

窄流道叶轮 3D 打印砂型铸造生产实践

赵 提, 杨永辉, 张焕祥, 苗嘉华

(洛阳易普特智能科技有限公司, 河南洛阳 471000)

摘要: 介绍了采用3D打印砂型技术生产窄流道叶轮的铸造过程。原砂使用100/140目硅砂, 采用流涂方式涂刷砂型内腔, 采用立浇方式成形铸件。经生产实践验证, 铸件表面质量和尺寸精度满足验收技术条件要求。

关键词: 3DP砂型; 窄流道叶轮; 铸造

3D打印砂型技术是一种主要基于微滴喷射成形的快速成形技术, 依靠打印设备铺砂功能, 通过原砂与固化剂的均匀搅拌, 树脂粘结剂的按需喷射以及成形砂型(芯)的清理等工序, 当喷射的树脂粘结剂遇到预混了固化剂的型砂后使砂粒粘结固化成所需砂型(芯)。这项技术采用了数字化虚拟制造的方式, 无需模具, 可以直接打印制造出结构复杂的砂型砂芯, 能够避免人为组芯过程造成的尺寸累积误差, 提高铸型的尺寸精度, 改善因铸型尺寸不符造成的铸件尺寸超差问题。

随着该技术尤其是3D打印砂型设备的推广应用, 在设计端为工程师带来了无限的选择, 以改进产品的设计。与传统的铸造方法相比, 通过3D打印砂型, 节省了大量模具投入, 可以快速、低成本地制造出高质量、内腔复杂的铸件。不仅解决了模具整体无法出芯的问题, 同时拓宽了研发设计人员思路, 降低数模生产准备时间, 使现有的设计工具能够快速更新, 使企业能够承受得起数模更加频繁的更换和改善, 跟得上新产品设计周期的步伐, 提高灵活性和适应性^[1-2]。

1 叶轮铸件技术要求

叶轮的结构设计要求具有良好的流体动力学性能、强度和韧性的平衡、几何形状优化等特性, 以实现高效能、低噪音、低损耗等目标。叶轮制造工艺要求材料质量稳定可靠、精密加工、严格控制工艺和精度, 以保证叶轮的精密度和表面粗糙度。

首次开发的叶轮铸件如图1所示, 材质HT250, 毛坯重量16 kg, 最大外圆直径339 mm, 高度96 mm, 叶片最小壁厚只有2 mm, 盖板壁厚5 mm, 出水口宽度(6 ± 0.2) mm。铸件过流部位尺寸公差不低于CT9级, 铸件不允许有冷隔、粘砂、裂纹、气孔、夹渣、缩孔等铸造缺陷。



图1 叶轮铸件图

Fig. 1 Drawing of impeller casting

2 铸造工艺方案

此类窄流道叶轮的出水口宽度通常在4~8 mm范围内, 叶轮直径大于300 mm。其特点为幅面大, 砂芯结构薄弱, 有砂芯强度低、溃散性差和排气难等不良因素, 因此容易产生砂芯变形甚至断裂导致的偏芯、夹砂和气孔等铸造缺陷, 铸造难度很大。在铸造工艺设计前, 对铸件进行壁厚分析, 结果如图2所示。

根据该铸件的结构特点, 试制过程采用2种不同的工艺方案(A和B)。方案A的

作者简介:

赵提(1970-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事铸造、3D打印砂型相关工作。电话: 18611330022, E-mail: zhaoti@ept3d.com

中图分类号: TG251

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

01-0115-04

收稿日期:

