● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.12.012

熔模铸造泵壳类铸铁铸件热裂问题分析及解决方案

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,江西 南昌 330063;2. 南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063)

摘　要:采用铸造模拟软件 ProCAST 分析了熔模铸造长江 750 特别铸铁泵壳铸件的热裂缺陷,并进行了实验验证。结果表明,铸件和浇注系统冷却速度以及凝固时间的差异是造成的铸造应力,并导致热裂缺陷产生的主要原因。通过减小浇注系统的尺寸,缩小了铸件和浇注系统的冷却速度和凝固时间的差异,改善铸造应力的分布,减轻由铸件和浇注系统形成的应力框效应,可以有效避免热裂缺陷的产生。

关键词:铸铁;熔模铸造;热裂;铸造应力
中图分类号:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)12-1051-03

Analysis and Solution of Hot Tearing Defects in Iron Cast Pump Casing via Investment Casting

XU Shengfa[1], ZHANG Shouyin[2], LIU Jingwei[1], CHEN Yanfei[1], LU Baiping[2], XU Zhifeng[2], WANG Zhitai[2], MA Zhijian[2]
(1. Jiangxi Hongdu International Mechanical & Electrical Co., Ltd., Nanchang 330063, China; 2. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The hot cracking defects of special cast iron pump shell castings of Changjiang 750 by investment casting were analyzed by casting simulation software ProCAST and verified by experiments. The results show that the difference of cooling rate and solidification time between casting and pouring system is the main cause of casting stress and hot crack. By reducing the size of the casting system, the difference of cooling speed and solidification time between the casting and the casting system is reduced, the distribution of casting stress is improved, the stress frame effect formed by the casting and the casting system is alleviated, and the hot crack defects can be effectively avoided.

Key words: iron; investment casting; hot tearing; casting stress

泵壳铸铁铸件为航空零部件,对产品密封性和结构强度有较高的要求。采用熔模铸造生产该类泵壳零件时,出现了热裂缺陷,导致产品大量报废。热裂缺陷产生的原因众多。采用铸造模拟软件 ProCAST 进行铸造应力分析,找出缺陷产生的根源,并对浇注系统进行优化设计,有效解决该类缺陷。

1　产品结构及特性

泵壳零件材质为长江 750 特别铸铁,其化学成分见表 1。泵壳铸件数模见图 1。外形尺寸为 116 mm×103 mm×60 mm,平均壁厚为 5 mm。经计算,其质量约为 0.8 kg。

表 1 长江 750 特别铸铁化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of Changjiang cast iron

C	Si	Mn	Cr	P	S
3.00~3.50	1.80~2.50	0.50~0.90	0.25~0.55	0.20~0.60	<0.12

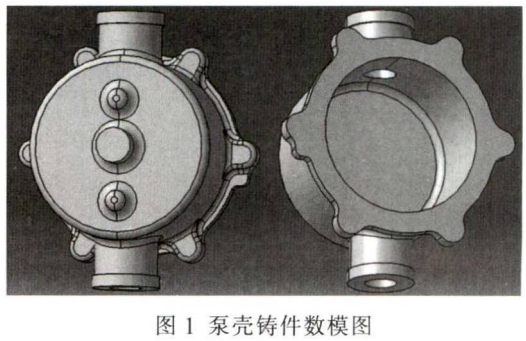


图 1 泵壳铸件数模图
Fig.1 Digital model of Pump Casing

收稿日期:2021-06-21
作者简介:许盛发(1982—),江西景德镇人,工程师.主要从事熔模精密铸造技术方面的工作.
Email:xsf8235@163.com
通讯作者:张守银(1982—),安徽阜阳人,讲师.研究方向:复合材料、有色合金铸造、铸造数值模拟技术.
Email:zhangsy@nchu.edu.cn

2 铸件工艺设计及铸造缺陷

该泵壳铸件采用熔模铸造工艺，以硅酸乙酯为黏结剂，以石英粉和石英砂为耐火材料制备型壳。模壳厚度约为 8 mm。制备好的型壳经脱蜡后埋入砂箱进行 900~950 ℃焙烧，焙烧时间为 3 h。取出后立即浇注，浇注温度为 1 350 ℃。原铸造工艺方案如图 2 所示。

