

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.010

# 3D 打印在快速熔模精密铸造技术中的应用\*

姜耀林<sup>1</sup>, 邵中魁<sup>2</sup>

(1. 浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 浙江省机电产品质量检测所, 浙江 杭州 311305)

**摘要:**针对3D打印技术在熔模精密铸造行业的应用现状问题,对快速熔模精密铸造技术的工艺原理及国内发展概况进行了研究,分别重点研究了基于光固化成型技术、选择性激光烧结技术及熔融沉积成型技术的快速熔模精密铸造技术的国内研究现状,并深入剖析了这三种技术各自的优势与不足。其中,基于光固化成型技术的快速熔模精密铸造技术主要存在型壳易胀裂技术难题;基于选择性激光烧结技术的快速熔模精密铸造技术虽可有效克服型壳易胀裂技术难题,但存在原型零件强度不高、易翘曲变形等问题;而基于熔融沉积成型技术的快速熔模精密铸造技术则因原型尺寸精度较低、表面质量较差导致其实用性较低。研究结果表明,目前这三种快速铸造技术都还存在各自的技术瓶颈,这在很大程度上限制了其推广应用。

**关键词:**3D打印;熔模精密铸造;光固化;选择性激光烧结;熔融沉积

中图分类号:TH166;TP23

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0048-04

## Analysis of the application of 3D printing technology in the rapid investment casting process

JIANG Yao-lin<sup>1</sup>, SHAO Zhong-kui<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China;

2. Zhejiang Testing & Inspection Institute for Mechanical & Electrical Products Quality, Hangzhou 311305, China)

**Abstract:** Aiming at the application status of 3D printing technology in the investment precision casting industry, the technical principle and the domestic development situation of the rapid investment precision casting was studied firstly, then the domestic research status of the rapid investment casting process based on SLA, SLS and FDM were studied respectively as a key point in this article, and the advantages and disadvantages of these three technologies were deeply analyzed. The main technical problem of the rapid investment casting process based on SLA was that the shell was easy to crack during roasting, and the rapid investment casting process based on SLS mainly had the problems that the prototype strength was not high enough and easy to distort even though it can effectively overcome the shell cracking technical difficulty, and the rapid investment casting process based on FDM had a low practicality because of the low dimensional precision and poor surface quality of the FDM prototype. The results indicate that all these three rapid casting technologies still have their own technical bottlenecks at present, which makes it hard to be generalized.

**Key words:** 3D printing; investment casting; SLA; SLS; FDM

## 0 引 言

熔模精密铸造是铸造行业中一项优异的新技术,其铸件尺寸精度高、表面质量好、能制造复杂结构铸

件,应用范围较广,尤其是在高端铸件制造方面具有独特的优势<sup>[1]</sup>。但是,由于熔模精密铸造工艺先后包含模具制造、压制蜡模、挂浆撒砂制壳、高温焙烧、浇注成形、铸件后处理等多道工序,工艺过程复杂且制造周期

收稿日期:2016-07-25

基金项目:浙江省科技计划资助项目;公益技术研究工业项目(2016C31054)

作者简介:姜耀林(1965-),男,浙江嘉兴人,教授级高级工程师,主要从事机电检测及先进制造技术方面的研究。E-mail: jyl5133@163.com

长,难以满足现代社会对企业产品多样化和市场快速响应的需求。

3D 打印技术是制造业领域正在迅速发展的一项新技术,其核心思想为增材制造<sup>[2-3]</sup>,最早起源于美国。它以数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可粘合材料,通过逐层打印的方式来构造物体<sup>[4]</sup>。它无需模具,产生极少的废料,有效缩短了加工周期,在非批量化生产中具有明显的成本和效率优势<sup>[5]</sup>。

快速熔模精密铸造技术(以下简称快速铸造技术)就是将 3D 打印技术与熔模精密铸造工艺相结合,采用 3D 打印原型替代传统的蜡模作为熔模,在其基础上直接制作型壳,再高温焙烧去除 3D 打印原型,即可进行铸件浇注成形,该技术可有效缩短零件开发周期、降低生产成本,应用前景广阔<sup>[6]</sup>。

