

QT500-14 风电主轴的铸造工艺开发

葛春丽¹, 黄连凯², 宋培龙¹, 相亮², 李肖霞¹, 梁安阳¹

(1. 山东中车风电有限公司, 山东济南 250022; 2. 通裕重工股份有限公司, 山东禹城 251200)

摘要: 高硅球墨铸铁QT500-14材料具有良好的力学性能, 可应用于大功率风力发电机组的主轴, 大幅度降低机组成本。通过严格控制材料QT500-14的化学成分、采用金属型铸造、通过MAGMA软件模拟主轴铸造工艺预测铸造缺陷, 在主轴铸造过程中采取在预测缺陷位置处放置冷铁的控制措施, 铸造出符合设计要求的风电主轴。

关键词: QT500-14; 风力发电机组主轴; 化学成分; 金属型铸造; 铸造工艺

随着风力发电机组功率等级增大, 锻造主轴的尺寸和重量越来越大, 受锻造设备、锻造工艺影响, 采购成本较高。铸造主轴具有易于成形、工艺简单、生产效率高、适于批量生产等诸多优势, 对主轴的降本效果显著, 因此铸造主轴在国内外风电行业的应用越来越多, 其中铸造材料主要选择力学性能较高的高硅球墨铸铁QT500-14。作者吕乐华等^[1-4]研究了高硅球墨铸铁QT500-14的化学成分及熔炼工艺, 但少有人对QT500-14材料在风电主轴的铸造方式和铸造工艺进行系统的研究。为铸造高质量高性能的风电主轴, 本文针对某大功率风力发电机组的主轴开展系统的铸造研究。

1 某大功率风力发电机组的主轴模型

某大功率风力发电机组的铸造主轴, 材质为高硅固溶强化球墨铸铁QT500-14, 重约17.9 t, 主要壁厚110~220 mm, 大端面直径2.6 m, 主轴长3.4 m, 模型见图1。



图1 某大功率风力发电机组的主轴模型
Fig. 1 Model of a high power wind turbine spindle

2 化学成分控制

碳: 强烈促进石墨化。碳含量在一定程度上影响球化效果, 碳含量能改善球墨铸铁的流动性, 对球铁的凝固起到补缩作用。但碳含量过高则引起石墨漂浮, 力学性能急剧下降^[5]。经过大量的QT500-14材料的试验验证, 碳含量控制在3.0%~3.5%比较合适。

硅: 硅是强烈促进石墨化元素, 并促进铁素体形成和减少渗碳体产生。依据球墨铸铁断后伸长率与Si含量的关系^[6], Si含量超过4.5%时, 其伸长率极速下降, 故Si含量应控制在3.3%~4.3%之间。

作者简介:

葛春丽(1983-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事风力发电机组铸件材料研究工作。E-mail: 187210503@qq.com, 电话: 15168808625

中图分类号: TG242

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)11-1467-05

基金项目:

国家基金项目《机电产品全生产周期绿色设计使能技术、工具及集成服务平台研发》编号2020YFB1711600。

收稿日期:

2022-10-26 收到初稿,
2023-08-25 收到修订稿。

锰：锰是碳化物形成元素，有反石墨化作用^[7]。Mn也是强烈的晶界偏析元素，容易导致晶界出现珠光体^[8]，I Riposan等人^[9]的研究成果表明，为得到铸态铁素体，锰含量应不高于0.2%。

其他元素。磷是球墨铸铁件中的有害元素，会降低铁碳合金的共晶含碳量，阻碍石墨化，因此磷含量不高于0.04%。硫在球铁中是有害元素，会消耗球化剂，使球化衰退，因此硫含量不高于0.02%。镁

是球铁中最主要的球化元素，由于QT500-14为高硅球墨铸铁，铁液中硅含量较高，容易导致碎块石墨的出现，为了得到圆整的石墨球，镁的含量应控制在0.04%~0.055%。王美喜在专利^[10]中通过多次实例铸造论证了微量元素对高硅球墨铸铁QT500-14的性能影响很大，钛含量控制在0.001%之下。

