

铸件皮下气孔的快速分析与改善方法

史继之¹, 吴少旗¹, 陈崇生¹, 张士雨¹, 杨超^{2, 3}

(1. 徐州徐工精密工业科技有限公司, 江苏徐州 221600; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240;
3. 上海交通大学内蒙古研究院, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要: 皮下气孔是球墨铸铁常见的铸造缺陷, 会破坏铸件结构连续性, 减少铸件的有效承载面积, 削弱铸件在使用过程中承受载荷的能力, 且在加工前很难用肉眼辨别出, 危害性大。本研究利用扫描电镜/X-射线能谱仪 (SEM/EDS) 分析了法兰铸件的皮下气孔形貌及气孔附近的元素分布, 结合MAGMA模流软件分析发现最先流入的低温铁液汇集于固定部位, 在铁液卷气氧化生成的气体未能在铁液凝固前及时排出, 形成皮下气孔且气孔缺陷位置相对固定。基于该分析结果, 制定了改善方法, 即把浇注起始温度由1 390 ℃提高至1 410 ℃的同时, 把封闭式浇注系统改为半开放式浇注系统, 避免了低温铁液长时间停留在固定区域。通过小批量试验及批量生产验证, 该法兰铸件的成品率由70%提升到98%以上, 皮下气孔缺陷得到了有效控制。本研究的跨学科技术融合方法为铸造缺陷的分析和控制提供了新的研究思路。

关键词: 皮下气孔; 电镜分析; 浇注温度; 浇注系统

作者简介:

史继之(1985-), 男, 学士, 工程师, 主要从事铸造产品工艺开发工作。E-mail: shijizhi111@163.com

通信作者:

杨超, 男, 博士, 助理教授。E-mail: yangchao1987@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG244.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)04-0508-07

基金项目:

内蒙古自治区上海交通大学科技合作专项“科技兴蒙”上海交通大学行动计划(2023XYJG0001-01-01); 徐工精密-上海交通大学联合攻关项目“基于人工智能技术的铸件成本优化”(SA0501495)。

收稿日期:

2024-12-02 收到初稿,
2024-12-07 收到修订稿。

球墨铸铁因其优异的力学性能和铸造性能, 在工业生产中被广泛应用^[1-2]。然而, 皮下气孔作为球墨铸铁常见的铸造缺陷之一, 严重影响了铸件的质量和性能^[3-4]。皮下气孔通常位于铸件表面下1~3 mm处, 在铸态时不易被发现, 但经热处理或机械加工后会显露出来^[5-6]。这种缺陷会破坏铸件结构的连续性, 减少有效承载面积, 并削弱铸件在使用过程中承受载荷的能力^[7-9]。因此, 对皮下气孔的形成机理和控制方法的研究具有重要的实际意义^[10]。

国内外学者对球墨铸铁皮下气孔的形成机理和防治措施进行了广泛研究^[11]。研究表明, 皮下气孔的形成与多种因素有关, 包括铁液质量、铸型因素和浇注温度等^[12]。国外研究者通过试验发现, 控制铁液中的残留铝和钛的含量是防止皮下气孔的关键^[13]。国内学者则更多关注型砂性能对皮下气孔的影响, 如型砂的水分含量和有效土含量等^[14]。此外, 通过添加稀土元素和控制浇注温度等措施也能有效地防止皮下气孔的产生^[15]。尽管已有研究取得了一定的进展, 但皮下气孔的形成机理仍然存在争议^[16], 且缺乏快速准确的分析方法来确定皮下气孔的具体原因^[17]。传统的分析方法依赖于经验判断和反复生产验证, 这不仅耗时费力, 还会导致大量废品的产生, 增加了生产成本^[18]。