本研究将针对 3D 打印技术在熔模精密铸造行业的应用现状问题,对快速熔模精密铸造技术的工艺原理及国内发展概况进行研究。

## 1 快速铸造技术发展概况

20 世纪 90 年代起,美国、日本以及西欧等国家就开始研究 3D 打印技术在传统铸造行业领域的应用,至今一直在持续不断地开展深入研究<sup>[7]</sup>。国内的一些高校、研究机构及相关企业紧随其后,对 3D 打印技术在熔模精密铸造领域的工业应用方面做了很多研究工作,并取得了一定的研究成果。

3D 打印技术与熔模精密铸造技术的结合使得该快速铸造技术不仅“引进”了 3D 打印技术制造周期短、生产成本低、可制造任意复杂形状零件的优点,同时“继承”了熔模精密铸造工艺铸件尺寸精度高、表面质量好、几乎可成形任意金属种类等特点,正好扬长避短,在复杂形状金属铸件的单件、小批量生产方面具有广阔的应用前景。

依据打印方式与打印材料的不同,3D 打印技术主要可分为熔融沉积成型(FDM)、光固化成型(SLA)、选择性激光烧结(SLS)、切纸叠层(LOM)等 4 个种类。因此,不同的 3D 打印技术与熔模精密铸造工艺相结合就形成了各自相对应的快速铸造技术,目前国内研究比较常见的有基于 SLA 的快速铸造技术、基于 SLS 的快速铸造技术、基于 FDM 的快速铸造技术,尤其以前两种居多。切纸层叠(LOM)虽然在铸造行业也有应用,但 LOM 原型难以直接作为熔模使用,一般作为压型模具用于压制“蜡模”,或者作为木模直接用于制造石膏型或陶瓷型,因此该技术与本研究的快速

铸造技术工艺原理不同,本研究对此不再进行深入叙述。

## 2 基于 SLA 的快速铸造技术

光固化成型技术(SLA)的成型原理为:采用叠层制造的原理,计算机控制特定波长的紫外激光束对光敏树脂进行逐层扫描,使得液态光敏树脂发生光聚合反应逐层形成固态零件截面,如此重复直至零件原型制造完毕<sup>[8]</sup>,光固化成型原理如图 1 所示。

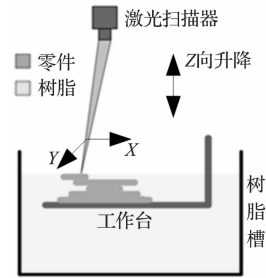


图 1 光固化成型原理

基于 SLA 的快速铸造技术的简要工艺过程为:首先将零件三维模型通过光固化成型设备直接打印成形,得到零件树脂原型,并进行清洗、去支撑、打磨、后固化等后处理工序,最后以此零件树脂原型为熔模进行熔模精密铸造,依次进行制壳、焙烧、浇铸、脱壳、铸件后处理等工序,最终制得零件金属铸件<sup>[9-10]</sup>。

光固化成型技术所制造零件树脂原型尺寸精度高、表面质量好、机械强度较高,这也正是该基于 SLA 的快速铸造技术的优势所在。但是,由于 SLA 所采用的光敏树脂材料的热膨胀系数较大,在高温焙烧脱树脂的过程中树脂原型的膨胀程度远远高于型壳的膨胀程度,容易胀裂紧紧包覆在树脂原型外表面的型壳,导致铸造过程失败。型壳胀裂如图 2 所示。



图 2 型壳胀裂

因此,型壳易胀裂问题便成为该基于 SLA 的快速铸造技术所需解决的一个关键技术难题,甚至在很大程度上影响了该技术的产业化推广应用。

西安交通大学的宗学文等人<sup>[11]</sup>针对快速熔模精密铸造中存在的型壳开裂技术难题,对光固化树脂原型与铸造型壳材料在高温烧失过程中的热变形机理和型壳开裂条件进行了有限元分析,建立了原型-型壳热变形数学模型,并将理论研究成果成功地应用于新型燃气涡轮导向器的快速铸造。

浙江省机电设计研究院的姜耀林等人<sup>[12]</sup>以闭式离心泵叶轮为研究对象,基于 ProCAST 软件对该叶轮浇注系统进行优化设计,并将叶轮及其浇注系统整体模型进行抽壳处理,再通过 3D 打印机快速制造叶轮及其浇注系统整体树脂原型,最后以该树脂原型作为熔模进行熔模精密铸造,最终成功制得了闭式离心泵叶轮金属铸件。

此外,还有许多研究人员针对该基于 SLA 的快速铸造技术存在的胀型问题,对光固化树脂原型焙烧工艺参数、树脂原型和型壳之间的膨胀原理、型壳制作过程中的浆料配置等开展了理论试验研究,研究成果显著。

