矿用平板车车轮铸件熔模铸造工艺优化

王成军，李环宇
（安徽理工大学人工智能学院，安徽淮南 232001）

摘要：矿用平板车车轮铸件结构复杂，在熔模铸造过程中经常会产生缩松缩孔等缺陷。通过数值模拟软件分析该铸件的浇注过程，结果显示在车轮轮辋底部存在较多缩松缩孔，严重影响了铸件质量。为降低该铸件的缩孔率，对工艺方案进行改进，同时针对浇注温度、浇注速度、型壳预热温度三个工艺参数进行优化。各个工艺参数之间对缩孔率的影响是相互的，通过正交试验获得最优工艺组合。优化后的工艺参数提升了车轮铸件的工艺质量和生产效率。

关键词：熔模铸造；车轮铸件；工艺优化；数值模拟；正交试验

作者简介：
王成军（1978–），男，教授，工学博士，博士生导师，主要从事智能机械与机器人、多维振动铸造理论与技术等方面的科研与教学工作。E-mail：cumt1279@163.com
通讯作者：
李环宇，女，硕士。电话：15029238138，E-mail：2022201879@aust.edu.cn

中图分类号：TG26
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2024）09-1286-06

基金项目：
2022 安徽省自然科学基金面上项目（2208085ME128）；2022 安徽省同心科创工程项目（202206e08020005）。
收稿日期：
2024–03–18 收到初稿，2024–05–25 收到修订稿。

矿用平板车车轮的直径远大于高度，是常见的盘型铸件，而盘型铸件是汽车制造、航空航天、矿山机械、交通运输等行业机械设备中常见的关键部件[1-5]。熔模铸造工艺生产出的产品一般具有良好表面粗糙度、结构形状复杂和较高尺寸精度等特点[6]。在熔模铸造过程中，矿用平板车车轮铸件可能会产生缩松缩孔缺陷问题，而传统工艺设计需要结合设计人员的经验进行“试错迭代试验”，既耗时又耗力，所以必须降低铸造过程的试制周期。采用数值模拟软件可以缩短试制时间，同时对铸件成形过程可视化，从而预测铸件缺陷产生的位置[7]。

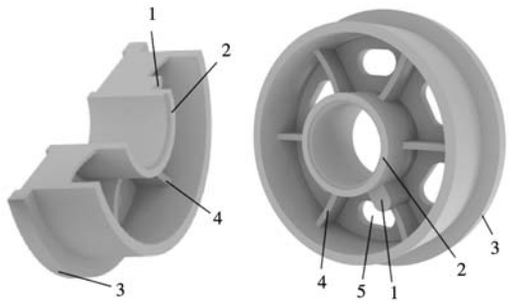
张跃[8]等结合熔模铸造，研究了叶轮铸件的三种浇注系统。古毅康[9]等对球墨铸铁轮盘铸件进行了铸造工艺设计，通过设置过滤网和顶、侧冒口等措施，防止铸件产生缩松缩孔等缺陷。史文东[10]等对某轮毂浇注过程进行模拟，并分析了垂直造型工艺砂孔缺陷问题。通过将某矿用平板车车轮作为研究对象，利用数值模拟软件分析矿用平板车车轮铸件充型、凝固过程以及缩松缩孔分布，进而优化浇注系统。同时研究了不同工艺参数对铸件缩孔率的影响，以达到提高铸件品质的目的。

1 车轮铸件结构分析

该铸件是某矿用平板车上的一个零部件，其材质为ZG35CrMnSi，化学成分如表1所示，具有高强度、耐冲击和耐摩擦的特点。铸件整体属于回转体盘型铸件，在一端内侧有一个凸缘，质量约为33.46 kg，轮廓尺寸为350 mm × 400 mm × 114 mm。如图1所示，其结构复杂且零件壁厚相差较大，其中轮毂处壁厚为36 mm，轮缘处壁厚为15 mm，中间辐板壁厚为10 mm；辐板之间存在均匀分布的6个30 mm × 20 mm直槽口。该部件不允许在铸造过程中产生明显的铸造缺陷，轮辋底部和轮辐连接处是铸件热节部位，如图2所示，不能产生对铸件整体有较大影响的缩松缩孔缺陷。通过SolidWorks软件对车轮铸件进行三维实体建模，如图1所示。

