

# 基于增材制造的口腔全瓷修复成型工艺研究进展与展望

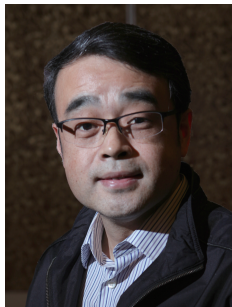


扫码阅读电子版

曹彦泽 魏洪波 董加一 蔡榕 李德华

军事口腔医学国家重点实验室, 口腔疾病国家临床医学研究中心, 陕西省口腔生物工程  
技术研究中心, 第四军医大学口腔医院种植科, 西安 710032

通信作者: 李德华, Email: lidehua@fmmu.edu.cn



李德华

**【摘要】** 全瓷修复相比金属和烤瓷修复具有明显优势, 临床应用广泛。以等材制造和减材制造为代表, 全瓷固定义齿的传统成型工艺发展较为成熟, 但仍有许多不足之处。随着科技的快速进步, 增材制造技术的出现正在改变口腔修复领域的传统制造模式, 已有很多学者尝试将其用于加工全瓷固定义齿。本文将简要阐述全瓷修

复成型工艺的技术现状和增材制造技术的原理及优势, 着重论述基于口腔修复用陶瓷材料的增材制造技术分类及工艺探索的相关进展。

**【关键词】** 增材制造; 全瓷; 口腔固定修复

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB1104100)

**引用著录格式:** 曹彦泽, 魏洪波, 董加一, 等. 基于增材制造的口腔全瓷修复成型工艺研究进展与展望[J/C/D]. 中华口腔医学研究杂志(电子版), 2020, 14(2):65-70.

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2020.02.001

## Research progress and prospective on processing techniques of all-ceramic restorations based on additive manufacturing

Cao Yanze, Wei Hongbo, Dong Jiayi, Cai Rong, Li Dehua

State Key Laboratory of Military Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & Shaanxi Engineering Research Center for Dental Materials and Advanced Manufacture, Department of Implantology, School of Stomatology, The Fourth Military Medical University, Xi'an 710032, China

Corresponding author: Li Dehua, Email: lidehua@fmmu.edu.cn

**【Abstract】** Compared with metal or metal-ceramic restorations, all-ceramic restorations embody eminent advantages, which have been widely applied in clinic. Characterized by equivalent manufacturing (EM) and subtractive manufacturing (SM), traditional processing techniques of all-ceramic fixed

dental prostheses (FDPs) have been well developed, but still remain defective. Rapid evolution of science and technology witnessed the changing of traditional manufacturing pattern of prosthetic dentistry (PD) with the emergency of additive manufacturing (AM), which has been utilized by many scholars to fabricate all-ceramic FDPs. This review briefly stated the current condition of processing techniques of all-ceramic restorations and the theory and advantages of AM, meanwhile, emphasized the categories and research progress of AM based on ceramic materials for PD.

**【Key words】** Additive manufacturing; Ceramics; Fixed dental prostheses

**Fund program:** National Key Research & Development (R & D) Plan Program(2017YFB1104100)

DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-1366.2020.02.001

全瓷修复体因具有良好的力学性能、优异的生物相容性、化学稳定性和美观性而应用广泛, 深受患者欢迎<sup>[1]</sup>。其传统成型工艺主要包括以铸造、粉浆涂塑为代表的等材制造和以数控切削成型为代表的减材制造<sup>[2-3]</sup>。然而, 两种成型工艺仍存在许多技术问题难以解决。等材制造成型工艺数字化程度较低; 减材制造成型工艺难以加工微小结构, 成型精度提升有限, 且刀具铣削易造成表面微裂等缺陷, 对成型质量影响较大, 铣削过程还存在严重的材料浪费现象。

