

# 风电球墨铸铁行星架铸造工艺研究

魏冬冬, 徐贵宝, 张 军, 汪 义, 查明晖

(中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

**摘要:** 对风电球墨铸铁行星架的铸造工艺进行了系统的研究, 并利用Magma数值模拟软件进行了工艺优化。针对行星架的结构特点和技术要求, 浇注系统采用底注多内浇道进铁液。在工艺上, 将冒口与冷铁相结合, 严格控制化学成分, 采用多次孕育, 选取钇基重稀土球化剂, 适当降低浇注温度, 可有效改善铸态组织, 提高铸件致密度和材质性能。正火时应特别注意冷却方式, 以保证珠光体含量, 从而提高铸件力学性能。

**关键词:** 球墨铸铁; 数值模拟; 工艺优化; 热处理; 铸件本体性能

风电齿轮箱是风力发电机组中一个重要的机械部件, 而行星架作为齿轮箱内的传动部件, 将直接承受并传递巨大的动载荷和静载荷, 作用十分关键。风电球墨铸铁行星架的材质为EN-GJS-700-2U, 关键壁厚 > 100 mm, 属于厚大断面球墨铸铁件。铸件具有冷却速度缓慢和凝固时间冗长的特点, 易产生球化衰退、石墨畸变、石墨漂浮等缺陷, 且铸态下难以获得较高珠光体含量的组织<sup>[1]</sup>。

由于行星架的作用至关重要, 同时铸造上难度很大, 因此对铸件的内部和表面质量要求都非常严格, 需要同时做UT(超声波无损探伤)和MT(表面磁粉探伤)检测。铸件MT检测关键部位需达到EN 1369中规定的2级要求; 铸件整体UT检测, 客户接口部位达到EN12680-3中规定的1级要求, 关键部位满足2级要求, 其他部位达到3级要求。本文以2 MW风电球墨铸铁行星架为对象, 利用Magma模拟软件制定和优化铸造工艺, 并采取合理的熔炼及热处理工艺, 使得铸件本体金相达到球化率2级、石墨大小5级以及大于75%的珠光体含量, 本体与附铸试块力学性能均达到 $R_m \geq 650$  MPa、 $R_{p0.2} \geq 370$  MPa、 $A \geq 1\%$ , 无损检测结果满足技术要求。

## 1 工艺分析

行星架毛坯净重3 260 kg, 其结构示意图如图1所示。铸件总高度1 314 mm, 辅板直径1 340 mm, 壁厚80 mm, 立柱壁厚55 mm, 长轴具有一定斜度, 壁厚在100 mm至120 mm之间。长轴根部与下辅板连接处壁厚最大, 属于热节重叠区域。长轴、短轴、销孔和立柱根部区域都属于表面磁粉探伤和超声波无损探伤要求较高的重要部位。

球墨铸铁具有较大的氧化倾向, 为保证铁液平稳充型、防止湍流, 减少渣类、气孔类缺陷, 风电大型铸件一般都采用底注多内浇道、半封闭浇注系统, 同时通过放置过滤网来阻挡夹杂进入型腔<sup>[2]</sup>。另外, 行星架铸件模数虽然大于2.5 cm, 在理论上通过保证树脂砂砂型强度, 加强铁液的随流孕育等措施, 可达到无冒口甚至无冷铁铸造, 但鉴于铁液中加入了Mn等合金元素增大了铁液的收缩性, 且为保留一定的工艺安全系数, 仍应采用冒口结合冷铁的工艺方案。

## 2 工艺(方案)设计

采用呋喃树脂砂, 为便于造型, 提高效率, 省去上下辅板之间的砂芯, 采用三

作者简介:

魏冬冬(1986-), 男, 硕士, 研究方向铸铁材料及工艺。

E-mail: w1050921@163.com

中图分类号: TG255

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

10-1233-06

收稿日期:

2021-06-21 收到初稿,

2021-08-02 收到修订稿。

开箱造型,分型方式如图2所示。

## 2.1 铸造工艺设计

浇冒口系统工艺设计示意图见图3所示。

(1) 浇注位置: 为保证最关键部位长轴的材料致密度,同时使得内浇道前方有足够的充型空间,减少与砂型的碰撞,保证铁液充型平稳,将长轴置于下型,金属液通过内浇道从长轴端底部注入。

