

铝合金套筒铸件仿真分析与工艺优化

李红强, 朱 广, 李沛根, 李文静

(西安西开精密铸造有限责任公司, 陕西西安 712046)

摘要: 通过AnyCasting铸造模拟软件对一种铝合金套筒原金属型低压铸造工艺进行仿真分析, 研究了铸造缺陷出现的原因, 并开展工艺优化。结果表明, 原工艺内浇道不能较好补缩法兰, 以及下法兰一字浇道没有起到补缩作用, 却加大局部热节, 导致法兰背面加工槽出现缩孔、缩松缺陷; 初步优化工艺将原工艺内浇道扩大, 并取消一字形内浇道, 缺陷明显减小, 但仍存在; 对初步优化工艺进一步采取降低充型速度, 与采用风冷铜镶块两种优化方案, 都实现了法兰由远离内浇道端向内浇道顺序凝固, 铸件缺陷消除。按照初步优化工艺并降低充型速度, 开展试制与批量生产, 铸件合格率达98%以上。

关键词: 铝合金; 套筒铸件; 仿真分析; 工艺优化

铸造铝合金因具有优良的力学性能、无热裂倾向、铸造性能好、线收缩率小、易回收再生, 并且环保、气密性高等特点, 在工业中应用前景广泛^[1]。铝合金套筒铸件是气体绝缘金属封闭开关设备的常规零件, 形状简单、年用量大, 适合采用金属型低压铸造工艺生产。ZL101A是铝合金铸件的常用材料, 其合金相主要有 α -Al基体、共晶Si、强化相 Mg_2Si 、铁基化合物, 铸造过程中易出现缩孔、缩松和夹杂等缺陷^[2]。

传统上, 铸造工艺方案先依据经验制定, 试浇后根据铸件内的缺陷发生情况对工艺方案进行修改直至生产出符合要求的铸件^[3]。与传统铸造工艺方案的确定相比, 铸造CAE技术具有成本低、试制周期短, 可以有效提高铸件质量^[4]。技术人员采用模拟软件进行虚拟浇注, 对温度场、流场、应力场数值模拟, 预测铸件的缩孔、缩松、裂纹等缺陷和铸件各部位的组织情况。根据模拟结果完善工艺后, 试模生产验证。通过传统铸造设计、铸造仿真分析与生产验证三者有效的结合, 控制铸件品质, 为大批量铸造生产提供可靠保证^[5]。

1 铸件特点与工艺方案

本文研究的套筒零件表面全加工, 基本尺寸 $\Phi 230\text{ mm} \times 180\text{ mm}$, 质量4.3 kg, 材质ZL101A-T6(成分见表1)。零件三维图见图1。由图1a知, 套筒为直筒连接上、下法兰结构, 筒壁厚6 mm, 上、下法兰厚度分别为30 mm和33 mm, 都均布直孔。由图1b可知, 上、下法兰背面均有凹槽, 下法兰比上法兰更厚大。

套筒的两法兰直孔与背面凹槽, 毛坯进行铸实。为提高工艺出品率, 套筒采用

表1 ZL101A化学成分
Table 1 The chemical composition of the ZL101A

$w_B/\%$				
Ti	Mg	Si	Fe	Mn
0.08~0.20	0.25~0.45	6.5~7.50	≤ 0.2	≤ 0.10
Zn	Cu	其他杂质分量	其他杂质总量	Al
≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.05	≤ 0.15	余量

作者简介:

李红强(1986-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为铝合金铸造工艺设计与仿真分析。E-mail: 631265516@qq.com

中图分类号: TG146.21;

TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

10-1440-07

收稿日期:

