

大型高铬铸铁叶轮凝固过程应力场数值模拟及铸造工艺优化

史东丽¹, 钱坤才²

(1. 常州机电职业技术学院机械工程学院, 江苏常州 213164; 2. 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: 某大型高铬铸铁叶轮铸件在试制时出现热裂问题, 采用ProCAST软件对铸件凝固过程进行了温度场和应力场耦合模拟。结果表明: 铸件热裂缺陷与铸件结构、开箱时间和内浇口位置有关。对铸件结构和铸造工艺进行了优化设计, 工艺实施后获得了合格铸件。

关键词: 高铬铸铁; 叶轮; ProCAST; 热裂

高铬铸铁作为优良的耐磨材料在国内外得到了广泛的应用, 主要用于低冲击负荷工况条件的衬板、锤头、磨球及渣浆泵的过流部件等大中型耐磨损件^[1]。

大型高铬铸铁叶轮铸造成形过程的开裂倾向是渣浆泵行业的难题之一。铸造凝固过程中产生的热应力是由于铸件在冷却过程中各部分冷却不均匀, 在同一时刻各部分收缩量不同, 受阻碍而产生的。当最大应力超过铸件在该温度下的最大抗拉强度, 而此时液态金属的补缩又不充足时, 可能导致铸件产生变形或裂纹。因此, 对铸件凝固过程中进行热应力数值模拟, 可以有效研究和预测热裂, 为实际生产提供科学指导^[2]。本研究针对某大型高铬铸铁叶轮铸件试制过程出现的开裂问题, 采用ProCAST软件对叶轮铸件凝固过程进行数值模拟分析, 进而提出优化工艺参数和改进方案。

1 技术要求及铸造工艺

1.1 结构及技术要求

高铬铸铁叶轮铸件最大直径为2 050 mm, 总高830 mm, 流道高度为368 mm, 前后盖板厚度均为45 mm, 共有厚度为40 mm的4枚主叶片和后端盖板上的16枚副叶片。叶轮铸件三维模型如图1。

高铬铸铁叶轮的化学成分要求如表1所示。该国外客户在标准ASTM A532 Class III Type A25%Cr的基础之上, 对成分进行了调整。其实际要求的成分范围比ASTM A532小。尤其对含C量、含Cr量有了更精确的要求。同时, 对P、S等有害元素含量的要求也远低于ASTM A532的要求。

高铬铸铁叶轮要求按照GB/T 9444—2007磁粉探伤, 叶轮轮毂区域(如图2所示)以及叶冠和叶片的交叉区域(如图3所示)不同缺陷类型需要满足的探伤验收标准如表2所示。

1.2 初始铸造工艺

高铬铸铁叶轮铸件造型采用呋喃树脂砂, 采用开放式浇注系统。分为上、下两层浇道, 沿上下盖板位置用耐火管铺设环形浇道。根据主叶片个数采用3个 $\Phi 260$ mm的保温冒口, 高度为400 mm, 冒口位置对准主叶片。在叶轮轮毂位置, 放置2个

作者简介:

史东丽(1980-), 女, 副教授, 硕士, 主要从事数值模拟研究。电话: 13775114189, E-mail: 601516495@qq.com

中图分类号: TG391.9;
TG24

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)09-0972-05

基金项目:

江苏省高等职业教育高水平骨干专业建设项目(苏教高[2017]17号)。

收稿日期:

2020-04-07 收到初稿,
2020-05-15 收到修订稿。

240 mm × 300 mm × 450 mm的腰圆型的保温冒口。在冒口下设计补贴。浇注系统三维图如图4所示。铁液出炉温度控制在1 450 ℃左右, 浇注前在浇包内静置2~3 min, 浇注温度控制在1 370~1 390 ℃。铸件毛坯重量3 650 kg, 浇注铁液质量约为5 000 kg, 浇注后48 h开箱。

2 ProCAST软件热裂纹分析原理

金属液接近凝固温度时, 收缩量较大, 塑性较差, 铸件自由收缩受阻而造成热裂以至在随后的冷却过程中产生裂纹, 一般位于铸件最后凝固的部位。

热裂形成的过程如图5所示。图中 p_c 为空隙压力, p_m 为金属静压力。糊状区的压力计算公式为:

$$p = p_a + \rho gh - \Delta p_{sh} - \Delta p_{mec} \quad (1)$$

式中: p_a 为大气压力; ρgh 为金属静力压; Δp_{sh} 、 Δp_{mec} 为流动过程中凝固收缩和变形的压力降。

稳态条件下, 这两者由以下公式得出:

$$\Delta p_{sh} + \Delta p_{mec} = \frac{180\mu}{G\lambda^2} [v_T \beta A + \frac{(1+\beta)B\dot{\epsilon}}{G}] \quad (2)$$