(2) 冒口、冷铁工艺: 行星架热节主要集中在长轴根部与下辅板连接处、短轴与上辅板连接处、立柱

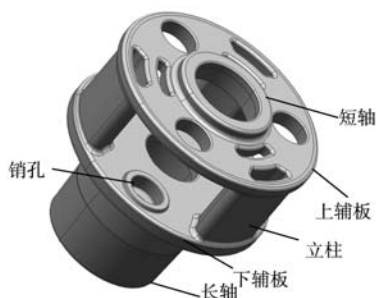


图1 行星架结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of planet carrier

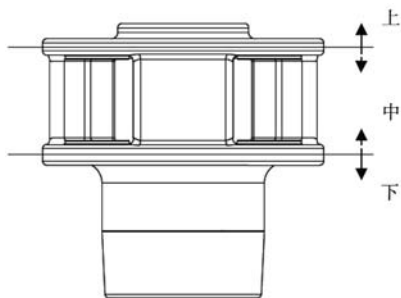


图2 行星架分型面工艺设计

Fig. 2 The design of parting faces for planet carrier

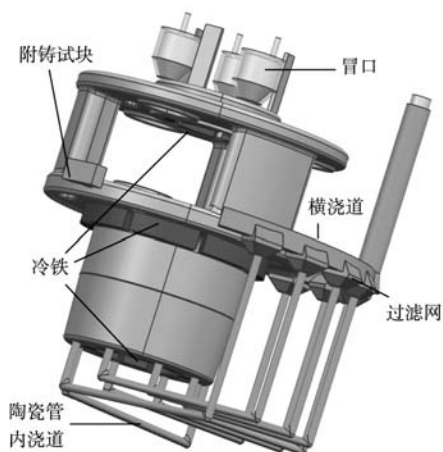


图3 行星架铸造工艺示意图

Fig. 3 The casting process diagram of planet carrier

与上下辅板连接处,但受制于空间因素,有些部位不适宜安放冒口。于是在设计工艺时,以冷铁为主,配合少数冒口为主要工艺设计思路。短轴顶端设置三个缩颈式发热冒口,一方面增加了静压头,有利于对铸件进行液态补缩;另一方面可以溢流,收集部分前期的冷、脏铁液。

针对厚大球墨铸铁件的铸造,冷铁的使用非常关键,不仅可以加强冷铁附近区域铸件的冷却,改善金相组织,防止石墨衰退,另外在充型时,不断降低相接触铁液的温度,让铁液液态收缩提前,从而得到浇注系统的及时补缩,尽量减小铸件在浇注系统凝固后的收缩量。根据行星架的结构特点,在轴承孔、销孔、长轴根部与下辅板连接处等关键部位和热节处采用冷铁工艺。

(3) 浇注系统: 采用球墨铸铁四单元大孔出流设计原则<sup>[1]</sup>。浇注重量(GC)大约为3 900 kg,最终选取的浇注系统各单元截面比例约为 $A_{直}:A_{横}:A_{内}=1.1:1.5:1$ ,内浇道总截面面积为 $100.48\text{ cm}^2$ (8道 $\Phi 40\text{ mm}$ 的陶瓷内浇道),用以保证铁液大流量、平稳充型。在内浇道前方设置浇口窝和过滤网,可以减缓铁液充型速度,具有一定的挡渣效果。

## 2.2 熔炼工艺设计

### 2.2.1 化学成分

碳当量对厚大断面珠光体球墨铸铁的石墨形貌和铸件性能影响较大,碳当量越高,越易产生石墨畸变和石墨漂浮等缺陷,但过低会降低铁液流动性,并减小石墨化膨胀,导致缩孔缩松等缺陷。另外对于厚大断面珠光体球墨铸铁,Si是一种极为敏感的元素,高Si有利于高的球化率;而低Si可抑制石墨漂浮和碎块状石墨,促进基体的珠光体化。针对行星架铸件,化学成分应遵循高碳、低硅原则,取碳当量 $CE_{4.2}\sim 4.3$ ,其中硅含量为 $2.0\%\sim 2.2\%$ 。

