

空心叶片铸造用陶瓷型芯的 3D 打印及性能调控研究进展

许西庆^{1,3}, 杨永康¹, 李 杰¹, 李 鑫², 郭亚杰¹, 牛书鑫², 胡永彪³(1. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710061; 2. 北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095;
3. 长安大学工程机械学院, 西安 710061)

摘 要: 陶瓷型芯在航空发动机空心涡轮叶片的熔模铸造中起到关键作用。3D 打印技术作为新一代的成型技术, 具有无需模具、制造周期短、精度高等优点, 正在逐渐替代传统的陶瓷型芯制备工艺。本文总结了光固化技术、选择性激光烧结、直写成型技术和分层挤出成型等目前在陶瓷型芯领域使用较多的 3D 打印技术, 针对 3D 打印陶瓷型芯打印精度低、力学性能与气孔率适配性差、结构性能各向异性等局限性探讨了性能优化研究现状, 并对该领域的发展进行了展望。

关键词: 陶瓷型芯; 3D 打印技术; 光固化技术; 打印精度; 力学性能; 各向异性

中图分类号: TG156 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)06-1583-12

网络出版时间: 2023-05-16



Research Progress on 3D Printing and Performance Optimization of Ceramic Cores for Hollow Blade Casting

XU Xiqing^{1,3}, YANG Yongkang¹, LI Jie¹, LI Xin², GUO Yajie¹, NIU Shuxin², HU Yongbiao³

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Ceramic cores have an impact on the precious casting of the engine hollow blades. 3D printing technology, as a novel generation of molding technology, is replacing the conventional ceramic core manufacture process due to the advantages of no mold, short manufacturing cycle, and high accuracy. This review summarized the existing 3D printing technologies for ceramic cores such as light-curing technology, selective laser sintering, direct-write forming technology and layered extrusion, and discussed the current research work on the performance optimization for ceramic cores prepared by 3D printing based on their shortcomings (i.e., low printing accuracy, poor compatibility between mechanical property and porosity, and anisotropy in structure and property). In addition, the future development of this technology was also prospected.

Keywords: ceramic cores; 3D printing; light curing technology; printing accuracy; mechanical properties; anisotropy

随着航空航天事业的快速发展和航空发动机推重比的提高, 发动机涡轮燃气温度不断升高, 叶片的耐温性能成为关键。受各种合金熔点的限制, 现有发动机叶片的承温能力已经达到极限, 为了提高发动机的散热能力, 叶片的内腔冷却结构越来越复杂^[1-5]。熔模铸造(如图 1 所示^[6])是获得精确内腔结构的理想方法, 陶瓷型芯在涡轮叶片熔模铸造中提供精密、复杂内腔, 是制备叶片内腔结构不可或缺

的转接件。随着航空发动机对涡轮叶片性能和精密要求提高, 传统的制造方法如注射成型法^[7]、热压注法^[8]和凝胶铸模法^[9]等陶瓷型芯制备技术因烧成率低、生产时间长、成本高等缺点^[10], 已经难以满足发动机叶片的发展需求(如表 1 所示), 急需新的成型技术来替代传统的陶瓷型芯制备方法。

3D 打印技术为陶瓷型芯制备提供了新的途径。3D 打印, 又称为增材制造, 是一种快速成型技术,

收稿日期: 2023-03-23。 修订日期: 2023-04-10。

基金项目: 国家自然科学基金(52102062); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102313204)。

第一作者: 许西庆(1990—), 男, 博士, 副教授。

Received date: 2023-03-23. Revised date: 2023-04-10.

First author: XU Xiqing (1990—), male, Ph.D., Associate Professor.

E-mail: xiqingxu@chd.edu.cn

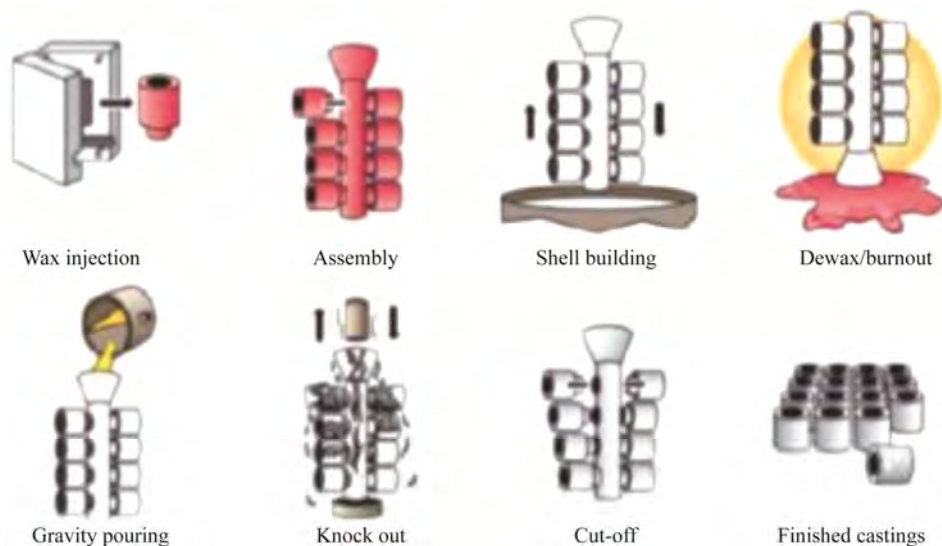


图 1 熔模精密铸造流程图^[6]
Fig. 1 Flow chart of investment casting^[6]

表 1 传统工艺制备陶瓷型芯

Table 1 Preparation of Ceramic Core by Traditional Processes

Molding process	Process characteristics	Advantage	Disadvantage
Injection moulding	Ceramic powder is added with molten plasticizer to form ceramic slurry, and then the molten slurry is injected into the closed mold cavity with the help of the thrust of a screw	Can shape complex parts with high dimensional accuracy and uniform microstructure	There are insufficient injections, cavities, hidden seams, and external collapses, and the degreasing process is cumbersome
Hot press injection method	Preparation of ceramic core slurry using thermoplastic materials as plasticizers, followed by hot pressing injection molding	Beneficial for casting ceramic cores with complex structures and high dimensional accuracy	Heating and providing pressure are required during slurry pouring, and the process is complex
Gel casting	By preparing a slurry with low viscosity and high solid content, the organic monomers in the slurry are polymerized to solidify the slurry <i>in situ</i>	The process is simple and convenient, and the prepared green body has high strength and good uniformity	Introducing a large amount of toxic organic compounds that pose a threat to the environment during the preparation process
Grouting forming	Adding a coagulant to the ceramic slurry, injecting it into the mold, and then self curing	Simple process, easy to operate	Difficulty in preparing cores with complex shapes and high accuracy

以数字模型文件为基础,把复杂的三维制造转化为一系列的二维面上的叠加,使用电脑自动化的控制材料由点-线-面-体逐渐制造成型所需的物体^[11–16]。3D 打印技术最早起源于美国,当前世界上公认的第一台商业应用的 3D 打印机是由美国 Charles Hull 先生在 1986 年发明的 stereo lithography apparatus, 简称 SL^[17]。经过几十年的快速发展,3D 打印新工艺和新设备不断涌现,应用领域不断拓展,在航空航天事业中发挥着越来越重要的作用。相较于传统的陶瓷型芯制备方法,3D 打印技术可制备更高精度和更复杂结构的型芯,且不需要制造模具,制造周期明显减短,降低了生产成本,很好的弥补了传统制备工艺的不足^[18]。

根据不同的原料形式,3D 打印技术分为浆料基、粉末基和块状固体基,如表 2 所示。基于浆料

的 3D 打印技术有:光固化技术(SL、DLP)、喷墨打印技术(IJP)和直写成型技术(DIW);基于粉末的 3D 打印技术有:三维打印成型技术(3DP)、选择性激光烧结(SLS)和选择性激光熔化(SLM);基于块状固体的 3D 打印技术有:分层实体制造技术(LOM)和熔化沉积成型技术(FDM)。

