

# 海洋平台四支管节点铸造工艺数值模拟

姚丽苹<sup>1</sup>, 游龙<sup>1</sup>, 王强<sup>2</sup>, 张欣<sup>3</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南洛阳 471023; 3. 南阳理工学院 智能制造学院, 河南南阳 473000)

**摘要:** 根据海洋平台用四支管节点的材质和结构特点进行了铸造工艺设计并采用ProCAST软件对节点铸件充型凝固过程进行了数值模拟验证和工艺优化。结果表明: 应用优化后的工艺方案, 金属液充型平稳, 实现了自下而上的顺序凝固, 铸造孔洞缺陷集中在冒口中, 成功生产出了满足探伤级别要求的节点铸件。

**关键词:** 海洋平台; 节点铸件; 铸造工艺; 数值模拟

节点是自升式钻井平台和固定导管架式生产平台的关键部位, 以往都采用焊接, 造成节点处应力集中, 在风浪等外力作用下, 易产生疲劳裂纹, 进而使平台发生重大事故。为了解决这个关键问题, 人们把交叉的焊接接头改为铸造接头, 通过实尺结构试验和计算表明, 节点以铸造代替焊接能显著提高疲劳寿命, 降低应力集中并使节点的质量减轻<sup>[1]</sup>。铸造节点与焊接节点相比, 具有以下特点: ①根据工程需要设计成各种形状复杂的结构形式, 并且尺寸不受限制; ②在局部高应力区采用圆形倒角和过渡圆滑的截面, 外形美观同时提高使用性能; ③因为铸件壁厚不受限制, 铸件的壁厚变化容易控制; ④减轻应力集中, 有利于疲劳强度, 避免在交叉应力部位的角焊缝焊接; ⑤对搭接焊缝结构, 可直接使用铸件, 这样刚性面有利于设计时考虑其应力和刚性; ⑥可以简化制造工艺, 如切割、装配和焊接, 易于实施全面的无损检测; ⑦减少制造时间<sup>[2-6]</sup>。

节点铸件由多根管以不同的空间角度汇聚于一点, 具有直径大、形状复杂和质量大等特点, 加工制作难度极大<sup>[7-8]</sup>。目前国内节点铸件主要应用于厂房、仓库、体育馆、展览馆、会场、航站楼、车站、办公楼、商住楼和宾馆等建筑中, 国内能够生产大型节点铸件的企业不多, 且铸造工艺一般采用木模和水玻璃砂造型, 这种铸造工艺存在造型困难、木模浪费严重和废品率较高等问题<sup>[9]</sup>。因此, 海洋平台装置构件等重要部件需要采用适宜的材料选择, 以及缺陷少、性能稳定的铸造技术。吴志超等针对节点铸件水玻璃砂铸造工艺中存在的问题, 提出了消失模-砂型复合铸造工艺, 用泡沫替代木模制作节点外轮廓模样, 木模制作砂芯, 采用实心泡沫模型和水玻璃砂造型, 砂型硬化后采用破坏方式将泡沫取出, 下入砂芯, 合箱浇注, 成功生产了节点铸件。该工艺利用了消失模泡沫模样设计的高自由度、泡沫加工容易且价格低廉的优势<sup>[10]</sup>。Gao YQ等针对节点铸件在实际生产中易产生缩孔与热裂纹缺陷的特点, 采用ProCAST软件优化了冒口与冷铁的设计, 获得了经超声波检测合格的节点铸件<sup>[11]</sup>。游龙等根据海洋平台用六支管节点的结构特点, 采用ProCAST软件对节点充型与凝固过程进行了数值模拟与工艺优化, 保证了铸件质量, 获得了检测合格的铸造六支管节点<sup>[12]</sup>。

本研究针对某海洋平台用四支管节点的结构特点, 利用数值模拟技术计算了节点铸件充型、凝固过程, 预测了缺陷位置, 针对缺陷进行了铸造工艺优化, 最终成功生产了海洋平台用节点铸件。

## 作者简介:

姚丽苹(1985-), 女, 硕士, 主要研究方向为铸造合金、铸造工艺设计和制备。

E-mail: jshang002@126.com

## 通信作者:

游龙, 男, 副教授。E-mail: youlong25@163.com

中图分类号: TG24;

