

涡轮叶片用陶瓷型芯 3D 打印技术研究应用现状及展望

邹仁啸^{1, 2}, 尹绍奎^{1, 2}, 于瑞龙^{1, 2}, 马月婷^{1, 2}, 周英伟^{1, 2}, 王鹏伟^{1, 2}

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022;

2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 简要介绍了三种光固化3D打印技术的原理和特性, 并介绍了该技术进行陶瓷浆料和陶瓷型芯制备的工艺流程, 重点介绍了近几年对该技术制备陶瓷型芯的研究探索和成果, 并展望了光固化技术在型芯制备方面的发展方向。

关键词: 3D打印; 光固化; 陶瓷型芯

高性能航空燃气涡轮发动机有着飞机“心脏”的美名^[1], 随着航空技术的不断提升, 航空发动机逐渐向着大推力、低油耗和高推重比的方向发展^[2]。航空发动机产生的推力上限是由叶片的承温能力决定的, 而先进的发动机的叶片所需承温标准已经高于2 000 K, 因此研究如何增强发动机推进力的重点落在如何提高叶片的承温上限^[3-4]。目前可以提升叶片的承温能力主要有以下三种方式: 第一种是采用性能更好的合金, 但受制于金属熔点, 性能已达极限; 第二种是在叶片表面增加一层隔热涂层, 以此提高涡轮叶片的承温性能^[5]; 第三种则是利用复杂的中空结构以提升叶片的冷却能力^[6-7], 从而提升承温能力, 而空心叶片制造的关键就是陶瓷型芯的制备, 因此改进陶瓷型芯的制备工艺愈发重要^[8]。

铸件生产的成材率和成本直接受到陶瓷型芯的性能与品质的影响^[9]。目前单一对流气冷已经无法满足生产需要, 中空叶片的冷却结构趋于复杂化、精密化, 发展为双层壁超气冷结构^[4, 10], 热压注成形、凝胶注模成形、注射成形^[11]传统方法仍需使用模具, 制备出的陶瓷型芯表面光洁度差、尺寸精度误差大, 同时生产周期长、工艺繁杂, 无法满足产量需求和使用要求, 因此研究一种新型陶瓷型芯制备方法迫在眉睫^[6]。

3D打印技术又被称作增材制造(AM), 作为新一代快速成形技术, 其已被广泛应用于多个领域^[12]。不同于传统的制造方法, 在成形技术方面, 3D打印拥有减材制造和等材制造都无法比拟的优势: (1) 3D打印技术利用二维平面的不断堆叠形成三维产品, 简化了生产过程, 可以快速验证个性化的创新产品实用性; (2) 3D打印技术的成形材料种类繁多, 尤其是便于加工很多难加工的材料; (3) 3D打印技术的工艺环节更简单, 开发周期更短, 投入的成本更低; (4) 3D打印技术为绿色制造模式, 材料损耗更少, 利用率更高, 节能减排效果更好^[13]。光固化技术是用于陶瓷型芯生产的增材制造技术的首选, 光固化技术主要包括以下三种技术: 立体光刻(SLA)、数字光处理(DLP)和双光子聚合(TPP)^[14-18]。

1 光固化增材制造技术

光固化技术制造陶瓷型芯是通过一定波长的紫外光(200~400 nm)或可见光(400~700 nm)照射具有光敏特性的陶瓷浆体液面, 使零件切片后的固化层浆体固

作者简介:

邹仁啸(2000-), 男, 硕士生, 主要研究方向为光固化铝基陶瓷型芯浆料制备和工艺流程。E-mail: 15542412983@163.com

中图分类号: TQ174.75

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

02-0135-08

收稿日期:

2024-09-17 收到初稿,

2024-10-22 收到修订稿。

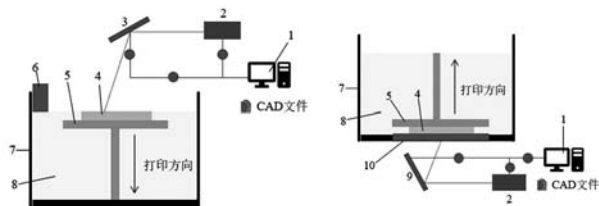
化, 因为聚合模式不同, 可分为单光子聚合和双光子聚合^[15, 19-20]两类。

