

基于ProCAST的Y型K4648高温合金结构件工艺研究

张浩正^{1,2} 司家勇¹ 朱春雷² 徐 坤² 盛凯英² 李培真³

(1. 中南林业科技大学机械与智能制造学院, 长沙 410004; 2. 青岛钢研德凯精铸有限公司, 青岛 266736; 3. 河北钢研德凯科技有限公司, 保定 072750)

摘 要 针对Y型K4648高温合金结构件出现缩松缺陷问题, 采用ProCAST软件对其充型过程、温度场、凝固过程以及缺陷等进行了模拟, 使用模数法设计浇注水口, 并进行试验验证。结果表明, 缺陷主要出现在补缩块和铸件交界处、铸件颈部壁厚部位、表面凸台和中间条状部位、两分支的连接处以及两分支薄壁区域。试生产结果表明, 所生产铸件无明显缺陷, 验证了模拟结果的准确性。

关键词 精密铸造; K4648镍基高温合金; 模数法; 数值模拟

中图分类号 TP311; TG146; TG132.3; TG249.5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240203

Process of Y-type K4648 Superalloy Parts Based on the ProCAST Software

ZHANG Haozheng^{1,2}, SI Jiayong¹, ZHU Chunlei², XU Kun², SHENG Kaiying², LI Peizhen³

(1. College of Mechanical and Intelligent Manufacturing, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; 2. Qingdao Gangyan Dekai Precision Casting Co., Ltd., Qingdao 266736; 3. Hebei Gangyan Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750)

Abstract: Aiming at the shrinkage defects of Y-type K4648 superalloy structural parts, ProCAST software was utilized to simulate the filling process, temperature field, solidification process and defects. The pouring nozzle was designed based on modular method, and the test was verified. The results reveal that the defects mainly occur at the junction between the reinforcing block and casting, wall thickness of casting neck, the surface convex and center strip, the joint of “two legs” and thin-wall area of branches. The product results indicate absence of obvious defects in the castings, verifying the accuracy of simulation results.

Key Words: Investment Casting, K4648 Nickel-based Superalloy, Modular Method, Numerical Simulation

随着工业的发展, 零件呈轻量化、结构复杂化和精度要求高等特点^[1], 这使得铸件成形难度增大, 特别是异型薄壁结构件的铸造工艺越来越复杂。精密铸造凭借生产铸件尺寸精度高、表面粗糙度低等特点成为铸造异型薄壁复杂结构件的重要工艺之一^[2]。浇注系统设计决定铸件内部品质^[3-7], 合理的浇注系统能消除铸件大部分缩松、缩孔缺陷。实际生产中, 浇注系统设计大多依靠实际经验, 需要不断进行试错^[8], 设计周期长、投入高。而借助计算机技术进行模拟能直观看到铸件充型、凝固以及冶金缺陷的分布情况, 根据缺陷情况来设计水口并对缺陷严重部分进行针对性的补缩, 能大幅缩短工艺设计时间, 降低试错成本。

Y型K4648高温合金结构件服役环境恶劣, 需要具有很强的耐高温稳定性和抗热疲劳开裂能力^[9-10]。该部件结构非常复杂, 并且壁厚差异较大, 铸造过程中极易

产生缩松和裂纹缺陷。此外, 该部件在凝固冷却过程中极易产生翘曲和变形, 尺寸精度难以控制, 因此优化设计浇注系统以获得缺陷较少的铸件十分重要。

本研究采用ProCAST软件对铸件进行模拟分析, 研究铸件的充型、温度场和凝固过程, 预测铸件缩松缺陷的分布情况, 并根据模拟结果采用模数法设计铸件补缩水口和浇注系统, 对浇注系统进行模拟分析以及试验验证, 旨在为该类Y型异形结构件的浇注系统设计提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验合金为K4648镍基高温合金, 其化学成分见表1^[11]。K4648合金属于高Cr镍基铸造高温合金, 其

收稿日期: 2024-05-13; 修订日期: 2024-08-13

第一作者简介: 张浩正, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: 1418196742@qq.com

通信作者: 司家勇, 男, 1978年出生, 教授, E-mail: sjy98106@163.com

引用格式: 张浩正, 司家勇, 朱春雷, 等. 基于ProCAST的Y型K4648高温合金结构件工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 995-1 001.

