DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.012

# ZL107 某基座铸件工艺模拟及优化

董海阔<sup>1</sup>,董方涛<sup>1</sup>,郗 旸<sup>1</sup>,张 强<sup>1</sup>,张开望<sup>1</sup>,王 玉<sup>2</sup>

(1. 西安航天精密机电研究所 陕西 西安 710100;2. 西安航天发动机厂 陕西 西安 710100)

摘 要:对某基座铸件的铸造工艺利用 ProCAST 软件进行模拟仿真,预测了缩松(缩孔)缺陷的产生位置及分布, 并依据仿真结果对铸造工艺方案进行优化。结果表明,采用优化后的工艺方案可生产出合格的铸件。模拟技术的应 用可以有效检测铸造工艺设计的合理性,提高生产效益。

关键词:数值模拟;低压铸造;凝固

中图分类号:TG292

文章编号:1000-8365(2021)08-0699-05

#### Process Simulation and Optimization of a ZL107 Base Casting

文献标志码:A

DONG Haikuo<sup>1</sup>, DONG Fangtao<sup>1</sup>, XI Yang<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Kaiwang<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>

(1. Xi'an Aerospace Precision Mechatronics Institute, Xi'an 710100, China; Xi'an Aerospace Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract**: The casting process of a base casting was simulated by Procast software, and the position and distribution of shrinkage porosity (shrinkage cavity) defects were predicted. The casting process scheme was optimized according to the simulation results. The results show that qualified castings can be produced by using the optimized process scheme. The application of simulation technology can effectively test the rationality of casting process design and improve the production benefit.

Key words: numerical simulation; low pressure casting; solidification

航天产品具有批量小、种类多、质量要求严格等特点<sup>[1]</sup>,如今正处于航天产业迅速蓬勃发展的时期,型号数量剧增。航天型号产品中的铸件生产面临着产品复杂化、小型化、多样化的挑战<sup>[2]</sup>。随着研发进度的不断加速,铸造生产的周期也在不断被压缩。因此,迫切需要新技术入手,适应这一发展趋势。铸造数值模拟技术作为目前最热门的行业先进技术之一,其重要性越来越明显<sup>[3-6]</sup>。铸造数值模拟技术可以对铸造工艺方案进行模拟计算,对缺陷进行识别,在计算机上就可以实现工艺方案检验和优化的迭代过程,避免反复试制带来的周期拉长的风险<sup>[7-8]</sup>,能够有效提高铸造生产效率。

本文作者通过利用 ProCAST 铸造模拟软件对 某基座铸件的铸造工艺方案进行仿真分析,对铸造 充型、凝固过程进行模拟计算,预测铸造缺陷的产 生,并参考模拟结果对工艺方案进行了优化和验证, 最终利用优化后的方案进行投产,得到合格铸件,大 大缩短了试制周期,提高了生产效率。

### 1 工艺方案

某基座 ZL107 铸件为某型号关键产品重要结构件,采用砂型铸造生产。该铸件对内部质量要求高,铸件内部要求不能出现缩松、缩孔、裂纹等缺陷, 且不允许补焊任何铸造缺陷,并且铸件厚壁部位与 薄壁部位壁厚比值达5倍之多,薄壁部位壁厚多为 4~5 mm,接近铝合金砂型铸造临界壁厚,属于大壁 厚差铸件,铸造生产难度较大。

图 1 为该基座铸件三维结构照片,该铸件尺寸 为:300 mm × 350 mm × 350 mm,采用树脂砂型铸 造。该铸件两侧圆轴端及 4 处安装耳位置厚度在 25 mm 左右,侧面非承重结构位置壁厚为 4 ~ 5 mm。 铸造生产时既要保证厚大轴端及安装耳内部不能出 现缩松、缩孔等铸造缺陷,又要保证薄厚相接处不能 出现裂纹,并且薄壁部位要充型完整,不能出现浇不 足缺陷。

