

耐低温冲击球墨铸铁件的生产

殷作虎¹,姚天龙¹,王小伟¹,何克银¹,朱皓宇¹,吴景泉²,俞国平²,俞新贞²

(1. 无锡永新合金球铁厂(集团),江苏 无锡 214072;2. 芜湖容川铸造有限公司,安徽 芜湖 241000)

摘要:简述了风电类耐低温球墨铸铁件的需求势头,列举了该类铸件的生产实例,从铁素体体积分数、晶粒大小及晶间结合力三个方面阐述了耐低温球墨铸铁生产的关键点及相关措施。

关键词:球墨铸铁;低温冲击;生产技术

近年来,国内生产具有耐低温冲击性能要求的球墨铸铁件的单位越来越多,产量越来越大。主要原因:一是寒冷地区石油、天然气工业发展及配套的存储运输等工程发展的需要;二是寒冷地区的工程机械、船运、汽运、火车运输设备的发展需要;三是风力发电产业的快速发展需要。截止2007年底,我国大陆已建成风力发电场158个,累计安装风电机组6469台,装机总容量达到590.6万kW,其中2007年我国大陆新装机容量330.4万kW,与2006年比增长147.1%。根据目前全球风电产业增长趋势,世界风能协会预测到2010年,全球总装机容量将达到1.7亿kW。根据目前国内增长趋势,预测到2010年,中国总装机容量达到0.15~0.25亿kW,到2020年,中国总装机容量可达到0.8~1亿kW。

铸件是风力发电设备的主要构件,包括装置叶

片的轮毂、底座、齿轮箱、主框架等构件,1~2 MW机组需15~20 t铸件,4.5 MW风力发电机组约需要35~45 t铸件。由于风力发电机组多建于海边和沙漠等多风源地带,有的零件要在离地高10 m的高空运行,有的零件在-20℃甚至-40℃的环境下服役,工况条件十分恶劣。因此,对铸件质量性能指标要求较高,除了要求常规性能指标外,还有低温冲击性能指标要求(见表1)。

表1 低温冲击初度指标/J·mm⁻²

| 试棒类别 | 参考壁厚/mm | 常温 23±5℃ | | 低温 | | | |
|------|---------|----------|------|--------|------|--------|------|
| | | | | -20±2℃ | | -40±2℃ | |
| | | 三个试棒平均 | 个别试棒 | 三个试棒平均 | 个别试棒 | 三个试棒平均 | 个别试棒 |
| 单铸试棒 | 25 | 14 | 11 | 12 | 9 | 12 | 9 |
| 附铸试棒 | 30~60 | 14 | 11 | 12 | 9 | 12 | 9 |
| | 60~120 | 12 | 9 | 10 | 7 | 10 | 7 |

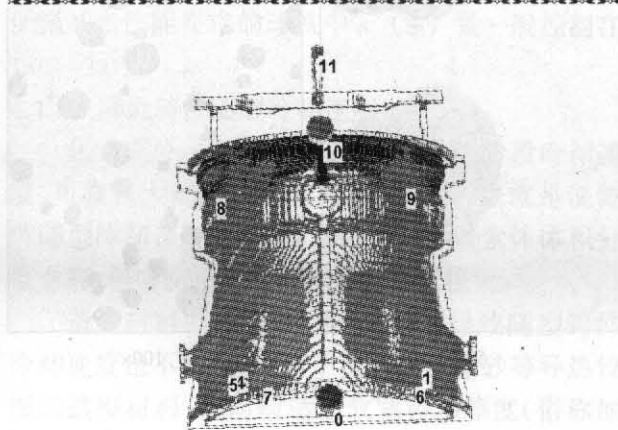


图2 铸件凝固过程数值模拟结果

浇注质量为6 t,浇注温度1350~1370℃,浇注时间约250 s。

将凝固数值模拟的缩松危险区域与实物的NDT检测结果进行对比,认为凝固数值模拟结果有

一定的指导作用,但不能完全依赖他,他预报缩松危险区域的数量往往比实际缩松区域数量多得多,即实际发生缩松的区域一般能够预报出来(如图2中的4、5、6、7),但是更多的所谓危险区域实际上没有缩松,或者缩松不超标(如图2中的8、9、10),为此,需要工艺设计人员根据自己的经验进行筛选、判别。

5 结束语

以上仅仅是我们一年多来在开发燃气轮机球墨铸铁件方面的一些心得体会,虽然部分产品已达到首件资格认证(FPQ)的要求,但由于对燃气轮机行业缺乏了解,对其使用球铁件的技术要求和铸造特点认识不足,因此,要使全部铸件通过资格认证,还需要一个不断认识和探索的过程。

