

基于数值模拟的灰铸铁上转盘砂型铸造工艺优化

唐婷, 张頔, 王立新, 王赋煜, 刘浩, 徐凯, 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: 采用三维绘图软件建立灰铸铁上转盘三维模型, 结合对上转盘的结构、形状、尺寸及实际应用情况进行分析, 初步设计了该灰铸铁件的铸造工艺方案, 并采用ProCAST软件进行灰铸铁上转盘铸造工艺数值模拟与分析。基于凝固过程中产生的缩孔与缩松等缺陷的仿真模拟结果, 通过添加冒口和优化浇注系统的方法对灰铸铁上转盘铸造工艺进行改进。优化的铸造工艺模拟结果表明, 上转盘缩孔缩松缺陷得到有效控制。

关键词: 数值模拟; HT300; 上转盘; 砂型铸造

Optimization of sand casting process for gray iron upper rotary disc castings based on numerical simulation

TANG Ting, ZHANG Di, WANG Lixin, WANG Fuyu, LIU Hao, XU Kai, LIU Fuchu

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

Abstract: In this paper, SolidWorks software was used to create the 3D model of gray iron upper rotary disc casting. Based on the analysis of the structure, shape, size and practical application of the upper rotary disc casting, the casting process scheme of the gray iron casting was initially designed, and ProCAST software was used for numerical simulation and analysis. According to the simulation results of defects distribution during casting, the casting process was adjusted by adding risers and optimizing the pouring system. After optimization and simulation, the shrinkage and porosity defects are effectively controlled.

Keywords: numerical simulation; HT300; upper rotary disc; sand casting

1 序言

上转盘HT300是重要的传动部件, 广泛应用于工程机械领域(如铁路交通、机床等), 其主要作用是承担机床重量以及作为刀架的导向件。上转盘承受机床上的静态载荷和动态载荷, 应保证其具有一定的强度、稳定性和耐磨性。上转盘也可在其水

平面进行旋转, 刀架可沿转盘上的导轨做短距离的移动, 进而实现车削加工等功能。因此, 在铸造工艺设计过程中, 应着重考虑底面与轴孔表面的组织密度和均匀性, 以防止出现无法承重压和渗油以及轴承不稳定的情况。然而, 上转盘为多孔、多槽结构, 内部形状复杂, 在铸造过程中厚大部位易出现

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)。

第一作者: 唐婷, 本科, 主要从事精密铸造等研究, E-mail: 2270873818@qq.com。

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

缩孔、缩松等缺陷，难以保证铸件质量。

我国铸造技术正朝精密化、高品质、薄壁化、轻量化、复合化和高性能方向发展。计算机技术在液态金属成形研究与工艺中广泛应用，数值模拟与仿真、CAD/CAM技术对优化铸造工艺起到重要指导作用^[1]。通过对铸造过程进行精确模拟，可以预测并优化铸件质量，减少试验次数，缩短研发周期，以及提高生产效率和经济效益^[2-5]。

本文采用ProCAST铸造模拟软件对HT300上转盘砂型铸造工艺进行模拟优化，通过多次模拟分析零件的温度场、凝固过程，以及缩孔和缩松等缺陷，设置冒口和优化浇注系统来获得较优的铸造工艺方案，减少或消除缩孔、缩松等缺陷，提高铸件质量，为该类零件的铸造生产提供参考。该选题是2023中国大学生机械工程创新创业大赛——第十四届铸造工艺设计赛C件，源自企业选供给大赛组委会，是企业亟需突破的灰铸铁件铸造难题，可供铸造工艺人员参考。

