

基于仿真模拟壳体缺陷机理分析及工艺改进

吴晓明, 彭 超, 王 玉, 郭 蓓
(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为了提高某型号发动机低压壳体铸件合格率, 对壳体加工后轴承冷却孔缺陷问题进行分析, 提出了工艺改进措施。采用内窥镜检查、剖切检查, 确定缺陷形貌及产生位置, 运用仿真模拟软件对原铸造工艺方案进行模拟, 基于凝固过程仿真结果以及产品结构分析, 确定了缺陷产生原因为温度场不协调及缺乏有效补缩源。针对缺陷产生原因提出工艺改进措施, 改进冷铁设计及加快充型速度优化凝固温度场, 添加冒口增加缺陷部位补缩能力。改进措施应用后, 仿真模拟结果显示, 原最先凝固区域凝固时间延迟, 冒口及缺陷上方均可以提供补缩, 建立了顺畅的补缩通道, 消除了原问题部位的疏松缺陷。小批量产品验证结果表明, 产品合格率大幅提高, 加工后未见疏松缺陷问题, 解决了型号研制问题, 保证产品批量交付。

关键词: 复杂壳体; 缺陷分析; 工艺改进; 数值模拟; 补缩通道

中图分类号: V462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2021)04-0096-07

Analysis of casting defect mechanism and optimization of complex shell casting based on numerical simulation

WU Xiaoming, PENG Chao, WANG Yu, GUO Bei
(Xi'an Space Engine Company, Xi'an 710100, China)

Abstract: For improving the qualification rate of complex shell, the mechanism of fluorescence loosen defects was described by using section check, endoscopy and numerical simulation. The process improvement measures were put forward. It was determined that the causes of defects were uncoordinated temperature field and lack of effective feeding source based on the simulation results of solidification process and the analysis of product structure. Through optimizing temperature field, adding source to feed and the feeding capacity of defect was enhanced. By using above measures, the simulation results show that the solidification time of the original first solidification area is delayed, a smooth feeding channel is established and the loose defects of the original problem area are eliminated. The verification results of small batch products show that the problem of fluorescence defects is eliminated, the qualified rate of products is improved and products are delivered in time.

Keywords: complex shell casting; defect mechanism; optimization; numerical simulation; feeding channel

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-03-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1710100)

作者简介: 吴晓明(1991—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机型号管理及铸造工艺。

0 引言

ZL104 属于典型的亚共晶铝硅合金,其气密性、流动性和抗裂性能优良,强度高,耐腐蚀好,铸造性能和切削加工性能良好,广泛用于承受大负荷的航天、航空发动机传动机匣、泵壳体零件,是目前应用最为广泛铝合金^[1-3]。然而,铝硅合金结晶温度区间很宽,呈糊状凝固方式。该合金在凝固时,液相析出 α 相,该相极易长成发达树枝晶,这些小晶体连成骨架,形成无数封闭的小熔池,熔池中的液相在凝固过程因骨架阻碍得不到外部液体补缩而形成疏松。其次,骨架会阻碍液相熔池液相收缩,产生拉应力,导致液相破裂产生疏松^[4-5]。某型号燃料泵低压壳体材料为 ZL104,因合金铸造特性及原有工艺裕度不高,在大批量生产过程中,部分产品在机加工过程中发现肉眼可见疏松缺陷,导致产品报废,直接影响发动机的装配进度。

铸造数字化仿真模拟技术通过将数值计算技术、图形可视化技术等数值仿真模拟技术与传统铸造专业凝固理论、流体力学等学科集成,通过对铸造过程的流场、温度场、应力场、微观组织等进行仿真计算,预测判定缺陷产生位置,是应用最为广泛的铸造缺陷预判技术^[6],广泛用于航空、航天、汽车等行业铸造过程缺陷机理分析、工艺设计及改进^[7-13]。随着计算机技术迅速发展,极大推进了铸造仿真模拟的发展速度,陆续从宏观模拟走向微观模拟,并开发出一系列的模拟软件,如:ProCAST、MAGMA、华铸 CAE 等^[14-15]。

本文利用 Procast 软件进行可视化仿真模拟,运用 X 光透视、内窥镜检查等手段,结合铸件结构分析,确定铸造缺陷产生原因,提出改进措施,结合试验验证,消除薄弱环节,切实保证产品质量,提高产品可靠性,提升工艺设计裕度,切实实现工艺设计由简单满足产品设计,适应单件研制、小批量生产向适应多产品、变批量生产转变。

