

# 基于 EKK CAPCAST 球墨铸铁曲轴 铸造工艺优化

胡波<sup>1</sup>, 田迎新<sup>2</sup>, 翟柏顺<sup>2</sup>, 王行法<sup>2</sup>, 余宁<sup>1</sup>, 曾小勤<sup>1</sup>, 李德江<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海圣德曼铸造有限公司, 上海 201805)

**摘要:** 采用EKK CAPCAST铸造模拟软件模拟球墨铸铁曲轴铸造过程, 与Anycasting软件对比分析充型和凝固过程中可能产生缺陷的位置和缺陷大小。模拟结果表明, 铁液充型平稳, 无飞溅现象; 凝固时在曲轴第三主轴颈心部存在较大孤立熔池区, 易在此产生缩松缩孔缺陷。根据模拟结果提出相应优化措施, 将浇注温度由1 400 °C降低为1 390 °C, 在第三连杆颈处增加冷铁, 加速第三主轴颈冷却速度。再次模拟结果表明, 第三主轴颈孤立熔池区消失, 缩松缩孔缺陷得到消除。EKK CAPCAST中精细的网格划分和精确的有限元算法为实现对缩松缩孔缺陷的定量分析提供了可能。

**关键词:** 球墨铸铁; 曲轴; 铸造模拟; 缩松

计算模拟技术结合流体力学和凝固理论的长足发展, 促进了铸造工艺计算模拟技术的广泛应用。目前最常用的铸造模拟软件除了ProCast、MAGMA、Adstefan<sup>[1]</sup>之外, 还有Anycasting<sup>[2]</sup>、EKK CAPCAST等。铸造模拟可以分析充型与凝固过程中可能出现的缩松、氧化夹渣、卷气等缺陷, 对浇注条件和浇注系统进行优化, 然后再次模拟验证, 消除铸造缺陷, 达到缩短研发周期, 降低工艺试验成本的目的。

田迎新等人<sup>[2]</sup>利用Anycasting 软件对曲轴的铸造过程进行模拟, 预测的缩松位置与实际的结果相符, 并在热节位置增加冷铁改变凝固顺序, 成功解决了疏松问题。刘若星等人<sup>[3]</sup>利用Anycasting软件对大型矿山机械中的耐磨件进行铸造模拟, 分析后采用增大冒口尺寸的方法达到了消除缩松缺陷的目的。陈德平等人<sup>[4]</sup>利用ProCast对风力发电机轴承座铸造工艺进行模拟, 成功预测铸件缩松缺陷的位置, 对铸件铸造工艺方案优化后有效减少了缩松, 降低了废品率和生产成本。目前, 采用Anycasting、ProCast等软件模拟铸造过程的文章较多, 而运用EKK CAPCAST软件的案例很少。

EKK CAPCAST软件是使用四面体有限元技术的铸造模拟分析软件。其特点是计算模拟精确高效, 计算速度快及使用方便。适用于压力、离心、砂型以及消失模铸造。该款软件易于建模, 采用有限元算法所建的模型准确, 最接近三维CAD模型。因此, 采用EKK软件建立的模型比其他软件的要准确许多<sup>[5]</sup>。

本文采用EKK CAPCAST模拟分析了球墨铸铁曲轴在铸造充型和凝固过程中可能产生的缺陷, 并提出相应的改进措施, 对浇注条件和浇注系统进行优化。

## 1 计算模拟过程

### 1.1 JMatPro 计算材料热物性参数

球墨铸铁QT820-3在模拟软件数据库中没有与之对应的数据, 为了计算结果反应真实情况, 根据成分采用材料性能模拟软件JMatPro对曲轴材料的密度、热导率、膨胀系数、表面张力、比热等热物性参数进行计算。其中潜热为258 J/g, 固相点温度为1 140 °C, 液相点温度为1 164 °C。

作者简介:

胡波(1995-), 男, 苗族, 硕士生, 主要研究合金铸造工艺优化问题。E-mail: 1969220462@qq.com

通讯作者:

余宁, 男, E-mail: Ningyu2005@hotmail.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)

10-1138-05

收稿日期:

2019-04-24 收到初稿,

2019-06-28 收到修订稿。

## 1.2 模拟前处理 MESHID 版块设置

在三维造型软件UG中建立曲轴铸造模型，包括浇注系统、铸件和补缩系统等，保存为STL文件。将曲轴三维模型文件导入EKK CAPCAST前处理MESHID版块，对各部分进行实体设置。曲轴几何形状复杂，模型系统比较庞大，为了确保计算精度，对网格划分细致，达到300万个单元。在铸造类型中选择砂型铸造，模具选用湿型砂（Green Sand）。初始浇注温度为1400℃，浇注时间为10s。

从图1b可以看出，EKK CAPCAST网格划分细腻，能够很好地还原曲轴铸件的曲面细节。EKK CAPCAST在棱角处的衔接处理十分得当，这得益于其采用的四面体单元更易于反映曲面变化；与图1c中采用Anycasting软件进行网格划分相比，EKK CAPCAST具有明显优势，对复杂铸件的还原程度高。

## 2 模拟结果分析

### 2.1 充型过程分析

浇注温度为1400℃的充型过程如图2所示。充型时间约为10s，铁液自浇口杯进入直浇道，在直浇道窝处转变方向流入横浇道，经过滤器过滤后流入内浇道。三个浇道截面积大小关系为： $S_{直浇道} > S_{横浇道} > S_{内浇道}$ ，因此铁液由直浇道经横浇道进入内浇道的过程中速度越来越大，利于快速充填整个型腔。铁液从内浇道充填型腔和冒口，主要受到重力的作用从型腔下部往上填充。虽然四根曲轴摆放位置和浇口的距离造成充填过程中

所用时间有差别，但充填效果大致相同。整个充型过程平稳进行，未发生飞溅和湍流现象。这与Anycasting模拟的结果相同。

### 2.2 凝固过程分析

浇注温度为1400℃的凝固过程如图3所示。3a，3b是EKK CAPCAST软件模拟结果，其中颜色较浅区域为已凝固区域，其余为未凝固区域；3c，3d为Anycasting软件模拟结果，颜色较浅区域为未凝固区域，其余为已凝固区域。

两种软件模拟结果均显示铸件远离浇口和保温冒口、模数较小的区域优先凝固，而模数较大区域和离保温冒口较近的区域趋于最后凝固。从图3a可以看出，内浇道凝固较早，能够防止前端保温冒口中的铁液回流，从而保证有充足的铁液对铸件进行补缩。四个主轴颈是铸件中模数最大的区域，四个主轴颈心部为热节位置，最后凝固。从图3b可以看出，圆圈内第三主轴颈心部出现较大的孤立熔池区。球墨铸铁的凝固温度区间较大<sup>[6]</sup>，易以糊状凝固方式凝固<sup>[7-8]</sup>，加上得不到补缩使得第三主轴颈心部易形成疏松缺陷。

对比图3a，3b和3c，3d可以发现，EKK CAPCAST软件的模拟结果与Anycasting一致，但是由于软件显示不同，EKK CAPCAST能够看到铸件内部的凝固情况，更为直观地表现孤立熔池区出现的位置。而Anycasting无法直观跟随铸件凝固过程，只能通过后期剖面的方式观察内部的凝固情况。因此EKK CAPCAST能从三维

