

光固化 3D 打印陶瓷型芯技术的研究进展

马月婷, 尹绍奎, 于瑞龙, 周英伟

(沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 概述了几种光固化3D打印技术的原理, 简要介绍了3D打印制备陶瓷型芯的工艺流程, 阐述了国内外研究进展和已经取得的研究成果, 并展望了3D打印陶瓷型芯未来的发展方向。

关键词: 3D打印; 增材制造; 陶瓷型芯; 光固化

近年来随着世界各国对航空航天技术发展的重视程度越来越高, 航空飞行器的研究正在如火如荼地进行中。航空发动机作为提供航空飞行器动力来源的核心部件, 其主要发展方向是大推力、低油耗^[1], 因此作为决定发动机最重要特性的涡轮叶片成为了研发的核心。涡轮叶片的承温能力直接决定着发动机的最大推进力, 第五代发动机的涡轮进口温度已经提高到了2 000 K以上^[2], 但因为受到金属熔点的限制, 合金的承温能力早已达到了极限, 很难继续提升, 因此需要借助陶瓷型芯来实现叶片复杂空心冷却结构的成形^[3]。图1为涡轮叶片内的复杂空心结构图^[4], 由于这种空心结构使原来涡轮叶片的冷却方式得以改进, 可以有效提高涡轮叶片的承温能力, 所以陶瓷型芯的质量将直接决定发动机的关键性能。

陶瓷型芯的作用是形成空心叶片铸件的内腔冷却结构^[5], 它的性能和质量极大地影响着铸件生产的合格率和成本。陶瓷型芯必须有足够的室温强度和高温强度, 以承受浇注时金属液的冲击; 气孔率在25%以上, 便于浇注后冷却及后续脱芯; 浇注时变形量小, 耐火度高于金属的浇注温度, 不与合金液发生反应^[6]。目前叶片内部冷却结构由单一对流气冷发展为双层壁超气冷^[7], 对于拥有新型冷却结构涡轮叶片的研制, 传统陶瓷型芯制备方法复杂, 主要通过热压注成形和凝胶注模成形^[8], 需提前制备多套模具, 且在更改叶片设计后, 模具需重新制备, 导致叶片研制生产周期长, 开模过程也会对型芯素坯表面造成不同程度的损坏。

陶瓷3D打印技术的诞生适时地使这些难题得到了解决。3D打印技术作为当今新一代快速成形技术, 其原理是使用成形设备将打印原材料层层堆叠直至形成实物, 因此又称“增材制造”^[9], 具有成形速度快、模型自由度高、材料浪费少、成品尺寸精度高等优点^[10], 且无需提前制造模具, 可任意修改模型, 极大地缩短了开发迭代制备周期^[11]。目前用于制备陶瓷型芯的3D打印技术绝大部分为光固化技术, 其中主流技术为立体光刻技术 (Stereo Lithography Appearance, SLA) 和数字光处理技术 (Digital light processing, DLP)。

1 光固化3D打印技术

SLA和DLP同属于光固化3D打印技术, 基本原理都是通过紫外光照射使光敏树脂固化从而成形, 其区别在于光源的照射方式不同, 其中SLA采用紫外光的线扫描使液态光聚合物固化, 而DLP采用紫外光的面曝光来固化光聚合物^[12]。

1.1 立体光刻技术 (SLA)

SLA的打印设备多为图2中的正置式, 即光源在上向下照射^[13]。打印前先通过软

作者简介:

马月婷 (1997-), 女, 硕士生, 主要研究方向为 3D 打印和陶瓷型芯。电话: 18811317377, E-mail: 18811317377@163.com

通讯作者:

尹绍奎, 男, 研究员, 硕士生导师。电话: 024-25856490, E-mail: yinsk@126.com

中图分类号: TQ174.75

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)03-0271-06

收稿日期:

2021-10-18。

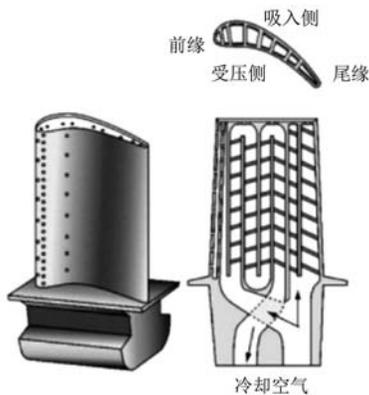


图1 涡轮叶片内部的复杂空心结构
Fig. 1 Complex hollow structure inside the turbine blade

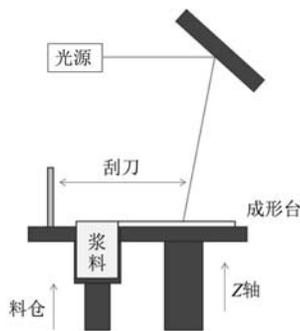


图2 立体光刻技术 (SLA) 原理图
Fig. 2 Principle of stereo lithography (SLA)

件将三维模型切片并得到扫描路径，沿路径采用波长特定的紫外光进行线扫描，使含有液态光敏树脂的陶瓷浆料固化，固化完成一层后，打印平台降低一个层厚的高度，重复以上过程，层层叠加，最终得到三维实体产品^[14]。SLA使用的紫外光的光斑尺寸极其细微（60~140 μm），因此能够制造出分辨率在微米级的高表面质量及精度的零件，可用于打印形状复杂的模型。

1.2 数字光处理成形技术 (DLP)

DLP是基于SLA的掩模技术^[15]，打印原理如图3所示，DLP同样使用紫外光作为光源，采取面曝光技术^[16]，每次曝光一层后打印平台上升一个层厚的高度，刮刀进行一次刮平，打印下一层，重复以上操作，直至形成实物。DLP在分辨率上比SLA更高（加工精度可达20~30 μm），且打印速度比SLA快很多，稳定性也高于SLA^[17]，所以DLP能迅速成形具有高精度尺寸的样件，但由于受到了DLP光源设备尺寸的影响，成形幅面较小，打印出产品的尺寸较小。DLP绝大部分都采用图3的倒置式投影方向，但也有少部分采用正置式，如佐治亚理工大学生产的设备^[13]。

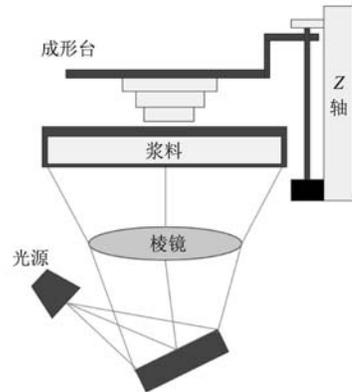


图3 数字光处理成形技术 (DLP) 原理图
Fig. 3 Principle of digital light processing technology (DLP)

以上两种光固化3D打印技术的主要差别在于打印速度及打印精度，受到两种技术特点的限制，SLA更适合相对大尺寸、大批量打印，DLP则适合小尺寸的高精度成形。

2 光固化技术制备陶瓷型芯工艺过程

以热压注法为例，传统方式制备陶瓷型芯的过程为：制造模具 制备浆料 型芯压注 型芯矫正 烧结 强化^[18]。使用光固化3D打印技术制备陶瓷型芯与传统方式的不同主要体现在无需提前制造模具，以及成形后无需手动修型，因此大大节约了每次修改型芯模型所需的时间和修型时所用的人工成本，以下为以试块为例使用光固化技术制备陶瓷型芯的具体工艺过程。

首先进行陶瓷浆料制备，光固化陶瓷浆料主要由陶瓷粉体和有机树脂以及分散剂、其他助剂等组成^[19]。将分散剂与无水乙醇混合得到预混液，再将陶瓷粉体加入到预混液中，用球磨机进行球磨并烘干得到改性后的陶瓷粉体^[20]。在陶瓷粉体中加入树脂及其他助剂，再将混合物加入均质机进行均质混合，得到分散均匀的陶瓷浆料。

