

# 铝合金闭式叶轮工艺设计及快速铸造

吕三雷, 司金梅, 王建军, 李晶晶

(河南平原光电科技有限公司, 河南 焦作 454001)

**摘要:** 提出一种基于数值模拟和 3DP 砂型的铝合金闭式叶轮铸造工艺。采用数值模拟软件比较两种工艺的充型、凝固过程, 并优化工艺设计, 采用 3DP 砂型铸造工艺完成了铸件的试制。对铸件尺寸进行激光扫描, 对铸件内部质量进行 X 光检测。结果表明, 铸造出了符合标准的铝合金叶轮铸件, 实现了快速铸造。

**关键词:** 闭式叶轮; 数值模拟; 3DP 砂型; 内部质量

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)09-0801-04

## Process Design and Rapid Casting of Aluminum Closed Impeller

LYU Sanlei, SI Jinmei, WANG Jianjun, LI Jingjing

(Henan Pingyuan Optical and Electrical Technology Co., Ltd., Jiaozuo 454001, China)

**Abstract:** A closed impeller casting process for aluminum alloy based on numerical simulation and 3DP sand mold was proposed. The filling and solidification processes of the two processes were compared by numerical simulation software, and the process design was optimized. The 3DP sand casting process was used to produce the castings. The size of the casting was scanned by laser and the internal quality of the casting was detected by X ray. The results show that the standard aluminum alloy impeller castings are cast and rapid casting is realized.

**Key words:** enclosed impeller; simulation; 3DPrinted; internal quality

铝合金闭式叶轮具有复杂的内部结构, 对内部质量要求较高, 尤其对传递动力过程中起能量转换关键作用的叶片的内部质量要求高<sup>[1-5]</sup>。因为, 铸造工艺应保证叶片充型平稳, 内部质量良好。目前国内主要采用熔模精密铸造工艺方法进行试制、生产, 但周期长、成本高, 无法适应快速多变的市场需求<sup>[6]</sup>。本文作者提出一种基于数值模拟和 3DP 砂型的铝合金闭式叶轮铸造工艺, 数值模拟能提前预判工艺合理性及缺陷产生位置, 节省工艺试制时间; 3DP 砂型无需制造模具, 可缩短试制周期, 克服复

杂内腔结构<sup>[7]</sup>, 因此特别适合多品种、小批量铸件的工艺试制和快速铸造。

## 1 叶轮结构与工艺设计

铝合金闭式叶轮铸件, 材料 ZL101A GB/T1173-2013, 最大外形尺寸  $\phi 405 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$ , 重 11.3 kg, 最大壁厚为 20 mm, 6 片叶片厚度为 3~5 mm, 呈异形结构围绕中心轴均布于前、后盖板之间, 铸件外形加工, 叶片不加工, 其三维结构见图 1。要求铸件无裂纹、冷隔、缩松等缺陷, 内部质量符合 GB/T9438-2013

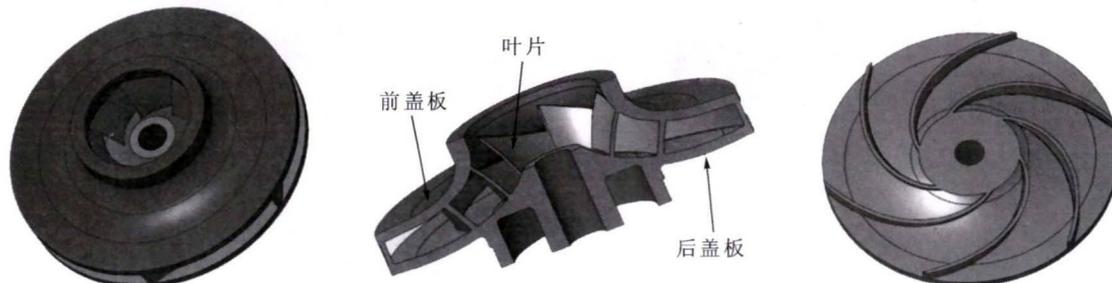


图 1 叶轮三维结构

Fig.1 The three-dimensional structure of closed impeller

收稿日期: 2021-08-02

作者简介: 吕三雷(1970—), 河南沁阳人, 高级工程师, 兵器集团关键技能带头人。主要从事铸造工艺及数字化仿真方面的工作。电话: 13939188695, Email: 13939188695@126.com

