深海齿轮箱行星架铁型覆砂铸造方案优化

张　应，罗代新，黄　令，叶馨欣，樊　绪，胡辛阳
（中船西南（重庆）装备研究院有限公司，重庆 400021）

摘要：针对某深海齿轮箱二级行星架铁型覆砂铸件的内部缩松缩孔问题，通过分析原铸造方案，提出优化措施，利用ProCAST软件对优化前后浇注温度、铁液成分和覆砂层厚度等对铸件孔隙率的影响进行了数值模拟。结果表明，浇注温度、铁液成分、覆砂层厚度对缩松缩孔缺陷的影响依次降低。在优化工艺参数下，铸件孔隙率降为10%~20%，内部缩孔缩松缺陷明显减少。经生产验证，采用优化铁型覆砂方案制备的铸件通过了超声波三方检验，质量满足要求。

关键词：球墨铸铁；行星架；铁型覆砂铸造；有限元数值模拟；Niyama准则；致密化
中图分类号：TG249.3；TH132；P751　**文献标识码：**B　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1156-07
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0147

Optimization of Sand-Lined Metal Mould Casting Process for Planetary Carriers of Deep-Sea Gearboxes

ZHANG Ying, LUO Dai-xin, HUANG Ling, YE Xin-xin, FAN Xu, HU Xin-yang
(CSSC Southwest (Chongqing) Equipment Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400021, China)

Abstract: Aiming at the problem of shrinkage cavity and shrinkage porosity defects in the sand-lined metal mould castings of the deep-sea gearbox secondary planet carrier, the optimization measures were proposed by analyzing the original casting scheme, and the ProCAST software was used to simulate the effects of pouring temperature, molten metal composition and sand coating thickness on the porosity of the casting before and after optimization. The results show that the effects of pouring temperature, molten metal composition and sand coating thickness on the shrinkage cavity and shrinkage porosity defects decrease successively. Under the optimized process parameters, the porosity of the casting is reduced to 10%-20%, and the internal shrinkage cavity and shrinkage porosity defects are significantly reduced. After production verification, the castings prepared by the optimized sand-lined metal mould scheme have passed the ultrasonic third-party inspection, and the quality meets the requirements.

Key words: ductile iron; planetary carrier; sand-lined metal mould casting; finite element simulation; Niyama criterion; densification

深海行星齿轮组在工作中持续受到高压、低温及变载荷等恶劣条件[1]的影响，工程上对其使用性能要求十分严格，行星架作为行星齿轮组的核心部件，是整个机构中承受外力矩最大的零件，其服役可靠性要求更为严苛[2]。某深海齿轮箱二级行星架铸件材料为高强度高塑性球墨铸铁QT1000-5，采用铁型覆砂铸造工艺生产。铁型覆砂铸造具有金属型铸造的特点，覆砂层薄膜强度高，能够抵御石墨化膨胀产生的压力，可实现无冒口铸造[3]。由于铁液中含有镁元素，球墨铸铁共晶温度较高，这导致凝固过程中的自补缩较为困难[4]，实际铸造过程中，部分二级行星架产品存在内部缩孔和铸型崩砂缺陷。为解决上述问题，本课题对行星架铁型覆砂铸造方案进行优化，通过ProCAST软件模拟铸造过程，探究优化方案的可行性，并进行了生产验证。

1　原铸造方案分析

1.1　材料选择

由于深海作业服役环境苛刻，行星架铸件需满足热处理后抗拉强度不低于1 000 MPa，超声波探伤缺陷

基金项目：国家重点研发计划（2023YFB3406300）。
收稿日期：2026–04–20 收到初稿，2026–06–01 收到修订稿。
作者简介：张应（1991–），男，硕士，高级工程师，研究方向为机械加工及装备。E-mail：zy@csscsweri.com
引用格式：张应，罗代新，黄令，等．深海齿轮箱行星架铁型覆砂铸造方案优化 [J]. 铸造，2026，75（10）：1156–1162.
Zhang Ying，Luo Daixin，Huang Ling，et al. Optimization of sand-lined metal mould casting process for planetary carriers of deep-sea gearboxes [J]. Foundry，2026，75（10）：1156–1162.

