

6 MW 大型风电主机架铸造工艺 数值模拟与优化

苏飞¹, 汪东红², 薛菁¹, 邓小明³, 龚潜海³, 陈寅³, 疏达²

(1. 上海工程技术大学材料科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240; 3. 浙江佳力风能技术有限公司, 浙江杭州 310051)

摘要: 以某6 MW大型风力发电机主机架为研究对象, 运用ProCAST有限元分析软件进行数值模拟, 成功预测出铸件中可能出现缩松缩孔的部位, 并基于此对铸造工艺进行了优化, 经过工厂生产实践验证, 铸造出了符合交付条件的主机架铸件。本研究为大型风电球墨铸铁件的铸造工艺优化和缺陷预测提供了一种有效的方法, 并为工业生产中的资源节约和质量保障作出了贡献。

关键词: 风电主机架; 球墨铸铁件; 铸造工艺优化; 数值模拟

作者简介:

苏飞(1999-), 男, 硕士, 研究方向为风电铸件智能铸造。E-mail: M350122369@sues.edu.cn

通信作者:

汪东红, 男, 博士, 副研究员, 博士生导师。电话: 021-54748678, E-mail: wangdh2009@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)01-0091-07

基金项目:

浙江省重点研发计划(2022C01147); 上海市Ⅲ类高峰学科—材料科学与工程(高能束智能加工与绿色制造)。

收稿日期:

2023-12-18 收到初稿,
2024-01-14 收到修订稿。

随着风电机组不断朝着大型化、重型化方向发展, 风电结构件的生产、运输、安装和维护等重要环节面临巨大挑战。随着风电单机容量的不断增长, 风电结构件的重量也随之不断增加, 本研究中的6 MW风电主机架重量可达23 t, 安装高度几十米甚至上百米。此外, 风力发电机一般建设在高原或深海等“富风区”, 需要经长期的风沙侵蚀和海水腐蚀。因此, 为了尽可能避免风电结构件的损坏, 减少维护的成本, 保证风电机组至少二十年的使用寿命^[1], 在铸造生产时把控铸件的冶金质量显得尤为重要。

如果以传统的试错法^[2-3]小批量生产这种风电大型铸件, 必将大大增加试错成本。得益于计算机技术的发展, 铸造行业诸如ProCAST、华铸CAE等数值模拟软件, 通过计算机辅助模拟浇注过程流场和凝固过程的温度场, 预判铸件产生缺陷的位置, 提高了铸造工艺设计的效率, 降低了铸件开发与生产的成本。魏冬冬^[4]对风电球墨铸铁行星架的铸造工艺进行了系统的研究, 利用Magma软件模拟出了风电行星架形成缩松缺陷的位置, 并通过优化冷铁工艺成功减小了缩松体积。陈玉芳^[5]在生产7 MW风电底座前利用Magma优化浇注系统, 确保了金属液进入型腔的入口速度不大于0.5 m/s。YOU^[6]使用有限元软件ProCAST对风电转子轴的铸造工艺进行了数值模拟, 预测了铸件在凝固过程中的缺陷, 并进行了铸造工艺优化, 避免了铸件中气孔的产生。VLADIMIR ˇSABIK^[7]针对风电涡轮出现的冷隔和浇不足的问题, 以浇注温度、内浇道数量和横浇道长度为变量设计了多组模型, 通过数值模拟, 得到了理想的浇注工艺, 并在实际生产中得到了验证。

本研究利用ProCAST软件对某6 MW的风力发电机主机架的充型与凝固过程进行数值模拟, 并针对铸件中可能出现的缩松缩孔改进铸造工艺方案。以数值模拟结果作为参考, 确保工厂成功制得符合交付条件的风电主机架铸件产品。