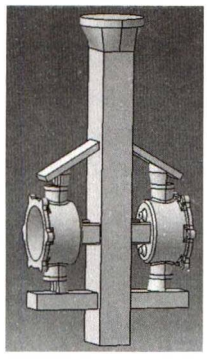


图 2 浇注系统数模图
Fig.2 Digital model of gating system

型壳清理后铸件出现了裂纹缺陷，具体位置见图 3。经统计，裂纹造成的铸件废品率约为 60%。金相观测(图 4)发现，该裂纹主要出现在晶界处，形貌较为曲折，为热裂缺陷。铸铁件在凝固末期及凝固后不久的温度范围内强度及塑性较差，由于铸件固态线收缩受到阻碍，在铸件中产生了铸造应力。当铸造应力超过铸件该温度下的强度时，铸件开裂形成裂纹[1]。

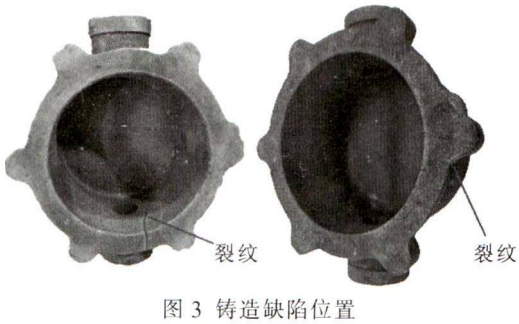


图 3 铸造缺陷位置
Fig.3 Locations of defects

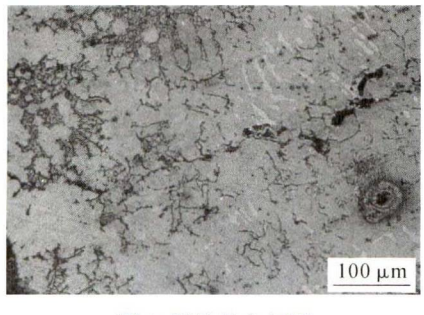


图 4 裂纹处金相图
Fig.4 Optical microscopy of hot tearing

3 铸造应力模拟分析

为分析铸造裂纹的成因，采用 ProCAST 软件进行了铸造模拟分析。为了准确模拟该泵壳铸件的生产条件，使用 MeshCAST 软件模块分别对铸件、模壳和砂箱进行了网格划分和初始、边界条件设置。由铸件建立模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)的模壳；②删除网格，删除模壳与铸件的界面、模壳环形面；③依据模壳浇口的外边缘线条构建平面，通过装配，获得模壳的几何体；④在 MeshCast 中构建砂箱，通过装配，获得独立的铸件、模壳和砂箱模型；⑤进行网格划分，获得铸件、模壳和砂箱的体网格(图 5)。铸件和模壳的网格尺寸为 2 mm，砂箱网格尺寸为 20 mm。四面体网格共计约 125 万。

