

基于 AnyCasting 的 AC8A 铝合金活塞铸造工艺优化

李起保¹ 刘继林² 李晓航³ 高培虎¹ 张世吾⁴ 闫志义⁴ 张丽娜⁴ 李建平⁴
(1.西安工业大学材料与化工学院; 2.陆军驻大同代表室;
3.陆军驻西安地区第八军代室; 4.山西柴油机工业有限责任公司)

摘 要 针对 AC8A 铝合金活塞在铸造过程中产生的铸造缺陷,采用 AnyCasting 模拟软件研究了保温冒口形状和尺寸及浇注系统对汽车活塞顶部和裙部缺陷形成的影响。结果表明,通过对横浇道的尺寸优化和冒口尺寸的优化,减少了活塞顶部和裙部的缩孔和疏松缺陷,提高了铸件合格率。

关键词 Al-Si 合金;活塞;数值模拟;浇注系统;保温冒口

中图分类号 TG146.21;TG249.3;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.007 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Casting Process Optimization for AC8A Aluminum Alloy Piston by the AnyCasting Software

Li Qibao¹, Liu Jilin², Li Xiaohang³, Gao Peihu¹, Zhang Shiwu⁴, Yan Zhiyi⁴, Zhang Lina⁴, Li Jianping⁴
(1.School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University; 2.Representative Office in Datong, PLA; 3.No.8 Representative Office in Xi'an, PLA; 4.Shanxi Diesel Engine Industry Co., Ltd.)

Abstract: To eliminate the casting defects in aluminum alloy piston during casting process, effects of the shape and size of the insulation riser as well as gating systems on the defect formation at the top and the skirt of the piston were investigated by the AnyCasting software. The results indicate that the shrinkage cavities are reduced through size optimization of runner and riser, thus enhancing qualified rates.

Key Words: Al-Si Alloy, Piston, Numerical Simulation, Gating System, Insulation Riser

活塞是发动机的核心部件,其铸造技术要求高,难度大^[1]。传统活塞材质为铸铁,制造工艺简单、成本低,但自身质量大,发动机运行过程中惯性冲击大、噪声大,且高速运动过程中易发生脆性破坏,造成发动机的整体

收稿日期:2022-03-20;**修改稿收到日期:**2022-05-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771140);陕西省创新人才推进计划-科技创新团队资助项目(2017KCT-05);陕西省科技厅重点研发计划资助项目(2019ZDLGY05-09);陕西省高校青年创新团队资助项目(金属腐蚀防护及表面工程);陕西省教育厅服务地方计划专项资助项目(19JC022);榆林市科技局资助项目(2019-121)
第一作者简介:李起保,男,1996 年出生,硕士研究生,西安(710021),E-mail:2467911540@qq.com
通信作者:高培虎,男,1979 年出生,副教授,西安(710021),E-mail:tigergaopei@163.com
引用格式:李起保,刘继林,李晓航,等. 基于 AnyCasting 的 AC8A 铝合金活塞铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):33-38.
LI Q B, LIU J L, LI X H, et al. Casting process optimization for AC8A aluminum alloy piston by the AnyCasting software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):33-38.

[12] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, SAXENA P, et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting[J]. Additive Manufacturing, 2021, 40: 101 889.

[13] DU W C, REN X R, PEI Z J, et al. Ceramic binder jetting additive manufacturing: A literature review on density[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2020, 142(4): 040 801.

[14] NAN B Y, YIN X W, ZHANG L T, et al. Three-dimensional printing of Ti₃SiC₂-based ceramic[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(4): 969-972.

[15] KUNCHALA P, KAPPAGANTULA K. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers[J]. Materials & Design, 2018, 155: 443-450.

[16] 陈敏,王楠,王洋,等.合成抗水化性致密氧化钙砂的研究[J].东北大学学报(自然科学版),2007,28(2): 225-228.

[17] 吉晓莉,万伟伟,王浩,等. TiO₂对 CaO 陶瓷烧结和抗水化性能的影响[J].化工新型材料,2011,39(1): 88-89.

[18] LIU F, FAN Z, LIU X, et al. Aqueous gel casting of water-soluble calcia-based ceramic core for investment casting using epoxy resin as a binder[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 1 235-1 242.

