# 一种铸钢行星架产品的铸造工艺优化

赵红乐<sup>1</sup>,张 纬<sup>1</sup>,孟少峰<sup>2</sup>,周志勇<sup>2</sup>,惠亚兴<sup>3</sup>,张干龙<sup>3</sup>,张兴屹<sup>3</sup>,刘勇冠<sup>3</sup>,张丽琼<sup>3</sup>

(1. 晋西装备制造有限责任公司,山西太原 030024; 2. 晋西车轴股份有限公司 技术开发部,山西太原 030024; 3. 晋西工业集团有限责任公司,山西太原 030024)

摘要:某行星架铸件材质为ZG42CrMoA,为减少其在生产过程中下部圆弧位置存在的明显缩孔缺陷。借助华铸CAE软件对原铸造工艺进行了模拟分析,通过对铸件充型和凝固过程的观察,发现铸件充型过程平稳,但凝固过程在下部圆弧位置形成了较大的孤立液相区。孤立液相区在凝固过程中会产生收缩缺陷。对铸造工艺进行了优化,并借助模拟软件进行可行性预测。经生产验证铸件质量良好。

关键词: 行星架; 模拟分析; 工艺优化; 生产验证

行星架是行星齿轮传动装置的主要构件之一,是典型的低速、重载、变转矩和增速传动件。行星架作为传动装置的输出构件,承担了所有的转矩输出,承受的外力矩最大,因此对其产品质量要求严格<sup>[1-5]</sup>。行星架铸件的重要加工表面不能存在气孔、砂眼、夹渣等铸造缺陷,主要受力部位不能存在缩孔、缩松等铸造缺陷。公司在初始生产阶段,生产的产品不同程度地出现了缩孔、缩松缺陷,本研究借助模拟软件对缺陷原因进行了分析,并重新进行了铸造工艺设计,以期为行星架铸造生产提供技术指导。

## 1 产品结构及原工艺方案

### 1.1 产品结构

行星架为圆形对称结构,产品轮廓尺寸500 mm×500 mm×420 mm,壁厚较均匀,最大壁厚55 mm,最小壁厚33 mm,铸件重约190 kg,产品结构如图1所示。行星架产品质量要求较高,除中间4个立柱及立柱相接的上、下平面外均需机械加工。行星架材质为ZG42CrMoA,化学成分要求如表1所示。残余元素含量(质量分数):Ni $\leq$ 0.30%,Cr $\leq$ 0.30%,Cu $\leq$ 0.25%,V $\leq$ 0.05%,残余元素总含量不大于1%。

立柱上法兰下法兰

图1 行星架铸件三维实体图 Fig. 1 3D solid geometry of planetary carrier casting

表1 铸件化学成分 Table 1 Chemical composition of casting

 $w_{\rm B}/\%$ 

C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Al	
0.38 ~ 0.45	0.30 ~ 0.60	0.60 ~ 1.00	≤0.035	≤0.035	0.80 ~ 1.20	0.20 ~ 0.30	0.02 ~ 0.08	

### 作者简介:

赵 红 乐 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造工艺设计及热处理。电话: 18803418012, E-mail: zhaohongle1985@126.com

中图分类号: TG24 文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

11-1356-05

收稿日期:

2021-06-15 收到初稿, 2021-08-12 收到修订稿。

铸件的原铸造工艺见图2,铸件采用水平分型。立 柱由砂芯形成, 以立柱水平中心将砂芯分为对称的两 个部分,上部砂芯如图3所示。为保证铸件的致密度, 在铸件顶部放置冒口,并将铸件上部分做成实心结 构,凝固过程中利用顶冒口对立柱及下法兰进行钢液 补充;同时在立柱位置的上法兰上放置4个小冒口,在 下法兰底部对应立柱的位置放置冷铁。为保证铸件充 型过程平稳,采用底注的方式进行浇注。

