DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.4209

风电悬架梁铸造工艺设计及模拟

孙祥广,秦　程,韩庆翔,张宪华,周正寿
(江苏恒立液压股份有限公司 常州铸造分公司,江苏 常州 213164)

摘　要:传统的风力发电铸件主要以低牌号低延伸的球铁件为主。随着时代的快速发展,风力发电铸件催生了高伸长率的性能要求。本文以 QT500-14 为研究对象,使用 MAGMA 模拟软件对风电悬架梁铸件进行铸造工艺设计,通过增加冷铁的方式对工艺进行优化。经铸件解剖和超声探伤验证,铸件内部缩松缩孔缺陷满足技术要求。通过优化 C、Si 和 Mn 等关键元素,金相和力学性能均满足技术要求,成功开发 QT500-14 球墨铸铁风电悬架梁。

关键词:数值模拟;悬架梁;缺陷;工艺优化

中图分类号: TG244　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2025)01-0092-06

Casting Process Design and Simulation of Suspension Beam Casting

SUN Xiangguang, QIN Cheng, HAN Qingxiang, ZHANG Xianhua, ZHOU Zhengshou
(Changzhou Casting Branch, Jiangsu Hengli Hydraulic Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: Traditionally, low-grade and low-elongation ductile nodular iron is the major material used for wind power castings. With the rapid development of the times, high elongation is required for wind power castings. This paper principally focused on the material QT500-14 as the research target, employing MAGMA simulation software to devise the casting process for wind power suspension beam castings and optimizing the process through the addition of chills. After dissection and ultrasonic testing, the internal shrinkage porosity and shrinkage hole defects of the casting fulfil the technical criteria. By optimizing crucial elements such as C, Si and Mn, both the metallographic and mechanical properties satisfy the technical criteria, thereby successfully developing the QT500-14 ductile iron wind power suspension beam.

Key words: numerical simulation; suspension beam; defect; process optimization

风力发电早期采用钢管、焊接件作为发电机组的支撑零件,随着风电工业的不断发展,风力发电铸件逐渐成为替代钢管和焊接件的重要零件[1-3]。风电铸件结构复杂,承受压力高,产品质量要求很高。不仅需要满足低温性能要求,对铸件内部、外部质量要求和机械性能要求也甚是严格[4-6],近年来,国内外研究人员不断进行材料创新,将不同的合金元素添加到铸铁中,改善球墨铸铁力学性能,使其能更好地承受各种应力和载荷,保证设备稳定性和寿命[7-8]。此外,对铸造工艺参数进行了深入研究,通过调整浇注温度、速度和冷却方式等参数,提高了铸件的性能和质量。

尽管目前在风电悬架梁铸造工艺方面已取得诸多成果,但仍面临如何进一步提高铸造工艺精度和稳定性的问题。鉴于此,本文深入研究风电悬架梁铸造工艺,结合前人研究经验和成果,使用 MAGMA 计算机模拟技术[9-12],探索更加先进、高效、可靠的铸造工艺,为我国风电产业的持续发展提供有力的技术支持。

1　铸造工艺设计和优化

1.1　风电悬架梁结构特征分析

风电悬架梁铸件三维形貌如图 1 所示,铸件最大外形尺寸 670 mm×250 mm×250 mm,质量为 138 kg,材质为 QT500-14,具体化学成分见表 1,铸件壁厚相差大,不得有缩松、气孔和砂眼等铸造缺陷。

1.2　铸造工艺分析及设计

初步铸造工艺方案如图 2 所示。采用树脂砂手

收稿日期: 2024-10-22

作者简介: 孙祥广,1987 年生,学士,工程师. 主要从事砂型铸造. Email: sunxgok@126.com

通信作者: 周正寿,1988 年生,硕士,高级工程师. 主要从事砂型铸造. Email: zzs545@126.com

引用格式: 孙祥广,秦程,韩庆翔,张宪华,周正寿. 风电悬架梁铸造工艺设计及模拟[J]. 铸造技术,2025, 46(1): 92-97.

SUN X G, QIN C, HAN Q X, ZHANG X H, ZHOU Z S. Casting process design and simulation of suspension beam casting[J]. Foundry Technology, 2025, 46(1): 92-97.

