

某钛合金条形结构件铸造工艺分析及优化

马静^{1,2}, 王林春^{1,2}, 张宁^{1,2}, 崔新鹏³, 李峰³, 李鑫磊^{1,2}, 赵瑞斌^{1,2}

(1. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100095;

2. 北京市先进钛合金精密成形工程技术研究中心, 北京 100095; 3. 北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 针对某钛合金条形结构件生产周期长, 铸件回弹变形、批次性鼓胀、裂纹和缺肉等铸造缺陷比较严重的问题, 开展工艺改进及降本增效工作, 利用ProCast对条形结构件充型及凝固过程进行分析, 预测某条形结构件中的缩孔缺陷, 后根据初始方案的结果进行方案优化, 对其浇冒系统进行改进, 最终得到的某条形结构件的缩孔大小减小为 0.03 cm^3 , 整体相较初始方案减小了99.1%。结合某条形结构件校形工装的改进, 铸件生产周期由116天降低至90天, 铸件成形良好, 无鼓胀和砂眼等缺陷, 小缩孔可以热等静压压实, 实现铸件的稳定批量生产。

关键词: ProCast; 精密铸造; 钛合金; 数值模拟; 缩孔

随着航空和航天工业的发展, 对装备的载荷、强度和刚性等要求越来越高, 钛合金铸件已从传统意义上的毛坯件升级为近净成形整体功能部件, 整体向功能化、整体化和轻量化发展, 铸件的结构越来越复杂、外形轮廓尺寸越来越大和最小壁厚越来越薄; 尺寸精度要求越来越高, 冶金质量要求近乎苛刻, 这些都对钛合金铸造工艺提出了越来越高的要求^[1-3]。

某用于伸缩的长条状铸件结构较为简单, 但是在批量生产过程中, 铸件回弹变形、批次性鼓胀、裂纹和缺肉等铸造问题比较严重^[4]; 且因为组模及后续的生产方案设计问题, 整体浇注过程中金属利用率较低, 仅有13.3%, 单件成本高, 月交付量低, 无法满足订单的长期交付需求^[5]。针对这些问题, 基于ProCast软件对不同组模方案进行模拟分析, 分析缩孔分布情况, 根据模拟结果开展工艺改进及降本增效工作, 提高产品质量, 缩短生产周期, 实现铸件的稳定批量生产^[6-10]。

1 某条形结构件及浇注系统设计

图1为某条形铸件三维结构图, 材质为Ti6Al4V钛合金, 采用重力铸造的浇注方案, 涂料厚度为15 mm, 表1为铸件与涂料在不同温度下的换热系数, 表2为型壳的辐射系数。条形件的外形轮廓尺寸为 $142 \text{ mm} \times 52 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 质量为2.1 kg, 铸件属于长条形小件, 结构较为简单, 在实际的生产过程中, 铸件头部易变形, 尺寸稳定性差, 波动性大, 且条形结构件的部分位置厚度过渡较大, 在凝固过程中容易形成热节, 最终导致铸件形成缩松和缩孔等缺陷^[11]。

根据条形结构件长条形易变形的结构特点, 采用竖排组焊2排, 两铸件之间变形相互制约, 能够有效减小铸件在生产过程的变形量, 铸件的长度方向上存在两个凸台, 厚度较大, 该部位容易往一个方向偏移变形, 变形量约为 $0.4 \sim 0.5 \text{ mm}$, 其他区域易先于这些区域凝固, 后续凝固过程中形成孤立液相区, 为避免条形结构件在后续过程中形成缩松和缩孔等缺陷, 需在浇注系统的设计过程中重点设计该处^[12]。

1.1 无浇注系统铸件凝固模拟结果分析

条形结构件在无浇注系统的情况下, 由于长度方向上的两个凸台的部分金属液

作者简介:

马静(1996-), 女, 工程师, 硕士生, 研究方向为钛合金铸造。E-mail: majinguj@163.com

中图分类号: TG146.23;
TG249.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2025)
08-1112-07

收稿日期:

2025-04-21 收到初稿,
2025-05-27 收到修订稿。

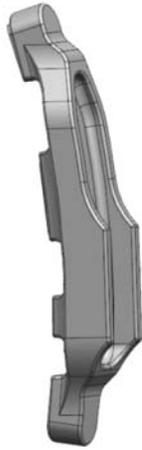


图1 条形结构件的三维结构图
Fig. 1 3D structural diagram of a bar-shaped component

表1 铸件与涂料在不同温度下的换热系数
Tab. 1 Heat transfer coefficients between the casting and coating at different temperatures