本研究旨在探索使用扫描电子显微镜-能量色散光谱仪 (SEM-EDS) 来分析铸件皮下气孔的形貌及气孔附近的成分分布, 以期快速准确地确定皮下气孔的成因。这种方法的创新之处在于能够直接观察和分析气孔的微观结构和化学成分, 从而为制定针对性的解决方案提供科学依据。通过这种方法, 可以缩短缺陷改善周期, 减少废品和不良品的产生, 降低生产成本, 提高工艺的稳定性。此外, 本文还将探讨如何通过优化工艺参数和材料选择来预防皮下气孔的形成, 为球墨铸铁的生产提供更为经济和高效的解决方案。

1 试验材料与方法

本研究采用的是湿型砂工艺, 脱箱造型方法, 采用日本Sinto自动化水平线

FCMX-Ⅱ式造型机。研究对象为某型法兰类铸件产品，其轮廓尺寸如图1所示，上端直径310 mm，下端直径260 mm，高度118 mm。材质牌号为QT400-18LT，件重19.5 kg。产品对于致密度要求较高，需要UT探伤，内部缺陷要求为2级以下。

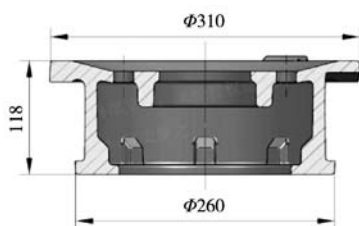


图1 某型法兰类铸件产品示意图

Fig. 1 A certain type of flange casting product schematic diagram

产品工艺方案为一型一件，为保证铸件铁液纯净，采用封闭式浇注系统，浇道比为 $\Sigma F_{直} : \Sigma F_{横} : \Sigma F_{内} = 1.5 : 1.2 : 1.0$ ，其中直浇道的截面积1 256 mm²，横浇道的截面积1 004.5 mm²，内浇道的截面积837 mm²。内腔3块圆弧冷铁，直浇道底部放置1片碳化硅过滤片，规格为50 mm × 50 mm × 22 mm（20ppi）。模重32.9 kg，工艺出品率59.3%。铸造工艺如图2所示。

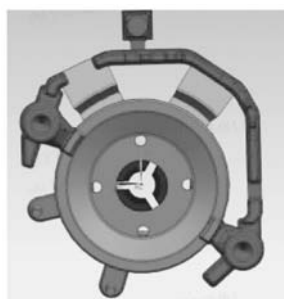


图2 某型法兰类铸件铸造工艺示意图（修改前）

Fig. 2 Schematic diagram of casting process for a certain type of flange casting (before modification)

产品浇注起始温度为1 390 ℃，浇注时间为10~12 s。为保证铁素体比例>90%，要求开箱时间大于4 h。

2 试验结果及讨论

2.1 缺陷情况

按照上述工艺生产出来的铸件，在铸件落砂，抛丸清理后，其表面并未观察到气孔类缺陷，经机械加工后，气孔位置固定于直浇道正对面法兰上下端面处（图3），气孔比表面积较大（图4）。孔径多为0.5~2 mm的针眼状或圆形，内壁光滑，单一出现或呈弥散状出现于固定区域。批次气孔报废率在11.5%~37%之间。

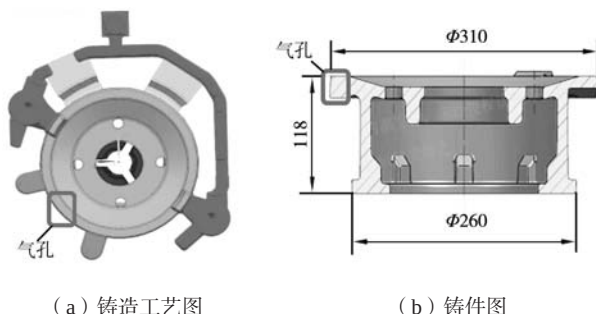


图3 气孔缺陷位置（图示方框内法兰底部）

Fig. 3 Location of porosity defects (bottom of flange in box show)

由于气孔出现比例较大，位置较为固定，且不希望反复生产来验证改善，容易造成批量的不良品及产品交付期的延误。因此决定探索使用SEM-EDS来分析气孔形貌及成分，以期可以快速判断出气孔的种类及气体来源，快速改善气孔缺陷^[19]。

