DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.013

球墨铸铁曲轴铸造缺陷预测与验证

胡　波[1],余　宁[1],李德江[1],田迎新[2],曾小勤[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,预测铸造充型与凝固过程中可能产生缺陷的种类、位置和大小,并结合生产试验进行对照验证。模拟结果表明,现有生产工艺条件下铁液充型过程平稳,未发生湍流现象;但是凝固过程中第 4 主轴颈出现较大孤立熔池区,凝固时间较晚,产生较大收缩应力,此处易产生约 6 mm^3 大小的收缩裂缝缺陷。模拟预测结果在实验中得到证实,在第四主轴颈内发现裂缝缺陷。将浇注生产的曲轴剖开,裂缝包裹的体积与预测缺陷形成区域体积在同一数量级。金相观察和硬度表征发现,裂缝内外组织性能存在明显不同,是凝固时间不同步所致。

关键词:球墨铸铁;曲轴;铸造模拟;铸造缺陷

中图分类号: TG245　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1076-05

Prediction and Verification of Casting Defects of Ductile Iron Crankshaft

HU Bo[1], YU Ning[1], LI Dejiang[1], TIAN Yingxin[2], ZENG Xiaoqin[1]

(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 casting process of nodular cast iron crankshaft was simulated by EKK CAPCAST casting simulation software, and the types, locations and sizes of possible defects during mold filling and solidification were predicted, and combined with the production test for verification. The simulation results show that the filling process of molten iron is stable and no turbulence occurs under the existing production conditions. However, during the solidification process, a large isolated molten pool area appeared in the fourth spindle neck, which had a relatively late solidification time and produced a large shrinkage stress. Shrinkage crack defects of about 6 mm3 were easy to occur here. The simulated prediction results are confirmed in the experiment, and the fracture defect is found in the neck of the fourth spindle. The cast crankshaft is cut open and the volume of the fracture envelope is on the same order of magnitude as the volume of the predicted defect formation area. Metallographic observation and hardness characterization show that there are obvious differences in microstructure properties inside and outside the fracture, which are caused by the unsynchronization of solidification time.

Key words: ductile iron; crankshaft; casting simulation; casting defects

计算机技术和软件技术的快速发展为铸造行业数值化提供了良好基础,铸造模拟软件的开发和应用使得采用模拟技术优化铸造工艺成为可能[1]。铸造模拟可以分析常见的铸造缺陷,例如缩松缩孔,裂缝,氧化夹渣等。通过分析模拟预测结果,优化铸造工艺方案,能大幅减少铸造缺陷,缩短研发周期,降低工艺探索成本。

Mane V.V.等人[2]使用 AutoCAST-X1casting 仿真软件优化进料和浇口元件,通过改变浇口和进料元件尺寸进行模拟和实验研究。逐步增加进料器和进料器颈部尺寸并多次模拟改变浇口比,获得了无缺陷铸造工艺。张帆等人[3]利用 ProCAST 软件对球墨铸铁连杆铸造工艺过程进行数值模拟,实现对铸件质量的预判,降低生产成本。Y. Sun 等人[4]采用 Z-CAST 模拟软件研究球墨铸铁后桥铸件凝固过程,分析球墨铸铁在铸造过程中产生的缩孔,热裂等典型缺陷,在此基础上改进卡车后桥的铸造设计,完善铸造工艺。毕海香等人[5]借助 MAGMA 模拟分析软件,确定了缺陷产生的原因并对冒口、冷铁、浇注温度和合金液碳当量等进行了工艺优化,经验证缺陷问题得到改善。

采用软件模拟铸造过程,优化工艺方案并取得成功的例子很多,但是建立模拟预测与生产验证联系却还有研究的空间。采用 EKK CAPCAST 模拟软

收稿日期:2019-07-26

作者简介:胡　波(1995-),贵州务川人,硕士生.研究方向:合金铸造工艺优化问题.电话:18217522350,
E-mail:1969220462@qq.com

