

# 水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷形成原因分析

王爽<sup>1,2</sup> 郑万<sup>1,2</sup> 季军<sup>3</sup> 黄翱<sup>3</sup> 冯荣<sup>1,2</sup> 李永杰<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081; 2. 武汉科技大学钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3. 黄石新兴管业有限公司, 黄石 435100)

**摘要** 为探究水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷形成原因, 分析了空气湿度及管模裂纹对铸管气孔缺陷发生率的影响。采用 SEM 和 EDS 表征了气孔表面形貌及元素分布, 结合模拟计算了铸管外表面凝固时间及气泡上浮临界尺寸。结果表明, 雨季气孔缺陷废管比例为 0.68%, 为其他时段的两倍左右。铸管承口、插口部位 1.5 m 内气孔发生率比铸管中间部位高了 20%~40%。研究管模修复工艺发现, 承插口部位管模龟裂严重, 管模裂纹内气体在高温铁水的作用下受热膨胀, 形成气泡侵入铁水, 同时铁水中 CO、H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等气体向裂纹中气泡扩散, 促进其增长, 形成侵入型气孔。模拟结果表明, DN150 铸管外表面凝固时间约为 0.3 s, 当铁水润湿角为 90°~180° 时, 气泡脱离管模裂纹临界直径为 1.4~2.8 mm。在 0.3 s 内, 若管模裂纹内气泡超过临界直径, 则气泡不会被铸管外表面捕获形成表面气孔; 反之, 则滞留在铸管外表面, 形成气孔缺陷。

**关键词** 水冷离心球墨铸铁管; 管模裂纹; 侵入型气孔; 气泡上浮

中图分类号 TG249.4; TG143

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240178

## Formation Analysis of Porosity Defects in Water-cooled Centrifugal Ductile Iron Pipe

WANG Shuang<sup>1,2</sup>, ZHENG Wan<sup>1,2</sup>, JI Jun<sup>3</sup>, HUANG Ao<sup>3</sup>, FENG Rong<sup>1,2</sup>, LI Yongjie<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for New Process of Ironmaking and Steelmaking, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3. Huangshi Xinxing Pipes Co., Ltd., Huangshi 435100)

**Abstract:** In order to investigate the formation of porosity defects in water-cooled centrifugal ductile iron pipe, the influence of air humidity and pipe mold cracks on the incidence of porosity defects in cast pipes was statistically analyzed. The surface morphology and element distribution of porosity were characterized by SEM and EDS, and time to solidus of outer surface and critical uplift size of bubble were calculated combined with simulation. The results indicate that the percentage of waste pipe with porosity defects in the rainy season is 0.68%, which is about twice as much as that in other periods. The incidence of porosity within 1.5 m to socket part in cast pipe is 20%~40% higher than that of the middle part. According to the pipe mold repair process, pipe mold at the socket is cracked seriously, and the gas in the crack of mold suffers thermal expansion under the action of high-temperature ferrofluid, leading to bubbles and invading the ferrofluid. Meanwhile, CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> in the ferrofluid are diffused to the bubble in the crack to promote growth, resulting in the formation of invasive pores. Simulation calculations reveal that time to solidus of outer surface of DN150 cast pipe is about 0.3 s, and the critical diameter of bubble desorbing from the crack of pipe mold is 1.4~2.8 mm. When the wetting angle of molten iron is 90° to 180°. Within 0.3 s, bubbles in the crack whose size exceeds the critical diameter will not be captured by outer surface of cast pipe to avoid formation of surface porosity. On the contrary, it will be retained in the outer surface of cast pipe to form the porosity defects.

**Key Words:** Water-cooled Centrifugal Ductile Iron Pipes, Pipe Mold Crack, Invasive Pores, Bubble Uplift

近年来,随着中国城镇化建设的快速推进,市政供水、供气管网建设与完善对安全可靠的管材需求日益

增大。离心球墨铸铁管具有强度高、耐压抗振、耐腐蚀、使用寿命长、施工安装方便、性价比高等特点,在供

收稿日期: 2024-04-26; 修订日期: 2024-08-13

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)资助项目(2023BEB027)

第一作者简介: 王爽, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, E-mail: 1409522334@qq.com

通信作者: 郑万, 男, 1965 年出生, 教授, E-mail: zhengwan@wust.edu.cn

引用格式: 王爽, 郑万, 季军, 等. 水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷形成原因分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(7): 1 073-1 080.

WANG S, ZHENG W, JI J, et al. Formation analysis of porosity defects in water-cooled centrifugal ductile iron pipe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(7): 1 073-1 080.

水和输气用压力管道中得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。但水冷离心球墨铸铁管表面容易出现重皮、气孔、夹渣、渗漏、破裂等缺陷,其中,气孔缺陷占40%以上,是造成铸管废品的主要原因<sup>[3]</sup>,不仅影响铸管表面品质,减小铸管的有效壁厚,而且水压试验中导致渗漏缺陷,甚至出现爆管现象<sup>[4-6]</sup>。

水冷离心球墨铸铁管气孔缺陷的形成受到多种因素的影响,包括铁水成分、管模内油污、模粉中的水分以及管模龟裂等<sup>[7-10]</sup>。在铁水熔炼升温、调质(成分调整)过程中,潮湿的废钢(油脂、铁锈)以及合金可能引入气体或者导致O含量升高,造成碳氧反应生成气体;浇注过程中的铁水二次氧化产生大量碳氢化合物,进而形成气孔;模粉、压缩空气中的水分遇到高温铁水发生反应生成FeO和[H],而FeO和碳反应生成CO气体,管模内腔龟裂的裂纹内积聚大量气体,在浇注过程中形成侵入气孔;同时管模油污铁锈与高温铁水接触后产生气体。这些过程均增加了气孔形成的可能性。