表1 ZG35CrMnSi的化学成分
Table 1 Chemical composition of ZG35CrMnSi w_B/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
0.4	0.75	1.2	0.03	0.03	0.8	0.3	0.25	0.15	0.05



1. 凸缘　2. 轮毂　3. 轮缘　4. 辐板　5. 直槽口

（a）局部剖面图　　（b）结构示意图

图1　矿用平板车车轮

Fig. 1 Mining flatbed wheels

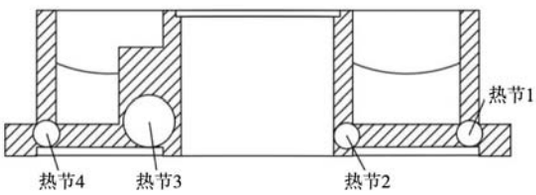


图2　热节分布图

Fig. 2 Distribution of hot spots

2　熔模铸造工艺设计

2.1　浇注位置选择

浇注位置是指铸件在铸型中浇注时所处的位置，是工艺设计中重要且需较早考虑的内容之一[11]。通过对轮毂的结构特点分析可知，铸件为圆盘形结构，热节分布如图2所示，轮盘底部易出现热节，其主要位于轮缘与底盘接触部位（热节1、热节4）、轮毂与底盘接触部位（热节2）以及凸缘与底盘接触部位（热节3）。对于车轮铸件浇注位置的选择主要为了实现顺序凝固，消除热节部位的缩松缩孔缺陷。由于车轮铸件的直径较大，高度较低，因此把车轮铸件的浇注位置设置在轮盘底部位置，这样使得金属液进入时流程较小。在该浇注位置中，将内浇口设置在车轮铸件壁厚最大部位，使得从铸件到浇注系统的顺序凝固。

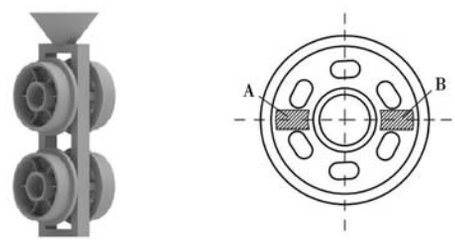
2.2　浇注系统设计

熔模铸造中浇注系统一般由浇口杯、直浇道、横浇道以及内浇口、冒口组成。由于车轮铸件上分布辐条较多，因此对金属液流动性要求高，需要考虑浇注过程中金属液的阻力等。由于侧注式浇注系统中金属液由型腔侧面水平注入，优点是金属液对铸型型壁冲击较小、熔模焊装等较方便，铸件补缩良好，排气性能比顶注式好，因此选用侧注式浇注系统[12]。

选择浇注系统的类型后，首先确定浇注系统的阻流截面，组元截面的大小决定了充型时间的长短。利用奥赞公式确定阻流截面：

$$F_{\min}=\frac{G}{\rho\tau\mu\sqrt{2gH_{均}}} \qquad (1)$$

式中：$F_{\min}$是浇注系统最小截面面积，cm^2；G是充填铸型的金属液总质量，kg；ρ是金属液的密度，kg/m^3；τ是充型的时间，s；μ是金属液流量系数；是金属液充型是实际平均计算压头，m[13]。通过Solidworks软件添加材质后，可以查看到模型的体积是34 892 566.126 mm^3。通过数值模拟软件中的Thermal可知，在室温状态下，金属液的密度是7.927 g/cm^3；在1 580 ℃左右时，密度是6.962 g/cm^3。G是244.913 kg，由公式（1）计算出阻流截面的取值范围介于44~47 cm^2。铸钢铸造常用的截面比为$M_{直}$：$M_{横}$：$M_{内}$=1.15：1.05：1[14]。根据车轮铸件特点，采用横浇道-直浇道-内浇道设计，一型四件。浇口杯选择圆形漏斗形，同时考虑顺序凝固，在车轮铸件底部放置2个内浇道（A、B），此操作可以让浇口更便于对厚大部位进行补缩，减小轮辋底部缺陷的产生，确保铸件致密。所设计的车轮铸件浇注系统结构如图3所示。