通讯作者:余　宁(1972-),重庆人,助理研究员.研究方向:集成计算材料科学与工程.
Email:Ningyu2005@hotmail.com

件对汽车用球墨铸铁曲轴铸造过程进行模拟,预测充型和凝固过程中可能产生铸造缺陷的种类,位置以及大小;并根据预测结果对车间生产的铸件进行定点解剖试验,验证模拟预测的准确性。

1　模拟与试验过程

1.1　JMatPro 计算材料热物性参数

球墨铸铁的热物性参数随合金成分变化很大,而热物性参数对铸造模拟来说又至关重要。球墨铸铁 QT820-3 的成分如表 1,在 EKK CAPCAST 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 对材料的密度、导热系数、比热等参数进行计算。其中固相点温度为 1 140 ℃,液相点温度为 1 164 ℃,潜热为 258 J/g。

表1 QT820–3化学成分 w(%)
Tab. 1 Chemical composition of QT820–3

C	S	Si	Mn	P	Cr	Sn	Ti	Cu	Mg	Fe
3.7	0.01	2.45	0.32	0.05	<0.1	0.02	0.02	1.15	0.04	other

1.2　模拟前处理 MESHID 板块设置

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 板块,如图 1,对各部分进行实体设置。曲轴几何形状复杂,模型系统庞大,为了确保计算精度,对网格划分细致,达 300 万个单元。在铸造类型中选择砂型铸造,模具选用湿型砂(GreenSand)。初始浇注温度为 1 390 ℃,浇注速度为 1.1 m/s。

1.3　生产试验验证方法

采用 1.2 设计的工艺方案在车间进行浇注生产,对浇注曲轴试样进行线切割解剖,查找缺陷位置。在宏观缺陷位置处取样,采用美国标乐 Simplimet3000 自动镶样机进行热镶样,自动磨样机 E comet300 抛光,采用 4%硝酸酒精棉花擦拭腐蚀 15 s。光学显微镜 ZEISS Axio Imager.A1m 下观察缺陷及周围组织,并采用 HVS-30P 型数显维氏硬度计进行机械性能表征。

2　模拟结果分析

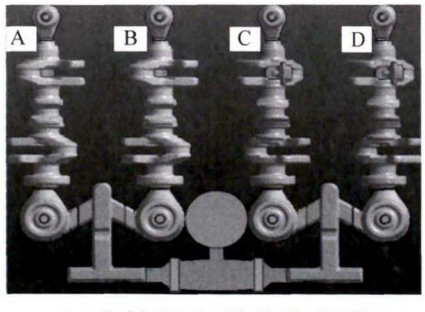
2.1　充型过程分析

充型过程如图 2。铁液自浇口杯进入直浇道,在直浇道底部转变方向流入横浇道,经过滤器过滤后流入内浇道。3 个浇道截面积大小关系为:$S_{直浇道}>S_{横浇道}>S_{内浇道}$,铁液由直浇道经横浇道进入内浇道的过程中速度越来越快,利于快速充填整个型腔。铁液从内浇道充填型腔和冒口,主要受到重力作用从型腔下部往上填充。虽然 4 根曲轴摆放位置不同造成充填过程所用时间有差别,但充填效果大致相同。整个充型过程平稳进行[6],未发生飞溅和湍流现象,利于气体排出,避免卷气、冲砂的发生。

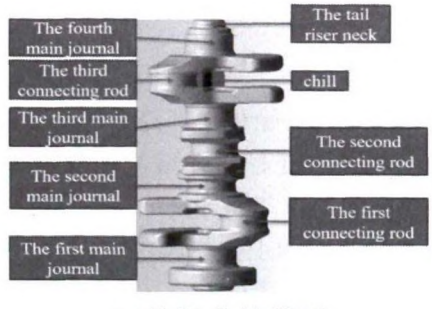
2.2　凝固过程分析

凝固过程如图 3,其中浅色区域为已凝固区域,深色区域为未凝固区域。模拟结果显示铸件远离浇口和保温冒口、模数较小区域优先凝固,而模数较大区域和离保温冒口较近区域最后凝固。从图 3(a)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。如图 3(b),凝固时间为 t=300 s 时,四根曲轴的尾端冒口颈均已凝固,与第四主轴颈断开,使尾端冒口起不到补缩作用。四个主轴颈是模数最大的区域,主轴颈心部为热节位置,最后凝固。从图 3(c)看出,圆圈内第四主轴颈心部出现较大孤立熔池区,这是因为冷铁加速了第三连杆颈的凝固,过早切断了第四主轴颈与第三主轴颈的联系。在尾端冒口起不到补缩作用的情况下,第四主轴颈易形成孤立熔池区。可增大尾端冒口颈,使尾端冒口对第四主轴颈起到补缩作用,进而解决第四主轴颈孤立熔池区问题。