采用碱酚醛树脂砂造型、制芯、砂型、砂芯工作 面均匀涂刷醇基锆英粉涂料,涂刷过程避免涂料堆积 和流坠,涂刷后及时点燃。采用中频炉熔炼,倾包浇 注, 开浇温度1 560~1 580 ℃, 浇注时间20~30 s。当 钢液上升至冒口1/3处时改由冒口浇注,并及时向冒口 放置发热覆盖剂。

### 铸造缺陷及原因分析

#### 2.1 铸造缺陷

铸件上表面存在不同程度的砂眼, 部分铸件的下 部圆弧有明显的缩孔,见图4a。产品热处理后,对其 进行粗加工,粗加工后在铸件表面发现有气孔,同时 发现约有15%产品下部圆弧部位存在缩孔,对缩孔进一 步处理发现其深度超过15 mm,如图4b所示。

### 2.2 原因分析

借助铸造模拟软件,可以较直观地对铸造过程进 行观察,为铸件缺陷分析提供帮助。本研究采用华铸 CAE软件对行星架原铸造工艺进行模拟。计算时铸件 化学成分设定为ZG42CrMoA合金各主要元素的中限, 造型材料为树脂砂、浇注温度为1580℃、砂型和砂芯 的初温为20 ℃,环境温度为20 ℃,浇注方式为重力倾 包。

### 2.2.1 充型过程模拟

图5为原铸造工艺充型过程的数值模拟结果。从图

上可以看出铸件充型过程平稳,从下法兰开始填充, 逐渐向上,最后填充顶冒口。由于内浇道设置在立柱 中间位置, 经两个内浇道进入铸件型腔的金属液在浇



图2 三维铸造工艺图 Fig. 2 3D casting process diagram



图3 砂芯图 Fig. 3 Sand core diagram





(a) 铸件毛坯缩孔位置 (b) 铸件粗加工后缩孔位置 图4 铸件缩孔图 Fig. 4 Casting shrinkage

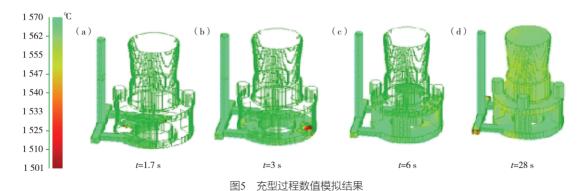


Fig. 5 Numerical simulation results during filling process

道对侧的立柱位置汇合,这有利于浇注开始阶段金属 液中裹挟的砂粒等杂质上浮,降低铸件内部砂眼的发 生。金属液填充型腔的过程中,金属液在放置冷铁的 位置温度下降最快,但是浇注过程并未发生凝固现象。

#### 2.2.2 凝固过程模拟

图6为凝固过程的数值模拟结果。铸件整体上形成 了自下而上的凝固,但是凝固过程形成了明显的孤立 液相区。浇注结束后,由于冷铁的激冷效果,与冷铁 直接接触的金属液温度下降最快,率先发生了凝固。

随着凝固的进行, 当下法兰与立柱接触部位凝固结束 时,两个立柱中间区域有较大范围的孤立液相区,见 图6b。由于该部位的补缩通道已经封闭,后续凝固 时,这部分金属液的凝固收缩得不到金属液的补充, 便会形成缩孔、缩松缺陷。模拟缺陷发生情况如图7所 示。凝固过程数值模拟结果显示,铸件上部实现了较 好的凝固顺序,凝固自立柱逐渐过渡到顶冒口,最后 凝固部分发生在顶冒口中心位置,由于铸件顶部中心 部分最终采取机械加工方法去除,最后凝固的部分不 必高出产品,从而减少金属液的消耗。

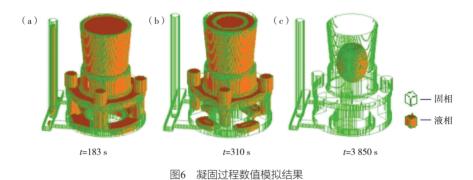


Fig. 6 Numerical simulation results during solidification process

### 工艺优化及模拟预测

### 3.1 工艺优化

对砂眼缺陷,通过加宽内浇道,减少金属液在 浇注系统的流速,降低了金属液对型壁的冲刷破坏, 减少了冲入型腔的型砂。由于直浇道底部区域受到的 金属液冲刷最为严重,尤其是刚开始进入浇道的金属 液,会对该部位产生强烈的冲刷,因此在该部位增加 陶瓷浇口窝,避免该部位砂型的破坏。针对下部圆弧 处的缩孔缺陷,因为其是由于不合理的冷却顺序,使 得补缩通道过早封闭,因此需重新对铸件的激冷系统 进行设计。铸件下法兰在不增加冒口的情况下,凝固

