DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.023

3D 打印石膏型无模快速精密铸造工艺研究

许中明[1],黄学能[1],钱　江[2]
(1.顺德职业技术学院 智能制造学院,广东 佛山 528333;2.广州明珠电气股份有限公司,广东 广州 511400)

摘　要:以斜齿轮为铸造试验对象,沿工艺流程从铸型设计、铸型 3D 打印、铸型脱水、零件浇注 4 阶段对石膏型无模快速精密铸造工艺进行了研究。结果表明,当所铸零件形状复杂时,采用剖分结构的铸型比整体铸型更有利于型腔内部余粉的清理;型腔表面不用刷硅溶胶或水玻璃等,但需进行脱水处理,否则铸件易出现气孔等缺陷;石膏型无模铸造充型能力强,型壳清理方便,铸造出来的零件尺寸精度可达 CT5~CT6,表面粗糙度 *Ra* 值可达 3.2~6.3 μm

关键词:石膏型;无模铸造;精密铸造;3D 打印

中图分类号:TG249.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1324-04

Research on Moldless Rapid Precision Casting Technology of Plaster Mold by 3D Printing

XU Zhongming[1], HUANG Xueneng[1], QIAN Jiang[2]
(1. School of Intelligent Manufacturing, Shunde Polytechnic, Foshan 528333, China; 2. Guangzhou Mingzhu Electric Co., Guanzhou 511400, China)

Abstract: With helical gears as the casting test object, the moldless rapid precision casting technology of plaster mold was studied by four stages as casting mold design, 3D printing, dewatering and casting parts along the process flow. The results show that when the shape of the casting parts is complex, the partition structure is more advantageous to the cleaning of the cavity interior than the whole casting; the surface of the cavity inside the plaster casting does not need to be brushed with silica sol or sodium silicate, but needs to be dewatered, otherwise the casting is prone to defects such as blowhole; the filling capacity of plaster mold is better than that of the sand mold. The plaster mold is easy to clean. The dimensional precision of the part casted can reach CT5 ~ CT6, and the *Ra* value of surface roughness can reach 3.2 ~ 6.3 μm.

Key words: plaster mold; moldless casting; precision casting; 3D printing

数字化无模快速精密铸造技术是近年国内外近净成形技术研究的热点,它是将数字化技术和快速成型技术等应用到传统铸造技术中,为单件小批量零件的快速制造提供更优的技术方案。数字化无模快速铸造技术省去传统精密铸造技术中蜡型、泡沫塑料模、木模等的制作,不但大大缩短生产周期,具有更高的精度、更少的余量、更好的表面质量,还可铸造更复杂的结构、节能降耗、减少污染,是铸造技术的重大进步。

目前,无模快速铸造技术的研究和应用基本都集中在砂型,石膏型的研究极少。本文通过试验来研究石膏型无模快速精密铸造的工艺。

收稿日期:2019-09-01
基金项目:广东省轻工装备智能制造工程技术研究中心开放课题资助项目(2019-KJZX011)
作者简介:许中明(1971-),广东湛江人,工学博士,副教授.研究方向:快速制造技术、石膏型精密铸造技术.
电话:075722328707,E-mail:exzm@qq.com

1　数字化无模快速铸造技术研究与应用现状

数字化无模快速铸造是在 CAD 中,将零件三维数字模型转换为相应的壳型,再加上浇、冒口系统,得到铸型三维模型,然后以铸造用的型砂等为原料,通过 3D 打印机直接制出铸造用的型壳原型,经固化处理后获得铸造用的型壳,再浇注金属得到零件。无模快速铸造的核心技术是铸型的快速制造技术,目前主要有以下几种工艺。

(1)选择性激光烧结(Selective Laser Sintering,简称 SLS)铸型工艺　以树脂砂和陶瓷粉等为成形材料,采用激光烧结的方法制造出铸型,最早在 1989 年由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 C. R. Dechard 研制成功,随后美国 DTM 公司、德国 EOS 公司陆续推出该工艺的铸型 3D 打印机,其中德国 EOS 公司的激光烧结砂型制造技术处于世界领先地位[1]。国内华科三维、易加三维的砂型 3D 打印机也是采用这种工艺。SLS 铸型制造工艺通过选用粒

