

基于数值模拟的QT500-7固定底座 砂型铸造工艺优化研究

聂俊初, 王峥, 邢健博, 殷培琨, 王昊天, 刘富初

中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院 湖北武汉 430074

摘要: 采用三维绘图软件绘制QT500-7固定底座三维模型, 分析其结构特点、工艺要求和服役条件等要素, 初步设计了该球墨铸铁件的铸造工艺方案, 并利用仿真模拟软件进行了充型和凝固收缩模拟研究。初始铸造工艺方案模拟结果表明, 充型完整, 无浇不足、冷隔等现象, 但在铸件底板处厚大部位存在缩孔缺陷。通过增设冒口、冷铁来优化铸造工艺方案, 显著提高铸件质量, 在铸件内部已无缺陷显现, 可为固定底座的实际铸造工艺设计提供参考。

关键词: 数值模拟; QT500-7; 固定底座; 砂型铸造

Optimization of sand casting process for QT500-7 fixed base via numerical simulation

NIE Junren, WANG Zheng, XING Jianbo, YIN Peikun, WANG Haotian, LIU Fuchu

School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074,
Hubei, China

Abstract: With the help of SolidWorks software, the three-dimensional model of ductile iron QT500-7 fixed base was established. Its structural characteristics, process requirements and actual conditions were analyzed to initially design the casting process scheme, and the simulation of mold filling and solidification shrinkage was performed by using simulation software. The simulation results show that the filling process is stable and there is no insufficient pouring or cold separation, while there are shrinkage holes in the thick part of the fixed base. The casting process was adjusted by adding risers and cold iron. After optimization and simulation, the quality of the castings is significantly improved, and no defects in the castings. The optimized scheme can provide theoretical support for the actual casting process design of the fixed base.

Keywords: numerical simulation; QT500-7; fixed base; sand mold casting

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目2022年第一批立项项目(No. 220604555150617); 国家级大学生创新创业训练计划项目(No.202410491030, No.202410491047, No. 202410491048, No.202410491058, No.S202410491017, No.S202410491035, No.S202410491102, No.S202410491119, No.X202410491055); 中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金项目(No. SKJ2023125); 广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金面上项目(No. 2024A1515013258)。

第一作者: 聂俊初, 本科生, 主要研究方向为精密铸造等, E-mail: 1977164969@qq.com。

通信作者: 刘富初, 工学博士/博士后, 副教授, 主要研究方向为陶瓷型芯增材制造和精密铸造等, E-mail: liufuchu@cug.edu.cn。

1 序言

固定底座是一种用于支撑和固定各种设备或结构物的基础工具，广泛应用于包括机械工程、建筑工程、汽车工程等诸多领域。其主要作用是提供稳定的支撑力和固定性，通过底座本体、固定螺栓和固定垫片等组装配合，稳定地支撑其他部件或设备，以防止使用过程中发生摇晃、倾斜或倒塌等不安全情况，确保整体结构的稳定性和安全性。因此，其需要较高的耐磨性与轴向承载能力，对铸件质量的要求较高，不允许有明显缺陷。

在当今铸造业领域，铸造过程仿真模拟已成为一个至关重要的方法，其在产品设计和过程开发中扮演着不可或缺的角色。这种先进的技术手段能够显著提升铸造工艺设计的效率，并帮助设计人员在制造流程的初期阶段做出精确的选择和明智的判断^[1-4]。与过去依靠反复试验、不断试错、再进行修改的传统方法相比，基于ProCAST等铸造模拟仿真软件进行铸造工艺模拟优化，可减少制造成本、缩短研发周期、改善铸造过程质量，并可提升整个生产流程的可靠性和成功率^[5-8]，目前已有多种复杂铸件（铸钢、灰铸铁和球墨铸铁等）采用数值模拟仿真技术进行铸造工艺改进与优化^[2-9]。

本文基于ProCAST软件铸造模拟功能对QT500-7固定底座的铸造工艺方案进行模拟仿真，分析预测可能存在的缩松、缩孔等缺陷，并在铸造工艺优化后将其消除，从而提升铸件质量。试验零件是2024中国大学生机械工程创新创业大赛：第十五届铸造工艺设计赛A件，其源自企业选供给大赛组委会，紧密贴合企业亟待攻克的铸造难题。因此，本研究具有重要的意义与实际应用价值。

