

耐低温冲击韧性球墨铸铁的研制

黄 鹏^{1, 2}, 陈光金^{1, 2}, 王 宣^{1, 2}, 夏奇兵^{1, 2}

(1. 宜宾普什联动科技有限公司, 四川宜宾 644000;

2. 四川省动力零部件制造工程技术研究中心, 四川宜宾 644000)

摘要: 冲击韧性是指材料在受冲击载荷作用下, 断裂前吸收塑性变形功的能力, 揭示了材料的脆断倾向, 冲击吸收能量数值越高, 材料发生脆性断裂的可能性越小。球墨铸铁在低温环境下受冲击载荷时易发生脆断, 为提升球墨铸铁使用范围, 低温-50℃下具有良好冲击韧性的球墨铸铁的研究很有必要性。本研究在不加入其他合金元素的前提下, 通过优化铸铁的化学成分, 再对铸件进行退火处理, 获得近100%铁素体基体组织, 该铸铁抗拉强度 ≥ 380 MPa, 屈服强度 ≥ 230 MPa, 满足了国标QT400-18L和欧标EN-GJS-400-18LT铸铁的力学性能要求; 同时满足-50℃低温冲击吸收能量平均值 ≥ 12 J, 且单个值 ≥ 9 J, 其综合力学性能达到了预期目标。

关键词: 球墨铸铁; 低温(-50℃); 冲击韧性; 铁素体基体; 退火处理; 力学性能; 铸造工艺

中图分类号: TG255; TG113.25; TG143.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-4977(2026)04-0361-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0051

Study and Manufacturing of Low Temperature Impact Toughness Ductile Iron

HUANG Peng^{1,2}, CHEN Guang-jin^{1,2}, WANG Xuan^{1,2}, XIA Qi-bing^{1,2}

(1. Yibin Push Link Technology Co., Ltd., Yibin 644000, Sichuan, China;

2. Sichuan Power Parts Manufacturing Engineering Technology Research Center, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: Impact toughness refers to the ability of a material to absorb plastic deformation work prior to fracture under impact loading, which reflects the material's tendency to brittle fracture. The higher the impact absorbed energy, the lower the possibility of the material undergoing brittle fracture. Ductile iron is prone to appear brittle fracture when subjected to impact load at low temperatures. In order to improve the application range of ductile iron, it is necessary to obtain ductile iron with good impact toughness at -50℃. In this study, without adding any additional alloying elements, by optimizing the chemical composition of the cast iron and subsequently annealing the castings, a nearly 100% ferrite matrix structure was obtained. The resulting ductile iron exhibits a tensile strength of ≥ 380 MPa and a yield strength of ≥ 230 MPa, which meets the mechanical property requirements of the national standard QT400-18L and the European standard EN-GJS-400-18LT cast irons. At the same time, it meets the average value of -50℃ low temperature impact absorption energy ≥ 12 J, and the single value is ≥ 9 J, and its comprehensive mechanical properties have reached the expected target.

Key words: ductile iron; low temperature(-50℃); impact toughness; ferrite matrix; annealing treatment; mechanical properties; casting process

球墨铸铁通过球化和孕育处理得到球状石墨, 有效提高铸铁的伸长率和冲击韧性, 从而得到与碳钢相近的综合使用性能^[1-2]。球墨铸铁与钢相比, 除塑性、韧性稍低外, 其他性能均接近, 是兼有钢和铸铁优点的优良材料^[3-4]。铸铁是由Fe、C和Si组成的合金总称, 工业用铸铁中C含量一般为2.0%~4.0%, C在铸铁中多以石墨形态存在, 有时也以碳化物形态存在, 除碳外, 铸铁中还含有1.0%~3.0%的Si, 以及Mn、P、S

等元素^[5-7]。合金铸铁中还含有Ni、Cr、Mo、Al、Cu、B、V等元素, 其中C和Si是影响铸铁显微组织和力学性能的主要元素^[8-9]。在铸铁材料中, 球墨铸铁的发展仅次于灰铸铁, 具有优良的力学性能、耐磨性能和吸震性能, 且生产成本较低, 已广泛应用于轨道交通行业^[10]。柳建国等为提高精铸QT450-10低温冲击韧性, 通过正交试验研究Si和Ni元素对铸件力学性能的影响, 并对铸件进行正火处理, 获得抗拉强