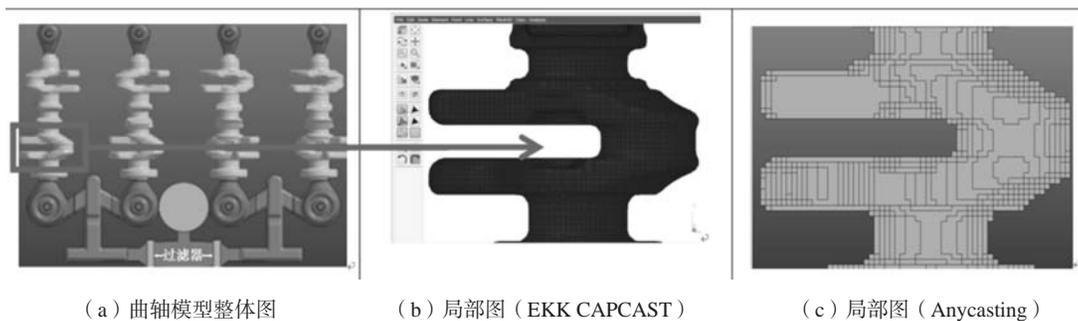


图1 EKK与Anycasting网格化分对比

Fig. 1 Comparison of meshing by EKK CAPCAST and Anycasting

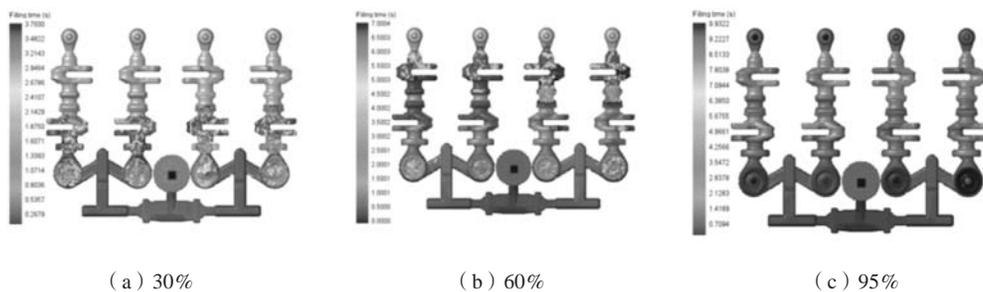


图2 1400℃浇注充型过程

Fig. 2 Filling process simulation by EKK CAPCAST at pouring temperature of 1400 °C

立体角度更为直接有效地展现铸件内部的凝固情况。

如图4a所示,在厚壁的心部位置设定温度传感器(即数据采集点),其中1,2,3,4传感器位于第一根曲轴,5,6,7,8传感器设置在第二根曲轴同样位置。得到各点温度随时间的变化曲线如图4b,4c所示。

由图4b可知,各点的温度变化趋势一致,均经历三个阶段:第一阶段为液态冷却阶段,铁液与砂型接触,较大的温度差使得铁液热量向砂型传递,铁液温度快速下降;第二阶段为凝固放热阶段,铁液温度下降到液相点以下,铁液凝固放热,抵消向环境释放的大部分热量,所以出现平台区域;第三阶段为固态冷却阶段,铁液已经完成共晶等凝固反应,热量继续向外传递。此时砂型温度升高,砂型-铸件界面换热系数变小,铸件的冷却速度也开始减缓。

第一、第二根曲轴具有相近的变化曲线。其中冷却速度最慢的两点为4和8,这两点更靠近保温冒口,因此在平台阶段温度随时间变化较小,凝固时间稍落后于其他位置。3和7的位置更贴近砂型界面,能够快速地将热量通过砂型-铸件界面传递出去。2和6在主轴颈心部热量传递较慢。1和5两个位置虽然离砂型较近,但是第三连杆颈所夹的砂型接收三个面的热量,这部分砂型区域温度上升极快,导致后期的导热效果下降明显。

采用Anycasting进行同样的计算,如图4c,对比图4b和4c可以发现,两种软件的计算结果均显示铁液凝

固经过上述三个阶段。但是,EKK CAPCAST软件的计算结果具有以下特点:

(1) EKK CAPCAST结果显示第一阶段与第二阶段的转折点温度约为1 155 °C,模拟计算设定的液相点温度为1 164 °C,说明有近10 °C的过冷,这与球墨铸铁共晶过冷度较大<sup>[9-10]</sup>相符合。而Anycasting的结果显示凝固阶段温度偏高,未考虑到球墨铸铁共晶过冷度大的性质,因此EKK CAPCAST软件的结果更趋近于实际凝固情况。

(2) EKK CAPCAST结果显示第二阶段每个温度传感器位置的凝固时间存在明显不同,这与曲轴各区域凝固先后顺序相符。

(3) EKK CAPCAST结果显示第三阶段的冷却速度有逐渐减小的趋势,这是后期铸件和砂型温度差减小,换热系数降低所致,与实际凝固情况相符。

### 3 铸造工艺优化

#### 3.1 浇注温度的优化

浇注温度对缩松缩孔缺陷的影响具有双面性。浇注温度提高一方面利于补缩,有助于抑制缩松缩孔的产生;另一方面浇注温度过高会引起铁液液态收缩量增加,反而促进缩松缩孔的形成<sup>[11]</sup>。因此,对抑制缩松缩孔形成应有最佳浇注温度。其余参数不变,研究浇注温度对缩松缩孔缺陷的影响。利用EKK CAPCAST软件后处理版块中的ISO volume测量可能产生缩松缩孔

