

基于正交试验的球墨铸铁轴承座铸造工艺数值分析

林堃兴¹, 魏 剑^{1,2,*}, 高 浩^{1,2}, 林智宏¹

(1. 三明学院 机电工程学院, 三明 365004; 2. 福建省铸锻零部件工程技术研究中心, 三明 365004)

摘要: 为合理设计并优化球墨铸铁轴承座铸造工艺参数, 需探究浇注温度、模具温度及浇注速度对浇注工艺缺陷的影响规律。基于流体连续性方程、N-S 方程和能量守恒方程等, 建立了球墨铸铁轴承座数值计算模型, 对比分析顶注式和底注式浇注系统, 优化冒口, 设置冷铁和排气系统, 并设计了 17 组正交模拟试验, 探究了浇注温度、模具温度及浇注速度对体积缺陷率的影响。极差及方差分析结果表明, 浇注温度是影响体积缺陷率的最显著因素, 其次为模具温度, 且二者皆与体积缺陷率呈正相关。在最佳浇注温度时, 可将浇注速度降至选定范围内的最低水平, 此时充型和凝固过程平稳, 铸件性能最佳。研究结果可为优化球墨铸铁轴承座铸造工艺参数提供理论指导。

关键词: 铸造工艺; 轴承座; 数值模拟; 正交试验

中图分类号: TG245 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0123-10

Numerical analysis of ductile iron bearing seat casting process based on orthogonal tests

LIN Longxing¹, WEI Jian^{1,2,*}, GAO Hao^{1,2}, LIN Zhihong¹

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Sanming University, Sanming 365004, China;

2. Fujian Province Engineering Technology Research Center of Casting and Forging Parts, Sanming 365004, China)

Abstract: In order to design and optimize the casting process parameters of ductile iron bearing seat, the effects of pouring temperature, mold temperature and pouring speed on casting process defects should be investigated. Based on fluid continuity equation, N-S equation and energy conservation equation, the numerical calculation model of ductile iron bearing seat was established, and the top pouring system and bottom pouring system were compared and analyzed. Firstly, the riser was optimized and the chills and exhaust systems were set up. Then 17 sets of orthogonal simulation tests were designed to explore the effects of pouring temperature, mold temperature and pouring speed on the defect volume fraction. The results of range analysis and variance analysis show that pouring temperature has the most significant effect on the defect volume fraction, followed by mold temperature, and both of them are positively correlated with the defect volume fraction. At the optimal pouring temperature, the pouring speed can be reduced to the lowest level within the selected range. At this

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 福建省区域发展项目(2022-H-4009); 三明市科技计划项目(2022-G-16); 大学生创新创业训练计划立项项目(202311311008)。

作者简介: 林堃兴(2002—), 男, 福建龙岩人。学士, 研究方向为铸造数值模拟。E-mail: 2196464441@qq.com。

* 通信作者: 魏 剑(1977—), 女, 山西平定人。副教授, 主要从事铸造及优化设计方面的研究。E-mail: 781075998@qq.com。

point, the filling and solidification process are stable and the casting performance is the best. The research results can provide theoretical guidance for optimizing the casting process parameters of ductile iron bearing seat.

Key words: casting process; bearing seat; numerical simulation; orthogonal test

作为装备制造业的基础,铸造业寻求采用数字化和智能化技术提升核心竞争力。铸件充型和凝固过程的数值模拟是提高铸件质量的有力保障^[1-2]。作为核心传动组件的轴承座通过介于旋转轴与支承结构间的轴承来显著减小摩擦,保护支承结构免受强大应力损伤,维持设备高效稳定运行。由于铸件充型和凝固过程中存在问题,易出现缩孔、缩松、气孔等缺陷,因此用体积缺陷率(Defect Volume Fraction, DVF)来评估铸件质量。

李伟伟等^[3-6]通过软件模拟方法研究不同浇注系统、局部冷铁或冒口、冷铁尺寸对铸件质量的影响,结果表明当充型过程平缓稳定时,可以获得合格的铸件。吴永康等^[7-9]应用正交试验法进行螺旋轴流式多相流泵、电池包壳体轻量化、压电致动器性能的多因素分析,从而获得最优参数组合。尹起^[10]通过正交试验法获得最佳浇注温度和浇注速度,有效消除铸件内的缩松(孔)缺陷。综上所述,影响铸件体积缺陷率的因素众多,应用正交试验法研究各因素共同作用对铸件体积缺陷率的影响规律,有助于有效降低铸件体积缺陷率,指导球墨铸铁轴承座铸造工艺参数。

1 数值计算模型

1.1 物理模型

本文以壁厚不均一的轴承座铸件为研究对象,长、宽、高分别为 0.321、0.127、0.099 m,质量 8.34 kg。由图 1 可知该铸件结构对称但复杂,表面有着大量圆角、曲面和斜面,空腔体积大,且壁厚不均匀,薄壁与厚壁及拐角部位尺寸差异大,顶部与内部圆弧处为重要表面,有概率产生开裂等缺陷,因此需采用合理的铸造工艺设计。