基金项目: 宜宾市科技计划项目(2025GY010)。

收稿日期: 2025-08-21 收到初稿, 2026-03-05 收到修订稿。

作者简介: 黄鹏(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事发动机缸体铸造及加工技术研发、产业化等方面工作。E-mail: huangpeng@pushlinko.com

引用格式: 黄鹏, 陈光金, 王宣, 等. 耐低温冲击韧性球墨铸铁的研制[J]. 铸造, 2026, 75(4): 361-365.

HUANG Peng, CHEN Guangjin, WANG Xuan, et al. Study and manufacturing of low temperature impact toughness ductile iron[J]. Foundry, 2026, 75(4): 361-365.

度 ≥ 450 MPa, -40 °C低温冲击吸收能量 ≥ 5 J的球墨铸铁^[11]。张华锋等通过调整化学成分、优化熔炼工艺和热处理工艺,获得了 -60 °C低温冲击吸收能量达到12 J以上的球墨铸铁^[12]。齐鹏等研究了Cu含量对球墨铸铁低温冲击韧性的影响,结果表明,当Cu含量为0.3%时,抗拉强度为510 MPa, -40 °C低温冲击吸收能量达16 J^[13]。姜少宁等通过添加Ti元素在球墨铸铁中形成TiC颗粒,制备了制氧机壳体铸件,研究结果表明,当Ti元素含量为0.03%时,球化率达94%,室温冲击吸收能量为17 J, -40 °C冲击 >12.3 J^[14]。毕明阳等通过调控镍含量与退火热处理工艺,探究镍含量对QT400-18L铸铁组织与力学性能的影响,结果表明,当镍质量分数为0.4%时,试样抗拉强度为395 MPa, -40 °C低温冲击吸收能量为14.7 J,较QT400-18L标准提升约22.5%^[15]。

我国轨道交通行业纬度跨度很大,寒冷地区冬季的温度最低可达到 -50 °C以下,而普通球墨铸铁低温下

耐冲击性能较差^[16],随着使用环境温度的下降,球墨铸铁逐渐由韧性向脆性转变,这使得普通球墨铸铁在低温环境下,需要承受动载荷方面的工作受到极大的制约。因此在保证抗拉强度和屈服强度均不受影响的条件下,对球墨铸铁满足 -50 °C低温冲击韧性的研究迫在眉睫。

1 材质要求及试验件的选择

国标QT400-18L和欧标EN-GJS-400-18LT铸铁的力学性能要求见表1。

产品为某机车用电机座,其轮廓尺寸为640 mm \times 601 mm \times 625 mm,零件质量301 kg,产品部分尺寸及结构如图1所示,涉及到的铸件主要壁厚一般在30~60 mm,局部位置超过60 mm,鉴于此附铸试块依据国标GB/T 1348—2019要求,选择C型40 mm试块,吃砂量控制在80 mm,试块尺寸如图2所示。

表1 国标QT400-18L和欧标EN-GJS-400-18LT的力学性能要求

Tab. 1 National standard QT400-18L and European standard EN-GJS-400-18L mechanical property requirements

标准	牌号	壁厚/mm	$R_m/(N \cdot mm^{-2})$	$R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$	伸长率A/%
GB/T 1348—2019	QT400-18L	$t \leq 30$	400	240	18
GB/T 1348—2019	QT400-18L	$30 < t \leq 60$	380	230	15
DIN EN 1563: 2019	EN-GJS-400-18LT	$t \leq 30$	400	240	18
DIN EN 1563: 2019	EN-GJS-400-18LT	$30 < t \leq 60$	380	230	15