和常温球墨铸铁相比,耐低温冲击球墨铸铁的生产有一定的难度,对球化剂、孕育剂、生铁、废钢等原辅材料,球铁成分,过程控制及检测诸方面都提出了全新的要求。笔者在此介绍耐低温冲击球墨铸铁的球化剂、孕育剂及配套使用工艺。

1 生产条件

采用 0.5 t 中频感应电炉熔炼铁液,呋喃冷硬树脂砂造型,主要生产如图 1 所示的箱体铸件,牌号为 GJS-350-22-LT,铸件质量为 117 kg。

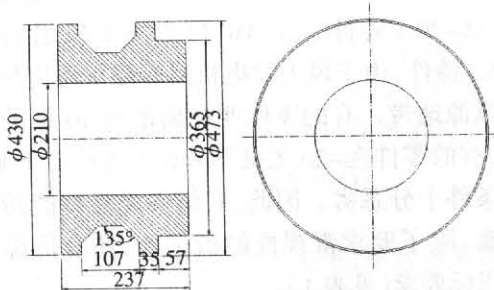


图 1 箱体铸件图

2 生产过程

主要炉料为低 $w(C)$ 、低 $w(Mn)$ 废钢和回炉料,采用增碳剂,增硅剂调整铁液成份,控制原铁液及铸件化学成份到表 2 要求范围。升温至 1 510~1 530 °C,进行球化和孕育处理,球化剂和孕育剂成分见表 3。

一般情况下球化剂、孕育剂的加入量分别为 1.3%、1%。将球化剂放置在球铁包堤坝一侧,其上覆盖 0.9%的孕育剂扒平,加入少许铁屑后冲紧。球化和孕育处理后,浇铸铸件和 25 mm 厚的单铸试棒,浇铸时,随流加入 0.10%~0.15%、粒度为 0.1~1.0 mm 的孕育剂。

表 2 原铁液和铸件化学成分 $w_B(\%)$

| 材料 | C | Si | Mn | P | S | Mg | RE |
|-----|---------|---------|-------|--------|--------|------------|-----------|
| 原铁液 | 3.7~3.9 | 0.7~1.0 | <0.20 | <0.035 | <0.020 | | |
| 铸件 | 3.6~3.8 | 1.7~2.0 | <0.20 | <0.035 | <0.015 | 0.03~0.045 | 0.01~0.02 |

表 3 球化剂和孕育剂的化学成分 $w_B(\%)$

| 材料 | Mg | RE | Ca | Ba | Si | Sb | Bi |
|-----|-------|---------|---------|---------|-------|----|----|
| 球化剂 | 5~5.0 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 1.5~2.5 | 40~45 | 适量 | 适量 |
| 孕育剂 | | | | 2~3 | 65~70 | 适量 | 适量 |

3 检测结果

对单铸试棒进行铸态和热处理态的力学性能、金相组织测试,结果见表 4、表 5 和图 2。

表 4 试棒铸态下力学性能数据

| 试棒编号 | 抗拉强度 /MPa | 伸长率 (%) | 硬度 (HB) | 屈服强度 /MPa | 冲击初度 /J·mm ⁻² |
|------|-----------|---------|---------|-----------|--------------------------|
| 1 | 425 | 18.0 | 325 | 168 | 16 |
| 2 | 426 | 19.0 | 332 | 162 | 17 |
| 3 | 431 | 18.5 | 346 | 162 | 16 |
| 4 | 439 | 17.6 | 362 | 163 | 14 |
| 5 | 439 | 19.0 | 364 | 163 | 15 |
| 6 | 442 | 18.0 | 352 | 168 | 17 |
| 7 | 439 | 18.0 | 352 | 168 | 16 |
| 8 | 432 | 19.0 | 356 | 172 | 16 |

表 5 试棒热处理后的力学性能数据

| 试棒编号 | 抗拉强度 /MPa | 伸长率 (%) | 硬度 (HB) | 屈服强度 /MPa | 冲击初度 /J·mm ⁻² |
|------|-----------|---------|---------|-----------|--------------------------|
| 1 | 365 | 26 | 272 | 152 | 20 |
| 2 | 367 | 26 | 268 | 156 | 21 |
| 3 | 372 | 27 | 267 | 152 | 21 |
| 4 | 365 | 24 | 256 | 153 | 19 |
| 5 | 368 | 25 | 262 | 152 | 18 |
| 6 | 372 | 23 | 264 | 154 | 18 |
| 7 | 369 | 28 | 265 | 156 | 19 |
| 8 | 365 | 27 | 263 | 153 | 18 |

