

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2164

大功率核电齿轮箱球墨铸铁行星架铸件研制

崔宇¹, 李增利^{1,2}, 赵竞翔¹, 李克锐¹, 李然¹

(1. 郑州机械研究所有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 中国机械科学研究总院集团有限公司, 北京 100044)

摘要:行星架作为齿轮箱的重要结构件,在传动过程中承受的载荷较大,综合性能要求高。为进一步提高球墨铸铁行星架的强度和塑性,提高行星架的服役寿命,根据大功率核电齿轮箱行星架结构特点和性能要求,设计了合理的铸件成分控制范围,进行了铸造工艺设计和数值模拟分析,并通过严格控制造型、熔炼、球化孕育、浇注和后处理过程,制造了高强度高塑性行星架铸件,对附铸试块进行组织分析及性能检测。结果表明,基体以珠光体为主,球化率 90%以上,抗拉强度 797 MPa,屈服强度 444 MPa,伸长率为 7.0%,性能满足指标要求。

关键词:行星架;球墨铸铁;铸造工艺;熔炼处理

中图分类号: TG143.5; TG24

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2023)05-0477-06

Development of Ductile Iron Planetary Carrier Casting for High-power Nuclear Gearbox

CUI Yu¹, LI Zengli^{1,2}, ZHAO Jingxiang¹, LI Kerui¹, LI Ran¹

(1. Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 2. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: As an important structural part of the gearbox, the planet carrier bears a large load during the transmission process and requires high comprehensive performance. To further improve the strength and plasticity as well as the service life of the ductile iron planet carrier, according to the structural characteristics and performance requirements of the planet carrier of the high-power nuclear power gearbox, a reasonable control range of the casting composition was designed, and the casting process design and numerical simulation analysis were carried out. Finally, high strength and high plasticity planet carrier castings were manufactured by strictly controlling the molding, melting, spheroidizing treatment, inoculation, pouring and posttreatment processes. The microstructure and tensile properties of the attached cast test block were analysed. The results show that the matrix is mainly pearlite, and the nodularity reaches more than 90%. The tensile strength, yield strength and elongation are 797 MPa, 444 MPa and 7.0%, respectively, meeting the index requirements.

Key words: planetary carrier; ductile iron; casting process; melting treatment

核电循环泵用齿轮箱为行星传动结构,其设计寿命为 20 年。作为齿轮箱行星齿轮传动结构中的重要构件,行星架结构复杂、传递功率大、设计寿命长。大功率核电齿轮箱行星架在运行过程中直接承受并传递巨大的动载荷和静载荷,要求具有高强度、高刚度、高精度及高稳定性等综合性能^[1-4],主要采用高强度球墨铸铁材料制造。前期的行星架采用 QT600-3A 牌号球墨铸铁制造^[5-9],在运行过程中出现寿命短和早期失效等问题,经分析发现是材质强

度和塑性不足造成的。

为进一步提高核电齿轮箱的可靠性,作者单位参与的“大功率核电齿轮箱关键构件制造与装配技术研究”子课题内控要求大功率核电齿轮箱球墨铸铁行星架铸件抗拉强度 ≥ 700 MPa,伸长率 $\geq 5\%$,对铸件强度和塑性的良好结合提出了更高的要求。因此,本研究以上述项目中某型号行星架为研究对象,结合数值模拟方法,进行了高强度高塑性球墨铸铁行星架铸件成分工艺的优化设计和生产实践。

收稿日期: 2022-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2010102)

作者简介: 崔宇,1978 年生,高级工程师。主要从事不锈钢、耐热钢、球墨铸铁、耐磨材料等合金材料研究与产品研发。

电话: 13949098795, Email: 13949098795@163.com

引用格式: 崔宇,李增利,赵竞翔,等. 大功率核电齿轮箱球墨铸铁行星架铸件研制[J]. 铸造技术, 2023, 44(5): 477-482.

CUI Y, LI Z L, ZHAO J X, et al. Development of ductile iron planetary carrier casting for high-power nuclear gearbox[J]. Foundry Technology, 2023, 44(5): 477-482.