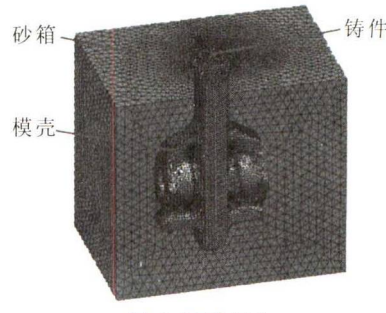


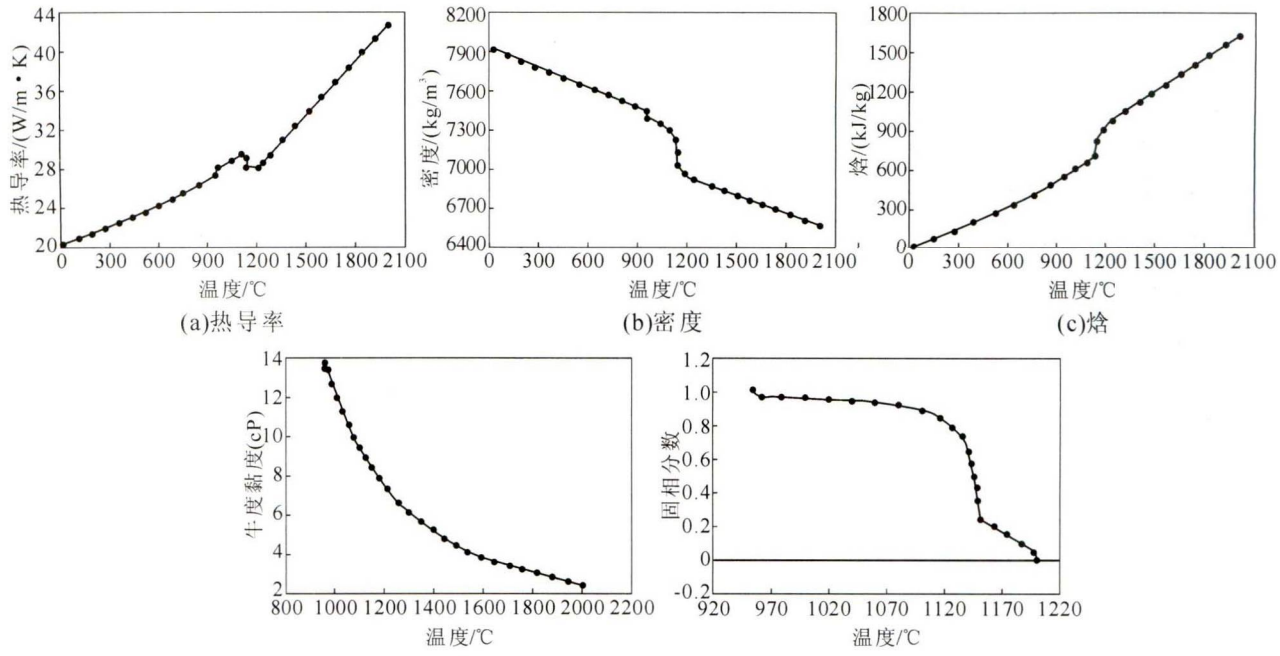
图 5 网格划分
Fig.5 Meshing

根据合金成分，按照 Scheil 公式计算获得长江 750 特别铸铁的热物性参数，充型凝固以及应力计算所用热物性参数分别见图 6 和图 7。其液相线温度和固相线温度分别为 1 200.2 ℃和 954.3 ℃。

模拟采用的浇注温度为 1 350 ℃，模壳和砂箱预热温度为 900 ℃。铸件和模壳的界面换热系数为 1 000 W/m^2·K[2]，模壳与砂的界面换热系数为 400 W/m^2·K。模拟采用充型、凝固和应力耦合计算。应力模型为弹塑性(Elasto-Plastic)模型。

平均正应力的模拟结果如图 8 所示。可以看出，在泵壳边缘(紫色部分)压应力较大，而筒壁则为拉应力。从图中可以看出，应力较大的位置主要分布在泵壳的筒壁和法兰边缘位置，和实际出现的裂纹位置相符(图 3)。凝固过程出现大量的枝晶并搭接成完整的骨架时，枝晶骨架的收缩受到模壳的阻碍，不能自由收缩，产生应力。当应力超过铸件在该温度条件下材料的强度极限时，枝晶之间产生开裂。而由于铸件的壁厚较为均匀，开裂部位周围没有足够的金属液进行补缩，铸件出现了热裂。

铸件在凝固过程中，厚大热节部位冷却缓慢，而与其相邻薄壁位置冷却较快。热节部位在凝固过程中承受两侧或三侧筋板冷却收缩所产生的拉应力，导致裂纹产生。该泵壳铸件浇注系统，直浇道较为厚大，凝固时间较长(模拟结果显示为 1 298 s)。凝固

