

精密铸造大直径窄出风口叶轮的工艺优化

郭晓轩¹ 陈春峰² 周仕玲² 李泽芝¹ 周士金² 孙震兆¹ 马永恒¹ 赵平¹

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

摘要 通过UG软件建模及AnyCasting软件对大直径窄出风口叶轮进行精密铸造数值模拟, 预测了铸件缩孔、缩松缺陷的分布情况, 并对浇注系统进行改进。对浇注温度、焙烧温度、充型高度3个参数进行模拟正交试验, 得到优化工艺参数组。针对铸件特点, 设计了新的制壳工艺, 解决了铸件芯部的跑火问题。利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)等表征手段对工艺优化前后的试样进行检测与分析。结果发现, 铸件宏观与微观尺度的缩孔、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。

关键词 精密铸造; 工艺优化; 铸造缺陷; 叶轮

中图分类号 TG249.5; TG142.71; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250206

Process Optimization of Investment Casting for Large-diameter and Narrow-outlet Impellers

GUO Xiaoxuan¹, CHEN Chunfeng², ZHOU Shiling², LI Zezhi¹, ZHOU Shijin², SUN Zhenzhao¹,
MA Yongheng¹, ZHAO Ping¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042; 2. Zibo Jindong Machinery Manufacturing Co., Ltd., Zibo 256104)

Abstract: The investment casting of large-diameter and narrow-outlet impeller was numerically simulated through of UG software modeling and AnyCasting software. The distribution of shrinkage cavity and porosity defects in the casting was predicted, and gating system was modified. The simulation orthogonal experiments were carried out on parameters including pouring temperature, baking temperature, and filling height, to obtain optimal process parameter group. A novel shell-making process was designed according to casting characteristics, solving the bleeder issues in the core of casting. The specimens before and after process optimization were detected and analyzed by means of metallographic microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM). The results indicate that the shrinkage cavity and porosity defects at both macroscopic and microscopic scales are significantly reduced, mechanical properties are enhanced with reduction of inclusions, and the microstructure as well as hardness is more uniform.

Key Words: Investment Casting, Process Optimization, Casting Defects, Impeller

精密铸造作为一种近净形液态金属成形技术^[1], 能够生产具有高尺寸精度、清晰轮廓与优异表面质量的铸件^[2], 显著减少了后续加工需求, 使铸件几何形状接近最终产品, 其历史可追溯至商周时代^[3]。其在蜡模表面逐层覆砂制壳的加工方式^[4]适合制造中小尺寸铸件, 大尺寸零件的生产一直以来是行业的技术难点^[5]。

大直径窄出风口叶轮铸件存在直径大、出风口窄、壁厚不均匀、形状大且薄等特点^[6], 难以高效、高质生

产^[7]。目前传统的加工工艺是制作蜡模, 再逐层沾浆挂砂风干, 脱蜡焙烧后浇注, 最后振壳切割得到铸件^[8]。生产的叶轮铸件存在大量缩孔、缩松、麻点等问题^[9], 并且在浇注过程中存在型壳破裂现象^[10], 造成出品率低、铸件质量低。

近年来, 随着计算机技术的发展, 数值模拟和仿真被广泛用于凝固过程分析^[11]。许多研究者利用商用的模拟软件, 对铸件进行凝固过程研究以及缺陷预测, 有利于缩短试制周期, 降低生产成本^[12]。本研究在传统

收稿日期: 2025-05-19; 修订日期: 2025-06-05

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升资助项目(2024TSGC0319, 2022TSGC2246); 山东省淄博市重点研发计划基金资助项目(2021XCZF0010)

第一作者: 郭晓轩, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: 1652785423@qq.com

通信作者: 赵平, 男, 1983年出生, 副教授, E-mail: zhaoping@qust.edu.cn

引用格式: 郭晓轩, 陈春峰, 周仕玲, 等. 精密铸造大直径窄出风口叶轮的工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(5): 789-794.

GUO X X, CHEN C F, ZHOU S L, et al. Process optimization of investment casting for large-diameter and narrow-outlet impellers[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 789-794.