检测达到GB/T 7233.1—2023中Ⅰ级的要求。经调研发现，等温淬火球墨铸铁及高强度高塑性球墨铸铁两种材料符合使用要求。其中，高强度高塑性球墨铸铁具有更高的抗拉强度、疲劳强度、断裂韧度和更好的耐磨性，同时25%~50%的残余奥氏体含量使其具有优异的耐疲劳性能[5]，更适合进行深海作业。结合实际生产经验，最终选用球墨铸铁QT1000-5作为铸件材料[6]，其化学成分见表1。铁型覆砂铸造的铸型锁紧后具有刚度高、变形小、冷却快的特点，所得铸件尺寸精度高、飞边毛刺小[7]，适合球墨铸铁的铸造成形。

表1 QT1000-5球墨铸铁的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the QT1000-5 ductile cast iron w_B/%

C	Si	Mn	Mg	P	S	RE	Fe
3.2~3.8	2.2~2.8	0.2~0.6	0.03~0.06	< 0.08	< 0.02	0.01~0.04	余量

1.2 铸造方案

铸造方案设计包括模具、出气口、激冷系统以及浇注系统的设计等[8-12]。铁型覆砂工艺，通过在砂箱内腔覆上薄层覆膜砂，使其在金属液结晶过程中产生明显冷激现象，从而细化晶粒，提高铸件强度，以满足行星架工程使用要求[13]。

铁型覆砂铸造方案的砂箱采用上下分型结构，生产时造型主机同时完成砂箱上箱和下箱的制造，然后箱体与模具进行合模，依次完成射砂、固化和起模的覆砂造型工序，随后再依次进行合箱、浇注、冷却、开箱、出铸件和铁型清洗过程，具体流程如图1所示，铸造优化方案主要针对起模到浇注之间的流程。

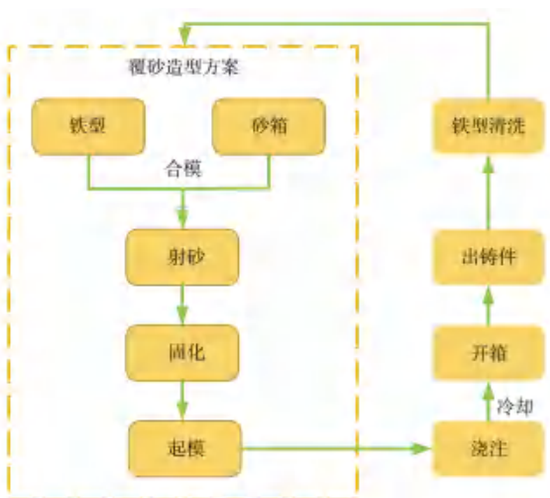
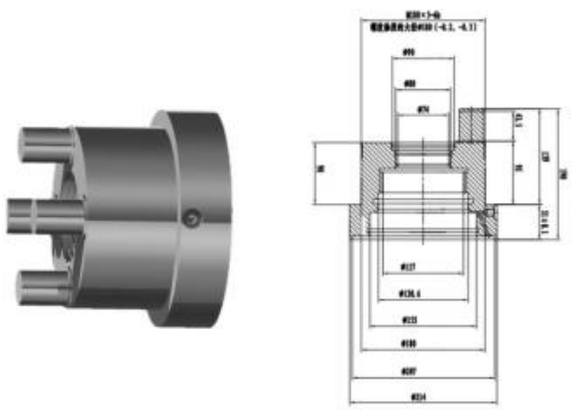


图1 铁型覆砂铸造流程

Fig. 1 The sand-coated metal mold casting process flow

采用一般成品砂作为覆膜砂，通过射砂得到符合要求的上、下铸型，浇注温度为1 450~1 500 ℃，环境温度为26 ℃，砂层厚度为5 mm，浇注方式为重力浇注，根据此铸造方案生产的产品如图2所示。二级行星架整体尺寸为214 mm × 214 mm × 190 mm，最大壁厚53 mm，最小壁厚17.45 mm，铸件质量约为20 kg。



（a）产品图 （b）尺寸图

图2 二级行星架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the secondary planetary carrier

任务研制时，铸造过程中出现铸型崩砂等问题，如图3（a）所示；二级行星架由于结构复杂，约有30%的产品内部出现缩松缩孔问题，进一步测量发现其缩孔深度超过10 mm，如图3（b）所示。

