

大型球墨铸铁机床床身材质和 铸造工艺优化设计

周 韬¹, 彭 祥², 徐达义², 丰大顺², 黄中月¹

(1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 芜湖泓鹄材料技术有限公司, 安徽芜湖 241009)

摘要: 为解决大型QT600-3球墨铸铁机床床身铸件力学性能不足、凝固缺陷突出等问题, 本研究采用微合金化处理与数值模拟技术相结合的方法开展工艺优化。通过设计传统阶梯式浇注系统+冒口与多独立直浇道+冒口冷铁组合式浇冒系统两种方案, 结合Cu-Sn复合微合金化进行成分调控, 系统分析了铸造过程中的充型行为与凝固特性。结果表明, 优化后的工艺方案可有效改善铸件充型凝固过程温度场均匀性及铸件关键部位的温度分布与凝固顺序, 铸件缩松体积从958 cm³降至423 cm³, 降幅达55.85%; 同时, 铸件力学性能显著提升, 抗拉强度达648 MPa、伸长率达5%, 均超过QT600-3标准规定要求。该优化工艺可为大型复杂球墨铸铁件的铸造工艺设计提供理论依据与工程参考。

关键词: 球墨铸铁; 机床床身; QT600-3; 数值模拟; 铸造工艺优化; 微合金化; 浇冒系统; 凝固缺陷

中图分类号: TG244; TP391.9; TH161.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0791-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0101

Optimization Design of Material and Casting Process for Large Ductile Iron Machine Tool Bed

ZHOU Tao¹, PENG Xiang², XU Da-yi², FENG Da-shun², HUANG Zhong-yue¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Wuhu Honghu Materials Technology Co., Ltd., Wuhu 241009, Anhui, China)

Abstract: To address the prominent problems of insufficient mechanical properties and solidification defects in large-sized QT600-3 ductile iron machine tool bed castings, the process optimization was carried out by combining microalloying treatment with numerical simulation technology in this study. Through designing two process schemes, including the conventional stepped gating system with feeders and the combined scheme of multiple independent straight sprues with feeders and chills, and adjusting the composition via Cu-Sn composite microalloying, the mold filling process and solidification characteristics were systematically analyzed. The results show that the optimized scheme improves the temperature field uniformity of the casting and the temperature distribution and solidification sequence at key positions of the casting during the mold filling and solidification processes. The shrinkage porosity volume is reduced from 958 cm³ to 423 cm³, with a decrease rate of 55.85%; meanwhile, the mechanical properties are enhanced to a tensile strength of 648 MPa and an elongation of 5%, all exceeding the standard requirements of QT600-3. This optimized process can provide a theoretical basis and engineering reference for the design of similar large-sized complex nodular cast iron castings.

Key words: ductile iron; machine tool bed; QT600-3; numerical simulation; casting process optimization; microalloying; gating and feeding system; solidification defects

大型机床铸件(特别是机床床身)因其具有大平面、导轨面厚长和侧壁较薄等特点, 属于结构复杂且对尺寸精度和内部质量要求极高的部件^[1]。在制造过程中, 这类铸件常面临缩孔、缩松、变形和裂纹等铸造缺陷的挑战。采用QT600-3球墨铸铁制备机床床身

时, 该材料在凝固过程中产生的石墨化膨胀具有良好的自补缩效果, 有助于减少铸造缺陷。因此, 通过数值模拟优化浇注系统设计以实现均衡凝固, 对于提升铸件质量至关重要^[2-9]。

本研究针对某大型球墨铸铁机床床身铸件, 通

基金项目: 安徽省自然科学基金(2308085ME167)。

收稿日期: 2025-10-31 收到初稿, 2026-02-27 收到修订稿。

作者简介: 周韬(2001-), 男, 硕士, 主要研究方向为球墨铸铁铸造。E-mail: zt2335698418@163.com

通信作者: 黄中月, 女, 副教授。电话: 18919638245, E-mail: zhongyuehuang@hfut.edu.cn

引用格式: 周韬, 彭祥, 徐达义, 等. 大型球墨铸铁机床床身材质和铸造工艺优化设计[J]. 铸造, 2026, 75(7): 791-797.

Zhou Tao, Peng Xiang, Xu Dayi, et al. Optimization design of material and casting process for large ductile iron machine tool bed [J]. Foundry, 2026, 75(7): 791-797.

