

灰铸铁曲轴箱缩陷分析及工艺措施

赵梦航

(上柴动力海安有限公司, 江苏南通 226601)

摘要: 为解决SC10E系列曲轴箱厚大部位缩陷缺陷的问题, 采用了激冷铸件缺陷位置、降低回炉料对铸件收缩倾向的影响、调换孕育剂等方法。具体的措施包括: 在缺陷位置顶部安装铬铁矿砂芯; 修改熔炼炉料配比, 修改前新生铁: 回炉料: 废钢=2:4.5:3.5, 修改后新生铁: 回炉料: 废钢=2:0:8; 将RECaBa孕育剂调换为Si75Sr1.5孕育剂。措施实施后大幅度降低了此产品缩陷缺陷率, 彻底解决了该产品铸造废品率偏高的问题。

关键词: 发动机曲轴箱; 缩陷缺陷; 激冷; Si75Sr1.5孕育剂

发动机曲轴箱是一个容纳汽车曲轴的空腔结构。它在发动机的下部, 是发动机中重要的零部件, 它承担连杆传来的力, 因此曲轴箱铸件的质量要求很高, 不允许有裂纹、缩松、砂眼、气孔等铸造缺陷。

上柴SC10E系列发动机是我公司的主导产品, 该系列曲轴箱改型后, 其中一侧增加了厚大的加油口, 加油口位于浇注位置铸件的上端, 极易产生缺陷, 铸件的试制阶段废品率高达20%, 主要缺陷为加油口缩陷。后经过笔者不断改良铸造工艺, 显著降低了缺陷率, 实现量产^[1-3]。

本文总结了从问题出现、原因分析、提出方案、实施方案、效果验证的整个过程, 为读者朋友提供了解决此类问题的几种途径。

1 产品介绍及技术要求

1.1 产品介绍

铸件材质为HT300, 最大轮廓尺寸1 050 mm × 120 mm × 450 mm, 主要壁厚6 mm, 最大壁厚60 mm, 铸件质量108 kg (图1)。应用场景有车用、工程机械、船机、电站等。

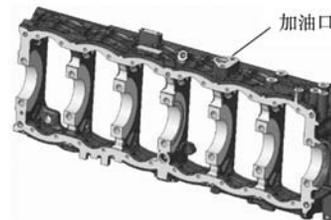


图1 SC10E曲轴箱三维图

Fig. 1 Three dimensional diagram of SC10E crankcase

1.2 技术要求

要求铸件化学成分如表1所示, 力学性能如表2所示, 表面粗糙度 $Ra \leq 25 \mu\text{m}$, 铸

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

C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr
3.30~3.38	1.60~1.80	0.65~0.75	0.06~0.10	≤ 0.06	0.6~0.8	0.1~0.2

表2 力学性能要求
Table 2 Requirements of mechanical properties

热处理	抗拉强度/MPa	表面硬度HB
去应力退火	≥ 280	180~230

作者简介:

赵梦航(1993-), 男, 助理工程师, 学士, 主要从事发动机气缸体、气缸盖铸造工艺研究工作。电话: 13949208906, E-mail: 664315127@qq.com

中图分类号: TG143.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1316-03

收稿日期:

2023-08-14 收到初稿,

2023-10-09 收到修订稿。

件轮廓清晰、无粘砂、夹砂和多肉、缺损缺陷。

2 工艺方案及问题描述

2.1 工艺方案

我公司生产SC10E系列曲轴箱过程中，采用三乙胺冷芯盒工艺制作主体砂芯，采用覆膜砂热芯盒工艺制作辅助砂芯，采用中频电炉熔炼，HWS静压造型线造型，连续式退火炉热处理。砂箱尺寸：1 450 mm × 1 100 mm × 420/420 mm。

铸造工艺采用每箱两件立浇侧注^[4]（图2），浇口杯位于铸型中间，铁液引入铸型后流经直浇道、横浇道、分直浇道、分横浇道、内浇口，最后充满铸型产品部分，浇注温度1 400~1 415 ℃，浇注时间27 s ± 3 s，每箱浇注总质量308 kg。

