

## • 工艺技术 Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2022.10.009

## 轮芯铸件消失模铸造工艺研究

杨芬芬, 李振彦, 颜文羽, 陈君逸, 潘 源

(遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006)

**摘要:** 针对轮芯铸件的结构特点, 采用消失模铸造工艺, 利用 ProCAST 数值模拟软件模拟分析了轮芯大法兰面朝下放置时的凝固过程。模拟结果显示, 铸件厚大部位处存在严重的缩孔缩松缺陷, 与试制生产结果相吻合。针对出现的缩孔缩松缺陷, 将轮芯铸件由法兰面朝下改为朝上放置, 使缩孔缩松缺陷得到显著减轻。进一步对铸造工艺方案进行优化, 在内、外法兰处放置冷铁, 并将法兰水平端面改为 30° 斜面。模拟结果表明, 优化后铸件内部缩孔缩松缺陷得到完全消除, 并确定了最佳工艺方案。

**关键词:** 轮芯; 消失模铸造; 工艺优化; 缩孔缩松; 碳渣

中图分类号: TG249.6; TG245

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2022)10-0906-06

## Study on Lost Foam Casting Process of Wheel Core Parts

YANG Fenfen, LI Zhenyan, YAN Wenyu, CHEN Junyi, PAN Yuan

(College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi 563006, China)

**Abstract:** According to the structural characteristics of wheel core casting, the lost foam casting solidification process with the large flange of the wheel core placed downward is simulated and analyzed by using the numerical simulation software ProCAST. The simulation results show that there are serious shrinkage cavity and porosity defects in the thick part of the casting, which is in good agreement with the trial production result. In view of the shrinkage cavity and porosity defects, the flange of casting is placed upward instead of downward so that the shrinkage cavity and porosity defects are significantly reduced. The casting process scheme was further optimized by placing cold iron at the inner and outer flanges and changing the horizontal end face of the flange to a 30° inclined plane. The simulation results show that the shrinkage cavity and porosity defects in the casting are eliminated thoroughly based on the optimized process, which is the best process scheme.

**Key words:** wheel core; lost foam casting; process optimization; shrinkage cavity and porosity; carbon slag

与传统铸造相比, 消失模铸造具有生产效率高、污染排放少等优点, 在高精度、结构复杂的铸件大批量生产中, 具有非常明显的优势<sup>[1-3]</sup>。消失模铸造与传统空腔浇铸存在较大差异, 金属液前沿泡沫受热分解, 吸收了金属液的大量热量, 不仅降低了金属液流动性, 而且使铸件容易出现缩孔缩松、碳渣等缺陷<sup>[4-5]</sup>。针对消失模铸造过程中出现的缩孔缩松缺陷问题, 研究者们通过提高金属液浇注温度<sup>[6]</sup>、优

化浇注系统<sup>[7]</sup>、合理放置冷铁<sup>[8]</sup>、优化设计冒口<sup>[9-10]</sup>等工艺措施, 提升金属液的充型能力, 改善铸件的凝固顺序, 从而有效避免了消失模铸造中产生的缩孔缩松等缺陷。与轮芯相似的环形结构件, 如叶轮<sup>[6]</sup>、环形轮毂<sup>[9]</sup>和球磨铸铁管<sup>[10]</sup>等, 均可通过采用合理的浇注系统和大冒口的工艺措施, 彻底消除铸件中的缩孔缩松缺陷。本文对 ZG270-500 轮芯的消失模铸造工艺进行了模拟分析, 结合模拟分析和生产结果, 对铸造工艺进行不断优化, 最终设计出了不含缩孔缩松和碳渣等缺陷的最佳铸造工艺方案, 为轮芯铸件的消失模生产提供了依据。

## 1 轮芯结构及模拟参数

## 1.1 轮芯结构分析

轮芯是连接轮子和传动轴的关键结构件, 用在颠簸振动的工况下, 对铸件的强度要求较高。本文研究的轮芯零件如图 1 所示, 图中红色(深色)区域为

收稿日期: 2022-08-12

基金项目: 遵义市科技计划项目(遵市科合 HZ 字(2021)213 号);