TP311.52

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1276-06

## 基金项目:

河南省科技攻关项目  
(232102230061)。

## 收稿日期:

2024-10-11 收到初稿,

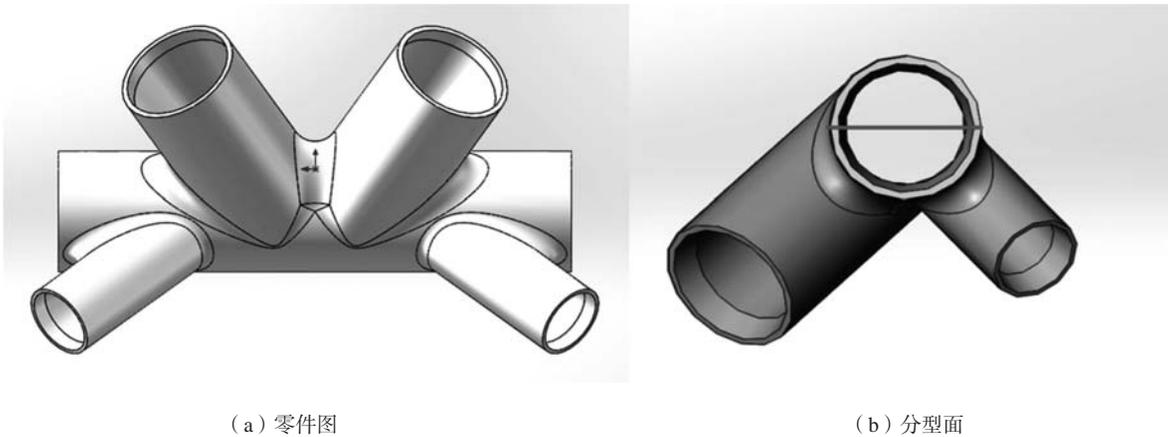
2024-12-16 收到修订稿。

## 1 节点铸件原始铸造工艺设计

四支管节点铸件结构为多个薄壁圆筒件的结合体，轮廓尺寸为3 300 mm×800 mm×2 195 mm，壁厚不均匀，主管壁厚为96 mm，大支管壁厚为91 mm，小支管壁厚为66 mm，零件质量为9.5 t。主管与支管交接处形成多个孤立、分散的热节，不利于实现铸件的顺序凝固，易产生缩孔，铸造收缩率难以准确掌握，尺寸不易保证。同时相对于较大的铸件外廓尺寸，壁厚设计显得较薄，极易出现缩松、缩孔、浇不足以及裂纹等缺陷。铸件热节分布分散，仅依靠冒口很难进行补缩，还需依靠冷铁和补贴的合理配合，以期获得致密的铸件。四支管节点铸件零件结构如图1(a)所示。

示。

节点分型面的选择需要注意：尽可能将铸件的全部或者大部放在同一个砂箱内，以减小错型造成的尺寸偏差，选择分型面与浇注位置如图1(b)所示，各支管位于下型中。造型制芯方面，铸钢节点内腔尺寸较大，主管砂芯定位较易，但支管砂芯定位难度大，须依靠芯撑进行固定，造型采用消失模与砂型复合造型，充分利用了消失模泡沫模样设计的高自由度、泡沫加工容易且价格低廉的优势，铸件尺寸有一定的保证。铸件为大型薄壁件，且高度较高，浇注系统在保证平稳浇注、快速充型的同时还要避免冲击砂芯，浇注系统宜采用底注式。



