

# 基于 ProCAST 的柴油机活塞铸造工艺模拟及优化

周传龙<sup>1</sup>, 何强<sup>1</sup>, 周宏根<sup>1</sup>, 李国超<sup>1</sup>, 符博峰<sup>2</sup>, 赵明<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 机械工程学院, 江苏镇江 212003; 2. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西西安 713100)

**摘要:** 为解决某船用柴油机活塞在铸造过程中出现的缩孔、缩松缺陷问题, 基于三维建模软件以及铸造仿真模拟软件, 以QT700活塞铸件为研究对象, 运用UG绘制其三维模型图, 利用ProCAST软件模拟活塞铸件的铸造过程并预测缩孔、缩松缺陷可能出现的区域。根据活塞铸件的结构特点设计了轴向引入和径向引入两种底注式浇注系统。研究表明: 径向引入底注式浇注系统相比于轴向引入底注式浇注系统在减少铸件缩孔、缩松缺陷上更有优势。进一步研究浇注温度、充型时间以及铸型温度等对铸件缩孔、缩松率的影响规律, 并通过正交试验获得最佳的工艺参数组合。最后, 在铸造缺陷产生部位增加补缩冒口, 有效地消除了铸造过程中的缺陷。

**关键词:** 柴油机活塞; 铸造; 浇注系统; 数值模拟

活塞是船用柴油机关键零部件之一, 在柴油机工作过程中不仅要承受气缸中的燃烧压力, 还要通过活塞销将压力传递给连杆, 因此对活塞的铸造质量有较高的要求<sup>[1-2]</sup>。现有球墨铸铁型船用柴油机活塞的毛坯大多采用铸造方式生产, 合理的浇注系统设计及铸造工艺参数设置能够有效地减少缩孔、缩松等铸造缺陷, 从而达到保证活塞铸件铸造质量及延长活塞使用寿命的目的<sup>[3-4]</sup>。

近年来, 随着计算机模拟仿真技术的飞速发展, 诸多专业的铸造仿真软件开始在实际生产过程中发挥重要的作用<sup>[5-7]</sup>。通过数值模拟技术预测铸造过程中可能产生的缺陷问题, 有助于在确定零件的铸造工艺参数并对其进行工艺优化时大幅度缩短时间和经济成本。王明智等<sup>[8]</sup>利用正交试验对浇注温度和模具温度进行优化, 并预测了轮毂铸件的铸造缺陷可能存在的区域。曹文晔等<sup>[9]</sup>运用ProCAST软件对某活塞件的铸造工艺进行模拟, 通过采用合并缝隙式浇道及合理布置补缩冒口、冷铁, 有效实现活塞铸件的顺序凝固, 成功将铸造缺陷转移至冒口。尹起等<sup>[10]</sup>对机床滑块进行铸造工艺模拟, 分析缺陷分布位置, 通过增大冒口、添加冷铁, 有效消除铸件厚大部位的铸造缺陷。刘继广等<sup>[11]</sup>设计了卧式和立式两种浇注系统, 模拟发现立式浇注系统缺陷更少, 进一步研究不同工艺参数对铸件缩孔、缩松的影响以及通过正交试验获得最佳的工艺参数组合, 最后改进浇注方案, 降低铸件的缩孔、缩松率。

针对活塞铸造仿真过程中的关键问题, 作者根据活塞铸件具体结构尺寸设计出两种浇注方案, 并通过ProCAST软件进行模拟仿真, 比较两种浇注方案在减少铸件缺陷上的优劣。分析了浇注温度、充型时间以及铸型温度等对活塞铸件铸造质量的影响规律, 基于正交试验分析获得了最佳工艺参数组合。进一步通过增加环形补缩冒口, 有效地消除了铸造过程中的缺陷, 研究结果对企业的实际生产有一定的参考价值。

## 1 铸件工艺分析

柴油机活塞基本结构为圆筒形, 材质为QT700, 最大直径为 $\Phi 278$  mm, 总体高度为330 mm, 净重54 kg, 其三维模型图如图1所示。铸件最大壁厚为33 mm, 最小

作者简介:

周传龙(1996-), 男, 硕士, 主要从事机械加工工艺研究工作。E-mail: zhouchuanlong96@163.com

通讯作者:

何强, 男, 博士, 副教授。E-mail: heqiang@just.edu.cn.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)05-0632-05

收稿日期:

2021-08-09 收到初稿,  
2021-12-02 收到修订稿。

壁厚为8 mm, 其中铸件侧壁上有两个直径 $\Phi 120$  mm的销孔, 属于典型的复杂薄壁铸件; 铸件壁厚分布不均匀, 存在较多壁厚差较大的交接处, 在铸造过程中容易形成铸造热节, 导致缩孔、缩松等铸造缺陷的产生<sup>[12-13]</sup>。

该铸件为圆筒形薄壁件, 且其结构较为复杂。在金属液充型完成后, 铸件开始缓慢降温, 铸件顶部是整个铸件中壁厚最大处, 与其相连接的薄壁部分率先发生金属液共晶凝固, 该区域会抽取一部分顶部热节处的金属液作为补缩, 易导致顶部因金属液缺失石墨化膨胀不充分而产生缩孔、缩松现象。铸件侧壁为整个零件壁厚最薄处, 且由于其内部两道加强筋和底部止口的存在, 铸件侧壁壁厚呈交替分布, 侧壁部分容易由于热量散失不均产生铸造热节。本文中铸件所采用的QT700球墨铸铁的化学成分见表1, 材料在不同温度下的热物性参数见图2。

## 2 铸造工艺方案的确定

铸件顶部壁厚较大、侧壁壁厚不均匀, 因此要求金属液在充型过程中要平稳缓慢地沿型腔上升, 逐步

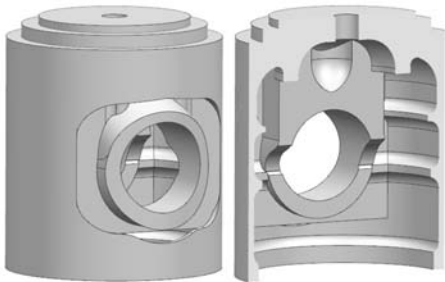


图1 铸件三维模型图

Fig. 1 3D model of the diesel engine piston casting

表1 QT700的化学成分

Table 1 Chemical composition of the QT700  $w_B/\%$

C	Cu	Mg	Mn	Si	P	S
3.5	0.8	0.06	0.1	2.7	<0.05	<0.05

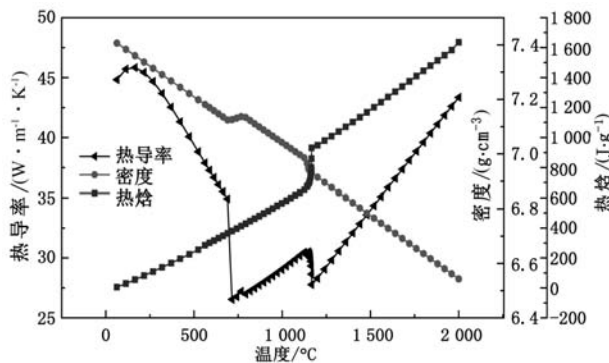


图2 基于ProCAST计算的QT700热物性参数

Fig. 2 Thermophysical parameters of the QT700 based on ProCAST calculation

充满型腔。同时, 为了缩小凝固过程中铸件整体的温度差, 降低因局部温度差较大导致的铸造应力, 避免铸件变形、热裂的产生。根据同时凝固、均衡凝固原则, 确定铸件的浇注方式为底注式浇注系统。

本铸件采用半封闭式的浇注系统, 在设计各个浇道的尺寸时应首先确定最小阻流截面尺寸。对半封闭式底注式浇注系统而言, 浇注系统中的各个浇道尺寸的计算应该以内浇道截面尺寸作为最小截面参考, 这有利于保证金属液快速充型。内浇道、横浇道、直浇道截面比为,  $A_1:A_2:A_3=1:1.5:1.2$ , 内浇道分散布置在铸件底部; 同时, 为了进一步研究内浇道引入金属液的位置对铸件浇注质量的影响, 初步设计了轴向引入和径向引入两种底注式浇注系统, 如图3所示, 由于球墨铸铁会石墨化膨胀进行自补缩, 因此先进行无冒口铸造。

