

# 风力发电轮毂铸件的研制

齐齐哈尔重型铸造有限责任公司 (黑龙江 161005) 赵红霞 柴树繁

**【摘要】** 本文介绍了高档球墨铸铁轮毂的铸造过程, 以及采取大孔出流浇注系统、强制冷却, 铁液精炼等工艺措施。

我公司生产的1.5MW风力发电机叶轮轮毂是高韧性的球墨铸铁件, 其牌号为QT400—18, 力学性能要求抗拉强度 $\geq 400\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 250\text{MPa}$ 、保温伸长率 $\geq 18\%$ , 低温冲击值( $-20^\circ\text{C}$ ) $> 7\sim 9\text{J}/\text{cm}^2$ 。外观尺寸为直径2800mm的球形体, 主要壁厚为70~170mm, 铸件重量为10.5t, 处理铁液15t。由于该铸件工作中要保持动态平衡, 尺寸精度要求非常严格, 壁厚偏差要求为 $\pm 5\text{mm}$ 。由于其特殊的使用环境限制, 必须具有良好的力学性能。铸造时不允许用芯撑, 每件都需要进行超声波探伤, 无超标缩孔、疏松和裂纹等缺陷, 铸件应符合JB/T 9441—1988及GB/E 1348—1988技术标准。它属于高技术、高难度系列产品, 过去都是依赖进口, 在国内能生产的厂家很少, 而且废品率很高。

## 一、铸造工艺方案

由于该铸件上下开孔, 尺寸分别为 $\phi 800\text{mm}$ 和 $\phi 900\text{mm}$ , 平台宽220mm、厚170mm; 侧壁等份3个 $\phi 1840\text{mm}$ 孔, 平台宽185mm、厚175mm。

采用底口朝下底部注入铁液; 从铸件中部设计分型面, 两箱铸造。

(1) 主要铸造工艺参数 木型放尺为8/1000, 分型负数 $-2\text{mm}$ , 铸件在浇注位置下面、侧面的机械加工余量为 $+13\text{mm}$ , 上面为 $+15\text{mm}$ , 孔为 $+15\text{mm}$ , 砂芯间隙 $2\text{mm}$ 。

(2) 砂种及涂料 型砂采用呋喃冷硬树脂砂造型、制芯, 涂料为锆英粉醇基涂料。树脂砂强度约为 $1000\text{kPa}$  (24h)。

(3) 强冷措施 为了消除热节, 使其各部分均平衡凝

固, 在轮毂厚大部位设置石墨冷铁。

## 二、第一次试生产

冒口的尺寸为 $3-\phi 60\text{mm} \times 300\text{mm}$ , 冒口颈尺寸为 $\phi 40\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。采用半封闭底注式浇注系统, 各截面面积比为 $\Sigma F_{\text{内}} : \Sigma F_{\text{冒}} : \Sigma F_{\text{外}} = 1 : 1.4 : 1.2$ 。铁液采用20t中频炉熔炼; 孕育采用包内、随流、浮硅和瞬时多层次孕育方法; 瞬时孕育剂采用钡硅铁, 其余采用75SiFe; 化学成分控制在 $w_{\text{C}} = 3.3\% \sim 3.8\%$ 、 $w_{\text{Si}} = 2.2\% \sim 2.8\%$ 、 $w_{\text{Mn}} = 0.2\% \sim 0.3\%$ 、 $w_{\text{P}} \leq 0.07\%$ 、 $w_{\text{S}} \leq 0.02\%$ 、 $w_{\text{RE}} = 0.02\% \sim 0.04\%$ 、 $w_{\text{Mg}} = 0.04\% \sim 0.06\%$ ; 浇注时采用浇口塞装置, 浇注温度为 $1340 \sim 1370^\circ\text{C}$ , 浇注重量15t。浇注1件产品, 经超声波探伤不合格, 缺陷产生在 $\phi 2210\text{mm}$ 台内侧部位。

根据铸件的结构特点和生产试验的结果, 铸件产生缩松缺陷的深度为45mm左右, 为此我们改进了浇注系统和冷却条件。

## 三、改进后浇注系统及冒口设计

### 1. 浇注系统结构

针对轮毂的结构特征及生产经验, 经过认真分析决定采用大孔出流的浇注系统。该系统具有铁液流量大、快速平稳充满铸型, 铸型温度场温度均匀, 以及闭脏、闭气等功能。

浇注系统采用环形结构, 由浇口杯、直浇道、环形横浇道(开口)及底返内浇道(6个)所组成的浇注系统。

### 2. 大孔出流浇注系统计算

(1) 确定浇注系统的截面积比为 $\Sigma A_{\text{内}} : \Sigma A_{\text{冒}} : \Sigma A_{\text{外}}$