II类, 叶片尺寸公差符合 GB/T6414-1999 CT7 级。

低压铸造具有充型平稳、铸件在一定的压力下自上而下顺序凝固、内部组织致密的特点, 因此, 更能保证叶轮铸件的内部质量。根据铸件结构, 设计两种工艺方案。方案 I 见图 2, 浇道位于前盖板一侧, 均

布 6 个浇道，浇道宽度与所在位置厚度一致，为 20 mm，后盖板朝上，设置排气孔。



图 2 铸造方案 I，6 个浇口位于前盖板上  
Fig.2 Casting scheme I，6 gates are arranged on front cover

方案 II 见图 3，与方案 I 相反，浇道位于后盖板一侧，外圈上有 6 个浇道均布，浇道宽度与所在位置厚度一致，为 15 mm，内圈两个腰形浇道，宽度为 20 mm，前盖板朝上，设置有排气孔。



图 3 铸造方案 II，6 个浇口位于后盖板上，2 个浇口位于内圈  
Fig.3 Casting scheme II，6 gates are arranged on rear cover，  
and two gates on the inner ring

## 2 数值模拟与优化

采用 ProCAST 模拟软件对两种工艺方案进行

模拟。设置铸件和浇注系统的网格长度为 3，面网格数为 108 314，体网格数为 1 445 331，浇注温度为 720 °C，铸件与砂型换热参数为 500 W/m<sup>2</sup>·K，充型速度 35 mm/s，充型压力为 45 kPa，保压压力为 50 kPa，充型时间为 20 s。

### 2.1 方案 I 模拟分析

方案 I 模拟结果见图 4。4(a)为方案 I 充型 18 s 时示意图，结果显示，在图示区域由于叶片壁厚薄，图示 A 区域壁厚大，铝液由叶片进入后盖板时，充型高度落差大，存在卷气现象，容易形成缺陷；4(b)是 25 s 示意图，结果显示，铸件从叶片中间、前盖板、后盖板边缘开始凝固，浇口对应的前盖板部位温度高，最后凝固，图示区域壁厚大，温度高且没有铝液进行补缩，形成缩松、缩孔缺陷，截面缺陷位置见图 4(c)，整体缺陷分布见图 4(d)。

### 2.2 方案 II 模拟分析

方案 II 模拟结果见图 5。5(a)为方案 II 充型 15 s 时示意图，结果显示，铸件充型时，铝液由叶片进入前盖板时，充型高度落差小，充型相对平稳。5(b)是方案 II 凝固 24 s 凝固示意图，结果显示，铸件从叶片前盖板边缘部位开始凝固，后盖板一侧对应浇道部位，温度较高，后凝固。图示区域温度较高，凝固速度慢且没有铝液进行补缩，容易形成缩松缺陷，见图 5(c)，图 5(d)是缩松、缩孔缺陷分布图。