1 铸件结构特点及生产问题

1.1 产品简介及结构分析

涡轮泵作为液体火箭发动机的“心脏”,是发动机动力的源泉^[16]。某型号低压壳体是启动涡轮泵的重要组成部分,该产品主要由启动涡轮壳体对接

端、中间锥孔、侧面法兰、涡道内腔、一级泵壳体对接端及凸台组成,其轮廓尺寸 240 mm × 220 mm × 180 mm,内腔结构复杂,呈半封闭的“U”型结构,为大曲率变截面,从入口方向内腔空间逐渐变小,中间由隔板进行分割。该产品采用砂型铸造工艺生产,通过 X 光透视、表面荧光检查分别对内部质量、表面质量进行检查,内部不允许有疏松、缩孔、夹杂等缺陷,表面不允许有线状缺陷和积聚状缺陷。

为保证合金充型良好,减轻合金氧化,采用底注式浇注系统。为分散热量,减轻局部过热,从一级泵壳体对接端的 4 个对称内浇口引入金属液,由下而上逐层按顺序充填型腔。顶部启动涡轮壳体对接端放置冒口对顶部厚大热节部位的补缩。为加速底部一级泵壳体对接端厚大法兰、侧面法兰端面及传感器对接孔等厚大热节部位的冷却速度,以获得良好的补缩顺序,减轻或抑制疏松缺陷产生。如图 1 所示的产品结构。但是启动涡轮壳体对接端、大法兰由涡道连接,壁厚为典型的两头厚,中间薄,呈“沙漏”结构(见图 1),中间薄壁部位凝固时间短,补缩通道若提早关闭,便会在底部厚大部位产生疏松缺陷,原工艺方案如图 2 所示。