[19] BRUNI Y L, GARRIDO L B, AGLIETTI E F. Properties of CaO-ZrO₂ based composites[J]. Procedia Materials Science, 2015 (8): 203-210.

破坏。为了适应汽车轻量化发展趋势,铝合金活塞逐步取代铸铁活塞,极大地减轻汽车发动机的质量,实现了轻量化,保障发动机的可靠运行^[2,3]。

铝合金活塞质量相对铸铁大幅降低,降低了汽车油耗和尾气排放。另外,铝合金活塞热导率高,提高了发动机的工作效率,而且铝合金活塞的磨损率较低,延长了发动机的使用寿命^[4,5]。活塞结构复杂、壁厚不均、热节多,在铸造过程中容易出现缩松、缩孔等缺陷^[6,7]。传统的铸造工艺基于经验试制法,其设计、生产周期长,成品率低,生产成本低^[8]。数值模拟软件应用到铝合金活塞铸造过程中,可对金属液充型和凝固过程进行预测,通过优化浇注系统,合理配置铸造工艺参数^[9]。通过定性、定量分析铸造过程充型、凝固以及残余熔体模数的变化,降低缺陷出现的概率,从而提高铸件的品质^[10~13]。

本课题针对某型汽车发动机活塞,分析活塞结构特点,通过 AnyCasting 模拟分析,研究了保温冒口形状和尺寸及浇注系统对汽车活塞顶部和裙部缺陷形成的影响,通过改变浇注系统的设计以及冒口尺寸的优化,消除了不合理铸造工艺产生的铸造缺陷。根据模拟结果,对铸造工艺进行优化,提高了铸件合格率。

1 几何模型建立

某发动机活塞基本结构见图 1。活塞最大直径为 113.7 mm,总体高度为 77.3 mm,顶部冒口高度为 32 mm,最大直径为 50 mm,冒口颈高度为 1 mm,最大直径为 57 mm。活塞顶部和裙部较厚,销孔处比裙壁厚。根据活塞受力分析,活塞顶部和销孔位置承压面积大,因此该处要组织致密,无气孔、裂纹等缺陷^[8]。

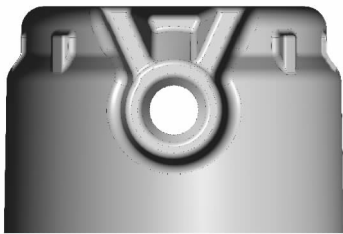


图 1 活塞铸件模型
Fig.1 The model of piston

由于活塞顶部和裙部较厚,可能会出现热节,因此增设保温冒口补缩^[14]。同时由于活塞裙和内销座过渡处的壁厚差异很大,在侧面增设保温块,实现顺序凝固。采用底注式浇注系统,浇口杯放置在活塞顶部 110 mm 处,以增强补缩效果。设置顶部冒口,避免顶部产生缩孔和缩松缺陷,铸造工艺见图 2。

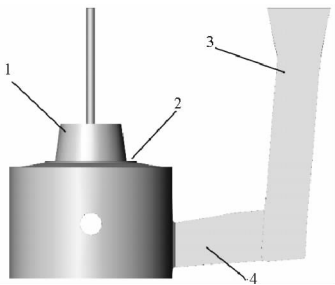


图 2 活塞浇注系统
Fig.2 Gating system of piston
1.顶冒口 2.冒口颈 3.直浇道 4.横浇道

2 初始铸造工艺模拟

2.1 网格模型建立

首先,在 SolidWorks 软件中建立浇注系统模型,并输出 STL 文件,导入 AnyCasting 软件中进行数值模拟,见图 3。图 4 为铸件网格剖分图,根据铸件的外形尺寸及质量将其划分为 1 000 800 个正方体网格,网格大小为 2.654~2.674 mm,表面网格单元数为 42 006 个。

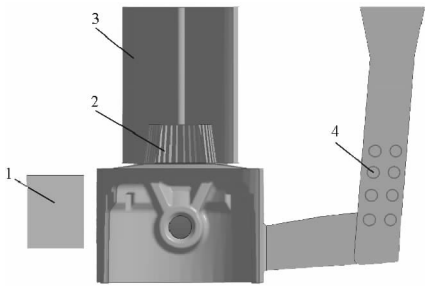


图 3 初始方案铸件浇注系统
Fig.3 Initial gating system for aluminum piston castings
1.侧面保温块 2.保温冒口 3.保温冒口套 4.浇道保温块

