印具有以下优点: 1) 打印制件具有优良的精度和表面光滑度; 2) 打印制件内部致密性高, 力学性能优越; 3) 适用于几何形状复杂的精密制件制造。

除了以上优点, SLM打印也存在不足, 例如设备昂贵、工艺参数调整复杂, 以及支撑结构的添加等^[16-17]。

1.2 FDM技术

FDM是一种以丝状的热塑性材料作为原料, 通过加工头的加热挤压, 在计算机的控制下逐层堆积, 最终获得成形立体零件的技术^[18]。一方面, 低成本、高速度、工艺简单、可用于制作复杂几何形状是该技术的优势; 另一方面, 其主要缺点是打印制件机械性能弱、表面质量差、热塑性材料数量有限^[19-20]。

2 临床应用的优化

2.1 材料的选择

3D打印可摘局部义齿支架的研究中, 材料选择对支架性能起着至关重要的作用。目前, 常用的支架材料包括钴铬合金、钛合金和纯钛, 它们以优良的强度、刚度和耐腐蚀性广泛应用于临床, 但也存在美学不佳和过敏风险等缺点^[21]。随着材料科学的进步, 聚醚醚酮 (polyetheretherketone, PEEK) 作为一种高性能非金属材料, 近年来逐渐受到关注。

PEEK是一种热塑性半结晶聚合物, 其弹性模量低于钴铬合金, 具有抗过敏性、良好的机械性能、耐高温和耐化学腐蚀等优点。此外, 还可通过添加金属氧化物, 例如纳米二氧化钛, 以实现颜色的调控, 改善其美观性^[22-23]。然而, PEEK卡环固位力相较于钴铬卡环较差^[24]。为了提高PEEK卡环的固位力, 在设计时通常需要增加其宽度和厚度, 并确保足够的倒凹深度^[25]。Wang等^[19]的研究发现: 在PEEK中添加5%质量分数的短碳纤维 (short carbon fiber, CF) 和玻璃纤维 (glass fiber, GF) 可显著提高其拉伸强度和弯曲强度。Chen等^[26]通过比较钴铬合金、Ti-6Al-4V合金和PEEK材料制作的可摘局部义齿支架对口腔组织的影响, 结果发现: PEEK支架在应力分布上更小、更均匀, 能够有效保护牙周膜, 适用于牙周条件不佳的患者。尽管PEEK支架表现有优良的生物学性能, 但目前尚无足够的临床实验应用, 临床上主流仍为金属支架。

2.2 支架设计的优化

可摘局部义齿支架设计通常着眼于其优良的力学性能, 三维有限元分析和拓扑优化是3D打印设计更优、更轻可摘局部义齿支架的一种新型优化方式, 可以在很大程度上改善和提升修复体的力学性能并减轻其重量。

三维有限元分析是一种使计算机技术用于预测在施加一定范围的力时不同材料将如何反应的方法^[27]。在口腔修复学领域, 其主要应用于预测可摘局部义齿支架和卡环的应力分布及固位力, 以优化其结构。Alsheghri等^[28]通过力学分析模型和有限元分析, 研究最佳的SLS圆环形卡环尺寸, 结果显示: 对于磨牙, 卡环尺寸为长度13 mm、截面半径1.2 mm、倒凹0.25 mm时, 既保证了固位

力,又有效避免了塑性形变。马珂楠等^[29]利用有限元分析方法对比评价了不同设计的SLM钴铬、纯钛和钛合金可摘局部义齿的圆环形卡环固位力,并分析了卡环脱位过程中的应力分布,其建议临床最佳的卡环为卡环臂体部宽度/厚度为1.9 mm/1.1 mm,聚合度为0.8,进入倒凹深度为0.5 mm的钛合金圆环形卡环。

拓扑优化是一种结构优化技术,其原理是按照给定的设计域出发,并在满足既定的设计要求(如载荷和边界条件)的情况下,给出最优结构^[30]。姜献峰等^[31]利用拓扑优化,根据卡环受力状况,设计了不等厚的卡环,并用SLM技术打印,结果显示:优化后的卡环用材较优化前减少20%,且患者舒适度有所提高。拓扑优化和有限元分析的应用有利于设计出更优质的修复体。