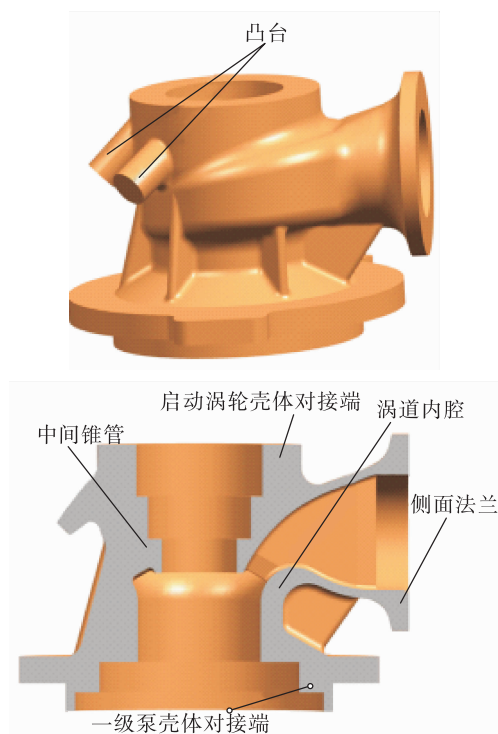


图 1 产品结构

Fig. 1 Structure of product

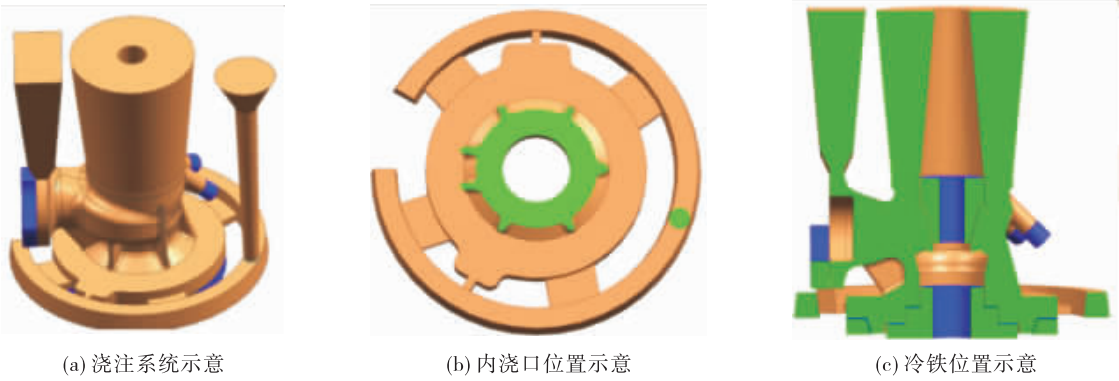


图 2 原工艺方案
Fig. 2 Previous processing design

1.2 问题描述

启动涡轮燃料泵水试装配过程,使用内窥镜对低压壳体 $\phi 4$ 轴承冷却孔进行检查时,发现 $\phi 4$ 内孔 1/3 圆周面存在铸造缺陷,缺陷位置见图 3,内窥镜形貌见图 4。铸件剖切后,可见明显的缩孔缺陷,见图 5。该关键部位的疏松缺陷问题,会降低涡轮泵的可靠性,直接造成产品报废,产品合格率仅 30%,需开展研究解决此问题。

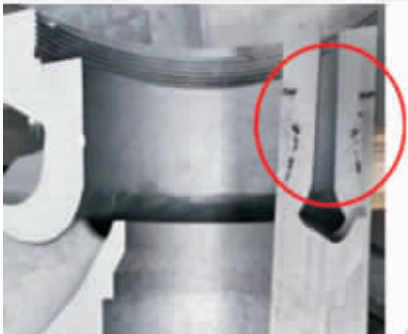


图 5 剖切后缺陷形貌
Fig. 5 The morphologies of defect after section

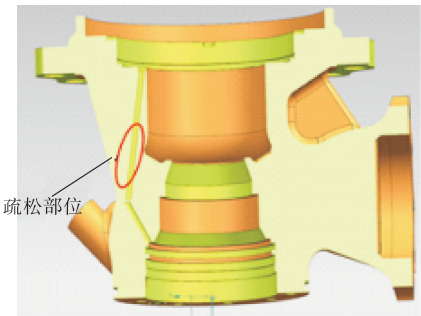


图 3 缺陷位置
Fig. 3 The position of defect

1.3 缺陷产生原因分析

$\phi 4$ 轴承冷却孔位于涡道与一级泵壳体对接端法兰的交汇处,该冷却孔通过机加而成。该区域附近的涡道壁厚仅为 5 mm,内腔隔板厚度为 12 mm,筒壁厚为 16 mm,轴承冷却孔入口处厚 23 mm,筋板厚为 10 mm,大法兰厚为 25 mm,各部分壁厚差异极大,见图 6。

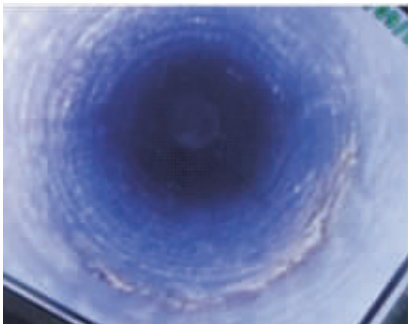


图 4 缺陷形貌(内窥镜)
Fig. 4 The morphologies of defect(endoscope)

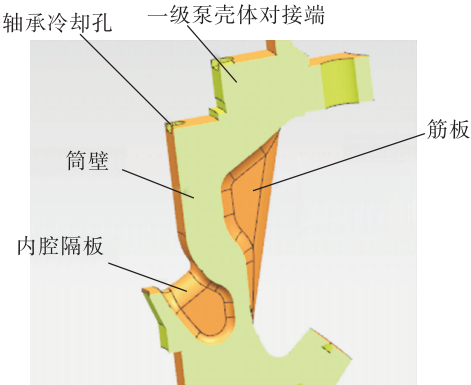


图 6 $\phi 4$ 轴承冷却孔结构
Fig. 6 Structure of bearing of shafts

该处疏松缺陷问题产生,反映出该缺陷位置凝固顺序、补缩能力未达到设想效果,与冷铁设计不合理、缺乏有效补缩源有关。通过过程复查发现,问题批产品的出炉温度较低,合金液流动性降低,影响了缺陷部位的充填。

1.4 仿真模拟结果

不同时刻铸件充型过程如图 7 所示,由图可知,整个充型过程耗时 20 s,合金液于 1.13 s 时从铸件两侧 4 个内浇口进入型腔。20 s 时,完成冒口充填。59 s 时,隔板、侧面法兰及涡道部分温度降低明显。89 s 时,一级泵壳体对接端法兰因放置冷铁而强化散热,温度显著降低,但仍高于浇道温度,其所对应