中国知网 https://www.cnki.net

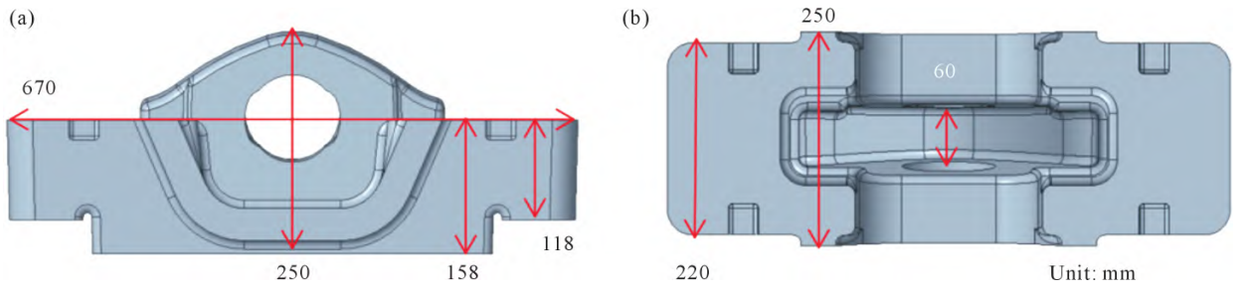

图 1 铸件尺寸示意图：(a) 主视图；(b) 俯视图

Fig.1 Schematic diagram of the dimensions of the casting: (a) front view; (b) top view

表1 QT500-14化学成分

Tab.1 Chemical composition of QT500-14

(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	S	P	Fe
Content	3.0~3.5	3.7~4.3	≤0.50	≤0.025	≤0.05	Bal.

工造型线，一模一件，在铸件无法起模的中间孔处设计砂芯 1 个，在直浇道两侧各设计了过滤网，有效进行挡渣和避免紊流的产生。浇注系统在铸件的一侧放置，设有 4 个内浇道，采用开放式浇注系统，浇道面积 $F_{直}:F_{横}:F_{内}$ =1 256:2 135:2 512=1.0:1.7:2.0，保证充型速度，避免铸件产生冷隔、砂眼等铸造缺陷。此外，基于铸件模数法设计计算出冒口尺寸(冒口模数=1.2×铸件模数)[13](图 3)，冒口放置在铸件顶部，保证铸件内部和外部质量[7,14-16]。

1.3 铸造模拟分析及工艺优化

为验证工艺可靠性，采用 MAGMA 模拟软件对悬架梁铸件凝固过程进行模拟。首先把铸件、冒口和浇注系统等转为 STL 格式文件导入到 MAGMA 模拟系统，针对每个零部件进行网格划分。为加快计算速度且不失准确性，浇注系统网格尺寸大于铸件部分，网格优化形成了 2 099 766 个节点，472 057 个单元，化学成分按照表 1 中值控制。因铸件壁厚整体较厚，浇注温度设计为 1 340 ℃，砂型温度为 25 ℃，最后浇注时间为 15 s。MAGMA 模拟主要参数设置如表 2 所示。

1.3.1 初步模拟分析

图 4 为风电悬架梁的凝固、缩松和热节的模拟

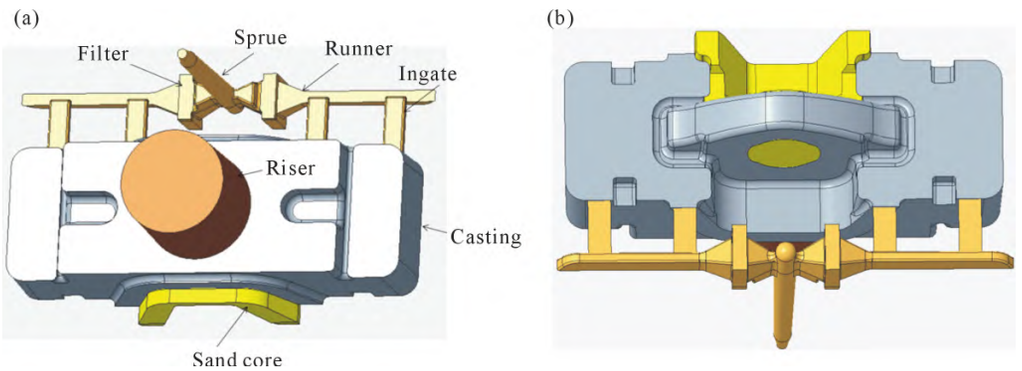

图 2 铸造工艺方案：(a) 俯视图；(b) 仰视图

Fig.2 Casting process: (a) top view; (b) upwards view

表 2 模拟参数设置

Tab.2 Setting of simulation parameters

Parameter	Casting material	Mold materials	Initial pouring temperature/℃	Pouring time/s
Value	QT500-14	Resin sand	1 340	15

