

引用格式: 牛书鑫, 杨永康, 李鑫, 等. 光固化增材制造陶瓷型芯尺寸精度控制研究进展[J]. 航空材料学报, 2026, 46(10): 45-59.

NIU Shuxin, YANG Yongkang, LI Xin, et al. Research progress in dimensional accuracy control of ceramic cores prepared by vat photopolymerization additive manufacturing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(10): 45-59.

光固化增材制造陶瓷型芯尺寸精度控制研究进展

牛书鑫¹, 杨永康², 李鑫¹, 许西庆^{2*}

(1. 中国航发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; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 西安 710061)

摘要: 陶瓷型芯是航空发动机空心叶片精密铸造中形成复杂冷却通道的关键部件, 其尺寸精度直接影响叶片内腔结构质量与成品率。光固化增材制造技术因具有高分辨率、高效率 and 无需模具等优势, 在复杂陶瓷型芯制备中展现出良好应用前景。然而, 其在打印、脱脂烧结及浇注服役过程中, 仍存在台阶效应、收缩开裂、相变致裂和高温蠕变等问题, 导致型芯尺寸精度严重下降。本文围绕陶瓷型芯“原料—制备—使用”全流程, 综述了不同阶段影响光固化增材制造陶瓷型芯尺寸精度的关键因素及其作用机理, 重点分析了浆料组成、打印工艺、烧结行为和高温服役对尺寸稳定性的影响。最后对该领域的发展趋势进行了展望, 未来研究应重点关注高性能浆料设计、打印与烧结协同调控以及面向工程应用的精度评价与标准体系构建。

关键词: 光固化增材制造; 陶瓷型芯; 光敏浆料; 烧结; 变形机理

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2024.000037

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2024.000037

中图分类号: TP391.73; V263

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)10-0045-15

Research progress in dimensional accuracy control of ceramic cores prepared by vat photopolymerization additive manufacturing

NIU Shuxin¹, YANG Yongkang², LI Xin¹, XU Xiqing^{2*}

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

Abstract: Ceramic cores are critical components for forming complex cooling channels in the investment casting of hollow aero-engine blades, and their dimensional accuracy directly determines the structural quality of the internal cavities and the casting yield of the blades. Due to its high resolution, high efficiency, and mold-free processing capability, vat photopolymerization additive manufacturing has shown great promise for the fabrication of complex ceramic cores. However, issues such as the stair-step effect, shrinkage-induced cracking, phase-transformation-induced fracture, and high-temperature creep still arise during printing, debinding and sintering, and casting service, thereby severely compromising the dimensional accuracy of the cores. Focusing on the entire lifecycle of ceramic cores, from raw materials to fabrication and service, this paper reviews the key factors affecting the dimensional accuracy of ceramic cores fabricated by vat photopolymerization additive manufacturing at different stages, together with the underlying mechanisms. Particular attention is given to the effects of slurry composition, printing parameters, sintering behavior, and high-temperature service conditions on dimensional stability. Finally, future development trends in this field are discussed, with emphasis on the design of high-performance slurries, the coordinated optimization of printing and sintering, as well as the establishment of dimensional accuracy evaluation methods and standard systems for engineering applications.

Key words: vat photopolymerization additive manufacturing; ceramic core; photosensitive slurry; sintering; deformation mechanism

推重比是衡量航空发动机性能的重要指标之一,推重比的提高要求更高的涡轮燃气温度,这意味着需要提高涡轮叶片材料耐高温能力和空心叶片的冷却能力。由于受到合金熔点的限制,高温合金的耐温性已接近极限,因此需要通过涡轮叶片复杂的内腔结构设计提高其冷却效果^[1-5]。陶瓷型芯,在空心叶片的熔模铸造中提供复杂的冷却内腔结构,其性能和尺寸精度直接影响空心叶片的精度和成品率。陶瓷型芯的传统制备方法如热压注成型法、凝胶注模成型法等^[6-7],对于小批量、个性化、复杂结构的陶瓷型芯存在生产成本较高、生产周期较长、制备工艺复杂等缺点^[8],亟待开发新的制备工艺以满足陶瓷型芯快速更新换代的需求。

增材制造^[9-11](additive manufacturing, AM)技术,是基于“离散-堆积”原理,以计算机三维设计模型的数据文件为基础,随后通过软件对模型进行分层,再以数控成型系统逐层打印叠加成型出实体的技术。与陶瓷型芯传统制备技术相比,具有成型速度快、精度高、无需模具等优势,可极大提高陶瓷型芯的制备效率,缩短生产研发周期,非常适合用于精密铸造领域。

随着增材制造技术的快速发展,涌现出多种

增材制造技术。适用于陶瓷增材制造领域的技术根据原料特性可分为基于粉末或浆料两类进行打印,前者主要以黏结剂喷射技术(binder jetting, BJ)^[12-13]、激光选区烧结技术(selective laser sintering, SLS)^[14-15]等技术为主,后者主要包括光固化技术(vat photopolymerization, VPP)与直写成型技术(direct ink writing, DIW)^[16-17]等。光固化成型技术具有高分辨率、表面质量良好等优点,在陶瓷型芯制备领域得到广泛关注^[18]。

陶瓷型芯在制备与浇铸过程中的环境状态十分复杂,对其尺寸精度提出了十分严苛的要求。但是由于光固化增材制造技术的局限性,制备出的陶瓷型芯往往存在尺寸精度并不理想的问题,受光固化成型技术特点的影响,陶瓷型芯会产生明显的体积收缩、分层、开裂以及高温变形等问题,对陶瓷型芯的尺寸精度产生不利影响^[5]。针对光固化增材制造陶瓷型芯的尺寸精度,国内外学者展开了大量研究,本文旨在对陶瓷型芯的“原料—制备—使用”全流程的尺寸变化进行总结,如图1所示^[19-26],系统综述了光固化增材制造陶瓷型芯的相关改善方案,分析了原材料与制备工艺对尺寸变化的影响机理,最后对该领域进行展望与总结,以期优化陶瓷型芯尺寸精度提供借鉴与参考。

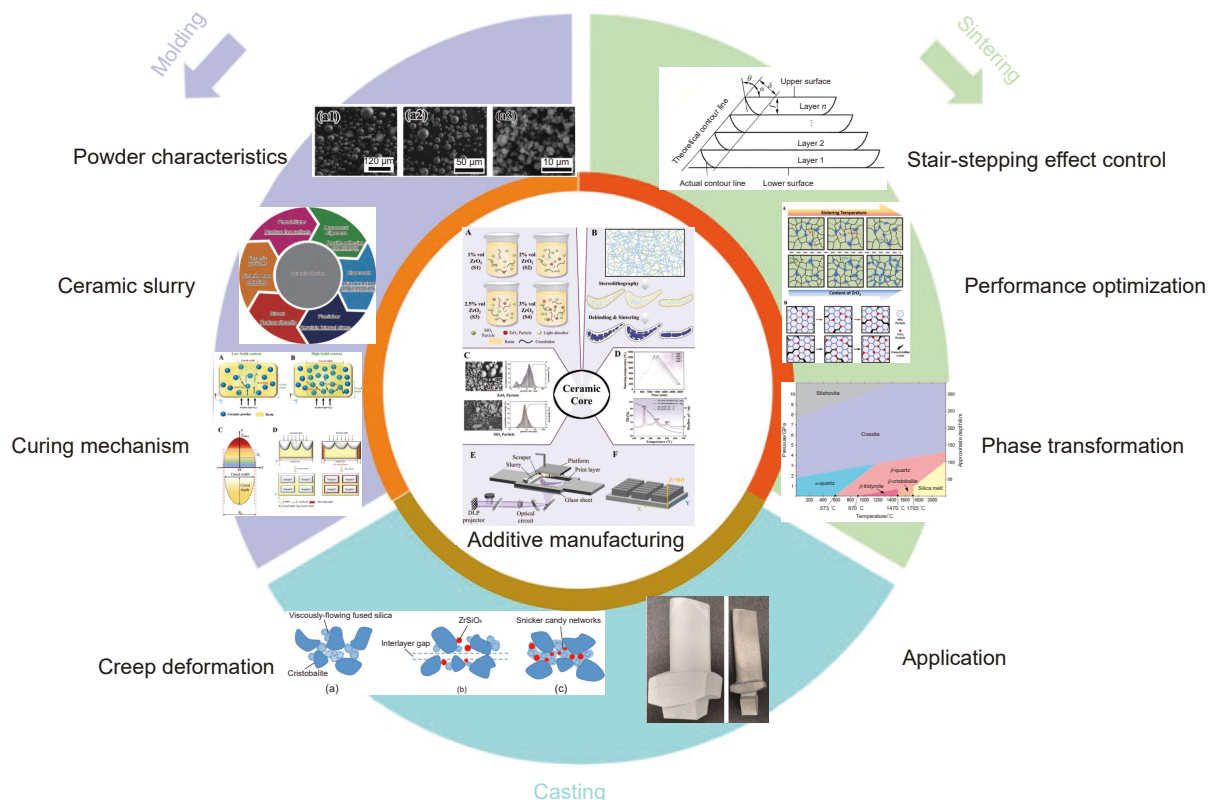


图1 增材制造陶瓷型芯流程及相关机理图^[19-26]