过ProCAST数值模拟,对充型、凝固和冷却过程进行分析。结合成分调整与浇冒系统改进,进行了实际生产验证。研究结果有效减少了铸件缺陷,提升了良品率,为同类大型铸件的铸造工艺设计提供了参考^[10-11]。

1 零件分析

机床床身铸件(图1)属于大型精密铸件,最大外廓尺寸为3 132 mm×5 000 mm×1 311 mm,总质量25 620 kg,采用树脂砂型消失模铸造工艺^[12]。铸件导轨部位壁厚较大,最大厚度超过76 mm,平均壁厚40 mm。其技术要求为:导轨面平直度符合设计标准,加工后表面不得存在缩松、缩孔等缺陷。

2 铸造工艺设计

2.1 浇冒系统设计

方案一采用开放式阶梯式浇注系统,直浇道布置于铸件两端。依据均衡凝固工艺原则,内浇道设计为

多道分散式结构以引入铁液^[13]。通过减小内浇口和冒口的截面积,并采用短薄宽的内浇口截面,实现了多股细流充填。由于铸件重量较大,因此采用环绕式双层阶梯浇注系统。该设计旨在充分利用球墨铸铁凝固过程中石墨化膨胀,以及浇注结束后浇注系统短期畅通的后补缩作用,以实现自补缩^[14]。在两导轨面位置放置了直接冷铁,以确保导轨的硬度及组织致密性。冷铁的放置位置如图2(a)所示。

考虑到行车距离和砂箱尺寸等工厂现有条件的限制,难以采用底注式或设置足够的中注式浇道^[15]。基于均衡凝固原理,设计了具有多个独立长直浇道、横浇道和阶梯式内浇道的系统,使用两个浇口杯分别引入独立的直浇道,如图2(b)所示。内浇口设置在厚大部位与侧壁的交界处,以便优先充型厚大处,避免冲击薄壁区域。在地脚螺栓部位采用了冒口与冷铁的组合方式,增加补缩量,确保冒口及时封闭,消除接触热节,减少顶面缩松、缩孔等缺陷。



(a) 视图1

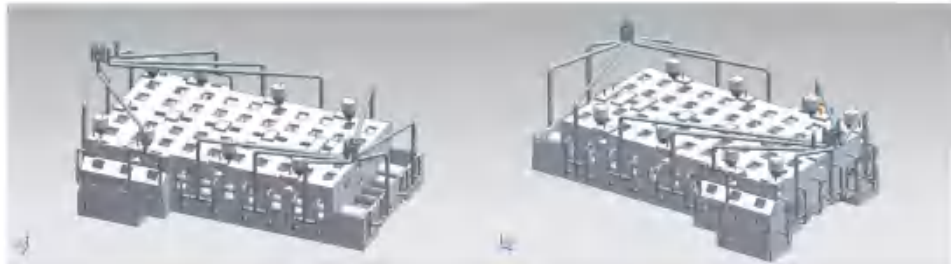
(b) 视图2

图1 机床床身三维图

Fig. 1 3D drawing of the machine tool bed



(a) 方案一



(b) 方案二

图2 浇注系统及冷铁冒口设计

Fig. 2 Design of the gating system, chills and risers

2.2 成分设计

微量元素在球墨铸铁中扮演着至关重要的角色，它们通过影响石墨形态、基体组织以及凝固行为，从而显著改变球墨铸铁的微观结构和力学性能。在微合金化调整方面，方案一和方案二分别采用了不同的化学成分进行模拟。

方案一使用了未进行Cu-Sn复合微合金化的成分，而方案二则使用了Cu-Sn复合微合金化，成分如表1所示^[16]。经微合金化调整后，铸件的珠光体比例由80%提升至90%，如图3所示，力学性能相应提高，其中抗拉强度达到648 MPa，伸长率达到5%，如图4所示。

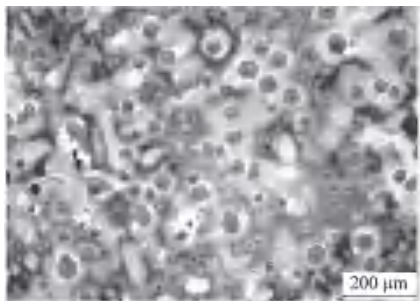
2.3 模型网格及参数设置

将模型从UG中以X-T格式导出，并导入ProCAST

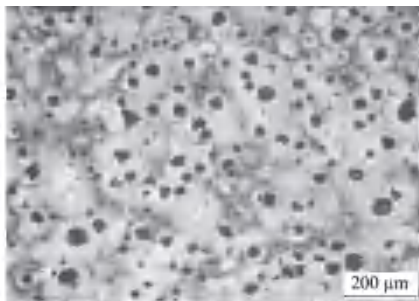
表1 微合金化后化学成分表
Tab. 1 The chemical composition table after microalloying
 $w_B/\%$