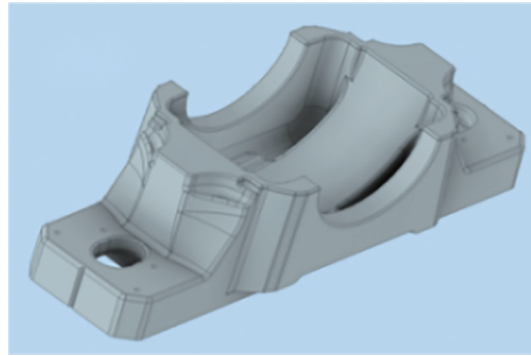


图 1 轴承座三维模型

1.2 数值模型

本文采用 SOLA-VOF 方法。假定注入型腔的铸铁熔液为不可压缩牛顿流体,采用重力铸造,遵循质量守恒和能量守恒,满足流体连续性方程、N-S 方程和能量守恒方程^[11-12]。

连续性方程:

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

N-S 方程:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g + \mu \nabla^2 w \end{cases} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

式中: D 为散度; u 、 v 、 w 为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; P 为单位密度的压力, J/kg ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ∇^2 为拉普拉斯算子; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$; c 为比热容, $J/(kg \cdot K)$; T 为

热力学温度, K; λ 为热传导系数, $W/(m \cdot K)$; S 为热源项; t 为时间。

1.3 铸造缺陷计算

本文采用温度梯度与冷却速率比值法来预测收缩缺陷。分析凝固过程中各个节点随时间演化的温度梯度(G)与冷却速率(R)之比值,当 G/\sqrt{R} 值小于预设界限值时,表明此位置易于发生缩松或缩孔现象。它的判据式为

$$\frac{G}{\sqrt{R}} < C; R = \left| \frac{T_u - T_l}{t_u - t_l} \right| \quad (4)$$

式中: G 为所选节点处的温度梯度, K/m ; R 为该处的冷却速率, K/s ; C 为临界值,与铸件尺寸相关; T_u 为液相线温度, K ; T_l 为固相线温度, K ; t_u 为液相线温度时刻, s ; t_l 为固相线温度时刻, s 。

2 初始铸造工艺模拟分析

2.1 模型设置

轴承座采用 QT400-18,其化学成分和实测值如表 1 所示。在 Anycasting 中选择砂型铸造方式,浇注温度初步设置为 $1420\text{ }^\circ\text{C}$,模具温度 $150\text{ }^\circ\text{C}$,铸件与冷铁接触面的热传导系数 $0.1\text{ }W/(m \cdot K)$ 。模具壁厚 0.03 m ,轮廓尺寸 $0.381\text{ m} \times 0.1871\text{ m} \times 0.280\text{ m}$,在铸件薄壁和圆弧剖面等重要位置放置 5 个传感器。

表 1 QT400-18 成分

项目	C	Si	Mn	P	S	Mg	Re
质量分数	3.50~3.60	2.50~3.00	0.45~0.57	0.05~0.06	0.01~0.03	0.03~0.06	0.03~0.05
实测值	3.50	3.12	0.14	0.04	0.01	0.04	—

2.2 网格无关性验证

为确保网格大小不影响数值模拟结果,分别对比了网格尺寸为 1、2、4、6、8、16 mm 时,浇注温度 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 、模具温度 $125\text{ }^\circ\text{C}$ 的充型时间。当网格尺寸低于 6 mm 时,随着网格尺寸的减小,充型时间增长趋势变缓,且 4 mm 网格尺寸计算结果与 2、1 mm 网格相差不大。因此,同时考虑模拟计算耗时与精度后,采用 6 mm 均匀网格划分进行后续模拟计算^[13]。此时,网格划分时间 0.372 s,表面单元 23 294 个,网格数 1 451 034 个。

2.3 浇注系统设计

浇注系统是铁液流向型腔内的重要路径。铸铁件工艺出品率取 70%,得浇冒口质量为 3.57 kg,型腔内金属总质量为 11.91 kg,铸件平均壁厚 6.5 mm,浇注时间 7.6 s,充型时间 4.4 s,计算得出上升速度 22.73 mm/s,满足 19~30 mm/s 的要求。对于封闭式浇注系统,内浇道、横浇道和直浇道的截面比例为 1 : 1.2 : 1.5,最终得到浇注系统如图 2 所示。

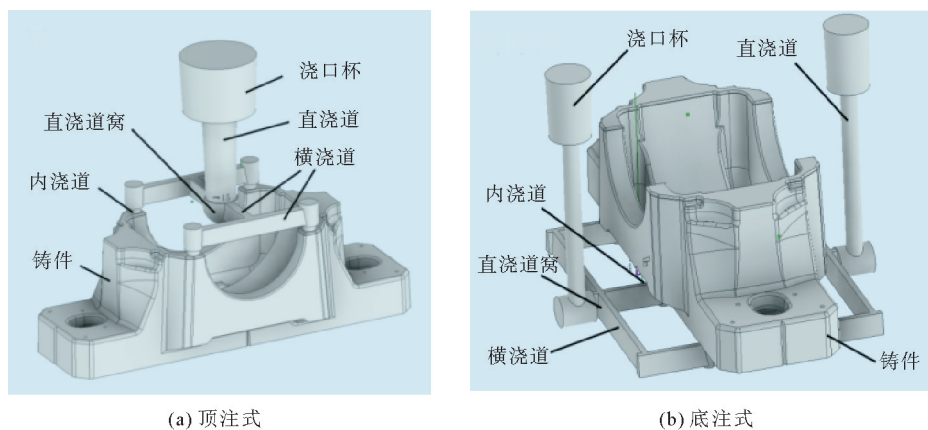


图 2 浇注系统

2.4 充型过程模拟

浇注工艺方案如表2所示。首先选取方案1对两种浇注系统无冒口的充型过程进行模拟,结果如图3、4所示。

对比图3(a)和图4(a),底注式和顶注式充型25.01%时间分别是1.32和2.60 s,底注式平稳充型,铁液没有大幅度的起伏和迸溅现象,底部最低温度1375℃,无卷气,无凝固现象;顶注式有小幅起伏,底部最低温度1325℃,有3处地方可能发生卷气。