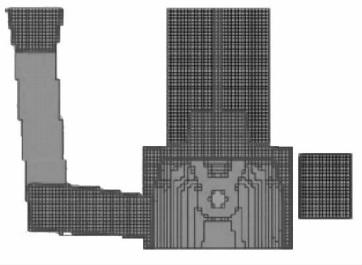


图 4 铸件网格剖分图
Fig.4 Grid meshing of casting

2.2 材料性能及初始条件

活塞材质为 AC8A 铝合金,其成分见表 1,物理性能见表 2。模具选用 SCr440 铸钢,冒口选用空心微珠型保温冒口,侧面保温块、浇道保温块均选用 Mastic 85C 耐热保温材料,其物理性能见表 3。

表 1 AC8A 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of AC8A alloy %					
wt%					
Cu	Si	Mg	Fe	Ni	Al
0.5~1.5	11.0~13.0	0.8~0.13	0.00~0.70	0.8~0.15	余量

表 2 AC8A 铝合金的物理性能

Tab.2 Physical properties of AC8A aluminum alloy			
密度/ (kg · m ⁻³)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	热膨胀系数/ (×10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
2 700	963	20.5	117

表 3 保温材料物理参数

Tab.3 Physical parameters of thermal insulation materials			
保温材料	密度/ (kg · m ⁻³)	比热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
空心微珠	1 500	1 500	0.15
Mastic85C	800	1 000	0.15

2.3 铸造工艺参数设定

保温材料及模具预热温度设定为 300 ℃,浇注温度为 780 ℃,浇注速度为 15.426 59 cm/s,浇注时间为 6~7 s,凝固时间为 120 s 左右。

2.4 初始工艺方案数值模拟

图 5 为活塞铸件充型过程的温度场分布。可以看出,在 2.276 29 s 时活塞底部温度超过液相线温度,达 600 ℃ 以上,铸件仍保持液态。随着充型继续,铸件型腔内的金属液面逐渐上升。3.577 13 s 时充型率为 55.04%,铸件远离横浇道的外壁温度已降至 550 ℃,活塞裙和内销座端温度仍高于 630 ℃。当充型率达到 75.04% 时(见图 5c),液面上升至顶部凸台区域。在 6.175 34 s 时,活塞顶部温度升至 680 ℃,是最后凝固的部位,可见保温冒口起到了补缩作用。

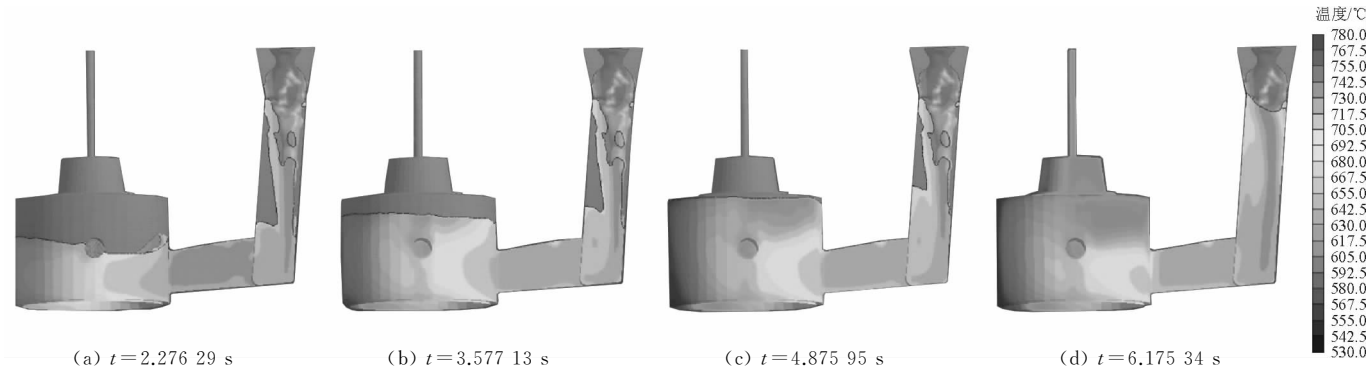


Fig.5 Temperature field of initial molten alloy during the filling process at different moments