Fig. 1 Diagram of the additive manufacturing ceramic core process and related mechanisms^[19-26]

1 光固化增材制造技术的分类与成型原理

光固化增材制造是以陶瓷颗粒与光敏树脂为主要原料,经球磨混合后制备出陶瓷浆料,使其在特定波长的光的作用下发生聚合反应固化成型。成型后的陶瓷坯体需要经过“脱脂-烧结”处理,使光敏树脂脱除,陶瓷颗粒结合,得到最终的陶瓷产品。目前用于制备陶瓷型芯的光固化技术主要分为立体光刻(stereolithography, SL)技术与数字光处理(digital light processing, DLP)技术。

1.1 SL 成型技术

SL 技术^[27]是通过特定波长的紫外光在浆料表面进行扫描,通过“点-线-面”的扫描移动使切片层进行固化,当固化完成一层后,打印平台会下降一个层厚的高度并不断重复上述过程,最终获得实体零件。SL 机理如图 2 所示^[28],激光器发射紫外激光束,照射液槽中的液态光敏树脂,使光敏树脂迅速固化成型。由于 SL 技术具有分辨率高以及快速成型的优势,因此能够应用于高精度零件的制作,符合陶瓷型芯的制备要求。

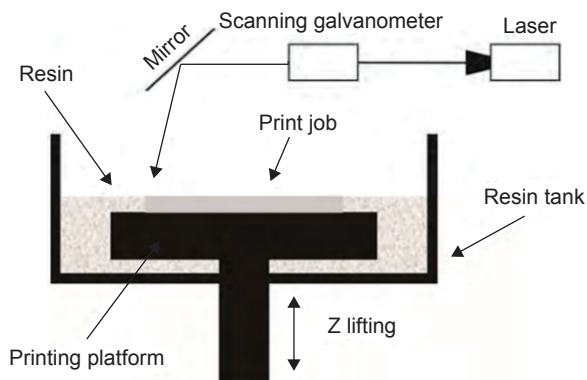


图 2 SL 技术原理图^[28]
Fig. 2 Principle of SL^[28]

Mu 等^[19]基于 SL 技术系统研究了打印参数、固相含量以及烧结温度对硅基陶瓷型芯性能的协同作用。随着能量密度的提高和曝光时间的延长,固化深度与过固化区域均会增加。固相含量与烧结温度的增加可促进陶瓷颗粒间的紧密结合,提高型芯强度。但对硅基陶瓷型芯而言,烧结温度的进一步升高则会生成更多的高温相方石英,在冷却阶段,由于相变引起的体积收缩导致裂纹产生,使陶瓷型芯强度下降。An 等^[29]通过优化 SL 技术的工艺参数,系统研究了陶瓷型芯的微观结构、裂纹数量及力学性能随烧结温度的变化规律,通过样品的系统表征,建立了用于预测和评价 SL 打印陶瓷型

芯性能的体系。Li 等^[30]使用 SL 制备了硅基陶瓷型芯,通过控制打印参数和调节烧结工艺,使硅基陶瓷型芯在 1300 °C 烧结温度下弯曲强度达 12.1 MPa,同时陶瓷型芯表现出各向同性的力学性能。

1.2 DLP 成型技术

DLP^[31]技术是基于 SL 的掩模技术,其成型原理如图 3 所示^[28],将浆料倒入料槽后流平,通过计算机软件设置打印参数,随后从光源处投影出紫外光进行曝光。与 SL 的成型原理不同,DLP 采用面曝光的方式,将紫外光以切片图案的方式进行投影,照射到陶瓷浆料中的光敏树脂表面,使光敏树脂发生聚合反应从而固化成型,随后以逐层叠加的方式得到三维实体零件。因此,DLP 技术相较于 SL 技术具有更高的成型效率^[27]。

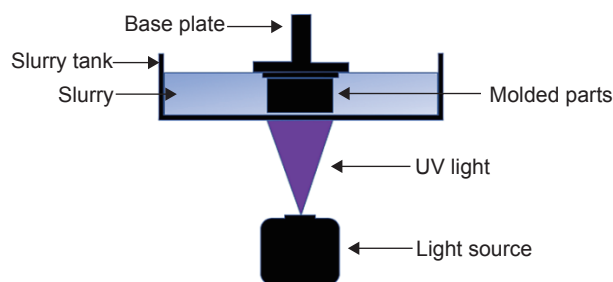


图 3 DLP 技术原理图^[28]
Fig. 3 Principle of DLP^[28]

Yang 等^[32]使用 DLP 技术研究了 Y_2SiO_5 添加量和烧结温度对氧化铝陶瓷型芯微观结构和性能的影响。通过 Y_2SiO_5 的相变与分解,实现了低温烧结氧化铝陶瓷型芯。在 1350 °C 下、 Y_2SiO_5 添加量为 15%(质量分数,下同)时,室温弯曲强度达 20.282 MPa,孔隙率为 39.31%,解决了高室温弯曲强度与高孔隙率难以均衡的矛盾难题。Wang 等^[33]采用 DLP 技术研究了纳米氧化硅粉含量对硅基陶瓷型芯微观结构和性能的影响。纳米氧化硅粉的加入能促进陶瓷型芯的烧结和致密化。同时还能填充打印的层间缝隙,改善台阶效应和粗糙度。Niu 等^[34]基于 DLP 技术研究了氧化铝含量对硅基陶瓷型芯各向异性的调控效果。当掺入 6% 氧化铝时,杂质中碱性氧化物的存在改善了打印层间的颗粒重排,削弱了层间间隙,增强了微观结构的均匀性。当氧化铝含量为 9% 时,高熔点的氧化铝颗粒阻碍了黏性流动,导致各向异性加剧。

以上两种光固化技术各有所长,SL 成型更加精细,而 DLP 成型速度更快,均能一体成型结构复杂的陶瓷型芯,同时也是研究最广泛的两种增材制造技术。增材制造技术的发展为复杂陶瓷零件

的制备提供了新的途径,使其摆脱了模具限制,也方便后续对型芯结构的改良,这大大缩短了陶瓷型芯的研发周期,而光固化作为增材制造中的佼

佼者,有望成为未来陶瓷型芯发展的重要手段,表1^[19, 21, 23, 32, 35-39]总结了当前光固化3D打印陶瓷型芯的烧结性能及尺寸精度。

表1 光固化3D打印陶瓷型芯烧结性能及尺寸精度研究进展^[19, 21, 23, 32, 35-39]

Table 1 Research progress in sintering performance and dimensional accuracy of ceramic cores by vat photopolymerization 3D printing^[19, 21, 23, 32, 35-39]

Forming process	Material	Sintering temperature/°C	Flexural strength/MPa	Apparent porosity/%	Shrinkage/%	Ref.
SL	SiO ₂ +ZrO ₂	1200	10.00	30.00	3.2	[19]
SL	Al ₂ O ₃ +16%Y ₂ O ₃	1600	16.1	40.8	4.8	[23]
SL	SiO ₂ +1%Al ₂ O ₃ (volume fraction)	1200	20.38	39.00-40.00	1.64	[35]
SL	SiO ₂ +1%SiB ₆	1200	14.63	25.00	1.86	[36]
SL	Al ₂ O ₃	1600	50.1	36.4	10	[37]
DLP	Al ₂ O ₃ +15%Y ₂ SiO ₅	1350	20.282	39.31	< 5	[32]
DLP	SiO ₂ +2%ZrO ₂ (volume fraction)	1200	12	30	3.6	[21]
DLP	SiO ₂ +15%ZrSiO ₄	1250	8.93	30	2	[38]
DLP	Al ₂ O ₃ +3% nano-SiO ₂ (volume fraction)	1500	46.2	35.97	9	[39]

2 陶瓷浆料对光固化尺寸精度的影响研究进展

陶瓷浆料作为光固化增材制造的基础,需要兼具足够的固含量(体积分数>40%)和流动性(黏度一般低于3 Pa·s)^[40],但随着光固化技术的发展,可用于打印的浆料黏度逐渐增加,目前已报道有200 s⁻¹剪切率下黏度为15.4 Pa·s的高固含量膏料用于光固化技术^[41]。固含量的提升可以减少陶瓷型芯在脱脂-烧结阶段产生的变形、开裂等缺陷,并提高陶瓷颗粒的黏结强度,良好的流动性则有利于浆料铺展,减小刮刀阻力,提高打印速度,并改善尺寸精度。因此,制备出高固含量、低黏度的陶瓷浆料是光固化增材制造技术的关键。

为研究陶瓷浆料对光固化尺寸精度的作用机理,将其分为液相与固相进行讨论,光固化行为的传播机理如图4所示^[19]。

陶瓷浆料的液相成分主要包括单体/低聚物、光引发剂、分散剂等。其中,单体/低聚物发生反应固化成型,光引发剂受到紫外光照射后,释放出活性自由基,使浆料中的单体/低聚物固化;分散剂能够调控浆料黏度,控制成型精度^[42]。通常光敏树脂须具备较低的收缩率、适当的反应速度和良好的流动性^[43],单体/低聚物作为液相的主要组成部分,为坯体提供强度,并影响固化速率与收缩率。不同单