过程只能以立柱为补缩通道进行金属液补充,因此必 须首先将立柱处冷铁去除。

对行星架进行区域划分。按照行星架结构特点, 将行星架划分为4个区域,见图8。

模数是指凝固体体积与散热表面面积之比,计算 公式见式(1)。

$$M=V/A$$
 (1)

式中: M为模数; V为凝固体体积; A为凝固体散热表面 面积。

由三维模型计算得出 $M_a$ =1.79 cm;  $M_b$ =1.45 cm;  $M_c$ =2.27 cm;  $M_d$ =2.67 cm。 $M_d$ > $M_c$ > $M_a$ > $M_b$ ,即在不采取

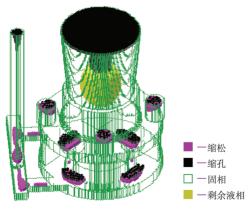
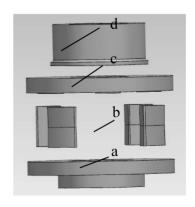


图7 铸件缩孔、缩松图 Fig. 7 Possibilities of shrinkage



a.下法兰 b.立柱 c.上法兰 d.上部圆环 图8 产品区域划分 Fig. 8 Product area division

措施的情况下,立柱会先于下法兰完成凝固,在下法 兰处最后的凝固部位必然会形成收缩缺陷, 若想使下 法兰部分不产生收缩缺陷,可以通过放置冷铁的方式 加速其凝固来实现。所需冷铁的质量及与铸件接触的 冷铁表面积可通过公式(2)、(3)进行计算[6]。

$$G=7.4V_0 (M_0-M_r)/M_0$$
 (2)

$$F = V_0 \left( M_0 - M_r \right) / 2M_0 M_r \tag{3}$$

式中:G为冷铁质量,g;F为冷铁接触铸件表面积,  $cm^2$ ;  $V_0$ 为热节体积,  $cm^3$ ;  $M_0$ 为热节模数, cm;  $M_r$ 为 热节减小后模数, cm。

将下法兰体积 $V_0$ =8 967 cm<sup>3</sup>、 $M_0$ = $M_a$ =1.79 cm、  $M_r = M_b/1.1 = 1.32$  cm代入公式,得到F = 891.84 cm<sup>2</sup>, G=17 440 g。为使下法兰形成向立柱方向的凝固顺 序,在下法兰下部圆环放置冷铁,如图9中a所示,同 时在立柱中间区域放置冷铁,图9中b所示。铸件原工 艺将上部圆环设计成实心结构, 配以大冒口, 造成大 量钢液的消耗。通过计算分析,在上部圆环设置两个 冒口配合补贴、冷铁完全能够保证该部位致密度符合 要求,冒口、补贴、冷铁见图9。经过工艺优化后,单 件产品钢液消耗由412 kg变为215 kg, 明显提高了钢液 的利用率;同时由于中心部分由实心结构变为空心结 构,使得热处理和机加过程更加高效。

#### 3.2 经优化的铸造工艺可行性预测

图10为优化方案的凝固过程数值模拟。经过优

化后铸件凝固过程中原来两个立柱中间的孤立液相区 消失,而在立柱偏下的位置出现了一个小的孤立液 相区,在该区域可能会形成小的缩孔、缩松,铸件最 后凝固发生在冒口部分。从模拟结果可以看出,铸件 凝固时间明显减少。图11为铸件缩孔、缩松概率分布 图,可以看出,铸件缩孔、缩松集中发生在浇道和冒 口位置,在立柱下部可能会出现少量缩松,如图11所示。