2 铸件结构分析及技术要求

本文的研究对象为上转盘零件，材质为HT300，密度为7.3g/cm³，具有强度高、耐磨性好的特点。上转盘的三维结构如图1所示，外轮廓尺寸为

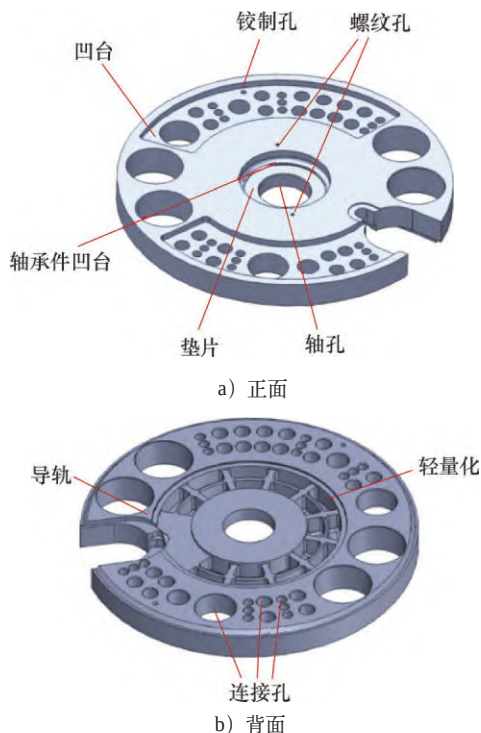


图1 铸件三维结构

1281mm × 1269.7mm × 101mm，质量约为502.41kg，最大壁厚为113mm，最小壁厚为15mm，底部属于薄壁大平面，最大孔径为350mm，最小孔径为12mm，螺纹孔和铰制孔小于铸出孔范围标准，因此可不直接铸出。上转盘为多孔多槽结构，壁厚不均匀，厚大部位易出现缩孔、缩松等缺陷，难以具有一定的强度、稳定性和耐磨性。

技术要求：铸件大平面不得有砂眼、气孔等缺陷，内部基本无缩、缩松等缺陷；未注倒角0.5mm × 45°；未注铸造圆角为R5mm；铸件加工前热处理。

3 上转盘初始铸造工艺方案设计

为了防止上转盘底部大平面的铸造缺陷，应采取“平做立浇”工艺，但由于操作难度太大，因此在实际生产中不可行^[6]。根据上转盘结构特点、形状和尺寸，结合铸造工艺设计原则，首先对比了底注式浇注系统和在中注式浇注系统，对于壁厚不均匀、形状复杂的铸件重要面不宜朝上放置，而是尽量使厚大部位或简单面朝上^[7]。采用ProCAST软件进行数值模拟，二者都在最大壁厚处存在较多缺陷，但中注式浇注系统中铸件上表面缺陷范围更大，故选择底注式封闭浇注系统，整个充型过程快速平稳且均匀，不容易出现飞溅、喷射、浇不足等现象，且金属液消耗少，清理方便^[8]。共设置1个直浇道、2个横浇道和7个内浇道，断面比为 $\Sigma F_{\text{直浇道}} : \Sigma F_{\text{横浇道}} : \Sigma F_{\text{内浇道}} = 1.15 : 1.1 : 1$ ，面积分别为8.67cm²，8.29cm²，7.54cm²，浇注时间为47s。该铸件属于单件小批量生产，采用砂型铸造工艺，铸型和砂芯均使用呋喃树脂砂。上转盘初始铸造工艺方案设计如图2所示。