ZHANG H Z, SI J Y, ZHU C L, et al. Process of y-type K4648 superalloy parts based on the ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 995-1 001.

主要适用于服役温度低于 1 000 ℃ 以下的零件制造^[12]。合金的综合力学性能和抗冷热疲劳性能较好、抗氧化和耐腐蚀性能优良,适用于制作航空、航天发

动机中承受高温、中等应力、抗氧化和耐腐蚀要求较高的零部件,主要产品有导向叶片、精铸导向器等零件。

表 1 K4648 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of K4648 alloy

w_B															
C	W	Mo	Nb	Ti	Al	Cr	Fe	B	Ce	Si	Mn	Y	S	P	Ca
0.03~0.10	4.60~5.50	2.30~3.50	0.70~1.30	0.70~1.30	0.70~1.30	32.0~35.0	≤0.05	≤0.008	≤0.03	≤0.30	≤0.03	≤0.04	≤0.01	≤0.01	≤0.02
余量															

1.2 模型建立及参数设置

采用 UG 软件建立铸件 3D 模型,见图 1。其中箭头指向部分为补缩块,作用相当于浇注系统中的浇冒口。模型建立完毕后输出 X_T 格式导入 ProCAST 软件中,采用 Mesh 模块对模型进行网格划分,见图 1c。为确保模拟结果准确性,网格划分时网格尺寸要小于

铸件的最小壁厚。但小尺寸的网格,会导致其网格数量较多,计算精度提高但计算量增大^[13]。故综合考虑,将铸件网格大小划分为 1 mm,数量为 273 796,型壳网格大小为 4 mm,数量为 291 592,体网格数量为 3 221 974。网格创建完毕后在 Cast 模块中进行模拟参数的赋值,其浇注条件见表 2。铸件与型壳、型壳与环境之间的界面传热系数分别设为 500、5 W/(m²·K)。

表 2 铸件模拟浇注参数

铸件材质	浇注温度/℃	型壳材料	型壳温度/℃	浇注时间/s	真空度/Pa
K4648	1440	莫来石	900	3	3

2 铸件模拟结果

2.1 充型过程

图 2 为铸件不同时刻的充型状态(分图从左到右依次为凸面、凹面和侧面模拟结果,下同)。可以看出,在 0.23 s 时,金属液从两个补缩块进入铸件,在铸件上部交汇并产生紊流,然后沿着内壁向铸件下部充型。