锰是碳化物形成元素,促进白口形成。对于厚大断面珠光体球墨铸铁来说,不宜采用提高锰含量来增加珠光体含量以及提高力学性能,并且由于行星架中必定要加入Cu元素,以增加珠光体含量,提高球墨铸铁的强度和硬度,且后期铸件还要进行正火热处理,因此应把Mn含量控制在 $0.5\%$ 以下。铜是中等石墨化元素,显著稳定和细化珠光体,且不形成游离碳化物,能显著改善铸件断面性能均匀性。在工业生产中,采用铜作为合金化元素生产珠光体球墨铸铁可实现稳定生产,因此行星架铸件Cu含量建议控制在 $0.5\%\sim 0.6\%$ 。

镁是球墨铸铁中最主要的球化元素。对于一般的球墨铸铁件, $0.025\%\sim 0.04\%$ 的残余镁含量能基本满

足石墨球化的需求。但随凝固时间的延长,铁液中镁含量会逐渐降低。对于厚大断面珠光体球墨铸铁件,凝固时间较长,残余镁含量宜控制在0.04%~0.06%之间。合适的稀土可增加石墨球数量,提高铁液的抗衰退能力,但过多的稀土元素会恶化石墨形态,甚至引起碎块状石墨等缺陷出现,建议稀土含量控制在0.02%~0.03%之间。

原铁液的化学成分,建议控制:C为3.5%~3.8%、Si为1.2%~1.4%、Mn≤0.5%、P≤0.05%、S≤0.015%、Cu为0.5%~0.6%。

### 2.2.2 球化孕育

球化孕育对球墨铸铁的性能具有显著的影响,对于厚大球墨铸铁件的球化孕育处理,有着更加严格的要求。针对厚大球墨铸铁件,目前国内外采用的球化剂有纯镁、钇基重稀土镁、轻稀土镁等。重稀土镁比轻稀土镁脱硫能力强,石墨球圆整、抗衰退能力强。在孕育方面,应选用高效、长效、粗颗粒和团状的孕育剂,并采用多次孕育方式。

对于行星架铸件,采用冲入法球化和小剂量多次孕育处理。球化剂选用钇基重稀土球化剂(成分为:45%Si、5.5%~6.2% Mg、0.8%~1.2%RE,其余为Fe),加入量1.15%~1.25%,采用含Ba高效孕育剂(成分为:72%Si、2%~3% Ba、少量的Ca、Al,其余为Fe),加入量0.6%,浇注随流孕育量为0.15%。

### 2.2.3 熔炼浇注

尽量降低铁液浇注温度,能缩短厚大球铁件凝固时间,改善其石墨形态。在实际生产中,为了获得较低的浇注温度而又不致于加长铁液保持时间引起孕育衰退,可采用倒包等措施使铁液快速降温。

应将行星架的熔炼温度控制在1 500~1 550℃之间,消除原材料遗传性的影响,并能净化铁液,出炉温度控制在1 460~1 490℃。为缩短凝固时间,同时减小液态收缩,可适当降低浇注温度,但过低的浇注温度不利于铁液中的夹渣和气体等上浮,造成MT不合格,甚至形成冷隔,因此综合考虑将浇注温度定为1 340~1 360℃。

## 2.3 热处理工艺

对于厚大珠光体球墨铸铁件,即使提前开箱,由于铸件冷却非常慢,珠光体含量根本达不到预期要求,因此想在铸态下达到技术要求难度较大。目前,大部分厂家都是先在铸态下达到QT500的性能,后经过正火热处理达到QT700的性能指标,并且通过回火消除铸件的残余应力。

因此,对于球铁行星架这种风电关键零部件,热处理的各个参数控制就显得格外重要,其中加强铸件的冷却速度尤为关键。若铸件在正火出炉后冷却速度不够,铸件的性能不但不会提高,反而会因形成较多的铁素体而降低性能。行星架热处理设定的具体工艺参数为:900~920℃保温5~8 h,出炉风冷至550℃,后空冷,随后560~570℃保温4~6 h,后炉冷至小于150℃后出炉空冷。值得注意的是,长轴内圆散热条件显然差于其他部位,为保证铸件性能均匀性,应对长轴内圆部位采取特别强制风冷。若大批量生产,热处理过程中将出现一炉多件,此时甚至需要采取雾冷的方式处理。

