光固化增材制造技术在熔模铸造中的应用

胡可辉[1,2]，赵鹏程[2,3]，吕志刚[1,2]

（1. 摩擦学国家重点实验室，北京 100084；2. 清华大学机械工程系，北京 100084；
3. 先进成形制造教育部重点实验室，北京 100084）

摘要：增材制造工艺可以实现复杂形状直接成形，其中光固化增材制造技术具有成形精度高的优势。利用光固化增材制造技术制备熔模，然后与熔模铸造工艺相结合，可以更好地发挥两种工艺的优势，缩短工艺周期。利用光固化增材制造技术制备熔模铸造用陶瓷型芯、型壳，可实现熔模铸造工艺的快速响应。文中简介了光固化增材制造技术的相关设备及成形原理，并分别阐述了光固化树脂熔模和光固化陶瓷型芯/铸型在熔模精密铸造工艺中的应用。

关键词：光固化；增材制造；熔模铸造；陶瓷型芯；一体化铸型

作者简介：
胡可辉（1991–），女，博士，主要研究方向为光固化陶瓷增材制造技术及应用。E-mail: hukehui@tsinghua.edu.cn
通讯作者：
吕志刚，男，博士，研究员，博士生导师。E-mail: lvzg@tsinghua.edu.cn

中图分类号：TG249.5
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2021）02-0155-05

基金项目：
国家重点研发计划：增材制造陶瓷铸型在熔模精密铸造中的应用示范（2018YFB1106600）；摩擦学国家重点实验室自主研究课题（SKLT2021B05）。
收稿日期：
2020–10–27。

熔模铸造是一种近净成形工艺，所制造的铸件具有尺寸精度高、表面质量好的特点，可不经加工或少量加工后直接使用[1]。熔模铸造工艺灵活，能制备出结构复杂的铸件[2]。但是，熔模铸造也有工艺环节多，生产周期长的问题，蜡模压型的开发制造、陶瓷型芯的制备、陶瓷型壳制壳过程等都是影响熔模铸造工艺快速响应的制约因素。

与熔模铸造同样具有复杂成形优势的增材制造技术近些年得到快速发展。增材制造采用逐层累加方式成形，不需要使用模具，因此能够明显缩短成形件的开发周期。将增材制造工艺与熔模铸造工艺相结合，采用增材制造工艺制备熔模、陶瓷型芯，甚至陶瓷型壳，而金属成形由铸造过程实现，可以更好地发挥两种工艺的优势，缩短熔模铸造生产周期，或者进一步提高复杂形状成形能力。

为了满足熔模铸造高精度铸件的制造要求，相应的增材制造技术也需要达到高精度控制，光固化增材制造高精度优势明显，是与熔模铸造工艺结合的适配工艺。光固化增材制造是较早出现的增材制造工艺之一，1986年，美国人Chales Hull发明了第一台基于光固化技术的3D打印机，经过30多年的发展，光固化增材制造技术愈趋成熟。

1 光固化增材制造成形原理及设备

光固化增材制造是利用光照方式固化光敏树脂，实现分层制造，在光敏树脂中混入陶瓷粉体，可以实现陶瓷坯体的增材制造。

光固化增材制造原理如图1所示。设备根据光源的照射方向可分为正置式和倒置式：正置式的光源自上向下照射，零件由成型台承载，浸泡在料缸中随着分层固化向下运动；倒置式的光源自下向上照射，零件粘接在成型台上向上运动，逐层堆积。正置式设备的优势是便于实现大幅面的零件制备，成形中需要添加的工艺支撑少；倒置式设备的优势是成形精度更高，成形时需要的浆料少，材料利用率高。

光固化增材制造的光源照射方式可分为激光线扫描和数字光处理系统（DLP，Digital Light Processing）面曝光两种。其中DLP面曝光的方式系统更稳定、成形速度更快，但由于DLP光源设备尺寸的限制，使得成形幅面较小。