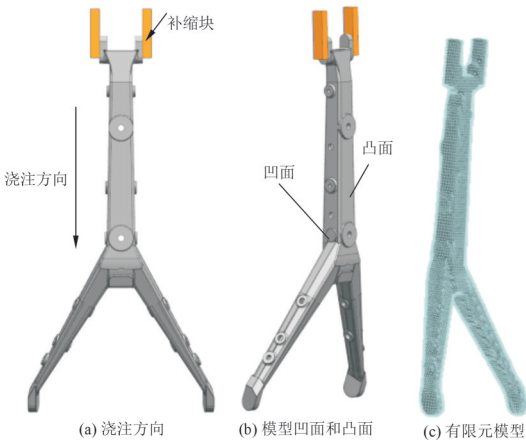


图 1 铸件 3D 模型及有限元模型
Fig.1 3D model and finite element model of castings

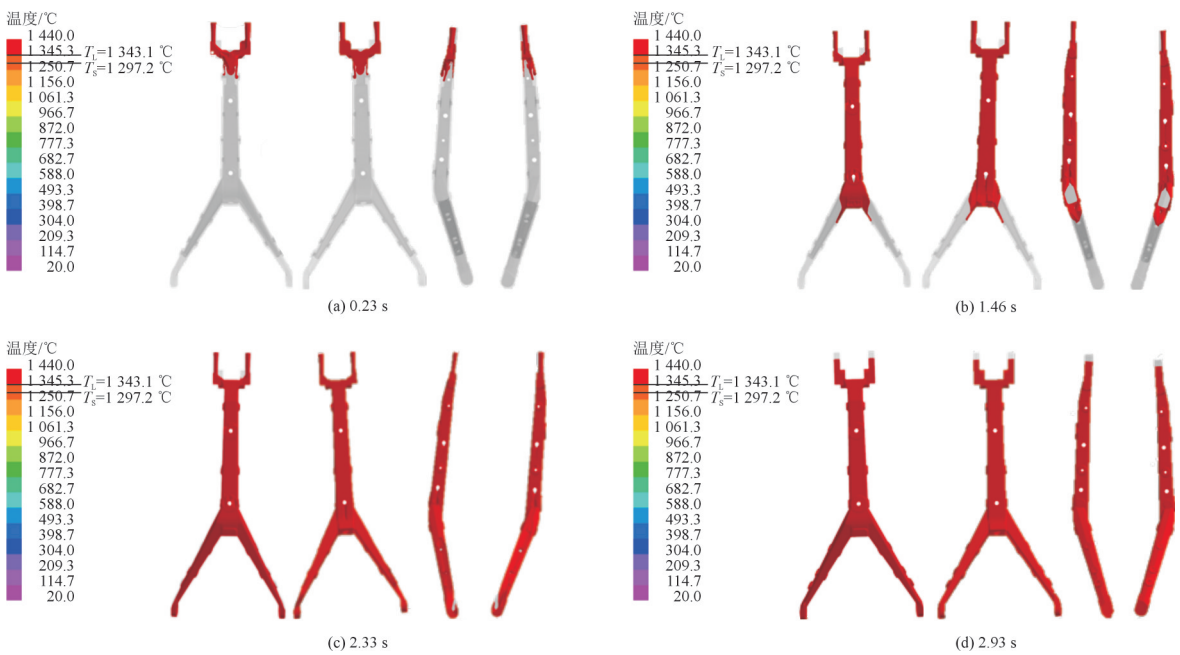


图 2 不同时刻的充型状态
Fig.2 Filling state at different moments

1.46 s时,铸件上半部分基本充型完毕,但铸件凸台部分以及凹面分支连接处明显充型不足;在2.33 s时,金属液在向上填充铸件“两条腿”的最外侧,直至2.93 s时铸件完成充型。整个充型过程不满足由下而上的充型顺序,且在铸件各个凸台和铸件两分支处易出现缩松、缩孔缺陷。

2.2 温度场

图3为不同固相分数时的温度场。可以看出,不同

凝固时刻的温度场分布大致相同,在铸件表面凸台部位以及厚壁部位都存在低温区域包围高温区域的情况,在后续的凝固过程中易出现缩松、缩孔缺陷。由充型过程可以知道,铸件两分支的充型顺序先是沿凸面、凹面以及侧面进行充型,随后对两分支底部进行充型,最后再充型外侧面。由于底部位置壁厚比侧面厚,所以在后续的凝固过程中温度梯度高于侧面温度,该部位也容易出现缩松、缩孔缺陷。