对铸件结构进行分析后,为了保证充型平稳及 不出现浇不足缺陷,决定采用低压铸造方式进行生 产。铸造工艺三维结构如图 2,低压直绕道尺寸为  $\phi 60 \text{ mm}$ ,十字横浇道截面尺寸为 50 mm × 40 mm。 从十字横浇道上各引入一宽度为 30 mm 的楔形内 浇道与铸件底部 4 边相接,同时在两侧轴端底面增 加厚度为 20 mm 的工艺补贴,再通过十字横浇道设

收稿日期:2021-04-12

作者简介:董海阔(1992一),陕西西安人,硕士,助理工程师. 主要从 事有色金属铸造成形方面的工作. 电话:18640078079, Email:1305037611@qq.com



图 1 基座铸件形貌 Fig. 1 Base casting morphology





置 ¢30 mm 内浇道引入轴端底面,利用低压铸造的 内浇道补缩作用,加强对轴端厚大部位的补缩,后期 由机加辅助去除。铸件顶部安装凸台设置冒口辅助 补缩。同时,为调节冷却顺序,加快补缩距离较远位 置的冷却,在如图 3 黑色部位,放置了 4 处冷铁,冷 铁材质为铸铝。考虑冷铁为多次重复利用,并结合 生产经验,最终冷铁厚度取激冷部位最大厚度的 3 倍,厚度约为 15 mm 左右。利用低压浇注系统与冷 铁配合在铸件充型、凝固过程中形成一个利于补缩 的凝固顺序,铸件浇注温度取 700 ℃,低压浇注参数 如表 1。

表1 低压浇注参数 Tab.1 Parameters of low pressure casting

阶段	升液	充型	升压	保压
压力/kPa・s <sup>-1</sup>	2.5	3	4	42
时间/s	6	4	3	300

## 2 铸造缺陷分析及工艺优化

将以上铸造工艺方案导入 ProCAST 模拟软件 进行模拟计算。图 3 为该方案条件下缩松缩孔模拟 结果,从图中可以发现在两侧窗口上部出现了缩孔倾向区域,缺陷产生的概率高达40%。经检查,轴端及其他部位均未发现缩孔倾向区域。模拟结果表明该工艺方案可以保证轴端厚大部位内部质量,但是两处窗口上部易出现缩松缩孔缺陷。





Fig. 3 Numerical simulation results of shrinkage porosities

通过模拟结果对铸件凝固过程进行分析。图 4 是截取充型结束后第 30 ~ 70 s时的温度场变化, 图 5为充型结束后第 30 ~ 70 s时的固相分数变化, 图 6 充型结束后第 30 ~ 70 s时的缩松(缩孔)模拟 结果。从图4~图6的模拟结果可以看出, 随着铸 件的冷却,在窗口上部出现密闭的高温度区域以及 密闭的固-液两相区,该密闭区域在冷却过程中无 法获得有效补缩,很容易形成缩松(缩孔)缺陷。模 拟结果中温度、固相分数的变化规律与最终高缩松 (缩孔)倾向区域的形成规律高度一致。



(a)30 s



Fig. 6 Numerical simulation results of shrinkage defects at different time after filling completed

根据以上分析,初步判断造成该区域出现较高 缩松(缩孔)缺陷概率的原因为冷铁激冷能力不足。 在此处形成密闭高温度区域,进而形成密闭固-液 两相区,最终导致形成高缩松(缩孔)倾向区域。因 此,不改变其他工艺参数和低压浇注参数的条件下, 采取了两种优化方案,方案一是将冷铁厚度由原来 的 15 mm 分别增加为 20 mm 和 30 mm 分别进行模 拟:方案二是选取激冷能力更大的铜质冷铁,铸铝的 密度约为2.7 g/cm<sup>3</sup>,导热系数约为160 W/m・K, 比热容为0.88 kJ/(kg·℃);含铜量 60% 的黄铜密 度约为8.5 g/cm<sup>3</sup>,导热系数约109 W/m.K,比热容 约为0.39 kJ/(kg·℃),含铜量 60% 的黄铜导热率 及比热容虽不如铸铝,但是其密度是铸铝的3.15 倍,因此单位体积黄铜冷铁的能吸收的热量要比铸 铝多约40%。因此体积相同的条件下,黄铜要比铸 铝激冷能力更强<sup>[9]</sup>。

