

# 基于风电球墨铸铁件的强度提升研究及实践

李英昌, 董 健, 员一泽, 刘海涛

(国电联合动力技术有限公司, 北京100039)

**摘要:** 风电补贴退坡及平价上网形势下, 倒逼技术提升而实现降本需求, 其中重量占比较高的风电球墨铸铁需要更高性能的产品开发。通过研究材料化学成分、球化、孕育工艺控制和微量元素控制, 获得强度高于QT400-18AL的铁素体基球墨铸铁材料, 且满足低温冲击韧性, 对风电机组结构轻量化设计及技术降本具有重要意义。

**关键词:** 球墨铸铁; 风电; 强度; 低温冲击韧性

2019年5月国家能源局发布《关于2019年风电、光伏发电项目建设有关事项的通知》<sup>[1]</sup>, 宣告风电项目建设进入平价上网阶段。整个行业从2003年伊始的特许权招标, 至近期的竞价上网及平价上网, 政策调整逐步迫使风电整机产业技术不断进步、成本不断下降。

风电机组中的机架(机座)、轮毂、转轴及轴承座等球墨铸铁件, 占叶轮-机舱总重量的20%~30%, 铸件材料优化对风电机组整机减重降本的重要性不言而喻。

目前风电用球墨铸铁较多采用GB/T 1348-2009标准中的QT400-18AL牌号, 即对应EN1563标准中的EN-GJS-400-18U-LT材料<sup>[2]</sup>, 并有风电行业专用的球墨铸铁件标准GB/T 25390-2010。

随着风电机组功率大型化的发展<sup>[3]</sup>, 机组铸件结构呈现大吨位、大截面尺寸的特点, 如何在保持大功率机组铸件承载能力的基础上, 降低铸件重量成为新型铸件材料研制的关键点。本文参考QT400-18AL材料的铸造工艺、材料性能等方面, 着手研制大截面尺寸下的低温高性能球墨铸铁材料。

作者简介:

李英昌(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为大兆瓦级风力发电机组结构与材料。E-mail: 12105917@chnenergy.com.cn

通讯作者:

刘海涛, 男, 硕士。电话: 010-57659317, E-mail: 12109704@chnenergy.com.cn

中图分类号: TG255

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

04-0483-03

收稿日期:

2020-09-24 收到初稿,

2020-11-24 收到修订稿。

## 1 性能要求

一般认为铸件壁厚达100 mm以上属于大断面铸件<sup>[4]</sup>, 大功率机组铸件壁厚大多超过100 mm。目前QT400-18AL材料在大断面下, 由于结晶缓慢、凝固时间长而存在球化衰退、石墨漂浮、石墨球畸变的倾向, 造成大断面铸件性能降低, 不利于减重降本设计。

针对大兆瓦风电机组中的机架、轮毂和轴承座的大断面铸件, 结合机组设计载荷的要求, 提出了大功率机组大断面铸件的性能要求: ①力学性能, 特别是低温冲击性能不得低于GB/T 1348-2009标准要求; ②金相组织要求石墨球化率 $\geq 90\%$ , 铁素体含量 $\geq 90\%$ , 珠光体含量 $< 10\%$ , 渗碳体 $\leq 1\%$ , 磷共晶 $\leq 1\%$ , 石墨大小5级以上。

## 2 化学成分分析

依据QT400-18AL牌号球墨铸铁的化学成分组成, 研制一种铁素体基的高强度球墨铸铁, 在保证低温( $-20 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ )最小冲击功满足GB/T 1348-2009标准要求的条件下, 尽可能提升材料的屈服强度和拉伸强度, 并使铸件壁厚减小。

根据材料成分的作用, 重点研究能够促进石墨化, 增强铁素体的元素成分。本

文重点研究镍元素, 及适当控制硅和镍元素含量的可行性。

Si元素可促进石墨化, 促进渗碳体分解, 减少珠光体含量, 可固溶于铁素体基体<sup>[5]</sup>, 决定石墨化铁素体数量, 随Si含量增加, 材料的抗拉强度和屈服强度可明显提高, 但使材料韧-脆性转变温度向高温方向移动, 而导致材料低温冲击韧性降低, Si含量每提高0.1%, 脆性转变温度提高5.5~6℃, 这里Si含量控制在2.1%~2.5%。