结果。从图 4a 和 b 可以看出，铁液凝固到 99.5%时，铸件还未完全凝固，说明冒口补缩能力不够。由图 4c 缩松模拟可以看出，在铸件内部、冒口下方有独立液相，且在图 4d 铸件最终热节示意图可以看出，铸件内部还存在热节，说明铸件出现缩松或缩孔风险比较大。通过模拟结果看出，现有冒口可能偏小，需要进一步加大冒口来保证铸件质量，但加大冒口

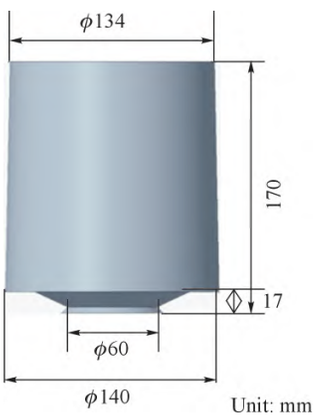

图 3 冒口示意图

Fig.3 Schematic diagram of the riser

中国知网 https://www.cnki.net

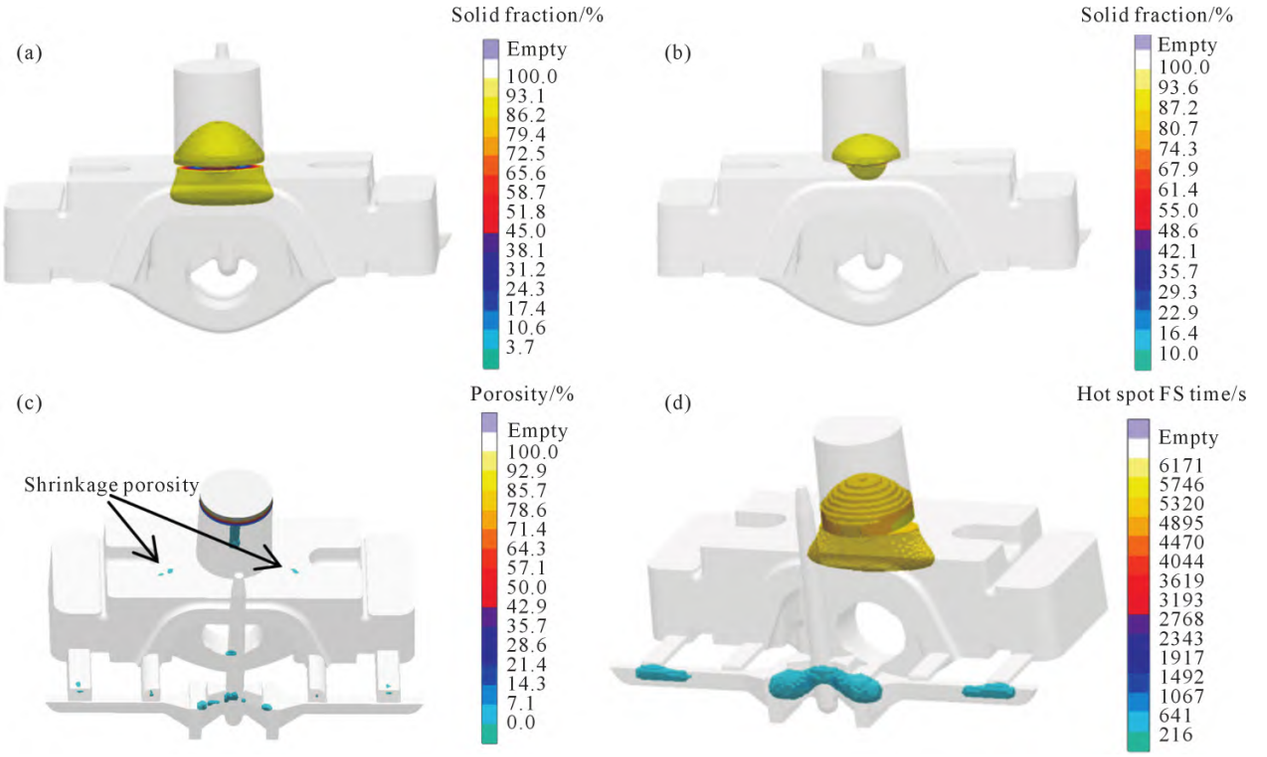

图 4 模拟结果:(a) 凝固 98%;(b) 凝固 99.5%;(c) 缩松;(d) 热节
Fig.4 Simulation results: (a) solidified 98%; (b) solidified 99.5%; (c) shrinkage porosity; (d) hot spot

会导致产品出品率降低,增加生产成本。

1.3.2 工艺方案优化

根据生产检验，在远离冒口厚大位置增加冷铁以增加冒口的补缩距离，使用小冒口达到补缩的目的。同时因为 QT500-14 的 Si 含量较高,容易造成铸件组织石墨粗大,影响铸件伸长率,使用冷铁可以有效保证铸件延伸和细化组织[17-20]。

如图 5 所示,根据铸件结构、激冷效果和工艺性原则,在壁厚较厚区域的下模放置 2 种冷铁。根据冷铁设计公式(1),计算出 2 种冷铁尺寸(冷铁 1 尺寸 130 mm×100 mm×60 mm，冷铁 2 尺寸 130 mm×60 mm×60mm)。