表2 浇注工艺方案

方案编号	充型温度/℃	充型速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	模具预热 温度/℃	有无冒口
1	1400	0.50	125	无
2	1400	0.50	125	有
3	1380	0.40	100	有
4	1420	0.60	150	有

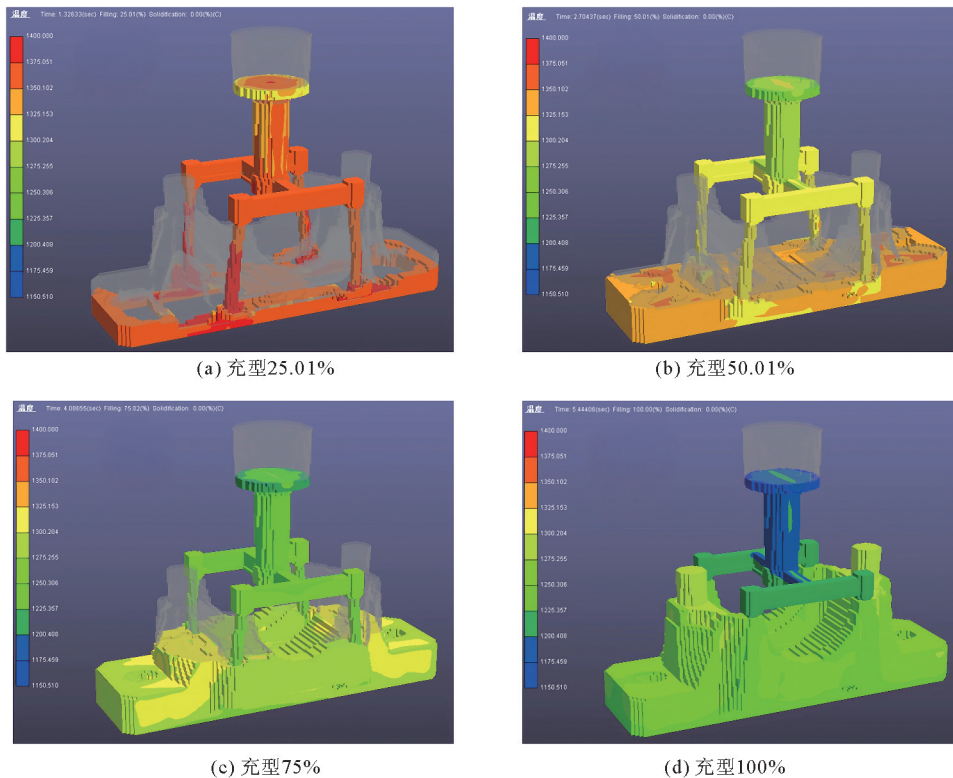


图3 顶注式充型温度场

对比图3(b)和图4(b),底注式和顶注式充型50.01%时间分别是2.70和5.19 s,二者铁液均上升较为稳定,无飞溅现象。底注式靠近内浇道温度1350℃,其余部位1325℃;顶注式均比底注式温度低50℃。

对比图3(c)和图4(c),底注式和顶注式充型75%时间分别是4.08和7.82 s。对比图3(d)和图4(d),底注式和顶注式分别在5.44和10.64 s时完成充型,铸件温度分别在1300和1250℃以下,底注式充型速度明显快于顶注式。顶注式温度梯度小,但浇注系统温度比铸件冷却快,不能依靠浇注系统实现补缩功能,有必要设计冒口。

2.5 凝固过程模拟

同时对两种浇注系统的凝固过程进行模拟,其中 t 为凝固时间,结果如图5、6所示。

对比图5(a)和图6(a),铸件由外而内进行凝固,温度峰值区域在铸件厚壁处。 $t=57.55$ s时前者凝固25.95%, $t=57.9$ s时后者凝固26.47%。对比图5(d)和图6(d),顶注式和底注式分别在502和440 s时完成凝固。