李远才等<sup>[11]</sup>研究了水冷离心球墨铸铁管承口处气孔缺陷,发现来自树脂粘结剂中的 $N_2$ 、 $H_2$ 等是导致针孔的主要气体,氧化夹杂物作为气泡形核的核心,并使之生长,形成气孔缺陷。当铸型中水分含量较高时,高温铁水与水分发生反应,导致铁水中氧化物熔渣增多,其与C反应生成CO气体,同时反应产生的 $H_2$ 向CO气泡中扩散,凝固过程中形成CO皮下气孔<sup>[12-13]</sup>。此外,球铁水中气泡以高熔点的MgO等非金属夹杂物为核心长大,在长大过程中粘附更多夹杂物,在离心作用下迁移至铁水表层氧化膜下形成皮下气孔<sup>[14-15]</sup>,刘荣等<sup>[16]</sup>发现皮下气孔基底上存在大量的Mg、Si元素。可见,减少气泡形核核心和促进气泡逃逸也是减少气孔缺陷的有效手段。孙少东等<sup>[17]</sup>研究了球墨铸铁中气体逃逸的影响因素,发现铁水中残Mg含量较高时,铁水表面MgO的含量升高,形成氧化膜层,同时铁水黏度增大,严重阻碍气泡逸出,后续气泡被迫滞留在氧化膜层下形成皮下气孔。韩少丽等<sup>[18]</sup>采用ProCAST软件对K4169合金的离心铸造工艺进行了模拟研究,通过分析浇注速度、铸型转速、浇注温度及铸型温度对离心铸管充型及凝固行为的影响,获得了K4169合金离心铸管最佳制备工艺参数。大量研究针对球墨铸铁中气孔来源、气泡形核以及气泡运动进行研究分析,但针对气候、管模裂纹对离心铸造下球墨铸铁管气孔缺陷影响的深入报道相对较少。

本研究统计分析了气候及管模裂纹对铸管气孔缺陷发生率的影响,并对球墨铸铁管气孔缺陷取样,对其

表面形貌成分进行了表征分析。同时,结合模拟计算铸管外表面凝固时间以及气泡上浮临界尺寸,探讨了管模裂纹导致铸管外表面气孔缺陷的形成机制,旨在为降低铸管气孔缺陷发生率提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 空气湿度对铸管气孔废品率影响的统计分析

铸管气孔缺陷与空气湿度存在关联。为探究气候因素对气孔缺陷的影响,基于某公司2022年气孔废品记录,详细统计了每月水冷球墨铸铁管因气孔缺陷导致的废管占总废管的比例。

### 1.2 管模裂纹对气孔缺陷影响的分布统计

离心球墨铸铁管生产工艺较复杂,水冷管模的激冷激热导致管模裂纹严重。本研究将铸管划分为4个区域。距承口0~1.5 m为1号位,距承口1.5~3.0 m为2号位,距承口3.0~4.5 m为3号位,距承口4.5~6.0 m为4号位,通过统计气孔在铸管轴向上的分布,分析管模裂纹对气孔缺陷影响。

现场可以观察铸管气孔缺陷的工序点为离心浇注拔管后、退火后的铸管外观检查以及沥青喷涂后的铸管漆膜检测。在以上工序,跟班观察、记录了5个班次生产的气孔废管的缺陷分布部位,并进行了统计分析。

### 1.3 气孔缺陷的微观特征观察

试验材料来自某公司采用水浸式离心机生产的DN150水冷离心球墨铸铁管。图1为气孔缺陷在铸管上的位置以及形貌。为避免高温退火影响气孔表面特征的分析<sup>[19]</sup>,气孔缺陷试样取自退火前铸管距插口1 m内位置,见图1a。由图1b可知,气孔在铸管周向上弥散分布,气孔平均直径为2~4 mm,深度为1~3 mm。

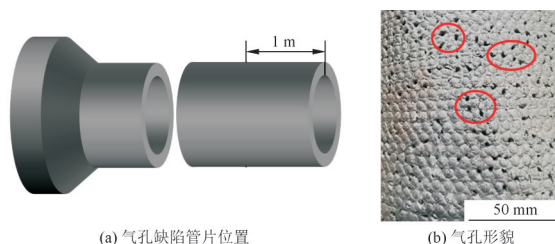


图1 气孔缺陷在铸管上的位置以及形貌

Fig.1 Position and morphology of pore defects on ductile iron pipes

图2为气孔缺陷制样示意图。采用线切割机将气孔缺陷管片沿气孔中心切割成10 mm×10 mm×10 mm的试样,见图2a,使气孔内部暴露,得到气孔纵截面,见

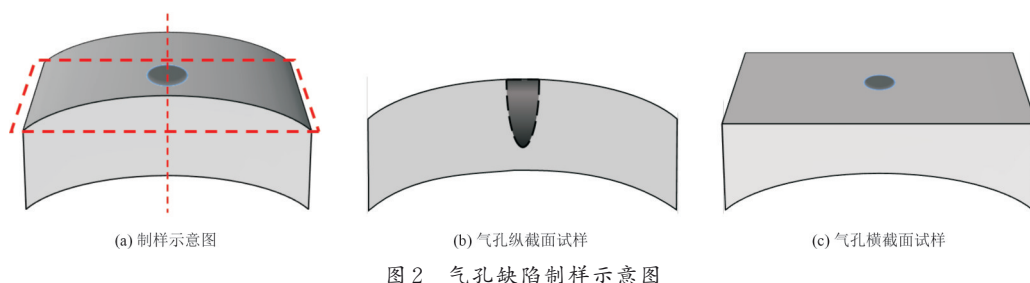


Fig.2 Schematic diagram of preparation for porosity defects

图2b;按照图2a采用线切割机将气孔缺陷管片切割成 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的试样,使气孔保持在试样中心,用粗砂纸将试样弧形面打磨平整、镶嵌,得到气孔横截面,见图2c。

将气孔纵截面、横截面在砂纸上打磨,去除截面污渍,放入无水乙醇中用超声波清洗仪(KQ-50型)清洗、吹干后,保存在含有干燥剂的真空器皿中。利用Nova400Nano型场发射扫描电镜(SEM)、Le350PentaFETx-3型能谱分析仪(EDS)分别观察气孔缺陷形貌,检测其元素分布,分析气孔缺陷形成的原因。

