

打印方向对3D打印牙科氧化锆陶瓷性能影响的研究进展

曹周川¹ 赵静¹ 史珂莹² 郑园娜^{1,2}

1. 浙江中医药大学口腔医学院/附属口腔医院特诊科 杭州 310051;

2. 宁波牙科医院特诊科/宁波市健康口腔医学研究院 宁波 315100

[摘要] 氧化锆陶瓷凭借其优异的机械性能和良好的生物相容性,在口腔修复领域应用广泛。目前,基于计算机辅助设计和计算机辅助制造的切削工艺是氧化锆陶瓷修复体制造的金标准,但存在材料浪费和加工限制等局限性。相比之下,3D打印技术在材料利用率、复杂结构成型等方面展现出显著优势,为口腔修复体的制备提供了新的技术路径。在3D打印氧化锆陶瓷的制备过程中,打印方向作为关键工艺参数之一,显著影响其最终性能。目前,尚未见关于打印方向对3D打印氧化锆陶瓷性能影响和作用机制的归纳总结。因此,本文重点探讨了打印方向对氧化锆陶瓷机械性能、微观结构及尺寸精度等方面的影响,以期修复体制备过程中合理选择打印方向提供理论依据。

[关键词] 氧化锆; 3D打印; 打印方向; 机械性能; 微观结构; 尺寸精度

[中图分类号] R783.1 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026136



本文链接

OSID 码

Research progress on the effect of printing orientation on the properties of 3D printed dental zirconia ceramics

Cao Zhouchuan¹, Zhao Jing¹, Shi Keying², Zheng Yuanna^{1,2}

1. Dept. of VIP Center, School and Hospital of Stomatology, Zhejiang Chinese Medical University, Hangzhou 310051, China; 2. Dept. of VIP Center, Ningbo Dental Hospital & Ningbo Oral Health Research Institute, Ningbo 315100, China
Supported by: Horizontal Research Project of Zhejiang Chinese Medical University (352219A00605); Medical and Health Science and Technology Project of Zhejiang Province (2024KY1186)

Correspondence: Zheng Yuanna, Email: zyn218@126.com

[Abstract] Zirconia ceramics have been widely used in prosthodontics due to their excellent mechanical properties and biocompatibility. Presently, milling based on computer aided design and computer aided manufacturing remains the gold standard for producing zirconia ceramic restorations, yet it has certain limitations such as material waste and processing constraints. 3D printing offers a new solution for the production of dental restorations, leveraging its advantages in material utilization and fine structure processing. The printing orientation is a key parameter which can significantly affect the performance of the definitive zirconia restorations/ceramics. The existing literature has not yet systematically summarized the influence of printing orientation on the performance of 3D printed zirconia ceramics or its mechanisms. Therefore, this paper elucidates the influence of printing orientation on the mechanical properties, microstructure, dimensional accuracy, and other aspects of zirconia restorations/ceramics, aiming to provide a theoretical basis for rationally selecting the printing orientation during prosthesis fabrication.

[Key words] zirconia; 3D printing; printing orientation; mechanical properties; microstructure; dimensional accuracy

[收稿日期] 2025-06-02; **[修回日期]** 2025-08-20

[基金项目] 浙江中医药大学横向科研项目 (352219A00605); 浙江省医药卫生科技计划项目 (2024KY1186)

[第一作者] 曹周川, 硕士, Email: ethan_cao20010726@163.com

[通信作者] 郑园娜, 教授, 博士, Email: zyn218@126.com

氧化锆陶瓷凭借其突出的机械强度、生物相容性及美学效果,已经成为制作口腔固定修复体

的主流材料^[1]。基于计算机辅助设计和计算机辅助制造 (computer aided design and computer aided manufacturing, CAD/CAM) 的切削工艺被视为生产氧化锆陶瓷修复体的金标准^[2], 该技术能够确保修复体具有精确的加工精度^[3]和稳定的临床效果^[4]。然而, 切削工艺仍存在诸多挑战, 如加工过程中材料利用率低、容易引发微裂纹、铣削工具磨损快、复杂结构的加工精度难以保证等^[5-6]。因此, 亟需新的制造技术以突破现有工艺瓶颈。