本文旨在对陶瓷型芯领域应用较多的 3D 打印技术进行总结与讨论,针对现有缺点探讨 3D 打印陶瓷型芯性能优化的研究进展,对该领域发展进行展望。

1 用于陶瓷型芯的 3D 打印技术分类

1.1 光固化技术

光固化技术是以陶瓷粉末和光敏树脂为原料,同时加入消泡剂、分散剂等其他添加剂,经球磨制备得到陶瓷浆料,使用光固化打印机将浆料打印成

表 2 3D 打印技术的分类及特点

Table 2 Classification and characteristics of 3D printing technology

Raw material	Method	Material	Process characteristics	Advantage	Disadvantage	Accuracy
Based on powder	SLS (selective laser sintering),	Compacted fine powder, metal	Use a roller press to press ceramic powder into thin layers, use a carbon dioxide laser for selective sintering, and stack layer by layer	High resolution	Multiple defects	80–250 μm
	SLM (selective laser melting)	alloy partial polymer				
Based on blocky solids	FDM (fused deposition modelling)	Thermoplastic polymers, fiber reinforced polymers	Send the filamentous material to a nozzle device with a heating device that can be moved. The material is heated and melted at the nozzle outlet, and then printed layer by layer according to the designed digital model	Low cost, high-speed	Poor mechanical properties and limited raw materials	50–200 μm
LOM (laminated object manufacturing)		Polymer composite materials, ceramics, paper, and metal rolls	Use a laser cutter to cut ceramic materials into ceramic thin sheets according to the design pattern, and use adhesive to stack the ceramic thin sheets together, layer by layer to form a part	Fast and low-cost. Preparation of large structures	Difficulty in manufacturing complex structures	Depending on layer thickness
Based on slurry	IJP (ink-jet printing)	Particle suspension, ceramics, concrete, and soil	Spray the liquid phase material layer by layer onto the substrate in the form of droplets according to the digital model through a nozzle, and finally complete the printing process	Preparation of large structures and rapid printing	Low resolution, low interlayer adhesion	5–200 μm
SL (stereolithography), DLP (digital light processing)		Containing photosensitive monomer resin and hybrid polymer ceramics	UV irradiation of photosensitive resin slurry for selective curing, layer by layer stacking to create a three-dimensional structure	High resolution and quality	Slow speed and high cost	10 μm
DIW (direct ink writing)		High viscosity liquid or solid-liquid mixed slurry	Continuously apply pressure to the nozzle and continuously extrude the slurry, directly writing out the designed shape layer by layer until the part is printed and formed	Low equipment requirements, high molding, and flexible manufacturing	The accuracy is greatly affected by the nozzle diameter	Hundred micrometers to tens of micrometers

型芯坯体。用于陶瓷型芯制造的光固化技术主要包括立体光刻技术和数字光处理^[19–20]。

1.1.1 立体光刻技术(SL) 立体光刻技术是将陶瓷粉料和光敏树脂(其中包括单体、光引发剂等)混合均匀,通过特定波长的光源照射(一般为紫外光源)固化成型^[19–20],原理如图 2 所示,利用激发器发射紫外激光束,照射液槽中的液态光敏树脂,使光敏树脂迅速固化成型。成型开始时,工作台下降 1 个层厚高度,紫外激光束按照计算机的控制信息对截面轮廓扫描,扫描区域迅速固化打印出 1 个截面,层层叠加制造出三维结构模型。光固化过程是由点到线、线到面、逐层打印,因此可以制造出精度高、表面质量更好的陶瓷型芯。

Li 等^[21]使用 SL 技术制备了硅基陶瓷型芯,在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 烧结温度下硅基陶瓷型芯弯曲强度达到 12.1 MPa,并且通过控制打印参数和调节烧结工艺使型芯具有各向同性的机械性能。同时其还使用立

体光刻技术制备铝基陶瓷型芯坯体并在真空环境下烧结得到陶瓷型芯,研究发现真空烧结可在较低温度下实现与空气气氛高温烧结相同的弯曲强度,并在最佳真空烧结温度下制备的陶瓷型芯三维方向收缩率降低,表面粗糙度为 97.2 nm^[22]。

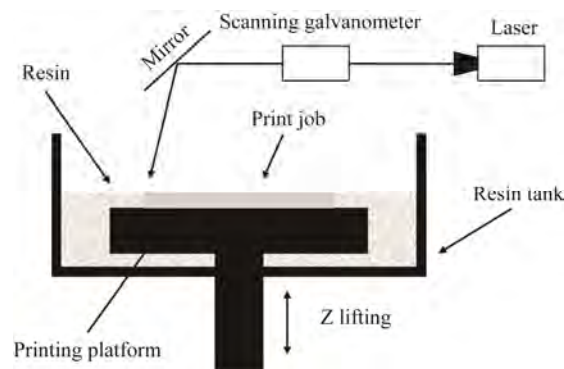


图 2 SL 技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of SLA technology

1.1.2 数字光处理技术(DLP) 数字光处理技术是在立体光刻技术的基础上提出的一种直接对陶瓷浆料的平面进行光固化,从而直接进行逐层累加成型的技术^[23–24],原理如图3所示,将配制好的树脂放入球磨搅拌机中,待搅匀后放入打印机的料槽中,调平,通过专业的软件设置好一系列的曝光参数,3个轴开始工作,待液面自流平后,紫外光曝光在打印平台上,其形状和尺寸都由计算机控制,层层叠加,直到最后1层完成。由于直接进行平面固化,省去了点到线、线到面的打印,显著节省了打印时间,并且提高了打印精密度,在制备复杂形状及高精度零部件上有很大优势,因此适用于陶瓷型芯的3D打印。

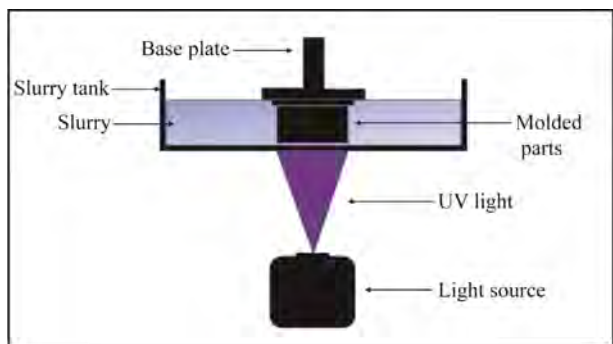


图3 DLP技术示意图
Fig. 3 Diagram of DLP technology

Liu等^[25]使用DLP技术成功制备铝基陶瓷型芯,并研究脱脂保温时间对陶瓷型芯性能的影响,发现脱脂保温时间的延长加强了层间的结合力,进而提高了陶瓷型芯的弯曲强度。Liang等^[26]使用数字光处理成功制备了高孔隙率和高弯曲强度的铝基陶瓷型芯,在1400℃烧结坯体获得了35.1%的孔隙率和20.3 MPa的弯曲强度。

1.2 选择性激光烧结技术(SLS)

选择性激光烧结原理如图4所示^[27],陶瓷粉料在工作台上被压成一定厚度的薄层,利用二氧化碳

激光束将粉末加热到接近熔点^[28–29],将粉末黏合在由设计确定的每层特定区域。颗粒自由分布于粉末床,每层完成时,由活塞控制下降高度进行下1层的烧结,逐层叠加直到零件打印完成。选择性激光烧结技术较其他3D打印技术制备的复杂零件性能好、更加耐用,不需要后固化,制备快速。

Kim等^[30]使用SLS技术成功制备了高强度、低热变性和热膨胀系数的叶片。此外,Wen等^[31]使用SLS和真空渗透相结合制备硅基陶瓷型芯,确定了最佳激光工艺参数和渗透时间,使硅基型芯在1550℃的高温蠕变和弯曲强度分别达到了0.31 mm和15.04 MPa,满足了制造空心叶片的要求。

1.3 直写成型技术(DIW)

直写成型技术是使用喷嘴挤压出各种尺寸的浆料,通过受程序控制的平台移动喷嘴将浆料直接一层一层写出设计的形状,直到零件打印成型^[32–33]。直写成型技术的原理如图5所示^[34],浆料挤出装置固定在Z轴上,由计算机控制运动,打印平台固定在XY平面上,平台按照软件生成的路径运动,同时喷头挤出浆料,完成打印后Z轴上升一定高度,逐层累加直到打印完成^[35]。