温度/°C	20	1600	1650	2000
换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	300	350	900	900

表2 型壳的辐射系数
Tab. 2 Emissivity of the mold shell

温度/°C	30	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
辐射系数	0.9	0.71	0.62	0.56	0.51	0.48	0.47	0.46	0.45

通道断开，这些区域在后续的过程中形成了缩孔，该条形结构件在后期凝固过程中形成的缩孔大小为3.28 cm³，如图2所示。

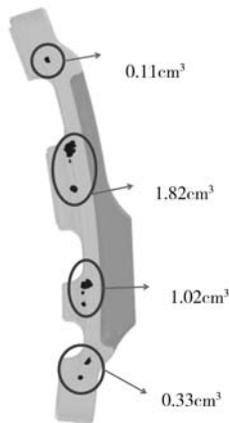


图2 条形结构件无浇注系统缩孔分布
Fig. 2 Shrinkage porosity distribution in the bar-shaped component without gating system

1.2 初始方案数值模型及工艺参数设置

根据条形结构件的结构特征，设计浇注系统，如图3所示，条形结构件一型两件，一组40件，设计条形结构件专用浇道，专用浇道的轮廓尺寸为600 mm × 380 mm × 500 mm，重力浇注^[13-15]。本研究为了计算结果的精确度和速度，对条形结构件的不同部位进行不同尺寸的网格划分，直浇道的网格尺寸设置为8 mm，横浇道的网格尺寸设置为5 mm，冒口和铸件的网格尺寸设置为2 mm，设置有限元模型，并且因为在实际的生产过程中，需要对蜡模进行刷涂料，整个过程需要涂11层料浆，在条形结构件的有限元模拟过程中，将每层料浆的厚度近似设为1.3 mm，即设置型壳的厚度为14 mm，根据铸件的材料，选择条形结构件初始的浇注温度为1 720 °C，型壳的预热温度为150 °C，浇注时间设置为5 s，型壳厚度设置为14 mm，冷却的形式为炉冷^[16]。初始组模方案见图4。

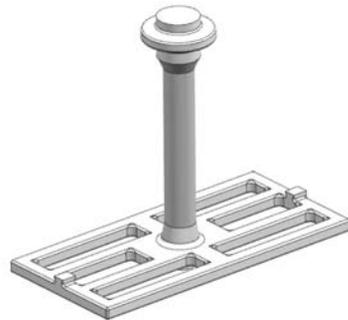


图3 条形结构件专用浇道
Fig. 3 Dedicated gating system for the bar-shaped component

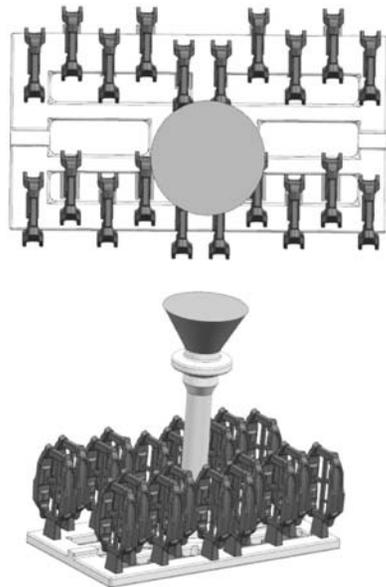


图4 初始组模方案
Fig. 4 Initial mold assembly design

1.3 初始方案结果分析

条形结构件在充型的过程中，以其中某一型为例，如图5所示，在金属液从浇杯进入直浇道流入到浇道盘，在2.83 s通过底部浇道流入到辅浇和条形结构件的铸型型腔内，在3.38 s时流入厚大区域，该铸型左半

部分的方案为两个辅浇道，右半部分的方案为一个辅浇道，左半型针对底部的厚大区域设计了辅浇道补充充型，充型速度稍优于右半型，但效果不显著，在后序的充型过程中，金属液完全满足自下而上的充型顺序，液流平稳无飞溅紊流。