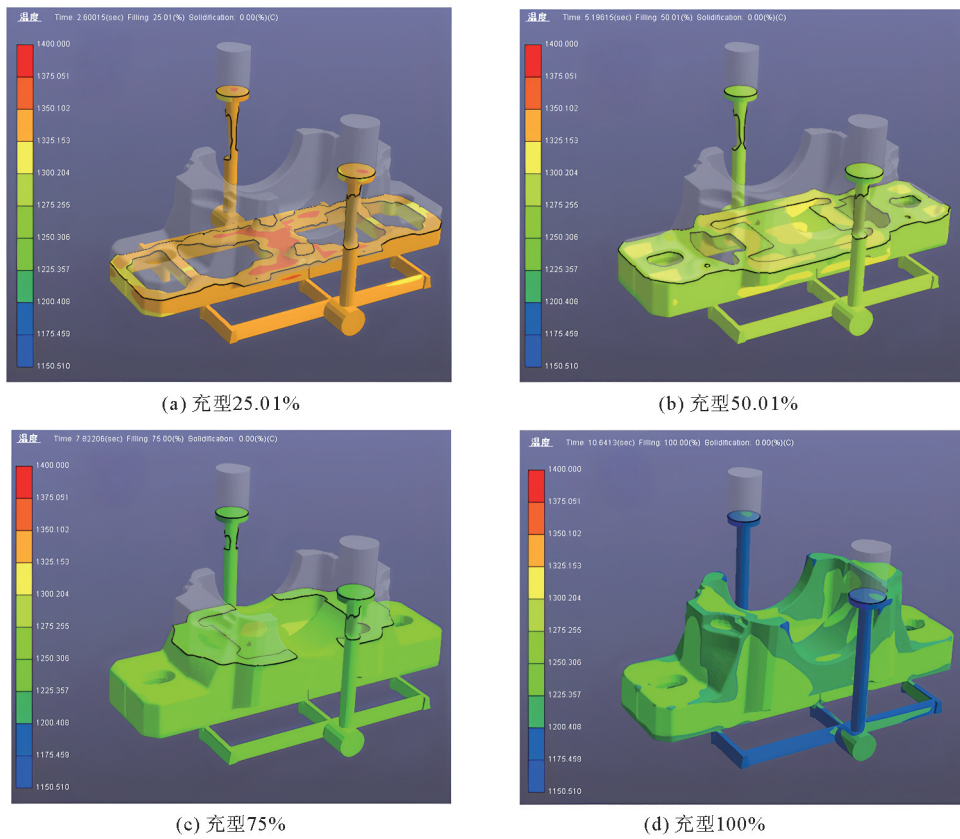


图 4 底注式充型温度场

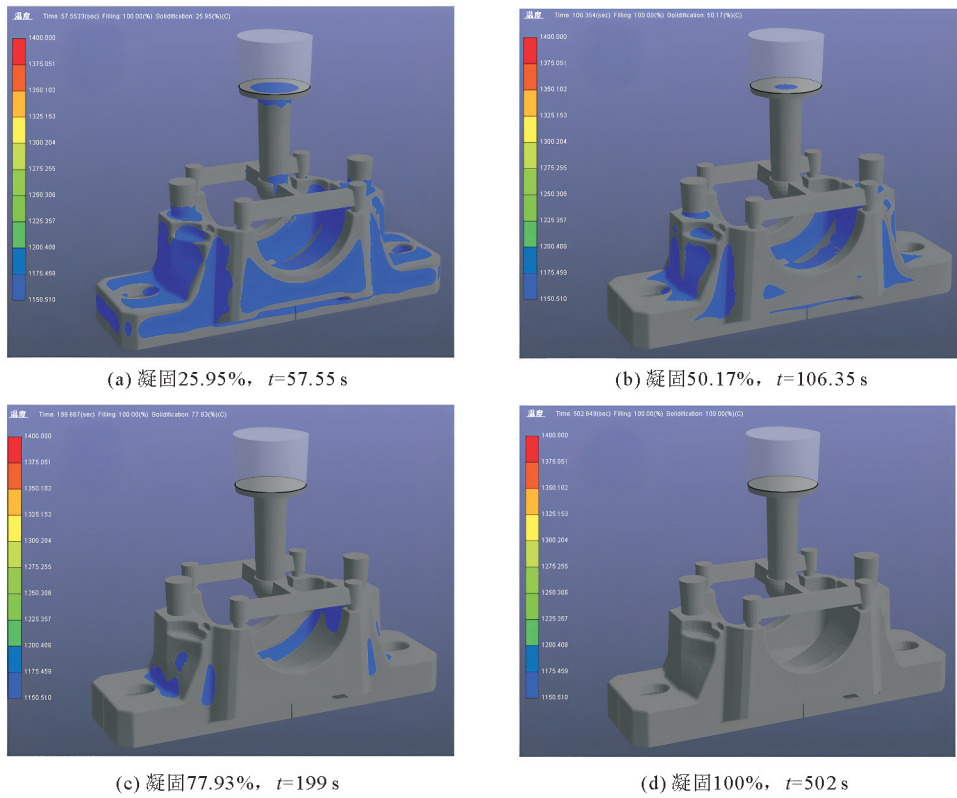


图 5 顶注式凝固过程

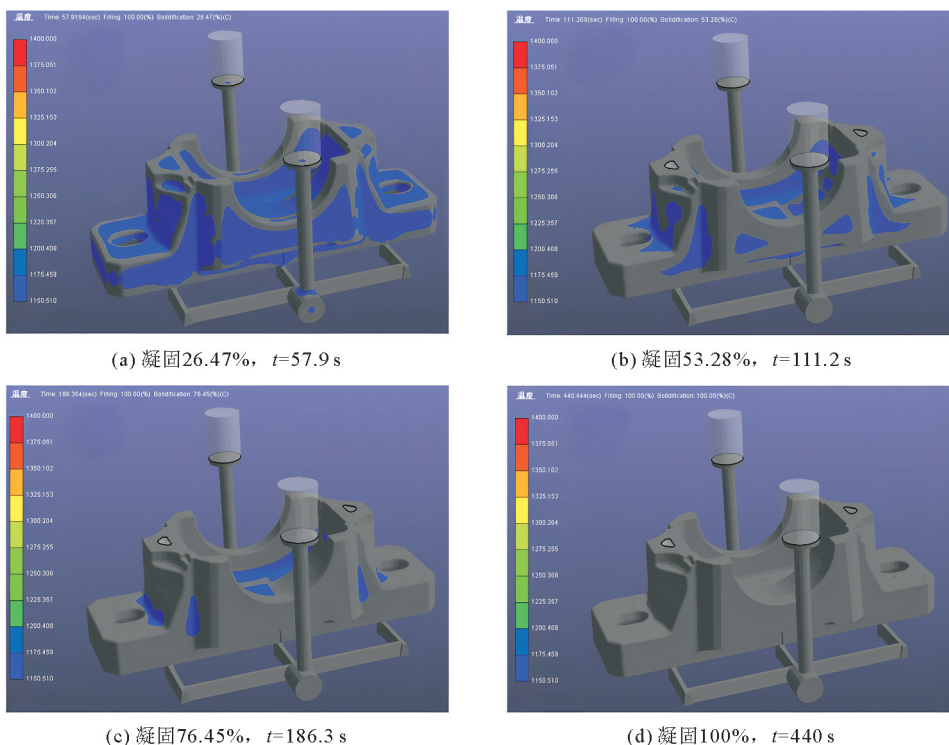


图6 底注式凝固过程

综上,底注式不能对顶部进行补缩,即使设计了2个浇口杯,充型速度几乎是顶注式的2倍,充型流程太过繁琐,故对顶注式浇注系统继续模拟。

2.6 缺陷分析

后续分别完成浇注方案2、3、4的模拟,从图7(a)—(c)可以看出浇注温度 $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、浇注速度 0.6 m/s 时凝固后产生的缺陷较少,主要集中在其内表面;由图7(d)可知内部标记的部分存在孤立液相区域,主要由于该局部厚大而形成热节,凝固过程中没有得到足够的补缩,进而导致缩松。