工艺的基础上,设计一种针对此叶轮铸件的高强度型壳的制壳方法,利用 AnyCasting 软件对现有的浇注系统与工艺参数进行改进,模拟浇注过程中的流场与温度场,对缩孔缩松等铸造缺陷的形成做出预测。为验证试验结果,采用优化工艺进行实际的铸造生产,并与工艺优化前的铸件进行对比,分析铸件缺陷产生的原因,旨在为相关产品的生产提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 数学模型

将金属液的流动假设为不可压缩的牛顿流体,并建立控制方程。利用 AnyCasting 软件,以充型和凝固阶段的能量方程、连续性方程、Navier-Stokes 方程为数学模型,把压力场、速度场的求解与自由表面的处理分开进行^[13],用 SOLA-VOF 迭代法进行数值求解,用残余熔体模数来预测缩孔率^[14]。残余熔体模数是评估铸件缩孔率的关键参数,残余熔体模数越大,熔池孤立化倾向越显著,这将直接导致缩孔和缩松缺陷的形成^[15]。

1.2 几何模型与仿真参数设置

利用 UG/CAM 软件对叶轮铸件进行建模,见图 1。铸件的轮廓尺寸为 456 mm×456 mm×160 mm,叶轮主体部分厚度为 37 mm,出风口厚度为 13 mm,铸件壁厚在 9~20 mm 之间。初始工艺的浇注系统设计见图 2,将模型导入有限元模拟软件,对铸造的充型与凝固过程进行仿真。在 AnyCasting 软件中设置如下参数:铸件材质为 304 不锈钢,浇注温度为 1 640 ℃,充型高度

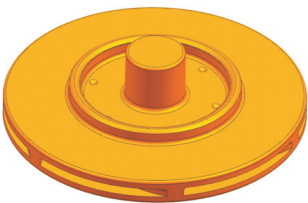


图 1 大直径窄出风口叶轮模型

Fig.1 3D model of large-diameter and narrow-outlet impeller

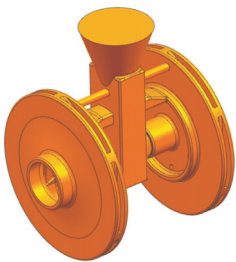


图 2 原始组树方案

Fig.2 The original process of the gating system 为 10 cm,焙烧温度为 1 100 ℃,划分总网格数为 996 660,型壳厚度为 8 mm,重力加速度设为 9.8 m/s²,铸件与空气的传热系数为 1 000 W/(m²·K),型壳与空气的传热系数为 50 W/(m²·K)^[16],304 不锈钢的化学成分见表 1。

表 1 304 不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 304 stainless steel %

w_B							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.04	≤0.04	8.0~11.0	18.0~21.0	2.0~3.0
							Fe 余量

2 试验结果与工艺优化

2.1 初始工艺方案模拟

初始工艺方案模拟结果见图 3。由图 3b 可以看出,铸件缺陷主要集中在叶轮芯部,缺陷率达到 60%,铸件整体的残余熔体模数为 9.260 mm。实际生产铸件见图 4。可以发现,芯部出现了大量缩孔缩松缺陷,与数值模拟结果一致,证明模拟效果较好。