#### 1.4 铸管外表面凝固速度模拟计算

以外径为 $162\text{ mm}$ ,内径为 $150\text{ mm}$ ,长度为 $500\text{ mm}$ 的DN150水冷离心球墨铸铁管插口部位为模拟研究对象,采用ProCAST软件进行卧式离心铸造凝固过程模拟。管模尺寸:外径为 $208\text{ mm}$ ,内径为 $168\text{ mm}$ ,长度为 $500\text{ mm}$ ,材质为21CrMo10模具钢。根据DN150铸管的制备工艺,设定浇口直径为 $60\text{ mm}$ ,管模转速为 $750\text{ r/min}$ 。按照ProCAST软件模拟的相关参数设定原则,确定离心铸管与管模之间的传热系数为 $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,铸管内表面与空气接触,环境温度为室温( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),设置铸管表面为空冷,传热系数为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。管模外表面冷却方式为水冷,根据许国方等<sup>[20]</sup>对水冷离心铸管管模与冷却水的传热系数的计算方法,DN150管模外表面与冷却水的传热系数确定为 $8\,661\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。进入管模中的铁水在管模的带动下贴内壁运动,并在管模水冷的快速凝固条件下凝固成铸管。离心铸造网格为四面体网格,网格总数为 $3\,505\,718$ 个。假设铸管充型过程瞬间完成,模拟研究铸管外表面凝固行为(固相率增长),以分析铸管外表面气孔被捕获或者逃逸的可能性。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 空气湿度对气孔缺陷发生率的影响

图3为2022年1~12月期间生产的气孔废管比例。可以看出,4~8月平均气孔缺陷废管比例为 $0.68\%$ ,其

他月份气孔缺陷废管平均比例为 $0.36\%$ ,4~8月平均气孔缺陷废管比例比其他月份提高近 $100\%$ 。结合当年当地降水量数据分析,4~8月降水量较多,空气湿度较大。因此,可以推断空气湿度增大明显提高了铸管气孔缺陷的发生率。

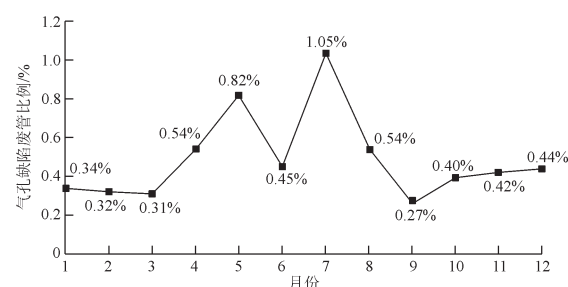


图3 2022年月度气孔缺陷废管比例

Fig.3 Monthly percentage of waste tubes with pore defects in 2022

### 2.2 管模龟裂对铸管气孔发生率的影响

图4为现场统计54根铸管的气孔缺陷分布情况。按照缺陷发生率的计算公式(发生率=该区域气孔缺陷支数÷气孔缺陷总支数 $\times 100\%$ ),气孔在1、2、3、4号位发生率分别为 $83.33\%$ 、 $48.15\%$ 、 $42.59\%$ 和 $66.67\%$ 。气孔缺陷主要分布在承口部位(1号),其次是插口部位(4号),铸管中间部位(2号、3号)气孔较少。在管身轴向不同部位气孔发生率有明显的差异,承口、插口部位的气孔发生率比中间部位高了 $20\%\sim 40\%$ 。

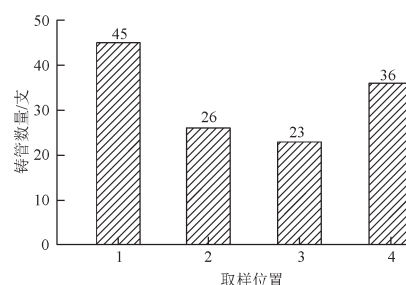


图4 铸管轴向气孔缺陷分布统计

Fig.4 Statistics of axial pore defect distribution in cast pipes

进一步调查发现,更换的管模在承口和插口位置龟裂严重,见图5。由图5a可见,铸管内表面龟裂严重,主要为环状裂纹,对管模龟裂部分放大可以发现,裂纹

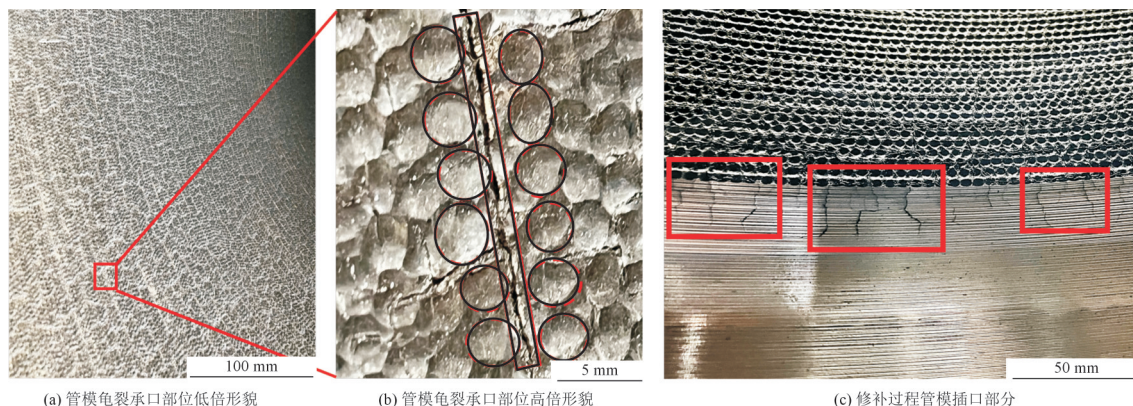


图5 管模承口与插口裂纹形貌

Fig.5 Morphologies of crack in the socket of pipe mold

较深,位置在两行打点凹坑之间。图5c为修复管模插口过程中对插口龟裂位置进行车削,可见裂纹较长较深。现场实施的管模修复工艺也规定:针对承口0~1 m和插口0~1 m两个范围进行修补,可见管模内表面质量较差,与承口、插口部位气孔发生率高具有较好的对应关系,但修复规定是基于修复工艺、成本等考虑制定的,从图5c车削与未车削之间还存在明显的裂纹,推测往轴向更深的位置可能还有程度较轻的裂纹存在,造成铸管中间部位的气孔。