2.2 检测方法

采用扫描电镜/射线能谱仪来进行缺陷分析，随机挑选有缺陷的四个铸件，每个试块随机选择一个气孔进行分析观察，试块明细如图5所示。

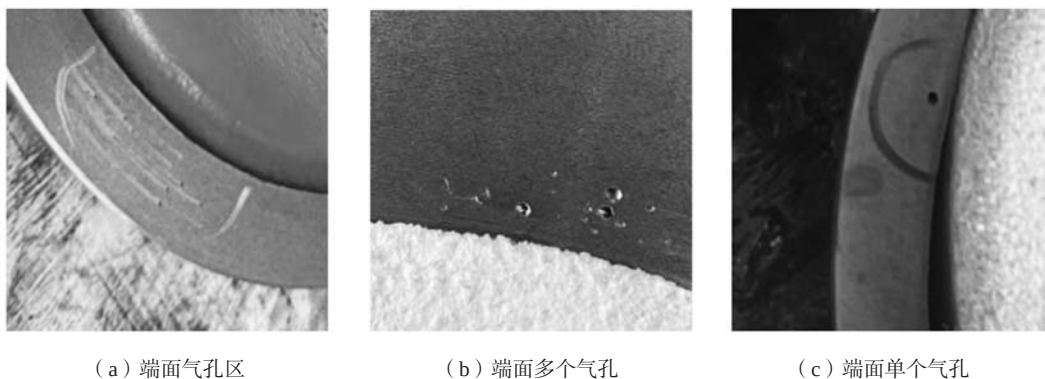


图4 气孔缺陷实物照片

Fig. 4 Physical photographs of porosity defects

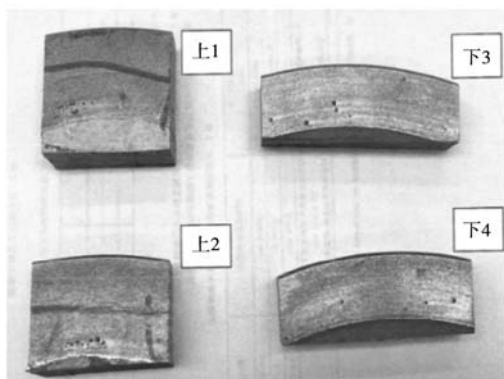


图5 试块
Fig. 5 Test block

试块的电镜图如图6所示，试块的成分分析如表1-表4所示。

2.3 结果分析及改善措施

20世纪末21世纪初，日本黑川豊、尾添伸明、太田英明等人利用扫描电镜/X-射线能谱仪对气孔缺陷的形貌及缺陷产生机理进行了观察和分析，将气孔分为物理型皮下气孔、氧化型皮下气孔、溶解型皮下气孔、渣致型皮下气孔。

