

# 奥氏体不锈钢蜗壳铸造工艺设计与优化

陶承闯<sup>1</sup>, 赵海涛<sup>2</sup>, 王浩磊<sup>3</sup>, 黄宏军<sup>1</sup>, 袁晓光<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 一汽铸造有限公司采购部, 吉林长春 130011;  
3. 沈阳铸锻工业有限公司, 辽宁沈阳 110142)

**摘要:** 使用UG和ProCAST软件对奥氏体不锈钢蜗壳铸件进行三维建模, 对铸件浇注和凝固过程的温度场进行数值计算, 对铸件缺陷出现的位置进行预测。针对铸件的缺陷进行了铸造工艺方案的优化, 确定了最优的工艺方案: 选取开放式阶梯浇注系统, 可以保证金属液平稳、完整充型; 在容易产生缩孔缩松的位置采用冒口与冷铁配合的方法可以有效补缩。采用优化后的铸造工艺方案生产的铸件质量满足设计要求, 为类似铸件的生产提供了参考。

**关键词:** 奥氏体不锈钢铸件; 蜗壳; 数值模拟; 工艺优化

蜗壳是离心风机的重要组成部分, 其本身的性能及与叶轮的匹配对风机的性能和效率有很大的影响。奥氏体不锈钢蜗壳作为离心式压缩机最重要的元件之一, 它的作用是将离心叶轮中传来的气体集中、导流, 并将其动能转变为压力能<sup>[1-3]</sup>。对于结构复杂、壁厚不均匀的蜗壳件采用整体铸造容易产生变形和铸造缺陷等问题, 如凝固过程容易形成缩孔、缩松等铸造缺陷; 充型不平稳, 挡渣效果不佳, 产生氧化夹杂缺陷。这就要求在铸造工艺方案的设计上不仅要关注对热节部位的补缩, 还要兼顾平稳充型、除渣去气等。本课题采用ProCAST软件对蜗壳的充型、凝固过程进行模拟分析, 优化奥氏体不锈钢蜗壳的铸造工艺, 并通过生产验证。

## 1 铸造工艺设计

蜗壳材质为奥氏体不锈钢ZG06Cr17Ni12Mo2Ti, 铸件重10.5 t。外形尺寸为3 200 mm × 2 500 mm × 1 300 mm, 铸件三维图如图1所示。蜗壳平均壁厚60 mm, 最小壁厚为50 mm, 属大型奥氏体不锈钢蜗壳产品。该铸件横向尺寸跨度相对较大, 壁厚相对较薄, 局部有凸台, 热节比较多, 且分散。浇注时很容易产生浇不足、缩松、缩孔等缺陷; 流道为变径的曲面, 吸入法兰的中心截面与流道中心不是同一平面, 分型面选取困难, 并且砂芯的定位和制作也比较困难。结合工厂生产条件, 选用树脂砂手工造型和制芯。

根据蜗壳铸件的结构特点, 铸件设置2个分型面。分型面一选择在蜗室截面中心, 阻碍起模部位设置活块; 分型面二设置在R 877 mm半圆盘的底面(图2)。

考虑到钢液的体收缩较大, 收缩率选为2.5%, 铸件浇注系统采用开放式, 各单元截面比为:  $\Sigma_{包} : \Sigma_{直} : \Sigma_{横} : \Sigma_{内} = 1 : (1.8-2) : (1.8-2) : (2.0-2.5)$ <sup>[4]</sup>。

## 2 蜗壳铸造工艺模拟与优化

### 2.1 蜗壳铸造工艺模拟分析

首先采用ProCAST的网格划分功能对蜗壳体铸造工艺模型进行网格划分。然后设定计算用铸造工艺参数, ProCAST软件中设置的铸造参数为: 铸件的材质

作者简介:

陶承闯(1994-), 男, 满族, 硕士, 主要研究方向为铸造合金及新材料。E-mail: 15840011506@126.com

通讯作者:

黄宏军, 男, 副教授, 博士, 博士生导师。电话: 024-25496308, E-mail: huanghong1977@163.com

中图分类号: TG242

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

02-0192-06

收稿日期:

2018-07-04 收到初稿,

2018-08-24 收到修订稿。

为奥氏体不锈钢；铸型材质选用树脂砂；铸件与砂箱之间的换热系数为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；铸件的浇注温度为 $1580 \text{ }^\circ\text{C}$ ，充型速度为 $90 \text{ kg/s}$ ，浇注时间为 $130 \text{ s}$ ；热传递方式为空气冷却；设置重力加速度为 $9.8 \text{ m/s}^2$ ；初始砂箱温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，运行参数采用默认设置<sup>[5-7]</sup>。