3 打印工艺的优化

3D打印可摘局部义齿支架的精度、表面粗糙度及机械性能均受到打印工艺参数与热处理工艺的影响。通过合理选择工艺参数和热处理条件,可有效降低支架的缺陷率,从而提高其整体质量。基于此,不少学者对打印工艺的优化开展了深入研究。

3.1 SLM工艺打印参数优化

3.1.1 能量密度(linear energy density, LED)的优化

LED是一种既定的特性,其计算方式为 $LED = [P/(v \cdot d \cdot h)]$ (J/mm^3)^[32],其中 P 、 v 、 h 、 d 分别表示激光功率、扫描速度、扫描间距、铺粉层厚。当这些因素不平衡时,会形成不平衡的温度场,产生较大的温度梯度,造成高热应力,导致制件产生翘曲、孔隙、裂纹等几何缺陷,除了可直接关系到制件的几何精度,还对其硬度、内部孔隙率和表面粗糙度产生重要影响,从而进一步影响制件的力学性能和使用效果等^[33]。研究^[34]表明,随着激光功率的增加,每单位时间内熔化的粉末量也随之增加,导致制件内部的孔隙率降低。这种变化使得零件的抗拉强度和屈服强度提高,同时疲劳性能也有所增强。相反,若扫描速度和扫描间距增大,则可能导致熔池的宽度和深度变化,从而产生更多气孔,这会显著影响制件的表面形态和力学性能^[34]。但激光功率、扫描速度及扫描间距对熔池的影响,并非呈绝对地相关比例^[35]。铺

粉层厚对制件机械性能无明显影响,其主要影响制件的表面粗糙度,以及制件生产效率^[36]。不同层厚的材料在打印过程中可能会产生不同程度的材料收缩,进而导致打印制件的尺寸偏差,影响打印精度。Hwang等^[37]的研究指出,在利用SLM打印纯钛可摘局部义齿支架时,最佳的工艺参数为 $P=180\text{ W}$, $v=1\,200\text{ mm/s}$, $h=60\text{ }\mu\text{m}$, $t=30\text{ }\mu\text{m}$,这样的设置能够实现支架的最佳精度、密度和打印生产率。钴铬合金是目前SLM支架制作的常用金属。Wang等^[35]分析了多种不同梯度的工艺参数下打印的钴铬合金制件的机械性能及成型效率,结果显示:钴铬合金最佳的打印参数为 $P=160\text{ W}$ 、 $v=1\,100\text{ mm/s}$, $h=50\text{ }\mu\text{m}$ 。桑磊等^[38]通过对比多梯度参数的LED对钴铬合金内部孔隙率、表面粗糙度的影响,结果发现:当LED为0.12~0.30 J/mm且扫描间距不超过90 μm 时,熔池的有效搭接率可超过30%,进而获得孔隙率低于1%的高质量钴铬修复体。周金字等^[39]发现:当 $P=160\text{ W}$ 、 $v=1\,200\text{ mm/s}$ 、 $h=0.08\text{ mm}$ 时,钴铬合金试样抗拉强度最佳,其为优化成型效率提出了一种基于自适应细分-重要抽样的可靠性优化分析方法,并得出优化后的参数为: $P=165.6\text{ W}$, $v=1\,733.2\text{ mm/s}$, $h=0.08\text{ mm}$ 。

SLM打印钴铬合金的最佳参数有助于指导高性能支架的打印,然而,至今鲜有学者专门探讨SLM打印钴铬合金可摘局部义齿支架的最佳参数,以及不同参数对支架机械性能的具体影响。

3.1.2 支撑参数的优化

SLM打印支撑参数包括打印方向、构建平台位置及支撑结构的数量、大小和位置等^[40]。构建角度指的是打印方向与构建平台之间的角度,是SLM支架表面粗糙度、精度的重要影响参数之一。一方面,不同的构建角度会导致层间不同的阶梯效应,造成层间连接的不平整,从而影响表面质量;另一方面,构建角度影响制件内部的热应力分布,较大角度下可能会使热应力更易集中,导致收缩不均匀,造成制件变形^[41]。此外,由于SLM打印逐层堆积的特性,每一层的构建通常由先前沉积、聚合层的支撑以抵抗重力,当构建角度过大时,新沉积层的某些区域无法与构建平台接触,形成悬垂区域^[41]。这些区域容易在热处理过程中由于重力的作用出现下垂、变形、翘曲,此时需要额外的支撑结构来稳定制件的几何形态。SLM工艺只能构建最大倾斜角为45°的无支撑悬垂结构^[42]。构建角度可在打印前设置,不同的角度

