

# 1.5MW 风力发电轮毂铸造质量控制

邓宏运, 章红卫, 王万超

(1. 西安理工大学 664 信箱, 陕西 西安 710048; 2. 西安长泰特种合金厂, 陕西西安 710077)

**摘要:**1.5MW 风力发电轮毂铸件重达 12t, 为大断面球铁, 材质要求为 EN GJS400—18LT, 要求对联体试块做 -20℃ 低温冲击试验和对所有关键部位进行 UT 探伤, 工艺难度极大。主要技术指标如下:  $\sigma_b = 395\text{MPa}$ ;  $\sigma_{0.2} = 220\text{MPa}$ ;  $\delta = 19\%$ ; HB145; -20℃ 低温冲击值为: 3 个试样平均 10.50J, 最低 10J。球化率 90%, 球径大小 6 级, 铁素体含量 95%。UT 探伤结果未发现 3 级以上的铸造缺陷, 达到了 DIN EN1563 材料标准的要求和客户的验收条件。生产这样高要求铸件, 关键技术在于化学成分的正确选择; 冷铁的合理采用; 球化剂、孕育剂及孕育方法的科学运用。

**关键词:**风力发电轮毂; 大断面球铁; UT 探伤; 低温冲击性能

风力发电利用自然界的可再生能源——风能, 成为当今国际新能源发展的流行趋势。近年来, 各国的风力发电市场的年增长率超过了 20%, 据预测风力发电技术的应用将在未来 30 年内持续高增长。大断面高韧性球铁在风力发电设备中获得广泛的应用, 这些铸件一般采用德国/欧洲 (DIN/EN GJS400-18-LT) 材料标准的高韧性球铁 (相当于中国国家标准 QT400-18AL), 铸件质量要求极为严格。目前, 中国有一汽无锡铸造有限公司、江阴吉鑫、宁波永祥、宁波日月、大连重工、秦川机床、陕柴重工、东方汽轮机、长城须崎等少数的企业成功地开发出此类产品, 市场处于紧缺状态。因此开发风电铸件产品系列具有十分广阔的市场前景。

## 1 风力发电轮毂铸件要求及生产难点

### 1.1 风力发电轮毂铸件的质量要求及验收规范

(1) 规范要求为 DIN/EN GJS400-18-LT 抗低温冲击铁素体球墨铸铁必须带有 70mm 厚度的联体试块供顾客验证, 力学性能要求:  $\sigma_b > 370\text{MPa}$ ,  $\sigma_{0.2} > 220\text{MPa}$ ,  $\delta > 12\%$ , HB140~180。-20℃ 低温冲击值为: 3 个试样平均 10J, 最低 8J。球化率要求 85% 以上; 基体中铁素体 > 90%。

(2) 风力发电轮毂铸件要进行 100% 关键尺寸检验。

(3) 外观检磁粉 (MT) 及超声波 (UI) 无损探伤检验, 要求组织致密, 缩松等级 1~3 级。

### 1.2 风力发电轮毂工艺技术的难点

风力发电轮毂铸件断面厚大, 冷却缓慢, 金属液体凝固时间长, 容易出现球化衰退, 且铸件 3 个法兰端面根部的热节处很容易产生缩孔、缩松。生产风力发电轮毂球铁的技术难点有:

(1) 风力发电轮毂铸件要在 3 个法兰端面进行 UT 探伤, 如何解决铸件的内部缩松;

(2) 在厚大断面保证获得良好的球化率, 避免球化衰退, 在铸态下获得铁素体 90% 以上的基体组织;

(3) 如何使材料有足够的抗拉强度、屈服强度和足够的延伸率 (>12%);

(4) 如何保证良好低温 (-20℃) 冲击韧性;

(5) 如何进行球化孕育处理及微合金化工艺。

## 2 铸造工艺的控制原则

风力发电轮毂的工艺设计原则是采用通过施加冷铁的方法使铸件尽可能的获得同时凝固, 同时,

借助球状石墨膨胀获得致密、健全的内部组织。为获得铁素体基体,开箱温度要控制在 600℃ 以下。采取底注式、半封闭式浇注系统。该铸件重量达 12t,铁液总量达 14t,充型时间可用下式近似计算,即

$$\text{充型时间: } T = 1/2 \times S \times G^{1/2} = 1/2 \times 1.9 \times 140001^{1/2} = 112\text{s}。$$

### 3 风力发电轮毂化学成份的控制

#### 3.1 风力发电轮毂 C、Si、CE 的选择

由于球状石墨对基体的削弱作用小,故球墨铸铁中石墨数量的多少对力学性能的影响不显著,当含碳量在 3.3% ~ 3.8% 范围内变化时,对力学性能无明显影响。所以过程中确定碳硅含量时,主要考虑保证铸造性能,将碳当量选择在共晶成分左右,即 4.3% 左右,具有共晶成分的铁液的流动性最好,形成集中缩孔的倾向大,铸件组织的致密度高。