1.1 立体光刻技术 (SLA)

因样品的移动方向不同, 其打印方式根据方向的不同可分为两种: 由上至下和由下至上。打印方式如图1所示。两种打印方式都是通过移动扫描镜使紫外光照射陶瓷浆料, 移动方式按照由点到线, 再由线到面的固化切片层^[21]。

自上而下的方式每一层的切片层固化完成后, 都会将平台下降一个切片层的高度, 等浆料自动填补或用刮刀刮平液面后再进行下一层的打印^[22]。这种打印方式会消耗大量时间在浆料平面平整上, 延长打印时间。同时, 因为自由基的存在会产生氧阻反应, 光敏树脂的固化效果大打折扣。料槽的深度决定了零件的高度, 因此零件的尺寸也受到了极大的限制^[15]。

自下而上的方式则多了一个透光窗口。窗口设置在料槽的底部, 与平台的距离为一个切片层厚, 紫外光从底部照射以固化浆料。每完成一个切片层的打印, 平台都会上移一个切片层的高度, 在重力的作用下, 浆料可迅速填补空缺, 缩短打印时间, 提升效率。这种打印方式固化发生在料槽底部, 因此零件的尺寸不会受到制约, 减少了浆料的浪费, 且因为浆料隔绝了空气, 固化效果不会受到氧阻反应的影响^[23-24]。



(a) 自上而下打印 (b) 自下而上打印

1. 控制系统
2. 激光光源
3. 扫描镜
4. 打印零件
5. 打印平台
6. 刮刀
7. 树脂料槽
8. 树脂浆料
9. 反射镜
10. 透光窗口

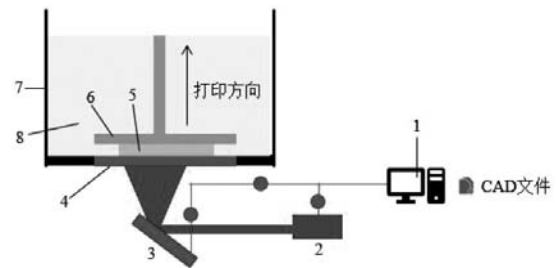
图1 SLA工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SLA

1.2 数字光处理技术 (DLP)

在SLA技术的基础上, 发展的一种掩模技术被称为DLP技术^[25], 是一种面曝光技术^[26]。该技术有两种类别: 上曝光和下曝光^[27]。下曝光技术是目前主要的技术, 工作示意图如图2所示。首先将紫外线或可见光进行数字处理。将处理后得到的光照图案经过振镜反射之后固化料槽底部的浆料。每个切片层固化完成后, 平台上移一个切片层的位置, 浆料在重力作用下填

补, 继续进行下一层的浆料固化打印工作^[15]。在分辨率上, DLP高于SLA, 打印速度上DLP更快, 稳定性也更高^[28]。因此DLP能成形的样件精度高, 速度快。但受制于光源设备的尺寸, DLP的产品尺寸较小^[4]。



1. 控制系统
2. 投影光源
3. 振镜
4. 透光窗口
5. 打印零件
6. 打印平台
7. 树脂料槽
8. 树脂浆料

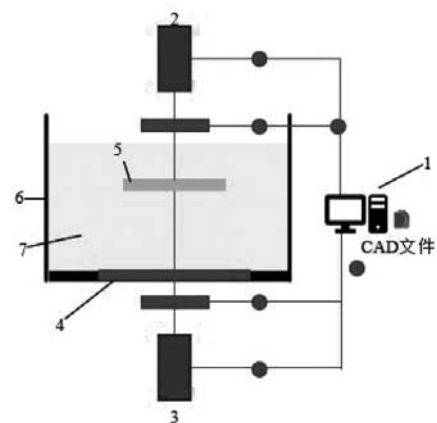
图2 DLP工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the DLP

1.3 双光子聚合技术 (TPP)

SLA和DLP技术都是单光子聚合技术, 而TPP技术则是双光子聚合技术。TPP技术利用红外光和绿色激光同时照射光敏树脂时会使光敏树脂发生聚合反应^[29-30]的原理, 在浆料内部聚焦两个光子, 使低分子量有机物发生聚合反应, 以此来固化陶瓷浆料^[31], 工作示意图如图3所示。