2023-11-20 收到初稿,
2024-03-12 收到修订稿。

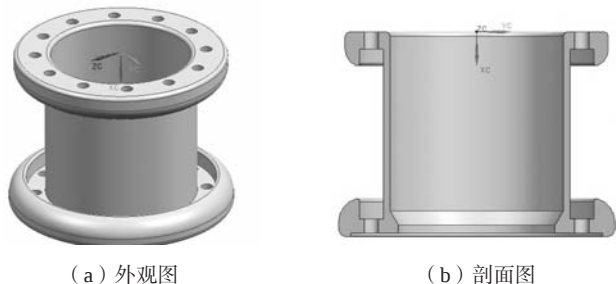


图1 零件三维图

Fig. 1 The three-dimensional diagram of the sleeve casting

一型两件金属型低压铸造工艺，见图2。直浇道两侧的套筒毛坯为镜像对称关系。直浇道通过两侧内浇道与两套筒毛坯上、下法兰相连。下法兰内浇道处内腔具有“一”字形浇道。

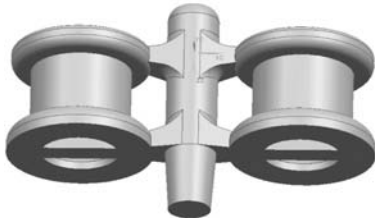


图2 原金属型低压铸造工艺

Fig. 2 The original metal mold low-pressure casting process

套筒零件熔炼、浇注、清理等工序完全按照操作要领执行。原工艺生产的套筒零件，两法兰背面加工槽都存在明显的缩孔、缩松缺陷，见图3。



图3 原工艺铸造缺陷

Fig. 3 The original process casting defects

本文首先对套筒原工艺建立三维模型，利用AnyCasting软件对模型进行网格划分、参数设置及模拟仿真分析铸造缺陷产生的原因；然后，优化工艺与生产验证。模型划分均匀网格，网格数约为1 000万。ZL101A铝合金材料液相线温度为614 ℃，固相线温度为556 ℃。文中涉及的ZL101A材料、模具材料、铜镶块材料的热物理性能参数均为AnyCasting软件材料数据库默认参数，主要参数设置见表2。

表2 主要模拟参数
Table 2 The main simulation parameters

铸件材料	模具材料	铜镶块	浇注温度/℃	模具初始温度/℃	镶块初始温度/℃
ZL101A-T6	QT500-7	CuCr1	700	320	150

2 仿真结果分析

2.1 原工艺仿真分析

原工艺仿真结果见图4。由图4a可知，铸件约7 s完成充型，充型过程平稳。由图4b知，铸件充满时，上法兰温度649 ℃以上，远高于液相线温度，不会出现因铝温低造成铸造缺陷，总体充型过程良好。由图4c、d、e可知，铸件凝固66 s，上法兰内浇道对面出现孤立液相，下法兰一字浇道已凝固；凝固82 s，下法兰内浇道对面与内浇道成90°方向即将出现孤立液相；凝固106 s，下法兰内浇道即将出现孤立液相。图4f显示的铸造缺陷与孤立液相区域较好的对应。

铸件上法兰内浇道对面出现孤立液相，说明上法兰内浇道不能有效补缩；下法兰内浇道与浇道对面出现明显的孤立液相，一字形浇道较早凝固，说明一字形浇道没有补缩作用，反而加大一字浇道两端热节；下法兰内浇道成90°方向出现孤立液相区，说明下法兰内浇道不能有效补缩。因此，原工艺生产的套筒法

兰背面凹槽加工出现缩孔、缩松缺陷。

2.2 优化工艺仿真分析

根据原工艺模拟仿真结果分析，给出初步工艺优化方案：对上、下法兰内浇道进行扩大；取掉下法兰一字形浇道。初步优化工艺见图5。

对初步优化工艺仿真，结果见图6。由图6a可知，充型约7 s，铸件将要充满，上法兰温度642 ℃以上，高于液相线温度，相比扩浇道前，温度略有下降，与扩浇道后流速减缓有关。而由图6b、c、d、e可知，铸件凝固64 s，上法兰内浇道对面存在孤立液相；凝固79 s，下法兰内浇道对面相比两旁更粗大，进一步凝固将变为孤立液相；凝固83 s，下法兰内浇道对面存在轻微孤立液相，及与下法兰内浇道成90°方向即将出现孤立液相；凝固127 s，下法兰内浇道位置顺序凝固。图6f显示的缺陷与孤立液相区域较好对应。