其中氧化型皮下气孔形状在球形和裂隙状之间，FeO与铁液中的C反应而产生气体，其反应式为：

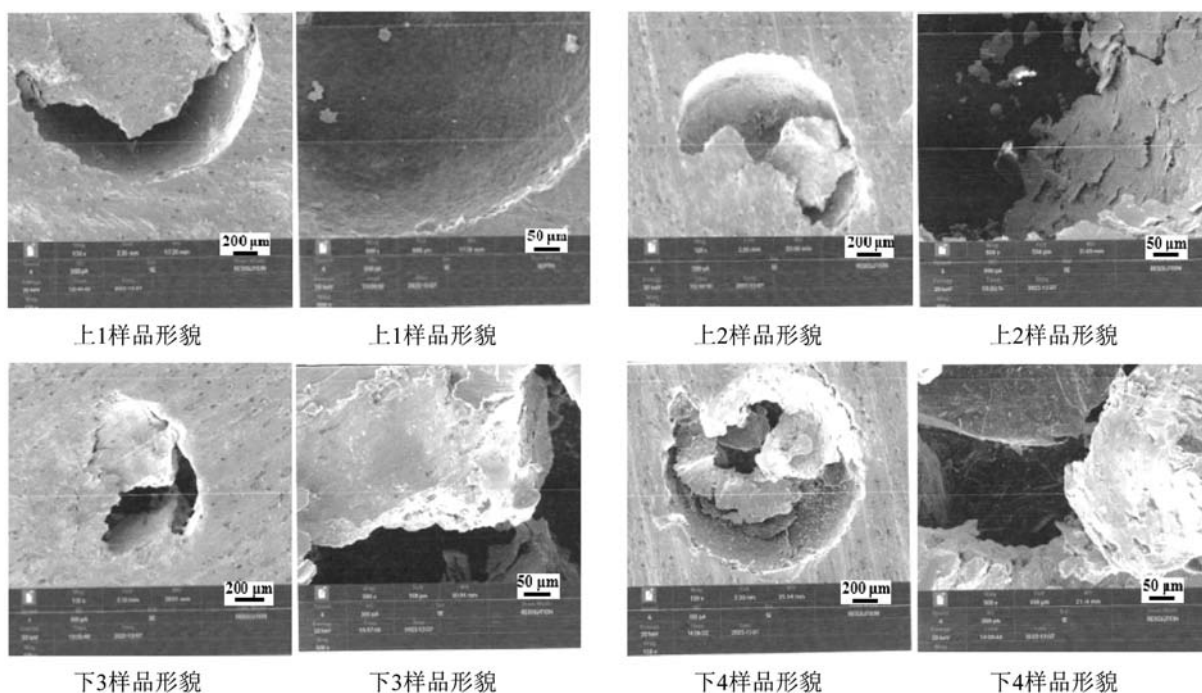


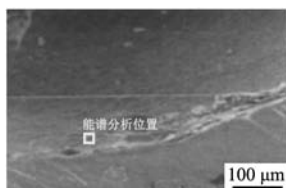
图6 电镜结果

Fig. 6 Electron microscopy analysis result

表1 试块1成分分析表

Tab. 1 Composition analysis table of test block 1

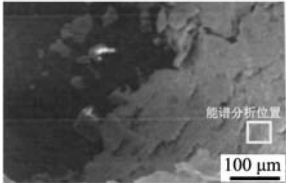
元素	归一化质量分数/%	原子分数/%
C	81.14	91.90
Fe	12.95	3.15
O	5.70	4.85
Si	0.21	0.10
总计	100.00	100.00



上1样品能谱检测位置

因此氧化型皮下气孔内部通过能谱仪分析成分多为C、O、Fe。缺陷最容易发生在首先浇入铸型的铁液最后流到的位置及最终凝固的铸件壁厚处^[20]。

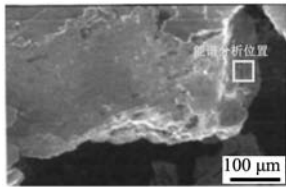
从图6电镜分析结果可见，缺陷表面较为光滑，气孔内部无夹杂物或略带夹杂物的痕迹；从表1至表4的成分分析来看，气孔表面成分主要为Fe、C和O三种元



上2样品能谱检测位置

表2 试块2成分分析表
Tab. 2 Composition analysis table of test block 2

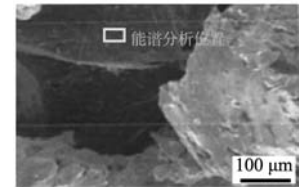
元素	归一化质量分数/%	原子分数/%
C	86.41	94.25
Fe	9.21	2.16
O	4.38	3.59
总计	100.00	100.00



下3样品能谱检测位置

表3 试块3成分分析表
Tab. 3 Composition analysis table of test block 3

元素	归一化质量分数/%	原子分数/%
Fe	67.17	31.65
C	28.09	61.54
O	3.35	5.50
Si	1.39	1.31
总计	100.00	100.00