DIW具有制备均匀亚微米和纳米结构的致密陶瓷的能力,Xie等^[36]开发了一种组合方法,即勃姆石中添加羟乙基纤维素(HEC)的新型凝胶组合物以及聚乙二醇(PEG)和乙醇作为液体干燥剂的多步骤液体干燥剂,成功制备了平均晶粒尺寸为1 μm、理论密度为99%、弯曲强度为(380±45) MPa的致密氧化铝陶瓷零件。Edison等^[37]使用常用的陶瓷浆料进行DIW 3D打印,通过加入硅酸钠和聚丙烯酸钠两种不同的添加剂成功制备了陶瓷试样,评估了其DIW技术结合使用的潜力。

DIW技术对模具、激光、平版印刷掩模或工具要求较低,但对油墨的流变性能要求高,应具有足够高的固相含量、屈服应力和弹性模量,以确保挤出长丝保持形状和无变形桥接。Hossain等^[38]对

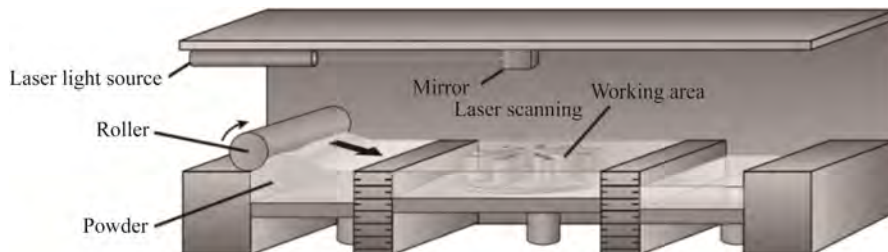
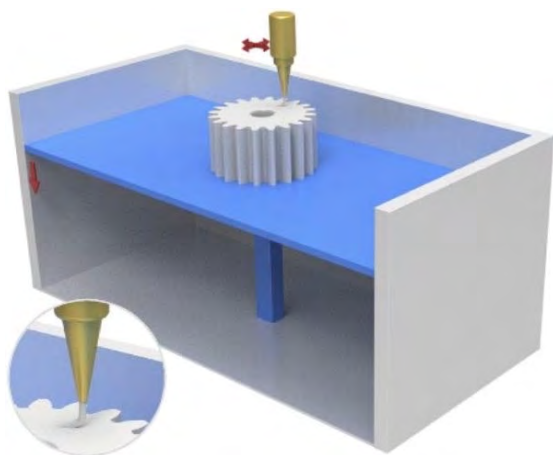


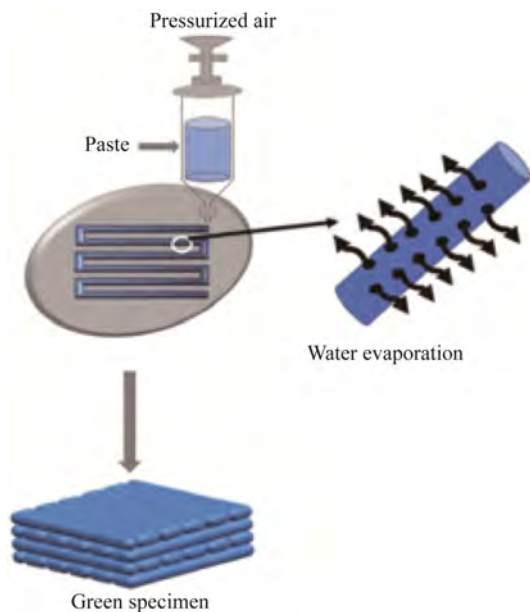
图4 SLS技术示意图^[27]
Fig. 4 Schematic diagram of SLS technology^[27]

图 5 DIW 技术示意图^[34]Fig. 5 Schematic diagram of DIW technology^[34]

比了多种油墨的流变性能, 选取最佳性能的油墨通过 DIW 制备陶瓷, 发现使用废弃稻壳灰(RHA)和 DIW 技术可以在低温下原位生成性能优异的莫来石陶瓷。Tang 等^[39]使用 DIW 制备铝基陶瓷型芯时掺杂了适量高岭土作为基体材料, PVP 分子和高岭土颗粒之间形成氢键, 形成空间网络增加了空间位阻和斥力, 有助于形成稳定浆料, 而不会结块或堵塞。

1.4 分层挤出成型技术(LEF)

分层挤出成型技术利用计算机控制系统以连续分层的方式沉积陶瓷浆料, 以生产形状复杂的致密陶瓷试样^[40]。LEF 的原理如图 6 所示, 将零件使用软件绘制出三维模型, 然后切片处理。把配置好的陶瓷浆料注入针筒注射器, 控制器控制三维平台按

图 6 LEF 技术示意图^[40]Fig. 6 Diagram of LEF technology^[40]

照预定轨迹运动, 同时控制挤出机挤出浆料在工作平台上沉积, 通过逐层沉积最终完成整个零件的成型^[41]。与其他成型技术相比, 分层成型技术成本更低, 可设计和制备复杂的陶瓷型芯且不需要采用昂贵的工具、模具和光刻模具。

Li 等^[42]采用 LEF 技术制备 CaO-SiO_2 陶瓷型芯, 发现陶瓷型芯的线性收缩和弯曲强度随着 C/S 含量的降低而增大, 当 C/S 为 2.45 时陶瓷型芯具有优异的退让性, 并且以二氧化硅为改性剂可显著提高 LEF 制备的陶瓷型芯性能。Tang 等^[40]采用固体含量为 48%~52%浆料通过 LEF 制备了铝基陶瓷型芯, 其中由体积分数为 50%的固体负载和重量分数为 2%的甲基纤维素(MC)溶液组成的浆料制成的氧化铝试样具有最佳表面质量和形状稳定性, 表明 LEF 是一种很有前途的陶瓷型芯制备方法。