增材制造 (additive manufacturing, AM) 是根据CAD的数字化模型, 通过逐层沉积材料的方式构建个性化物件, 该过程常被称为“3D打印”。相比于传统的切削工艺, 该技术在材料利用率、生产效率、还原精细结构等方面具有显著优势, 展现出良好的经济与社会效益^[7]。2009年, 文献^[8]报道了通过直接喷墨打印 (direct ink printing, DIP) 技术制作的氧化锆陶瓷口腔修复体。自此, 3D打印技术在氧化锆陶瓷修复体制作中的应用受到了广泛关注。然而, 现有研究表明, 3D打印氧化锆陶瓷修复体在关键性能指标上仍存在明显不足, 比如在尺寸精度^[9]和机械强度^[10]方面均显著低于切削工艺, 其工艺参数仍需进一步优化。

打印方向是3D打印的重要工艺参数之一^[11]。其定义是基于打印层与标准件样品测试平面或牙冠长轴的相对关系: 水平打印 (0°) 指打印层平面平行于标准件样品的测试平面, 或垂直于牙冠长轴; 垂直打印 (90°) 则指打印层平面垂直于标准件样品的测试平面, 或平行于牙冠长轴; 此外, 还可采用不同角度的倾斜打印方向^[5,11-13]。研究^[5,11,14]表明, 打印方向会对氧化锆陶瓷的尺寸精度、物理性能和机械性能产生影响。而对于其具体影响, 现有研究^[11,13,15-17]结论仍存在分歧。目前, 关于3D打印氧化锆陶瓷修复体的最佳打印方向, 学术界尚未达成共识。本文归纳了口腔氧化锆陶瓷修复体的主流3D打印技术, 重点总结分析了打印方向对氧化锆陶瓷修复体性能的影响, 旨在为临床实践中根据不同的修复需求选择适当的打印方向提供理论依据, 从而实现个性化、高性能3D打印氧化锆陶瓷修复体的精准制备。

1 牙科氧化锆陶瓷的3D打印技术

常见的牙科氧化锆陶瓷3D打印技术主要包括: 光聚合 (vat photopolymerization)、材料喷射

(material jetting, MJ) 和材料挤出 (material extrusion, MEX) 等, 可应用于制作氧化锆陶瓷牙冠、种植体、种植基台、内冠、固定桥等^[7]。

1.1 光聚合

该技术主要包括立体光刻 (stereolithography, SLA) 和数字光处理 (digital light processing, DLP), 其浆料由氧化锆陶瓷粉末和液态的光敏树脂按一定比例混合而成^[14,18]。SLA通过计算机控制紫外线激光束逐点固化浆料, 逐层堆积成型, 适用于大尺寸物件的制作^[19]。DLP则采用数字微镜装置一次性整层曝光, 固化速度更快, 但受限于光源投影范围, 更适合小尺寸物件的制作^[19]。打印成型后的坯体需通过脱脂处理去除有机组分, 并在高温下烧结以形成致密化的氧化锆陶瓷。

1.2 MJ

MJ (包括直接喷墨打印) 通过多喷头系统将含有氧化锆陶瓷粉末的浆料与可溶性支撑材料共同喷射, 以微小液滴的形式逐层沉积到平台上。打印过程中, 通过加热底板和移动式加热装置的协同作用, 实现浆料溶剂的快速挥发^[11,20]。每完成一层打印, Z轴平台精确下降一个层高, 循环往复直至坯体完全成型。后处理阶段, 采用特殊溶剂去除支撑材料, 随后坯体需经过脱脂、高温烧结等关键步骤形成最终的氧化锆陶瓷制件^[11]。MJ技术具有优异的加工精度^[11]和机械强度^[21], 但由于生产成本较高, 该技术的产业化应用仍面临较大的经济性挑战。

1.3 MEX

MEX包括自动注浆成型 (robocasting, RC) 和墨水直写 (direct ink writing, DIW), 通过喷嘴在恒定压力下挤出高固含量的氧化锆陶瓷浆料, 依靠浆料优异的形态保持能力实现逐层堆积成型, 无需额外的逐层固化处理。打印完成后, 坯体同样需要经过脱脂和高温烧结等后处理程序而形成致密化的氧化锆陶瓷。MEX具有成本优势, 但受限于较低的打印分辨率和较长的打印时间, 在精度要求高的口腔修复领域的应用逐渐减少^[22-23]。

