

定量座包浇注铸件的二次孕育工艺优化

李晓艳, 马宏军, 李东成, 刘明宇, 钱 峥

(日月重工股份有限公司, 浙江宁波 315113)

摘要: 探讨在定量座包浇注过程中, 不同的二次孕育工艺对风电球墨铸铁扭力臂性能的影响。通过优化二次孕育工艺的孕育剂粒度及添加方式, 浇注5吨QT400-18AL扭力臂。结果显示, 二次孕育工艺优化后, 抗拉强度和屈服强度分别提升4.5 MPa和4.6 MPa, 石墨球数量增加了约40个 $\cdot\text{mm}^{-2}$, 球化率保持不变。然而, 二次孕育工艺优化前后试样在低温冲击性能方面的差异并不显著。二次孕育工艺优化前后试样金相石墨球化率保持一致, 但经过二次孕育工艺优化后, 单位面积石墨球数量的标准差较大, 表明优化方案仍需进一步改进以提升其均匀性。

关键词: 定量座包; 球化率; 孕育剂; 力学性能; 二次孕育

在风电铸件领域, 轮毂、底座、轮轴以及齿轮箱箱体、扭力臂、行星轮支架等部件尤为突出^[1]。为了确保这些部件能在高空环境下连续无故障地运行至少20年, 对铸件的质量要求极为严苛。风电铸件中的球铁组织性能有着严格的要求。在石墨状态方面, 需要石墨球数量多且大小分布均匀、形态圆整, 因为良好的石墨形态和分布能够有效减少应力集中, 提升铸件的力学性能。而铁素体基体也须具备合适的含量和良好的连续性, 以保证铸件具有足够的韧性和塑性。同时, 考虑到风电设备常常在低温环境下运行, 铸件的低温性能, 如低温冲击韧性等, 也至关重要。在低温环境中, 若铸件的低温性能不佳, 可能会出现脆性断裂等问题, 严重影响风力发电系统的正常运行^[2-3]。

作为风电设备核心组件的扭力臂, 其材料选择与制造工艺直接关系到风力发电系统的整体可靠性和使用寿命。在生产过程中, 孕育处理对于铸件组织的均匀性和力学性能的提升发挥着至关重要的作用^[4-5]。然而, 在实际生产中, 鉴于在处理渣的过程中, 采用定量座包浇注法导致浇注时间适度延长约1.5 min, 随流孕育时孕育剂粒度较小且孕育过早, 导致石墨球数量减少, 石墨形态及大小分布不均匀, 从而对铸件的力学性能和微观组织结构产生了不利影响, 难以满足风电铸件对球铁组织性能的严格要求。

本研究旨在通过对扭力臂铸件的二次孕育处理方法进行优化, 以改善球铁组织的石墨状态和基体性能, 提升铸件的低温性能等综合性能。这不仅对于提高扭力臂的质量和可靠性具有重要意义, 也有助于提升整个风力发电系统的运行稳定性和使用寿命。已有研究表明, 二次孕育处理对大断面球铁组织及性能有着显著影响, 进一步深入研究二次孕育处理对满足其特殊性能要求的作用非常必要^[6]。

1 试验材料及方法

1.1 材料及制备

本产品熔炼过程所使用的原材料包括Q10级优质生铁、优质碳素钢、再生料、低稀土含量的球化剂Mg6RE、75SiFe、硅铝孕育剂以及高钙钡一次孕育剂。原材料的化学成分见表1。

作者简介:

李晓艳(1993-), 女, 硕士, 中级工程师, 主要从事铸铁材料研发工作。E-mail: 1421563296@qq.com

中图分类号: TG253

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)11-1536-07

收稿日期:

2025-02-08 收到初稿,
2025-04-17 收到修订稿。

表1 原材料化学成分
Tab. 1 Chemical compositions of raw materials

名称	C	Si	Mn	S	P	Mg	Ba	Ca	Re	AL	Zr	Fe
Q10生铁	4.54	0.62	0.076	0.012	0.025	-	-	-	-	-	-	余量
优质碳素钢	0.04	0.01	0.222	0.006	0.014	-	-	-	-	-	-	余量
75SiFe	-	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	余量
高钙钡孕育剂	-	72.40	-	-	-	-	1.85	0.72	-	0.92	-	余量
硅铝孕育剂	-	72.35	-	-	-	-	-	0.55	-	4.16	-	余量

1.2 试验方法

在为5 t中频感应炉中完成铁液的熔炼过程，出铁温度设定为1 470 ℃。利用直读光谱仪对铁液成分进行检测。采用三明治球化处理工艺，其中球化剂的添加量控制在1.05%（质量分数，下同），同时加入了0.35%的高钙钡一次孕育剂，其粒度范围为3~8 mm。此外，采用粒度分别为0.2~0.8 mm、10~50 mm的硅铝孕育剂进行二次孕育处理，两种孕育剂的添加量均为0.20%。铁液的浇注温度控制在1 370~1 380 ℃。

在工艺优化前，二次孕育处理采用的是粒度为0.2~0.8 mm的随流孕育方式，具体的操作现场图示见图1。工艺优化后，二次孕育处理改为将粒度为10~50 mm

的孕育剂加入浇包液面，然后倒包进座包里面进行浇注，具体的操作现场图示见图2。

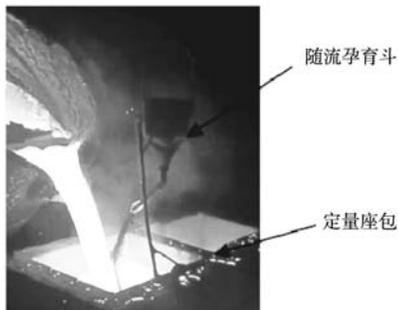


图1 优化前二次孕育现场操作图
Fig. 1 Field operation diagram of the secondary inoculation process before optimization

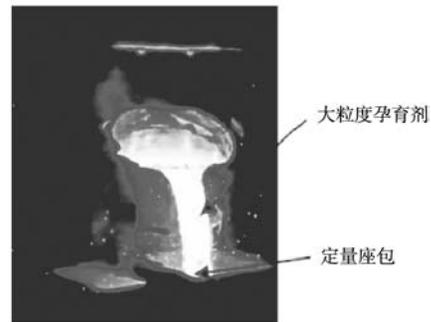
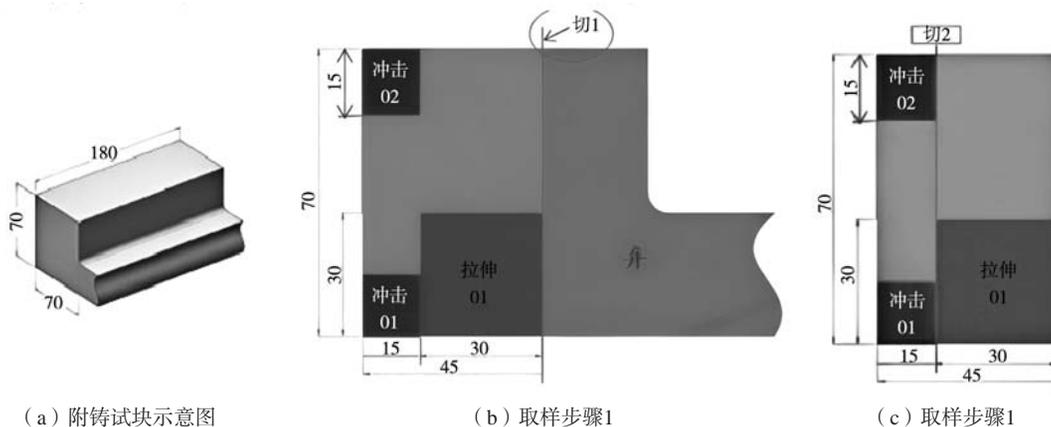