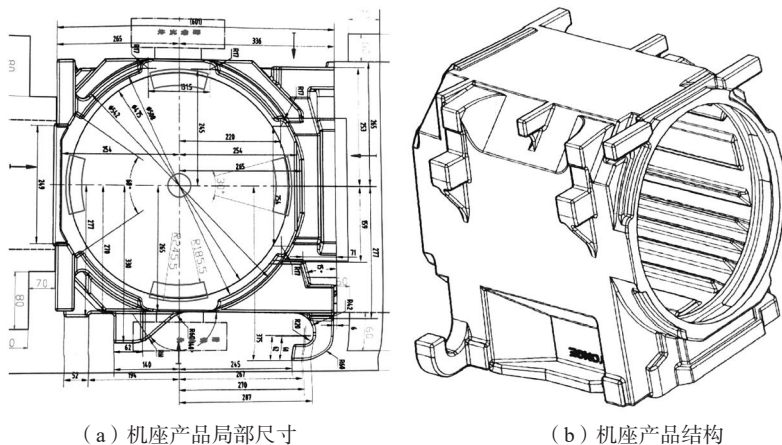


图1 机座产品部分尺寸及结构

Fig. 1 Local dimensions and structure of the motor shell product

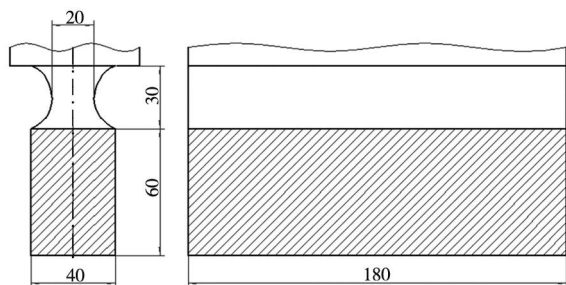


图2 附铸试块尺寸

Fig. 2 Sizes of the cast-on test block

依据表1标准,此试样对应的力学性能需要满足:

$R_m \geq 380$ N/mm², $R_{p0.2} \geq 230$ N/mm², 伸长率 $\geq 15\%$ 。

2 原材料及成分设计

2.1 原材料

通过长期的技术调研发现,要想获得具备耐低温冲击性能的高质量球墨铸铁,其炉料必须纯净,需要控制炉料中常见的Mn、P、S及微量元素。本研究采用

Q10高纯生铁、优质废钢、自身回炉料，其加入比例为7:2:1，另外还有C含量为97.50%~99.50%的增碳剂、Si含量为72.0%~80.0%的硅铁、Mg含量为5.00%~5.50%的6RE球化剂；Si含量为68.00%~75.00%的高硅钙钡孕育剂。

2.2 成分设计

对球墨铸铁而言，提高碳当量CE可以增加球墨铸铁的流动性^[17]，结合实际生产情况，对于壁厚在30~60 mm的铸件，应控制CE=4.3%~4.5%，C含量为3.65%~3.75%；Si可以降低碳在 γ -Fe中的溶解度，使共析点的含碳量降低，从而提高共析转变温度^[18]，对于铸态铁素体球墨铸铁而言，Si含量增加会提高抗拉强度和屈服强度，但增加Si明显降低冲击韧性，因此控制Si的含量为1.95%~2.05%；Mn与其他合金元素及微量元

素结合，会对球墨铸铁的冲击韧性和脆性转变温度有不利的影响，基于实际生产经验，应控制Mn的含量为<0.20%；P一般是随炉料进入球墨铸铁中，P往往被认为是有害元素，但不会影响球墨铸铁的球化效果，但P易偏析在晶界周边形成含P的碳化物，会降低伸长率和冲击韧性，因此必须严格控制P含量 $\leq 0.04\%$ ；S与球化剂中的Mg和RE有很强的结合能力，易生成有害杂质，具有反石墨球化作用，S还会消耗大量球化剂，影响球化效果^[19]，导致铸件质量下降，因此，在保证球化效果的前提下，应控制S的含量 $\leq 0.02\%$ ；Mg的含量为0.035%~0.045%。为降低合金成本，其他合金元素并没有添加，都是通过炉料带入微量成分，最终通过实际生产经验及试验生产环境，设计能满足低温冲击性能要求的球墨铸铁的化学成分如表2所示。

表2 化学成分设计
Tab. 2 Chemical composition design

表2 化学成分设计						w _B /%
C	Si	Mn	P	S	Mg	
3.65~3.75	1.95~2.05	<0.20	≤ 0.04	≤ 0.02	0.035~0.045	