TPP技术固化陶瓷浆料发生在浆料内部, 即双光子聚合位置的浆料会被固化, 与SLA和DLP都不相同。3D打印技术中, 打印精度最高的也被认为是TPP技术^[32]。



1. 控制系统
2. 激光光源 I
3. 激光光源 II
4. 透光窗口
5. 打印零件
6. 树脂料槽
7. 树脂浆料

图3 TPP工作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the TPP

2 光固化技术制造型芯工艺流程

2.1 陶瓷浆料的制备

光固化3D打印陶瓷成形技术无模具直接成形，不需要手动修型，可节约时间和人工成本。以下介绍光固化增材制造陶瓷型芯的工艺流程，陶瓷型芯以试块代替，陶瓷浆料制备流程如图4所示。首先要制备具有一定固相含量的浆料，同时要保证浆料的粘性符合标准，陶瓷粉体、有机树脂、分散剂和其他助剂等组成光固化所需的陶瓷浆料^[33]。向无水乙醇中加入分散剂，进行充分混合。将陶瓷粉体加入其中，通过球磨机球磨2~4 h（总体积不超过2/3的球磨机容量），烘干球磨后的混合液以得到陶瓷粉体此时的陶瓷粉体已经改性^[34]。此时将光敏树脂和其他助剂加入已经改性的陶瓷粉体中，加入均质机中，使各成分充分混合，即可得到陶瓷粉体分散均匀的陶瓷浆料。



图4 陶瓷浆料制备流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the preparation of the ceramic slurry

2.2 3D 打印陶瓷型芯

3D打印陶瓷型芯流程如图5所示。使用NX或SolidWorks等软件设计陶瓷型芯模型，通过Magics等成形软件进行切片后导入到3D打印机中（部分3D打印机自带切片软件，可直接导入.stl文件）。设置合适的打印参数后，测试激光，启动设备，打印出陶瓷素坯^[35]。

对陶瓷素坯先进行脱脂处理，取出作为粘结剂的有机树脂。此时应设置好升温速率和保温时间，避免陶瓷开裂。脱脂处理完成后进行烧结，在高温的作用下，陶瓷坯体会发生陶瓷致密化。通常，会根据陶瓷性能的不同，通过强化液对烧成陶瓷进行强化处理，以此提升型芯的力学性能^[36]。强化类型根据机理的区别可分为两种：室温强化和高温强化，陶瓷型芯的室温强度^[37]和高温强度^[38]等性能都将通过强化液的浸渍处理提高。

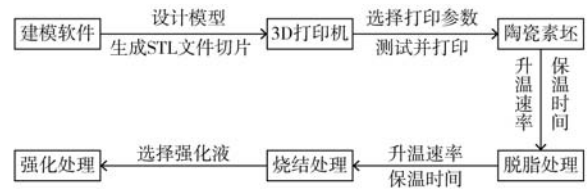


图5 3D打印陶瓷型芯流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the 3D-printing ceramic cores

3 国内外研究现状

光固化陶瓷型芯与传统制备陶瓷型芯在浆料的制作与素坯的成形方面有着很大不同。同时，用于光固化技术的基体材料粒度较细，一般为微米级，因此在烧结参数方面也有着很大的不同。对于光固化技术在陶瓷型芯应用方面，国内外的研究主要集中在浆料制备（粘度和固相含量等）、打印参数和脱脂烧结参数等方面。部分DLP技术研究成果如表1所示。可以看出，硅基陶瓷型芯的室温抗弯强度最高可达18.4 MPa，最低仅有2.6 MPa。铝基陶瓷型芯的室温抗弯强度则均