### 2.3 气孔缺陷形貌及内表面元素分布特征分析

图6为气孔纵截面形貌及元素面分布。可以发现,气孔表面与基体颜色有明显差异,左侧深灰色为气孔内表面,内表面较粗糙,黑色球状物为石墨,右侧浅灰色为铸管基体。由图6d~图6f可以发现,气孔表面区域存在C、O、Fe元素富集,其中O主要分布在气孔表面,在铸管基体分布极少,C在气孔表面呈局部集中的零星分布,Fe、O存在一个重叠区,表明此处形成含Fe的氧化物,同时还有少量Si元素富集。

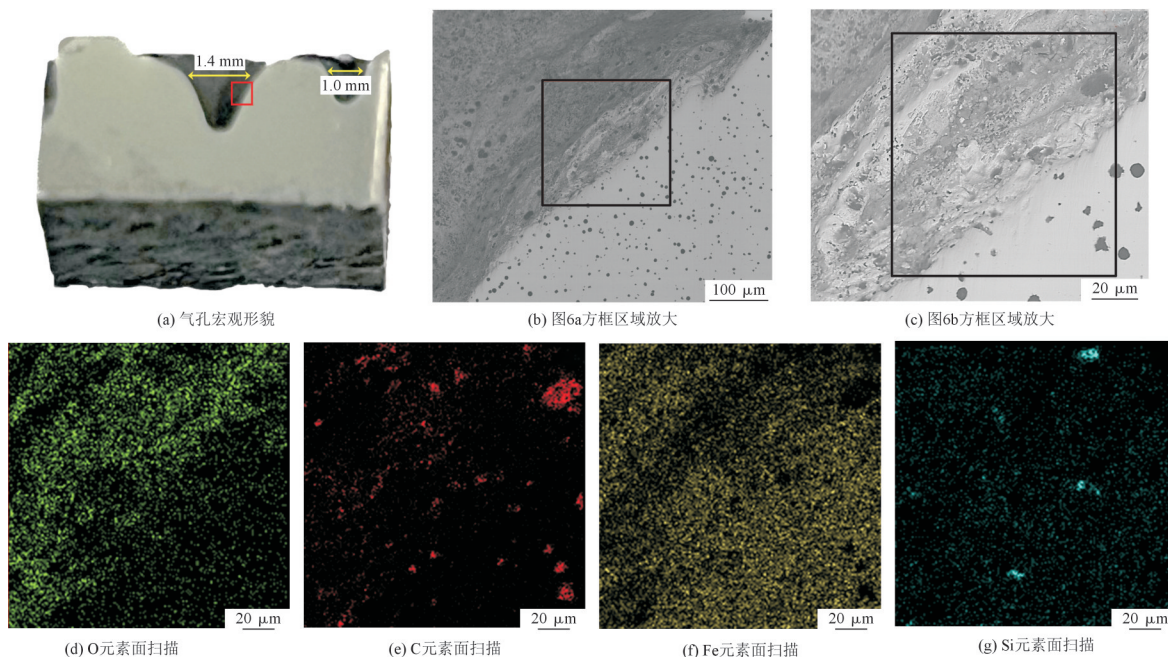


图6 气孔剖面形貌及元素面扫描图

Fig.6 Profile morphology and elemental surface scanning of pores

图7为气孔内壁形貌及元素面扫描能谱图。由图7a可见,气孔横截面上有两个气孔,直径分别为0.70 mm与0.95 mm。对右侧较大气孔进行观察,气孔表面与基体分界线近圆形,见图7b。气孔表面石墨颗粒尺寸较大,呈零星分布。根据图7d~图7g面扫描能谱图,发现

气孔表面富集了O、Mg、C和Si元素,O、Mg元素在气孔内表面密集分布,其含量明显高于铸管基体,气孔表面的C、Si元素弥散分布,其含量也高于铸管本体的。气孔内O、C、Si和Mg元素相互重叠,因此可以推测,气孔内壁存在SiO<sub>2</sub>和MgO等夹杂物。