3 试验方案

将生铁、废钢和球墨铸铁回炉料按照7:2:1的配比加入熔炼炉中进行预热，然后进行升温熔化，期间加入一定量的增碳剂和硅铁，继续升温熔炼成铁液后，取样检测熔炼得到的铁液成分，根据取样检测结果进行成分调整，得到合格铁液，加入占铁液总质量0.1%~0.3%的硅钡进行脱氧预处理，温度合适后出炉球化孕育；将占铁液总质量1.2%~1.3%的6RE球化剂、占铁液总质量0.7%~0.9%的硅钡孕育剂和占铁液总质量0.6~0.8%的碎钢片在100~200℃烘烤1 h，再按照冲入法进行球化处理。取样检测球化后铁液成分，将球化后的铁液进行扒渣、测温，然后进行浇注，浇注时加入铁液质量0.1%~0.2%的孕育剂进行随流孕育，浇注完成后铸件随型冷却至室温；然后产品及其附铸试块经过抛丸、落砂、粗清后进行热处理，热处理完毕后取附铸试块加工成标准检测试样，进行金相、拉伸、硬度

及低温-50℃冲击韧性检测。

4 试验结果及讨论

4.1 化学成分

在不同炉次铸件上取出5组试样，采用ARL4460直读光谱仪检测试样的化学成分，编号1~5，检测的化学成分如表3所示。

从检测的化学成分可以看出，常规元素含量均符合前述成分设计要求，其他如Cu、Ni、Mo、Sb和Sn含量很低，主要是从炉料带来的微量合金成分，此时合金化效果可以忽略，主要是C、Si、Mn、P和S影响材料性能。

4.2 金相及力学性能

对铸态试样的力学性能进行检测，其结果如表4所示，静拉伸力学性能整体比较高，均满足要求，但冲

表3 检测的化学成分
Tab. 3 Chemical compositions detected

序号	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Mo	Mg	Sb	Sn
1	3.76	1.99	0.19	0.030	0.009 1	0.027	0.014	0.003 2	0.041	0.001 0	0.002 1
2	3.70	2.05	0.20	0.030	0.009 8	0.041	0.012	0.002 8	0.038	0.001 0	0.002 3
3	3.67	2.07	0.18	0.028	0.012	0.04	0.011	0.003 8	0.036	0.001	0.002 4
4	3.68	1.96	0.17	0.029	0.010	0.028	0.011	0.002 6	0.039	0.001 0	0.001 9
5	3.65	2.04	0.18	0.032	0.011	0.048	0.013	0.003 0	0.043	0.000 9	0.002 1

表4 铸态力学性能及金相检测结果
Tab. 4 As-cast mechanical properties and metallographic test results

序号	附铸试样 $R_m/(N \cdot mm^{-2})$	$R_{p0.2}$ $/(N \cdot mm^{-2})$	$A/\%$	硬度 HB	球化 等级	石墨个数 $/mm^2$	珠光体 含量/%	-50 °C冲击吸收能量KV ₂ /J			
								检测值1	检测值2	检测值3	平均值
1	395	248	24.5	144	2~3级	155	<5	10.12	10.35	10.51	10.33
2	395	251	20.5	145	2~3级	170	<5	8.94	9.08	8.63	8.88
3	400	252	26	148	2~3级	125	5	7.09	7.11	6.65	6.95
4	386	236	25.5	143	2~3级	125	<5	9.11	9.83	10.07	9.67
5	392	245	25.5	144	2~3级	130	<5	10.26	9.53	10.74	10.17

击吸收能量均值均<12 J, 单个值部分<9 J, 不满足相关标准要求, 需要进行退火处理消除珠光体及晶界碳化物, 提高冲击韧性, 金相检测结果见表4, 金相图见图3。

