

# 重卡轮毂的缩松缩孔形成机理及工艺优化

熊仁龙<sup>1</sup>, 王荣昌<sup>1</sup>, 吴和保<sup>1</sup>, 苏现想<sup>2</sup>, 凌骏春<sup>2</sup>, 连明堂<sup>2</sup>, 万 鹏<sup>1</sup>

(1. 武汉工程大学机电工程学院化工装备强化与本质安全湖北省重点实验室, 湖北武汉 430205;

2. 湖北新兴全力机械有限公司, 湖北随州 441300)

**摘要:** 针对重卡汽车轮毂在铸造过程中出现的缩孔缩松缺陷问题, 采用顺序凝固结合均衡凝固理论, 利用华铸CAE进行铸造模拟, 优化了补缩系统。优化后的浇冒口系统显著缩短了凝固时间, 降低了因缩松缩孔造成的废品率。结果表明, 铸件的结构完整性和理化性能均满足标准要求。本研究为提高铸件质量和优化铸造工艺提供了有益参考。

**关键词:** 重卡轮毂; 球墨铸铁; 缩松缩孔; 工艺优化

## 作者简介:

熊仁龙(1989-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为先进钢铁材料的制备与加工。E-mail: xiongrl1019@126.com

## 通讯作者:

万鹏, 男, 助理研究员, 博士, 硕士生导师。电话: 027-81624809, E-mail: 382663254@qq.com

中图分类号: TG250.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

04-0551-05

## 基金项目:

华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室开放课题基金(P2023-2026); 武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2022104)。

## 收稿日期:

2024-01-10 收到初稿,  
2024-01-23 收到修订稿。

轮毂是重卡汽车的重要组成部分, 对重卡汽车安全性有着重大影响, 其对强度、韧性有着较高的性能要求, 通常使用球墨铸铁来生产制造<sup>[1]</sup>。球墨铸铁以其优秀的力学性能和良好的可切削加工性, 在很多场合能够代替碳钢、合金钢、可锻铸铁等, 用来制造一些受力较复杂, 对强度、韧性和耐磨性要求较高的零件<sup>[2]</sup>。

随着重卡轻量化趋势的需求, 各零部件不断减重。重卡轮毂的结构越来越复杂, 针对铸造工艺带来较大的挑战, 再结合球墨铸铁的特殊凝固方式, 在生产过程中容易发生缩松缩孔缺陷<sup>[3]</sup>。球铁凝固过程的体积变化属于收缩和膨胀同时叠加, 由于温度降低引起的体积收缩和奥氏体析出导致的相变收缩和石墨析出导致的共晶膨胀共同作用表现出宏观上的体积变化, 最终表现为铸件上的体积缺陷<sup>[4]</sup>。对于铸造凝固过程中出现的缺陷, 常可以使用计算机辅助工程分析, 如缩松、缩孔、气孔、夹杂等, 为优化铸造工艺提供参考, 降低试制成本, 缩短设计周期, 提高铸件质量<sup>[5]</sup>。本文通过对比CAE模拟结果结合实际工艺, 设计了全新的浇注系统, 成功地将因缩松缩孔导致的产品不良率由50.57%降低到0.36%, 降低了50.21%。

## 1 轮毂件缩松缩孔分布特征

某重卡汽车轮毂为圆筒壳类结构, 壁厚不均匀。外轮廓尺寸为382 mm × 223 mm, 平均壁厚12 mm, 最大壁厚为52 mm。轮毂使用球墨铸铁ZQQT-2, 铸件本体要求抗拉强度大于600 MPa, 伸长率大于6%, HBW硬度为190~250, 金相组织要求: 主要组织为40%~70%珠光体和铁素体, 球化等级1-3级, 石墨大小大于6级, 游离碳化物不大于3%, 不允许存在大的片状和块状碳化物。轮毂毛坯总质量为36.98 kg, 铸件下部为阶梯式法兰面, 底部为用于螺栓固定凸台, 上部圆筒状结构。轮毂类球墨铸铁件是汽车底盘的重要保安零件, 此类零件壁厚不均匀, 热节分散, 冷却速度快, 存在着严重缩松、缩孔倾向<sup>[6]</sup>。