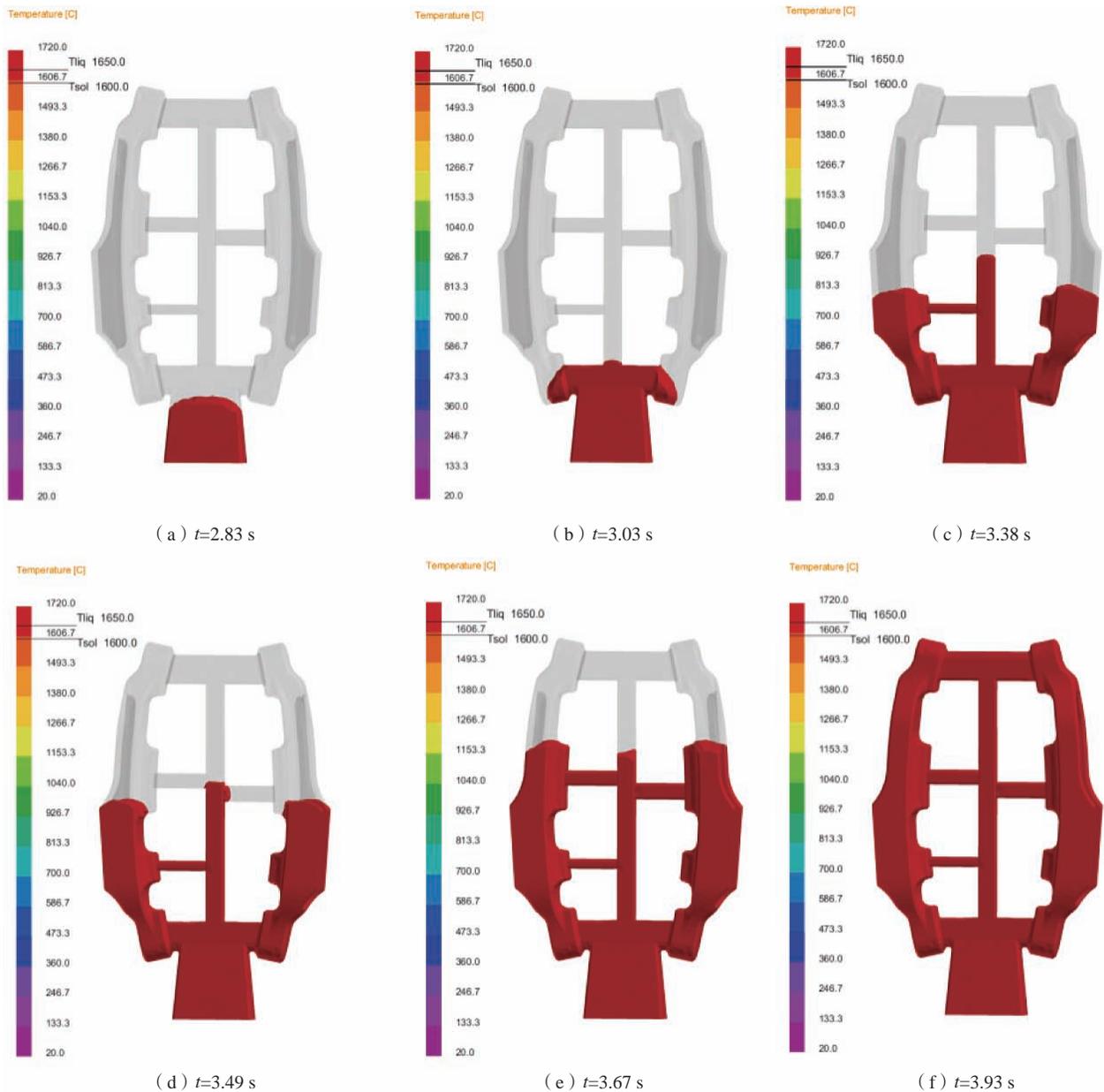


图5 条形结构件充型顺序

Fig. 5 Filling sequence of the bar-shaped component

图6为条形结构件凝固过程中的热节分布，从图中可以看出，在5.35 s时，凝固的是壁厚较薄区域，辅浇及无凸台部分优先凝固，随后向壁厚较厚的部位凝固；29.3 s时，铸件的大部分区域已经凝固，只有壁厚大部位和底部浇道有金属液，且厚大凸台部位周边的金属液已完全凝固，形成了孤立的液相区，补缩通道