铸件初步优化工艺上法兰内浇道对面仍存在孤立液相，说明上法兰内浇道仍不能有效补缩；下法兰内

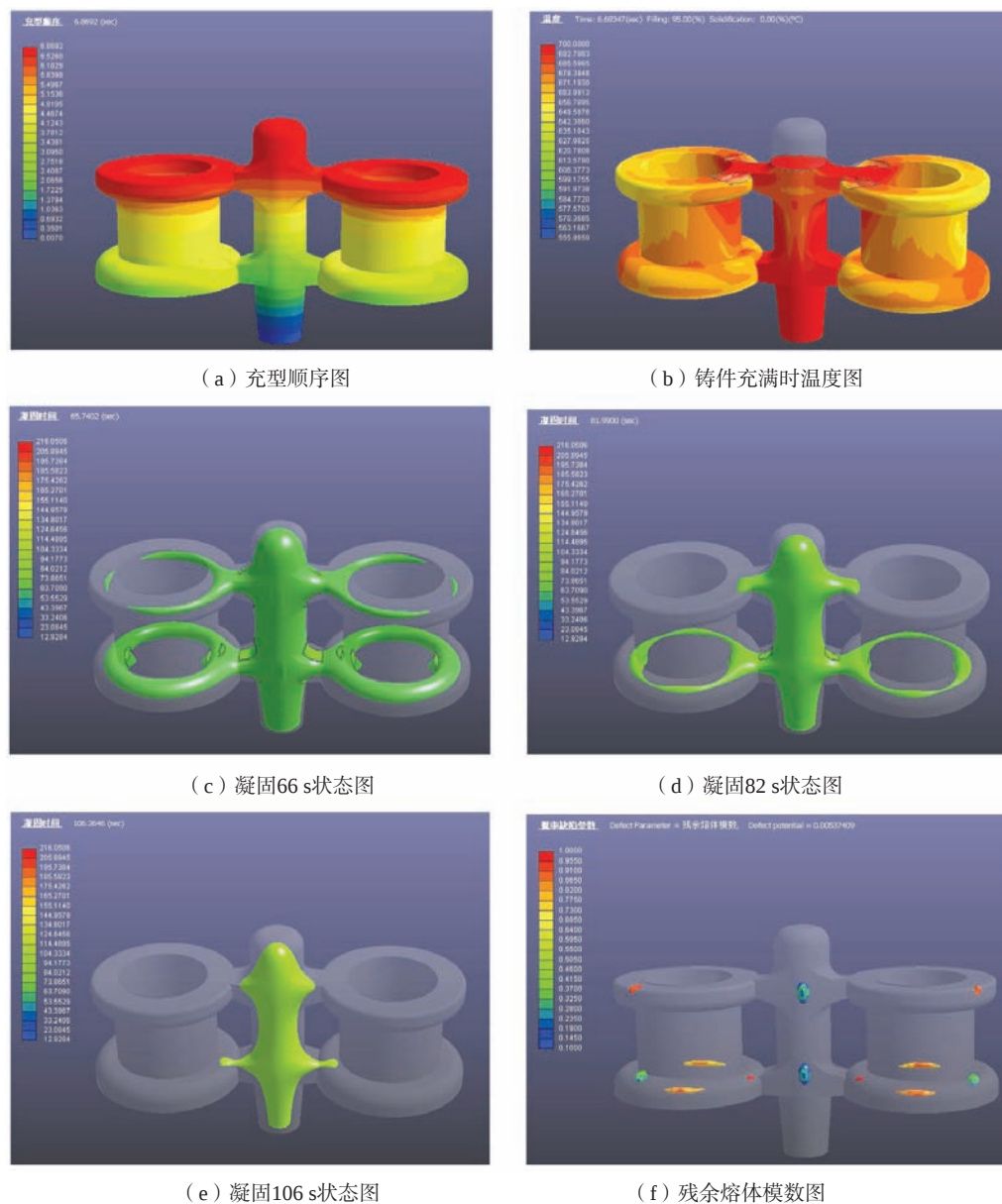


图4 原工艺模拟仿真结果

Fig. 4 The simulation results of the original process

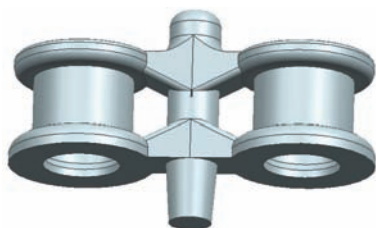


图5 初步优化工艺

Fig. 5 The preliminary optimization process

浇道对面及与下法兰内浇道成90°方向出现孤立液相，说明下法兰内浇道仍不能有效补缩。与原工艺相比，套筒初步优化工艺下法兰内浇道位置孤立液相及产生

的缺陷消除，其余上、下法兰缩孔、缩松缺陷都明显减轻。

2.3 进一步工艺优化与仿真分析

针对初步优化工艺的仿真结果，上、下法兰仍不能较好地顺序凝固，上、下法兰内浇道对面及与下法兰内浇道成90°位置出现缩孔、缩松缺陷，但明显减轻，进一步工艺优化，采取两种方法：一是降低充型速度，铝液流向法兰远端时间变长，使得法兰远端温度更低，更早凝固；二是采用风冷铜镶块的方式，对法兰远端进行激冷。