2 铸件结构特点与技术要求

固定底座铸铁零件，其材质为QT500-7，化学成分见表1^[10, 11]。零件外形尺寸为760mm×760mm×270mm，最大壁厚为40mm，最小壁厚为20mm，最大孔径为450mm，最小孔径为140mm。该零件净重为174.31kg，属于中小型零件，作为工业机器人的零部件，其与旋转底座相接，并起稳定支撑和固定

表1 QT500-7化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S
3.5~3.8	2.5~2.8	≤0.3	≤0.07	≤0.02

安装作用。

图1所示为铸件三维结构。固定底座主要由支撑底板、中心主通孔、其他小直径通孔、侧伸凸台、侧向矩形通孔及顶部小侧伸块等组成。其中，主中心孔与侧向矩形通孔为主要结构部分，其影响着组装件的稳定性与牢固性，也是铸造中较难成形部分。另外，也要注意顶部小侧伸块及两个侧伸凸台在成形时应如何正确分型，以确保结构完整。零件支撑底板、侧伸凸台与中心台面上存在较多螺纹孔和小直径铰制孔，小于铸出孔范围标准，考虑不直接铸出。支撑底板四角处与侧伸凸台相对较厚，在浇注过程中因易形成热节而产生收缩缺陷。

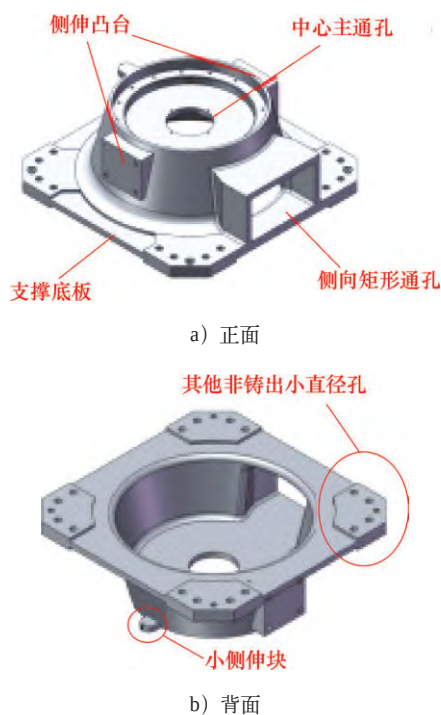


图1 铸件三维结构示意图

铸件的技术要求：铸件表面上的粘砂、夹砂、飞边、毛刺、浇冒口和氧化皮等应清理干净；不允许有影响铸件使用性能的裂纹、冷隔、缩孔、夹渣及穿透性气孔；铸造公差按照GB/T 6414—2017《铸件 尺寸公差、几何公差与机械加工余量》执行，根据铸件小批量生产特点选取等级为DCTG13。

3 铸造工艺方案设计

铸造工艺方案应满足“符合实际应用情况”“工艺合理简单”“经济环保性要求”三大基本原则，其方案设计过程包括铸件浇注位置、分型

面、砂芯、工艺参数与浇注系统的确定等方面。

3.1 浇注位置和分型面确定

浇注位置需要根据铸件的结构特点、尺寸、重量、技术要求、铸造合金特性、铸造方法、生产批量、现场生产条件及综合效益等方面加以确定。正确的浇注位置应能保证获得健全的铸件，并使造型、制芯和清理方便。分型面的选择同理，应尽量与浇注位置一致，使铸造工艺简便，易于保证铸件质量。

基于铸件重要加工面应朝下放置、大面积薄壁部分置于下部或侧面、厚壁部分置于铸型上部或侧面等多方面考虑，最终选取的浇注位置为倒置式浇注铸件支撑底板部位。此时铸件中心台面和主中心孔等与工业机器人旋转底座直接装配部位的表面质量便能得到保证，同时起模方便、造芯容易，便于安置冒口。

