● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.019

风电电机端盖低温球墨铸铁件消失模铸造技术

邓宏运[1],王春景[2]
(1.西安华清科教产业集团有限公司,陕西 西安 710043; 2.西安工业大学,陕西 西安 710021)

摘　要:介绍了低温高韧性球墨铸铁电机端盖的消失模铸造工艺。低温球墨铸铁电机端盖模样采用 EPS 板材加工而成,EPS 板材的密度 18 g/dm^3,从泡沫模样的涂料涂刷与烘干,装箱造型等关键工艺控制变形;分析了消失模铸造生产低温球铁的原材料、化学成分选择、球化处理、孕育处理等工艺过程。结果表明,消失模铸造低温高韧性球墨铸铁电机端盖铸件力学性能、材质达到了同类产品先进的技术水平,电机端盖低温高韧度球墨铸铁件表面质量好,没有夹渣、加砂、冷隔、变形等缺陷,可批量生产。

关键词:球墨铸铁;低温冲击性能;消失模铸造

中图分类号: TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0075-04

Lost Foam Casting Technology for Low Temperature Nodular Cast Iron of Wind Power Motor End Cover

DENG Hongyun[1], WANG Chunjing[2]
(1.Xi'an Huaqing Science and Education Industry Group Co., Ltd., Xi' an 710043, China; 2. Xi' an Technological University, Xi' an 710021, China)

Abstract: The lost foam casting process of motor end cover with low temperature and high toughness ductile iron was introduced. Low-temperature nodular iron motor end cover shape was processed by EPS plate, the density of EPS plate is 18 g/dm^3, and deformation was controlled by key technologies such as foam shape coating, drying and packing molding. The raw materials, chemical composition selection, spheroidization treatment and inoculation treatment of low temperature ductile iron produced by lost foam casting process were analyzed. The results show that the mechanical properties and materials of motor end cover casting of lost foam casting process with low temperature and high toughness ductile iron have reached the advanced technical level of similar products. Motor end cover low temperature high toughness ductile iron has nice surface quality, no slag, sand, cold insulation, deformation and other defects, and it can be mass production.

Key words: Nodular cast iron; Low Temperature Impact Resistance; Lost Foam Casting

风电的关键设备风力发电铸件是高韧性的球墨铸铁件。风电设备在自然环境下服役,在 -40 ℃低温下工作时,容易产生脆性断裂,维修成本大,所以电机端盖、电机壳体、轮毂、底座等铸件采用低温高韧性球墨铸铁。球墨铸铁有较好的综合性能,相对于铸钢件成型工艺性好,生产成本较低。风电设备球墨铸造铁件牌号一般为 GB/T1348—2009 球墨铸铁 QT400-18AL,低温冲击值高于 12 J/cm^2(-20 ℃),或欧洲标准 EN-GJS-400-18U-LT。风电铸件按国家标准验收,铸件端面加工后做超声波探伤检验,不许有影响铸造件强度的缩松、裂纹、砂眼等缺陷。风电设备球墨铸造铁件国内外多采用树脂砂铸造,目前尚未见到消失模铸造风电设备球墨铸造铁件的报道。本文介绍低温高韧性球墨铸铁电机端盖的消失模铸造生产过程。

1　端盖铸造工艺分析

1.1　消失模铸造工艺方案

端盖是风力发电机上重要的球墨铸铁件,为 QT400-18AL,前端盖铸件重 216 kg,后端盖铸件重 226 kg,轮廓尺寸为 ϕ1 148 mm×72 mm,平均壁厚 28 mm,铸件整体壁厚均匀。铸件有尺寸公差,件重公差要求,表面粗糙度 Ra50 μm。

GB/T1348—2009 球墨铸铁标准中 QT400-18AL 牌号力学性能见表 1,低温冲击韧度按欧洲标准 EN-400-18U-LT 达到 12 J/cm^2(-20 ℃)。球墨铸铁较高的冲击韧度、伸长率,较低的脆-韧性转变温度,明显高于普通球铁生产技术。从金相组织上要求

收稿日期:2018-09-04
作者简介:邓宏运(1963-),陕西礼泉人,高级工程师.主要从事铸造技术及管理工作.电话:13992391930,E-mail:563470260@qq.com

