DN2000离心球墨铸铁管承口缩松缩孔缺陷数值模拟研究

李永杰[1,2] 郑 万[1,2] 季 军[3] 李冠豪[3] 王 爽[1,2] 冯 荣[1,2]
（1. 武汉科技大学钢铁冶金与资源利用教育部重点实验室，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 利用SolidWorks建立铸管承口模型，通过ProCAST软件模拟浇注凝固过程，探究浇注温度、管模预热温度及管模转速对DN2000离心球墨铸铁管承口缩孔缺陷的影响。结果发现，浇注温度升高（1 310～1 350 ℃），铁水流动性提升，缩孔体积减小了20.01%。当管模温度从160 ℃升至170 ℃，铸件内部补缩通道持续时间延长，缩孔体积减少了30.00%。当模温为200 ℃时，铸件内部热节被均匀分散，缩孔体积减少了25.82%。管模转速为200 r/min时，铁水所受离心力适中，缩孔体积减少了21.93%。通过多因素正交模拟试验，确定了各因素对铸管缩孔缺陷影响程度的主次顺序依次为管模转速、管模预热温度及铁水浇注温度。在理想模拟参数条件下进行现场试验，取样检测表明，与原有缺陷试样相比，承口表面及截面试样缩孔数量和体积均减少，缩孔缺陷优化的效果良好。

关键词 大口径球墨铸铁管；离心铸造；数值模拟；正交试验
中图分类号 TF593.2；TP331 **文献标志码** A DOI：10.15980/j.tzzz.T20250378

Numerical Simulation on Shrinkage Porosity and Cavity in the Socket of DN2000 Centrifugal Ductile Iron Pipe

LI Yongjie[1,2], ZHENG Wan[1,2], JI Jun[3], LI Guanhao[3], WANG Shuang[1,2], FENG Rong[1,2]
（1. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, 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: A SolidWorks model of pipe socket was established, and pouring and solidification processes were simulated using ProCAST software to investigate the effects of pouring temperature, mold preheating temperature, and mold rotational speed on shrinkage cavities in DN2000 centrifugal ductile iron pipe socket. The results indicate that as the pouring temperature rises from 1 310 ℃ to 1 350 ℃, the fluidity of molten iron is improved, leading to a 20.01% reduction in shrinkage cavity volume. With mold temperature increasing from 160 ℃ to 170 ℃, the duration of internal feeding channels within the casting is prolonged, resulting in a 30.00% decline in shrinkage cavity volume. At a mold temperature of 200 ℃, the internal hot spots in the casting are uniformly dispersed, and the shrinkage cavity volume is reduced by 25.82%. With mold rotational speed of 200 r/min, the molten iron encounters moderate centrifugal force, achieving a 21.93% reduction in shrinkage cavity volume. Through a multi-factor orthogonal simulation experiment, the significance order of influencing factors on shrinkage cavity defects was determined as follows: Mold rotational speed, mold preheating temperature, and molten iron pouring temperature. Live-work trials under ideal simulated parameters reveal that both the number and volume of shrinkage cavities in the surface and cross-section samples of socket are reduced compared to the original ones, demonstrating effective optimization of shrinkage cavity defects.

Key Words: **Large-diameter Ductile Iron Pipe, Centrifugal Casting, Numerical Simulation, Orthogonal Experiment**

离心球墨铸铁管凭借高强韧度、耐腐蚀和柔性连接等特点，已成为城市给排水、综合管廊等工程的核心

收稿日期：2025-10-17；**修订日期**：2026-01-16
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：李永杰，男，2000年出生，硕士研究生，E-mail：1991747774@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：李永杰，郑万，季军，等. DN2000离心球墨铸铁管承口缩松缩孔缺陷数值模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金，2026，46（11）：1 623-1 632.
LI Y J, ZHENG W, JI J, et al. Numerical simulation on shrinkage porosity and cavity in the socket of DN2000 centrifugal ductile iron pipe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(11): 1 623-1 632.

管材，其承插式橡胶圈接口的气密性可达 0.3 MPa 下不泄漏[1]，在“南水北调”等重大工程中得到广泛应用。随着水利基础设施建设的推进，DN2000 及以上的大口径离心球墨铸铁管，具有较高压力、较大流量的高效输水能力，可显著降低建设与运行成本，需求以年均 12% 的速度增长[2-3]。

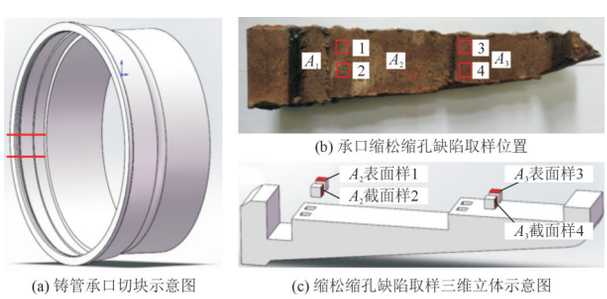
离心球墨铸铁管长 6 000 mm，由承口、直管和插口 3 个部分组成，其中，铸管承口段结构最为复杂，其结构衔接处多且壁厚差大，而铸件凝固过程厚壁处热节聚集，极易产生缩松缩孔缺陷[4]，降低铸管承载和安全运行能力。尽管离心球墨铸铁管具备石墨共晶膨胀抵消液态收缩的独特机制[5]，但实际生产中，其液态收缩量通常较大，导致石墨共晶膨胀难以完全抵消这一收缩过程，最终使得缩松、缩孔缺陷成为影响其质量的主要问题。由于铸件凝固与补缩过程的内部状态难以直接观测，现场依赖经验的控制方法存在明显局限性。要有效解决缩孔缺陷，需结合数值模拟技术，通过精确预测凝固过程中的温度场动态分布与收缩行为，为工艺参数的优化提供指导。