### 3 基于 SLS 的快速铸造技术

选择性激光烧结技术(SLS)的成型原理为:首先在工作平台上铺上一层很薄的粉末材料,激光束在计算机控制下按照零件分层轮廓有选择性地烧结成形,逐层累积形成实体模型,最后去掉未烧结的粉末材料即可获得烧结原型,选择性激光烧结原理如图 3 所示。

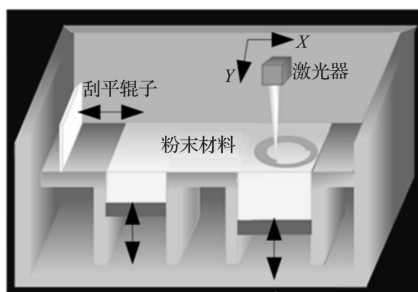


图 3 选择性激光烧结原理

基于 SLS 的快速铸造技术的简要工艺过程与前述基于 SLA 的快速铸造技术基本类似:首先将零件三维模型通过选择性激光烧结设备直接烧结成形,得到零件烧结原型,并以该零件烧结原型为熔模进行熔模精密铸造,最终制得零件金属铸件。

选择性激光烧结技术可采用多种材料,较常见的激光烧结材料包括高分子材料粉末、金属粉末、陶瓷粉末、石英砂粉等,其中应用广泛的高分子烧结材料主要包括聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、尼龙等。基于

SLS 的快速铸造技术早期曾采用 PC 粉末作为烧结材料,并在熔模铸造方面获得成功应用,但是后期推出的 PS 粉末材料烧结温度较低、烧结变形小、成形性能优良,比 PS 粉末更加适合熔模铸造工艺,因此目前基于 SLS 的快速铸造技术主要采用聚苯乙烯粉末作为烧结材料<sup>[13]</sup>。

基于 SLS 的快速铸造技术的优势在于:由于未烧结的粉末可对模型的空腔和悬臂部分起支撑作用,不必像 SLA 和 FDM 工艺那样另外设计支撑结构,可以直接生产形状复杂的原形及部件;且采用 PS 粉末作为烧结材料制作的烧结原型零件的燃烧分解温度较低,可有效克服高温焙烧过程中型壳易胀裂的技术难题。

但是,由于 SLS 技术存在原型零件强度不高、易翘曲变形导致精度降低等问题,需对烧结原型零件进行后处理。如研究人员采用 PS 粉末进行快速铸造时,需对 PS 粉末烧结原型零件进行渗蜡处理,以提高原型零件的强度及表面质量,便于后续开展挂浆制壳等工序。

华中科技大学的孙海霄等人<sup>[14]</sup>采用选择性激光烧结工艺烧结塑料原型,对作为烧结材料的塑料粉受热裂解燃烧特点开展了研究,并以此塑料烧结原型为熔模,在塑料原型表面制作陶瓷型壳,高温焙烧后原型完全脱去,成功制得锌合金金属铸件。

中北大学的崔建芳等人<sup>[15]</sup>用自行研制的激光烧结快速成型机对 PS 粉末烧结工艺开展了研究,并用自制的 PS 粉末烧结成型制得 PS 原型,再对成型件进行浸蜡处理,成功制造出铸造用可消失树脂模具,可直接用于熔模精密铸造。

华中科技大学的史玉升等人<sup>[16]</sup>采用 PS 基高分子粉末材料作为 SLS 烧结材料,烧结成型后对原型进行渗蜡处理,再在原型表面涂覆陶瓷浆料,型壳干燥后进行高温焙烧,该工艺所制作的陶瓷型壳不变形、不开裂、表面质量好、无杂质残留,非常适合于金属零件快速铸造工艺。

### 4 基于 FDM 的快速铸造技术

熔融沉积成型技术(FDM)的成型原理为:材料在喷头内被加热熔化,喷头按 CAD 分层数据沿零件截面轮廓和填充轨迹运动,同时将熔化的材料挤出,材料迅速固化,并与周围的材料黏结,层层堆积最终实现零件的沉积成型,熔融沉积成型原理如图 4 所示。