关闭形成孤立热节，在后序凝固的过程形成缩松和缩孔等缺陷，需要进一步工艺改进来避免缺陷。

从图7条形结构件初始方案的缩松和缩孔分布图可以看出，缩孔还是主要出现在厚大凸台处，总体的缩孔尺寸相较于凝固状态下整体缩小，大小约为 1.3 cm^3 ，但还是没有完全消除，需要进一步改善缩孔所在位置

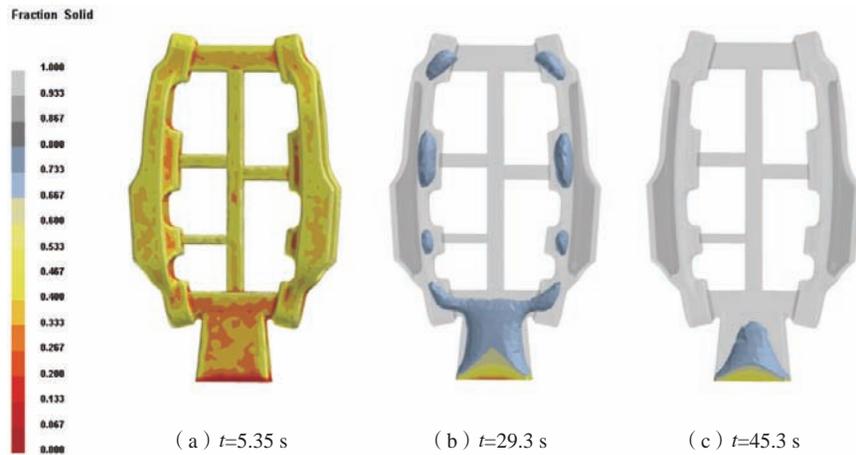


图6 条形结构件凝固过程中热节随时间分布

Fig. 6 Hot spot distribution in the bar-shaped component during solidification over time

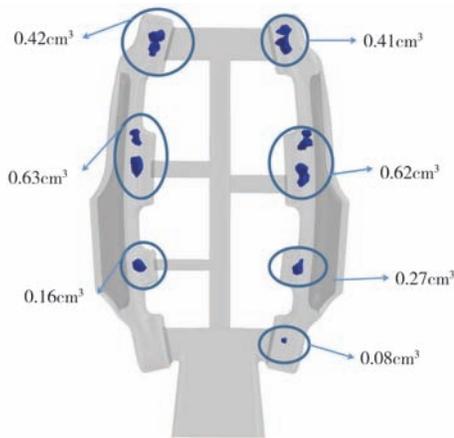


图7 初始方案缩松缩孔分布图

Fig. 7 Shrinkage porosity and microporosity distribution in the initial design

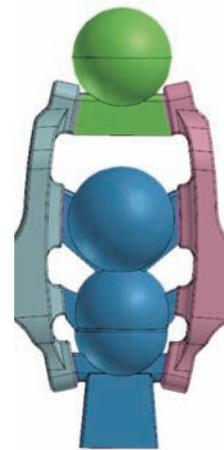


图8 优化浇冒方案

Fig. 8 Optimized gating and riser system design

的浇冒系统。

2 条形结构件优化浇冒方案模拟及结果分析

2.1 条形结构件优化浇冒方案

针对该条形结构件的缩孔提不出的现状，侧边厚大凸台部位的浇道尽量大，得以有足够的金属量用以补缩，本方案中在多次调试后，选用了足够大的圆形冒口，而同样的思路，条形结构件的顶部凸台因重力浇注，上方需要冒口补充金属凝固后的金属液缺口，整体优化方案如图8所示^[17-19]。

2.2 条形结构件优化浇冒方案结果分析

和初始方案一致，优化后仍以其中一型为例，如图9所示，在凝固的初始阶段，铸件的固相率为21.7%时，条形结构件首先从壁厚较小的无凸台的部分优先

凝固，凝固过程从铸件本体向冒口方向进行；当凝固时间 $t=27.7$ s时，铸件除厚大凸台条形处已完全凝固，厚大凸台处的孤立液相区已完全转移至冒口处；在47.7 s时，条形结构件厚大凸台部位的最后凝固点也转移至圆形冒口处，整个条形结构件铸件本体在凝固过程中没有孤立液相区，为后续的缩松和缩孔的优化提供了理论基础，且因为组型及后续的生产方案设计问题，整体浇注过程中金属利用率提高至26.7%。