（a）浇注系统　　（b）补缩设计

图3　浇注系统结构

Fig. 3 Gating system structure

3　工艺方案试验及分析

3.1　确定浇注速度

速度过快将会导致钢液在进入型腔的同时，将空气卷入液体内部并随之一起流动，因而造成卷气；而速度过慢会导致钢液无法完成充型，引起浇不足缺陷。因此，合理控制浇注速度对铸件质量存在一定的影响。

以卡尔金公式计算浇注速度[15]：

$$v=\frac{0.22\sqrt{h}}{\delta\cdot\ln\frac{T}{380}} \qquad (2)$$

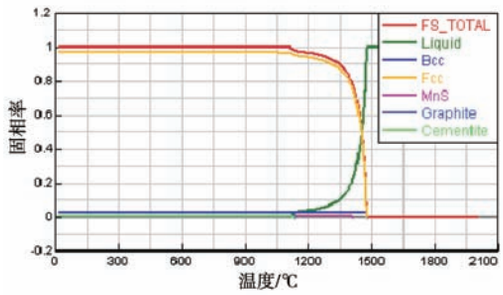
式中：v为浇注速度，cm/s；h为铸件高度，cm；δ为铸件壁厚，cm；T为浇注温度，℃。

根据上述计算得出，浇注速度v=278.416 mm/s。考虑参数影响，设定浇注速度为280 mm/s。

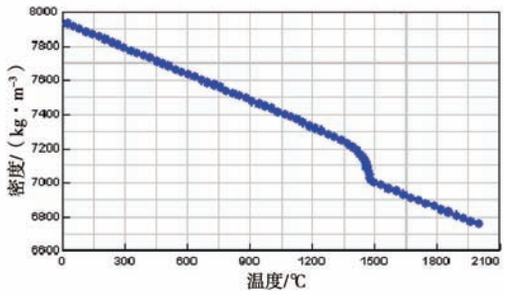
3.2 主要工艺参数设置

将合金钢35CrMnSi添加到数值模拟软件Cast模块中，并计算分析其热物理性能，如图4所示。

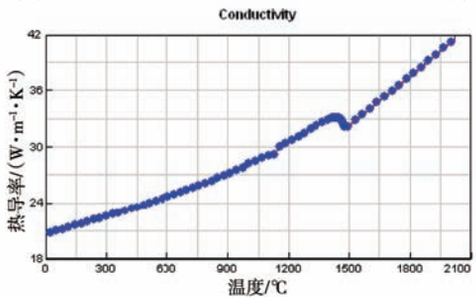
铸件材料的液相线温度为1 479 ℃、固相线温度为1 111 ℃。铸钢件浇注温度一般较其材质的液相线温度高50~100 ℃，因此浇注温度为1 530~1 580 ℃，取1 580 ℃；重力方向设置为*Y*轴负方向，充型速度为280 mm/s；型壳材料为石英砂，厚度约为6 mm，共有5层；在空气中完成浇注过程，型壳预热温度为1 000 ℃，以自然冷却的方式进行冷却。



（a）固相率随温度变化曲线



（b）密度随温度变化曲线



（c）热导率随温度变化曲线

图4 ZG35CrMnSi热物性参数

Fig. 4 ZG35CrMnSi Hot Physical Property Parameters

3.3 结果分析

铸件在初始工艺方案中不同时刻的充型状态，如图5所示。*t*=1.8 s时刻金属液已经进入直浇道内，开始自上而下进行填充，液面流动较为平缓，没有出现严重的飞溅现象，也没有出现冲击型腔壁的现象。在*t*=4.8 s时刻，第一组工件充型基本过半，而充型完全在*t*=6.2 s时刻。有可能裹气的地方在铸件的轮辋下部位置，此处容易产生缩松、缩孔。在*t*=11 s时，工件部分已全部完成充型。