硅在球墨铸铁中对性能的影响很大,主要表现在硅对基体的固溶强化作用同时,硅能细化石墨,提高石墨球圆整度。球铁中硅含量的提高,很大程度上提高强度指标,降低韧性。球墨铸铁经过球化处理的铁液有较大的结晶过冷和形成白口倾向,硅能够减少这种倾向。但是硅量控制过高,大断面球铁中促使碎块状石墨的生成,降低铸件的低温冲击韧性,因此,为满足风电铸件低温冲击性能要求,硅应控制在 2.2% 以下。碳当量过高会引起石墨漂浮,石墨漂浮层的厚度会随着碳当量的增加而加厚。碳当量太高是产生石墨漂浮的主要原因,但不是唯一的原因,铸件大小,壁厚、浇注温度也是一些重要因素,图 1 是碳当量、铸件壁厚和石墨漂浮三者的关系。

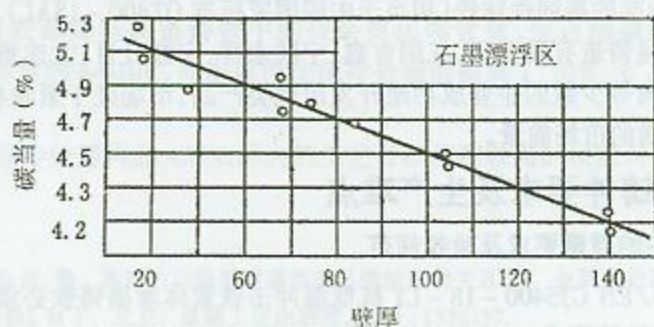


图 1 碳当量、壁厚与石墨漂浮的关系

从图 1 可以看出,铸件壁薄,碳当量可以选择的高一些不会出现石墨漂浮,相反厚大铸件的碳当量应当选的低些。总之碳当量上限以不出现石墨漂浮为原则,下限不出现渗碳体保证完全球化为准,在这种前提下,应尽可能提高碳当量获得致密的铸件。

#### 3.2 锰(Mn)

锰具有严重的正偏析倾向,往往富集于共晶团晶界处,促使形成晶间碳化物,显著降低球墨铸铁的韧性。对厚大断面球铁来说,锰的偏析倾向更严重。同时锰含量的提高,基体中的珠光体含量提高,所以提高了强度指标的同时,降低韧性。对高韧性球墨铸铁中锰含量控制应更严格。因此,对于厚大铸件,锰的上限控制为  $Mn < 0.3\%$ 。

#### 3.3 磷、硫

磷在球墨铸铁中有严重的偏析倾向,易在晶界处形成磷共晶,严重降低球墨铸铁的韧性,磷增大球墨铸铁的缩松倾向。要求球墨铸铁有高的韧性时,应将磷控制在 0.05% 以下,甚至是 0.04% 以下。

球墨铸铁中硫与球化元素有很强的化合能力,生成硫化物和硫氧化物,不仅消耗球化剂,造成球化不稳定,而且使夹杂物数量增多,球化衰退速度加快。采用生铁电炉熔炼,硫可以控制的低一些,通

常可以达到 0.02% 以下;当原铁液含硫量大于 0.025% 时,需要进行炉内脱硫。

### 3.4 镁和稀土的含量

镁是主要的球化元素,稀土具有脱硫,中和反球化元素,对 Mg 具有保护等作用,提高铁液的抗衰退能力。但是稀土元素是碳化物形成元素,因此在保证球化良好的情况下尽可能控制稀土的残留量。RE 残 0.01% ~ 0.04%;Mg 残 0.03% ~ 0.06%。

## 4 生产过程控制方法

### 4.1 原材料的选择

风电低温球铁的生产,选择高纯的原材料是非常必要的,原材料中 Si、Mn、S、P、Ti 含量要少(Si < 0.8%, Mn < 0.3%, S < 0.03%, P < 0.04, Ti < 0.04%),对 Cu、Cr、Mo 等一些合金元素要严格控制含量。由于很多微量元素对球化衰退最为敏感,如钨、钙、铈、锡、钛、钒等。钛对球化影响很大,是反球化元素,应严格加以控制。