图2 优化后二次孕育现场操作图
Fig. 2 Field operation diagram of the secondary inoculation process after optimization

2 试验结果与分析

2.1 力学性能分析

依据生产计划，在工艺优化前后，分别浇注10件扭力臂，该扭力臂在分型面法兰面侧面放置有尺寸为70 mm × 70 mm × 180 mm的附铸试块，如图3（a）所示，并对其进行光谱成分分析，结果如表2所示。工艺优化前后的试样化学成分详细数据见表2，其中二次孕育处理优化前的为1组，二次孕育处理优化后的为2



(a) 附铸试块示意图

(b) 取样步骤1

(c) 取样步骤1

图3 附铸试块及取样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of attached cast test block and sampling

表2 铸件化学成分
Tab. 2 Chemical composition of castings

w_B/%

名称	C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	Cu	Cr
1-1	3.85	2.1	0.13	0.032	0.009	0.003	0.053	0.008	0.021
1-2	3.85	2.11	0.13	0.032	0.008	0.003	0.048	0.009	0.019
1-3	3.85	2.11	0.13	0.031	0.009	0.004	0.045	0.007	0.021
1-4	3.85	2.13	0.13	0.031	0.008	0.003	0.052	0.008	0.018
1-5	3.85	2.12	0.12	0.031	0.011	0.005	0.051	0.007	0.017
1-6	3.85	2.12	0.12	0.032	0.01	0.004	0.054	0.008	0.024
1-7	3.85	2.12	0.12	0.032	0.01	0.004	0.052	0.008	0.028
1-8	3.86	2.11	0.12	0.031	0.01	0.004	0.05	0.011	0.030
1-9	3.86	2.11	0.12	0.031	0.011	0.005	0.05	0.008	0.020
1-10	3.86	2.14	0.12	0.031	0.01	0.004	0.048	0.008	0.018
2-1	3.86	2.12	0.12	0.031	0.009	0.005	0.053	0.009	0.024
2-2	3.86	2.13	0.12	0.032	0.011	0.005	0.055	0.009	0.022
2-3	3.86	2.14	0.12	0.031	0.01	0.004	0.047	0.008	0.021
2-4	3.86	2.11	0.12	0.033	0.01	0.004	0.054	0.008	0.020
2-5	3.86	2.11	0.12	0.033	0.011	0.004	0.052	0.009	0.024
2-6	3.86	2.11	0.12	0.033	0.011	0.004	0.048	0.011	0.021
2-7	3.87	2.12	0.11	0.028	0.012	0.004	0.052	0.009	0.022
2-8	3.87	2.14	0.11	0.029	0.009	0.004	0.05	0.010	0.025
2-9	3.87	2.13	0.11	0.027	0.009	0.004	0.046	0.007	0.016
2-10	3.86	2.15	0.12	0.03	0.008	0.005	0.051	0.008	0.023

组。

根据图3(b)与(c)所展示的取样示意图,对经过二次孕育工艺优化前后的铸件附铸试块分别选取10件进行检测样品的制备工作。在样品制备过程中,必须保留一份作为留底。拉伸试棒切割后的剩余部分应予以保留,并依照金相检测标准GB/T 9441—2021进行金相观察。

针对优化前后各10个拉伸试棒,依据标准GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分—室温试验方法》进行常温下的拉伸测试。同时,针对优化前后各10组(每组3个)的冲击试样,依据标准GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》在-20℃环境下进行冲击试验。测试结果详见表3。

通过对表3数据的分析,可以观察到二次孕育工艺优化后,抗拉强度和屈服强度平均值均得到提升,抗拉强度增加了4.5 MPa,屈服强度增加了4.6 MPa。在伸长率方面,优化后有所下降,平均幅度为1.4%,但在-20℃的低温冲击性能及硬度方面,并未发现显著的变化。