国家自然科学基金(52101062); 遵义师范学院博士基金(遵师 BS[2020]6 号)

作者简介: 杨芬芬(1988—), 博士, 讲师。研究方向: 合金凝固行为电磁调控及腐蚀机理等。电话: 17784823932,

Email: yangfen0515@163.com

通讯作者: 李振彦(1985—), 硕士, 讲师。研究方向: 金属液态成型技术研究。电话: 19185166420,

Email: lizhenyan888@163.com

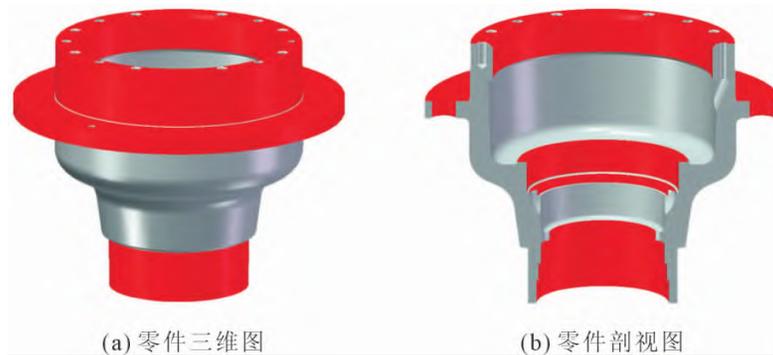


图1 轮芯三维模型

Fig.1 Three-dimensional models of the wheel part

铸造后的机加工面,机加工后不得有缩孔缩松、碳渣等缺陷,其余区域无须机加工,保持铸造后的粗糙度即可。该零件呈环形结构,铸件高度为315 mm,主要壁厚为35 mm,口径较大的一端外径为 $\phi 300$  mm,并分布有厚度为40 mm的法兰,口径较小的一端外径为 $\phi 180$  mm,内圆面分布有台阶。

## 1.2 模拟参数设置

(1)铸件采用ZG270-500,具体化学成分如表1所示。

表1 铸件化学成分

Tab.1 Chemical composition of casting

合金元素	C	Si	Mn	S	P	Fe
百分含量 w/%	0.30~0.40	0.20~0.45	0.50~0.90	$\leq 0.35$	$\leq 0.35$	Bal.

(2)采用ProCAST软件进行模拟分析,模拟类型采用Lost Foam,浇注温度为 $(1\ 545 \pm 15)$  °C,液相线温度为1 489 °C,浇注速度为21 kg/s,铸件涂层外表面负压为0.06 MPa,浇口处的浇注压力为0.13 MPa,冒口处的压力为0.1 MPa。

(3)涂层采用Sand permeable foam,涂层与铸件之间的界面换热系数为 $500\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [11]。

## 2 原始方案模拟分析与生产

### 2.1 分析计算模型

本文中的轮芯铸件与轮毂铸件结构相似,皆为



图2 原始方案模型

Fig.2 Original scheme models

环形件,高成勋等[9]采用倒立放置的浇注工艺,结合涂层工艺的控制,解决了轮毂铸件的缩孔缩松缺陷问题,因此轮芯铸件的原始铸造工艺方案采用倒立放置,为了使液态金属平稳浇注,采用底注式浇注。浇道截面尺寸为 $30\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ,冒口尺寸为 $\phi 200\text{ mm} \times 230\text{ mm}$ 。原始方案的分析计算模型如图2所示,采用四面体单元划分,单元总数1 552 471。

### 2.2 模拟结果分析

由于该轮芯铸件结构较为简单,为了更好地观察铸件凝固顺序和孤立液相区的位置,采用固相相进行分析[12]。截取铸型中间截面分析其凝固过程,截面位置如图3所示。本文的凝固时间是从开始浇注计时,直至冷却凝固完成。

