

基于数值模拟的铝活塞铸造过程优化

邢小兵¹ 宋 亮¹ 熊培友^{1, 2} 李锋刚¹ 刘云芳¹ 兰 军¹
(1.滨州渤海活塞有限公司; 2.上海交通大学机械与动力工程学院)

摘 要 为了降低铝合金活塞铸造缺陷,基于 MAGMA 软件对不同活塞铸造模具结构和铸造工艺进行模拟分析,结合 DOE 设计确定了最优的模具和铸造工艺方案,并进行了试验验证。结果表明,当采用将内浇道向下增加 45°斜角,增大保温冒口尺寸且对铸造模具销芯进行 60 s 冷却的组合方案时,有效减少了活塞铸造缩松缺陷,解决了活塞销座厚大部位由于缩松导致的废品率高的问题,且减少了反复修模、试模的成本,提高了产品品质。

关键词 活塞;模具;铸造工艺;数值模拟

中图分类号 TP311;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization of Aluminum Piston Casting Process Based on Numerical Simulation

Xing Xiaobing¹, Song Liang¹, Xiong Peiyu^{1, 2}, Li Fenggang¹, Liu Yunfang¹, Lan Jun¹

(1.Binzhou Bohai Piston Co., Ltd.; 2.School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University)

Abstract: In order to reduce casting defects in aluminum alloy piston, the die structure and casting process of different pistons were analyzed by the MAGMA software, and optimal die and process scheme were determined and verified combined with the DOE design. The results indicate that the shrinkage porosities in piston are effectively reduced through the combination scheme of increasing the inner gate angle by 45 degrees downward, increasing the size of the insultnant riser and cooling the pin core of the casting mold for 60 s, which solves high scrap rate caused by shrinkage in the thick piston pin seat area, and saves the trial-manufacture and production cost of repeated mold repairing and test, thus improving the casting quality of products.

Key Words: Piston, Mould, Casting Process, Numerical Simulation

随着现代内燃机载荷和设计速度的不断提升,发动机功率的不断增大,活塞的各项性能要求也随之不断提高,这就要求活塞必须具备质轻、热膨胀系数小(体积稳定性好)、导热性好、耐高温、耐磨损等良好的性能^[1-3]。但是在实际金属型铸造活塞过程中,受到合金材料、产品特殊结构、模具设计、冷却及铸造工艺参数等因素的影响,容易在活塞销座壁厚处产生缩松、缩孔等缺陷,显著影响零件性能^[3-8]。为了提高销座补缩能力,一般在其上方设置补缩冒口,但这种方法存在工艺出品率低、浇冒口设计复杂的问题^[9]。在浇注过程中,合金液的温度场、速度场等相互耦合作用比较复杂,很难通过实时观察和测量得出准确的预测,因此采用数值模拟对活塞铸造充型和凝固过程进行分析十分重要^[10-11]。随着仿真技术的不断进步,试验分析虚拟设计的统计工具与可

用于工艺优化的遗传算法相结合,为铸件的虚拟试验和自动优化提供了新的途径^[12]。目前,铸造过程仿真模拟技术已广泛应用于各种合金铸造工艺设计及优化过程中,通过对汽车铝合金轮毂^[13-15]、制动器壳体^[16]、发动机活塞^[17-18]、连杆^[19]凝固过程进行准确建模模拟,预测生产过程中可能存在的缩孔、缩松、气孔、夹渣、浇不足等铸造缺陷,分析缺陷形成的原因和机理,进而分析浇注温度、模具预热温度、充型时间、冷却参数、冒口及浇道结构尺寸等工艺参数对铸件缺陷的影响,从而得到最佳工艺方案,达到优化铸造工艺、消除铸造缺陷的目的^[20]。为降低某国外柴油机产品活塞的铸造废品率,本课题使用 MAGMA 软件对活塞金属型铸造模具结构及工艺进行数值计算,结合 DOE 优化及试验验证,最终确定最佳铸造模具结构及工艺方案,生产出合格产品。

收稿日期:2022-04-12;修改稿收到日期:2022-05-27

基金项目:山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2020KE051)

第一作者简介:邢小兵,男,1979 年出生,高级工程师,山东滨州(256602),E-mail: wind-xxb526@163.com

通信作者:熊培友,男,1984 年出生,高级工程师,山东滨州(256602),E-mail: peiyu.xiong@bhpiston.cn

引用格式:邢小兵,宋亮,熊培友,等. 基于数值模拟的铝活塞铸造过程优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(2): 254-258.