下端涡道部分降温不明显。

不同时刻铸件凝固过程固相分数见图 8,由图可知,铸件 69 s 时,侧面法兰处涡道部分开始凝固。159 s 时,中间锥管部分所对应的涡道部分,底部一级泵壳体对接端因添加冷铁快速冷却至固相。此时,冒口部位仍处于液相区,可实现对启动涡轮壳体对接端的补缩。204 s 时,涡道区域已经冷却凝固,直接关闭了涡道上侧部位与下侧部位的补缩通道,而此时涡道与一级泵壳体对接端法兰的交汇处($\phi 4$ 轴承冷却孔)为 0.7~0.8,仍以液相形式存在,在后续凝固过程产生体积收缩,因缺乏金属液补缩,而产生疏松缺陷。

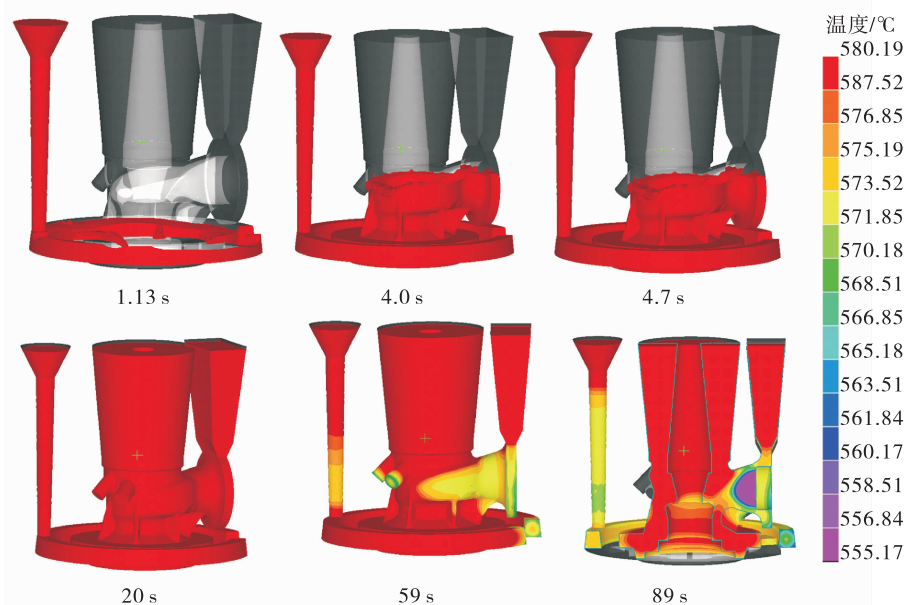


图 7 充型过程温度变化

Fig. 7 Filling temperature at different time

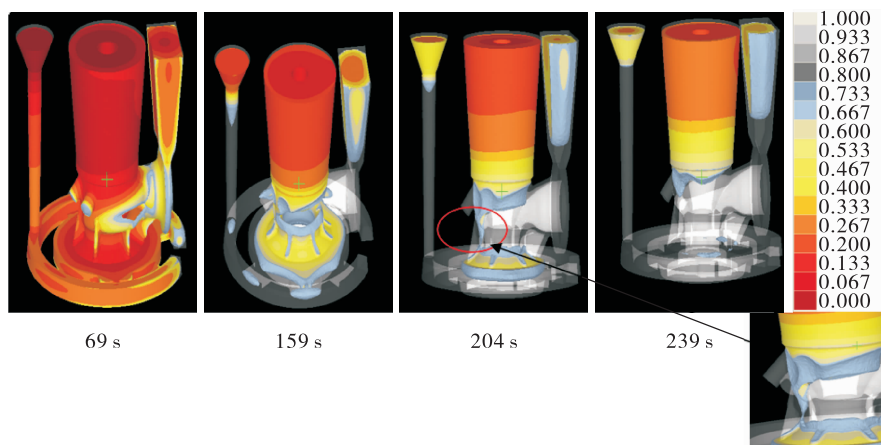


图 8 凝固过程固相分数变化

Fig. 8 Solid phase at different time during solidification process

图9为原方案冷铁设计,其中1#冷铁紧贴一级泵壳体对接端内腔,2#冷铁则紧贴一级泵壳体对接端厚大部位,3#冷铁则紧贴启动涡轮壳体对接端,冷铁材质均为铝合金。因1#冷铁高度过高,使得缺陷部位所对应的散热能力过快,更加速上部薄壁涡道部分的冷却速度,使壁处过早的凝固,其次,底部一级泵壳体对接端冷铁高度不足,加之,下部分冷铁材质为铝合金,使得一级泵壳体对接端所对应的下端部位的冷却速度过慢。缺陷所处部位上半部分冷却速度快,而下端冷却速度慢,导致凝固时温度梯度不合理,未能形成自下而上的凝固顺序。其次,缺陷部位除了依靠上端补缩通道的补缩源外,无额外补缩能力。

