

熔模铸造低合金钢热裂问题的分析及解决

许盛发¹ 张守银² 刘敬伟¹ 陈燕飞¹ 卢百平² 徐志锋² 汪志太² 马志健²
(1.江西洪都国际机电有限责任公司; 2.南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 低合金钢中由于元素偏析大、导热性能差,有严重的裂纹产生倾向。针对锁座铸钢件熔模铸造出现的裂纹和缩孔、缩松问题,采用 ProCAST 软件进行了模拟分析,并通过改进浇注方案和验证,解决了缺陷问题。结果表明,Niyama 值较低、凝固时间较长的位置更容易出现缩孔、缩松和裂纹缺陷,综合采用凝固时间和 Niyama 判据能够更为准确地确定铸件缺陷产生位置。
关键词 铸造低合金钢;熔模铸造;热裂;凝固时间;Niyama 判据
中图分类号 TG249.5 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.028 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Analysis and Elimination of Hot Cracking Defects in Low Alloy Steel
by Investment Casting

Xu Shengfa¹, Zhang Shouyin², Liu Jingwei¹, Chen Yanfei¹, Lu Baiping²,
Xu Zhifeng², Wang Zhitai², Ma Zhijian²
(1.Jiangxi Hongdu International Mechanical & Electrical Co., Ltd.;
2.School of Aerospace Manultaturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: Due to the large element segregation and low thermal conductivity in cast low alloy steel, serious cracks is easily formed. In order to eliminated the defects of hot crack and shrinkage porosity, ProCAST software was used to simulate the solidification process. The pouring system was modified and verified to eliminate the defects. The results indicate that the lower Niyama value and longer solidification duration are prone to form shrinkage cavity and crack defects. Therefore, the casting defect location can be determined accurately by combination of so-lidification time and Niyama criterion.
Key Words: Cast Low Alloy Steel, Investment Casting, Hot Crack, Solidification Time, Niyama Criterion

裂纹是熔模铸造铸钢件常见的裂纹缺陷,往往伴随着微观缩松、缩孔的出现。如何防止裂纹出现是研究者一直关注的问题。在铸件凝固和冷却过程中,铸件局部应力达到或超过该温度下材料的强度极限时,会出现裂纹^[1]。根据裂纹形成时期,可分为热裂纹和冷裂纹。热裂纹是铸钢件、可锻铸铁和某些轻合金铸件常见的铸造缺陷之一。热裂纹是铸件在凝固末期或凝固后不久尚处于强度和塑性很低的状态下,因铸件收缩受阻而引起的裂纹。其形成主要因素是缺少液态补缩和大拉应力^[2]。另外,合金成分也会影响热裂纹的产生^[3]。

某锁座铸钢件为航空零部件,对结构强度有较高的要求。采用熔模铸造生产该类零件时,出现了热裂纹和微观缩松,导致铸件大量报废。本课题采用 ProCAST 软件对锁座铸钢件的浇注工艺方案进行模拟分析,并结合凝固时间和 Niyama 判据对铸件产生的热裂纹和微

观缩松缺陷进行分析,通过优化浇注系统避免了缺陷的产生,为该类熔模铸造薄壁铸钢件的生产提供参考。

1 铸件结构及特性

锁座薄壁零件材质为 ZG35CrMnSi 低合金钢,其化学成分见表 1。零件图见图 1。外形尺寸为 126 mm×74 mm×90 mm,平均壁厚为 4 mm。经计算,其质量约为 0.45 kg(密度为 7.8 g/cm³)。

该锁座铸件承受一般动载荷和较大静载荷,不允许

表 1 ZG35CrMnSi 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZG35CrMnSi								%
ω _B								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Fe
0.32~0.40	0.60~0.90	0.90~1.20	0.70~1.00	≤0.040	0.10~0.20	<0.035	<0.030	余量

收稿日期:2021-07-12;修改稿收到日期:2021-10-15
第一作者简介:许盛发,男,1982 年出生,工程师,南昌(330063),E-mail: xsf8235@163.com
通信作者:张守银,男,1982 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail: zhangsy@nchu.edu.cn
引用格式:许盛发,张守银,刘敬伟,等. 熔模铸造低合金钢热裂问题的分析及解决[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):261-264.
XU S F, ZHANG S Y, LIU J W, et al. Analysis and elimination of hotcracking defects in low alloy steel by investment casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):261-264.