方案	C	Si	Mg	Mn	Cr	Cu	Sn
方案一	3.55	2.53	0.06	0.45	0.16	0.42	0.002
方案二	3.55	2.10	0.05	0.43	0.17	0.53	0.03

软件，使用其Mesh模块进行网格划分。为平衡准确性和计算量，多次模拟实验得到较为合适的网格大小，有限元模型网格数量达到千万级，有限元模型如图5所示。在消失模铸造的材料属性选择上，需将铸件属性分配为Foam，而浇道和冒口属性分配为Alloy。考虑到成分调整，将具体成分输入到ProCAST中计算其物性参数^[17-18]，热物性参数如图6所示。模拟浇注参数如表2所示。



(a) 方案一



(b) 方案二

图3 两个方案的金相组织

Fig. 3 Metallographic structures of the two schemes

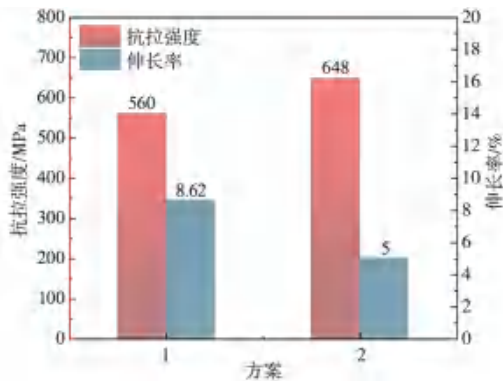


图4 不同方案力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of different schemes



图5 铸件有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the casting

表2 铸件模拟浇注参数
Tab. 2 Pouring parameters of the casting used for simulation

铸件材质	浇注温度/℃	砂型材料	浇注时间/s	打箱温度/℃
QT600-3	1 390	呋喃树脂砂	142	200

2.4 数值模拟结果

2.4.1 充型过程

方案一的充型过程如图7所示。直浇道两端的型腔最先接触金属液。受铸件结构和消失模发气阻碍，箱体一侧厚大部位充型速度较慢。充型从四周向中部推进。靠近浇口的区域温度较高，而侧壁距离较远，金属液到达时间长，温度持续下降，导致温度场分布不均匀^[19]。最终在137 s时完成充型。方案二的充型过程如图8所示。相比于方案一，方案二采用多独立直浇道设计，金属液独立进入型腔，速度较快，进入时间相差不大，在10 s时几乎同时抵达型腔并开始充型。前端金属液温度较方案一有所提高，且侧壁各部位的温差减小，温度场均匀性得到改善。充型仍由四周向中部推进，随后液面稳定上升，最终在147 s时完成充型。