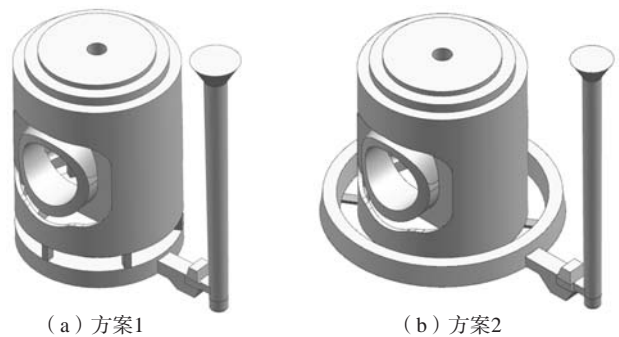
## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值模拟前处理

铸件能否获得较好的铸造质量, 在一定程度上受其浇注方案的影响。对所设计的两种浇注方案进行模拟仿真, 预测出现的铸造缺陷, 评估两种铸造工艺的合理性并进行工艺优化。本次设计使用UG NX软件对两种浇注系统进行三维模型绘制, 然后导入到ProCAST软件中进行铸造过程仿真。

利用ProCAST软件的Visual-Mesh模块划分铸件网格大小, 铸件和浇注系统网格为6 mm, 铸型网格为20 mm, 网格划分完成后共获得145万个个体网格。铸件材质为球墨铸铁, 其石墨化膨胀会导致铸件型壁迁移, 影响铸件的表面质量和尺寸精度, 因此要求铸型有较高的致密度。选用强度较高的自硬呋喃树脂砂, 并将其材料应力类型设为刚性。

根据实际生产情况, 采用砂型重力铸造, 铸件材料GJS-700 (QT700); 浇注温度1380 °C, 铸型初始温度25 °C, 表面散热条件为空冷; 铸型与铸件之间热交换系数为500 W/(m<sup>2</sup>·K)。



(a) 方案1

(b) 方案2

图3 铸件浇注系统方案

Fig. 3 Two kinds of casting gating systems

### 3.2 数值模拟结果分析

在相同浇注条件下,方案1和方案2中铸件充型过程流场如图4所示,方案2相对于方案1来说,其金属液充型过程中金属液缓慢上升,相对比较平稳,不会对砂型造成较大冲击。图5为方案1和方案2铸件凝固末期的温度场分布,可以看出,方案2中铸件凝固速度较快,铸件温度场梯度比方案1小,有利于铸件均匀凝固。图6为方案1和方案2铸件内部缩孔、缩松分布图,由于铸件按照自下而上的顺序凝固,薄壁部分首先发生石墨化膨胀,将金属液向壁厚部分挤压,加大铸件顶部的自补缩效果,预防铸造缺陷的产生。铸造缺陷主要分布在铸件顶部和底部壁厚交接处,方案1中铸件缩孔率为2.03%,方案2中铸件缩孔率为1.72%。综上所述,结合流场及温度场分析,从减少铸件缩孔、缩松缺陷的形成来看,采用方案2能够更好提升铸件的质量。