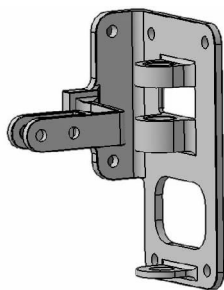


图 1 锁座零件图

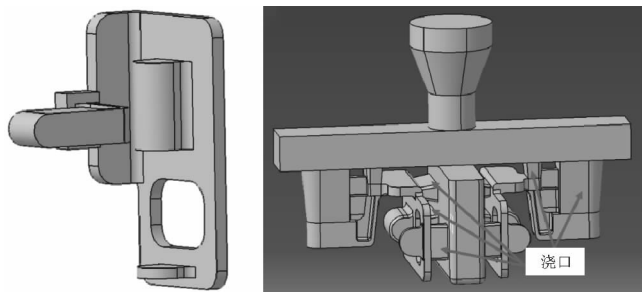
Fig.1 Digital model of lock seat

有裂纹、冷隔和穿透性缺陷,铸件按 HB5001-92 II 类验收。

2 工艺设计、铸造缺陷及模拟分析

2.1 铸件工艺设计和铸造缺陷

图 2 为锁座铸件和初始浇注系统方案。从图 2b 看出,初始方案在铸件热节部分设置了多个浇口。由于大平面部分有两个较大的凸台,为便于组装蜡模和补缩,在模组中间设置了一个厚大板状的浇道。



(a) 铸件

(b) 初始浇注方案

图 2 锁座铸件和初始浇注方案

Fig.2 Lock seat and initial gating system

采用熔模铸造,模料为精白蜡(50%)和硬脂酸(50%),以硅酸乙酯为粘结剂,采用石英粉和石英砂为耐火材料制备型壳。型壳制备为面层、过渡层和背层共 4 层,厚度约为 8 mm。制备的型壳经脱蜡后埋入砂箱并放入焙烧炉,在 900~950 ℃下焙烧 3 h。取出后立即浇注,浇注温度为 1 580 ℃。浇注后铸件表面多处有宏观裂纹,未出现裂纹的铸件经机加后,在大平面处也存