1 铸件特点分析

行星架三维图和主要尺寸如图1所示,轮廓尺寸为 $\phi 1\,280\text{ mm}\times 700\text{ mm}$,主要壁厚为100~115 mm,4个立柱最大厚度在210 mm以上,为铸件最厚位置,铸件质量2 400 kg,热节大且分散,结构不利于补缩,易产生缩孔、缩松等铸造缺陷,铸造技术难度大。

2 成分设计

行星架铸件属于厚大断面球墨铸铁件,凝固时间长,易出现石墨漂浮、石墨畸变、球化衰退、元素偏析及晶间化合物、反白口、缩孔、缩松等缺陷。国内外的大量研究表明,严格控制铁液的化学成分能够有效防止此类缺陷的产生^[10-15]。本研究遵循高碳、低硅、低磷、低硫、适量镁和稀土的原则,结合实际生产经验和理论分析,合理设计化学成分控制范围,以保证球墨铸铁件的质量性能要求。

在控制C含量不产生石墨漂浮的条件下,提高碳含量能够促进石墨化、减小白口倾向、促进镁的吸收、改善球化效果、提高石墨球的圆整度,并且提升铁液的流动性,减少缩孔缩松等缺陷,使铸件具有良好的综合性能,本研究控制原铁液碳含量在3.5%~3.7%。硅强烈促进石墨化,生产铸态珠光体球墨铸铁需要严格控制含硅量,硅量过低促成游离渗碳体析出,导致铸件韧性下降;硅量过高时,铁素体比例上升,铸件强度降低,本研究将球化孕育后的硅含量控制在2.0%~2.3%^[16]。为保证球墨铸铁件的铸造性能和球化孕育效果,防止出现石墨漂浮,保证铸件强度,综合碳、硅成分控制范围,控制碳当量CE在4.3%~4.4%^[17]。锰是稳定珠光体的元素,适当增加锰含量可以提高球铁强度、硬度及耐磨性,但锰含量过高,由于其偏析倾向较大,易形成沿

晶界析出网状碳化物降低韧性、塑性,甚至降低强度,因此锰含量控制为小于0.5%^[18]。硫与镁、稀土等球化元素亲和力很强,形成MgS、RES渣,含硫高时,大量消耗球化元素,降低球化效果,同时还容易导致夹渣、皮下气孔、热裂纹等缺陷产生,宜控制硫含量小于0.02%。磷在球铁中溶解度较低,当磷超过某一含量时,易在共晶团边界形成磷共晶,降低铸件的塑性、韧性和强度,并且使铸件产生冷裂,故磷含量控制为小于0.03%。

本研究采用稀土、镁元素进行球化孕育,镁起主要球化作用,稀土作为辅助球化,并起到净化铁液、中和球化干扰元素的作用,在保证球化的前提下,尽量降低镁和稀土含量,以减少白口倾向,故Mg_残约为0.04%~0.06%、RE_残小于0.02%^[19-20]。

铸态球墨铸铁生产中,以适量的铜进行合金化是控制珠光体数量的有效措施之一。铜在共晶转变阶段能促进石墨化,可减少或消除游离渗碳体的形成,在共析阶段促进并细化珠光体,强化基体组织,提高基体力学性能,本实验铜含量为0.5%~0.8%^[21]。最终设计的化学成分如表1所示。

3 铸造工艺设计与数值模拟

3.1 铸造工艺设计

根据大孔出流和均衡凝固原理,采用小颈保温冒口设计了铸造工艺^[22],如图2所示。浇注时间为60~70 s,选择浇注系统截面比为 $\Sigma A_{\text{内}}:\Sigma A_{\text{横}}:\Sigma A_{\text{直}}=1.00:2.00:1.56$,依据阻流截面设计法计算内浇道的尺寸^[23], $A_{\text{阻}}=38\text{ cm}^2$,直浇道选用 $\phi 100\text{ mm}$ 陶瓷管,横浇道选用 $\phi 80\text{ mm}$ 陶瓷管,在横浇道使用2个 $\phi 150\times 30\text{ mm}$ (10 PPI)的陶瓷过滤器挡渣,采用4个 $\phi 40\text{ mm}$ 陶瓷管相对均匀分布在直浇道进口,使铁液分散进入型腔,同时减小单个内浇道入口截面积,