2023-09-18 收到初稿,

2023-12-26 收到修订稿。

铸造工艺设计原则为：采用阶梯式浇注方式，底部注入保证铁液的平稳充型，同时顶部开设浇口便于薄壁盖板的成形，采用溢流及补缩冒口，便于排气及补缩，并且

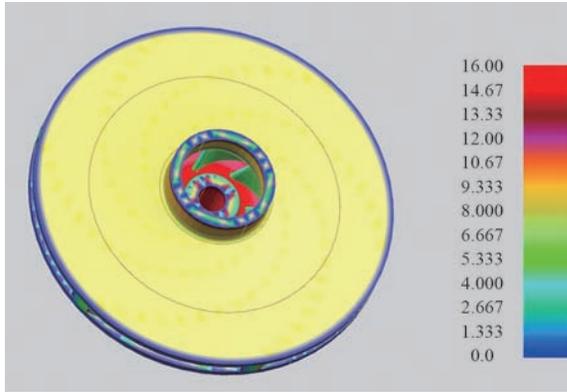


图2 铸件壁厚分析

Fig. 2 Analysis of casting wall thickness

在叶片与盖板连接部位放置出气片。铸造工艺设计如图3所示。方案A的充型过程数值模拟结果见图4。通过充型过程预测最后区域填充完成后模具内空气压力的分布，用以观察形成卷气的风险区域。

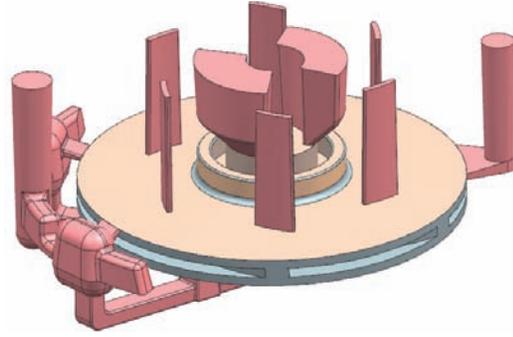


图3 铸造工艺图（方案A）

Fig. 3 Drawing of casting process (Plan A)

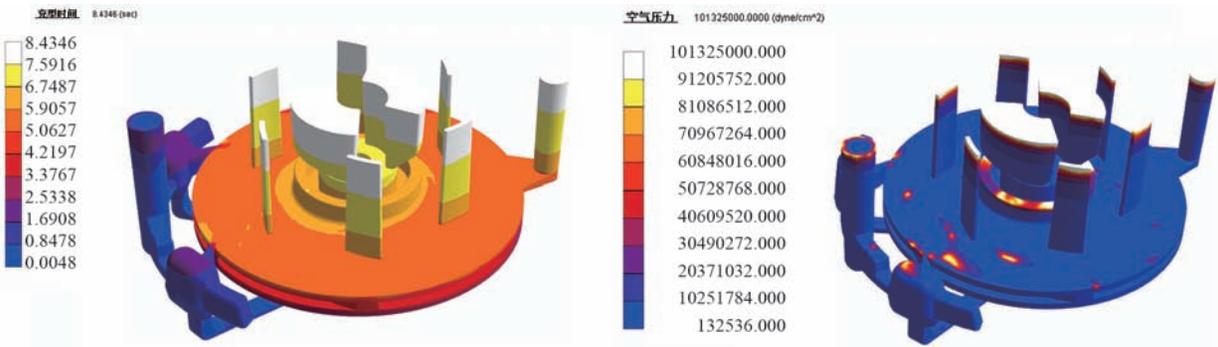


图4 充型过程模拟（方案A）

Fig. 4 Numerical simulation of mold filling process (Plan A)

方案B的铸造工艺设计原则为：优化整体铸造过程的排气，采用立浇的工艺，将叶轮盖板竖直放置，从两侧盖板中间注入，设计封闭式浇注系统，保证铁液的快速平稳充型，尤其是叶片薄壁位置的成形，在铸件顶部开设溢流冒口，便于排气及补缩^[3]。铸造工艺设计如图5所示。方案B的充型过程数值模拟结果见图6。

3 3D打印砂型方案

该铸件毛坯材质为HT250，砂型采用呋喃树脂+固化剂+100/140目硅砂制备，SiO₂含量在98%以上，设备选择S2000型砂型3D打印机，最大成形尺寸为2 000 mm × 1 000 mm × 800 mm。砂型主要性能：拉伸强度1.4~1.9 MPa，发气量低于12 mL/g。

方案A为上下结构，如图7所示，砂型定位采用的是环形凸台防火槽，在内圆孔处设置砂芯出气孔。3D打印砂型精度高、间隙小，可以保证合型精度及稳定性。每块砂型都有设计的扣手方便合箱搬运，以方便