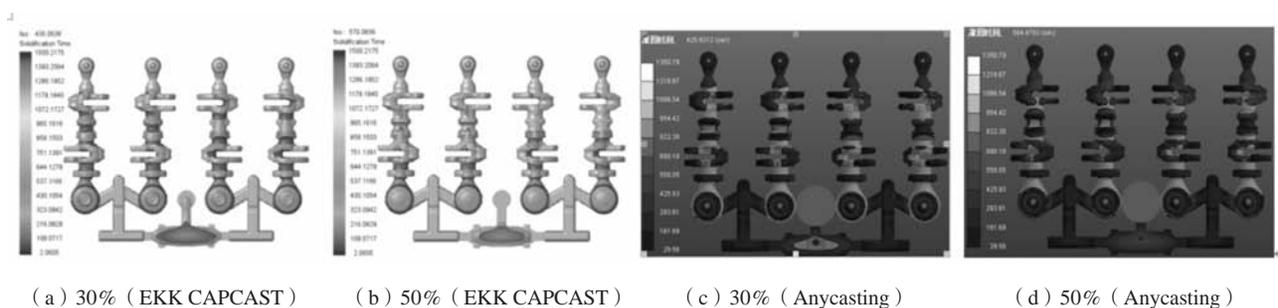


图3 1 400 °C浇注时的凝固过程

Fig. 3 Solidification process simulation by EKK CAPCAST and Anycasting at pouring temperature of 1 400 °C

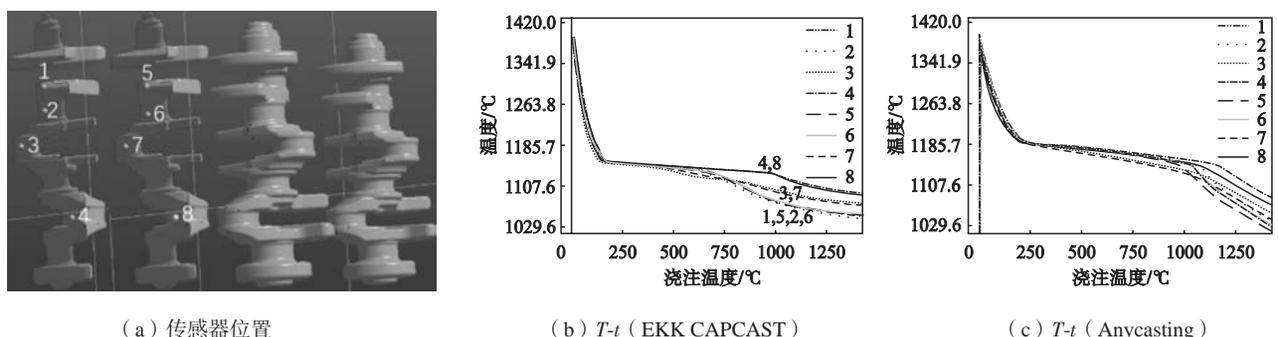


图4 温度-时间曲线

Fig. 4 Curves of temperature vs time

缺陷区域的体积，将不同浇注温度下缩松缩孔形成区域的体积统计于表1中。

采用Origin绘制缩松缩孔体积与温度关系，如图5所示。从图中可以看出，四根曲轴的第三主轴颈中缩松缩孔形成区域的体积随着温度的升高先降低后升高，在1 390 ℃时降到最小。这与上述提到的规律一致。各个温度下第一根和第二根曲轴的缩松缩孔形成区域体积相对较小，而第三、第四曲轴的缩松缩孔形成区域体积相近且都较大，这种不因浇注温度改变而改变的规律应与曲轴摆放的位置有关。因此建议将第三、第四曲轴的摆放位置改为与第一、第二曲轴一致。

可以看出，EKK CAPCAST可以快速找出缩松缩孔形成区域的位置，还能够提供缩松缩孔区域的大小。因此，在缩松缩孔缺陷的分析方面，EKK CAPCAST具有定性分析到定量分析的能力。

### 3.2 增加冷铁

浇注温度的优化只能一定程度上减小缩松缩孔体积，却不能从根本上消除缩松缩孔缺陷。为了达到彻底消除缩松缩孔缺陷的目的，尝试在第三连杆颈处引入冷铁，加快第三主轴颈热节部位的冷却。在浇注温度为1 390 ℃的情况下，只加入冷铁而不改变浇注条件，对充型过程影响甚小。充型过程仍然平稳，充型时间也与未加入冷铁前一致，因此不再赘述。利用EKK CAPCAST对加入冷铁前后的凝固进行对比，研究冷铁消除缩松缩孔缺陷的效果。