相比传统成型工艺, 增材制造(additive manufacturing, AM)的独特理念和技术特点尤为适合制作具有复杂曲面结构的各类修复体, 其中金属与树脂AM技术发展较早, 已成功打印出金属固定义齿与树脂过渡义齿, 而陶瓷AM技术因发展较晚尚未在打印全瓷修复体方面展开全面研究。本文就全瓷修复成型工艺的现状, AM的技术原理及优势, 基于口腔修复用陶瓷材料的AM技术分类及工艺探索的

相关进展进行深入探讨。

### 一、全瓷修复成型工艺的技术现状

全瓷修复体的传统成型工艺分为等材制造和减材制造,前者主要包括铸造法、热压铸法、粉浆涂塑法等<sup>[4]</sup>,主要适用于玻璃陶瓷和氧化铝陶瓷的加工,但环节繁琐,耗费人力,误差易因手工制作和加工环节增多而累积;后者为数控切削成型,或称计算机辅助设计与制作(CAD-CAM)切削法<sup>[5]</sup>,自20世纪90年代发展至今,已经成为主流工艺之一,可加工氧化铝和氧化锆,不但节省人力,还缩短了加工周期,使得全瓷修复体的力学性能得到明显提升。CAD-CAM切削的全瓷坯料有部分烧结和完全烧结两种形式<sup>[6]</sup>。部分烧结坯料切削后仍需烧结成型,烧结产生的各向收缩需要得到有效补偿;完全烧结坯料切削后不需烧结成型,但刀具磨损最为严重,产生的微裂纹也会减少修复体的使用寿命。同时,加工过程中需考虑铣削的同轴性、轨迹的连贯性、刀具的直径形态与磨损量等因素,避免出现过切、倒凹和结构精度不足等现象,大大增加了核心算法优化与铣削设备研发的难度,造成微小结构难以加工,加工精度和结构表现力的提升有限。此外,该工艺材料浪费问题突出,文献报道浪费率在70%以上,甚至高达90%<sup>[7]</sup>,使加工成本居高不下。而支撑结构的后期拆除和调磨,也相对增加了操作时间。

### 二、增材制造的技术原理及优势

AM是一类新兴的制造技术,2009年美国材料与试验协会(American Society for Testing Material, ASTM)成立的AM技术委员会F42对AM技术的定义:与减材制造相反,采用逐层堆叠材料的方法,将三维模型数据加工成实物的过程<sup>[8]</sup>。AM的基本原理可以概括为以数字化三维模型为基础,通过切片软件对三维数据进行切分降维,形成多个离散化的二维平面数据,再利用快速成型(rapid prototyping, RP)设备,分层堆积,叠加成型,快速制作出三维实物。AM是一种“从无到有,由少至多”的RP技术<sup>[9]</sup>,也称为广义上的3D打印(three dimensional printing, 3DP)。

AM具有加工周期短、生产成本低的效益优势和个性产品定制、复杂结构加工的制造优势,可实现复杂结构物体的快速成型与快速开发。在成本控制方面,与数控切削成型材料浪费严重,且剩余坯料无法重复利用相比,全瓷AM技术的材料利用率高,且未加工的坯料可以重复利用,一旦规模化

应用可大幅降低生产成本。在打印精度和结构表现力方面,全瓷AM技术可以通过控制光斑直径(或喷射直径)、能量密度等打印参数,以及调整原料的粒径、均一性和粘度等表征获得极高的打印精度,能够清晰锐利地再现点线角及尖窝沟嵴等表面几何结构。同时,全瓷AM技术避免了数控切削成型复杂的铣削轨迹与刀具磨损带来的精度下降问题。在口腔修复领域个性化修复体的设计制作与临床应用中展现出广阔的前景。