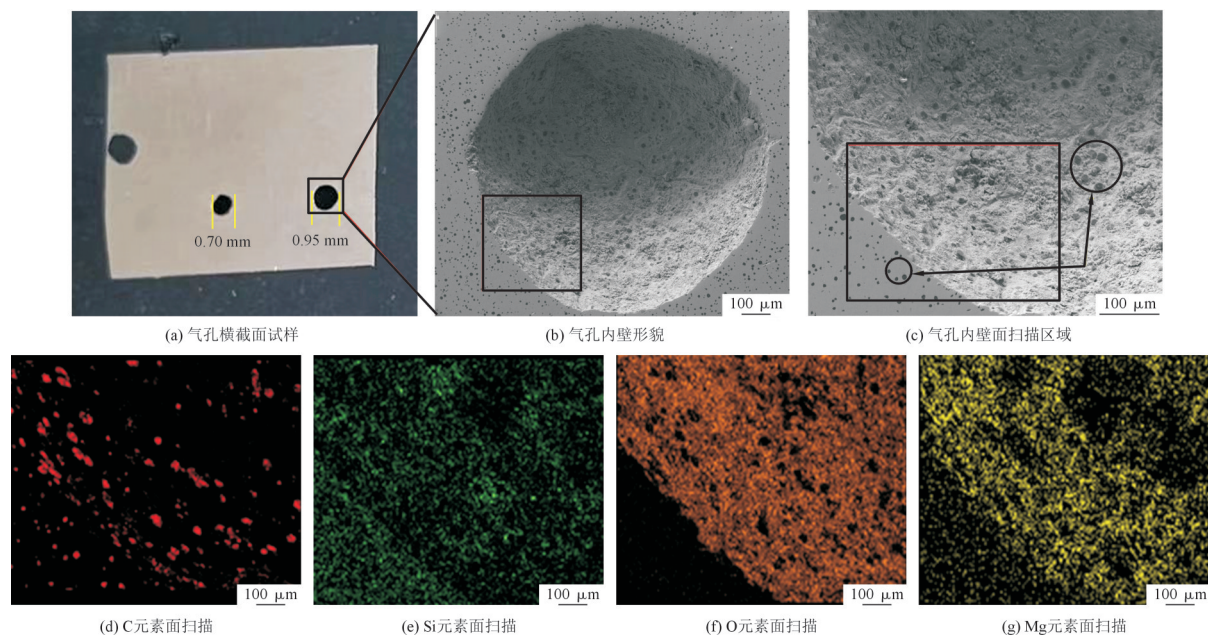


图7 气孔内壁形貌及元素面扫描图

Fig.7 Inner wall morphologies and element surface scanning of pores

2.4 铸管外表面凝固行为数值模拟结果

表1为球墨铸铁的化学成分。将球墨铸铁成分代入ProCAST热力学数据计算公式,可计算得到球墨铸铁液相线温度为1 168 ℃,固相线温度为1 053 ℃。

图8为DN150铸管外表面温度、固相率与时间的

关系。由图8a可以看出,当铁水接触到管模时,铁水温度迅速下降,从浇注温度1 350 ℃降至液相线温度1 168 ℃仅需要0.2 s。随着铸管温度进一步下降,铸管外表面固相率急剧升高,迅速达到90%,凝固完成仅0.3 s,而固相率从90%提高到100%,消耗时间为3 s左右。因此DN150铸管外表面基本凝固时间为0.3 s。

表1 球墨铸铁的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ductile iron

| $w_B$   |         |      |       |        |             |       |       |      |    |  |
|---------|---------|------|-------|--------|-------------|-------|-------|------|----|--|
| C       | Si      | Mn   | P     | S      | Mg          | Cr    | Cu    | Ti   | Fe |  |
| 3.4~4.0 | 1.8~2.2 | ≤0.4 | ≤0.08 | ≤0.015 | 0.045~0.065 | ≤0.05 | ≤0.04 | ≤0.1 | 余量 |  |

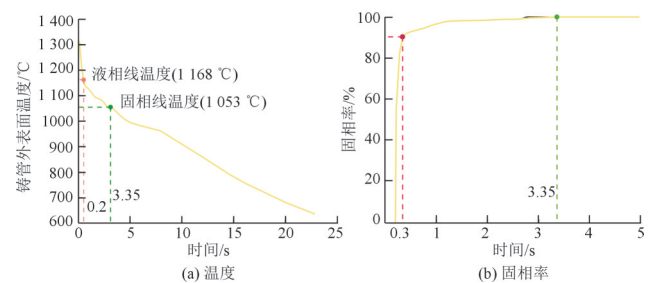


图8 DN150铸管外表面温度、固相率与时间的关系

Fig.8 Relationship between outer surface temperature or solid fraction of DN150 cast pipe with time

3 铸管气孔缺陷形成机制

3.1 雨季气孔缺陷发生率升高原因

当空气潮湿时,模粉、孕育剂等水分相应增加。水分遇到高温铁水发生反应,导致铁水中O含量、H含量增加,产生CO气体<sup>[12-13]</sup>。浇注过程中,CO气体与铁水中的氢向管模裂纹中的气泡扩散,使其长大。模粉出

厂要求水分含量<0.5%,现场模粉与孕育剂堆放在厂房内,容易受雨天影响而受潮。此外,浇注过程中模粉与孕育剂采用压缩空气输送,雨季空气湿度大,提高了气孔缺陷发生率。因此,降低孕育剂、模粉中水分能减少气孔缺陷发生。

3.2 管模裂纹对气孔缺陷的影响

离心浇注过程中,在高温铁水作用下,管模裂纹中的气体受热膨胀,气体压力迅速增大。气体侵入铁水内,需满足公式:

$$P_{气} > P_{离} + P_{阻} + P_{内} \quad (1)$$

式中, $P_{气}$ 为铁水与管模裂缝中气体压力,Pa; $P_{离}$ 为离心场中的离心压力,Pa; $P_{阻}$ 为形成气泡时克服表面张力引起的压力,Pa; $P_{内}$ 为压在铸管内表面铁水上的气体压力,即大气压强,Pa。

浇注过程中,裂纹中气体阻碍铁水流入,假设铁水与管模裂纹之间气体体积不变,近似看成等容过程,计算公式为:

$$P_{\text{气}} = \frac{nRT}{V_{\text{气}}} \quad (2)$$

$$\frac{P_{\text{气}}}{P_{\text{at}}} = \frac{T_{\text{浇注}}}{T_{\text{常温}}} \quad (3)$$

式中,  $n$  为物质的量, mol;  $R$  为普适气体常数,  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为热力学温度, K;  $V_{\text{气}}$  为气体体积,  $\text{m}^3$ ;  $T_{\text{浇注}}$  为浇注温度,  $1623 \text{ K}$ ;  $T_{\text{常温}}$  为常温,  $298 \text{ K}$ ;  $P_{\text{at}}$  为大气气压,  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 计算可得  $P_{\text{气}} = 5.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

离心力场中离心压力公式为<sup>[21]</sup>:

$$P_{\text{离}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{Fe}} \omega^2 (r^2 - r_0^2) \quad (4)$$

式中,  $\rho_{\text{Fe}}$  为铁水密度,  $6850 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\omega$  为 DN150 管模旋转角速度,  $25.6 \pi/\text{s}$ ;  $r$  为 DN150 管模半径,  $0.081 \text{ m}$ ;  $r_0$  为 DN150 铸管内表面铁水半径,  $0.075 \text{ m}$ 。

$$P_{\text{阻}} = \frac{2\sigma}{r_1} \quad (5)$$

式中,  $\sigma$  为球墨铸铁表面张力,  $1.817 \text{ N}/\text{m}$ <sup>[22]</sup>;  $r_1$  为气泡半径, 取图 7a 中最小气孔半径为  $0.35 \text{ mm}$ 。

根据 DN150 铸管制备的相关工艺参数, 代入式(4)和式(5)计算可得,  $P_{\text{离}} + P_{\text{阻}} + P_{\text{内}} = 132118.4 \text{ Pa} < P_{\text{气}}$ 。因此, 静态计算看, 管模裂纹内的气体能够侵入铁水, 由于铸管外壁表面快速冷却, 这部分气体可能在铁水凝固时滞留在外表面形成侵入型气孔。