（a）铸型崩砂 （b）铸件内部缩孔

图3 二级行星架铸造缺陷示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the casting defects in the secondary planetary carrier

1.3 缩松缩孔判据分析

目前，通常采用Niyama判据分析铁液凝固过程中的缩松缩孔，当$G/\sqrt{R} \leqslant K_t$时，铸件会出现缩松缩孔现

象，其中G为铸件内部的温度梯度，R为冷却速度，K_r为判定的临界常数。田学雷等[14]在考虑铁液静压力和流动压力后将公式变为：

$$P_r=P_j-K_r\sqrt{R}/G \quad (1)$$

式中：P_r为铸件某部分的压力；P_j为铁液静压力。

从式（1）可以看出，当$P_r\leqslant 0$时，铁液在凝固过程中不能得到补缩，导致铸件内部逐渐出现缩松缩孔缺陷，进一步将$G/\sqrt{R}$法变形为：

$$P_jG/\sqrt{R}\leqslant K_r \quad (2)$$

由式（2）可知，缩松缩孔现象不仅与铸件内部温度梯度和冷却速度有关，也与铁液压力有关。

Carlson等[15]提出了新的无量纲Niyama准则，在进一步考虑固液区压力变化、铁液成分和凝固特性后，将$G/\sqrt{R}$法优化为：

$$N_y^*=C_\lambda\frac{G}{R^{5/6}}\sqrt{\frac{\Delta P_{cr}}{\mu\beta(T_{liq}-T_{sol})}} \quad (3)$$

式中：C_λ为铸件材料常数；ΔP_{cr}为糊状区临界压降；μ为液体动力粘度；β为总凝固收缩率；T_{liq}为液相线温度；T_{sol}为合金100%凝固时的温度。

Carlson通过数值模拟和实际孔隙率对照验证了模型的准确性。由式（3）可以看出，铸件缩松缩孔与铁液压力、铁液成分、液相线温度和固相线温度等因素相关。

球墨铸铁QT1000-5本身具有较高强度和塑性，其化学成分和微观组织控制较其他球墨铸铁更为严格，较低的碳含量和铜、钼等合金元素的添加可以促进珠光体基体的形成。但碳含量降低使其在铸造成形中可用于析出和产生膨胀的石墨碳当量减少，石墨膨胀量不足，削弱了自补缩能力[16]。球墨铸铁的膨胀力难以克服铁液在凝固过程中的收缩量，导致其在凝固时内部压力不足，因此铸件出现缩孔缩松现象。

如前所述，球墨铸铁在共晶凝固时会产生巨大的石墨化膨胀力。虽然球墨铸铁QT1000-5的总膨胀量因低碳当量而减少，但其凝固速度较快，压力积聚可能更迅猛；若铸型刚度不够，型壁可能会在外部大气压或金属静压力的作用下向内产生微小移动，进而出现铸型崩砂现象。

2 方案优化及可行性验证

2.1 铸造方案优化

结合球墨铸铁在铁型覆砂铸造过程中产生缩松缩孔的原因，可通过优化浇注温度[17-18]、覆砂层厚度和铁液成分[19-20]等来降低铸件缩孔缺陷；同时，为了进一步减少铸型崩砂，还需对模具结构进行优化，以提高铸型刚度。优化措施如下：

（1）浇注温度。通过控制浇注温度，并将铁液从细薄位置引入，可使铁液更快地凝固并封闭通道。铸件内部共晶转变时析出石墨，石墨比容大于铁液而发生体积膨胀，砂型强度使其产生内压形成自补缩，可以在一定程度上弥补缩孔。浇注温度降低时进入铸型内部的热量减少，温度均匀化能力变弱，铸件内部温度梯度增加，能够减少缩松缩孔缺陷。但温度过低则会导致孕育剂不易溶解，石墨化不充分，增加铸件缩松缩孔的风险，因此将浇注温度控制在1 350~1 400 ℃之间[21]。