在实际生产中早期使用图1a浇注系统工艺批量化生产, 该工艺生产造成的缩松缩孔缺陷造成的不合格率高达50.57%。

此轮毂在铸造生产中出现的缩孔缺陷, 具体表现为图1b中的弯曲条状孔洞。孔洞主要出现在进水口的对侧, 靠近筒内壁, 孔壁光滑且为黑色。铸件内壁在热节位

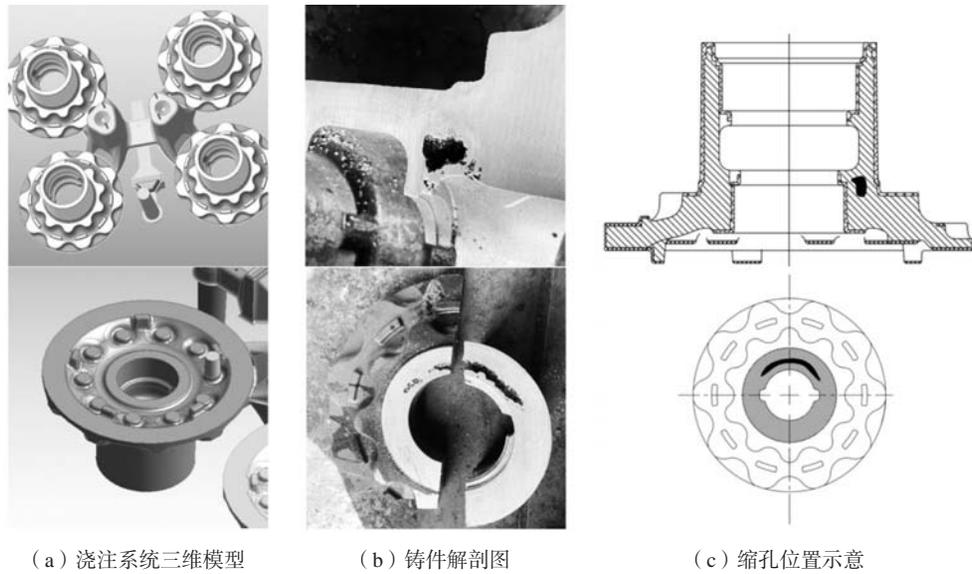


图1 铸件缩孔缺陷

Fig. 1 Shrinkage defects of casting

置附近出现内凹现象。解剖后，可以观察到缩孔主要集中在部分热节区域附近如图1c，而进水口附近由于冷铁的存在，凝固速率较快，因此未出现缩孔。

针对该缺陷，分析其可能原因如下：

(1) 冒口位置设置不当：冒口距离热节位置中心较远，导致补缩距离过长，从而影响了补缩效果。

(2) 冒口颈设计不合理：冒口颈的补缩位置距离热节区域较远，且冒口颈与热节区域之间存在较薄的区域。这些较薄区域凝固速度较快，一旦凝固，将阻断热节部分和冒口之间的补缩通道，进一步加剧缩孔的形成。

## 2 工艺模拟及分析

基于顺序凝固与均衡凝固原理，重新设计了浇冒口系统如图2。顺序凝固要求冒口位于热节处并最后凝固，以便直接对热节补缩，但是可能在冒口根部形成

缩孔<sup>[7]</sup>。为防止缩孔，按照均衡凝固原理，冒口不能扩大热节<sup>[8]</sup>。所以在靠近冒口根部的内侧位置放入冷铁，以减小接触热节<sup>[9]</sup>。同时，优化了浇道布局，提高了金属液充型速度。将原方案和优化后的方案使用华铸CAE进行模拟对比。模拟对比见图3。

图3为原方案与优化后方案的凝固过程模拟对比。原方案中，整体结构的凝固时间为2 355 s。凝固初期（图3a， $t=401$  s），发生液相隔离，冒口颈部提前凝固，而型腔内部的热节部分仍处于液态。较薄部位如法兰面边缘和圆筒顶部已转变为固相。铸件完全凝固时（图3b， $t=980$  s），热节附近出现缩松缩孔，但冒口还未凝固。完全凝固（图3c， $t=2\ 355$  s）后，铸件缩孔体积为 $92.55\text{ cm}^3$ ，缩松为 $367.92\text{ cm}^3$ 。总凝固时间过长，表明原方案冒口设计偏大。冒口内部缩孔较少，说明对铸件补缩有限。