为探究经过二次孕育处理优化后对铸件附铸试块力学性能稳定性的影响,进行离散度分析,其结果如图4至图8所示。

观察图4~图8,可以得出结论:经过二次孕育工艺的优化,附铸试块在抗拉强度、屈服强度、-20℃低温冲击性能及硬度方面的离散程度较优化前有所降低,显示出更好的稳定性。然而,在伸长率方面,优化后的二次孕育处理工艺相较于优化前表现出更大的变异系数,这表明其稳定性存在一定程度的波动。

对二次孕育处理优化前后的铸件附铸试块力学性能综合分析,可以得出结论:二次孕育处理工艺优化在提升力学性能方面具有明显优势。

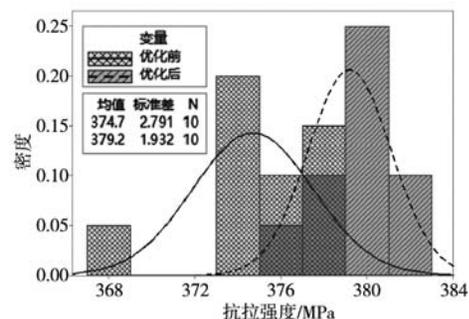


图4 抗拉强度离散图

Fig. 4 Tensile strength discrete diagram

表3 二次孕育工艺优化前后浇注铸件附铸试块力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of cast-in test blocks before and after secondary inoculation process optimization

名称	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度 HBW	-20 °C 冲击值/J
1-1	377	235	26.5	143	13.05
1-2	368	226	26.5	135	13.53
1-3	377	235	26.0	140	14.17
1-4	374	233	26.0	137	13.63
1-5	374	233	26.5	136	12.23
1-6	374	233	27.5	139	14.50
1-7	374	233	24.5	140	12.94
1-8	378	236	25.5	140	12.77
1-9	375	234	26.5	140	12.60
1-10	376	235	26.0	140	12.80
均值1	374.7	233.3	26.15	139	13.22
2-1	377	237	26.5	138	13.53
2-2	378	236	25.5	138	12.64
2-3	379	237	25.0	141	13.63
2-4	379	238	23.0	141	14.06
2-5	376	235	25.0	141	14.17
2-6	379	237	24.0	141	13.55
2-7	380	239	24.0	141	12.93
2-8	382	242	21.0	141	12.77
2-9	380	237	27.0	139	12.33
2-10	382	241	26.5	143	12.37
均值2	379.2	237.9	24.75	140.4	13.20

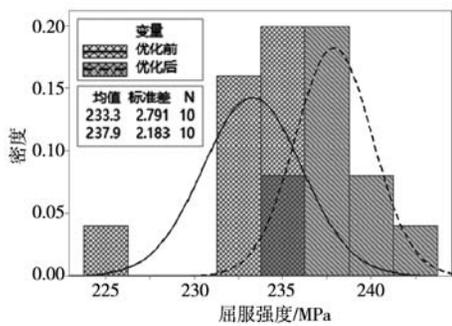


图5 屈服强度离散图
Fig. 5 Yield strength discrete diagram

2.2 石墨组织分析

图9为二次孕育工艺优化前后的附铸试块内石墨组织显微特征。借助图像分析软件Image Pro Plus6.0, 对金相图片中的石墨球数量及直径测量, 并依据球墨铸铁金相检验标准GB/T 9441—2021, 对石墨的球化级别和等级大小评定, 结果见表4。