设计的铸造工艺方案一采用在 $\Phi 1175 \text{ mm}$ 法兰上设置1个明冒口，尺寸为 $180 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 540 \text{ mm}$ ，在 $\Phi 1760 \text{ mm}$ 法兰部位设置6个腰圆型暗冒口，其中1个暗冒口尺寸为 $340 \text{ mm} \times 450 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ，另有5个暗冒口尺寸相同，尺寸为 $280 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$ ；浇注系统采用底注式，设置1个 $\Phi 100 \text{ mm}$ 的直浇道，1个 $\Phi 100 \text{ mm}$ 的横浇道，2个 $\Phi 80 \text{ mm}$ 的内浇道，并采用 $\Phi 50 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的圆柱形随型冷铁若干，放置于加强肋等与蜗壳壁交接形成的局部热节部位（图3）。

采用铸造工艺方案一对蜗壳铸件的充型及凝固过程进行分析。充型过程的状态图如图4所示，可以看出金属液能充满整个型腔。凝固过程状态图如图5所示。由图5a可以看出，经过 $523 \text{ s}$ 冷却后，在蜗壳上下法兰处温度明显高于其他部位，而蜗壳口处冷却速度最快，温度最低，并且蜗壳侧壁处温度分布不均。图5b为经 $3823 \text{ s}$ 冷却凝固状态图，下法兰处温度略高于其他位置，而蜗壳口处温度最低。需要对冒口和冷铁位置、数量等进行调整。

图6为采用铸造工艺方案一获得的蜗壳铸件缺陷预测分布示意图。采用Niyama判据，判据参数为 $13.5\%$ ，铸件各部位出现缩孔缩松概率超过 $13.5\%$ 会显示在模拟结果中。由图6可知，铸件的缩松、缩孔等缺陷主要在冒口、浇注系统、蜗壳铸件底部法兰下壁等处。由此可见，该工艺方案在保证铸件补缩方面还存在问题，还需要进行工艺改进。