4.3 热处理过程

基于对铸态试样性能及金相的分析, 需要对产品进行热处理消除微量的珠光体。产品同附铸试块一起进炉进行热处理, 热处理工艺如图4所示。将产品和附

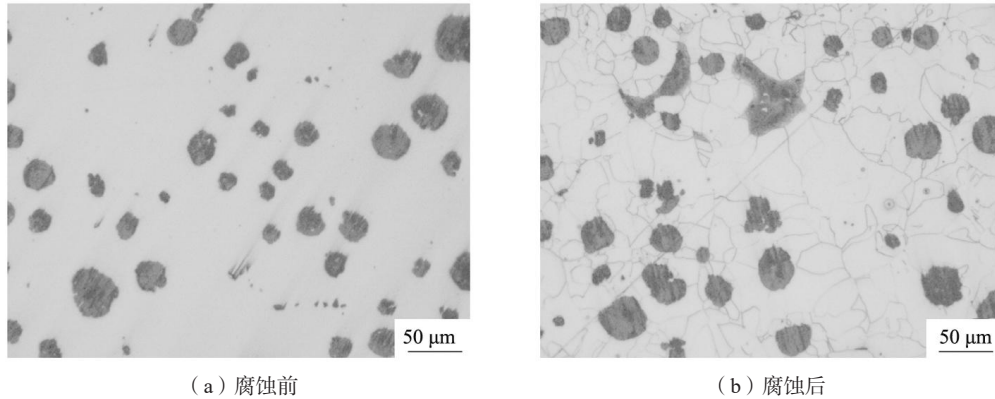


图3 铸态金相组织

Fig. 3 As-cast metallographic structures

表5 退火热处理后产品的力学性能及金相检测结果
Tab. 5 Mechanical properties and metallographic test results of the products after annealing

序号	附铸试样 $R_m/(N \cdot mm^{-2})$	$R_{p0.2}$ $/(N \cdot mm^{-2})$	$A/\%$	硬度 HB	球化 等级	石墨个数 $/mm^2$	珠光体 含量/%	-50 °C冲击吸收能量KV ₂ /J			
								检测值1	检测值2	检测值3	平均值
1	384	242	23.5	138	2~3级	145	<2	14.42	13.81	14.42	14.22
2	389	245	24.5	142	2~3级	150	<2	13.87	14.25	14.07	14.06
3	390	243	25	144	2~3级	145	<2	13.63	14.42	14.35	14.13
4	386	239	25.5	140	2~3级	140	<2	14.42	14.63	14.52	14.52
5	385	240	26.5	139	2~3级	135	<2	14.51	13.89	14.34	14.25

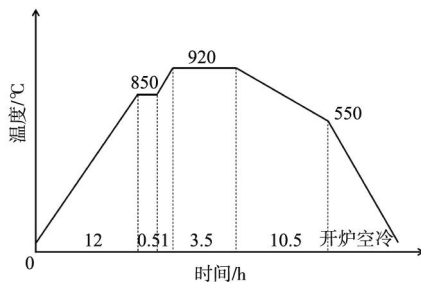


图4 热处理工艺

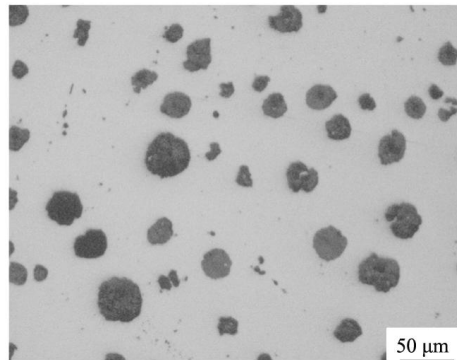
Fig. 4 The heat treatment process

铸试块放进退火炉中随炉升温, 升至850 °C保温0.5 h, 再升温至920 °C保温3.5 h, 然后随炉冷至550 °C后开炉空冷, 此过程中需严格控制升温 and 降温速率, 本次试制控制升温速率70 °C/h, 降温速率35 °C/h。

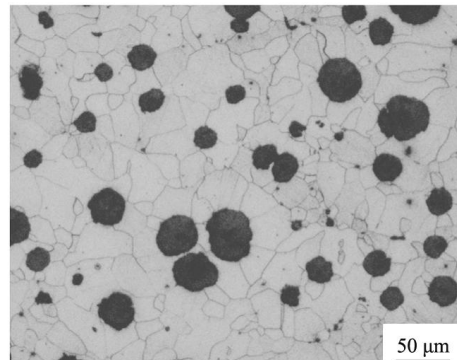
4.4 冲击性能

对上述铸件进行热处理后, 取附铸试块加工成标准的“V”型冲击试样和力学拉伸试样, 冲击试块在低温-50 °C环境下进行冲击检测, 其抗拉强度满足

≥ 380 MPa, 屈服强度满足 ≥ 230 MPa, -50 °C冲击吸收能量满足平均值大于12 J, 且单个值大于9 J。说明通过原材料选用、成分控制, 热处理后, 能够得到满足预期目标的球墨铸铁件, 其结果见表5, 金相组织如



