

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3046

行星架铸件成型数值模拟及缺陷精准调控

陈 烜¹, 徐 哲², 刘 琨¹, 蒋 崑², 薛 雨¹, 付 珂², 赵永柱², 吕复强², 陈 正²

(1. 常熟天地煤机装备有限公司, 江苏常熟 215500; 2. 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏徐州 221008)

摘要:行星架是采煤机齿轮传动系统中承受转矩、动载的关键传动件,使用中常多发裂纹缺陷而导致报废。基于此,针对采煤机齿轮传动用行星架的铸造工艺方案,利用 ProCAST 软件研究行星架铸件在充型和凝固过程中的温度场、速度场、凝固固相率及缩松缩孔分布等模拟结果,对铸造方案进行了优化。结果表明,添加明冒口和冷铁后,行星架的缩松缩孔等缺陷得到了有效控制,行星架侧板部分缺陷减少 57%以上,柱状部分缺陷完全避免,有效指导了煤机齿轮传动用行星架缩松类缺陷的防治,进而从根本上解决多发裂纹的问题。

关键词: ProCAST; 行星架; 数值模拟; 铸造缺陷

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)04-0388-07

Numerical Simulation and Accurate Defect Control of Planetary Carrier Casting Molding

CHEN Xuan¹, XU Zhe², LIU Kun¹, JIANG Wei², XUE Yu¹, FU Ke²,
ZHAO Yongzhu², LYU Fuqiang², CHEN Zheng²

(1. Changshu Tiandi Coal Mining Equipment Co., Ltd., Changshu 215500, China; 2. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The planetary carrier is the key transmission component that bears torque and dynamic load in the gear transmission system of the shearer. In recent years, it has often been scrapped due to multiple cracks, which are directly related to casting defects. Based on this, a reasonable casting process plan is proposed for the planetary carrier used for the gear transmission of the shearer. Using ProCAST software, the simulation results of the temperature field, velocity field, solidification solid rate and shrinkage cavity distribution of planetary carrier casting during mold filling and solidification were studied, and the casting scheme was optimized according to the simulation results. The results show that after the addition of open risers and cold iron, the shrinkage porosity and other defects of the planet carrier are effectively controlled, the partial defects of the side plate of the planet carrier are reduced by more than 57%, and cylindrical defects are completely avoided. The casting simulation effectively guides the prevention and treatment of shrinkage porosity defects of planetary carriers used for coal engine gear transmission and fundamentally solves the problem of multiple cracks.

Key words: ProCAST; planetary carrier; numerical simulation; casting defects

行星架作为采煤机齿轮传动系统中的重要组成部分,是典型的承受转矩、动载的传动件,具有较高的强度与刚度^[1-4]。在制造过程中如果采用整体锻造,后续精加工切削量大,因此一般使用砂型铸造^[1]或者焊接制造出结构和尺寸接近的成品毛坯^[5-7]。行星架主要受力区域的铸造缺陷率决定了其是否可以满足长期在煤矿井下工作且免维护的要求。行

星架在铸造过程中常见的缺陷主要有气孔、缩松缩孔、夹杂夹砂等,而这些缺陷出现的原因各不相同:①对于行星架铸件内部的气孔,主要是因为铸造工艺设计不完善或铸型存在较大水分,当金属液凝固收缩时,气体无法及时逸出,从而在铸件内部形成气孔;②当行星架壁厚或高度较大时,行星架铸件的热节处(金属液最后凝固区域)无法得到足够的金属液

收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2001204); 中煤科工集团上海有限公司科研开发项目(02090804822Y)

作者简介: 陈 烜, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事煤矿机械及金属材料方面的工作。

通讯作者: 陈 正, 1980 年生, 博士, 教授, 研究方向为非平衡相变热-动力学, 非晶、高熵等亚稳新材料设计及功能性, 特种铸造工艺及模拟研究。Email: chenzheng1218@163.com

引用格式: 陈烜, 徐哲, 刘琨, 等. 行星架铸件成型数值模拟及缺陷精准调控[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 388-394.

CHEN X, XU Z, LIU K, et al. Numerical simulation and accurate defect control of planetary carrier casting molding[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 388-394.

补缩,从而导致该区域组织中出现细小并分散的孔洞,即缩松缩孔;③在行星架铸件制备砂型和浇注过程中,如果未及时清理铸型中的铁液渣质,或用高速金属液冲刷型腔表面,都会导致铸件内部出现铁液渣和砂粒,即夹杂夹砂。当行星架在实际生产中承受重载,这些缺陷可能会成为裂纹源并降低其整体力学性能,最终导致行星架整体性失效。因此,如何高效且低成本地减少铸件在铸造过程中的缺陷,以及针对不同结构尺寸的铸件设计合理的浇注系统并保证其使用质量,对企业来说极为重要^[8-11]。