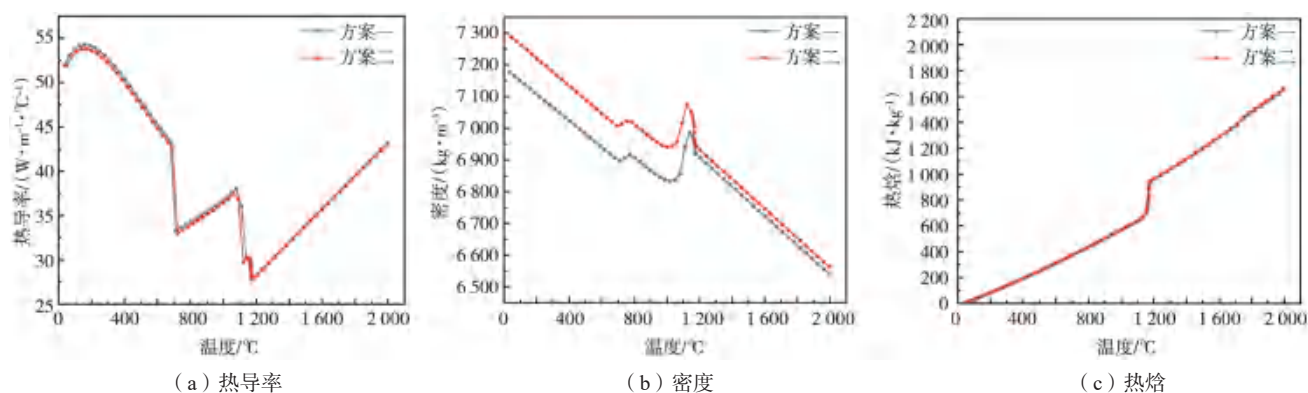


图6 不同方案热物性参数

Fig. 6 Thermophysical parameters of different schemes

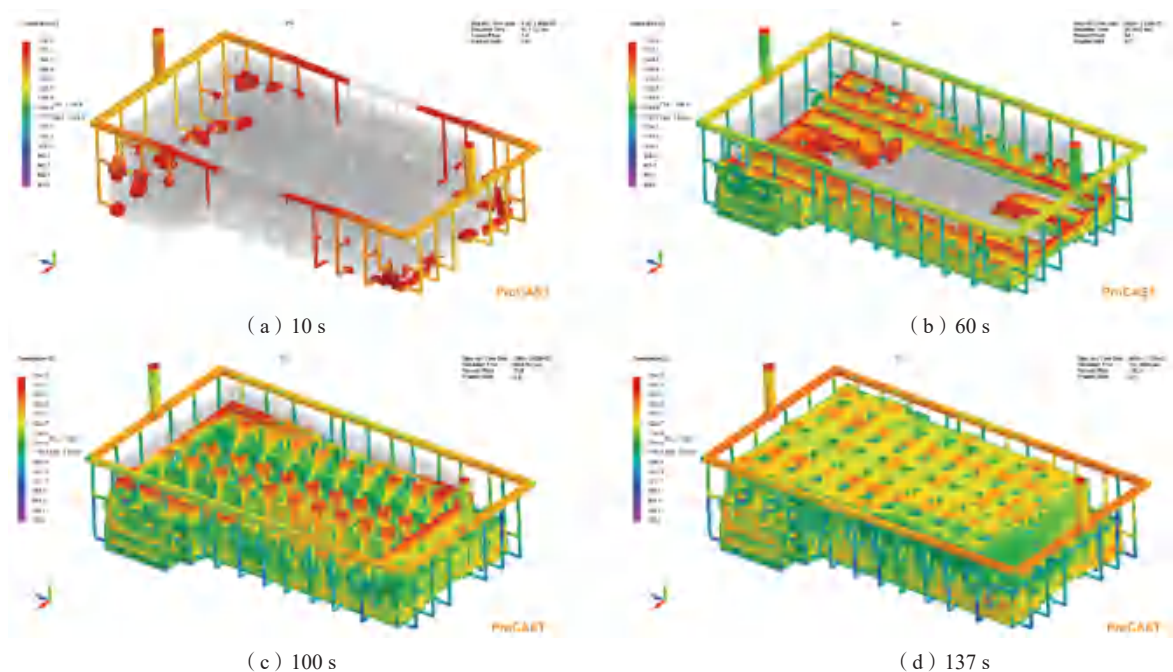


图7 方案一不同时刻的铸件充型状态

Fig. 7 Mold filling status of the casting for scheme 1 at different times

2.4.2 凝固过程

图9中为方案一不同时刻铸件温度场与固相率场。为了便于观察及大致划分铸件内部高液相占比区域，图9、图11的固相率场设置为固相率小于50%的截取图。方案一充型完成时，金属液温度总体呈现上高下低、中间高、侧壁低的趋势。凝固过程大致为四周薄壁先凝固，大部分区域近同步凝固，最后厚大热节处凝固。机床床身底部箱体部位壁厚最大、温度最高，凝固时间最长，并向周围传递热量，造成温度场不均匀，易产生缩松、缩孔。方案一顶部的地脚螺栓散热差、凝固晚，且该处补缩通道关闭较早，冒口作用未完全发挥，易产生缩松、缩孔。

方案二不同时刻的温度场如图10所示。图11为方案二不同时刻铸件固相率场方案二整体凝固过程与

方案一相似，仍为四周薄壁先凝固，大部分区域近同步凝固，最后厚大热节处凝固。由于微合金化成分调整，方案二的凝固时间有所提前。在底部箱体等厚大部位，凝固时间与其他部位相差较大，难以通过均衡凝固获得有效补缩。而方案二在地脚螺栓部位采用了冒口与冷铁的组合，使得该部位的补缩通道关闭时间延长，可通过顺序凝固进行有效补缩，使冒口作用得以有效发挥，有助于减少该处缩松、缩孔。