光固化增材制造技术应用于陶瓷件的制备时，其工艺过程主要包括浆料的制

备、光固化成形、脱脂及烧结四个阶段。首先将陶瓷粉体与光敏树脂进行分散混合，制成均匀稳定的光固化陶瓷浆料，然后利用光固化增材制造设备完成“浆料涂层-曝光固化-层层累积”的过程，获得陶瓷坯体，然后经过脱脂、烧结后获得最终陶瓷制品。

用于陶瓷成形的光固化设备需要适配高黏度的陶瓷浆料（或膏料）的涂敷，同时要求更高功率的光源保证陶瓷浆料的固化厚度。倒置式陶瓷光固化设备能够实现更薄的铺料层厚，从而获得更高的打印精度，但在每层固化后与料槽底部分离时，分离力导致层间缺陷更容易产生[3]。另外，由于陶瓷坯体倒挂于成型台，受坯体自重影响，不宜成形大尺寸件。表1为部分公开报道的光固化陶瓷增材制造设备及其特点。

2 光固化树脂制备熔模

基于光固化增材制造技术可以获得形状更复杂、精度高、表面质量好、机械强度较高的树脂熔模[4]，替代模具成形的蜡模使用，工艺包括以下几个步骤：设计熔模的三维模型； 将三维模型通过光固化增材制造设备直接成形，得到光敏树脂熔模； 清洗熔模，再经过去支撑、后固化等后处理工序；进行熔模铸造组模、制壳等后续工艺。

光固化树脂熔模不仅可以完成珠宝首饰[5]、义齿[6]的铸造，在航空航天零部件熔模铸造中也得到了应用，如涡轮导向器[7]、叶轮[8]等，见图2[7-9]。其中利用该技术制备的闭式叶轮铸件的尺寸精度可达CT4级，表面粗糙度可达Ra6.3 μm[9]。

在熔模铸造中使用光敏树脂熔模时，需要注意以下问题：

（1）光敏树脂材料无法像蜡模那样加热熔化流出，需要高温焙烧烧除，由于树脂热膨胀系数较

表1 光固化陶瓷增材制造部分设备厂商及设备特点
Table 1 Manufacturers and characteristics of stereolithography ceramic equipment

研究机构	光源	投影方向	分离方式	备注
密歇根大学	激光	正置式	-	浆料
佐治亚理工大学	DLP	正置式	-	浆料
奥地利Lithoz公司	DLP	倒置式	料盒倾斜	浆料/膏料
荷兰Admatec公司	DLP	倒置式	竖直分离	浆料/膏料
法国3DCeram公司	激光	正置式	-	膏料
昆山伯力迈	激光	正置式	-	浆料
北京十维科技	DLP	倒置式	竖直分离	浆料
	激光	正置式	-	浆料/膏料
广东工业大学	DLP	倒置式	水平分离	浆料

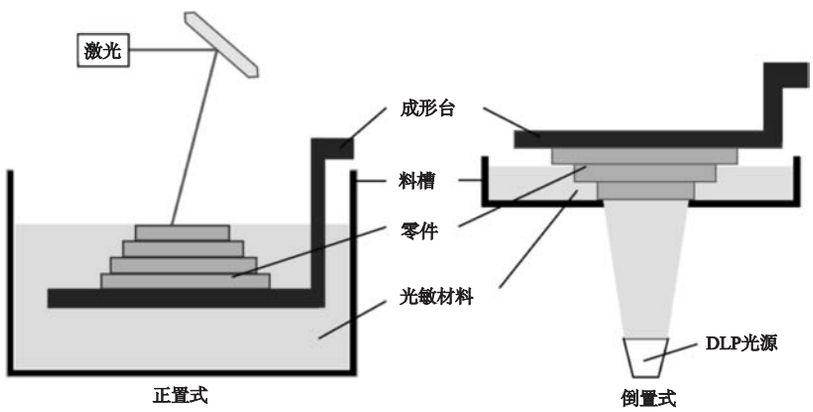
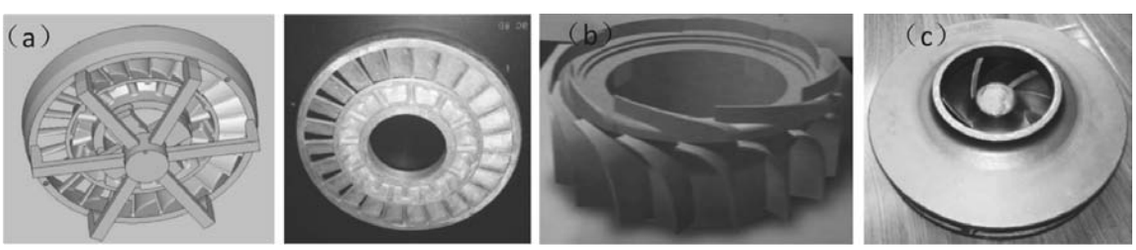