1 工艺设计模型

1.1 模型结构与参数

某6 MW风力发电机主机架结构如图1所示, 材质QT400-18L, 外廓尺寸4 533 mm ×

4 217 mm × 1 772 mm, 总重约为23 t, 属于大型球墨铸铁件。该主机架结构造型复杂, 呈对称结构。考虑到能最大限度地减轻主机架的质量, 减少耗材, 因此模型多筋骨和空孔, 其壁厚变化大, 最大壁厚有175 mm, 而最小壁厚仅有30 mm。主机架顶面(定义浇注面为底面)为法兰盘结构, 法兰面内圆直径为2 424 mm, 侧边是4组电机架, 其上各有2个直径为390 mm的电机安装孔, 这是主机架最小壁厚处, 也是易受力破损处。主机架法兰盘结构上的小孔不铸出, 同时为了便于起模和铸件精加工, 铸件部分表面机械加工余量设计为10~15 mm。

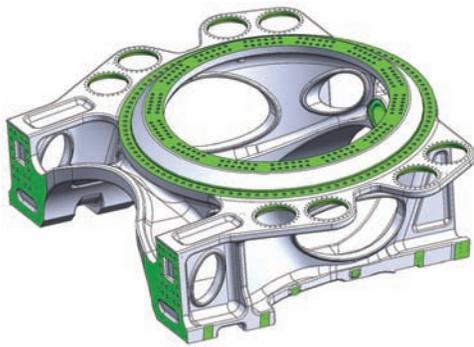


图1 6 MW风电主机架三维模型
Fig. 1 3D model of 6 MW wind turbine mainframe

1.2 浇注系统

球墨铸铁件一般采用开放式、底注式浇注系统^[8-9]。图2是6 MW风电主机架所使用的浇注系统模型, 采用了一组对称的底注式浇注系统, 两条U型直浇道的直径为80 mm, 竖直高度为2 140 mm, 20条直径为50 mm, 竖直高度为788 mm的U型内浇道从集渣包以不同的角度连接至铸件底部。这种开放式、底注式的优点在于浇注系统内部压力较小, 防止夹砂, 降低了铸件的夹杂物含量; 金属液从铸件底部向上注入, 充型平稳, 避免了金属液的紊流与飞溅, 提高了铸件的质量。



图2 6 MW风电主机架浇注系统模型(单侧)
Fig. 2 Gating system model of 6 MW wind turbine mainframe
(unilateral)

1.3 补缩系统和铸造工艺图

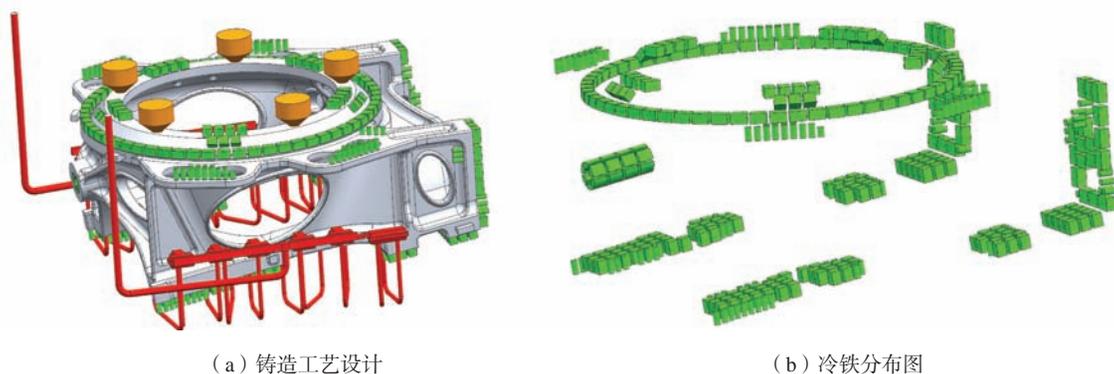
为了加快风电主机架厚大区域的凝固速度, 防止形成孤立液相区, 在风电主机架的底部和离直浇道较远的铸件末端布排厚度为60~120 mm不等的低碳钢冷铁。在铸件结构复杂的环道和厚度较小的连接处分别放置适当厚度的随形冷铁与柱形冷铁, 以加速冷却效果, 提高铸件特殊部位的强度和韧性。整个主机架共使用冷铁424块, 冷铁间最小间隙25 mm, 充分保障了铸件的冷却效率。