（2）铁液成分。当浇注温度为1 350 ℃、碳含量为4.3%，且硅含量较低时，在一定范围内提高碳含量能使石墨膨胀大于收缩，减小缩孔概率。此外，镁元素在组织中通常分布不均，且容易出现白口倾向，镁的偏析和夹杂的富集易引发缩松缩孔[22]。在铁液中加入适量磷、锰、钒等元素会使其热导率下降，流动距离增加，从而减缓凝固过程中的压力损失，有利于减少缩松缩孔缺陷[23]。初始铁液中含有3.9%~4.1%C、0.037%~0.045%RE、2.3%~2.6%Si和0.040%~0.047%Mg，根据上述分析，将铁液中最终碳含量控制在4.3%以上，硅含量控制在2.6%~2.7%，稀土元素和镁含量控制在0.05%以下。

（3）覆砂层厚度。不同覆砂层厚度会对铸件的凝固速度产生影响[24]，薄覆砂层会加快铁液凝固，减小液体收缩，从而在一定程度上控制缩松缩孔[25]。

（4）铸型结构优化。铸型刚性不足会使得石墨的膨胀力被无效释放，造成内部缩孔；铸型局部刚性强度不足则无法承受集中膨胀力，易导致铸型崩砂。增加砂箱厚度也会在一定程度上增加铸型刚度，从而减少崩砂问题[26]。

基于上述分析，在原有基础上优化了模具结构，同时对活块进行固定，增强其稳定性，如图4所示。

（a）铸造工艺　　（b）浇冒系统

图4 优化铸造工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optimized casting process

2.2 数值模拟分析

铸件内部缩松缩孔体积占总体积的百分比可通过孔隙率表示。借助ProCAST软件和Niyama准则对优化

前后的铁型覆砂铸造过程进行数值模拟，进一步探究浇注温度、铁液成分和覆砂层厚度对铸件缩松缩孔的影响。模拟参数见表2，优化前铸件缩松缩孔模拟结果见图5。

表2 优化前后的模拟参数
Tab. 2 The simulation parameters before and after optimization

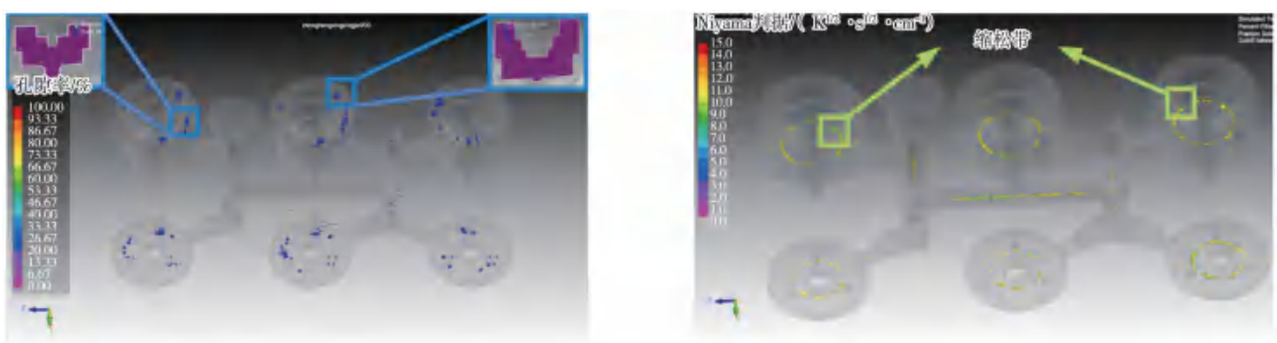
项目	浇注温度/℃	覆砂层厚度/mm	碳含量/%	硅含量/%
优化前	1 500	5	3.9~4.1	2.3~2.6
优化后	1 400	3	≥4.3	2.6~2.7

2.2.1 浇注温度的影响

将浇注温度从1 500 ℃降为1 400 ℃，铸件内部缩松缩孔模拟结果如图6所示。主要缩孔位置由行星架内部转移到浇注口上，孔隙率由优化前的60%~82%降低到25%~33%左右，Niyama判据值（$G/\sqrt{R}$）由9 $K^{1/2}\cdot s^{1/2}\cdot cm^{-1}$提高到9.6 $K^{1/2}\cdot s^{1/2}\cdot cm^{-1}$，说明控制浇注温度可以较好地避免铸件内部缩松缩孔缺陷。