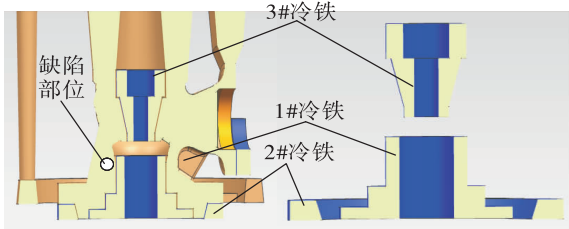


图9 原工艺方案冷铁设计

Fig. 9 Iron chill of previous processing design

2 工艺优化与验证

2.1 工艺优化方案制定

2.1.1 改变冷铁材质及尺寸

通过改变冷铁结构以及材质,调整了原有不合理的凝固温度场,建立起畅通的补缩通。冷铁方案见图10,1#冷铁材料改为紫铜,加强该部位的冷却速度,同时,降低冷铁高度,以减小对一级泵壳体对接端涡道区域的冷却速度。其次,加2#冷铁的冷铁高度,提高对一级泵壳体对接端的冷却速度,优化冷却温度场。

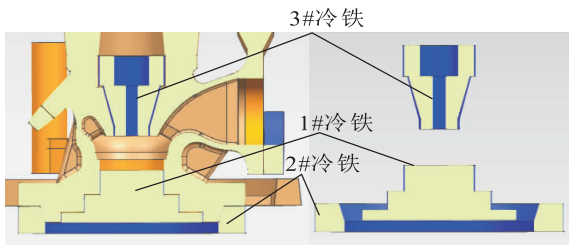


图10 改进后冷铁

Fig. 10 Iron chill after improvement

2.1.2 添加侧冒口

采用模数法进行冒口设计,模数 M 为铸件或铸件

被补缩部分的体积 V 与其表面积 A 的比值 ($M = V/A$)。实现顺序凝固,应保证冒口最后凝固,即冒口凝固时间大于铸件基体凝固时间,计算公式如下^[17-20]

$$\left(\frac{M_r}{K_r}\right)^2 \geq \left(\frac{M_c}{K_c}\right)^2 \quad (1)$$

式中: M_r 为冒口模数; M_c 为铸件模数; K_r 为冒口凝固系数; K_c 为铸件凝固系数。

对于普通冒口, $K_r = K_c$, 因而式(1)可以写成

$$M_r = f M_c \quad (2)$$

式中 f 为换算系数,对于铝合金,一般按 1.2 计算。

轴承冷却处需补缩部位可视作圆柱体,以热节圆的最大直径作为圆柱体的直径,热节圆最大直径按照 A. Heuvers 氏滚圆法确定, D 为 37.5 mm,具体如图11所示。

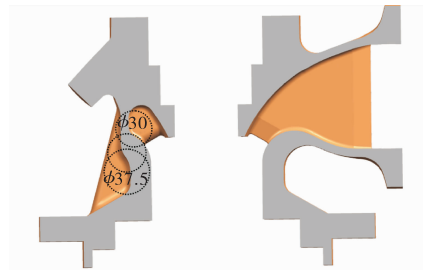


图11 冒口计算方法

Fig. 11 Feeding value of riser

圆柱体的高度为筋板的厚度,即 H 为 12 mm。圆柱体冒口计算公式为

$$M_c = \frac{V}{A} = \frac{\pi D^2 H / 4}{(\frac{\pi D^2}{2} + \pi D H)} = \frac{DH}{2D + 4H} \quad (3)$$

式中: D 为热节圆最大直径; H 为热节圆高度。

可算得 M_c 为 3.65 mm, 按照式(2)计算 M_r 为 4.35 mm。根据圆柱体冒口模数与直径的关系 ($M = D/4$), 计算可得冒口直径 D_r 为 17.4 mm, $H_r \geq 1.5 D_r = 26.1$ mm, 添加冒口如图12所示。