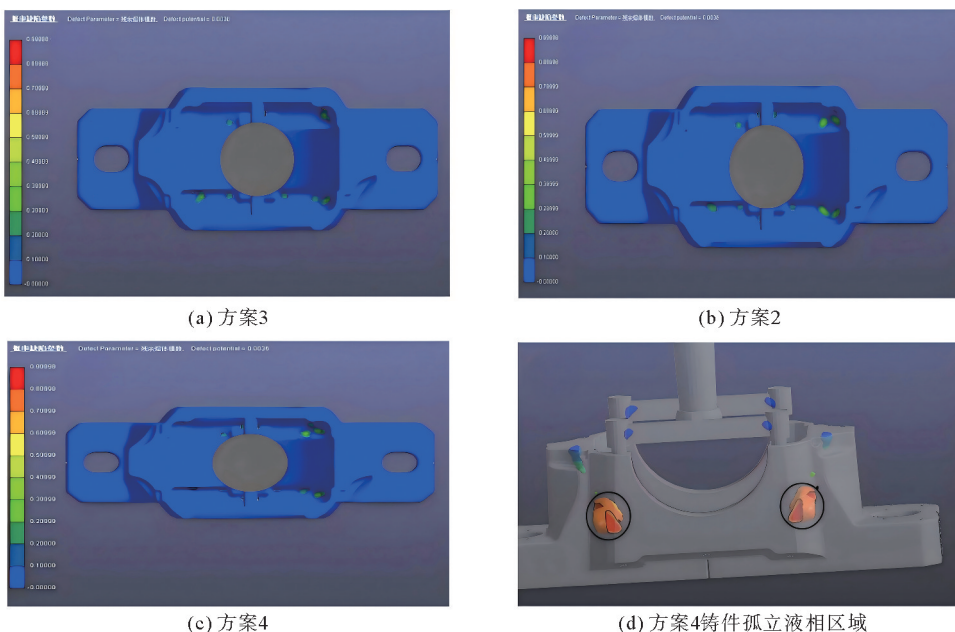


图7 缺陷分布

3 铸造工艺优化

3.1 冷铁、冒口、排气系统的设计优化

对于模数比较大的球墨铸铁件,由于凝固时间比较长,通常会降低石墨球化率,可能增加石墨粗大和石墨畸变等缺陷出现的概率,故须使用冷铁来减少其凝固的时间。采用铸铁外冷铁,间距控制在 20~30 mm。在铸件底部,内浇道向下区域由于铁液持续充型形成了一块过热区域,导致了铸件在该区域存在缩松缺陷,为此相应增加了冷铁,以扩大铸件的冷却面积。为加快铸件厚壁区即孤立液相区域冷却,同时排出充型时型腔内的各种气体,在厚壁侧边处增加引出式暗出气孔。此外优化圆柱形压边冒口尺寸,优化后的浇注系统如图 8 所示。