## 3 铸造工艺数值模拟及优化

### 3.1 原工艺方案模拟分析

采用Magma软件对原始铸造工艺进行充型和凝固模拟。模拟结果如图4所示。铁液在进入型腔后,充型路径顺畅,铁液进流速度小于2 m/s,充型平稳,无明显飞溅现象<sup>[4]</sup>。在凝固时间到46 min时,可明显看出长轴根部圆角处液相开始分离。在凝固末期(67 min)时,立柱根部均出现较大面积孤立液相,尤其是在与下辅板交接区域。采用Magma软件的Porosity判据功能进行判断,与凝固模拟结果相对应,最后凝固的区域都会形成缩松缺陷,在长轴根部内外圆与冷铁交接处最为严重,其他关键部位如短轴和销孔均无缩松缺陷显示,具体如图4c所示。

### 3.2 工艺改进措施

由于三个立柱与辅板交接处是行星架在运行过程中的疲劳热点,内在质量要求严格,为了消除此部位的缩松缺陷,拟采用随型冷铁加强凝固时的冷却速度。针对长轴根部的缩松缺陷形成原因,分析认为,长轴根部与下辅板连接处属于热节重叠区域,该热节处于型腔的中心部位,散热条件极差,因此该区域的温度场对于冷铁的布置非常敏感。若冷铁尺寸偏小,激冷作用不够,就无法消除缺陷,如果冷铁激冷作用偏大又会切断补缩通道,最终在长轴段离冷铁不远的地方留下聚集的缩松缺陷,而且缺陷部位和大小还会随着冷铁的大小和摆放位置而不断变化。为保证长轴早于长轴与下辅板的交接处凝固,彻底消除该区域的缩松,增加铸造工艺的保险系数,对此区域的冷铁工艺进行了优化。通过在长轴外圆面从根部到顶部也放置一整圈冷铁,以保证长轴早于长轴根部与下辅板交接处凝固。同时,在下辅板平面上均匀地布置一整圈冷铁,将长轴根部会被冷铁“赶”至辅板上的热节进行分散,将缩孔或缩松缺陷分散成细小的缩松,甚至

于消除。

### 3.3 优化工艺的模拟结果

采用Magma软件对优化后的铸造工艺进行模拟,图5为模拟结果。由图可以看出,优化的工艺使得长轴率先凝固,凝固至21 min时,长轴已基本成为固态相,与下辅板的液态补缩通道一直保持通畅。当凝固至后期(55 min)时,立柱的孤立液相区转移至立柱中间非疲劳热点部位,长轴的孤立液相区也转移至下辅板内部要求较低的区域。同时,由缩松模拟结果也可以看出,关键区域的缩松缺陷显示都已消失,细小的缩松缺陷已转移至其他非关键区域,如图5c中椭圆所示的立柱中间部位和下辅板区域。此外,工艺优化后,铸件的凝固时间明显缩短,减少了球化孕育衰退的风险,缩松缺陷的面积和程度也相应降低,有利于铸件性能的保证。

## 4 生产验证

按照优化后的铸造工艺进行试制,除进行各项常规检测外,并对首件产品进行本体性能检测,以确定

铸件的力学性能是否达到设计使用要求,取样位置如图6所示。取样区域为行星架关键部位,且属于热节较大区域,冷却条件差,易产生缺陷,热处理难度大,具有一定的代表性,从外至内取4根拉伸试棒,依次标记为A、B、C、D。

试验结果显示,铸件超声波和表面磁粉检测满足技术要求。附铸试块的性能达到技术要求,各项指标余量都较大,本体性能也满足预期要求,具体如表1所示。其中,附铸试块由于热处理时冷却条件始终好于铸件本体,其形成的珠光体含量高于铸件本体,且更细小,因此各项性能均高于铸件本体。