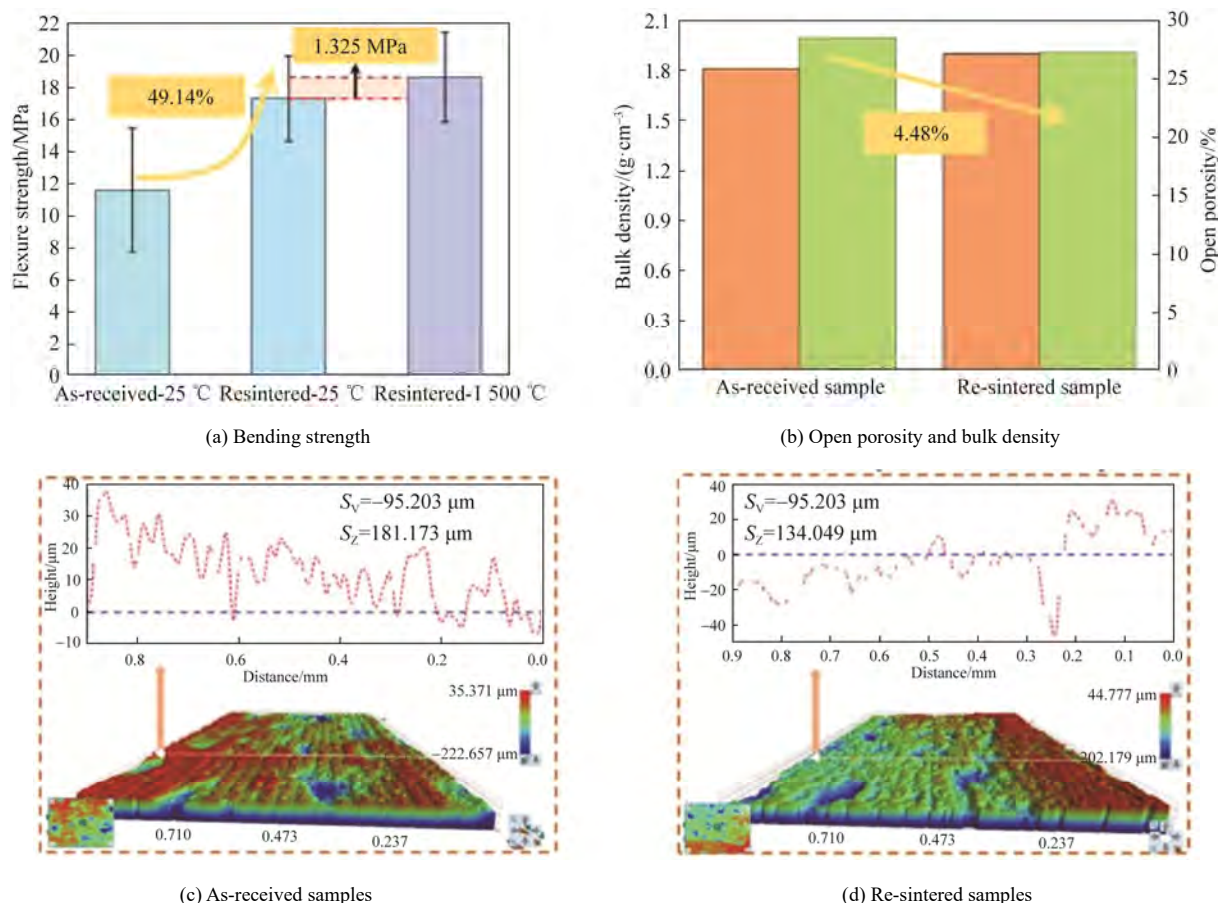
2 3D 打印陶瓷型芯局限性及解决现状

陶瓷型芯在金属液浇注和叶片凝固过程中的工作状态十分复杂, 在浇注过程中陶瓷型芯会受到金属液的机械冲击及静压力, 需要拥有良好的高温强度及高温抗蠕变性能, 保证其在高温情况下不发生软化变形及断裂。此外, 陶瓷型芯中保留适当的孔隙有利于脱脂过程树脂的挥发, 以及铸造后型芯的去除。但是 3D 打印陶瓷型芯因为自身的局限性存在尺寸精度低、机械强度和气孔率适配性差、结构性能各向异性等缺点, 为了提升 3D 打印制备的陶瓷型芯性能, 国内外研究者进行了大量的研究。

2.1 陶瓷型芯的 3D 打印精度控制

3D 打印制备陶瓷型芯的应用过程中, 型芯的成型精度包括尺寸精度和表面精度都是评价型芯性能的重要指标, 其中型芯的表面粗糙度 $R_a \leq 2.0 \mu\text{m}$ 可达到空心叶片的使用要求。目前在 3D 打印过程中, 除了打印机自身精度以外, 陶瓷型芯的成型精度还会受到浆料粘度、打印参数、收缩开裂等多方面的影响, 导致其成型精度不尽如人意。

针对陶瓷型芯的成型精度, 学者们从浆料组成、颗粒级配、矿化剂入手调节陶瓷型芯浆料。Li 等^[43]人熔融石英颗粒中加入纳米 ZrO_2 , 改善了陶瓷芯的表面粗糙度, 如图 7 所示。烧结后陶瓷型芯的 3D 表面中最大谷深为 $95.203 \mu\text{m}$, 最大谷高为 $181.173 \mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $1.53 \mu\text{m}$ 。再烧结后, 因为纳米 ZrO_2 的加入使得陶瓷型芯表面粗糙度有所改善, 最大晶粒深度为 $95.203 \mu\text{m}$, 最大晶粒高度为 $134.049 \mu\text{m}$, 表面粗糙程度降低至 $1.14 \mu\text{m}$ 。

图7 烧结样品和再烧结样品的弯曲强度、开孔率和表面粗糙度^[43]Fig. 7 Bending strength, open porosity, and surface roughness of as-received and re-sintered samples^[43]

此外, Wang 等^[44]使用纳米二氧化硅作为矿化剂,通过 DLP 打印硅基陶瓷型芯,发现纳米二氧化硅颗粒的加入提高了烧结陶瓷型芯的致密化和打印层间结合强度,随着纳米二氧化硅含量从 0 增加到 2.5% (质量分数),烧结试样的表面粗糙度从 1.85 μm 降低至 1.63 μm 。由于光敏树脂的去除和致密化过程,很难消除 3D 打印陶瓷的烧结收缩,但学者们通过调整热处理工艺降低收缩率,从而提高型芯精度。Li 等^[45]研究了烧结温度对光固化 3D 打印硅基陶瓷型芯表面粗糙度的影响,如图 8 所示,当烧结温度超过 1 100 $^{\circ}\text{C}$,型芯表面粗糙度由 2.08 μm 降低至 1.06 μm 满足了空心叶片的使用要求,这是因为不同烧结温度影响了烧结过程中型芯的液相含量、莫来石生成量和形态以及颗粒间玻璃相的分布。

2.2 机械强度和气孔率适配性研究

高强度和高孔隙率是熔模铸造和脱芯对陶瓷型芯的基体要求,但提高陶瓷型芯的气孔率往往会降低其机械强度。因此如何提高机械强度和气孔率的适配性,在提高机械强度的同时保证陶瓷型芯具有较高的孔隙率一直是 3D 打印陶瓷型芯的研究重

点。针对这一问题,学者们通过加入矿化剂、晶须增韧、形成三维网络结构、化学气相渗透、真空渗透等的方法在获得高机械强度的同时保持高的孔隙率。

文献[46]研究了纳米氧化硅作为矿化剂对 DLP 制备铝基陶瓷型芯性能的影响,纳米氧化硅使陶瓷型芯的断裂机制发生变化,如图 9 所示,在确保足够的孔隙率(35.97%)同时,陶瓷型芯表现出优异的力学性能,25 $^{\circ}\text{C}$ 最大弯曲强度为 46.2 MPa,1 500 $^{\circ}\text{C}$ 为 26.1 MPa。该作者还设计了一种围绕熔融石英大颗粒的网络结构 ZrSiO_4 陶瓷型芯,采用 DLP-3D 打印制备陶瓷型芯,烧结时纳米 ZrO_2 与大 SiO_2 颗粒反应生成网络结构的 ZrSiO_4 ,如图 10 所示,由于再烧结期间 Al_2O_3 的稳定作用,可以改善陶瓷型芯的高温机械性能,使再烧结试样的室温弯曲强度提高了 49.14%,同时开放孔隙率仅降低了 4.48%,保证了型芯的高强度和高孔隙率^[43]。

Tang 等^[47]利用直接写成技术(DIW)制备了纳米 MgO 增强的氧化铝基陶瓷芯,通过引入纳米 MgO 减少了型芯坯体的干燥收缩,并促进了液相烧结。实验发现:添加 1% MgO 的铝基陶瓷型芯在 1 400 $^{\circ}\text{C}$

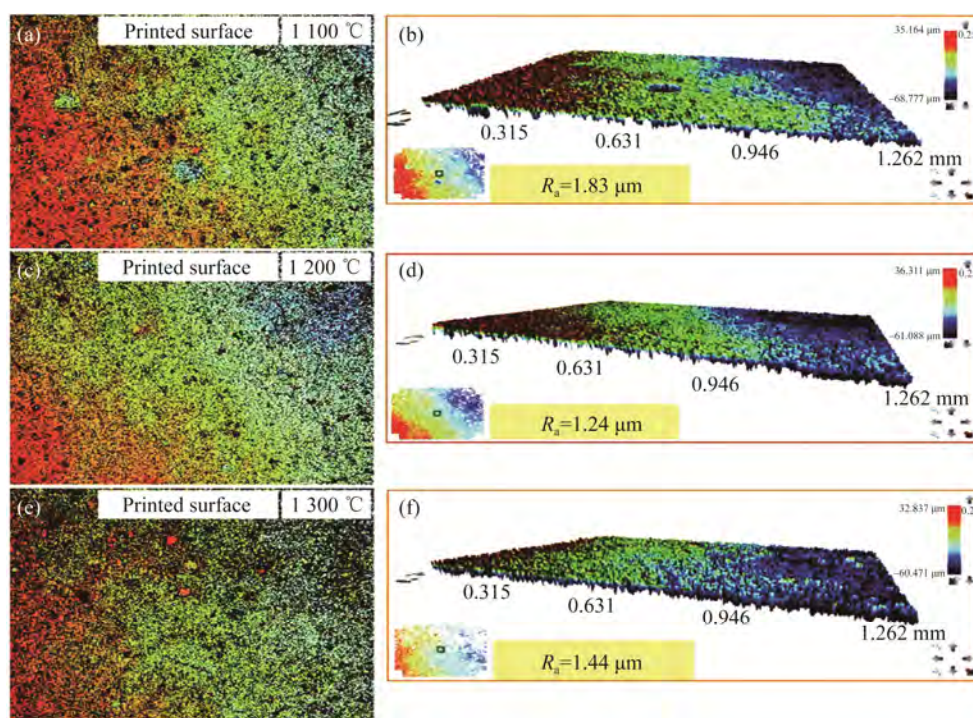


图 8 不同温度烧结陶瓷型芯打印堆积方向的表面二维、三维形貌和粗糙度^[45]