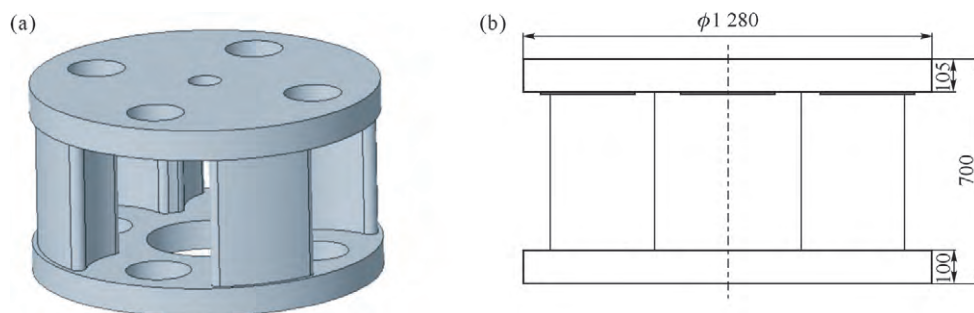


图1 铸件几何形状和主要尺寸:(a) 铸件形状,(b) 铸件主要尺寸

Fig.1 Geometric shape and main geometry dimensions of the casting: (a) casting shape; (b) casting main size

表1 铸件化学成分控制范围 w/%

Tab.1 Chemical composition control range of the casting

元素	C(原铁液)	Si(处理后)	Mn	S	P	Mg _残	RE _残	Cu
含量	3.5~3.7	2.0~2.3	<0.5	<0.02	<0.03	0.04~0.06	<0.02	0.5~0.8

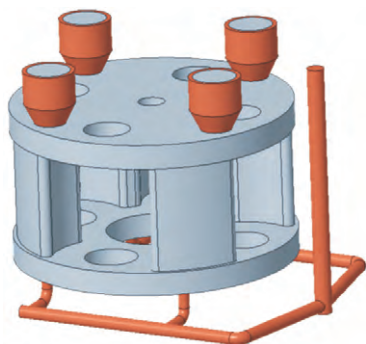


图2 铸造工艺示意图

Fig.2 Schematic diagram of the casting process

既保证快速充型,又能及时封闭内浇口,防止石墨化膨胀导致铁液回送。

铸件法兰与立柱热节部位模数 M_c 约为 4.5 cm,在稍偏离 4 个热节部位处分别放置 $\phi 200$ mm 的缩颈保温冒口,一方面使得温度场均匀,另一方面促进同时凝固、减小铸造应力。同时为有效控制冒

口的液态补缩时间、便于去除冒口,在冒口根部放置 $\phi 30$ mm 的易割片。

3.2 工艺数值模拟

根据设计的铸造工艺,采用三维设计软件对行星架铸件和浇冒系统进行三维建模,采用 JSCAST 铸造数值模拟软件对铸造过程进行充型凝固过程数值模拟。

行星架充型过程的模拟结果如图 3 所示,铁液进入型腔及在后续液面上升过程中没有出现飞溅现象,充型过程整体平稳,浇注过程中产生夹渣、冲砂缺陷的风险较小。

凝固过程的模拟结果如图 4 所示。铸件在整体凝固过程中补缩通畅,铸件内部无孤立液相,由于冒口根部易割片的作用,冒口在补缩一定时间后及时关闭补缩通道,防止凝固后期的石墨膨胀,致使铁液回送冒口产生缩松缩孔缺陷。