高硅球墨铸铁QT500-14铸造主轴的主要化学成分见表1。

表1 QT500-14铸造主轴的主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of casting spindle of QT500-14

C	Si	Mn	P	S	Mg	Ti	$w_B/\%$
3.0~3.5	3.3~4.3	≤0.2	≤0.04	≤0.02	0.04~0.055	<0.001	

3 金属型铸造

风电铸件如轮毂、主机架、轴承座等关键大部件使用的材料为球墨铸铁QT400-18，铸造模样使用木模，铸造方式为砂型铸造。通过多次单铸试块的铸造试验研究，球墨铸铁材料QT500-14使用砂型铸造的力学性能偏低，屈服强度小于等于290 MPa，抗拉强度小于等于380 MPa，且极不稳定，经探伤发现基体内部存在大量的微观缩松，影响铸件的质量。大型球墨铸铁件的铸造缺陷主要是因为冷却速度慢，凝固时间过长而引起的，因此需要采取措施加快冷却。将砂型铸造改为金属型铸造，内腔采用砂型铸造的方式进行试验研究。由于金属型的热导率和热容量大，铸件冷却速度快，凝固后组织致密，力学性能高，通过采用金属型单铸试块铸造试验，屈服强度大于等于350 MPa，抗

拉强度大于等于460 MPa，基本满足铸造主轴的力学性能要求。

4 主轴的铸造凝固模拟

4.1 铸造主轴的工艺分析

风电主轴的特点是一端是直径较大的圆盘，另一端直径较小，两端直径差距较大，若采用横铸的方式，主轴较长，中间型芯容易弯曲，达不到预期性能要求。采用竖铸方式，将主轴大端重要加工面朝下^[11]，通过铁液的重力补缩来避免缩孔、缩松等缺陷^[12]。采用底注、开放式的浇注系统，设置1个浇注口，4个保温冒口，见图2a，保证冒口最后凝固。在浇注系统中放置过滤片，过滤去除一次渣，使铁液流动平稳，见图2b。

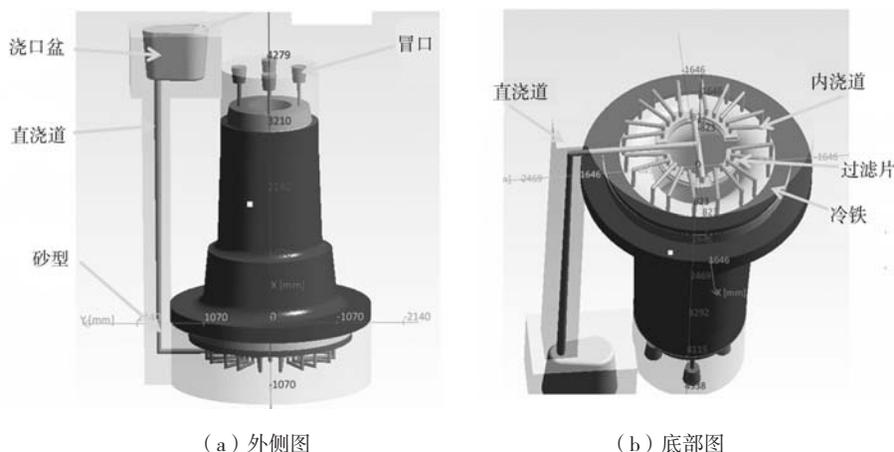


图2 主轴浇注系统图

Fig. 2 Spindle pouring system diagram

冒口采用上大下小的楔形冒口，有利于快速凝固，减少缩孔、缩松等铸造缺陷。在主轴内腔大端处放置大量冷铁，促进铁液快速冷却。为保证铁液充型

平稳，冷却补缩快速，在主轴内部设置多个浇道，保证铸造质量。

4.2 建立模型和网格划分

利用三维软件建立主轴的铸造模型，将三维模型导入MAGMA铸造模拟软件。设定主轴的充填时间、金属液流动速度、金属液的温度及压力、凝固时间、铸型的温度。

利用MAGMA软件的网格划分功能划分网格，网格大小设置要合理，网格太小计算速度慢，网格太大模拟精度太低，主轴的网格划分完成后节点数是1 137 230个，单元数是16 589 160个。按照铸造经验，此网格可以较好保证铸件的模拟精度。