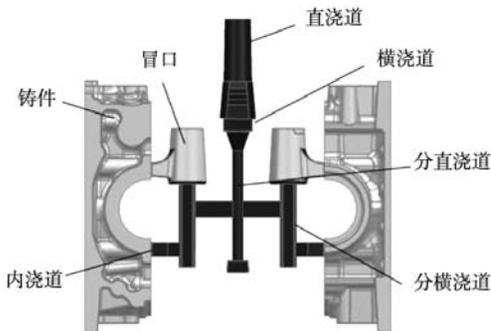


图2 SC10E曲轴箱铸造工艺图

Fig. 2 Casting process diagram of SC10E crankcase

2.2 问题描述

（1）此型号产品为上柴SC10E系列曲轴箱的改型产品，改型后增加了如图1所示的加油口。首次验证使用原工艺生产（图2），铸造出来的毛坯表面出现了缩陷缺陷，缺陷率超过20%（图3）。

（2）零件产品结构造成铸件壁厚差异大，最大壁厚60 mm，最小壁厚6 mm，缺陷位置位于浇注位置铸件顶端，若使用保温冒口补缩，不但要更改产品结构，还提高了生产成本。



图3 SC10E曲轴箱加油口缩陷

Fig. 3 The oil filler sink of SC10E crankcase

3 工艺优化及改善结果

3.1 工艺优化

3.1.1 激冷铸件缺陷位置

在缺陷位置顶部安装铬铁矿砂激冷砂芯^[5-7]（图4），激冷砂芯各组分混砂配比为原砂：铬铁矿砂：树脂：固化剂=50：100：2：1。为了将砂芯顺利安装到缺陷位置上方，还需要修改造型模具并预留砂芯安装空间，生产时在造型上型下芯工位使用铁钉将激冷砂芯固定到铸型对应位置。

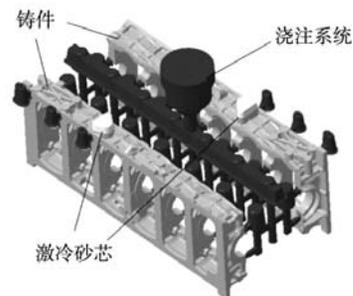


图4 优化后SC10E曲轴箱铸造工艺图

Fig. 4 Optimized SC10E crankcase casting process diagram

3.1.2 降低回炉料对铸件收缩倾向的影响

通过调整熔炼材料配比，降低回炉料对疏松倾向的影响。修改前，新生铁：回炉料：废钢=2：4.5：3.5，修改后，新生铁：回炉料：废钢=2：0：8。

3.1.3 调换孕育剂

将RECaBa孕育剂调换为预防缩松效果更好的Si75Sr1.5孕育剂，每100 kg铁液加入0.56 kg孕育剂。

3.2 改善结果

措施实施后大幅度降低了该产品缺陷率，工艺优化前缺陷率超过20%，优化工艺后缺陷率1.35%。彻底解决了加油口缩陷率偏高的问题，并实现了量产（图5）。该问题的解决也给我公司其他相似产品的铸造生

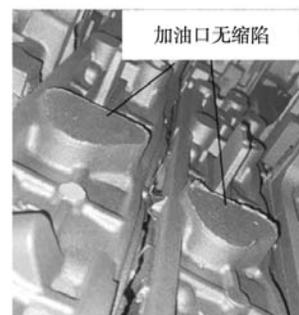


图5 工艺优化措施改善效果实物图

Fig. 5 Improvement effect diagram of process optimization measures

产提供了工艺方向和参考依据。

4 结论

(1) 经过大量生产验证, 提出的三种解决灰铸铁曲轴箱缩陷缺陷的措施能有效解决SC10E系列曲轴箱厚

大部位缩陷问题。

(2) 解决缩陷问题常规措施是在缺陷顶端放置补缩冒口, 但对于铸型顶端不易放置补缩冒口的铸件, 可以采取激冷缺陷位置、调整炉料配比、调换孕育剂等措施降低铸件厚大部位缩陷率。