$$\delta=G/(\rho A) \tag{1}$$

式中,G 为冷铁质量;ρ 为冷铁密度;A 为冷铁的接触面积。此处设置冷铁,在温度场方面,冷铁的热导率高，能迅速吸收铸件的热量。当液态金属浇入铸型后，靠近冷铁部分的金属温度会因冷铁的吸热作用而快速下降，使得铸件在冷铁附近的温度场梯度增大,温度降低加快。从凝固顺序来讲,由于冷铁加速了与之接触部分金属的冷却，这部分金属会率先凝固,从而改变了铸件原本的凝固顺序,让凝固从冷铁处开始向其他部位推进,使铸件实现顺序凝固,将缩孔、缩松等缺陷转移到冒口等补缩区域,有效提高铸件的致密度,减少内部缺陷。对优化后方案进行模拟可证实,铸件内部没有独立液相,如图 6a 所示,最后

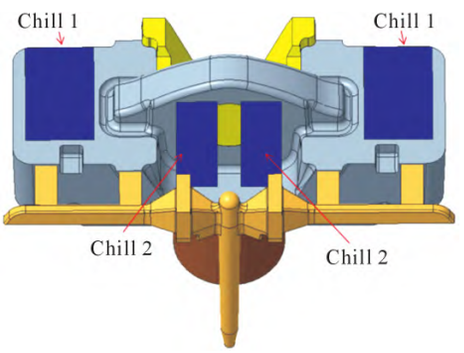

图 5 增加冷铁工艺方案
Fig.5 Process scheme with the addition of chills

液相全部处于冒口和浇注系统中。由图 6b 可知,铸件内部没有热节且整个热节都在冒口中，说明铸件内部不会产生缩松、缩孔等铸造缺陷,达到优化目的。

由图 7 可见,优化后工艺基本实现了设计目标,整个内浇口在充型过程中始终处于充满状态，外界气体无法进入型腔。整个浇注过程金属液面较平稳,湍流发生较少,铸件质量得到保证。因此,浇注系统和相关参数设定符合铸件充型要求。

2 实验材料与方法

将 10%(质量分数,下同)生铁、60%回炉料和30%废钢作为炉料烘干处理后，放入容量为 1 t 的 ABP 中频无芯感应试验电炉中进行熔炼，铁液溶解完成后升温至 1 500~1 530 ℃，断电静止 5~10 min,打

