

精密铸造不锈钢弯管支架的工艺优化

郭晓轩¹, 陈春峰², 李泽芝¹, 周士金², 孙震兆¹, 赵平¹

(1. 青岛科技大学材料科学与工程学院, 山东青岛 266042; 2. 淄博金东机械制造有限公司, 山东淄博 256104)

摘要: 通过UG软件建模以及AnyCasting软件对304不锈钢弯管支架进行了精密铸造的数值模拟, 预测了铸件缩孔缺陷的分布情况, 并对浇注系统进行改进。通过分析铸件结构, 改变焙烧温度、浇注温度等生产工艺参数, 并进行实际生产。利用金相显微镜、扫描电子显微镜等表征手段对工艺优化前后的样品进行检测与分析。结果发现: 铸件宏观与微观的缩孔缩松缺陷都明显减少, 力学性能提高, 夹杂物数量减少, 组织与硬度更均匀, 为不锈钢薄壁管架铸件的生产提供了参考。

关键词: 精密铸造; AnyCasting; 不锈钢支架; 工艺优化

基于国民经济的快速发展, 不锈钢消费总体趋势受国内需求量快速增长的牵引拉动, 市场潜力巨大^[1]。304不锈钢是一种常见的不锈钢材料, 国标牌号为06Cr19Ni10, 业内亦叫做18/8不锈钢, 意思是含有18%以上的Cr和8%以上的Ni^[2]。因其具有耐800℃高温、加工性能好和韧性高等特点, 被广泛应用于机械、食品和医疗等行业^[3], 是目前市场上需求量最大的不锈钢品种。在精密铸造领域, 304不锈钢是应用最广泛的材料之一。精密铸造304不锈钢制品表面光洁度高、尺寸精准, 作为零部件可以提升产品性能和可靠性, 能满足市场对高品质产品的需求, 成为推动产业升级的重要力量^[4]。同时, 不锈钢的可循环再利用能够减少材料浪费, 提升生产效率, 符合可持续发展的理念。

不锈钢弯管支架主要用于固定软管并改变朝向, 是软管与支架两个不同材料之间的连接件。但在实际生产过程中, 由于其不规则的外形与生产工艺的影响^[5], 在精密铸造时常会产生缩孔、卷气等缺陷。铸件存在大量缩孔, 会直接导致铸件的报废, 最终成品率不足20%, 且仍需返工, 生产损失较大。该零件设计要求铸件表面平滑, 不得有缩孔、裂纹等铸造缺陷, 且要有合适的硬度。本试验通过UG软件建模并导入AnyCasting软件, 对不锈钢弯管支架的原始工艺进行了数值模拟分析, 根据模拟结果优化浇注系统的设计以及部分工艺参数, 利用金相显微镜、扫描电子显微镜等表征手段对工艺优化前后的样品进行检测与分析及力学性能对比, 解决缩孔缩松缺陷, 提高了产品质量。

1 试验材料与方法

不锈钢弯管支架大体可看作半圆形, 底部为实心圆柱, 圆弧处有U形凹槽, 并且还有两个U形凸起。底部圆柱直径为12 mm, 其余部分平均厚度为2.5 mm。材料为304不锈钢, 密度为7.93 g/cm³, 其化学成分见表1。通过UG软件对不锈钢弯管支架进行三维建模, 如图1所示, 底部块体为原始工艺方案水口。同时根据模拟分析, 预测该铸件的缩孔缩松缺陷的位置为U形凹槽顶部的热节处。

表1 304不锈钢成分
Tab. 1 304 stainless steel composition

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	w _B /%
≤0.08	≤1.0	≤2.0	≤0.04	≤0.04	18.0~21.0	8.0~11.0	

作者简介:

郭晓轩(2000-), 男, 硕士生, 主要从事先进材料领域的研究开发工作。
E-mail: 1652785423@qq.com

通信作者:

赵平, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zhaoping@qust.edu.cn

中图分类号: TG249.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0801-07

基金项目:

山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2024TSGC0319、2022TSGC2246); 山东省淄博市重点研发计划基金资助项目(2021XCYP0010)。

收稿日期:

2024-08-09 收到初稿,

2024-09-07 收到修订稿。

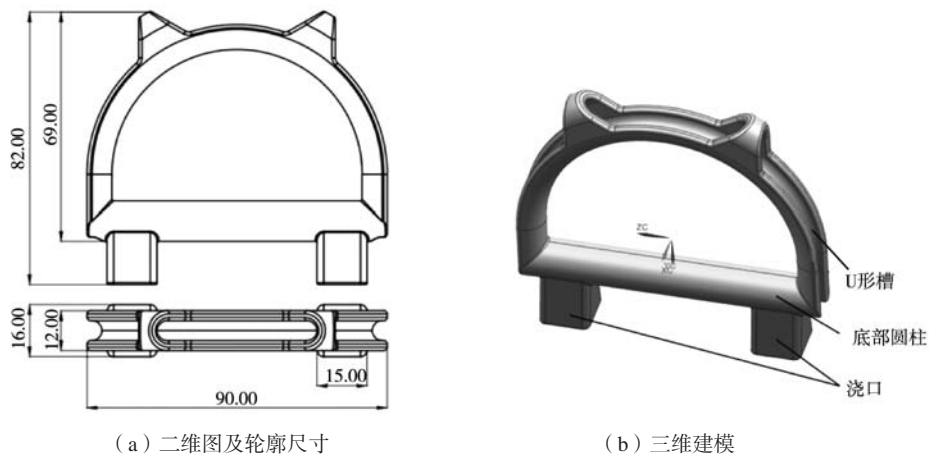


图1 不锈钢弯管支架

Fig. 1 Stainless steel bend bracket

分析该不锈钢铸件的结构特点,铸件整体形状不规则,顶部跟底部厚度差异较大,U形槽处壁厚薄,整体属于薄壁复杂零件。在铸造过程中,应保证充型过程平稳,各个部位都能得到完整充型、补缩。根据实际生产要求与生产条件,不锈钢弯管支架铸件采用直浇道、平注式浇口的设计。一树20件,出品率为45%左右,组树方案如图2所示。

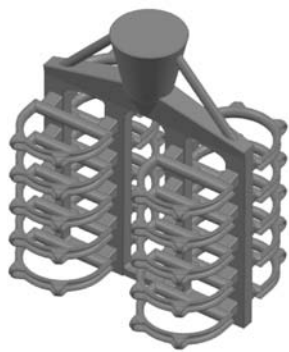


图2 组树模型图

Fig. 2 Group tree model diagram

304不锈钢固相线温度为1 411.2 ℃,液相线温度为1 461.9 ℃^[6]。型壳一共六层:

第一层:硅溶胶+锆英粉325目+湿润剂+除泡剂浆料,詹式流杯粘度值为40~45 s,撒80~120目锆英砂,室温21 ℃,湿度63%,干燥时间4~6 h。

第二、三层:硅溶胶+锆英粉325目+莫来石粉200目浆料,詹式流杯粘度值为24~30 s,撒30~60目莫来石砂,室温20 ℃,湿度50%,干燥时间8~10 h。

第四、五层:硅溶胶+莫来石粉200目浆料,詹式流杯粘度值为13 s,撒16~30目莫来石砂,室温20 ℃,湿度50%,干燥时间8~10 h。

封层:硅溶胶+莫来石粉200目浆料,詹式流杯粘

度值为13 s。室温20 ℃,湿度50%,干燥时间8~10 h。

型壳厚度约8 mm,焙烧温度为1 050 ℃,焙烧时间为35 min。铸件在重力的作用下沿负Z方向采用顶注式和自然冷却的方式,浇注温度为1 600 ℃。

2 试验结果与分析

2.1 数值模拟参数设置

在进行精密铸造数值模拟时,为了获得精度更高的结果,需要准确设置相关参数。本试验在AnyCasting软件中设置如下参数:铸件材料为304不锈钢,浇注温度为1 600 ℃,型壳厚度8 mm,划分总网格数为997 375,型壳焙烧温度为1 050 ℃,充型高度为10 cm,重力设置为9.8 m/s²,顶注式空冷,铸件与型壳、铸件与空气之间的热交换系数均为1000 W/(m²·K),型壳与空气之间的热交换系数设为50 W/(m²·K)。

2.2 数值模拟结果与分析

不锈钢弯管支架的原始工艺方案充型状态如图3所示。金属液在型腔中平稳上升,在第一层铸件有微弱冲击型腔的现象。1 s时金属液充满底层浇道,并开始充填最下层铸件,3 s时充型到一半左右,6 s时铸件充型完成,8 s时全部充型完成。