比较方案 I 与方案 II 模拟结果，方案 I 充型落差相对大，存在卷气风险，缺陷分布的部位壁厚较大，不易放置冷铁；方案 II 充型相对平稳，缺陷分布

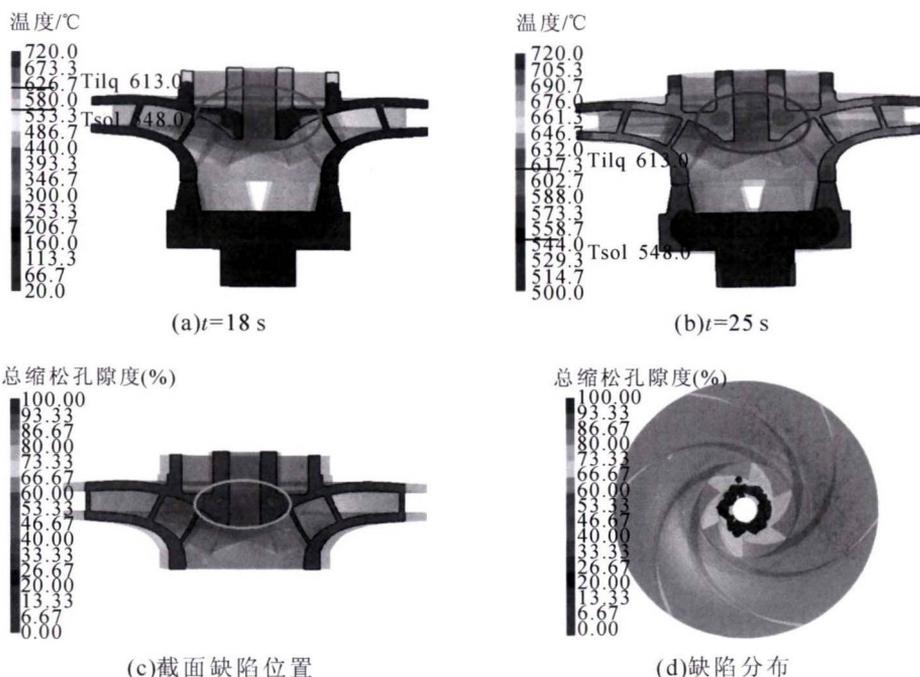


图 4 方案 I 模拟结果  
Fig.4 Simulation results of scheme I

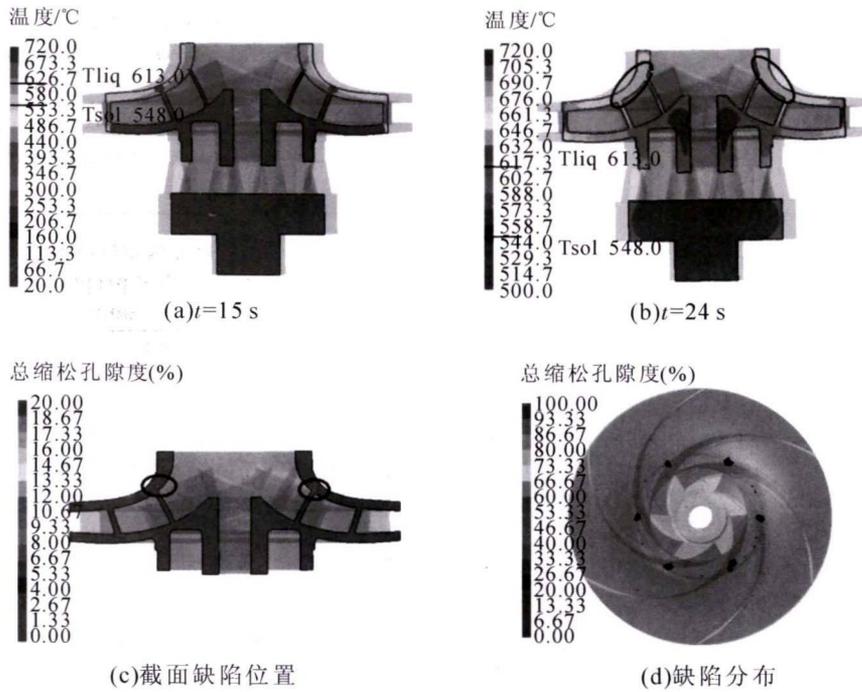


图5 方案II模拟结果

Fig.5 Simulation results of scheme II

的部位厚大,可以放置冷铁增大过冷度进行优化,优化后工艺方见图6。



图6 优化后的铸造方案II,增加了冷铁  
Fig.6 Optimized casting scheme II, chills are added on

图7是方案II优化后模拟结果。图7(a)是25s示意图,与图5(b)相比,可以看出,增加冷铁后,厚大的圆环部位由于过冷度的增加首先凝固,图5(b)出现缺陷的部位,与相邻叶片的温度基本一致,没有出现缩松缺陷。图7(b)是优化后缩松缩孔缺陷分布图,优化后,原缩松缺陷消失,工艺可行。