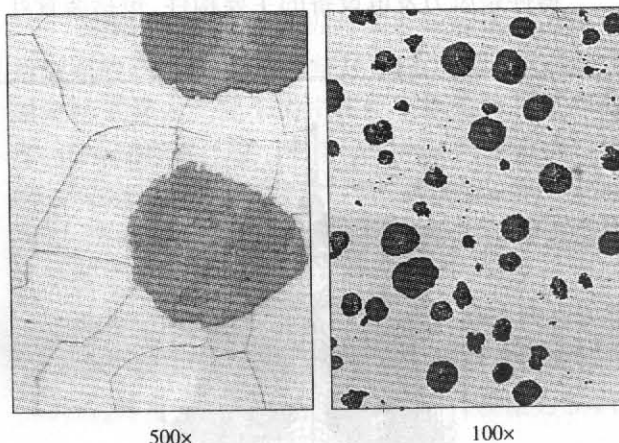


图 2 金相组织

4 分析与探讨

如何获得较高低温冲击初度的球墨铸铁件呢?冲击初度反映材料断裂时吸收的能量,也反映快速变形条件下,材料抵抗裂纹萌生、发展和断裂的能力。低温冲击初度是一个材料的韧性指标,也就是

说具有较高低温冲击韧度的球墨铸铁件在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时具有较高冲击韧性,脆—韧性转变温度较低,能够较好地克服冷脆问题。

因此,如下的一些措施都能有效提高球墨铸铁的低温冲击韧度指标。

4.1 提高球墨铸铁中铁素体的分数

研究表明不同温度下不同基体组织对低温冲击韧度有较大的影响,塑性较高的铁素体球铁能获得较高的冲击韧度指标。

4.1.1 化学成份

降低促进或稳定珠光体形成元素,如:Mn、V、Zr、Nb、Ti、Cr、Mo、W、Cu、Pb、Sb等的质量分数。其中,Mn对球墨铸铁的冲击韧度和脆性转变温度都有特别不利的影 响,每提高 0.1% 的 $w(\text{Mn})$,球铁的脆性转变温度提高 $10\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以,应尽量选择低 $w(\text{Mn})$ 的生铁和废钢作为原材料;Cu虽然是中性元素,对提高珠光体体积分数的作用不明显,但是,随着 $w(\text{Cu})$ 量的增加,球墨铸铁的脆性转变温度升高,并且冲击韧度也下降。

适量提高铁素体形成元素,如:C、Si、Ca、Ba、Al、Bi等的质量分数。其中,Si是强烈促进石墨化元素,有利于提高铁素体体积分数,但 $w(\text{Si})$ 量增加,冲击韧度明显下降, $w(\text{Si})$ 量每提高 0.1% ,脆性转变温度就提高 $5.5\sim 6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $w(\text{Si})$ 量在 4% 左右的球墨铸铁,虽具有全部的铁素体基体,但脆性很大,就是常温下也难以在有冲击载荷的条件下使用,因此,具有低温冲击性能要求的球铁中 $w(\text{Si})$ 量一般控制在 $1.6\%\sim 2.0\%$ 。

4.1.2 降低铸件随型冷却速度

化学成分一定的球铁,改变其共晶阶段冷却速度,可在较大范围内改变其基体组织,也就是说铸件随型冷却速度愈慢,其基体组织中 铁素体体积分数愈高;但应防止出现晶粒及石墨球粗大。

造型材料不同,导热能力不同,导致随型铸件冷却速度也不同,应选用干型砂或树脂砂等导热较慢的造型材料,同时应适当放宽铸型厚度(俗称加大吃砂量),尽量减少或不用冷铁,对于薄壁件来说,采用适当提高浇铸温度的措施来减缓铸件冷却速度,并尽量延长开箱时间,有条件的可将随型铸件集中摆放,减缓散热。

4.1.3 热处理

热处理工艺提高了铁素体体积分数,伸长率、

冲击韧度都得到了较大幅度的提高(见表4和表5)。通过退火处理,部分元素在高温下能得以扩散,铸件基体组织的晶格变细、晶粒细化,铁素体体积分数和性能得以稳定提高;同时,可适当放宽对原辅材料中部分元素的苛刻要求。对于中小铸件或达不到要求的铸件可通过热处理的措施来弥补。

4.2 细化晶粒、增加共晶团数量

随着材料晶粒尺寸的增大,材料的断裂应力显著降低,当晶粒尺寸大于某一临界尺寸时,即出现脆性断裂。细化及减小晶粒尺寸可降低脆性转变温度,从而提高球墨铸铁低温冲击韧度指标。

4.2.1 合成铸铁熔炼工艺

采用废钢和回炉球铁作为主要原料,采用石墨增碳, SiFe或SiC增硅的方式熔炼球铁铁液。由于C、Si的熔点比铁液的高,主要是靠扩散溶解的方式进入铁液,在铁液中存在着大量[C]的微晶,这种微晶是先共析或共晶石墨很好的外来形核基底,有利于细化晶粒。