会导致不同的悬垂区域,将影响所需支撑结构的数量和面积,进而影响制件质量^[41]。

支撑结构是指在打印过程中为悬垂结构或关键特征(薄壁特征)提供支撑的物理结构,通常在打印前设计,其主要作用是均匀热应力分布,减少热应力集中,并可降低制件内部的残余应力、层间阶梯效应,从而改善表面质量,稳定制件几何形态,提高精度^[1,43-44]。支撑结构的添加和设计(包括支撑形态、密度、厚度以及分布等)已被证明能有效优化SLM制件的表面质量、精度、疲劳性能^[1,43-46]。但支撑结构会增加打印时间以及后处理操作的复杂性。为此,可通过最小化与支撑结构接触面积、减少支撑数量以及最大化制件几何稳定性来确定最佳构建角度的方法,从而最大限度地减少制造时间并提高制件表面光滑度^[47-48]。

周嘉陵等^[45]比较了不同构建角度和不同支撑密度下的SLM卡环,结果表明,当构建角度为0°,支撑密度为0.9 mm时,卡环有最佳的精度和正确性。Kobayashi等^[49]发现:当成型角度为-45°时,SLM打印的可摘局部义齿支架表面粗糙度最小。Kim等^[50]通过比较4种不同构建角度制作的全口义齿基托适合性,研究发现:构建角度为0°、30°时,可改善软腭封闭区的适合性,而60°或90°角度一定程度上能够提升材料利用率,但在软腭封闭区适应偏差较大。谢文强等^[51]使用SLM打印了0°、45°、90°共3种不同构建方向的圆环形卡环,并比较卡环的内表面粗糙度、与基牙密合度、内部孔隙度,结果显示:SLM 90°组的卡环具有更好的密合性和光滑的内表面。

目前,关于构建角度与支撑设计对SLM支架表面质量和精度的影响研究相对较少,且多数集中在构建角度的影响上,针对支撑设计的研究仍然较为有限。

3.2 FDM工艺打印参数的优化

FDM打印的PEEK支架也在逐步应用,FDM的工艺参数包括:打印温度、速度、材料层厚、喷嘴直径、构建方向、填充角度^[52-53]。较高打印温度下的PEEK零件具有良好的表面质量和尺寸稳定性,Ding等^[54]发现:打印温度在420 °C以上时,材料细丝才能完全熔化,层间连接才会更为紧密,分层现象大大减少。层厚是影响材料拉伸强度的重要参数,适当减少层厚有助于减少PEEK零件内部的孔隙,增加PEEK细丝之间的表面接触,从而改善其机械性能^[52,55]。研究^[56]发现:在填充率为

100%且层厚为0.1 mm的条件下打印的PEEK制件拥有最佳的拉伸强度;该研究还得出了最佳性能PEEK制件的参数组合:水平方向打印,层厚为0.1 mm,打印温度为525 °C。PEEK材料的打印通过加工喷嘴打印,适当增加喷嘴直径可使结构更均匀、密度更高,从而可提高零件的抗压强度^[52]。此外,构建方向的不同也会影响PEEK材料的力学性能。研究^[57]表明,垂直打印的PEEK零件不如水平打印的硬度和抗拉强度高。而Zhen等^[53]发现:在±10°的填充间隔下,垂直打印的PEEK零件有最佳的综合性能。

3.3 热处理工艺的优化

热处理是指一种材料在固态下,通过加热、保温和冷却的手段,来获得零件良好力学性能、物理性能和化学性能的工艺^[58]。3D打印的金属修复体在制作过程中存在冷却速度快、温度梯度大等问题,从而导致高内部应力,影响修复体的机械性能。刘佳宁等^[59]使用3种不同热处理工艺处理铸造钴铬合金支架,结果发现:淬火再回火的钴铬合金支架的性能最理想,可满足临床对可摘局部义齿支架的力学性能。Kittikundecha等^[60]采用2种热处理条件处理SLM制备的钴铬钼合金卡环,结果发现:热处理后的样本在各个角度表现为均匀的等轴晶粒和随机织构,有效减少了其各向异性影响,均匀的组织成分可有效消除组织缺陷。Yan等^[61]的研究表明,使用温度为1 100 °C保持30 min退火处理的钴铬合金支架、金属内冠比温度为800 °C,保持60 min处理,拥有更少的残余应力以及更高的韧性。

