

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.004

# 基于 ProCAST 及 3D 打印技术的 闭式叶轮快速铸造技术研究\*

姜耀林, 何朝辉, 邵中魁

(浙江省机电设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311305)

**摘要:**针对单件小批量复杂形状零件快速制造问题,以具有复杂内部空腔结构的闭式离心泵叶轮为研究对象,开展了基于 ProCAST 及 3D 打印技术的快速铸造技术研究。首先采用 Pro/E 软件建立了离心泵叶轮及其浇注系统整体数学模型,通过 ProCAST 软件对该叶轮铸造工艺过程进行了数值模拟仿真,然后完成了闭式叶轮及其浇注系统整体树脂模型的 3D 打印,并以该树脂模型作为熔模进行了熔模精密铸造,最终制得了闭式离心泵叶轮铸件。研究结果表明,利用该快速铸造技术制得的闭式叶轮铸件的尺寸精度可达 CT4 级,表面粗糙度可达  $Ra6.3 \mu\text{m}$  以下。

**关键词:**3D 打印;快速铸造;光固化;ProCAST;闭式叶轮

中图分类号:TH164;TH311

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1166-05

## Rapid casting of enclosed impeller based on ProCAST and 3D printing technology

JIANG Yao-lin, HE Chao-hui, SHAO Zhong-kui

(Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311305, China)

**Abstract:** Aiming at rapid manufacturing of complex shape product for single and small batch, a rapid casting technology based on ProCAST and 3D printing technology was studied, with the enclosed centrifugal pump impeller which has complex internal cavity structure as an application example. Firstly the enclosed impeller model with gating system was established by Pro/E, secondly the numerical simulation of casting process of the enclosed impeller was made by ProCAST, and then a resin impeller model with gating system was directly produced by 3D printing technology, finally a metal enclosed centrifugal pump impeller was casted by investment casting with the resin impeller model as the fired mold. The results indicate that the dimensional accuracy of the casted metal impeller can reach CT4 level and the surface roughness can be better than  $Ra6.3 \mu\text{m}$ .

**Key words:** 3D printing; quick casting; SLA; ProCAST; Enclosed impeller

## 0 引 言

离心泵是一种通用流体机械,被广泛地应用于石油、化工、造纸、钢铁、电力等国民经济的各行各业,被誉为是工业的心脏,其叶轮是离心泵的主要核心部件<sup>[1-2]</sup>。闭式离心泵叶轮在前盖板与后盖板之间具有复杂内部空腔结构,难以采用传统机加工的方式进行加工制造。目前国内采用熔模精密铸造作为闭式离心泵叶轮的主要制造方法。熔模精密铸造生产的第一个工序就是制造离心泵叶轮蜡模作为熔模,一般采用金属模具作为压型来制造蜡模。但是,由于金属模具的生产工艺复杂、

开发周期长、制造成本高、制造精度不易控制,难以实现闭式离心泵叶轮铸件的快速制造,直接影响产品开发效率,因而无法适应快速多变的市场需求<sup>[3]</sup>。

3D 打印技术是以数学模型为基础,将材料逐层堆积制造出实体物品的新兴制造技术,它无需模具,仅利用三维数学模型在一台设备上即可快速制造出任意复杂形状的零件,可有效缩短加工周期,节省开发成本<sup>[4]</sup>。其中,光固化 3D 打印技术是目前加工精度最高的一种 3D 打印技术,它以液态光敏树脂为原料,通过紫外激光束对光敏树脂进行逐层扫描,使其产生光固化反应,从而形成零件实体<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2015-05-21

基金项目:浙江省重大科技专项重大工业项目(2013C01127-5)

作者简介:姜耀林(1965-),男,浙江嘉兴人,高级工程师,主要从事光固化 3D 打印应用技术方面的研究。E-mail:jyl5133@163.com

ProCAST 是由美国 ESI 集团开发的一款集成化程度很高的铸造模拟软件,能够对铸件在形成过程中的流场、温度场和应力场进行仿真分析并准确预测缩孔、缩松等铸造缺陷,帮助铸造工程师优化铸造设备参数和工艺方案<sup>[6-7]</sup>。

本研究以闭式离心泵叶轮为研究对象,开展基于 ProCAST 及 3D 打印技术的快速铸造技术研究,主要技术路线为:首先优化设计叶轮及其浇注系统整体原型,然后基于 ProCAST 对该叶轮铸造工艺过程进行有限元数值模拟仿真,再通过 3D 打印机快速制造叶轮树脂模型,最后以该树脂叶轮作为熔模进行熔模精密铸造<sup>[8-9]</sup>。