铸件凝固的情况将影响其质量。铸件不同时刻的凝固率如图6所示，图中ZG35CrMnSi的临界固相率

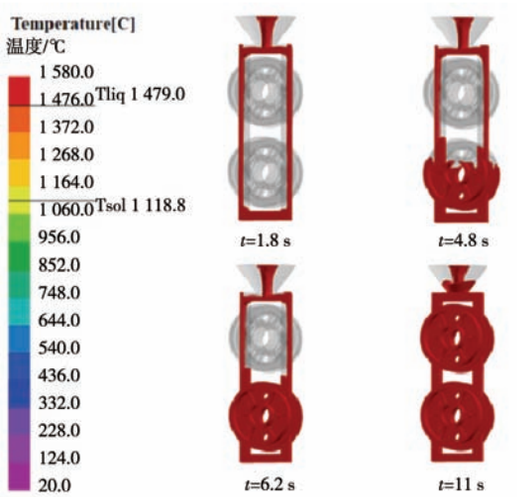


图5 初始方案铸件的充型状态

Fig. 5 The filling state of the initial scheme casting

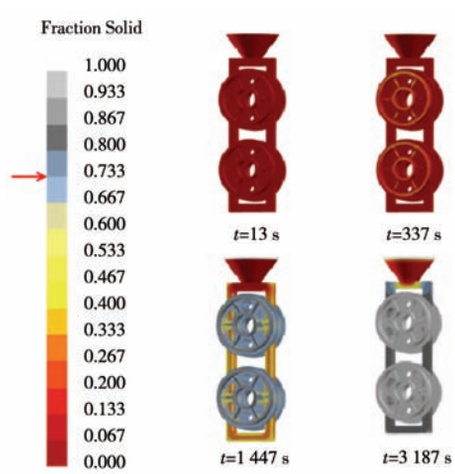


图6 初始方案铸件的凝固率

Fig. 6 Solidification rate of the initial scheme casting

取0.7。从图中可以看出，t=13 s时铸件完成充型。在t=337 s时刻铸件开始凝固，凝固顺序由轮辋上部和轮辐最先开始凝固，依次向车轮内圈、轮辐与轮辋的交接处凝固，最后凝固的是轮辋底部和内浇道连接处，以及浇口中心。观察温度场分布情况，可以看出，铸件浇注系统整体上呈顺序凝固，可以极大地避免铸造缺陷的产生。因为车轮上存在圆孔，并且圆孔与轮辋和轮辐之间的距离很小，使得圆孔位置此刻还没有凝固，有可能不利于金属液的及时补缩，造成缩松缩孔缺陷。图6中红色箭头所指的位置代表铸钢的临界固相率，可以看出在1 447 s时铸件主体凝固率已近似0.7，整个浇注系统凝固完全并且自然冷却到1 111 ℃需要3 187 s。

铸件在初始方案下的缩松缩孔分布，如图7所示。通过实验结果分析，发现在轮辋底部缩松缩孔较为严重，缩孔率为13.13%。分析模拟结果，产生缩松缩孔缺陷的原因是工艺方案设计不合理，导致铸件在凝固时因体积收缩，没能得到补缩。铸件主体部分分布的缩孔过多，铸件质量将会受到影响，严重可能导致产品报废。

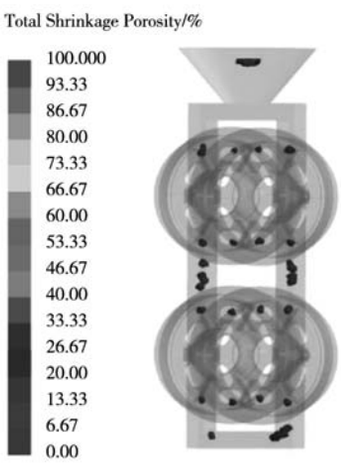


图7 缩松缩孔分布图

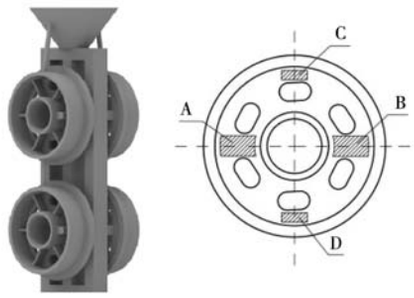
Fig. 7 Distribution of shrinkage porosity