2.4.3 缩松缩孔

铸件主体区域实现了均衡凝固，石墨化膨胀可抵消大部分凝固收缩。然而，由于局部厚大部位的存在，铸件整体温度场仍不均匀，不利于实现完全的均衡凝固。例如，箱体、地脚螺栓及肋板交汇处凝固较晚，石墨化膨胀未能完全抵消金属液凝固收缩，且补

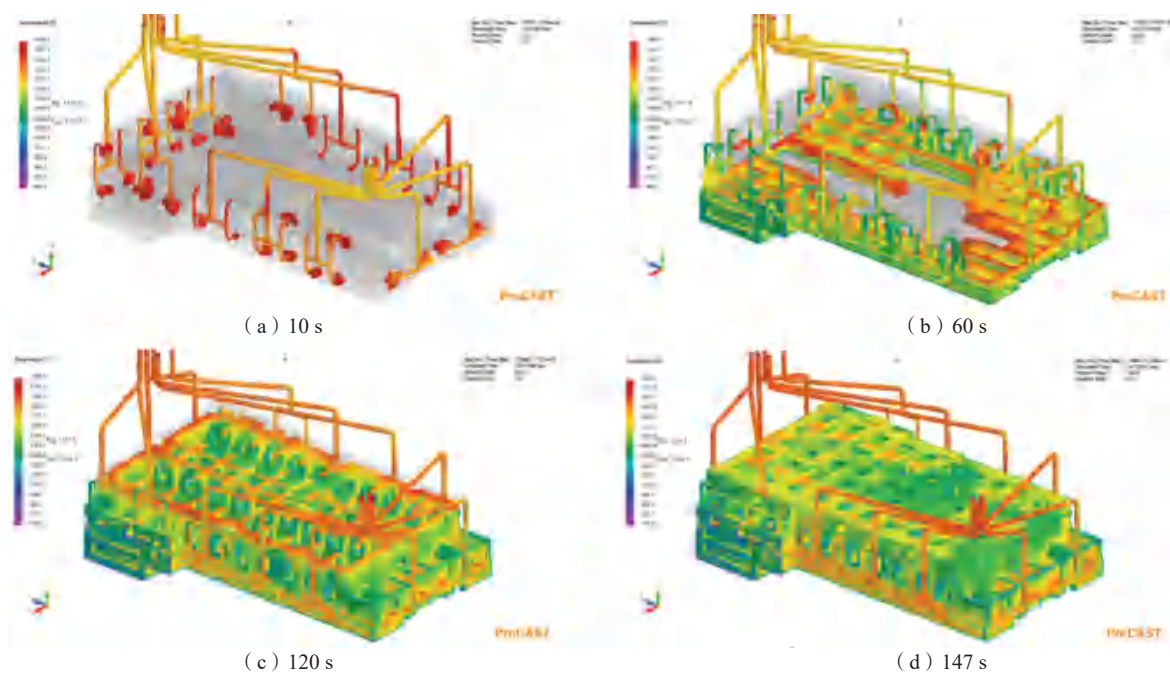
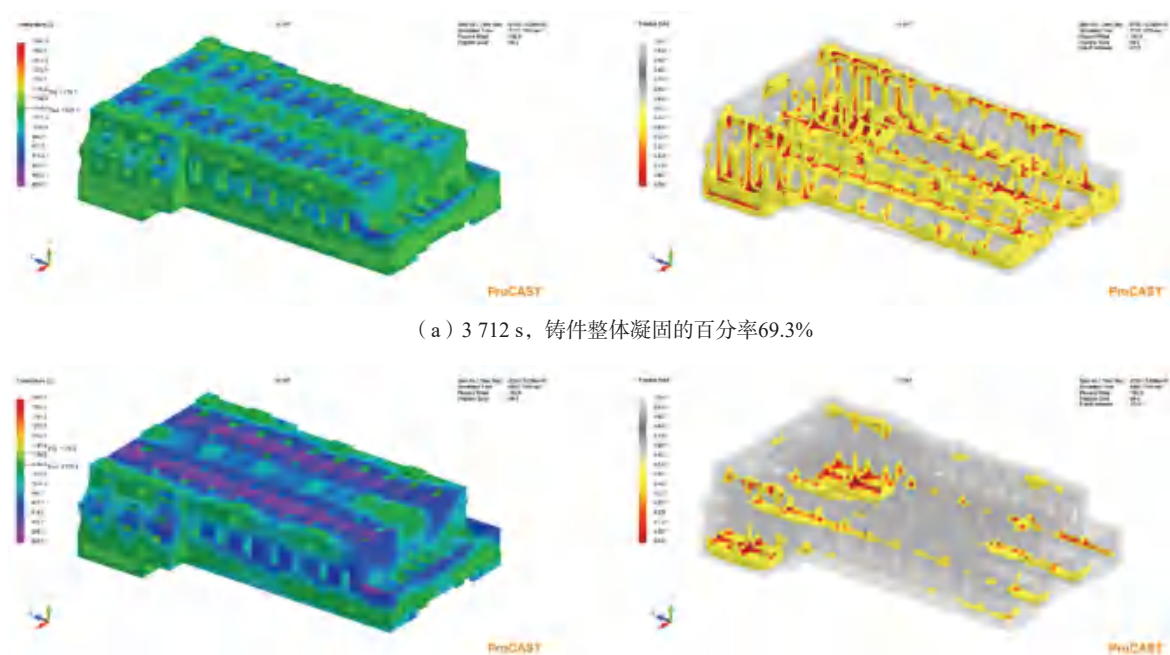