体/低聚物表现出的性能各有不同,主要是由于官能团的差异导致的。一般而言,单官能团的单体通常表现出较低的固化速率,多官能团则能在聚合反应中增加交联密度,提高坯体强度^[44]。但随着官能团数量的增加,往往伴随着浆料黏度的剧烈上升,且反应速率过高也会导致物件受力增加而开裂^[45]。因此,往往采用混合单体的形式制备陶瓷浆料。对光引发剂而言,光聚合反应程度与光引发剂含量呈正相关,可促进浆料的转化率。此外,为保证浆料的流动性与稳定性,利用分散剂改性陶瓷浆料。分散剂的加入可以减少颗粒间的相互作用,降低浆料黏度,提升打印精度与表面质量,其原理如图5所示^[45]。然而,过量的分散剂会因自身缠绕、桥接使浆料黏度提升^[20]。

对于陶瓷浆料固相组分而言,粉末特性是影响光固化行为的重要因素。在光固化过程中,陶瓷颗粒对光的吸收、反射以及散射,与最终的成型精度密切相关,国内外学者进行了大量研究,并分析其影响机理。

固含量是影响陶瓷型芯性能的关键因素,目前已得到广泛研究。学者们发现固含量与浆料黏度呈幂函数增长,认为浆料固含量与黏度的关系遵循Krieger-Dougherty模型^[46],见式(1):

$$\eta = \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}\right)^{-n} \quad (1)$$

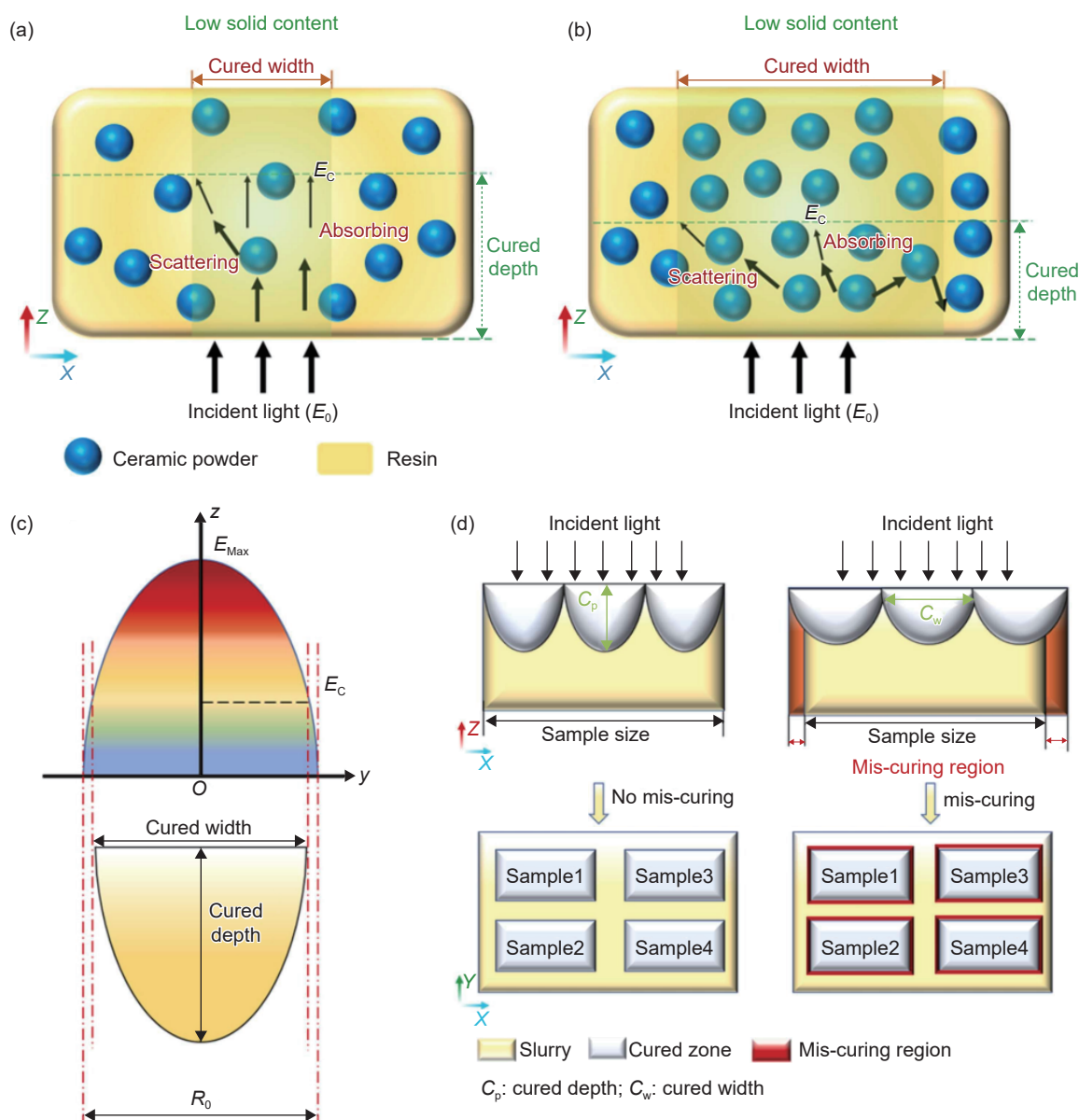


图 4 入射光与陶瓷浆料之间相互作用示意图^[19] (a)低固含量; (b)高固含量; (c)入射光能量分布示意图; (d)过固化区域的概念

Fig. 4 Schematic diagram of interaction between incident light and ceramic slurry^[19] (a) low solid loading; (b) high solid loading; (c) schematic diagram of incident light energy distribution; (d) concept of over-curing region

式中: η 是陶瓷浆料的黏度; φ 是实际固含量, φ_{max} 是浆料的理论最大固含量; n 为经验指数或拟合参数, 反映固含量对黏度增长的敏感程度。该模型表明, 越接近理论最大固含量, 浆料黏度增加得越快, 据此推算出最佳固含量, 对陶瓷浆料制备有指导作用。刘国仟等^[47] 研究了固含量对氧化铝浆料流变行为、固化行为以及性能的影响。发现氧化铝颗粒在固化过程中吸收、散射和反射紫外光, 导致分层现象的产生。随着固含量的增加, 一方面光敏树脂可吸收的紫外光减少, 另一方面氧化铝颗粒的堆积加剧了折射现象, 导致固化深度降低。

Gu 等^[48] 的研究结果表明, 随着固含量增加, 陶瓷型芯在打印和烧结过程中的收缩变形减小, 有利于改善陶瓷型芯的表面成型质量和精度。

针对陶瓷浆料的固化深度方面的研究往往引入 Beer-Lambert 公式, 见式(2)^[49-51]:

$$C_d = D_p \ln \left(\frac{E_0}{E_c} \right) \quad (2)$$

式中: C_d 为陶瓷浆料的固化深度, μm ; E_0 为曝光能量, mJ/cm^2 ; E_c 为实现光固化所需的最小能量, mJ/cm^2 ; D_p 为光在陶瓷浆料中的有效穿透深度, 表征固化光沿传播方向衰减的特征长度, μm 。一般