2.2.2 铁液成分的影响

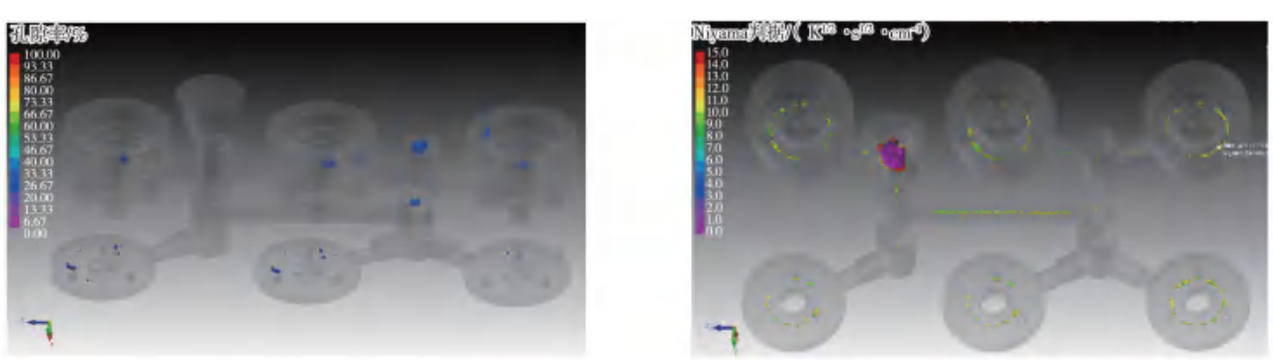
将铁液成分中的碳含量提高为大于4.3%，稀土含量控制在0.05%以下，硅含量提高为2.6%~2.7%，数值模拟结果如图7所示。孔隙率降低到35%~41%左右，



（a）孔隙率 （b）Niyama判据

图5 优化前铸件缩松缩孔分布

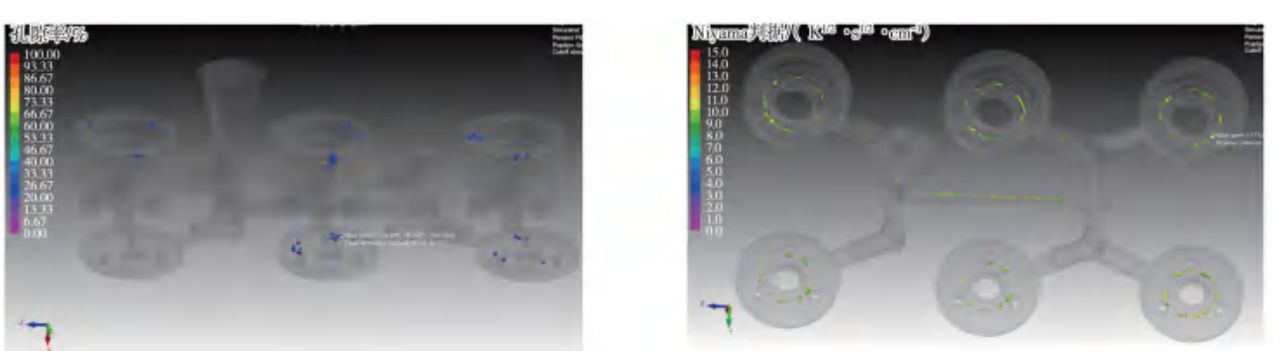
Fig. 5 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distributions in the castings before optimization



（a）孔隙率 （b）Niyama判据

图6 浇注温度优化后铸件缩松缩孔分布

Fig. 6 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distributions in the castings after pouring temperature optimization