在选定浇注位置的基础上，分型面的选择如图2所示。此情况下分型面位于铸件的最大截面处，便于起模；与浇注位置一致，简化铸造工艺；铸件绝大部分位于下砂型，可以减少错型和尺寸偏差。

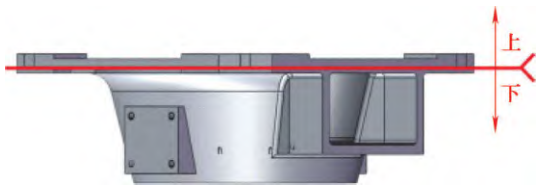


图2 铸件浇注位置与分型面示意

3.2 造型工艺选择

由于固定底座生产批量较小，因此铸造生产宜采取手工造型制芯、两箱造型、一箱一件的方式，利用木模样直接造型和木质芯盒制芯。造型工艺材料选用呋喃树脂砂，其黏结强度高，耐热性强，砂型刚性好，有利于获得较高的工艺出品率。

根据铸件结构与浇注特点，拟设计2种砂芯：铸件侧向矩形通孔需要设置砂芯单独成形，以保证其结构完整；同时铸件及两侧小凸台在起模时会遮挡，无法使铸件获得准确的外形，因此需要设置砂芯。铸件的内部结构拟依靠上下砂型直接成形，不另设砂芯，顶部小侧伸块则依靠活块的设计铸出。砂芯初步设置方案如图3所示。1号砂芯通过砂芯的特殊设计与芯座配合定位，2号砂芯则使用

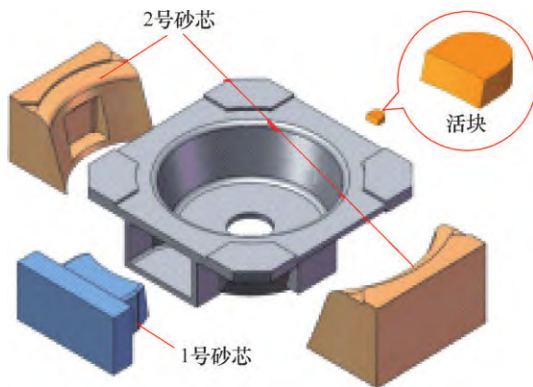


图3 砂芯设计及其摆放位置

底部垂直定位芯头，保证铸造时各结构的精度。

3.3 浇注系统设计

为保证铸件平稳快速充型，浇注系统要求能够大流量地输送铁液和具有比灰铸铁更好的挡渣能力，因此选择适用于球墨铸铁件的开放式顶注浇注系统方案。开放式浇注系统进入型腔时金属液流速小、充型平稳、冲刷力小，且金属氧化少；而顶注式浇注系统充型能力强，能优化开放式流速小的问题，且方便冒口的补缩与造型。

基于以上选择，初步设计浇注方案如图4所示。对于球墨铸铁的开放式浇注系统，各截面比一般为 $\Sigma A_{\text{内}} : \Sigma A_{\text{横}} : \Sigma A_{\text{直}} = (1.5 \sim 4) : (2 \sim 4) : 1$ ，且 $\Sigma A_{\text{直}} < \Sigma A_{\text{横}} < \Sigma A_{\text{内}}^{[12]}$ ，故取截面比为 $\Sigma A_{\text{内}} : \Sigma A_{\text{横}} : \Sigma A_{\text{直}} = 3 : 2.5 : 1$ ，依据理论计算，设计直浇道1道，截面积为 11.88cm^2 ；横浇道1道，截面积为 29.69cm^2 ；内浇道共4道，总截面积为 35.63cm^2 。各浇道的截面形状与尺寸如图5所示，较大的横浇道截面可有效防止铁液反流；为有效挡渣同时需在浇口杯与直浇道口处设置过滤网；内浇口设计成“短薄宽”形式，能充分利用其补缩作用。