随着近些年模拟仿真技术的兴起,铸造行业也步入了智能铸造阶段,铸造数值模拟逐渐从充型凝固过程扩展到生产全流程的模拟仿真,并在指导实际生产中发挥着越来越重要的作用。徐超等^[12]通过 ProCAST 软件对压气机叶轮进行低压铸造数值模拟,分析充型压力对孔隙体积、卷起氧化残渣等级和二次枝晶臂间距的影响,试铸后铸件表面白光检查合格,无影响强度及品质的缺陷。张东生等^[13]采用 ProCAST 软件对 A356 铝合金轮毂进行铸造过程模拟,研究浇注温度及保压时间对成形质量的影响,并利用优化参数对轮毂进行试制,对其成形质量及组织性能进行分析,结果发现软件模拟出的铸件缺陷位置与生产铸件一致,并且优化后的铸造工艺对铸件缺陷改进帮助较大。因此,通过数值模拟可以预测铸造过程中缩松缩孔等缺陷的大小及位

置,以图片或动画的形式直观地展现出来,企业可以根据模拟结果分析,及时修改铸造工艺,降低试错成本^[14-18]。

本文以某行星架为研究对象,根据其形状特点设计铸造工艺,并利用 ProCAST 软件进行有限元模拟,根据模拟结果进一步优化铸造方案,以指导行星架的实际铸造过程。

1 铸造工艺设计与数值模型的建立

1.1 行星架三维模型设计与网格划分

图 1 为行星架铸件及其浇注系统的三维图像及尺寸。该铸件中部由 4 块侧板连接上下两部分。由于 4 块侧板和上部法兰盘壁厚较小,如果采用顶注式浇注,该部分金属液冷却凝固速度远大于行星架上部圆柱,导致铸件内部补缩通道阻断,使行星架侧板及底部法兰盘极易出现缩松、缩孔等缺陷。因此,该铸件采用底注式浇注,且由于铸件尺寸大,为了满足铸件生产精度要求,采用一模一箱的生产工艺。

将三维模型导入 MeshCAST 进行网格划分和修复,为了保证模拟精度,铸件的网格划分较小。行星架铸件及浇注系统网格划分如图 2 所示,体网格数约为 132 万。

1.2 材料热物性参数及模拟参数设置

铸件材质为 ZG42CrMo,具体化学成分如表 1 所示。铸型材料为 Resin Bonded Sand,铸件与铸型

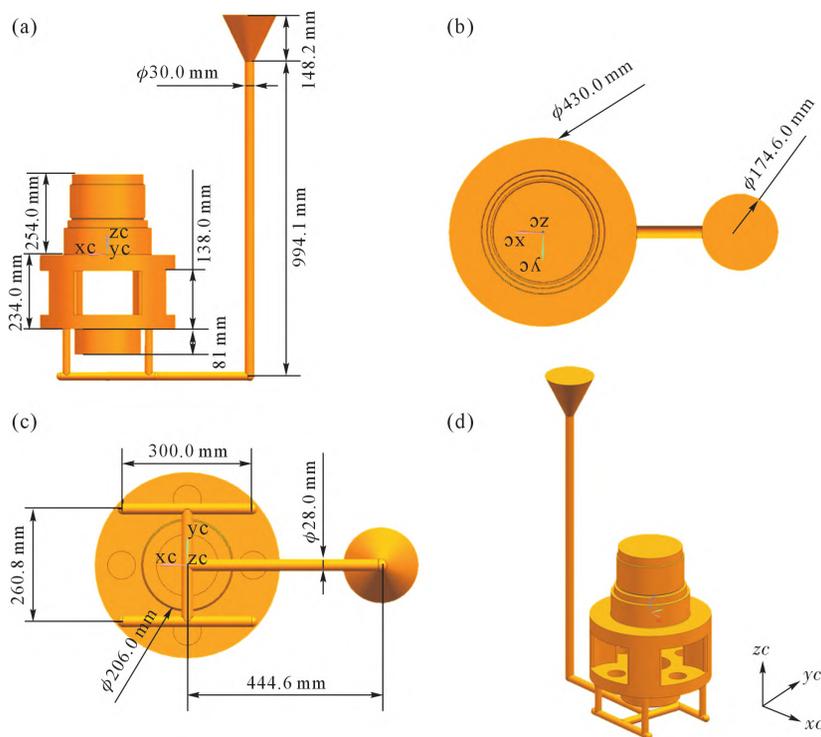


图 1 行星架铸件及浇注系统的三维结构:(a) 正视图;(b) 俯视图;(c) 底视图;(d) 整体视图

Fig.1 Three-dimensional structure diagram of the planetary carrier casting and gating system: (a) front view; (b) top view; (c) bottom view; (d) overall view