Fig. 8 Surface two-dimensional and three-dimensional morphology and roughness of sintered ceramic core printing stacking direction at different temperatures^[45]

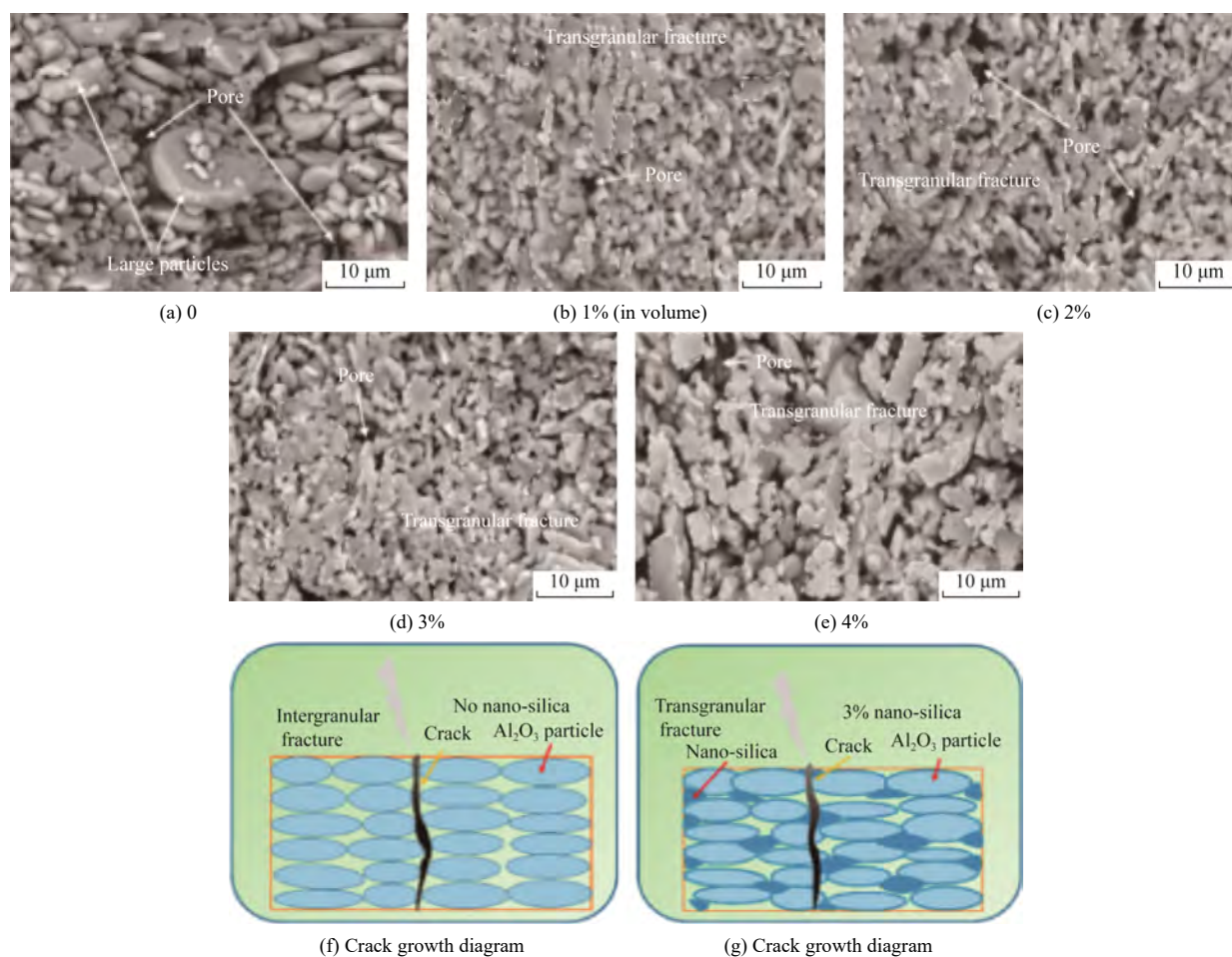


图 9 不同纳米二氧化硅含量的陶瓷芯的 SEM 照片与机理^[46]

Fig. 9 SEM image and mechanism diagram of sintered ceramic core with different nano-silica contents^[46]

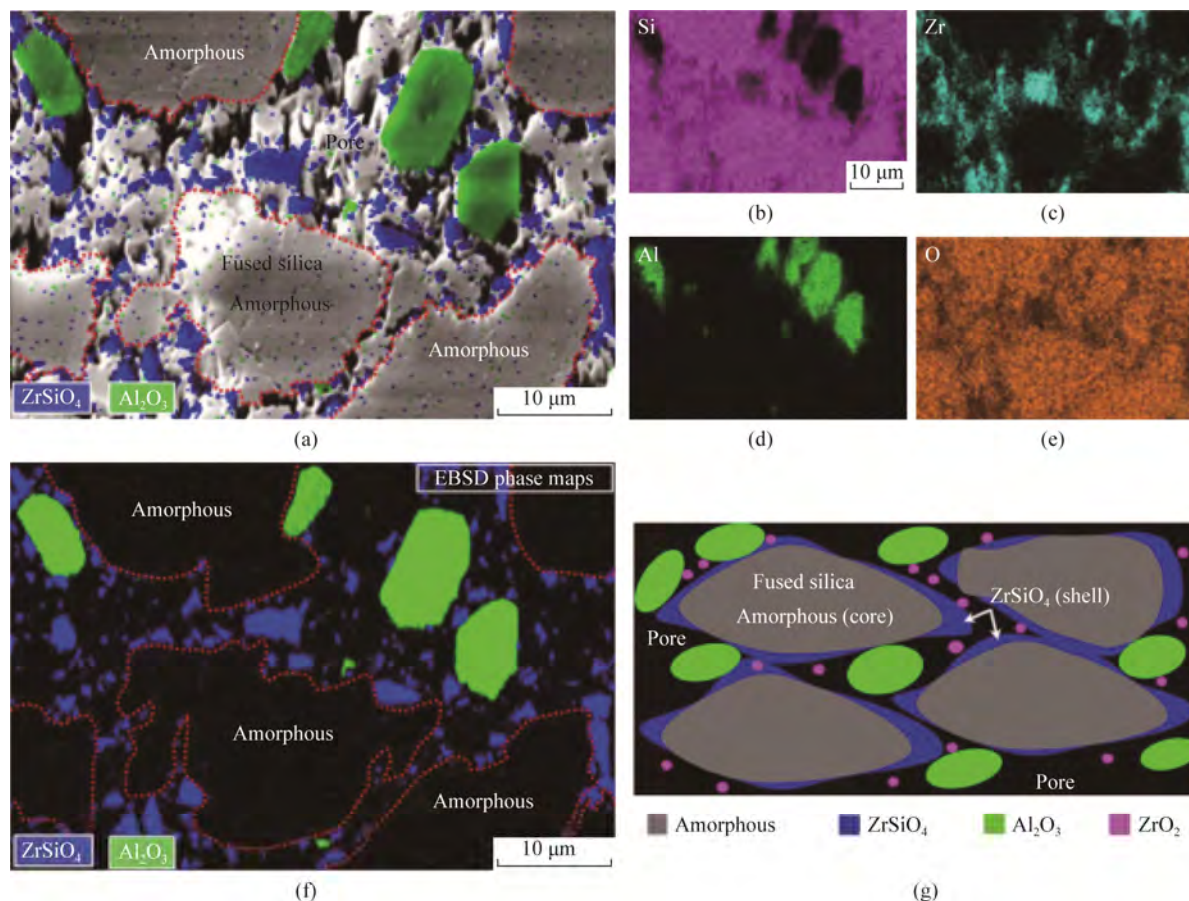


图 10 (a, f)再烧结样品的横截面 EBSD; (b-e)再烧结样本的元素分布; (g)再烧结型芯的微观结构示意图^[43]
Fig. 10 (a, f) Cross-section EBSD of re-sintered sample; (b-e) Element distribution of re-sintered sample; (g) Microstructure diagram of re-sintered core^[43]