如图4(a)所示,液态金属充满型腔后,在涂层的激冷作用下,金属液温度快速降低,凝固时间为196.84 s时,固相分数为19.5%。如图4(b)所示,凝固时间为466.84 s时,随着温度的降低,铸件较薄的H位置凝固较快,厚大的K位置凝固较慢,形成了孤立的液相区,此时固相分数为39.9%。如图4(c)所示,凝固时间为866.84 s时,铸件H位置凝固较快(固相分数为62.5%),浇冒口对铸件补缩困难,此时固相分数为54.1%。如图4(d)所示,凝固时间为1 446.84 s时,固相分数为67.4%,铸件H位置已完全凝固,浇冒口已无法对铸件进行补缩,铸件K位置形成了孤立热

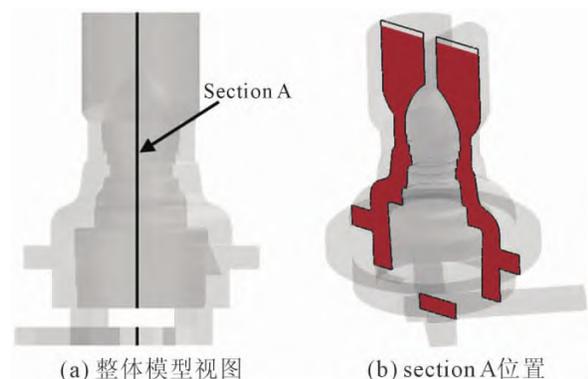


图3 铸型分析截面位置

Fig.3 Section position of casting

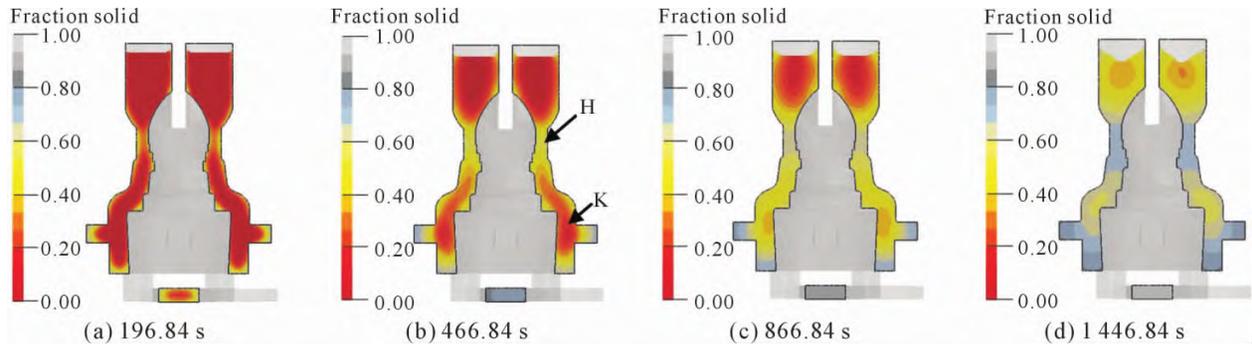


图 4 铸型凝固过程的固相场分布  
Fig.4 Solid phase field distributions during casting solidification

节,容易形成缩孔缩松缺陷<sup>[13-14]</sup>。

由于铸件 H 位置凝固较快,冒口的补缩通道被阻断,从而导致铸件产生了缩孔缩松缺陷。铸型完全凝固后的缩孔缩松缺陷主要分布在铸型厚大部位 K 位置,其余分布在内浇道和冒口中,具体位置如图 5 所示。