从是否加入冷铁对比结果来看，如图6b和6c所示，550 s时，未加入冷铁时第三主轴颈中存在大片的孤立熔池区，而加入冷铁后第三主轴颈已经凝固完成，未出现孤立熔池区。

对是否加入冷铁的缩松缩孔形成区域进行对比。如图7，可以看到第三主轴颈框线内的缩松缩孔缺陷因冷铁加入得到完全消除。

## 4 结论

(1) EKK CAPCAST软件的网格划分更为细腻符合实际形状；采用有限元算法结果更为精确可靠；表现孤立熔池区更为直观；能够测量缩松大小，实现对缩松缩孔缺陷的定量分析。

(2) EKK CAPCAST软件模拟汽车曲轴铸造过程中充型阶段平稳，无飞溅现象；预测凝固阶段在主轴颈心部易出现缩松缩孔缺陷。

表1 不同浇注温度下第三主轴颈缩松形成区域体积  
Table 1 Volumes of shrinkage cavity formed inside the third main journal of each crankshaft at different pouring temperatures /mm<sup>3</sup>

温度/℃	第一根	第二根	第三根	第四根
1 370	2.285 1	2.720 2	3.874 5	3.852 1
1 380	2.179 9	2.706 2	3.804 5	3.823 2
1 390	2.043 9	2.594 2	3.793 8	3.772 7
1 400	2.077 2	2.655 9	3.975 2	3.866 9
1 410	2.092 3	2.667 2	4.055 0	3.985 2
1 420	2.167 3	2.677 1	4.208 8	4.031 5

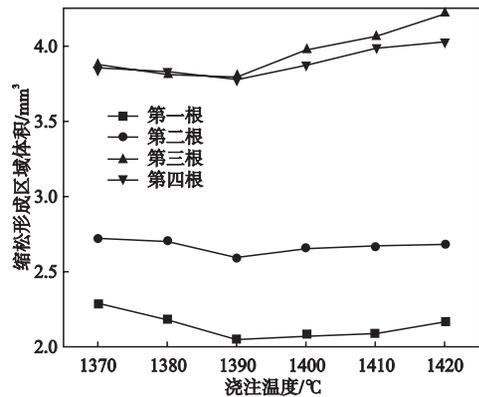
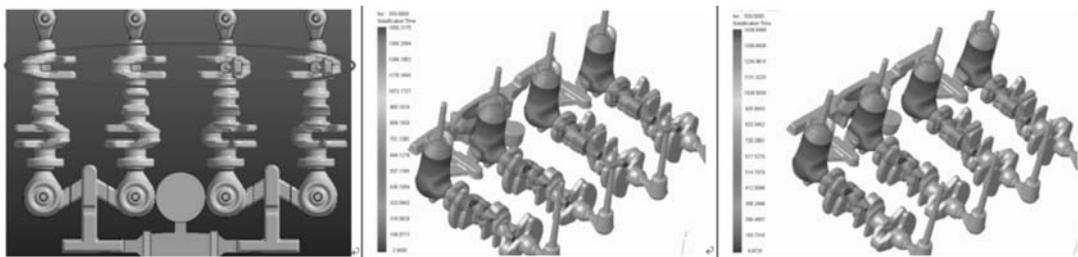


图5 缩松形成区域体积-浇注温度关系  
Fig. 5 Curves of volume of shrinkage cavity formed vs pouring temperature