（a）孔隙率 （b）Niyama判据

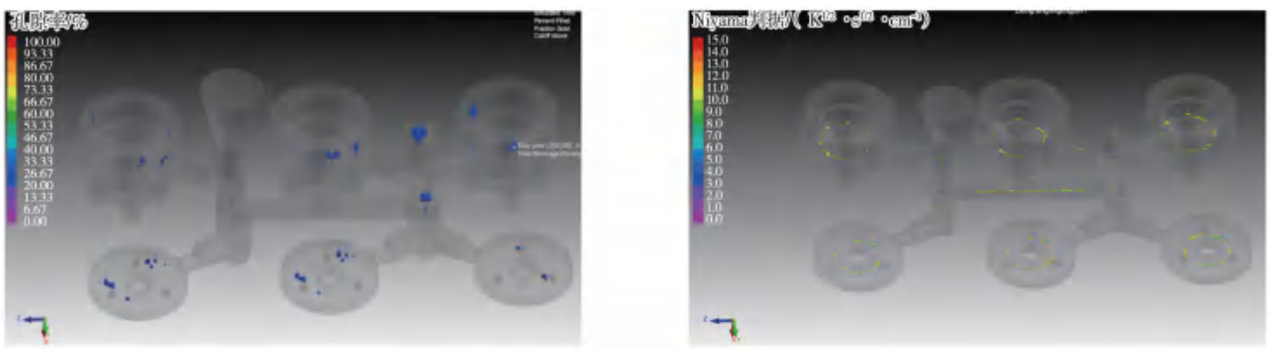
图7 铁液成分优化后铸件缩松缩孔分布

Fig. 7 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution in the castings after the molten melt composition optimization

Niyama判据值提高到9.5 $K^{1/2}\cdot s^{1/2}\cdot cm^{-1}$，优化铁液成分可以从一定程度上避免缩松缩孔缺陷。

2.2.3 覆砂层厚度的影响

将覆砂层厚度从5 mm改为3 mm，铸件内部缩松缩孔模拟结果如图8所示，最大孔隙率降低到40%~58%，Niyama判据值提高到9.22 $K^{1/2}\cdot s^{1/2}\cdot cm^{-1}$，说明减小覆砂层厚度对控制铸件内部缩松缩孔缺陷有一定帮助。



（a）孔隙率　　（b）Niyama判据

图8 覆砂层厚度优化后铸件缩松缩孔分布

Fig. 8 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distributions in the castings after sand coating thickness optimization

2.2.4 整体优化数值模拟

利用ProCAST软件开展浇注温度、铁液成分和覆砂层厚度整体优化后铁型覆砂铸造过程的数值模拟分析，对比凝固时间、孔隙率和缩松带的变化情况，探究优化方案的可行性。如图9所示，优化后整体充型平稳，最高温度为1 400 ℃，最低温度为1 304 ℃，平均温度1 365 ℃，满足浇注温度控制要求，冷隔风险低。

优化前后的凝固过程数值模拟结果如图10所示，优化后铸件凝固时间由430 s缩短为344 s，铁液收缩减小，使得球墨铸铁的膨胀力在一定程度上能控制铁液凝固过程中的补缩量，有利于减少缩松缩孔现象。

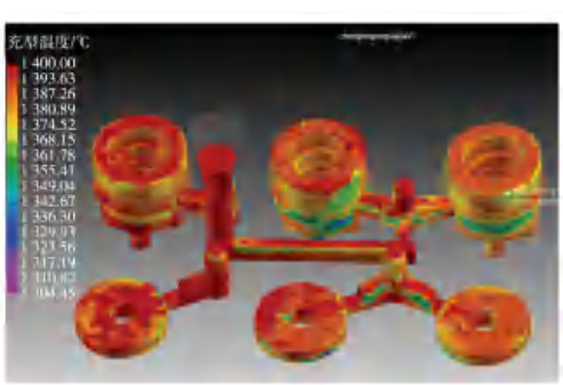
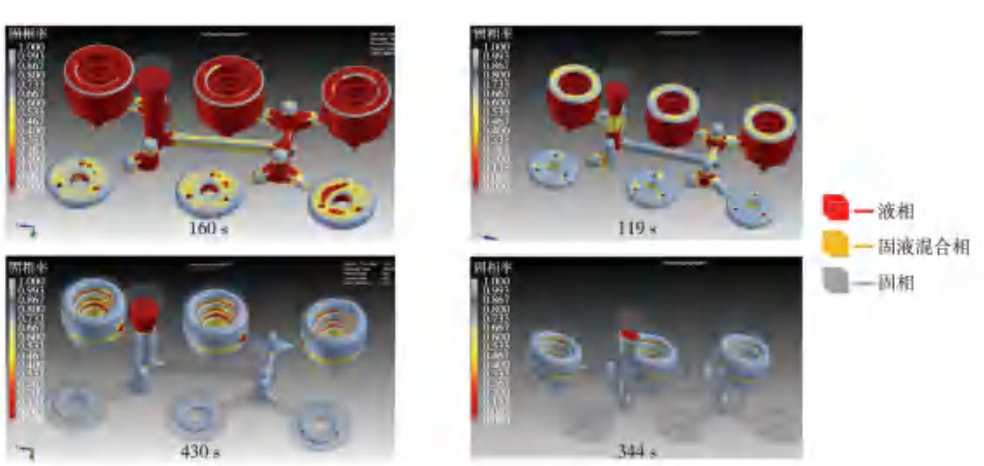