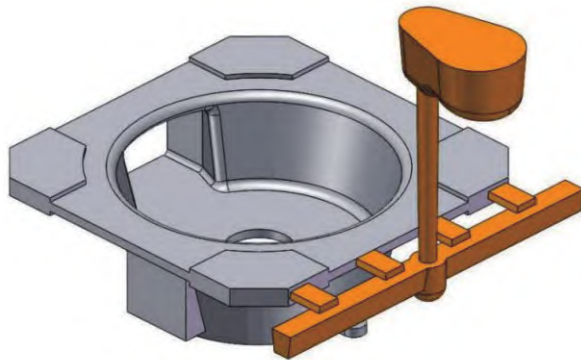


图4 初始铸造工艺方案

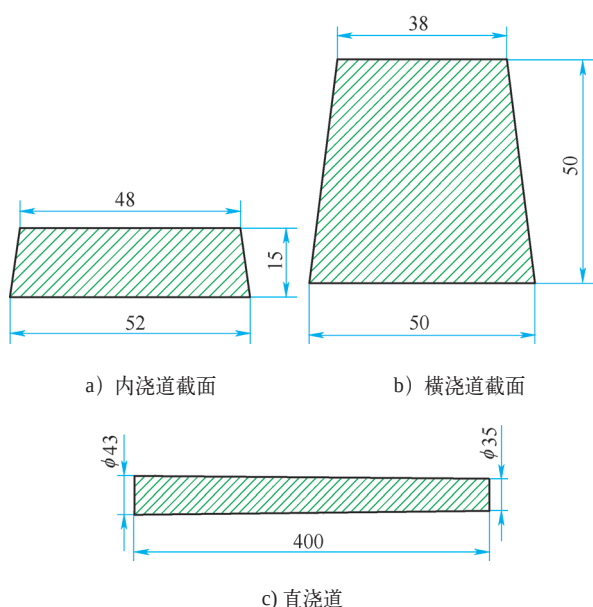


图5 各浇道的截面形状与尺寸

4 模拟参数设定

将在SolidWorks中绘制的三维模型转换为igs格式，然后导入ProCAST中的Mesh模块进行网格划分。共划分二维网格21244个、三维网格178308个，如图6所示。然后需进行铸造模拟参数的选定与设置。

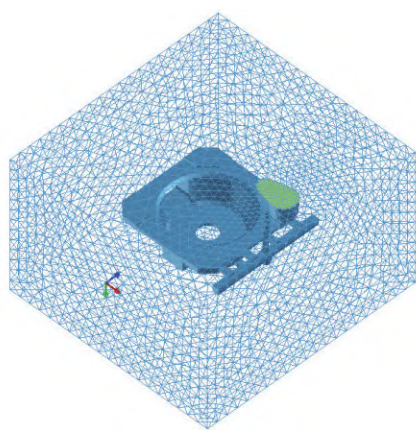


图6 浇注方案网格划分

ProCAST软件进行浇注过程数值模拟时主要参数有：浇注温度、浇注时间、各部分材料及换热系数。

1) 由于球墨铸铁液相线温度为 1168°C ，因此设定初始浇注温度为 1360°C ；根据计算结果，浇注时间设定为19.6s，重力连续浇注。

2) 铸件材料设为球墨铸铁（材料库中设置），铸型材质选用树脂砂（Resin Bonded Sand）。

3) 界面换热系数设置如下：金属与砂的热交换系数取 $h=500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；型砂与冷铁的热交换系数取 $h=500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；金属与冷铁的热交换系数取 $h=2000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ；型砂与外界选择空冷^[6, 9]。

5 铸造工艺方案数值模拟与优化改进

5.1 初始工艺方案模拟结果分析

初始浇注方案设计充型时间为19.6s，模拟充型时间为18.7s，充型时间符合浇注系统设计结果。整个充型过程中金属液温度较为均匀，无明显温度差区域，有利于球墨铸铁借助石墨化膨胀实现自补缩；充型完整，没有浇不足、冷隔等现象产生，说明该浇注系统和浇注方案设计总体上符合实际^[7-9]。

图7所示为初始方案充型流场分布。从图7可看出，金属液在开始阶段从顶端流向底部的过程中，充型较不平稳，速度分布不均匀，金属液下泻流速较大，出现“冲砂”现象，金属液对型腔底部产生较大冲击力；部分金属液流动距离较大，与空气接触多，易造成氧化。此外，在底部的充型过程中，金属通过内浇口的速度过大，使充型过程中产生不规则的紊态流动，导致型腔内少量空气无法及时排出，被卷入金属液内部一同进入型腔，容易出现“卷气”现象。