表1 DLP打印陶瓷型芯技术汇总
Tab. 1 Summary of the technology of the ceramic cores printed by DLP

| 作者 | 基体材料 | 固相含量 | 烧结温度/℃ | 室温抗弯强度/MPa | 收缩率/% | 气孔率/% |
|----------------------|--------------------------------|--------|--------|------------|-----------|-------|
| 胡可辉 ^[39] | SiO ₂ | 55vol% | 1 200 | 18.4 | 4.2~6 | 28.15 |
| 陈典典 ^[40] | SiO ₂ | 75wt% | 1 200 | 2.6 | 1.19~2.19 | 38.5 |
| 马月婷 ^[6] | SiO ₂ | 70vol% | 1 180 | 8.93 | 1.95~4.31 | 30.23 |
| Wang ^[41] | SiO ₂ | 50vol% | 1 200 | 13.8 | 4.7~5.6 | 31.6 |
| Li ^[42] | SiO ₂ | 58vol% | 1 300 | 12.1 | 4~6 | 33.5 |
| 焦守政 ^[43] | Al ₂ O ₃ | 60vol% | 1 600 | 105 | 5.00 | 18.64 |
| Li ^[44] | Al ₂ O ₃ | 70wt% | 1 500 | 35.6 | - | 47.5 |
| Li ^[45] | Al ₂ O ₃ | 50wt% | 1 650 | 24.0 | 17~24 | 50.4 |
| Li ^[46] | Al ₂ O ₃ | 83wt% | 1 300 | 26.4 | 1.7~3.6 | 42 |
| Li ^[47] | Al ₂ O ₃ | 83wt% | 1 300 | 27.5 | 2.3~4.0 | 38.4 |
| Li ^[48] | Al ₂ O ₃ | 83wt% | 1 350 | 26.7 | 3.0~5.5 | 33.8 |
| Li ^[49] | Al ₂ O ₃ | 83wt% | 1 300 | 25.8 | 2.1~3.8 | 41.5 |

高于24 MPa。随着固相含量的提高，陶瓷型芯的收缩率不断减小。

3.1 浆料制备技术

制备光固化陶瓷型芯要求浆料流动性良好、素坯结合强度高和具有光敏特性。满足条件的浆料可分为树脂基、水基和前驱体光固化陶瓷浆料，树脂基浆料粘度较高但易于制备高固相含量的浆料，水基浆料粘度较低但稳定性差，得到的素坯强度低。前驱体陶瓷浆料成分复杂，成本高昂，不适合批量生产^[15]。综合来看，树脂基陶瓷型芯浆料最适合陶瓷型芯的批量生产。1996年，Griffith等^[50]研究出了一种特殊的陶瓷浆料，并且研究了3种基体材料的SLA制备，为陶瓷型芯光固化打下了基础。为了提升浆料的性能，降低粘度的同时提升固相含量，往往会向陶瓷浆料中加入分散剂。分散剂不仅可以提升浆料的固相含量，还可以改善浆料的流变性能。Hinczewski等^[51]研究得出分散剂的加入使浆料的粘度降低，有效减少了脱脂阶段的缺陷发生。Zhang等^[52]发现，当分散剂选取为KOS110且质量分数为5%时，制备的浆料流动性最佳，且选用球形氧化铝粉末作为基体材料可以制备出固相含量达到60%的低粘度陶瓷浆料。图6为含有不同种类分散剂的Al₂O₃树脂浆料的粘度^[52]。浆料中的其他添加剂也会对浆料的性能产生影响，Nie等^[53]研究得出，将DBP（苯二甲酸二丁酯）作为增塑剂加入氧化铝陶瓷浆料中可有效使浆料粘度降低并提升固相含量。添加剂的使用对型芯的性能有着很大程度的影响，但添加剂的种类和含量应针对陶瓷型芯种类的不同而进行调整。

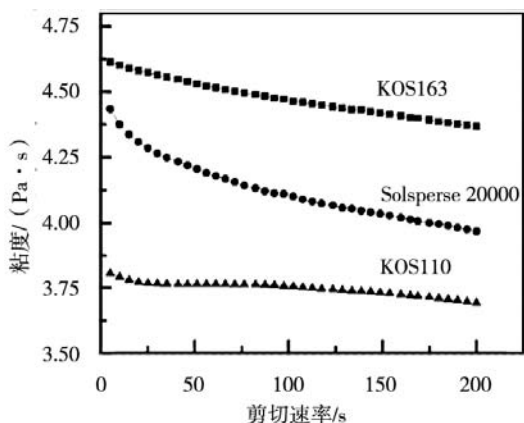


图6 含有不同种类分散剂的Al₂O₃树脂浆料的粘度

Fig. 6 Viscosity of the Al₂O₃-resin slurries with different dispersants

3.2 3D 打印参数及优化技术

打印参数与3D打印设备、陶瓷浆料和型芯的性能要求相关。王瑞昌等^[54]设置打印参数为底层曝光时间34 s，层厚0.05 mm，曝光时间4.5~4.6 s时用固相含量