图1 光固化增材制造设备原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of equipment of stereolithography



（a）涡轮导向器熔模和铸件 （b）叶轮铸件 （c）闭式叶轮铸件

图2 光固化树脂熔模及其制备的铸件
Fig. 2 Photocurable resin investment mold and its prepared castings

大，容易造成型壳胀裂[4]。为了解决该问题，美国3D System公司于20 世纪90年代初期开发了QuickCast软件，使光固化增材制造设备能够制作出内部由蜂窝形结构构成而表面仍保证完整光滑形状的精确熔模。这项技术使得树脂熔模可在焙烧型壳时首先向内坍塌，解决型壳胀裂的问题，还能节省90%的光敏树脂制模材料[10-11]。此外，西安交通大学的宗学文等人建立了树脂脱除过程中型壳的热胀受力模型，并通过有限元分析获得型壳不同部位的应力分布状况，从而指导流道和熔模的设计[8]。

（2）当树脂黏度较大时，经过蜂窝化处理的熔模很难将内腔中剩余的树脂排尽。因此，除了开发更低黏度的光敏树脂外，还需要采用离心分离等措施辅助内腔树脂的排出。

（3）关注光敏树脂焙烧后的残留灰分，避免由于灰分导致铸件表面产生非金属夹杂及其他缺陷[12]。

（4）树脂的固化收缩率较大，在熔模的分层制造完成后，由于积累的收缩应力过大可能导致熔模变形。另外，树脂的吸湿性也会对熔模的尺寸稳定性产生影响[12]。

因此，用于制作熔模的光敏树脂材料应具备低黏度、低固化收缩率、低灰分残留以及低吸湿性的特点。同时利用壁内网格化的熔模能够防止型壳的胀裂。

3 光固化陶瓷浆料制备陶瓷型芯/铸型

陶瓷型芯是形成熔模铸件复杂内腔的关键技术之一，型壳是熔模铸造的铸型，直接关系到铸件成形质量。目前，用于光固化增材制造陶瓷型芯/铸型的陶瓷材料主要有SiO_2和Al_2O_3氧化铝，陶瓷粉体和光敏树脂的混合料应具备高固含量、高稳定性的特点以实现更低的烧结收缩率，另外还应有合适黏度，以适应分层铺料的工艺需要。表2为SiO_2和Al_2O_3光固化陶瓷浆料研究现状，通过选择合适的分散剂、降低光敏树脂黏度以及将陶瓷粉体进行级配能够有效提高固含量并降低浆料黏度[13]。

清华大学吕志刚团队利用DLP陶瓷增材制造设备，制备了航空发动机涡轮叶片用复杂硅基陶瓷型芯，见图3。其整体精度误差 < 0.2 mm，经实际浇注验证，综合性能满足单晶叶片浇注条件要求，脱芯性能好。