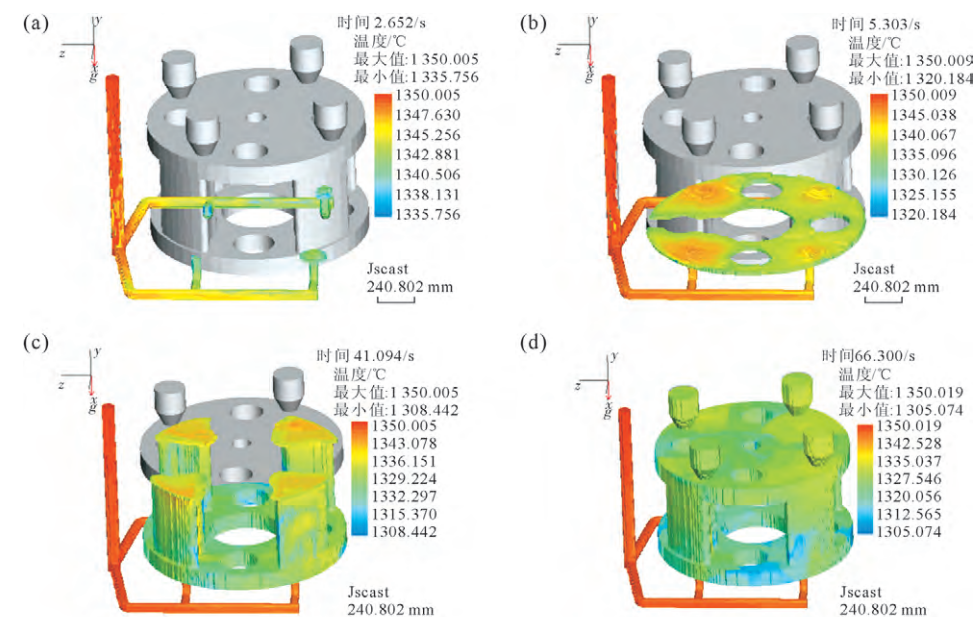


图3 充型过程数值模拟结果:(a) 充型 2%,(b) 充型 8%,(c) 充型 62%,(d) 充型完成

Fig.3 The numerical simulation results of the filling process: (a) filled 2%, (b) filled 8%, (c) filled 62%, (d) fully filled

4 铸件制造

4.1 造型

采用 1 600 mm×1 600 mm×320 mm 的砂箱 3 箱造型,分型面如图 5 所示。采用水玻璃砂制作高强度、高刚性砂型,防止型壁变形和抬箱,充分利用石墨析出产生的体积膨胀避免收缩缺陷^[23-24]。上箱铸型均匀开设 16 个 $\phi 20$ mm 出气孔,以防止浇注过程中气体无法逸出而形成气孔、浇不满等缺陷。为防止粘砂缺陷、提高表面质量、便于铸件清理,在铸型上均匀涂刷厚度约 1.5 mm 的石墨醇基涂料。

4.2 熔炼与球化孕育处理

生产中采用 3 t 中频感应电炉、高纯生铁等优

质铸造原材料熔炼高温纯净铁液,铜在熔炼前期以合金形式加入到炉底熔炼,使得铁液合金浓度均匀。采用 ARL 3460 直读光谱仪分析进行铁液成分调整;采用包内堤坝式冲入法球化孕育处理,包内球化处理温度为 1 400~1 430 ℃,球化剂加入量为铁液质量的 1.3%。主要成分含量(质量分数)为: 5.68% Mg, 0.55% Al, 44.29% Si, 1.0% Ca, 0.93% Re, 粒度为 4~25 mm;包内孕育剂为 0.4% 的高钙钡孕育剂,主要成分(质量分数)为 1.03% Al, 72.76% Si, 1.55% Ca, 2.35% Ba, 粒度为 3~8 mm。冲入法球化孕育处理完成后,立即扒渣防止返硫,同时加除渣剂覆盖防止铁液氧化。为强化孕育效果,提高补缩能力,消除碳化物,提高综合力学性能,在浇注时随流加入 0.1%