其中, $A = \int_{T_{cg}}^{T_{mf}} \frac{f_s^2 dT}{(1-f_s)^2}$, $B = \int_{T_{cg}}^{T_{mf}} \frac{f_s \cdot F_s(T)}{(1-f_s)^3} dT$, $F_s(T) =$

$$\int_{T_{cg}}^{T_{mf}} f_s dT$$

式中: G 为温度梯度; μ 为液体动力粘度; λ 为等轴晶或二次枝晶的平均尺寸; $\dot{\epsilon}$ 为糊状区的机械变形率; v_T 为凝固速率; β 为收缩率; T_{cg} 为晶粒形成时枝晶臂凝聚时的温度; T_{mf} 为进料温度; f_s 为固相体积分数; A , B 为取决于合金的性质和凝固路径, 可以通过 f_s 和 T 的关系得出。

由公式(1)和(2)得到的 Δp 如果小于空隙压力(用 Δp_c 表示), 就会产生热裂, 即:

$$\Delta p = p_a - p = \Delta p_{sh} + \Delta p_{mec} - \rho gh < \Delta p_c \quad (3)$$

其中, 空隙压力通过 $\Delta p_c = p_a - p_c$ 给出。

基于以上的公式, ProCAST应力分析计算模块可以模拟凝固和随后冷却过程中可能产生的裂纹缺陷。根据应力计算要求, ProCAST提供杨氏模量、泊松比和热膨胀系数与温度关系曲线。可使用HOT CRACK INDICATOR功能对热裂位置进行预测。该功能主要原理基于铸件的收缩受到阻碍的部位发生应变和应力集中, 在铸件的某些部位应变以及应力的的发展程度都超过了在该温度下材料所能够承受的极限值, 这个时候液态金属的补缩假如不够充足的话, 就会在铸件相应的位置上产生热裂纹^[3]。

3 应力计算分析

按照最初设计的工艺方案对样品进行了试制, 但是浇注出来的样品在上叶冠位置出现了贯穿型的裂纹

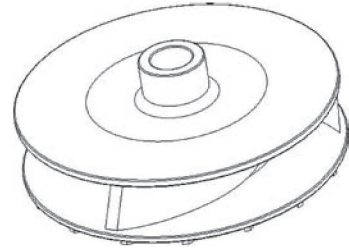


图1 叶轮铸件三维模型

Fig. 1 3D model of impeller casting

表1 高铬铸铁叶轮的化学成分要求

Table 1 Chemical composition requirements of high chromium cast iron impeller

元素	范围要求	目标范围	$w_B / \%$
C	1.90~2.20	1.95~2.15	
Mn	0.65~0.85	0.70~0.80	
Si	0.30~0.90	0.45~0.75	
Ni	1.00~1.40	1.10~1.30	
Cr	24.0~26.5	24.50~25.50	
Mo	剩余	<0.15	
P	剩余	<0.035	
S	剩余	<0.035	
Cu	剩余	<0.15	
V	剩余	<0.010	

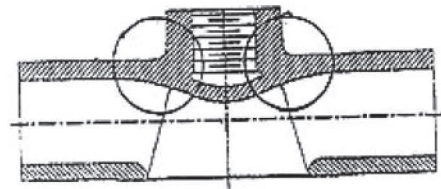


图2 叶轮轮毂区域

Fig. 2 Impeller hub area

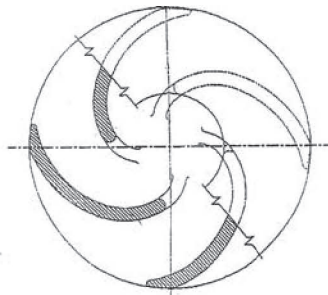


图3 叶冠和叶片的交叉区域

Fig. 3 Head and blade cross area

表2 高铬铸铁叶轮磁粉探伤验收标准

Table 2 Acceptance criteria for MPI of high chromium cast iron impellers

缺陷类型	叶轮轮毂区域	叶冠和叶片的交叉区域	其他区域
ASTM E 125 Type 1	不允许	不允许	不允许
ASTM E 125 Type 2	2级	2级	3级
ASTM E 125 Type 3	2级	2级	3级

(图6)。在再次样品浇注之前,利用ProCAST软件对叶轮铸件的初始工艺进行了温度场和应力场的耦合运算。

通过在ViewCast中对铸件冷却温度-时间曲线的观察发现,在浇注后48 h,局部的温度仍然在400 °C左右(温度-时间曲线中线条所示)。对于高铬铸铁件,这样的开箱温度仍然过高。开箱时间仍然需要延长以达到降低内应力的目的。铸件冷却温度-时间曲线如图7所示^[4]。