凝固顺序直接决定了铸件质量的好坏^[7],原始工艺方案的不锈钢弯管支架凝固顺序如图4所示。铸件凝固的过程基本按照由外向内、由下向上的顺序凝固,符合最优凝固顺序,有利于获得高质量铸件。80 s时开始由外向内凝固,从远离浇口处向浇口位置凝固,679 s时铸件已基本完全凝固。

不锈钢弯管支架的原始工艺方案缩孔位置如图5所示。经过数值预测模拟后发现,缩孔主要出现在U形凹槽的顶部两端,呈对称分布。缺陷主要出现在铸件表

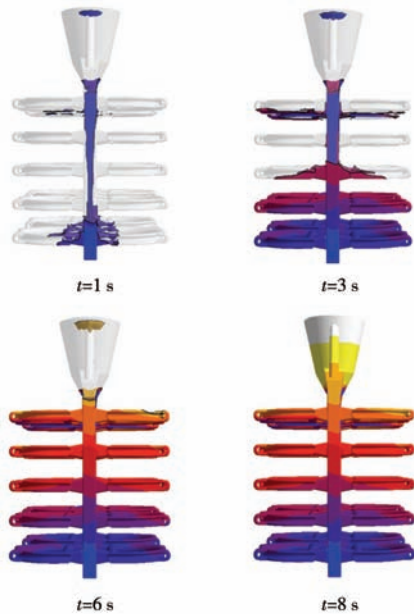


图3 不同时刻铸件充型情况

Fig. 3 Mold filling conditions of casting at different time

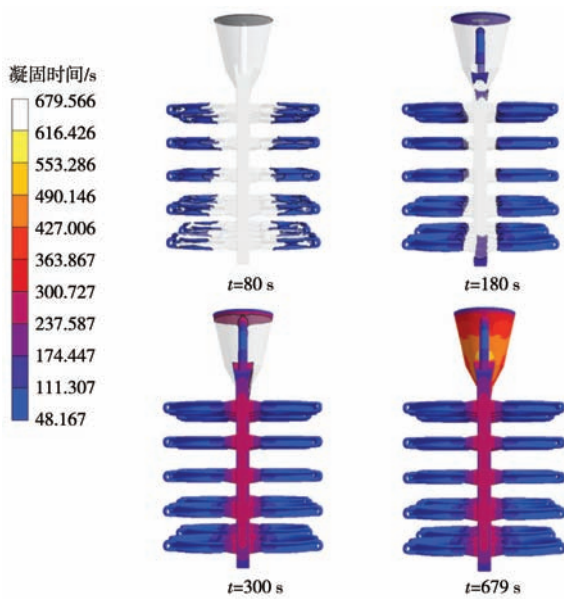


图4 不同时刻铸件凝固情况

Fig. 4 Solidification situations of casting at different time

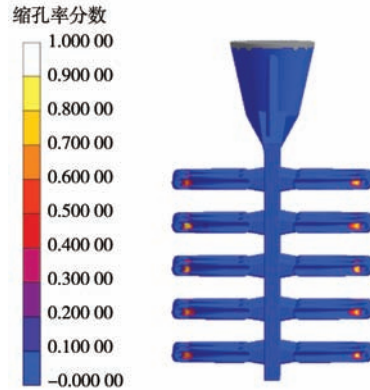


图5 铸件缩孔分布

Fig. 5 Distributions of shrinkage cavities in castings

面，此部位出现缩孔的概率接近50%，导致铸件的质量不合格，废品率较高，与实际生产过程中发现的问题相符合，证明数值模拟的效果较好。实际生产过程中铸件缺陷如图6所示。缩孔缺陷产生的原因，主要是工艺参数以及浇道设计、组树方案等方面不合理，从而导致了该位置不能及时补缩，产生了缩孔缩松缺陷。为了降低出现缩孔的概率，解决缺陷问题，提升产品质量，需要对浇注系统以及工艺参数进行改进。

2.3 浇注系统的分析与改进

根据不锈钢弯管支架的原始工艺数值模拟结果可以得出，铸件的缩孔、缩松缺陷主要集中在最大热节处，位于U形凹槽的顶端。根据数值模拟结果推测产生这些缺陷的原因是铸件在凝固收缩阶段时，由于内浇道部分先凝固，导致补缩通道堵塞，铸件在冷却收缩时因体积收缩而没有及时得到补缩造成的。