对首件和小批量试制3件经铸造、机加工验证,并通过工艺过程评定后,最终对其铸造工艺进行固化。按照固化的工艺组织生产,批量生产1 000余件,成品率达到98%以上。

## 5 结论

(1) 对于风电球墨铸铁行星架铸件,合适的化学成分为碳当量CE4.2~4.3、硅2.0%~2.2%、铜0.5%~0.6%、锰≤0.5%,残余镁含量宜控制在

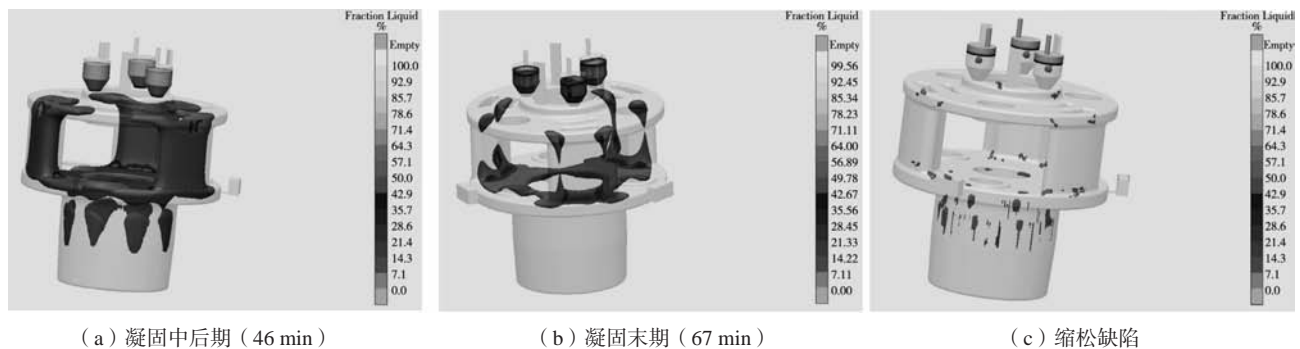


图4 行星架凝固、缩松数值模拟结果

Fig. 4 The numerical simulation results of solidification process and porosity defects for planet carrier

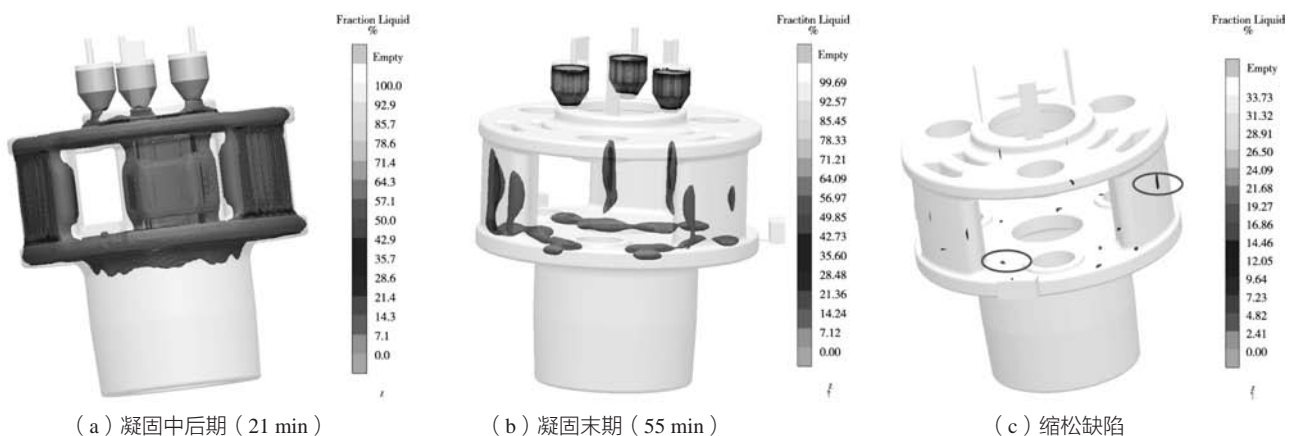


图5 工艺优化后行星架凝固、缩松数值模拟结果

Fig. 5 The numerical simulation results of solidification process and porosity defects for planet carrier after casting process optimization