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度较细的陶瓷粉和覆膜砂、采用较小的分层厚度，可以得到较高表面质量的铸型，但设备价格昂贵，且受设备成型空间和成型速度的限制，只适合于制造中小件。

（2）立体光固化（Stereolithography Apparatus，简称SLA）铸型工艺　将铸型材料粉末按一定的比例加入到光固化树脂中，然后根据铸型的CAD模型在光固化成型机上制作出型壳。该技术由美国3D System公司研制成功及进行商品化[2]。

（3）三维印刷（Three Dimensional Printing，简称3DP）铸型工艺　采用逐点喷洒粘接剂来粘接粉末材料从而制造出铸型，铸型材料包括石英砂粉末、陶瓷粉末等。由美国麻省理工学院研究成功，Soligen、Z Corp.等公司将其商品化[3]。采用这种工艺的企业较多，具体实现方法也有所不同，例如美国Soligen公司使用颗粒尺寸为75～150 μm的陶瓷粉末为铸型材料，粘接材料选用硅溶胶，制造出的铸型表面质量较高，但这种硅酸盐水溶液分层粘接起来的陶瓷铸型强度较低，必须经过焙烧之后才能用于浇注；德国Voxelje公司采用喷射-固化的成型方式，铸型材料为石英砂；美国ExOne公司也是用粘接剂把石英砂逐层打印成铸型；国内广东峰华卓立公司结合传统树脂砂工艺，采用微滴喷射砂型3D打印工艺[4]制造铸型。

除以上基于3D打印的无模铸造技术外，单忠德等人发展了一种利用三维CAD模型数据直接对砂型进行切削加工，从而得到铸型的无模铸造工艺[5,6]，也取得了较好效果。在这几种无模快速铸造工艺中，3DP铸型打印工艺起步较晚，但因其具有较快的制造速度、较大的成型空间及较优异的性能，近年应用越来越广泛。目前无模快速铸造工艺中，铸型材料主要采用陶瓷、石英砂和树脂砂粉末，采用石膏作为铸型材料的研究很少。

2　石膏型无模快速精密铸造的工艺流程

尽管目前国内外对石膏型无模快速铸造技术研究较少，然而石膏作为铸型材料有独特的优点：①石膏蓄热系数大、导热性差，在浇注的过程中，铸液降温慢，凝固时间长，因而铸液流动性好，这对形状复杂、薄壁的铸件成形非常有利；②石膏在其工作温度范围内线膨胀率变化小，这对保证铸件的尺寸精度和表面粗糙度很有利；③石膏具有一定的强度和硬度，也可承受较高温度，可浇注铝、铜等熔点不超过1 300 ℃的有色金属零件；④石膏的比重轻，搬运操作容易，而且溃散性好，铸型清理简便，污染小。

因此，研究石膏型铸造技术对形状复杂、薄壁的有色金属件具有重要应用价值。现有的石膏型铸造技术是用SLA或FDM工艺的3D打印机制造塑料或蜡制原型，埋入石膏浆料中，待石膏浆料固化后，加热去除塑料或蜡制原型，得到所需铸型[7]。这种工艺相对复杂，操作麻烦，耗时也长。随着3DP工艺3D打印机的发展，直接打印出石膏精密铸型已具备条件。

采有3DP打印工艺制作铸型的石膏型无模快速精密铸造工艺流程如图1。

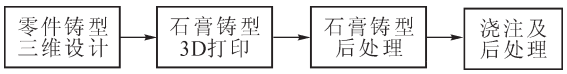


图1　石膏型无模快速精密铸造工艺流程

Fig.1　Rapid and precise casting process of plaster mold

3　3D打印石膏型无模快速精密铸造工艺试验

下面以斜齿齿轮为例，研究石膏型无模快速精密铸造零件的工艺。

3.1　铸型三维设计

石膏铸型在加热脱水后及合金铸液冷却凝固后体积会发生变化，因此需在零件原有尺寸基础上整体放大$(1+k)$倍，从而得到铸造原型的三维CAD模型，其中k为总收缩率，$k=k_1+k_2$，k_1是石膏铸型的收缩率，k_2是合金铸件收缩率，可通过工艺测试或查文献资料得到。此处根据工艺试验值取$k=0.015$。