图8所示为初始方案最终缺陷预测模拟。从图8可看出，铸件在凝固后壁厚较大部位存在热节，出现缩孔、缩松，影响铸件质量的缺陷均分布在支撑底座四角与两侧伸凸台的厚大部位，其中由于支撑底板处于铸型顶部，因此有较为严重的缩孔。但缺陷整体较少，可通过简单的补缩措施将其消除，因此后续考虑设计冒口与冷铁进一步优化方案。

5.2 工艺方案优化设计

针对支撑底板四角处的缩孔，考虑设置冒口进行补缩。选用圆柱形单缩颈明冒口，将冒口设置在铸件最高、最厚的部位，即支撑底板四角位置。通过模数法计算该4个位置的冒口模数，根据铸造手册按机床类顶缩颈冒口查得尺寸^[13, 14]，最终选取的冒口尺寸如图9所示。

针对两侧伸凸台的缩松，考虑通过使用冷铁来消除。冷铁材质选用灰铸铁，采用直接外冷铁，以加速冷却，实现凸台厚大部位先行凝固。由于冷铁尺寸不得小于热节的 $1/2$ ，同时需操作

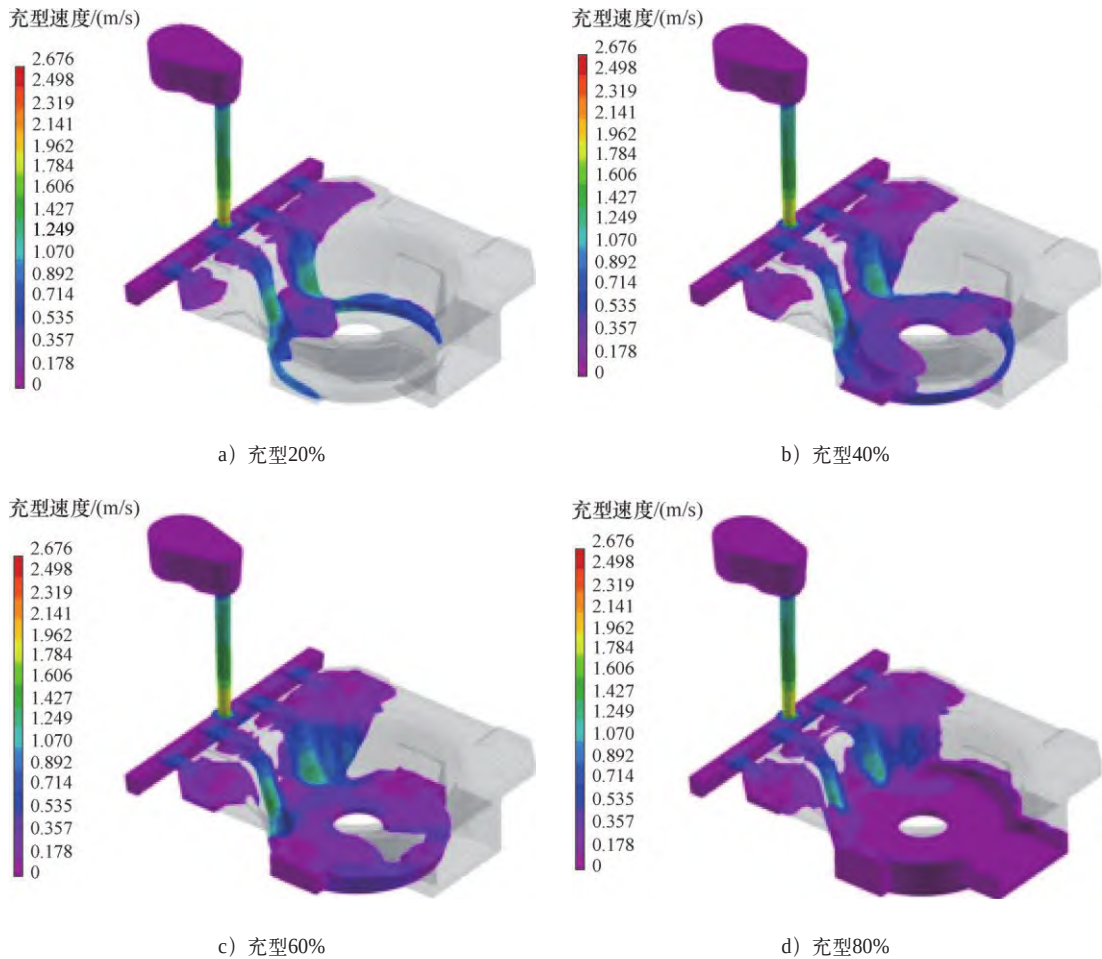


图7 初始方案充型流场

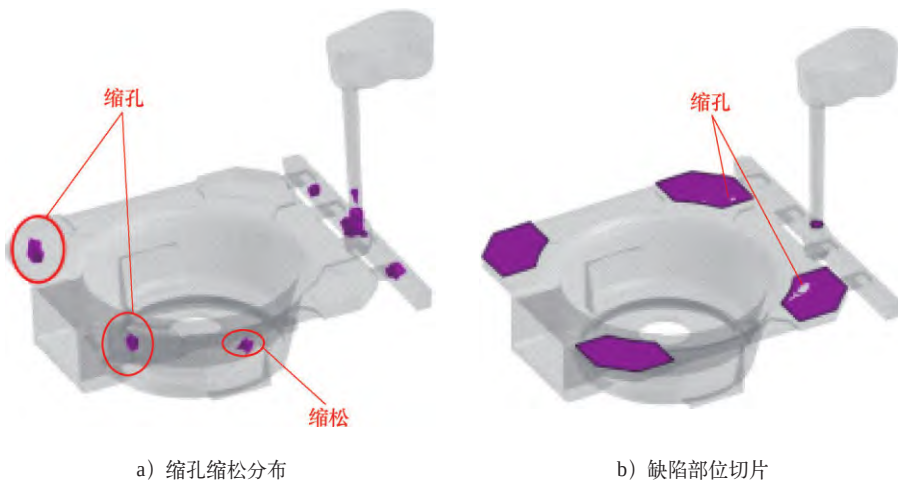


图8 初始方案最终缺陷预测模拟

方便、降低工艺难度，因此最终选择冷铁尺寸为 $130\text{mm} \times 130\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，共2块^[15]。优化后的铸造工艺方案及冒口、冷铁设置位置如图10所示。