(a) 零件图

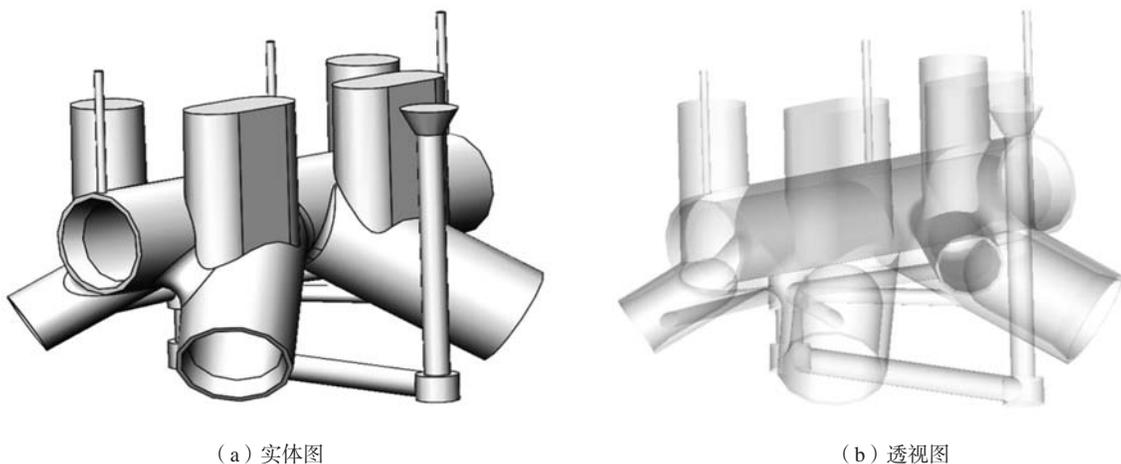
(b) 分型面

图1 四支管节点零件与铸造分型面示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of four branch pipe node component and casting parting surface

节点原始铸造工艺设计如图2所示：①支管管口朝下，利于砂芯的安装；②4个冒口放置于铸件的热节处，冒口下部设置有补贴，与热节连接，其中大支管与主管连接处由于热节尺寸大而采用腰圆形冒口，小

支管与主管连接处采用圆柱形冒口；③横浇道位于铸件下部，钢液自下而上地充型，利于气体排出；④底部的支管各连接一条内浇道，利于钢液平稳充型；⑤主管上设置了3个排气冒口，便于排出型内气体，防止



(a) 实体图

(b) 透视图

图2 节点铸件初始铸造工艺方案示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of initial casting process plan for node casting

浇不足。

节点的浇注系统采取开放式浇注系统，底注式浇注，浇道比为： $\sum A_{直} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : 1.1 : 1.44$ 。冒口尺寸采用模数法计算，大支管与主管连接处铸件的模数  $M_{C1} = 8.6$  cm，腰圆形冒口模数为  $M_{R1} = 1.2 \times 8.6 = 10.32$  cm，取整为10.5 cm，通过查表可知冒口的具体尺寸。小支管与主管连接处铸件的模数  $M_{C2} = 5.5$  cm，圆柱形冒口模数为  $M_{R2} = 1.2 \times 5.5 = 6.6$  cm，取整为6.75 cm，通过查表也可知冒口的具体尺寸<sup>[13]</sup>。

## 2 原始工艺数值模拟研究

### 2.1 数值模拟前处理

首先采用SolidWorks构建节点铸件、冒口与浇注系统的三维图形，然后将实体文件导入ProCAST软件Visual-Environment模块中，对模型进行检查、修复和装配，并进行面网格和体网格的划分。铸件网格单元长度取10 mm，浇注系统网格单元长度取40 mm，冒口网格单元长度取90 mm。面网格总数为60 150个，体网格总数为258 550个。然后选择合适的热物性参数和

边界条件，节点铸件材料为低碳钢，其化学成分如表1所示。计算可知合金液相线温度为1 526 ℃，固相线温度为1 446 ℃。铸型材料为水玻璃石英砂。针对大型铸件砂型铸造，为减少数值模拟的计算量，采用虚拟砂箱。合金与铸型之间的界面换热系数根据经验选取典型值为500 W/(m<sup>2</sup>·K)，铸件浇注温度为1 620 ℃，砂型初始温度为25 ℃，浇注速度128 kg/s，浇注时间217 s。

表1 节点铸件的化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of node casting

|      |      |      |      |       | $w_B / \%$ |
|------|------|------|------|-------|------------|
| C    | Si   | Mn   | S    | P     | Fe         |
| 0.08 | 0.08 | 0.31 | 0.05 | 0.030 | 其他         |