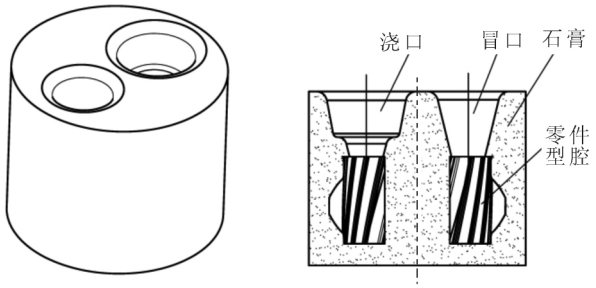
之后，在铸造原型的三维CAD模型上，加上加工余量，再根据铸造工艺的需要设计出浇道、冒口等，然后对整个铸造原型对外抽壳，壳厚为8~12 mm。由于斜齿轮形状复杂，无法直接采用外抽壳命令得到铸型，本文采用实体布尔减法得到铸型，即先在铸造原型外面建立一个实体模型（比铸造原型单边大8~12 mm），然后再减去铸造原型实体，从而得到所需铸型，如图2。

由于3DP工艺打印后需清理型腔内部的粉末，而斜齿轮型腔复杂，内部齿壁的粉难以完全清理干净，因此本文将铸型分为铸型底和铸型盖两半，待清理完内部粉末后再粘结成为一体，粘结剂采用透明胶水VisiJet PXL Clear binder。铸型分型面选择在斜齿轮上端面，从而使齿轮型腔完全在铸型底；在分型面外沿设置止口结构，用于定位和保证装配精度，如图3。

3.2　铸型3D打印

将齿轮铸型的三维CAD文件转化为STL格式

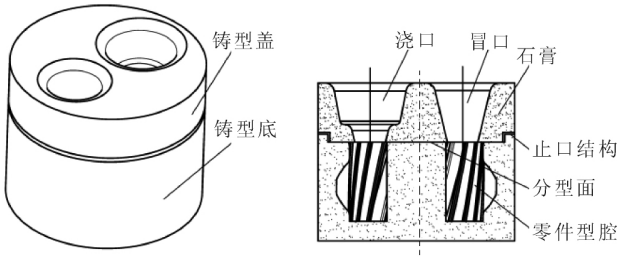
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)轴测图　　(b)剖视图

图 2 齿轮的整体铸型

Fig.2 Integral cast mold of the gear



(a)轴测图　　(b)剖视图

图 3 齿轮的剖分铸型

Fig.3 Split cast mold of the gear

并导入 3D 打印机，将铸型打印出来。由于铸型的制造精度对铸件精度有直接影响，本文采用美国 3D System 公司生产的 Projet 660 型工业级 3D 打印机，成型材料为 α 型半水石膏复合粉末(280~320 目)，粘结剂采用透明胶水 VisiJet PXL Clear binder，打印层厚设置为 0.1 mm。打印结束后，用压缩空气吹走余粉，再将铸型粘结成整体，见图 4。

3.3 石膏铸型脱水

由于 3D 打印出来的石膏铸型含水量较大，为避免铸型变形、开裂以及铸造时出现气孔等缺陷，需放在加热炉中加热至 200~220 ℃去除结晶水后再进行浇注，此时石膏转化为III型硬石膏 $Ca[SO_4]\cdot\varepsilon H_2O$($0.06<\varepsilon<0.11$)。加热时，升温速度控制在 2 ℃/min 以内，升至脱水温度后保持温度不变，保温时间根据铸型外形尺寸和型重确定，可按 1.25 h/kg 进行估算，操作时观察从加热炉排气管中排出的水汽，若已稀薄即可停止加热。齿轮石膏铸型脱水加热工艺见图5。