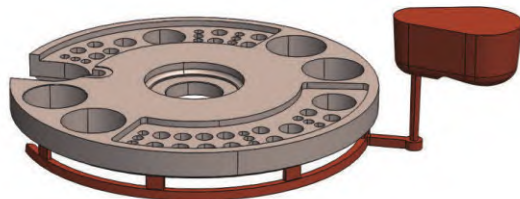


图2 上转盘初始铸造工艺方案

4 数值模拟前处理参数设定

采用ProCAST软件铸铁（重力）模块进行充型及凝固过程数值模拟。浇注时主要参数有浇注温

度、浇注时间、各部分材料及换热系数。故初始条件设定为：浇注温度1370℃、浇注时间47s。在铸造过程数值模拟过程中，模拟结果与实际结果存在偏差，在一定程度上影响了铸件质量，热物性参数的准确程度会直接影响铸造数值模拟的优劣^[9]。由于铸件及砂芯结构相对复杂，所以铸件与砂型和砂芯等界面换热现象明显，对于材料HT300，设定以下热交换系数以模拟不同界面之间的热传导：金属与砂的热交换系数： $h=500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，型砂与冷铁的热交换系数： $h=500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，金属与冷铁的热交换系数： $h=2000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，铸型材质选用[树脂砂，铁]，保温套材质选用保温效果很好的[冒口套1]，冷铁材质选用[铸铁]，其他设置参数不再赘述。

底注式浇注系统共划分二维网格25636个、三维网格311860个，如图3所示。对于砂型铸件来说，可以使用ProCAST自带的虚拟铸型，省去对铸型网格的剖分。模拟参数设置过程中不能用真实的砂箱

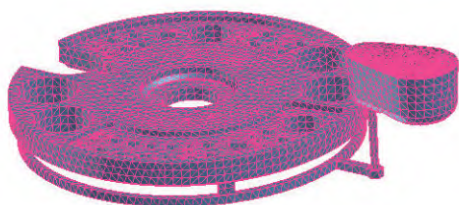


图3 上转盘和浇注系统网格模型

尺寸作为虚拟砂箱的尺寸，由于该模型中虚拟砂箱的外表面被定义为绝热条件，因此砂箱尺寸要足够大，才能避免出现大的计算误差。

5 上转盘初始铸造工艺方案数值模拟与分析

5.1 充型过程流动场分析

上转盘初始铸造工艺方案的充型过程如图4所示。设计充型时间为47s，模拟充型时间为45s，模拟充型时间符合浇注系统设计结果。在充型过程中，金属液在重力作用下由浇口杯通过直浇道、横浇道和内浇道进入型腔，液面开始进入铸件底部，后自下而上逐渐升高。当充型25%时，金属液通过内浇道进入型腔底部，金属液对型腔底部的冲击力较小，“冲砂”现象不明显；当充型50%时，金属液由底部边缘部位流动至铸件中部，充型平稳；当充型75%时，金属液充满铸件底部后向铸件上部流动；当充型100%时，金属液已充满整个铸件。由图4d可知，在充型中没有“浇不足”的部位。在整个充型过程中，金属液流动距离较大，铸件整体难以同时进行凝固。

5.2 凝固缺陷分析

图5所示为铸件的凝固缺陷分布状态。从图5可看出，在不加冒口的情况下，铸件的缩松、缩孔大多出现在壁厚较大处。上转盘的顶部、底座及中心处都出现了一定量的缩孔或缩松。铸件较厚处出现