2 打印方向对氧化锆陶瓷显微结构和物理性能的影响

2.1 3D打印氧化锆陶瓷的显微结构

3mol%的氧化钇稳定的四方相多晶氧化锆 (3mol% yttria-stabilized tetragonal zirconia polycryst-

tal, 3Y-TZP) 是应用最广泛的牙科氧化锆陶瓷类型之一^[24]。以 3Y-TZP 作为原料, 无论是使用切削工艺还是 3D 打印技术制备的氧化锆陶瓷, 均以四方晶相为主^[25]。目前, 关于打印方向对氧化锆陶瓷微观结构影响的研究较少。有研究^[10]报道: 在倾斜打印的 3Y-TZP 样品中单斜晶相的含量高达 14.2%, 而在水平和垂直打印的样品中仅占 0.93% 和 2.95%。此外, 该研究^[10]还发现: 氧化锆陶瓷在垂直打印时晶粒尺寸最大 (458 nm±152.0 nm), 随后依次是水平打印 (420 nm±151.8 nm) 和倾斜打印 (418 nm±139.1 nm)。但是该研究没有进行统计学分析, 亟待未来研究进一步探究和验证其相关性。

在扫描电子显微镜下, 使用 SLA、DLP 和纳米粒子喷射技术 (nanoparticle jetting, NPJ) 制备的 3D 打印氧化锆陶瓷表面均可见沿打印方向堆叠排列的分层结构^[10,18,20]。MEX 打印的氧化锆陶瓷也有类似的微观表面特征, 当浆料黏合剂性能欠佳时分层更加明显, 甚至出现剥脱^[26]。Abualsaud 等^[10]的研究中, 氧化锆陶瓷晶粒的生长可能受到了层间缺陷的影响, 导致晶粒尺寸与打印方向产生潜在的关联。此外, 层间缺陷还会对打印氧化锆陶瓷的强度、尺寸精度、透光性等多个方面产生影响, 如何促进层间结合是重要的技术难题之一^[5]。Sarwar 等^[27]尝试将 DLP 技术和连续供膜系统 (continuous film supply system, CFS) 相结合, 利用 CFS 实现更小的层厚并控制每层浆料供给的一致性, 在扫描电子显微镜下观察到烧结后的氧化锆陶瓷层间结构基本消失。

2.2 3D 打印氧化锆的密度

对于 SLA 工艺制备的 3Y-TZP 样品, 垂直打印的氧化锆陶瓷密度显著高于水平打印的样品^[5,12]。这可能归因于 SLA 工艺逐点固化的特点^[5]。垂直打印的样品具有较小的打印层面积, 意味着每层材料的固化时间更短, 可以减少未固化浆料中的陶瓷颗粒因重力沉降而导致局部浓度下降。此外, 另一项研究^[10]表明: 倾斜打印的 3Y-TZP 密度相对较低且孔隙率较高。这是因为倾斜打印时部分打印层的边缘会失去支撑而形成悬垂结构, 浆料难以逐层附着, 容易产生孔隙等缺陷^[28]。

2.3 3D 打印氧化锆陶瓷的透光性

透光性是氧化锆陶瓷修复体的重要美学特性, 与表面粗糙度、孔隙率等因素密切相关^[29-32]。研究^[5]显示: 当厚度为 1 mm 时, 水平打印和垂直打

印的 SLA 氧化锆陶瓷圆盘透光度分别是 3.403% 和 4.393%, 而切削氧化锆陶瓷样品的透光度为 10.253%。这是因为切削氧化锆陶瓷的密度显著高于打印氧化锆陶瓷, 减小了孔隙对透光性的不利影响^[12]。垂直打印氧化锆陶瓷的透光性较水平打印更高^[5], 可能得益于垂直打印时更高的密度和更小的孔隙率^[5,10,12]。然而, 对于 SLA 工艺制备的氧化锆陶瓷, 垂直打印时表面粗糙度较水平打印时显著更高^[33]。