2块平面冷铁需内贴于成形侧伸凸台的2个2号砂芯内，因此将2号砂芯的形状与尺寸特征进行优化调

整，如图11所示。

5.3 优化方案模拟结果分析

对固定底座优化后的铸造方案进行模拟，其充型过程如图12所示。从图12可看出，当充型50%时，金属液上升至冷铁处并逐渐充满侧伸凸台；

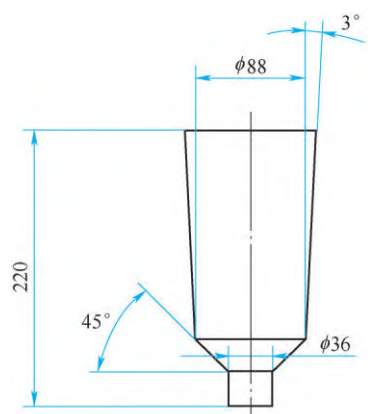


图9 冒口形状与尺寸

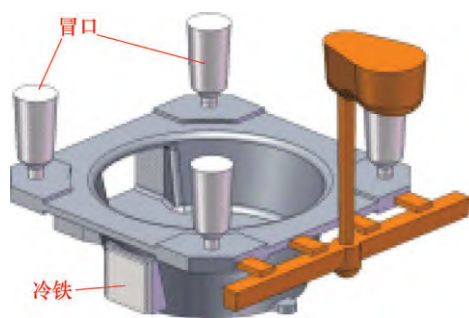


图10 优化后的铸造工艺方案

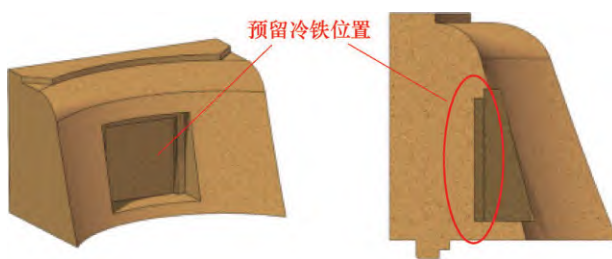


图11 优化后2号砂芯示意

当充型达到75%时，金属液基本将铸件主体填充完成，同时冷铁开始发挥作用，与铁液热交换后逐渐升温；当充型至100%时，金属液已完成充型，且充型完整，侧伸凸台处铁液在冷铁的作用下先于内部冷却凝固。

从最终优化后的缺陷模拟（见图13）来看，铸件内已经没有显现缩孔缩松，缺陷均成功转移至冒口中，铸件的质量显著提高，满足铸件不允许有裂纹、冷隔、缩孔、缩松、夹渣及穿透性气孔等缺陷的技术要求。经计算，此方案的工艺出品率最终达到66.2%，从经济性和工艺合理性上初步判断，这是合理可行的工艺设计方案，能够生产出满足技术