数值模拟技术作为研究铸造缩孔缺陷的重要方法，其有效性已在大量研究中得到验证[6]。目前，大量研究探索了不同铸造工艺下缩孔缺陷的形成机制及其控制措施。在重力铸造中，研究者通过软件设置不同的浇注工艺条件（如浇注温度和管模预热温度等），结合软件模拟结果深入分析浇注工艺参数对铸件缺陷形成的影响机制。GUNASEGARAM D R 等[7]通过 Thercast 软件模拟铝合金熔模铸造过程，将模具涂层厚度从 0.1 mm 增至 0.3 mm，模具预热温度提升至 300 ℃，最终废品率下降了 27%。吕宇阳等[8]研究某不锈钢底座，发现浇注温度升高至 1 700 ℃以上，可明显减轻或消除缩孔。在离心铸造中，研究者侧重于离心转速对缩孔缺陷形成的影响机制分析。隋艳伟等[9]研究 0～600 r/min 离心转速条件下 Al-Cu 合金缩孔缺陷情况，发现随旋转速度增加，铸件中缩孔缺陷体积先减小后增大，且转速为 500 r/min 时，缩孔缺陷体积最小。然而，现有研究在球墨铸铁管领域存在明显不足，多数研究仅关注浇注系统对球墨铸铁铸件缩孔缺陷的影响，且研究对象多为中小型铸件，缺乏对大型球墨铸铁件（尤其是管件）浇注工艺参数的数值模拟研究。夏小江[10]围绕铁型覆砂铸造工艺下球墨铸铁件的缩孔缩松问题展开研究，明确了无冒口法、顺序凝固法及直接使用冒口法等工艺对防止球墨铸铁件缩孔缩松的有效性。KABNURE B B 等[11]通过修改法兰颈部尺寸为 5 mm×40 mm，利用 SolidCast 和 AutoCast 软件进行模拟验证，将铸件成品率提高了 3%。

对于 DN2000 离心球墨铸铁管，管长为 6 000 mm、壁厚为 26 mm，铁水量大，凝固时间超过 30 min，体积收缩量达 6.8%～7.2%，针对承口离心缩孔缺陷预测的研究未见报道。本研究利用 ProCAST 软件模拟设置不同的铁水浇注温度、管模预热温度和离心转速，结合软件后处理模块分析出的铸件轴向截面的温度梯度、压力梯度等结果，对比研究了不同参数条件对铸件缩松缩孔缺陷的影响程度。基于分析结果，对 3 个参数进行多因素正交模拟试验，确定铸件离心浇注的最佳方案，以提高铸件生产质量。

1　铸件承口缩松缩孔缺陷试样检测分析

离心球墨铸铁管可分为承口、管身和插口 3 个部位，从铸管承口部位截取长 400 mm、宽 120 mm 的试样，见图 1。由于其承口结构复杂，将承口铁水与砂芯接触面命名为 A_1、A_2 和 A_3 面。随后，打磨表面锈迹（1 mm），在该试样表面的 A_2 和 A_3 面厚壁区域分别切割出尺寸为 10 mm×10 mm×15 mm 的表面试样、10 mm×10 mm×15 mm 的径向截面试样。



(a) 铸管承口切块示意图　(b) 承口缩松缩孔缺陷取样位置　(c) 缩松缩孔缺陷取样三维立体示意图

图 1　铸管承口切样示意图

Fig.1　Schematic diagram of socket sampling for cast pipe

将试样依次用 400～2 000 目砂纸从粗到细依次打磨，再用粒径为 W3.5～0.5 μm 的金刚石研磨膏逐级抛光，最后使用乙醇作为溶剂经过超声波清洗仪（KQ-50 型）清洗、吹干后置于 OLYMPUS BX51 金相显微镜下观察，见图 2。A_2 面厚壁端试样可通过肉眼观察到缩孔缺陷，其中表面样的缩孔缺陷呈单个分散状态分布，截面样的缩孔缺陷则呈现多个缩孔集中分布于距铸件表面 7 mm 的位置。A_3 面厚壁区域试样未发现较大的缩孔缺陷，借助金相显微镜对其缩孔缺陷形貌特征进行观察，结果见图 2e 和图 2f。可以看出，A_3 表面存在细小的显微缩孔，这些显微缩孔均匀分布在石墨球周围，而其截面试样存在多个微观缩孔聚集分布（区域 1）以及单个微观缩孔分布（区域 2）的情况，且在这些微观缩孔周围还伴随着细小的显微缩孔聚集分布（区域 3）。综上，缩孔缺陷在铸管承口 A_2 表面及距表面 5 mm 处分布较多，对铸管承口质量危害较大，而 A_3 截面存在少量缩孔缺陷，对铸件危害较小。

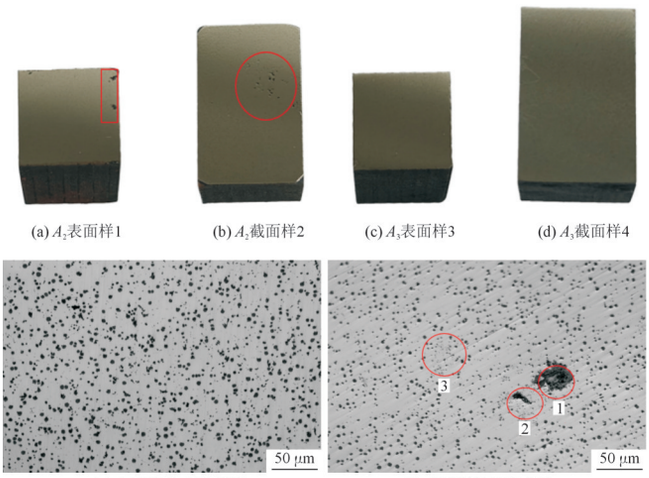


图2　试样制备与检测分析

Fig.2　Specimen preparation and testing analysis

2　模型建立及模拟参数设置

2.1　模型建立

承口模型尺寸见图3，由砂芯、铸件和管模组成。考虑生产浇注时，溜槽出口位于承口与直管连接处上方，铁水浇入管模后受离心力影响会有部分流入直管方向，模型建立时取管模轴向长度为1 000 mm，厚度为86 mm，内径为1 042 mm，砂芯轴向长度为403.5 mm，内径为991 mm。铸件（图中红色部分）轴向长度为919 mm，其与砂芯接触面分别命名为A_1、A_2和A_3面，管壁厚度分别为35.36、46.80和43.38 mm。模型承口结构轴向总长度为322.5 mm，运用SolidWorks软件建立三维模型见图4。

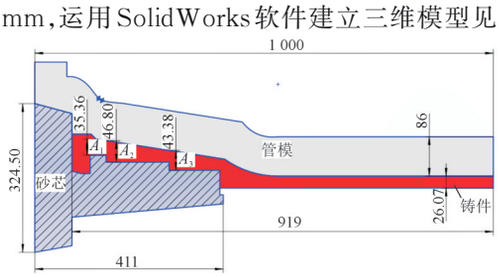


图3　管模、砂芯和铸件二维平面尺寸图

Fig.3　2D dimension of pipe mold, sand core and casting

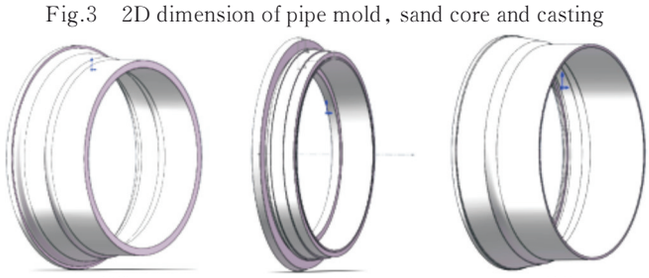


图4　三维模型示意图

Fig.4　Schematic diagram of 3D model

2.2　模型材料及铁水成分选择

管模材料为21CrMo10，其能够在高温环境下保持稳定的性能，抵抗热疲劳和热变形，同时具备较高的强度、耐磨性和良好的韧性。

离心机浇注用球化处理后铁水更易获得球状石墨，且达到细化和均匀组织的作用。管模材料和球化铁水成分见表1和表2。

表1　管模材料的化学成分

Tab.1　Chemical composition of pipe mold　%

w_B							
C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	Fe
0.2	2.5	0.3	0.3	0.01	0.01	0.3	余量