### 2.2 充型过程数值模拟分析

前处理完成后，对节点铸件充型与凝固过程进行了数值模拟，并分析预测铸件缩孔缩松缺陷位置。铸钢节点充型过程的温度场分布和金属液充填状态变化情况如图3所示。

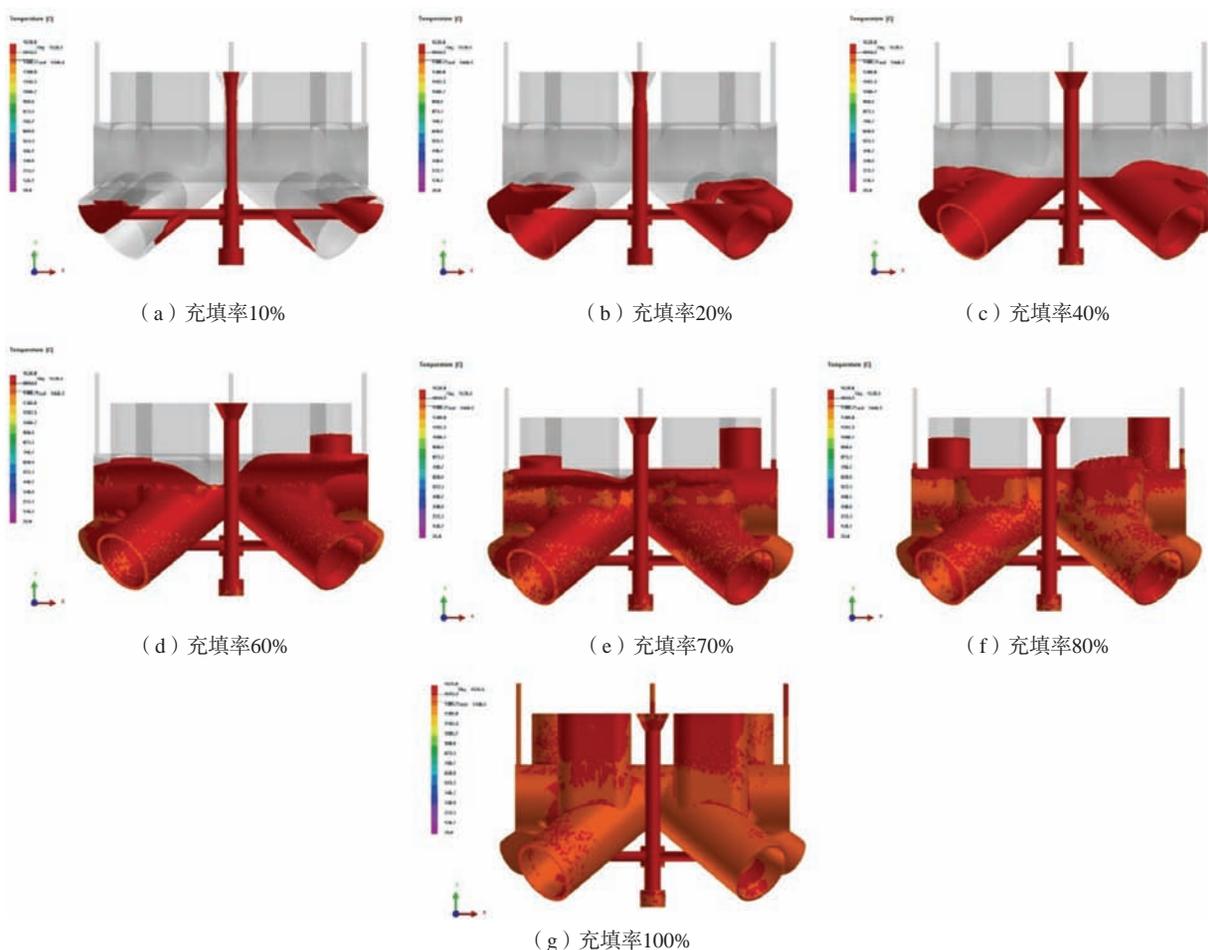


图3 四支管节点铸件充型过程温度场分布

Fig. 3 Temperature field distributions during the mold filling process of four branch pipe node casting

由图3可知,金属液首先通过底注式浇注系统内浇道流入四个支管型腔,金属液填充率从0~40%的阶段,流动较为平稳,金属液在型腔内的上升速度也比较平缓,符合浇注系统设计要求。当金属液填充率达到60%~80%时,型腔内的金属液大致保持在同一水平线上,且上升平稳,随后逐渐充满冒口,充型过程完成。

### 2.3 凝固过程数值模拟与缺陷分布

节点铸件凝固时间云图以及孔洞缺陷预测结果如图4所示。为简化分析,在X方向上截取了两个热节尺

寸较大的关键截面X1与X2,如图4(a)所示。X1面凝固时间云图如图4(b)所示,圆柱形冒口凝固时间最长,达到了工艺设计的需求,但小支管与主管交接热节处的凝固时间要长于周边部位,形成孤立液相区,铸件的缺陷预测结果如图4(c)所示,热节处存在孔洞缺陷。X2面凝固时间云图如图4(d)所示,腰圆形冒口凝固时间最长,大支管与主管交接热节处的凝固时间要长于周边部位,如图4(e)所示该热节处也存在孔洞缺陷。根据数值模拟结果,此工艺方案中出现了补缩通道提前隔断,造成节点铸件内部形成液相孤立区,最后形成了孔洞缺陷。