光固化增材制造技术还可以直接成形熔模铸造型壳。上海交通大学李飞利用DLP技术制备了煅烧高岭土陶瓷型壳，并浇注不锈钢金属液进行验证，图4为型壳及不锈钢样件[19]。

除了直接制造型芯和型壳之外，光固化增材制造技术利用其对复杂结构的一体成形优势，可实现型芯-型壳一体制造。图5为芯-壳一体化铸型制备流程及其与传统熔模铸造工艺流程的对比。相比传统熔模精密铸造需要开发型芯、蜡模使用的模具，芯-壳一体化增材制造大大简化了工艺流程，缩短制造周期，并节约蜡模和型芯的模具开发费用。

图6为密歇根大学的Bea利用正置式光固化增材制造设备制备的氧化硅芯-壳一体化陶瓷铸型及浇注的单晶叶片[20-21]。2019年Bea对该氧化硅铸型在高温下的方石英转化率和高温强度进行了研究，1 300 ℃时抗弯强度为11.4 MPa，1 500 ℃时抗弯强度为4.6 MPa[22]。

表2 SiO_2和Al_2O_3光固化陶瓷浆料研究现状
Table 2 Research status of photocurable SiO_2 and Al_2O_3 slurry

研究者	陶瓷材料	固含量/vol%	浆料黏度/（Pa·s）	发表年份
Griffith[14]	SiO_2	50	0.4	2000
Bae[15]	SiO_2	50	0.59	2011
周韦召[16]	SiO_2	50	3	2011
Chartier[17]	Al_2O_3	60	110	2002
Zhang[18]	Al_2O_3	60	15.4	2019
胡可辉[3,13]	Al_2O_3	60	3	2018
	SiO_2	60	3.1	2020
李飞[19]	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	45	-	2020

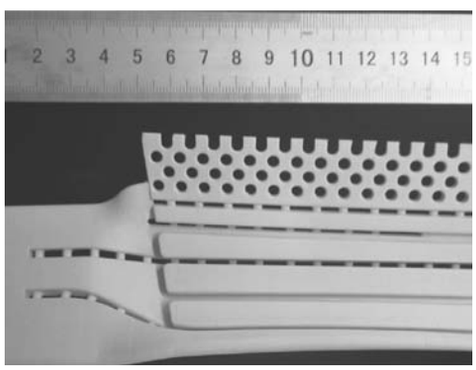


图3 增材制造多层复杂陶瓷型芯
Fig. 3 Complex ceramic cores with multilayer walls propared by stereolithography ceramic