合理设置冒口有助于铸件在凝固时能得到有效补缩, 避免铸件型腔内出现缩松缩孔缺陷。风电主机架铸造工艺设计中设置了5个直径为250 mm, 高度为300 mm的冒口, 放置在铸件顶部的法兰面上, 冒口之间以冷铁隔开, 划分出各自的补缩区域。图3所示为铸件铸造工艺设计模型与冷铁的空间分布图。

2 数值模拟前处理

2.1 网格划分

由于风电主机架模型体积庞大, 过小的网格尺寸会严重拖慢计算机的运算求解速度, 造成计算机资



(a) 铸造工艺设计

(b) 冷铁分布图

图3 6 MW风电主机架铸造工艺设计模型

Fig. 3 Casting process design model of 6 MW wind turbine mainframe

源的浪费。但又因其结构复杂且壁厚不均匀，且浇注系统断面变化大、弯道多，如果设置过大的网格尺寸则会导致模型细节的丢失，降低数值模拟的精准性。为了提高计算精度，将铸件模型中的短边和小碎面等细节部位设置网格单元尺寸为15 mm，其余部位网格大小设置为20 mm，保证了每条曲线上至少分配了5个结点。同时为了提高计算机的模拟运算效率，在ProCAST中设置虚拟砂箱，不涉及网格的划分。

2.2 材料与工艺参数

球墨铸铁属于高强度铸铁，有较高的强度和抗疲劳性能，有一定的塑韧性，并且具有良好的耐磨性和减震性，缺口敏感性较低，铸造工艺性好，因而在风电机组中得到了广泛应用^[10]。但与其他合金不同的是，球墨铸铁的固、液两相区间较宽，呈“糊状凝固”的特点^[11-12]。且球墨铸铁的凝固伴随着小石墨球的析出与胀大，在一定条件下，铸件在凝固时甚至会发生体积的膨胀^[12]。因此，球墨铸铁件往往会出现疏松缩孔缺陷，为了尽可能消除铸件缺陷，保证产品的物理化学性能，使用合理的铸造工艺尤为关键。图4是球墨铸铁QT400-18L的密度随温度变化曲线，可以看到，随着温度的降低，球墨铸铁的密度在均匀增大，在温度降至1 180 ℃左右时，温度-密度曲线的斜率突然减小，从此处开始，球墨铸铁开始凝固，且伴随着石墨

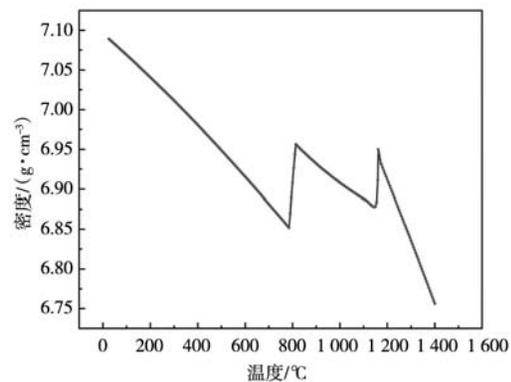


图4 QT400-18L的密度随温度变化图

Fig. 4 Density variation of QT400-18L with temperature

球的析出^[13]。

风电主机架以QT400-18L为原料进行浇注。QT400-18L的抗拉强度为370 MPa ± 10 MPa，屈服强度为230 MPa ± 10 MPa，布氏硬度值在HBW 120~175，同时有良好的低温韧性，是保证风电设备保持长期良好运作的基础。表1和图5分别是QT400-18L的化学成分表和固相率-温度曲线。QT400-18L的液相线温度约为1 180 ℃，为了保证金属液在凝固前有足够的时间充满铸件型腔，浇注温度设置在1 350~1 360 ℃范围内，浇注时间为180 s ± 20 s，在ProCAST中一般选取这些参数的中值或边界值。

表1 QT400-18L化学成分
Tab. 1 Chemical composition of QT400-18L

C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	$w_B/\%$
3.65~3.75	2.00~2.10	≤0.15	≤0.032	≤0.020	0.01~0.02	0.040~0.055	