参考文献:

- [1] 杨明, 刘志清, 贾晓波. 滑板铸件缩陷缺陷的解决 [J]. 铸造, 2011 (6): 602-603.
- [2] 豆柱, 魏兵, 孙君宁. 冷铁的初步研究 [J]. 铸造, 1988 (10): 23-31.
- [3] 张世辉, 周佩超, 吴振超. 铸件凝固过程计算机数值模拟软件在生产中的应用 [J]. 铸造, 1999 (5): 18-21.
- [4] 上柴动力海安有限公司. 一种轻量化曲轴箱体铸件浇注系统及其制造工艺: CN.113523193A [P]. 2021-10-22.
- [5] 赵成志, 张贺新. 铸造工艺设计与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 291-297.
- [6] 张俊善, 尹大伟. 铸造缺陷及其对策 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022: 41-42.
- [7] 陈国桢, 肖柯则, 姜不居. 铸造缺陷和对策手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 170-173.

Analysis and Process Measures for Sink of Grey Cast Iron Crankcase

ZHAO Meng-hang

(SDEC Haian Co., Ltd., Nantong 226601, Jiangsu, China)

Abstract:

In order to solve the problems of sink defects in thick parts of SC10E series crankcase, methods such as chilling casting defect location, reducing the influence of return charge on the sink tendency of casting, changing inoculant, and so on were adopted. Specific measures include that install chromite sand cores on the tops of the defect locations; modify furnace charge ingredient ratio, namely new pig iron: return charge: steel scrap=2:4:5:3.5 before modification and new pig iron: return charge: steel scrap=2:0:8; replace RECaBa inoculant with Si75Sr1.5 inoculant. After the implementation of the measures, the sink defect rate of this product is greatly reduced, and the problem of high casting scrap rate of this product is completely solved.

Key words:

engine crankcase; sink defect; chilling; Si75Sr1.5 inoculant

S16R 机体裂纹的分析及预防

陈晓飞

(上柴动力海安有限公司, 江苏海安 226600)

摘要: 针对S16R机体铸件裂纹问题进行铸造应力、金相和电镜分析。应力场数值模拟结果表明, 铸件结构合理, 不会产生裂纹缺陷。金相和电镜分析后发现裂纹处存在E型石墨和严重的氧化物。通过控制砂芯强度为1.0~1.2 MPa, 熔炼时增加1%碳化硅预处理剂, 提高铸件碳含量0.05%和增加0.1%硅钼随流孕育等措施, 消除了铸件裂纹缺陷。

关键词: 柴油机机体; 树脂砂; 裂纹

SR系列产品是日本三菱重工公司非道路用的中大型发动机的的主力产品, 主要用于船用主机、辅机及陆用电站。S16R缸孔夹角 60° , 缸孔直径 $\Phi 204$ mm, 缸孔中心距为265 mm, A列和B列缸孔错位间距为53 mm。最小壁厚7 mm, 自由端、输出端曲轴瓦面厚度分别为52 mm、57 mm, 中间档曲轴瓦面厚度为52 mm, 底脚板主要厚度为30 mm。机身長2 200 mm、宽1 080 mm、高920 mm、质量2 040 kg, 要求材料牌号为HT250铜铬铸铁合金, 本体抗拉强度250~350 MPa, 主轴承座HB硬度控制在200~250范围内, 铸件外轮廓表面的残余压缩应力-250~0 MPa。

铸造采用立式底浇工艺, 如图1所示。采用呋喃树脂砂手工造型、中频电炉熔炼, 浇注温度 $1\ 360\sim 1\ 380^\circ\text{C}$, 浇注时间 $52\text{ s}\pm 3\text{ s}$, 型内保温72 h后开箱, 然后铸件去应力退火。在正常生产过程中突然出现一个月有六件因铸件裂纹造成报废和经济损失。生产中每件产品在应力退火和抛丸后, 都会采用磁粉探伤对容易发生裂纹部位进行检测。裂纹缺陷主要集中在铸件两端窗口圆角处, 由里向外延伸, 如图2所示。

