开式叶轮倒置式铸造工艺研究

杨文亮,洪海春,苏容超,王志冰,邵春艳,王凯强,刘 瑜

(北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京100083)

摘要:对开式叶轮正立式和倒置式两种浇注工艺的工艺可行性进行了模拟验证,并对模拟过 程中铸件的充型过程、凝固顺序、缺陷倾向进行了系统的对比分析,验证了倒置式叶轮快速 铸造工艺在缺陷预防上的优越性。采用砂型3D打印快速成形工艺对叶轮的砂型模具进行快速 成形,浇注后对铸件进行精度扫描分析和解剖分析,结果表明:在铸件精度方面,采用倒置 式叶轮快速铸造工艺得到的铸件表面尺寸精度在±0.6 mm以内,可达到CT8级,在缺陷预防 方面,采用倒置式叶轮快速铸造工艺得到的铸件内部无明显铸造缺陷,而正立式铸造工艺得 到的铸件厚大部位产生明显的缩孔、缩松。

关键词:正立式;倒置式;充型过程;凝固顺序;缺陷倾向;砂型3D打印快速成形工艺

开式叶轮作为典型的复杂零部件,由于长期处于高压、高温等水流或气流的环境下,叶轮极易出现腐蚀、疲劳断裂等问题,鉴于此,叶轮在生产过程中尤其是铸造环节,不允许出现热裂、缩孔、缩松等铸造缺陷。同时为了进一步增加叶轮的导流效果,叶片必须具备较高的表面质量及尺寸精度^[1-2]。

传统的开式叶轮的铸造过程多采用多砂芯拼装的组芯工艺,每个叶片至少需要 两个砂芯组合^[3-5],该工艺对砂型生产的一致性,精度、工人的作业水平等均提出了 较高的要求。在新产品验证环节,采用传统的组芯工艺首先要制备金属模具,该过 程周期长、成本高、柔性差、不利于新产品快速迭代的需求,且组芯工艺制备的砂 型存在大量坯缝,产品浇注完成后需经过打磨等后处理,才能得到最终的产品,该 过程存在一定的精度损失^[6-7]。砂型3D打印技术作为一种新型的快速成形技术,具有 复杂结构一体成形的优势,目前已在高端复杂铸件一体成形工艺上有着广泛应用^[8-9]。

针对开式叶轮铸件的性能要求及现有生产过程中存在的问题,本文将从优化铸造工艺的角度出发,研究降低叶轮铸造过程中缺陷倾向的铸造工艺设计方法,并利用3D打印快速成形技术制备砂型,研究一体成形的砂型在提高叶片表面质量及精度要求等方面的技术优势。

1 铸造工艺设计

目前,典型的叶轮成形工艺为正立式浇注工艺,即叶轮的进气侧朝上,出气侧 朝下,但由于开式叶轮出气侧较为厚大,铸件凝固过程中不利于连续性的补缩^[10-11]。 为了弥补正立式浇注的问题,本文采用倒置式开式叶轮浇注成形工艺,并对两种浇 注工艺进行铸造过程模拟分析对比。通过对浇注后的铸件进行尺寸精度扫描及解剖 分析,验证倒置式浇注系统的工艺可行性。本文研究的叶轮结构如图1所示。叶轮材 料为QT450,叶片厚度为4 mm,属于典型的薄壁结构,中间部分厚大。

两种浇注工艺均采用底注式浇注工艺,封闭式浇注系统设计,两种浇注系统采 用相同尺寸的横浇道、直浇道和内浇道。为了增加系统的补缩效果,将缩孔和缩松 的倾向引入到冒口中,因此均在浇注系统的顶部设置了大的补缩冒口,两种浇注系 统及补缩设计如图2所示。

作者简介: 杨文亮(1986-),男,硕士, 工程师,主要研究方向为 砂型 3D 打印成形工艺。电 话: 18363696885,E-mail: 18363696885@163.com

中图分类号:TG24 文献标识码:A 文章编号:1001-4977(2023) 01-0072-05

基金项目:

国家重点研发计划资助 (2016YFB1101800)。 收稿日期: 2021-05-17收到初稿, 2022-05-14收到修订稿。



(a)正立式浇注系统
(b)倒置式浇注系统
图2 浇注系统及补缩设计三维图
Fig. 2 Three-dimensional diagram of the design of the gating and feeding system

2 砂型制备

砂型采用设备如图3所示。3D打印铸件砂型因为是 一体成形,故浇注的铸件精度高,坯缝少,易清理, 适用于新产品开发和复杂单件生产。打印工艺的设计 更改只需要更改三维模型,可以实现铸造工艺的快速 迭代优化。



图3 高效数字化砂型打印精密成形机 Fig. 3 High efficiency machine for the sand mold 3D printing

铸型材料选用硅砂,砂型模具的打印层厚为0.5mm, 呋喃树脂的加入量为砂子质量的2.5%,固化剂的加入 量为树脂质量的15%,经试块测试,打印砂型的抗拉 强度在1.5 MPa左右,发气量为9 mL/g。打印出的砂 型模具经扫描及精度检验,整体精度分布在±0.2 mm 以内,满足浇注要求,砂型精度扫描结果如图4所 示。



图4 砂型精度扫描结果 Fig. 4 Scanning results of the precision of the sand mold

3 铸造过程模拟分析

采用铸造模拟软件对正立式及倒置式两种浇注工 艺进行浇注过程模拟,铸件的浇注温度为1 420 ℃, 浇注时间为13 s,铸造材料选择QT450(模拟时选 用近似的FCD450代替)。打印呋喃树脂砂型热交换 系数砂型-空气设置为 $0.001 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \mathbb{C})$,砂型-金属设置为 $0.1 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \mathbb{C})$,其他参数如表1所示。

表1 模拟分析参数设置表 Table 1 Setting table of parameters of the simulation analysis

铸型	铸件	初始	金属液充型速	收缩率	分析
材料	材料	温度/℃	度/ (cm・s ⁻¹)	/%	方法
Cold box	FCD450	0 25	70	1.2	充型分析及充型前后
					的热/凝固过程分析

3.1 充型过程模拟分析

首先对浇注过程中两种方案的充型过程进行模 拟分析,正立式浇注系统与倒置式浇注系统的充型过 程如图5所示。通过模拟结果可知,两种浇注工艺均 能保证叶轮较好的充型,由于采用了底注式的浇注工 艺,两种充型过程平稳,无明显的浇不足、冷隔等缺 陷。

3.2 凝固过程模拟分析

对两种浇注系统的凝固过程进行模拟,铸件凝固 模拟结果如图6所示,正立式浇注工艺,由于进气口直 径较小,在凝固过程中率先凝固,在补缩冒口和出气 口芯部产生固相区,阻隔了冒口的补缩通道,在出 气口芯部区域产生孤立的液相区域,不利于叶轮的 出气口芯部的补缩;而倒置式浇注系统由于出气口 在上,可以通过增大冒口的方式起到较好的补缩效 果,将孤立液相区转移至冒口部分,降低铸件的缺 陷倾向。

3.3 铸件缺陷倾向模拟分析

采用概率缺陷法对浇注过程中的铸件缺陷概率进 行了模拟分析,正立式浇注工艺由于补缩受阻,存在 孤立液相区,故在叶轮出气口芯部的区域产生较大的 缩孔、缩松缺陷倾向,而倒置式浇注工艺浇注过程中 铸件实现了自下而上的顺序凝固,凝固过程中不存在 孤立液相区,且由于设置了大的补缩冒口,将最后凝 固区域转移至冒口内,铸件本体无明显的缺陷倾向区



(a)正立式浇注系统



(b) 倒置式浇注系统

图5 充型过程模拟结果 Fig. 5 Simulation results of the mold filling process



Fig. 6 Simulation analysis results of the isolated liquid phase during solidification process

域(图7)。

3.4 铸件精度及缺陷分析

对两种铸造工艺获得砂型进行同时浇注,浇注温 度为1 420 ℃, 浇注时间为13 s, 铸造材料选择QT450, 通过对倒置式铸造工艺获得铸件进行外观检查及三维 扫描分析,叶片表面光滑,无坯缝,叶轮整体的精度 在±0.6 mm内,铸件精度可达到CT8级,结果如图8所 示。