中国知网 https://www.cnki.net

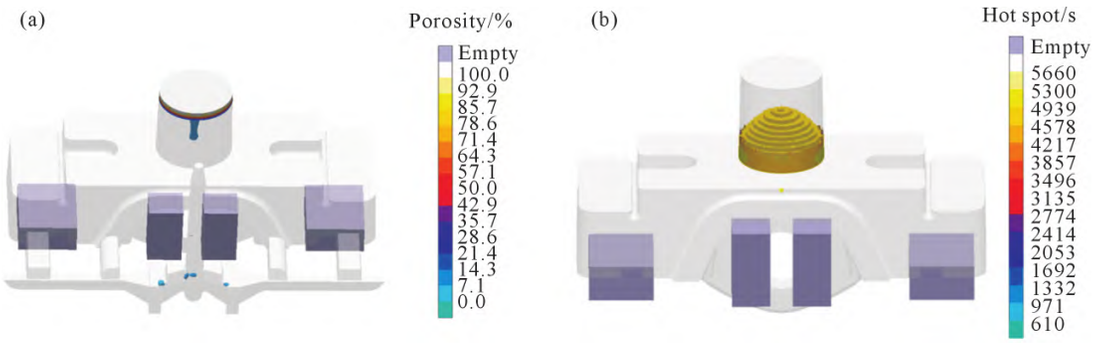

图 6 优化后模拟结果：(a) 孔隙率；(b) 热节

Fig.6 Simulation results after optimization: (a) porosity; (b) hot spot

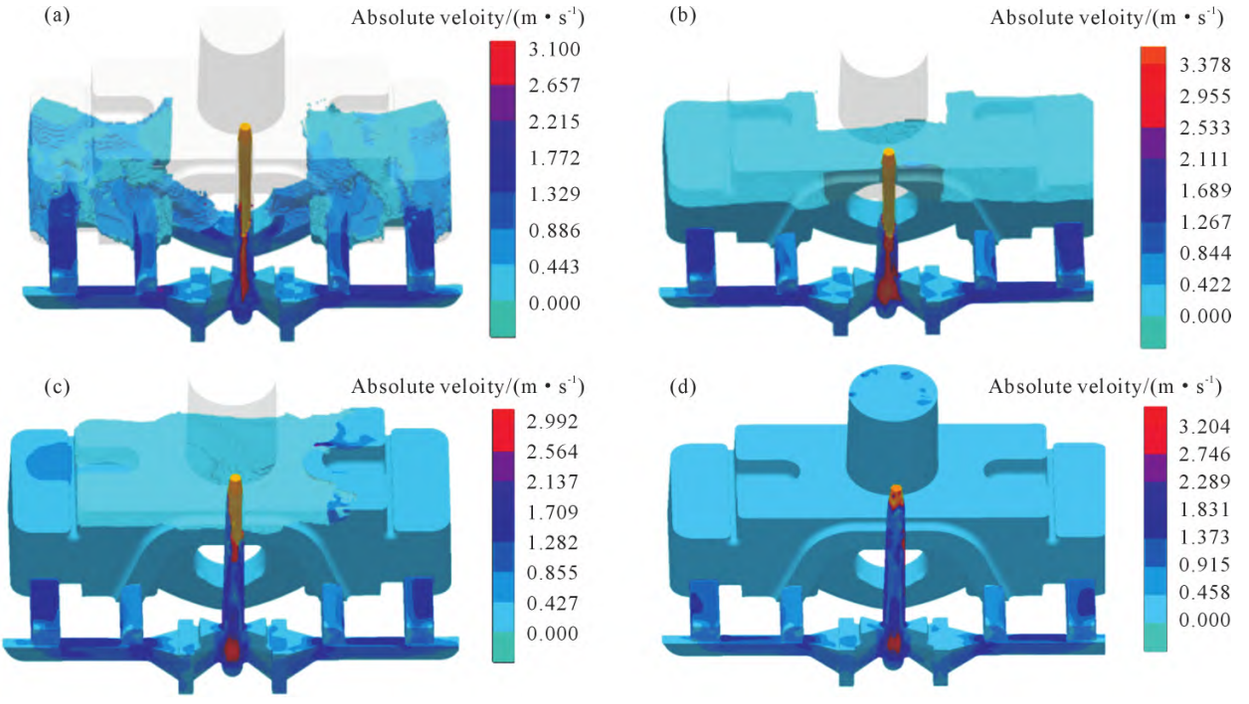

图 7 优化后充型过程模拟结果：(a) 充型 20%；(b) 充型 50%；(c) 充型 80%；(d) 充型 100%

Fig.7 Simulation results of the filling process after optimization: (a) filling 20%; (b) filling 50%; (c) filling 80%; (d) filling 100%