(a) 腐蚀前



(b) 腐蚀后

图5 退火处理后金相组织

Fig. 5 Metallographic structures after annealing treatment

5 结论

在不添加Ni合金元素的条件下, 通过严格控制材料选用和常规元素化学成分, 再通过合适的热处理工艺, 能够保证试制的球墨铸铁件在低温 -50 °C条件下

图5所示, 通过退火处理, 铸态金相中少量珠光体被分解, 得到了近乎100%的铁素体组织, 因而提高了冲击韧性。

具有良好的冲击韧性, “V”型缺口下平均冲击吸收能量为14.37 J, 又能满足QT400-18L的拉伸强度和伸长率要求, 通过此工艺的试验验证, 制备出一种在低温 -50 °C下具备良好冲击韧性的球墨铸铁, 为该领域提供了技术性参考。

参考文献:

- [1] 张坤, 刘建东, 宋贤发, 等. 厚大断面球墨铸铁低温冲击性能研究 [J]. 现代铸铁, 2017, 37 (3): 41-45.
- [2] 潘密, 邵斌, 杨宗明, 等. QT350-22AL厚大断面低温球墨铸铁件熔炼生产工艺 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1169-1172.
- [3] 张新宁, 姜珂. 奥氏体球墨铸铁超低温冲击断裂行为研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (12): 1326-1328.
- [4] 龚文邦, 杨振阳, 刘金城, 等. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 的低温性能与环境脆性 [J]. 铸造, 2022, 71 (6): 741-745.
- [5] 卫东海, 李克锐, 李增利, 等. 轨道交通用低温高韧性球墨铸铁件制造技术研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 342-348.
- [6] 佟立丰. QT450-10球墨铸铁强韧化处理和性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [7] 姜珂. 超低温奥氏体球墨铸铁微观组织与低温冲击断裂行为的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [8] 张新宁. 石墨球对系列冲击温度下球墨铸铁断口作用机制 [J]. 钢铁, 2019, 54 (9): 110-115.
- [9] 王峰. 球墨铸铁的应用及技术发展 [J]. 湖北理工学院学报, 2021, 37 (6): 54-58.
- [10] 赵阳, 孙新明, 李亚文. QT400-18AL (-50 °C) 低温冲击材料研究及应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2015 (23): 32-36.
- [11] 柳建国, 陈娟, 李乔. 汽车零部件精铸QT450-10低温高冲击性能研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2019 (11): 75-77.
- [12] 张华锋, 孙树峰, 朱于国, 等. 超低温地铁传动箱用铁素体球墨铸铁的开发 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 2766-2768.
- [13] 齐鹏, 许荣福, 马驿皓, 等. 铜对低温球墨铸铁组织与力学性能的影响研究 [J]. 铸造技术, 2023, 44 (5): 443-448.
- [14] 姜少宁, 朱晓宇, 林江海, 等. 钛对球墨铸铁显微组织与低温性能的影响 [J]. 铸造, 2025, 74 (1): 26-32.
- [15] 毕明阳, 许荣福, 冯以盛, 等. 镍元素对低温球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 齐鲁工业大学学报, 2025, 39 (6): 11-18.
- [16] 张宇航, 郭兴春, 付彬国, 等. 铁素体球墨铸铁低温冲击韧性 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (17): 6937-6941.
- [17] 邓凯. -50 °C低温冲击球墨铸铁的研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2011 (17): 72.
- [18] 王文慧, 孙玉福, 肖志云. 镍和硅复合添加对低温高韧性球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (5): 456-463.
- [19] 徐德安, 纪汉成, 肖志瑜. 大型海上风电机组高强度高韧性抗低温冲击球墨铸铁主轴的研发 [J]. 铸造技术, 2025, 46 (5): 481-490.