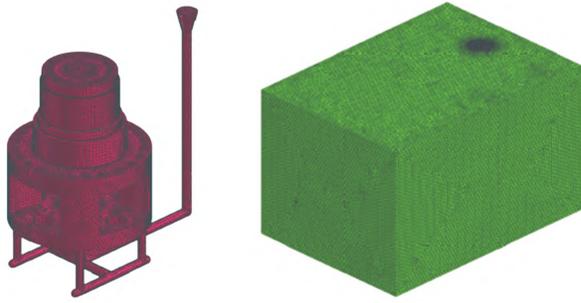


图2 行星架铸件及浇注系统网格划分
Fig.2 Schematic diagram of the grid division of the planetary carrier casting and gating system

表1 ZG42CrMo化学成分
Tab.1 Chemical composition of ZG42CrMo (mass fraction/%)

C	Mn	P	S	Si	Cr
0.42	0.6	0.01	0.027	0.3	1

之间接触面重合网格类型为 COINC(不同材料相界面), 换热系数设为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})^{[19]}$ 。采用砂型重力铸造, 铸型初始温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 金属液浇注温度设为 $1500 \text{ }^\circ\text{C}^{[20]}$, 浇注时间为 12.3 s , 砂箱冷却方式为空冷。使用 ProCAST 软件内置数据库计算的材料热物性参数如图 3 所示。

2 初步模拟结果及分析

2.1 充型过程分析

在充型过程中, 温度场和速度场同时变化。温度场的变化直接影响凝固和冷却过程, 通过速度场的分布和冷却凝固分析偏析微观结构。在模拟充型

过程中, 通过实时动画分析铸件容易出现缩松、缩孔等缺陷的位置, 并根据各项物理场参数对后续工艺设置进行优化。

充型速度场包含了铸造过程中, 熔融金属液流经浇口系统并进入型腔的速度大小和方向, 图 4 为行星架充型过程速度场。当铸件充型 10%(图 4a)时, 直浇道和横浇道中的金属液流速比较大, 通过设计的 4 根内浇道逐步减慢其流动速度, 防止出现卷气和夹渣。当铸件充型 30%(图 4b)时, 金属液上升速度趋于平缓, 有助于减少铸造缺陷。

充型过程中的温度场变化可以反映金属液流动过程的温度差异, 图 5 为行星架充型过程的温度场。通过充型温度场和速度场可以确定, 底注式浇注方式很好地满足了该行星架的浇注过程, 浇注过程整体平稳, 最后凝固部分可以确定为行星架顶部柱体。

2.2 凝固过程分析

2.2.1 凝固过程温度场

凝固过程温度场变化是产生缩松缩孔的重要参考, 同时可以预测铸件凝固顺序, 反映铸件热节部位。图 6 为行星架铸件凝固过程中的温度场。从图 6a 可以看到, 当铸件和浇注系统整体凝固 50%时, 法兰盘边缘最先开始凝固, 然后是行星架的 4 个侧板; 当铸件整体凝固 80%(图 6d)时, 铸件顶部温度仍然很大, 此处容易出现热节, 且由于侧板部分的凝固阻断了行星架顶部的补缩, 铸件顶部大概率会出现缩松、缩孔等缺陷^[21-22]。

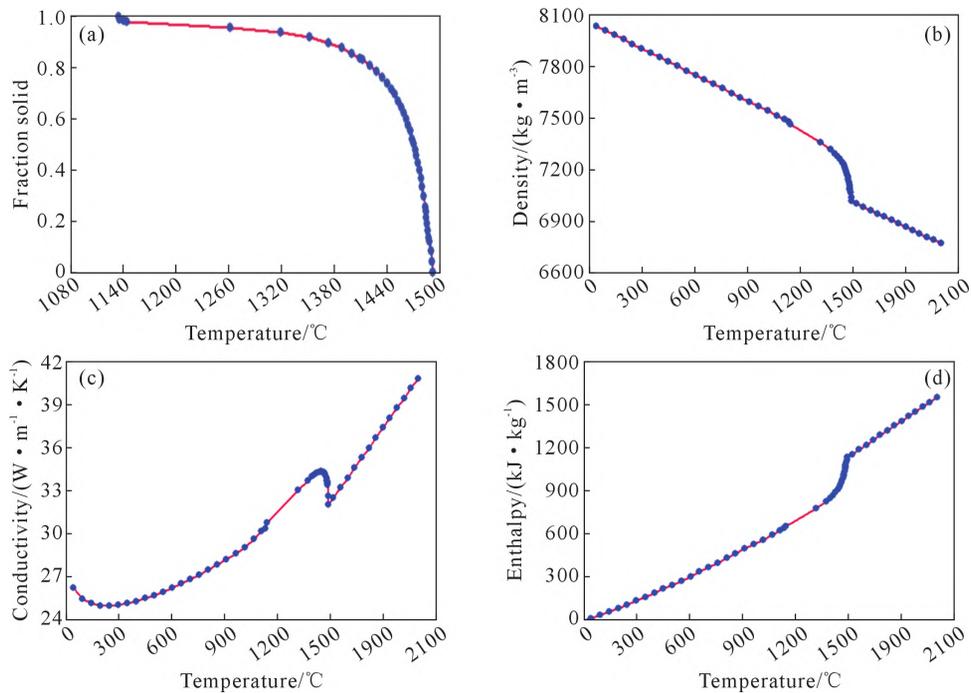


图3 ZG42CrMo 热物理性参数: (a) 固相率; (b) 密度; (c) 热导率; (d) 热焓
Fig.3 Thermophysical parameters of the ZG42CrMo: (a) solid fraction; (b) density; (c) conductivity; (d) enthalpy