图 6 为活塞铸件凝固过程的温度场分布。可以看出,凝固起始阶段,活塞铸件远离内浇道的裙部和底部最先开始凝固,固相率为 37.44% 时,用时 18.218 9 s,铸件顶部边缘逐渐开始凝固;固相率为 55.20% 时,用时

23.664 6 s,随着时间推移,铸件凝固至活塞销孔顶部,且因活塞顶部壁厚较厚,导致凝固速度较慢,但是仍可沿内浇道及顶部冒口进行补缩凝固。固相率为 86.38% 时,用时 45.548 9 s,铸件凝固至顶部凸台区域时,冒口

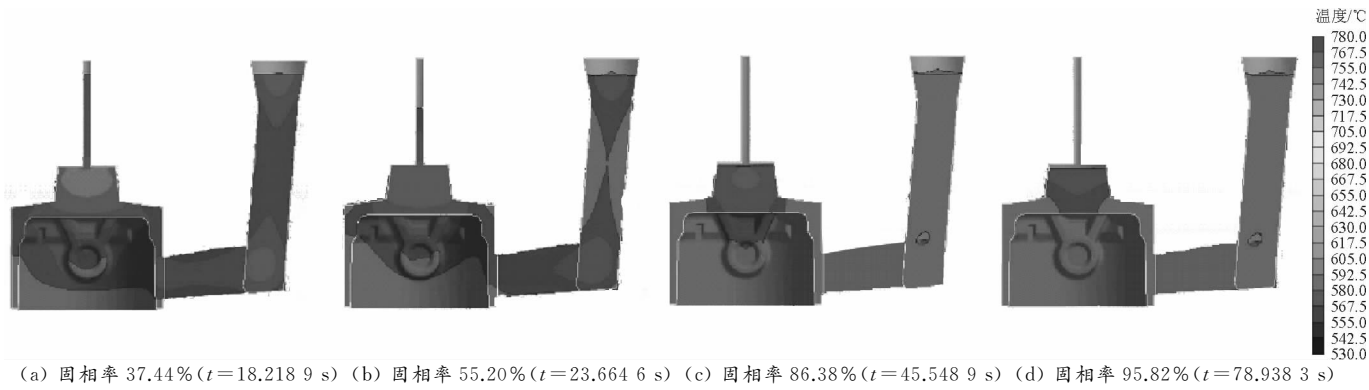


Fig.6 Solidification process of initial piston casting

的中心区域的温度达 580 ℃,此时冒口对活塞顶部仍有一定补缩作用。固相率为 95.82% 时,用时 78.938 3 s,凝固过程即将结束,冒口区域为最后凝固区。因此铸件的凝固顺序为远离浇道区域先凝固,顶部厚部区域其次,冒口为最后凝固区域,完全凝固时间为 114.961 s。

2.5 铸件缩松、缩孔缺陷预测

铸件的近内浇道活塞裙部边缘部分在凝固过程中可能有孤立液相区,由于周围液体均已凝固,无法及时补缩而有可能形成缩松、缩孔。因此,在初始铸造工艺数值模拟中用残余熔体模数法对截面 XY 和截面 XZ

进行缺陷预测。活塞铸件出现缺陷处的典型截面见图 7。其中,典型 XY 截面为铸件直浇道的纵向剖切面,典型 XZ 截面正好位于铸件横浇道的横向切面,并且该缺陷位置靠近横浇道活塞裙部区域。可以看出,铸件从冒口获得补缩,浇注过程中活塞裙部产生明显的缩松,但铸件型腔两侧的加强筋处及活塞顶部厚大部位处发生缺陷的可能性较小。因此,需进一步增加冒口高度或通过合理设置保温材料,降低活塞裙部缩松倾向。