由图10优化浇冒方案的缩孔分布图可知，条形结构件铸件本体基本无缩孔，只有部分厚大部位凸台处还存在部分不大于 0.03 cm^3 的缩孔，与初始方案的 3.28 cm^3 的缩孔相比，整体缩孔大小减少了99.1%，根据经验可知，这些缩孔缺陷可在后续的热等静压工序中被压实。根据优化后的方案进行实际组型投产，生产出的条形结构铸件成形完整，铸件的表面无明显的流痕、冷隔和裂纹等缺陷，经过处理后的铸件经X射线检测，其检测结果与模拟结果基本吻合，铸件整体基

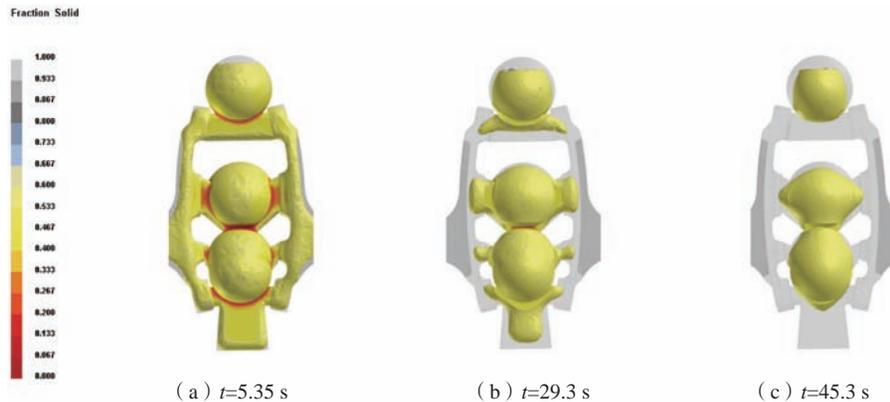


图9 优化浇冒方案凝固过程中热节随时间分布

Fig. 9 Temporal distribution of the hot spots in the optimized gating and riser system during solidification



图10 优化浇冒方案的缩孔分布图

Fig. 10 Distribution diagram of the shrinkage cavities for the optimized gating and risering scheme



图11 优化后条形结构件X射线检测

Fig. 11 X-ray inspection of the optimized bar-shaped structural components

本无缩孔，如图11所示，经后续检测生产的条形结构件满足技术协议要求，满足投产要求。

3 条形结构件实际生产铸件变形研究

3.1 条形结构件生产时的变形规律

以条形结构件热等静压后的状态为例，为了完成条形结构件变形规律分析，对热压后的铸件与生产加工时的铸件标准图进行最佳拟合分析，发现当铸件以头部区域为最佳拟合时，尾部区域发生变形；当铸件以尾部区域最佳拟合时，头部区域发生变形；当铸件以头部尾部同时最佳拟合时，铸件变形程度稍微变小，即在实际生产中，条形结构件的头部区域往一个方向偏移，偏移量约为0.3 mm，局部位置存在面缩；同一时间段压制的蜡模首尾件尺寸波动大；不同时间段压制的蜡模尺寸存在差异，稳定性差。

3.2 校形工装优化改进

目前现有的校形工装是一套可以同时校形4件条形

结构件，装炉数量少，工装空间利用率不高，在现有的小型工装的基础上，增加一个夹层，可以将校形数量由4件/套提高至8件/套，且可通过工装自重将变形量较大的铸件放置第二层，加大校形载荷量，增加变形较大铸件的一次校形合格率^[20]。优化后的校形工装如图12所示。

根据改进后的校形工装，选取8件不同变形量的条形结构件进行工装炉内校形，关注铸件4个位置的轮廓和位置要求，其中位置1、2的轮廓度要求为 ± 0.38 mm，位置3的轮廓度要求为 ± 0.76 mm，位置4的位置度要求为0.76 mm。

经过现有的工艺参数，即真空度 < 1 Pa开始升温，1 h 20 min升温至430 °C，25 min升至630 °C，保温30 min，15 min升至730 °C并保温，保温时间3 h，炉温降至500 °C下关闭真空泵，随炉冷却到250 °C以下方可出炉。