4.3 参数设置

在模拟铸造前，在MAGMA软件中设置相关参数。首先设置高硅球墨铸铁QT500-14的化学成分，见第2章。冷铁以及金属型设置为STELL，型砂设置为呋喃树脂砂，温度设置为25℃，孕育效果选择良好，收缩倾向选择一般。

4.4 充型模拟

通过MAGMA模拟软件模拟可知，主轴充型过程平稳，没有飞溅、喷射现象，随着浇注时间的增加，

金属液不断均匀稳定上升。在整个充型过程中，浇道一直充满铁液，可防止气体和夹渣的进入，避免夹渣缺陷的产生，因此采用自下而上的浇注工艺比较合理，较好保证铸造质量。

4.5 凝固过程模拟

充型完毕后金属流体及型腔的温度就是凝固过程的初始温度，凝固过程中铸件所处的状态取决于金属液的温度^[13]，铸件凝固过程经历三个相区：液相区、液固两相区和固相区，随着凝固时间的增加，金属液逐步由液态变成固态。通过MAGMA软件模拟可观察主轴的凝固顺序，从而可预测缺陷的位置。图3为主轴金属液凝固过程图，深色表示液相，透明表示固相。从图3中可看出，壁厚最薄的位置最先凝固，铸件上方本体冒口和底部厚大位置最后凝固，图3a为起始凝固状态，图3b为30 min的凝固状态，图3c为2 h的凝固状态，整个过程需要4 h 39 min全部凝固完成。从图3中可以看出，刚开始时凝固速度很快，2h左右大部分已完成凝固，冒口为最后凝固部位，也是最易形成缩松、缩孔缺陷的位置，为保证铸造质量，在铸件顶部设置本体冒口，铸造完成后将本体冒口进行切除。

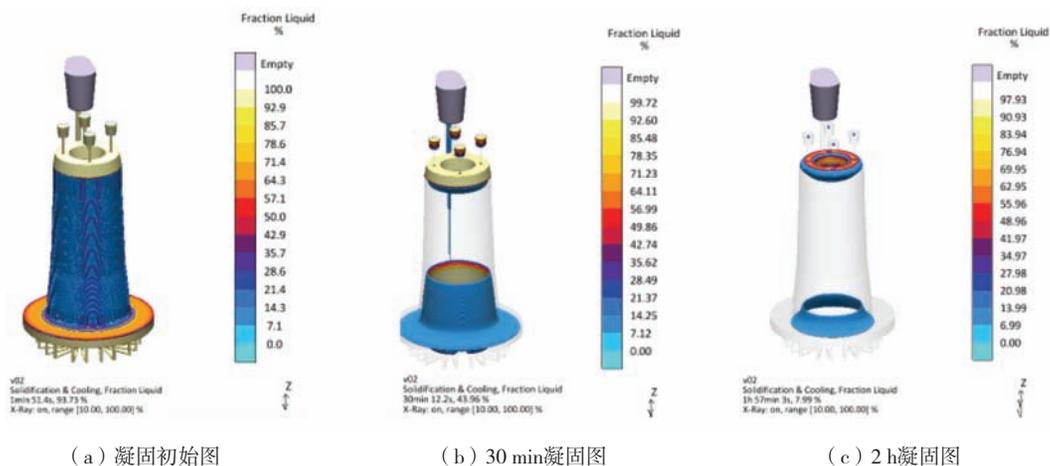


图3 主轴凝固过程图

Fig. 3 Solidification process view of spindle

4.6 模拟结果分析

通过模拟结果可以看出，主轴铸造后整体质量比较好，只有少数的孔隙率出现。孔隙率^[14]可以直观反映缩松、缩孔等缺陷的位置与大小。根据MAGMA软件模拟结果，预测主轴缩松、缩孔位置较为分散，体积较小，较大的缩松、缩孔缺陷位于主轴大端喇叭口位置以及轴身薄壁位置，模拟结果见图4。