### 4 生产验证

采用中频炉熔炼合金, 倾包浇注, 浇注温度约 1 570 °C, 实测浇注时间在22~28 s之间。对行星架进 行解剖,解剖照片如图12所示,图12b为图12a局部缺

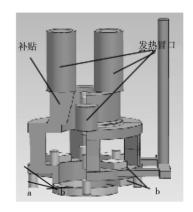


图9 三维铸造工艺图 Fig. 9 3D casting process diagram

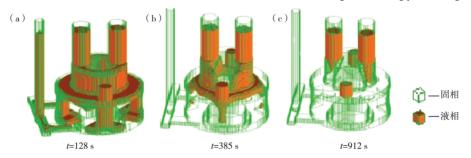


图10 凝固过程数值模拟结果

Fig. 10 Numerical simulation results of the solidification process

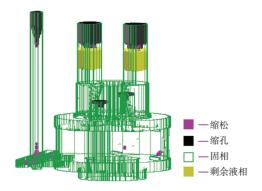


图11 铸件缩孔、缩松图 Fig. 11 Possibilities of shrinkage

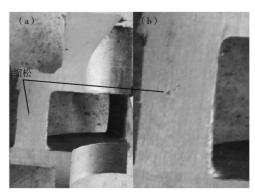


图12 铸件解剖块 Fig. 12 Dissection blocks of casting

陷放大图。通过观察解剖断面,在铸件立柱中心断面存在少量缩松,其他断面未发现缺陷。铸件加工后未发现缺陷。优化后的方案不仅保证了产品的质量,而且大幅度提高了钢液利用效率,提高了生产效益。

放置冷铁,不仅起不到效果,还会使补缩通道提前凝固,增大铸件产生缩孔、缩松的风险。

(2)借助数值模拟软件对行星架铸件铸造工艺进行模拟,有助于对缺陷产生原因进行直观分析,提升工艺优化的效率。

### 5 结论

(1)铸造工艺设计过程冷铁使用需慎重,不当

#### 参考文献:

- [1] 孙首群,汪仕阳,黄飞,等.风电增速机行星架铸造工艺的改进[J].铸造,2017,66(6):636-638.
- [2] 赵书斐,马立,穆润清,等. 采煤机行星减速器行星架的受力及疲劳强度分析 [J]. 煤矿机械,2017,38(9):59-61.
- [3] 安成成,张银生,赵晓文,等. 大型风电二级行星架铸钢件质量的控制 [J]. 铸造, 2020, 69(3): 283-285.
- [4] 修坤, 张世超. 小行星架铸件热处理裂纹缺陷分析与消除 [J]. 铸造, 2015, 64(5): 472-474.
- [5] 李钰,李鉴峰,卢艳,等.基于ProCAST的球铁行星架重力铸造工艺研究[J].中国铸造装备与技术,2017(6):36-40.
- [6] 李弘英. 铸钢件的凝固和致密度的控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

# Casting Process Optimization of a Cast Steel Planetary Carrier

ZHAO Hong-le<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, MENG Shao-feng<sup>2</sup>, ZHOU Zhi-yong<sup>2</sup>, HUI Ya-xing<sup>3</sup>, ZHANG Qian-long<sup>3</sup>, ZHANG Xing-yi<sup>3</sup>, LIU Yong-guan<sup>3</sup>, ZHANG Li-qiong<sup>3</sup>

(1. Jinxi Equipment Manufacturing Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Technology Development Department, Jinxi Axle Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 3. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China)

### Abstract:

The material of planet carrier casting is ZG42CrMoA. In order to reduce the obvious shrinkage defects of the lower arc in the production process, the original casting process was simulated and analyzed by CAE software. By observing the filling and solidification process of the casting, it is found that the filling process was stable, but the solidification process formed a large isolated liquid region in the lower arc. Shrinkage defects will be present in the isolated liquid region during solidification. The casting process was optimized, and the feasibility of the scheme was predicted by simulation software. The production verifies that the casting quality is good.

### **Key words:**

planetary carrier; simulation analysis; process optimization; production verification