XING X B, SONG L, XIONG P Y, et al. Optimization of aluminum piston casting process based on numerical simulation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):254-258.

1 模具设计及铸造工艺分析

1.1 活塞产品结构分析

所研究的活塞直径为 109 mm,采用具有高耐磨性、高热疲劳性的亚共晶 Al-Si 合金(SAE332)。该活塞结构相对较复杂,第一环槽镶铸高镍奥氏体铸铁耐磨铁环,头部厚大,裙部壁厚不均匀,尤其是销座下端厚大,见图1。因此活塞毛坯铸造实现顺序凝固补缩困难,

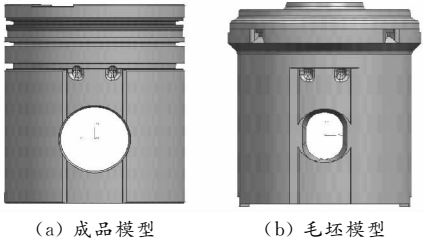


图 1 活塞及毛坯三维模型
Fig.1 3D model of piston and blank

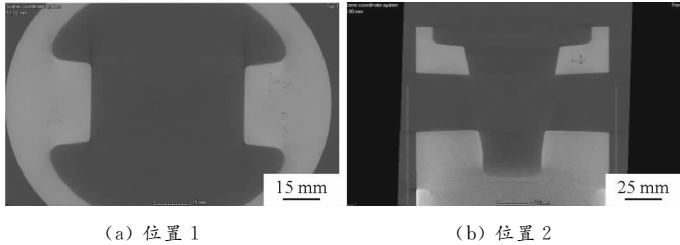


图 3 活塞铸件 CT 检测
Fig.3 CT detection of piston

1.2 铸造工艺分析

由于对铸件品质要求较高,采用精度、稳定性相对较高的全自动铸造机进行模具试制及生产,结合铸造机特点及生产柴油机毛坯积累的经验,采用活塞顶部朝上的铸造方式。由于 SAE332 合金属于亚共晶 Al-Si 合金,倾向于同时凝固,补缩性能差,缩松、缩孔倾向大,且由于该活塞顶部厚大(见图 4 和图 5),容易产生热节。为了保证顶面有足够的铝液进行补缩,必须在热节部位设置冒口进行有效补缩,防止产生缩孔或缩松等缺陷。另外,由于该活塞销孔下端厚度较大,将销芯设计成椭圆状(正常销芯一般设计成圆形),有利于铝液从销芯两侧对底部厚大部位的补缩,见图4。考虑活塞裙部与内

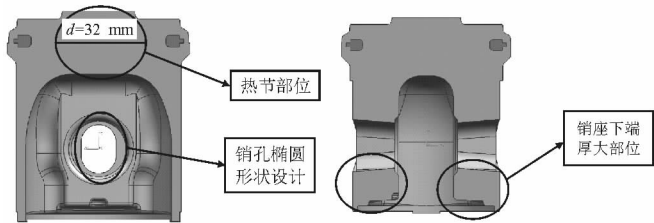


图 4 活塞长轴剖面图
Fig.4 Section of major axis of piston

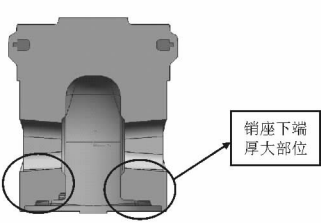


图 5 活塞短轴剖面图
Fig.5 Section of minor axis of piston

在生产过程中发现,在活塞销座厚大处有分散的海绵状缩松缺陷,见图 2 和图 3。结合类似结构活塞设计经验,该活塞初始设计方案采取了增大补缩冒口、扁销芯措施,能够进行样件生产,但铸造品质很不稳定,废品率最高达 70%。