为10%的陶瓷浆料得到打印效果良好的陶瓷型芯。陈典典^[40]和Li^[42]均对不同打印方向打印硅基陶瓷型芯进行了研究，发现横向打印的硅基陶瓷型芯抗弯强度达到2.6 MPa，竖向打印的硅基陶瓷型芯抗弯强度达到1.1 MPa，低于横向打印的抗弯强度，证明了在抗弯强度方面，平行于打印方向的陶瓷性能高于垂直于打印方向。不同打印方向陶瓷型芯气孔率、抗弯强度如表2所示^[40]。马月婷^[6]选用了3D CERAM C900以不同的成形参数、摆放方向和有无Z轴补偿进行打印，得出对不添加支撑的试样，part成形参数比support成形参数精度高，摆放方向对打印精度无影响和试块尺寸较小时Z轴补偿对精度影响很小。由于打印机的型号不同，打印参数往往也不同，具体打印参数应按照具体设备和生产要求选取。

表2 不同打印方向陶瓷型芯气孔率、抗弯强度
Tab. 2 Porosity and flexural strength of the ceramic cores in different printing directions

| 性能 | 水平方向 | 垂直方向 |
|----------|-------|-------|
| 孔隙率/% | 38.32 | 38.35 |
| 抗弯强度/MPa | 2.6 | 1.1 |

3.3 脱脂烧结工艺参数

脱脂烧结参数包含气氛氛围、温度台阶和升降温速率等，这些因素会影响陶瓷型芯的烧结程度，最终影响型芯的性能^[55]。Li^[45, 49]研究了氧化铝陶瓷素坯脱脂环节气氛的影响，发现保温有助于提高型芯的抗弯强度，在真空下脱脂保温120 min或氩气气氛下脱脂180 min都可以得到满足性能要求的型芯。赵红亮等^[56]将纳米氧化硅粉末加入氧化铝浆料中，降低了氧化铝型芯的烧结温度。Sun等^[57]发现在脱脂阶段升温速率采用0.2 °C/min和0.5 °C/min时缺陷较少，在氩气气氛脱脂减少了缺陷的产生。Li等^[49]研究发现最适合埋粉烧结氧化铝型芯的氧化铝粉末粒径为1 000 μm，相比于正常烧结的型芯，埋粉烧结的型芯有更小的收缩率、更低的体积密度和更高的开气孔率。关于光固化铝基陶瓷型芯，相关研究因浆料组分的不同参数也各不相同，最佳烧结温度最低可达1 300 °C，最高可达1 600 °C，具体参数应依照浆料具体组分来判断。

4 3D打印陶瓷型芯应用

奥地利的Lithoz公司研制了一款LithaCore450产品，该产品是一种用于硅基陶瓷型芯3D打印的浆料。此浆料通过Lithoz的CeraFab8500打印，所得到的硅基陶瓷型芯如图7(a)所示^[58]。该产品性能如表3所示。该型芯打印最大尺寸误差为0.1 mm，型芯烧成后

表3 LithaCore450性能
Tab. 3 Performance of LithaCore450

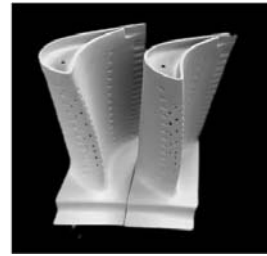
| 参数 | 理论 密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 相对 密度/% | 三点弯曲强 度/MPa | 表面粗 糙度/ μm | 最大烧结 粒度/ μm | 方英石 含量wt. % | 最高工作 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 1 500 $^{\circ}\text{C}$ 热膨胀率/% |
|----|--------------------------------------------|------------|----------------|--------------------------|---------------------------|----------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 数值 | 2.44 | 72.0 | 10 | <3 | 100 | 20~40 | 1 575 | <0.5 |



(a) LithaCore450型芯



(b) 3DCERAM公司产品



(c) 康硕集团产品

图7 陶瓷型芯产品示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the ceramic core products