基于以上分析的原因，在原始工艺方案上进行浇道改进，着重对铸件，尤其是对铸件顶部U形凹槽的补缩设计进行改进。重新设计了以下两种工艺方案，如图7所示。方案a是在原始工艺方案上作出修改，使用三分流道模架，将平注改为侧注，浇口数不变，同时使易出现缩孔缺陷的U形槽朝下放置，利于其补缩。方案b是不改变铸件与浇口，但是换用顶注式的模架，将



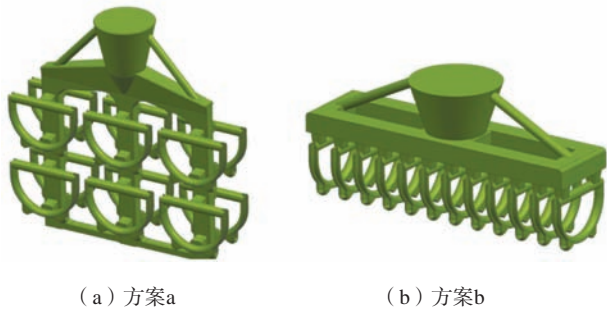
(a) 外部缩孔



(b) 内部缩孔

图6 实际铸件缩孔位置

Fig. 6 Locations of actual casting shrinkage cavities



(a) 方案a

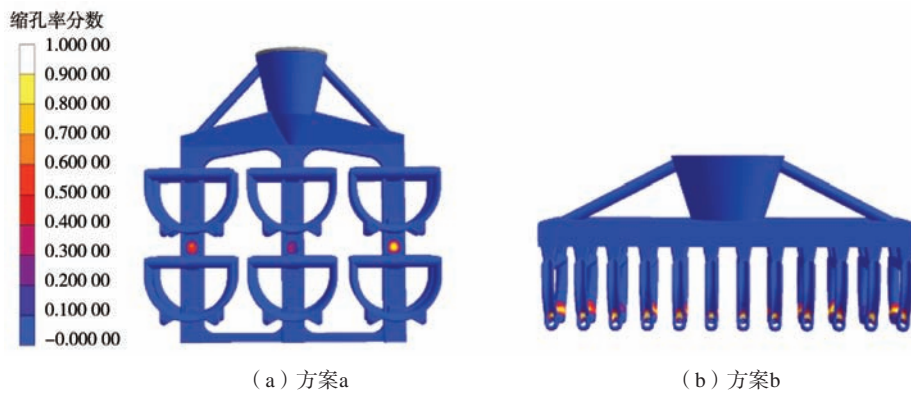
(b) 方案b

图7 优化后的组树三维模型

Fig. 7 Optimized 3D models of group trees

铸件同样是U形槽朝下放置进行组树。

在UG中建模并导入AnyCasting中进行网格划分,方案a划分总网格数为983 136,方案b划分总网格数为1 008 504。为了将两种工艺方案进行比对分析,保持工艺参数与边界条件与原始工艺方案相同,型壳厚度仍设为8 mm。优化工艺后的不锈钢弯管支架数值模拟结果如图8所示。



(a) 方案a

(b) 方案b

图8 优化后工艺方案缩孔分布

Fig. 8 The shrinkage cavity distributions for the process schemes after optimizing

2.4 铸造工艺参数的优化

影响精密铸造铸件质量的工艺参数很多,从方便生产、降本增效的角度出发,本文主要以方案a为基准,分析型壳焙烧温度、浇注温度和浇注速度三个参数对铸件质量的影响。

根据实际生产经验,型壳焙烧温度应处在1 050~1 200 ℃,浇注温度应处在1 560~1 660 ℃。焙烧温度与浇注温度的选择取决于铸件壁厚,厚度越大,型壳的焙烧温度应该越高而浇注温度越低,浇注温度与铸件壁厚关系见表2。钢液的浇注速度由产品结构决定,厚大件浇注时应均匀、平缓,浇口杯慢慢浇满;薄壁件与复杂件要快速浇注;常规件速度适中、均匀即可。