表2　球化铁水的化学成分

Tab.2　Chemical composition of spheroidized iron melt　%

w_B										
C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Cr	Ti	V	Fe
3.2～3.6	2.22	0.3	0.05	0.005	0.061	0.027	0.015	0.035	0.004	余量

2.3　模拟参数设置

（1）浇注入口及速度　某企业DN2000离心球墨铸铁管承口浇注停留时间为3 s，溜槽出口是直径约为20 cm的半圆。本次模拟参数设置浇注时间为4 s，入口是直径为200 mm的圆，铁水流量为352.028 4 kg/s。

（2）边界条件　充型过程中铁水与空气直接接触，铸件外表面施加空冷条件。

（3）传热系数　界面传热系数决定了金属液与管模和砂芯的热量传递，是模拟准确性的重要参数之一。铁水与砂芯的传热系数一般为500～1 200 W/(m²·℃)，离心铸造中，铁水与管模传热更快，设置为750 W/(m²·℃)。热模离心球墨铸铁管在管模内部有内衬涂料，具有很好的绝热性能，ProCAST软件中没有生产用涂料材料，铁水与管模传热系数通过联立努塞尔数定义式和经验公式计算得到，通过JmatPro计算铁水物性参数结果见表3。

表3　1 330 ℃铁水热物性参数

Tab.3　Thermophysical properties of liquid iron at 1 330 ℃

密度/(kg·m^{-3})	比热容/(kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	热导率/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	运动黏度/(m^2·s^{-1})
6 800	0.78	31.63	7.388×10^{-7}

努塞尔数是跨越边界的对流热量与传导热量的比率，其定义式和经验公式为[12]：

$$Nu=\frac{hL}{k} \tag{1}$$

$$\overline{Nu}_D=cRe_D^m Pr^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

式中，h为流体的对流传热系数；L为特征长度；k为流体的热导率；$\overline{Nu}_D$为圆柱体表面努塞尔数；Re_D为雷诺数；Pr为普朗特准则数；c、m为经验常数，取值见表4。

表 4　c、m 经验常数取值

Tab.4　Value selection of empirical constants c and m

Re_D	c	m
(0.4～4]	0.989	0.330
(4～40]	0.911	0.385
(40～4 000]	0.683	0.466
(4 000～40 000]	0.193	0.618
＞40 000	0.027	0.805

根据雷诺数公式：

$$Re=\frac{u_{av}L_C}{v} \tag{3}$$

式中，u_{av}为平均流速（管模旋转线速度）；L_C为流体流动的几何特征尺寸（对于旋转的管模来说等于直径）；v为运动黏度。Re=117.289×10^7＞40 000，所以c取 0.027，m取 0.805。计算得到圆柱体表面流体的努塞尔数为 7.917×10^{-4}。再根据努塞尔数计算公式，求得管模内表面与铁水的直接对流传热系数为 130.97 W/(m²·℃)。当涂层与原有传热过程串联时，总热阻($R_{总}$)为两者之和：

$$R_{总}=R_{铁水}+R_{涂层} \tag{4}$$

涂层的热阻为：

$$R_{涂层}=\frac{\delta}{k_{涂}} \tag{5}$$

式中，δ为涂层的厚度；$k_{涂}$为涂层的热导率。

铁水与管模的热阻为：

$$R_{铁管}=\frac{1}{h_{铁水}} \tag{6}$$

暴延强等[13]提到热模用硅藻土涂料的热导率为 0.12～0.15 W/(m·℃)，本次计算热导率取 0.14 W/(m·℃)，涂层厚度取 1 mm。联立上式，求得模拟用铁水与管模界面传热系数为 62.77 W/(m²·℃)。

(4)石墨膨胀系数　石墨膨胀系数是球墨铸铁在凝固后期会经历石墨化膨胀过程，石墨球析出发生的体积膨胀会填补铁水凝固收缩产生的体积空缺，而膨胀系数的取值需匹配球墨铸铁管的材质特性。参考球墨铸铁结构件数值模拟案例，设置膨胀系数为 0.8[14]。

3　模拟结果与分析

3.1　铸件充型及凝固过程

在离心球墨铸铁管的生产现场，管模通常会设置微小的倾斜度(0.5°～2°)，以此优化充型效果。铸件充型过程见图 5。1 340 ℃铁水浇入型腔后，受离心力的作用，大量铁水沿管模内壁向管口螺旋形填充，部分铁水向直管方向延伸，整个过程同步进行。铁水充型至 3.1 s时，铸件承口外壁铁水充填完成，并逐步向内壁填充，直管段充型也接近尾声。在 4.0 s时，铸件充型结束。此时，铸件承口内表面温度为 1 335 ℃，外表面温度为 1 338 ℃，均位于液相线温度之上。这表明铁水浇入承口型腔，受后续高温铁水温度补给影响，温度损失较小。同时利用 Jmatpro 软件计算，铁水黏度为 4.72 mPa·s，在型腔内流动性好，离心力的作用促进内部热量传递，整体温度趋于平衡状态。



图 5　1 340 ℃铁水浇注充型过程

Fig.5　Filling process of iron melt casting at 1 340 ℃

铸件凝固过程见图 6。铁水液相线和固相线温度分别为 1 189.9 ℃和 1 050.3 ℃。当铸件凝固至 68 s时，由于铁水与砂芯传热[750 W/(m²·℃)]速度较铁水与管模内壁[62.77 W/(m²·℃)]快，承口内外表面温度分别下降至 1 022 ℃和 1 234 ℃，管口、A_2和A_3面形成一层凝固壳层薄壳，此时固相率为 8%。当凝固时间为 398 s时，承口内表面薄壳受内部高温铁水摩擦生热，温度逐渐升高至 1 045 ℃，而铸件承口外壁铁水与管模持续传热，温度下降至 1 144 ℃，为固液相共存状态。对铸件进行切片观察(见图 6e)，此时管口凝固前沿逐渐向心部推移，同时承口A_2面薄壁处也逐渐凝固，此时整个铸件固相率提升至 20%，见图 6b。当凝固时间进行至 558 s时，铸件承口已接近凝固完成，在A_2和A_3面厚壁区域和结构过渡区域表面可观察到较多的孤立液相区(图中红色标记处)。此时，直管段内壁凝固接近 53%，而与承口连接处由于管壁较厚，凝固较慢，固相率为 30%，见图 6c。当t=1 261 s时，此时温度为 917 ℃，固相率为 100%，铸件凝固结束。