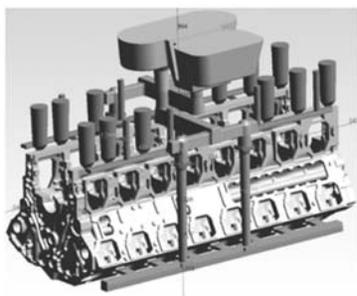


图1 S16R机体铸件浇冒系统图

Fig. 1 Gating and feeding system of S16R engine body casting



图2 S16R机体铸件裂纹位置和形态

Fig. 2 Locations and morphologies of S16R engine body casting cracks

作者简介:

陈晓飞(1973-), 男, 工程师, 主要从事缸体铸造工艺设计工作。E-mail: xfzcgxs@sina.com

中图分类号: TG245

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1319-04

收稿日期:

2023-08-16 收到初稿,

2023-10-11 收到修订稿。

本研究结合实际生产情况, 重点从产品结构和铸造工艺两个方面对机体铸件裂纹缺陷进行分析, 寻找解决方法。

1 裂纹原因分析

铸件裂纹分为冷裂纹和热裂纹。冷裂是铸件凝固后冷却到弹性状态时, 因铸件局部的铸造应力大于合金的极限强度而引致的裂纹。冷裂往往穿晶扩展到整个截面, 呈宽度均匀的细长直线或折线状, 断口有金属光泽或轻微氧化色泽。热裂是铸

件在凝固末期或终凝后不久，铸件尚处于塑性阶段并且强度很低状态下，因铸件固态收缩受阻而引起的裂纹。热裂断面严重氧化，无金属光泽，裂纹在晶界萌生并沿晶界扩展，呈粗细不均、曲折而不规则的曲线。

铸件开箱后进行磁粉着色探伤未发现裂纹，热处理后发生裂纹。为了区分热处理裂纹和热裂纹，我们把抛丸和热处理工序进行调换。铸件开箱后进行抛丸探伤100件未发现裂纹，再进行热处理也未产生裂纹现象。说明裂纹不是由热处理引起的。

针对遇到的问题，在铸件缸口和窗口裂纹处截取试样进行金相分析对比，如表1、图3和图4所示，并对铸件裂纹处进行了扫描电镜和能谱分析。铸件缸口位

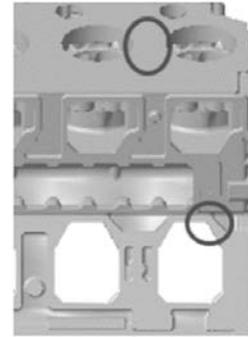
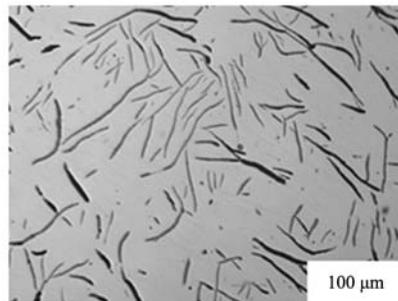


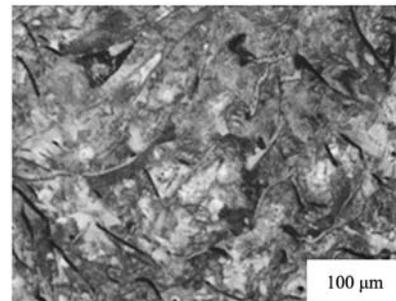
图3 S16R机体铸件金相取样位置
Fig. 3 Metallographical sampling positions on the S16R engine body casting