设置型壳焙烧温度为1 120 ℃,浇注温度为1 610 ℃,采用快速浇注,由此试制的方案a铸件表面已没有缩孔缩松缺陷,加工后内部也没有明显的缩孔缩松,符合

由图8可以看出方案a的铸件缩孔产生概率都在0~10%,可以认定已经消除了缩孔、缩松缺陷。而方案b仍在U形槽处出现了缩孔缺陷,相比于原始工艺方案并没有解决问题。于是对方案b增加型壳局部淬水步骤,工艺如下:将焙烧完成的型壳从焙烧炉中取出之后,立即淬水,淬水时间3 s,淬水深度10 mm,淬水完成后应立即浇注,注意要浇满并及时在浇口处撒一层除渣剂。淬水时应注意在水箱内放入支撑物,淬水部分与支撑物之间不能形成封闭空间,连续淬水时保持水的温度与高度,可以准备多个水箱并及时补充水。淬水的目的是局部激冷,让热节处的型壳温度降低,从而实现浇注完成后热节处优先凝固,从而促进补缩,消除缺陷。

经淬水工艺后的方案b铸件表面缩孔缩松缺陷基本消失。对比方案a与方案b,两种方案都能基本消除缺陷,但方案b需要增加淬水步骤,延长工时,降低生产效率,提高生产成本,而两种方案的组树难度一致,综合考虑采用方案a更加合理。

表2 浇注温度与铸件壁厚的关系

Tab. 2 The relationship between casting temperature and casting wall thickness

铸件种类	壁厚/mm	浇注温度/℃
壁厚件	> 10	1 560~1 600
常规件	3~10	1 600~1 630
壁薄件	< 3	1 630~1 660

铸件质量要求,即确定此为最佳工艺参数。

2.5 生产验证及组织对比分析

对优化后的结果进行实际生产验证,严格控制相关工艺参数,得到的铸件实物如图9所示。由图可知,铸件外观良好,无缩孔缩松缺陷。经统计,优化工艺后的不锈钢弯管支架成品率达到80%以上。



图9 工艺优化后铸件实物

Fig. 9 Real casting after process optimization

借助电火花线切割机切割工艺优化前铸件为试样A，工艺优化后铸件为试样B，对切割后的试样依次使用500目、800目以及1 200目粒度砂纸对A、B试样进行打磨，并使用抛光机抛光，将抛光后的试样置于无水酒精中进行超声波清洗，得到金相试样；后续利用王水酒精溶液腐蚀，腐蚀时间为3~5 min，得到腐蚀试样。对样品A、B进行金相显微分析，硬度测试，扫描电子显微镜与能谱仪分析。选择试样光滑表面，利用布氏硬度计对A、B试样进行硬度测试，各取六个点测量，结果取平均值，测试结果见表3。

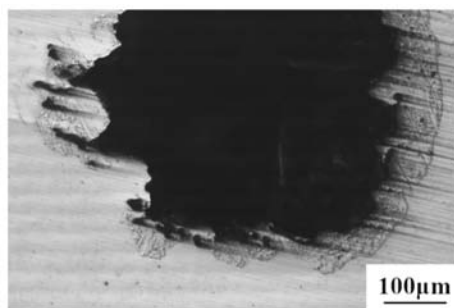
由表3可知A试样硬度分布不均匀，且硬度低，这是因为A试样存在不连续分布的缩孔，缩孔处硬度低，其余部分硬度高，所以硬度分布不均匀。由于缩孔处组织疏松，晶粒排布杂乱，消除了缩孔疏松缺陷后组织更加致密均匀，所以B试样的平均硬度有所提升。工

表3 工艺优化前后铸件HB硬度
Tab. 3 HB hardnesses of castings before and after process optimization

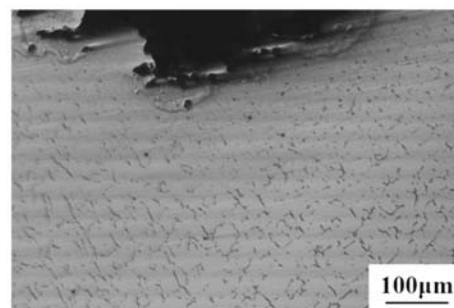
测试点	A试样	B试样
1	73	133
2	117	133
3	125	134
4	124	129
5	79	127
6	123	128
平均硬度	106.8	130.7