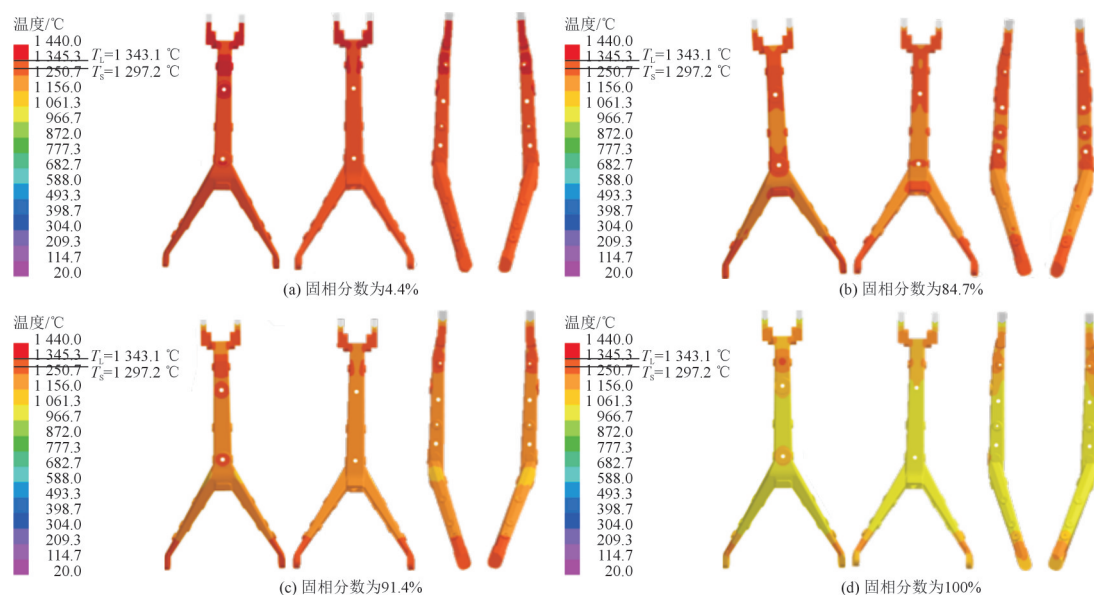


图3 不同固相分数的温度场

Fig.3 Temperature field with different solidification fractions

2.3 凝固过程

在凝固过程中温度梯度分布不均匀导致出现低温区域包围高温区域的孤立液相区,在后续凝固过程中

孤立液相区周围提前凝固,导致孤立液相区得不到金属液补充,从而形成缩松缺陷^[14-15]。图4为不同时刻的铸件固相分数图。可以看出,铸件在充型完成后的3.31 s开始凝固,此时凝固部位位于铸件两分支的侧面

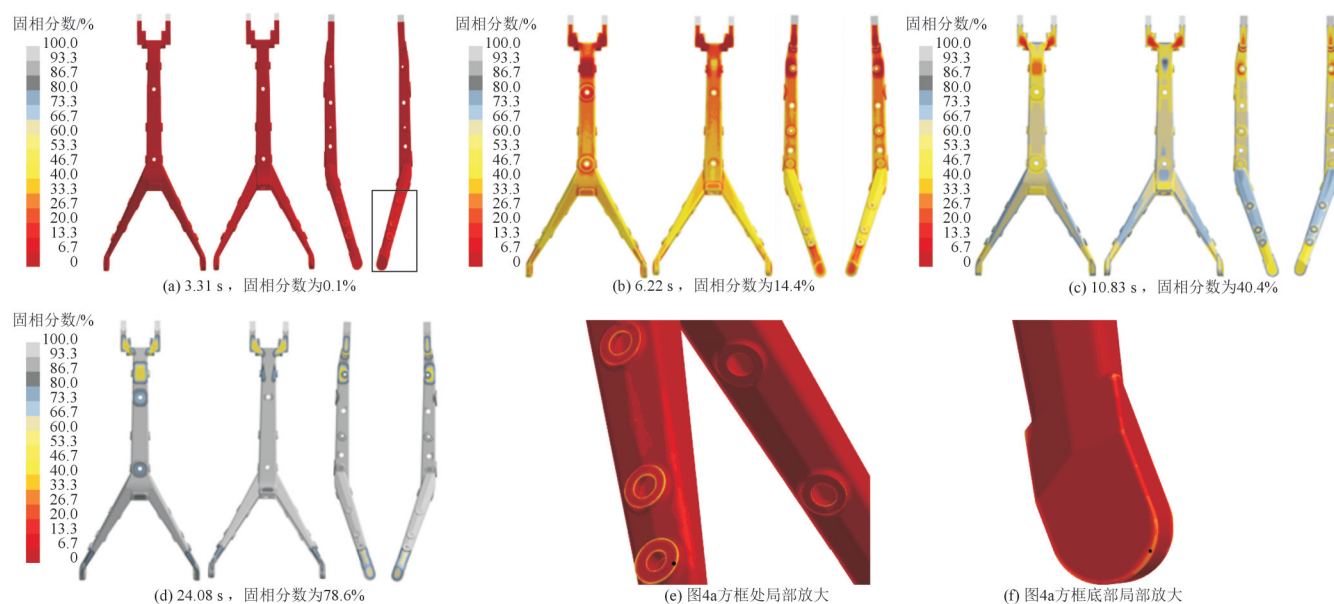


图4 不同时刻铸件的凝固场

Fig.4 Solidification field of the castings at different moments

凸台以及底部,见图4a方框处,局部放大图见图4e和图4f。当凝固时间为6.22 s时,铸件上半部分表面的所有凸台以及“颈部”的凸面和侧面均出现了孤立液相区,在铸件两分支的交汇处和底部区域都出现了孤立液相区。凝固时间为10.83 s时,除了上述部位外,在铸件的两分支的侧面凸台以及底部区域均出现了孤立液相区,且在铸件与补缩块连接部位出现了较严重的孤立液相区。凝固时间为24.08 s时,铸件大部分部位已经完全凝固,金属液基本无流动性,最终在80.33 s时铸件凝固完成。