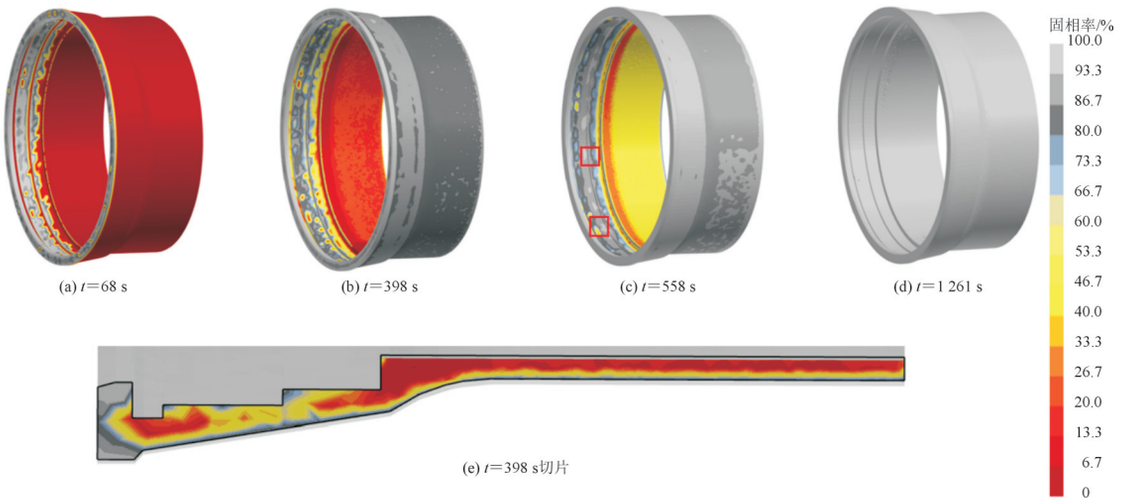


图6　铸件特定时刻的固相率分布结果

Fig.6　Results of solid fraction distribution in casting at specific moment

3.2　缩孔缺陷预测结果

离心球墨铸铁管缩孔缺陷可分为宏观缩孔和微观缩孔。宏观缩孔多因整体补缩不足或凝固后期集中收缩未被补偿所致，其会破坏铸管连续性，成为应力集中的核心，显著降低铸管耐压能力。微观缩孔则因局部凝固不畅所致，分布密集时会破坏铸管致密度，导致铸管液密性显著降低。ProCAST软件区分微观和宏观缺陷依据下式：

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_M}{\rho_{L_{固}}} \times 100\% \tag{7}$$

式中，φ为微观/宏观缩孔缺陷平均孔隙率临界值；ρ_M为MACROFS值下的铁水密度；$\rho_{L_{固}}$为铁水固相线温度时的密度。MACROFS为宏观孔隙率计算参数，其设定宏观孔隙率与微观孔隙率形成之间的固相极限分数，本研究取软件默认值0.7。

ProCAST软件后处理缩孔缺陷预测模型平均孔隙率结果为缩孔体积/预测出现缩孔缺陷的铁水体积，见图7。截取一处缩孔缺陷结果，其铁水体积为154.96 cm^3，缩孔体积为1.25 cm^3，平均孔隙率为2.28%。根据式(7)计算得到φ=1.7%，故本次模拟结果取平均孔隙率大于2%为宏观缺陷。



图7　ProCAST预测缩孔缺陷详细信息

Fig.7　Detailed information on shrinkage cavities predicted by ProCAST

铸件缩孔缺陷的典型特征见图8。可以看出，铸件承口部位的缩孔缺陷主要聚集于A_2面与A_3面的厚壁区域。相较之下，A_2面薄壁区域仅存在少量零星分布的缩孔缺陷，未形成明显的缺陷聚集区。为进一步探究缩孔在铸件内部的分布规律，对铸件沿轴向进行切片观察，将平均孔隙率的显示标尺设为2%～5%，可有效提升图像对比度，更清晰地呈现缩孔缺陷的形态与分布特征。图9为轴向切片观察结果。可以看见，宏观缩孔主要形成于两个位置：一是A_2面的表层区域，二是位于A_2面表层以下、距表面约5 mm的亚表层区域。此观察结果与实际取样检测结果相符，模拟参数设置合理。

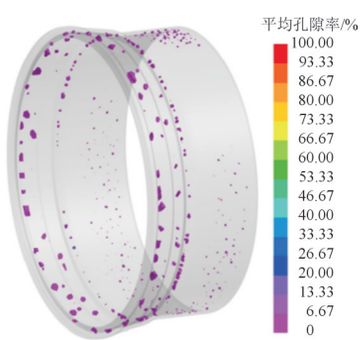


图8　缩孔缺陷预测结果

Fig.8　Prediction results of shrinkage cavities

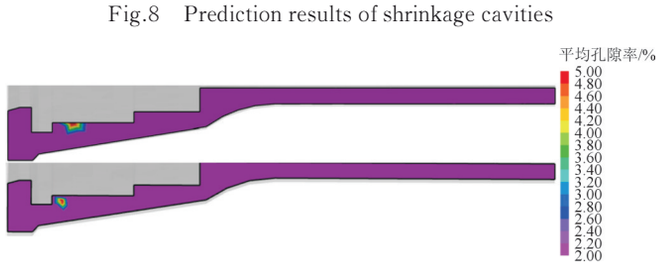


图9　铸件轴向切片结果

Fig.9　Axial section results of casting

4　不同浇注工艺对铸件缩松缩孔缺陷的影响

4.1　不同浇注温度对铸件缩松缩孔缺陷的影响

由于不同参数条件下缩孔缺陷分布预测图大致相同，以下缩孔缺陷结果仅展示一张图。合适的浇注温度是获得致密管件、缩松缩孔缺陷较少的关键因素。现场浇注温度为 1 300～1 350 ℃，本研究依次设置浇注温度为 1 310、1 320、1 330、1 340 和 1 350 ℃，得到不同浇注温度下的缺陷分布和平均孔隙率结果见图 10。可以看出，铁水浇注温度由 1 310 ℃升至 1 340 ℃，铸件平均缩孔率由 2.37% 降低至 2.08%，缩孔体积由 132.51 cm^3 降低至 113.20 cm^3。当温度为 1 350 ℃时，平均缩孔率又升高至 2.10%，而缩孔体积降低至 106.01 cm^3。由此可知，随浇注温度升高，铸件平均缩孔率先减小后增大，缩孔体积逐步减小。