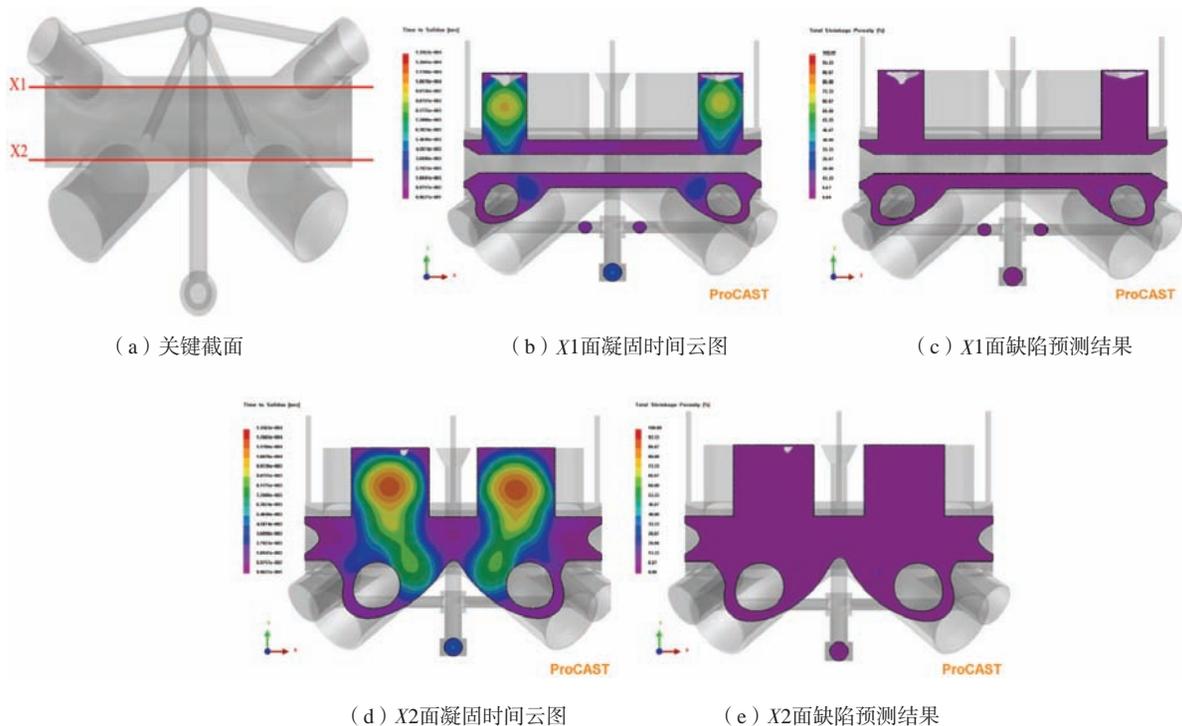


图4 四支管节点铸件凝固时间云图及缺陷概率分布情况

Fig. 4 Cloud maps of solidification time fields and defect probability distributions of four branch pipe node casting

## 3 节点铸件铸造工艺优化设计

针对原始工艺方案造成的冒口未能有效补缩的问题,在四个支管与主管交接处支管内设置随形冷铁,确保型腔中的钢液在凝固过程中实现有效的顺序凝固,优化后铸造工艺方案如图5所示。

优化工艺后的节点铸件凝固时间云图以及孔洞缺陷预测结果如图6所示。X1面凝固时间云图如图6(a)所示,圆柱形冒口凝固时间最长,与原始方案相比,小支管与主管交接热节处的凝固时间显著缩短,能获得冒口有效补缩,形成了自下而上的顺序凝固,如图6(b)所示,孔洞缺陷最终存在于冒口中。X2面凝固时间云图如图6(c)所示,腰圆形冒口凝固时间最长,