图9 优化后的充型过程模拟结果

Fig. 9 Simulation result of the mold filling process after optimization

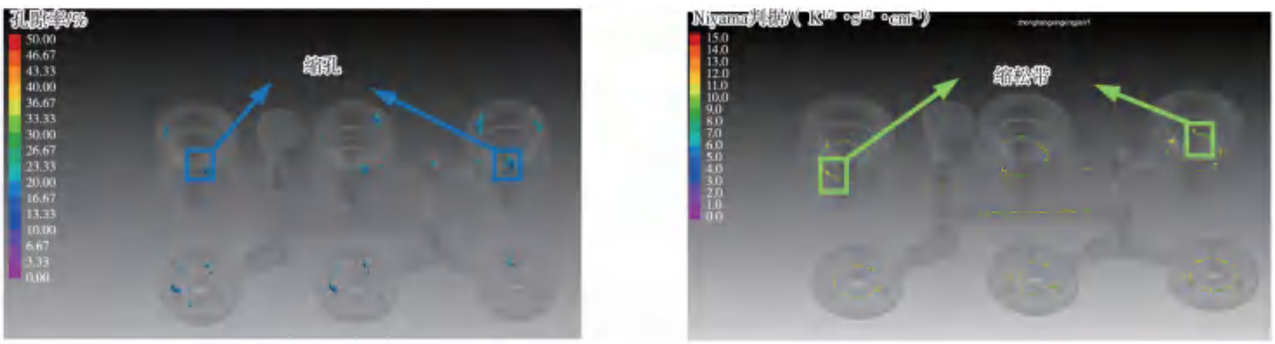
进一步通过孔隙率数值模拟分析和Niyama判据分析整体优化后二级行星架铸件内部缩松缩孔情况。如图11所示，孔隙率优化后降低为10%~20%，同时铸件心部的轻微缩松带明显减少。Niyama判据值提高为11.2 $K^{1/2}\cdot s^{1/2}\cdot cm^{-1}$，说明方案优化后铸件缩松缩孔缺陷减少。



（a）优化前　　（b）优化后

图10 整体优化前后凝固过程模拟结果

Fig. 10 Simulation results of the solidification process before and after overall optimization



（a）孔隙率　　（b）Niyama判据

图11　整体优化后铸件缩松缩孔分布

Fig. 11 Shrinkage cavity and shrinkage porosity distributions of the castings after overall optimization

2.3　生产验证

利用优化后的铁型覆砂铸造方案生产二级行星架，浇注温度为1 350~1 400 ℃，实际浇注时间在15~20 s，覆砂层厚度3 mm，环境温度26 ℃，浇注方式为重力浇注，成品如图12所示，整批产品约有2%出现缩孔，缩孔深度为3~5 mm，相较于优化前缩孔率降低了93.3%。

（a）优化前　　（b）优化后

图12　二级行星架成品图

Fig. 12 Finished products of the secondary planetary carriers

超声波探伤检测结果显示其符合GB/T 7233.1—2023标准Ⅰ级要求，可投入深海系统中使用。

3　结论

（1）针对深海传动用行星架铸件内部缩松缩孔问题，结合铁型覆砂铸造工艺和Niyama准则，分析得出铸件缩松缩孔缺陷与铁液压力、铁液成分、液相线温度和固相线温度等因素相关。

（2）利用ProCAST软件分别对浇注温度、铁液成分和覆砂层厚度开展了数值模拟分析。结果显示，浇注温度对缩松缩孔缺陷影响最大，其次是铁液成分，覆砂层厚度影响较小。在优化工艺参数下，二级行星架铸件凝固时间较优化前减少25%，最大孔隙率降为10%~20%，铸件心部缩松带明显减少。

（3）采用优化铁型覆砂铸造工艺生产的二级行星架缩孔率较优化前降低了93.3%，超声波探伤合格，可投入深海传动减速器中使用。

参考文献：

[1] 郭富航. 深海小型化高压齿轮泵效率特性分析 [D]. 洛阳：河南科技大学，2024：62.