综合分析表明，原浇注系统下，底部法兰面和

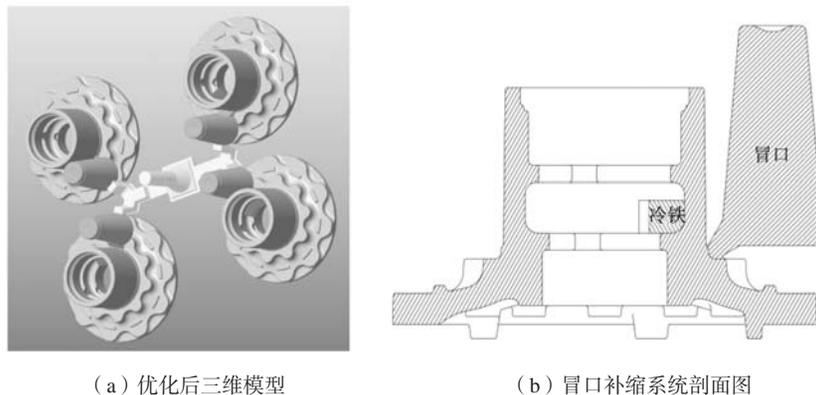


图2 优化后的浇注系统方案

Fig. 2 Optimized design of gating system

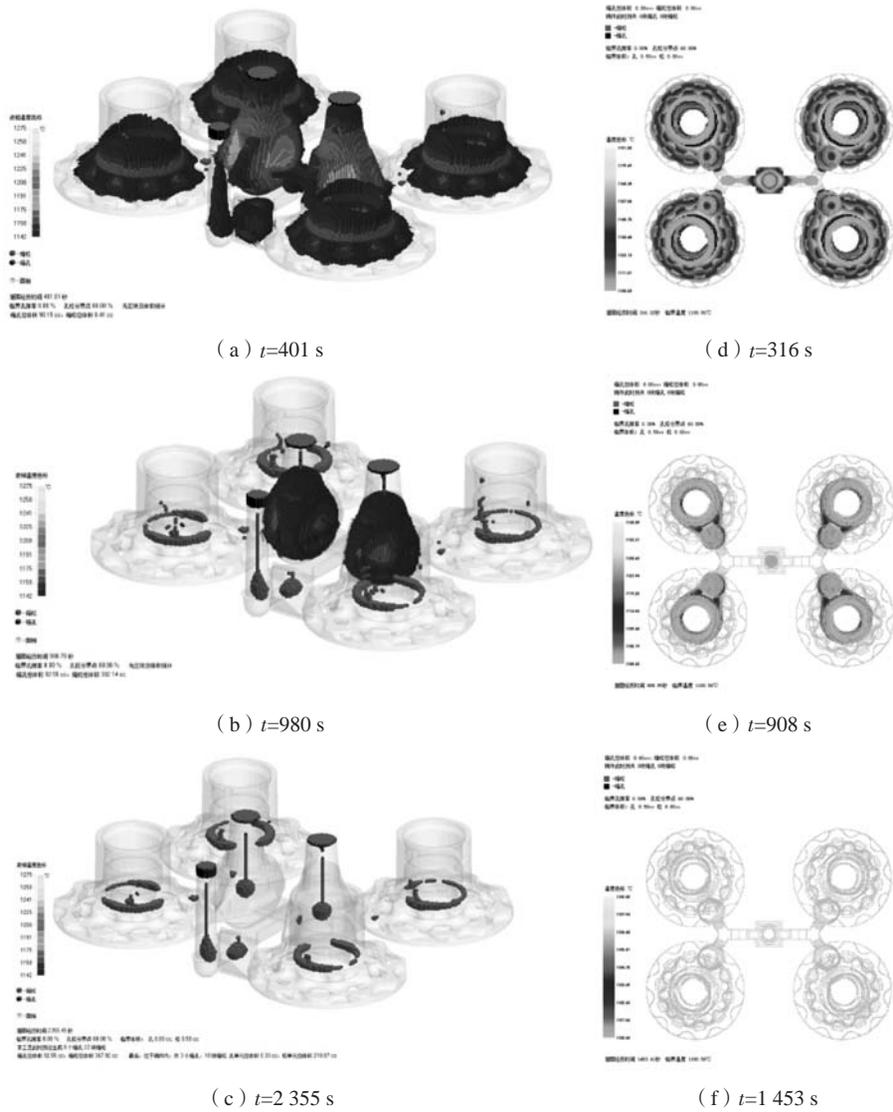


图3 凝固过程模拟仿真

Fig. 3 The solidification process of the casting

顶部圆筒先于厚大热节部分凝固并产生收缩。凝固后期，冒口颈提前凝固，导致铁液在收缩过程中补缩不足，最终在热节附近形成缩孔。

优化后，完全凝固时间缩短至1 453 s，实现近顺序凝固，从远离冒口的薄结构开始凝固，逐层向热节和冒口颈推进，避免了液相隔离。最终，在冒口颈附近完成凝固，显著减少缩孔和缩松缺陷，提高铸件质量。

### 3 试验验证与分析

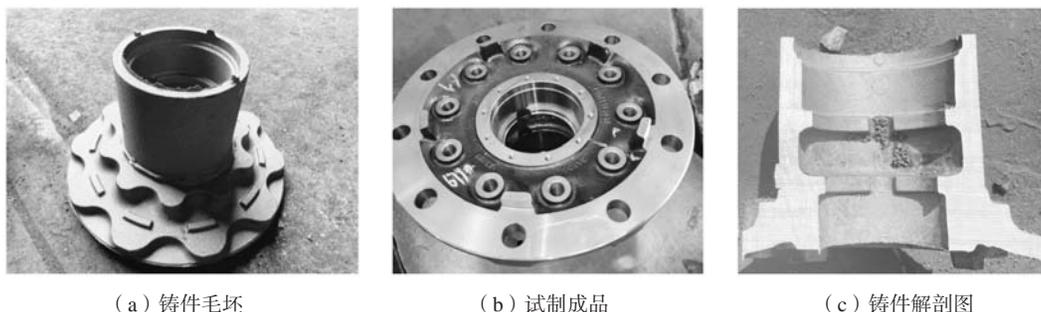
按照优化后的方案试铸，在6 t中频感应电炉中熔炼，出炉温度控制在1 500~1 540 ℃。使用多次孕育和喂丝球化工艺来稳定珠光体含量和提升球化质量。铸件经过去除冒口和震砂处理后，铸件表面光滑平整，无明显缺陷（如图4a），成品件表面同样无缺陷（如