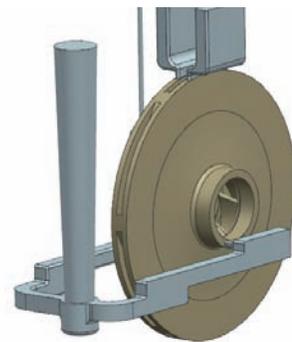


图5 铸造工艺图（方案B）

Fig. 5 Drawing of casting process (Plan B)

清砂、刷涂料及运输合箱为原则设计砂型。

方案B为平做立浇结构，如图8所示两侧为盖板侧壁芯，中间为叶片砂芯，砂芯中心圆位置开设出气孔，与侧壁联通，顶部开设排气孔，直接与大气联通。使用3D打印砂模铸造，可以实现叶轮流道砂芯整

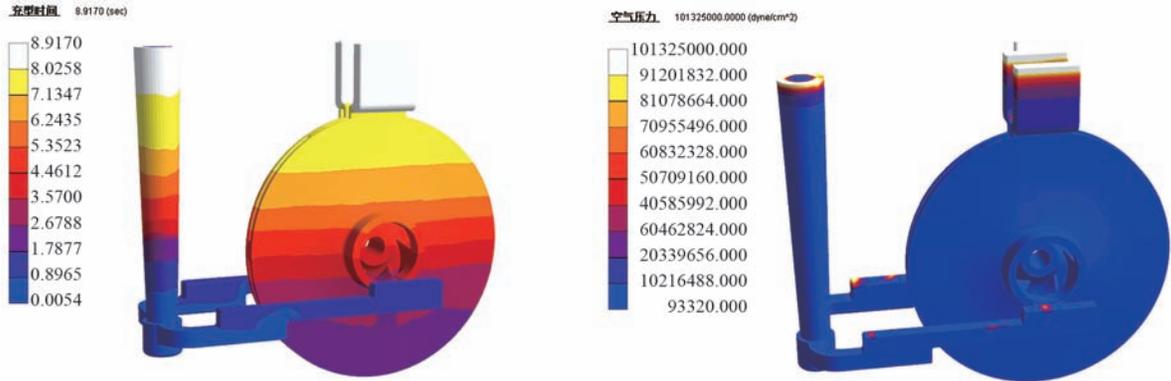


图6 充型过程数值模拟(方案B)

Fig. 6 Numerical simulation of mold filling process (Plan B)



图7 砂型示意图(方案A)

Fig. 7 Schematic diagram of sand mold (Plan A)

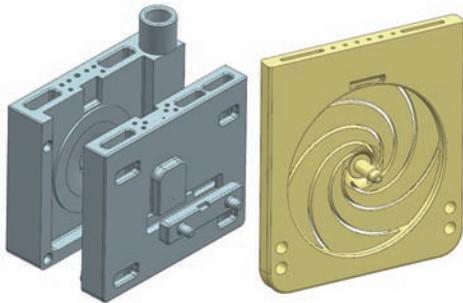


图8 砂型示意图(方案B)

Fig. 8 Schematic diagram of sand mold (Plan B)

体打印,砂型尺寸精度可控制在 ± 0.2 mm以内,从而大幅提高铸件的尺寸精度。合型后在分型面四周用封箱膏密封,然后使用专用的工装固定。

涂料:采用流涂的方式,以获得较好的表面质量。叶轮流道是其最重要的工作面,在施涂过程中,通过波美计、梳式湿膜厚度测距仪,控制涂层厚度在0.15~0.25 mm范围内。此外,为减小铸件粘砂倾向,采用水基复合涂料进行流涂,然后放入烘干窑内,温度设定在100~130℃范围内,烘干时间2~3 h。

4 铸件生产验证

方案A砂型放置压铁,方案B使用工装在两侧夹紧。考虑铸件薄壁的特点,铁液出炉温度不低于1 500℃,

浇注温度均要求 $1\ 430\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$,浇注时间8 s左右。图9、图10为清整后铸件毛坯图,其中,方案A铸件因气孔、偏芯、夹砂缺陷报废。



图9 落砂后的铸件(方案A)

Fig. 9 Casting after shakeout (Plan A)



图10 落砂后的铸件(方案B)