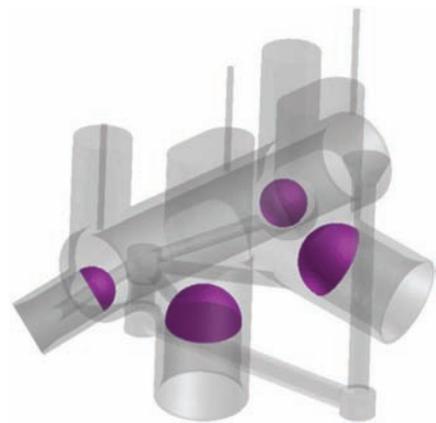


图5 优化后铸造工艺方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of casting process plan after optimization

大支管与主管交接热节与冒口的补缩通道畅通,如图6(d)所示,孔洞缺陷最终也存在于冒口中。显然优化

后工艺中的冒口、冷铁、补贴等措施保证型腔中的钢液在凝固过程中实现了有效的顺序凝固。

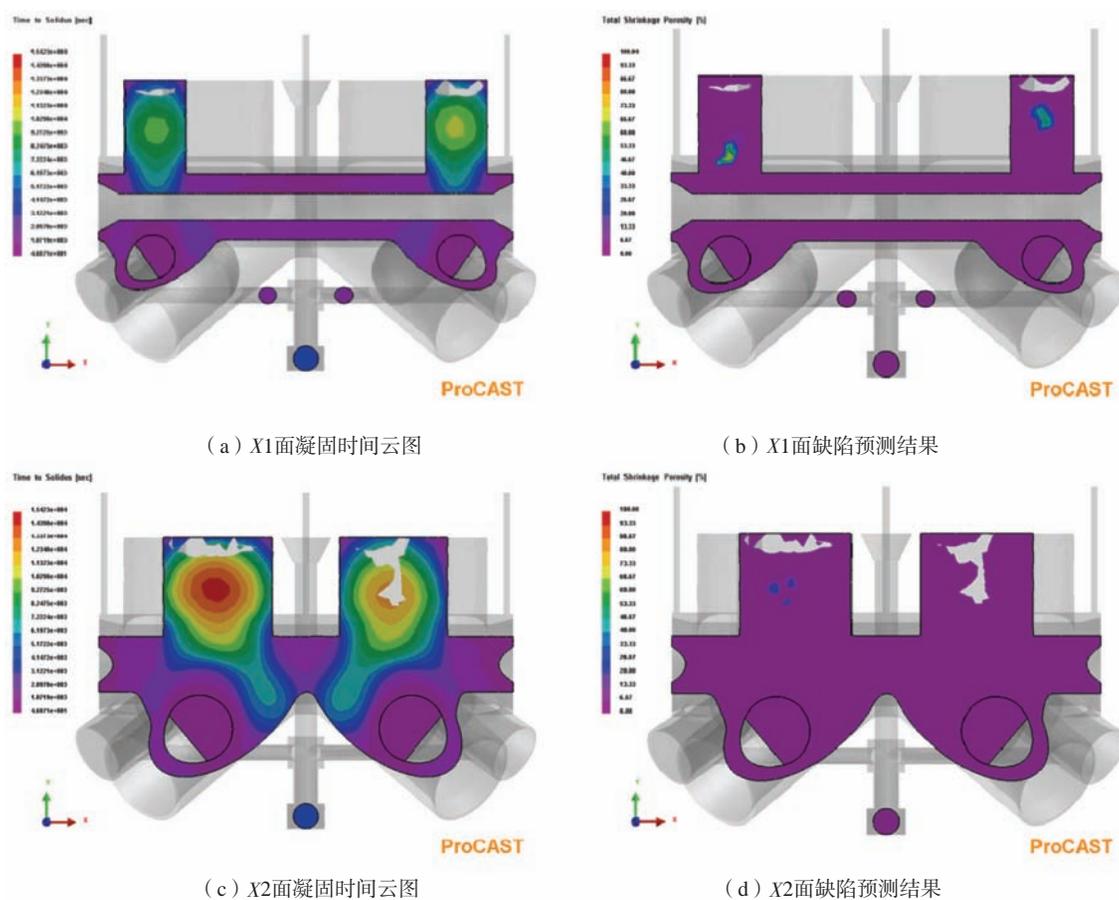


图6 工艺优化后四支管节点铸件凝固时间云图及缺陷概率分布情况

Fig. 6 Cloud maps of solidification time fields and defect probability distributions of four branch pipe node casting after process optimization