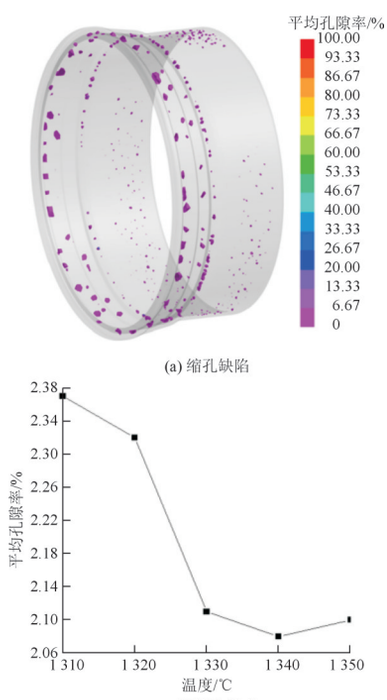


图 10　不同铁水浇注温度下铸件缩孔缺陷结果

Fig.10　Results of shrinkage cavities at different pouring temperatures of iron melt

球墨铸铁凝固过程可分为液态收缩、凝固收缩、共晶膨胀和固相收缩 4 个阶段，其中共晶膨胀阶段由于石墨的大量析出，石墨球形核产生的膨胀抵消部分液态收缩，可减少收缩缺陷。图 11 为 1 300～1 350 ℃时铁水的黏度变化。可以看出，当浇注温度由 1 310 ℃升高至 1 350 ℃，过冷度减小，结晶过程驱动力减弱，共晶反应生成的奥氏体壳薄且疏松，C 原子通过奥氏体壳的扩散阻力减小，石墨可持续生长，石墨形核膨胀产生的压力推动周围铁水向已收缩区域流动，实现“动态补缩”。同时，铁水温度从 1 310 ℃升高至 1 350 ℃，黏度由 4.96 mPa·s 降低至 4.62 mPa·s，铁水流动性升高，高流动性铁水更易突破枝晶间阻力，向厚壁区域进行补缩，减小缩孔体积。

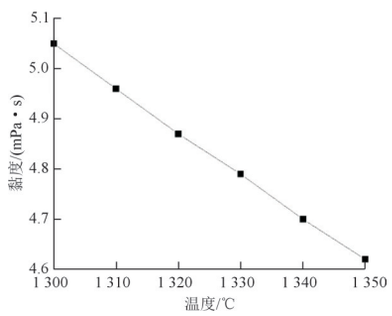


图 11　1 300～1 350 ℃铁水黏度变化

Fig.11　Viscosity variation of iron melt at 1 300～1 350 ℃

结合软件计算 1 340 ℃和 1 350 ℃ Niyama 缩孔结果，见图 12。图中显示了铸件 $G/\sqrt{R}$ 的分布情况，且 Niyama 值小于 8 $K·s^{0.5}/cm$ 会产生缩孔缺陷。在 A_2 面薄壁端内表面，1 350 ℃时的 Niyama 值较 1 340 ℃大。因此，当浇注温度由 1 340 ℃升高至 1 350 ℃时，铁水流动性进一步提高，将较小的缩孔分散为缩松，模拟预测产生缩孔缺陷的铁水体积减小量高于缩孔体积减小量，平均孔隙率升高。

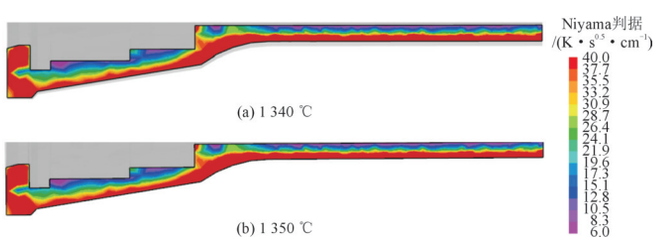


图 12　Niyama 准则下铸件内部 $G/\sqrt{R}$ 的分布情况

Fig.12　Distribution of $G/\sqrt{R}$ inside casting under Niyama criterion

4.2　不同管模预热温度对铸件缩松缩孔缺陷的影响

离心球墨铸铁管现场生产节奏快，离心机可利用管模余温实现连续浇注，但此情况导致管模温度难以精准控制。此外，若熔炼工序突发事故，离心机往往出现“等管”现象，需对管模进行预热处理。本研究设置管模预热温度分别为 160、170、180、190 和 200 ℃，模拟计算铸件凝固过程，得到不同管模预热温度下铸件的缩孔缺陷分布和铸件在不同模温条件下平均孔隙率见图 13。可以看出，管模预热温度由 160 ℃升高至 170 ℃时，铸件平均孔隙率由 2.67% 降低至 2.15%，缩孔体积由 157.84 cm^3 减小至 110.48 cm^3。管模预热温度升高

至190 ℃时，铸件平均缩孔率升高至2.83%，缩孔体积增至149.27 cm³。当管模预热温度升高至200 ℃时，铸件平均孔隙率降低至2.02%，缩孔体积降低至110.72 cm³。由此可知，管模预热温度从160 ℃升高至200 ℃，离心铸造过程应避免模温在180 ℃和190 ℃，选择170 ℃或200 ℃可减少缩孔缺陷。

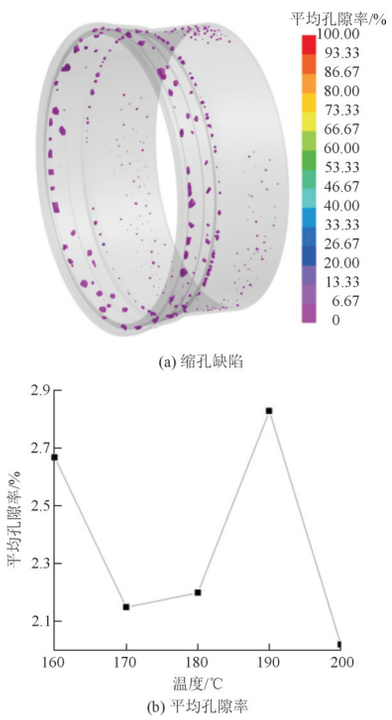


图13　不同管模预热温度下铸件缩孔缺陷结果

Fig.13　Results of casting shrinkage cavities at different preheating temperatures of pipe mold