图4b）。经过解剖后，铸件内部无缩松缩孔，满足质量要求。生产的1 672件中，仅6件存在缩松缩孔缺陷，显著提高成品率。该6件缩松缩孔出现的原因可能为：同一包铁液经过多箱浇注，在浇注后期包内铁液温度下降，导致最后浇注的个别砂箱内部铁液温度较低，容易出现缩松缩孔缺陷。

在铸件本体上取标准试棒，经测试其强拉强度、屈服率和硬度均满足使用标准，如表1。对本体法兰面所取得试块成分含量测试，如表2，测试元素碳、硅

表1 优化工艺后的力学性能测试  
Table 1 Mechanical properties of improved sample

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
被测试样	630	520	7	211
参考性能	≥600	≥380	≥6	190~250



(a) 铸件毛坯

(b) 试制成品

(c) 铸件解剖图

图4 试铸样品

Fig. 4 Sample of test casting

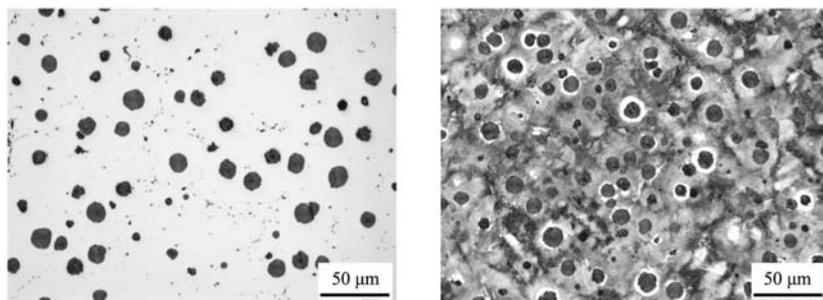
表2 元素含量测试  
Table 2 Elemental content test

项目	C	Si	P	S	Mg
标准值	3.6~3.8	2.3~2.5	≤0.05	≤0.02	0.04~0.05
被测试样	3.76	2.23	0.029	0.01	0.06