4 小结

尽管3D打印技术在可摘局部义齿支架的制作中展现出许多优势,但仍面临打印速度较慢、设备成本高等现实挑战,这使其广泛应用受到限制。目前,关于3D打印工艺参数优化的研究,主要集中在金属制件的表面粗糙度、精度和机械性能等方面,然而,对于可摘局部义齿支架的机械性能,尤其是在工艺参数和支撑设计优化方面,相关研究仍显不足。有限元分析与拓扑优化技术通过参数化建模和应力场可视化显著简化了3D打印支架的设计迭代流程,并且其与3D打印的数字化对接实现了从仿真验证到成型工艺的无缝转换,但目前该技术在临床实践中的应用依然较为有限,支

架的尺寸与结构设计多依赖于技师的经验,且现有研究普遍采用简化几何构型进行分析。若能针对复杂支架设计开展更深入的研究,探索最优结构设计方案,将为未来可摘局部义齿支架的临床应用提供更广阔的发展空间。

此外,现有的研究多集中于体外实验,缺乏3D打印可摘局部义齿支架在临床应用中的相关研究。未来,亟需加强临床应用研究,特别是对其长期稳定性的跟踪,以便全面评估该技术在口腔修复中的实际效果与潜力。同时,如何平衡3D打印可摘局部义齿支架的美学、功能性与舒适度,也将是未来研究的重要方向。

综上所述,随着技术的不断进步和研究的深入,3D打印技术有望为口腔修复领域带来更加高效和个性化的解决方案,并推动其临床应用与转化。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

5 参考文献

- [1] Zhang GQ, Li JX, Zhou XY, et al. Optimization design of support structure based on 3D printing technology[J]. *Sci Rep*, 2024, 14: 18225.
- [2] Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery: printing techniques, materials, and applications [J]. *Acta Biomater*, 2021, 122: 26-49.
- [3] 陈建宇, 张志光, 李子夫. 选择性激光熔化技术在口腔医学领域中的应用[J]. *国际口腔医学杂志*, 2014, 41(1): 97-101.
Chen JY, Zhang ZG, Li ZF. Application of selective laser melting technique in stomatology[J]. *Int J Stomatol*, 2014, 41(1): 97-101.
- [4] 戴宜君, 董研, 彭伟, 等. SLM打印钴铬合金基底冠精度及密合性研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2018, 34(2): 158-163.
Dai YJ, Dong Y, Peng W, et al. Dimensional accuracy and internal and marginal fit evaluation of Co-Cr crowns prepared by SLM[J]. *J Pract Stomatol*, 2018, 34(2): 158-163.
- [5] Rues S, Tasaka A, Fleckenstein I, et al. Fit and retention of cobalt-chromium removable partial denture frameworks fabricated with selective laser melting [J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(8): 416.
- [6] Zhang MM, Gan N, Qian HX, et al. Retentive force and fitness accuracy of cobalt-chrome alloy clasps for removable partial denture fabricated with SLM technique[J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 66(3): 459-465.
- [7] Yun YG, Kang H, Kim EC, et al. Fundamental properties and clinical application of 3D-printed bio-glass porcelain fused to metal dental restoration[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(8): 7203.
- [8] Xing XJ, Hu Q, Liu Y, et al. Comparative analysis of the surface properties and corrosion resistance of Co-Cr dental alloys fabricated by different methods [J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(3): 497.e1-497.e11.
- [9] 刘一帆, 王伟娜, 于海, 等. 选择性激光熔覆(SLM)钛合金可摘局部义齿支架的适用性研究[J]. *实用口腔医学杂志*, 2017, 33(3): 302-305.
Liu YF, Wang WN, Yu H, et al. Study on the fit of titanium alloy removable partial denture framework fabricated by selective laser melting[J]. *J Pract Stomatol*, 2017, 33(3): 302-305.
- [10] Xin XZ, Chen J, Xiang N, et al. Surface properties and corrosion behavior of Co-Cr alloy fabricated with selective laser melting technique[J]. *Cell Biochem Biophys*, 2013, 67(3): 983-990.
- [11] Peng PW, Hsu CY, Huang HY, et al. Trueness of removable partial denture frameworks additively manufactured with selective laser melting[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(1): 122-127.
- [12] Heiba IM, Mohamed Lotfy S, Rizk FN, et al. Effect of different digital technology on the adaptation and retention of Co-Cr partial denture frameworks[J]. *J Prosthodont*, 2024, 33(8): 801-807.
- [13] 谢燕翔, 张智昶, 叶芳霞, 等. 选区激光熔化在齿科材料中的应用研究进展[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(23): 5-10.
Xie YX, Zhang ZC, Ye FX, et al. Research progress on application of selective laser melting in dental materials[J]. *Hot Work Technol*, 2022, 51(23): 5-10.
- [14] Awad A, Fina F, Goyanes A, et al. 3D printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering[J]. *Int J Pharm*, 2020, 586: 119594.
- [15] 杨强, 鲁中良, 黄福享, 等. 激光增材制造技术的研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(12): 26-31.