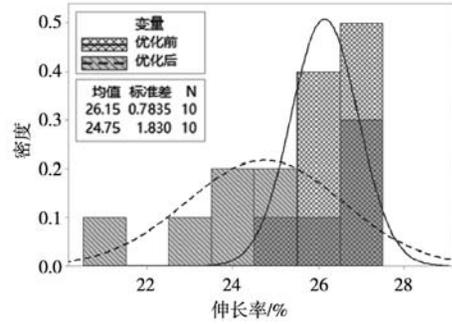


图6 伸长率离散图
Fig. 6 Elongation discrete diagram

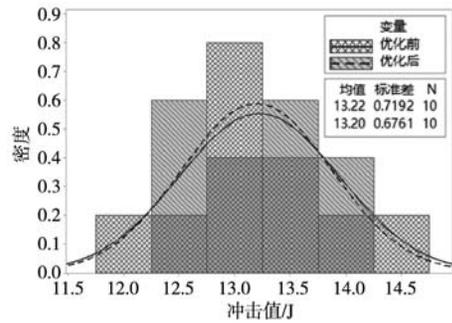


图7 -20 °C冲击值离散图
Fig. 7 -20 °C Impact value discrete diagram

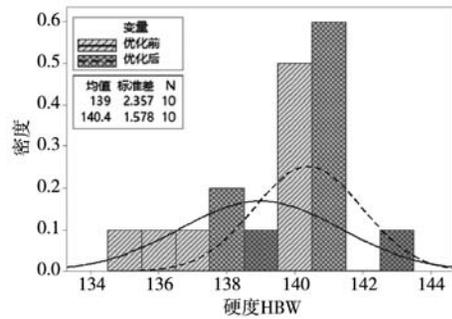


图8 硬度离散图
Fig. 8 Hardness discrete diagram

经观察表4数据可知, 二次孕育工艺优化前后, 附铸试块的球化率保持一致, 然而优化后每平方毫米内石墨球的数量相较于优化前平均增加了42个。为进一步探究工艺优化对附铸试块每平方毫米内球数稳定性的影响, 进行离散度分析, 结果如图10所示。

图10对单位面积内石墨球数量的分布离散性进行探讨, 结果显示, 二次孕育工艺优化后的试块在石墨球数量的离散性方面更为突出, 而二次孕育工艺优化前的试块则在石墨球数量的稳定性方面表现更为优异。分析认为, 这与二次孕育剂在浇包液面的添加方式以及倒包孕育过程中大颗粒度孕育剂溶解的均匀