笔者研究的基于 ProCAST 及 3D 打印技术的快速铸造技术是将有限元铸造模拟软件 ProCAST 以及先进的 3D 打印技术与传统的熔模精密铸造工艺相结合,可有效降低制造成本,缩短生产周期,可快速实现复杂形状零件的单件、小批量快速制造,尤其适用于新产品开发试制阶段。

## 1 叶轮整体模型 CAD 设计

首先本研究基于 Pro/E 软件建立一个外径为 160 mm 的闭式离心泵叶轮三维模型,分别如图 1、图 2 所示。

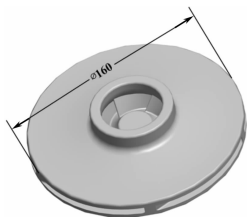


图 1 闭式离心泵叶轮三维模型

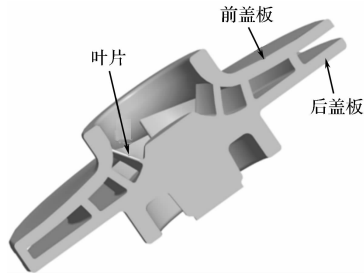


图 2 闭式离心泵叶轮模型剖视图

该闭式离心泵叶轮主要由前盖板、叶片、后盖板等 3 大部分组成,前盖板与后盖板之间具有复杂的内部空腔结构,采用传统金属压蜡模具无法一次成形闭式离心泵叶轮蜡模,且模具结构复杂,开发周期长,制造成本高。而本研究采用 3D 打印技术则可以将复杂结构的闭式离心泵叶轮直接 3D 打印成形,无需模具,极大地降低了叶轮制造成本,缩短了叶轮生产周期,尤其适用于闭式离心泵叶轮新产品开发试用阶段。

为了省去传统熔模精密铸造过程中手工粘制蜡浇

注系统这个工艺环节,本研究在闭式离心泵叶轮模型的基础上直接设计浇注系统,使闭式离心泵叶轮及其浇注系统形成一个整体模型。

该模型如图 3 所示。

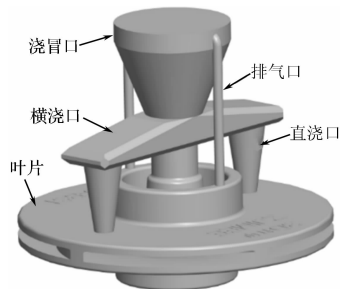


图 3 叶轮及其浇注系统整体模型

为了节约树脂材料,同时防止后续高温焙烧过程中树脂模型胀裂型壳,本研究将该闭式叶轮及其浇注系统整体模型进行抽壳处理,设置抽壳壁厚为 0.8 mm,抽壳后的叶轮整体模型为内部中空结构。

剖视图如图 4 所示。



图 4 抽壳后叶轮整体模型剖视图

## 2 ProCAST 数值模拟仿真

为了验证前述浇注系统设计是否合理,本节将基于 ProCAST 软件对该闭式叶轮铸造工艺过程进行数值模拟仿真。

本研究首先将闭式离心泵叶轮及其浇注系统整体模型导入 ProCAST 软件 MeshCAST 模块中划分网格,设置最大网格尺寸为 1 mm。

生成的叶轮铸件网格模型如图 5 所示。

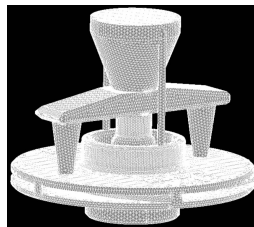


图 5 闭式叶轮铸件网格模型

本研究设置叶轮型壳壁厚 5 mm,自动生成叶轮型壳,并划分体网格后生成的闭式叶轮铸件及其型壳三维有限元网格模型如图 6 所示。

其中,模型有限元体网格单元总数为 1 299 165 个,节点总数为 278 025 个。

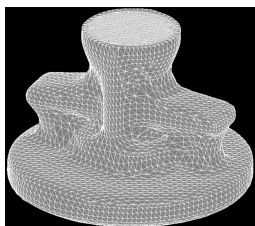


图 6 叶轮铸件及其型壳网格模型

本研究将上述网格模型导入到 PreCAST 模块中进行前处理,分别设置:叶轮铸件材料为普通碳钢,型壳材料为硅砂,接触面类型为 COINC,界面热交换系数为  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ,浇注温度为  $1580 \text{ C}$ ,浇注速度为  $1 \text{ m/s}$ ,冷却方式为 Air\_cooling,型壳初始温度为  $700 \text{ C}$ ,采用重力铸造,且忽略扣箱辐射<sup>[10]</sup>。