另一方面, 管模裂纹内部为气体隔绝的干燥表面, 而气体的存在可以直接忽略气泡的形核过程, 使得管模

裂纹成为更好的气泡形成位置。管模裂纹内气泡仅需要得到铁水内部溶解气体的扩散就可以得到补充, 并进一步生长。因此, 管模裂纹通过消除形核表面张力项  $2\sigma/r_1$ , 直接成为气孔的起源, 气泡长大过程更加容易。

### 3.3 管模裂纹中气泡长大机制

图 9 为气泡长大机制。在浇注过程中, 管模龟裂严重, 管模粉不足以填充裂纹之间空隙。在高温铁水的作用下, 裂纹中的气体温度升高, 气体压力迅速增大, 根据管模裂纹对气孔缺陷的影响分析, 裂纹中气体侵入铁水中, 见图 9a。当空气湿度较高时, 模粉、孕育剂等水分相应增加。水分遇到高温铁水发生反应, 导致铁水中 O 含量、H 含量增加。当管模裂纹内气体受热膨胀侵入铁水时, 随着铁水温度的降低, 其中溶解的 H、N 等会向裂纹中气泡扩散, 促使其长大, 见图 9b。气泡形成在固液界面前沿的液相中, 随着固液界面向铸件中心推进, 直至完全凝固, 在铸管表面形成气孔。此外, 球墨铸铁水中 Mg、Si 元素含量高, 随着凝固进行, 容易富集在凝固前沿与 O 结合, 形成稳定的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  夹杂物, 而  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  夹杂物容易聚集在气孔表面, 见图 9c, 从而提高了气泡异质形核的能力<sup>[22]</sup>。同时, 这些物质呈现在气泡的表面, 见图 9c, 在图 6 和图 7 中得到了验证。可见, 管模裂纹、铁水中的气体含量及铸管外表面的气孔形成有重要影响。

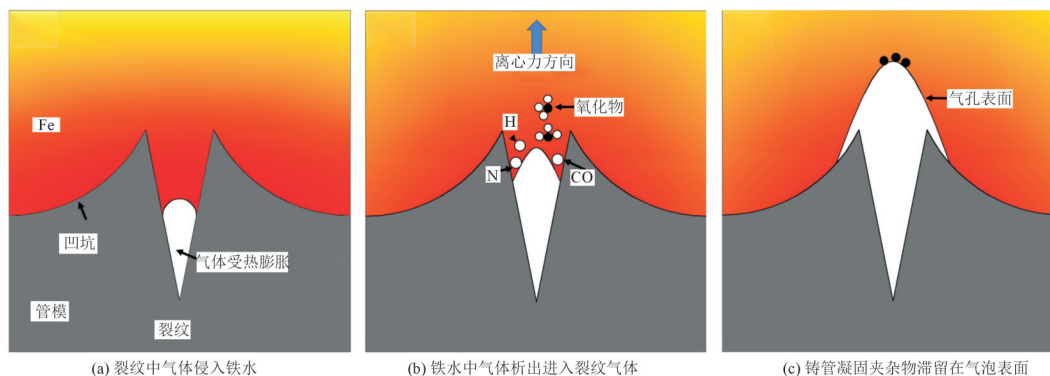


图 9 气泡生长示意图

Fig.9 Schematic diagram of bubble growth

### 3.4 气泡上浮、逃逸对气孔缺陷的影响

当气泡长到一定尺寸时, 会脱离管模表面, 在离心力作用下, 向铸管内表面运动。脱离管模表面气泡开始运动时的临界尺寸, 由气泡脱离时的动力和气泡保持在固体表面的附着力决定<sup>[23-24]</sup>, 即:

$$C_1(\rho_{\text{M}} - \rho_{\text{B}})gd_0^3 = C_2\sigma d_0 \quad (6)$$

$$d_0 = 0.0208\theta \left[ \frac{\sigma}{(\rho_{\text{M}} - \rho_{\text{B}})g} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中,  $d_0$  为气泡脱离表面时的临界直径, m;  $C_1$ 、 $C_2$  为常数;  $\rho_{\text{M}}$  为液态金属的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_{\text{B}}$  为气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\sigma$  为液态金属与气泡间的表面张力,  $\text{N}/\text{m}$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\theta$  为润湿角, ( $^\circ$ )。

在离心力场下, 一切质点所受到的离心力相对于重力增加了  $(\omega^2 r/g - g)$  倍<sup>[25]</sup>, 忽略重力影响, 因此得到离心力场下的临界直径  $d_0$  计算公式为:

$$d_0 = 0.0208\theta \left[ \frac{\sigma}{(\rho_{\text{M}} - \rho_{\text{B}})\omega^2 r} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

式中,  $\omega$  为旋转角速度;  $r$  为距离旋转中心的距离, m。

铁水密度取  $6850 \text{ kg/m}^3$ ; 空气密度为  $1.205 \text{ kg/m}^3$ ; 铁水与气泡之间的表面张力  $\sigma$  取  $1.817 \text{ N/m}^{[22]}$ 。  $\theta$  为液体对固体表面的润湿角, 假设形成气孔缺陷的管模裂纹不能被铁水润湿, 见图 10, 因此, 润湿角  $\theta$  范围为  $90^\circ \sim 180^\circ$ 。根据式(8), 计算得到气泡对应的脱离管模裂纹表面的临界直径为  $1.4 \sim 2.8 \text{ mm}$ 。

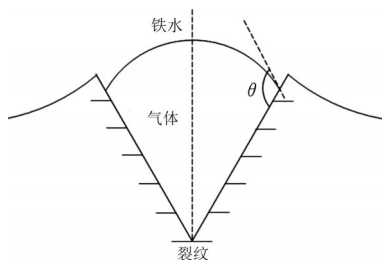


图 10 管模裂纹与润湿角

Fig.10 Pipe mold cracks and wetting angle

在离心铸造过程中, 铁水中粒子的沉降速度与其半径的平方、粒子密度和金属液密度之差成正比。随着离心力场的增强, 粒子的沉降速度相应提升。沉降系数  $S$  用于衡量离心场中颗粒的沉降速度, 可表示为:

$$S = \frac{dx/dt}{\omega^2 r} = \frac{r_0^2 (\rho_{Fe} - \rho_1)}{18\mu} \quad (9)$$