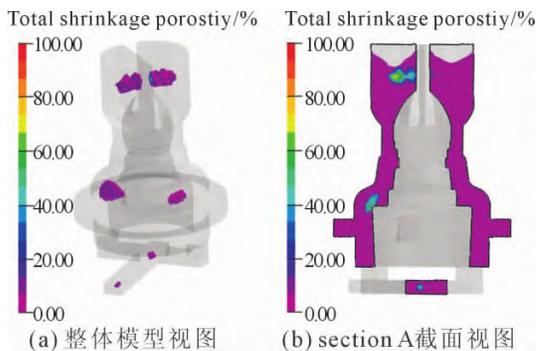


图 5 铸型的缩孔缩松分布

Fig.5 Distribution of shrinkage cavity and porosity in casting

### 2.3 试制生产

消失模材质采用 STMMA(苯乙烯-甲基丙烯酸甲脂),主要制造工艺为预发泡、熟化、成型和烘烤。其中预发机型号为 DH-450 间歇式预发机,采用蒸汽发泡,温度为 90~115 °C,预发好的珠粒在熟化 24 h 后方可进行成型工序。涂料采用水基的消失模铸钢涂料,该轮芯铸件采用浸涂法,涂 3 遍完成,涂层总厚度为 2 mm;涂料完成后放入烘干室中,温度控制在 50 °C,相对湿度 ≤ 10%,烘干 5 天以上。型砂采用宝珠砂,球形粒形,粒度为 0.6~3.0 mm。生产浇铸时砂箱内负压为 0.06 MPa。

在轮芯铸件的消失模铸造试制生产中,铸件内法兰热节严重,机加工后出现了严重缩孔缩松缺陷,缩孔缩松位置分布如图 6 所示,试验结果与图 5 所示的缩孔缩松模拟结果相吻合。为了消除轮芯消失模铸件的缩孔缩松缺陷,需对其铸造工艺进行优化分析。

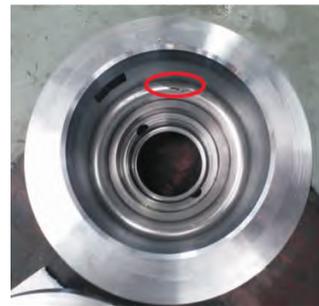


图 6 铸件缩孔缩松缺陷分布

Fig.6 Distribution of shrinkage cavity and porosity defects in casting

## 3 优化方案模拟分析

### 3.1 方案优化

由于原始方案中铸件 H 位置凝固较快,阻断了冒口液态金属的补缩通道,导致 K 位置出现了严重的缩孔缩松缺陷,因此将该轮芯铸件颠倒放置,可实现冒口的及时补缩,同时在大法兰处设置 6 个集渣包,便于泡沫残渣物漂浮于集渣包和冒口中,从而避免碳渣缺陷<sup>[15]</sup>,优化后的浇注系统如图 7 (a)所示。冒口的最大轮廓尺寸为:170 mm×180 mm×100 mm。铸件模型如图 7(b)所示,整体模型单元总数 2 358 952,涂