本研究完成前处理后将该模型先后导入 Data-CAST 及 ProCAST 模块进行有限元求解计算,求解完成后在 ViewCAST 模块中观察模拟结果。

叶轮铸件充型过程模拟结果如图 7 所示。

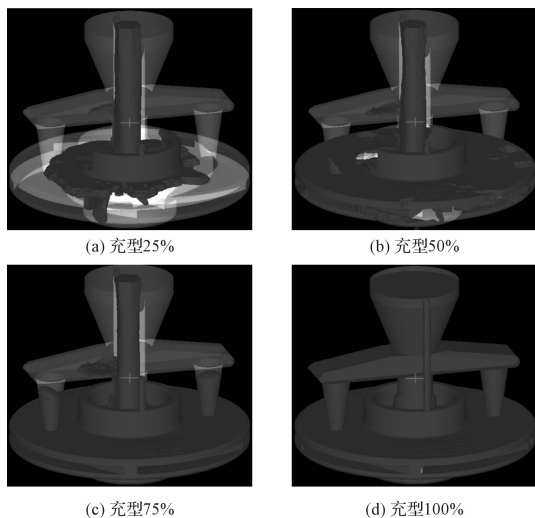


图 7 叶轮充型过程模拟结果

通过分析充型模拟结果可知,高温液态金属浆料从浇口按照  $1 \text{ m/s}$  速度经由主浇道向下充填,进入到叶轮型壳内部型腔,随后金属液按照叶轮形状向四周辐射充填,将叶轮前盖板、叶片、后盖板逐步充填完整,整个充填过程中,液态金属流动相对稳定,并无明显的卷气现象。叶轮铸件充填完毕后,液态金属逐步向上充填直浇口、横浇口及浇冒口,整个充填过程结束。

叶轮铸件凝固过程模拟结果如图 8、图 9 所示。

通过分析凝固模拟结果可知,铸件温度分布状态为从上向下温度逐步降低,从内向外也是温度逐步降低。由此推断,该叶轮铸件的凝固过程为由下向上、由外向内的逐步顺序凝固过程,该凝固顺序符合铸造工艺要求,有利于凝固过程中浇注系统对叶轮铸件补缩,有效防止缩孔、缩松等铸造缺陷产生。

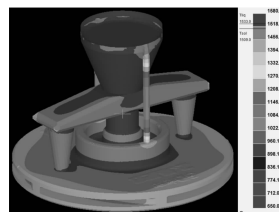


图 8 叶轮凝固过程模拟结果



图 9 叶轮凝固过程剖视图

### 3 光固化 3D 打印树脂叶轮

本研究将完成数值模拟仿真验证的叶轮及其浇注系统整体模型导入 RPDdata 软件进行前处理,选择成形方向并设计工艺支撑。

完成前处理后的叶轮整体模型如图 10 所示。

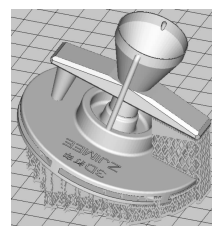


图 10 叶轮整体模型前处理

本研究设置分层厚度  $0.1 \text{ mm}$ ,将叶轮整体模型进行分层处理,再导入激光快速成型机,设置工艺参数并直接 3D 打印成形,将打印完成后得到的树脂叶轮依次进行清洗、去除支撑、后固化、表面打磨等后处理工序。

完成后处理后的树脂叶轮如图 11 所示。

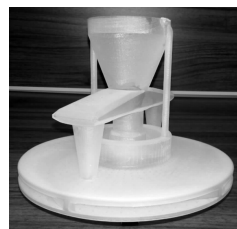


图 11 完成后处理后的树脂叶轮

### 4 熔模精密铸造实验

在闭式叶轮及其浇注系统整体模型 3D 打印成形的基础上,本研究将所制得的树脂叶轮代替传统蜡模作为熔模进行熔模精密铸造实验。

(1) 首先进行制壳工序。

本研究以硅溶胶为浆料,先在树脂叶轮表面均匀敷上面层浆,然后将该树脂叶轮伸入淋砂机中多方向翻

转,使其表面均匀覆盖一层锆英砂作为面层砂,并放到干燥间进行干燥。待面层砂完全干燥后,吹去表面浮砂,涂第二层过渡层浆,放入浮砂桶中敷莫来砂作为过渡层砂,并进行干燥。依此方法分别依次制作第三、第四、第五层型壳,最后为了加强模壳强度并防止外层掉砂现象,在第五层型壳干燥后进行封浆处理,只涂浆而不敷砂,待封浆层干燥后型壳制作完成。