因此, 为了获得理想的透光性, 垂直打印氧化锆陶瓷的表面处理尤为重要。

3 打印方向对氧化锆陶瓷机械性能的影响

3.1 3D 打印氧化锆陶瓷的抗弯强度

SLA 和 DLP 氧化锆陶瓷在水平打印时, 其抗弯强度分别为 817~1 187 MPa 和 657~751 MPa; 垂直打印时, 二者的抗弯强度则分别为 207~925 MPa 和 126~675 MPa^[5,10,15,18,33]。男性的平均最大咬合力约为 587 N, 女性约为 425 N^[34]。由此可推断, 对于上述 2 种 3D 打印工艺制备的氧化锆陶瓷, 水平打印样品的抗弯强度基本能够满足临床应用要求, 而垂直打印样品则不能满足。多项研究^[5,10,15,33]表明: 采用 SLA 和 DLP 工艺制备的氧化锆陶瓷, 在水平打印条件下的抗弯强度显著高于垂直打印。然而, 也有研究^[18]发现: 设置打印层厚 30 μm、曝光时间 1 000 ms、光照强度 250% 时, 经 1 550 °C 高温烧结 1 h 后, 水平打印获得的 DLP 氧化锆陶瓷抗弯强度高于垂直打印样品, 但是差异无统计学意义。

Weibull 分析^[15]显示: 垂直打印氧化锆陶瓷样品的断裂全部由层间缺陷导致, 而水平打印样品由层间缺陷导致的断裂相对较少。由此可见, 层间缺陷是导致不同打印方向下氧化锆陶瓷抗弯强度产生差异的关键因素。在测试过程中, 垂直打印样品的打印层与负荷方向平行, 层间界面直接承受最大应力; 而水平打印样品的层间界面与主应力方向垂直, 最大应力主要由打印层承受, 使得其整体强度得到提升。另一方面, 氧化锆陶瓷在载体固化过程中沿打印方向的收缩率显著更高, 在烧结过程中沿重力方向的收缩率更高^[35]。这种各向异性的收缩可能在氧化锆陶瓷内部产生残余应力, 使得其强度也表现各向异性差异。此外, 加工参数 (如层厚、光照条件) 和浆料成分 (如

光引发剂浓度、陶瓷粒径)的优化,有利于减少层间结构缺陷,从而减少打印氧化锆陶瓷抗弯强度的各向异性^[12,36-37]。因此,打印氧化锆陶瓷抗弯强度的各向异性程度不同,可能与加工参数的差异有关。但是由于文献中打印参数披露不完整,无法进行深入的分析。未来研究应注重关键工艺参数记录的完整性。

3.2 3D打印氧化锆陶瓷的疲劳性能

SLA和DLP工艺成型的氧化锆陶瓷,动态疲劳强度显著低于切削氧化锆陶瓷;其中,SLA水平打印样品的动态疲劳强度显著高于其垂直打印样品^[14,38]。扫描电子显微镜对疲劳试验样品断面的观察结果^[14]显示:所有裂纹均起源于表面层间结构相关的打印缺陷,且此现象与打印方向无关。研究^[14,33]表明:切削氧化锆陶瓷的表面质量优于SLA打印样品,而SLA垂直打印氧化锆陶瓷的表面粗糙度显著高于水平打印样品。由此可见,上述动态疲劳强度差异与氧化锆陶瓷的表面质量有关。值得注意的是,水平打印氧化锆陶瓷抛光后的疲劳强度仍高于垂直打印样品,这可能与材料内部的层间结构有关^[14]。

3.3 3D打印氧化锆陶瓷的断裂韧性

DLP以45°打印制作的氧化锆陶瓷断裂韧性最高,随后依次是0°和90°,结果差异具有统计学意义^[15]。SLA氧化锆陶瓷的断裂韧性与打印方向的相关性存在争议。Xiang等^[5]使用单边V型切口梁法(single-edge-V-notch-beam, SEVNB)证实水平打印的SLA氧化锆陶瓷的断裂韧性较垂直打印显著更高,而Miura等^[16]使用压痕法测试发现打印方向对断裂韧性无显著影响。上述研究结果不一致可能是研究方法不同导致的,压痕法可以用来直接比较相同测试条件下材料之间的断裂韧性差异,但是测量值并不能准确反映其断裂韧性本身^[5]。SEVNB可以控制初始裂纹的方向,这可能导致氧化锆陶瓷断裂韧性的差异更显著:测量水平打印样品时,初始裂纹方向与氧化锆陶瓷的打印层平面垂直,能有效阻止裂纹沿层间缺陷延伸;测量垂直打印样品时则相反。

3.4 3D打印氧化锆陶瓷的硬度

有研究^[12,15-16,18,20]显示:采用SLA、DLP和NPJ等技术制备的氧化锆陶瓷,其表面硬度不受打印方向的影响。但是,采用MEX技术制作的垂直打印氧化锆陶瓷样品较水平打印样品的表面硬度更高^[17]。这是因为MEX技术依靠陶瓷浆料的低流动