### 2.2 蜗壳铸造工艺方案改进

铸造工艺方案一在蜗壳底部法兰处存在较多缩孔、缩松缺陷，说明底部法兰处存在补缩不足问题，

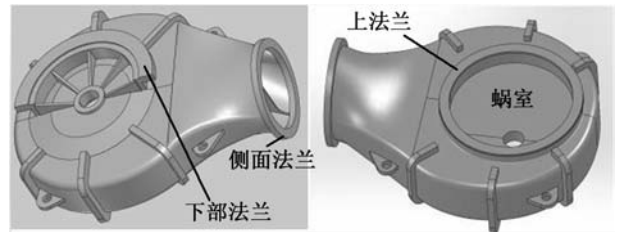


图1 铸件三维图

Fig. 1 Three dimensional drawing of volute castings

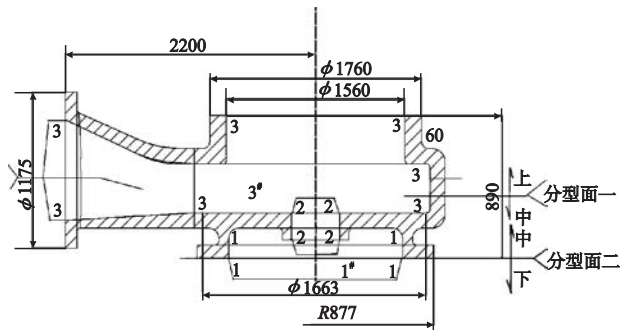


图2 铸件分型示意图

Fig. 2 The mold parting of casting

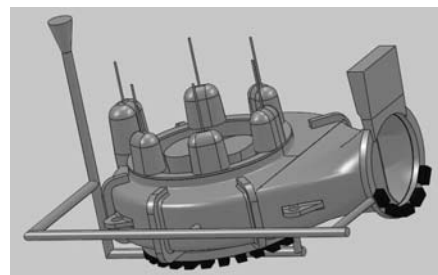


图3 铸造工艺图

Fig. 3 The process of casting

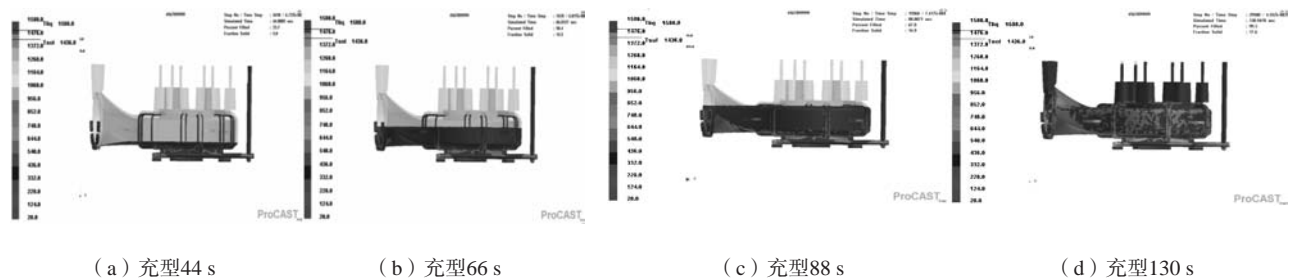
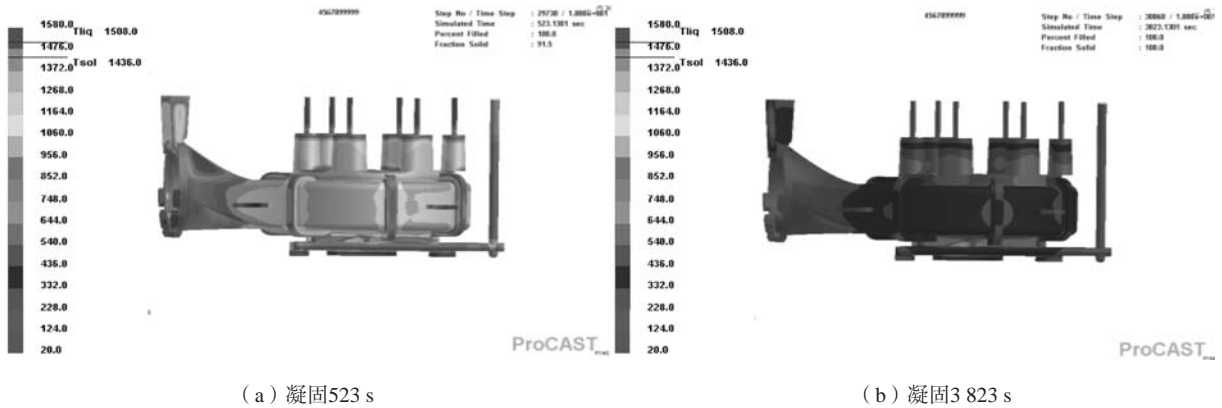


图4 工艺方案一充型状态图

Fig. 4 Mold-filling state of scheme 1



(a) 凝固523 s

(b) 凝固3 823 s

图5 工艺方案一铸件凝固状态

Fig. 5 Melt solidification simulation of scheme 1

需增加冒口以消除缺陷。考虑在蜗壳底端法兰和蜗壳侧壁等位置出现的缩松、缩孔等缺陷，在蜗壳下壁法兰部位设置2个腰圆暗冒口，尺寸为300 mm × 480 mm × 620 mm。浇注系统采用阶梯式，增加1个 $\Phi 100$  mm的横浇道，2个 $\Phi 80$  mm的内浇道。改进的铸造工艺方案二的蜗壳充型过程如图7所示。由图7可见，金属液仍能平稳上升，可以充满型腔。蜗壳凝固过程如图8所示，铸件的凝固顺序比铸造工艺方案一有明显改善。