下4样品能谱检测位置

表4 试块4成分分析表
Tab. 4 Composition analysis table of test block 4

元素	归一化质量分数/%	原子分数/%
C	96.34	97.71
O	2.37	1.81
Fe	1.29	0.28
总计	100.00	100.00

素，C含量最高，夹杂少量Si元素。由于皮下气孔有侵入型、析出型和反应型等多种类型，除与浇注系统和浇注温度有关外，还与型砂、铁液化学成分与含气量等有关。为进一步确定皮下气孔的类型，使用炉前成分分析仪对铁液的化学成分（表5）和O、N和H含量

（表6）进行分析。可以发现炉前原铁液中的O、N和H的含量符合纯净铁液的要求（纯净原铁液的气体含量目标值为 $[O]<40\times10^{-6}$ ， $[H]<2.5\times10^{-6}$ ， $[N]<130\times10^{-6}$ ），排除析出型气孔的可能。同时对比改善后的铁液O、N和H含量，无明显变化，工艺改善后的气孔改善与铁

表5 铁液的化学成分
Tab. 5 Chemical composition of molten iron

材质牌号	项目	C	Si	Mn	P	S	Mg
QT400-18（A）L	原铁液	3.80 ± 0.1	1.25 ± 0.1	≤0.20	≤0.035	≤0.015	
	终铁液	3.6 ± 0.1	2.25 ± 0.1	≤0.20	≤0.035	≤0.012	0.048 ± 0.01

表6 改善前后铁液中的O、N和H含量
Tab. 6 Contents of O, N, H in molten iron before/after optimization

元素含量	改善前			改善后		
	1	2	3	1	2	3
$[O]\times10^{-6}$	25	24	30	25	28	30
$[N]\times10^{-6}$	95	90	88	95	85	88
$[H]\times10^{-6}$	1.3	1.5	1.2	1.3	1.2	1.2

液中的O、N和H含量无关。通过综合分析，此气孔无论是形态还是成分均符合氧化型皮下气孔的特征。因此制定如下对策。一是提高浇注温度，使得卷入的气体有更多的析出时间；二是修改浇注系统形式，改为半开放式浇注系统，加大内浇道截面积。截面比例 $\Sigma F_{直}:\Sigma F_{横}:\Sigma F_{内}=1.25:1.0:1.5$ ，其中直浇道的截面积1 256 mm²，横浇道的截面积1 004.5 mm²，内浇道的截面积1 508 mm²。修改横浇道搭接形式，横浇道由

原来的直连方式改为断开（图7）。迫使铁液优先通过内浇道底注进入铸件，铸件充满后再通过两侧冒口，既保证了铁液充型平稳又保证了热冒口的补缩温度。

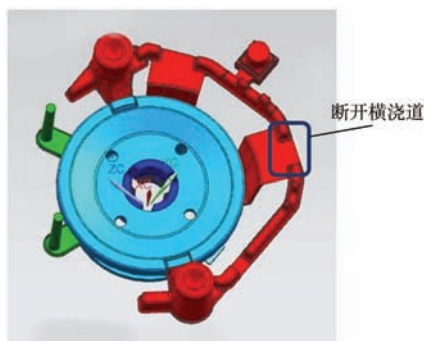


图7 某型法兰类铸件铸造工艺图（修改后）

Fig. 7 Schematic diagram of casting process for a certain type of flange casting (after modification)

对修改前后的工艺方案进行模拟，修改前的铸件在浇注时，固定位置存在低温铁液，且为通过两侧冒口首先进入铸型的铁液。此部分铁液在浇注时产生紊流，卷气后进入固定区域，且无后续铁液跟随，极易产生卷入型氧化气孔^[21]（图8）。

修改后的铸件在浇注时，由于内浇道加大，进入流道的铁液优先向下进入底部内浇道，顶部两侧冒口并没有铁液进入，在铸件液面上升到一定高度后，才开始有铁液进入，且非低温铁液，无紊流（图9）。

2.4 试验验证结果

根据分析判断的缺陷类型，按照制定的措施进行试制。修改前起始浇注温度1 390 ℃，浇注时间8~10 s；修改后起始浇注温度1 410 ℃，浇注时间7~9 s。用修改后工艺试生产，浇注82件进行试加工，未发现气孔缺陷。后续固化此工艺生产9批次，废品率最高2.07%，可以达到稳定生产的目标。具体废品情况见图10。