### 三、基于口腔修复用陶瓷材料的增材制造技术分类及工艺探索

为了规范AM技术的相关术语及分类,ASTM和国际标准化组织相继制定了一系列标准,如ASTM F2792-12,ISO/ASTM 52900:2015以及ISO 17296-2:2015标准。根据成型原理的不同将AM技术划分为七大基本类别,即粘接剂喷射(Binder Jetting)、定向能量沉积(Directed Energy Deposition)、材料挤出(Material Extrusion)、材料喷射(Material Jetting)、粉末床熔融(Powder Bed Fusion)、薄片叠层(Sheet Lamination)与立体光固化(Vat Photopolymerization),我国GB/T 35351-2017和GB/T 35021-2018标准沿用了这一分类<sup>[10]</sup>。目前,文献报道的基于口腔修复用陶瓷材料的AM技术分类包括粘接剂喷射,粉末床熔融和立体光固化,具体技术特点、技术优势与缺陷见表1<sup>[11-15]</sup>,可利用氧化铝和氧化锆作为打印原料<sup>[16]</sup>。

1. 粘接剂喷射:主要包括3DP和直接喷墨打印(direct inkjet printing, DIP)等。目前,文献报道仅DIP能够制作全瓷修复体,也有学者将这种技术归类为液滴直写成型(Droplet-based Direct Ink Writing)<sup>[17]</sup>。该技术采用将含有陶瓷粉末的悬浮液直接喷射成型的方法,工艺流程为先把陶瓷粉末、分散剂、粘接剂、表面活性材料等成分按比例混合制成陶瓷悬浮液,即“陶瓷墨水”<sup>[18]</sup>,再通过喷嘴按预先设定的程序喷射至工作台面,逐层沉积,从而打印出三维实物,且需经过脱脂烧结等后处理最终成型。

通过DIP工艺已经制得了微米和毫米级别的三维陶瓷结构<sup>[19]</sup>。DIP工艺通过调整陶瓷墨水的固相含量与陶瓷粉末的粒径等因素,可使制备的陶瓷产品具有较高的致密度与良好的力学性能。Ebert等<sup>[11]</sup>用27%固相含量的氧化锆悬浮液和改良的间歇式(drop-on-demand)喷墨打印设备制作了试件和单冠,经烧结后,试件相对致密度达96.9%,弯曲强度(763 MPa)和断裂韧性(6.7 MPam<sup>0.5</sup>)与冷等静压

表1 基于口腔修复用陶瓷材料的增材制造技术<sup>[11-15]</sup>

技术分类	技术特点	技术优势	技术缺陷
直接喷墨打印(DIP)	经喷嘴喷射含粘接剂的陶瓷悬浮液	成品致密度较高,力学性能较好;材料利用率高;打印速度快;无支撑设计	悬浮液不稳定,喷嘴易堵塞,成型精度与质量难控制,成型周期有不确定性
选择性激光烧结(SLS)	CO <sub>2</sub> 激光烧结含粘接剂的陶瓷粉末	材料利用率高,选材广	成品致密度不足,表面质量差,工艺处理复杂
选择性激光熔化(SLM)	Nd:YAG激光直接熔化陶瓷粉末	成品致密度较高,材料利用率高,无需脱脂烧结	结构稳定性欠佳,表面质量差,工艺处理复杂
激光扫描式立体光刻(LSSL)	紫外激光点光源固化含光敏树脂的陶瓷浆料	成型精度与表面质量极佳,成品致密度与力学性能优良,材料利用率高	打印速度较慢,成型周期有不确定性
面曝光式立体光刻(MPSL)	紫外光LED面光源固化含光敏树脂的陶瓷浆料	打印速度较快,成品致密度与力学性能优良,材料利用率高	翘曲变形现象较为明显,成型精度与表面质量有待提高,成型周期有不确定性

(cold isostatic pressing)处理的氧化锆相当,但可观察到冠表面存在亚微米级的孔隙缺陷,分析为喷嘴干燥或悬浮液颗粒团聚造成的喷嘴堵塞导致,在悬浮液的配比与制备、喷射系统的组成配置等方面仍需进一步优化。Özkol等<sup>[20]</sup>继而采用热喷墨打印系统从悬浮液粒径分布、Zeta电位等因素对固相含量22%和27%的陶瓷悬浮液进行了研究,初步研制出了可用于稳定打印的氧化锆悬浮液,打印成型的单冠无孔隙、裂纹等缺陷,但未涉及修复体的精度与适合性研究,难以明确评价该工艺临床应用的可行性。