2.4 缩松结果

采用Niyama缩松判据预测铸件内部缩松情况,通过有关研究可知镍基高温合金Niyama临界值为1.0~1.1^[16-18]。图5为缩松缺陷模拟结果。借助软件可知,缩松缺陷总体积为1.311 269 cm³,质量为0.001 574 g,缩松缺陷在铸件凸面与凹面分布情况一致,在铸件颈部厚壁区域出现大块缩松缺陷,在各个表面凸台处也出现明显缩松,铸件上半部分中间出现条状缺陷,铸件两分支连接的厚壁区域以及两分支均出现了较严重的缩松。这是由于充型凝固时铸件不是顺序凝固,导致铸件下部分区域无法得到充足的补缩,在铸件壁厚区域以及表面凸台部分,充型液体较多冷却时间慢,导致周围区域冷却过快形成了孤立液相区,从而阻断了该部分的补缩通道,导致后续液体补缩不足,产生缩松缺陷。



图5 缩松缺陷分布图

Fig.5 Distribution of shrinkage porosities

3 水口设计

通过分析铸件模拟的充型过程、温度场、凝固过程,得到了铸件缩松缺陷分布情况。对各部位缩松缺陷进行编号,见图6。根据模数法来设计水口。

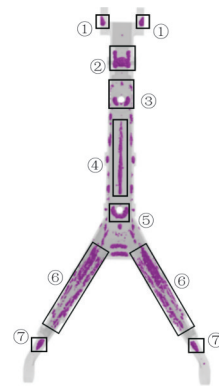


图6 铸件缩松缺陷分布图

Fig.6 Distribution of shrinkage porosities of casting

3.1 模数法

铸件的凝固时间取决于体积与表面积的比,即模数(M)^[19-22],其数学表达式为:

$$M = \frac{V}{S} \quad (1)$$

式中, V 为该部位体积,cm³; S 为散热表面积,cm²。

为保证设计水口能补缩缩松部位,水口模数 M_r 应大于补缩部位的模数 M_c ,应满足以下要求:

$$M_r \geq M_c \quad (2)$$

从凝固顺序上分析,水口要对铸件缺陷部位起到补缩作用,则水口部位应该比缺陷部位凝固的速度慢。根据铸造经验,需要满足一个确定的关系才能实现水口对缺陷部位的补缩作用,一般采用经验公式计算:

$$M_r = f M_c \quad (3)$$

式中, f 为冒口的平衡系数,WLODAWER R提出 $f \geq 1.2$ 即可实现补缩时水口的模数 $\geq$ 铸件的模数^[19]。

水口的补缩作用是否可以满足缺陷部位的要求还需要满足如下条件:

$$\epsilon(V_r + V_c) \leq V_r \eta \quad (4)$$

式中, $(V_r + V_c)$ 为铸件缩孔体积; η 为水口补缩率^[22-24]; ϵ 为金属液的收缩率。

水口的补缩率是金属在冷却凝固过程中由于体积收缩而引起的变化,故水口补缩率用金属补缩率代替,镍基合金补缩率一般为1%~5%。

3.2 水口分布结果

基于上述理论,结合ProCAST的缩松结果,可以计算出各编号部位的缩孔体积、模数、水口模数范围以及水口体积的范围,结果见表3。

Y型结构件为中空状,铸件表面可以看成是许多矩形块拼接而成,所以各个缺陷部位可以近似看作矩形铸件。表4为不同种类铸造水口。结合表4,选择水口形状为方柱形^[25]。

表 3 各部位计算参数表

Tab.3 Calculation parameter for each part

编号	缩孔体积/cm ³	模数/cm	水口模数/cm	水口体积/cm ³
①	0.097 970	0.25	≥0.30	≥9.80
②	0.364 006	0.36	≥0.43	≥36.40
③	0.080 186	0.25	≥0.30	≥8.00
④	0.073 569	0.13	≥0.15	≥7.35
⑤	0.112 856	0.23	≥0.28	≥11.28
⑥	0.036 560	0.14	≥0.17	≥3.65
⑦	0.105 242	0.38	≥0.46	≥10.52