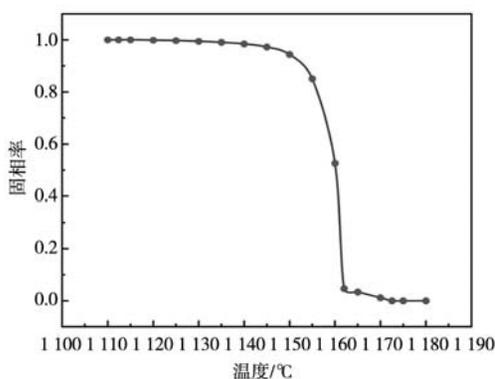


图5 QT400-18L的固相率随温度变化图

Fig. 5 Solid fraction of QT400-18L changing with temperature

型砂选用的是呋喃树脂自硬砂，这种型砂造型简单，在常温下就可以固化成形，且硬度高，透气性好，有利于铸件的凝固成形。

2.3 界面换热系数

界面换热系数是一个比较复杂的物理量，它受到很多因素的影响，如传热介质的性质、传热过程的方式、传热面的形状和材质等。在ProCAST软件前处理边界条件设置中，设置型砂与冷铁之间的界面换热系数为1 000 W/(m²·K)，金属液与冷铁之间的界面换热系数为2 000 W/(m²·K)^[14-16]，而球墨铸铁和型砂之间的换热系数则使用ProCAST库中随温度变化的函数，换热系数如图6所示。通过对换热系数的确定，计算机可以相对准确地计算各个有限单元体在铸件凝固过程中的热量传递，从而较好地预测铸件不同部位的温度梯度变化。

2.4 球化参数

由于球墨铸铁在凝固时伴随着石墨球化的过程，从而使铸件在凝固时伴随着体积膨胀和凝固收缩两种

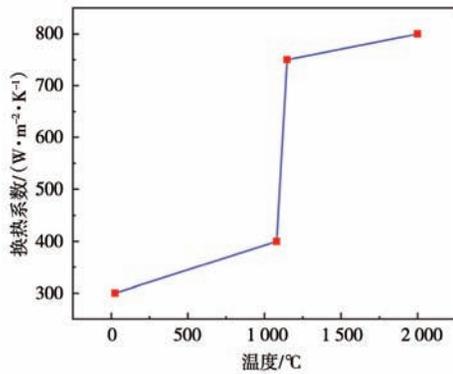


图6 球墨铸铁与型砂之间的换热系数

Fig. 6 Heat transfer coefficient between ductile iron and molding sand

现象, 因此还需要对凝固过程的微观变化进行数值模拟分析。因此, 在ProCAST前处理中需要开启微观分析模块, 根据ProCAST说明文档, 设置相应的球墨铸铁膨胀系数和孕育时间, 以此来模拟球墨铸铁中的石墨膨胀状态。针对风电主机架的数值模拟, 膨胀系数取区间正常值0.8, 孕育时间则参考实际时间, 设置为15 min。