基于陶瓷材料的DIP技术具有便于控制成份和显微结构,无需单独设计打印支撑,材料利用率高,成本低和打印时间短等优势,但存在陶瓷悬浮液不稳定,喷嘴喷射效果不佳等技术难题,对加工精度及成型质量影响较大,相关研究尚需深入。

2. 粉末床熔融:包括选择性激光烧结(selective laser sintering, SLS)、选择性激光熔化(selective laser melting, SLM)和电子束熔化(electron beam melting, EBM)等<sup>[21]</sup>。基于口腔修复用陶瓷材料的SLS和SLM的实验研究已逐渐展开。

(1)SLS:也称选区激光烧结,其原理与三维印刷有相似之处,但是将喷射粘接剂改为照射激光束。该工艺先将陶瓷粉末与有机物材料或粘接剂按比例混合。其中有机物材料的熔点低于陶瓷粉末,熔化时可充当粘接剂。再用压辊在工作台面平铺粉末,预热后按设定参数照射CO<sub>2</sub>激光束,受照射的粘接剂受热熔化将陶瓷粉末粘接。之后逐层重复上述环节,得到陶瓷坯体,再经烧结等后处理完成最终成型<sup>[22]</sup>。

目前,文献报道采用该技术打印出的陶瓷成品致密度较低,且易产生表面粘粉、孔隙与裂纹等缺陷。

Shahzad等<sup>[23]</sup>通过溶解-析出法制备了氧化铝与聚酰胺的粉末状复合物,经过激光烧结与脱脂烧结后得到了表面无缺陷的试件与单冠,该研究提出的粉末制备工艺具有一定的可行性,但成品的致密度仅为理论密度的50%。随后,Shahzad等<sup>[12]</sup>对SLS技术制作出的氧化锆标准试件采用温等静压(warm isostatic pressing)处理,虽使试件的相对致密度达到92%,但出现了表面裂纹,且线性收缩率高达30%~50%。

(2)SLM:也称选区激光熔化,与SLS的原理相似,不同点在于该技术的打印原料直接采用陶瓷粉末,同时使用输出功率更高,光斑直径更小的Nd:YAG激光器作为光源,经照射可使陶瓷粉末快速熔融,并快速冷却凝固成型,无需后处理阶段的再次脱脂烧结。

该技术打印成型的陶瓷成品在致密度与力学性能方面较SLS有所提高,但表面质量较差,存在表面裂纹与粘粉等技术难题亟待解决。德国研究者Wilkes等<sup>[13]</sup>采用CO<sub>2</sub>激光器预热氧化铝和氧化锆混合粉末床,Nd:YAG激光束进行熔融,获得含有 $\alpha$ -氧化铝与四方晶相氧化锆的两相组织结构的三单位固定桥支架坯体,虽然致密度达100%,弯曲强度高于500 MPa,但坯体表面光洁度差,结构稳定性欠佳,当成型高度大于3 mm时表面出现裂纹。

SLS与SLM技术具有材料利用率高、选材广、成本低的优势,但涉及的工艺处理较复杂,成品的性能不足,存在众多难以解决的问题。未来应从陶瓷粉末的制备与铺设,激光能量密度、扫描速度与路径等工艺参数,激光能量与粉末颗粒的相互作用<sup>[24]</sup>,以及抑制裂纹产生及扩展<sup>[25]</sup>,减少残余应力等多环节多因素进行分析与优化。

3. 立体光固化:也称立体光刻(stereolithography, SL),与DIP、SLS和SLM技术相比,是目前研究最

为深入与广泛,也是最具临床应用潜力的全瓷AM技术。根据光源与曝光方式不同分为激光扫描式立体光刻(laser scanning stereolithography, LSSL)与面曝光式立体光刻(mask projection stereolithography, MPSL)。