图8 方案二不同时刻的铸件充型状态

Fig. 8 Mold filling status of the casting for scheme 2 at different times



(a) 3 712 s, 铸件整体凝固的百分率69.3%

(b) 6 562 s, 铸件整体凝固的百分率89.4%

图9 方案一不同时刻铸件温度场与固相率场

Fig. 9 Temperature and solid fraction fields of the casting for scheme 1 at different times

缩不足,从而产生了较大体积的缩松、缩孔。

图12为方案一与方案二的缩松概率模拟结果。方案一与方案二的缩松缺陷位置相似,仍出现在铸件内部肋板交汇处、顶部地脚螺栓及箱体等热节部位。箱体因壁厚最大,凝固时间远超其他部位,在金属液流动性基本丧失时,只能完全依赖石墨化膨胀抵抗收缩,因此不可避免地出现缩松。方案二在顶面地脚螺

栓处采用了内冷铁与冒口联合使用的方式,使得该部位的局部凝固方式转变为顺序凝固。与方案一相比,顶部地脚螺栓处厚大部位的缩松体积有所减少,且整体的补缩通道较为完整,不足之处亦可由石墨化膨胀进行补充,从而较好地实现了均衡凝固。方案二铸件的缩松体积仅为 423 cm^3 ,相比于方案一的 958 cm^3 ,降低了55.85%。改进后的工艺可显著减少缩松等缺陷,