通过ProCAST中的HOT CRACK INDICATOR模块可以有效地预测有热裂倾向的位置。在上盖板和叶片交接的位置,预测有热裂倾向,如图8所示。对实物检测发现,这个位置的圆角仅为R15。对于这类大尺寸的叶轮,这样的R角太小,极易产生应力集中。另外,在下盖板和叶片交接的位置也预测有热裂倾向,如图9所示,有一组内浇口设计在了叶片和盖板的交接位置,这个位置也预测可能出现热裂。

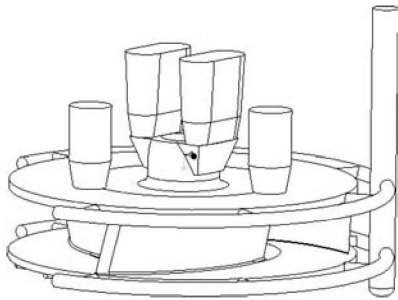


图4 三维铸造工艺图
Fig. 4 3D casting process diagram

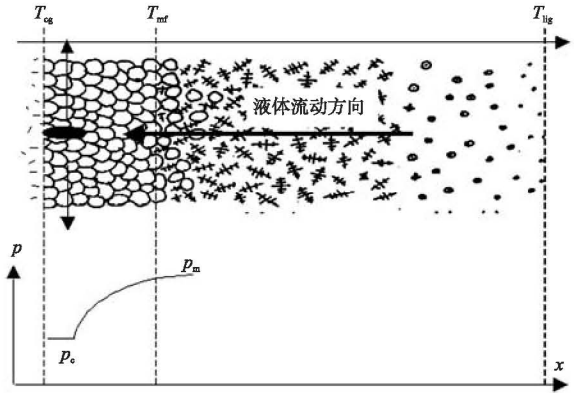


图5 热裂形成示意图
Fig. 5 Schematic diagram of hot tearing formation

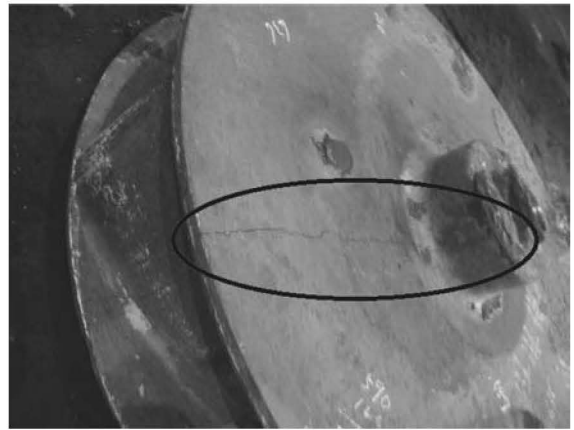


图6 样品裂纹位置及形态
Fig. 6 Position and shape of crack in impeller casting

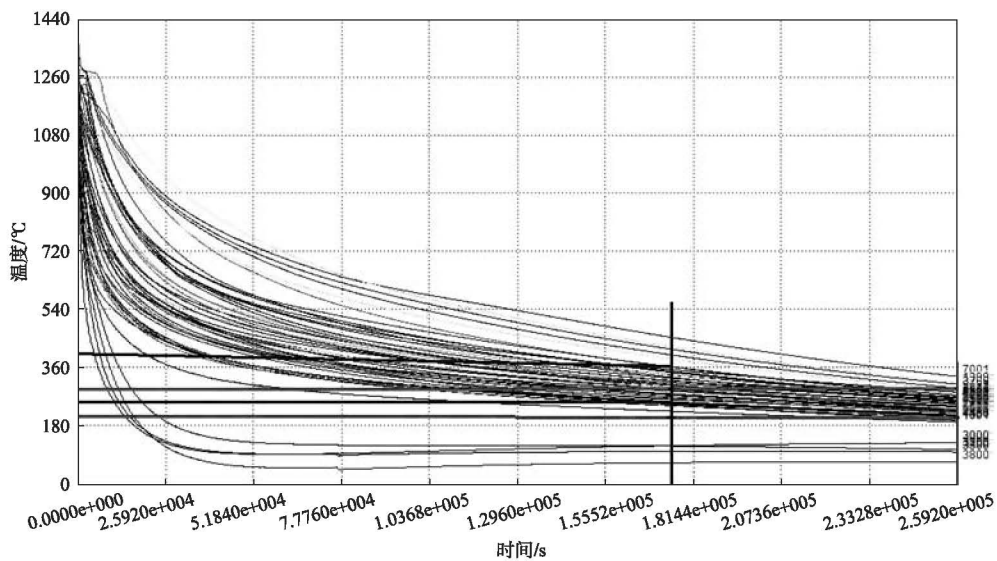


图7 铸件冷却温度-时间曲线
Fig. 7 Cooling temperature-time curves of casting

4 工艺改进及验证

基于前文分析,对后续铸件结构和铸造工艺做了以下改进:

- (1) 增加盖板与叶片交接位置的圆角从R15增至R40。
- (2) 如温度-时间曲线所示,在浇注后72 h,温度低于250 ℃,故延长开箱时间至72 h。
- (3) 内浇口需避开叶片和盖板的交接位置。

对上述改进后工艺重新进行了模拟,发现原先可能出现热裂的位置,上盖板和叶片交接位置以及下盖板和叶片交接位置对应的色标明显降低,如图10所示。在将浇口位置避开叶片和盖板的交接位置后,浇口位置无热裂倾向。根据上述改进后的工艺再次进行了样品试制。产品经磁粉探伤,未发现裂纹。叶轮实物如图11所示。



图8 上盖板和叶片交接处可能出现热裂
Fig. 8 Hot tearing may occur at the junction of upper cover plate and blade

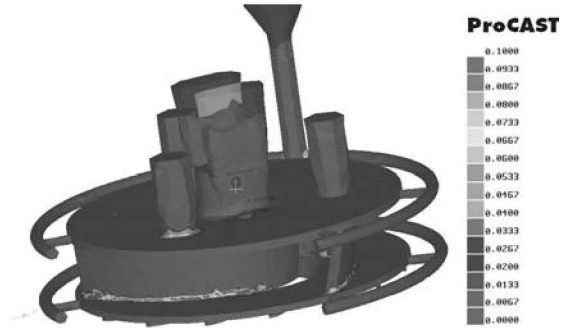


图9 下盖板和叶片交接处可能出现热裂
Fig. 9 Hot tearing may occur at the junction of lower cover plate and blade

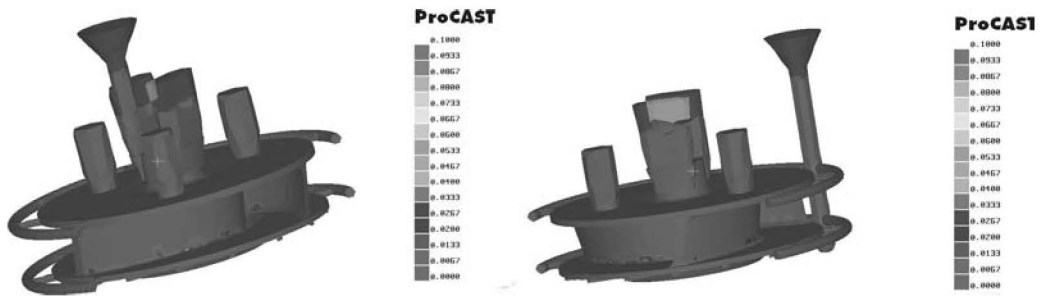


图10 应力场中可能出现热裂的位置
Fig. 10 Location of possible hot tearing in stress field



图11 叶轮铸件实物图
Fig. 11 Picture of impeller casting

5 结论

针对高铬铸铁叶轮在样品试制过程中出现的热裂问题,通过对凝固过程温度场和应力场的耦合运算,找到了问题出现的原因。通过对温度场的数模模拟,计算出了合适的开箱时间,避免因开箱过早而导致的开裂。通过对应力场的数模模拟,找到可能产生裂纹位置,进而可以针对性地进行了结构的改进,使得高铬铸铁叶轮满足了使用要求。

参考文献:

- [1] 张晓娟, 褚祥治, 苑少强, 等. 大壁厚高铬铸铁Cr27的铸态组织及性能研究 [J]. 铸造技术, 2013 (3): 269-271.
- [2] 杨继伟, 刘宝措, 范士超, 等. 离心泵壳铸造凝固过程应力场模拟 [J]. 中国铸造装备与技术, 2018 (3): 25-29.
- [3] 关晓强. 泵体的铸造工艺优化及其应力模拟研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2014.
- [4] 谭奇鑫. 大型机床床身充型凝固及铸造热应力有限元分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

Casting Process Optimization of Large-Scale High Chromium Cast Iron Impeller Based on Stress Field Simulation of Solidification Process

SHI Dong-li¹, QIAN Kun-cai²

(1. Institute of Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Mechatronic Technology, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

Based on hot tear defect that occurred during trial production of large-scale high chromium cast iron impeller casting, the temperature field and stress field coupling simulation of the casting solidification process was carried out by using ProCAST software. The results show that the hot tearing is related to the structure of the casting, the opening time and the position of the inner gate. Therefore, the casting structure and casting process were optimized, and the qualified castings were obtained after the implementation of the process.

Key words:

high chromium cast iron; impeller; ProCAST; hot tearing