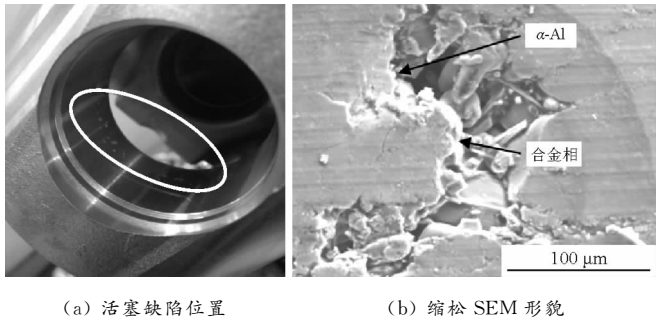


图 2 活塞成品缺陷位置及 SEM
Fig.2 Defect location and SEM morphologies of piston

销座过渡处壁厚差较大,应采用强制水冷方式,增加销座壁厚处的冷却速度,以期实现顺序凝固,见图 5。

2 数值模拟计算及优化

2.1 凝固过程数值模型

采用有限差分(FED)法来对铸件的凝固过程进行模拟计算,凝固过程是一个三维不稳定的导热过程,其三维直角坐标描述为^[21]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中, x,y,z 为坐标轴方向长度, mm; T 为温度, K; t 为时间, s; ρ 为密度, kg/m^3 ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 为等压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

2.2 网格划分

综合该铸件结构和模拟分析的效率,使用 Equidistant 等距离网格划分功能对毛坯三维实体模型进行网格划分,使用 Classic 自定义网格划分功能对浇注系统进行网格划分,在重点部位,如铸件易产生缺陷的厚大区域采用较密集的网格单元,其他区域则采用相对较疏的网格单元,网格划分结果见图 6。

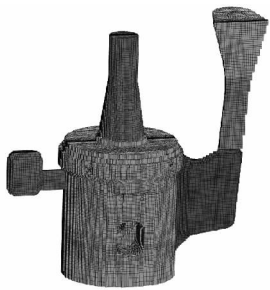


图 6 活塞铸件网格模型

Fig.6 Grid model of piston casting

2.3 工艺参数及边界条件

铸造过程模拟工艺参数与实际生产保持一致,见表 1。

表 1 铸造工艺参数

Tab.1 Processing parameters of casting process						
浇注温度/ ℃	模具预热温度/ ℃	预热循环 次数/次	模具冷却水压 力/MPa	冷却水温度/ ℃	冷却水流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	铸造机倾转角 度/(°)
710	200	3~5	0.6	25	0.45	25

模具之间的传热系数为 800~1 000 W/(m²·K), 模具与保温材料之间的传热系数为 200 W/(m²·K)。为了保证浇注过程尽可能与实际生产相符,使用自动浇注控制功能;同时,为了保证镶环能够有效地被充型铝液冲刷,提高镶环和铝基体的粘结率,设计倾转浇注。浇注时采用绕 Y 轴向 +X 轴方向,即浇口方向倾斜 25°。

2.4 DOE 优化

根据铸造工艺分析的结果,销座下端比较厚大,容易产生热节,而销座周围无法设置冒口对其进行补缩,只能依靠销座两侧的补缩通道进行自下而上的自补,但受销芯模具冷却的影响,两处补缩通道易先行凝固,导致销座下端厚大部位由于得不到补缩而产生缩松缺陷。因此,将整个铸件上两侧销座厚大部位作为 DOE 优化的目标,同时还兼顾铸件其他部位。