孔隙率为28%，在烧结温度为1 500 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下，烧结完成后产品的热膨胀率低于0.5%，产品表面粗糙度小于3 μm ，最高使用温度可达1 575 $^{\circ}\text{C}$ 。法国Safran Group作为航空航天领域的巨头，已经应用Lithoz公司的3D打印设备和材料长期制造陶瓷型芯，在2017年的AMCeramics上，法国Safran Group将初步的研究成果进行展示^[4]。

3DCERAM公司是知名度很高的3D打印公司。2020年，该公司宣布与乌克兰的伊夫琴科-进步设计局进行合作，该设计局为闻名世界的航空发动机研发单位。该项合作实现了服务于镍基高温合金叶片的陶瓷型芯的规模生产和应用，制造了能满足叶片浇注要求的陶瓷型芯^[15]。该公司产品如图7(b)所示。

康硕集团的李琴^[59]等人制备了性能优异的硅基陶瓷型芯。该型芯的基体材料是粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的氧化硅粉

体，利用SLA技术，通过3D打印机制备了型芯。该型芯的生坯尺寸精度超过 $\pm 0.1 \text{mm}$ 的仅有10%，部分烧成试样变形，其中80%的变形量低于0.1 mm，15%的变形量高于0.1 mm，但低于0.26 mm。该型芯的固相含量较高，致密度可达73.4%。烧成型芯的室温抗弯强度为18.19 MPa，而1 300 $^{\circ}\text{C}$ 高温抗弯强度为22.99 MPa，1 340 $^{\circ}\text{C}$ 下最大高温挠度为0.23mm。该型芯满足应用所需的抗蠕变性能。该产品如图7(c)所示。

胡可辉等人^[39]制备了用于航发双层壁涡轮叶片的光洁高精度陶瓷型芯，该型芯如图8(a)所示，其性能如表4所示。该陶瓷型芯的原料是55%固含量的氧化硅陶瓷浆料。型芯以DLP光固化打印的方式通过AutoCera-M型陶瓷打印机制成。该陶瓷型芯具有8.51 μm 的表面粗糙度， $\pm 0.2 \text{mm}$ 的尺寸偏差，18.4 MPa室温抗弯强度和7.48 mm的高温挠度。该型芯

表4 陶瓷型芯性能
Tab. 4 Performance of the ceramic core

| 参数 | 收缩率/% | 吸水率/% | 孔隙率/% | 体积密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 高温挠度/mm | 表面粗糙度/ μm | 室温抗弯强度/MPa |
|----|----------|-------|-------|----------------------------------------|---------|----------------------|------------|
| 数值 | x-y: 4.2 | 17.26 | 28.15 | 1.67 | 7.48 | 8.51 | 18.4 |

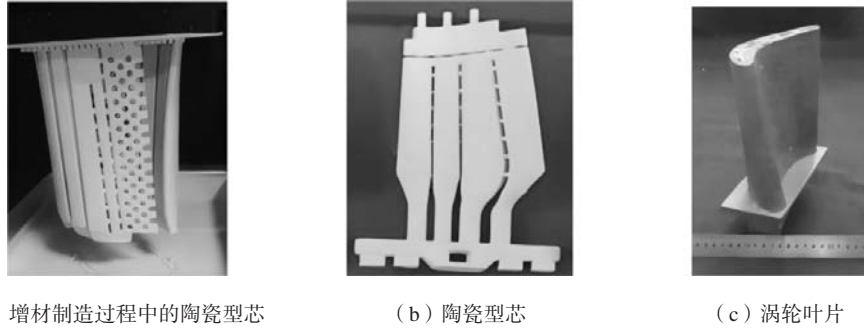
通过了单晶浇注和脱芯的验证。

清华大学的吕志刚等人^[60-61]制作出了满足单晶叶片浇注要求的复杂陶瓷型芯。该陶瓷型芯通过光固化技术制备，性能良好，成功通过了单晶叶片浇注验证。该型芯增材制造过程如图8(b)所示。

赵磊等^[62]研究得到一体化型芯型壳，采用了光固化技术和凝胶注模技术选用镍基高温合金K4002，在真空气氛下浇注，得到了如图8(c)所示的涡轮叶片。

5 发展与展望

3D打印技术有着制造复杂度低、改善难加工材料的可加工性、新产品开发周期短、产品高精度和高自由度等优势，全世界已有多家公司选择3D打印技术制造陶瓷型芯。然而由于成本较高，且生产批量小、型芯力学性能部分低于传统型芯等，该技术无法完全取得碾压式的优势。因此可以得出利用该技术制造陶瓷