使用建模软件设计3D模型，将模型在成形软件中加载并切片处理，将陶瓷浆料加入打印设备中，设置打印设备的打印参数。准备完成后启动打印机，通过光固化技术打印成形陶瓷坯体^[21]。得到打印好的陶瓷坯体后，先进行脱脂工序，将陶瓷坯体中作为粘接剂的有机树脂去除，随后进行烧结，使陶瓷坯体在高温作用下发生致密陶瓷化。通常情况下，为了提高陶瓷型芯的力学性能，还会对烧结后的陶瓷型芯进行强化处理^[22]。强化根据机理不同可分为室温强化和高温强化，通过浸渍处理提高陶瓷的室温强度^[23]、高温强度^[24]等性能。

3 国内外研究进展

光固化与传统制备过程的区别主要在于陶瓷浆料制备和素坯成形,此外由于3D打印的陶瓷粉体粒度在微米数量级,因此烧结参数也与传统方式不同。目前,国内外关于光固化制备陶瓷型芯的研究主要关于原材料组成、浆料粘度及固相含量、打印参数及脱脂烧结参数几个方面。将目前国内外关于光固化3D打印陶瓷型芯的工艺研究及所获性能汇总如表1所示。

目前3D打印陶瓷型芯的制备方式多为DLP技术,使用SLA技术的研究较少,将李琴^[26]和胡可辉^[27]的研究结果作为SLA和DLP两种技术关于陶瓷型芯制造方面的对比。基体材料都为SiO₂时,模型切片层厚均为50 μm,两者制备出的陶瓷型芯尺寸精度均在±0.2 mm内;使用SLA技术制备出的陶瓷型芯室温抗弯强度为

18.19 MPa,使用DLP技术制备出的室温抗弯强度为18.4 MPa,由于使用的基体材料相同,两种技术制备出的陶瓷型芯强度相当。

决定陶瓷型芯性能的打印原料主要有基体材料、矿化剂或添加剂^[38],陶瓷型芯根据基体材料的不同可以分为硅基陶瓷型芯、铝基陶瓷型芯^[39]等。加入矿化剂的目的在于促进或控制后续烧结过程中陶瓷结晶化合物的形成或反应。添加剂在制备陶瓷的成分中含量一般较低,但是添加剂的加入对烧结后陶瓷型芯的各项性能都会带来一定的影响^[40]。在基体材料方面,3D打印硅基陶瓷型芯的力学性能较低,铝基陶瓷型芯的力学性能表现较好,这与传统方式制备陶瓷型芯一致,而在气孔率及收缩率方面基体材料并未导致明显差别。同时,适当地加入矿化剂及添加剂相较于未

表1 光固化3D打印陶瓷型芯的性能汇总
Table 1 Summary of performance of light-cured 3D printed ceramic cores

作者	打印方式	基体材料	固相含量	矿化剂或添加剂	脱脂温度 /	烧结温度 /	室温抗弯强度 /MPa	高温抗弯强度 /MPa	气孔率 /%	收缩率 /%
贾鸿远 ^[25]	SLA	SiO ₂	50vol%	ZrO ₂ (1.5wt%)	550~600	1 300	4.524	11.114	11.36	6.3
李琴 ^[26]	SLA	SiO ₂	-	-	400~800	1 230	18.19	22.99	38	-
胡可辉 ^[27]	DLP	SiO ₂	55vol%	-	420~540	1 200	18.4	-	28.15	4.2~6
陈典典 ^[28]	DLP	SiO ₂	75wt%	-	-	1 200	2.6	-	38.35	1.19~2.19
Wang ^[29]	DLP	SiO ₂	50vol%	纳米SiO ₂ (2.5wt%)	-	1 200	13.8	-	31.6	4.7~5.6
Li ^[30]	DLP	SiO ₂	58vol%	Al ₂ O ₃ (7.5wt%)	-	1 300	12.1	-	33.5	4~6
焦守政 ^[31]	DLP	Al ₂ O ₃	60vol%	-	400~700	1 600	105	-	18.64	5.00
Li ^[32]	DLP	Al ₂ O ₃	70wt%	SiO ₂ (10wt%)	550	1 500	35.6	-	47.5	-
Li ^[33]	DLP	Al ₂ O ₃	50wt%	CaO (5wt%)	550	1 650	24.0	-	50.4	17~24
Li ^[34]	DLP	Al ₂ O ₃	83wt%	-	550	1 300	26.4	-	42	1.7~3.6
Li ^[35]	DLP	Al ₂ O ₃	83wt%	-	500	1 300	27.5	-	38.4	2.3~4.0
Li ^[36]	DLP	Al ₂ O ₃	83wt%	-	550	1 350	26.7	-	33.8	3.0~5.5
Li ^[37]	DLP	Al ₂ O ₃	83wt%	-	550	1 300	25.8	-	41.5	2.1~3.8