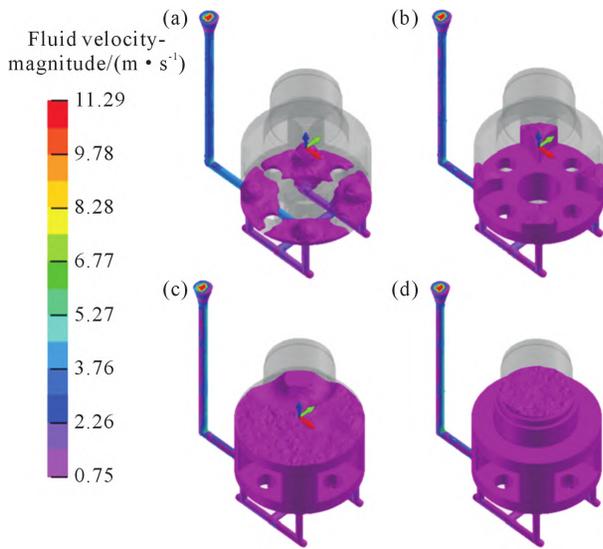


图 4 行星架铸件充型过程速度场:(a) 充型 10%;(b) 充型 30%;(c) 充型 50%;(d) 充型 80%

Fig.4 Velocity field during the filling process of planetary carrier castings: (a) filling 10%; (b) filling 30%; (c) filling 50%; (d) filling 80%

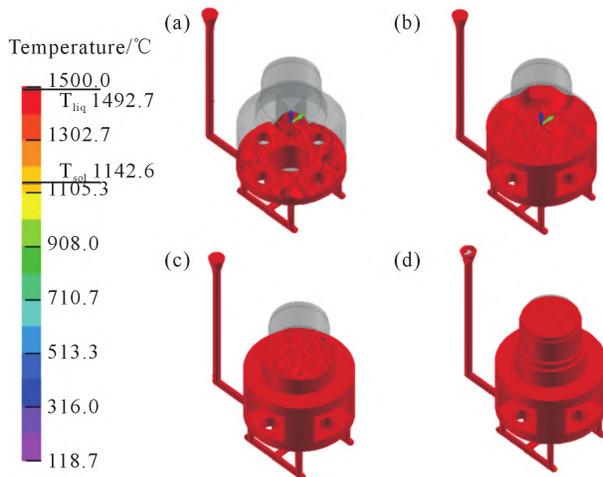


图 5 行星架铸件充型过程温度场:(a) 充型 25%;(b) 充型 50%;(c) 充型 75%;(d) 充型 100%

Fig.5 Temperature field during the filling process of planetary carrier castings: (a) filling 25%; (b) filling 50%; (c) filling 75%; (d) filling 100%

2.2.2 顺序凝固过程

对铸件顺序凝固过程观察发现,金属液在一些孤立区域凝固时,因为没有以互补的方式收缩,这些区域很可能产生缺陷。图 7 为行星架铸件凝固过程中的固相率。当铸件凝固 20%(图 7a)时,上层和下层的法兰盘边缘固相率已达到 100%,而行星架侧板内固相率只有 40%左右,仍存在一定的金属液,导致侧板内部无法补缩,产生缺陷。从图 7c 看到,行星架底部已经凝固完成,顶层中心仍存在红色区域,有较大热节。凝固末期,行星架顶部形成孤立液相区,进而无法正常补缩。综上,铸件中下部法兰盘由于壁

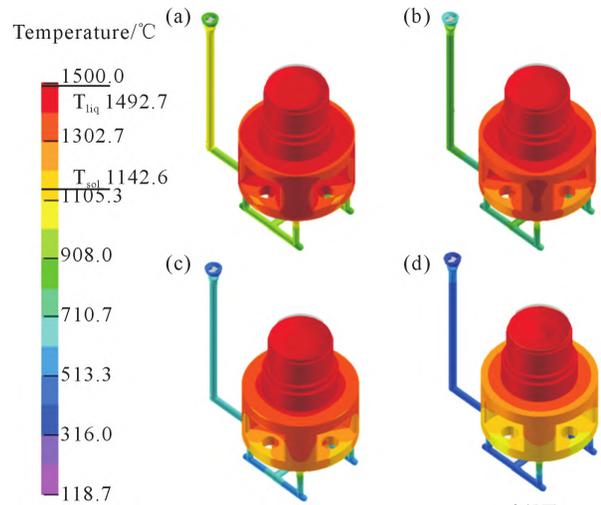


图 6 行星架铸件凝固过程温度场:(a) 凝固 50%;(b) 凝固 60%;(c) 凝固 70%;(d) 凝固 80%

Fig.6 Temperature field during the solidification of planetary carrier castings: (a) solidified 50%; (b) solidified 60%; (c) solidified 70%; (d) solidified 80%