(a) 增材制造过程中的陶瓷型芯

(b) 陶瓷型芯

(c) 涡轮叶片

图8 通过验证的型芯研究成果

Fig. 8 Research results verified of the cores

型芯的发展侧重点主要为以下几点。

(1) 不断提高尺寸精度^[4]。目前通过3D打印技术制造的型芯精度不低,尺寸误差基本处于0.1~0.2 mm的范围内。在精度高的3D打印技术基础上,通过降低切片层的厚度等方式,进一步提高打印精度,发挥3D打印技术精度高的优势,以满足未来对结构趋于复杂化和尺寸精确度要求更高的陶瓷型芯的需求。

(2) 研发基体材料和其他辅助材料,降本增产^[4]。目前,世界范围内性能好的3D打印材料的价格很高,设备和原料过高的成本也是3D打印技术制备陶瓷型芯大范围应用的限制之一。因此,研制低成本高品质的3D打印陶瓷浆料迫在眉睫,并且新的陶瓷粉体材料有待开发。

(3) 提高打印效率,大幅提升产量^[4]。在更改模型方面,3D打印技术有着得天独厚的优势,但因为SLA技术要耗时几天才能制造一个型芯,而DLP技术同

时制造多个型芯时精度较低,难以达标,导致在大批量的生产方面,3D打印技术有着明显的不足之处。应在不损害打印精度的同时,提升光固化陶瓷型芯制备的产量。

(4) 研究出具有高固相含量且流动性好的浆料,不断提升型芯性能,找到合适的工艺流程^[4]。固相含量高的浆料具有较低的烧成收缩率。目前的研究表明,很多实验中的硅基陶瓷型芯力学性能不高,不能满足使用需要,3D打印铝基陶瓷型芯的显气孔率过低,难以脱除。由于光固化3D打印技术的层与层之间依靠光敏树脂固化结合,使得型芯的致密度低于传统成形工艺。而提高固相含量则会导致孔隙的减少,对于化学性质稳定的氧化铝陶瓷型芯来说则会使其难以脱芯。因此如何提高陶瓷型芯力学性能的同时保证型芯的孔隙率是未来的发展重点。

参考文献:

- [1] 杨富强. 基于知识的涡轮叶片高质量锥束CT成像技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [2] 仝伟婷. 航空发动机涡轮叶片精密成形技术分析 [J]. 内燃机与配件, 2020 (19): 36-37.
- [3] 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, 2022, 43 (4): 22-38, 3.
- [4] 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.
- [5] 孟宪添. 光固化法增材制造氧化铝陶瓷材料组织与性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [6] 马月婷. 3D打印硅基陶瓷型芯制备工艺基础研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院, 2023.
- [7] 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, 2019.
- [8] 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.
- [9] 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): 4235-45.
- [10] 中国铸造协会. 熔模铸造手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [11] 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.
- [12] 张文毓. 3D打印材料的研究与应用 [J]. 金属世界, 2021 (1): 12-19.
- [13] 王世崇, 朱雨薇, 吴瑶, 等. 光固化3D打印技术及光敏树脂的开发与应用 [J]. 功能高分子学报, 2022, 35 (1): 19-35.