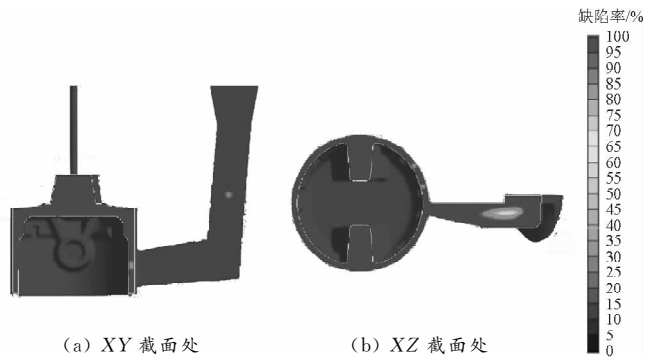


图 7 初始工艺铸件不同截面缺陷预测

Fig.7 Defect prediction of different sections in initial casting

3 铸造工艺优化

根据铸件的凝固顺序及残余熔体模数判定,在铸件裙部厚大部位无法得到冒口的及时补缩,而形成缩孔缺陷。因此,通过改变冒口和浇注系统形状与尺寸,实现顺序凝固,提高冒口补缩能力。

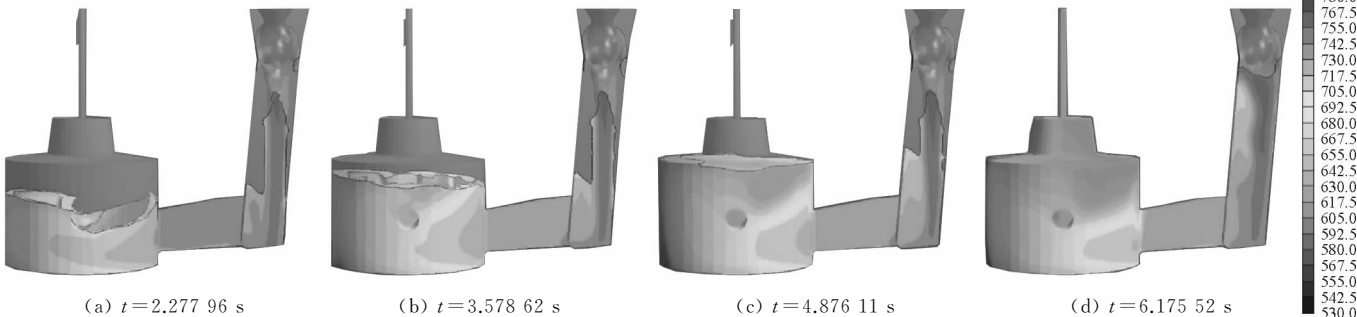


图 8 优化方案 1 合金液在充型过程中不同时刻的温度场

Fig.8 Temperature field of molten alloy during the filling process at different moments in the optimization scheme 1

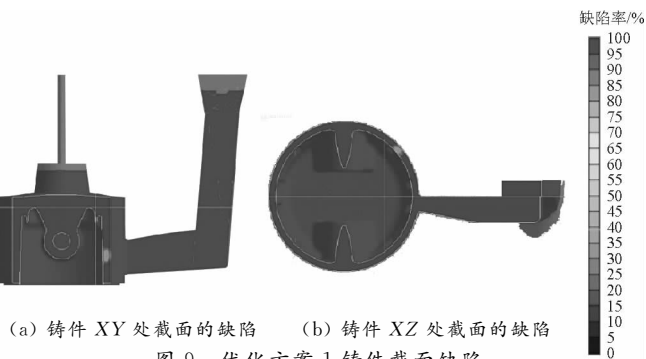


图 9 优化方案 1 铸件截面缺陷

Fig.9 Section defects of the castings in the optimization scheme 1

3.1 浇注系统与顶冒口改进

根据初始方案模拟结果可知,需进一步提高凝固温度梯度,提高冒口的补缩能力,仅依靠侧面保温块调节凝固温度梯度,效果不理想。因此,为了避免活塞裙部边缘部分在凝固过程中由冷速过快造成局部快速凝固出现缩松缺陷,将直浇道宽度由原来的 6 mm 增加到 12 mm,确保金属液平稳充型,降低卷气、夹杂可能性,保证顶部自下而上顺序凝固,并将浇注速度维持在 15.426 59 cm/s。浇注系统改进后,顶部冒口最大直径依然为 50 mm,顶部冒口颈最大直径由原来的 65 mm 减小至 57 mm,称为优化方案 1。