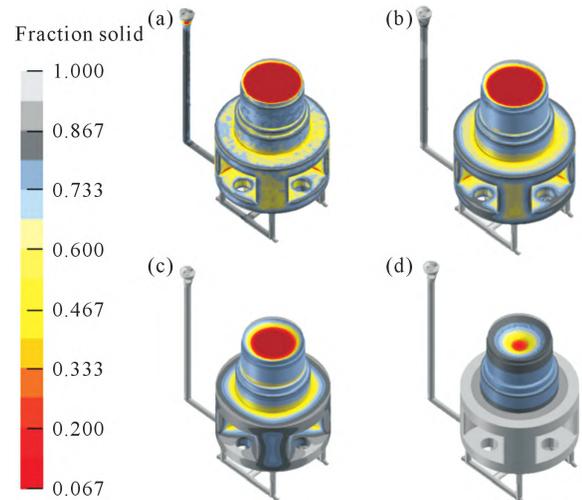


图 7 行星架铸件凝固过程中的固相率:(a) 凝固 20%;(b) 凝固 40%;(c) 凝固 60%;(d) 凝固 80%

Fig.7 Solid fraction during the solidification of planetary carrier castings: (a) solidified 20%; (b) solidified 40%; (c) solidified 60%; (d) solidified 80%

厚较小,最先开始凝固,导致行星架侧板和顶部无法补缩,产生缺陷。

2.3 缺陷分析

图 8a 为行星架缺陷分布示意图,其中行星架上部柱体中缺陷体积为 124.118 828 cm³,侧板中缺陷体积为 75.494 537 cm³。从图 8 中的缺陷分布可以验证之前的分析,由于法兰盘部分壁厚较小,导致其在凝固初期优先凝固,使行星架侧板和顶部圆柱的补缩通道被阻断,且圆柱部分较厚,内外凝固速率不同,有较大热节,金属液无法补缩导致这两部分缺陷产生。

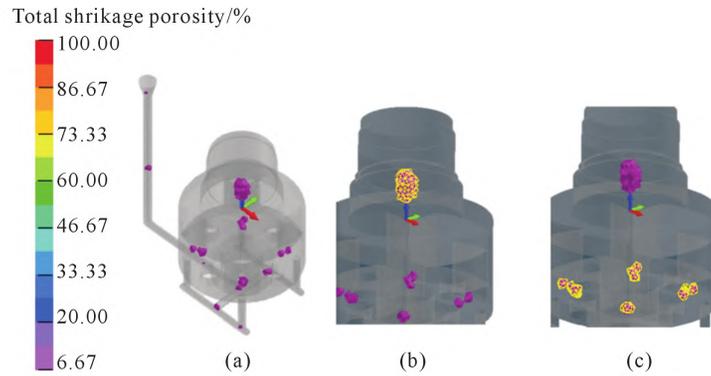


图8 行星架铸件缺陷分布:(a)缺陷整体分布情况;(b)行星架顶部缺陷分布情况;(c)行星架侧板区缺陷分布情况
Fig.8 Planetary carrier casting defect distribution: (a) overall distribution of defects; (b) distribution of defects on top of the planet carrier; (c) distribution of defects in the side plate area of the planet carrier

3 铸造工艺改进

3.1 工艺优化方案

根据模拟分析,对铸件进行工艺改进。为了减少行星架顶部圆柱内部的缺陷,添加明冒口对其进行补缩。在行星架底部添加冷铁,加快侧板的凝固速度,达到减少缺陷的目的。具体工艺优化方案,冒口及冷铁尺寸如图9所示。

3.2 优化方案模拟结果分析

3.2.1 凝固过程分析

图10为工艺优化后行星架凝固过程的温度场。可以看出,添加冒口和冷铁后,铸件整体遵循从下到上的凝固顺序。当铸件整体凝固75%(图10c)时,行星架中下部分温度已降低到42CrMo液相线以下,而顶部柱状部分和冒口温度相比其他区域高,倾向于最后凝固,这有利于减少行星架顶部柱状区域内部的缺陷;当铸件整体凝固60%(图11c)时,行星架侧板部分已经凝固成型,而未添加冷铁时,侧板仍存

在金属液残留,如图7c所示,因此行星架底部放置的柱状冷铁可以有效促进侧板部分的凝固。冷铁和冒口的配合使用,强化了铸件的顺序凝固,可有效防止缩松缩孔等缺陷产生,提高铸件的工艺出品率。