3 初步模拟与分析

铸件的充型过程如图7所示, 金属液从两边的内浇道流入铸件型腔底部, 液面自下而上缓慢上升, 且受铸件自身结构的影响, 远离直浇道的型腔末端因为空

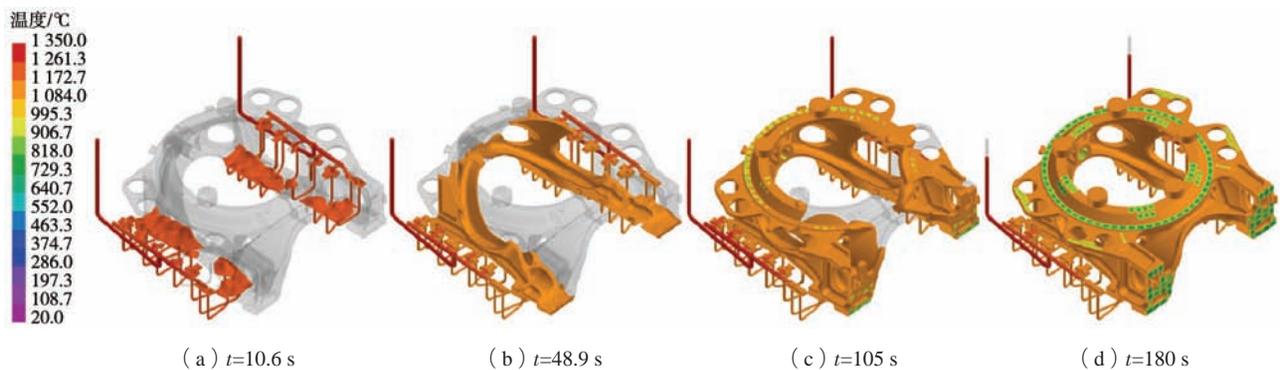


图7 主机架铸件充型过程数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of mold filling processes for the mainframe casting

间更大而最后充满。整个充型过程持续了180 s, 型腔中液面流动平稳, 没有出现飞溅、紊流等现象。

由于主机架体积庞大, 且充型时间较长, 往往在充型过程中就伴随着凝固的现象, 如图8(a)所示。铸件法兰面两边的固定架由于壁厚较薄, 且放置了冷铁, 其冷却速度远远大于铸件的其他部位, 因此铸件充型160 s时固相率就已经大于0.7, 可认为此处基本凝

固, 不再具有流动性。而随着铸件进一步冷却, 在铸件底部的厚壁处出现了大体积的孤立液相区, 如图8(b)所示。一旦球墨铸铁的自补缩与金属液凝固和冷却收缩无法相抵, 则会在孤立液相区形成缩松缩孔缺陷。

将孔隙率的可视最小值调到10%, 即可看到铸件内缩松缩孔的主要位置分布, 结果如图9所示。

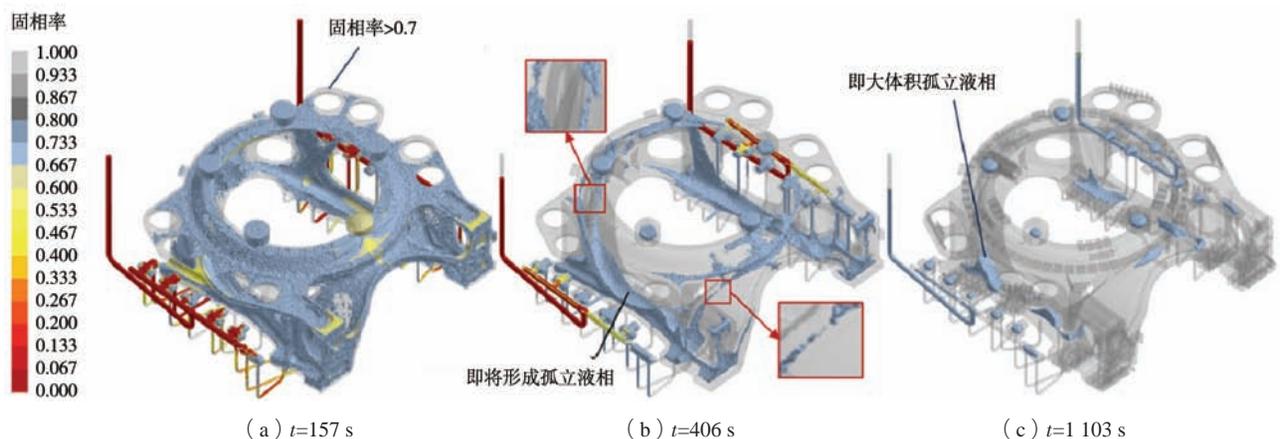


图8 主机架铸件固相率变化数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of solid fraction variations for the mainframe casting