对两种铸造工艺获得铸件进行解剖,解剖位置选 取叶轮转动轴线所在的平面,经分析,倒置式铸造工 艺获得铸件内部光滑、平整,无明显缩孔、缩松等铸



(b) 倒置式浇注系统概率缺陷分析

图7 铸件缺陷倾向模拟分析结果 Fig. 7 Simulation analysis results of the casting defects tendency



图8 铸件外观口精度扫描结果 Fig. 8 Scanning results of the casting appearance and precision



(b) 正立式铸造工艺铸件解剖截面 图9 铸件解剖结果分析 Fig. 9 Analysis results of the casting dissection

造缺陷,如图9a所示,而采用正立式铸造工艺获得的 铸件内部出气端厚大部位有明显的缩孔产生,与模拟 结果一致,如图9b所示。

结论 4

(1)通过对叶轮正立式与倒置式两种不同的浇注 工艺的模拟分析对比,开放式叶轮倒置式浇注工艺更 有利于将缺陷倾向转移至冒口,降低叶轮本体的缺陷 倾向,更好地提高了叶轮的铸造质量。

(2) 砂型3D打印模具浇注出的叶轮无坯缝,外观 精度可达到CT8级,且无需制造金属模具或木模,效率 高,其成本可大幅度降低。

参考文献:

- [1] 赵颖烈. 3D打印砂型在叶轮体铸件开发中的应用 [J]. 铸造工程, 2020, 44 (5): 44-46.
- [2] UTELA B, STORTI D, ANDERSON R, et al. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP) [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2008, 10 (2): 96–104.
- [3] 何志军. TiB₂/Al叶轮铸件熔模铸造与数值模拟研究 [D]. 江苏:江苏大学,2016.
- [4] 李峰,郑福生,王刚,等.基于ProCAST的叶轮熔模铸造凝固过程数值模拟[J].热加工工艺,2013,42(7):55-57.
- [5] 杨大春. 不锈钢叶轮一模两型立置浇注熔模铸造工艺 [J]. 铸造技术, 2007 (1): 155-156.
- [6] LI Xinya, SHAN Zhongde, LIU Feng, et al. Rapid patternless casting technology on CNC manufacturing [C] // Chinese Mechanical Engineering Society.Proceedings of 69th World Foundry Congress, Zhejiang, China, 2010.
- [7] 刘丽敏,单忠德,杨颜绮,等.优质高效砂型/芯复合成形工艺研究[J].铸造技术,2019,40(12):1281-1285.
- [8] 顾兆现. 铸件快速复合成形制造工艺研究 [D]. 北京:机械科学研究总院, 2012.
- [9] 刘丽敏,单忠德,刘丰,等. 基于多材质复合铸型的铸铁件铸造工艺数值模拟与试验研究 [J]. 铸造,2018, 67(11): 955–960.
- [10] 王寿彭. 铸件形成理论及工艺基础 [M]. 西安:西北工业大学出版社,1994.
- [11] 单忠德. 无模铸造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

Research on Upside-Down Type Casting Process of Open Impeller

YANG Wen-liang, HONG Hai-chun, SU Rong-chao, WANG Zhi-bing, SHAO Chun-yan, WANG Kai-qiang, LIU Yu

(Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract:

Upside type and upside-down type impeller pouring processes were simulated to verify the feasibility of the open impeller casting process, and in the process of simulation, filling process, solidification sequence, defect tendency were compared and analyzed, and the advantages of inverted impeller rapid casting process in defect prevention were verified. The sand mold 3D printing rapid prototyping process was adopted to carry out rapid prototyping of the sand mold of the impeller, and the precision scanning analysis and anatomical analysis of the casting were carried out after pouring. The results showed that in terms of casting accuracy, the surface dimensional accuracy of the castings obtained by the upside-down type impeller rapid casting process was within ± 0.6 mm, which reached CT8 level. In terms of defect prevention, there are no obvious casting defects in the castings obtained by the upside-down type impeller rapid casting process, while the thick parts of the castings obtained by the upside obvious shrinkage and porosity.

Key words: upside type; upside-down type; filling process; solidification sequence; defect tendency; sand mold 3D printing rapid prototyping technology