校形出炉后对这8件条形结构件进行扫描，扫描结果显示，8件中6件一次合格，其中两件因为打磨过量

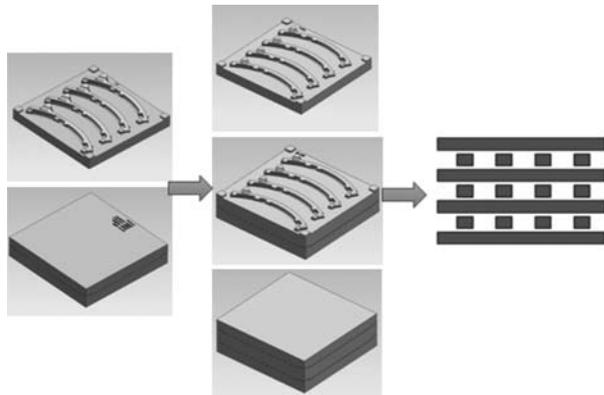


图12 校形工装优化示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the optimization of the shaping tooling

需要进行后续的补焊。其具体的尺寸如表3所示，相较于之前未校形的尺寸合格率，整体的一次合格率大大提升，达到了75%，放置校形工装后，铸件能够通过工装得到校正，即使有部分的铸件未能校正合格，但整体变形量减小。

因此，在对校形量数据的基础上进行分析，有些校形量小的铸件，容易被校形合格；有些变形量大的，在现有的校形工装的基础上，可以进行多次校形进行校正，整体的校形效率由一模四件提高至一模八件，效率提高了整整一倍，整体的一次校形合格率也

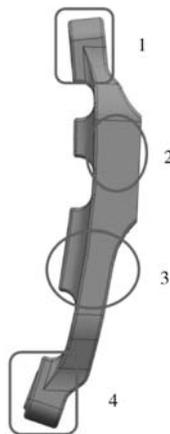


图13 条形结构件校形主要关注的轮廓位置

Fig. 13 Key contour locations of focus for the bar-shaped component shape correction

参考文献:

- [1] 潘龙, 武丽丽, 张益锋, 等. 稀土镁合金框架铸造工艺优化研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (8): 1165-1170.
- [2] 孟祥林, 刘锦辉. 基于ProCast和SLS的燃烧室机匣铸造工艺优化 [J]. 长春大学学报, 2023, 33 (12): 1-7.
- [3] ZOHREHSADAT N, BEHZAD N, MASOUD P, et al. A new generation of metal chillers to control the solidification structure of Al-4.5 wt%Cu alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 2488-2503.
- [4] 梁军. 铝合金减震塔压铸工艺设计与优化 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- [5] 蒋梦麒, 陈双, 齐兵, 等. 基于ProCast的支座件熔模铸造浇注系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (4): 978-982.

表3 不同变形量条形结构件校形前后尺寸变化
Tab. 3 Dimensional changes of the bar-shaped component with varying deformation amounts before and after shape correction

件号	状态	位置1/mm	位置2/mm	位置3/mm	位置4/mm
1	校形前	0.56	1.65	-1.56	合格
	校形后	0.45	1.11	-1.20	合格
2	校形前	合格	0.58	合格	2.4
	校形后	合格	合格	合格	合格
3	校形前	合格	0.7	合格	2.0
	校形后	合格	合格	合格	合格
4	校形前	0.7	1.9	-1.6	2.0
	校形后	合格	合格	合格	合格
5	校形前	合格	0.46	合格	1.1
	校形后	合格	合格	合格	合格
6	校形前	合格	合格	-0.9	1.5
	校形后	合格	合格	合格	合格
7	校形前	1.1	2.0	合格	1.4
	校形后	0.65	0.65	合格	合格
8	校形前	0.44	0.65	合格	1.4
	校形后	合格	合格	合格	合格

因校形工装自重的增加提高到了75%，缩短了生产周期，整体铸件生产周期由116天降低至90天，实现铸件稳定批量生产。

4 结论

(1) 基于ProCast对条形结构件进行充型凝固分析，对初始浇注系统进行优化，整体缩孔大小由 3.28 cm^3 减小到 0.03 cm^3 ，整体减小了99.1%。