### 4.2 球化剂和球化处理

生产厚大断面球铁件时,为了提高抗衰退能力,在球化剂中加入一定比例的重稀土,这样既可以保证起球化作用的 Mg 的含量,同时也可以增加具有较高抗衰退能力的重稀土元素,如铈等。据有关资料表明,铈的球化能力仅次于镁,但其抗衰退能力比镁强得多,且不回硫,铈可过量加入,高碳孕育良好时,不会出现渗碳体。另外,铈与磷可形成高熔点夹杂物,使磷共晶减少并弥散,从而进一步提高球铁的延伸率。在球化处理时,为了提高镁的吸收率,控制反应速度及提高球化效果,采用特有的球化工艺。对球化处理的控制,主要是在反应速度上进行控制,控制球化反应时间在 2min 左右。对此采用中低 Mg、Re 和铈基重稀土的复合球化剂,球化剂的加入量为 1.5%。

### 4.3 孕育剂和孕育处理

孕育处理是风电轮毂生产的关键,孕育效果决定了石墨球的直径、石墨球数和石墨球的圆整度,为了保证孕育效果,孕育处理采用多级孕育处理。孕育处理越接近浇注,孕育效果越好。从孕育到浇注需要一定的时间,该时间越长,孕育衰退就越严重。为了防止或减少孕育衰退,采取以下措施:

- (1)使用长效孕育剂进行包内孕育,孕育剂加入量为 0.8%;
- (2)采用特效孕育剂进行水口箱瞬时孕育,加入量为 0.2%。

### 4.4 浇注工艺控制

浇注应采用快浇,平稳注入的原则。为了提高瞬时孕育的均匀性及防止熔渣进入型腔,水口盆的总容量应与铸件的毛重相当,浇注时将孕育剂放入水口盆中,将铁液一次全部注入水口,使铁液与孕育剂充分混合,扒去表面浮渣,提出水口。

## 5 力学性能检验

浇注后将附铸试块切下,做铸态金相和理化分析,金相组织中球化级别达到 2 级以上,石墨大小 2 级以上,铁素体含量 > 90%,抗拉强度及 -20℃ 低温冲击韧度检验均能达到要求。

## 6 典型缺陷的形成防止措施

风电类铸件的主要缺陷有球化不良及球化衰退、缩孔(松)、夹渣。球化不良表现为:集中分布的厚片状石墨和少量球状、团状石墨;有时还有水草状石墨。随着球化不良程度的加剧,集中分布的厚片状石墨的数量逐渐增多、面积增大。球化衰退的特征是炉前球化良好,在铸件上球化不好;或者同一包的铁液,先浇注的铸件球化良好,后浇注的铸件球化不好。球化不良及球化衰退将使球墨铸铁的力学性

能达不到铸件牌号要求的指标。

缩孔(松)缺陷形成与铸造工艺及浇注温度有着明显而直接的关系,合理的铸造工艺及浇冒口一体化补缩,配合一定数量的外冷铁,内浇口短薄宽与分散引入,配合以合适的浇注温度和浇注速度是防止缩孔的较为有效的技术措施。

风电底座的大平面、圆弧面及法兰面最容易夹渣,风电轮毂的底法兰面也容易夹渣。

生产中如果铸态金相组织合格,力学性能中个别数据接近要求而不合格,尤其是低温冲击韧度,可以通过对铸件及试样同炉石墨化退火补救。

## 6.1 球化不良及球化衰退的主要影响因素

(1)碳当量高,原铁液含硫高:对于厚壁铸件,当碳当量超过共晶成分时就有可能产生开花状石墨。生产中大多采用高碳低硅的原则。硫是主要的反球化元素,当铁液中的含硫量太高时,硫与镁和稀土生成硫化物,因其密度小而上浮到铁液表面,而这些硫化物与空气中的氧发生反应生成硫,硫又回到铁液,又重复上述过程,从而降低了镁与稀土含量,降低球化效果;

(2)球化元素残余量低:除了硫以外,消耗稀土和镁的微量元素总量是球化合金选择和加入量的主要依据,稀土与镁含量过低时,往往产生球化不良或球化衰退现象;

(3)温度:中频炉生产球墨铸铁若出现铁液温度过高,将使铁液氧化严重,中间合金与铁液作用激烈,由于镁与稀土易与氧化物产生还原反应,球化元素烧损严重,使得镁、稀土含量降低,同时高温也将增加镁的烧损和蒸发;铁液温度太低,球化剂不能熔化和被铁液吸收,而上浮至铁液表面燃烧或被氧化;

(4)滞留时间:铁液中镁的含量是随孕育处理后停留时间的增加而减少,其主要原因是因硫及镁、稀土的氧化与蒸发造成的。

球化衰退防止:球化衰退的原因一方面和 Mg、RE 元素自铁液中逃逸减少有关,另一方面也和孕育作用不断衰退有关,为了防止球化衰退,采取以下措施:

(1)铁液中应保持有足够的球化元素含量;

(2)降低原铁液的含硫量,并防止铁液氧化;