4 工艺方案改进

4.1 浇注系统的改进

根据对初始方案的数值仿真结果可以看出，轮辋底部及轮辐周围依然存在缩孔缩松的铸造缺陷，而对于铸件质量来说，此缺陷的影响较为明显。如图6所示，轮辋底部和轮辐首先开始凝固，最后凝固区域在车轮与浇道的连接处，这造成了铸件薄壁部位已经凝固，而金属液由于补缩通道阻塞不能进行补缩，最终形成孤立液相区。

依据分析结果对初始工艺方案进行改进，图8是改进后车轮铸件的工艺方案。图8所示，浇注系统是以初始浇注系统方案为基础，在车轮铸件底部增加两个新的内浇道（C、D），以扩大浇注系统的补缩面积，使车轮上下两部分的缩松、缩孔缺陷消失，除此之外，增添排气孔并对改进方案进行数值模拟分析。



（a）浇注系统　　（b）补缩设计

图8 改进后车轮铸件的工艺方案

Fig. 8 Improve the process scheme of rear wheel castings

4.2 改进后工艺方案的数值模拟结果

图9是改进后工艺方案的缩松缩孔分布图。缩孔率为8.65%，与初始方案数值模拟缩孔率相比，数值减小。因此，改进工艺方案的设计较为合理。但由于铸件在轮辐周围及轮辋底盘还存在少量缩松缺陷，因此需要对优化方案进行参数优化。

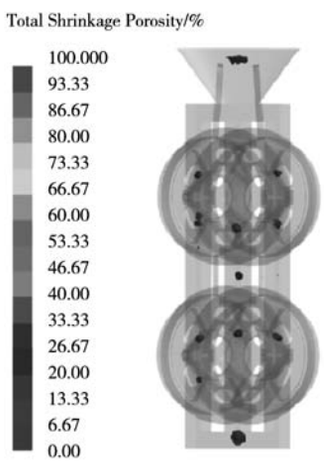


图9 改进后工艺方案的缩松缩孔分布图

Fig.9 Shrinkage porosity distribution diagram of improved process scheme a and b

5 熔模铸造工艺参数优化与验证

5.1 铸造工艺参数优化

通过对浇注温度、充型速度和型壳预热温度三个铸造工艺参数进行研究，结合相关文献及生产经验，选择浇注温度为1 530 ℃，1 555 ℃和1 580 ℃。型壳预热温度在750~1 000 ℃之内进行选择，确定750 ℃、900 ℃和1 000 ℃作为研究的三水平。由上述计算得出

了试验的浇注速度，考虑相关生产经验，选择充型速度分别为：270 mm/s、280 mm/s和290 mm/s。

根据已知参数，建立正交试验因素水平表，如表2所示。试验中三个影响因素分别是浇注温度、型壳预热温度和浇注速度，评判指标为铸件内缩孔率。铸件内缩孔率越小，说明此工艺组合越合理。

表2　正交试验因素水平表
Table 2 Orthogonal test factor level

水平	因素		
	A浇注温度/℃	B充型速度/（mm·s^{-1}）	C型壳预热温度/℃
1	1 530	270	750
2	1 555	280	900
3	1 580	290	1 000

根据正交试验因素水平表，借助ProCAST模拟软件完成9组方案的实验，获得相关结果的缩孔率值，并填入表内，如表3所示。分析结果可以探究影响缩孔率的各个因素，确定浇注温度、浇注速度和预热温度合理的取值，得到最佳方案。