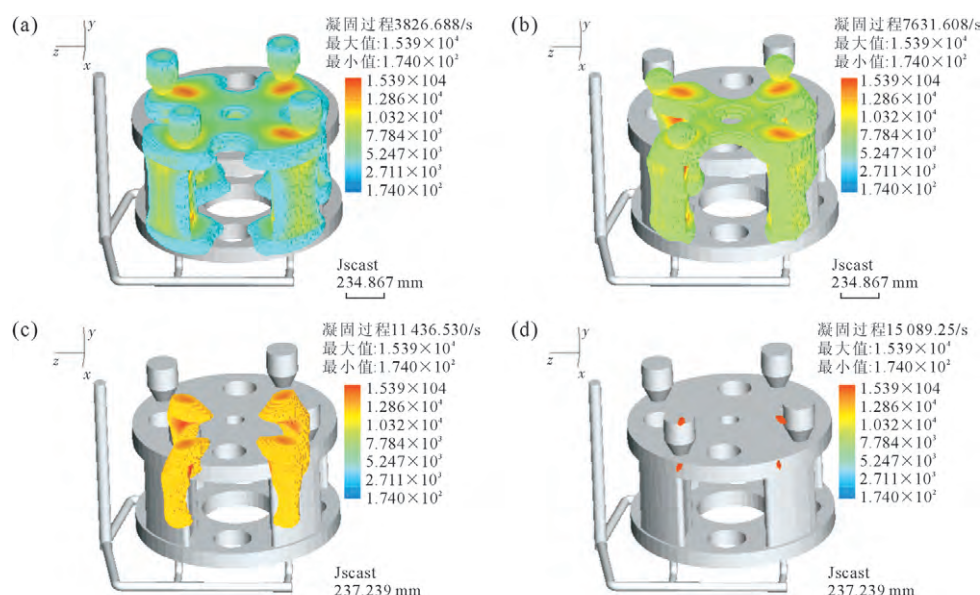


图4 凝固过程数值模拟结果:(a)凝固 25%,(b)凝固 50%,(c)凝固 75%,(d)凝固完成

Fig.4 The numerical simulation results of the solidification process: (a) solidified 25%, (b) solidified 50%, (c) solidified 75%, (d) solidification finished

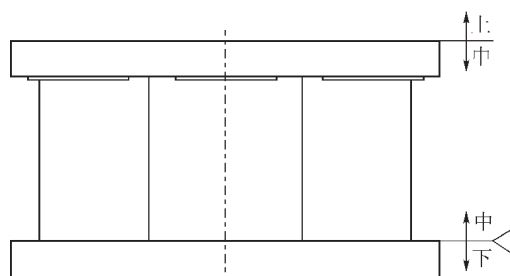


图5 3箱造型分型面示意图

Fig.5 Schematic diagram of the three-box modelling

硫氧孕育剂进行瞬时孕育,硫氧孕育剂主要成分(质量分数)为:73% Si, 1.0% Ca, 1.75% Ce, 1.0% Al, S 微量, O 微量,粒度为 0.2~0.7 mm。

4.3 浇注与清理

合箱后在 240 °C 热风下烘型 4 h 以上,使型腔温度达到 50~60 °C。浇注温度 1 350 °C,浇注时间 61 s,低温快浇,以减少液态收缩,铸件温度降至 300 °C 以下时打箱清理^[25],以降低铸件的应力。

4.4 成分组织性能检测

对铸件的附铸试块进行取样分析,化学成分如表 2 所示,基体组织以珠光体为主,球化率 90%以

表2 行星架铸件化学成分 w/%

Tab.2 Composition of planet carrier casting

C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg _残
3.65	2.04	0.23	0.018	0.008	0.56	0.05

上,试样的金相组织如图 6 所示。

制备的 $\phi 14$ mm 规格拉伸试样尺寸如图 7 所示,采用 SHT4605 万能试验机进行拉伸试验^[9],试样抗拉强度为 797 MPa,屈服强度为 444 MPa,伸长率为 7.0%,满足性能指标要求。

5 结论

(1)本研究设计了高强度高塑性球墨铸铁件成分,设计了行星架铸件铸造工艺,采用数值模拟软件进行了充型凝固分析,充型平稳,凝固均匀。

(2)采用高强度砂型、熔炼高温纯净铁液、冲入法球化孕育、随流孕育、低温快浇等综合措施进行了大型核电齿轮箱球墨铸铁行星架铸造,附铸试块球化率 90%以上,抗拉强度 797 MPa,伸长率为 7.0%,设计的成分和工艺满足高强度高塑性行星架铸件制造要求。

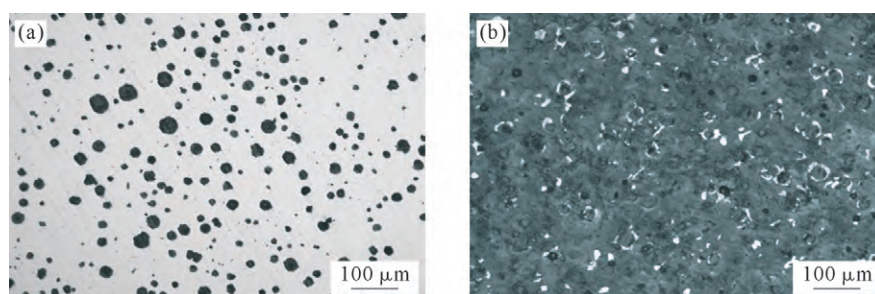


图6 附铸试块金相组织:(a)石墨形态,(b)基体组织

Fig.6 Metallurgical structure of cast-on sample: (a) graphite morphology, (b) matrix structure