图14为管模预热温度分别为170、190和200 ℃下铸件的内外壁温度曲线，图15是凝固时间为454 s，管模预热温度分别为160、170、190和200 ℃的固相率分布结果。由图14可知，当模温升至170 ℃时，铁水与管模温差减小，其冷却速率降低。根据凝固前沿移动速度公式[15] $v=\Delta T/(\rho LG)$，可知温度梯度G减小，导致凝固前沿移动速度变缓，内部铁水液态时间延长，厚壁热节部位补缩更充分，缩孔体积减少。当管模预热温

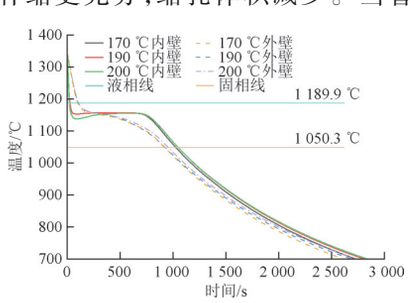


图14　不同管模预热温度下铸件内外壁温度曲线

Fig.14　Temperature curves of inner and outer walls of casting at different preheating temperatures of pipe mold

度为190 ℃时，铁水降温至液相线温度的时间延长，液态收缩量增加，同时，模温升高使铁水过冷度减小，石墨形核驱动力减弱，共晶膨胀抵消液态收缩量减少，缩孔体积增多。当管模预热温度为200 ℃时，由固相率结果可知，铸件承口内部处于近平衡状态，热节均匀分散，凝固过程补缩效果好，缩孔体积减少。

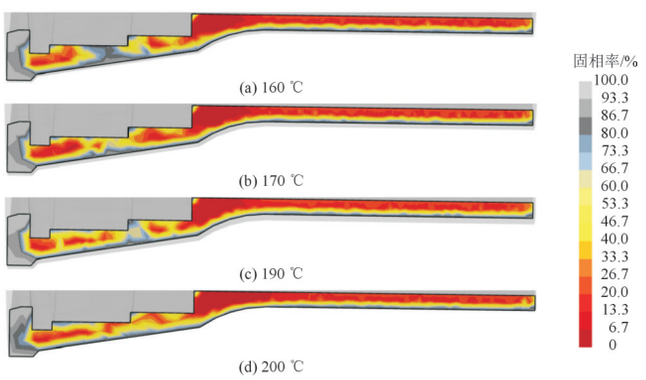


图15　铸件凝固时间为454 s时的固相率分布结果

Fig.15　Results of solid fraction distribution at solidification time of 454 s

4.3　不同管模转速对铸件缩松缩孔缺陷的影响

管模转速是离心球墨铸铁管浇注过程的重要参数。管模转速较低时，铁水会因离心力不足发生雨淋现象；管模转速过高时，易造成分层等铸造缺陷[16]。铁水浇注时，管模转动的重力系数（离心加速度与重力加速度的比值）可选取15，浇注结束后终转速重力系数可选取42[17]。现场用管模转速参考以下公式：

$$N=\omega^2 r/g \tag{8}$$

式中，N为重力系数，取42；ω为角速度，rad/s；r为管模半径，m；g为重力加速度，9.8 N/kg。

经计算，DN2000管模铁水浇注转速为115 r/min，终转速为194 r/min。在ProCAST软件CAST模块Process Conditions-Geometrical中选择Revolution并进行编辑，设置旋转轴为垂直于重力方向，管模转速分别为150、200、和250 r/min，模拟计算铸件凝固过程，得到不同离心转速下铸件的缩孔缺陷分布和铸件不同转速条件下平均孔隙率见图16。可以看出，转速由150 r/min升高至200 r/min，铸件平均孔隙率由2.64%降低至2.06%，缩孔体积由174.45 cm³减小至136.19 cm³。当转速升高至250 r/min时，铸件平均缩孔率升高至2.56%，缩孔体积升高至175.38 cm³。由此可知，当转速为200 r/min，铸件生成的缩孔缺陷最少。

球墨铸铁在凝固过程枝晶发育显著，铁水通过枝晶间隙以渗流形式进行补缩，渗流量的大小直接影响补缩效果。补缩渗流流量可参照达西定律[18]：

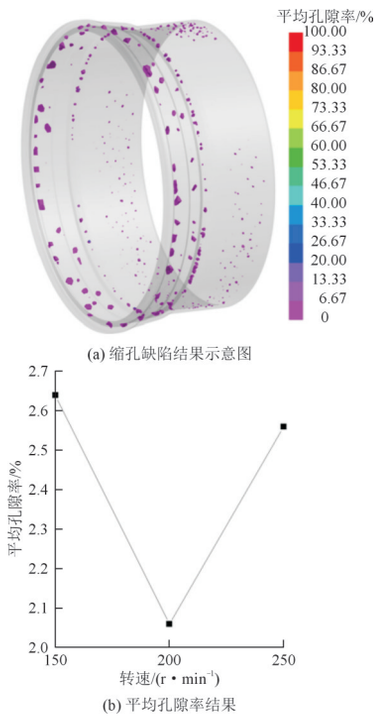


图 16　不同管模转速下铸件缩孔缺陷结果

Fig.16　Results of shrinkage cavities at different pipe mold rotational speeds

$$V_1 = V_2 - qt = V_2 - \frac{KA\Delta P}{\eta L}t \tag{9}$$

式中，V_1为铸件中缩孔体积；V_2为合金熔体收缩体积；q为补缩流量；K为渗透率；A为横截面积；ΔP为压力差；η为合金熔体黏度；L为截面间距离；t为补缩时间。

由上式可知，在铁水黏度、通道渗透率与路径长度相对稳定的条件下，渗流流量与管模旋转速度和横截面积的乘积相关。当转速由 150 r/min 提高至 200 r/min时，铁水虽因离心力增大贴附管模内壁，但此时枝晶间渗流通道有效横截面积 A 尚未发生显著收缩，ΔP增加使枝晶间渗流驱动力增强，有利于铸件内部补缩，缩孔体积减少。

图 17为不同转速条件下的铁水充型压力分布。可以看出，当转速提高至250 r/min时，铸件由外壁向内壁的压力梯度增大，铁水在离心力惯性作用下紧贴管模内壁，致使补缩渗流通道横截面面积被挤压减小，渗透率K下降，铁水补缩流动渗透阻力增大。同时，离心转速提高加剧铁水与管模内表面相对运动，传热加快[19]，热流密度增大导致铁水过冷度提高，共晶生长窗口期时间缩短、尽管离心场下压力 ΔP进一步增大，但凝固过程糊状区铁水黏度η升高，抵消了 ΔP提高产生的驱动作用，碳原子扩散不充分，部分形核核心由于前沿液相碳质量浓度不足“失效”，导致共晶膨胀量减少，液态补缩和凝固补缩不足，缩孔体积增加。