(2) 针对生产过程中条形结构件变形的情况，对变形情况进行分析并改进现有变形工装，提高了装炉的数量，使工装利用率提高100%。

(3) 针对条形结构件铸件不同的变形量，变形量小的铸件，可以通过现有工装进行一次校形合格，而某些变形量比较大的铸件，很难通过一次校形合格的，可以多次校形进行校正，从而达到尺寸合格要求。

- [6] LIN P, LIN N. Low pressure casting technology and forming process analysis of metal mold based on ProCast FEA procedure [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29 (9): 1308–1315.
- [7] 贾士艳, 王安国, 张峻槐, 等. 铝合金叶轮铸造工艺研究 [J]. *铸造*, 2022, 71 (12): 1585–1591.
- [8] 宁兆生, 宋克兴, 张彦敏, 等. 高精度钛合金叶轮熔模精密铸造工艺优化 [J]. *铸造*, 2022, 71 (6): 751–754.
- [9] HUZENG Z, LEI X, YANJUN H, et al. The effect of micro-nano TKX-50 particle gradation on the properties of TNT based castable explosives [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2023, 41 (4): 465–482.
- [10] MITIN E V, SUL'DIN S P, KELDUNOVA V V. Simulation of casting by means of ProCast design software [J]. *Russian Engineering Research*, 2023, 43 (7): 815–817.
- [11] 李锦东. 铝合金大壁厚差支架挤压铸造工艺设计及数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [12] 陈方桃. 基于ProCast的排气机匣熔模铸造数值模拟与优化 [J]. *铸造*, 2022, 71 (1): 99–102.
- [13] ERDAKOV N I, IVANOV A V, VYBOISHCHIK V A. Forecasting the structure and the hindered contraction of casts by using the ProCast system of engineering analysis [J]. *Materials Science Forum*, 2019, 4726: 661–667.
- [14] 高浩斐, 屈银虎, 钟涛, 等. 基于ProCast的阀体零件熔模铸造工艺优化 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41 (5): 657–660.
- [15] 王伟, 崔晓明, 石博, 等. 铝合金轮毂连接盘挤压铸造数值模拟 [J]. *铸造*, 2021, 70 (3): 306–310.
- [16] 周涛, 龚海军, 李欢, 等. 铝合金凸轮轴盖压铸模浇注系统设计 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40 (11): 1244–1248.
- [17] BONDARENKO A Y, ECHIN B A, BAZHENOV E V, et al. Simulation of the temperature distribution on the mold surface and inside casting during high-gradient directional solidification [J]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2017, 58 (5): 481–488.
- [18] 史东丽, 钱坤才. 大型高铬铸铁叶轮凝固过程应力场数值模拟及铸造工艺优化 [J]. *铸造*, 2020, 69 (9): 972–976.
- [19] 李春玲. 基于ProCast分析的汽车轮毂成形工艺及模具设计 [J]. *模具技术*, 2020 (4): 19–27.
- [20] HUANG W, SHEN M H, HU J M, et al. A Pre-processing method of ProCast based on Pro/E and hyper mesh [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3337 (597): 203–207.

Analysis and Optimization of Casting Process for Titanium Alloy Bar Structural Components

MA Jing^{1,2}, WANG Lin-chun^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}, CUI Xin-peng³, LI Feng³, LI Xin-lei^{1,2}, ZHAO Rui-bin^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd., Beijing 100095, China; 2. Beijing Engineering Technology Research Center for Advanced Titanium Alloy Precision Forming, Beijing 100095, China; 3. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

This study addresses the issues of prolonged production cycles and severe casting defects in a titanium alloy bar-shaped component, including springback deformation, batch bulging, cracks, and incomplete filling. Process improvements and cost-efficiency optimization were carried out. The ProCast software was utilized to analyze the filling and solidification processes of the bar-shaped component, predicting shrinkage porosity defects. Based on the results of the initial design, the gating and riser system was optimized. The final optimized design reduced the shrinkage porosity volume to 0.03 cm³, which was a 99.1% reduction compared with the initial scheme. Combined with improvements in the bar-shaped component calibration tooling, the production cycle was shortened from 116 days to 90 days. The castings exhibited excellent formability, free from defects such as bulging and sand inclusions. Minor shrinkage pores could be compacted via hot isostatic pressing (HIP), enabling stable and mass production of the castings.

Key words:

ProCast; precision casting; titanium alloy; numerical simulation; shrinkage porosity