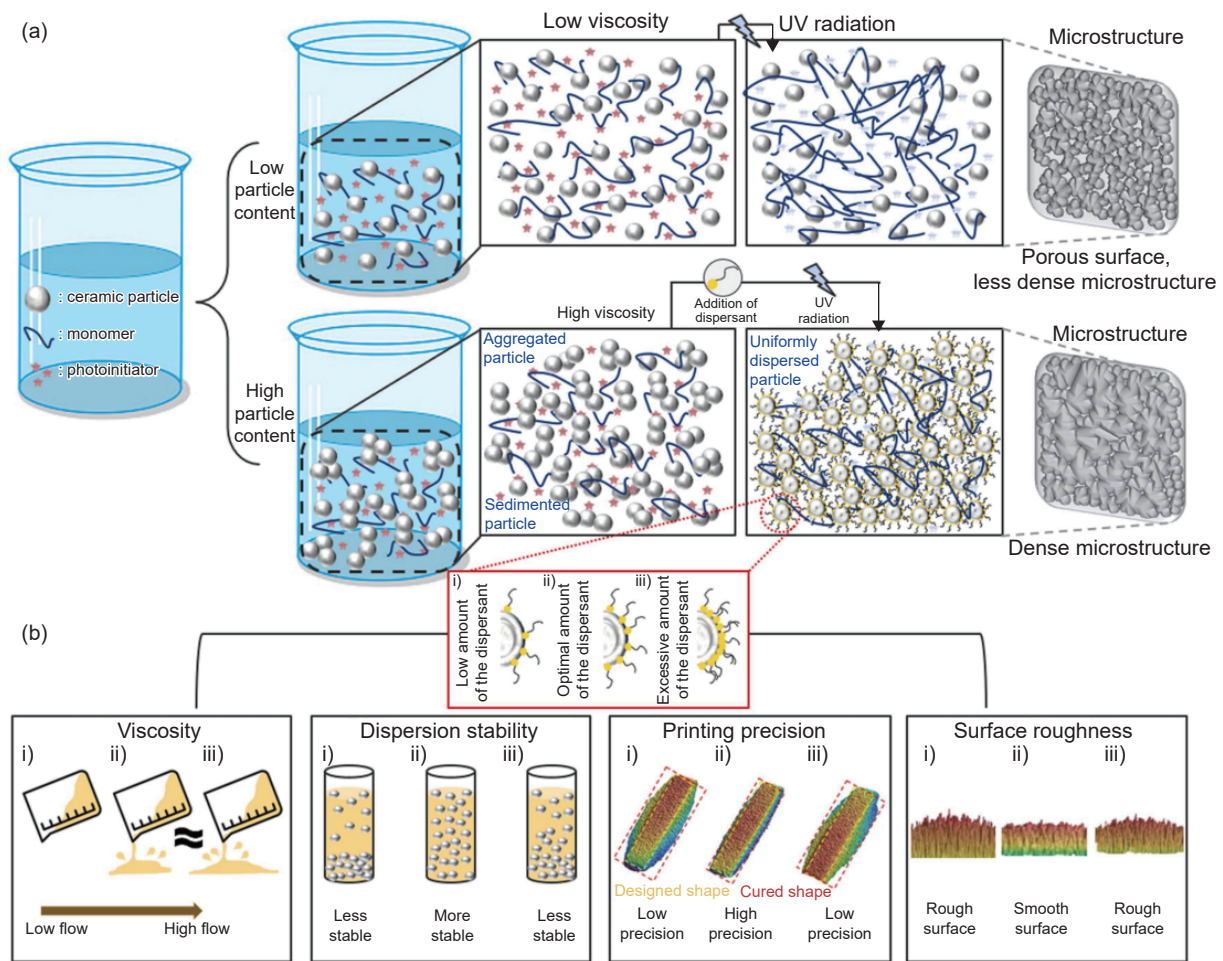


图5 陶瓷浆料分散调控对尺寸精度与表面质量的影响机制^[45] (a)制备高固含量致密微观结构陶瓷浆料示意图; (b)不同分散剂浓度的陶瓷浆料和固化坯体的性能表征示意图

Fig. 5 Mechanism by which dispersion regulation of ceramic slurries affecting dimensional accuracy and surface quality^[45]
(a) schematic diagram of the preparation of ceramic slurries containing high solid loading for the dense microstructure;
(b) schematic diagram of the performance characterization of ceramic slurries and cured green bodies with different dispersant concentrations

而言, 较低的 E_c 值是获得高精度坯体的关键因素。而 D_p 的大小取决于陶瓷固含量、粒径大小以及陶瓷颗粒和光敏树脂的折射率差。高固含量的浆料会导致折射现象加剧, 使固化深度降低, 过固化区域增加, 极大地影响光固化成型样品的精度。因此, 固含量不一定越高越好, 需与浆料黏度、成型精度等方面一起考虑。

Qian 等^[52] 发现随着氧化铝颗粒粒径的增大, 固化深度增加, 散射程度略有增加, 陶瓷坯体精度下降。Ozkan 等^[53] 的研究指出陶瓷颗粒与光敏树脂的低折射率差是获得高固化深度的关键, 如式(3)所示:

$$\Delta n^2 = (n_{\text{ceramic}} - n_{\text{monomer}})^2 \quad (3)$$

式中: Δn 为折射率差; n_{ceramic} 与 n_{monomer} 分别表示陶瓷颗粒与光敏树脂的折射率。

An 等^[21] 研究了 ZrO_2 含量对光固化行为的影响, 其研究结果与上述结论一致。由于 ZrO_2 与光敏树脂的折射率相差较大, 且固含量高达 60% (体积分数), 在陶瓷颗粒与 ZrO_2 的相互作用下会发生更加显著的折射和散射行为, 导致固化深度降低, 过固化区域增大, 成型精度下降。最终发现, 当 ZrO_2 体积分数为 2% 时, 浆料拥有良好的光固化特能。

综上所述, 选择合适的陶瓷浆料配方、明确光在陶瓷浆料中的传播机制对提高陶瓷型芯精度与抑制光固化产生的缺陷有重要影响, 图 6 总结了陶瓷浆料制备对光固化的影响。然而, 在目前的研究中, 往往将光敏树脂与陶瓷颗粒对光固化行为的影响分开讨论, 这不足以满足高精度陶瓷型芯的成型。因此, 还需要进一步探索打印工艺与浆料配方的协同作用, 这对光固化制备陶瓷型芯具有重要的工程意义。

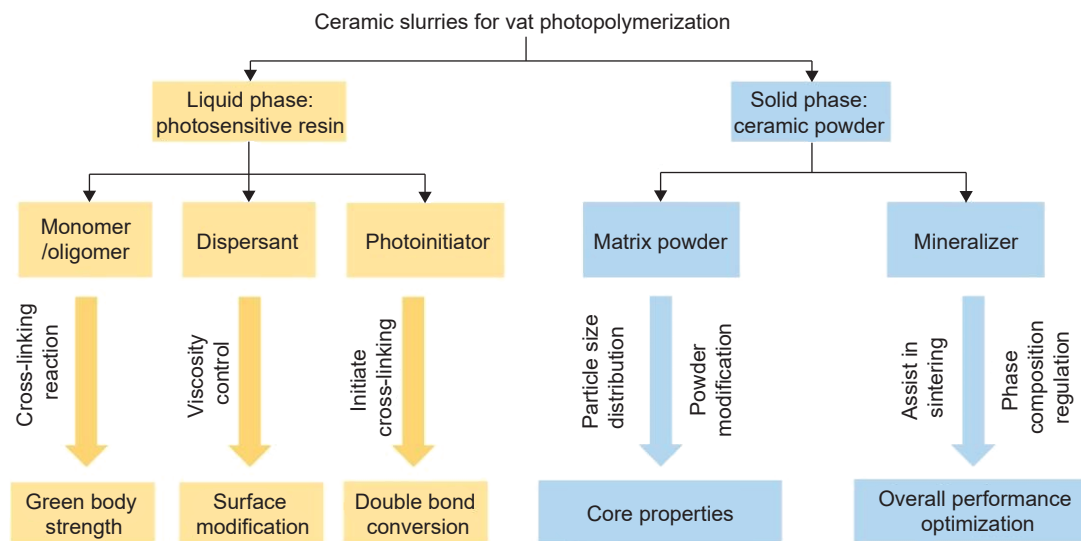


图 6 陶瓷浆料制备对光固化的影响

Fig. 6 Effect of ceramic slurry preparation on vat photopolymerization

3 台阶效应及各向异性控制研究进展

基于增材制造技术成型原理,形成的坯体往往存在明显的层间间隙,导致台阶效应的出现,造成陶瓷型芯结构性能各向异性,影响尺寸精度和表面粗糙度。因此,为改善光固化制备陶瓷型芯结构的各向异性,大量学者对其形成机理与改性方法进行了探究。

鲁中良等^[22]基于光固化成型原理,建立了分析台阶效应的数学模型,根据几何关系,台阶高度 δ 可由式(4)表示:

$$\delta = \frac{T}{\cos \theta} \cos(\alpha - \theta) \quad (4)$$

式中: α 为水平面与理论轮廓线之间的夹角; T 为分层厚度; θ 为实际表面轮廓的切线与理论轮廓线的夹角。

陈典典等^[54]针对不同打印方向对硅基陶瓷型芯性能的影响进行深入研究并作机理分析,陶瓷颗粒在重力作用下产生沉积,导致浆料上层陶瓷颗粒较少、光敏树脂较多,而下层中陶瓷颗粒集中分布,使其在后续的脱脂-烧结阶段中有裂纹产生,随着烧结过程的进行,裂纹不断扩展,使陶瓷型芯表现出各向异性。Zhao等^[55]认为陶瓷颗粒在浆料中的沉降对DLP中层状结构的形成起着关键作用,可以通过提高浆料稳定性、减小切片层厚和缩短打印时间来降低沉降速度,从而抑制层状结构的形成。Li等^[56]通过有限元模拟分析陶瓷型芯层状结构形成,并探究机理。研究发现,在浆料铺展过程中,由于陶瓷颗粒的吸附与沉降,细颗粒更容易集中在上下表面,粗颗粒则保留在片层结构内部,由于二者

烧结特性的差异,致使陶瓷型芯最终表现为各向异性。

学者们往往通过矿化剂^[57]对光固化陶瓷型芯的各向异性进行改性研究。许西庆等^[58]以莫来石为矿化剂,通过DLP技术制备硅基陶瓷型芯。研究发现,少量莫来石可促进陶瓷颗粒烧结致密化和打印层间扩散结合,提高结构均匀性,从而减弱陶瓷型芯的各向异性。Li等^[59]通过掺入成孔剂,并调节烧结工艺的方式调控各向异性。成孔剂起到增大孔隙连通性和孔径大小的作用,同时陶瓷型芯的体积密度、收缩率和弯曲强度随着烧结温度的升高而增加,优化了型芯的整体性能,使其适用于高温铸造领域。