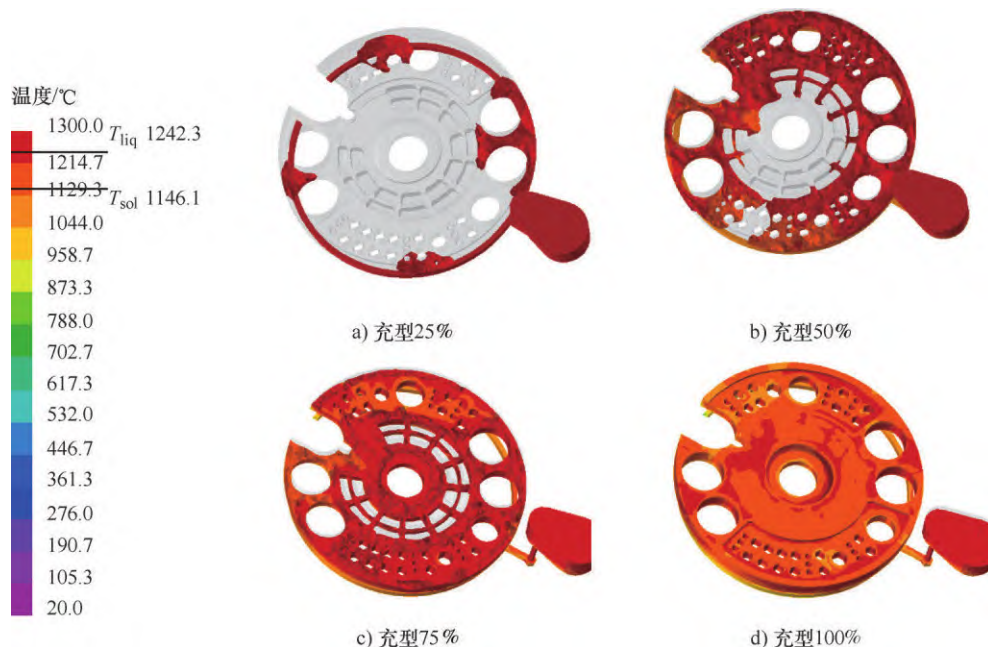


图4 充型过程

大量缩松、缩孔的原因在于轴承支撑孔内侧壁厚过大，存在热节^[10]，且散热过慢，存在孤立液相区^[11]。在之后的工艺优化中，将在尽量保证铸件出品率的前提下，采取放置冒口的方法，来减少缺陷。



图5 凝固缺陷分布状态

6 上转盘优化铸造工艺方案数值模拟与分析

6.1 铸造工艺方案优化

根据上转盘初始铸造工艺方案数值模拟与分析结果，由《铸造手册（第5卷）：铸造工艺》^[12]中推荐的机床类铸件冒口系列，以及标准圆柱形暗冒

口尺寸关系，在上转盘共设置了5个顶缩颈冒口和5个暗冒口，如图6所示。设计的冒口尺寸分别见表1、表2。

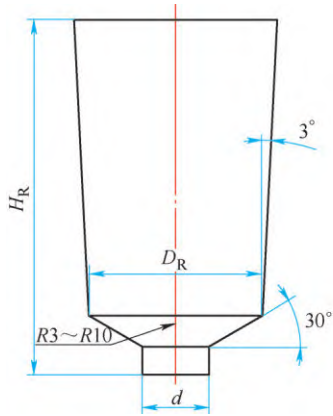
表1 顶缩颈冒口尺寸 (mm)

D_R	d	H_R
180	90	300

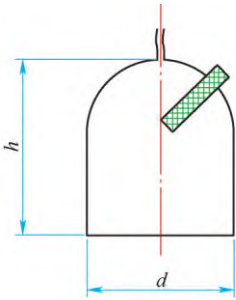
表2 暗冒口尺寸 (mm)

d	h
80	180

结合上转盘初始铸造工艺方案的充型流动场分析，对铸件的浇注系统进行优化。优化后的铸造工艺方案采用顶注式浇注系统，共设置1个直浇道、1个横浇道和4个内浇道，直浇道、横浇道和内浇道的面积分别为 38.5cm²，33.0cm²，31.7cm²。此外，为了模拟实际生产，铸件中直径<50 mm的孔不通过铸造成形。优化后的铸造工艺方案如图7所示。

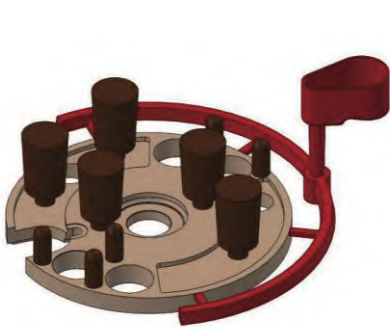


a) 顶缩颈冒口



b) 暗冒口

图6 冒口结构形状



a) 正面



b) 背面

图7 上转盘优化后的铸造工艺方案

6.2 铸造工艺方案优化后充型和凝固过程

铸造工艺方案优化后,金属液的充型整体平稳,没有浇不足的部位,金属液流动距离小、无冷隔现象,与空气接触少,充型效果较好。

通过在上转盘上表面添加冒口,上转盘远离冒

口的部位最先凝固,其次是冒口下方,最后是冒口凝固,且将最后凝固的部位控制在冒口中,可大幅减少上转盘上表面的缩孔、缩松和浇不足等缺陷。冒口位于铸件的加工面上,可以通过后续加工去除。工艺方案优化后的凝固过程及固相率场如图8所示。