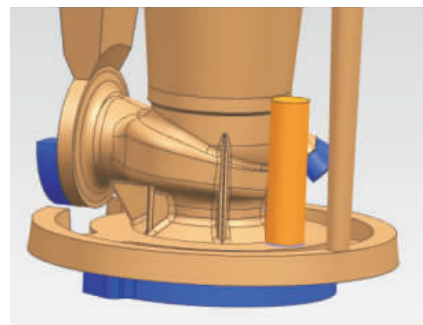


图12 改进方案的暗冒口

Fig. 12 Blind riser after improvement

2.1.3 提高金属液流动能力

低压壳体浇注温度通过出炉温度、转移时间进行控制,转移时间越长,合金液热量损失越多,浇注温度则越低。在当前转移时间基础上,通过试验验证及历史数据的统计分析,在工艺规程及历史包络允许范围内,适当提高浇注温度由 725 °C 增加至 745 °C,延长液态金属在砂型中的流动时间,为筒壁及 $\phi 4$ 轴承冷却孔提供补缩用合金液,消除缺陷。

2.2 改进方案仿真模拟

对于改进后的方案进行模拟结果见图 13,由图可知,充型 69 s 后铸件的涡道内壁开始出现凝固,涡道壁处开始出现了糊状凝固区域,随后在 1#冷铁、2#冷铁的作用下,一级泵壳体对接端底部法兰及涡道内壁开始出现凝固,因冷铁改为铜,冷却能力提高,下部分金属液的凝固速度加快,同时随冷铁高度的降低,延迟了涡道壁瓶颈区域的冷却时间,保证补缩通道畅通,同时侧冒口提供的补缩源,保证了缺陷部位可以得到有效的金属液补充,轴承冷却孔未见残留的孤立合金液,原问题能够得到改善

或解决。但是一级泵壳体对接端右侧部位,在 189 s 凝固时,因其无补缩,出现部分孤立液相区,同时因该位置呈“内凹”结构无法添加外部补缩源,该位置可能会出现部分疏松。

2.3 改进效果评价

小批量投产 16 件,X 光透视合格率由改进前的 30% 提高至 68.7%,机加工后 $\phi 4$ 轴承冷却孔附近再无疏松缺陷问题,与仿真模拟预测结果相符。铸件原始疏松缺陷位于一级泵壳体对接端右侧部位(具体位置见图 13)。该部位厚大,凝固速度慢,冷铁已无法改变其最后凝固的结果。其次,该位置空间狭小,存在结构干涉,无法添加冒口,用于缺陷部位补缩。该部位为产品结构造成瓶颈,无法通过铸造工艺优化解决问题,只能通过现场的精益化控制,稳定产品合格率。

本文解决了加工后铸件关键部位—轴承孔缺陷问题,铸造合格率得到明显提升,保证型号顺利交付。

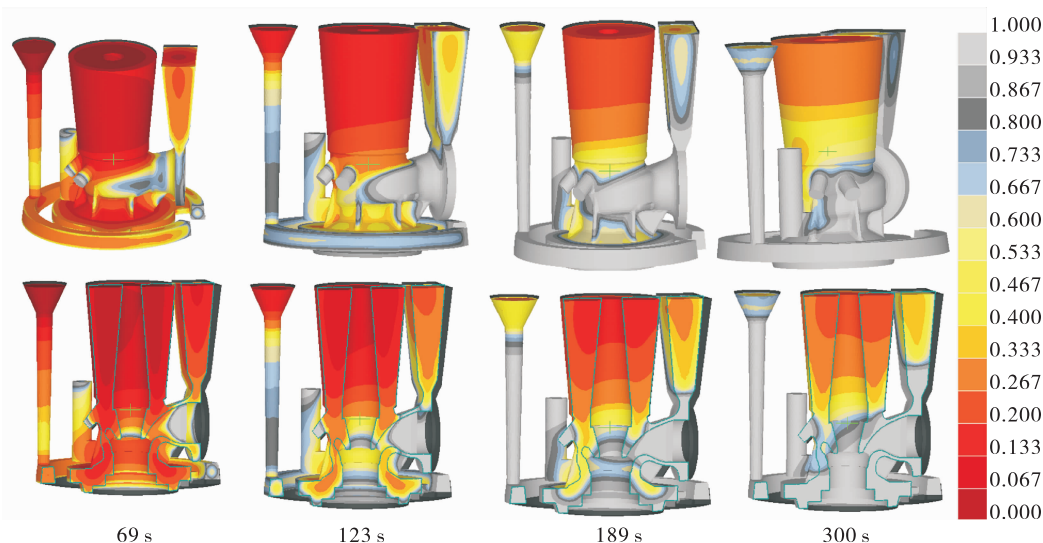


图 13 改进方案固相分数分布图

Fig. 13 Solid phase at different time during solidification process after improvement