3.2.2 缩松缩孔缺陷控制

图12为优化工艺后行星架整体的缺陷分布及大小。添加冒口后,行星架顶部柱状部分缺陷全部转移至冒口中。侧板部分的缺陷体积大小为31.947 390 cm³,较未优化前降低57.68%,说明冒口和冷铁的配合使用起到了良好的冷却和补缩作用,减少了铸件内部缺陷。图13为工艺改进后实际试铸的行星架铸件及其缺陷微观分析,在图13b的黑框中可以明显看到侧板与底法兰盘连接处有裂纹,此处缺陷是由于侧板与底法兰盘处存在较大热节,使得连接处内部产生缩松缩孔等缺陷,导致铸件在侧板与法兰盘连接处出现裂纹。图13c为连接处部分微观分析,可以明显看到缩松缩孔等缺陷,这也验证了模拟的准确性。

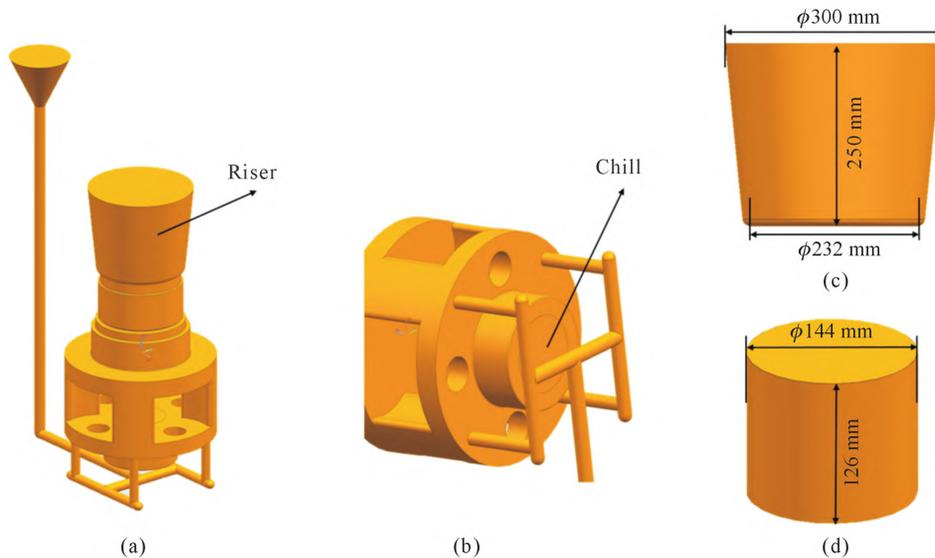


图9 工艺优化方案:(a)冒口位置;(b)冷铁位置;(c)冒口尺寸;(d)冷铁尺寸
Fig.9 Process optimization plan: (a) location of the riser; (b) location of chill; (c) size of the riser; (d) size of the chill

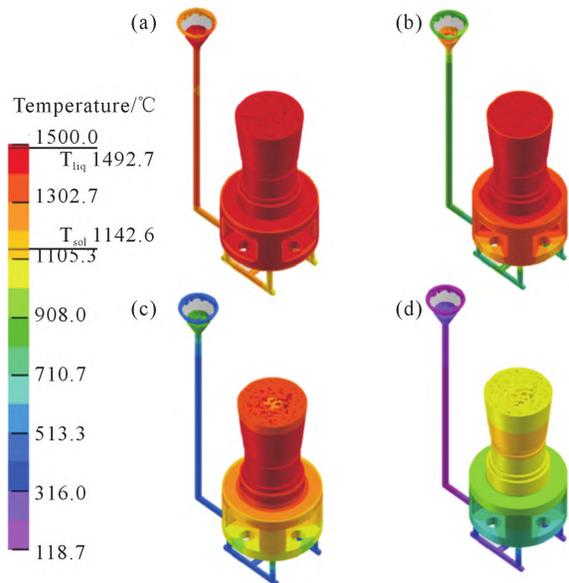


图 10 工艺优化后行星架铸件凝固温度场:(a) 凝固 25%; (b) 凝固 50%;(c) 凝固 75%;(d) 凝固 100%
Fig.10 Solidification temperature field of planetary carrier castings after process optimization: (a) solidified 25%; (b) solidified 50%; (c) solidified 75%; (d) solidified 100%

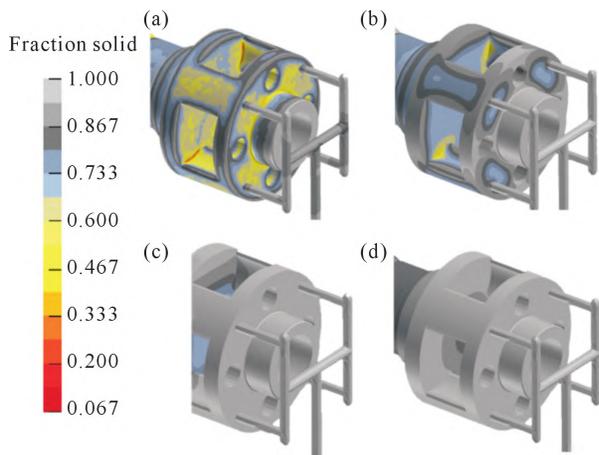


图 11 工艺优化后行星架铸件凝固过程中固相率:(a) 凝固 20%;(b) 凝固 40%;(c) 凝固 60%;(d) 凝固 80%
Fig.11 Solid fraction during the solidification of planetary carrier castings after process optimization: (a) solidified 20%; (b) solidified 40%; (c) solidified 60%; (d) solidified 80%