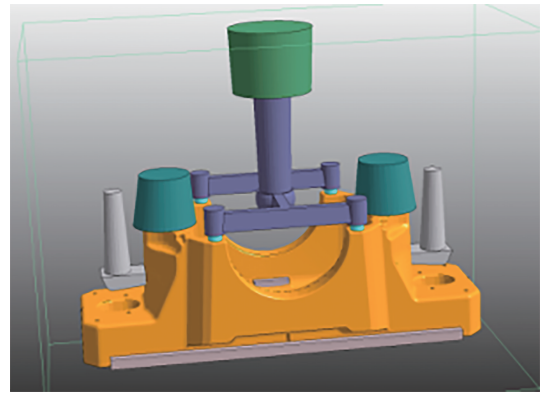


图 8 优化后的浇注系统

3.2 优化后缺陷情况

选择浇注方案 4 进行缺陷对比,补缩情况结果如图 9 所示,缩孔全部出现在冒口部分,铸件成型性很好,实物如图 10 所示。

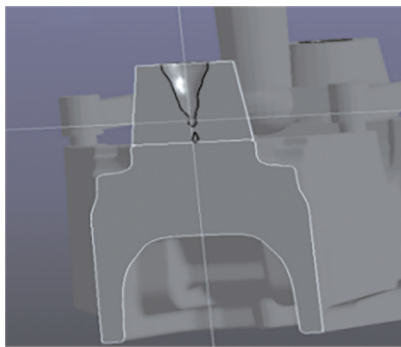


图 9 优化后冒口补缩情况

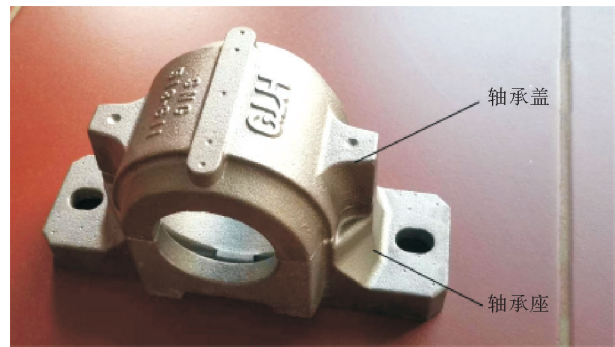


图 10 成型后的轴承座

4 正交模拟试验设计

试验变量和水平如表 3 所示。采用 Box-Behnken 试验设计,如表 4,当在 Design-Expert 13 软件中输入可变因素和水平时,它可以自动生成测试表。从表中可以看出,生成了 17 组测试方案,其中包括 5 组中心重复测试。由于不需要连续多次试验,在相同的因素下,试验组合比中心重复试验少,因此更经济^[14]。

以体积缺陷率作为响应指标的回归分析公式为

$$Y_1 = 0.5504 + 0.1243A + 0.0455B - 0.0232C + 0.0202AB + 0.0098AC - 0.0292BC + 0.0317A^2 - 0.0333B^2 - 0.0473C^2 \quad (5)$$

获得拟合模型,并使用方差分析评估模型的适宜性,如表 5 和表 6 所示。模型的极端显著性 ($P < 0.0001$) 和不显著性 (misfit) 表明它可以预测检验因素对响应指数的影响方向。

表 3 试验变量和水平

水平	浇注温度 A/°C	模具温度 B/°C	浇注速度 C/(m·s ⁻¹)
水平 1	1380	100	0.05
水平 2	1400	125	0.06
水平 3	1420	150	0.07

表 4 正交试验测试

序号	工艺参数			响应
	浇注温度 A/°C	模具温度 B/°C	浇注速度 C/(m·s ⁻¹)	体积缺陷率 Y ₁ /%
1	1400	150	0.05	0.574
2	1380	125	0.05	0.426
3	1400	125	0.06	0.550
4	1400	150	0.07	0.457
5	1380	125	0.07	0.372
6	1420	125	0.07	0.663
7	1400	100	0.07	0.424
8	1400	125	0.06	0.543
9	1400	150	0.06	0.517
10	1420	100	0.06	0.596
11	1400	125	0.05	0.577
12	1420	125	0.05	0.678
13	1380	150	0.06	0.461
14	1420	150	0.06	0.727
15	1380	100	0.06	0.411
16	1400	100	0.05	0.424
17	1420	125	0.06	0.565

表 5 体积缺陷率响应模型方差分析

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.1678	9	0.0186	37.970	<0.0001	显著
A	0.1235	1	0.1235	251.490	<0.0001	
B	0.0166	1	0.0166	33.720	0.0007	
C	0.0043	1	0.0043	8.810	0.0209	
AB	0.0016	1	0.0016	3.340	0.1103	
AC	0.0004	1	0.0004	0.774	0.4081	
BC	0.0034	1	0.0034	6.970	0.0334	
A ²	0.0042	1	0.0042	8.600	0.0219	
B ²	0.0047	1	0.0047	9.520	0.0177	
C ²	0.0094	1	0.0094	19.200	0.0032	
残差	0.0034	7	0.0005			
失拟项	0.0013	3	0.0004	0.8585	0.5312	不显著
纯误差	0.0021	4	0.0005			
总离差	0.1712	16				

表 6 体积缺陷率模型拟合情况

标准差	平均值	变异系数/%	拟合度 R ²	修饰后的 R ²	预测拟合度 R ²	信噪比
0.0222	0.5274	4.20	0.9799	0.9541	0.8551	21.2543

一个准确的模型应该有许多决定系数, R² 大于 0.9 且接近 1, 但 R² 也会随着更多变量的加入而上升, 因此, 这种相关性通常用修饰后的 R² 来表示。变异系数小于 10%, 在合理范围内, 且模型中的 R² 和修饰后的 R² 均大于 0.9, 表明模型具有较高的可靠性^[15]。

模型残差的正态概率如图 11(a) 所示, 残差服从正态分布, 呈直线分布; 预期响应和实际值均为线性分布, 如图 11(b) 所示。响应面模型如图 12 所示。当浇注速度 C 为中间水平时, 图 12(a) 描绘了反应值体积缺陷率 Y₁ 随浇注温度 A 和模具温度 B 的波动情况。从图中可以看出, 当 B 在 100~125 °C 时, Y₁ 随 A 的增加先增大后略有减小, 而当 B 在 125~150 °C 时, Y₁ 随 A 的增加而增大。总体来看, Y₁ 随 A 的增加而增大, 且在所选水平范围内, A 的影响幅度大于 B, 说明降低浇注温度是降低体积缺陷率的有效途径。