Ni的石墨化能力是Si的1/5~1/3<sup>[6]</sup>, 无限固溶于铁, 可促进石墨化, 稳定和细化珠光体<sup>[7]</sup>。Ni含量一定时, 通过固溶强化, 可提高位错运动和增殖的阻力, 从而使得材料韧性加强<sup>[8]</sup>, 但其含量过多时, 将在所固溶的基体中产生晶格畸变, 位错运动减少, 材料韧性降低<sup>[9]</sup>, 这里Ni含量控制在0.2%~0.7%。

### 3 原料选用

为保证化学成分的稳定, 原料进行严格控制<sup>[10]</sup>:

①生铁, 选用低锰、低磷、低硫的低牌号类球墨铸铁用的优质生铁; 炉料占比20%~40%; ②废钢, 选用化学成分稳定的碳素废钢, 控制碳化物形成元素如Cr、Cu、W、V等的含量, 整料干净, 无锈蚀、无油污; 炉料占比30%~40%; ③回炉料占比30%~40%。

### 4 球化和孕育

采用稀土镁球化剂, 冲入法加入, 球化剂成分: 40%~45% Si、6%~7% Mg、1%~2% RE、

1%~2% Ba、0.8%~2% Ca, 其余为Fe。

在出铁过程中随流加入硅钡孕育剂, 孕育剂成分: 70%~75% Si、4%~6% Ba、0.8%~1.5% Ca、Al≤1.5%, 其余为Fe。

在充型过程中随流加入硅铋孕育剂, 孕育剂成分: 70%~75% Si、1%~2% Bi、0.8%~1.5% Ca、Al≤1.5%, 其余为Fe。

### 5 熔炼和退火

采用中频感应电炉将上述原料在1 430℃温度下熔炼, 而后进行球化、孕育和微合金化处理, 待温度降至1 330~1 360℃, 控制进铁速度, 将其浇入呋喃树脂砂铸型。浇注完成后, 控制冷却速度, 铸件在铸型中缓慢冷却至400℃以下, 从铸型中清理出铸件。

铸件高温退火处理: 以低于60℃/h的加热速度将铸件加热至高温, 如900~950℃, 保温2~5 h, 随炉缓慢冷却至600℃, 出炉空冷。

### 6 试验分析

试验铸件在热处理前的铸态金相检验结果: 球化率>90%, 石墨球大小6~7级, 磷共晶<1%, 珠光体含量10%~15%, 经过高温退火处理后的金相组织较铸态时, 其珠光体含量不超过5%。

从试验铸件附铸试块取样, 测定最终化学成分和力学性能, 见表1和表2。表3为国标规定的QT400-18AL牌号力学性能。

由表2、表3可得, 该试验研制的球墨铸铁材料,

表1 化学成分分析结果

Table 1 Result of chemical composition analysis

| 试样号               | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Mg <sub>残</sub> | RE <sub>残</sub> |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|------|-----------------|-----------------|
| QT-1 <sup>#</sup> | 3.66 | 2.17 | 0.21 | 0.028 | 0.005 | 0.35 | 0.043           | 0.023           |
| QT-2 <sup>#</sup> | 3.63 | 2.21 | 0.18 | 0.026 | 0.005 | 0.41 | 0.041           | 0.025           |
| QT-3 <sup>#</sup> | 3.61 | 2.15 | 0.17 | 0.03  | 0.005 | 0.38 | 0.035           | 0.028           |

表2 力学性能检测结果

Table 2 Testing result of mechanical properties

| 试样编号              | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% | 硬度HBW | 冲击功(-20℃)/J |
|-------------------|----------|----------|-------|-------|-------------|
| QT-1 <sup>#</sup> | 398      | 282      | 25.3  | 141   | 15.2        |
| QT-2 <sup>#</sup> | 405      | 284      | 23.9  | 143   | 14.1        |
| QT-3 <sup>#</sup> | 392      | 275      | 25.1  | 138   | 15.7        |