性实现分层堆叠,而不是通过逐层固化。在该研究中,垂直打印的样品因层数更多,重力对浆料的挤压致密化作用更为显著,导致其硬度更高。该研究^[17]还发现:对于同一样品,垂直打印样品的上表面和水平打印样品的侧面较其他表面拥有更高的硬度。这些平面在打印过程中均平行于重力方向,其硬度更高同样可能与重力对浆料的持续挤压有关。

4 打印方向对氧化锆陶瓷修复体尺寸精度的影响

研究^[11]表明:使用NPJ技术制备的氧化锆陶瓷切牙牙冠尺寸精度最高的打印方向是90°和135°,而磨牙牙冠则是0°和180°。设置光照强度为30 mW/cm²、层厚为30 μm、在X/Y平面上打印分辨率为3 840×2 160像素,使用DLP工艺制作氧化锆陶瓷磨牙牙冠,结果显示:其边缘精度在0°和45°打印时最高,内表面精度则在90°打印时最高^[39]。Cameron等^[13]发现:同样基于光聚合原理,由台式打印机(AON ZipPro, AON公司)制作的氧化锆陶瓷牙冠的精度从0°、45°到90°打印方向依次降低,而由工业打印机(CeraFab System S65, Lithoz GmbH公司)制作的牙冠在45°方向打印时尺寸精度最高,其具体的加工参数未知。由此可见,打印方向会显著影响氧化锆陶瓷牙冠的尺寸精度,由于其复杂的作用机制,上述研究结论之间有较大差异。

打印方向可能通过改变支撑结构的外形和位置,对氧化锆陶瓷牙冠的打印精度产生影响。在135°构建方向下,牙冠的自支撑结构外形最佳,有利于提高尺寸精度^[40];而90°打印时,软件会在牙冠边缘添加支撑结构,导致磨除支架时边缘产生明显缺陷,0°和45°打印的样品则未观察到此类缺陷^[39]。NPJ工艺由于使用了水溶性的支撑材料,不需要手动磨除的步骤,因此减少了支撑结构附着区加工缺陷的产生^[20]。另一方面,残余应力也可能是作用机制之一。堆叠方向上的尺寸和打印层数越小,烧结后产生的残余应力和形变就越小^[5,41]。因此,水平打印可能更适合制作大跨度固定桥等修复体,有利于提高尺寸精度^[5]。此外,氧化锆陶瓷在脱脂和烧结过程中会产生各向异性的收缩^[35],导致不同打印方向下牙冠的打印精度有差异。提高浆料中的固相含量有助于减少收缩的各向异性,理论上有利于提高尺寸精度^[42]。

5 总结与展望

近年来, 3D 打印氧化锆陶瓷在口腔修复领域备受关注, 打印方向作为重要的加工参数之一, 逐渐成为研究焦点。不同打印方向下, 打印氧化锆陶瓷在机械性能、微观结构和尺寸精度等方面存在不同程度的差异。综合来看, 相较于垂直打印, 水平打印样品常表现出更高的抗弯强度及更低的密度, 而两者硬度的差异通常不显著。此外, 打印方向对氧化锆陶瓷修复体的尺寸精度具有显著影响, 但是目前对于尺寸精度最佳的打印方向尚未达成共识, 可能是不同的 3D 打印技术、修复体几何外形等因素的综合作用所致。层间结构缺陷和残余应力被认为是导致不同打印方向的氧化锆陶瓷性能出现差异的关键机制。目前, 3D 打印氧化锆陶瓷仍处于起步阶段, 尚未广泛应用于临床, 因此缺乏相关临床研究。现阶段氧化锆陶瓷的 3D 打印多为单一打印方向, 未来可探索多方向组合打印的可行性, 以获得更理想的修复体。此外, 结合大量体外和临床研究数据, 借助人工智能实现计算机控制的自动方向优化, 也是未来的研究方向之一。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