= 1.5 : 2 : 1。

(2) 选取直浇道、横浇道、内浇道流量系数为  $\mu_1 = \mu_2 = 0.60$ 、 $\mu_3 = 0.55$ ，计算有效截面积比  $K_1$ 、 $K_2$ 。

$$K_1 = \frac{\mu_1 \cdot \sum A_{直}}{\mu_2 \cdot \sum A_{横}} = 0.75$$

$$K_2 = \frac{\mu_1 \cdot \sum A_{直}}{\mu_3 \cdot \sum A_{内}} = 1.6364$$

(3) 计算平均压头  $h_p$  (底注)。

$$h_p = h_3 - \frac{P^2}{2C} = h_3 - \frac{C}{2} = \frac{K_2^2}{1 + K_1^2 + K_2^2} \cdot \left( H - \frac{C}{2} \right)$$

$$= (1.6364^2 / 1 + 0.75^2 + 1.6364^2) \times (327 - 280/2) \text{ cm}$$

$$= 118.1 \text{ cm}$$

式中  $h_p$ ——平均压头，cm；

$h_3$ ——底注内浇道实际流出压头，cm；

$H$ ——直浇道压头 (浇口杯高度 + 上砂箱高度)，cm；

$C$ ——铸件在铸型内高度，cm。

(4) 计算总浇注量  $G$ 、浇注时间  $t$ 。

浇注重量按 10 500kg 计算。

浇注时间计算：

$$t = S_2 \cdot \sqrt{G} = 1.9 \sqrt{10\ 500} \text{ s} = 195 \text{ s}，\text{修正为 } 90 \text{ s}。$$

式中  $t$ ——浇注时间，s；

$S_2$ ——系数；

$G$ ——铁液消耗总重量，kg。

(5) 计算节流截面积  $\sum A_{内}$ 。

$$\sum A_{内} = \frac{G}{0.31 \times \mu_3 \times t \times \sqrt{h_p}}$$

$$= \frac{10\ 500}{0.31 \times 0.55 \times 90 \sqrt{118.1}} = 63 \text{ cm}^2$$

设计内浇道尺寸为  $3 \times 2 - \phi 40 \text{ mm}$  陶瓷管。其实际截面积为  $75.36 \text{ cm}^2$

(6) 确定浇注系统各单元截面积。

直浇道： $\sum A_{直} = 1.5 \sum A_{内} = 1.5 \times 75.36 \text{ cm}^2 \approx 113 \text{ cm}^2$

横浇道： $\sum A_{横} = 2 \sum A_{内} = 2 \times 75.36 \text{ cm}^2 \approx 150.7 \text{ cm}^2$ ；

### 3. 冒口和冷铁的设计

根据生产的结果，对冒口和冷铁也进行改进。冒口尺寸加大为  $3 - \phi 60 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ ，冒口颈尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，以提高浇注系统的有效压力头；产生缺陷的  $\phi 2210 \text{ mm}$  台内侧部位的石墨冷铁改为铸铁冷铁，根据铸

件的壁厚选取冷铁厚/铸件厚 = 0.5。

### 4. 化学成分及力学性能控制

单铸试块，见表 1、表 2。

表 1 化学成分 (质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	RE	Mg
控制范围	3.3 ~ 3.8	2.2 ~ 2.8	≤0.30	≤0.05	≤0.02	0.02 ~ 0.04	0.04 ~ 0.06
						0.04	0.06
目标值	3.6	2.6	≤0.25	≤0.05	≤0.02	≤0.03	≤0.05

表 2 力学性能及金相组织

力学性能				金相组织	
$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ (%)	HBW (试块)	HBW (本体)	石墨大小 (级)	球化率 (级)
≥400	≥18	130 ~ 180	≥130	6	3

### 5. 熔炼及浇注工艺

(1) 设备 采用 20t 中频感应电炉熔炼铁液，配有炉前快速分析仪。

(2) 原材料 ①采用本溪专用球墨铸铁用生铁 Q10、Q12。②采用普通优质碳素钢。③球化剂采用 QRMg8RE5。④孕育剂采用 75SiFe、钡硅铁。⑤脱硫剂为  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  粉。

(3) 熔炼工艺 ①配料。生铁 70%、废钢 30%、球化剂 1.6%、孕育剂 1.2% (包内 0.5%、出铁槽孕育 0.4%、浮硅 0.2%、瞬时孕育 0.1%)。②铁液精炼。铁液升温到 1500 ~ 1510℃ 进行短时间精炼，以达到去气、去渣的目的。

(4) 处理温度 球化处理温度为 1420 ~ 1440℃。

(5) 浇注工艺 ①采用清洁完好的浇包，浇注前加强扒渣与覆盖。②严格控制出铁液与浇注的间隔时间 < 10min。③浇注温度为 1330 ~ 1340℃ (浇口杯内测量)。④采用具有闸门，浇口塞的专用浇口杯。浇注时待浇口杯内铁液上升至浇口杯内有效高度 2/3 时，立即提起浇口塞；铸型浇满后进行补浇，直至冒口内铁液不再回落为止。

### 四、生产效果

工艺改进后生产 9 件产品，经检测铸件尺寸精度、外观质量全部符合品质标准；经超声波探伤只有一件不合格。化学成分、力学性能及金相组织 (试块) 见表 3。

(下转第 67 页)