3 结论

1) 针对某型号启动涡轮燃料泵低压壳体缺陷问题,采用内窥镜检查、剖切检查确定缺陷的形貌、位置,并运用 Procast 仿真模拟软件对原方案进行仿真模拟,结合温度场、固相分数及产品结构分析,确

定了温度场不协调、缺乏有效补缩源是铸造疏松缺陷产生的根本原因。

2) 通过调整冷铁材质及尺寸,改善凝固温度场,并添加侧冒口及提高出炉温度,改善缺陷部位补缩能力,建立了良好的补缩通道, $\phi 4$ 轴承冷却孔附近合金液得到补充,基本消除疏松缺陷。

3) $\phi 4$ 轴承冷却孔对侧区(一级泵壳体对接端右侧)因结构限制无法放置冒口仍出现缺陷。后续将开展工艺方案优化研究,进一步提升产品合格率。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(第3卷):铸造非铁合金[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 隋育栋,王渠东. 铸造耐热铝合金在发动机上的应用研究[J]. 材料导报,2015,29(3):14-19.
- [3] 杨守杰,戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报,2005,19(2):76-80.
- [4] 范晓明. 金属凝固理论与技术[M]. 2版. 武汉:武汉理工大学出版社,2019.
- [5] 蔡启舟,吴树森. 铸造合金原理及熔炼[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [6] 阚精诚,刘继广,杨友文,等. 铸造充型过程数值模拟技术的研究现状与展望[J]. 热加工工艺,2019,48(13):9-13.
- [7] 周建新,廖敦明. 铸造 CAD/CAE[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [8] 王玉,吴晓明,任新苗,等. 铸件缺陷机理分析及凝固温度场工艺优化[J]. 火箭推进,2020,46(3):83-89.
WANG Y, WU X M, REN X M, et al. Analysis of casting defect mechanism and optimization of solidification temperature field[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(3): 83-89.
- [9] 杨欢庆. 航天液体动力高性能复杂铸件铸造 CAD/CAE 技术应用[C]//2019 中国铸造活动周论文集. 武汉:[s. n.], 2019.
- [10] 黄进,张勇佳,殷亚军,等. 基于华铸 CAE 的航空发动机铝合金传动件铸造数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(8):846-849.
- [11] 孙浩,崔恩强,张娜,等. ZL205A 合金舱体低压工艺设计及数值仿真应用[J]. 上海航天,2019,36(2):131-135.
- [12] 夏伟,杜航,徐慧,等. 基于铸造仿真技术的铝合金缸盖缩孔缺陷控制[J]. 特种铸造及有色合金,2019,39(11):1202-1204.
- [13] 文波,夏志单,季珊林,等. 复杂薄壁框类铝合金铸件工艺设计及数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2018,38(7):768-771.
- [14] 钱怡君,程兆虎,于浩. 数值模拟在铸造中的应用进展[J]. 精密成形工程,2012,4(4):39-43.
- [15] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势[J]. 铸造,2012,61(10):1105-1115.
- [16] 郭维,白东安. 液体火箭发动机用超低比转速离心泵优化设计[J]. 火箭推进,2011,37(5):19-23.
GUO W, BAI D A. Optimal design of ultra-low specific speed centrifugal pump for LRE[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2011, 37(5): 19-23.
- [17] 丛伟. 模数法在铸钢件冒口设计中的应用[J]. 沈阳航空工业学院学报,2002,19(4):17-19.
- [18] 赫振梅,李卿卿,李晓东. 冒口模数定量算法在铸钢工艺设计上的应用[J]. 铸造技术,2020,41(11):1037-1041.
- [19] 徐巧志,王瞳,沈旭,等. 基于距离场的铸钢件冒口设计方法及应用[J]. 铸造,2018,67(6):479-482.
- [20] 纪艳卿,陈鹏荣. 高强不锈钢离心轮浇冒口的设计与计算[J]. 火箭推进,2015,41(4):90-94.
JI Y Q, CHEN P R. Design and calculation of casting head for high strength stainless steel centrifugal impeller[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(4): 90-94.