4 光固化陶瓷型芯烧结收缩及相变研究进展

光固化制备的陶瓷型芯在烧结过程中发生显著的体积收缩,容易导致变形和开裂,是影响陶瓷型芯尺寸精度的另一重要因素,因此有必要对陶瓷型芯的烧结动力学展开综述。陶瓷烧结的驱动力主要源于粉末的表面能,经烧结后形成多晶体,其界面能逐渐取代表面能,使烧结体趋于稳定。主要传质方式分为两类:“蒸发-凝聚”传质与扩散传质。蒸发-凝聚是烧结初期常见的传质方式,此时烧结颈扩大,颗粒逐渐转变为不规则形状。扩散传质源于空位浓度差,往往从高空位浓度向低空位浓度处迁移,即向烧结颈部方向传质,从而达到填充气孔的效果^[60]。最终宏观表现为体积收缩与孔隙率下降,但这对于陶瓷型芯后续的脱除处理不利。

因此,研究烧结机理以平衡陶瓷型芯弯曲强度、孔隙率与收缩率三者匹配关系具有重要意义。

随着烧结过程的进行,一方面,烧结颈部逐渐填充、颗粒接触点处结构基元迁移,导致颗粒结合与气孔缩小、体积收缩,另一方面,陶瓷颗粒相互接触产生的压应力进一步加剧型芯收缩。

为探究陶瓷材料的烧结机理, Li 等^[61]通过 Laplace 方程给出了与曲率相关的表达式,如式(5)所示:

$$\Delta\sigma = \gamma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为孔隙表面的应力差; γ 为孔隙的表面张力; R_1 和 R_2 为表面上相互垂直的两条曲线的曲率半径。烧结初期的传质方式主要是蒸发-凝聚传质,其产生的根本原因是颗粒凸表面与烧结颈凹表面之间曲率半径的差异,通过 2 个颗粒连接处的负曲率半径的烧结颈,物质从蒸气压较高的凸表面蒸发,并在蒸汽压较低的凹形烧结颈处凝聚,从而促进烧结颈长大。

Li 等^[62]基于 Kuczynski 双粒子模型,对陶瓷型芯的烧结进行研究,采用 SL 技术在 1150 °C 下制备出孔隙率为 37.9%、弯曲强度为 33.7 MPa 的氧化铝陶瓷型芯。球形颗粒接触区烧结颈生长速率见式(6):

$$\frac{x}{r} = \left(\frac{3\sqrt{\pi}\gamma M^{\frac{3}{2}} P_0}{\sqrt{2} R^{\frac{3}{2}} T^{\frac{3}{2}} d^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot r^{-\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中: T 为烧结温度; P_0 为蒸气压; t 为时间; γ 为表面张力; r 为原始粉料粒度; M 为摩尔质量; R 为气体常数; d 为密度。由式(6)可知,提高烧结温度有利于加快烧结颈生长速率,促进颗粒间结合。但随着烧结过程的进行,球形颗粒逐渐变形,导致双粒子模型仅适用于烧结初期。随着烧结过程进入中期,会逐渐产生圆形气孔,使连通气孔逐渐闭合,烧结体开始致密化,而烧结后期则对应晶粒生长和气孔粗化。同时还研究了烧结温度对晶粒尺寸的影响^[63],如式(7)所示:

$$d^n - d_0^n = kt \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right) \quad (7)$$

式中: d 为生长后的晶粒尺寸; d_0 为初始晶粒尺寸; k 为与材料及晶粒生长机制有关的常数; t 为烧结时间; R 为气体常数; Q 为活化能; n 为给定晶粒生长机制的常数。随着烧结温度升高,物质扩散与晶界迁移加快,促进氧化铝晶粒长大和烧结致密化,从而使孔隙率降低、收缩率增加。最终在 1350 °C 下

制备出满足要求的氧化铝陶瓷型芯。

Li 等^[23]从扩散理论的角度来解释烧结机理并阐释了 Y_2O_3 对氧化铝陶瓷型芯烧结行为的影响,如式(8)所示:

$$D = \frac{v\lambda^2}{6} \exp \left(\frac{-q}{kT} \right) \quad (8)$$

式中: D 为烧结扩散系数; v 为原子跃迁频率; λ 为原子跃迁距离; q 为原子扩散活化能; k 为玻尔兹曼常数; T 为烧结温度。烧结温度的升高提高了原子的扩散速率,促进了烧结过程的致密化,从而提高了氧化铝陶瓷型芯的力学性能。而 Y^{3+} 随 Y_2O_3 加入陶瓷型芯中,增加了 O^{2-} 的扩散活化能,从而降低 O^{2-} 的扩散系数,抑制型芯烧结致密化,达到增加孔隙率的目的。通过调节烧结温度与 Y_2O_3 含量的协同作用,从而制备出高孔隙率(40.8%)和低高温变形(0.63 mm)的氧化铝陶瓷型芯。

基于以上分析,烧结过程同时受烧结温度和粉末粒径的显著影响。陶瓷颗粒初始粒径越小,烧结颈生长速率越高,烧结驱动力越大,对烧结过程有明显的促进作用,可增强陶瓷型芯的力学性能,但对型芯的收缩率、显孔隙率以及浸出率有不利影响。因此,国内外众多学者针对粉末特性进行了研究。Funk 等^[64]提出了一种基于最密堆积原理的颗粒粒度分布函数,如式(9)所示:

$$V = \frac{D^n - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (9)$$

式中: V 为颗粒的累积体积分; $D_{\max}$ 为最大颗粒粒径; $D_{\min}$ 为最小颗粒粒径; n 为分布指数。基于此式可计算得出最佳粒度分布,实现颗粒紧密堆积,为探究最优颗粒级配提供了指导。安晓龙^[65]研究了颗粒级配对光固化成型硅基陶瓷型芯的影响,该因素对陶瓷型芯微观组织的作用机理如图 7 所示。研究发现,细粉含量越多,对烧结的促进作用越明显,使析出的 $ZrSiO_4$ 颗粒越多,有利于陶瓷型芯高温性能,同时会导致收缩率增加,为协同颗粒粒径与陶瓷型芯性能的关系,可选择 1200 °C 为烧结温度。Li 等^[37]对粗、中、细三种粉末进行颗粒级配。当添加比例为 2:1:1 时,细粉作为烧结基体为陶瓷型芯提供强度,而粗粉则阻碍烧结致密化,降低收缩。最终制备出显孔隙率达 36.1%、弯曲强度为 50.1 MPa 的氧化铝陶瓷型芯。

与铝基陶瓷型芯相比,硅基型芯因其复杂多晶性,成型精度与力学性能难以控制,随着烧结温度的增加,二氧化硅经相变后在高温下形成 β -方石英,冷却过程中, β -方石英向 α -方石英转变,同时伴随

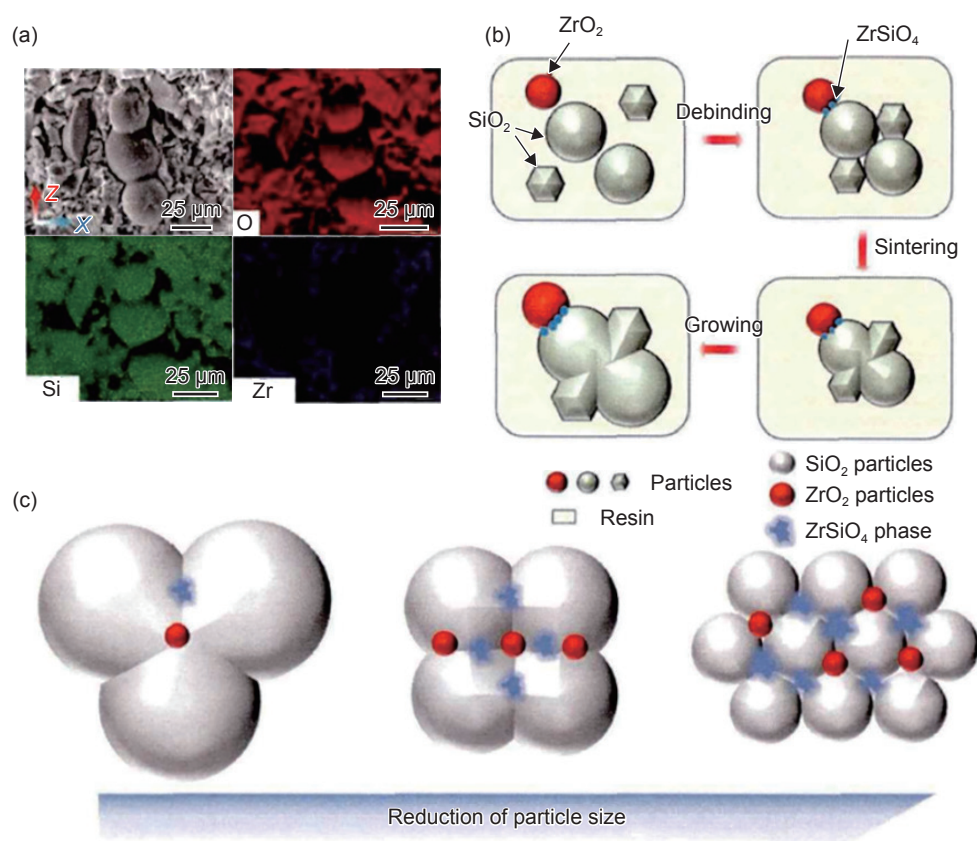


图 7 颗粒级配对陶瓷型芯组织演变的影响^[65] (a) 1200 °C 烧结后颗粒结合组织形貌及其 EDS 成分分布; (b) 脱脂-烧结过程中颗粒结合行为及 ZrSiO₄ 析出行为机理; (c) 陶瓷颗粒尺寸效应对颗粒结合行为及相组成的影响机理