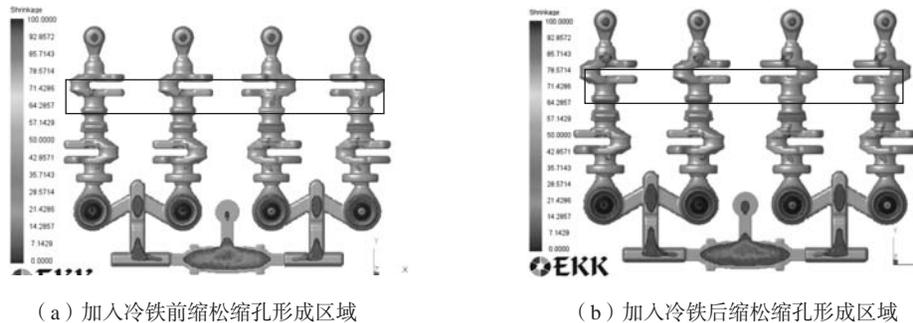
(a) 加入冷铁模型

(b) 无冷铁t=550 s

(c) 加入冷铁t=550 s

图6 加入冷铁前后对比

Fig. 6 Comparison of solidification process without and with chills



(a) 加入冷铁前缩松缩孔形成区域

(b) 加入冷铁后缩松缩孔形成区域

图7 无冷铁与加入冷铁缩松形成区域对比

Fig. 7 Comparison of shrinkage cavity areas formed without and with chills

(3) 基于模拟结果对铸造方案进行优化, 建议将浇注温度由1 400 °C降低至1 390 °C可以有效抑制缩松缩孔缺陷形成; 在曲轴第三连杆杆颈处引入冷铁加速第三主轴颈冷却可消除缩松缩孔缺陷。

#### 参考文献:

- [1] 古晓霞, 郭建政, 李绍敏. 三种铸造模拟软件对铸钢件铸造模拟之比较 [J]. 铸造, 2013 (5): 1084-1088.
- [2] 田迎新, 曾维和, 曾小勤, 等. 基于Anycasting球墨铸铁曲轴铸造工艺数值模拟及试验研究 [J]. 铸造, 2015 (11): 1102-1107.
- [3] 刘若星, 马瑞强. 模拟软件Anycasting在耐磨铸件工艺中的应用 [J]. 铸造技术, 2014 (1): 198-200.
- [4] 陈德平, 罗建设, 谢建. 基于ProCAST风力发电机轴承座铸造工艺模拟及优化 [J]. 热加工工艺, 2019 (1): 106-108.
- [5] 肖刚. 自动网格划分工具 [DB/OL]. <http://www.ekkinc.com.cn/technology/meshing.html>, 2018.
- [6] 李传斌. 球墨铸铁的凝固特性和铸件冒口的设置 [DB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/1b79f829da38376baf1faefb.html>, 2016-03-29.
- [7] 杨明月, 叶小龙, 麻先银. 球墨铸铁金相组织缺陷原因及防止方法概述 [J]. 现代铸铁, 2017 (3): 65-70.
- [8] 卢彬彬, 许景峰, 李永刚. 球墨铸铁缩松浅析 [J]. 中国铸造装备与技术, 2017 (1): 46-48.
- [9] 王树宝, 郭文申, 姜霄云. 球墨铸铁典型缩松缺陷的解决 [J]. 铸造, 2017 (23): 56-58.
- [10] 谢高峰, 王晓靖. 控制球墨铸铁件缩孔缩松缺陷的新方法 [J]. 铸造工程, 2016 (6): 34-36.
- [11] 赵娅. 发动机曲轴铸造缺陷的原因分析与优化 [J]. 热加工工艺, 2016 (8): 247-249.

## Optimization of Ductile Iron Crankshaft Casting Process Based on EKK CAPCAST

HU Bo<sup>1</sup>, TIAN Ying-xin<sup>2</sup>, ZHAI Bo-shun<sup>2</sup>, WANG Xing-fa<sup>2</sup>, YU Ning<sup>1</sup>, ZENG Xiao-qin<sup>1</sup>, LI De-jiang<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Sandmann Foundry Co., Ltd., Shanghai 201805, China)

#### Abstract:

The EKK CAPCAST casting simulation software was used to imitate the casting process of ductile iron crankshaft. Comparison simulation was carried out on the position and size of defects that might occur during filling and solidification process by using the EKK CAPCAST software and Anycasting software. The simulated results shows that the whole filling process runs smoothly and no splash occurs. However, There were large isolated molten pools appeared at the center of the third main journal of the crankshaft during the solidification, which made shrinkage cavity defects occur more easily. According to the simulation results, the pouring temperature was reduced from 1 400 °C to 1 390 °C and the chills were added at the third connecting rods to accelerate the cooling rate of the third main journal. The optimized results proved that the isolated molten pools inside the third main journal disappeared and the shrinkage cavity defects were eliminated. Besides, the fine element meshing and accurate finite element algorithm in EKK CAPCAST makes it possible to quantitatively analyze the defects of shrinkage cavity.

#### Key words:

ductile iron; crankshaft; casting simulation; shrinkage cavity