2.4.1 铸造工艺

考虑到 Al-Si 合金的特性,同时为了预防并消除销座下端厚大部位可能产生的缩松,通过对销芯的冷却和不冷却两种方式进行优化模拟计算,见表 2。

表 2 销芯冷却因子

Tab.2 Cooling factor of pin core	
水平 1	水平 2
充型后 20 s 开始冷却 60 s	不冷却

2.4.2 模具结构

为了避免铝液充型过程中产生紊流,对横浇道形状及尺寸进行改进。一是将内浇道向下增加 45°斜角(方案 1),见图 7。二是将横浇道和内浇道整体向下加长

15 mm(方案 2),见图 8。



图 7 浇注方案 1
Fig.7 Runner scheme 1



图 8 浇注方案 2
Fig.8 Runner scheme 2

考虑到铸件头部厚大,极易形成热节,冒口的大小影响铸件头部温度场,进而间接影响到销座部分的补缩通道。因此,顶冒口的大小进行优化计算。

冒口尺寸一般按活塞热节圆直径来确定如下:

$$D = (1.2 \sim 1.5) d \tag{2}$$

式中, D 为冒口根部直径,mm; d 为活塞毛坯热节圆直径,mm。

对于直径较大的热节圆,在补缩通道畅通的状态下,冒口直径取中限偏下尺寸;对于直径较小的热节圆或补缩通道易堵塞的状态下,冒口直径取中限偏上尺寸。

由于活塞热节圆直径为 32 mm,根据式(2)可计算得 1 号冒口套冒口根部直径 $D_1 = 38$ mm;2 号冒口套冒口根部直径 $D_2 = 45$ mm。

冒口的高度一般按经验公式计算如下:

$$H = (0.8 \sim 1.5) D \tag{3}$$

式中, H 为冒口高度,mm。

冒口高度太低,补缩效果得不到保证;冒口高度太高,铝合金消耗多,工艺出品率低。计算可得 1 号冒口高度 $H_1 = 57$ mm;2 号冒口高度 $H_2 = 68$ mm。

根据活塞结构及其尺寸,选取正常生产使用的标准保温冒口套 1 号及 2 号分别进行优化计算,见图 9 和图 10。

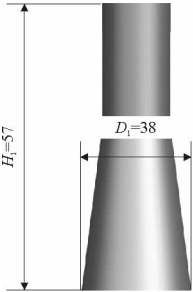


图 9 1 号保温冒口
Fig.9 Insulated riser 1

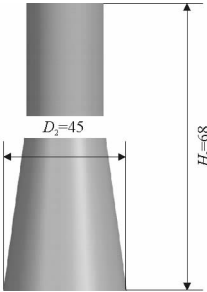


图 10 2 号保温冒口
Fig.10 Insulated riser 2

2.4.3 优化方案

使用 MAGMA 软件中的 DOE 优化设计模块对以上制定的影响因子自动进行优化分析,见表 3。以整个

铸件上两侧销座厚大部位缩松率作为 DOE 优化的目标,同时还兼顾铸件其他部位的缩松缺陷,见图 11。

表 3 试验因子水平一览表

Tab.3 A list of test factor levels

因子	水平 1	水平 2
A(销芯冷却)	充型后 20 s 开始冷却 60 s	不施加冷却
B(浇口形状与尺寸)	浇注方案 1	浇注方案 2
C(顶冒口尺寸)	1 号保温冒口	2 号保温冒口

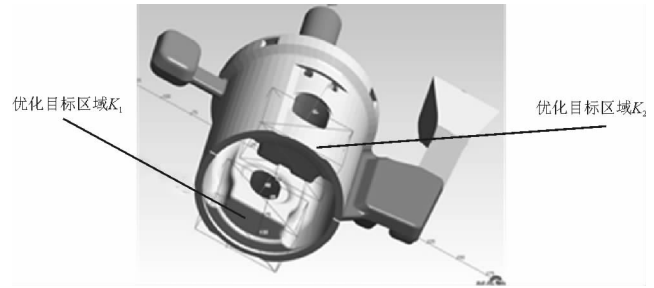


图 11 铸件优化目标区域示意图

Fig.11 Schematic diagram of optimization for target area

A(销芯冷却)、B(浇口形状与尺寸)和 C(冒口尺寸)的优化分析,共计 8 种设计方案组合,见表 4。

表 4 DOE 组合方案

Tab.4 Combination scheme of DOE

方案	A(销芯冷却)	B(浇口形状与尺寸)	C(顶冒口尺寸)
1	1	1	1
2	2	1	1
3	1	2	1
4	2	1	1
5	1	1	2
6	2	1	2
7	1	2	2
8	2	2	2