烧结时具有 38.24 MPa 的弯曲强度、5.54% 的线性收缩和 40.01% 的开孔率，满足陶瓷芯的要求。

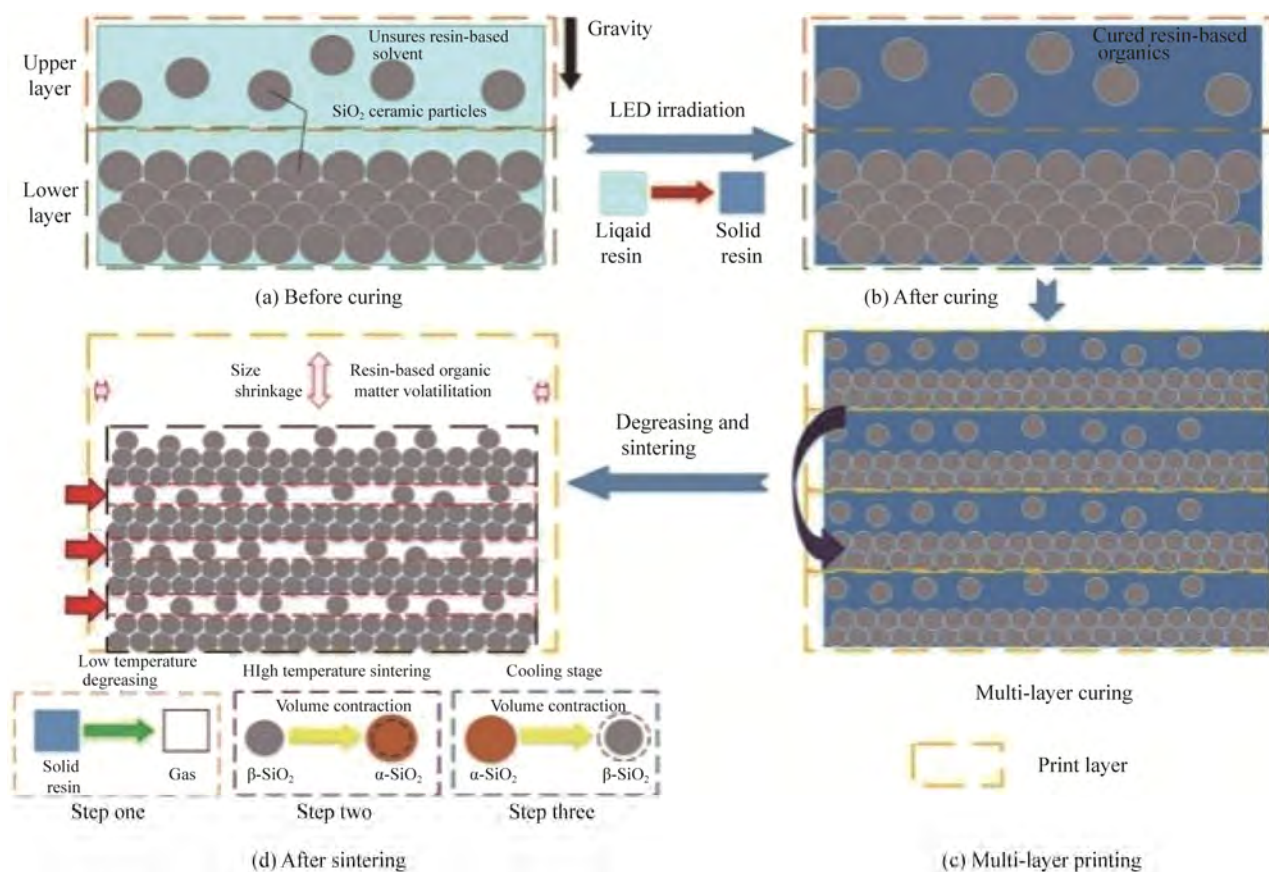
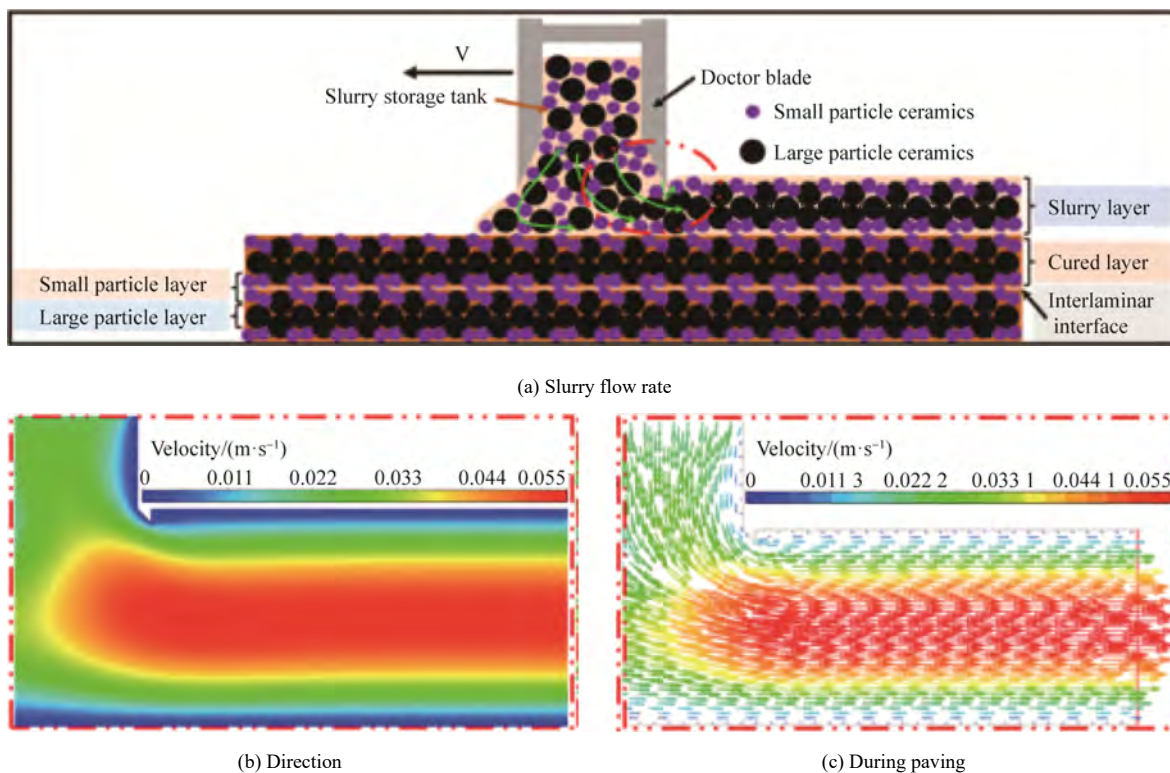
2.3 结构性能的各向异性研究

由于 3D 打印件具有多层结构，其收缩率、热膨胀系数、力学性能均表现出各向异性，对叶片形状产生不可控的影响。学者们通过优化浆料粘度、调节层间扩散结合、引入打印中间层来缓解陶瓷型芯打印件的各向异性问题。

文献[48]探讨了不同打印方向陶瓷试样的热学与力学性能的差异机理，如图 11 所示。由于重力作用导致陶瓷颗粒产生沉积，固化后打印层上层有机物多、陶瓷颗粒少，下层与之相反，导致烧结后出现层间缝隙，随着烧结收缩，层间缝隙增大，使陶瓷型芯不同方向的性能存在差异，并提出 σ_V/σ_H 作为力学性能各向异性的评判依据。以纳米 SiO_2 作为添加剂，由于纳米 SiO_2 具有更高表面能，在烧结过程中容易产生液相，促进了打印层之间颗粒扩散，减小层间距，降低各向异性^[49]，为 3D 打印陶瓷型芯的各向异性调控提供了新的指导。

Li 等^[50]从 X、Y 和 Z 方向打印陶瓷型芯试样，系研究了烧结过程中孔隙分布的演化规律，利用有限元模拟说明了打印过程中层状结构的形成机理，结果如图 12 所示。图 12 描述了烧结过程孔隙分布演化对型芯各向异性的影响规律，可知陶瓷型芯的层状结构是陶瓷型芯各向异性的主要原因，在打印过程中，由于吸附和沉淀，细颗粒集中在界面处，而粗颗粒保留在层状结构内部，这导致型芯的层间界面与内层的烧结特性和孔隙分布的差异。