在多处微观裂纹和显微缩松。经统计,不良率达 70% 左右。铸件缺陷位置见图 3。

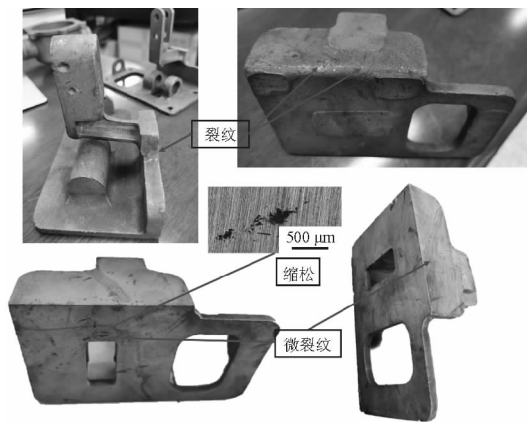


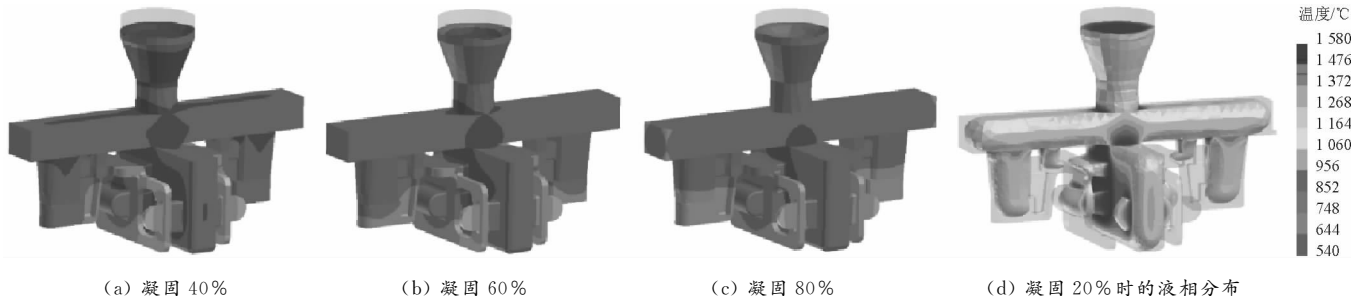
图 3 铸件缺陷位置

Fig.3 Locations of defects

2.2 铸造模拟分析

使用 MeshCAST 模块分别对铸件、型壳和砂箱进行网格划分和初始条件、边界条件设置。由铸件建立型壳和砂箱的步骤如下:①在铸件建立 2D 网格基础上,生成均匀厚度(8 mm)的型壳;②删除网格,删除型壳与铸件的界面、型壳环形面;③依据型壳浇口的外边缘线条构建平面,通过装配,获得型壳的几何体;④在 Mesh-CAST 中构建砂箱,通过装配,获得独立的铸件、型壳和砂箱模型;⑤进行网格划分,获得铸件、型壳和砂箱的体网格。铸件和型壳的网格尺寸为 2 mm,砂箱网格尺寸为 20 mm。四面体网格共计约 100 万个。模拟采用的浇注温度为 1 580 ℃,型壳和砂箱预热温度为 900 ℃。铸件和型壳的界面传热系数为 1 000 W/(m² · K)^[2],型壳与砂的界面传热系数为 500 W/(m² · K)。

图 4 为凝固过程的温度分布。可以看出,铸件薄壁的部位先凝固。由于浇道设计较为粗大,在铸件几乎完全凝固时,中间厚大的板状浇道仍处于液相。补缩效果较好,但会造成铸件部分凝固时间差异过大,增大铸件应力;同时,增加了铸件的凝固时间,从而铸件易产生裂纹或缩孔、缩松。从图 4d 可以看出,板状浇道最后凝固,凝固时间较长,其热量的辐射对铸件大平面位置的



(a) 凝固 40%

(b) 凝固 60%

(c) 凝固 80%

(d) 凝固 20% 时的液相分布

图 4 凝固过程模拟结果

Fig.4 Simulation result of solidification field

影响较为严重。这也解释了在铸件大平面位置出现缩孔和微裂纹的原因。

3 铸造工艺改进及模拟验证

3.1 铸造工艺改进

从原方案产生的铸造缺陷,以及铸造模拟分析结果可以看出,针对薄壁铸钢件,尽量采用分散的浇口,以缩短铸件的凝固时间,缩小铸件各部分的凝固时间的差异,有利于减少缩孔、缩松,降低铸件的裂纹倾向。鉴于此,根据零件的形状,将铸件薄壁上的凸台中间部分切除,减少铸件的热节;采用4个分散的、尺寸较小的内浇道,同时减小直浇道和横浇道的尺寸。改进后的浇注系统见图5。

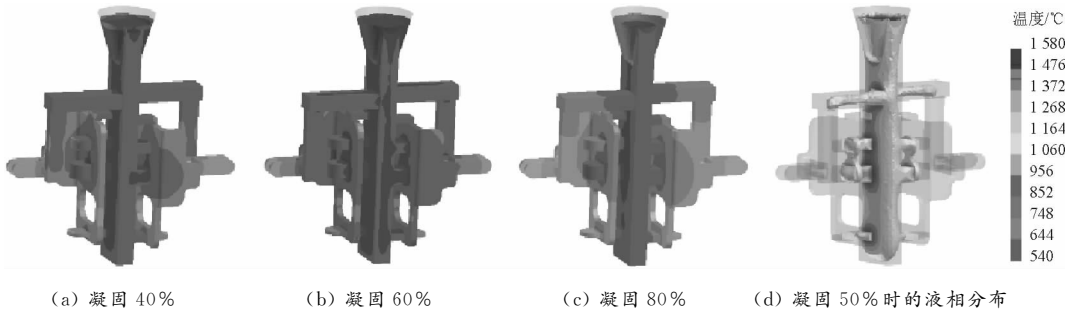


图5 改进后浇注系统数模图

Fig.5 Digital model of optimized gating system

3.2 改进方案模拟分析

图6为改进方案凝固过程的温度分布。可以看出,与初始方案比较,该方案铸件能够更快冷却。由图6d

看出,两个较厚内浇道中间的薄壁部分的凝固晚于铸件的其他部分。

3.3 改进方案验证

针对改进方案进行了工艺验证,组装蜡模见图7。经3次试投产,每次投产30件,铸件的合格率从初始方案的30%分别提高到了75%、83%和85%。裂纹缺陷主要集中在两个较厚的内浇道之间的部位(见图7b),该部位对应的部分(见图1)经机加后切除。因此,制作蜡模时将该部分去除,经试制和投产,该裂纹缺陷彻底消除。