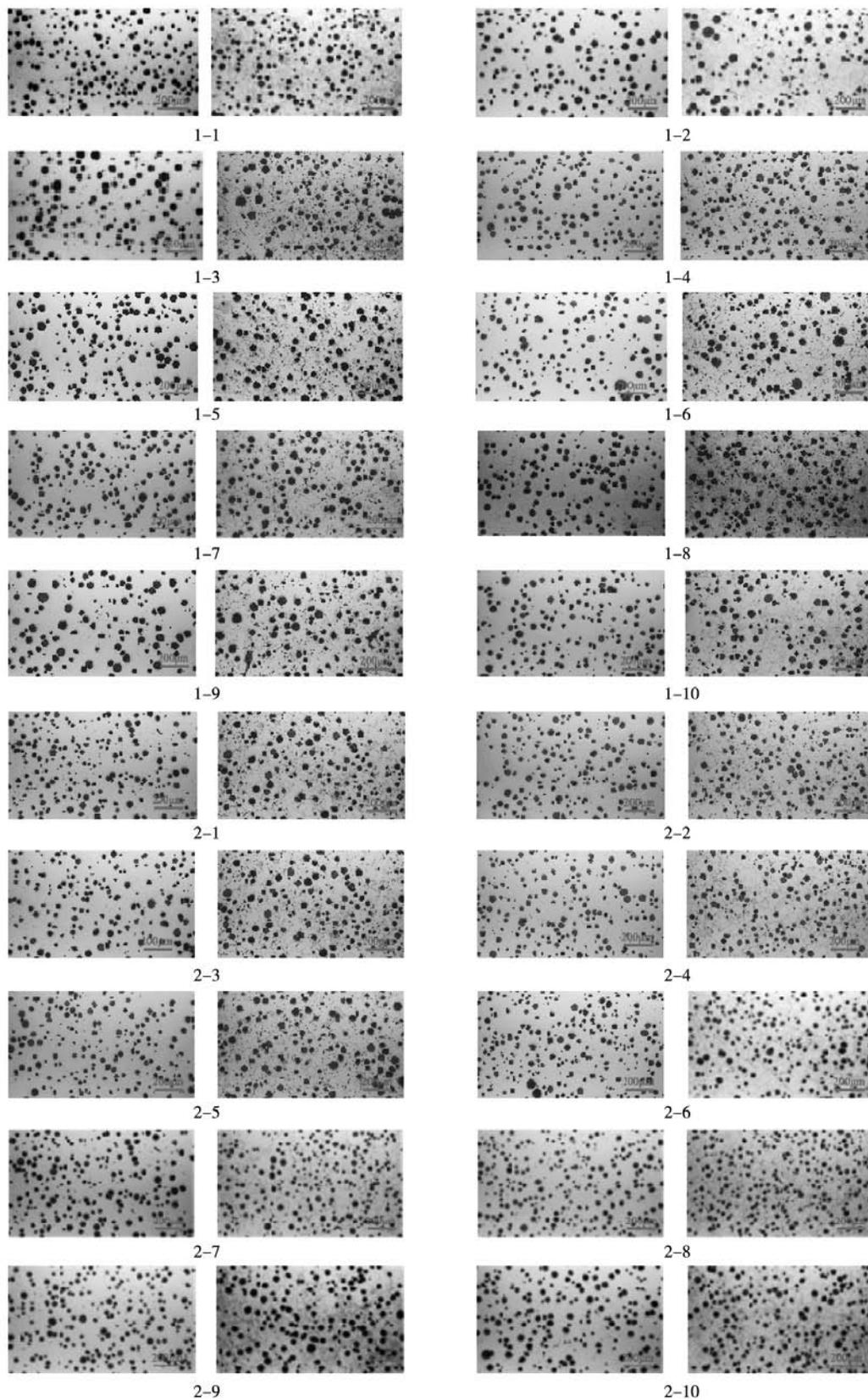


图9 二次孕育处理优化前后附铸试块金相组织图100× (左边: 未腐蚀; 右边: 腐蚀)

Fig. 9 Shows the metallographic structure of the attached casting test block before and after the optimization of the secondary inoculation treatment 100× (Left: uncorroded; Right: corroded)

表4 二次孕育工艺优化前后附铸试块金相检测结果
Tab. 4 The metallographic detection results of the attached casting test block before and after the optimization of the secondary inoculation process

名称	球化率/%	石墨大小	珠光体/%	铁素体/%	球数/(个·mm ²)
1-1	95	6级+5级	<5%	>95%	145
1-2	95	6级+5级	<5%	>95%	140
1-3	95	6级+5级	<5%	>95%	137
1-4	95	6级	<5%	>95%	155
1-5	95	6级+5级	<5%	>95%	126
1-6	95	6级+5级	<5%	>95%	134
1-7	95	6级+5级	<5%	>95%	142
1-8	95	6级+5级	<5%	>95%	138
1-9	95	6级+5级	<5%	>95%	113
1-10	95	6级	<5%	>95%	123
平均值	95	6级+5级	<5%	>95%	135
2-1	95	6级+5级	<5%	>95%	183
2-2	95	6级+5级	<5%	>95%	174
2-3	95	6级+5级	<5%	>95%	140
2-4	95	6级	<5%	>95%	189
2-5	95	6级+5级	<5%	>95%	156
2-6	95	6级	<5%	>95%	190
2-7	95	6级+5级	<5%	>95%	183
2-8	95	6级	<5%	>95%	189
2-9	95	6级+5级	<5%	>95%	188
2-10	95	6级	<5%	>95%	175
平均值	95	6级+5级	<5%	>95%	177