表1 S16R机体铸件基体组织
Table 1 Matrix structure of S16R engine body casting

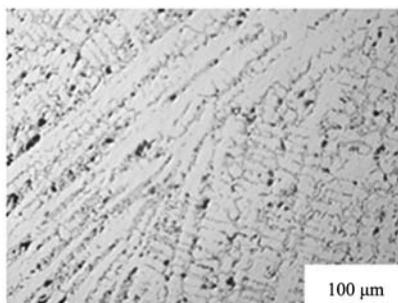
检测项目	石墨形态	级别	显微组织	珠光体数量
技术要求	A型片状石墨	3-5级	珠光体+少量铁素体，碳化物+磷共晶数量 $\leq 3\%$	$\geq 97\%$
缸口面	A型+少量团絮状	3级	珠光体	98%
窗口裂纹处	E型+A型+少量团絮状（E型占比90%）	5级	珠光体+铁素体	90%



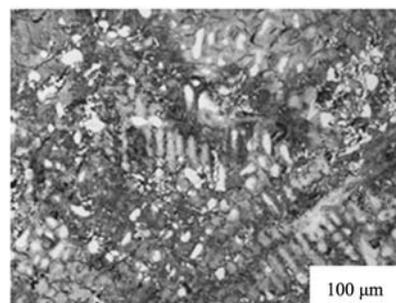
(a) 缸口处铸件石墨分布形态（抛光态）



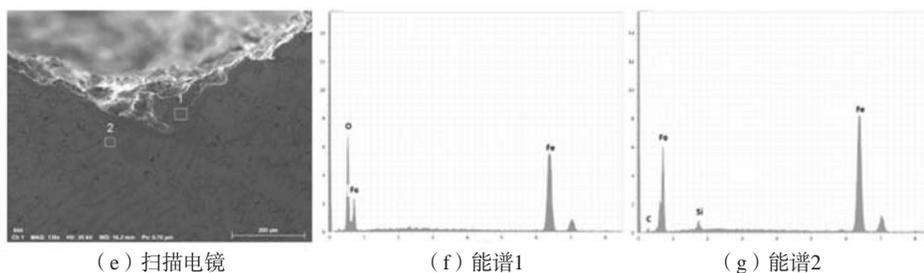
(b) 缸口处铸件显微组织（低倍）形貌



(c) 裂纹处铸件石墨分布形态（抛光态）



(d) 裂纹处铸件显微组织（低倍）形貌



(e) 扫描电镜

(f) 能谱1

(g) 能谱2

图4 S16R机体铸件金相、扫描电镜和能谱分析结果

Fig. 4 The metallographical, SEM and EDS analysis results of the S16R engine body casting

置基体组织符合技术要求，窗口裂纹处金相石墨主要以E型存在，且有超过标准要求的<10%的现象，珠光体含量也只有90%，没有达到 $\geq 97\%$ 标准。在铸件裂纹表面的下面没有发现夹杂物以及其他异常相。同时氧化层清晰可见，而且表面完全氧化。同时可以看到一些位置的氧化物已经进入到基体内部。对氧化层的位置进行纵截面的EDS能谱分析，证明氧化物为铁的氧化物，主要是 Fe_3O_4 。通过这些特征我们判断裂纹为热裂纹。

铸件产生裂纹后，还采用数值模拟软件对铸件进行了应力场变化分析，裂纹窗口处圆角过渡圆滑，没有阻碍铸件自由收缩的现象。铸件凝固过程中温度差异小于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ ，且随着温度降低，温差越来越小，如图5所示，没有出现温度异常现象。热裂纹数值模拟结果也没有异常情况发生，如图6所示。对铸件（无裂纹产品）裂纹易发位置进行应力测试，应力值均未超过屈服强度。分析认为该铸件结构设计合理，不是产生裂纹的原因。