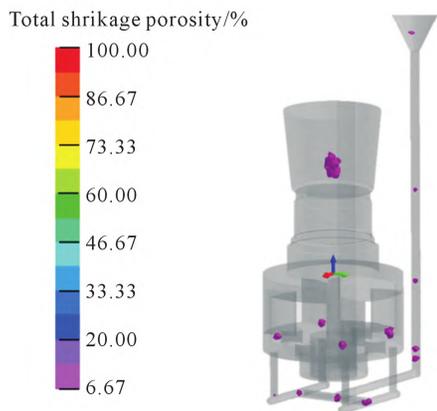


图 12 工艺优化后行星架铸件缩松缩孔大小及分布
Fig.12 Size and distribution of shrinkage porosity and shrinkage hole in planetary carrier castings after process optimization

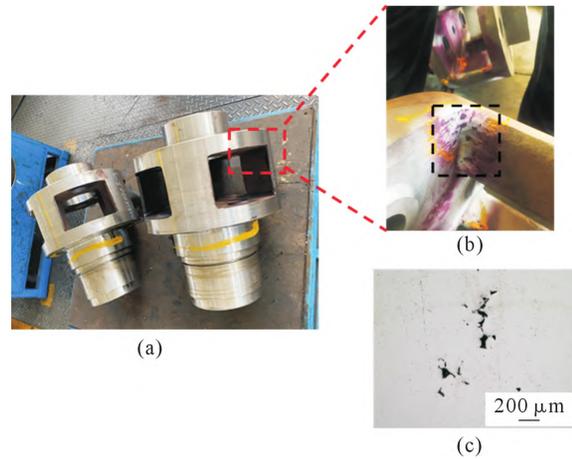


图 13 工艺改进后铸件毛坯:(a) 铸件毛坯;(b) 侧板与底法兰盘连接处缺陷;(c) 侧板与底法兰盘连接处缺陷微观分析
Fig.13 Casting blanks after process improvement: (a) casting blanks; (b) defects at the connection between the side plate and the bottom flange; (c) microscopic analysis of defects at the connection between the side plate and the bottom flange

4 结论

(1)通过预模拟发现行星架侧板底部与圆柱部分存在缩松缩孔缺陷,通过铸造模拟中的充型和凝固过程分析可知,缺陷的产生主要是因为下法兰盘部分壁厚较小,在凝固过程中优先凝固,阻断了侧板和顶部圆柱部分的补缩通道。

(2)结合行星架的铸造模拟分析,通过添加冒口和冷铁,使行星架顶部柱状区域缺陷完全转移至冒口,侧板部分缺陷消除 57%以上。

参考文献:

- [1] 袁岳东. 采煤机行星架铸造工艺优化[J]. 金属加工(热加工), 2022 (9): 103-105.
YUAN Y D. Optimization of coal mining machine planetary carrier casting process[J]. MW Metal Working, 2022(9): 103-105.
- [2] 沙嘉熹,余勇,吴玉斌,等. 不同壁厚行星架附铸试块力学性能研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(4): 307-310.
SHA J X, YU Y, WU Y B, et al. Study on mechanical properties of test blocks with different wall thickness attached to planetary carrier[J]. Foundry Technology, 2022, 43(4): 307-310.
- [3] 朱子江,刘思沾,侯佳兵,等. 大型铸钢行星架的数值模拟及工艺优化[A]. 第十七届中国 CAE 工程分析技术年会论文集[C]. 北京:中国力学学会产学研工作委员会, 2021: 5.
ZHU Z J, LIU S Z, HOU J B, et al. Numerical simulation and process optimization of large cast steel planetary carrier[A]. Proceedings of the 17th annual China CAE engineering analysis technology conference[C]. Beijing: Industry-University Research Committee of the Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2021: 5.
- [4] 徐超,季德生,李嘉倩. 基于 ProCAST 的行星架铸造模拟及工艺优化[J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56(4): 41-46.