3.4 浇注及后处理

铸型脱水完成后，因温度不高，可直接从炉内取出，不用随炉冷却。为避石膏铸型在空气中受潮以及提高铸液的流动性，应尽快进行浇注。浇注合金采用重力铸造锌合金，这种锌合金具备强度高、铸造性能好、对过热和重熔不敏感、收缩率小、气孔少、切削加工性能好等优点。将高铝锌基合金 ZZnAl8Cu1Mg (ZA-8)铸锭放入电炉内，加热至 420 ℃使其熔化得到锌合金铸液，将铸液从浇口倒入仍处于热态的石膏铸型内，待铸液凝固及冷却后，破除石膏型得到所需斜齿轮铸件；去除浇口和冒口，稍做修整后得到锌合金齿轮铸件，如图 6。

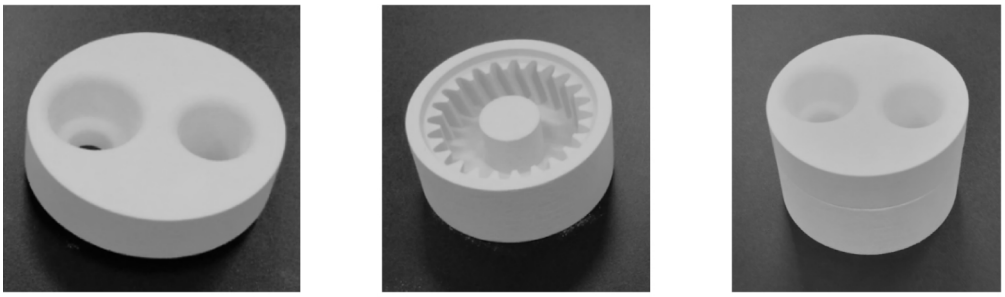
从铸件三维 CAD 图设计开始到铸件完成，时间共计为 2 天，所需时间比用 3D 打印制作塑料原型件的消失模石膏型快速铸造技术少一些[7]。经测量，齿轮铸件主要尺寸如表 1 所示。

表 1 齿轮铸件主要尺寸测量表

Tab.1 Main dimensions measuring table of the casted gear

尺寸项目	铸造要求(CT6)	铸件实际尺寸	实际精度等级
内孔 ϕd/mm	30±0.32	29.80	CT5
外径 ϕD /mm	89.0±0.39	89.25	CT5
高度 h/mm	25.0±0.29	24.72	CT6

从表 1 中看出，铸造出来的齿轮尺寸精度等级为 CT5~CT6；从图 6(b)的铸件照片可看出，齿轮表面质量较好，3D 打印的台阶效应几乎观察不到；用北京时代 TR200 型粗糙度测量仪测出表面的粗糙度值 Ra 为 3.2~6.3 μm。在铸造过程还可以观察到，高温的金属铸液浇入铸型后，所接触到的石膏表面打印胶水固化形成的树脂出现碳化，导致颜色变黄，但不影响铸型的强度和性能。