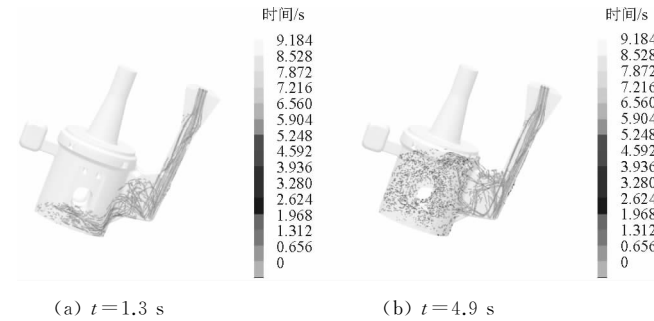


图 12 最优方案组合充型过程及凝固温度场变化

Fig.12 Optimal scheme combination of filling process and variation of solidification temperature field

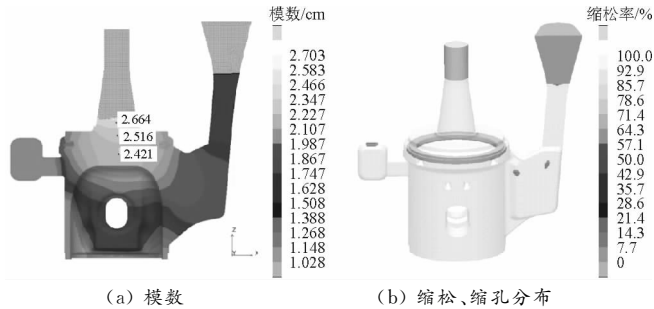


图 13 最优方案组合缺陷预测

Fig.13 Defect prediction for optimal scheme combination

3 结果讨论及验证

3.1 优化计算结果

以设定的优化目标区域 K_1 和 K_2 的缩松率为主要评价指标,见表 5。可以看出,方案组合 5 是最优的方案,该方案下活塞 K_1 和 K_2 区域缩松率最小,且活塞整体缩松和显微缩松都明显减少。

表 5 最优计算结果

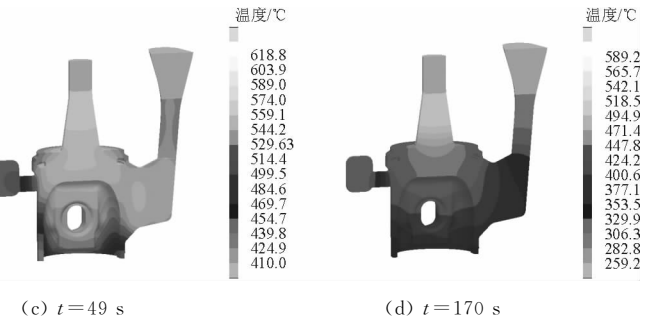
Tab.5 Optimum calculation results

方案组合	K_1	K_2	减少缩松/cm ³	减少显微缩松/%	减少氧化/%	减少气压/MPa
1	0.0	0.0	4.33×10^{-3}	3.52	2.47	161.787
2	6.56×10^{-4}	9.05×10^{-4}	2.64×10^{-4}	2.76	2.40	157.222
3	3.40×10^{-3}	1.97×10^{-3}	5.97×10^{-5}	3.13	2.23	141.160
4	1.06×10^{-6}	2.41×10^{-5}	1.88×10^{-3}	2.36	2.31	161.787
5	0.0	1.69×10^{-6}	3.67×10^{-3}	3.50	2.52	150.016
6	2.08×10^{-4}	6.56×10^{-4}	4.39×10^{-4}	3.13	2.53	153.516
7	4.42×10^{-3}	2.70×10^{-3}	8.51×10^{-7}	1.59	2.40	113.810
8	1.12×10^{-3}	1.12×10^{-3}	8.15×10^{-5}	3.50	2.53	209.617