将改进后模型导入 AnyCasting 软件中再次进行模拟,浇注温度仍为 780 ℃,浇注时间为 6.5 s,模拟获得充型过程的温度场分布见图 8。通过浇注系统优化和顶部冒口尺寸,对比初始方案的充型温度分布可知,在顶部冒口最大直径为 57 mm 时,铸件凝固状态并未得到明显改善。充型时间为 2.277 96 s 时,明显看出,远端活塞底部温度低于浇道处,凝固从边缘部分开始。当充型率达到 95.01% 时,即充型时间为 6.175 52 s 时(见图 8d),金属液已全部充型至顶部冒口。但此时冒口温度低于近横浇道活塞裙部,没有形成从下至上的凝固顺序,且在裙部产生热节,因而产生缩孔、缩松以及变形等缺陷。

选取活塞的 XY、XZ 截面进行剖视观察(见图 9)。可以看出,截面 XY、XZ 显示发生缩孔的位置已由远

端活塞裙部转至近横浇道活塞裙部区域,改进浇注方案和顶冒口并没有明显改善铸件缩孔、缩松。

3.2 顶冒口再次改进

为保证最终凝固在顶部冒口,在浇注系统和顶冒口改进的基础上,浇注速度保持在 15.426 59 cm/s,将顶部冒口最大直径改为 60 mm,使活塞裙部的热节向冒口偏移,称为优化方案 2。

将改进后模型导入 AnyCasting 软件中进行模拟,充型过程温度场见图 10。相比于顶部冒口颈最大直径

为 57 mm,实现了顺序凝固,铸件内部无缩孔、缩松缺陷。可以看出,在 2.808 17 s 时,远端活塞底部温度上升至 650 ℃,改善近横浇道裙部因温度梯度较大而产生局部热节,见图 10a。充型时间为 7.623 59 s 时,充型率

达到95.02%,此时已全部充型至顶部冒口且冒口处的温度最高,远端活塞裙部的温度则降低到 530 ℃,实现从下至上的顺序凝固,消除了裙部产生的缩孔、缩松以及变形缺陷。

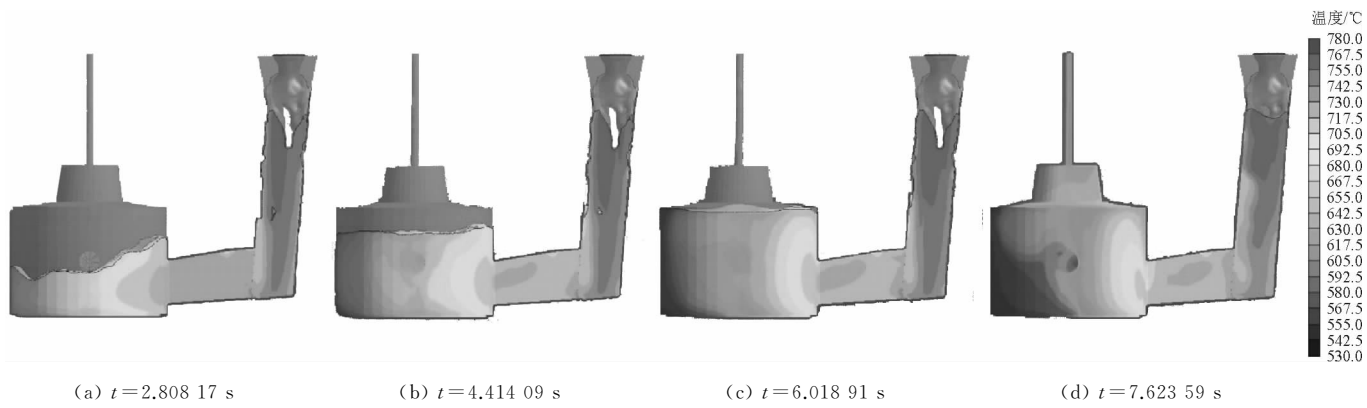


图 10 优化方案 2 合金液在充型过程中不同时刻的温度场

Fig.10 Temperature field of molten alloy during the filling process at different moments in the optimization scheme 2

选取活塞的两个典型截面 XY、XZ 进行剖视观察,见图 11。可以看出,截面 XY、XZ 发生缩孔缺陷的位置已由活塞裙部转至顶部冒口和横浇道区域,而该区域将进行加工切除,因此对铸件品质无影响。