Fig. 7 Effect of particle size distribution on microstructure evolution of ceramic cores^[65] (a) particle bonding microstructure and EDS elemental distribution after sintering at 1200 °C; (b) particle bonding behavior and ZrSiO₄ precipitation mechanism during debinding-sintering process; (c) mechanism of particle-size effect on particle bonding behavior and phase composition

体积收缩,进而影响陶瓷型芯的尺寸精度并可能诱发微裂纹^[24]。Kazemi 等^[66]研究发现,方石英约在 1380 °C 时在熔融石英颗粒表面结晶。模拟铸造后,由于方石英相变,陶瓷型芯的强度降低,且熔融石英颗粒表面形成的方石英显著降低了陶瓷型芯的浸出性。Bae 等^[67]依据 Avrami 动力学方程研究了硅基陶瓷型芯的相变动力学,通过实验数据拟合说明方石英的形成受一维界面生长控制。Bae 课题组^[68]还发现当方石英含量大于 30% 时,随含量增加,陶瓷型芯性能逐渐下降。

基于此,需对二氧化硅相变有清楚的认识,并评估方石英含量。为验证硅基陶瓷型芯在烧结过程中发生的相变及确定方石英含量,分别采用 X 射线衍射确定其物相组成以及使用 K 值法计算方石英含量,二者均可通过 Jade 软件进行分析。利用 K 值法研究氧化铝含量对硅基陶瓷型芯结晶行为的影响^[69],见式(10):

$$\frac{w_c}{w_a} = K \frac{A_c}{A_a} \quad (10)$$

式中: w_c 和 w_a 分别为方石英和氧化铝的含量; A_c 和 A_a 分别为两相的 XRD 峰面积; K 是比例常数,可通过 PDF 标准卡中的 RIR 值确定。两相的 XRD 峰面积比大致与两相的质量分数比成正比相关,而氧化铝添加量是可知的,由此可推算出方石英含量。

矿化剂作为陶瓷型芯常用的增强相,其添加量对调控方石英含量有重要影响。Zheng 等^[35]研究了氧化铝对硅基陶瓷型芯烧结的影响,其中氧化铝起“晶种”的作用,使熔融氧化硅转变为方石英。但过量的氧化铝会促进粗颗粒和方石英的生长,且由于方石英相变导致的体积收缩产生微裂纹,致使弯曲强度下降。该课题组同时还研究了 SiB₆ 作为矿化剂对硅基型芯的影响^[36],其中 SiB₆ 与熔融二氧化硅基体通过氧化反应生成硼硅酸盐玻璃相,破坏了 Si—O 键近程有序的结构,抑制方石英的析出。由此可见,矿化剂的应用对方石英析晶有不同影响,需根据实际需求决定矿化剂的种类,表 2^[35-36, 58, 70-71]总结了各类矿化剂对硅基型芯相变的影响。

烧结过程对陶瓷型芯的制备而言是不可绕过的难题,陶瓷颗粒在此过程中的传质、扩散、致密化等一系列复杂变化,与陶瓷型芯的性能息息相关。因此,对烧结机理的探索有利于制备性能优异的陶瓷型芯。但如何控制烧结工艺制度、如何选择矿化剂种类与含量,均是目前3D打印陶瓷型芯面临的问题与挑战。

5 光固化陶瓷型芯高温蠕变及铸造应用研究进展

经脱脂和烧结后的陶瓷型芯,在空心叶片铸造过程中还需经受1550℃左右的高温考验及金属液冲击,因此陶瓷型芯需具有良好的高温强度、高温抗蠕变性能,以保证空心涡轮叶片的成型精度。因此研究陶瓷型芯在铸造过程中的尺寸变化具有重要意义。

陶瓷型芯在恒定的温度和载荷下发生的连续而缓慢的塑性变形,即高温蠕变现象。其内在原因是晶格内原子的热运动,随温度升高、应力增大和时间的延长而增加。目前认为陶瓷型芯蠕变机理与原子扩散、晶界滑移、孔隙率等因素有关^[25, 72-73]。

为了抑制铸造态陶瓷型芯在高温下产生的蠕变, Li等^[37]基于颗粒级配将氧化铝型芯的高温蠕变变形量降至2.27 mm,并指出孔隙率而非晶粒尺寸是影响型芯高温抗蠕变性能的重要因素。马月婷等^[38]研究了硅酸锆添加量对光固化制备硅基陶瓷型芯的影响,在铸造过程中,由于硅酸锆熔点高,能均匀分布在基体中,抑制了液相的生成,显著提高了型芯的高温性能,使陶瓷型芯的蠕变变形量下降至1.78 mm,高温弯曲强度提升至37.13 MPa。Hu等^[74]利用立体光刻技术设计并制作了具有点阵结构的陶瓷型芯,有效避免了裂纹

的产生,减少了因收缩引起的尺寸误差,所得陶瓷型芯的高温抗弯曲强度为12.87 MPa,蠕变变形量为0.345 mm。

优异的高温抗蠕变性能对涡轮叶片的尺寸精度有重要意义,在此过程中,陶瓷颗粒的黏性流动加剧、内部结构发生改变,均显著影响蠕变性能。而矿化剂的加入与型芯结构设计的改进可有效抑制高温蠕变,对陶瓷型芯的实际应用有重要帮助。表3^[26, 55, 58, 74, 75-78]对陶瓷型芯在铸造过程中的蠕变量进行了总结,并与传统工艺做了对比。可以发现,光固化制备的型芯高温蠕变明显偏高,对涡轮叶片的成型精度不利。因此,关于型芯高温蠕变的调控还需进行深入研究。

总体而言,光固化技术制备的陶瓷型芯已基本满足空心叶片性能要求,目前已有研究人员针对其在精密铸造中的实际应用展开了研究。清华大学吕志刚课题组^[75]利用光固化技术成功制备出多层壁复杂陶瓷型芯,并在实际工艺条件下进行金属浇注和脱芯验证,型芯性能已能满足涡轮叶片要求,如图8所示。西安交通大学李涤尘课题组^[79]提出了一种基于光固化的整体式陶瓷铸型制备工艺,并在真空下完成浇注验证,最终制备出无疏松缩孔的空心叶片。基于此,该课题组还通过引入硅粉在陶瓷铸型中原位生成莫来石晶须,并通过定向凝固,实现了涡轮叶片的快速成型。

综上所述,通过光固化技术制备出的陶瓷型芯虽已基本满足空心叶片浇注要求,但与传统工艺相比仍有较大差距。明确烧结、蠕变机理对于精准控制陶瓷型芯尺寸精度有重要意义,且矿化剂的选择及相关作用机理对陶瓷型芯性能亦有着重要影响,最终制备出低收缩、无缺陷的陶瓷型芯是目前及日后陶瓷3D打印领域亟待解决的难题之一。

表2 各类矿化剂对硅基型芯相变的影响^[35-36, 58, 70-71]

Table 2 Effect of various mineralizers on the phase transformation of silica-based cores^[35-36, 58, 70-71]

Mineralizer	Result	Mechanism	Ref.
Al ₂ O ₃	Promotion	As a seed for the crystallization of fused silica into cristobalite	[35]
SiB ₆	Inhibition	The short-range ordered structure of Si—O bonds is destroyed by oxidation	[36]
Mullite	Promotion	Heterogeneous nucleation	[58]
ZrSiO ₄	Promotion	Heterogeneous nucleation	[70]
Cristobalite	Promotion first and then inhibition	Cristobalite increases the free surface energy of the system and increases the nucleation position, thereby promoting crystallization; the volume expansion of the β-cristobalite to α-cristobalite confines compressive stress on the surrounding fused silica and inhibits crystallization	[71]

表 3 光固化 3D 打印陶瓷型芯高温蠕变相关进展^[26, 55, 58, 74, 75-78]

Table 3 Progress related to high-temperature creep of vat photopolymerization additive manufacturing ceramic cores^[26, 55, 58, 74, 75-78]

Forming	Material	Casting temperature/℃	Deflection/mm	Ref.
SL	Al ₂ O ₃ +16%Y ₂ O ₃	1550	0.63	[23]
SL	Al ₂ O ₃	1550	2.27	[37]
SL	SiO ₂ +15%ZrSiO ₄	1300	1.78	[38]
DLP	SiO ₂ +nano-SiO ₂	1540	0.25	[33]
DLP	SiO ₂	1550	7.48	[75]
Injection molding	SiO ₂ +nano-SiO ₂	1540	0.2	[76]
injection molding	SiO ₂ +3% mullite fiber	1540	0.12	[77]
injection molding	SiO ₂ +24%ZrSiO ₄	1550	0.15-0.30	[78]

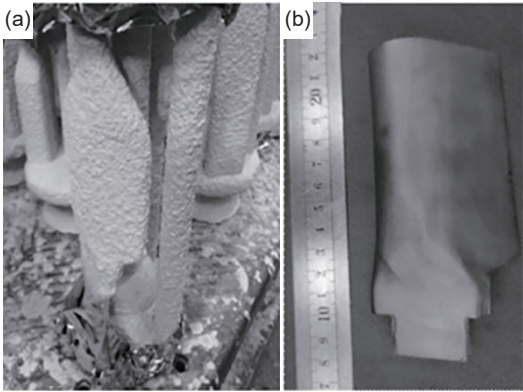


图 8 光固化陶瓷型芯应用实例^[75] (a)陶瓷铸型;
(b)单晶叶片

Fig. 8 Application examples of vat photopolymerization core^[75] (a)ceramic mold; (b)single-crystal blade