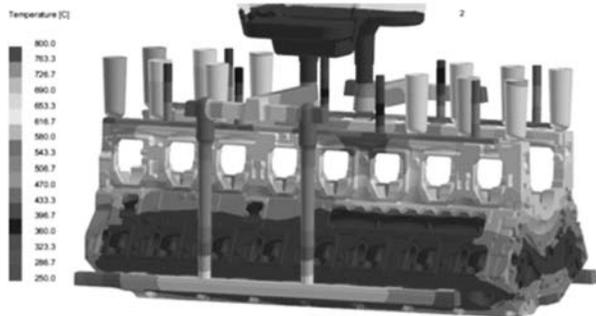


图5 S16R机体铸件温度场

Fig. 5 S16R engine body casting temperature field

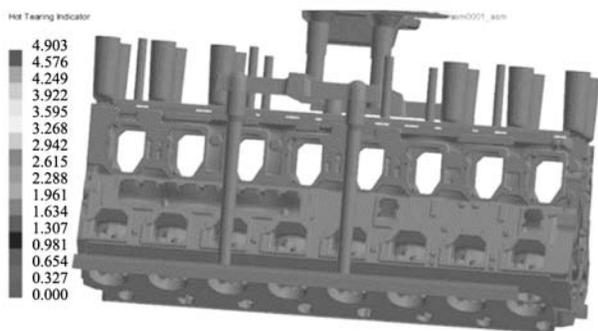


图6 S16R机体铸件热裂分析

Fig. 6 Hot tearing analysis for the S16R engine body casting

铸件裂纹处E型石墨高达90%远远超出了铸件的标准10%。E型石墨也是一种过冷石墨，它是比A型石墨短小的片状石墨，容易在碳当量较低（亚共晶程度大）、奥氏体枝晶多而发达的铸铁中形成。由于枝晶间共晶液数量少，析出的共晶石墨只好沿枝晶方向分布，故有明确的方向性^[1]。E型石墨对基体有割裂作用，对铸件的服役性能危害较大。

从图4存在裂纹缺陷的铸件石墨分布形态中可以看出奥氏体共晶柱晶柱粗大，共晶团面积小，对载荷的抗冲击力小。凝固过程中石墨为共晶先析出相，形核后呈辐射状长大，在共晶团边界处停止生长。石墨是自生的孔洞，在应力作用下，垂直于应力方向的石墨片或与应力方向成较大角度的石墨片腔体首先扩大，石墨片尖端处应力集中超过基体强度时基体被撕裂^[2]。

2 解决措施

通过铸件仿真模拟、工序的调整、金相和电镜的分析，认为铸件裂纹是由铸件存在大量E型石墨组织引起的热裂纹。找到问题的原因我们对原有生产工艺做了适当调整。

(1) 控制砂芯强度，掏空易产生裂纹的窗口，减少铸件收缩的砂芯阻力。修订砂芯强度标准把原有砂芯强度 $\geq 1.0\text{ MPa}$ 调整为 $1.0\sim 1.2\text{ MPa}$ ，掏空易产生裂纹的窗口增加型砂的退让性（见图7），减少拐角处应力集中超过铸件基体强度时基体被撕裂。



图7 S16R机体铸件窗口砂芯掏空

Fig. 7 S16R engine body casting window sand core hollowed out

(2) 熔炼时增加预处理剂（W-2碳化硅）。碳化硅可以增加铁素体的含量，消除或减少白口的倾向，避免过冷结构，降低铸铁壁厚敏感性，使得铸件的薄截面和厚截面之间的微观结构和硬度差异很小，有利于共晶团簇的萌发，增加共晶团的数量。碳化硅的优点正好解决铸件不同壁厚处金相差异，提高铁液纯净度在铁液高温（ $1520\text{ }^\circ\text{C}$ ）长时间保温降低铁液形核能力，造成石墨形态恶化产生不良石墨形态等问题。因此在铁液熔炼过程中加入1%预处理剂。

(3) 优化铸件碳、铜含量，增加浇注时的随流孕育。缸体碳当量低（ $< 3.7\%$ ）有增加过冷石墨形成的倾向，容易在铸件主要壁厚部位产生较多D型、E型石墨。随着含碳量的增加，形成细小枝晶间石墨所必须的冷却速度提高，产生枝晶间石墨的可能性减少。包底加入孕育剂铁液冲入法孕育，经常会包内剩余铁液时加入的孕育剂与渣子粘在一起，出铁后部分孕育剂浮在铁液表面没有熔化掉，这样就会造成孕育量不