(a)铸型盖　　(b)铸型底　　(c)粘结好的铸型

图 4 3D 打印出来的齿轮铸型

Fig.4 Cast mold of the gear by 3D printing

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

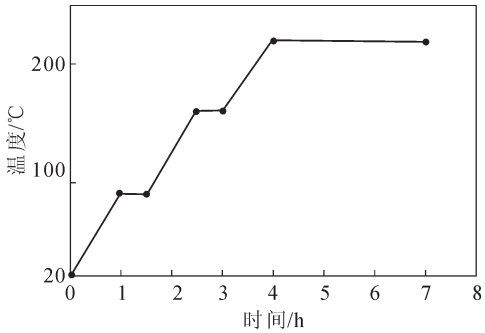
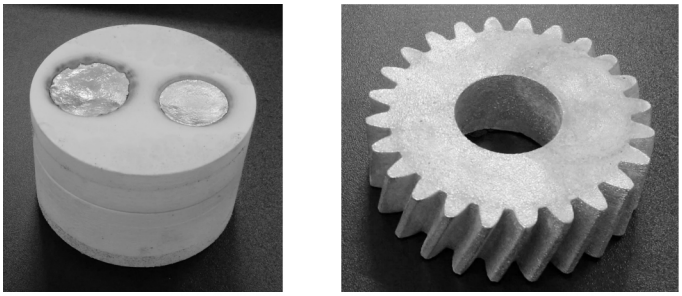


图 5 齿轮石膏铸型脱水工艺图

Fig.5 Process drawing of dewatering process for the plaster mold of gear



(a)浇注后的铸型　　(b)清理后的齿轮铸件

图 6 齿轮无模快速精密铸造成品

Fig.6 Finished gear by moldless rapid precision casting of plaster mold

4 结论

(1)当所铸零件形状复杂时，采用剖分结构的石膏铸型比整体铸型更有利于型腔内部余粉的清理。

(2)石膏铸型型腔表面不用刷硅溶胶或水玻璃等，但需进行脱水处理，否则铸件易出现气孔等缺陷。

(3)石膏型无模铸造比砂型具有更强的充型能力，铸造出来的零件尺寸精度高、表面质量好，型壳清理也更方便；与石膏型消失模快速铸造技术相比，3DP 打印工艺石膏型无模铸造成本更低、速度更快。

参考文献：

[1] Jin-wu Kang, Qiang-xian Ma. The role and impact of 3D printing technologies in casting[J]. China Foundry，2017，54(17)：124-132.

[2] 周建新，计效园，闫春泽，等. 铸造技术路线图：快速成形[J]. 铸造. 2017, 66(5)：433-438.

[3] Elena Bassoli, Andrea Gatto, Luca Iuliano. 3D printing technique applied to rapid casting [J] . Rapid Prototyping Journal, 2007, 13 (3)：148-155.

[4] 杨伟东，檀润华，颜永年，等. 基于微滴喷射技术的快速铸造方法探讨[J]. 铸造技术，2005，26 (1)：255-256.

[5] 单忠德，朱福先. 应用 PCD 刀具铣削砂型的刀具磨损机理和预测模型[J]. 机械工程学报，2018，54(17)：124-132.

[6] 刘丽敏，单忠德，兰盾. 基于无模铸造精密成形技术砂型坎合组装方式研究[J]. 铸造技术，2017，38(2)：354-359.

[7] 许中明，王鸿博，杨亘，等. 应用石膏型快速精密铸造技术制造叶轮[J]. 制造技术与机床，2017(6)：61-64.

《特种铸造及有色合金》杂志征订启事

期刊简介：《特种铸造及有色合金》杂志，是中国科学技术协会主管，中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所主办的中文核心期刊，为国内外权威数据库及检索系统收录，并荣获全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖和新中国 60 年有影响力的期刊。

主要内容：各种(黑色和有色合金)特种铸造方法，如：熔模铸造、压力铸造、半固态铸造、金属型铸造、离心铸造、连续铸造、壳型铸造、消失模铸造(实型铸造)及电磁铸造等方面的理论、工艺、设备、造型材料、测试与控制、计算机应用技术等；各种(砂型铸造及特种铸造)有色合金及复合材料的熔炼和铸造工艺、凝固理论、测试与控制、计算机应用等方面的科研成果及生产经验，并介绍上述内容的国内外发展动向和学术、技术交流活动消息等。

期刊订阅：本刊为月刊，邮发代号 38-109，20 元 / 期，全年共 12 期，邮局可订，平邮免邮费。合订本和专刊、光盘可向本刊编辑部邮购。

联系方式：

地址：武汉市江岸区江大路 26 号(430019)

电话：027-85358206/85486024/85358127(传真)

邮箱：tzzz@special-cast.com　网址：www.special-cast.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net