表3 国标规定的QT400-18AL力学性能

Table 3 Mechanical properties of QT400-18AL by requirement of national standards

| 标准         | 铸件壁厚/mm | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% | 硬度HBW   | 冲击功(-20℃)/J |
|------------|---------|----------|----------|-------|---------|-------------|
| GB/T 1348  | >60~200 | 360      | 220      | 12    | 120~175 | 10          |
| GB/T 25390 | >60~200 | 370      | 220      | 12    | 120~175 | 10          |

与国标规定的QT400-18AL牌号相比, 抗拉强度平均提高约11%, 屈服强度平均提高约27%, 伸长率已有提升。-20℃的低温冲击功平均约15 J, 高于标准要求值, 材料低温韧性能够保证。

## 7 结束语

当下风电机组单机容量不断攀升, 海上装机逐年增量, 以及整机持续降本适应市场的趋势, 需要研制更高强度的风电用球墨铸铁材料替代传统球墨铸铁材料。通过研制实践该高强度球墨铸铁件, 检验试验铸件的力学性能, 可得出如下结论。

(1) 风电用高强度球墨铸铁件可通过合理的化学成分设计、原料控制、工艺控制获得;

(2) 风电用高强度球墨铸铁, 因有低温韧性要求, 须控制合理的硅、镍含量, 其中镍含量不应低于0.2%, 但也不应高于0.7%;

(3) 该高强度球墨铸铁, 在低温冲击韧性满足国家标准和行业标准的条件下, 其抗拉强度提升约11%, 屈服强度提升约27%, 铸件壁厚得以减小, 材料利用率进一步提高。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 关于2019年风电、光伏发电项目建设有关事项的通知 [EB/OL].[2019-5-28]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t20190530\\_3667.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t20190530_3667.htm).
- [2] 俞旭如, 李小青.《风力发电机组 球墨铸铁件》国家标准介绍[J].现代铸铁, 2009(4): 29-34.
- [3] 界面新闻. 中国海上风电5MW及以上机组已成主流 [EB/OL].[2019-12-7]. [https://www.jiemian.com/article/3757042\\_qq.html](https://www.jiemian.com/article/3757042_qq.html).
- [4] 王星, 闫兴义, 陈玉芳, 等. 大断面风电球墨铸铁铸件的技术控制 [J]. 现代铸铁, 2015(1): 23-27.
- [5] 张伯明. Si强化铁素体球墨铸铁的新进展 [J]. 现代铸铁, 2019(4): 1-7.
- [6] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册 第1卷: 铸铁 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] 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(5): 456-463.
- [8] 喻光远, 肖恭林, 陈琳, 等. 高强高韧超低温球墨铸铁的研究与开发 [J]. 铸造, 2019(3): 258-263.
- [9] 陈江, 黄兴民, 高杰维, 等. 低镍球墨铸铁低温冲击性能及断裂机理研究 [J]. 材料工程, 2012(12): 33-38.
- [10] 彭建中, 刘玲霞, 杨忠贤. 大型风电球墨铸铁轮毂的质量控制 [J]. 铸造, 2010(9): 969-972.

---

## Study and Practice of Strength Enhancing Based on Wind Power Ductile Iron Castings

LI Ying-chang, DONG Jian, YUN Yi-ze, LIU Hai-tao  
(Guodian United Power Technology Company Ltd., Beijing 100039, China)

### Abstract:

The decline of wind power subsidies and the grid parity forced wind power industry to upgrade technology continuously and reduce the cost, in which the ductile irons for wind power need to be studied further to achieve higher performance. In the work, a higher strength ferrite ductile iron was developed based on QT400-18AL by adjusting the chemical composition, reasonable spheroidization and inoculation treatment and trace elements control. The higher strength ductile iron can meet the requirement of low-temperature impact toughness, which has an important significance for the lightweight design of wind turbine structure and technology cost reduction.

### Key words:

ductile iron; wind power; strength; low-temperature impact toughness