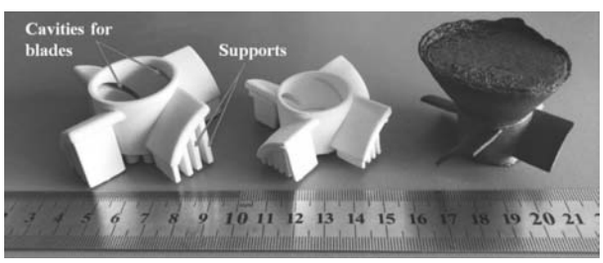


图4 煅烧高岭土型壳及不锈钢铸件
Fig. 4 Calcined kaolin shells and stainless steel casting

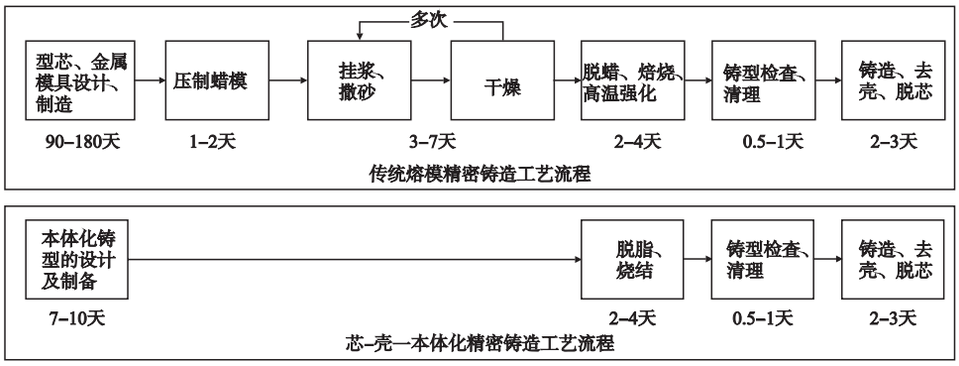


图5　芯-壳一体化精密铸造与传统熔模精密铸造工艺流程对比

Fig. 5 Comparison of core-shell integrated precision casting and traditional investment casting process

清华大学吕志刚团队开发芯-壳一体化增材制造成形技术，制备如图7的陶瓷结构，内芯为多层结构，外壳做了剖视处理。可以观察到烧结前后型壳与内芯成形完好。

进一步，在型壳外增加轻量化网格结构，提高铸型的强度，见图8。

对于具有封闭内腔结构的一体化铸型而言，坯件打印完成后型腔内部残余浆料的清洗是关键问题之一。因此，型芯、型壳坯体分别成形后组装一体烧结也是可行的技术方案。

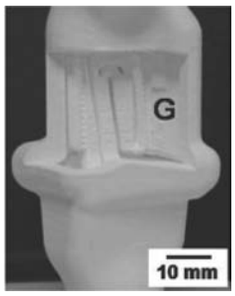
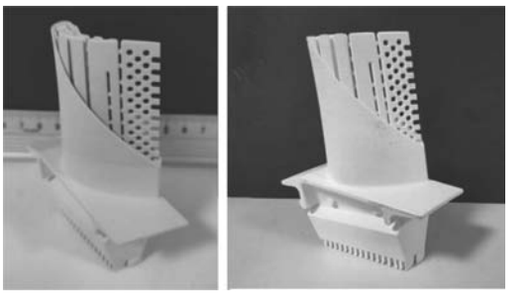


图6　密歇根大学制造的芯-壳一体化铸型

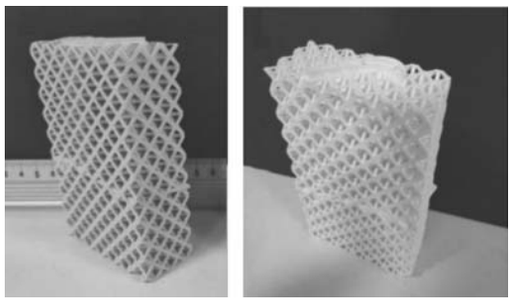
Fig. 6 Core-shell integrated mold and single crystal blade manufactured by University of Michigan



（a）坯体　　（b）烧结件

图7　芯-壳一体化铸型验证件

Fig. 7 Core-shell integrated casting mold



（a）坯体　　（b）烧结件

图8　外壳加强一体化铸型样件

Fig. 8 Prototype of reinforced integrated casting shell

4　结论

（1）光固化增材制造技术可以实现高精度复杂形状成形，与熔模铸造可以实现较好的工艺组合，缩短熔模铸造工艺流程，提高工艺响应速度。

（2）利用光固化树脂制作熔模，应选择适用的树脂材料，控制光固化工艺，通过网格化壁内空腔的设计，降低树脂熔模烧除时胀裂型壳的风险，避免残留灰分的影响。

（3）光固化陶瓷增材制造技术得到快速发展，采用该技术可制备结构更为复杂的陶瓷型芯，为以空心叶片为代表的复杂铸件内腔实现提供新的技术方案。进一步，可以发展芯-壳一体化的熔模铸型成形。

参考文献：

[1] 姜不居. 熔模精密铸造 [M]. 北京：机械工业出版社，2004：1–6.

[2] 常万顺，李继高，柯鑫，等. 金属工艺学 [M]. 北京：清华大学出版社，2015：40–41.

[3] HU Kehui，WET Yameng，LÜ Zhigang，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.