(1)LSSL:其成型原理<sup>[26]</sup>可简要概括为将陶瓷粉末与包含光敏树脂单体,光引发剂和光分散剂等在内的一系列成分按比例混合制备成打印浆料;按照切片软件的参数,逐层铺设打印原料并接受特定波长的点光源(一般为紫外激光光束)照射,激光光束按设定的轨迹与扫描速度对每层照射,光敏树脂发生聚合反应而固化,将陶瓷粉末紧密粘合,起到了粘接剂的作用,之后工作台面下降一个层厚,送料装置在已固化层上充填并铺平打印原料形成下一分层,经点光源再次照射固化,重复以上步骤直至完成全部分层的打印;再将打印成型的陶瓷坯体清洗干燥,脱脂烧结,得到最终的陶瓷成品。

LSSL技术具有极佳的打印精度,打印成品的力学性能与表面质量优良,致密度高。法国3D Ceram公司率先使其商业化,许多学者对该技术打印全瓷修复体进行了较为深入的研究。Lian等<sup>[14]</sup>用国产LSSL设备制作了标准试件,相对致密度达到98.58%。Wang等<sup>[27]</sup>对3D Ceram公司LSSL设备制作的氧化锆单冠进行了三维精度分析,参照学者Kim等<sup>[28]</sup>的方法将单冠划分不同区域分别测量,外表面与内表面精度分别达到 $(53 \pm 9)$ 和 $(38 \pm 12)$   $\mu\text{m}$ ,与CAD-CAM切削法制作的单冠相比差异无统计学意义,基本满足临床应用的要求。王文俊等<sup>[29]</sup>对采用国产LSSL设备加工的氧化锆试样的细胞毒性、弯曲强度和单冠的边缘及内部适合性进行了检测,结果显示无明显细胞毒性,弯曲强度 $[(962.64 \pm 83.02)$  MPa]可满足临床要求,边缘间隙值 $[(109.33 \pm 26.79)$   $\mu\text{m}$ ]基本达到临床可接受的120  $\mu\text{m}$ ,但殆面间隙值 $[(149.12 \pm 45.75)$   $\mu\text{m}$ ]较大,提示工艺的成型精度有待提升。

(2)MPSL:又称数字光处理(digital light processing, DLP)或数字光投影。其基本原理与LSSL类似,不同的是采用了紫外光LED面光源而非点光源。该法依据切片软件生成具有截面图形的切片数据,经过计算生成数字掩膜,再利用面光源对每一层陶瓷浆料进行照射,形成设定的截面视图,从而一次性实现整层固化。之后工作台面下降一个层厚,进行下一层的固化,循环往复最终完成

打印。数字微镜器件(digital micromirrors device, DMD)<sup>[30]</sup>作为数字光处理的核心,通过微镜阵列能够精确调控入射、出射光线,以及曝光时间和光照强度等参数,将数字掩膜投射于陶瓷打印材料表面,控制成型过程。

MPSL技术同样受到了众多学者的关注。奥地利Lithoz公司将该技术商业化,称之为LCM(Lithography Based Ceramic Manufacturing)。Dehurtevent等<sup>[15]</sup>对不同固相含量与粒径的氧化铝浆料采用DLP技术制作的标准试件进行了性能表征的研究,试件的致密度达96%~99%,弯曲强度达270~360 MPa,初步满足ISO 6872:2008牙科陶瓷材料标准的要求,但利用该技术试制的单冠基底肉眼可见残留的支撑且边缘间隙较明显,对支撑结构设计和各向异性收缩控制有待进一步优化。Li等<sup>[31]</sup>利用DLP技术制作了前牙区四单位氧化锆固定桥,结果存在修复体表面裂纹、空隙等缺陷,以及支撑较难去除等技术难题,需对打印原料的制备、支撑设计和脱脂烧结等环节进行优化。Lian等<sup>[32]</sup>采用三段式辅助支撑设计的DLP技术制作了后牙区氧化锆三单位固定桥,并对两个位点的边缘间隙进行了测量,仅为710和440  $\mu\text{m}$ ,未能达到临床要求。该研究针对支撑优化提出了创新性的设计,但支撑全部位于咬合面,后处理去除支撑则可能对解剖结构造成破坏,仍需对支撑的形式、数目与位置进行更为深入的研究。