图4 充型过程流场

Fig. 4 Flow field during mold filling

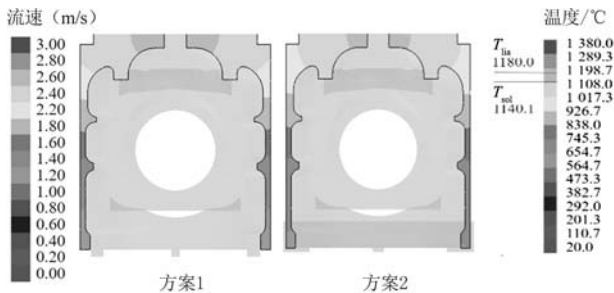


图5 凝固末期温度场

Fig. 5 Temperature field at the end of the solidification

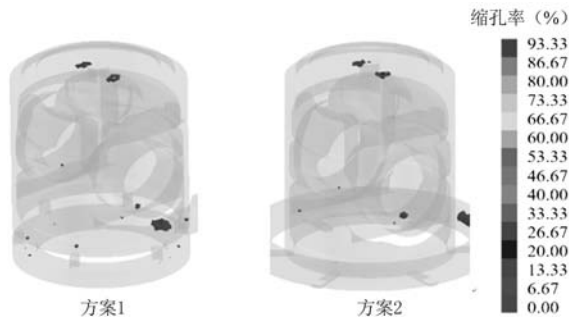


图6 缩孔缩松位置预测图

Fig. 6 Position prediction of the shrinkage and dispersed shrinkage

## 4 浇注工艺方案优化及改进

### 4.1 工艺参数对铸件质量的影响

在径向引入底注式浇注方案基础上,为研究工艺方案中各个重要参数的变化对铸件质量的影响,拟对浇注温度、充型时间和铸型温度进行仿真。

图7为浇注温度对铸件缩孔率的影响。铸件为薄壁结构件,因此为使金属液在型腔内更好地流动充型,选择浇注温度在1 350~1 470 °C。从图中可以看出,铸件缩孔率随着浇注温度的上升,在1 350~1 470 °C时大幅度降低,在1 370~1 430 °C时,缩孔率降低趋势较为平缓,当浇注温度超过1 430 °C时,铸件缩孔率逐渐升高。其中,当浇注温度为1 430 °C时,铸件缩孔率最低为1.65%,铸件质量最好。

图8为充型时间对铸件缩孔率的影响。随着充型时间的增加,铸件缩孔率先降低再升高,当充型时间达到12 s时,铸件缩孔率最低。

图9为铸型温度对铸件缩孔率的影响。随着铸型温度的增加,铸件缩孔率在15~35 °C范围内持续降低,在达到35 °C后,铸件的缩孔、缩松缺陷开始逐渐增加。

### 4.2 正交试验

在研究了三种单因素对铸件缩孔率影响的基础上,设计正交试验综合考虑浇注温度、充型时间、铸

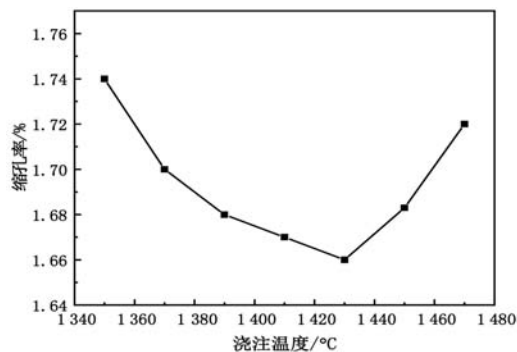


图7 浇注温度对铸件缩孔率的影响

Fig. 7 Influence of pouring temperature on the shrinkage of the castings

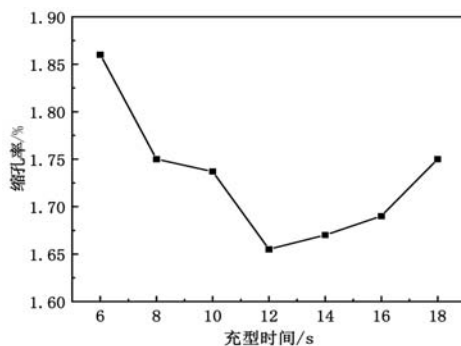


图8 充型时间对铸件缩孔率的影响

Fig. 8 Influence of filling time on the shrinkage of the castings

型温度相互作用下对铸件质量的影响。正交试验所采用的工艺参数如表2所示，正交试验模拟结果如表3所示。

由表3正交试验结果分析得出，最佳的试验参数组合为 $A_2B_1C_2$ ，即在浇注温度1 410 ℃，充型时间12 s，铸型温度25 ℃时，铸件的缩孔、缩松率最低，为1.612%。

采用极差分析方法对正交试验结果进行分析，研究各因素对铸件缩孔率的影响。各因素按照极差数值大小的排列顺序依次为 $R_C > R_A > R_B$ ，铸型温度对铸件缩孔率的影响最大，浇注温度的影响次之，充型时间对