表1 附铸试块及铸件本体性能结果  
Table 1 The performances of attached test block and casting body itself

项目	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率A	硬度(HB)	金相组织
技术要求	$\geq 650$	$\geq 370$	$\geq 1$	210~305	球化率2级, 球径大小 $\geq 5$ 级, 珠光体含量 $\geq 75\%$
附铸试块	917	521	5	290	球化率2级, 球径大小6级, 珠光体含量98%
本体A	758	434	3	275	球化率2级, 球径大小6级, 珠光体含量85%
本体B	679	399	4.5	259	球化率2级, 球径大小6级, 珠光体含量80%
本体C	660	394	6.5	252	球化率2级, 球径大小6级, 珠光体含量80%
本体D	774	415	3.5	269	球化率2级, 球径大小6级, 珠光体含量85%

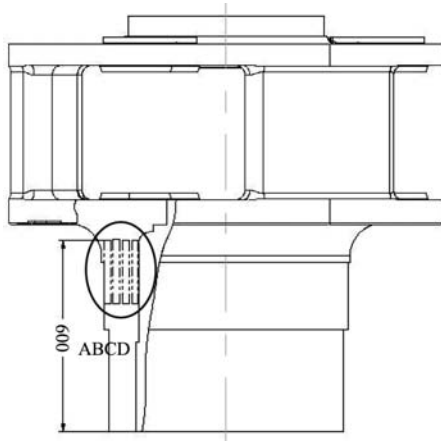


图6 行星架本体解剖取样位置示意图

Fig. 6 The section diagram of sampling positions on planet carrier

0.04%~0.06%之间, 稀土元素控制在0.02%~0.03%之间。

(2) 采用多次孕育, 选取钇基重稀土球化剂, 适当降低浇注温度(1 340~1 360 ℃为宜), 缩短凝固时间, 可以改善石墨形态, 保证行星架铸件材质性能。

(3) 针对风电厚大球墨铸铁件, 应尽量采用底注多内浇道分散进铁液, 保证铁液平稳充型; 冒口与冷铁相结合, 冒口能溢流冷铁液并提供一定的液态补缩量, 冷铁加强关键部位冷却, 消除或减轻疏松缺陷, 提高材料致密度和材质性能。

(4) 热处理是行星架铸件生产的重要工序, 高温正火出炉后应特别注意加强冷却, 可采取风冷或雾冷等方式处理, 以提高珠光体含量。

#### 参考文献:

- [1] 杭家友. 厚大球铁铸件铸造工艺探讨 [J]. 球墨铸铁与灰铸铁, 211(6): 43-47.
- [2] 张年玉, 陶元亮, 叶青, 等. 风电低温球铁铸件铸造工艺综述 [J]. 铸造技术, 2013, 33(2): 195-199.
- [3] 史蒂芬·I·卡塞. 球墨铸铁浇口和冒口 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983: 83-88.
- [4] 何文东. 风电铸件表面夹杂的成因分析及预防措施 [J]. 铸造, 2013, 62(7), 694-696.

---

## Research on Casting Process of a Ductile Iron Planet Carrier for Wind Power Generation

WEI Dong-dong, XU Gui-bao, ZHANG Jun, WANG Yi, ZHA Ming-hui  
(CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

### Abstract:

The casting process of a ductile iron planet carrier for wind power generation was investigated and the numerical simulation software MAGMA-Soft was used for the casting process optimization. According to the structure characteristics and technical requirements of the planet carrier, the bottom gating and multiple ingates system has been selected for the casting process. By combining to use risers and chills, accurately controlling the chemical composition, adopting the multi inoculation and the Y-based heavy rare earth nodulizer and properly lowering the pouring temperature, the as-cast metallographic structure of the planet carrier casting can be modified, and the density and properties of the casting can be improved. Special attention should be paid to the cooling method during the normalizing of the casting to ensure the content of pearlite in the microstructure and improve the mechanical properties of the casting.

### Key words:

ductile iron; numerical simulation; process optimization; heat treatment; casting body property

---