为避免模拟的铸造缺陷，主轴实际铸造过程中在喇叭口位置的内侧、小头端内侧均使用冷铁加速金属液的补缩，降低热节出现，避免缩孔、缩松等铸造缺陷。

5 主轴的铸造成形和结果分析

5.1 主轴的铸造成形

首先按照文中高硅球墨铸铁QT500-14的化学成分配料、熔化铁液；然后使用FeSiMg合金作为球化剂进行球化处理，球化剂的粒度选用4~32 mm；接着使用BaSi作为孕育剂进行孕育处理，孕育剂的粒度选用0.5~6 mm；最后进行浇注成形，控制浇注温度1 365℃，一边浇注一边随流孕育。主轴铸造成形后在砂箱中保温约72 h，缓慢冷却至400℃以下取出主轴，并进行清理。

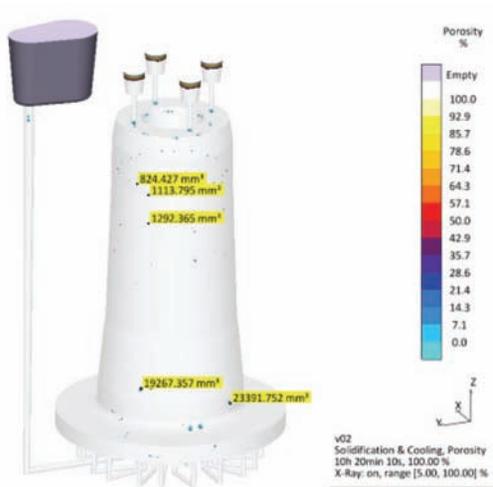


图4 主轴模拟结果

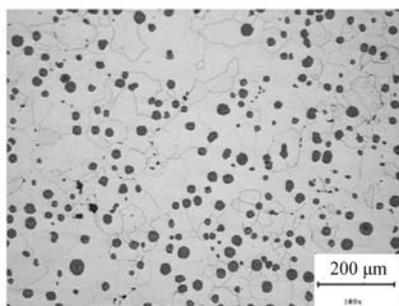
Fig. 4 Simulation results of spindle

5.2 铸造结果分析

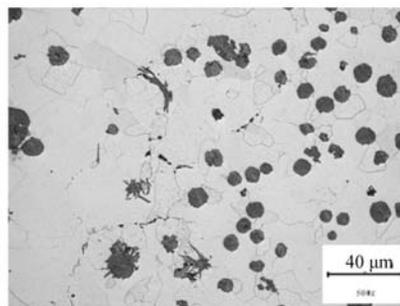
根据设计要求, 在主轴的不同部位进行本体取样, 试样编号顺次为TY-1、TY-2、……、TY-10。抽取TY-5进行金相检测, 金相组织^[15]见图5, 其中珠光体<5%, 球化率>90%, 石墨球大小\6级, 满足EN 1563对高硅球墨铸铁QT500-14材料的要求。

对10个本体试样进行力学性能试验, 将试样屈服强度和抗拉强度试验数值拟合成曲线, 如图6所示, 图中横坐标为试样编号, 纵坐标为机械强度数值, 单位为MPa。

从图6中可看出, 试样的抗拉强度 ≥ 470 MPa, 屈服强度 ≥ 370 MPa, 满足标准EN1563中的规定(抗拉强度 ≥ 450 MPa, 屈服强度 ≥ 350 MPa), 且同时满足文中大功率风力发电机组主轴的设计要求。图7的试验结果曲线表明了高硅球墨铸铁QT500-14材料的力学性能较稳定, 波动较小, 若应用于风力发电机组铸造