(2)完成制壳后进行焙烧浇注工序。

本研究清理干净型壳浇口杯边缘,并将型壳浇口杯向下装入高温焙烧炉中进行高温脱树脂如图 12 所示。



图 12 高温焙烧脱树脂

待焙烧完成后,型壳内部树脂叶轮已烧蚀气化消失,型壳内部完全为内部中空结构,通过直接叉出型壳浇注熔融金属液,待其冷却后即得闭式叶轮铸件及其型壳。

本研究将包覆着型壳的叶轮铸件放到震壳机上进行震动脱壳,使铸件表面型壳基本清除干净,但是一些沟槽、深孔等表面还存留有少量残壳。

(3)最后本研究采用火焰切割机切除浇注系统,并对叶轮铸件表面进行喷砂处理,以进一步清除残壳并提高表面质量。

最终制得闭式离心泵叶轮金属铸件如图 13 所示。



图 13 闭式叶轮金属铸件

## 5 铸件精度测量

现笔者针对本研究的“基于 Procast 及 3D 打印技术的快速精铸技术”具体可以达到的尺寸精度及表面粗糙度进行检验。首先本研究测量该闭式叶轮铸件的尺寸精度,通过选择闭式叶轮模型 4 个具有代表性且

便于测量的尺寸进行测量。

尺寸测量示意图如图 14 所示。

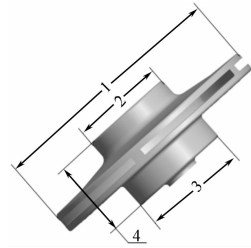


图 14 闭式叶轮尺寸测量示意图

尺寸测量结果如表 1 所示。此处闭式离心泵叶轮铸件的理论尺寸按照数据模型尺寸乘以综合收缩率 98.83% 计算确定,尺寸精度等级按国际通用的熔模铸件尺寸公差等级计算。

表 1 闭式叶轮铸件尺寸测量结果

序号	理论值/mm	实测值/mm	绝对误差/mm	尺寸精度等级
1	φ160	φ159.68	-0.32	CT4
2	φ61.59	φ61.78	+0.19	CT4
3	φ68.16	φ68.38	+0.22	CT4
4	52.23	52.08	-0.05	CT4

由表 1 可知,闭式离心泵叶轮铸件的绝对尺寸误差范围为  $-0.32 \text{ mm} \sim +0.22 \text{ mm}$ ,且其尺寸精度等级达到了 CT4 级尺寸公差。

再测量闭式离心泵叶轮铸件的表面粗糙度。本研究在叶轮铸件表面分别随机选择均匀布置的 10 个点进行表面粗糙度测量。

粗糙度测量结果如表 2 所示。

表 2 闭式叶轮铸件表面粗糙度测量结果

序号	1	2	3	4	5
实测值/ $\mu\text{m}$	2.98	4.56	3.24	3.62	4.58
序号	6	7	8	9	10
实测值/ $\mu\text{m}$	6.20	3.59	4.24	2.96	3.94

由表 2 可知,闭式离心泵叶轮铸件的表面粗糙度范围为  $2.96 \mu\text{m} \sim 6.20 \mu\text{m}$ ,说明表面粗糙度可达  $Ra$   $6.3 \mu\text{m}$  以下。

## 6 结束语

笔者以具有复杂内部空腔结构的闭式离心泵叶轮为研究对象,研究了一种基于 ProCAST 及 3D 打印技术的闭式叶轮快速铸造技术,其成功地将有限元铸造模拟软件 ProCAST 以及先进的 3D 打印技术与传统的熔

(下转第 1191 页)

本文引用格式:

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):1166-1169,1191.

JIANG Yao-lin, HE Chao-hui, SHAO Zhong-kui. Rapid casting of enclosed impeller based on ProCAST and 3D printing technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(9):1166-1169,1191.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>