(3)缩短铁液经球化处理后的停留时间;

(4)铁液经球化处理并扒渣后,为防止 Mg、RE 元素逃逸,可用覆盖剂将铁液表面覆盖严,隔绝空气以减少元素的逃逸。

## 6.2 防止风电铸件产生球化不良和球化衰退的技术措施

(1)严格控制铁液成分,铁液的碳当量控制在 4.3% 以下;原铁液中的含硫量必须小于 0.015%;

(2)如果球化剂中球化元素含量不足,加入量不够,根据生产条件经过炉前取样后计算出稀土、球化剂的加入量。严格掌握铁液量,防止失控造成铁量过大使球化剂量相对减少,处理后的球铁铁液中稀土镁的残留量不应过低,而且一定要使用 H/D 在 1.8 以上的球化包;

(3)温度控制,要控制出炉温度,以防球化剂严重烧损;装包质量要保证,防止球化剂提前反应;铁液扒渣后应用硅酸铝覆盖;

(4)缩短铁液的停滞时间,铁液球化后应及时浇注,从球化处理完毕到浇注结束时间不得超过 10min。

## 6.3 产生夹渣的影响因素

(1)型砂 若型腔表面粘附有多余的砂子或灰尘,它们可与金属液中的氧化物合成熔渣,导致夹渣产生;砂型的紧实度低,型壁表面容易被金属液侵蚀和形成低熔点的化合物,导致铸件产生夹渣。

(2)浇注系统 浇注系统设计应具有挡渣功能,使金属液平稳地充填铸型,避免飞溅及紊流造成

的夹渣。

(3) 化学成份 硅的氧化物是夹渣的主要组成部分,因此含硅量越低,铸件夹渣越少,但是硅对铸件的性能影响较大,如果硅含量越低,则铸件的低温冲击性能越高,而铸件的抗拉性能越差。硫严重消耗镁的元素,铁液中的硫化物是球铁件形成夹渣缺陷的主要原因之一。硫化物的熔点比铁液熔点低,在铁液凝固过程中,硫化物将从铁液中析出,增大了铁液的粘度,使铁液中的熔渣或金属氧化物等不易上浮。而铁液中硫含量太高时铸件易产生夹渣,因此残余镁和稀土不应太高。

(4) 浇注温度 生产中浇注温度太低是引起夹渣的主要原因之一。

#### 6.4 防止风电类铸件产生夹渣的技术措施

- (1) 控制铸型紧实度,合箱时应吹净铸型中的砂子;
- (2) 浇注系统要使铁液流动平稳,并且设有集渣包和挡渣装置(如滤渣网等),避免直浇道冲砂;
- (3) 严格控制铁液成分,尽量降低铁液中的含硫量,防止形成氧化镁杂质;
- (4) 控制浇注温度,过热温度必须达到  $1500^{\circ}\text{C}$ ,适宜的静置,以利于非金属夹杂物的上浮、聚集。球化孕育处理完毕后扒干净铁液表面的渣子,铁液表面放上覆盖剂,防止铁液氧化。选择合适的浇注温度。

### 7 常规生产中容易忽视的几个问题

- (1) 重视冒口补缩,忽视外冷铁的激冷及内浇口对铸型的过热;
- (2) 重视熔炼,忽视冶炼;
- (3) 重视球化处理,忽视孕育处理,忽视球化处理后到浇注的时间控制;
- (4) 重视球化剂、孕育剂、增碳剂的计量,忽视原铁液计量准确;
- (5) 重视提高球化率,忽视细化石墨提高石墨球数;
- (6) 重视浇注温度控制,忽视浇注时间及浇注速度控制,浇注最好以大流量低流速。

### 8 结论

在铸态下对 70mm 壁厚的附铸试块进行检验,获得结果如下:基体组织基本为铁素体,球化等级为 II 级,球径大小为 6 级;力学性能参数达到了 EN 1563 材料标准规定的 EN GJS400-18LT 的材质牌号要求;UT 探伤结果也符合 EN 12680-3-2003 的标准要求。性能参数: $\sigma_b = 395\text{MPa}$ 、 $\sigma_{0.2} = 220\text{MPa}$ 、 $\delta = 19\%$ 、HB145;  $-20^{\circ}\text{C}$  低温冲击值为:3 个试样平均 10.50J,最低 10J。

对于电炉合成铸铁生产,由于不用生铁原材料,只是碳素废钢、晶体石墨增碳剂采购,管理相对容易,增碳剂、球化剂、孕育剂选择要求与电炉非合成球铁生产相同,由于电炉的温度化学成份容易控制,对于一般铸造工厂,降低生产高韧性球铁的技术难度,减少了球化不良的多种影响因素,提高了合格率,降低了生产综合成本,提高了生产效益。