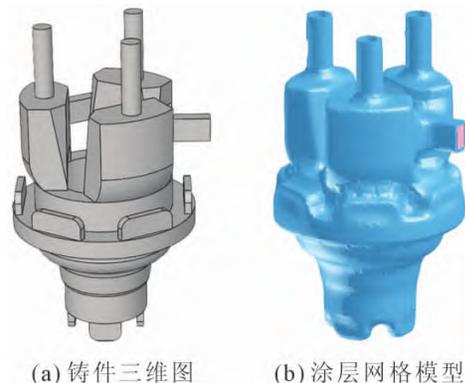


图 7 优化后的方案

Fig.7 The optimized scheme

层厚度为 2 mm。

### 3.2 轮芯铸件凝固过程

同样截取铸型中心截面,与原始方案对比分析铸件凝固过程并观察其凝固顺序,截面位置如图 8 所示。

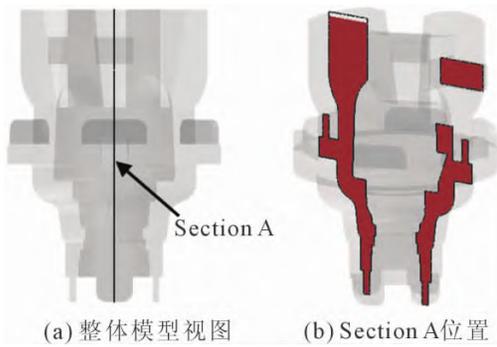


图 8 铸型分析截面位置  
Fig.8 Section of position casting

如图 9(a)所示,液态金属充满型腔后,法兰位置处的 6 个集渣包较薄,率先凝固,无法实现集渣效果,此处仍需改进。如图 9 (b) 所示,凝固时间为 495.95 s 时,冒口仍可对铸件进行实时补缩,凝固顺序合理。如图 9(c~d)所示,随着铸件继续凝固,铸件 K 位置冷却稍慢,仍然存在孤立液相区的风险,易产生缩孔缩松缺陷,因此需在该位置施加冷铁。

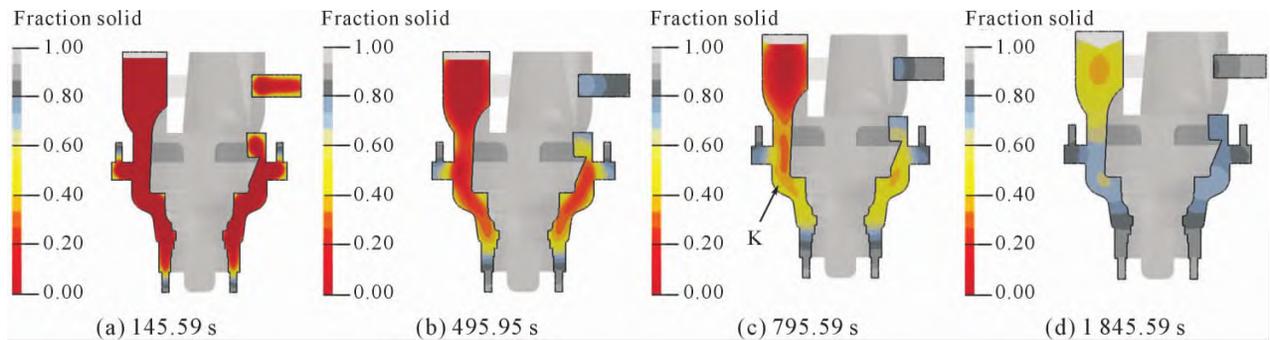


图 9 铸型凝固过程的固相场分布  
Fig.9 Solid phase field distributions during casting solidification

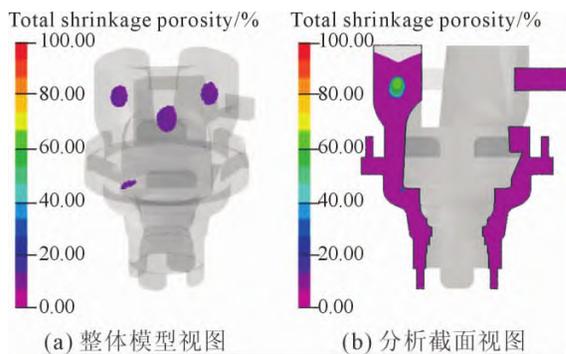


图 10 铸型的缩孔缩松分布  
Fig.10 Distribution of shrinkage cavity and porosity in casting

与原始方案相比(图 5),优化后的缩孔缩松缺陷明显减小,但是厚大的 K 位置仍然凝固较慢,局部区域形成了孤立液相区,从而造成较小的缩孔缩松缺陷,缺陷位置分布如图 10 所示。

## 4 优化方案局部改进

### 4.1 分析计算模型

针对图 10 所示的缩孔缩松缺陷,在内、外法兰处放置冷铁,冷铁采用 HT200 材质,放置位置如图 11 所示,外冷铁尺寸为:外圆直径  $\phi 430$  mm,内圆直径为  $\phi 304$  mm,高度为 40 mm。内冷铁尺寸为:外圆直径  $\phi 208$  mm,内圆直径  $\phi 108$  mm,高度为 30 mm,以加快厚大部位快速凝固。同时去除法兰表面集渣效果欠佳的 6 个集渣孔,将法兰水平端面改为  $30^\circ$  斜面(图 11 中(红)圈位置),便于泡沫残留物漂浮于冒口中,提升排渣效果。