LSSL采用点光源,由点-线-面-体的顺序逐步引发固化,局部升温较低,热膨胀小,不易引起材料的翘曲变形,但打印速度较慢;而MPSL因使用面光源,对打印层一次曝光成型,打印速度较快,但存在局部升温较高,因热效应引发的翘曲变形现象更为明显。工艺优化应综合考虑切片算法、扫描速度与轨迹,以及光源的能量密度等因素。此外,立体光刻技术还面临如何优化支撑和控制收缩等共性问题。

目前,支撑设计普遍采用了接触式支撑结构,而创新性的非接触式支撑结构<sup>[33]</sup>,即非接触基底固化,接触间隙不固化,使支撑易去除,不造成表面损伤的支撑形式,不但为支撑设计提供了崭新的研究思路,也进一步提升了生产效率,简化了后处理操作。

后处理阶段中的脱脂与烧结过程是产生收缩并耗时较长的关键环节。目前脱脂过程多采用热脱脂法<sup>[14-15,20]</sup>,通过间歇性梯度升温方式将坯体中除陶瓷外的添加成分挥发或裂解排出。而烧结过程

通常采用常压烧结法使脱脂后的坯体致密化。两个过程总耗时十几甚至几十小时,且易产生表面结构剥脱、开裂和尺寸收缩过大等问题。通过调整脱脂与烧结过程的温度曲线等工艺参数,较好地解决了表面质量与尺寸精度问题,但耗时较长的问题仍未得到显著改善。随着新型脱脂工艺<sup>[34]</sup>(如溶剂脱脂等)和烧结工艺<sup>[35]</sup>(如电等离子烧结和冷烧结等)的出现,有望在缩短时长与精度控制等方面取得新的进展。

#### 四、展望

基于口腔修复用陶瓷材料的AM技术,特别是LSSL所具有的高精度、高质量成型等技术特点与优势展现出了巨大的临床应用潜力。目前,该类技术的研究仍处于体外实验阶段,虽然已有学者用国外设备和材料进行了打印氧化锆全瓷修复体的可行性研究,并评价了成型精度与密合性,但是国外垄断打印设备、支撑策略及材料的成分配比,使得陶瓷AM技术无法在口腔医学领域普及推广,以临床应用为方向的工艺探索仍存在许多问题亟需解决。其中,粘接剂喷射技术应着重优化悬浮液制备工艺与喷射系统,粉末床熔融技术则应针对粉末制备与预处理,以及激光烧结/熔化的关键参数等多环节多因素进行优化和简化。对于立体光刻,针对现有切片算法的离散化处理和STL(Surface Tessellation Language)格式文件的特点,应探索更加先进普适的算法及文件格式,避免打印台阶效应对表面形态的不利影响。其次,应对紫外光的固化参数进行深入优化,并从原料表征入手,消除热效应引起的变形现象,进一步提高打印速度与打印精度。最后,应探究新型支撑设计与脱脂烧结工艺,解决表面缺陷、尺寸偏差等问题,进一步缩短后处理周期。随着工艺的发展与突破,基于口腔修复用陶瓷材料的AM技术有望实现国产化自主研发与标准化临床应用,成为全瓷修复等减材制造技术的替代方案。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参 考 文 献