- Yang Q, Lu ZL, Huang FX, et al. Research on status and development trend of laser additive manufacturing[J]. *Aeronaut Manuf Technol*, 2016, 59(12): 26-31.
- [16] 柳朝阳, 赵备备, 李兰杰, 等. 金属材料3D打印技术研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2020, 30(2): 83-89.
- Liu CY, Zhao BB, Li LJ, et al. Research progress of 3D printing technology for metallic materials[J]. *Powder Metall Ind*, 2020, 30(2): 83-89.
- [17] Leary M, Maconachie T, Sarker A, et al. Mechanical and thermal characterisation of $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ SLM block support structures[J]. *Mater Des*, 2019, 183: 108138.
- [18] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D打印技术研究现状和关键技术[J]. *材料工程*, 2016, 44(2): 122-128.
- Zhang XJ, Tang SY, Zhao HY, et al. Research status and key technologies of 3D printing[J]. *J Mater Eng*, 2016, 44(2): 122-128.
- [19] Wang P, Zou B, Ding SL, et al. Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing[J]. *Compos Part B Eng*, 2020, 198: 108175.
- [20] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Compos Part B Eng*, 2018, 143: 172-196.
- [21] 郭芳, 陈兆社, 黄硕, 等. 熔融沉积成型氧化钛/聚醚醚酮可摘局部义齿的适合性初探[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2022, 15(4): 458-461.
- Guo F, Chen ZS, Huang S, et al. Preliminary study on TiO_2 /polyetheretherketone removable partial dentures prepared by fused deposition modeling[J]. *Chin J Pract Stomatol*, 2022, 15(4): 458-461.
- [22] Liu YC, Fang M, Zhao RF, et al. Clinical applications of polyetheretherketone in removable dental prostheses: accuracy, characteristics, and performance[J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14(21): 4615.
- [23] 陆伟, 陈晔, 冀堃, 等. 一体化双色3D打印聚醚醚酮口腔修复体的初步临床报告[J]. *实用口腔医学杂志*, 2020, 36(3): 548-552.
- Lu W, Chen X, Ji K, et al. Preliminary clinical report of integrated two-color 3D printing PEEK dental prosthesis[J]. *J Pract Stomatol*, 2020, 36(3): 548-552.
- [24] Vaddamanu SK, Alhamoudi FH, Chaturvedi S, et al. Retentive forces and deformation of fitting surface in RPD clasp made of polyether-ether-ketone (PEEK)[J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(4): 956.
- [25] Chen X, Wang F, Sun FF, et al. Digital fabrication of an adult speech aid prosthesis by using a 3-dimensionally printed polyetheretherketone framework[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(2): 358-361.
- [26] Chen X, Mao BC, Zhu ZL, et al. A three-dimensional finite element analysis of mechanical function for 4 removable partial denture designs with 3 framework materials: CoCr, Ti-6Al-4V alloy and PEEK[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 13975.
- [27] 刘佳怡, 何雨桐, 汪振华. 有限元分析法在口腔修复学中的应用进展[J]. *医学综述*, 2019, 25(16): 3248-3252.
- Liu JY, He YT, Wang ZH. Application progress of finite element analysis in prosthodontics[J]. *Med Recapitul*, 2019, 25(16): 3248-3252.
- [28] Alshegri AA, Alageel O, Caron E, et al. An analytical model to design circumferential clasps for laser-sintered removable partial dentures[J]. *Dent Mater*, 2018, 34(10): 1474-1482.
- [29] 马珂楠, 陈虎, 沈妍汝, 等. 选择性激光熔化打印可摘局部义齿圆环卡环固位力的有限元分析[J]. *北京大学学报(医学版)*, 2022, 54(1): 105-112.
- Ma KN, Chen H, Shen YR, et al. Finite element analyses of retention of removable partial denture circumferential clasps manufactured by selective laser melting[J]. *J Peking Univ (Health Sci)*, 2022, 54(1): 105-112.
- [30] Park J, Lee DM, Sutradhar A. Topology optimization of fixed complete denture framework[J]. *Int J Numer Method Biomed Eng*, 2019, 35(6): e3193.
- [31] 姜献峰, 袁喜根, 董研, 等. 基于拓扑优化的可摘局部义齿卡环设计研究[J]. *浙江工业大学学报*, 2016, 44(1): 15-18.
- Jiang XF, Yuan XG, Dong Y, et al. Research on the clasp of removable partial denture using topology optimization design[J]. *J Zhejiang Univ Technol*, 2016, 44(1): 15-18.
- [32] Konieczny B, Szczesio-Włodarczyk A, Sokolowski J, et al. Challenges of Co-Cr alloy additive manufac-