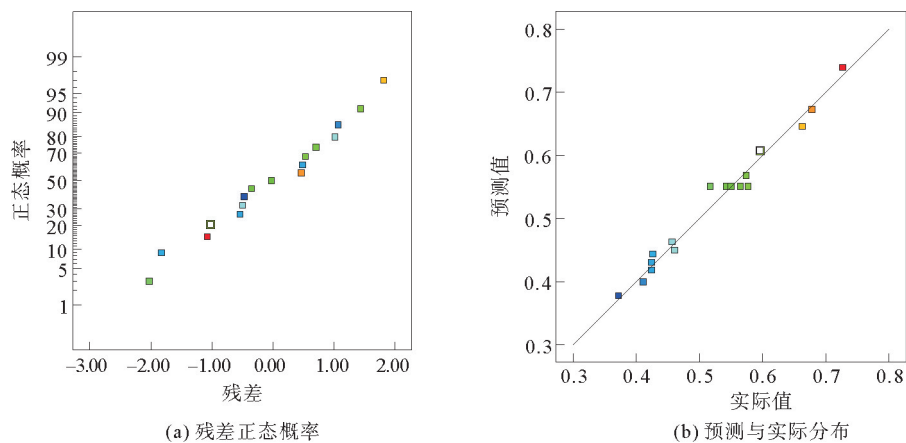


图 11 响应诊断

从图 12(b)中可以看出, Y_1 随着 A 的增加而增加,当 $C \geq 0.06 \text{ m/s}$ 时, Y_1 的变化趋向大于 $C < 0.06 \text{ m/s}$ 时。当 A 适中且 C 大于 0.06 m/s 时,得到的结果最优,说明提高浇注速度可以降低缺陷率。从图 12(c)可以看出, B 和 C 对 Y_1 的影响都很大,但当 $B > 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 且 $C > 0.06 \text{ m/s}$ 时,对 Y_1 的影响较小,曲线的陡峭度表明 C 的影响大于 B 。

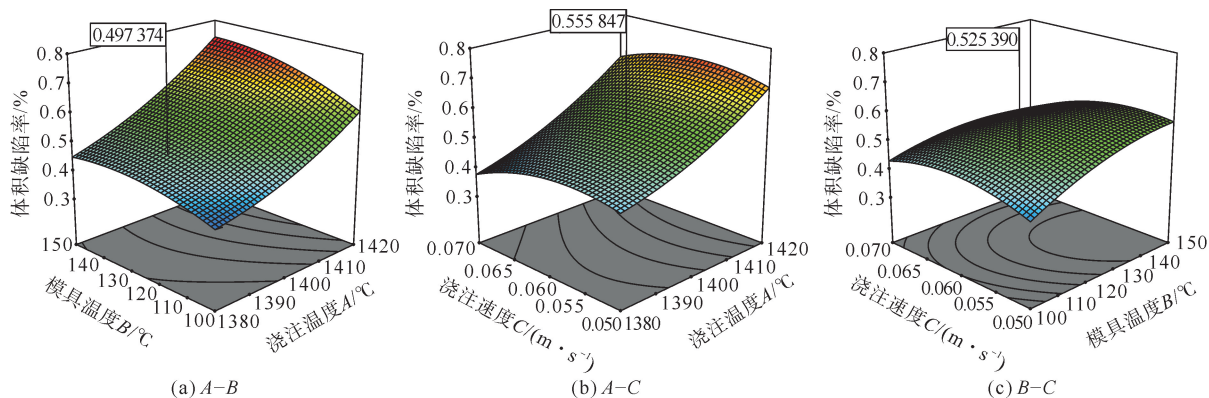


图 12 体积缺陷率响应面

通过对体积缺陷率的响应面分析,可以得出浇注温度、模具温度、浇注速度对缺陷的影响程度在设定范围内依次减小。在缺陷优化中,降低浇注温度或降低模具温度是减少缺陷最有效的途径。此外,适当提高浇注速度也有利于减少缺陷。但浇注速度对缺陷影响不大,在考虑生产效率的情况下,可将浇注速度降至选定范围内的最低水平。

优化结果是浇注温度 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$,模具温度 $145 \text{ }^\circ\text{C}$,浇注速度 0.061 m/s ,此时体积缺陷率为 0.556 ,模拟结果如图 13 所示。圆弧面及其他表面缺陷已经基本消除图 13(a)(c);内部缺陷对比如图 13(b)(d)所示,在厚壁处,即孤立液相区域的缺陷经过冷铁的激冷和补缩作用已经消除了绝大部分。