#### 4 节点铸件的生产与后处理

节点铸件的冶炼方案为:EBT电弧炉冶炼→LF钢包精炼→VD真空精炼→浇注。采用优化后的铸造工艺,铸件毛重10.2 t,钢液总重15.7 t。节点的造型采用消失模-砂型复合工艺,工艺原理如下:用泡沫替代木模制作节点铸件外轮廓模样,局部薄壁位置采用木模制作砂芯;采用实心泡沫模样和水玻璃砂造型,砂型硬化后采用破坏方式将泡沫取出,然后下入砂芯,砂芯需要使用芯撑固定,最后合箱浇注。复合工艺不仅利用了消失模泡沫模样设计的高自由度、泡沫加工容易且价格低廉的优势,避免了变形、增碳的问题,而且保留了砂型铸造充型平稳,铸件成分、尺寸稳定的优点。铸型冷却一段时间,用红外线测温仪测量冒口根部温度在350℃以下时,开始打箱,利用余热气割冒口,气割后冒口需放在原处保温,以避免冒口下部产生裂纹。后处理的具体工序为:打箱→落砂清理→去应力退火→割除浇冒口→预备热处理(正火)→尺寸

检测+精整→热处理(淬火+高温回火)→抛丸→初检(外观、尺寸)→毛坯尺寸终检→机加工→零件尺寸检测。最终试验获得了满足内部无裂纹缺陷,超声波探伤达到标准2级的四支管节点铸件,如图7所示。



图7 试验获得的四支管节点铸件

Fig. 7 Four branch pipe node casting obtained from the experiment

## 5 结论

(1) 设计并优化了海洋平台四支管节点铸件铸造工艺, 并采用数值模拟方法验证了优化工艺的合理性。

(2) 采用优化后工艺以及消失模与砂型复合造型技术进行试生产, 获得了满足内部探伤标准要求的节点铸件。

### 参考文献:

- [1] 汤聚法. 海上采油平台管节点用钢特点 [J]. 钢结构, 1986 (1): 38-47.
- [2] 安文在, 王文举. 海上采油平台用的铸钢节点 [J]. 一重技术, 1991 (2): 69-74.
- [3] 刘锡良, 林彦. 铸钢节点的工程应用与研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2004, 6 (1): 12-17.
- [4] 杨茹萍, 庞秀芝, 宋邦金, 等. 海洋平台管接点应力分析三种方法讨论 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 1994 (2): 73-78.
- [5] 周旭, 莫健, 李向明, 等. 可锻铸铁连接件铸造工艺的优化研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (1): 91-97.
- [6] 周楚昊, 郭树人, 向东, 等. 基于零件结构特征计算的铸造工艺数据库研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (10): 1466-1472.
- [7] 陈荣毅. 大型铸钢节点的设计与分析 [J]. 广东土木与建筑, 2004 (2): 6-8.
- [8] 刘迎辉, 余朋, 潘徐政, 等. 铸造工艺数据驱动的工程机械铸件缺陷预测 [J]. 铸造, 2024, 73 (9): 1329-1335.
- [9] 吴涛. 铸钢节点在大跨度管桁架建筑钢结构中应用 [J]. 科技资讯, 2011 (9): 89, 133.
- [10] 欧阳书荀, 方雷, 吴志超, 等. 铸钢节点的消失模-砂型复合铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (1): 63-66.
- [11] GAO Y Q, SUN S J, JIN H. Casting simulation of cast steel joint based on Pro-CAST [C]// 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 592 (2019) 012086.
- [12] YOU L, YAO L P, LI X Y, et al. Numerical simulation and casting process optimization of cast steel node [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2023, 126 (11-12): 5215-5225.
- [13] 李弘英, 赵成志. 铸造工艺设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

---

# Numerical Simulation on Casting Process of Four Branch Pipe Node for Offshore Platform

YAO Li-ping<sup>1</sup>, YOU Long<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 3. School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473000, Henan, China)

### Abstract:

According to the material and structural characteristics of four branch pipe node for offshore platform, the casting process was designed, and numerical simulation verification of the mold filling and solidification processes of the node casting were carried out and the casting process was optimized by using of ProCAST software. The results show that applying the optimized process scheme, the liquid metal filling is stable, sequential solidification from bottom to top is achieved, and the defects of the casting cavities are concentrated in the feeders, the node casting met the requirement of flaw detection level being successfully produced.

### Key words:

offshore platform; node casting; casting process; numerical simulation

---