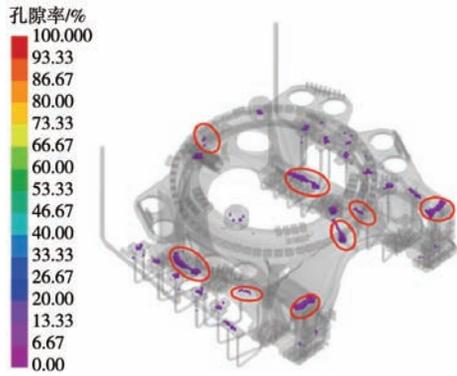


图9 主机架铸件缩松缩孔预测

Fig. 9 Prediction of shrinkage porosities and cavities in the mainframe casting

ProCAST软件显示铸件内缩松缩孔总体积达到了 $2\ 643.402\ \text{cm}^3$ ，其中大体积的缩松缩孔位于主机架底部厚壁处和主机架末端。法兰面上也存在少量的缩松缩孔。底部产生缩松缩孔的原因正是铸件在冷却时产生了大体积的孤立液相区，球墨铸铁的球化膨胀不足以抵消凝固收缩产生的空孔。而铸件末端的缺陷则是由于球墨铸铁金属液充型时以固液共存的糊状流动，其流动效果差，铸件末端是最后填充的地方，金属液流动至此，前面的金属液基本凝固，因此无法得到补缩而产生缩松缩孔。至于法兰面上的缩松缩孔则是由于冒口的补缩性能不足，冒口颈先于铸件凝固，阻断了补缩通道。

4 铸造工艺优化

为了提高冒口对铸件的补缩量，使用发热冒口替代普通冒口，确保冒口晚于铸件凝固。同时弃用铸件法兰面上的一圈冷铁，改变铸件凝固顺序，使铸件底部在凝固时尽可能有更多的金属液来补缩。此外，还

增加了两组对称的内浇道，以提高铸件末端的充型速度（图10），以减少缩松缩孔的产生。

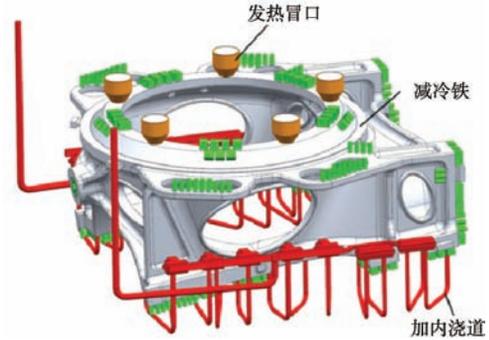


图10 优化后的铸造工艺

Fig. 10 Optimized casting process

经过数值模拟可以发现，由于卸载了铸件法兰面冷铁，凝固速度有所减慢，铸件厚壁处的金属液长时间与法兰面上的金属液相连通，并间接得到发热冒口的补缩。因此如图11（b）所示，较图8所示的大体积孤立液相区，铸件底部所形成的孤立液相区的体积和密集度均有所降低，且孤立液相区的中间也出现凝固分离的趋势。随着凝固的进行，大体积的孤立液相区被划分成多个小体积的孤立液相区。由于石墨球化膨胀，小体积的孤立液相区凝固后并未出现缩松缩孔。

图12是主机架优化后的缩松缩孔预测结果，相较于优化前的缩松缩孔数值模拟结果，使用优化后的工艺方案所产生的缩松缩孔大幅度降低，只在铸件末端出现了少量的缩松缩孔，此时铸件内缩松缩孔体积仅有 $126.137\ \text{cm}^3$ 。