加入前,陶瓷型芯部分性能有提升的作用,对硅基陶瓷型芯力学性能改善效果较好的添加剂为纳米SiO₂^[29],对铝基陶瓷型芯性能有较好提升的添加剂为SiO₂^[32],但过多的SiO₂会导致抗弯强度下降。

配制陶瓷打印浆料时,通过控制陶瓷粉体与光敏树脂的比例以及分散剂的加入量来调节浆料粘度^[41],图4为一种分散剂(PVP)对浆料粘度的影响曲线,可见浆料的粘度先随着分散剂含量的逐渐提高而减小,当分散剂的含量进一步增加后,浆料粘度又呈增大趋向。研究得到陶瓷打印浆料的粘度越低、流动性越好,则打印的效果越好,成形后的陶瓷坯体表面越光洁平滑,且浆料的固相含量高能保证陶瓷型芯的各项综合性能^[42];而粘度高、流动性差的浆料在打印成形

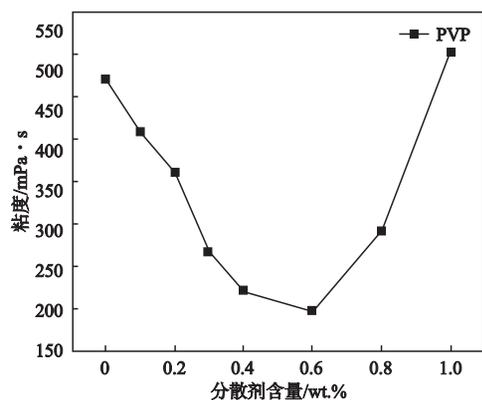


图4 分散剂含量对氧化硅陶瓷浆料粘度的影响
Fig. 4 Influence of dispersant content on the viscosity of silica ceramic slurry

后,陶瓷坯体表面质量较差,固相含量低的浆料打印出的陶瓷坯体在后续的脱脂和烧结过程中^[43],容易发生变形、裂纹甚至坯体坍塌等问题^[44]。因此,陶瓷浆料的粘度越低、固相含量越高,越有利于打印,但过高的固相含量会导致陶瓷型芯气孔率降低,不利于后续脱芯,根据目前研究,用于制备陶瓷型芯的打印浆料最佳固相含量在50vol%~60vol%。

打印参数包括打印方向、打印层厚、填充速度、填充线距和后固化时间^[45]等,往往与打印设备、陶瓷浆料和产品性能要求相关。王瑞昌^[46]等人选用固相含量为10%的陶瓷浆料进行了试验,底层曝光时间为34 s时,层厚0.05 mm,曝光时间4.5~4.6 s,打印效果较好;胡可辉^[27]等人采用倒置式DLP技术制备了大尺寸多层复杂陶瓷型芯,得出打印切片厚度为50 μm时打印精度较高,在此条件下打印出的坯体与STL模型的尺寸偏差均低于0.2 mm;陈典典^[28]和Li^[30]均对DLP打印技术关于打印方向进行了研究,分别采用横向打印和竖向打印制备了硅基陶瓷型芯试样,结果表明,在抗弯强度方面,横向打印(2.6 MPa)明显高于竖向打印(1.1 MPa),证明陶瓷在平行于打印方向的测试表面与垂直方向相比具有更高的抗弯强度,更多的打印参数仍需后续的研究和测试以制定统一标准。