渣。球化剂使用 Elmag5932，包内孕育采用硅钡孕育剂，加入量 0.6%，随流采用加入量 0.05%的硅锶锆孕育剂，浇注温度(1 340±10) ℃，冷却 10 h 后开箱，待铸件冷至室温后进行表面清理。采用斯派克直读光谱仪检测铸件化学成分。

在铸件本体上截取试块，经打磨和车加工后制成金相试样(10 mm×10 mm)、硬度试样(10 mm×30 mm)和拉伸试棒(ϕ14 mm)。利用德国 Leica DMi8 C 型金相显微镜观察石墨形状和大小；利用美国 MTS SHT4305 型微机控制电液伺服万能试验机测试抗拉强度。利用中国华银 HB-3000B-1 型布氏硬度计进行硬度测试，每个试样测试 3 个点，取均值。具体取样位置如图 8 所示，铸件化学成分及性能要求如表 3 所示。此外采用锯床对铸件进行切割检查。

表3 风电悬架梁化学成分

Tab.3 Chemical composition of the suspension beam

(mass fraction/%)

Element	C	Si	Mn	S	P	Fe
Content	3.2~3.4	3.8~4.0	≤0.25	≤0.015	≤0.05	Bal.

3 实验结果及讨论

3.1 铸件缩松缺陷分析

采用优化后方案生产铸件。对悬架梁铸件进行 10 mm 一刀的解剖，并对铸件进行 PT 检验，解剖结果如图 9 所示，铸件内部没有显示红色，均为白色，说明铸件内部组织比较致密，没有发现缩松和缩孔的铸造缺陷。

3.2 显微组织和力学性能

图 10 是 QT500-14 悬架梁的金相组织，使用图像分析软件统计，铸件球化率大于 90%，珠光体含

中国知网 https://www.cnki.net

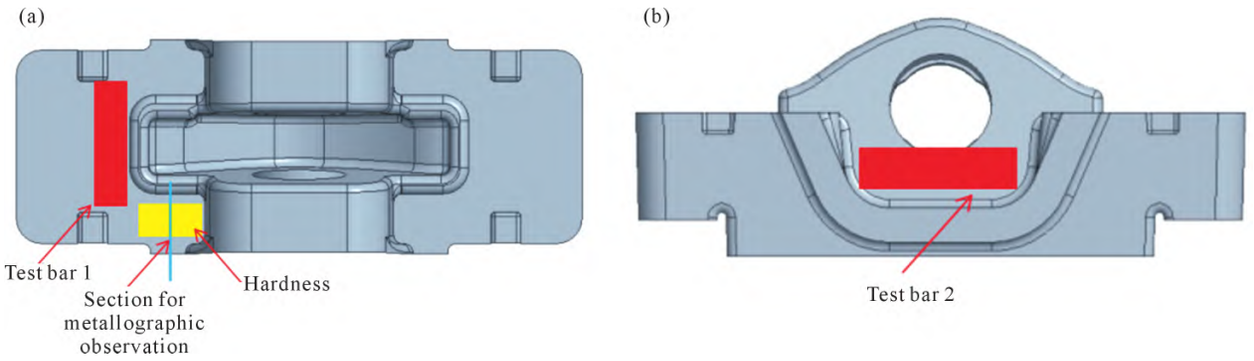

图 8 取样示意图:(a) 金相、硬度试样和拉伸试棒 1; (b) 拉伸试棒 2
Fig.8 Schematic diagram for sampling: (a) samples for metallographic and hardness tests and tensile test bar 1; (b) tensile test bar 2

图 9 铸件切片着色结果
Fig.9 PT results of the suspension beam

量为 1%(面积分数),符合铸件金相组织标准。由表 4 可以看出，铸件在两处取样位置的抗拉强度分别为 526 和 556 MPa，屈服强度分别为 415 和 456 MPa，断后伸长率分别为 18.5%和 14%，此外平均硬度值为 189 HBW,材质满足铸件标准,呈现较好强韧性能。