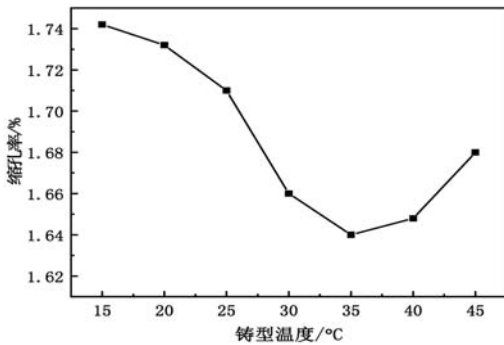


图9 铸型温度对铸件缩孔率的影响

Fig. 9 Influence of mold temperature on the shrinkage of the castings

表2 试验因素和水平设计

Table 2 Experimental factors and level design

水平	浇注温度/℃	充型时间/s	铸型温度/℃
1	1 390	12	20
2	1 410	14	25
3	1 430	16	30

表3 正交试验表

Table 3 Orthogonal experiment table

试验号	因素			评价指标
	A浇注温度/℃	B充型时间/s	C铸型温度/℃	
1	1 390	12	20	1.735
2	1 390	14	25	1.684
3	1 390	16	30	1.667
4	1 410	12	25	1.612
5	1 410	14	30	1.685
6	1 410	16	20	1.679
7	1 430	12	30	1.614
8	1 430	14	20	1.701
9	1 430	16	25	1.681
K1	1.695	1.653	1.705	
K2	1.658	1.690	1.659	
K3	1.665	1.675	1.655	
极差R	0.036 7	0.036 3	0.049 7	
主次顺序	C>A>B			
优组合	$A_2B_1C_2$			

铸件质量影响最低。

### 4.3 浇注工艺方案优化及验证

经过正交试验设计所得到的最佳工艺优化方案，能够降低活塞铸件铸造过程中的缩孔、缩松率，但铸件顶部和底部壁厚交接处仍会出现缩孔、缩松缺陷。因此，需要进一步改进浇注方案，即在铸件顶部和底部可能产生铸造缺陷的位置增加补缩冒口，对铸件凝固过程进行补缩，冒口截面尺寸如图10所示。改进后的浇注方案如图11所示。

设置冒口后，再次对铸件进行模拟，图12a所示该改进方案下，可成功地将铸件顶部和底部的热节部位转移至冒口中，实现铸件到冒口的顺序凝固。从图12b可以看出，铸件顶部和底部的缩孔、缩松缺陷已基本消除。

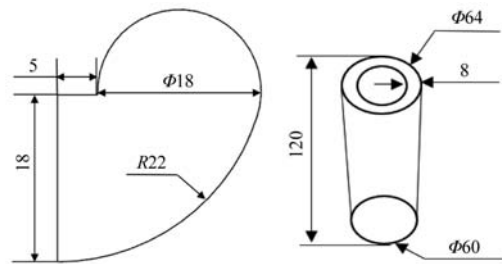


图10 冒口和保温圈尺寸

Fig. 10 Riser and jacket dimensions

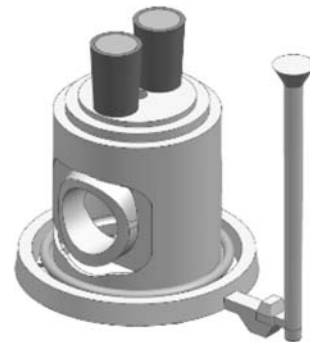
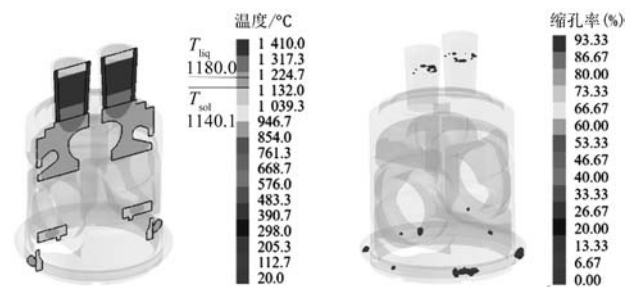


图11 改进后的铸造工艺方案

Fig. 11 Improved casting process



(a) 热节转移

(b) 顶部和底部缩孔缩松基本消除

图12 浇注工艺改进后缺陷分布

Fig. 12 Defect distribution after improved pouring process

## 5 结论

(1) 结合柴油机活塞铸件本身的结构特点, 设计了轴向引入和径向引入两种底注式浇注方案, 并对两种浇注方案进行模拟, 仿真结果发现, 径向引入底注式浇注系统更为合理。