脱脂参数包括脱脂气氛、脱脂温度等,烧结参数包括烧结温度、保温时间、升温速率和降温速率等,且都会在一定程度上影响陶瓷型芯的性能^[47]。Li等人系统地研究了脱脂和烧结参数对3D打印陶瓷型芯的影响,根据目前的研究结果,3D打印铝基陶瓷型芯的最佳脱脂参数为真空环境下550 ℃保温120 min,升温速率0.5 ℃/min,烧结温度为1 300/1 350 ℃时的综合性能较好,加入矿化剂或添加剂时,烧结温度则需调整以获得更加优良的性能。关于3D打印硅基陶瓷型芯,脱脂及烧结方面目前相关研究较少,最佳烧结温度在1 200~1 300 ℃,其余参数有待进一步的研究。

4 3D打印陶瓷型芯应用

康硕德阳智能制造有限公司的李琴^[26]等人以粒径10 μm的氧化硅粉体为基体材料,使用3DCERAM打印机通过SLA光固化成形技术制备了硅基陶瓷型芯。打印的生坯尺寸精度90%在±0.1 mm以内,脱脂烧结后试样部分发生变形,其中80%变形量在±0.1 mm以内,15%变形量在±(0.1~0.26) mm以内。计算出的平均致密度为73.4%,表明氧化硅陶瓷的固相含量较高。烧结后室温和高温抗弯强度(1 300 ℃)平均值分别为18.19 MPa和22.99 MPa,满足技术要求,最大高温挠度(1 340 ℃)为0.23 mm,抗蠕变性能较好,满足应用要求,可以供某重型燃机空心叶片熔模铸造使用。

胡可辉^[27]等人使用北京十维科技有限责任公司AutoCera-M型陶瓷打印机,采用DLP光固化打印方式,以固含量55%的氧化硅陶瓷浆料为原料,制备了航发双层壁涡轮叶片用陶瓷型芯。型芯表面光洁(表面粗糙度8.51 μm),尺寸精度高(尺寸偏差±0.2 mm),室温抗弯强度达到18.4 MPa,高温挠度为7.48 mm,通过了单晶浇注及脱芯验证。

奥地利Lithoz^[48]公司研制了一种用于3D打印硅基陶瓷型芯的打印浆料,并将其命名为LithaCore450,使用该公司的CeraFab8500设备打印出的硅基陶瓷型芯经检测,生坯与CAD模型的最大尺寸误差为0.1 mm,烧结后的产品具有孔隙率高达28%,1 500 ℃下烧结后的热膨胀率小于0.5%,表面粗糙度小于3 μm,最高使用温度达到1 575 ℃。航空航天巨头法国Safran Group已经长期应用Lithoz陶瓷3D打印机制造陶瓷型芯,并已在2017年欧洲陶瓷增材制造大会AMCeramics上展示了初步的研究成果。

5 发展与展望

3D打印制备陶瓷型芯拥有传统制造方法所不具备的高精度和高自由度,并且便于对模型进行修改及快速制备,目前国内外已有多家公司使用3D打印设备生产陶瓷型芯。然而,3D打印制备陶瓷型芯无法完全代替传统制造的原因在于,3D打印的成本较高,无法大批量生产,制备出的陶瓷型芯的力学性能部分低于传统方式等。由此得出,光固化3D打印制备陶瓷型芯的未来发展主要包括以下几个方向。

(1) 进一步提高3D打印的精度。3D打印技术相较于传统制造最大的优势为极高的尺寸精度,目前3D打印制备陶瓷型芯的尺寸误差在0.1~0.2 mm范围内,应从光固化3D打印技术出发,例如进一步降低模型切片层厚至20~30 μm,进而提升打印精度,发挥3D打印高精度的优良特点,应对未来陶瓷型芯结构更加复杂、尺寸精确度更高的发展需求。

(2) 研发系列材料,降低制备成本。目前,法国3DCERAM公司一罐质量为2 kg左右的3D打印用陶瓷浆料售价在1~2万元人民币,高昂的成本限制了3D打印陶瓷型芯的大范围应用,因此国内急需研制高品质的打印浆料以降低生产成本,并且有待开发新的基体材料。

(3) 提高打印效率,加快生产节奏。3D打印技术在更改模型方面拥有明显优势,但由于SLA打印机打印一个型芯往往需要1~2天或更久,而DLP打印机无法一次高精度打印多个型芯,导致在大批量加工方面3D打印有着明显的短板,后续应在保证打印质量的前提下,向着提高打印效率方向发展光固化3D打印陶瓷型