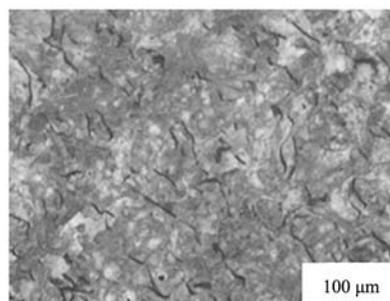
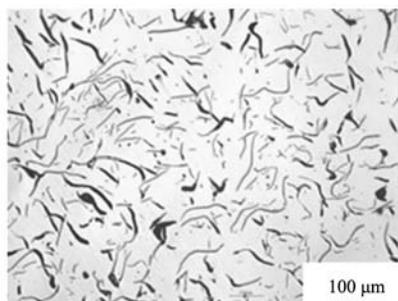
足,从而产生不良石墨形态。碳当量低铸件的内应力会增加。

对此优化铸件原来工艺,碳的含量由原来的3.15%~3.2%优化为3.20%~3.25%,铜含量由原来的0.6%~0.8%调整为0.8%~0.9%,增加孕育总量(孕育剂:稀土钙钡(0.3%)+75硅铁(0.3%)),由原来的包内0.4%调整为0.5%,增加浇注时的随流孕育加入量0.1%。

(4) 提高浇注温度。由1 355~1 370 °C调整为1 365~1 380 °C。铸件温度的提高砂型温度也相应提

高,铸件在砂型内的冷却速度有所降低,铸件各个部位的冷却速度的差值有所减少,这样铸件凝固的同步性得到了提高,所以其应力值会有所降低^[3],减少裂纹的倾向。

上述措施调整后对铸件进行了小批量试产,对本体易裂纹处窗口进行了金相分析,珠光体含量98%,铸件没有发现E型石墨(见图8),铸件加工好后也没有产生裂纹。随即进行了扩大验证,到现在生产了150余件都没有产生裂纹。



(a) 调整后铸件窗口易裂纹处石墨分布形态(抛光态) (b) 调整后铸件窗口易裂纹处显微组织(低倍)形貌

图8 S16R机体铸件金相

Fig. 8 S16R engine body casting metallography

3 结束语

利用铸造模拟软件的模拟代替试制来进行铸造工艺设计,可以有效节约研发时间及成本。通过铸造模拟软件的模拟,了解了铸件浇注和凝固的全过程,知道了铸件应力分布的情况,对铸件是否产生热裂纹和

冷裂纹有了初步的判断,为解决铸件裂纹提供了开阔的思路。通过改进砂芯强度、调整铸件成分和增加随流孕育等措施的落实,提高了裂纹位置的珠光体含量和消除了E型石墨,降低了铸件的应力,铸件裂纹得到了有效的遏制。

参考文献:

- [1] 杨永录,张绪国,宋岩,等.灰铸铁组织中不良石墨形态的金相分析及质量改进[J].金属加工,2012(1):71-75.
- [2] 袁森,徐锦锋,王武孝,等.灰铸铁中奥氏体枝晶的断裂行为[J].现代铸铁,1997(1):10-12.
- [3] 时建松.发动机缸体残余应力的数值模拟[D].合肥:合肥工业大学,2010.

Analysis and Prevention of Cracks in the S16R Frame

CHEN Xiao-fei

(SHANGHAI DIESEL HAI'AN Co., Ltd., Haian 226600, Jiangsu, China)

Abstract:

Directing at the problems of the S16R engine body casting cracks, the casting stress, metallographical, SEM and EDS analyses were carried out. The numerical simulation result of stress field show that the casting structure is reasonable and will not cause crack defects. However, the metallographical, SEM and EDS analyses reveal that there are E-type graphites and severe oxides existing on the positions of the cracks. Through taking measures of controlling the sand core strength at 1.0-1.2 MPa, adding 1% silicon carbide preprocessing agent during melting, increasing the carbon content of the casting by 0.05%, adding 0.1% silicon-zirconium stream inoculation and so on, the crack defects of castings were eliminated successfully.

Key words:

diesel engine body; resin sand; crack