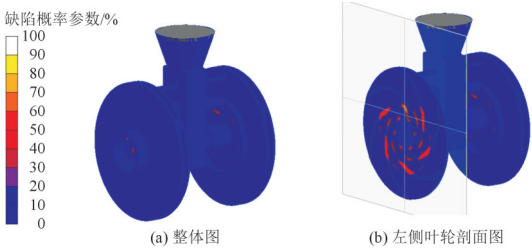
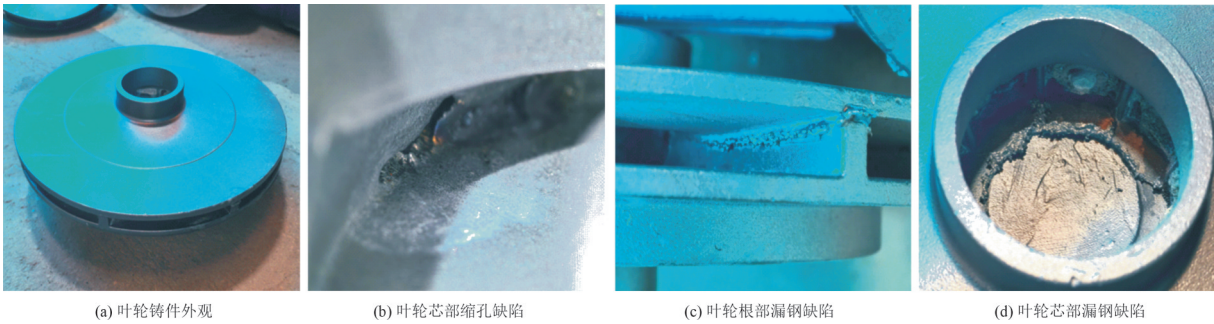


图 3 原始工艺模拟结果

Fig.3 Simulation results of primary process



(a) 叶轮铸件外观

(b) 叶轮芯部缩孔缺陷

(c) 叶轮根部漏钢缺陷

(d) 叶轮芯部漏钢缺陷

图 4 原始工艺铸件及缺陷

Fig.4 Castings and defects in primary process

芯部属于热节部位,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,此部位无法进行有效散热,凝固时间最晚,周围凝固后芯部无法得到有效补缩。同时由于立浇的设置,对于大而扁平的叶轮铸件,底部与顶部的浇注时间间隔过长,不利于顺序凝固以及顶层的补缩。另外,在生产过程中发现浇注工序中存在严重的漏钢现象,出现漏钢的铸件约占整体的35%。通过观察漏钢的部位,可以推断原因是芯部型壳强度不足导致的型壳破裂。因此,本研究将对大直径窄出风口叶轮从浇注系统、工艺参数和制壳工艺3个维度分别进行工艺优化。

2.2 浇注系统的优化

针对叶轮芯部的散热、凝固顺序、浇注顺序以及流动补缩等问题,对原始工艺的浇注系统进行改进。重新设计了两种工艺方案,见图5。两种方案均将原始的侧浇方案改为了立浇,并增设了补缩通道,以保证浇注时液流的稳定性与均匀性,使同一平面液流的压力相同,叶轮大平面的冷却速率一致,增强芯部的冷却补缩能力,提高铸件平面的质地均匀性。其中,方案A为Y字磨头单浇,方案B为一字磨头一树两件。

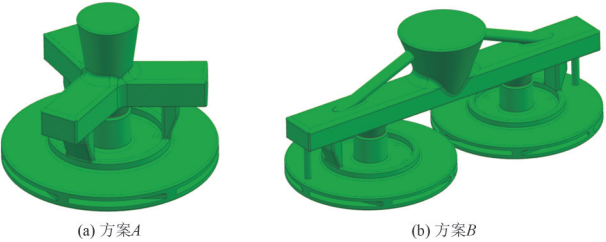


图5 新工艺方案的浇注系统
Fig.5 Gating system in modified scheme

在UG软件中建模并导入AnyCasting软件中进行网格划分,方案A划分总网格数为126 225,方案B划分总网格数为134 988。保持初始条件不变,型壳厚度仍设为8 mm,对比两种组树设计。新工艺方案的大直径窄出风口叶轮数值模拟结果见图6。可以看出,两种方案的缺陷情况均优于初始方案,其中方案A优于方案B,可能是由于方案A有更多的浇口与补缩通道,从而导致方案A在浇注过程中,金属液能够更均匀平稳地从中间铺开,同时方案A的单件设计也使其具有更均匀的散热能力,金属液按照顺序凝固,各部位流动补缩完整,无热节存在,使得最终缺陷较少。方案B为了保证浇注时金属液从中心注入,只能设置单侧的浇口与补缩通道,这会导致叶轮大平面两侧补缩压不同,外侧大于内侧,同时由于两叶轮相近,内侧散热差,使得外侧先凝固而内侧无法得到充分补缩,从而导致方案B仍有明显缺陷存在。方案A的残余熔体模数为