6 参考文献

- [1] Denry I, Kelly JR. State of the art of zirconia for dental applications[J]. *Dent Mater*, 2008, 24(3): 299-307.
- [2] Teegen IS, Schadte P, Wille S, et al. Comparison of properties and cost efficiency of zirconia processed by DIW printing, casting and CAD/CAM-milling [J]. *Dent Mater*, 2023, 39(7): 669-676.
- [3] Abduo J, Ho G, Centorame A, et al. Marginal accuracy of monolithic and veneered zirconia crowns fabricated by conventional and digital workflows[J]. *J Prosthodont*, 2023, 32(8): 706-713.
- [4] Leitão CIMB, de Oliveira Fernandes GV, Azevedo LPP, et al. Clinical performance of monolithic CAD/CAM tooth-supported zirconia restorations: systematic review and meta-analysis[J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 66(3): 374-384.
- [5] Xiang D, Xu YX, Bai W, et al. Dental zirconia fabricated by stereolithography: accuracy, translucency and mechanical properties in different build orientations[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(20): 28837-28847.
- [6] 麻健丰, 林婷婷, 黄盛斌. 3D 打印技术在牙科陶瓷成型领域的研究进展[J]. *口腔医学研究*, 2019, 35(2): 107-112.
- Ma JF, Lin TT, Huang SB. Research progress of 3D printing in manufacturing dental ceramics[J]. *J Oral Sci Res*, 2019, 35(2): 107-112.
- [7] Branco AC, Colaço R, Figueiredo-Pina CG, et al. Recent advances on 3D-printed zirconia-based dental materials: a review[J]. *Materials*, 2023, 16(5): 1860.
- [8] Ebert J, Özkol E, Zeichner A, et al. Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia[J]. *J Dent Res*, 2009, 88(7): 673-676.
- [9] Lerner H, Nagy K, Pranno N, et al. Trueness and precision of 3D-printed versus milled monolithic zirconia crowns: an *in vitro* study[J]. *J Dent*, 2021, 113: 103792.
- [10] Abualsaud R, Abussaud M, Assudmi Y, et al. Physico-mechanical and surface characteristics of 3D-printed zirconia: an *in vitro* study[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6988.
- [11] Lyu JZ, Yang X, Li Y, et al. Effect of build angle on the dimensional accuracy of monolithic zirconia crowns fabricated with the nanoparticle jetting technique[J]. *J Prosthet Dent*, 2023, 130(4): 613.e1-613.e8.
- [12] Suominen JM, Frankberg EJ, Vallittu PK, et al. Three-dimensional printing of zirconia: characterization of early stage material properties[J]. *Biomater Investig Dent*, 2019, 6(1): 23-31.
- [13] Cameron AB, Choi JJE, Ip A, et al. Assessment of the trueness of additively manufactured mol3% zirconia crowns at different printing orientations with an industrial and desktop 3D printer compared to subtractive manufacturing[J]. *J Dent*, 2024, 144: 104942.
- [14] Lu YQ, Wang L, de Oliveira Dal Piva AM, et al. Effect of printing layer orientation and polishing on the fatigue strength of 3D-printed dental zirconia[J]. *Dent Mater*, 2024, 40(2): 190-197.
- [15] Marsico C, Øilo M, Kutsch J, et al. Vat polymeriza-