### 4.2 结果分析

如图 12(a)所示,液态金属充满型腔后,在涂层的激冷作用下,外层金属率先凝固。如图 12(b~c)所示,随着铸件的凝固冷却,放置了冷铁的 K 位置未形成孤立的液相区,冒口仍然可对铸件进行实时补缩,同时泡沫残留物可实时漂浮于冒口中。如图 12(d)所示,整个铸型实现了铸件先凝固,冒口后

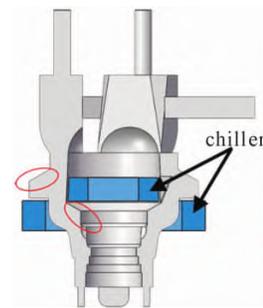


图 11 优化改进后的铸件  
Fig.11 Optimized and improved casting

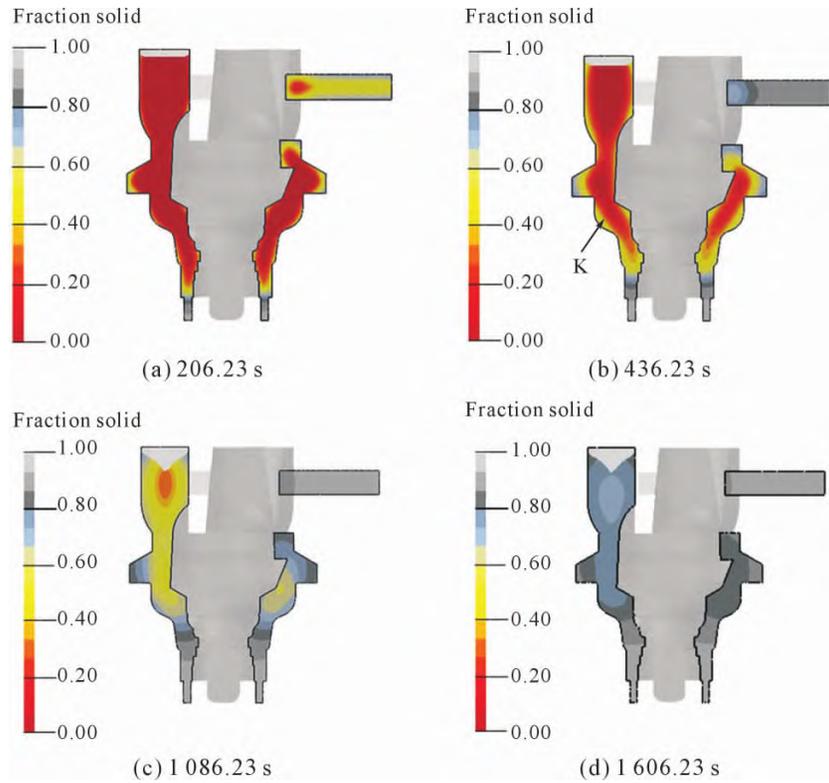


图 12 铸型凝固过程的固相场分布  
Fig.12 Solid phase field distributions during casting solidification