6 总结与展望

陶瓷型芯作为形成空心叶片内腔结构的重要转接件,其传统制备方法存在生产周期长、制备工艺复杂等缺点,亟待发展新的陶瓷型芯制备工艺。光固化增材制造技术因其成型速度快、成本低、无需模具等优势,为制造复杂结构的陶瓷型芯提供了新的选择。在光固化增材制造过程中存在固化精度差、台阶效应等问题,脱脂-烧结过程中容易出现体积收缩甚至开裂现象,在浇注过程中容易发生高温蠕变,上述问题均会严重影响陶瓷型芯的尺寸精度。因此,本文针对以上问题,从光固化增材制造陶瓷型芯的尺寸变形机理出发,重点介绍了陶瓷浆料制备、热处理过程对陶瓷型芯尺寸的影响,并对解决方案进行了总结。面向未来,光固化增材制造陶瓷型芯尺寸精度控制仍需围绕以下几个方面深入开展研究:

(1)高性能浆料设计。在液相成分方面,可通

过调节预混液中各类成分的种类、配比,以期提高固含量、降低黏度。在固相方面,可从粉末特性出发,选用与光敏树脂折射率相近的陶瓷颗粒,并辅以颗粒级配,开发出性能优异的陶瓷浆料。

(2)打印与烧结工艺协同调控。合适的烧结制度可以最大程度地避免陶瓷型芯烧结收缩引发的变形问题,而且对硅基陶瓷型芯而言,烧结温度直接影响方石英的析晶与相变,进一步影响型芯的尺寸精度。因此,关于陶瓷型芯烧结工艺的探索也将是未来研究的重点之一。

(3)标准化评价体系。面向工程应用需求,进一步完善陶瓷型芯尺寸精度评价方法与标准体系,构建兼顾尺寸精度、表面质量、力学性能、高温稳定性及浸出性能的综合评价框架,为光固化增材制造陶瓷型芯的工程化应用和标准化发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 于德海,王飞,何博,等.高温合金精密铸造用陶瓷型芯成型技术研究进展[J].现代技术陶瓷,2022,43(2):92-102.
Yu D H, Wang F, He B, et al. Research progress of molding technology of ceramic core for superalloy investment casting[J]. Advanced Ceramics, 2022, 43(2): 92-102.
- [2] 吴笑非,李鑫,许西庆,等.不同粒度莫来石粉改性硅基陶瓷型芯的制备及性能[J].航空材料学报,2021,41(4):128-133.
Wu X F, Li X, Xu X Q, et al. Fabrication and properties of silica-based ceramic cores modified by mullite powders with different particle sizes[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 128-133.
- [3] 李风光,唐世艳,刘富初,等.淀粉对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响[J].航空材料学报,2016,36(6):86-91.

- Li F G, Tang S Y, Liu F C, et al. Effects of starch on properties of alumina-based ceramic cores[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2016, 36(6): 86-91.
- [4] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯概述[J]. *铸造*, 2016, 65(9): 868-873.
- Chen X Y, Xiao L, Yu J B, et al. Review of ceramic cores in investment casting of superalloy hollow blades[J]. *Foundry*, 2016, 65(9): 868-873.
- [5] Li J G, An X L, Liang J J, et al. Recent advances in the stereolithographic three-dimensional printing of ceramic cores: challenges and prospects[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 117: 79-98.
- [6] Park H Y, Kim E H, Cho G H, et al. Process development of fabricating ceramic core using 3D printing technique[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 231: 382-387.
- [7] Yin S, Guo L, Pan L M, et al. Porous fused silica ceramics prepared by gelcasting using multigrade fused silica powders[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 819: 152982.
- [8] 刘岩松, 李文博, 刘永胜, 等. 3D打印陶瓷铸型研究与应用进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(7): 18-29.
- Liu Y S, Li W B, Liu Y S, et al. Research and application progress of 3D printing ceramic casting mould[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(7): 18-29.
- [9] 吴宇, 陈冰清, 刘伟, 等. 增材制造镍基高温合金在航空发动机与燃气轮机中的研究应用进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(1): 31-45.
- Wu Y, Chen B Q, Liu W, et al. Progress in research and applications of additively manufactured nickel-based superalloy in aero-engines and gas turbines[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(1): 31-45.
- [10] 何汝杰, 周妮平, 张可强, 等. SiC陶瓷材料增材制造研究进展与挑战[J]. *现代技术陶瓷*, 2021, 42(增刊1): 1-42.
- He R J, Zhou N P, Zhang K Q, et al. Development and challenges of additive manufacturing of SiC ceramic[J]. *Advanced Ceramics*, 2021, 42(S1): 1-42.
- [11] 顾薛苏, 殷杰, 崔崇, 等. C_p/SiC 复合材料的原料高效改性及其3D打印制备研究进展[J]. *现代技术陶瓷*, 2022, 43(4): 229-245.
- Gu X S, Yin J, Cui C, et al. Research progress on efficient modification of C_p/SiC composites and 3D printing preparation[J]. *Advanced Ceramics*, 2022, 43(4): 229-245.
- [12] Huang S J, Ye C S, Zhao H P, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 29: 100802.
- [13] Peng L, Jiang W M, Yang L, et al. Effect of silica sol on performance and surface precision of alumina ceramic shell prepared by binder jetting[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(17): 24372-24382.
- [14] 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]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 53: 43-47.
- [15] 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]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48: 102396.
- [16] 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]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(15): 5758-5766.
- [17] Tang S Y, Yang Y R, Fan Z T, et al. A novel composite binder design for direct ink writing alumina-based ceramics with enhanced strength at low sintering temperature[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(6): 7963-7974.
- [18] 马月婷, 尹绍奎, 于瑞龙, 等. 光固化3D打印陶瓷型芯技术的研究进展[J]. *铸造*, 2022, 71(3): 271-276.
- Ma Y T, Yin S K, Yu R L, et al. Research progress of light-curing 3D printing ceramic core technology[J]. *Foundry*, 2022, 71(3): 271-276.
- [19] Mu Y H, Chen J W, An X L, et al. Effect of synergism of solid loading and sintering temperature on microstructural evolution and mechanical properties of 60 vol% high solid loading ceramic core obtained through stereolithography 3D printing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2023, 43(2): 661-675.
- [20] 李文利, 周宏志, 刘卫卫, 等. 光固化3D打印陶瓷浆料及流变性研究进展[J]. *材料工程*, 2022, 50(7): 40-50.
- Li W L, Zhou H Z, Liu W W, et al. Research progress in ceramic slurries and rheology via photopolymerization-based 3D printing[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(7): 40-50.
- [21] An X L, Mu Y H, Chen J W, et al. Compositional optimization of high-solid-loading ceramic cores via 3D printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 103054.
- [22] 鲁中良, 姜博, 周江平, 等. 基于光固化成型技术的空心叶片陶瓷铸型制造缺陷控制[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(21): 111-117.
- Lu Z L, Jiang B, Zhou J P, et al. Defects control of manufacturing ceramic mold of hollow turbine blade based on stereo lithography[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(21): 111-117.
- [23] Li X, Su H J, Dong D, et al. In-situ $Y_3Al_5O_{12}$ enhances comprehensive properties of alumina-based ceramic cores by vat photopolymerization 3D printing[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 73: 103645.