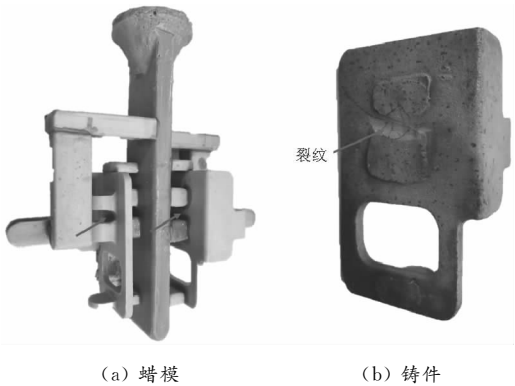


图7 改进方案组装蜡模和铸件

Fig.7 Wax pattern of optimized gating system and component

4 铸钢件裂纹及显微缩松缺陷分析

经过将厚大内浇道改为分散内浇道,并减小浇道的尺寸,消除了铸件的裂纹和缩松缺陷。为进一步分析裂纹及微观缩松缺陷产生的原因,从凝固时间和 Niyama 判据两方面对初始和改进方案进行了对比分析。

4.1 凝固时间分析

CHVORINOV N^[4]研究表明,铸件的凝固时间和其体积对表面积的比率的平方成正比。比例系数取决于浇注位置、铸件和铸型的热特性,其计算公式如下:

$$t = \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_c \Delta H_f}{T_m - T_0} \right)^2 \frac{1}{k_m \rho_m c_m} \right] \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1)$$

式中, t 为凝固时间, s; ρ_c 为铸件密度, kg/m^3 ; ΔH_f 为凝固潜热, J/kg ; T_m 为金属液温度, K ; T_0 为模具初始温度, K ; k_m 为模具初始温度下热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; ρ_m 为模具初始温度下密度, kg/m^3 ; c_m 为模具初始温度下比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; V 为铸件体积, m^3 ; A 为铸件表面积, m^2 。

初始方案的凝固总时间约为 950 s, 靠近浇道的凸台部分凝固时间约为 630 s (见图 8); 改进方案的凝固总时间约为 400 s, 而两个内浇道之间的铸件部分凝固

时间最长,约为 160 s(见图 8b),而此位置对应铸件裂纹缺陷出现的位置(见图 7b)。因此,可以推测裂纹缺陷出现的主要原因是铸件其他部分率先凝固,最后凝固的部分受到铸件其他部分的拉应力,而此时最后凝固的部分处于高温区,强度较低,从而出现裂纹。裂纹和微观缩松通常会共同出现,也与凝固时间较长有密切的关系。

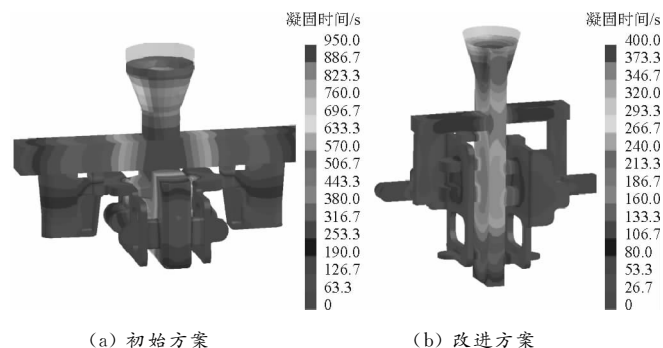


图 8 凝固时间
Fig.8 Solidification time

4.2 Niyama 判据分析

铸钢件铸造过程中缩孔、缩松出现常用 Niyama 判据^[5]。该判据定义为当时温度梯度与当时冷却速率的平方根之比:

$$N_y = G / \sqrt{R} \quad (2)$$

式中, G 为温度梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$; R 为冷却速率, $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。当 N_y 值足够大时,不会出现缩孔、缩松。而当该值低于某一临界值时,缩孔、缩松出现。在 Niyama 判据计算中, $Niyama$ 判据温度显著影响 N_y 值。在研究中,采用 Niyama 判据温度如下^[5]:

$$T_{N_y} = T_{\text{sol}} + 0.1(T_{\text{liq}} - T_{\text{sol}}) \quad (3)$$

式中, T_{N_y} 为 Niyama 判据温度; T_{liq} 为液相线温度; T_{sol} 为固相线温度。

ABOOTORABI A 等^[6]研究表明,当 Niyama 判据值为 $25(\text{k} \cdot \text{s})^{1/2}/\text{cm}$ 时模拟结果和试验结果符合较好。图 9 为初始方案和改进方案的 Niyama 判据值。可以看出,改进方案中的较低的 Niyama 判据值主要集中在两个凸台之间的薄壁位置(箭头位置)。该位置为裂纹缺陷易出现的位置。凝固过程中,温度梯度分布和缩孔、缩松的形成加剧变形。实际上,变形与温度下降以及形成缩孔、缩松是同时产生的^[3]。应该强调的是 Niyama 判据只能预测由补缩距离原因产生的相关缩孔、缩松,而不能准确预测因热节产生的缩孔、缩松,也不能预测气孔缺陷^[4]。

根据以上分析结果,可以综合采用凝固时间和 Niyama 判据对熔模铸造铸钢件进行分析。凝固时间较长,同时 Niyama 值较低的位置,铸件容易出现裂纹

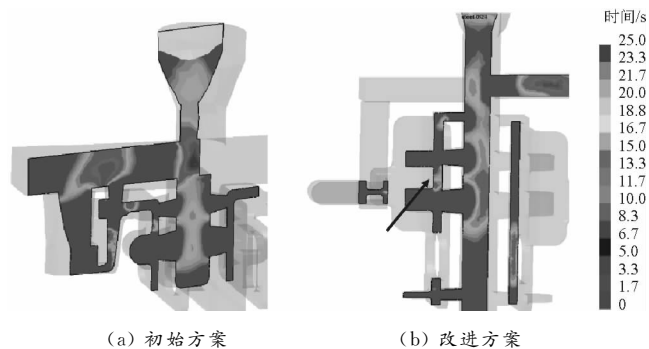


图 9 Niyama 判据值
Fig.9 Niyama criterion values

缺陷,并伴随缩孔、缩松出现概率的增加。

鉴于以上分析,进行铸钢件熔模铸造,尤其是对于薄壁件,应尽量采用分散的内浇道,避免内浇道之间距离太小,否则容易在铸件上出现热量集中部位,造成裂纹、显微缩松等缺陷;同时,分散的内浇道可以降低铸件的凝固时间,避免因局部凝固时间较长出现显微缩松和裂纹缺陷。

5 结 论

(1)采用 ProCAST 软件建构了熔模铸造型壳和砂箱,使模拟更加贴合实际,提高了模拟的可靠性。

(2)薄壁铸钢件的熔模铸造宜采用分散的内浇道,降低铸件的凝固时间,避免缩孔、缩松和裂纹缺陷的产生。

(3)结合 Niyama 判据和铸件的凝固时间,能够更为准确地确定铸件缩孔、缩松和热裂缺陷产生位置。其中 Niyama 值较低,凝固时间较长的位置更容易出现该类缺陷。

参 考 文 献

- [1] 许云祥,傅世军,沈翔,等.熔模铸钢件热裂的产生和防止[J].特种铸造及有色合金,1998(1): 22-25.
- [2] MONROE C A, BECKERMAN N C, KLINKHAMMER J. Simulation of deformation and hot tear formation using a visco-plastic model with damage[J]. TMS, 2009: 313-320.
- [3] KOTAS P, TUTUM C C, THORBORG J, et al. Elimination of hot tears in steel castings by means of solidification pattern optimization[J]. TMS, 2009: 313-320.
- [4] CHVORINOV N. Theory of the solidification of castings[J]. Giesserei, 1940, 27: 177-181.
- [5] CARLSON K D, BECKERMAN C. Use of the niyama criterion to predict shrinkage-related leaks in high-nickel steel and nickel-based alloy castings[A]. Proceedings of the 62nd SFSA technical and operating conference, Steel Founders Society of America[C]. Chicago, 2008.
- [6] ABOOTORABI A, KOROJY B, JABBAREH M A. Effect of mould design on the Niyama criteria during solidification of CH3C 80 t ingot[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(7): 722-730.

(编辑:刘卫)