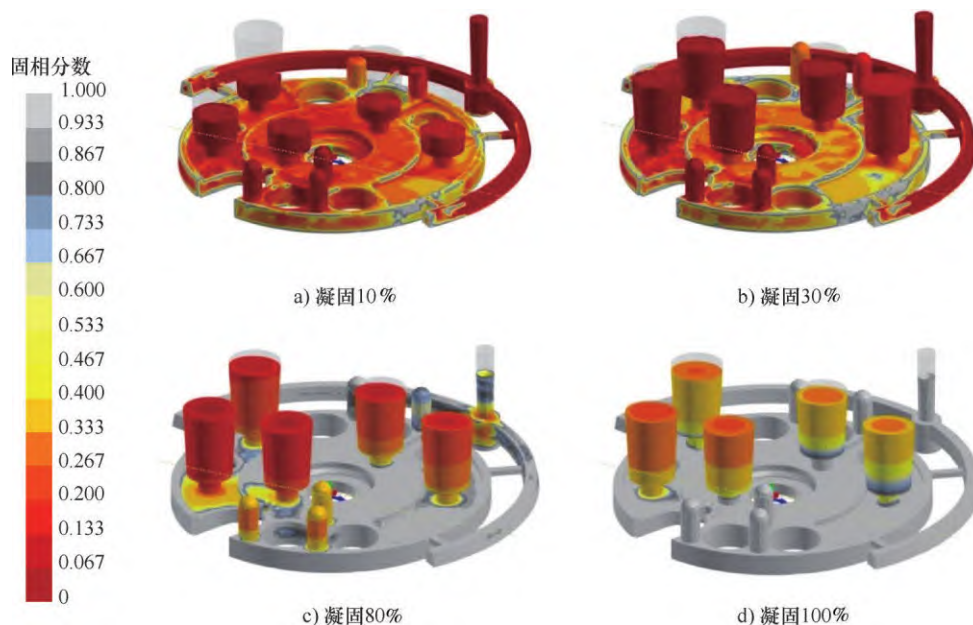


图8 工艺方案优化后的凝固过程及固相率场

6.3 铸造工艺方案优化后凝固缺陷分析

铸造工艺方案优化后凝固缺陷分布如图9所示。

由图9可知,经过工艺方案优化后,铸件几乎所有

缺陷都成功转移至冒口中,铸件已经没有缩松等缺陷,铸件内部明显缩孔缺陷减少至只有1处,对铸件的使用影响较小。冒口位于铸件的加工面,易于进行后续加工去除。本次工艺采用顶注式浇注系统,充型平稳完整,满足了铸件基本无缩孔、缩松缺陷的技术要求。