- [24] 潘继勇, 刘孝福, 何立明, 等. 硅基陶瓷型芯的研究进展[J]. 铸造, 2012, 61(2): 174-178.
Pan J Y, Liu X F, He L M, et al. Research progress of silica-base ceramic core[J]. Foundry, 2012, 61(2): 174-178.
- [25] Zhao G, Hu K H, Feng G Q, et al. Creep mechanism of zircon-added silica ceramic cores formed by stereolithography[J]. Ceramics International, 2021, 47(12): 17719-17725.
- [26] 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 F L, Chen Y, Miao K, et al. Rapid manufacturing of directional crystal turbine blade based on UV curing 3D printing technology[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(9): 1828-1836.
- [27] 陈超越, 殷宇豪, 徐松哲, 等. 航空发动机叶片用陶瓷型芯的光固化增材制造研究现状[J]. 航空制造技术, 2022, 65(增刊1): 67-76.
Chen C Y, Yin Y H, Xu S Z, et al. Research status of lithography-based additive manufacturing of ceramic cores for aero-engine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(S1): 67-76.
- [28] 许西庆, 杨永康, 李杰, 等. 空心叶片铸造用陶瓷型芯的 3D 打印及性能调控研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(6): 1583-1594.
Xu X Q, Yang Y K, Li J, et al. Research progress on 3D printing and performance optimization of ceramic cores for hollow blade casting[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(6): 1583-1594.
- [29] An X L, Mu Y H, Liang J J, et al. Stereolithography 3D printing of ceramic cores for hollow aeroengine turbine blades[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 127: 177-182.
- [30] 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]. Scripta Materialia, 2021, 194: 113665.
- [31] 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 Y, Wang G, Duan W Y, et al. Application and prospect of photopolymerization technologies for ceramics[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(5): 867-877.
- [32] Yang K, Li Q L, Chen T C, et al. High-performance 3D-printed Al_2O_3 cores for low-temperature sintering[J]. Ceramics International, 2023, 49(22): 36894-36906.
- [33] 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]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(8): 4650-4657.
- [34] Niu S X, Luo Y S, Li X, et al. 3D printing of silica-based ceramic cores reinforced by alumina with controlled anisotropy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 922: 166325.
- [35] Zheng W, Wu J M, Chen S, et al. Influence of Al_2O_3 content on mechanical properties of silica-based ceramic cores prepared by stereolithography[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(6): 1381-1388.
- [36] Zheng W, Wu J M, Chen S, et al. Improved mechanical properties of SiB_6 reinforced silica-based ceramic cores fabricated by 3D stereolithography printing[J]. Ceramics International, 2022, 48(15): 21110-21117.
- [37] Li X, Su H J, Dong D, et al. Enhanced comprehensive properties of stereolithography 3D printed alumina ceramic cores with high porosities by a powder gradation design[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 131: 264-275.
- [38] 马月婷, 尹绍奎, 于瑞龙, 等. 硅酸锆含量对增材制造硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(6): 735-740.
Ma Y T, Yin S K, Yu R L, et al. Effect of zircon content on the properties of additive manufacturing silica based ceramic core[J]. Foundry, 2022, 71(6): 735-740.
- [39] Liu J Q, Li Q L, Huo M D, et al. Microstructure and mechanical properties of 3D-printed nano-silica reinforced alumina cores[J]. Ceramics International, 2022, 48(20): 30282-30293.
- [40] 周伟召, 李涤尘, 周鑫南, 等. 基于光固化的直接陶瓷成型工艺[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(3): 198-201.
Zhou W Z, Li D C, Zhou X N, et al. Direct fabrication process of ceramics based on stereolithography[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(3): 198-201.
- [41] Zhang K Q, Xie C, Wang G, et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al_2O_3 slurry for stereolithography based additive manufacturing[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 203-208.
- [42] 李乔磊, 李金国, 梁静静, 等. 光固化 3D 打印制备空心叶片陶瓷型芯研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1339-1344.
Li Q L, Li J G, Liang J J, et al. Research progress in ceramic core of hollow blades by photocurable 3D printing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11): 1339-1344.
- [43] 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, 2021.
Chen X. Research on nano-modification of light-cured 3D printing silicon oxide-based ceramic core[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [44] Qian C C, Hu K H, Lu Z G, et al. Volume shrinkage and

- conversion rate of Al_2O_3 ceramic stereolithography suspension polymerised by ultraviolet light[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 267: 124661.
- [45] Kim I, Kim S, Andreu A, et al. Influence of dispersant concentration toward enhancing printing precision and surface quality of vat photopolymerization 3D printed ceramics[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 52: 102659.
- [46] Xu X H, Zhou S X, Wu J F, et al. Inter-particle interactions of alumina powders in UV-curable suspensions for DLP stereolithography and its effect on rheology, solid loading, and self-leveling behavior[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(4): 2763-2774.
- [47] 刘国仟, 闫长海, 张可强, 等. 立体光刻增材制造中固含量对 Al_2O_3 陶瓷性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2022, 37(3): 353-360.
- Liu G Q, Yan C H, Zhang K Q, et al. Effect of solid loading on the property of Al_2O_3 ceramics in stereolithographic additive manufacturing[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2022, 37(3): 353-360.
- [48] Gu Y, Duan W Y, Wang T C, et al. Additive manufacturing of Al_2O_3 ceramic core with applicable microstructure and mechanical properties via digital light processing of high solid loading slurry[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(15): 25216-25224.
- [49] Gentry S P, Halloran J W. Depth and width of cured lines in photopolymerizable ceramic suspensions[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(10): 1981-1988.
- [50] Gentry S P, Halloran J W. Absorption effects in photopolymerized ceramic suspensions[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(10): 1989-1994.
- [51] Zakeri S, Vippola M, Levänen E. A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 35: 101177.
- [52] Qian C C, Hu K H, Li J H, et al. The effect of light scattering in stereolithography ceramic manufacturing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(14): 7141-7154.
- [53] Ozkan B, Sameni F, Bianchi F, et al. 3D printing ceramic cores for investment casting of turbine blades, using LCD screen printers: the mixture design and characterisation[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42(2): 658-671.
- [54] 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 D D, Bao M D, Li X, et al. Research on anisotropy of 3D printed silicon oxide-based ceramic cores[J]. *China Ceramics*, 2020, 56(5): 33-39.
- [55] Zhao D, Su H J, Hu K H, et al. Formation mechanism and controlling strategy of lamellar structure in 3D printed alumina ceramics by digital light processing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 52: 102650.
- [56] 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]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58: 103055.
- [57] 陈天赐, 李乔磊, 张辉, 等. 矿化剂对陶瓷型芯性能的影响[J]. *铸造*, 2022, 71(10): 1262-1270.
- Chen T C, Li Q L, Zhang H, et al. Effect of mineralizers on properties of ceramic core[J]. *Foundry*, 2022, 71(10): 1262-1270.
- [58] 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.
- Xu X Q, Fan J X, Niu S X, et al. Anisotropy control and high-temperature strengthening of silica ceramic cores fabricated by 3D printing[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(9): 2422-2429.
- [59] 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]. *Ceramics International*, 2021, 47(19): 27668-27676.
- [60] 曾燕伟. 无机材料科学基础[M]. 2版. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2015.
- Zeng Y W. *Fundamentals of inorganic materials science*[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2015.
- [61] 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]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 104: 19-32.
- [62] 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]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(14): 4825-4836.
- [63] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Effect of sintering temperature in argon atmosphere on microstructure and properties of 3D printed alumina ceramic cores[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2020, 9(2): 220-231.
- [64] Funk J E, Dinger D R. *Predictive process control of crowded particulate suspensions*[M]. Boston, MA: Springer US, 1994.
- [65] 安晓龙. 光固化增材制造一种高固含量硅基陶瓷型芯组织与性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- An X L. Study on microstructure and mechanical properties of a high-solid-loading silicon-based ceramic core by stereolithography additive manufacturing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.

- [66] Kazemi A, Faghihi-Sani M A, Alizadeh H R. Investigation on cristobalite crystallization in silica-based ceramic cores for investment casting[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33(15/16): 3397-3402.
- [67] Bae C J, Kim D, Halloran J W. Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(2/3): 618-623.
- [68] Bae C J, Halloran J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1255-1262.
- [69] Liang J J, Lin Q H, Zhang X, et al. Effects of alumina on cristobalite crystallization and properties of silica-based ceramic cores[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 204-209.
- [70] Zhang J, Yu K B, Wu J M, et al. Effects of ZrSiO_4 content on properties of SiO_2 -based ceramics prepared by digital light processing[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 9584-9591.
- [71] 赵效忠. 陶瓷型芯的制备与使用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Zhao X Z. Preparation and application of ceramic core[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [72] Wereszczak A A, Breder K, Ferber M K, et al. Dimensional changes and creep of silica core ceramics used in investment casting of superalloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(19): 4235-4245.
- [73] Wei Y M, Lu Z G, Guo X. Influence of alkaline oxide on the deformation of ceramic shell mould at high temperatures during investment casting[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(17): 21197-21204.
- [74] Hu K H, Wang H Y, Lu K, et al. Fabrication of silica-based ceramic cores with internal lattice structures by stereolithography[J]. *China Foundry*, 2022, 19(5): 369-379.
- [75] 胡可辉, 吕志刚, 陆宽, 等. 复杂陶瓷型芯增材制造及浇注工艺验证[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(3): 227-234.
- Hu K H, Lyu Z G, Lu K, et al. Additive manufacturing of complex ceramic cores and verification of casting process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(3): 227-234.
- [76] Xu X Q, Niu S X, Wang X G, et al. Fabrication and casting simulation of composite ceramic cores with silica nanopowders[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(15): 19283-19288.
- [77] Niu S X, Xu X Q, Li X, et al. Microstructure evolution and properties of silica-based ceramic cores reinforced by mullite fibers[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 829: 154494.
- [78] Pan Z P, Guo J Z, Li S M, et al. Experimental study on high temperature performances of silica-based ceramic core for single crystal turbine blades[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(1): 548-555.
- [79] 赵磊, 李涤尘, 吴海华, 等. 基于光固化原型的燃气轮机涡轮叶片整体式陶瓷铸型设计与制备[J]. *电加工与模具*, 2011(4): 64-69.
- Zhao L, Li D C, Wu H H, et al. Design and fabrication of stereolithography-based integral ceramic molds for gas turbine blades[J]. *Electromachining & Mould*, 2011(4): 64-69.

收稿日期: 2024-03-01; 录用日期: 2024-04-08

基金项目: 基础科研(jcky-2024213b002)

通讯作者: 许西庆(1990—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为陶瓷材料增材制造, 联系地址: 陕西省西安市雁塔区长安中路161号长安大学小寨校区第五教学楼209室(710061), E-mail: xiqingxu@chd.edu.cn

(本文责编: 齐书涵)