- turing methods in dentistry—the current state of knowledge (systematic review)[J]. *Materials (Basel)*, 2020, 13(16): 3524.
- [33] Bian PY, Wang CC, Xu KW, et al. Coupling analysis on microstructure and residual stress in selective laser melting (SLM) with varying key process parameters[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(5): 1658.
- [34] Li JC, Hu JX, Cao LC, et al. Multi-objective process parameters optimization of SLM using the ensemble of metamodels[J]. *J Manuf Process*, 2021, 68: 198-209.
- [35] Wang JH, Ren J, Liu W, et al. Effect of selective laser melting process parameters on microstructure and properties of Co-Cr alloy[J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(9): 1546.
- [36] Hanzl P, Zetek M, Bakša T, et al. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts[J]. *Procedia Eng*, 2015, 100: 1405-1413.
- [37] Hwang S, An S, Robles U, et al. Process parameter optimization for removable partial denture frameworks manufactured by selective laser melting[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 129(1): 191-198.
- [38] 桑磊, 颜家振, 李宁, 等. 激光工艺参数对激光选区熔化牙科钴铬合金孔隙、表面粗糙度和硬度的影响[J]. *华西口腔医学杂志*, 2024, 42(4): 462-469.
- Sang L, Yan JZ, Li N, et al. Effect of laser process parameters on the pores, surface roughness, and hardness of laser selective melting of dental cobalt-chrome alloys[J]. *West China J Stomatol*, 2024, 42(4): 462-469.
- [39] 周金宇, 王新愿, 程锦翔, 等. 钴铬合金选区激光熔化工艺参数可靠性优化[J]. *兵工学报*, 2024, 45(12): 4530-4538.
- Zhou JY, Wang XY, Cheng JX, et al. Reliability-based optimization of selective laser melting process parameters for Co-Cr alloy[J]. *Acta Armament*, 2024, 45(12): 4530-4538.
- [40] Piedra-Cascón W, Krishnamurthy VR, Att W, et al. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: a narrative review[J]. *J Dent*, 2021, 109: 103630.
- [41] Daou EE. Does the build orientation parameter affect the fit of fixed partial dentures fabricated by additive manufacturing[J]. *Int J Prosthodont*, 2024, 37(7): 41-47.
- [42] Gan MX, Wong CH. Practical support structures for selective laser melting[J]. *J Mater Process Technol*, 2016, 238: 474-484.
- [43] Pollicini L, Mazzucato F, Valente A. Influence of SLM block support design on geometrical quality of AISI 316 L cantilever features and its impact on post-processing[J]. *Mater Res Express*, 2024, 11(1): 016510.
- [44] Cao QQ, Zhang J, Chang S, et al. The effect of support structures on maraging steel MS1 parts fabricated by selective laser melting at different building angles[J]. *Rapid Prototyp J*, 2020, 26(9): 1465-1476.
- [45] 周嘉陵, 颜杉, 于露翔, 等. 不同构建角度和支撑密度对选区激光熔化钴铬合金卡环准确性的影响[J]. *中国医科大学学报*, 2024, 53(6): 536-540, 554.
- Zhou JL, Yan S, Yu LX, et al. Effect of build angles and support densities on selective laser melting accuracy of cobalt-chromium clasps[J]. *J China Med Univ*, 2024, 53(6): 536-540, 554.
- [46] Kajima Y, Takaichi A, Nakamoto T, et al. Effect of adding support structures for overhanging part on fatigue strength in selective laser melting[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2018, 78: 1-9.
- [47] Calignano F. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting[J]. *Mater Des*, 2014, 64: 203-213.
- [48] Alharbi N, Osman RB, Wismeijer D. Factors influencing the dimensional accuracy of 3D-printed full-coverage dental restorations using stereolithography technology[J]. *Int J Prosthodont*, 2016, 29(5): 503-510.
- [49] Kobayashi H, Tasaka A, Higuchi S, et al. Influence of molding angle on the trueness and defects of removable partial denture frameworks fabricated by selective laser melting[J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 66(4): 589-599.
- [50] Kim KW, Kim SY, Kim SA, et al. Four different build angles in 3D-printed complete denture bases: a comparative *in vitro* study[J]. *Appl Sci*, 2024, 14(18): 8504.