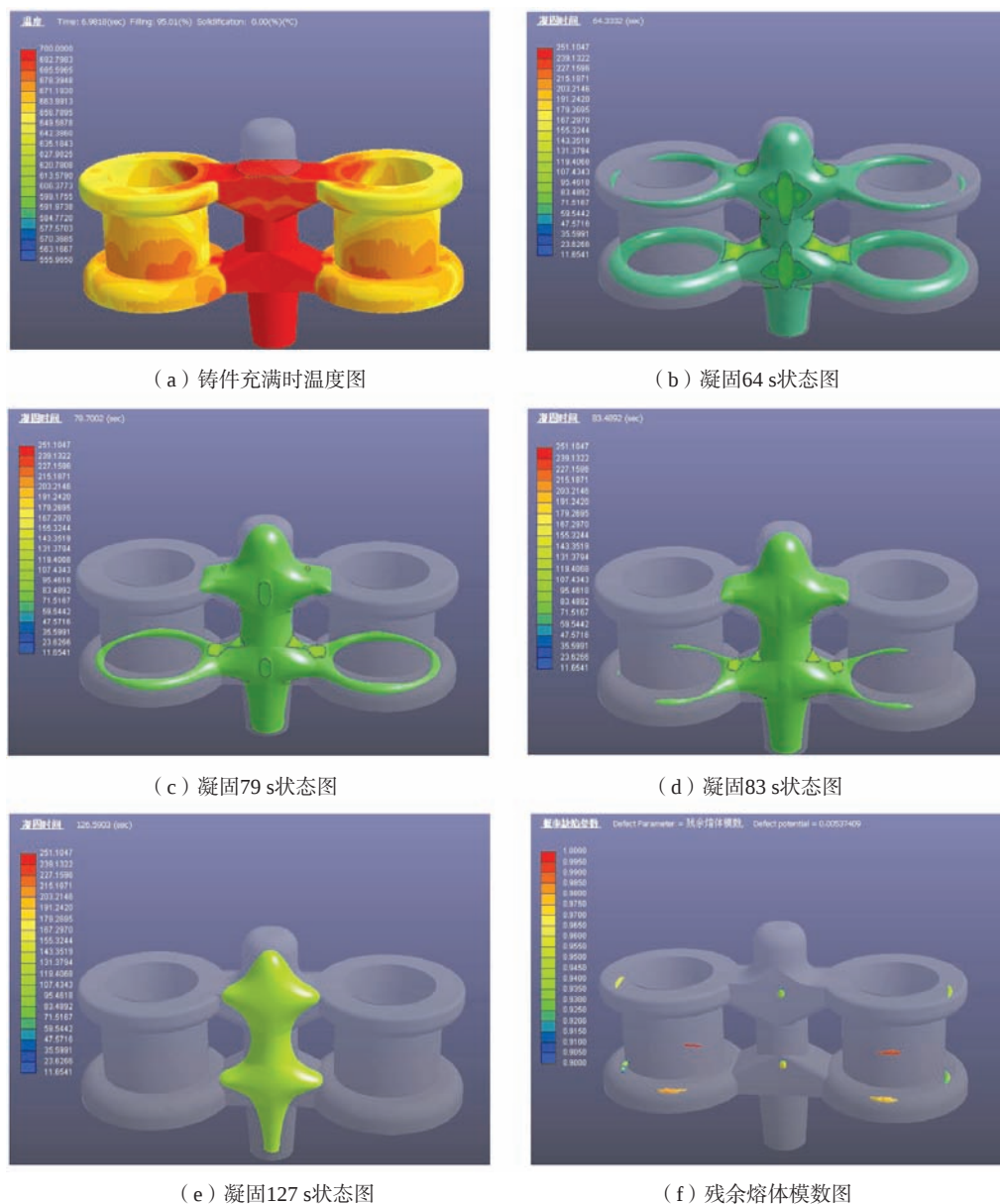


图6 初步优化工艺模拟仿真结果

Fig. 6 The simulation results of the preliminary optimization process

2.3.1 降低充型速度

初步优化工艺充型速度由1 080 Pa/s降低至600 Pa/s, 其余工艺参数不变进行仿真, 结果见图7。由图7a可知, 铸件约12 s完成充型, 由浇道向上一层一层平稳充型。由图7b知, 铸件充满时, 上法兰浇道对面温度620 ℃以上, 高于液相线温度, 不会出现因铝温低造成铸造缺陷。由图7c、d、e可知, 铸件凝固62 s, 上法兰内浇道对面已凝固, 补缩通道状态良好, 没有出现孤立液相; 凝固77 s, 下法兰内浇道对面将要凝固, 与补缩通道仍连通; 凝固87 s, 与下法兰内浇道成90°方向将要凝固, 补缩通道状态良好。图7f显示铸件没有缺陷。

相比初步优化工艺, 降低充型速度, 充型时间由约7 s变为约12 s, 铸件充满时, 上、下法兰内浇道对面位置温度下降约20 ℃以上, 上、下法兰内浇道对面到内浇道温度梯度增大, 铸件缺陷消除。因此, 此方案可行。

2.3.2 采用风冷铜镶块

对初步优化工艺采用风冷铜镶块工艺见图8, 并进行仿真, 结果见图9。由图9a、b、c可知, 铸件凝固61 s, 上法兰内浇道对面已凝固, 没有出现孤立液相区, 下法兰内浇道对面将要凝固, 仍保持较好连通; 凝固66 s, 上、下法兰内浇道成90°方向将要完成凝