文献[51]在光固化浆料中加入成孔剂，并结合烧结工艺的优化，获得了具有各向同性收缩的三维打印铝基陶瓷型芯。添加成孔剂的主要目的是增加 3D 打印陶瓷的开口孔隙率，同时通过提高烧结温度来提高其弯曲强度，如图 13 所示。与相比于未使用成孔剂的样品，含有成孔剂的型芯在 3 个方向上的收缩率更小且更均匀，随着烧结温度的升高，陶瓷的体积密度、收缩率和弯曲强度增加，同时 3 次烧结保证了层之间良好连接，修复了层间裂纹。

图 11 光固化打印收缩机理示意图^[48]Fig. 11 Schematic diagram of shrinkage mechanism of UV-curing printing^[48]图 12 3D 打印层结构的形成机理^[50]Fig. 12 Formation mechanism of layer structure in 3D printing^[50]

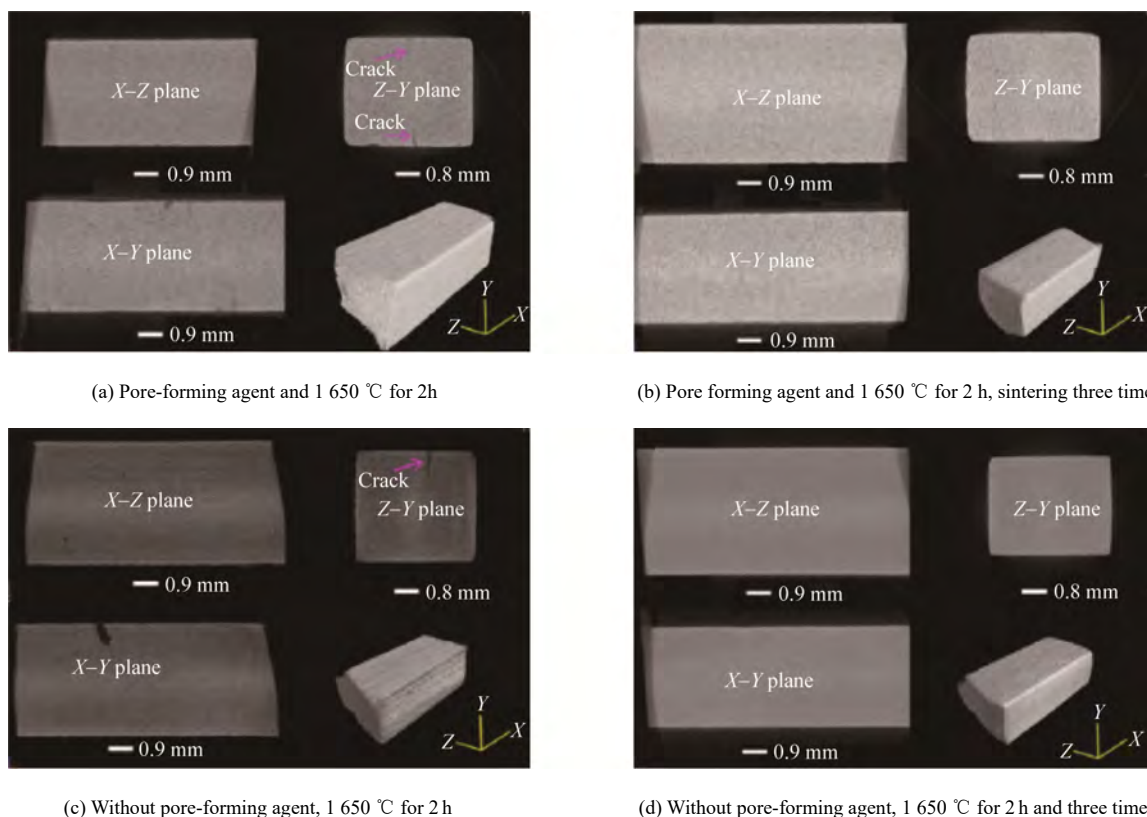


图 13 通过 CT 分析成孔剂和烧结工艺对 3D 打印陶瓷型芯内部结构的影响^[51]

Fig. 13 Influence of pore-forming agent and sintering process on the internal structure of 3D printed ceramic core analyzed by CT^[51]

3 结语

航空事业的发展对空心叶片陶瓷型芯的传统制造工艺提出巨大的挑战，3D 打印技术因周期短、成本低且制备的陶瓷型芯性能更加优异，越来越受到人们的关注。目前已经开发了光固化技术、选择性激光烧结、直写成型技术和分层挤出成型技术等多种用于陶瓷型芯的 3D 打印技术。尽管 3D 打印制备的陶瓷型芯仍然存在很多局限性，学者们通过改善打印精度、协调力学性能与气孔率适配性、解决结构性能各向异性，对陶瓷型芯不断优化改进，对于 3D 打印陶瓷型芯的工业应用具有重要意义。

总之，3D 打印技术凭借自身优势在陶瓷型芯领域必将受到学者们越来越多的关注，未来机遇与挑战并存。

参考文献:

- [1] 顾国红, 曹腊梅. 熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展[J]. 铸造技术, 2002, 23(2): 81–83.
- [2] 刘小瀛, 王宝生, 张立同. 氧化铝基陶瓷型芯研究进展[J]. 航空制造技术, 2005, 48(7): 26–29.
- [3] 王飞, 李飞, 刘河洲, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯的研究进展[J]. 航空制造技术, 2009, 52(19): 60–64.
- [4] YANG Z G, LI K L, MA S Q, et al. Preparation, mechanical, and leaching properties of CaZrO_3 ceramic cores[J]. Int J Appl Ceram Technol, 2021, 18(5): 1490–1497.
- [5] 许西庆, 樊嘉显, 牛书鑫, 等. 3D 打印氧化硅陶瓷型芯的各向异性调控及高温强化性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(9): 2422–2429.
- [6] 陈鑫. 光固化 3D 打印氧化硅基陶瓷型芯的纳米改性研究[D]. 西安: 长安大学.
- [7] CHEN Y, LU G, YAN Q, et al. Densification behavior in short carbon fiber reinforced silica-based ceramic cores via atmosphere sintering[J]. Acta Mater Compos Sin, 2022, 39(5): 2412–2420.
- [8] 冒厚昌. 大型陶瓷生坯的快速脱蜡[J]. 电子元件与材料, 1985(3): 47–49.
- [9] MAO Houchang. Electr Comp Mater (in Chinese), 1985(3): 47–49.
- [10] 张巨先, 高陇桥, 李发. 陶瓷凝胶注模成型技术[J]. 真空电子技术, 1999(5): 52–55.
- [11] ZHANG Juxian, GAO Longqiao, LI Fa. Vac Electron, 1999(5): 52–55.
- [12] LIU Xiaoying, WANG Baosheng, ZHANG Litong. Aeronaut Manuf Technol (in Chinese), 2005, 48(7): 26–29.