5 生产验证

优化工艺实施后，成功铸造出6 MW风电主机架。

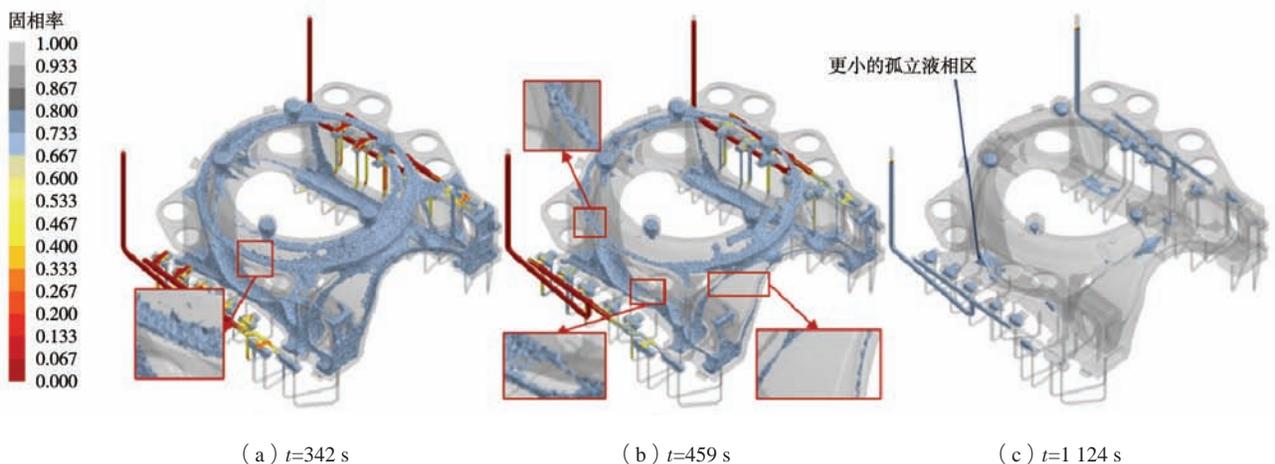


图11 主机架铸造工艺优化后不同时刻的固相率数值模拟结果

Fig. 11 Numerical simulation results of solid fractions at different times after casting process optimization of the mainframe

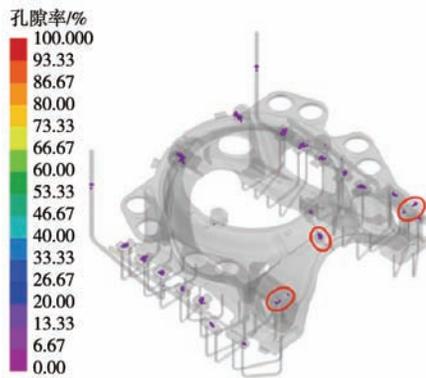


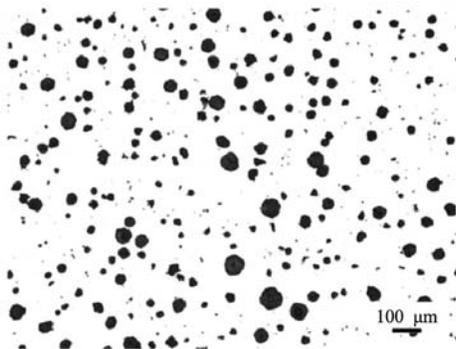
图12 主机架铸造工艺优化后的缩松缩孔数值模拟结果
Fig. 12 Numerical simulation results of shrinkage porosities and cavities after casting process optimization of the mainframe

经过检验,铸件加工面无缩松缩孔等缺陷,并且通过了高应力区磁粉探伤SM2级、超声波探伤Ⅱ级,以及其他区域磁粉探伤SM3级、超声波探伤Ⅲ级的规范要求。铸件的强度和韧性也经过测试达到了生产标准,试块的力学性能如表2所示。图13展示了铸件法兰盘侧壁处试块的金相组织。图13(a)显示了腐蚀前的金相组织,石墨球化效果良好,分布均匀,并且球化大小达到了6级,球化级别达到了2级,球化率超过90%。图13(b)展示了腐蚀后的金相组织,其中铁素体含量达到了95%,而珠光体含量低于5%。

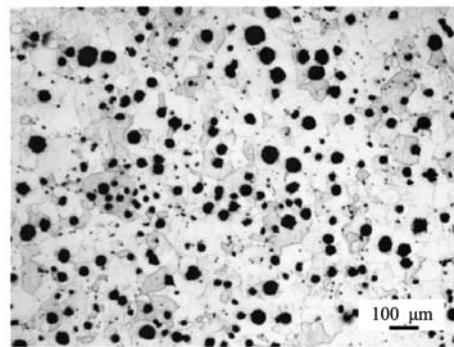
图14为工厂使用该铸造工艺生产出的6 MW风电主机架,铸件表面完整,无裂纹,且通过了各项检测,满足了批量生产与交付的条件。

表2 试块力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of test blocks

项目	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	冲击值(-40℃)/(J·cm ²)		
目标值	≥370	≥220	≥12	>7		
实测值	379	234	25.0	14	13	13