表1 GB/T1348-2009球墨铸铁力学性能
Tab.1 Mechanical properties of GB/1348-2009 ductile iron

材料牌号	壁厚 /mm	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)
QT400-18AL	$t\leqslant30$	≥380	≥240	≥18
	$30<t\leqslant60$	≥370	≥230	≥15
	$60<t\leqslant200$	≥360	≥220	≥12

基体组织为铁素体,球状石墨圆整、细小、分布均匀,不能含有渗碳体和磷共晶。因此,应当从严格控制铸件的化学成分,如原材料、球化剂,采用合理的球化工艺和孕育工艺,达到高的球化率和石墨球数。

端盖3种铸造工艺方案如图1,壁厚部位用腰形压边冒口实现液态补缩。按球铁生产工艺和铸件形状设计浇注系统[4]:①圆形端盖用随形横浇道,多内浇道,铁液快速平稳充满铸型,保证散热筋轮廓清晰;②横浇道、浇口杯有撇渣功能;③有较高的压头,保证筋轮廓清晰。

由于立铸阶梯浇注工艺在装箱过程很容易引起变形,对于这样大的平盘件,操作工人很难控制,综合分析认为弊大于利,没有采用。综合图1(b)与(c)优缺点,通过计算机数值模拟,可以在生产之前预知铸件充型凝固的整个过程,并可以预测铸造缺陷的产生部位。便可根据预测结果采取相应工艺改进措施,避免在生产中产生铸造缺陷,提高铸件的内部质量,从而达到缩短铸件试制周期、降低生产成本及提高材料利用率的最终目的。采用ProCAST软件对风电电机端盖铸件进行了铸造工艺数值模拟,根据凝固过程模拟结果对铸造工艺进行了优化改进。下平面加工余量6 mm,上平面加工余量6 mm,综合分析优化后工艺见图2。

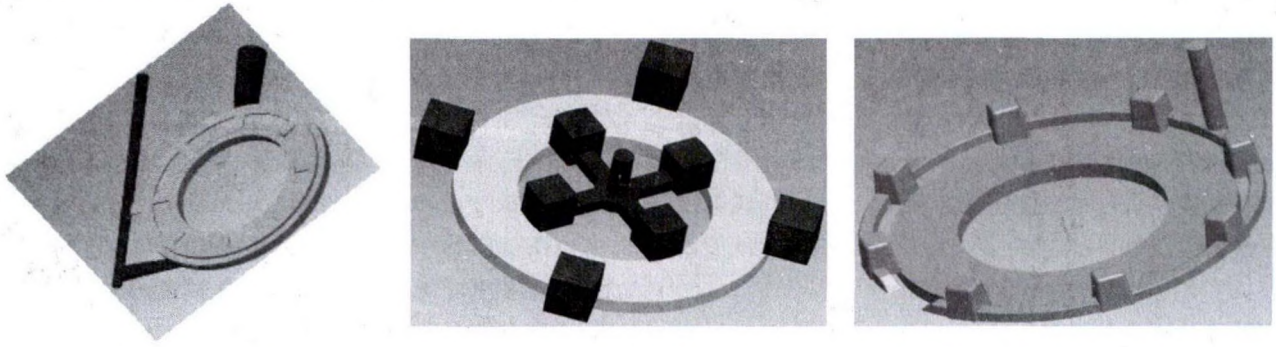
1.2 消失模铸造工艺

(1)前后端盖泡沫模样　前后端盖泡沫模采用EPS板材加工而成,EPS板材的密度18 kg/m^3。浇冒系统选用同样密度的EPS板材,端盖及浇冒系统模样按工艺尺寸切割打磨后,按工艺图要求组合。为了保证筋轮廓清晰,在上箱设置大量的4 mm×120 mm×100 mm排气孔,否则筋有不被充满的可能。图2前后端盖优化后铸造工艺