图9为铸造工艺方案二铸件缺陷预测分布示意图。

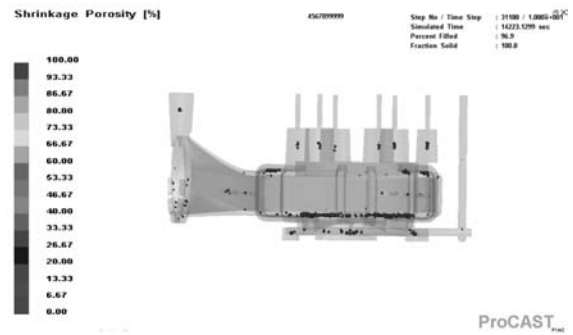
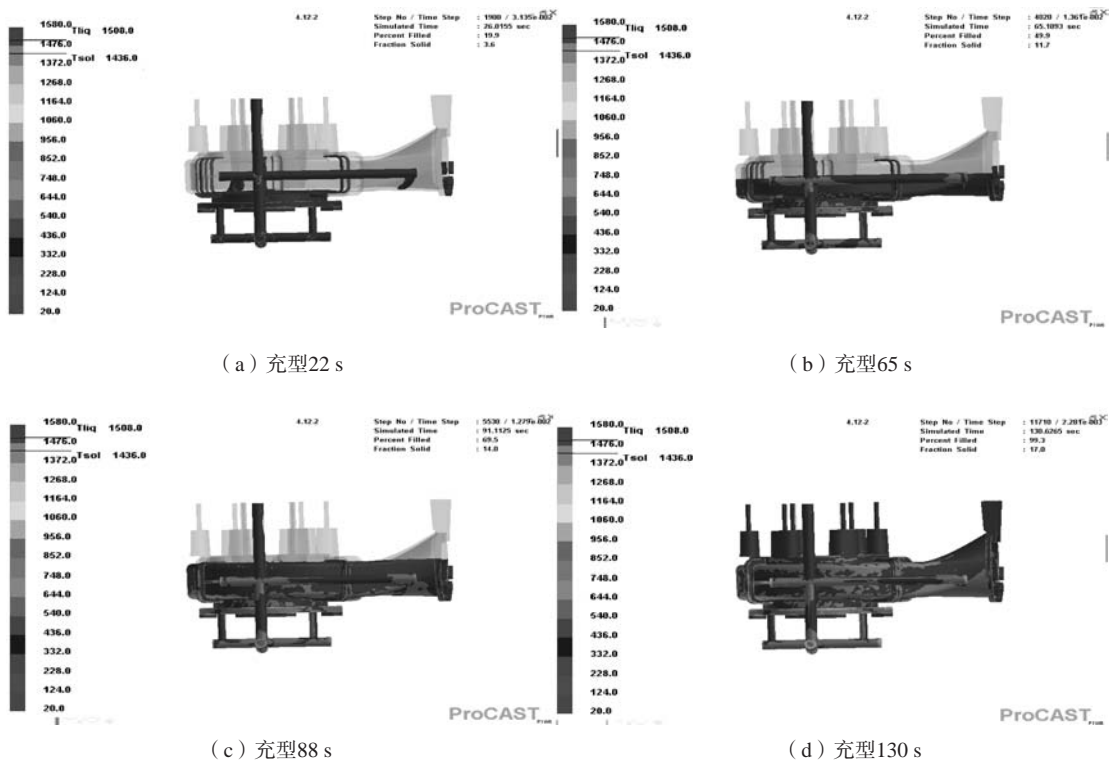