(a) 石墨



(b) 基体组织

图5 主轴金相组织

Fig. 5 Microstructure of spindle

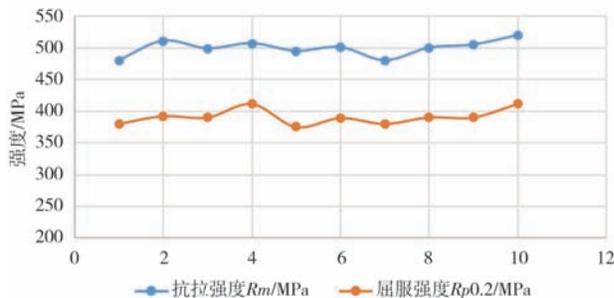


图6 试样力学性能试验曲线

Fig. 6 Mechanical property test curve of sample

主轴, 可较好地保证机组的可靠性。

6 结束语

(1) 通过材料的化学成分控制、铸造模具选用、利用MAGMA软件进行工艺模拟、铸造后热处理等系列的措施, 并应用实例充分验证了高硅球墨铸铁QT500-14应用在风力发电机组铸造主轴的可行性。

(2) 风力发电机组使用铸造成形替代锻造成形, 特别是对于大功率风力发电机组在保证可靠性的基础上可大幅降低机组的成本, 提高机组的竞争力。

参考文献:

- [1] 吕乐华, 张杰琼, 范随长, 等. 高硅固溶强化球墨铸铁的试制 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (9) : 777-779.
- [2] 宋光密, 徐文利, 王垒, 等. 固溶强化球墨铸铁QT500-14工艺试验与分析 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (4) : 65-67.
- [3] 杨万虎, 周文军, 张守全, 等. QT500-14、QT600-10高硅球墨铸铁研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (8) : 831-835.
- [4] 陈鹏辉, 柯志敏. 铸态QT500-14射台前板铸件熔炼工艺浅析 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (5) : 17-20.
- [5] 高博, 张涛, 杨霄峰, 等. 高硅固溶强化铁素体球墨铸铁的工艺研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2017 (5) : 15-17.
- [6] 曾大新, 何汉军, 张元好, 等. 铸态高强度伸长率球墨铸铁研究进展 [J]. 铸造, 2017, 66 (1) : 38-43.
- [7] 尤明. 大型风电主轴球铁铸件的生产工艺和质量控制 [J]. 现代铸铁, 2012 (6) : 23-26.
- [8] LACAZE J, BOUDOT A, GERVAR V, et al. Stable eutectoid transformation in nodular cast iron [J]. Metall Mater Trans (C), 1997, 28: 15-19.
- [9] RIPOSAN I, CHISAMERA M, STAN S. Influencing factors on as-cast and heat treated 400-18 ductile iron grade characteristics [J]. China Foundry, 2007 (4) : 400.
- [10] 王美喜, 占进, 余帆, 等. 一种改善高硅固溶厚大断面风电球墨铸铁件金相组织的工艺 [P]. 中国专利, CN113699432B, 2022-04-05.
- [11] 藏金平, 冯超伟, 杜春波, 等. 大型HT300主轴箱的铸造工艺 [J]. 现代铸造, 2012 (5) : 37-40.
- [12] 程宏伟. 大型风电主轴铸造工艺探讨 [C]//重庆市铸造年会论文集. 重庆: 重庆铸造协会, 2014: 112-114.
- [13] 王寿彭. 铸件形成理论及工艺基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- [14] 郭永圣. 冒口对A201铝合金铸件力学性能及孔隙率的影响 [J]. 铸造技术, 2010, 31 (11) : 1396-1400.
- [15] 郝石坚, 宋绪丁. 球墨铸铁 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.

Casting Process Research of QT500-14 Wind Turbine Spindle

GE Chun-li¹, HUANG Lian-kai², SONG Pei-long¹, XIANG Liang², LI Xiao-xia¹, LIANG An-yang¹

(1. CRRC Wind Power (Shandong) Co., Ltd., Jinan 250022, Shandong, China; 2. Tongyu Heavy Industry Co., Ltd., Yucheng 251200, Shandong, China)

Abstract:

High silicon ductile iron QT500-14 material has good mechanical properties and can be applied to the casting of high-power wind turbine spindle to reduce the unit cost significantly. By strictly controlling the chemical composition of QT500-14, casting with metal mold, simulating the spindle casting process with MAGMA software, predicting the casting defects, and taking measures to place chill at the predicted defect position in the actual casting process, the wind turbine spindle meeting the design requirements has been cast.

Key words:

QT500-14; wind turbine spindle; chemical composition; permanent mold casting; casting process