(2)端盖泡沫模样的涂料涂刷与烘干　采用专门研制的消失模铸造专用石英粉特种复合水基涂料,成本特别低,严格的混制工艺适合较高的浇注温度,铸件冷却后剥离性好。第一遍涂料波美度在1.6,烘干时间不低于12 h,第二及第三遍徐料波美度在1.7~1.8,烘干时间不低于20 h,两遍涂料总厚度在1.2~1.5 mm即可。整个徐料操作过程模型保持直立方式,转动时受力点为直浇道及底部三角支撑架端点,烘干房温度设置为50 ℃,湿度18%,烘干过程进行间断性测量黄模模重,间隔时间不低于4 h模重不变化即表示烘干,修补后放置时间不低于8 h才可埋箱浇注。待浇注的模型应单独放置,决不可与刚刷涂的模型放在1个烘干房,防止吸潮。浸涂前尽可能提前将干稠的涂料刷在比较窄小的散热片中和拐角地方,或浸涂干燥后再补刷该处防止粘砂。在搬运中要检查涂料的开裂和露白[1]。

(3)装箱造型　烘干后的黄模在装箱前一直存放于烘干房内不间断的烘干,随装箱随拿。底砂厚150 mm,刮平后震动,砂箱底部放砂不可过多过高、否则将造成气化不完善、抽气力缓慢负压不真实、轻则冷隔局部溃散,重则垮箱[2]。布袋放砂时不可速度过猛和局部堆积过多,否则将会冲击力过大产生变型、震动时间不可过短否则将造成砂子松软局部粘砂。浇口杯脖子要做硬化处理防止浇口杯下方涨粗和冲砂。放置黄模加砂至浇口杯位置后进行震动,覆盖薄膜及覆盖砂,对浇口杯进行处理,确保浇注过程砂子不进溅进入浇注系统[3]。

铸件化学成分相同的情况下,金相组织与共析阶段的冷却速度有关。铸件在铸型中的冷却速度愈慢,基体组织中铁素体含量愈高。当铸件吃砂量越



(a)立铸阶梯浇注　(b)平铸内浇道从中心4道引入　(c)平铸内浇道从外沿8道引入

图1 前后端盖铸造工艺方案
Fig.1 Casting process scheme of front and rear end caps

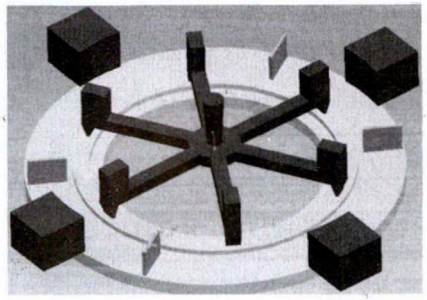


图 2 前后端盖优化后铸造工艺
Fig.2 Casting process after optimization of front and rear end caps

大，浇注温度越高，砂型保温性能越好，开箱时间越长，铸件在型砂中冷却速度就越慢，转变的铁素体组织越多。

2 风电端盖低温高韧性球墨铸铁熔炼质量控制

2.1 原材料的控制

(1)生铁　选择本溪或林州的优质 Q10、Q12 专用球铁生铁是生产低温球墨铸铁的必要条件，其中硅、锰、硫、磷含量要低，牌号越小越低，锰越低越好，一般要求 Mn<0.2%，P<0.06，S<0.02%。对球铁冲击值非常敏感的微量元素，如钨、锑、钒等要严格控制。

(2)废钢　选用普通碳素钢，无氧化皮，成分稳定。Mn 含量要低，不大于 0.3%。

(3)球化剂　镁是球铁的主要球化元素，镁与铁液中的氧、硫等元素化合，起到球化作用。镁含量少了造成球化不良，多了容易形成石墨球畸形，氧化夹杂物(MgO)。稀土起辅助球化作用，$RE_{残}$过高时会恶化石墨形状。选择低镁低稀土铁素体型钇基稀土球化剂 DQT，稀土和镁的残留量要控制在 $RE_{残}$ 0.03%～0.04%，$Mg_{残}$ 0.04%～0.05%。

(4)孕育剂　采用铁素体型球铁专用长效孕育剂。两次孕育处理后，石墨球细小、圆整、均布、球化等级高。用量比 FeSi75 减少 30%～50%，石墨化能力提高 3 倍，相应地可减少 FeSi75 的加入量，降低铁液的增硅量，因为球化剂和孕育剂增硅量可达到 1.1%以上。