图6 工艺方案一铸件缺陷预测分布

Fig. 6 Casting defect distribution of scheme 1



(a) 充型22 s

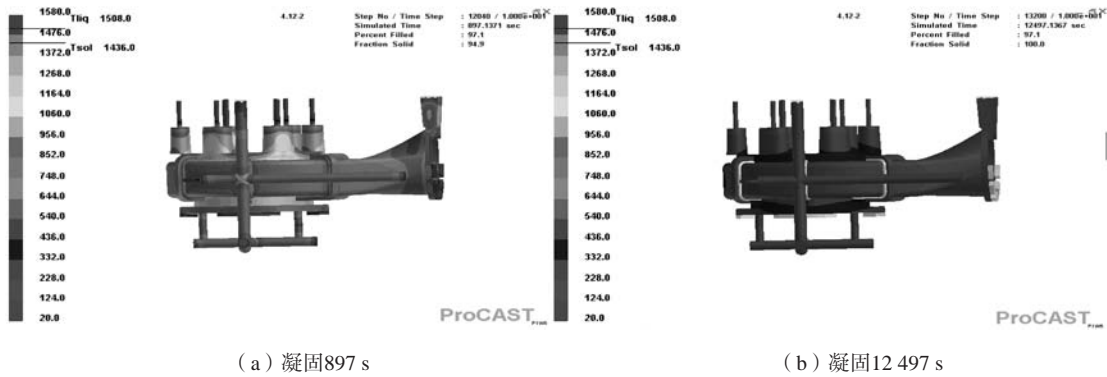
(b) 充型65 s

(c) 充型88 s

(d) 充型130 s

图7 工艺方案二充型状态图

Fig. 7 Mold-filling state of scheme 2



(a) 凝固897 s (b) 凝固12 497 s

图8 工艺方案二凝固状态图

Fig. 8 Melt solidification simulation of scheme 2

由图9可见，蜗壳底端法兰位置的缩松、缩孔等缺陷明显减少，零散缩孔、缩松缺陷分布在浇注系统，集中的缩孔和缩松缺陷位于明、暗冒口中。缺陷分布结果表明，在蜗壳下壁处增加2个暗冒口对蜗壳铸件的补缩作用十分明显。经过工艺改进，铸件仍有一部分缩松、缩孔等缺陷存在于蜗壳底端法兰位置，蜗壳侧壁处也有少量的缺陷存在，铸造工艺仍需要进一步优化。

### 2.3 蜗壳铸造工艺方案优化

根据工艺方案二的模拟结果可以看出，蜗壳底部法兰处仍然出现少量缺陷，说明此处的热节仍未完全消除。在蜗壳侧壁处也存在少量的缺陷，说明浇注系统对侧壁法兰的补缩作用未能完全满足要求。为了彻底消除铸件底部热节，需在底部法兰处增大冷铁的尺寸，以改善此处的温度分布。同时优化阶梯式浇注系统，加强对侧壁法兰的补缩作用。冒口尺寸和位置均与方案二相同。底部冷铁尺寸改为200 mm × 100 mm × 90 mm，其他位置冷铁尺寸不变。为了减少侧壁法兰处缺陷，调整浇注系统位置，尺寸不变。优化工艺方案示意图如图10所示。

优化工艺后的蜗壳充型过程如图11所示。由图11可知，液面上升平稳，金属液温度分布较均匀，铸件底部和蜗壳口放置的冷铁确保底部法兰和侧法兰区域温度最低。优化工艺后的蜗壳凝固过程如图12所示。

图13为优化工艺方案铸件缺陷预测分布示意图。由图13可见，蜗壳铸件内的缩孔和缩松缺陷明显减少，工艺方案二在蜗壳底端法兰和侧壁法兰处位置零散分布的缩松、缩孔等缺陷基本消失，出现的缺陷主要集中在两个暗冒口和顶部明冒口中。优化的冒口和浇注系统对铸件的补缩有很大改善作用，且优化的冷铁尺寸和冒口配合有效地消除了铸件的主要热节。所以优化的浇注系统和冒口、冷铁设计合理。

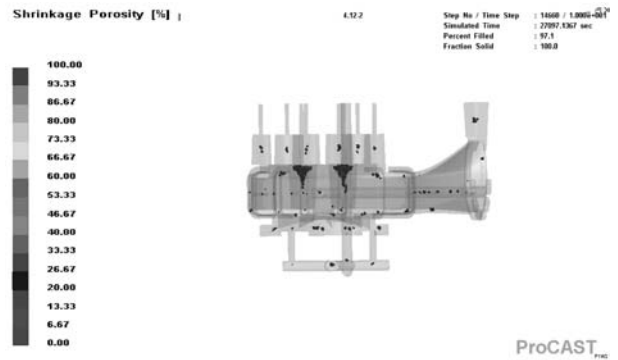
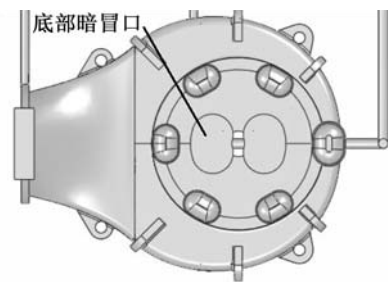
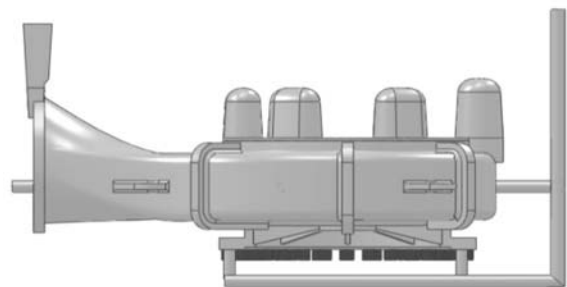