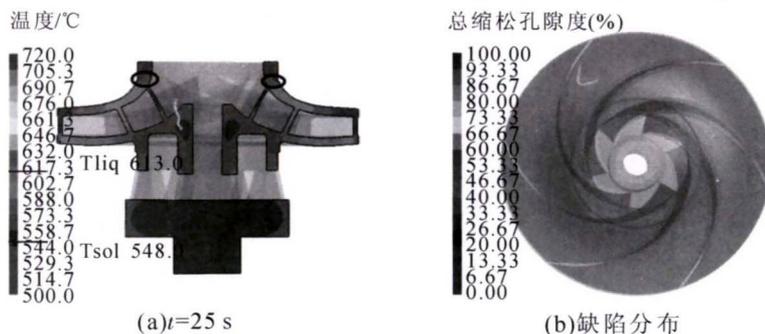


图7 优化后模拟结果

Fig.7 Optimized simulation results

### 3 砂型设计与浇注

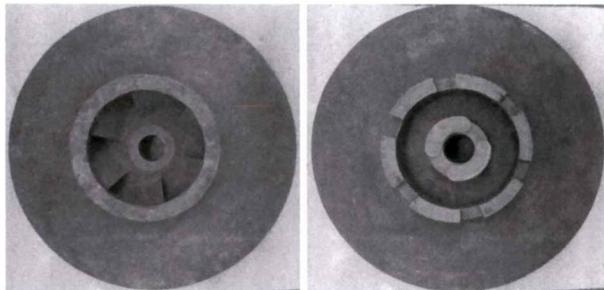
根据优化后方案II设计砂型。砂型共分为3块:上箱、中箱、下箱,砂箱之间通过凸凹子扣进行装配,见图8。为保证叶片形状及尺寸,方便刷涂料,将整个叶片形状设计在中箱;为保证砂型排气通畅,在上箱留排气孔及排气绳安装孔。设计砂型收缩率为1%,配合间隙为0.3mm。砂型上箱预留冷铁位置,后期将烘干后的冷铁通过铸造粘结剂粘在上箱上。

砂型采用3DP方式制造,打印材料为100/200目天然硅砂,打印层厚0.3~0.5mm。打印砂型的强度为大于1.6MPa,发气量小于15mL/g。

将冷铁喷砂后烘干,采用铸造粘结剂粘在上箱,将打印好的砂型表面刷两次涂料并烘干,烘干温度120~140℃,时间4h,最后将砂型合型,等待浇注。将铝合金溶液采用氩气进行精炼,精炼温度为720℃,730℃采用三元变质剂进行变质,变质后调整温度至720℃进行浇注,图9为浇注后的铸件实物。



图8 砂型设计  
Fig.8 The design of sand mold



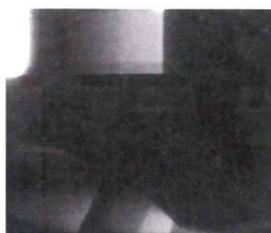
(a)正面 (b)反面

图9 叶轮铸件的正反面照片

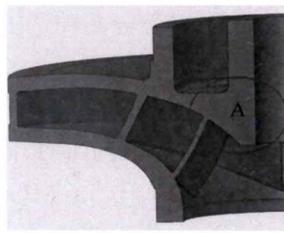
Fig.9 The impeller casting: (a) front view, (b) back view