艺优化不仅提升了铸件硬度，更使其硬度均匀性得到了提升。

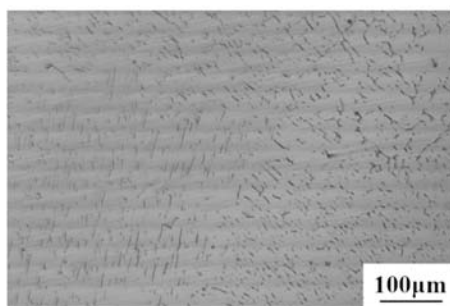
试样A、B的金相图片如图10所示。图10(a)为A试样缩孔在金相显微镜下的形貌。由图10(b)-(c)可看出，在缩孔周围的奥氏体呈胞状，而在其他区域的奥氏体则为板条状，并且有明显分界线。这是由于在冷却凝固的过程中，缩孔处冷却速率慢，在四大凝固模式中属于AF(逆向热流凝固)模式。凝固时 γ 奥氏体首先析出，随后 δ 铁素体从液相析出，残留的 δ 铁素体主要集中在奥氏体晶界处，最后凝固的组织为奥氏体和铁素体的混合组织，形成胞状奥氏体。别处冷却速率快，凝固模式为FA \rightarrow AF，由 δ 铁素体率先析出，长大过程中一部分转变为 γ 奥氏体，之后同时会



(a) A试样缩孔形貌



(b) A试样孔周边奥氏体



(c) A试样组织变化



(d) B试样骨骼状奥氏体

图10 工艺优化前后铸件金相图片

Fig. 10 Metallographic images of the castings before and after process optimization

析出一部分 γ 奥氏体，液相完全消失之后铁素体再发生固态相变转变为 γ 奥氏体，最终室温组织为奥氏体和铁素体的混合，形成板条状奥氏体^[8]。可以看出，由于缩孔的存在，导致金属液冷却速率不同，未按照顺序凝固，使得补缩通道堵塞，凝固时内部组织不均匀，这会最终导致铸件的强度降低，硬度不均匀。图 10 (d) 为 B 试样的铸件金相图，视场中没有缩孔等缺陷，且骨骼状奥氏体均匀分布。这是由于没有缩孔的影响，铸件整体冷却速度一致，属于 FA (顺热流凝固) 冷却模式。

借助扫描电子显微镜 (型号: JSM-7900F) 对 A、B 试样基体组织进行观察，如图 11 所示。由图 11 (a) 可观察到 A 试样基体上存在许多微小的缩孔，缩孔周围的板条状奥氏体分布杂乱且不均匀，并且存在尺寸较

大的夹杂物。对试样 A 进行 EDS 能谱分析，检测结果如图 11 (c) - (d) 所示，EDS 取样点 1 为图 11 (a) 视场中的夹杂物，EDS 取样点 2 为同一视场中的基体部分。可以发现，相较于基体，夹杂物中的 Si 元素含量明显升高，结合夹杂物形貌推测其为硅酸盐类夹杂物，是由于熔炼过程中钢液的脱氧、脱硫等操作产生的，属于内源性夹杂物。缩孔与夹杂物的存在破坏了基体组织的连续性与稳定性，并容易形成应力集中区，导致应力过大，易引起铸件裂纹源的萌生，使铸件失效，严重影响铸件的寿命。图 11 (b) 为 B 试样的扫描电镜照片，基体上无明显的缩孔缺陷与夹杂物，骨骼状奥氏体排列整齐、均匀分布。综上，工艺优化不仅解决了宏观的缩孔缺陷，同时也消除了微观上的缩孔，使得铸件组织均匀，提高了铸件的综合性能。