表 4 不同种类铸造水口

Tab.4 Different kinds of casting nozzle

水口形状	作用
圆柱形	提供渐进性的金属流动,减缓金属液的流速,有助于减少气体的渗入和涡流的发生。
方柱形	适用于方形或矩阵铸件,能够提供较为均匀的金属流动,减小涡流和气体渗入。
球形	提供均匀的金属流动,尤其适用于需要高度流动性的合金,同时减小气体的渗入风险。

根据以上分析,最终得到铸件水口分布图见图7。通过分析铸件冶金缺陷分布,在缺陷集中部位使用模数法设计水口作为该部位的补缩通道。根据水口的分

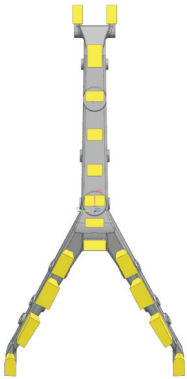


图 7 铸造水口分布图

Fig.7 Distribution of casting nozzle

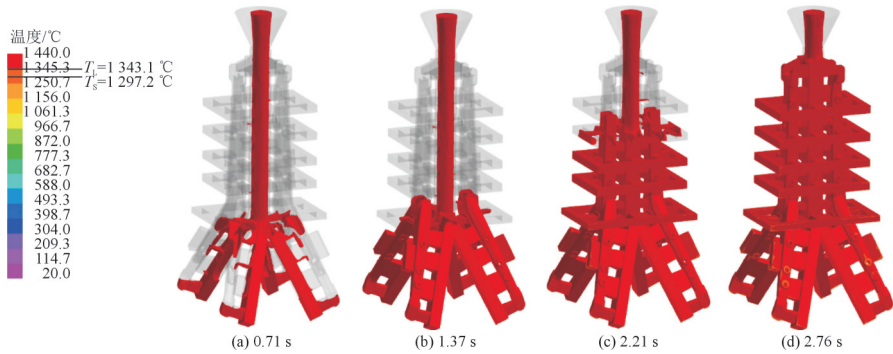


图 9 浇注系统充型过程温度场模拟

Fig.9 Temperature field simulation of gating system during filling process

图 10 为不同时间的温度场模拟结果。可以看出,铸件温度低于浇道的温度,且在后续凝固过程中也是铸件先凝固,符合顺序凝固原则。凸台部位设置的内

布,设计合适的浇注系统。

4 浇注系统

根据水口分布图设计的浇注系统见图8。可以看出,采用测注式浇注系统,由于Y型结构件内部中空且壁厚很薄,为了避免只在一侧设计水口不足以补缩至另一侧,故设计了横浇道对另一侧进行补缩。铸件侧面凸台部位增加内浇道,用来排出凸台部位的气体。铸件“两条腿”部分侧面设计了一个梯形冒口对该部位进行补缩。

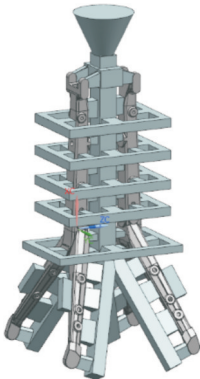


图 8 Y型结构件浇注系统

Fig.8 Gating system of Y-type part

图 9 为浇注系统的充型过程。可以看出,整个浇注过程充型平稳且完整,并未出现明显的液体飞溅以及卷气现象。金属液充型至上半部分时,金属液先充型至铸件内部然后再从设置的水口对内浇道进行充型,这有利于将铸件内部的气体排至浇道内,从而减少铸件气孔缺陷。在凸台部位设置的内浇道能够将凸台部位产生的气体排至浇道内,从而将铸件凸台部位的缺陷转移至浇道中,减少铸件中的缺陷。