第四主轴颈心部出现的孤立熔池区较大,易在后续凝固过程中产生铸造缺陷。对凝固过程中缺陷形成区域进行预测,如图 3(d),圆圈内部分为铸造缺



(a)曲轴浇注系统整体图



(b)单根曲轴模型

图 1　曲轴浇注系统前处理设置
Fig.1 Pre-processing settings for the gating system of crankshaft

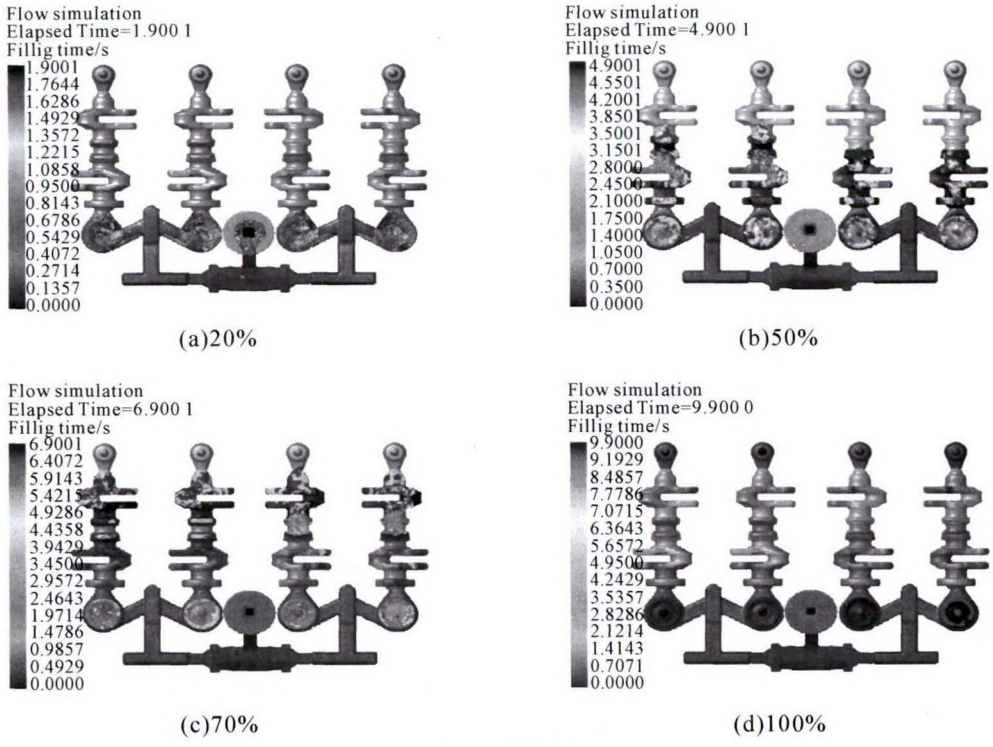


图 2 充型过程

Fig.2 Filling process

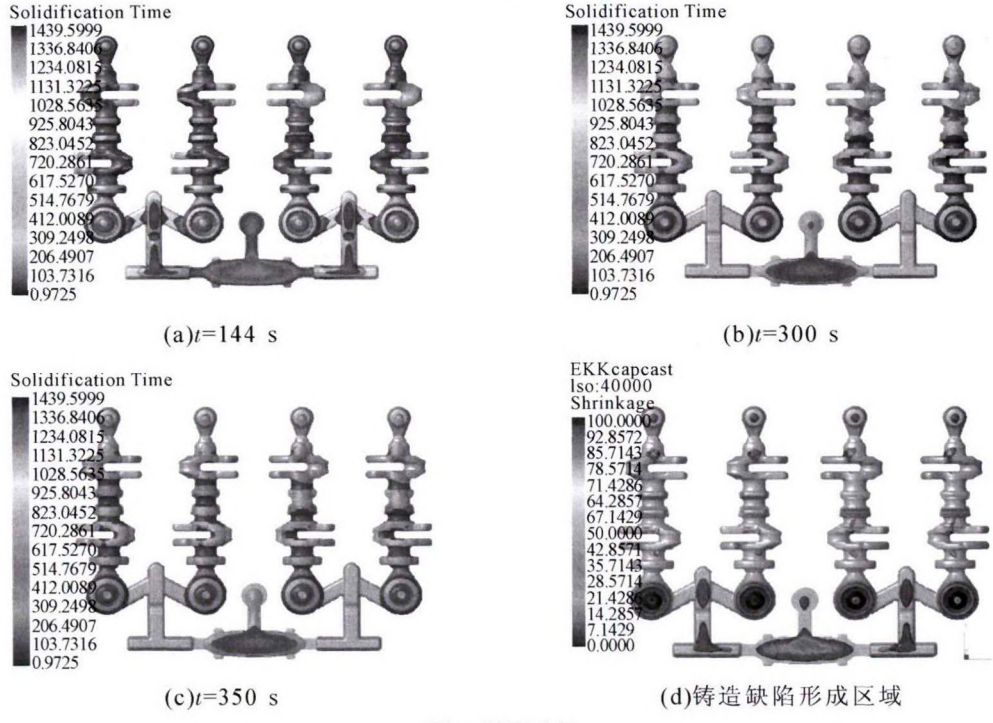


图 3 凝固过程

Fig.3 Solidification process

陷形成区域。第一、第二主轴颈内部存在较小的缺陷形成区域，建议在第一连杆颈处增加冷铁，加速第一、第二主轴颈心部的冷却速度进而抑制缺陷的形成。图 3(d)圆圈内为第四主轴颈孤立熔池区凝固过程中铸造缺陷形成区域。采用 EKK CAPCAST 中的 ISO volume 版块测量孤立熔池区体积以及铸造缺陷形成区域体积，如表 2。

表2 第四主轴颈孤立熔池与缺陷形成区域体积

Tab.2 Volumes of isolated molten pools and defects forming areas in the fourth main journals

曲轴编号	A	B	C	D