芯技术。

(4) 发展力学性能更加优良的3D打印陶瓷型芯。目前的研究结果表明, 在一些课题中3D打印硅基陶瓷型芯的力学性能未能达到使用标准, 由于光固化3D打印技

术为层层叠加, 层与层间的结合依靠光敏树脂的固化, 这种加工方式型芯致密度不如传统成形工艺, 如何提高陶瓷型芯的力学性能是未来的发展方向之一。

参考文献:

- [1] 王威. 航空发动机涡轮叶片精密成形技术分析 [J]. 科技创新与应用, 2020 (16): 139-140.
- [2] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术 [J]. 航空学报, 2021, 42: 25387.
- [3] 梁启如, 吴玉胜, 刘孝福, 等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展 [J]. 铸造, 2018, 67 (9): 790-793.
- [4] 李志月, 宋一飞, 杨治刚, 等. 凝胶注模成形空心叶片用氧化铝陶瓷型芯性能研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (5): 475-479.
- [5] 张立同, 曹腊梅, 刘国利. 近净形熔模精密铸造理论与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [6] 熊建平, 赵国庆, 戴斌煜, 等. 陶瓷型芯在航空发动机叶片生产中的应用与发展 [J]. 江西科学, 2007 (6): 801-806.
- [7] 中国铸造协会. 熔模铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 郭文, 王鹏飞. 涡轮叶片冷却技术分析 [J]. 航空动力, 2020 (6): 55-58.
- [9] 王超. 3D打印技术在传统陶瓷领域的应用进展 [J]. 中国陶瓷, 2015, 51 (12): 6-11.
- [10] 张文毓. 3D打印陶瓷材料的研究与应用 [J]. 陶瓷, 2020 (6): 40-44.
- [11] 张睿琳. 3D打印在航空发动机制造上的应用 [J]. 技术与市场, 2019, 26 (2): 153.
- [12] 张超, 马文茂. DLP光固化3D打印关键技术研究 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (4): 47-51.
- [13] 胡可辉, 赵鹏程, 吕志刚. 光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 155-159.
- [14] 刘雨, 陈张伟. 陶瓷光固化3D打印技术研究进展 [J]. 材料工程, 2020, 48 (9): 1-12.
- [15] 顾玥, 王功, 段文艳, 等. 陶瓷光固化成形技术的应用与展望 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49 (5): 867-877.
- [16] 郭亮, 金而立, 苏嘉敏, 等. 氧化锆陶瓷DLP 3D打印技术研究 [J]. 应用激光, 2020, 40 (6): 1040-1044.
- [17] 邢小颖, 汤彬, 马运, 等. 3D陶瓷打印在精密铸造中的应用 [J]. 铸造, 2019, 68 (10): 1127-1130.
- [18] 赵红亮, 翁康荣, 关绍康, 等. 空心叶片用陶瓷型芯 [J]. 特种铸造及有色合金, 2004 (5): 38-40.
- [19] 刘文进, 周国相, 林坤鹏, 等. 基于浆料形态的陶瓷3D打印技术的浆料体系研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (6): 1918-1926.
- [20] 聂光临, 黎业华, 盛鹏飞, 等. 表面改性对光固化3D打印Al₂O₃陶瓷性能的影响 [J]. 中国建材科技, 2021, 30 (3): 79-83.
- [21] 陆春, 徐艳荣, 戚丁文, 等. 3D打印氧化硅陶瓷的制备及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (3): 939-943.
- [22] 陆丽芳, 庞佳敏, 武振飞, 等. 陶瓷型芯的强化研究综述 [J]. 江苏陶瓷, 2019, 52 (5): 14-17.
- [23] 孙革, 张玲, 刘军和, 等. 强化对硅基型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2013, 62 (5): 440-442.
- [24] 郭新力, 姜延春, 黄国华, 等. 强化处理对硅基陶瓷型芯高温性能的影响 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1299-1302.
- [25] 贾鸿远. 光固化3D打印陶瓷型芯微观组织与性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2018.
- [26] 李琴, 张硕, 赵代银, 等. 3D打印空心叶片用氧化硅陶瓷型芯工艺及应用研究 [C]//2019中国铸造活动周, 武汉, 2019.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] WANG X, ZHOU Y, 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.
- [30] LI H, HU K, LIU Y, et al. Improved mechanical properties of silica ceramic cores prepared by 3D printing and sintering processes [J]. Scripta Materialia, 2021, 194: 113665.
- [31] 焦守政. 3D打印氧化铝陶瓷浆料的制备及性能研究 [D]. 沈阳: 航空航天大学, 2019.
- [32] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Silica strengthened alumina ceramic cores prepared by 3D printing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 41 (4): 1-10.
- [33] LI H, LIU Y, LI W, et al. The effect of sintering on the properties of calcium oxide promoted alumina-based ceramic cores via 3D printing [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 263 (8): 124443.
- [34] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Influence of debinding holding time on mechanical properties of 3D-printed alumina ceramic cores [J]. Ceramics International, 2021, 47 (4): 4884-4894.
- [35] LI H, LIU Y S, LIU Y S, et al. Microstructure and properties of 3D-printed alumina ceramics with different heating rates in vacuum debinding [J]. Rare Metals, 2020, 39 (5): 577-588.
- [36] LI H, LIU Y, LIU Y, 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.