图9 工艺方案二铸件缺陷预测分布示意图  
Fig. 9 Casting defect distribution of scheme 2



(a) 底视图



(b) 侧视图

图10 优化工艺方案示意图

Fig. 10 Schematic diagram of optimized casting process

### 3 蜗壳生产验证

蜗壳铸件按照优化的铸造工艺方案进行生产验证。制备的蜗壳铸件如图14所示，铸件表面质量好，经打磨和机械加工后，进行X射线探伤和打压检测，检验结果表明铸件满足工艺设计要求，铸件尺寸满足GB6414CT11级，铸件的化学成分和力学性能符合JB/T6403—1992规定。证明铸造工艺方案设计合理，冒口和冷铁实现良好配合。

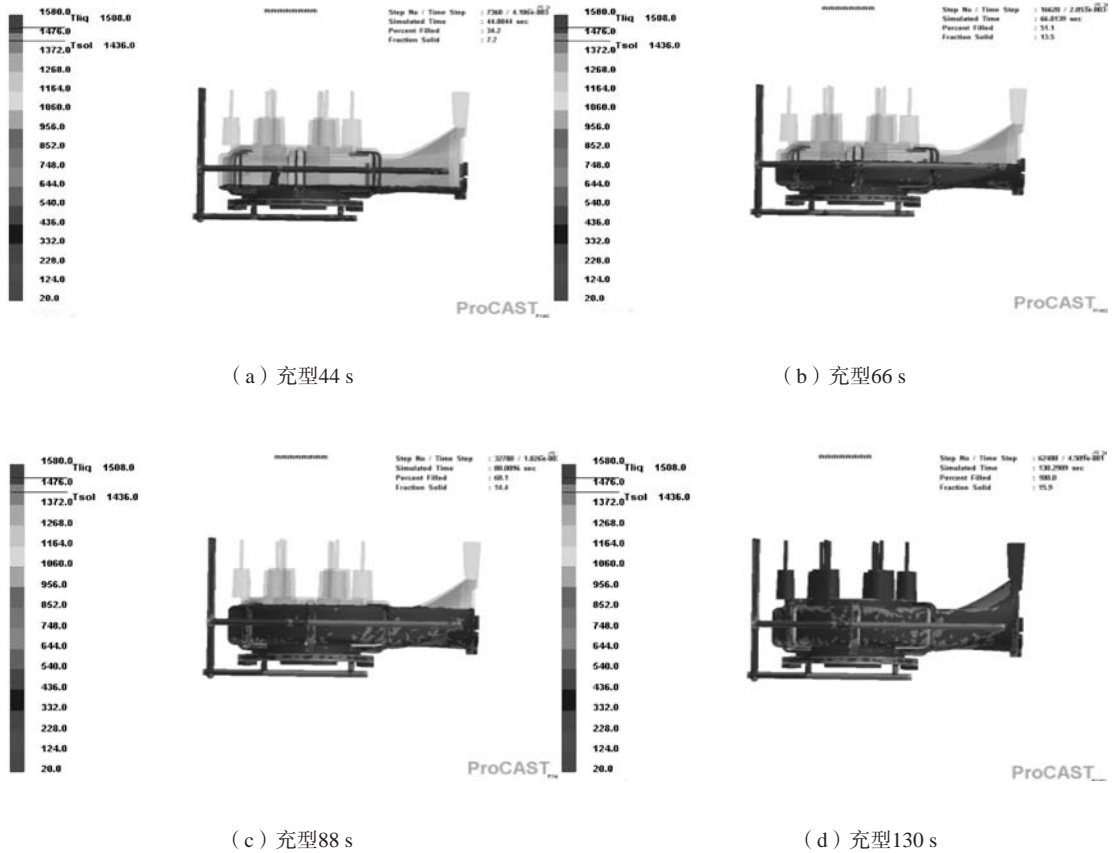


图11 优化工艺方案充型状态

Fig. 11 Mold-filling state after casting process improved

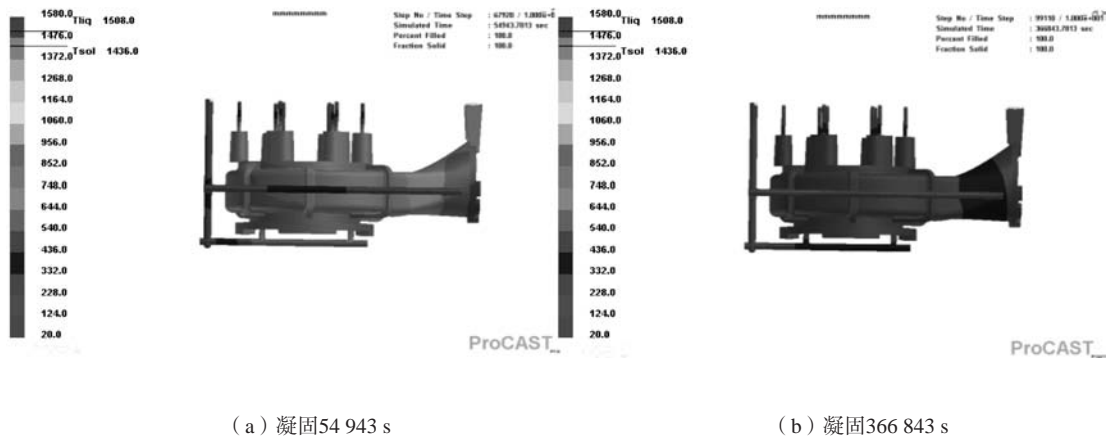


图12 优化工艺方案凝固状态图

Fig. 12 Solidification simulation status after process improved

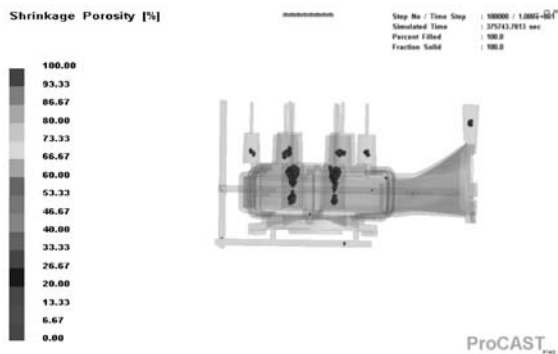


图13 优化工艺方案铸件缺陷预测分布示意图

Fig. 13 Casting defect distribution after casting process improved



图14 蜗壳实际铸件

Fig. 14 Volute casting

## 4 结束语

根据不锈钢蜗壳铸件的结构特点, 选取阶梯开放式浇注系统, 通过合理设置冒口, 冷铁, 合适的浇注温度, 充型速度, 可以获得形状完整、质量满足设计要求的蜗壳铸件。

### 参考文献:

- [1] 吕峰, 牛子宁, 李景银. 离心风机蜗壳内部流动研究 [J]. 流体机械, 2009, 37 (6): 14-19.
- [2] Heinrich M, Schwarze R. Genetic algorithm optimization of the volute shape of a centrifugal compressor [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2016: 13.
- [3] 江伟, 李国君, 张新盛, 等. 离心泵蜗壳进口边对叶轮径向力影响的数值模拟 [J]. 水利学报, 2014, 45 (2): 248-252.
- [4] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册: 铸造工艺 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 谢秋峰, 薛鑫, 吴亚夫, 等. 基于ProCAST蜗壳体铸件精铸过程数值模拟研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (7): 647-652.
- [6] 黄宏军, 曹阳, 王好强, 等. 马氏体不锈钢叶轮铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2015, 64 (4): 317-320.