2.2 化学成分控制

(1)碳　据铸件壁厚与造型方法，C 含量控制在 3.6%～3.9%，既有较好的石墨化能力，又不产生石墨粗大，漂浮现象。

(2)硅　Si 是强烈促进石墨化的元素，同时降低低温冲击韧度。当 Si 含量大于 2.4%时球墨铸铁 -20 ℃冲击值很难超过 10 J/cm^2，一般将 Si 控制在 2.2%～2.4%范围。

(3)锰　Mn 在铁素体球铁凝固过程中，容易在共晶边界上产生偏析，形成碳化物，增加珠光体量，对韧性有不利影响。生产中尽量选择低锰生铁，锰含量不得大于 0.2%，越低越好。

(4)磷　P 在铸铁中溶解度较低，当 P 大于 0.05%时，在球铁凝固过程中二元磷共晶或三元磷共晶。磷共晶在晶界分布，质硬，恶化了力学性能，降低了低温球铁的冲击韧度。生产中应尽量限制 P。共晶团边界形成的磷共晶容易成为珠光体的核心，从而促进晶界形成珠光体，降低球铁的塑韧性，因而其含量也是越低越好。

(5)硫　硫与镁、稀土亲和力强，消耗球化剂，造成球化反应不稳定，形成外来夹杂物 MgS、RES，控制在 S<0.025%。

(6)Ni　为了提高铸件的低温韧性，应添加适量的 Ni，w(Ni)0.5%～1.0%

根据分析，端盖合理的化学成分 w(%)为：3.65～3.9 C，2.1～2.4 Si，Mn<0.2，S<0.025，P<0.04，0.03～0.04 $RE_{残}$，0.04～0.05 $Mg_{残}$。0.3～0.6 Ni。

2.3 熔炼工艺控制

采用中频电炉熔炼可获得优质的铁液。只有铁液化学成分稳定，提高石墨球数，获得铁素体基体组织，石墨球数达到 120～180 个 /mm^2，球化率大于 92%以上，铸件伸长率、低温冲击值才能稳定。

原材料配比。生铁加入量 70%左右，废钢加入量 5%～8%，回炉料 20%以上，硅铁 0.5%～0.8%，熔炼时采用石墨增碳。C 熔点高，首先加入炉底，靠扩散溶解的方式进入铁液，在铁液中形成大量的[C]微晶，是共晶或共析石墨的外来形核基底，有利于细化晶粒，增加石墨球数。熔炼时为防止 Mn 过高，用 FeSi75 脱氧，如果脱氧不充分，铁液会强烈翻腾，碳烧损变大；如果 FeSi75 用量过多会增加硅的含量。生铁、废铁、回炉料要稳定。

原铁液化学成分 w (%) 为：3.65～3.9 C，1.1～1.3 Si，Mn<0.2，0.4～0.5 Ni，S<0.03%，P<0.05%。

2.4 球化处理与孕育处理

选用低镁低稀土球化剂，成分为 5%～7% Mg，1.5%～2.5% RE，MgO<1.0%，组织致密均匀，化学成分稳定，粒度 3～10 mm。

球化处理采用堤坝冲入法，出铁液温度控制在 1 480～1 500 ℃，球化剂加入量为出铁液重的 1.2%～1.45%。为了达到好的球化孕育效果，球化剂孕育剂要预先烘烤，在出铁液前放入堤坝内，覆盖一层铁屑或珍珠岩。

孕育处理是低温球墨铸铁生产的关键，孕育的效果决定了石墨球的直径、石墨球的圆整度，因此孕育处理分两次进行。①包内孕育：球化剂加入后，在其表面覆盖 3～6 mm 的硅钡孕育剂，加入量为 0.65%；②随流孕育：采用 Si-Ca-Ba-Bi 孕育剂，粒度为 0.2～0.8 mm，加入量为 0.25%。