- [37] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Effect of burying sintering on the properties of ceramic cores via 3D printing [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57 (4) : 380-388.
- [38] 裴芸宁, 胡可辉, 吕志刚. 基于光固化增材制造技术的陶瓷成形方法 [J]. *精密成形工程*, 2020, 12 (5) : 117-121.
- [39] 许素芳, 吴建青. 陶瓷型芯的制备方法 [J]. *佛山陶瓷*, 2019, 29 (2) : 3-8.
- [40] 张一彧. 矿化剂与添加剂对氧化硅陶瓷型芯性能影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [41] 焦守政, 齐文, 陈松, 等. 分散剂及粉体粒径对光固化氧化铝陶瓷浆料粘度及制件性能的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39 (1) : 260-265.
- [42] 刘亮, 廖艳梅, 颜宏艳, 等. ZrO₂陶瓷流延浆料的流变特性的研究 [J]. *人工晶体学报*, 2013, 42 (8) : 1595-1600.
- [43] WU H, CHENG Y, LIU W, et al. Effect of the particle size and the debinding process on the density of alumina ceramics fabricated by 3D printing based on stereolithography [J]. *Ceramics International*, 2016, 17290-17294.
- [44] ZHOU M, LIU W, WU H, et al. Preparation of a defect-free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography-optimization of the drying and debinding processes [J]. *Ceramics International*, 2016, 42 (10) : 11598-11602.
- [45] 李晶晶, 马世博, 梁帅, 等. 工艺参数对SLA成形制件力学性能的影响 [J]. *工程塑料应用*, 2019, 47 (10) : 75-79.
- [46] 王瑞昌, 蒋睿嵩, 明新国. 基于MIP-SLA的叶片陶瓷型芯光固化成形技术 [J]. *中国科学院大学学报*, 2020, 37 (2) : 162-168.
- [47] 刘丹丹, 李芳, 张小敏, 等. 光固化3D打印用于陶瓷制备的研究进展 [J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 18 (6) : 576-580.
- [48] SCHWENTENWEIN M, SCHNEIDER P, HOMA J. Lithography-based ceramic manufacturing : a novel technique for additive manufacturing of high-performance ceramics [J]. *Advances in Science & Technology*, 2014, 88 : 60-64.

Research Progress of Light-Curing 3D Printing Ceramic Core Technology

MA Yue-ting, YIN Shao-kui, YU Rui-long, ZHOU Ying-wei

(Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd., State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

This paper outlined the principles of several light-curing 3D printing technologies. The process of preparing ceramic cores by the 3D printing was briefly introduced. The research progress at home and abroad and the research results that have been achieved were expounded. Finally, it made a positive outlook for the future development.

Key words:

3D printing; additive manufacturing; ceramic core; light curing