8.166 mm,方案B的残余熔体模数为8.861 mm。方案A的出品率约为54%,方案B的出品率约为65%。虽然方案B的出品率高于方案A,但考虑到更优的铸件质量以及更方便的生产操作,综合考虑采用方案A更为合理。

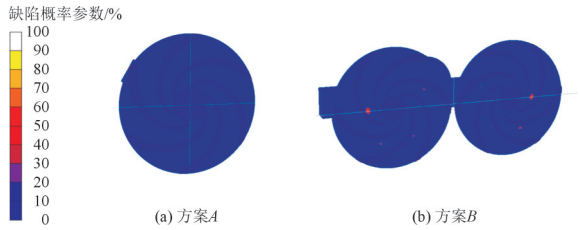


图6 新浇注系统的模拟结果
Fig.6 Numerical simulation results of modified gating system

2.3 工艺参数的优化

经过浇注系统优化后已经基本解决了铸件的缩孔、缩松缺陷问题,但在叶片根部仍存在一些微小的缺陷,铸件质量有待进一步提高。从方便生产的角度出发,以初始工艺参数为基础,分析型壳焙烧温度、金属液浇注温度和充型高度3个参数对铸件的影响,寻找优化工艺参数组合。

焙烧温度、浇注温度、充型高度是影响铸件缺陷的3个重要参数。根据精密铸造熔炼经验,结合304不锈钢的物理特性,将初始工艺方案设定浇注温度为1 640℃、焙烧温度为1 100℃、充型高度为10 cm。在设计正交试验前进行试验参数与水平的确定,最终确定采用 $L_9(3^3)$ 正交试验方案,各因素之间无相互作用,最终考核指标为残余熔体模数。影响因素与影响水平见表2,正交试验结果见表3。针对9组试验数据,首先计算各因素不同水平下的残余熔体模数平均值,随后通过极差分析确定各因素的影响程度,得出 $R_A=0.369$,

表2 影响残余熔体模数的因素

Tab.2 Affecting factors and levels for residual melt modulus			
序号	浇注温度(A)/℃	充型高度(B)/cm	焙烧温度(C)/℃
1	1 600	9	1 060
2	1 640	10	1 100
3	1 660	11	1 140

表3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results				
序号	A/℃	B/cm	C/℃	残余熔体模数/mm
1	1 600	9	1 060	7.916
2	1 640	10	1 060	8.194
3	1 660	11	1 060	8.296
4	1 660	10	1 100	8.277
5	1 640	9	1 100	8.166
6	1 600	11	1 100	7.933
7	1 600	10	1 140	7.894
8	1 640	11	1 140	8.184
9	1 660	9	1 140	8.277

$R_b=0.018, R_c=0.017$ 。极差分析结果表明,各工艺参数对残余熔体模数的影响程度依次为:浇注温度>充型高度>焙烧温度。

表4为方差分析结果。可以看出,浇注温度对残余熔体模数的影响最为显著,充型高度的影响其次,焙烧温度对残余熔体模数的影响最为微弱。极差与方差分析结果一致,确定最佳方案组为 $A_1B_2C_3$,即金属液浇注温度为1 600℃,型壳焙烧温度为1 140℃,充型高度为10 cm。

表4 残余熔体模数方差分析

Tab.4 Variance analysis of residual melt modulus

因素	平方和	自由度	均方	F值	P值
浇注温度	0.218	2	0.109	564.389	0.002
充型高度	0.001	2	0.000 5	1.513	0.398
焙烧温度	0.000 2	2	0.000 1	1.135	0.468
误差	0.000 2	2	0.000 1		
求和	0.219 4	8			

2.4 制壳工艺的优化

观察发现漏钢的部位为叶轮芯部,原因是出风口过窄,制壳时第3层壳就将其完全封堵,后续型壳无法有效制备,芯部仅有的3层壳整体强度不够。为了减少浇注时的漏钢现象,提升成品率,需要对现有制壳工艺进行改良。现有制壳工艺为通用工艺,通过逐层沾浆挂砂制备型壳,工艺如下:

(1)面层 沾锆英粉浆料,浆配为硅溶胶+325目锆英粉+湿润剂+除泡剂,詹式流杯黏度为40~45 s,撒80~120目锆英砂,干燥时间为4~6 h。

(2)第2、3层 沾混合浆料,浆配为硅溶胶+325目锆英粉+200目莫来石粉,詹式流杯黏度为24~30 s,撒30~60目莫来石砂,干燥时间为8~10 h。

(3)第4、5层 沾莫来石粉浆料,浆配为硅溶胶+200目莫来石粉,詹式流杯黏度为13 s,撒16~30目莫来石砂,干燥时间为8~10 h。

(4)封层沾5层浆料,詹式流杯黏度为13 s。干燥时间为8~10 h。

针对本铸件制壳难点,以加强大直径窄出风口叶轮芯部型壳的强度为目标,设计如下优化工艺:

(1)面层与2层 面层沾锆英粉浆料,浆料配置为硅溶胶+325目锆英粉+湿润剂+除泡剂,詹式流杯黏度为40~45 s,撒100~120目锆英砂。2层用过夜的面层浆料,撒80~100目莫来砂。每层沾浆完成后需用气枪吹去多余的浮浆,挂砂完成后需用铁片或铁丝清理狭槽内部,清理掉浮砂以及砂砾团,每一层制壳完成都需要干燥8~12 h。

(2)封层 使用2层浆料,并风干8 h以上。

(3)灌砂层 用耐火泥均匀封堵在叶轮四周出口与底部开孔处,风干2 h左右,从顶部灌80~100目莫来砂,灌砂时注意摇动,使砂完全充满型腔内部,灌砂完成后再用泥封堵顶部开孔,风干8~12 h。

(4)3~4层 用莫来石粉浆料,撒30~60目莫来砂,浆料詹氏流杯黏度为24~30 s,每层完成后用风机风干8~12 h。

(5)5~6层 用莫来石粉浆料,撒16~30目莫来砂,同时加入砂重2%的溃散剂,浆料詹氏流杯黏度为12~16 s,每层完成后用风机风干8~12 h。

(6)封层 用6层浆料,封层后需用风机风干8~12 h。

新制壳工艺主要是在原有工艺的基础上,在第2层壳与第3层壳之间增加了灌砂层,同时针对每一层型壳作了具体的参数优化。增加用气枪吹去多余的浮浆,用铁片或铁丝清理浮砂以及砂砾团等步骤,增大面层与二层使用砂粒的目数并增加二层封层以提升型壳内部的强度与致密性,在最外层壳中加入溃散剂,使型壳芯部充盈,提升型壳芯部的强度与均匀性,降低清壳难度。新制壳工艺的型壳结构示意图见图7。

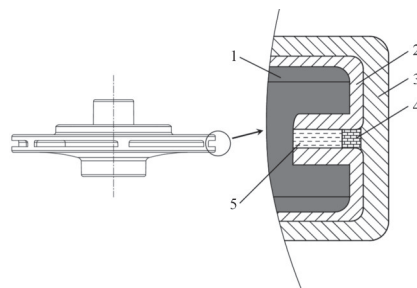


图7 新制壳工艺的结构示意图

Fig.7 Structure diagram of new shell-making process

1. 铸件本体 2. 面层、2层及封层 3.3~6层及封层 4. 耐火泥
5. 莫来砂

2.5 生产验证及组织对比分析

新制壳工艺实际生产过程见图8。经批量试制,发现已经基本解决浇注时的芯部漏钢问题,成品率达到95%。

对工艺优化后的结果进行实际生产验证,严格控制相关工艺参数,得到的大直径窄出风口叶轮铸件见图9。可以发现,经过工艺优化,生产出的铸件表面光洁平整,无裂纹麻点,芯部无缩孔缩松,铸件整体品质较好。