4.2.2 多次孕育

孕育的实质是脱氧、脱硫形成外来晶粒,其目的是增加石墨形核能力,细化晶粒,增加石墨球数量,增加铁素体体积分数,经过三次孕育,尤其是浇铸过程中采用 $0.3\sim 1.0\text{ mm}$ 的含Ba孕育剂进行瞬时孕育,孕育量虽少,但孕育效果显著。

4.3 净化铁液,减少晶粒内部、晶粒间的夹渣及夹杂物

材料断裂往往是穿晶或沿晶断裂,材料晶粒内部或晶粒间有夹杂或夹杂物,削弱了材料的键合力,在冲击载荷作用下,经常形成为裂纹源,或裂纹传播的途径,降低材料的耐低温冲击能力。

(1)脱氧、脱硫处理:采用冲天炉—电炉双联熔炼铁液时,可采取摇包方式、冲入方式或气动方式进行脱硫,使原铁液中的 $w(\text{S})$ 量降至 0.02% 以下。不过,现在常用的脱S剂大部分为CaO或CaC₂成份,其脱氧能力较差,能适当辅助以一些脱氧元素如Ca、Ba、Al等元素效果就更好。采用电炉熔炼铁液,也有必要进行脱氧、脱硫处理。

(2)铁液的过热及静置:提高铁液熔炼温度,可以使原材料中带入的夹杂物,以及在熔炼过程中形成的夹渣、夹杂物上浮至铁液表面。尤其是采用废钢增硫工艺更要适当提高熔炼温度($\geq 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$),增加保温时间,否则,C不能完全溶解到铁液中,就

会形成夹渣。对球化后的铁液进行 1~3 min 的静置,有利于活泼金属如 Mg、Ba、Al、Fe 的氧化物及硫化物上浮,从而净化铁液。

(3)多覆盖,勤扒渣:多覆盖有利于减少熔炼过程、浇铸过程中铁液和空气的接触时间,降低铁液中的 $w(O)$ 量;勤扒渣,有利于聚集在熔炼过程或球化过程中形成的残存氧化物、硫化物,从而使铁与渣分离,保证进入型腔前的铁液得到良好的净化。

(4)铁液过滤:结合浇铸系统在型上或型内设置一个带有过滤器的集渣包,一是阻止固、液态渣的通过;二是有利于铁液平稳注入型腔,减少二次氧化渣的形成;三是在集渣包中上浮一些集渣物,尽量减少一次渣进入型腔。

4.4 降低晶界偏析元素

应尽量降低晶界偏析元素 Mn、Sb、Sn、As、Ti 等的质量分数。

4.5 降低氧化物、硫化物形成元素

应尽量降低易形成氧化物、硫化物元素 Ca、Ba、Al、Mg、稀土元素的质量分数。

4.6 专用球化剂、孕育剂

用于生产耐低温冲击球铁的球化剂、孕育剂应注意如下三个原则:

(1)高效稳定的球化及孕育效果。这一方面取决于球化剂本身的成分稳定,主要元素如 Mg、RE、Ca、Ba 等元素质量分数偏差范围应小于 $\pm 0.3\%$;另一方面是铁液质量的稳定,如出铁温度 $w(S)$ 、 $w(O)$ 量的稳定;再次就是操作工艺的稳定,如出铁速度及除铁位置的控制,防止出铁过慢使铁液直冲球化剂。

(2)较强的石墨化能力。Mg、RE 是主要的球化元素,同时也是较强的白口形成元素;应以 Mg 为主,辅以 RE 元素,同时合理搭配 Ca、Ba、Bi 等石墨化能力较强的元素。

(3)较低的形渣能力。一方面应尽量减少球化剂、孕育剂中的渣含量,如 MgO、稀土的氧化物及其他的外来渣;同时,球化剂、孕育剂中的 $w(Ca)$ 、 $w(Ba)$ 量要适中,因为它们具有较强的形渣能力。

球化剂、孕育剂中 Mg、RE、Ca、Ba 等元素的含量及其加入量与球化效果及低温冲击性能存在着一定的矛盾,加入铁液中的 Mg、RE、Ca、Ba 等元素过量,会造成上述元素在铁液中的残留量偏高,其氧化、硫化渣较高势必影响冲击性能;但上述元素

过低也会影响球化效果及基体组织,达不到效果。应针对不同的铁液质量,铸件大小、形状、壁厚、浇注时间等条件选用恰到好处的专用球化剂、孕育剂及其配套工艺措施。

5 结束语

总之,只要控制好铁液的冶金质量;控制 C、Si、Mn、Ca、Ba、RE 等元素的质量分数在适宜范围;尽量降低其他元素的质量分数;选用特制球化剂、孕育剂及配套工艺;严格工艺过程,完善各项参数的检测手段;那么,稳定生产耐低温冲击球铁铸件并不是一件十分困难的事情。