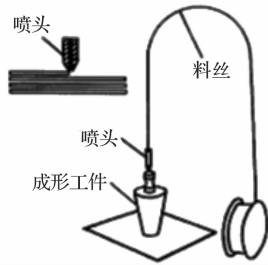


图4 熔融沉积成型原理

基于FDM的快速铸造技术的简要工艺过程为:首先通过FDM设备将零件三维模型熔融沉积成型,得到零件FDM原型,并以此FDM原型为熔模进行熔模精密铸造,最终制得零件金属铸件。

熔融沉积成型技术所采用的材料一般是热塑性材料,如蜡、ABS、PLA、PC、尼龙等,并且以丝状供料。基于FDM的快速铸造技术一般采用石蜡或塑料等低熔点材料的FDM原型作为熔模进行熔模精密铸造。

FDM设备不用激光器件,使用维护简单,成本较低,市场占有率很高。但是,与其他技术相比,FDM设备制造的原型尺寸精度较低、表面质量较差,这极大地降低了该基于FDM的快速铸造技术在实际工业领域的实用性,国内关于该技术的文献报道也很少见。

## 5 结束语

(1)基于SLA的快速熔模精密铸造技术所制造的铸件尺寸精度高、表面质量好,但是存在型壳易胀裂技术难题,虽可通过模型抽壳设计等方法进行克服,还是在很大程度上限制了其推广应用。西安交通大学、浙江省机电设计研究院等研究机构都已成功实现该技术在工业领域的应用。

(2)基于SLS的快速铸造技术目前主要采用PS粉末材料作为烧结材料,其原型制造工艺简单、燃烧分解温度低,可有效克服型壳易胀裂技术难题,但是该技术存在原型零件强度不高、易翘曲变形等问题,需对作为熔模的原型零件进行后处理,如对PS粉末烧结原型零件进行渗蜡处理以提高原型零件的强度及表面质量。华中科技大学、中北大学等研究机构在该技术研究方面取得的成果较为显著。

(3)虽然FDM技术因其使用维护简单、成本较低而占有较高的市场份额,但是由于FDM原型尺寸精度较低、表面质量较差直接导致了基于FDM的快速铸造技术在实际工业领域的实用性不强,国内关于该技术的文献报道也很少见。

## 参考文献(References):

- [1] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J]. 铸造, 2012, 61(4): 347-356.
- [2] 王宏忠, 李扬帆, 张曼茵. 中国3D打印产业的现状及发展思路[J]. 经济纵横, 2013(1): 90-93.
- [3] 朱珠, 雷林, 罗向东, 等. 含能材料3D打印技术及应用现状研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 52-55, 70.
- [4] 席骏. 3D打印技术及产品简介[J]. 数码印刷, 2014(2): 27-29.
- [5] 祁鸣, 张天龙. 3D打印: 社会化制造的新时代[J]. 中国经贸, 2013(11): 10-12.
- [6] 张敏华. 快速铸造技术的研究与发展[J]. 铸造技术, 2009, 30(2): 292-294.
- [7] 张敏华. 快速铸造和快速精密铸造技术的研究与发展[J]. 金属铸锻焊技术, 2009, 38(3): 36-39.
- [8] 张宇红, 曾俊华, 洪军. 大型零件光固化快速成型工艺研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3): 553-557.
- [9] 姜耀林, 邵中魁, 郭嘉. 基于3D打印技术的离心泵叶轮快速精铸工艺研究[J]. 制造业自动化, 2015(2): 153-156.
- [10] 董亮, 白羽, 刘原林, 等. 离心泵叶轮计算域参数化造型软件开发[J]. 流体机械, 2014, 42(6): 55-60.
- [11] 宗学文, 刘亚雄, 魏昱, 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, 95.
- [12] 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, 32(9): 1166-1169.
- [13] 汪艳. 选择性激光烧结高分子材料及其制件性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学自动化学院, 2005.
- [14] 孙海霄, 刘洪军, 董选普, 等. 基于SLS塑料原型的金属零件的快速铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2001(4): 12-13.
- [15] 崔建芳, 党惊知, 白培康, 等. PS粉末激光烧结快速成型技术及其在铸造中的应用[J]. 工程塑料应用, 2005(10): 35-37.
- [16] 史玉升, 孙海霄, 樊自田, 等. 基于选择性激光烧结方法的金属零件快速制造技术研究[J]. 铸造, 2003, 52(10): 749-752.

[编辑: 张豪]

## 本文引用格式:

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, 34(1): 48-51.

JIANG Yao-lin, SHAO Zhong-kui. Analysis of the application of 3D printing technology in the rapid investment casting process[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(1): 48-51.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>