使用电火花线切割工艺优化前叶轮铸件为试样A,工艺优化后铸件为试样B,对切割后的试样依次使用500、1 000及1 500目WC砂纸进行打磨,并使用ZYP-2X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。利用王水酒精溶液腐蚀,

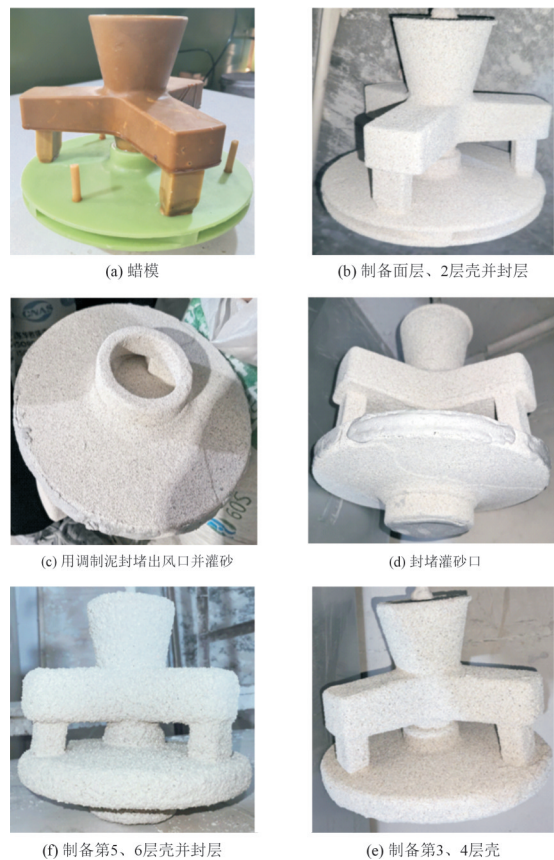


图8 新制壳工艺生产流程
Fig.8 Flow chart of new shell-making process

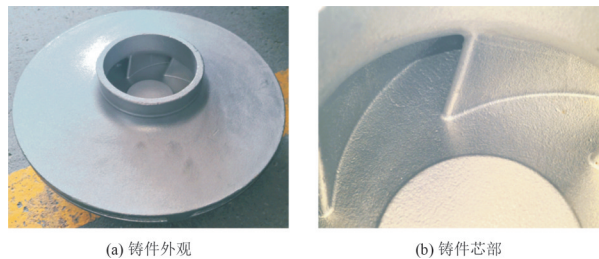


图9 工艺优化后的叶轮铸件
Fig.9 Impeller castings after process optimization

3~5 min,得到腐蚀试样。使用PA53MET 光学显微镜,JSM7900F 扫描电镜,FlatQuad 5060F 能谱仪和MHRS-150型布氏硬度仪对试样A,试样B进行分析。其中,硬度测试在样品中心部位依次等距取8个点,载荷为1 500 N,保压10 s。

选取试样光滑表面利用布氏硬度计对试样A、B进行硬度测试,等距各取8个点进行测量,结果取平均值,测试结果见表5。可以看出,试样A硬度分布不均匀,最小值与最大值差距超过40,平均硬度(HB)只有103.8,这是由于试样A内部存在不连续分布的缩孔,缩孔周围组织疏松,晶粒排布杂乱,而其余部位组织较为致密,因此靠近缩孔处硬度低、远离缩孔处硬度高,故试样A硬度分布不均匀且平均硬度低。经工艺优化后,由于消除了缺陷,铸件内部组织更加均匀致密,所

以试样B的硬度分布相较于试样A更加均匀,平均硬度也更高。工艺优化通过消除铸件缺陷,不仅提升了平均硬度,更提升了整体硬度的均匀性。

表5 工艺优化前后铸件硬度(HB)

Tab.5 Hardness of castings before and after process optimization		
测试点	试样A	试样B
1	116	128
2	108	126
3	76	133
4	120	130
5	113	136
6	108	126
7	72	136
8	118	131
平均硬度	103.8	130.8