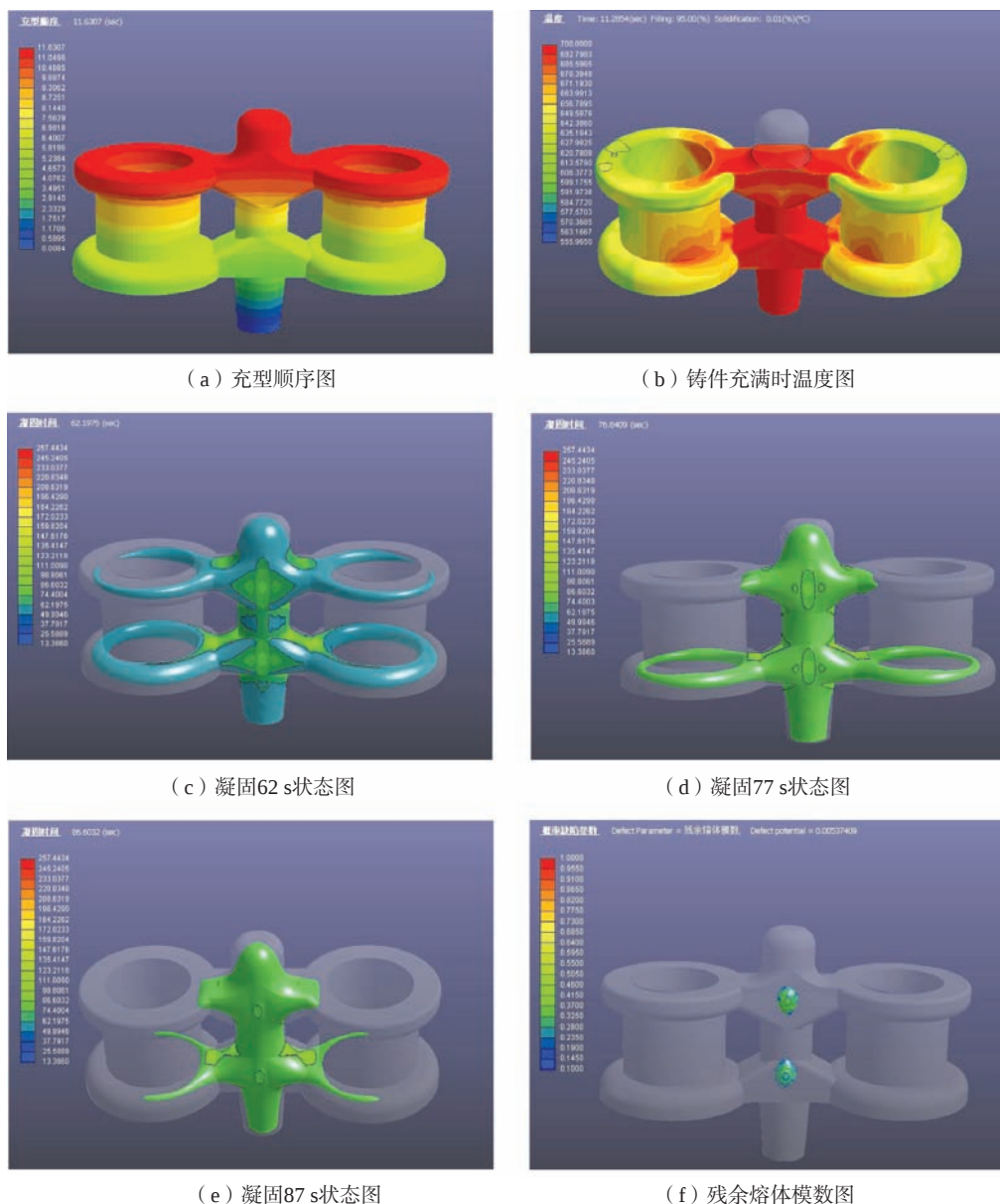


图7 降低充型速度模拟仿真结果

Fig. 7 The simulation results of decreasing filling velocity

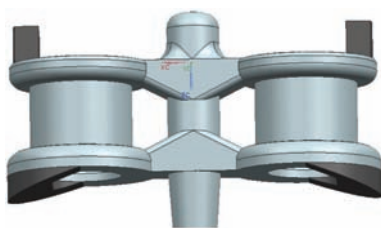


图8 采用风冷铜镶块工艺

Fig. 8 The process of using air-cooled copper inserts

固，补缩通道状态良好；凝固81 s，与下法兰内浇道成90°方向已凝固，补缩通道状态良好。图9d显示铸件没有缺陷。因此，此种工艺方案也可行。

3 生产验证

由于风冷铜镶块的工艺，模具除了按照初步优化工艺维修外，还需加工铜镶块、与铜镶块配合模具凹槽以及设置风冷管道，维修工作量大、维修成本高，而采取降低充型速度的工艺，只需按照初步优化工艺维修模具，维修工作量小。因此，风冷铜镶块工艺作为降低充型速度工艺的铸件仍存在问题的备选工艺。

按照初步优化工艺进行模具维修并采取降低充型速度方法，开展试制验证。首批生产试制20件，跟踪了零件机加工结果，全部合格，法兰背面凹槽内缩孔、缩松消除，套筒零件机加工情况见图10。后续进行了批量投产。该零件生产数量大于1 000件。铸件合