- [10] 张伟, 张玉军, 陈坤. 浅谈熔模铸造陶瓷型芯研究现状[J]. 陶瓷, 2007(12): 8–11.
ZHANG Wei, ZHANG Yujun, CHEN Kun. Ceramics (in Chinese), 2007(12): 8–11.
- [11] 张文毓. 3D打印陶瓷材料的研究与应用[J]. 陶瓷, 2020(6): 40–44.
ZHANG Wenyu. Ceramics, 2020(6): 40–44.
- [12] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1–4.
LU Bingheng, LI Dichen. Mach Build Autom (in Chinese), 2013, 42(4): 1–4.
- [13] 田国强, 安晓东, 许小奎, 等. 空心叶片铸造用陶瓷铸型增材制造技术综述[J]. 中国陶瓷, 2022, 58(4): 1–8.
TIAN Guoqiang, AN Xiaodong, XU Xiaokui, et al. China Ceram, 2022, 58(4): 1–8.
- [14] 史凤岭, 陈义, 苗恺, 等. 基于光固化3D打印技术的定向晶涡轮叶片快速制造[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(9): 1828–1836.
SHI Fengling, CHEN Yi, MIAO Kai, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(9): 1828–1836.
- [15] 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.
LI Yayun, SI Yunhui, XIONG Xinbo, et al. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(6): 793–805.
- [16] 顾玥, 王功, 段文艳, 等. 陶瓷光固化成型技术的应用与展望[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 867–877.
GU Yue, WANG Gong, DUAN Wenyan, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(5): 867–877.
- [17] 邸浩翔, 张琪琪, 安晓光, 等. 3D打印陶瓷技术的研究进展[J]. 山东陶瓷, 2018, 41(3): 18–24.
DI Haoxiang, ZHANG Qiqi, AN Xiaoguang, et al. Shandong Ceram (in Chinese), 2018, 41(3): 18–24.
- [18] SHI Y S, ZHANG J L, WEN S F, et al. Additive manufacturing and foundry innovation[J]. China Foundry, 2021, 18(4): 286–295.
- [19] MAINES E M, PORWAL M K, ELLISON C J, et al. Correction: Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes[J]. Green Chem, 2022, 24(2): 958–959.
- [20] WANG W, SUN J X, GUO B B, et al. Fabrication of piezoelectric nano-ceramics via stereolithography of low viscous and non-aqueous suspensions[J]. J Eur Ceram Soc, 2020, 40(3): 682–688.
- [21] LI H, HU K H, LIU Y S, et al. Improved mechanical properties of silica ceramic cores prepared by 3D printing and sintering processes[J]. Scr Mater, 2021, 194: 113665.
- [22] LI H, LIU Y S, LIU Y S, et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of stereolithography formed alumina cores sintered in vacuum[J]. J Eur Ceram Soc, 2020, 40(14): 4825–4836.
- [23] KODAMA H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer[J]. Rev Sci Instrum, 1981, 52(11): 1770–1773.
- [24] 杨飞, 连岑, 武向权, 等. 陶瓷面曝光快速成型工艺研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 138–144.
YANG Fei, LIAN Qin, WU Xiangquan, et al. J Mech Eng (in Chinese), 2017, 53(7): 138–144.
- [25] LI H, LIU Y S, LIU Y S, et al. Influence of debinding holding time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramic cores[J]. Ceram Int, 2021, 47(4): 4884–4894.
- [26] LI Q L, AN X L, LIANG J J, et al. Balancing flexural strength and porosity in DLP-3D printing Al_2O_3 cores for hollow turbine blades[J]. J Mater Sci Technol, 2022, 104: 19–32.
- [27] 刘振盈, 李磊, 杨玮婧, 等. 选择性激光烧结成型过程的影响因素[J]. 塑料工业, 2021, 49(11): 20–24.
LIU Zhenying, LI Lei, YANG Weijing, et al. China Plast Ind (in Chinese), 2021, 49(11): 20–24.
- [28] PAPAZOGLU E L, KARKALOS N E, KARMIRIS-OBATAŃSKI P, et al. On the modeling and simulation of SLM and SLS for metal and polymer powders: A review[J]. Arch Comput Methods Eng, 2022, 29(2): 941–973.
- [29] CHEN Q, GUILLEMOT G, GANDIN C A, et al. Three-dimensional finite element thermomechanical modeling of additive manufacturing by selective laser melting for ceramic materials[J]. Addit Manuf, 2017, 16: 124–137.
- [30] KIM E H, CHOI H H, JUNG Y G. Fabrication of a ceramic core for an impeller blade using a 3D printing technique and inorganic binder[J]. J Manuf Process, 2020, 53: 43–47.
- [31] ZHENG W, WU J M, CHEN S, et al. Fabrication of high-performance silica-based ceramic cores through selective laser sintering combined with vacuum infiltration[J]. Addit Manuf, 2021, 48: 102396.
- [32] 周振豪, 姜勇刚, 冯军宗, 等. 直写成型制备多孔陶瓷技术研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(4): 73–79.
ZHOU Zhenhao, JIANG Yonggang, FENG Junzong, et al. Mater Rep (in Chinese), 2023, 37(4): 73–79.
- [33] XIONG H, CHEN H, ZHAO L, et al. SiCw/SiCp reinforced 3D-SiC ceramics using direct ink writing of polycarbosilane-based solution: Microstructure, composition and mechanical properties[J]. J Eur Ceram Soc, 2019, 39(8): 2648–2657.
- [34] 金海泽, 孔文慧, 贾赫男, 等. 直写成型无机非金属材料及其结构/功能应用进展[J]. 材料导报, 2023(11): 1–11.
JIN Haize, KONG Wenhui, JIA Henan, et al. Mater Introd (in Chinese), 2023(11): 1–11.
- [35] 张雪静. 基于DIW工艺的陶瓷3D打印机械结构动力学分析[D]. 唐山: 华北理工大学.
ZHANG Xuejing. Dynamic analysis of mechanical structure of ceramic 3D printer based on DIW process (dissertation, in Chinese). Tangshan: North China University of Science and Technology.
- [36] XIE H H, YANG X F, LIU P, et al. 3D gel printing of alumina ceramics followed by efficient multi-step liquid desiccant drying[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41(13): 6634–6640.
- [37] ORDOÑEZ E, GALLEGO J M, COLORADO H A. 3D printing via the direct ink writing technique of ceramic pastes from typical formulations used in traditional ceramics industry[J]. Appl Clay Sci, 2019, 182: 105285.
- [38] HOSSAIN S S, BAEK I W, SON H J, et al. 3D printing of porous low-temperature *in situ* mullite ceramic using waste rice husk ash-derived silica[J]. J Eur Ceram Soc, 2022, 42(5): 2408–2419.
- [39] TANG S Y, YANG L, LIU X W, et al. Direct ink writing additive manufacturing of porous alumina-based ceramic cores modified with nanosized MgO[J]. J Eur Ceram Soc, 2020, 40(15): 5758–5766.
- [40] TANG S Y, FAN Z T, ZHAO H P, et al. Layered extrusion forming—a simple and green method for additive manufacturing ceramic core[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2018, 96(9–12): 3809–3819.
- [41] 胡芬. 分层挤出成形陶瓷型芯装置及成型性研究[D]. 武汉: 华中科技大学.
HU Fen. Study on the device and formability of ceramic core formed by layered extrusion (dissertation, in Chinese). Wuhan: Huazhong University of Science and Technology.

- [42] YANG L, TANG S Y, LI G J, et al. Performance characteristics of collapsible CaO-SiO₂ based ceramic core material *via* layered extrusion forming[J]. *Ceram Int*, 2019, 45(6): 7681–7689.
- [43] LI Q L, LIANG J J, ZHANG Y L, et al. Fused silica ceramic core based on network-structured zircon design *via* 3D printing[J]. *Scr Mater*, 2022, 208: 114342.
- [44] WANG X G, ZHOU Y L, ZHOU L, et al. Microstructure and properties evolution of silicon-based ceramic cores fabricated by 3D printing with stair-stepping effect control[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2021, 41(8): 4650–4657.
- [45] 李乔磊, 顾玥, 于雪华, 等. 烧结温度对 3D 打印硅基陶瓷型芯表面形貌及粗糙度的影响[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(3): 325–332.
LI Qiaolei, GU Yue, YU Xuehua, et al. *J Inorg Mater* (in Chinese), 2022, 37(3): 325–332.
- [46] LIU J Q, LI Q L, HUO M D, et al. Microstructure and mechanical properties of 3D-printed nano-silica reinforced alumina cores[J]. *Ceram Int*, 2022, 48(20): 30282–30293.
- [47] ZHENG W, WU J M, CHEN S, et al. Improved mechanical properties of SiC fiber reinforced silica-based ceramic cores fabricated by stereolithography[J]. *J Mater Sci Technol*, 2022, 116: 161–168.
- [48] 陈典典, 鲍明东, 李鑫, 等. 3D 打印氧化硅基陶瓷型芯的各向异性研究[J]. *中国陶瓷*, 2020, 56(5): 33–39.
CHEN Diandian, BAO Mingdong, LI Xin, et al. *China Ceram* (in Chinese), 2020, 56(5): 33–39.
- [49] FAN J X, XU X Q, NIU S X, et al. Anisotropy management on microstructure and mechanical property in 3D printing of silica-based ceramic cores[J]. *J Eur Ceram Soc*, 2022, 42(10): 4388–4395.
- [50] LI Q L, HOU W Q, LIANG J J, et al. Controlling the anisotropy behaviour of 3D printed ceramic cores: from intralayer particle distribution to interlayer pore evolution[J]. *Addit Manuf*, 2022, 58: 103055.
- [51] LI H, LIU Y S, COLOMBO P, et al. The influence of sintering procedure and porosity on the properties of 3D printed alumina ceramic cores[J]. *Ceram Int*, 2021, 47(19): 27668–27676.