- [1] Butt K, Thanabalan N, Ayub K, et al. Demystifying Modern Dental Ceramics[J]. Prim Dent J, 2019, 8(3): 28-33. DOI: 10.1308/205016819827601527.
- [2] 周安亮,王德成,屈贤明. 基于历史发展的等材制造智能化趋势研究[J]. 机电产品开发与创新, 2018, 31(2): 10-12. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2018.02.004.
- [3] Lu B, Li D, Tian X. Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing[J]. Engineering, 2015, 1(1): 85-89. DOI: 10.15302/J-ENG-2015012.
- [4] 赵信义. 全锆冠桥修复热点问题浅析[J]. 口腔材料器械杂志, 2018, 27(1): 1-6. DOI: 10.11752/j.kqcl.2018.01.01.
- [5] Rodrigues SB, Franken P, Celeste RK, et al. CAD/CAM or conventional ceramic materials restorations longevity: a systematic review and meta-analysis [J]. J Prosthodont Res, 2019, 63(4): 389-395. DOI: 10.1016/j.jpor.2018.11.006.
- [6] Uçar Y, Aysan Meriç I, Ekren O. Layered Manufacturing of Dental Ceramics: Fracture Mechanics, Microstructure, and Elemental Composition of Lithography-Sintered Ceramic [J]. J Prosthodont, 2019, 28(1): e310-e318. DOI: 10.1111/jopr.12748.
- [7] Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, et al. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry [J]. J Prosthodont, 2017, 26(2): 156-163. DOI: 10.1111/jopr.12510.
- [8] American Society for Testing Material (ASTM). ASTM F2792-12 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies [S]. DOI: 10.1520/F2792-12.
- [9] Shah S, Ashok V, Ganapathy D. Comparative evaluation of rapid prototyping and computer-aided milling in prosthodontics - A review[J]. Drug Invention Today, 2019, 12(5): 1040-1043.
- [10] 陈为平,林有希,黄捷,等. 3D打印发展现状分析及展望[J]. 工具技术, 2019, 53(8): 10-14. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7008.2019.08.002.
- [11] Ebert J, Ozkol E, Zeichner A, et al. Direct inkjet printing of dental prostheses made of zirconia[J]. J Dent Res, 2009, 88(7): 673-676. DOI: 10.1177/0022034509339988.
- [12] Shahzad K, Deckers J, Zhang Z, et al. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering [J]. J Eur Ceram Soc, 2014, 34(1): 81-89. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.023.
- [13] Wilkes J, Hagedorn YC, Meiners W, et al. Additive Manufacturing of ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Components by Selective Laser Melting [J]. Rapid Prototyp J, 2013, 19(1): 51-53. DOI: 10.1108/1352541311292736.
- [14] Lian Q, Sui W, Wu X, et al. Additive manufacturing of ZrO<sub>2</sub> ceramic dental bridges by stereolithography [J]. Rapid Prototyping J, 2018, 24(1): 114-119. DOI: 10.1108/RPJ-09-2016-0144.
- [15] Dehurtevent M, Robberecht L, Hornez JC, et al. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing[J]. Dent Mater, 2017, 33(5): 477-485. DOI: 10.1016/j.dental.2017.01.018.
- [16] Chen Z, Li Z, Li J, et al. 3D printing of ceramics: A review[J]. J Eur Ceram Soc, 2019, 39(4): 661-687. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013.
- [17] Lewis JA, Smay JE, Stuecker J, et al. Direct Ink Writing of Three Dimensional Ceramic Structures [J]. J Am Ceram Soc, 2006, 89(12): 3599-3609. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.01382.x.
- [18] Chia HN, Wu BM. Recent advances in 3D printing of biomaterials