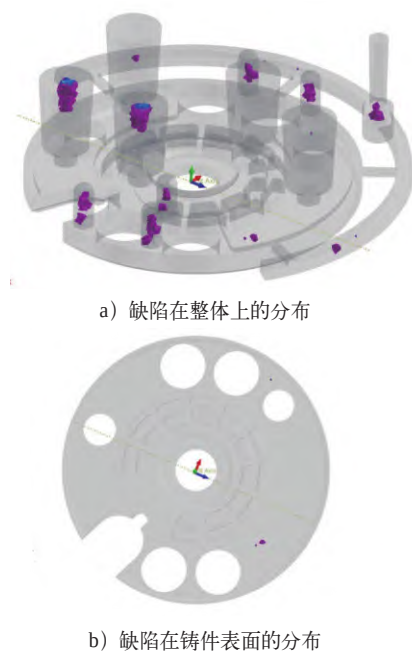


图9 工艺方案优化后凝固缺陷分布

7 结束语

1) 基于上转盘铸件的结构特点,设计了HT300上转盘初始铸造工艺方案,模拟结果表明,在上转盘的顶部、底座及中心处均出现了一定量的缩孔和缩松。

2) 在上转盘上部出现集中缩孔、缩松的部位设置顶缩颈冒口和暗冒口,并对铸件的浇注系统进行优化。优化的铸造工艺方案模拟结果表明,铸件内部无明显的缩孔、缩松缺陷,基本上所有的缩孔、缩松缺陷转移至冒口中。

参考文献:

[1] 殷亚军,刘振伟,张勇佳,等.铸造数值模拟软件(下转第127页)

火焰外逸问题,主烧嘴的火焰形态良好,长度大,没有脱火现象,且燃烧充分;提高了钢包的烘烤温度,使钢液温降得到有效减小,且温度分布更加均匀^[4]。

将原来的手动调节方式改为全自动控制,大大提高了操作的便捷性和精确度;引入了上位机监视系统,使钢包调度人员能够实时获取每个烘烤位的工作状态信息。同时,实现了无纸化烘烤数据记录,包括钢包号、烘烤类型、烘烤时间、天然气消耗量及烘烤终点温度等重要指标。通过这些改进,实现了更高效、更智能的钢包烘烤管理系统,实现了有效提高铸件质量的目标^[5]。

5 结束语

1) 节能倒立式铁液浇包烘烤装置的设计,使铁液浇包的烘烤温度提高快、温度均匀,有效减少了铁液温降,解决了烘烤时间长、烘烤升温慢,以及能耗高等问题。

2) 智能控制柜能够根据预先设定的烘烤曲线控制烘烤进度和状态,在控制柜的显示屏上,实时显示现场的烘烤信息,可以对铁液浇包的烘烤状态进行实时监控,人员占用少,降低了现场人员操作强度,工作效率高,并可对烘烤过程进行及时反馈。

参考文献:

- [1] 吴何畏,郑元一,管飞. 节能浇包烘烤装置设计[J]. 铸造技术, 2018, 39 (7): 1485-1488.
- [2] 汪海峰. 新型浇包烘烤器的开发与应用[J]. 金属加工 (热加工), 2012 (13): 76-77.
- [3] 陈洁,顾俭,李安东. 复合型蓄热式燃烧技术的开发与应用[J]. 中国设备工程, 2008 (7): 11-13.
- [4] 张志明,林桂源,陈娟英,等. 蓄热式高炉煤气钢包烘烤装置的试验研究[J]. 炼钢, 2001 (4): 55-59.
- [5] 蒋志良,张定科. 卧式钢包烘烤器的设计和应用[J]. 江苏冶金, 1992 (6): 57-59.

MW 20240728

(上接第123页)

- 技术及应用进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (10): 1297-1311.
- [2] 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.
 - [3] 杨行,郭莹,林相,等. 机床底座ProCAST数值模拟及铸造工艺优化[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (6): 6-9.
 - [4] 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.
 - [5] 刘瑞杰,王成军,刘志魏. 基于ProCAST轴座砂型铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2016, 37 (1): 87-90.
 - [6] 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.

- [7] 程行东,王亚南,张红奇,等. 大型发动机油盘灰铸铁件的工艺优化[J]. 现代铸铁, 2022, 42 (3): 17-21.
- [8] 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.
- [9] 王永振,李乐川,殷亚军,等. 数值模拟热物性参数反求技术研究及其在轨道交通铸件中的应用[J]. 轨道交通材料, 2023, 2 (2): 7-11.
- [10] 申恩强,樊自田,龙威,等. 车钩钩舌的铸造工艺模拟与优化[J]. 铸造, 2011, 60 (8): 765-768.
- [11] 邵雄. 基于CAE分析的铸钢件冒口优化技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [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: 359.

MW 20240708