- XU C, JI D S, LI J Q. Casting simulation and process optimization of planet carrier based on ProCAST[J]. *China Foundry Machinery & Technology*, 2021, 56(4): 41-46.
- [5] 林增煌, 陈灿, 杨弋涛. 利用模拟软件辅助优化行星架的铸造工艺[J]. *现代铸铁*, 2018, 38(1): 73-79.
- LIN Z H, CHEN C, YANG Y T. Casting method optimization of the planet carrier by help of simulation software[J]. *Modern Cast Iron*, 2018, 38(1): 73-79.
- [6] 王堃. 矿用刮板输送机行星架静力结构和模态分析[J]. *机械管理开发*, 2022, 37(11): 108-109, 114.
- WANG K. Static structural and modal analysis of the planetary frame of a mining scraper conveyor[J]. *Mechanical Management and Development*, 2022, 37(11): 108-109, 114.
- [7] 李嘉倩, 季德生, 徐超, 等. 大型行星架铸钢件浇注系统设计[J]. *大型铸锻件*, 2021(3): 13-14, 18.
- LI J Q, JI D S, XU C, et al. Design of gating system for steel casting of large planetary frame [J]. *Heavy Casting and Forging*, 2021 (3): 13-14, 18.
- [8] KUMAR R, MADHU S, ARAVINDH K, et al. Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using ProCAST software for defect minimization[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22: 799-805.
- [9] 刘秀华. 基于 ProCAST 有限元模拟对衬板铸造工艺参数的优化[J]. *铸造技术*, 2019, 40(7): 675-678.
- LIU X H. Optimization of lining casting process parameters based on ProCAST finite element simulation[J]. *Foundry Technology*, 2019, 40(7): 675-678.
- [10] 傅骏, 邓媛媛, 邓小明, 等. 大功率风力发电机行星架铸造生产实践[J]. *铸造技术*, 2013, 34(5): 650-651.
- FU J, DENG Y Y, DENG X M, et al. Production of high-power wind turbine carrier by cast[J]. *Foundry Technology*, 2013, 34(5): 650-651.
- [11] 李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 201-220.
- LI R. Casting process simulation ProCAST from beginner to master[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010: 201-220.
- [12] 徐超, 韩雨哲. 压气机叶轮低压铸造数值模拟[J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(1): 122-126.
- XU C, HAN Y Z. Numerical simulation of low pressure casting compressor impeller [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2023, 43(1): 122-126.
- [13] 张东生, 李世德, 徐佐, 等. A356 铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(6): 1720-1731.
- ZHANG D S, LI S D, XU Z, et al. Numerical simulation, microstructure and mechanical properties of low pressure die casting of A356 aluminum alloy wheel[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33(6): 1720-1731.
- [14] 周君华, 孙长波, 尚伟, 等. ProCAST 软件在熔模铸造工艺优化中的应用[J]. *材料科学与工艺*, 2013, 21(5): 109-112.
- ZHOU J H, SUN C B, SHANG W, et al. The application research of simulation technology in investment casting process[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 21(5): 109-112.
- [15] 孙治国. ProCAST 软件在铸造模拟中的应用[J]. *计算机光盘软件应用*, 2014(20): 77, 79.
- SUN Z G. Application of ProCAST software in casting simulation[J]. *Computer CD Software and Applications*, 2014(20): 77, 79.
- [16] 夏琨, 徐向阳, 段士伟. 基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J]. *铸造技术*, 2022, 43(5): 375-381.
- XIA K, XU X Y, DUAN S W. Numerical simulation of investment casting of rotor disc based on ProCAST[J]. *Foundry Technology*, 2022, 43(5): 375-381.
- [17] 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.
- HUANG J, ZHANG Y J, YIN Y J, et al. Numerical simulation and optimization of aluminum alloy transmission parts aeroengine based on InteCAST[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2019, 39(8): 846-849.
- [18] 魏冬冬, 徐贵宝, 张军, 等. 风电球墨铸铁行星架铸造工艺研究[J]. *铸造*, 2021, 70(10): 1233-1238.
- WEI D D, XU G B, ZHANG J, et al. Research on casting process of a ductile iron planet carrier for wind power generation [J]. *Foundry*, 2021, 70(10): 1233-1238.
- [19] 赵红乐, 张纬, 孟少峰, 等. 一种铸钢行星架产品的铸造工艺优化[J]. *铸造*, 2021, 70(11): 1356-1360.
- ZHAO H L, ZHANG W, MENG S F, et al. Casting process optimization of a cast steel planetary carrier[J]. *Foundry*, 2021, 70(11): 1356-1360.
- [20] 张玉磊, 张纬, 孟少峰, 等. 侧架铸造工艺数值模拟及优化研究[J]. *铸造技术*, 2021, 42(7): 606-608.
- ZHANG Y L, ZHANG W, MENG S F, et al. Numerical simulation and optimization of side frame casting process[J]. *Foundry Technology*, 2021, 42(7): 606-608.
- [21] 张云平. 基于 ProCAST 的制动铸件精确成形数值模拟与工艺提升[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(9): 97-103.
- ZHANG Y P. Casting numerical simulation of butterfly valve for exhaust brake based on ProCAST[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(9): 97-103.
- [22] 张孝元, 王孝国, 杨光印. 基于 ProCAST 的压壳铸造工艺设计及优化[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(7): 823-826.
- ZHANG X Y, WANG X G, YANG G Y. Design and optimization of shell-pressing casting process based on ProCAST software[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2022, 42(7): 823-826.