将两种优化方案分别代入软件进行模拟。图7 是方案一中冷铁厚度分别为 20、30 mm 时缩松(缩 孔)模拟结果。模拟结果显示铸件两侧窗口上部仍然 出现了高缩松(缩孔)倾向区域,缺陷产生概率仍为 40% 左右。模拟结果显示增加冷铁厚度并不能降低 该铸件缺陷生产的概率。王继章等的《铝合金铸件中 冷铁作用效果的研究》也得出过类似的结论<sup>[10]</sup>。

图 8 为方案二冷铁厚度不变,将冷铁材质换为 铜后的缩松(缩孔)模拟结果。结果显示铸件两侧 窗口上部没有高缩松、缩孔倾向区域产生。



图 7 采用不同厚度铝合金冷铁的缩松缩孔模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of shrinkage defects using aluminum chills with different thickness



图 8 冷铁材质为黄铜时的缩松缩孔模拟结果 Fig. 8 Numerical simulation results of shrinkage defects using brass chills

对冷却以及凝固过程的模拟结果进行分析。图 9 为充型结束后第 50 s 的铸件温度场及凝固场模拟

结果。从图中看出,将冷铁材质由铝变为铜后,窗口 上部凝固呈现非常好的顺序凝固的状态,因此大大 降低该处缩松(缩孔)缺陷的产生倾向。

最终对以上方案分别进行了实际投产验证,如 图 10,使用铝质冷铁的铸件在试加工时窗口上部加 工后的表面出现了明显的缩松(缩孔)缺陷,其位置 与模拟结果指示位置完全相同。

图 11 为采用含铜量为 60% 的黄铜冷铁铸件 X-射线检测底片,采用铜冷铁的铸件则在该处未发现 缩松(缩孔)缺陷产生,铸件内部质量良好。验证结 果与模拟结果一致,故该基座铸件决定在后续生产 中采用铜冷铁。



图9优化铸造工艺后的模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results after casting process optimization



图 10 冷铁材质为铝时的缩松缩孔缺陷 Fig. 10 Shrinkage defects using aluminum chills



图 11 冷铁材质为黄铜时 X-射线探伤结果 Fig. 11 Results of X- ray detection using brass chills

### 3 结论

(1)通过铸造数值模拟技术的应用,辅助完成 铸造工艺方案的检测和优化,大大缩短了该基座铸件的试制周期,也降低了反复试制带来了成本增加 及资源浪费,提高了生产效益。

(2)就该基座铸件生产而言,更换激冷能力更 大的冷铁材质比单一增加冷铁厚度对降低缩松(缩 孔)缺陷产生具有更加明显的作用。这结果对其他 铸件生产也有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 黎虹,任鹏立,符道,等.降低航空铝合金铸件成本初探[J].热 加工工艺,2013,42(21):215-216.
- [2] 樊振中,徐秀利,王玉灵,等.熔模精密铸造技术在航天工业的

应用及发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(3): 285-289.

- [3] 罗迪.铸造过程仿真系统应用的认知误区[J].铸造技术, 2018,39(8):1705-1708.
- [4] 黄胜银, 沈亚坤, 郑喜平. 铝合金底座铸造工艺数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(12): 2929-2932.
- [5] 介石磊,彭俊,郝春雨.汽车铝合金轮毂低压铸造工艺研究[J].铸造技术,2017,38(11):2785-2788.
- [6] 杜旭初,杨守杰,罗传彪,等.数值模拟在铝铜合金低压铸造工 艺中的应用[J].铸造技术,2016,37 (1):120-123.
- [7] 孔令超. 铝合金低压铸造过程模拟[J]. 铸造技术, 2015, 36
  (6):1513-1517.
- [8] 樊庆华,张剑,黄引平,等.传统铸造走向数字铸造的解决方案 [J].热加工工艺,2017,46(13):131-133.
- [9] 王君卿. 铸造手册[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [10] 王继章,杨晶,王宁.铝合金铸造中冷铁作用效果的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2011,31 (10):961-963.