Fig. 10 Casting after shakeout (Plan B)

方案B铸件表面无明显粘砂、气孔、浇不足等铸造缺陷,表面质量良好。浇冒口切割、打磨、抛丸处理后进行尺寸测量与检验,铸件尺寸公差等级达到了CT9级。图11为打磨抛丸清理后带有部分披缝的铸件毛坯图(方案B),尺寸检验合格。通过表面粗糙度测量



图11 打磨抛丸后的铸件(方案B)
Fig. 11 Casting after grinding and blasting (Plan B)

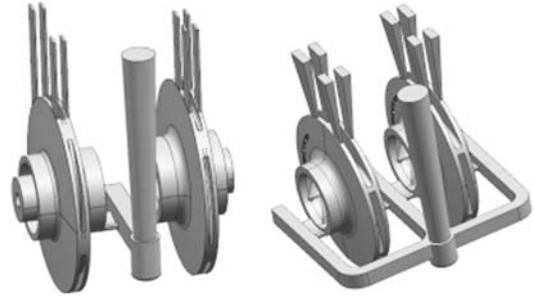


图12 改进的铸造工艺图
Fig. 12 Drawings of improved casting method

仪,检测内腔流道表面粗糙度 Ra 约18~22 μm ,满足铸件验收技术条件。

通过2种铸造工艺对比发现:在生产窄流道叶轮时,通常采用的平浇工艺,无法解决叶片砂芯偏薄而导致的强度低、排气难等问题,浇注后容易产生砂芯拱胀、断裂造成铸件偏芯、夹砂缺陷,或是气孔等造成铸件浇不足^[4]。因此,在后续多种型号的窄流道叶轮铸件开发过程中,采用3D打印砂型和立浇工艺,经过验证,铸件无铸造缺陷,保证铸件快速交付,缩短了客户的研发周期,减少了模具投入。为提高生产效率,改进后的铸造工艺按1型2件设计,见图12。

采用普通砂型铸造工艺研发该型号窄流道叶轮,按照投入两个铸件生产计算,模具费用2万,模具生产周期22天,造型、制芯、组芯需要3~5天,而使用3D打印砂型,费用仅需3000元左右,从设计到铸件交付仅7天。

参考文献:

- [1] 韩霞. 快速成型技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] 谭睿, 尹绍奎, 姜延春, 等. 砂型喷墨打印用呋喃树脂的制备工艺与性能研究 [J]. 铸造, 2021, 70(10): 1217-1221.
- [3] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [4] 施廷藻. 铸造实用手册 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1988.

5 结论

(1) 3D打印砂型和整体叶片砂芯,相比较传统模具铸造方法而言,提高了产品质量,大幅度提高了叶轮的尺寸精度,降低流道粗糙度,改善了实际流体通道,流道尺寸精度可控制在 $\pm 0.2\text{ mm}$ 以内。

(2) 采用立浇工艺,可以铸造出水口宽度在4~8 mm之间的窄流道叶轮,这种工艺设计为终端产品增加了更多的功能性和可行性。相比常规的铸造方法,立浇工艺解决了薄叶片砂芯的排气问题,减少了砂芯强度低从而容易断裂的影响,满足复杂叶轮铸件的高质量需求,可实现2 mm壁厚叶片的良好充型。

(3) 采用3D打印砂型的工艺方法,降低了窄流道叶轮铸造过程造型、制芯难度,实现了复杂结构铸件快速制造,可实施性好,产生极少的废料,单件小批量生产时,具有明显的成本和效率优势。

Production Practice of 3D Printing Sand Casting for Narrow Channel Impeller

ZHAO Ti, YANG Yong-hui, ZHANG Huan-xiang, MIAO Jia-hua
(Luoyang Easy 3D Printing Technologies Co., Ltd., Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract:

The casting process of narrow channel impeller produced by 3D printing sand mold technology is introduced. The original sand is 100/140 mesh silica sand, the flow coating method is used to coat internal surface of the sand mold, and the vertical casting method is used to form the impeller casting. Through production practice verification, the surface quality and dimension accuracy of the castings met the requirements of acceptance specifications.

Key words:

3D printing sand mold; narrow channel impeller; casting