可以看出,销芯延迟冷却和使用 1 号冒口有利于降低区域的缩松,内浇道的整体加长虽然对 K_2 区域缩松影响明显,但结合所有评价来看,不是最优方案。

图 12 为优化方案 5 充型过程跟踪粒子路径和凝固时的变化图。可以看出,整个充型过程浇道内铝液充型平稳,无明显的紊流卷气产生。凝固过程中活塞温度场自下而上呈阶梯分布,销座处无明显温度场异常点,说明销芯延迟冷却有利于销座厚大处梯度温度场的形成,基本满足自下而上顺序凝固原则。

图 13 为最优方案组合缺陷预测。可以看出,最优



方案下铸件的品质非常好,缩松缺陷均集中在浇冒口中,顶冒口部位模数大于 1.2 倍铸件本体模数,说明前期分析设置的顶冒口对铸件顶面厚大部位补缩效果良好。

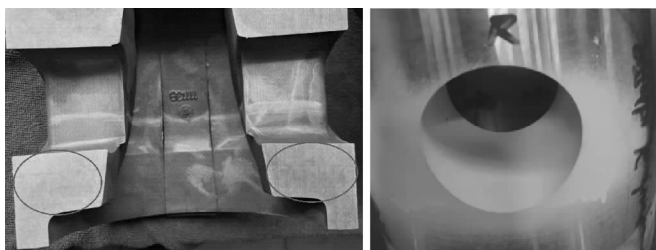
3.2 试验验证

使用最优方案进行浇注试验,对浇注的铸件活塞销座部分进行检测,首先使用配制的 10% 的 NaOH 溶液对剖开的铸件进行腐蚀,随后放入配制的草酸溶液进行

中和,再用清水冲洗,最后使用读数显微镜对铸件表面的缺陷进行判定,判定结果符合 JB/T 6289-2005。

另外,将活塞铸件外圆及销孔进行加工,使用清洗剂进行销孔部位的清洗,通过喷涂渗透剂及显影剂对销孔部位进行染色检验,没有发现缺陷,腐蚀与染色结果见图 14。

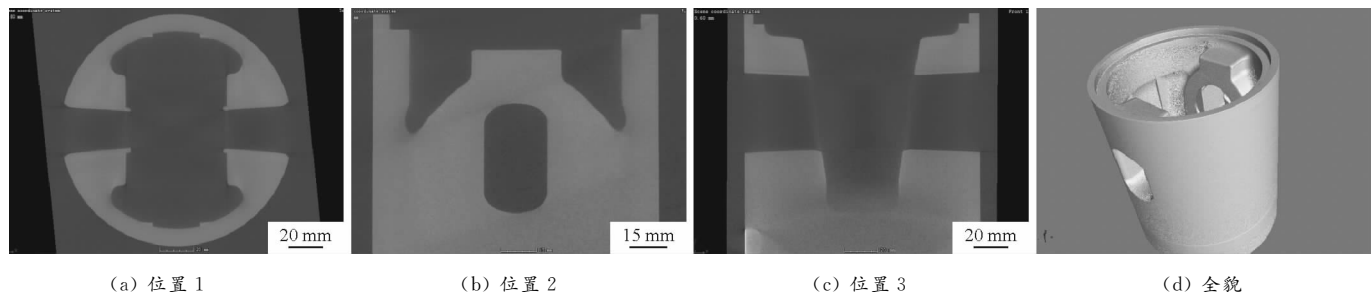
将粗加工后的活塞半成品进行工业 CT 扫描检验,通过 CT 逐层扫描,发现铸件内部无缺陷,见图 15。