4 结论

(1)模拟结果表明,在合理的浇冒口系统设计并配合冷铁后,可消除铸件局部缩松、缩孔等缺陷,获得合格铸件。

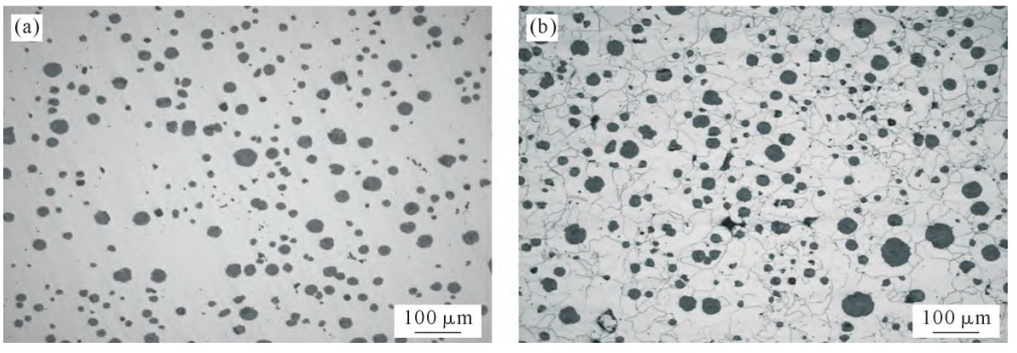

图 10 铸件显微组织:(a) 石墨形态;(b) 基体组织
Fig.10 Microstructure of the suspension beam: (a) morphology of graphite; (b) microstructure of the matrix

表 4 悬架梁检查的力学性能及组织要求
Tab.4 Mechanical properties and microstructure of the suspension beam

Tensile test bar	Ultimate tensile strength/MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Hardness (HB)	Nodularity /%	Area fraction of pearlite/%
1	526	415	18.5	185 188 194 (average:189)	90	1
2	555	456	14			
Technical criteria	≥480	≥390	≥12	170~200	≥80%	≤5%

(2)采用优化方案,铸件抗拉强度大于 526 MPa,屈服强度大于 415 MPa,伸长率大于 14%,平均硬度为 189 HB,球化率为 90%,且珠光体为 1%,满足力学性能和金相组织要求。

(3)采用优化工艺实际生产的悬架梁铸件,切片着色检查铸件内部无缺陷。

参考文献:

[1] SADARANG J, NAYAK R K. Utilization of fly ash as an alternative to silica sand for green sand mould casting process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 68: 1553-1561.

[2] 谭银元. 薄壁高强韧铸态球墨铸铁排气管的研制[J]. 机械工程材料,2003, 27(10): 31-33.
TAN Y Y. Production research on thin section exhaust pipes with high strength and toughness nodular cast iron[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(10): 31-33.

[3] KAILA V N , DAVE I B. The influence of coating sand materials on shell mold properties of investment casting process[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 800-804.

中国知网 https://www.cnki.net

[4] 张聚涛,张涛,赵悦光,宫显辉,颉向旭,景高楼. 球铁内燃机机身缩松缺陷的工艺改进[J]. 铸造技术,2023, 44(10): 972-976.
ZHANG J T, ZHANG T, ZHAO Y G, GONG X H, XIE X X, JING G L. Technological improvement on shrinkage defects of ductile iron internal combus tion engine body [J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 972-976.

[5] 王灼,刘越,周占虎,官振兴,张雅静. 冷却速度对高硅球墨铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造,2023, 72(3): 241-249.
WANG Z, LIU Y, ZHOU Z H, GUAN Z X, ZHANG Y J. Effect of cooling rate on microstructure and properties of high-silicon ductile iron[J]. Foundry, 2023, 72(3): 241-249.

[6] 陈晓飞. 1.5 MW 风力发电设备用轮毂铸造工艺优化设计[J]. 铸造,2010, 59(2): 202-204.
CHEN X F. Optimal design of casting technology for wheel of 1.5 MW wind power facility[J]. Foundry, 2010, 59(2): 202-204.

[7] 闫亮亮,刘佳敏,薛帅,李军,段昭,张蓬涛,薛卫卫,鲁猛飞. 大型复杂齿轮箱壳体差压铸造工艺的优化 [J]. 热加工工艺,2022 (17): 63-65.
YAN L L, LIU J M, XUE S, LI J, DUAN Z, ZHANG P T, XUE W W, LU M F. Optimization of differential pressure casting process for large complex gearbox case[J]. Hot Working Technology, 2022 (17): 63-65.