[4] 姜耀林，邵中魁. 3D打印在快速熔模精密铸造技术中的应用 [J]. 机电工程，2017（1）：48–51.

[5] 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（2）：80–83.

[6] Formlabs. Products，2020-09-10 [EB/OL]. http：//https：//formlabs.com/cn/industries/dental/.

[7] 宗学文，刘亚雄，魏罡，等. 光固化立体造型熔模铸造工艺的研究 [J]. 西安交通大学学报，2007，41（1）：87–90.

[8] 宗学文，刘洁，徐文博. 基于SLA的复杂零件低压熔模快速铸造工艺 [J]. 特种铸造及有色合金，2019，39（3）：300–303.

[9] 姜耀林，何朝辉，邵中魁. 基于ProCAST及3D打印技术的闭式叶轮快速铸造技术研究 [J]. 机电工程，2015（9）：1166–1169.

[10] CURTIS W，SURESH J，TOM M. Dimensional issues with investment casting patterns made by stereolithography [C]//Proceedings of The 48th Annual Technical Meeting on Investment Casting，USA，2000：1–9.

[11] CHARLES K. Investment casting trial studies examine significant new developments in stereolithographyresins [J]. Incast，2002（11）：12–15.

[12] 陈冰. 快速成形技术在熔模铸造中的应用——国外精铸技术进展述评（12）[J]. 特种铸造及有色合金，2005（12）：732–734.

[13] 胡可辉. 复杂陶瓷型芯光固化增材制造成形工艺及机理研究 [D]. 北京：清华大学，2020：32–100.

[14] JW halloran，M Griffith，TM Chu. Stereolithography resin for rapid prototyping of ceramics and metals [P]. the US，2000.

[15] BaeC. Integrally cored ceramic investment casting mold fabricated by ceramic stereolithography [J]. Applied Ceramic Technology，2011，6（8）：1255–1262.

[16] 周韦召. 复杂陶瓷零件光固化快速成形制造工艺研究 [D]. 西安：西安交通大学，2011：36–40.

[17] CHARTIER T，CHAPUT C，DOREAU F，et al. Stereolithography of structural complex ceramic parts [J]. Journal of Materials Science，2002，37（15）：3141–3147.

[18] ZHANG K，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.

[19] LI Fei，JI Xu，WU Zhenxing，et al. Digital light processing 3D printing of ceramic shell for precision casting [J]. Materials Letters，2020，276：128037.

[20] BAE C，HALLORAN J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology，2011，8（6）：1255–1262.

[21] HALLORAN J W，TOMECKOVA V，Gentry S，et al. Photopolymerization of powder suspensions for shaping ceramics [J]. Journal of the European Ceramic Society，2011，31（14）：2613–2619.

[22] BAE C，KIMD，HALLORANJ 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）：618–623.

Application of Stereolithography Technology to Investment Casting

HU Ke–hui[1, 2], ZHAO Peng–cheng[2, 3], LÜ Zhi–gang[1, 2]

（1. State Key Laboratory of Tribology, Beijing 100084，China；2. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China；3. Key Laboratory for Advanced Materials Processing, Ministry of Education, Beijing 100084, China）

Abstract:

The additive manufacturing technology can realize the direct forming of complex shape, while the stereolithography additive manufacturing technology has the advantage of high forming precision. The advantages of the two technologies can be brought into full play and the process cycle can be shortened by using the stereolithography technology to make the investment patterns and then combining with the investment casting technology. It is also possible to make ceramic cores or even ceramic shells for investment casting by using the stereolithography additive manufacturing process, so as to realize the rapid response of investment casting process. In this paper, the related equipment and forming principle of the stereolithography technology are briefly introduced, and the application of the resin pattern and the ceramic core/shell by stereolithography to the investment casting process are described respectively.

Key words:

stereolithography; additive manufacturing; investment casting; ceramic core; integrated casting mold

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）