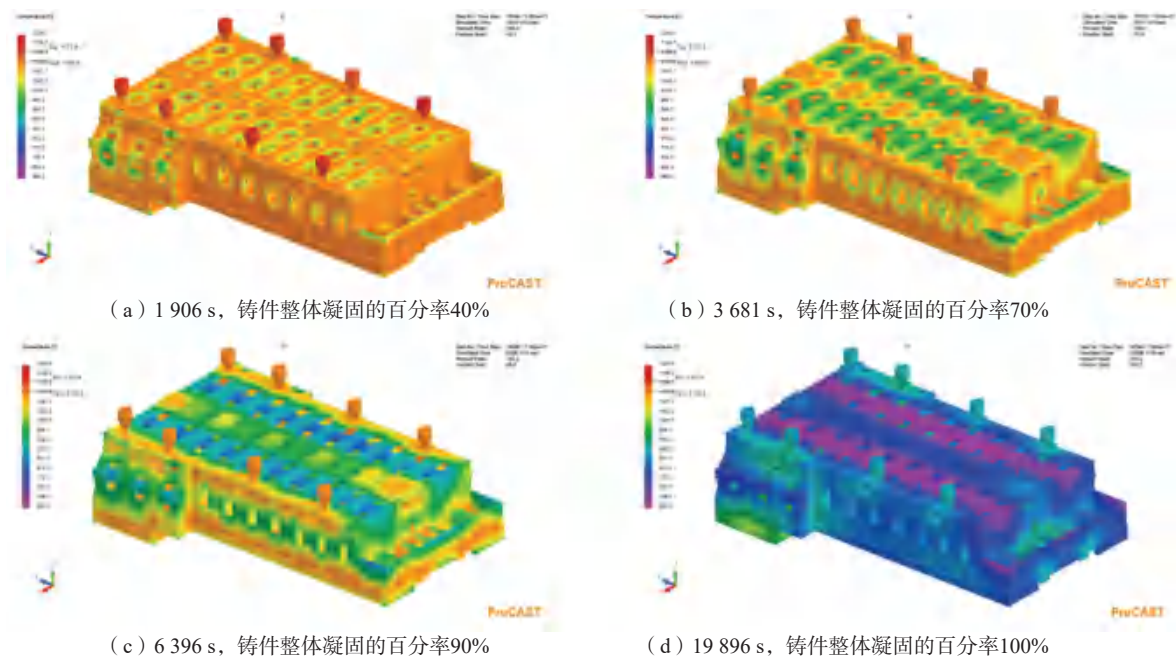


图10 方案二不同时刻铸件温度场

Fig. 10 Temperature fields of the casting for scheme 2 at different times

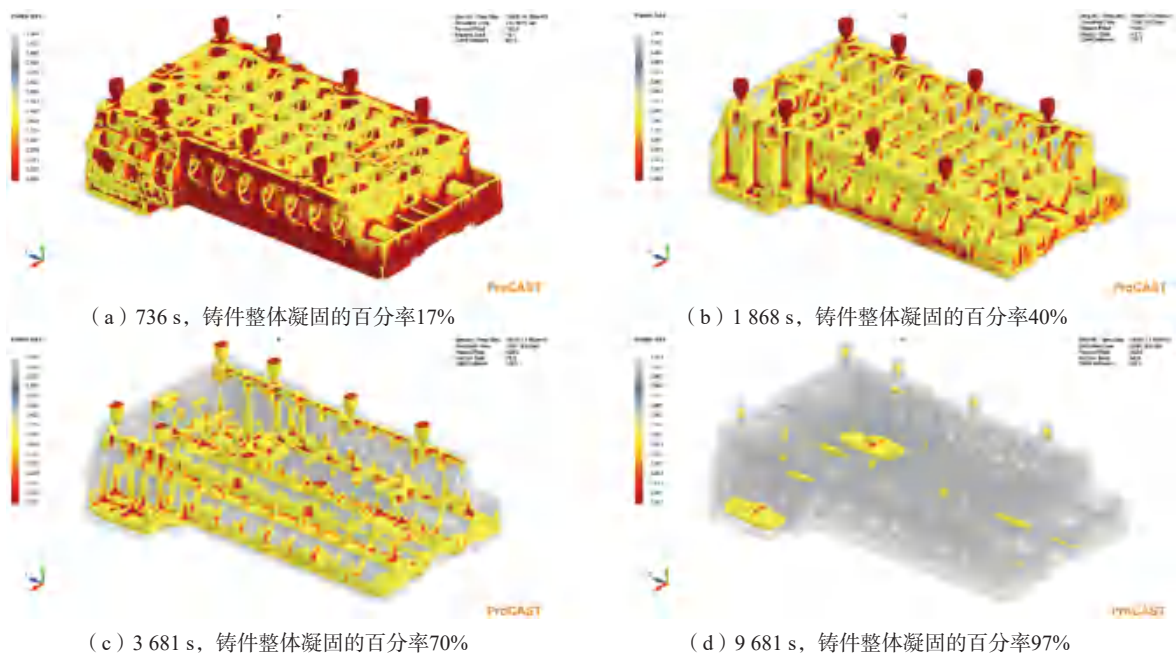


图11 方案二不同时刻铸件固相率场

Fig. 11 Solid fraction fields of the casting for scheme 2 at different times

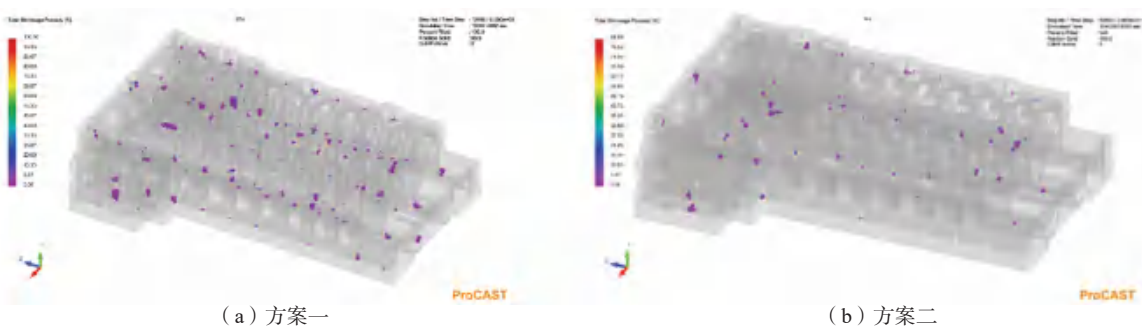


图12 铸件缩松缩孔分布图

Fig. 12 Distribution diagrams of shrinkage porosities and shrinkage cavities in the castings