凝固的顺序凝固,有效避免了缩孔缩松缺陷的产生。

在内、外法兰处放置冷铁,可实现铸件先凝固、冒口后凝固的顺序凝固,所有缩孔缩松缺陷皆位于冒口中,铸件的缩孔缩松缺陷得到了彻底消除,如图 13 所示。

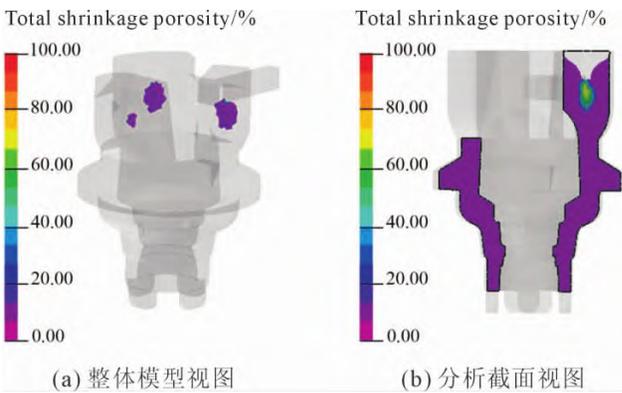


图 13 铸型的缩孔缩松分布  
Fig.13 Distribution of shrinkage cavity and porosity in casting

### 5 结论

(1)原始方案采用轮芯法兰面朝下放置,由于铸件不能实现由下到上的顺序凝固,凝固后期冒口无法对铸件进行补缩,导致内法兰端面存在严重的缩孔缩松,经试制生产,计算结果和实际浇铸结果相吻合。

(2)针对原始方案存在的缩孔缩松缺陷,优化铸造工艺方案,将轮芯铸件颠倒放置,使法兰面朝上。优化后的铸件缩孔缩松缺陷明显减小,但厚大位置处仍产生了较小的缩孔缩松缺陷,且法兰面的 6 个集渣孔凝固较快,集渣效果欠佳。

(3)针对优化方案存在的较小缩孔缩松缺陷,在内、外法兰处放置冷铁,加快厚大部位凝固速度,并将法兰水平端面改为 30°斜面,便于泡沫残留物漂浮于冒口中,最终确定了无缩孔缩松缺陷的最佳铸造工艺方案。

#### 参考文献:

- [1] 张杰琼,吕乐华,郭亚辉,等.消失模生产制动器壳体夹渣缺陷分析及防止措施[J].中国铸造装备与技术,2021,56(2): 26-29.
- [2] 姜青河,廖希亮,庞守美.消失模铸造技术的国内外现状及展望[J].铸造设备研究,1999(1): 1-3.
- [3] 惠青,从荣帅.铝合金气缸盖压铸工艺研究[J].中国高新技术,2021(7): 144-145.
- [4] 李建军,杜晓.灰铸铁箱盖的消失模铸造数值模拟研究[J].热加工工艺,2013,42(7): 63-64, 66.
- [5] 张志莲,肖云峰.消失模铸造 EPS 泡沫分解过程的三维数值模拟[J].铸造,2010,59(10): 1057-1060.
- [6] 田炜.基于 ProCAST 的叶轮消失模铸造缺陷模拟分析[J].铸造技术,2015,36(7): 1826-1828.
- [7] 李宗亮,何帅伟,轩世成,等.辅助浇口工艺在消失模球铁生产中的应用[J].铸造技术,2021,42(12): 1060-1062, 1069.

- [8] 赵悦光,田逢甲,郭敏,等. 风电轮毂铸件铸造工艺设计研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(3): 229-232.
- [9] 高成勋,刘伟明. 碳钢轮毂的消失模铸造[J]. 铸造设备与工艺, 2010 (6): 36-37, 46.
- [10] 付建勋,李京社,韩丽敏,等. 球墨铸铁管消失模铸造的数值模拟[J]. 铸造技术, 2008, 29(11): 1592-1595.
- [11] 张国强,赵占西,顾君捷,等. 缸体消失模铸造数值模拟与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(1): 63-66.
- [12] 夏琨,徐向阳,段士伟. 基于 ProCAST 的转子盘熔模铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术, 2022, 43(5): 375-381.
- [13] 梁敏,周璟,王助龙,等. 大型轧机轴承座的铸造工艺改进[J]. 铸造技术, 2019, 40(10): 1093-1095.
- [14] 魏剑辉,蒋梦麒. 基于 ProCAST 的 K423 衬板熔模铸造工艺优化设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1259-1261.
- [15] 段汉桥,魏伯康,郭晓阳,等. 用消失模工艺批量生产汽车差速器壳球铁件[J]. 铸造, 2004(3): 234-238.