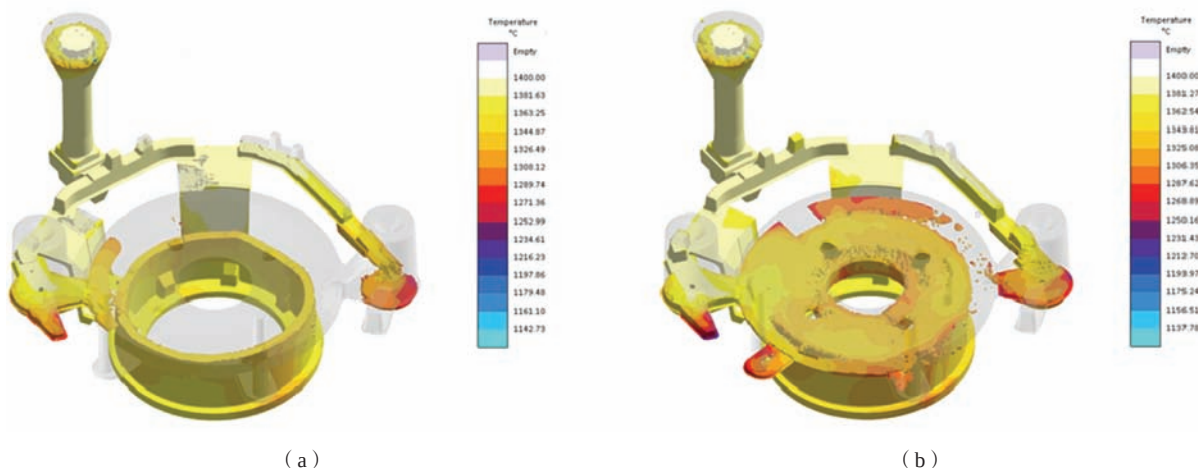


图8 修改前铸造工艺模流图

Fig. 8 Casting process simulation diagram before modification

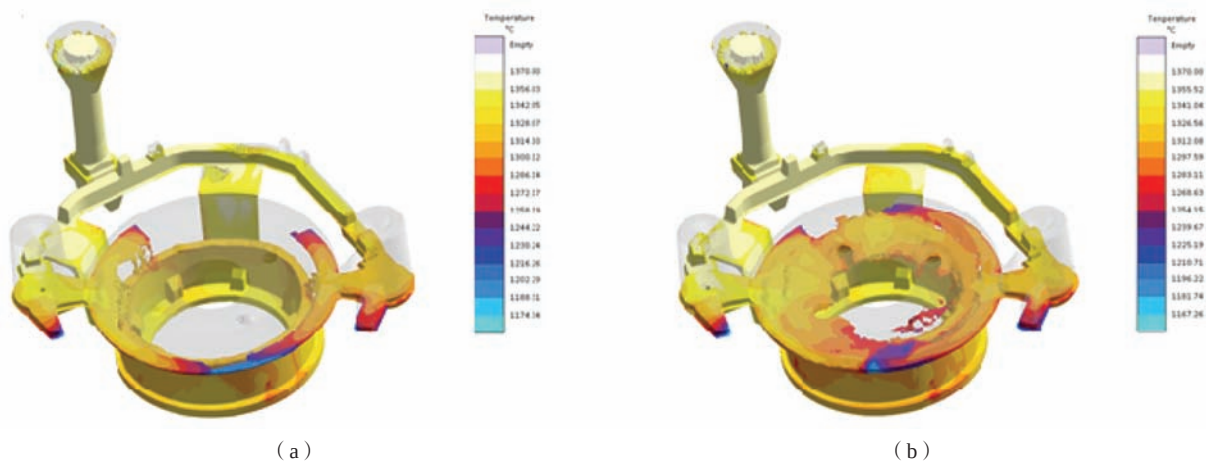


图9 修改后铸造工艺模流图

Fig. 9 Casting process simulation diagram after modification

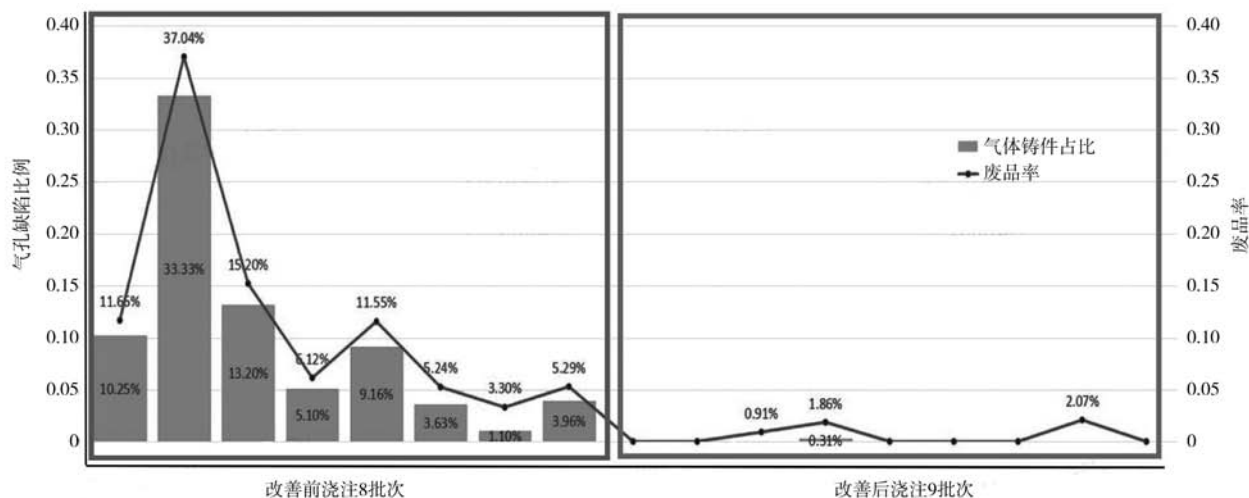


图10 改善前后的废品情况

Fig. 10 Scrap before and after improvement

3 结束语

(1) 把浇注起始温度由1 390 ℃提高至1 410 ℃, 减少浇注时间可以降低氧化型皮下气孔的比例。

(2) 使用SEM/EDS可以观察气孔外观, 分析气孔成分, 有助于快速判断气孔类别, 可以缩短缺陷改善周期, 为解决气孔缺陷提供可靠支撑。

(3) 把封闭式浇注系统改为半开放式浇注系统, 调节铁液充型顺序可以有效消除皮下气孔缺陷。

(4) 通过提高浇注起始温度和改善浇注系统, 经小批量试验及批量生产验证, 法兰铸件的成品率由70%提升到98%以上, 皮下气孔缺陷得到了有效控制。

参考文献:

- [1] 史东丽, 潘多龙, 高建国, 等. 基于数值模拟的高硅钼球墨铸铁排气歧管基体组织及性能预测 [J]. 铸造, 2019, 68 (12): 1362-1367.
- [2] 马艳东, 李松杰, 杨林, 等. 发动机缸套用球墨铸铁的组织与铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1505-1510.
- [3] 吕培楷, 林有希, 齐先军. 球墨铸铁消失模铸造涂料的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39 (4): 407-411.
- [4] 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 (3): 229-232.
- [5] 张立权. 湿型煤粉砂生产球墨铸铁件皮下气孔的产生与预防 [J]. 金属加工: 热加工, 2007 (11): 68-69.
- [6] 刘必荣. 小型柴油机曲轴表面缺陷磁粉探伤 [J]. 表面技术, 2004, 33 (3): 67-68.
- [7] 许少红. 奥氏体球墨铸铁轴类铸件的铸造工艺 [J]. 现代铸铁, 2011, 31 (5): 26-29.
- [8] 陈庚, 孙莹, 李崇斌, 等. 高镍奥氏体球墨铸铁支撑的材质及铸造工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (3): 51-54.
- [9] 孙振国, 王话, 康文, 等. 217吨吊钩上下模铸造工艺的研究 [J]. 铸造, 2013, 62 (1): 71-72.
- [10] 周亘, 刘婉华. 球铁件皮下气孔产生原因及防止方法 [J]. 现代铸铁, 2008, 28 (5): 15-25.
- [11] 李卫忠, 张伟, 胡自群. 高镍壳类产品皮下气孔的产生原因及解决措施 [J]. 铸造, 2021, 70 (1): 109-112.
- [12] 任现伟. 铸铁件气孔缺陷的原因分析与防止措施 [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (4): 51-55.
- [13] LI C, ZHANG M, YU M, et al. Experimental study on the performance of composite gradient reinforced cladding layer of ductile iron IN625/Co12 [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023: 1-11.
- [14] 万晓民, 齐浩, 苏培强, 等. 制动卡钳铸件皮下气孔缺陷的防止 [J]. 现代铸铁, 2016, 36 (1): 69-73.

- [15] 蒋云峰, 张香杰, 刘通. 提高浇注温度解决球墨铸铁皮下气孔问题 [J]. 铸造技术, 2004, 25 (6): 458-458.
- [16] 赵书城. 对球铁皮下气孔缺陷的认识 [J]. 现代铸铁, 2003 (2): 41-43.
- [17] 徐建林, 苏义祥, 路阳, 等. 球墨铸铁件常见缺陷的分析与对策 [J]. 铸造, 2001, 50 (4): 225-228.
- [18] 史晓阳, 王涛, 张飞场, 等. 某型缸盖皮下气孔的成因分析及解决措施 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (23): 156-158.
- [19] 连立建, 代正伟, 李强. 电镜分析在解决铸件夹渣缺陷上的有效应用 [J]. 现代铸铁, 2021, 41 (5): 23-26.
- [20] 金仲信. 用SEM/EDS观察和分析铸铁件皮下气孔 [J]. 现代铸铁, 2012, 32 (6): 79-81.
- [21] 王明娜, 董秀奇, 朱丽娟. 卷入性气孔的形成原因及预防 [J]. 铸造, 2014, 63 (3): 286-289.

Rapid Analysis and Improvement Methods for Subsurface Blowhole in Castings

SHI Ji-zhi¹, WU Shao-qi¹, CHEN Chong-sheng¹, ZHANG Shi-yu¹, YANG Chao^{2,3}

(1. XCMG Precision Industry Technology Co., Ltd., Xuzhou 221600, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Inner Mongolia Research Institute, Shanghai Jiao Tong University, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract:

Subsurface blowhole is a common casting defect in ductile iron, which can disrupt the continuity of the casting structure, reduce the effective load-bearing area of the casting, and weaken the ability of castings to withstand loads during application. Moreover, these defects are difficult to identify with the naked eye before machining, posing a significant risk. In this study, scanning electron microscopy/energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM/EDS) was utilized to analyze the morphology of subsurface blowholes and the elemental distribution near the blowholes in flange castings. Combined with MAGMA flow simulation software analysis, it was found that the first inflow of low-temperature iron liquid accumulates in a fixed area, and the gas generated by the entrainment and oxidation of the iron liquid fails to be expelled in time before the iron liquid solidifies, leading to the formation of subsurface blowholes with relatively fixed defect locations. Based on this analysis, an improvement method is developed, which involves increasing the pouring starting temperature from 1 390 °C to 1 410 °C and changing the closed pouring system to a semi-open pouring system, thus avoiding the prolonged stay of low-temperature iron liquid in a fixed area. Through pilot trials and mass production verification, the yield rate of the flange castings is increased from 70% to over 98%, effectively controlling the subsurface blowhole defects. The interdisciplinary technical integration approach of this study may shed light on the analysis and control of casting defects.

Key words:

subsurface blowhole; electron microscope analysis; pouring temperature; pouring system