## 4 结果分析

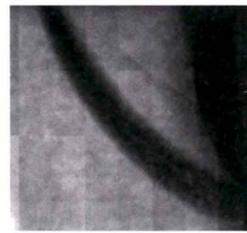
采用光谱分析仪,对铸件随炉试块的化学成分进行分析,结果见表1;采用拉伸试验机对随炉试棒的力学性能进行分析,结果见表2。结果表明铸件的



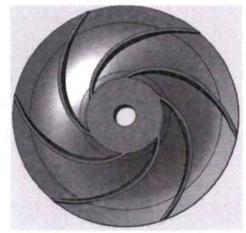
(a)后盖板X光照片



(b)后盖板X光对应位置



(c)叶片X光照片



(d)叶片X光对应位置

图10 X光检测结果

Fig.10 X-ray inspection results

## 5 结论

(1)通过数值模拟软件对不同工艺方案进行虚拟试制,可对浇注系统工艺进行优化。

(2)3DP 砂型叶轮铸件的尺寸精度较好,超出一般砂型铸件的尺寸精度 GB/T6414-1999 CT9, 可达到 GB/T6414-1999 CT7 级。

(3)模拟软件结合 3DP 砂型,可以实现封闭式叶轮铸件的快速铸造。

### 参考文献:

[1] 李志印,郑浩,张军军.多翼封闭式风机叶轮的砂型整体铸造成

表1 随炉试棒的化学成分 w(%)

Tab.1 The chemical composition of test bar from the same melt

元素	Si	Mg	Ti	Fe	Al
标准含量	6.5~7.5	0.25~0.45	0.08~0.20	≤0.2	其余
实际含量	6.83	0.37	0.12	0.15	其余

表2 随炉试棒的力学性能

Tab.2 The mechanical properties of test bar from the same melt

	试棒 1	试棒 2	试棒 3	
抗拉强度 /MPa	298	307	296	≥275
伸长率 (%)	2.5	3.0	2.5	≥2

化学成分、力学性能符合 GB/T1173-2013 的要求。

采用手持式三维扫描仪对铸件尺寸进行激光扫描可知,前盖板尺寸公差平均为 +1 mm,这是由于合型存在间隙造成的;叶片的尺寸公差为 -0.46~-0.23 mm,符合 GB/T6414-1999 CT7 级。

采用实时成像检测系统对铸件进行 X 光射线探伤,结果如图 10。10(a)所示部位对应的铸件部位如图 10(b)所示,在铸件厚大的部位 A 处,没有出现缩松缺陷,其余部位显像均匀,没有缩松、裂纹、气孔等缺陷。10(c)处部位为叶片部位,对应部位如图 10(d)所示,叶片均匀无缺陷,盖板部位无缩松、裂纹、气孔等缺陷。铸件内部质量符合 GB/T9438-2013 II 类铸件要求。

型工艺[J]. 铸造技术,2011,32(2):164-167.  
 [2] 冯爽诚,丁旭,沈刚,等. 铝合金叶轮砂型铸造工艺设计及模拟分析[J]. 铸造技术,2018,39(8):1968-1971.  
 [3] 冯准,郭延艳,孙志,等. 铝合金整体叶轮数控铣削加工研究[J]. 机电一体化,2015,21(1):19-25.  
 [4] 杨小宁,强巍,宋娜,等. 航空离心泵中叶轮诱导轮快速铸造工艺研究[J]. 铸造技术,2018,39(2):312-315.  
 [5] 杨欢庆,孙飞,王琳,等. 铝合金叶轮铸造工艺优化设计[J]. 特种铸造及有色合金,2014,34(6):570-573.  
 [6] 薛旷华. RP 技术在熔模铸造中的应用研究[D]. 无锡:江苏大学机械工程学院,2007.  
 [7] 王忠宏,李扬帆,张曼茵. 中国 3D 打印产业的现状及发展思[J]. 经济纵横,2013(1):90-93.