- tion-printed partially stabilized zirconia: mechanical properties, reliability and structural defects[J]. *Addit Manuf*, 2020, 36: 101450.
- [16] Miura S, Shinya A, Ishida Y, et al. Mechanical and surface properties of additive manufactured zirconia under the different building directions[J]. *J Prosthodont Res*, 2022, 67(3): 410-417.
- [17] Rane K, Farid MA, Hassan W, et al. Effect of printing parameters on mechanical properties of extrusion-based additively manufactured ceramic parts [J]. *Ceram Int*, 2021, 47(9): 12189-12198.
- [18] Coppola B, Schmitt J, Lacondemine T, et al. Digital light processing stereolithography of zirconia ceramics: slurry elaboration and orientation-reliant mechanical properties[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2022, 42(6): 2974-2982.
- [19] Quan HY, Zhang T, Xu H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges[J]. *Bioact Mater*, 2020, 5(1): 110-115.
- [20] Willems E, Turon-Vinas M, Camargo dos Santos B, et al. Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41(10): 5292-5306.
- [21] Zhong SP, Shi QM, Deng YL, et al. High-performance zirconia ceramic additively manufactured via NanoParticle Jetting[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(22): 33485-33498.
- [22] Schweiger J, Edelhoff D, Güth JF. 3D printing in digital prosthetic dentistry: an overview of recent developments in additive manufacturing[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(9): 2010.
- [23] 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.
- [24] Jerman E, Lümekmann N, Eichberger M, et al. Evaluation of translucency, Marten's hardness, biaxial flexural strength and fracture toughness of 3Y-TZP, 4Y-TZP and 5Y-TZP materials[J]. *Dent Mater*, 2021, 37(2): 212-222.
- [25] Kyung KY, Park JM, Heo SJ, et al. Comparative analysis of flexural strength of 3D printed and milled 4Y-TZP and 3Y-TZP zirconia[J]. *J Prosthet Dent*, 2024, 131(3): 529.e1-529.e9.
- [26] Hadian A, Fricke M, Liersch A, et al. Material extrusion additive manufacturing of zirconia parts using powder injection molding feedstock compositions [J]. *Addit Manuf*, 2022, 57: 102966.
- [27] Sarwar WA, Kang JH, Yoon HI. Optimized zirconia 3D printing using digital light processing with continuous film supply and recyclable slurry system[J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3446.
- [28] Osman RB, van der Veen AJ, Huiberts D, et al. 3D-printing zirconia implants; a dream or a reality? An *in-vitro* study evaluating the dimensional accuracy, surface topography and mechanical properties of printed zirconia implant and discs[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 75: 521-528.
- [29] Zhang Y. Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent[J]. *Dent Mater*, 2014, 30(10): 1195-1203.
- [30] dos Santos C, Rosa GO, Quintino MN, et al. Effect of surface finishing and thickness on the translucency of zirconia dental ceramics[J]. *Ceram Int*, 2020, 46(6): 7748-7755.
- [31] Schabbach LM, dos Santos BC, De Bortoli LS, et al. Application of Kubelka-Munk model on the optical characterization of translucent dental zirconia[J]. *Mater Chem Phys*, 2021, 258: 123994.
- [32] Fathy SM, El-Fallal AA, El-Negoly SA, et al. Translucency of monolithic and core zirconia after hydrothermal aging[J]. *Acta Biomater Odontol Scand*, 2015, 1(2/3/4): 86-92.
- [33] Lu Y, Wang L, Dal Piva AMO, et al. Influence of surface finishing and printing layer orientation on surface roughness and flexural strength of stereolithography-manufactured dental zirconia[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2023, 143: 105944.
- [34] dos Santos Calderon P, Kogawa EM, Lauris JRP, et al. The influence of gender and bruxism on the human maximum bite force[J]. *J Appl Oral Sci*, 2006, 14(6): 448-453.
- [35] Park JY, Jung YN, Jang KJ, et al. Effect of axis change on shrinkage rate of 3D-printed bioceramic zirconia fabricated via digital light processing[J]. *Biomimetics*, 2025, 10(3): 140.
- [36] Fu XS, Zou B, Xing HY, et al. Effect of printing strategies on forming accuracy and mechanical pro-

- perties of ZrO₂ parts fabricated by SLA technology [J]. *Ceram Int*, 2019, 45(14): 17630-17637.
- [37] Yu XH, Zhao YH, Wang ZG, et al. Microstructure formation mechanisms and property regulation methods during ceramic additive manufacturing[J]. *J Manuf Process*, 2024, 131: 1548-1564.
- [38] Zhai ZD, Qian C, Jiao T, et al. Zirconia specimens printed by vat photopolymerization: mechanical properties, fatigue properties, and fractography analysis [J]. *J Prosthodont*, 2024. doi: 10.1111/jopr.13942.
- [39] Mou ZW, Zhong JM, Wang F, et al. Zirconia crowns manufactured using digital light processing: effects of build angle and layer thickness on the accuracy [J]. *J Dent*, 2024, 151: 105359.
- [40] Osman R, Alharbi N, Wismeijer D. Build angle: does it influence the accuracy of 3D-printed dental restorations using digital light-processing technology[J]. *Int J Prosthodont*, 2017, 30(2): 182-188.
- [41] Xing HY, Zou B, Li SS, et al. Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO₂ ceramic components by laser scanning stereolithography[J]. *Ceram Int*, 2017, 43(18): 16340-16347.
- [42] 王亚宁, 张玉琪, 宋索成, 等. 氧化锆陶瓷扫描光固化成形与脱脂烧结工艺研究[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(3): 303-309.
- Wang YN, Zhang YQ, Song SC, et al. Laser stereolithography for zirconia ceramic fabrication and its debinding and sintering process[J]. *J Inorg Mater*, 2022, 37(3): 303-309.

(本文编辑 王姝)