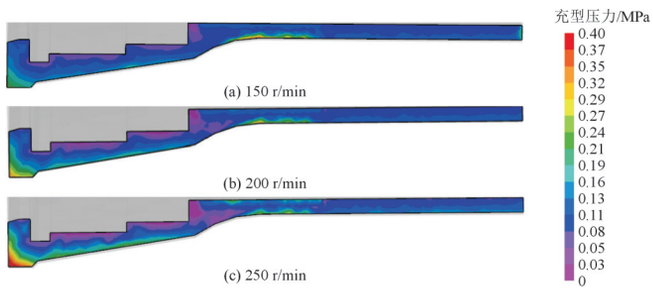


图 17　不同转速条件下的铁液充型压力分布

Fig.17　Distribution of iron melt mold filling pressure under different rotational speed conditions

4.4　各影响因素显著性程度分析

为确定影响铸管缩孔缺陷的主要因素，选取铁水浇注温度 1 310、1 330 和 1 350 ℃，管模预热温度 160、170 和 200 ℃，管模转速 150、200 和 250 r/min，采用 $L_9(3^3)$正交试验表，进行 9 组模拟试验，各组模拟试验对应的缩孔缺陷模拟结果见表 5。利用SPASS 软件对试验结果进行极差分析，结果见表 6。根据统计学原则，各因素的显著性水平（Sig.值）越小，表明其对指标的影响越显著。分析结果显示，管模转速的 Sig.值最小，其次为管模预热温度，铁水浇注温度的Sig.值最大。因此，各因素对铸管缩孔缺陷影响的主次顺序依次为：管模转速、管模预热温度及铁水浇注温度。

表 5　正交模拟试验及缩孔缺陷结果

Tab.5　Orthogonal simulation experiment and shrinkage defect results

试验序号	铁水浇注温度/℃	管模预热温度/℃	管模转速/(r·min^{-1})	缩孔体积/cm^3
1	1 310	160	150	177.97
2	1 310	170	200	168.58
3	1 310	200	250	174.96
4	1 330	160	200	162.78
5	1 330	170	250	173.95
6	1 330	200	150	173.37
7	1 350	160	250	186.36
8	1 350	170	150	177.81
9	1 350	200	200	157.86

表 6　SPSS 软件主体间效应检验表

Tab.6　SPSS software tests of between-subjects effects

源	Ⅲ型平方和	*df*	均方	*F*	Sig.
校正模型	3 040.112[a]	6	506.685	54.609	0.018
截距	244 026.120	1	244 026.120	26 300.453	—
铁水浇注温度	20.620	2	10.310	1.111	0.474
管模预热温度	91.713	2	45.856	4.942	0.168
管模旋转速度	2 927.779	2	1 463.890	157.774	0.006
误差	18.557	2	9.278	—	—
总计	247 084.789	9	—	—	—
校正的总计	3 058.668	8	—	—	—

注：源为因素/误差项；Ⅲ型平方和为离均差平方和；*df*为自由度；均方为平方和/*df*；*F*为该因素均方/误差均方；Sig.为显著性概率。

离心球墨铸铁管生产效率高，具有大批量、连续性强等特点。现场生产时，可将模温预热至200 ℃，铁水浇注温度控制为1 340～1 350 ℃，管模转速控制在（200±5）r/min，连续生产时可将管模余温控制为170 ℃，以此减少缩孔缺陷产生，提高铸管质量，以保证生产效率。

5　现场试验取样验证

基于数值模拟研究结果，进行DN2000铸管的现场浇注。受现场生产环境影响，铁水浇注温度控制在1 340～1 350 ℃，管模预热温度和转速分别为200 ℃、200 r/min。浇注完成后，为避免单次取样存在偶然误差，在铸管A_2和A_3面厚壁区域取表面和截面样（见图1）各4个，共制备试样16个。试样经打磨、抛光后见图18。

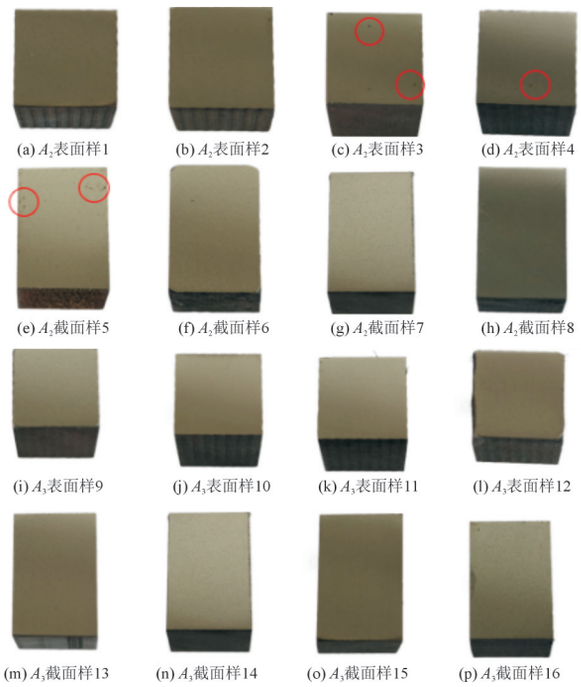
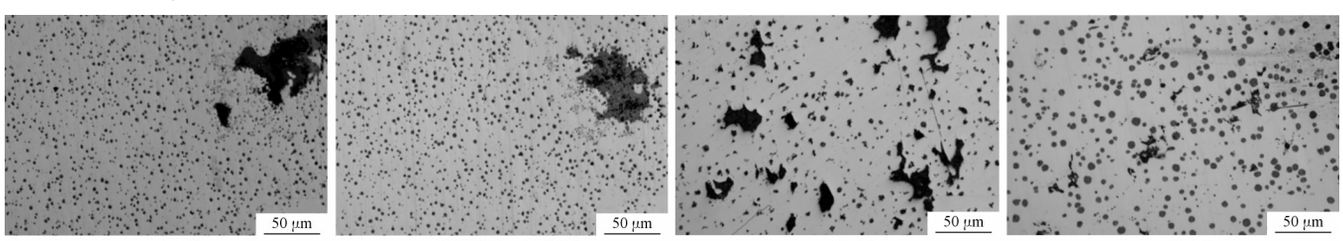


图18　铸件A_2、A_3表面及截面试样制备

Fig.18　Specimen preparation for surface and cross-section of casting A_2 and A_3

图19为A_2面试样缺陷金相结果对比。可以看出，与A_2表面样1相比，试样3的缩孔数量更多但尺寸更小，且形状近似圆形，说明A_2表面缩孔缺陷的优化效果良好。在截面缩孔缺陷方面，A_2截面样2存在大量形态不规则、尺寸较大的缩孔。试样5的缩孔则多为尺寸较小的圆形或近圆形，且分布相对分散，对铸管的危害明显降低。