表3　正交试验方案和结果
Table 3 Orthogonal test protocol and results

水平	因素A	因素B	因素C	缩孔率/%
L1	1	1	1	3.10
L2	1	2	2	3.00
L3	1	3	3	2.97
L4	2	1	2	3.03
L5	2	2	3	3.08
L6	2	3	1	3.13
L7	3	1	3	3.04
L8	3	2	2	3.08
L9	3	3	1	3.30

由表3可知，第9组试验铸件内缩孔率最高，达3.30%；第3组试验铸件内缩孔率最低，为2.97%。对比试验1、2和3，当浇注温度保持不变，提高充型速度与型壳预热温度时，缩孔率将下降，这可能是因为型壳温度的上升减缓了型腔中温度的下降，同时充型速度的提升促进了金属液的流动，从而使缩孔率下降。从试验1、4和7可以看出，充型速度保持不变，提高浇注温度和型壳预热温度将会影响铸件的缩孔率，但缩孔率并没有呈现出递增或递减的趋势，而是在浇注温度为1 555 ℃时最小，在1 530 ℃时最大，这可能由于浇注温度的升高导致钢液收缩值增大，对铸件的热作用增强，从而铸件自补缩不足产生缩松缺陷。所以温度不是越高越好，而是应该选择合理的温度。对比试验1和9可知，预热温度不变，提高充型速度和浇注温度会增加铸件缩孔率，这是由于充型速度过快导致钢液流动紊乱，易产生喷溅，造成卷气。正交试验方差分析如表4所示。

表4　三因素方差分析结果
Table 4 Results of three-way ANOVA

方差来源	平方和	自由度	均方	F	p
因素A	0.036	2	0.018	32.860	0.030*
因素B	0.019	2	0.010	17.256	0.055
因素C	0.058	2	0.029	52.228	0.019*
误差	0.001	2	0.001		

注：*p<0.05。

由表4可知，因素A呈现出显著性（F=32.860，p=0.030<0.05），因素C也呈现出显著性（F=52.228，p=0.019<0.05）。由此说明，因素A和因素C对缩孔率会产生差异关系。所以对比发现3个因素的主次关系是：“预热温度>浇注温度>充型速度”。因为正交试验的评判指标是缩孔率越小，铸件质量越优，因此筛选出的最佳工艺参数组合是A1B3C3。最优组合的试验结果如图10所示，铸件内缩孔缩松缺陷完全消除，深色部分主要集中在直浇道内，对铸件质量不会产生影响。

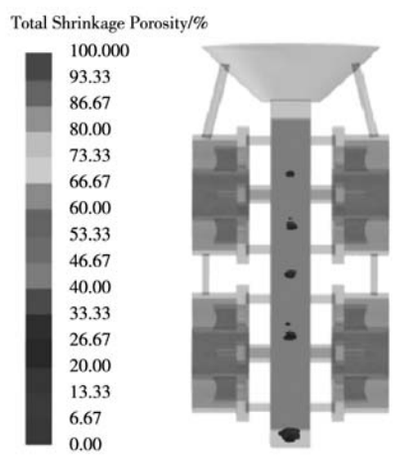


图10　最优工艺组合铸件的缩孔分布
Fig. 10 Distribution of shrinkage porosity in castings with optimal process combinations

5.2　生产验证

根据上述试验结果，通过对浇注系统及铸造工艺参数的优化，铸件缺陷得到改善。对矿用平板车车轮铸件进行生产验证。经生产验证，得到的车轮铸件外观良好，合格产品如图11所示。