在离心力的作用下金属液中颗粒分离沉淀时间  $t$  为<sup>[26]</sup>:

$$t = \frac{\ln(R_{max}/R_{min})}{S\omega^2} = \frac{27.4\mu \ln(R_{max}/R_{min})}{n^2 r_0^2 (\rho_{Fe} - \rho_1)} \quad (10)$$

式中,  $\rho_1$  为粒子密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  为金属液黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $n$  为转速,  $\text{r/s}$ ;  $r_0$  为粒子半径,  $\text{m}$ ;  $R_{max}$  为离心金属液的底面至轴心的距离,  $\text{m}$ ;  $R_{min}$  为离心金属液的液面至轴心的距离,  $\text{m}$ 。

根据 DN150 铸管的制备工艺参数, 计算气泡在纯液相过程中的上浮速度, 其中,  $\rho_1$  为空气密度, 取  $1.205 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_{Fe}$  为  $6850 \text{ kg/m}^3$ ; 转速  $n$  为 DN150 管模转速  $750 \text{ r/min}$ ;  $R_{max}$  为 DN150 铸管外表面至轴心距离,  $0.081 \text{ m}$ ;  $R_{min}$  为 DN150 铸管内表面至轴心距离,  $0.075 \text{ m}$ 。基于以上条件, 计算得到该情况下球墨铸铁中气泡大小与上浮时间的关系, 见图 11。当气泡直径为  $0.4 \text{ mm}$  时, 气泡上浮时间为  $0.4 \text{ s}$ , 超过铸管外壁表面凝固时间  $0.3 \text{ s}$ ; 当气泡直径为  $1.4 \text{ mm}$  时, 气泡上浮时间为  $0.032 \text{ s}$ , 远小于铸管外壁表面凝固时间。因此, 当管模裂纹气泡小于  $0.4 \text{ mm}$ , 一定会滞留在铸管外表面形成气孔; 管模裂纹气泡达到脱离表面临界直径 ( $>1.4 \text{ mm}$ ) 时, 能够迅速上浮、逃逸铸管表面, 不会形成铸管外表面气孔。

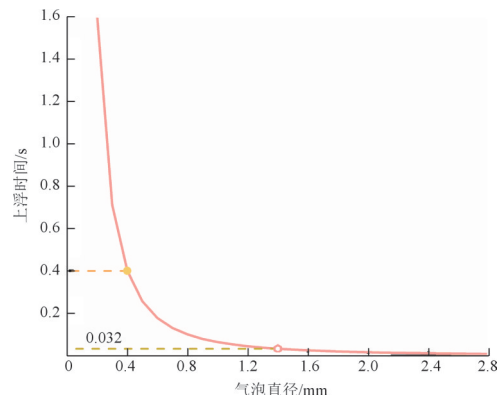


图 11 气泡直径与上浮时间的关系

Fig.11 Relationship between bubble diameter and uplift time

基于 DN150 铸管外表面凝固时间的模拟, 凝固时间为  $0.3 \text{ s}$ , 在这段时间内, 当裂纹内气体以及铁水中其他气体扩散形成大气泡 (直径  $>1.4 \text{ mm}$ ), 脱离管模裂纹迅速上浮至内表面, 见图 12a, 当裂纹内气体以及铁水中其他气体扩散形成气泡较小, 还未达到气泡脱离管模裂纹的临界直径, 铸管外表面基本凝固, 则滞留在铸管外表面, 形成气孔缺陷, 见图 12b。根据图 7a, 气孔缺陷试样中气孔直径均  $\leq 1.4 \text{ mm}$ , 因此, 气泡被凝固壳捕获, 形成气孔, 试样检测气孔尺寸与上述计算分析相符。

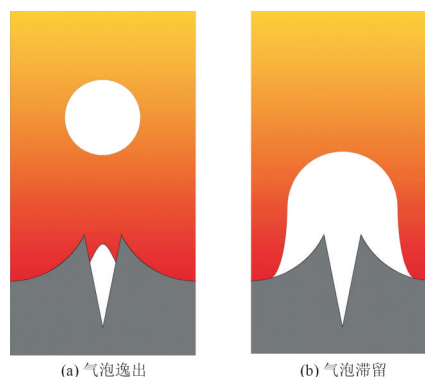


图 12 气泡逸出与滞留示意图

Fig. 12 Schematic diagram of bubble escape and retention

当管模裂纹初现时, 铸管厂常通过增加管模粉用量, 尽可能填充裂纹, 降低气孔缺陷发生率。然而, 当裂纹严重时, 管模粉不足以填充裂纹中的气体, 气体受热膨胀侵入铁水, 同时周围铁水中气体向其析出扩散, 促使其长大, 若超过气泡脱离管模裂纹表面的临界直径 ( $>1.4 \text{ mm}$ ) 且铸管外表面还未凝固时, 受离心力作用, 气泡向内表面运动, 避免铸管外表面气孔缺陷的形成。若气泡未达到上浮的尺寸且铸管外表面已经凝固, 则气泡滞留在铸管外表面, 形成气孔缺陷。在管模裂纹非常严重情况下, 裂纹内气体较多, 易达到上浮临界尺寸并脱离铸管表面, 由于气泡上浮, 铁水进入管模裂纹, 形成铸管外表面突起, 见图 13。因此, 当管模出现大面积环状突起时, 建议更换管模以减少气孔缺陷。