数值模拟结果验证了浇注系统等铸造工艺优化与成分调整的有效性。

2.5 生产验证

在实际生产中各个独立直浇道最上端由浇口盆进

行连接。生产实践表明,在新铸造工艺下,铸件出品率明显提高,导轨面平直度符合设计标准,加工后表面无缩松、缩孔等缺陷(图13)。铸件有良好的力学性能,完全达到生产质量要求。



图13 浇注系统及铸件实物

Fig. 13 Gating system and the actual casting

3 结论

(1) 针对某大型球墨铸铁QT600-3机床床身,通过数值模拟对比两种铸造工艺方案,发现方案二(多独立长直浇道+阶梯式内浇道+冒口冷铁组合)的充型温度场均匀性优于方案一,且缩松缩孔体积大幅减少。经实际生产验证,浇注系统改进有效减少了缺

陷,提高了成品率。

(2) 微合金化成分调整(3.5wt.%~3.7wt.% C、2.0wt.%~2.2wt.% Si、0.5wt.%~0.55wt.% Cu、0.03wt.% Sn等)使铸件的珠光体比例达到90%,抗拉强度达到648 MPa、伸长率达到5%,力学性能完全满足QT600-3标准要求。

参考文献:

- [1] 卫东海. 高刚度低应力球墨铸铁的研究与应用 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
- [2] 古金涛. 高档数控机床铸件石墨类型影响因素及关键控制技术 [D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [3] Su F, Wang D, Xue J, et al. Data-driven optimization of material composition and casting processes for large ferritic nodular cast iron components in wind turbines [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2921 (1): 012002.
- [4] Cheng J, Zhang Y, Liao D. Numerical simulation and experimental validation of residual stress in heavy machine tool crossbeam casting during demolding [J]. Metals, 2025, 15 (7): 687.
- [5] Chen Y, Li S, Huang J, et al. Research on key casting process of high-grade CNC machine tool bed nodular cast Iron [J]. Reviews on Advanced Materials Science, 2023, 62 (1): 20230164.
- [6] Socha L, Gryc K, Sviželová J, et al. Prediction of defects of ductile iron casting by numerical simulation [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1243 (1): 012008.
- [7] 聂俊初, 王峥, 邢健博, 等. 基于数值模拟的QT500-7固定底座砂型铸造工艺优化研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2025 (2): 140-146.
- [8] 宫兴林, 刘柏余, 倪长圣, 等. 基于ANSYS Workbench的复合材料滑枕设计 [J]. 金属加工 (冷加工), 2025 (1): 57-61.
- [9] 丁旭, 谭宇函, 黄启贵, 等. 基于数值模拟技术的球铁铸件串铸工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (23): 65-68.
- [10] 张国俊, 孙志平, 邹丽艳. 铸造过程数值模拟的应用与展望 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (21): 61-64.
- [11] 孙浩, 王明明, 张晓妍, 等. 大型铸件铸造工艺及数值模拟研究进展 [J]. 兵器材料科学与工程, 2026, 49 (1): 200-214.
- [12] 郭跃广, 郑华昌, 刘波, 等. 消失模铸造工艺技术研究及应用 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (7): 1896-1899.
- [13] 吴殿杰, 章舟. 呋喃树脂砂铸造生产及应用实例 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [14] 李宏英. 铸造工艺设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [15] 田小东, 陈华, 韦运玲, 等. 基于ProCAST的机床主轴箱铸造工艺研究 [J]. 通信与信息技术, 2024 (1): 45-48.
- [16] 易超. 微合金化对铸态高强韧球墨铸铁材料显微组织和力学性能的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [17] 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): 995-1001.
- [18] 李庆庆. 基于ProCAST的复杂形貌耐热不锈钢薄壁件模拟与工艺研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
- [19] 丁盛. 基于AnyCasting的大型机床床身铸造温度场模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (3): 101-104.