- [7] 林雪健, 黄宏军, 王浩磊, 等. 水轮机转轮体铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造, 2018 (1): 41-44.

## Process Design and Optimization of Austenitic Stainless Steel Volute Casting

TAO Cheng-chuang<sup>1</sup>, ZHAO Hai-tao<sup>2</sup>, WANG Hao-lei<sup>3</sup>, HUANG Hong-jun<sup>1</sup>, YUAN Xiao-guang<sup>1</sup>  
 (1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 100870, Liaoning, China; 2. Purchasing Department of FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China; 3. Shenyang Casting and Forging Industry Co., Ltd., Shenyang 110142, Liaoning, China)

### Abstract:

Austenitic volute casting was modeled by UG software, numerical simulation was carried out to compute the temperature fields during pouring and solidification processes by ProCAST software, and the position of defects was predicted. Based on above results, final casting process was determined. The results showed that adopting open stepwise gating system can ensure the melt being filled smoothly and completely, and effective feeding can be realized by placing riser or chill at these positions of the shrinkage porosity (hole) and dispersed shrinkage formed easy in the castings. The produced casting using optimized process has not defects such as shrinkage and dispersed shrinkage, meeting the casting design requirements.

### Key words:

austenitic stainless steel castings; volute; numerical simulation; process optimization