图10为试样A、B的金相组织。从图10a可以看出,在缩孔周围的奥氏体呈板条状,且排列松散、不规则。由图10b、图10c可看出,在远离缩孔位置存在排列规则致密的骨骼状奥氏体,且板条状奥氏体与骨骼状奥氏体之间有明显的分界线。这是由于在冷却凝固过程中,缩孔处为铸件最后凝固的热节区域,无法得到有效补缩,整体冷却速率较慢,容易形成枝晶粗化、溶质偏析加剧等情况,在4大凝固模式中属于逆向热流凝固模式(AF)。凝固过程中, γ 奥氏体作为初生相优先形核析出,随着温度降低, δ 铁素体从剩余液相中析出,最终凝固组织呈现 γ/δ 双相混合特征,残余 δ 铁素体主要分布于奥氏体晶界区域,形成典型的板条状奥氏体形貌。而在远离缩孔区域,冷却速率较快,凝固模式属于顺向热流凝固(FA)→逆向热流凝固模式(AF)。与AF模式相比,该凝固模式的显著差异在于初生相, δ 铁素体优先形核析出,随着温度降低,发生包晶反应,部分 δ 相通过固态相变转变为奥氏体,最终室温组织呈现骨骼状 γ 奥氏体与残留 δ 铁素体的双相分布,其形貌特征明显区别于AF模式下的板条状组织。可以看出,由于缩孔处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,最终导致铸件的强度降低,硬度不均匀。图10d中无缩孔、缩松等缺陷,骨骼状奥氏体均匀、整齐排列。这是由于没有缩孔的影响,铸件整体冷却速率一致,顺序凝固,属于FA模式。

采用JSM-7900F型场发射扫描电镜对试样A、B的抛光腐蚀表面进行观察,见图11。由图11a可以观察到试样A的基体上存在一些微观尺度的缩孔,缩孔周围奥氏体组织分布杂乱不均匀,并且存在尺寸较大的夹杂物。对试样A进行EDS能谱分析,检测结果见图11c和图11d。EDS取样点1为图11a视场中的夹杂物,EDS取样点2为同一视场中的基体部分。可以看出,相

较于基体,夹杂物中的Si元素含量明显升高,结合夹杂物的形貌推测其为硅酸盐类夹杂物,可能是由于熔炼过程中扒渣不充分,导致炉渣中的 SiO_2 与金属液中的Al、Fe等元素反应生成的,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,并容易形成微裂纹源,引发应力集中,使局部应力提升

3~5倍,加速塑性变形失效,严重影响铸件的使用寿命。从图11b可以观察到基体组织均匀致密,无明显的缩孔与夹杂物,骨骼状奥氏体排列整齐、均匀分布。综上,工艺优化解决了宏观与微观尺度的缩孔、缩松缺陷,提升了铸件组织的均匀性,提高了铸件的综合性能。

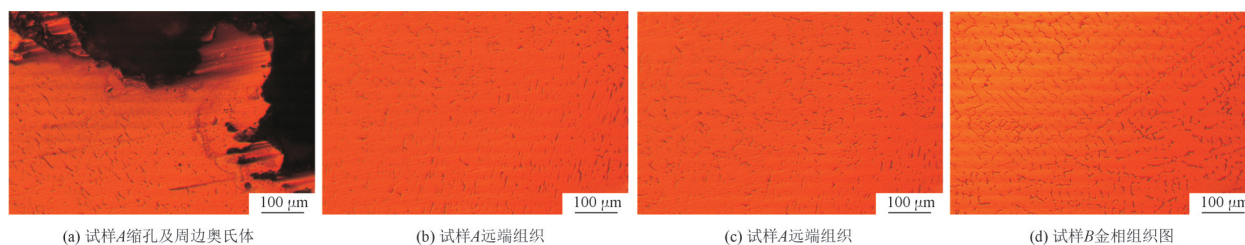


图10 工艺优化前后铸件金相组织

Fig.10 Metallographic structure of castings before and after process optimization