(a) 活塞剖面化学腐蚀 (b) 活塞销孔染色检验

图 14 活塞铸造缺陷检测结果

Fig.14 Defect inspection of piston casting



(a) 位置 1

(b) 位置 2

(c) 位置 3

(d) 全貌

图 15 活塞销座部位 CT 扫描结果

Fig.15 CT scanning results of piston pin seat

4 结 论

(1) 增加销芯延迟冷却工艺有利于活塞销座厚大处梯度温度场的形成,可以实现自下而上顺序凝固,从而减少活塞缩松缺陷。

(2) 增大顶冒口尺寸对活塞销座区域铸造缩松缺陷没有明显影响,但可减少活塞头部、裙部等其他部位的缩松缺陷。

(3) 当采用销芯施加冷却、内浇道向下增加 45° 及增大顶冒口的组合方案时,在保证充型平稳的同时,也增加了冷却和冒口补缩,改善了铸件温度梯度,有利于铸件实现自下而上的顺序凝固,可有效解决销座厚大部位的缩松问题,降低废品率,提升活塞品质。

参 考 文 献

- [1] 林风华,石小明,刘世英.商用车发动机活塞的发展趋势[J].内燃机与动力装置,2021,38(6):76-80.
- [2] 曾少波.重型车用柴油机活塞结构及材料的发展趋势[J].汽车工艺师,2016(6):75-77.
- [3] 李鹏.国外商用车发动机活塞的技术发展趋势[J].汽车工艺与材料,2011(2):17-21.
- [4] 朱祯,朱利民.汽车铝活塞销座缩松缺陷的消除[J].中国铸造装备与技术,2020,55(6):70-72.
- [5] 苏志国.活塞铸造缺陷与控制[J].内燃机与配件,2013(12):20-22.
- [6] 孙国臣,颜鲁滨,齐鹏.大功率柴油机活塞镶圈缺陷的分析与改进[J].内燃机与配件,2012(8):41-43.
- [7] KAZUHIKO T, MASAFUMI C, KAZUTO Y. Modeling and input shaping control of liquid vibration for an automatic pouring system [A]. Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control [C]. Kobe, Japan, 1996.

- [8] 宋亮,张屹林,闫汝辉,等.基于数值模拟的铝合金活塞设计与优化[J].特种铸造及有色合金,2015,35(2):150-152.
- [9] MINAMI R. Research on Porosity Defects of Al-Si Alloy Castings Made with Permanent Mold[D]. Tokyo, Japan: Weseda University, 2005.
- [10] 李殿中.可视化铸造技术的研究与应用[J].铸造,2005,54(2):148-152.
- [11] ZHANG H. Numerical simulation of nucleation, solidification and microstructure formation in thermal spraying [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 2 191-2 203.
- [12] 严世松.集虚拟试验和自动优化综合性能的新一代铸造模拟软件[A].2015中国铸造活动周论文集[C].长沙:2015.
- [13] 赵丽红,毕涛.低压铸造铝合金车轮轮辋断裂分析及结构优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(1):119-121.
- [14] 孙冬恩,程和法,周宏伟,等.低压铸造铝合金轮毂的数值模拟及工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2020,40(7):763-767.
- [15] ZHANG C, FU Y, WANG H, 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.
- [16] 郝刚,刘艳春.基于 ProCast 的汽车制动器壳体挤压铸造工艺数值模拟[J].热加工工艺,2019,48(9):87-89.
- [17] 刘沙,李春亮,白旭东.压铸机活塞铸造成型的工艺优化[J].铸造,2021,70(6):740-745.
- [18] 李庭勇. Magma 虚拟试验设计在活塞铸造工艺开发中的应用[J].特种铸造及有色合金,2018,38(8):847-849.
- [19] 刘振,万鹏,姜银方,等.发动机连杆挤压铸造数值模拟研究[J].热加工工艺,2014,43(17):75-78.
- [20] 徐义武,管文浩,马洪亮.铸造 CAE 在解决汽车铸件铸造缺陷中的应用[J].特种铸造及有色合金,2011,31(8):715-717.
- [21] NASTAC L. Numerical modeling of solidification morphologies and segregation patterns in cast dendritic alloys [J]. Acta. Mater., 1999, 47(17):4 253-4 260.

(编辑:栗万仲)