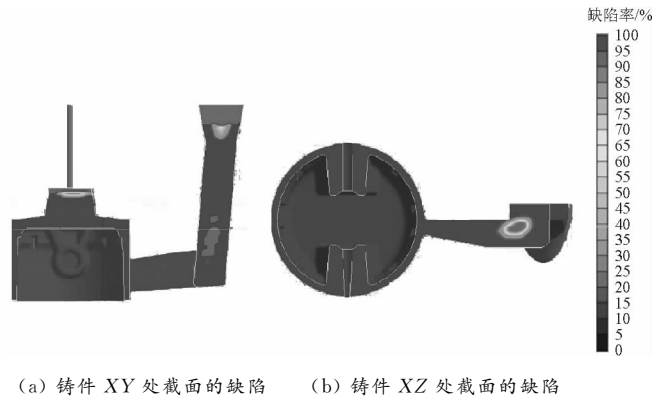


图 11 优化方案 2 铸件截面缺陷

Fig.11 Section defects of the castings in the optimization scheme 2

3.3 顶冒口的优化

为验证顶部冒口凸台尺寸的最佳尺寸,将顶部冒口颈最大直径增至 63 mm,并将浇注速度改为 15.434 38 cm/s,称为优化方案 3。将改进后模型导入 AnyCasting 软件中进行模拟,充型过程温度场分布见图 12。相比于顶部冒口颈最大直径为 60 mm,铸件仍实现了顺序凝固,但在裙部出现了缩孔、缩松缺陷。从图 12a 看出,充型时间为 2.276 78 s,远端活塞底部金属液填充较多,充型不够平稳。当充型 6.175 39 s 时(见图 12d),充型率达到 95.0%,此时金属液已全部充型至顶部冒口,且冒口处的温度最高,冒口与活塞顶部的温度约 630 ℃,而铸件靠近横浇道一侧的温度为 705 ℃。可以发现,近横浇道活塞裙部与活塞顶部的温度梯度较大,这使得裙部局部区域产生孤立熔池的可能性较大。通过截面 XY、XZ 进行概率率缺陷分布统计,见图 13。可以看出,铸件在截面 XY、XZ 出现了缩孔,缺陷的位置与

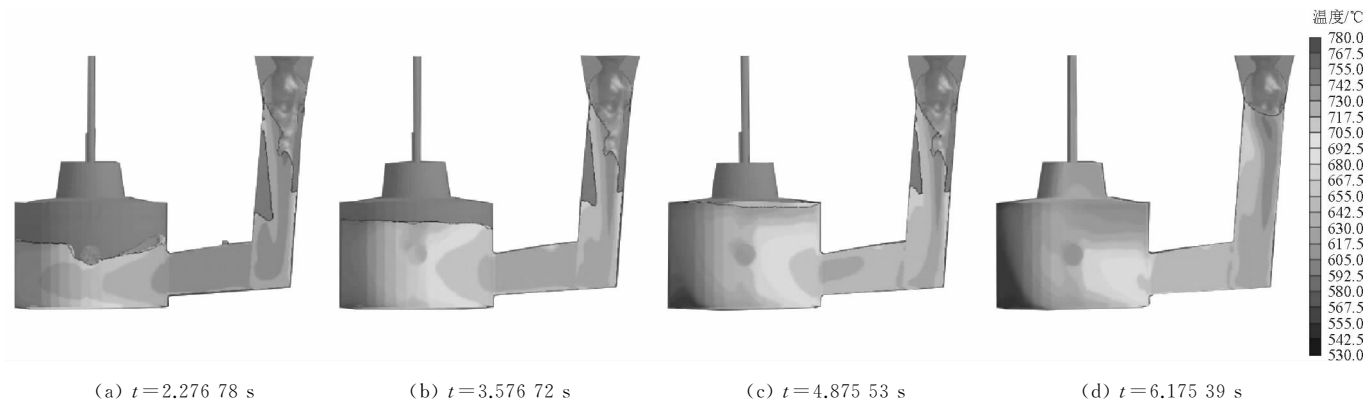


图 12 优化方案 3 合金液在充型过程中不同时刻的温度场

Fig.12 Temperature field of molten alloy during the filling process at different moments in the optimization scheme 3