6　结论

（1）为优化车轮铸件的成形质量和有效降低缩孔

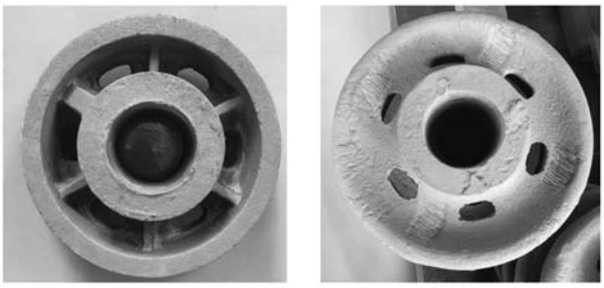


图11 合格产品图

Fig. 11 Diagram of qualified products

率，本设计对工艺方案进行优化，通过数值模拟软件仿真矿用平板车车轮铸件的熔模铸造过程。通过增加内浇道和设置排气孔对铸件缺陷进行改善，为实际生产提供指导性意见。

（2）结合工艺方案的仿真结果进行分析，并设计正交试验，优化工艺参数以提高铸件的产品质量，总结三个因素的主次关系是：预热温度>浇注温度>充型速度。同时，得到最佳的工艺参数组合为浇注温度1 530 ℃、浇注速度290 mm/s和型壳预热温度1 000 ℃。

参考文献：

[1] 李钟尧，吴雪龙，苗以升，等. 低压铸造铝合金轮毂工艺参数对缩孔缺陷的影响 [J]. 铸造技术，2024，45（2）:163–172.

[2] 何宇航，卢德宏，周振，等. 冷却工艺对大型铝合金轮毂低压铸造缺陷的影响 [J]. 铸造，2023，72（10）：1336–1344.

[3] 肖强伟，贾志伟，范世玺，等. 基于复合铸型的钛合金双流道闭式叶轮铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（9）：1275–1278.

[4] 魏伟，张磊磊，沈闯，等. 球墨铸铁在矿山机械厚大零部件中的应用 [J]. 现代铸铁，2022，42（5）：1–4.

[5] 阮建刚. 汽车制动盘材料检测要点 [J]. 铸造，2023，72（11）：1441–1446.

[6] HODGIR R，MITTAL Y G，KAMBLE P，et al. Comparative study of rapid ice investment casting Vs rapid casting processes of aluminium alloy [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2023，24：853–866.

[7] 刘娇. 大马力发动机用薄壁壳体铸件铸造工艺数值模拟与优化 [D]. 西安：西安工业大学，2023.

[8] 张跃，蒋勇，张乐莹. 基于增材制造的叶轮熔模铸造的工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2023，43（2）：277–80.

[9] 古毅康，康晋辉，李平，等. 高强韧性球墨铸铁轮盘铸件的试制 [J]. 铸造，2023，72（11）：1493–6.

[10] 史文东，陈毅，石云，等. 某轮毂垂直造型工艺砂孔问题的分析和解决 [J]. 铸造设备与工艺，2023（6）：24–5.

[11] 张稳，郭莹. 滑轨工作台铸造工艺数值模拟及优化 [J]. 热加工工艺，2022，51（13）：64–70.

[12] 罗利华，章舟. 熔模精密铸造技术问答 [M]. 北京：化学工业出版社，2012：22–23.

[13] 余欢. 铸造工艺学 [M]. 北京：机械工业出版社，2018：132–140.

[14] 李新亚. 铸造手册：铸造工艺 [M]. 3版. 北京：机械工业出版社，2011：529–538.

[15] 白瑀，张浩，黄亮. 基于ProCAST的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优化 [J]. 热加工工艺，2021，50（11）：71–75.

Optimization of Investment Casting Process for Wheel Castings of Mining Flatbed Trucks

WANG Cheng-jun, LI Huan-yu

(School of Artificial Intelligence, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China)

Abstract:

The structure of mining flatbed wheel castings is complex, and defects such as shrinkage and shrinkage holes often occur in the process of investment casting. The pouring process of the casting was analyzed by numerical simulation software, and the results showed that there were many shrinkage holes at the bottom of the wheel rim, which seriously affected the quality of the casting. In order to reduce the porosity of the casting, the process scheme was improved, and the three process parameters of pouring temperature, pouring speed and shell preheating temperature were optimized. The influence of each process parameter on the porosity is mutual, and the optimal process combination is obtained through orthogonal tests. The optimized process parameters improve the process quality and production efficiency of wheel castings.

Key words:

investment casting; wheel castings; process optimization; numerical simulation; orthogonal test

（编辑：潘继勇，pjy@foundryworld.com）