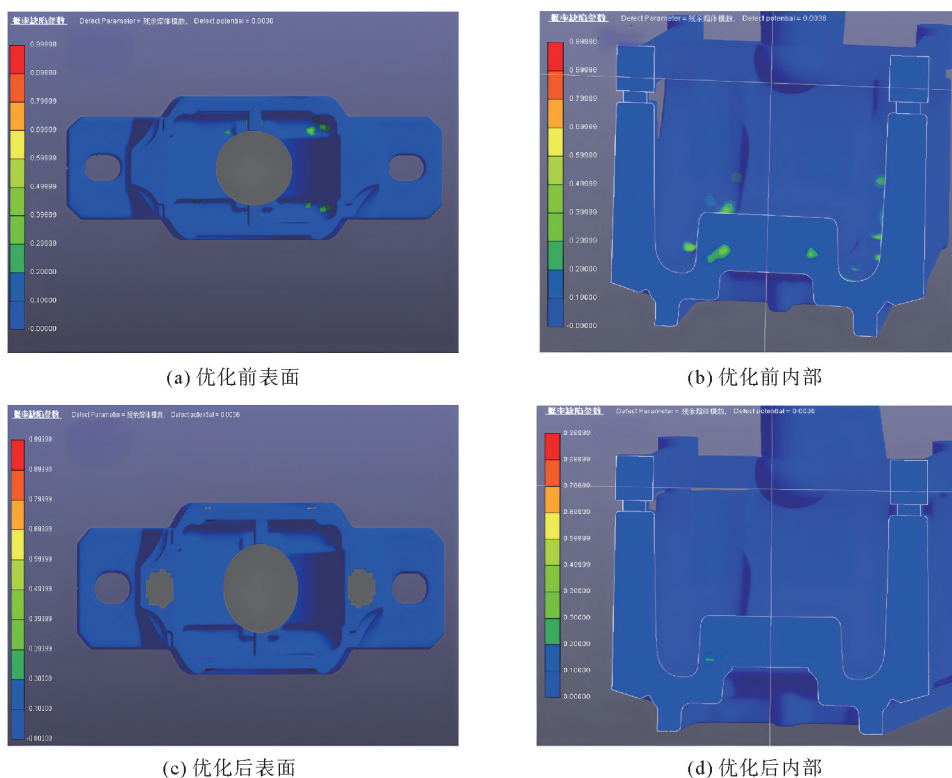


图 13 优化缺陷对比

5 结论

采用流体连续性方程、N-S方程和能量守恒方程等,建立球墨铸铁轴承座重力铸造物理模型,对比顶注式和底注式浇注系统,优化冒口,增设冷铁和排气系统减小铸造缺陷,并对体积缺陷率3种影响因素进行了正交模拟试验,采用极差分析法研究了各因素对体积缺陷率和无量纲方差的影响,得到如下结论:

1) 顶注式浇注系统比底注式拥有更长的充型时间,但由于具有补缩空间,缺陷较少。

2) 合理增设冷铁和排气系统、优化冒口可以减少铸造缺陷。

3) 正交试验的极差及方差分析结果表明,浇注温度是影响体积缺陷率的最显著因素,其次为模具温度,且二者皆与体积缺陷率呈正相关。在最佳浇注温度时,可将浇注速度降至选定范围内的最低水平,此时充型和凝固过程平稳,铸件性能最佳。

参考文献(References):

- [1] 陈维平,牛佳成,朱德智,等.我国铸造行业转型升级面临的挑战、机遇与对策:《铸造行业“十四五”发展规划》解读[C]//2021中国铸造活动周论文集.沈阳,2021:2-12.
CHEN Weiping, NIU Jiacheng, ZHU Dezhi, et al. Challenges, opportunities and countermeasures facing the transformation and upgrading of China's foundry industry: Interpretation of the 14th Five-Year Development Plan for the Foundry Industry[C]//Proceedings of China Foundry Week 2021. Shenyang, 2021: 2-12.
- [2] 周建新,殷亚军,沈旭,等.铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用[M].北京:机械工业出版社,2020.
ZHOU Jianxin, YIN Yajun, SHEN Xu, et al. Numerical simulation system and application of casting mold filling solidification process[M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [3] 李伟伟.重型汽车悬架摆臂铸钢件的研制[D].西安:西安工业大学,2017.
LI Weiwei. Development of the suspension swing arm casting steel for heavy duty car[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017.
- [4] 李开创,赵宇,刘鑫,等.床头箱灰铸铁件铸造工艺设计及模拟辅助优化[J].中国铸造装备与技术,2023,58(2):58-67.
LI Kaichuang, ZHAO Yu, LIU Xin, et al. Casting process design and simulation-assisted optimization of gray iron castings for headstock[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(2): 58-67.
- [5] 马聪,杨梦馨,程强,等.某箱体的铸造工艺缺陷分析与优化设计[J].铸造,2023,72(5):582-587.
MA Cong, YANG Mengxin, CHENG Qiang, et al. Optimization design and defect analysis of casting process for a box[J]. Foundry, 2023, 72(5): 582-587.
- [6] 邝雷志.基于UG/KF的三维铸造工艺辅助设计系统的开发与应用[D].长沙:湘潭大学,2022.
KUANG Leizhi. Development and application of 3D casting process aided design system based on UG/KF[D]. Changsha: Xiangtan University, 2022.
- [7] 吴永康.基于正交试验的螺旋轴流式多相流泵多目标设计与优化[D].兰州:兰州理工大学,2022.
WU Yongkang. Multi-objective hydraulic design and optimization of a helix axial multiphase pump based on orthogonal test[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [8] 熊玥.基于正交试验设计与二阶响应面模型的电动汽车电池包壳体轻量化[D].重庆:重庆大学,2021.
XIONG Yue. Lightweight design of battery-pack enclosure based on orthogonal experimental design and second-order response surface methodology[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [9] 段长江.基于正交试验设计的压电换能器性能研究[D].长沙:湘潭大学,2020.
DUAN Changjiang. Research on performance of piezoelectric transducer based on orthogonal experimental design[D]. Changsha: Xiangtan University, 2020.
- [10] 尹起.基于Anycasting的滑块铸造模拟仿真及工艺优化[D].淄博:山东理工大学,2017.
YIN Qi. Casting simulation and process optimization of machine sliding block based on Anycasting[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017.
- [11] 党云鹏,曹岩.基于ProCAST的ZL205A合金弹体传动件铸造工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(2):162-166.
DANG Yunpeng, CAO Yan. Casting process optimization of ZL205A alloy projectile transmission parts based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2): 162-166.