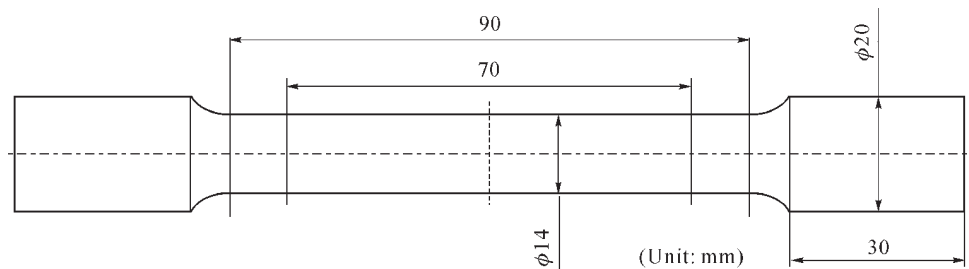


图7 拉伸试样尺寸

Fig.7 Size of tensile test sample

参考文献:

- [1] 雷亚国,何正嘉,林京,等.行星齿轮箱故障诊断技术的研究进展[J].机械工程学报,2011,47(19): 59-67.
LEI Y G, HE Z J, LIN J, et al. Research advances of fault diagnosis technique for planetary gearboxes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 59-67.
- [2] 叶长强.高效风电用球墨铸铁的组织控制与性能研究[D].南京:东南大学,2018.
YE C Q. Research on structure control and performance of ductile iron for efficient wind-power[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [3] 孟令先,刘忠明,张元国,等.我国核电循环泵齿轮箱的发展概况[J].装备制造技术,2011(1): 100-102.
MENG L X, LIU Z M, ZHANG Y G, et al. The development survey of the cycle pump gearbox for nuclear power[J]. Equipment manufacturing technology, 2011(1): 100-102.
- [4] 杨长辉,谭勇虎,许洪斌.大功率核电循环泵行星齿轮箱结构强度及耦合模态分析[J].重庆理工大学学报(自然科学),2013, 27(1): 18-21.
YANG C H, TAN Y H, XU H B. Structure strength and coupling modal analysis of circulating pump planet gearbox used in large-power nuclear station[J]. Journal of Chongqing university of technology (Natural Science), 2013, 27(1): 18-21.
- [5] 李克锐,李增利,崔宇,等.我国铸铁生产技术现状与发展趋势[J].铸造,2022, 71(2): 123-135.
LI K R, LI Z L, CUI Y, et al. Status and development trend of cast iron production technology in China [J]. Foundry, 2022, 71 (2): 123-135.
- [6] 沙嘉熹,余勇,吴玉斌,等.不同壁厚行星架附铸试块力学性能研究[J].铸造技术,2022, 43(4): 307-310.
SHA J X, YU Y, WU Y B, et al. Study on mechanical properties of test blocks with different wall thickness attached to planetary carrier[J]. Foundry Technology, 2022, 43(4): 307-310.
- [7] 向敬成,刘文川.大型球铁件HDBT410核电行星架的铸造工艺[J].现代铸铁,2013, 33(6): 26-30.
XIANG J C, LIU W C. Casting method of HDBT410 heavy nodular iron planet frame used for nuclear power station[J]. Modern Cast Iron, 2013, 33(6): 26-30.
- [8] 冉中阳,沈闯.厚大断面球墨铸铁件在能源领域中的应用[J].现代铸铁,2022, 42(4): 13-17.
RAN Z Y, SHEN C. Application of thick and large section nodular iron in energy field[J]. Modern Cast Iron, 2022, 42(4): 13-17.
- [9] 中国国家标准化管理委员会.球墨铸铁件:GB/T 1348-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
Standardization administration. Spheroidal graphite iron castings: GB/T 1348-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [10] 张亮亮,李克锐,卫东海,等.大断面重型球墨铸铁件电弧炉熔炼的生产实践[J].铸造技术,2020, 41(4): 327-330.
ZHANG L L, LI K R, WEI D H, et al. Practice of electric arc furnace melting of large section heavy ductile iron casting[J]. Foundry Technology, 2020, 41(4): 327-330.
- [11] 马敬仲,曾艺成.厚大断面球墨铸铁件生产中若干问题的探讨(3)[J].现代铸铁,2020, 40(3): 5-12.
MA J Z, ZENG Y C. A discussion on some problems in heavy section nodular iron production () [J]. Modern Cast Iron, 2020, 40 (3): 5-12.
- [12] 于明基,王丽萍,冯义成,等.Ni对厚大断面球铁显微组织和力学性能的影响[J].材料热处理学报,2020, 41(4): 116-124.
YU M J, WANG L P, FENG Y C, et al. Effect of Ni on microstructure and mechanical properties of heavy section ductile cast iron [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41 (4): 116-124.
- [13] 张欠欠,陈礼年.铸态QT700-10球墨铸铁的研制[J].现代铸铁,2021, 41(5): 1-3.
ZHANG Q Q, CHEN L N. Development of QT700-10 as-cast nodular iron[J]. Modern Cast Iron, 2021, 41(5): 1-3.
- [14] 李英昌,董健,员一泽,等.基于风电球墨铸铁件的强度提升研究及实践[J].铸造,2021, 70(4): 483-485.
LI Y C, DONG J, YUAN Y Z, et al. Study and practice of strength enhancing based on wind power ductile iron castings[J]. Foundry, 2021, 70(4): 483-485.
- [15] 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.
WEI D D, XU G B, ZHANG J, et al. Research on casting process of a ductile iron planet carrier for wind power generation [J]. Foundry, 2021, 70(10): 1233-1238.
- [16] 曾大新,何汉军,张元好,等.铸态高强度高伸长率球墨铸铁研究进展[J].铸造,2017, 66(1): 38-43, 49.
ZENG D X, HE H J, ZHANG Y H, et al. Development of as-cast ductile iron with high strength and high elongation [J]. Foundry, 2017, 66(1): 38-43, 49.
- [17] 卫东海,李克锐,吴现龙,等.碳当量对铸态高强度球墨铸铁残余应力的影响[J].铸造,2014, 63(4): 312-316.
WEI D H, LI K R, WU X L, et al. Effect of carbon equivalent on residual stress of high strength as-cast ductile iron [J]. Foundry, 2014, 63(4): 312-316.
- [18] 秦亮,马芳.锰对球墨铸铁力学性能及耐腐蚀性能的影响[J].铸造,2015, 64(2): 148-152.