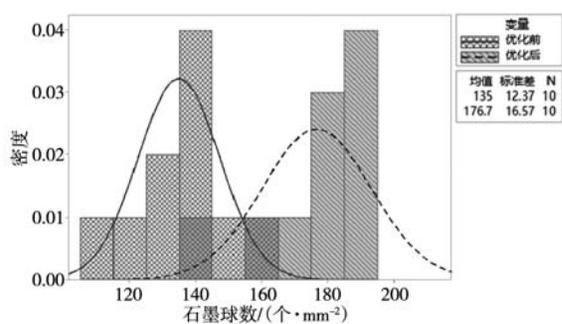


图10 石墨球数离散图

Fig. 10 Discrete graph of graphite sphere number

性密切相关^[7]。二次孕育剂的添加方式和大颗粒度孕育剂熔解的均匀性对石墨球数量分布具有显著影响。优化后的工艺在添加方式和熔解均匀性方面可能存在缺陷,导致石墨球数量离散性增大。后续可通过进一步优化二次孕育工艺,提高孕育剂添加与熔解的均匀

性,使单位面积内石墨球的大小与数量达到或超过ISO945—4:2019附录B中图B.1中(c)的要求。

3 结论

(1) 二次孕育处理工艺的优化在增强材料力学性能方面展现出显著优势。

(2) 经过二次孕育处理工艺优化,铸件附铸试块的抗拉强度、屈服强度以及石墨球数量均得到了积极改善。

(3) 为了进一步提升铸件的整体性能,后期应着重于优化二次孕育处理工艺,特别是在孕育剂的添加方式和熔解均匀性方面,以期在增强力学性能的同时,也能提高石墨球数量的稳定性,从而确保伸长率的稳定性。

(4) 石墨球分布均匀性与伸长率之间存在一定的相关性。

参考文献:

- [1] 刘春梅, 田立海. 风电铸件技术研发与生产实践 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (6) : 797-799.
- [2] 吴韬, 姜依彤, 陈光, 等. MW级风电机组轮毂用QT400与QT450球墨铸铁关键服役性能对比 [J]. 铸造, 2024, 73 (12) : 1674-1679.
- [3] 马敬仲, 丁建中, 尤其光, 等. 超低温高韧性球墨铸铁QT400-18AL的研究及应用 [J]. 铸造, 2012, 61 (8) : 856-861.
- [4] WANG W, JING T, GAO Y, et al. Properties of a gray cast iron with oriented graphite flakes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 182 (1-3) : 593-597.
- [5] 曾大新, 张元好, 何汉军, 等. 铸铁的孕育方法及其发展 [J]. 汽车工艺与材料, 2001 (8) : 21-24.
- [6] 陈维平, 周力威, 李文辉, 等. 二次孕育对大断面球铁组织及性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2014, 34 (2) : 22-26.
- [7] 张元好, 李怀君, 饶群章. 孕育理论与孕育实践应用 [J]. 铸造设备研究, 2004 (4) : 21-24.

Optimization of the Secondary Inoculation Process for Castings Cast by Quantitative Ladle Pouring

LI Xiao-yan, MA Hong-jun, LI Dong-cheng, LIU Ming-yu, QIAN Zheng
(Riyue Heavy Industry Co., Ltd., Ningbo 315113, Zhejiang, China)

Abstract:

In this paper, the effects of different secondary inoculation processes on the properties of the torsion arm of wind power nodular cast iron during the casting process of quantitative ladle were discussed. By optimizing the inoculant particle size and adding method of the secondary inoculation process, 5 tons of QT400-18AL torque arm was poured. The results show that the tensile strength and yield strength increased by 4.5 MPa and 4.6 MPa respectively, the number of graphite spheres increased by about 40 pcs/mm², and the spheroidization rate remained unchanged. However, there was no significant difference in the low temperature impact properties of the samples before and after the secondary inoculation process optimization. The spheroidization rate of metallographic graphite remained consistent before and after the secondary inoculation process optimization, but the standard deviation of the number of graphite spheres per unit area was large after the secondary inoculation process optimization, indicating that the optimization scheme still needs further improvement to enhance its uniformity.

Key words:

quantitative ladle; spheroidization rate; inoculant; mechanical properties; the secondary inoculation process