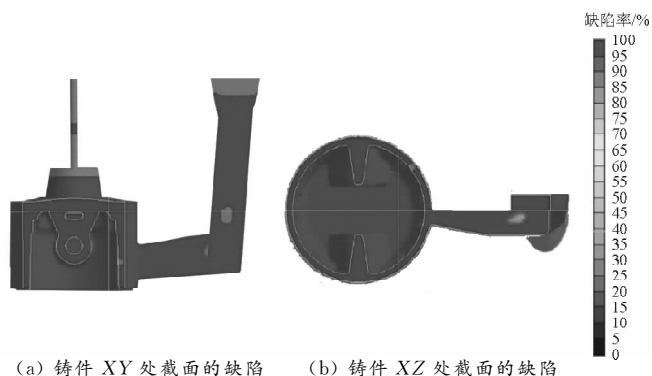


图 13 优化方案 3 铸件截面缺陷

Fig.13 Section defects of the castings in the optimization scheme 3

顶冒口颈尺寸为 57 mm 条件所产生的缺陷位置相同,均在近横浇道活塞裙部局部出现了缩孔、缩松。通过比较不同冒口颈尺寸下铸件的充型顺序、温度分布及残余熔体模数发现,当冒口颈最大直径为 57 mm 和 63 mm 时,铸件浇注过程中充型不够平稳,近横浇道活塞裙部的温度梯度较大,导致该处出现缩松、缩孔的可能性高于冒口颈尺寸为 60 mm 的。在冒口颈最大直径为 60 mm 时,铸件自下而上充型平稳,温度分布从左到右、自下而上逐渐升高,这样的温度梯度减小了近横浇道活塞裙部的温度梯度,符合铸件顺序凝固条件,保湿冒口的补缩效果和凝固质量最佳,保证了铸件品质。

综上对比分析,当模具的直浇道宽度为 12 mm,顶部冒口颈最大直径为 60 mm,浇注速度为 15.426 59 cm/s 时,AC8A 铝合金活塞铸件品质最佳。

4 结 论

(1)AC8A 铝合金活塞在金属型铸造过程中,活塞顶部和裙部易出现缩孔、缩松缺陷。横浇道的宽度为 12 mm,顶部冒口颈最大直径为 60 mm,补缩效果最佳。

(2)AC8A 铝合金浇注温度为 780 ℃、模具预热温度为 300 ℃、浇注速度为 15.426 59 cm/s 时,横浇道宽度为 11 mm,冒口直径为 60 mm,铸件内部无缩松缩孔缺陷。

参 考 文 献

- [1] 刘宇,杨志刚,宋阳.船用整体球墨铸铁活塞铸造及热处理工艺优化[J].铸造,2020,69(3):269-272.
- [2] 魏振洋.汽车轻量化技术的研究现状[J].汽车工程师,2020(11):11-12.
- [3] 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.
- [4] 李戈飞,尹志高,吕金旗.铝合金汽缸套的制造工艺研究[J].汽车工业研究,2018(12):60-63.
- [5] 杨欢庆,孙飞,王琳,等.铝合金叶轮铸造工艺优化设计[J].特种铸

造及有色合金,2014,34(6):570-573.

- [6] 张屹林,俎训龙,高学瑞,等.轿车铝活塞铸造缺陷分析及改进[J].金属加工(热加工),2013(23):68-69.
- [7] 张双槽,许广涛,周志杰,等.某铝合金铸件树脂砂型铸造工艺设计及优化[J].热加工工艺,2020,49(11):60-63.
- [8] 吴军,周兆忠,张元祥.基于 ProCAST 的铝合金活塞砂型铸造工艺分析[J].特种铸造及有色合金,2014,34(1):26-28.
- [9] 姜月明,李屹,丁旭,等.砂型铸造铝合金盖子数值模拟及工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2017,37(10):1061-1063.
- [10] 王浩,张龙,黄贞益.汽车活塞浇注系统的改进及数值模拟[J].铸造,2019,68(1):34-37.
- [11] 邢小颖,汤彬,马运,等.AnyCasting 虚拟仿真在砂型铸造中的应用及缺陷分析[J].铸造,2019,68(5):508-511.
- [12] 游寿松,张吉祥,张科峰,等.铸造 CAE 模拟分析低压铸造泵轮缩松缺陷[J].铸造,2020,69(2):183-186.
- [13] 蒲生,邢世雄.基于 AnyCasting 的叶轮铸造模拟及工艺设计优化[J].制造技术与机床,2021(11):27-31.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和科技信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