[8] 郭建明,俞卫松,周黎明. 汽轮机外缸上盖凝固模拟分析和铸造工艺优化[J]. 铸造,2010, 59(8): 856-858.
GUO J M, YU W S, ZHOU N M. Solidification simulation and casting technology optimization for steam turbine outside cylinder upper cover[J]. Foundry, 2010, 59(8): 856-858.

[9] 李松杰,周正寿,孙祥广. 减速机壳体的铸造工艺及 CAE 模拟分析[J]. 现代机械,2011(2): 86-88.
LI S J, ZHOU Z S, SUN X G. Casting technology and CAE simulation analysis of speed reducer shell[J]. Modern Machinery, 2011(2): 86-88.

[10] 党云鹏,曹岩. 基于 ProCAST 的 ZL205A 合金弹体传动件铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金,2022, 42(2): 162-166.
DANG Y P, CAO Y. Casting process optimization of ZL205 alloy projectile transmission parts based on ProCAST software [J]. Special Casting & Ninferrous Alloys, 2022, 42(2): 162-166.

[11] 吕乐华,张杰琼,范随长,许海铎,郭亚辉,王世杰,张毅,蔚磊磊. 高硅固溶强化球墨铸铁的试制[J]. 铸造技术,2021, 42(9): 777-779.
LYU L H, ZHANG J Q, FAN S C, XU H D, GUO Y H, WANG S J, ZHANG Y, WEI L L. Experimental production of high silicon solid strengthened duction iron[J]. Foundry Technology, 2021, 42 (9): 777-779.

[12] 郭平,李洪应. 球墨铸铁支架铸件的铸造工艺改进[J]. 现代铸铁,2021, 41(3):13-17.
GUO P, LI H Y. Process improvement of nodular iron bracket casting[J]. Modern Cast Iron, 2021, 41(3): 13-17.

[13] 周正寿. 液压后盖铸造工艺优化及 MAGMA 模拟分析[J]. 现代机械,2023(6): 23-26.
ZHOU Z S. Optimization of casting process and MAGMA simulation analysis of hydraulic rear cover [J]. Modern Machinery, 2023(6): 23-26.

[14] 孙斐,庄晔,邱永宁,孙祥广,周正寿,胡静. 碳当量对高压油缸端盖球铁件组织性能的影响[J]. 铸造技术,2015, 36(12): 2927-2929.
SUN F, ZHUAN Y, QIU Y N, SUN X G, ZHOU Z S, HU J. Effects of carbon equivalent on microstructure and properties of high pressure oil cylinder cover of ductile[J]. Foundry Technology, 2015, 36 (12): 2927-2929.

[15] SHI J P, SHAN Z D, YANG H Q. Advancing sustainable casting through cryogenic gradient forming of frozen sand molds: Design, error control, and experimental validation[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 203: 211-226.

[16] 黄鹏,邱代,杨屹,鲁晨光,薛佳利. 基于 ProCast 的大型采油发动机缸体工艺设计[J]. 铸造技术,2021, 42(7): 589-593.
HUANG P, QIU D, YANG Y, LU C G, XUE J L. Casting process design of large diesel engine block based on ProCast [J]. Foundry Technology, 2021, 42(7): 589-593.

[17] 刘慧玲,侯晓华,刘文刚. 等温淬火球墨铸铁在商用车轮毂上的应用实例[J]. 铸造工程,2022, 46(1): 47-51.
LIU H L, HOU X H, LIU W G. Application examples of austempered ductile iron on commercial wheel hubs [J]. Foundry Engineering, 2022, 46(1): 47-51.

[18] HAYRYNEN K L. The production of austempered ductile iron (ADI) [A]. Proceedings of 2002 world conference on ADI [C]. Louisville: American Foundry Society, 2002: 1-6.

[19] 李改玲,吕家禹,曹玉亭. Cr、Sn 对灰铸铁组织和性能的影响及应用[J]. 现代铸铁,2019, 39(3): 22-25.
LI G L, LV J Y, CAO Y T. Effect of Cr and Sn on microstructure and propertied of gray iron and its application [J]. Modern Cast Iron, 2019, 39(3): 22-25.

[20] ZHANG A, LIANG S, GUO Z, XIONG S. Determination of the interfacial heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface in low pressure sand casting[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 88: 472-482.

中国知网 https://www.cnki.net