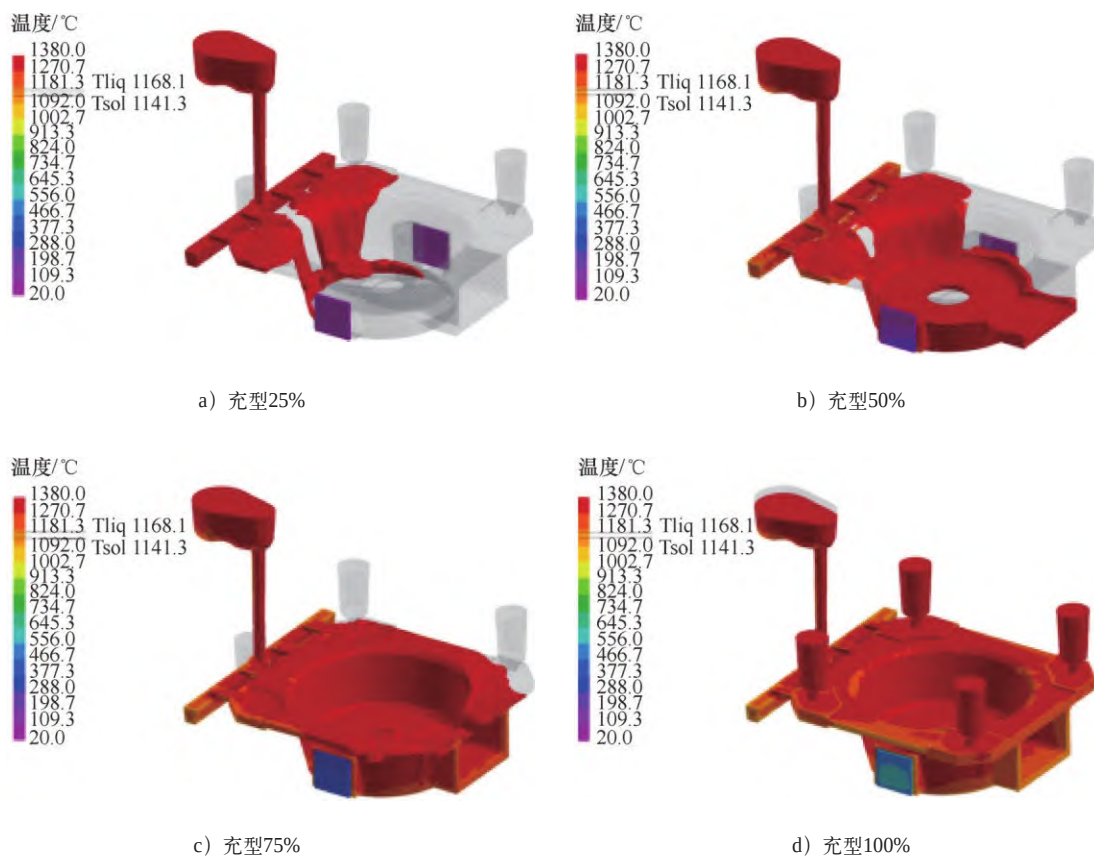


图12 优化方案充型过程

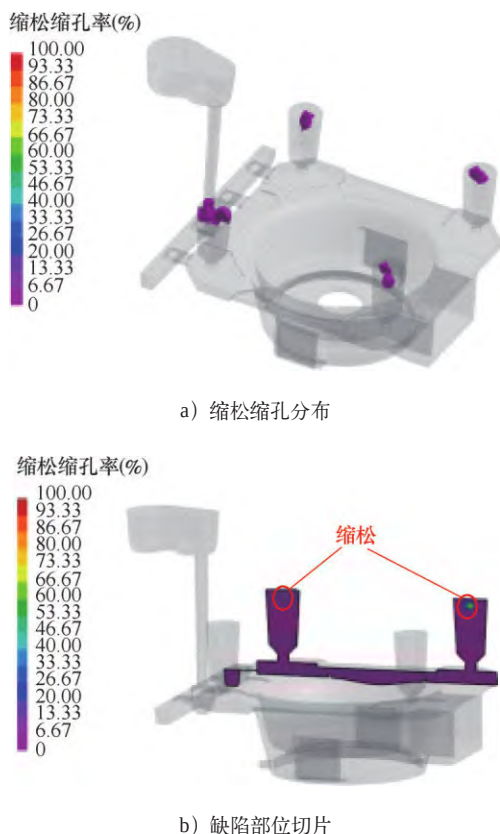


图13 优化方案缺陷模拟预测

要求的固定底座铸件。

6 结束语

1) 通过分析铸件结构特点,设计顶注式开放浇注系统和砂芯方案。依托初始方案模拟结果分析缺陷分布情况,顶部利用圆柱形单缩颈冒口将缩孔转移,厚大部位缩松通过设置平面灰铸铁外冷铁来消除。

2) 补缩方案设计成功优化铸造工艺,使铸件具有理想的凝固顺序与优秀的铸造性能。模拟结果中铸件内部无缺陷显现,工艺出品率达到66.2%,满足技术要求,可为固定底座实际铸造工艺设计及优化提供理论支持。

参考文献:

- [1] 陈煌. 计算机模拟辅助技术在铸造工艺设计中的应用[J]. 铸造, 2023, 72 (10) : 1387.
- [2] 马月姣, 牛俊涛, 谢君, 等. 基于数值模拟的薄壁机匣铸造工艺设计与优化[J]. 铸造, 2024, 73 (7) : 1024-1030.
- [3] 殷亚军, 刘振伟, 张勇佳, 等. 铸造数值模拟软件技术及应用进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023,

43 (10) : 1297-1311.

- [4] 牛晓峰, 王天成, 葛涛涛, 等. 铸造充型过程宏观数值模拟研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10) : 1312-1318.
- [5] 钱怡君. QT450-10汽车差速器壳铸造工艺数值模拟及其优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [6] 黄雪红, 季德生. 基于ProCAST球墨铸铁支座的铸造工艺优化[J]. 现代铸铁, 2022, 42 (4) : 29-35.
- [7] 蔡佳骏, 张亮, 夏双喜, 等. 高压蒸汽室铸钢件砂型铸造工艺模拟研究[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (5) : 109-115, 121.
- [8] 张亮, 蔡佳骏, 夏双喜, 等. 基于正交试验的高压蒸汽室铸钢件铸造工艺模拟优化研究[J]. 金属加工 (热加工), 2023 (9) : 109-114.
- [9] 唐婷, 张頔, 王立新, 等. 基于数值模拟的灰铸铁上转盘砂型铸造工艺优化[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (11) : 119-123, 127.
- [10] 张锡联. 铸态QT500-7球铁齿轮箱的生产[J]. 中国铸造装备与技术, 2016 (6) : 23-25.
- [11] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 (第1卷): 铸铁[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [12] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 (第5卷): 铸造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [13] 铸造工程师手册编写组. 铸造工程师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [14] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [15] 江长, 向思雨. 基于ProCAST的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化[J]. 铸造工程, 2020, 44 (5) : 40-43.

MW 20241019