浇道补缩口处的温度均高于铸件补缩部位,这有利于对铸件进行金属液的补充,使该部位在凝固过程中得到金属液的充分补充,减少缩松缺陷的出现。铸件两

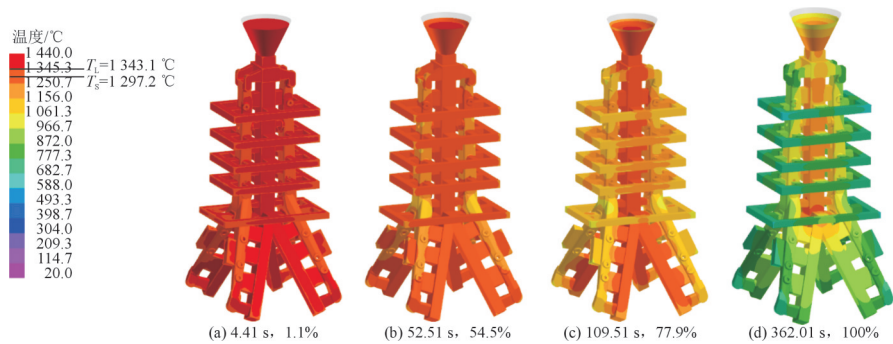


图 10 浇注系统温度场模拟

Fig.10 Temperature field simulation of gating system

分支薄壁部位设置的冒口温度也高于铸件薄壁位置的
温度,冒口的设置不仅有利于气体排出也能起到补缩
冒口的作用。

图 11 为浇注系统的缩松模拟结果。从图 11a 可以
看出,铸件缩松缺陷均出现在浇道和冒口中,铸件上缺
陷总体积为 0.029 cm³,最大体积为 0.005 cm³,铸件侧面
凸台上的缺陷已经被转移至内浇道中,减少了铸件上
的缺陷。在设置了冒口进行补缩的两分支薄壁位置处
的缩松缺陷转移至冒口中,减少了该薄壁区域的缩松
缺陷。

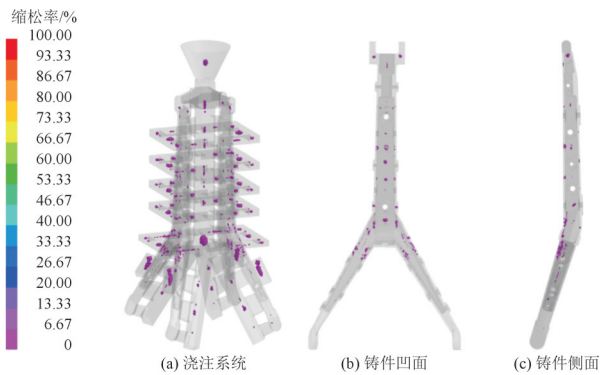


图 11 浇注系统缩松模拟结果

Fig.11 Simulation results of shrinkage porosities in gating system

对上述设计的浇注系统进行了数值模拟分析,设计
的浇注系统满足从下至上的充型顺序,并且温度梯
度分布满足顺序凝固原则,在铸件表面并未出现较明
显的孤立液相区,大大减少了铸件内部的缺陷。

5 试验验证

对模拟设计的浇注系统进行了实际浇注试验,并
对铸件实物进行荧光检测以及 X 光检测,结果见图
12~图 14。荧光检测发现,铸件表面未出现严重缺陷,
仅在铸件上半部分出现了几处伪缺陷,对铸件影响不
大明显。X 光检测发现,铸件内部并无明显缺陷,与模
拟结果一致。