- [J]. *J Biol Eng*, 2015,9(1):4. DOI:10.1186/s13036-015-0001-4.
- [19] 纪宏超,张雪静,裴未迟,等. 陶瓷3D打印技术及材料研究进展[J]. *材料工程*, 2018,46(7):19-28. DOI:10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000084.
- [20] Özkol E, Halloran J. Rheological Characterization of Aqueous 3Y-TZP Inks Optimized for Direct Thermal Ink - Jet Printing of Ceramic Components[J]. *J Am Ceram Soc*, 2013,96(4):1124-1130. DOI:10.1111/jace.12285.
- [21] Wei X, Li X, Wen S, et al. Channel design for 3D models with applications in powder - bed additive manufacturing [J]. *Rapid Prototyp J*, 2019,25(9):1536-1544. DOI:10.1108/RPJ-06-2018-0156.
- [22] 李亚运,司云晖,熊信柏,等. 陶瓷3D打印技术的研究与进展[J]. *硅酸盐学报*, 2017,45(6):793-805. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.2017.06.07.
- [23] Shahzad K, Deckers J, Boury S, et al. Preparation and indirect selective laser sintering of alumina/PA microspheres [J]. *Ceram Int*, 2012,38(2):1241-1247. DOI:10.1016/j.ceramint.2011.08.055.
- [24] Sing SL, Yeong WY, Wiria FE, et al. Direct selective laser sintering and melting of ceramics: a review [J]. *Rapid Prototyp J*, 2017,23(3):611-623. DOI:10.1108/rpj-11-2015-0178.
- [25] Zheng Y, Zhang K, Liu TT, et al. Cracks of alumina ceramics by selective laser melting [J]. *Ceram Int*, 2019,45(1):175-184. DOI:10.1016/j.ceramint.2018.09.149.
- [26] Xing H, Zou B, Li S, et al. Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D printed ZrO<sub>2</sub> ceramic components by laser scanning stereolithography [J]. *Ceram Int*, 2017,43(18):16340-16347. DOI:10.1016/j.ceramint.2017.09.007.
- [27] Wang W, Yu H, Liu Y, et al. Trueness analysis of zirconia crowns fabricated with 3 - dimensional printing [J]. *J Prosthet Dent*, 2019,121(2):285-291. DOI:10.1016/j.prosdent.2018.04.012.
- [28] Kim C, Kim S, Kim J, et al. Trueness of milled prostheses according to number of ball-end mill burs [J]. *J Prosthet Dent*, 2016,115(5):624-629. DOI:10.1016/j.prosdent.2015.10.014.
- [29] 王文俊,钱超,阿地力江·依米提,等. 立体光固化快速成型氧化锆全瓷冠的实验研究[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2018,19(5):257-261. DOI:10.3969/j.issn.1009-3761.2018.05.002.
- [30] Aznarte Garcia E, Qureshi AJ, Ayranci C. A study on material-process interaction and optimization for VAT-photopolymerization processes [J]. *Rapid Prototyp J*, 2018,24(9):1479-1485. DOI:10.1108/RPJ-10-2017-0195.
- [31] Li H, Lu S, Sun J, et al. Dental ceramic prostheses by stereolithography - based additive manufacturing: potentials and challenges [J]. *Adv Appl Ceram*, 2019,118(1-2):30-36. DOI:10.1080/17436753.2018.1447834.
- [32] Lian Q, Wu X, Li D, et al. Accurate printing of a zirconia molar crown bridge using three - part auxiliary supports and ceramic mask projection stereolithography [J]. *Ceram Int*, 2019,45(15):18814-18822. DOI:10.1016/j.ceramint.2019.06.111.
- [33] 周宏志,梁银生. 一种用高粘度材料进行三维打印的随形制作方法:中国,CN109551758A[P]. 2019-04-02.
- [34] Cano S, Gonzalez - Gutierrez J, Sapkota J, et al. Additive manufacturing of zirconia parts by fused filament fabrication and solvent debinding: Selection of binder formulation [J]. *Addit Manuf*, 2019,26:117-128. DOI:10.1016/j.addma.2019.01.001.
- [35] 谢志鹏,许靖堃,安迪. 先进陶瓷材料烧结新技术研究进展[J]. *中国材料进展*, 2019,38(9):821-830. DOI:10.7502/j.issn.1674-3962.201906007.

(收稿日期:2019-12-16)

(本文编辑:王嫚)