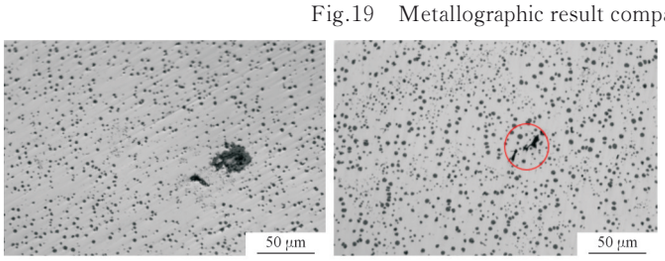


(a) A_2表面样1　(b) 现场试验A_3表面试样3　(c) A_2截面样2　(d) A_2截面样5

图19　A_2截面试样缺陷金相结果对比

Fig.19　Metallographic result comparison of defects in A_2 surface specimens

图20为A_3截面试样缺陷金相结果对比。可以看出，A_3表面样缩孔缺陷无明显变化，其截面样缩孔体积明显变小，缩孔缺陷优化结果较好。



(a) A_3截面样4　(b) A_3截面样16

图20　A_3截面试样缺陷金相结果对比

Fig.20　Metallographic result comparison of defects in A_3 cross-section specimens

6　结　论

（1）随铁水浇注温度升高至1 350 ℃，过冷度减小使奥氏体壳薄疏，石墨持续生长的膨胀压力推动铁水进行补缩；铁水黏度降低、流动性提升，更易向厚壁补缩，缩孔体积减少了20.01%。

（2）管模预热温度由160 ℃升高至170 ℃，铸件凝固过程中铁水内部温度梯度减小，导致凝固前沿移动速度变缓，内部铁水液态时间延长，厚壁热节部位补缩更充分，缩孔体积减少了30.00%。管模预热温度升高至190 ℃时，铁水降温至液相线的时间延长，液态收缩量增加，同时，模温升高使铁水过冷度减小，石墨形核驱动力减弱，共晶膨胀抵消液态收缩量减少，与模温170 ℃相比，缩孔体积升高了35.11%。当管模预热温度升高至200 ℃时，铸件承口内部铁水温度梯度近平衡状态，热节均匀分散，凝固过程补缩效果好，缩孔体积减少了21.93%。由此可知，管模预热温度从160 ℃升高至200 ℃，离心铸造过程应避免模温在180 ℃和190 ℃，选择170 ℃或200 ℃可尽量减少缩孔缺陷。

（3）管模转速由150 r/min升高至200 r/min，铁水

在枝晶间渗流驱动力增强，有利于内部补缩，缩孔体积减少了21.93%。当转速升高至250 r/min时，渗流通道横截面积被挤压减小，渗流阻力增大，且铁水与管模内壁传热加快，铁水过冷度减小，C扩散不充分，导致共晶膨胀量减少，缩孔体积升高了28.81%。当转速为200 r/min，铸件生成的缩孔缺陷最少。

（4）通过多因素正交模拟试验，优化工艺参数条件是铁水浇注温度为1 350 ℃、管模预热温度为200 ℃、管模转速为200 r/min。影响程度主次依次为：管模转速、管模预热温度、铁水浇注温度。

（5）取样检测表明，铸件表面和截面试样缩孔缺陷数量和体积均减小，缩孔缺陷改善效果良好。现场生产时，可将模温预热至200 ℃，铁水浇注温度控制为1 340～1 350 ℃，管模转速控制在（200±5）r/min，连续生产时可将管模余温控制为170 ℃，以此减少缩孔缺陷产生，提高铸管质量，并保证生产效率。

参　考　文　献

[1] GB/T 13295-2019 水及燃气用球墨铸铁管、管件和附件[S].

[2] 中国水利水电科学研究院.南水北调工程球墨铸铁管道技术白皮书[R].北京：中国水利水电出版社，2021.

[3] 中国铸造协会.中国球墨铸铁管行业发展报告[R].北京：中国铸造协会，2023.

[4] 王继才.磨浆机筒体新材料的开发及成型工艺研究[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2005.

[5] 张丽.球墨铸铁凝固及收缩倾向热分析检测研究[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2023.

[6] 李伟，周玉臣，林圣琳，等.仿真模型验证方法综述[J].系统仿真学报，2019，31（7）：1 249-1 256.

[7] GUNASEGARAM D R，FARNSWORTH D J，NGUYEN T T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology，2009，209(3)：1 209-1 219.

[8] 吕宇阳，吕存昌，赵凯，等.有孤立热节的铸件缩孔及表面毛刺的解决方法[C]//第十六届中国精密铸造年会.江苏无锡，2019.

[9] 隋艳伟，李邦盛，刘爱辉，等.离心铸造铝铜合金缩孔缺陷研究[J].铸造，2008，57(12)：1 284-1 286，1 289.

[10] 夏小江.铁型覆砂铸造球墨铸铁件缩松缩孔的防止[J].铸造，2020，69(2)：187-190.

[11] KABNURE B B，SHINDE V D，PATIL D C. Quality and yield improvement of ductile iron casting by simulation technique [J]. Materials Today：Proceedings，2020，27：111-116.

[12] 吴铿.冶金传输原理[M].第2版.北京：冶金工业出版社，2016.

[13] 暴延强，梅燕娜，林雪川，等.大口径球墨铸铁管热模涂料喷涂质量改进措施[J].铸造，2023，72(9)：1 209-1 212.

[14] 苏飞，汪东红，薛菁，等.6 MW大型风电主机架铸造工艺数值模拟与优化[J].铸造，2025，74(1)：91-97.

[15] 张卫国，刘林，黄太文，等.定向凝固ZMLMC法温度梯度的测定及其对凝固组织的影响[J].铸造技术，2006，27(11)：1 165-1 168.

[16] 梁海宏，苏柏林，陈强，等.水冷金属型离心球墨铸铁管常见缺陷分析[J].机械工人（热加工），2005(8)：62-64.

[17] 陈建波，申发田，李志杰，等.热模涂料法球墨铸铁管离心铸造工艺[J].铸造，2019，68(3)：287-290.

[18] 田芩蔚，胡国新，汪国山.离心力场中金属溶液的渗流传热机理[C]//中国工程热物理学会传热传质学学术会议.山东青岛，2001.

[19] 徐达鸣，范学燚，苏彦庆，等.一种确定离心铸造界面换热系数的数学模型[J].中国科技论文在线精品论文，2013，6(9)：802-806.

（编辑：张正贺）

《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，INSPEC、CA、MA、AJ、JST、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、湖北省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技术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。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：武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦11楼
邮编：430019
电话：027-85358206，85486024，85358127
投稿网址：www.special-cast.com
邮箱：tzzz@special-cast.com