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀后

图13 铸件法兰盘侧壁处试样腐蚀前后的金相组织

Fig. 13 Metallographic structures of the samples on the side wall of the casting flange before and after corrosion



图14 6 MW风电主机架铸件

Fig. 14 The 6 MW wind turbine mainframe casting

6 结语

采用数值模拟技术预测球墨铸铁风电主机架铸件缩松缩孔、优化铸造工艺设计,通过在铸件末端增加两组内浇道,微调了铸件充型顺序;通过删除铸件法兰面上的一圈冷铁设置,改进了铸件凝固顺序;通过用发热冒口替换普通冒口,提高了冒口补缩效率。再次数值模拟结果表明,工艺优化后铸件本体的缩松体积从2 643.402 cm³减少到126.137 cm³。以上研发工作为工厂成功铸造出符合交付条件的主机架提供了有力支持。

参考文献:

- [1] 傅明康, 宋贤发, 陈倩慧, 等. 大型风力发电机组中箱体铸造工艺设计 [J]. 铸造, 2017, 66 (1): 16-19.
- [2] 邓巍, 姜繁智, 周诗洋, 等. 海上风电法兰热锻成形工艺优化 [J]. 冶金设备, 2022 (4): 1-6.
- [3] 赵顺治. 风机主轴成形工艺仿真及参数研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- [4] 魏冬冬, 徐贵宝, 张军, 等. 风电球墨铸铁行星架铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1233-1238.
- [5] 陈玉芳, 王星, 唐光伟. 7 MW风电底座生产的关键控制技术 [J]. 铸造, 2017, 76 (10): 1108-1111.
- [6] YOU M, DIAO X G. Simulation of casting process for ductile iron wind generator rotor shaft [J]. Metallurgy Technology and Materials, 2012, 567: 141-145.
- [7] VLADIMIR ŠABÍK, PETER FURTAŠ. Failure analysis of a clutch wheel for wind turbines with the use of casting process simulation [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 135: 106159.
- [8] 赵悦光, 田逢甲, 郭敏, 等. 风电轮毂铸件铸造工艺设计研究 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (3): 229-232.
- [9] 何义雄. 2.5 MW风电轮毂球墨铸铁件的无冒口铸造工艺 [J]. 现代铸铁, 2020, 40 (4): 31-33.
- [10] 李肖霞, 王京丽, 杨扩岭. 风电机组球墨铸铁件缩松分析及预防措施 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (7): 601-602.
- [11] 周继扬. 厚壁球墨铸铁件的凝固形貌 [J]. 铸造, 1996, 45 (1): 1-7.
- [12] 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.
- [13] 唐玉龙. 球墨铸铁件缩孔缩松缺陷预测的数值模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [14] 赵建华, 宋刚, 王亚军, 等. 铸件/铸型热力耦合界面换热系数的稳态法测量 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35 (11): 62-66.
- [15] 黄雪红, 季德生. 基于ProCAST球墨铸铁支座的铸造工艺优化 [J]. 现代铸铁, 2022, 42 (4): 29-35.
- [16] 杨行, 郭莹, 林相, 等. 机床底座ProCAST数值模拟及铸造工艺优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (6): 6-9.

Numerical Simulation and Optimization of the Casting Process for a 6 MW Large-Scale Wind Turbine Main Frame

SU Fei¹, WANG Dong-hong², XUE Jing¹, DENG Xiao-ming³, GONG Qian-hai³, CHEN Yin³, SHU Da²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai 200240, China; 3. Zhejiang Jiali Wind Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China)

Abstract:

Taking the mainframe of a 6 MW large-scale wind turbine generator as research object, and utilizing the ProCAST finite element analysis software to carry out numerical simulation, the potential shrinkage porosity and cavity locations in the casting were successfully predicted, and based on this, the casting process was optimized. After practical production verification at the factory, manufactured the mainframe casting products met the delivery requirements. This research provided an effective method for optimizing the casting process and predicting defects in large-scale wind turbine ductile iron castings, and contributed to resource conservation and quality assurance in industrial production.

Key words:

wind turbine mainframe; nodular cast iron component; casting process optimization; numerical simulation