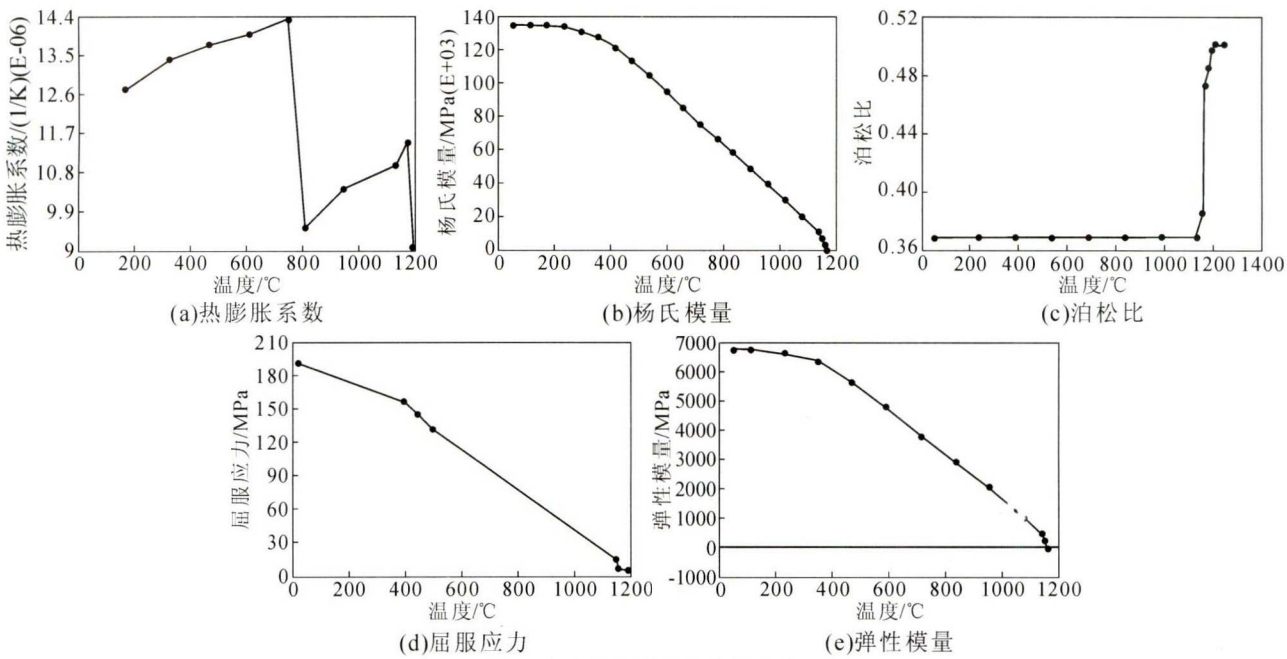


(a)热导率　(b)密度　(c)焓

(d)黏度　(e)固相率

图 6 充型凝固计算所需热物性参数

Fig.6 Thermophysical parameters



(a)热膨胀系数　(b)杨氏模量　(c)泊松比

(d)屈服应力　(e)弹性模量

图 7 应力计算所需热物性参数

Fig.7 Thermophysical parameters

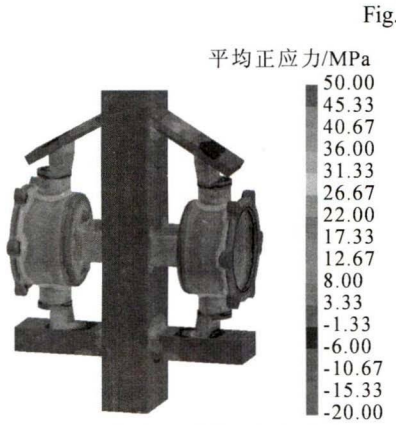


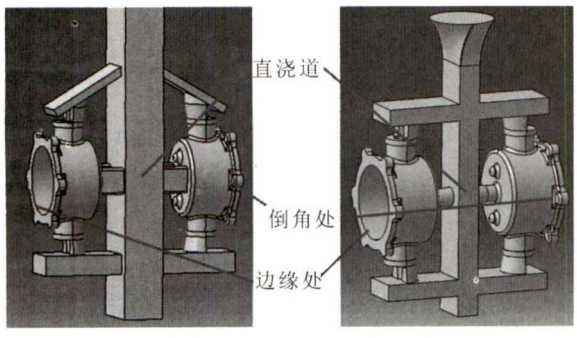
图 8 初始方案平均正应力分布

Fig.8 Average normal stress of initial gating system

过程中，泵壳的外缘和筒壁率先凝固，随后横浇道凝固，而直浇道最后凝固。铸件、横浇道和直浇道形成了典型的应力框结构。康进武等人[3]研究了应力框在凝固过程中的应力变化，研究发现，细杆内侧在凝固初期受拉，而后期受压，细杆外侧始终受压；粗杆中间应力大于外侧应力。泵壳铸件部分由于壁厚较小，且在外缘，率先凝固，相当于应力框的细杆；直浇道壁厚较大，相当于粗杆。