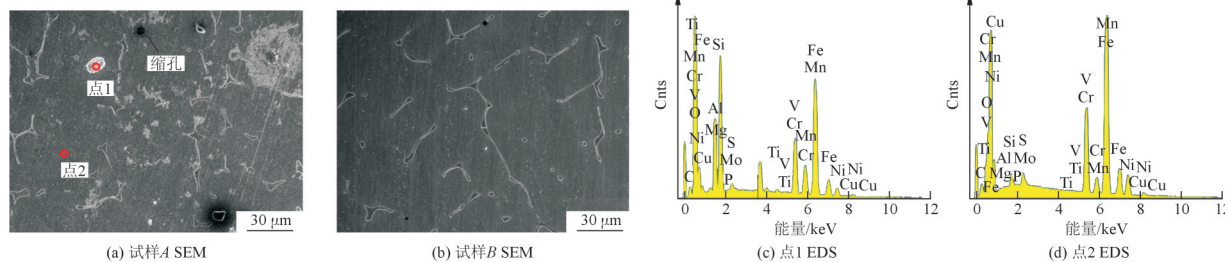


图11 工艺优化前后铸件SEM与EDS图

Fig.11 SEM images and EDS results of castings before and after process optimization

3 结 论

(1)利用UG及AnyCasting软件对大直径窄出风口叶轮进行建模并模拟,通过优化浇注系统与工艺参数,成功消除了铸件芯部宏观尺度与微观尺度的缩孔、缩松缺陷,使铸件组织均匀致密,平均硬度与硬度均匀性都得到改善。

(2)通过优化制壳工艺,加强了叶轮芯部的型壳强度,成功解决了浇注时因芯部型壳强度不足而出现的漏钢现象,成品率提升至95%。

(3)工艺优化前铸件产生缩孔、缩松缺陷的原因是金属液未顺序凝固,芯部缩孔处属于热节部位,冷却速率慢,冷却时无法得到有效补缩。

参 考 文 献

- [1] 史书考,李松山,向青春,等.一种双相不锈钢闭式叶轮熔模铸造的工艺优化[J].铸造,2025,74(3):370-375.
- [2] 李俭英.熔模精密铸造中的材料选择与性能评价[J].中国金属通报,2023(10):192-194.
- [3] 史书考.叶轮及阀体铸件熔模铸造的模拟参数及工艺方案优化[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [4] 金先志.不锈钢精密铸造缺陷研究与工艺优化[D].湖北襄阳:湖北文理学院,2023.

- [5] 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.
- [6] 刘锦润.304亚稳奥氏体不锈钢组织性能及其影响因素研究[D].昆明:昆明理工大学,2024.
- [7] 赵健,衣春雷.复杂不锈钢叶轮熔模铸造工艺的优化[J].材料研究学报,2015,29(12):955-960.
- [8] 谭培松.复杂薄壁叶轮熔模铸造工艺的探讨[J].特种铸造及有色合金,2020,40(8):864-866.
- [9] 刘金虎,纪志军,李峰,等.基于ProCAST的高Nb-TiAl合金叶轮熔模铸造[J].航空材料学报,2021,41(2):61-71.
- [10] 白瑀,张浩,黄亮.基于ProCAST的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优化[J].热加工工艺,2021,50(11):71-75.
- [11] 朱雪明,童幸生,王风华.基于DLP-3D打印的闭式叶轮熔模快速铸造技术研究[J].特种铸造及有色合金,2021,41(11):1370-1374.
- [12] 刘娇.大马力发动机用薄壁壳体铸件铸造工艺数值模拟与优化[D].西安:西安工业大学,2022.
- [13] 王晨旭,丁鑫,王新秀,等.立式离心浇注精密铸造技术研究进展[J].铸造技术,2024,45(10):932-944.
- [14] 王立召,王琳,王子阳,等.Y型管熔模铸造数值模拟工艺研究[J].铸造技术,2024,45(10):981-987.
- [15] 孟祥斌,邹明科,张朝威,等.数值模拟在单晶高温合金熔模铸造中的应用[J].精密成形工程,2024,16(4):180-189.
- [16] 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.

(编辑:张正贺)