图 12 铸件实物

Fig.12 Entity of casting

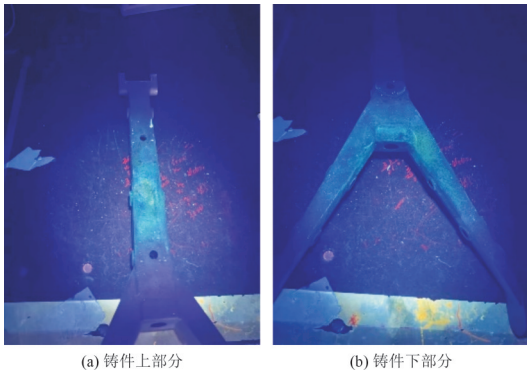


图 13 实物荧光检测结果

Fig.13 Fluorescent inspection results of products

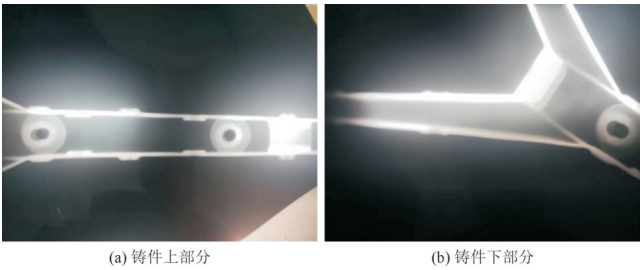


图 14 X 光检测结果

Fig.14 X-ray inspection results

6 结 论

(1)对 Y 型结构件进行了无浇注系统的铸件模拟
分析,从铸件的充型过程、温度场、凝固场预测了缩松
缺陷的分布,集中缺陷主要出现在补缩块和铸件交界

处,铸件颈部壁厚部位,表面凸台和中间条状部位,两分支的连接处以及分支薄壁区域。预测结果与缩松模拟结果一致。

(2)根据模拟后的缩松分布情况结合模数法在缩松严重部位设置了水口进行补缩,后续再根据水口的分布情况进行Y型结构件的浇注系统设计。

(3)对设计的浇注系统进行了数值模拟分析,设计的浇注系统满足从下至上的充型顺序,并且温度梯度分布满足顺序凝固原则,在铸件表面并未出现较明显的孤立液相区,大大减少了铸件内部的缺陷。对试样进行荧光检测以及X光检测,并未出现严重缺陷,证明该浇注系统可行。

参 考 文 献

- [1] 倪江涛,周庆军,衣凤,等.激光增材制造技术发展及在航天领域的应用进展[J].稀有金属,2022,46(10):1 365-1 382.
- [2] 樊振中.熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J].航空制造技术,2019,62(9):38-52.
- [3] 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.
- [4] 吕志刚.我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望[J].铸造,2012,61(4):347-356.
- [5] 王玉莲.熔模铸造型壳焙烧变形仿真与工艺优化方法研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [6] MAJIDI S H, BECKERMAN C. Effect of pouring conditions and gating system design on air entrainment during mold filling[J]. International Journal of Metalcasting, 2019, 13(2): 255-272.
- [7] AMBEKAR S A, JAJU D S B. A review on optimization of gating system for reducing defect [J]. Engineering, Materials Science, 2014, 2(1): 93-98.
- [8] 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.
- [9] 陈兴福,姚雷,韩牧遥,等.K4648合金中空盲管薄壁件无余量精密铸造工艺研究[J].钢铁研究学报,2011,23(S2):449-451.
- [10] 杨曼利,吴亚夫,谢秋峰,等.K424合金中空盲管薄壁件精密铸造工艺研究[J].特种铸造及有色合金,2016,36(6):625-627.
- [11] ZHENG L, XIAO C B, ZHANG G Q, et al. Investigation of interfacial reaction between high Cr content cast nickel based superalloy K4648 and ceramic cores [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(3): 10-22.
- [12] 周丽,逯红果,马中钢,等.一种铸造镍基高温合金的显微组织和冲击性能[J].山东理工大学学报(自然科学版),2021,35(6):24-26.
- [13] 谢秋峰,薛鑫,吴亚夫,等.基于ProCAST涡轮体铸件精铸过程数值模拟研究[J].铸造,2015,64(7):647-652.
- [14] 刘东,廖敦明,唐玉龙,等.UG环境下铸造CAD/CAE一体化系统的后处理显示及冒口工艺设计[J].铸造,2016,65(10):980-983,989.
- [15] 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.
- [16] 孙长明,吴保平,韩凤奎,等.铸造工艺对K4648合金热疲劳性能的影响[J].材料热处理学报,2017,38(5):73-78.

- [17] 党云鹏,曹岩.基于ProCAST的ZL205A合金弹体传动件铸造工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(2):162-166.
- [18] 王建成,徐志强,杨树峰.热顶设计对镍基高温合金铸锭收缩孔隙的影响[J].中国冶金,2022,32(4):63-69,76.
- [19] 陈淑惠.铸件冒口设计的原则及方法[J].科技创新导报,2008(27):100-102.
- [20] 陈流,黄放.基于AnyCasting的齿圈座铸钢件发热保温冒口设计[J].铸造,2013,62(3):226-229.
- [21] 肖博予,戴建平,宋相坤.采煤机铸钢件冒口设计与计算方法发展综述[J].煤矿机电,2023,44(3):16-20.
- [22] 张国宏.基于数值模拟仿真优化技术的冒口设计新方法研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.
- [23] 刘东.基于UG的铸造CAD/CAE集成技术及其在冒口优化设计中的应用[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [24] 卫红波.大型铸钢件保温冒口计算模型及计算软件的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [25] 刘瑞丽.提高消失模铸钢件冒口补缩效率的研究[D].武汉:华中科技大学,2013.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