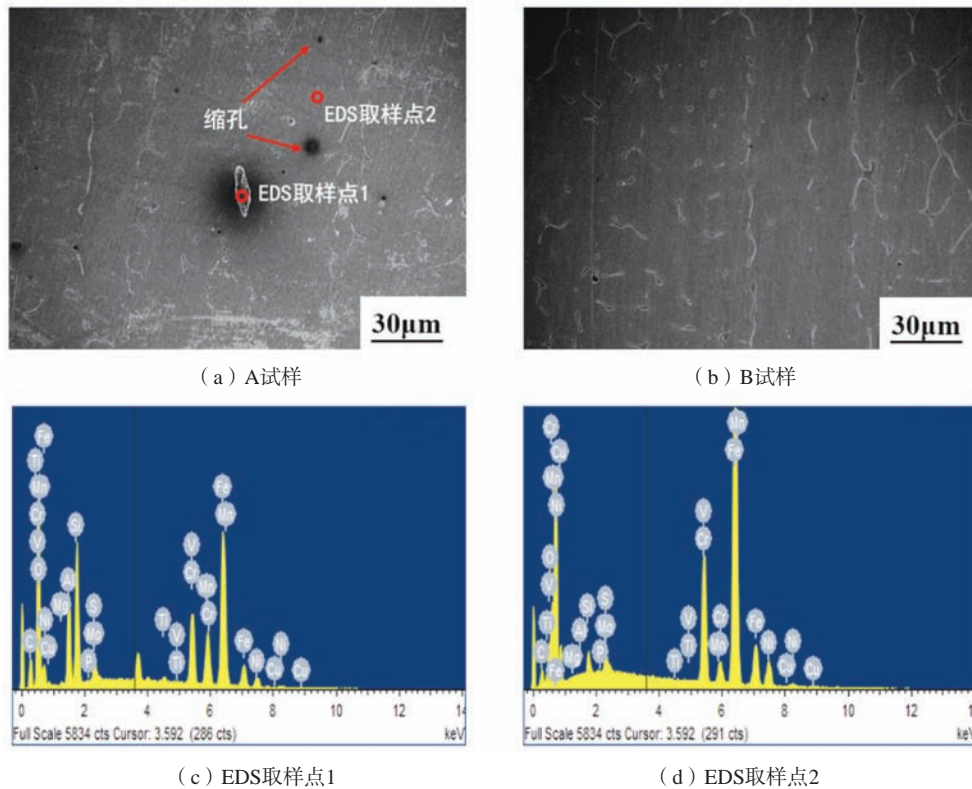


图 11 工艺优化前后铸件 SEM 图

Fig. 11 SEM diagrams of the castings before and after process optimization

3 结论

(1) 采用 AnyCasting 软件对不锈钢弯管支架精密铸造过程进行数值模拟，通过改进组树方式与浇注系统，使得铸件出现缩孔的概率明显降低。

(2) 分析获得不锈钢弯管支架铸件的最优工艺方案，并进行数值模拟与实际生产铸造，发现铸件内部无缩孔缩松缺陷，改善了铸件质量，为不锈钢弯管支架实际生产提供了参考。

(3) 工艺优化前缩孔、缩松缺陷产生的原因，是由于金属液未按照正确顺序凝固，末端热节处冷却速率低，最后凝固，无法顺利得到补缩，从而产生缩孔、缩松缺陷。

(4) 工艺优化不仅解决了宏观缩孔缺陷，也消除了微观的缩孔，使铸件组织均匀，平均硬度以及硬度均匀性都有提升。

参考文献:

- [1] 张晓光, 仓欣蕾, 彭彬. 不锈钢支架熔模铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 257-261.
- [2] 金先志. 不锈钢精密铸造缺陷研究与工艺优化 [D]. 襄阳: 湖北文理学院, 2023.
- [3] 王树森, 邹明科, 王亮, 等. 高温合金薄壁件铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1463-1466.
- [4] 李俭英. 熔模精密铸造工艺优化及应用研究 [J]. 世界有色金属, 2023 (21): 43-45.
- [5] 曾焱, 杨剑洪, 钱学海, 等. 06Cr19Ni10不锈钢研发 [J]. 冶金设备, 2020 (S1): 9-11.
- [6] 杨武强, 冀晓磊, 王琳, 等. 基于ProCAST本体件熔模铸造工艺优化设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (11): 1477-1481.
- [7] 苏连升. 熔模铸件疏松缺陷原因分析及解决方案 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (10): 1309-1312.
- [8] 陆娅. 304奥氏体不锈钢凝固组织的形成及演化规律研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.

Process Optimization of Precision Casting Stainless Steel Bending Bracket

GUO Xiao-xuan¹, CHEN Chun-feng², LI Ze-zhi¹, ZHOU Shi-jin², SUN Zhen-zhao¹, ZHAO Ping¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266044, Shandong, China. 2. Zibo Jindong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Zibo 256104, Shandong, China)

Abstract:

Through UG modeling and AnyCasting software, the precision casting numerical simulation of 304 stainless steel bending bracket was carried out, the distributions of shrinkage cavity defects of the casting were predicted, and the gating system was improved. By analyzing the structure of castings, the process parameters such as roasting temperature and pouring temperature were changed, and the actual production was carried out. Metallographic microscopy(OM)and scanning electron microscopy(SEM)were used to detect and analyze the samples before and after process optimization. The results show that the macroscopic and microscopic shrinkage cavity and porosity defects of castings were significantly reduced, the mechanical properties were improved, the number of inclusions was reduced, and the microstructure and hardness are more uniform. These provided references for the production of stainless steel thin-wall bending bracket castings.

Key words:

precision casting; AnyCasting; stainless steel bracket; process optimization