[2] 赵红乐，张纬，孟少峰，等. 一种铸钢行星架产品的铸造工艺优化 [J]. 铸造，2021，70（11）：1356–1360.

[3] 张思泽，李建林，郑科泽，等. 铁型覆砂球墨铸铁曲轴冷隔缺陷的工艺改进 [J]. 铸造工程，2023，47（3）：45–48.

[4] 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.

[5] 刘金城，龚文邦. 国外ADI、AGI和ACGI研发的一些新动向 [J]. 铸造，2021，70（10）：1149–1154.

[6] 梁桂香，崔炜，李仁辉. 玉柴成功研发QT1000-5材料填补国内外高强度铸铁领域空白 [J]. 铸造设备与工艺，2020，（2）：67.

[7] 寇伟伟. 铁型覆砂铸造充型过程研究及球墨铸铁曲轴冷却分析 [D]. 杭州：浙江工业大学，2013.

[8] 艾云龙，刘长虹，罗军明. 工程材料及成形技术 [M]. 北京：科学出版社，2007.

[9] 周孝林. 基于智能制造技术的模具设计优化研究 [J]. 模具制造，2026，26（2）：38–40.

[10] 夏小江，高强. 铁型覆砂铸造的生产工艺要素及装备规划 [C]//第十八届中国铸造协会年会论文集，2022：408–412.

[11] 董凌云. 铁型覆砂铸造凝固过程分析及其无冒口铸造技术研究 [D]. 杭州：浙江工业大学，2011.

[12] 李弘英，赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京：机械工业出版社，2005.

[13] 夏小江，黄列群，潘东杰，等. 国内覆砂铁型铸造的应用概况 [J]. 现代铸铁，2017，37（6）：35–38.

[14] 田学雷，刘志勇，李光友，等. 金属液压力对缩松预测的影响 [J]. 中国铸造装备与技术，2001（4）：9–11.

[15] Carlson K D，Beckermann C. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless Niyama criterion [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2009，40：163–

175.

[16] 郑洪亮，田卫星，孙建俊，等. 球墨铸铁缩松形成机理研究的现状 [J]. 铸造，2005，54（11）：5–7.

[17] Li C M，Zhang A，Li Y F，et al. 3D morphological characteristics of shrinkage porosities and their relationship with microstructures in Mg-12Al magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2026，36：96–111.

[18] Xiao Y Z，Xiao C B，Chang D K，et al. Time-varying disturbances of temperature field in investment casting and corresponding shrinkage defects control methods [J]. Journal of Materials Research and Technology，2025，35：5147–5159.

[19] Li S，Jiang H，Yao Z H，et al. Effect of liquid characteristics during final stage of solidification on shrinkage porosity in IN718 superalloy [J]. Materials & Design，2025，260：115010.

[20] Li C M，Zhang A，Li Y F，et al. Three-dimensional characteristics of shrinkage porosities in Mg-*x*Al-1Zn-0.2Mn alloys and their relationship with microstructures [J]. Journal of Materials Research and Technology，2024，33：9372–9385.

[21] 梅俊，蔡启舟，吴和保，等. 影响薄壁球铁件缩孔缩松形成的几个因素 [J]. 现代铸铁，2003（1）：50–53.

[22] Srivatsan T S，Sudarshan T S. The influence of phosphorus onshrinkage porosity in cast irons [J]. Materials Letters，1999，41（4）：186–191.

[23] 郝石坚. 现代铸铁学 [M]. 2版. 北京：冶金工业出版社，2009.

[24] 黄列群，董凌云，潘东杰，等. 铁型及覆砂层厚度对铸件凝固的影响 [J]. 机电工程，2012，29（2）：163–166.

[25] 李文生. 解决曲轴连杆档内缩松缺陷的措施 [J]. 铸造设备与工艺，2019（5）：41–42.

[26] 宋东君，沈旭，赵金跃，等. 浇注温度和铸型刚度对阀体缩松缺陷的影响研究 [J]. 铸造工程，2025，49（2）：58–62.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）