2.5 浇注工艺控制

浇注温度控制在 1 400～1 430 ℃，浇注温度太低，或断流会引起铸件上面筋不清晰或充填不满。浇注时应采取快速、平稳注入原则，注意及时挡渣操作。

3 热处理工艺

由于铸件存在不均衡凝固，铸态组织中可能会存在渗碳体和磷共晶，铁素体晶界存在珠光体，为了保证铸件基体中铁素体含量达到 95%以上，采用高温铁素体化退火工艺处理[5]。热处理工艺为加热到 910～940 ℃保温 2～5 h，使碳化物分解溶入奥氏体中，再冷却到 720～740 ℃保温 3～6 h，然后随炉冷却到 580 ℃之后可以空冷，铸件室温组织为石墨球+铁素体。可以消除碳化物，增加铁素体含量，提高铸件伸长率和冲击韧度。

4 生产结果

采用上述铸造工艺生产的电机端盖加工后尺寸和件重符合要求，加工端面 100%超声波探伤检验合格，没有发现缩松、裂纹、砂眼等缺陷。QT400-10AL 球铁化学成分 w(%)为：3.6 C，2.3 Si，0.15 Mn，0.025 S，0.04 P，$RE_{残}$=0.034，$Mg_{残}$=0.038 时，金相组织完全达到国家规定的标准，伸长率稳定在 20%以上，低温冲击值高于 12 J/cm^2(-20 ℃)，如表 2。

表2 电机端盖附铸试棒金相组织和力学性能

Tab.2 Microstructure and mechanical properties of the casting bar attached to the motor end cap

编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	-20 ℃低温冲击功 /J	硬度(HB)	球化等级	铁素体数(%)
1	420	270	21	16	155	2~3	95
2	416	250	26	19	145	2	97
3	424	280	22	18	150	2	95

5 结束语

消失模铸造电机端盖低温高韧度球墨铸铁件，选用采用 EPS 板材加工而成，EPS 板材的密度 18 g/dm^3，电机端盖低温高韧度球墨铸铁件表面质量好，没有夹渣、加砂、冷隔、变形等缺陷，消失模电机端盖类低温高韧度球墨铸铁件时，原材料选用本溪或林州的优质 Q10、Q12 专用球铁生铁，严格控制硅、锰、硫、磷含量，合理的化学成分 w(%)为：3.65~3.9 C，2.1~2.4 Si，Mn<0.2，S<0.025，P<0.04，0.03~0.04 $RE_{残}$，0.04~0.05 $Mg_{残}$，0.3～0.6 Ni，基体金相组织为全铁素体，不能含有渗碳体和磷共晶，采用低镁低稀土铁素体球化剂，合理的球化工艺、孕育工艺，获得高的球化率、细小分散的石墨球，有利于提高球墨铸铁的伸长率、低温冲击值，生产合格的铸件。

参考文献：

[1] 邓宏运，王春景，阴世何，等. 消失模铸造及实型铸造技术手册[M]. 北京：机械工业出版社，2013.

[2] 章舟，王春景，邓宏运，等. 消失模铸造生产实用手册[M]. 北京：化学工业出版社，2011.

[3] 崔春芳，邓宏运，赵琦. 消失模铸造技术及应用实例[M]. 北京：机械工业出版社，2007.

[4] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[5] 张锡联. 风力发电机电机端盖低温球墨铸铁件的生产 [J]. 中国铸造装备与技术，2013(4)：36-38.

(上接第 74 页)

[3] Akbarzadeha Y, Rezaei M, Babaluoa A A, et al. Microstructure, permeability and rheological behavior of lost foam refractory coatings, Surface & Coatings Technology[J], 2008, (202) :4636-4643.

[4] Kannan P, Biernacki J J, Visco D P, et al. A review of physical and kinetic models of thermal degradation of expanded polystyrene foam and their application to the lost foam casting process. Appl. Pyrolysis[J], 2007, (78):162-167.

[5] M. Abdelrahman, J. P. Arulanantham, R. Dinwiddie, G. et al. Monitoring metal-fill in a lost foam casting process. ISA Transactions [J] ,2006 , (45):459-475.

[6] P. M. Geffroya, M. LakehalJ. Goni, E. Beaugnonb, et al.Thermal and mechanical behaviour of grey cast iron and ductile iron castings using magnetic molding and lost foam processes.Journal of Materials Processing Technology[J], 2009, (209):4103-4111.