- QIN L, MA F. Effects of Mn on mechanical properties and corrosion resistance of ductile iron[J]. Foundry, 2015, 64(2): 148-152.
- [19] 吴德海, 王怀林, 张伯明. 合金元素对铸铁力学性能的影响[J]. 铸造工程, 2022, 46(2): 20-25.
- WU D H, WANG H L, ZHANG B M. Effect of alloying elements on mechanical properties of cast iron [J]. Foundry Engineering, 2022, 46(2): 20-25.
- [20] 白佳鑫. 高品质球墨铸铁生产的原材料选择和微量元素控制[J]. 铸造, 2020, 69(6): 563-571.
- BAI J X. Selection of raw materials and control of trace elements in the production of high-quality ductile iron[J]. Foundry, 2020, 69(6): 563-571.
- [21] 卫东海, 李克锐, 吴现龙, 等. 铜对铸态球墨铸铁弹性模量的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S1): 90-95.
- WEI D H, LI K R, WU X L, et al. Effect of copper on elastic modulus of as-cast ductile iron [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(S1): 90-95.
- [22] 连伟, 顾祥鸿, 魏兵. 运用大孔出流理论设计磨齿机床身底注式浇注系统[J]. 铸造技术, 2006(3): 205-207.
- LIAN W, GU X H, WEI B. Design of the bottom gating system for the grinding machine body based on large orifice discharge theory [J]. Foundry Technology, 2006(3): 205-207.
- [23] 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.
- HE Y X. Riserless casting method of 2.5 MW wind power hub[J]. Modern Cast Iron, 2020, 40(4): 31-33.
- [24] 殷亚军, 徐巧志, 周建新, 等. 考虑铸型强度的球墨铸铁件冒口设计方法[J]. 铸造工程, 2020, 44(5): 33-39.
- YIN Y J, XU Q Z, ZHOU J X, et al. Design method of risers for ductile iron castings based on mold strength[J]. Foundry Engineering, 2020, 44(5): 33-39.
- [25] 卫东海. 高刚度低应力球墨铸铁的研究与应用[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2014.
- WEI D H. Research and application of high-rigidity low-stress ductile iron[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2014.