根据以上分析，通过减小浇注系统尺寸对初始工艺方案进行了优化，并对铸件应力进行了模拟计算。在直浇道、泵壳铸件的边缘（rim）即倒角

(Edge-Fillet)处分别提取正应力数值,具体位置见图9。其中,改进后的浇注系统方案见图9(b)。



(a)初始方案　　(b)改进方案

图9 初始方案和改进方案以及获取正应力的关键位置

Fig.9 Initial and improved gating system and key points for obtaining normal stress

通过铸造的应力分析,得到的各点的平均正应力随凝固时间变化的曲线如图10。铸件壁厚较薄,且远离直浇道,所以率先凝固冷却,受到拉应力;随凝固和冷却的进行,泵壳铸件的边缘所受应力由拉应力变为压应力,而法兰倒角处一直处于拉应力状态。凝固初始阶段,材料屈服强度较小(图7d),铸件产生热裂缺陷。直浇道由于凝固较晚,应力增大较为滞后。

对比初始方案和改进方案,可以看出初始方案边缘和倒角的应力差值较大,而改进方案中该应力差值较小,铸件和直浇道因凝固时间差异产生的应力框效应较小,减小了热裂倾向。

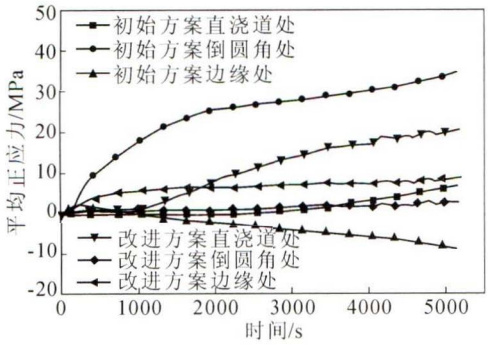


图10 平均正应力随时间变化曲线图

Fig.10 Curves of average normal stress vs time

4 铸造工艺优化及验证

根据应力分析结果,采用改进后的工艺方案进行了40件试投产,图11为改进方案的模壳。浇注清理后未发现裂纹缺陷造成的铸件报废。由于铸铁石墨膨胀带来的自补缩效应,未发现因浇注系统的减小而导致缩孔缩松等其他问题。整个浇注系统质量由原来的9.2 kg减少到3.8 kg,大大提高了铸件的出品率。

图11 改进方案的模壳

Fig.11 Ceramic shell of improved gating system

5 结论

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

(2)对泵壳进行了铸造应力模拟分析,发现铸件和浇注系统形成的应力框效应会增加铸造应力,带来裂纹缺陷。

(3)通过优化浇注系统,减小铸件和浇注系统的冷却速度和凝固时间的差异,能够减小铸造应力,避免由此造成的热裂缺陷。

参考文献:

[1] 张立权. 铸件裂纹产生原因及防止措施[J]. 机械工人,1984(10):50-53.

[2] 张晓光,韦洲,刘春雨. 灰铸铁连接件熔模铸造工艺优化[J]. 热加工工艺,2019,48(7):101-103.

[3] 康进武,熊守美. 铸钢应力框凝固过程三维应力数值模拟[J]. 铸造,1999(1):23-26.

(上接第1043页)

采取合理放置芯骨增加砂芯退让性,降低砂芯强度,避免过早开箱等降低外部阻力的措施,以及采用低稀土球化剂和含铋的孕育剂改善微观组织措施,可以有效解决球墨铸铁缸体裂纹问题。

参考文献:

[1] 刘增林,高光容. 大型柴油机缸体的铸造 [J]. 铸造,1997,46(12):20-22.

[2] 陈国桢,肖柯则,姜不居. 铸件缺陷和对策手册[M]. 机械工业出版社,1996.

[3] 喜多新男. 预防球墨铸铁铸造缺陷的措施 [J]. 现代铸铁,1986(2):60-64.