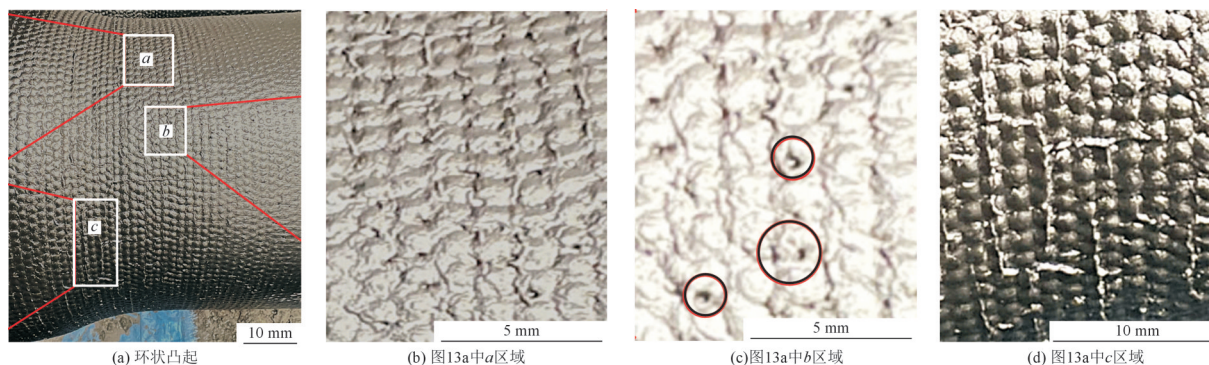


图13 铸管外表面环状突起

Fig.13 Ring-like protrusions on the outer surface of cast pipe

## 4 结 论

(1)雨季气孔缺陷废管平均比例为0.68%,其他时段气孔缺陷废管比例为0.36%,雨季气孔缺陷废管比例比其他时段提高了100%左右。这是因为在浇注过程中,孕育剂、管模粉受潮以及压缩空气湿度较大,水分与铁水反应,增加铁水中局部氧含量,产生气体,增大了气孔缺陷的发生率。

(2)铸管承口、插口部位1.5 m内的气孔发生率比铸管中间部位高20%~40%,表明管模内表面龟裂程度与气孔发生率存在明显的对应关系。这是由于管模承口、插口部位内表面龟裂严重,裂纹内气体在高温铁水的作用下受热膨胀侵入铁水。由于铸管外壁表面快速冷却,这部分气体于铁水凝固时滞留在外表面形成侵入型气孔。

(3)通过ProCAST对DN150铸管插口部位进行模拟,得到铸管外表面凝固时间约为0.3 s。当铁水润湿角为 $90^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$ 时,气泡脱离管模裂纹的临界直径为1.4~2.8 mm。在0.3 s内,若管模裂纹内气泡超过气泡脱离管模裂纹临界直径,则气泡不会被铸管凝固的外表面捕获,避免形成表面气孔;反之,则在铸管外表面形成气孔缺陷。

## 参 考 文 献

- [1] 范英俊,王黎晖,赵焕平,等.我国离心球铁管的生产技术和发展[J].现代铸铁,2000(1):11-17.
- [2] 刘明忠.中国离心球墨铸管行业的现状和发展[J].中国冶金,2016,26(5):1-7.
- [3] 翟文利,李海飞.提高球墨铸铁管综合合格率的措施[J].冶金丛刊,2011(3):27-28,31.
- [4] 李先亮.离心铸造球墨铸铁管渗漏缺陷分析[J].山东冶金,2001(6):41-42.
- [5] 金建军,乔秀丽.离心球墨铸铁管渗漏机理分析及预防措施[J].金属加工(热加工),2011(1):67-69.
- [6] 刘士臣,赵利军,金建军,等.离心球墨铸铁管渗漏机理分析及预防措施[J].河南冶金,2010,18(3):40-42.
- [7] 申发田,张建强,张俊杰,等.水冷离心球墨铸铁管气孔的成因及防止措施[J].现代铸铁,2018,38(5):45-48.
- [8] 余治科,冯光弼,刘菲.球墨铸铁管气孔的缺陷分析及预防措施[J].铸造,2008(4):404-405.
- [9] 崔胜凯,冯永成,崔景永.水冷金属型离心球铁管铸造缺陷的形成因素及防止措施[J].山东机械,2003(3):37-39.
- [10] 钟军超,陈建波,孟新,等.水冷金属型球墨铸铁管缺陷成因及解决措施[J].铸造设备与工艺,2019(5):35-37.
- [11] 李远才,童杏林,李连杰,等.离心球铁管承口部气孔缺陷分析[J].特种铸造及有色合金,1997(6):25-27.
- [12] 潘应君,林汉同,李汉麟.球铁件中CO皮下气孔的形成机理研究[J].现代铸铁,1994(2):17-20,24.
- [13] 司乃潮.球铁件皮下气孔缺陷形成的影响因素分析[J].铸造,1997(4):40-42.
- [14] 张月平,万苏文,唐太元,等.球铁件皮下气孔与壁厚的关系研究[J].铸造技术,2012,33(10):1197-1199.
- [15] 李庆春.铸件形成理论基础[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [16] 刘荣,檀传森,周松流.球墨铸铁活塞环皮下气孔的扫描电镜分析[J].铸造,2001(12):756-758.
- [17] 孙少东,张孟群,马翔,等.球铁件皮下气孔形成机理的研究[J].南京师范大学学报(工程技术版),2012,12(4):78-81,86.
- [18] 韩少丽,骆合力,李尚平,等.K4169合金离心铸管工艺模拟及试制研究[J].铸造,2021,70(3):373-377.
- [19] 侯晓霞,张维友,赵岩.热处理冷却方式对铁素体基体球墨铸铁组织与性能的影响[J].铸造技术,2018,39(9):2078-2081.
- [20] 许国方,曹岩,赵汝嘉.基于虚拟原型的水冷离心铸管管模热特性分析建模[J].重型机械,2000(4):38-41.
- [21] WANNASIN J, FIEMINGS M C. Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2): 143-149.
- [22] 陈家祥.炼钢常用图表数据手册[M].第2版.北京:冶金工业出版社,2010.
- [23] 孙少东,何时剑,张孟群,等.MgO对球墨铸铁件皮下气孔形成的影响分析[J].铸造,2004(12):1031-1034.
- [24] FRITZ W. Berechnung des maximalvolumens von dampfblasen[J]. Physik Zeitschr, 1935, 36: 379-384.
- [25] 林柏年.特种铸造[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [26] 寻梦华,骆合力,韩少丽,等.卧式离心铸管充型过程中夹杂物运动规律数值模拟研究及应用[J].稀有金属材料与工程,2023,52(7):2559-2564.

(编辑:刘晨辉)