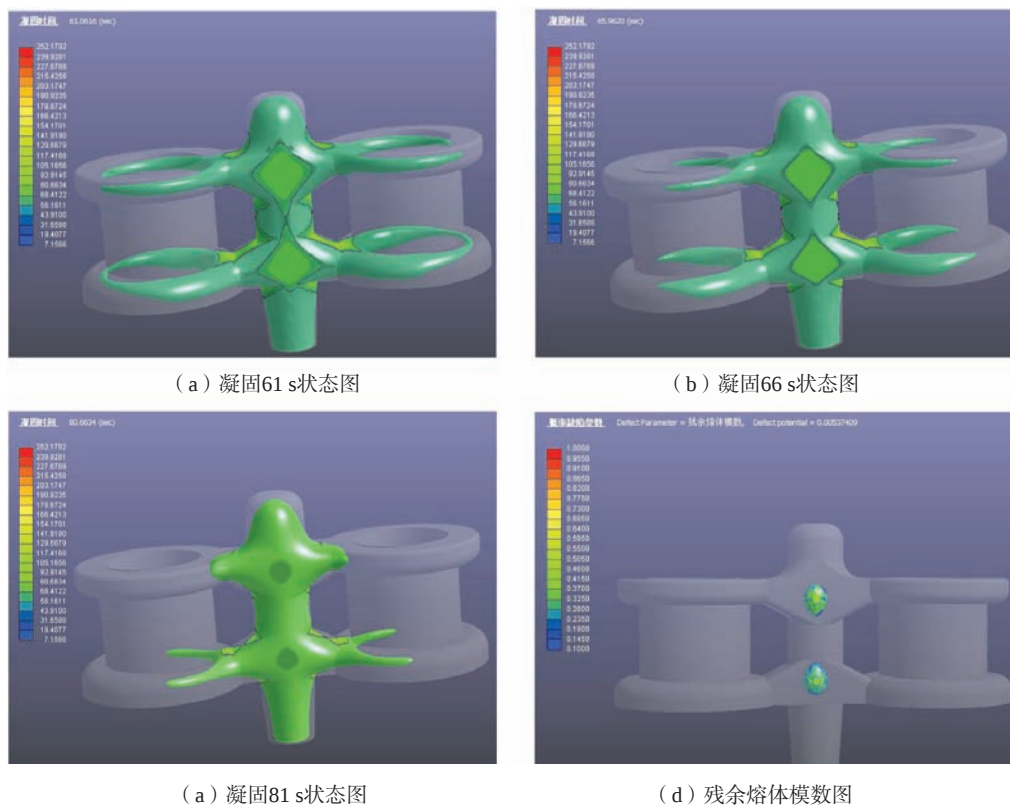


图9 采用风冷铜镶块模拟仿真结果

Fig. 9 The simulation results of using air-cooled copper inserts



图10 套筒零件机加工情况

Fig. 10 The machining condition of the sleeve casting

格率大于98%。

4 结论

(1) 原工艺仿真结果表明, 套筒原工艺上法兰与下法兰的内浇道不能有效补缩; 下法兰内腔的一字浇道没有起到补缩作用, 反而加大一字浇道两端的热

节。造成原工艺生产的套筒法兰背面凹槽加工出现缩孔、缩松缺陷。

(2) 初步优化工艺对套筒原工艺上、下法兰内浇道进行扩大并取消一字浇道。仿真结果与原工艺相比, 套筒初步优化工艺下法兰内浇道位置孤立液相及产生的缺陷消除, 其余上、下法兰缩孔、缩松缺陷都明显减轻。

(3) 对套筒初步优化工艺进一步采取了降低充型速度与采用风冷铜镶块两种优化方案。与初步优化工艺仿真结果相比, 将充型速度由1 080 Pa/s降低至600 Pa/s, 充型时间由约7 s变为约12 s, 上、下法兰内浇道对面位置温度下降约20 ℃以上, 上、下法兰内浇道对面到内浇道温度梯度增大, 铸件缺陷消除; 对初步优化工艺增加风冷铜镶块, 实现上下法兰由远离内浇道端向内浇道端的顺序凝固, 铸件缺陷消除。

(4) 按照初步优化工艺并降低充型速度, 首批试制20件, 全部合格。批量生产铸件已超过1 000件, 铸件合格率大于98%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马广辉, 李润霞, 段林. 铸造缺陷对 ZL101 合金断裂行为的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (2) : 162-166.
- [3] 赵明, 盛文斌. SKT机床床身铸造过程模拟及工艺优化 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (9) : 812-815.
- [4] 游寿松, 张吉祥, 张科峰, 等. 铸造 CAE 模拟分析低压铸造泵轮缩松缺陷 [J]. 铸造, 2020, 69 (2) : 183-186.
- [5] 黄永欢, 季火绩, 丁杰, 等. 基于MAGMA的地铁电机端盖铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2017, 66 (4) : 418-419.

Simulation Analysis and Process Optimization of the Aluminum Alloy Sleeve Casting

LI Hong-qiang, ZHU Guang, LI Pei-gen, LI Wen-jing

(Xi'an XIKAI Precision Foundry Co., Ltd., Xi'an 712046, Shaanxi, China)

Abstract:

The original metal mold low pressure casting process of the aluminum alloy sleeve was simulated and analyzed with AnyCasting simulation software. The reasons of casting defects in the original sleeve casting were studied, and simulation analysis was used to assist in process optimization. The results showed that the ingates of the original process could not effectively feed the flanges, and the straight line ingate of the lower flange did not play a role in feeding, instead of increasing the local hot spot, leading to obvious the shrinkage and porosity defects in the machining grooves on the back of the flanges. The flange ingates were expanded and the straight shaped ingate was removed in the preliminary optimization process, and the defects were significantly reduced, but still exist. For the preliminary optimization process, each of reducing the filling speed and using air-cooled copper inserts could achieve sequential solidification from far away the inner gates to the inner gates, eliminating the shrinkage and porosity defects of the castings. Finally, according to the preliminary optimization process and reducing the filling speed, the trial production and batch production were carried out, and the casting qualification rate exceeded 98%.

Key words:

aluminium alloy; sleeve casting; simulation analysis; process optimization