- [14] QUAN H, ZHANG T, XU H, et al. Photo-curing 3D printing technique and its challenges [J]. *Bioactive Materials*, 2020, 5 (1): 110-115.
- [15] 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 (Z1): 67-76.
- [16] 黄淼俊, 伍海东, 黄容基, 等. 陶瓷增材制造 (3D打印) 技术研究进展 [J]. *现代技术陶瓷*, 2017, 38 (4): 248-266.
- [17] 吴甲民, 杨源祺, 王操, 等. 陶瓷光固化技术及其应用 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56 (19): 221-238.
- [18] 杨孟孟, 罗旭东, 谢志鹏. 陶瓷3D打印技术综述 [J]. *人工晶体学报*, 2017, 46 (1): 183-186, 91.
- [19] 赵光华, 刘志涛, 李耀棠. 光固化3D打印: 原理、技术、应用及新进展 [J]. *机电工程技术*, 2020, 49 (8): 1-6, 65.
- [20] 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.
- [21] HULL C W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: US, US 08/484, 399 [P]. 1996-09-17.
- [22] HULL C W, SPENCE S T, ALBERT D J, et al. Methods and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography: US, US 19880183015 [P]. 1991-05-14.
- [23] WARDLE, BRAIN. Principles and applications of photochemistry [M]. US: Wiley, 2009.
- [24] LIGON, CLARK S, HUSÁR, et al. Strategies to reduce oxygen inhibition in photoinduced polymerization [J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114 (1): 557-589.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] BERTSCH A, BERNHARD P, VOGT C, et al. Rapid prototyping of small size objects [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2000, 6 (4): 259-266.
- [28] 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.
- [29] SUN H B, KAWATA S. Two-photon photopolymerization and 3D lithographic microfabrication [J]. *Chem Inform*, 2005, 36 (10): 169-273.
- [30] KAWATA S, SUN H B, TANAKA T, et al. Finer features for functional microdevices [J]. *Nature*, 2001, 412 (6848): 697-698.
- [31] VARADAN V K, JIANG X, VARADAN V V. Microstereolithography and Other Fabrication Techniques for 3D Mems [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [32] LEE K-S, KIM R H, YANG D-Y, et al. Advances in 3D nano/microfabrication using two-photon initiated polymerization [J]. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33 (6): 631-681.
- [33] 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.
- [34] 聂光临, 黎业华, 盛鹏飞, 等. 表面改性对光固化3D打印 Al_2O_3 陶瓷性能的影响 [J]. *中国建材科技*, 2021, 30 (3): 79-83.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 焦守政. 3D打印氧化铝陶瓷浆料的制备及性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [44] LI H, LIU Y, LIU Y, et al. Silica strengthened alumina ceramic cores prepared by 3D printing [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41 (4): 2938-2947.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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: 380-388.

- [50] GRIFFITH M L, HALLORAN J W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 79 (10) : 2601–2608.
- [51] HINCZEWSKI C, CORBEL S, CHARTIER T J R P J. Stereolithography for the fabrication of ceramic three-dimensional parts, [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 1998, 4 (3) : 104–111.
- [52] ZHANG K, XIE C, WANG G, et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al₂O₃ slurry for stereolithography based additive manufacturing [J]. *Ceramics International*, 2018, 45 (1) : 203–208.
- [53] NIE J, LI M, LIU W, et al. The role of plasticizer in optimizing the rheological behavior of ceramic pastes intended for stereolithography-based additive manufacturing [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 41 (1) : 646–654.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 赵红亮, 楼浪洪, 胡壮麒. Al₂O₃/SiO₂纳米复合陶瓷型芯材料的制备与性能 [J]. *材料研究学报*, 2002, (6) : 650–654.
- [57] SUN J, BINNER J, BAI J J J O T E C S. 3D printing of zirconia via digital light processing: optimization of the slurry and debinding process [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40 (15) : 5837–5844.
- [58] 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.
- [59] 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]. 沈阳: 2019中国铸造活动周论文集. 2019.
- [60] HU K, WEI Y, LU Z, et al. Design of a shaping system for stereolithography with high solid loading ceramic suspensions [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2018, 5 (4) : 311–318.
- [61] 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.
- [62] 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.

Research and Application Status and Prospects of Ceramic Core 3D Printing Technology for Turbine Blades

ZOU Ren-xiao^{1,2}, YIN Shao-kui^{1,2}, YU Rui-long^{1,2}, MA Yue-ting^{1,2}, ZHOU Ying-wei^{1,2}, WANG Peng-wei^{1,2}

(1.China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. National Key Laboratory of High-End Equipment Foundry Technology, Shenyang 110022, Liaoning, Chin)

Abstract:

This article briefly introduces the principles and characteristics of three photo polymerization 3D printing technologies, and describes the process flow of ceramic slurry and ceramic core preparation using this technology. This article focuses on the research exploration and achievements in the preparation of the ceramic cores using this technology in recent years, and looks forward to the development direction of UV curing technology in the core preparation.

Key words:

3D printing; UV curing; ceramic cores