及微量元素磷、硫均在许可范围内。镁是球化元素，

通常残余镁控制在0.04%~0.06%，镁虽然超过标准值0.05%少量，但是还在在0.06%范围内，对铸件性能和缩孔缩孔无影响<sup>[10]</sup>。

同时观察试块的显微组织，在该金相测试中，如图5，金相显微镜放大倍数为100倍。珠光体含量为50%，球化等级为三级，球化较好，均满足零件技术要求。



(a) 未侵蚀

(b) 侵蚀后

图5 试块显微组织

Fig. 5 Microstructure of the test specimen

## 4 结论

(1) 本研究采用华铸CAE进行铸造模拟预测，结果显示预测的缩孔缺陷位置与实际生产中的缺陷位置高度一致。通过模拟分析，能够有效地缩短工艺开发周期，并减少试验成本，从而提高生产效率和经济效益。

(2) 针对中小型球铁件，由于壁厚部位铁液补缩

不足导致的缩孔缺陷问题，本研究采用顺序凝固理论和均衡凝固理论相结合的方法，通过合理设置冒口，使其直接对热节位置进行补缩，同时在热节区域设置冷铁以减小热节尺寸。在补缩过程中，确保铸件凝固时冒口的补缩通道畅通无阻，是消除缩孔缩孔缺陷的关键前提。

### 参考文献:

- [1] 李克锐, 李增利, 崔宇, 等. 我国铸铁生产技术现状与发展趋势 [J]. 铸造, 2022, 71 (2): 123-135.
- [2] 王峰. 球墨铸铁的应用及技术发展 [J]. 湖北理工学院学报, 2021, 37 (6): 54-58.
- [3] 郑洪亮, 田卫星, 孙建俊, 等. 球墨铸铁缩松形成机理研究的现状 [J]. 铸造, 2005 (11): 5-7.
- [4] 吴和保, 魏伯康, 樊自田, 等. 小型球铁件的收缩特点及其补缩工艺 [J]. 现代铸铁, 2003 (5): 29-31.

- [5] LIAO D M, ZHOU J X, CHEN L L, et al. Casting CAD/CAE automatic optimal riser design technology [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2013, 24 (3-4): 247-252.
- [6] 吴和保, 樊自田, 龙文元, 等. 轮毂类球铁件缩孔缩松缺陷的形成机理及防治措施 [J]. 中国铸造装备与技术, 2003 (5): 14-16.
- [7] 尹社新, 洪美琴. 球墨铸铁轴箱铸件的铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2014, 63 (8): 852-855.
- [8] 夏小江. 铁型覆砂铸造球墨铸铁件缩松缩孔的防止 [J]. 铸造, 2020, 69 (2): 187-190.
- [9] 张帆. 基于实用冒口及均衡凝固技术的球铁冒口设计方法研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [10] 瞿铁, 刁晓刚, 魏伟, 等. 厚大断面球墨铸铁齿轮铸件的研制 [J]. 铸造, 2023, 72 (3): 315-319.

## Formation Mechanism of Shrinkage Porosity and Process Optimization in Wheels of Heavy Trucks

XIONG Ren-long<sup>1</sup>, WANG Rong-chang<sup>1</sup>, WU He-bao<sup>1</sup>, SU Xian-xiang<sup>2</sup>, LING Jun-chun<sup>2</sup>, LIAN Ming-tang<sup>2</sup>, WAN Peng<sup>1</sup>

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Chemical Equipment Intensification and Intrinsic Safety, School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Hubei Xinxing Quanli Machinery Co., Ltd., Suizhou 441300, Hubei, China)

### Abstract:

Addressing the porosity and shrinkage issues encountered during the casting process of heavy-duty truck wheel hubs, a combination of sequential solidification and equilibrium solidification theories was employed. Casting simulations were conducted using Huazhu CAE software to optimize the feeding and risering system. The optimized gating and risering system significantly reduced solidification time and minimized the defect rate caused by porosity and shrinkage. The results showed that the structural integrity and physicochemical properties of the castings met the required standards. This study provides a valuable reference for improving casting quality and optimized casting processes.

### Key words:

heavy truck wheel hub; ductile cast iron; shrinkage porosity; process optimization