(1) 适应材质广 从原则上讲,消失模铸造技术适用于各种合金材质,从铸铁、铸钢、合金钢到各种非铁合金。但从消失模铸造技术实际应用的情况看,其适用性顺序依次为灰铸铁、普通碳素钢、球墨铸铁、低碳钢、合金钢与铝合金。之所以造成对各种材质的适应性不同,主要原因是泡沫塑料在浇注过程中的燃烧分解物对合金液的影响作用不同。例如由于分解物中固态碳的存在,球墨铸铁内部容易产生黑渣,铸件表面容易产生皱皮缺陷;对含碳量低的铸钢件,采用消失模铸造可能使铸件表皮出现增碳现象。而这些问题可以通过泡沫塑料模样材料的选择、涂料的选择及抽真空等许多工艺参数的调整,从而不同程度地加以解决。

(2) 铸件精度高 消失模铸造是一种近无余量、精确成形的新工艺,该工艺无需取模、无分型面、砂芯,因而铸件没有飞边、毛刺,并减少了由于型芯组合而造成的尺寸误差。消失模采用干砂充填紧实,靠干砂的流动充填模样的空腔形成铸件的内腔及孔。对于内腔复杂的铸件,可将泡沫塑料模样分成几片发泡成形,然后粘接成整体模样。因此,不会出现传统砂型铸造中因砂芯尺寸不准确或下芯位置不准确造成铸件壁厚不均。消失模铸造的铸件质量与金属型铸造的铸件质量非常接近,表面光滑,比砂型铸造的铸件表面粗糙度低,可达  $R_a = 3.2 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。铸件尺寸在铸造过程中只有很小变化,发泡成形机生产的模样,尺寸几乎无变化。铸件的起模斜度很小,一般  $0.5^\circ$  即可满足要求。铸件的尺寸精度高,比传统砂型铸造可提高 1~2 级别。铸件尺寸公差很小,其最小铸出孔直径铝合金可达到 4mm、铸铁可实现 6mm。加工余量为 1.5~2mm,可大大减少机械加工的费用,与传统砂型铸造方法相比,可减少 40%~50% 的机械加工时间。

(3) 结构设计灵活 为铸件结构设计提供了充分的

自由度,原先分为几个零件装配而成的结构,可以通过由几个泡沫塑料模片粘合后铸造而成。传统需要加工形成的孔洞可以不用砂芯而直接铸造出来,大大节约了机械加工和制芯成本。由几个模片组合能够制造高复杂程度的模样(例如水泵、气缸体等铸件)。对于采用树脂砂造型的消失模铸造,一般用于生产中大型铸件,可以从几十千克到几十吨。一般来讲,对于生产结构复杂的铸件,消失模铸造工艺比传统的砂型铸造具有明显的优越性,甚至于一些原来采用传统砂型铸造难于生产的结构复杂的铸件,恰恰可以用消失模铸造的方法来生产。对于传统的砂型铸造,铸件的结构越复杂,需要的砂芯越多,消失模铸造不存在与分型和起模有关的铸件结构工艺性的问题。因此,它相对于用木模造型的铸造方法来说,扩大了可铸造的铸件的形状结构范围,减少了在设计铸件时所受到的限制。

(4) 安全环保投资低 型砂中无化学粘结剂,低温下泡沫塑料对环境无害,浇注时它排放的有机物很少,而且排放时间短、地点集中,便于集中收集处理。消失模铸造采用干砂造型,大大减少铸件落砂、清理的工作量,以及车间的噪声和粉尘,旧砂的回收率高达 95% 以上。工人劳动强度低,模样质量轻;雨淋加砂时的粉尘可集中收集、除尘,同时干砂回收系统可大大简化,没有化学粘结剂的加入,对人体健康危害小。由于模具主要用于制作泡沫模样,因此模具寿命长,比传统铸造模具损耗小、成本低。另外,由于铸件壁厚的减小,可以节约投资成本,例如某铝合金发动机缸体采用砂型铸造时的重量为 15kg,而用消失模生产只有 11kg;需要的生产工人数量减少,模样和铸件生产都可以实现自动化,彻底改变了传统铸造“苦、脏、累”的形象。MW

(待续) (20090221)

(上接第 63 页)

表 3 铸件化学成分、力学性能和金相组织检验结果

化学成分 (质量分数,%)							力学性能				金相组织	
C	Si	Mn	P	S	RE	Mg	$\sigma_s/\text{MPa}$	$\delta$ (%)	HBW (试块)	HBW (本体)	石墨大小 (级)	球化率 (级)
3.56	2.61	0.30	0.042	0.016	0.028	0.045	425	18.6	162	141	6	2
3.61	2.68	0.29	0.050	0.014	0.031	0.042	411	19.2	168	149	6	2

### 五、结语

应用大孔出流理论计算高难球墨铸铁件浇注系统,可防止铸件产生夹砂、缩孔、气孔等缺陷。

采用感应电炉精炼铁液,优化原材料,强化孕育,以及强制冷却是获得高韧性球墨铸铁件的有效措施。MW

(20090210)