(2) 研究了浇注温度、充型时间及铸型温度对铸件质量的影响, 发现影响铸件缩孔、缩松率大小的参数

影响程度依次为铸型温度>浇注温度>充型时间, 进一步通过正交试验得到最佳的浇注工艺参数: 浇注温度1 410 ℃, 充型时间12 s, 铸型温度25 ℃。

(3) 针对正交试验优化后存在的缩孔、缩松缺陷, 在铸件顶部和底部外侧缺陷处设置冒口来转移铸造热节, 实现从铸件到冒口的顺序凝固, 基本消除了缩孔、缩松缺陷, 有助于提高铸件质量。

### 参考文献:

- [1] 陈长江, 王渠东, 尹冬弟, 等. 内燃机活塞材料的研究进展 [J]. 材料导报, 2009, 23 (8): 62-65.
- [2] 宋军辉, 封学平, 崔青勇. 提高球铁活塞裙铸件表面质量的研究 [J]. 机车车辆工艺, 2010 (3): 10-11.
- [3] 王树宝, 郭文申, 姜霄云. 球墨铸铁典型缩松缺陷的解决 [J]. 金属加工 (热加工), 2017 (Z2): 56-58.
- [4] 洪恒发. 基于球墨铸铁凝固原理的补缩方法 [J]. 铸造, 2011, 60 (12): 1194-1199.
- [5] 杨小冬. 疏浚泥泵泵体砂型铸造数值模拟及工艺优化 [D]. 武汉理工大学, 2016.
- [6] 廖敦明, 曹流, 孙飞, 等. 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望 [J]. 金属学报, 2018 (2): 161-173.
- [7] 杨智强, 起华荣, 郭红星, 等. 国内铸造工艺数值模拟研究及应用现状 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (9): 2072-2075.
- [8] 王明智, 陈刚, 周志. 基于正交试验的铝合金轮毂铸造工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2015 (5): 65-68.
- [9] 曹文灵, 周照耀, 李元元, 等. 船用柴油机活塞铸造顺序凝固工艺设计及数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金, 2010 (1): 36-38.
- [10] 尹起, 盛文斌, 张振波. 基于AnyCasting的机床滑块铸造模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17): 102-104.
- [11] 刘继广, 张雅咪, 方晓刚, 等. 多功能显控台低压铸造工艺设计及优化 [J]. 铸造, 2020, 69 (12): 1325-1330.
- [12] ZHANG Chen, FU Yu, WANG Han, et al. Multi-objective optimization of process parameters during low-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy wheel castings [J]. China Foundry, 2018, 15 (5): 327-332.
- [13] LIU C, LIAO D, FEI S, et al. Numerical simulation of cold-lap defects during casting filling process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (5-8): 2419-2430.

## Simulation and Optimization of Casting Process for Diesel Engine Piston Based on ProCAST

ZHOU Chuan-long<sup>1</sup>, HE Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Hong-gen<sup>1</sup>, LI Guo-chao<sup>1</sup>, FU Bo-feng<sup>2</sup>, ZHAO Ming<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu, China; 2. Shanxi Diesel Engine Heavy Industry Company Limited, Xi'an 713100, Shaanxi, China)

### Abstract:

In order to solve the problems of shrinkage and dispersed shrinkage defects in the casting process of a marine diesel engine piston, based on the three-dimensional modeling software and casting simulation software, taking QT700 piston casting as the research object, the three-dimensional model diagram was drawn by UG, the casting process of the piston casting was simulated by ProCAST software, and the possible areas of the shrinkage and dispersed shrinkage defects were predicted. According to the structural characteristics of the piston castings, two kinds of bottom injection gating systems, axial introduction and radial introduction, were designed. The research results showed that the radial introduction bottom injection gating system had more advantages in reducing shrinkage and dispersed shrinkage defects than the axial introduction bottom injection gating system. The effects of pouring temperature, mold filling time and mold temperature on the shrinkage of castings were further studied, and the best combination of process parameters was obtained by orthogonal experiment. Finally, feeding riser was added at the position where casting defects occur, effectively eliminating defects in the casting process.

### Key words:

diesel engine piston; casting; gating system; numerical simulation