- [51] 谢文强, 王洁琪, 庄沛林, 等. 构建方向对 SLM 钛合金卡环的显微结构及性能影响[J]. 口腔疾病防治, 2019, 27(1): 17-22.
- Xie WQ, Wang JQ, Zhuang PL, et al. Effect of construction orientation on the microstructure and properties of SLM Ti alloy clasps[J]. *J Prev Treat Stomatol Dis*, 2019, 27(1): 17-22.
- [52] Moby V, Dupagne L, Fouquet V, et al. Mechanical properties of fused deposition modeling of polyetheretherketone (PEEK) and interest for dental restorations: a systematic review[J]. *Materials (Basel)*, 2022, 15(19): 6801.
- [53] Zhen HL, Zhao B, Quan L, et al. Effect of 3D printing process parameters and heat treatment conditions on the mechanical properties and microstructure of PEEK parts[J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 15(9): 2209.
- [54] Ding SL, Zou B, Wang P, et al. Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM[J]. *Polym Test*, 2019, 78: 105948.
- [55] Deng XH, Zeng Z, Peng B, et al. Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling[J]. *Materials (Basel)*, 2018, 11(2): 216.
- [56] Li Y, Lou Y. Tensile and bending strength improvements in PEEK parts using fused deposition modeling 3D printing considering multi-factor coupling[J]. *Polymers (Basel)*, 2020, 12(11): 2497.
- [57] Prechtel A, Reymus M, Edelhoff D, et al. Comparison of various 3D printed and milled PAEK materials: effect of printing direction and artificial aging on martens parameters[J]. *Dent Mater*, 2020, 36(2): 197-209.
- [58] 于露翔, 张若槿, 谭发兵. 热处理技术对 3D 打印钛合金试件机械性能的影响[J]. 中国组织工程研究, 2024, 28(29): 4741-4747.
- Yu LX, Zhang RJ, Tan FB. Influence of heat treatment technology on mechanical properties of 3D printed titanium alloy specimens[J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2024, 28(29): 4741-4747.
- [59] 刘佳宁, 牛新慧, 赵性川, 等. 热处理对可摘局部义齿铸造支架的影响研究[J]. 热加工工艺, 2025, 54(23): 44-48.
- Liu JN, Niu XH, Zhao XC, et al. Influence of heat treatment on removable partial dental stent[J]. *Hot Work Technol*, 2025, 54(23): 44-48.
- [60] Kittikundecha N, Kajima Y, Takaichi A, et al. Fatigue properties of removable partial denture clasps fabricated by selective laser melting followed by heat treatment[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2019, 98: 79-89.
- [61] Yan X, Lin H, Wu Y, et al. Effect of two heat treatments on mechanical properties of selective-laser-melted Co-Cr metal-ceramic alloys for application in thin removable partial dentures[J]. *J Prosthet Dent*, 2018, 119(6): 1028.e1-1028.e6.

(本文编辑 王姝)