孤立熔池体积 /mm³	44.10	43.20	44.10	43.84
缩松形成区域体积 /mm³	6.36	6.04	6.17	6.00

从表 2 看出，4 根曲轴孤立熔池区体积大小接近，在散热条件相同的情况下，其凝固时间也基本相

同。球墨铸铁凝固区间较大[7]，孤立熔池等热节部位温度梯度较小，糊状凝固尤其突出[8,9]。较大的孤立熔池区最后凝固得不到补缩，极易在凝固收缩过程中产生较大的收缩应力从而形成收缩裂缝缺陷。从表2看出，第四主轴颈收缩裂缝缺陷形成区域体积约为6 mm^3。

3　生产试验验证

根据模拟预测结果，对易形成铸造缺陷的第四主轴颈沿线条所示切面（如图4）进行解剖，解剖后在圆圈内发现明显的裂缝缺陷。

对该试样进行镶样观察，如图5(a,b)。裂缝宽约10 μm，肉眼可见。裂缝将基体分成两部分，上部分为裂缝包裹区域，裂缝包裹区域呈球形，尺寸约黄豆大小，与预测缺陷形成区域体积在同一个数量级。如图5(c)，对比裂缝两侧球状石墨组织，裂缝包裹区域石墨颗粒相对较小，外侧石墨颗粒较大，说明凝固顺序存在明显不同。对裂缝两侧进行微观硬度测量如图5(d)，裂缝内侧的平均硬度比外侧低约30 HV，说明两侧组织不同。孤立熔池区最后凝固，初生石墨颗粒长大时间相对较短，因此最终尺寸相对较小。同时最后凝固的部分易出现合金元素贫化现象，碳化物等硬质相减少，硬度降低。组织和性能上的差别表明裂缝内侧部分晚于外侧部分凝固，证实了模拟预测结果。

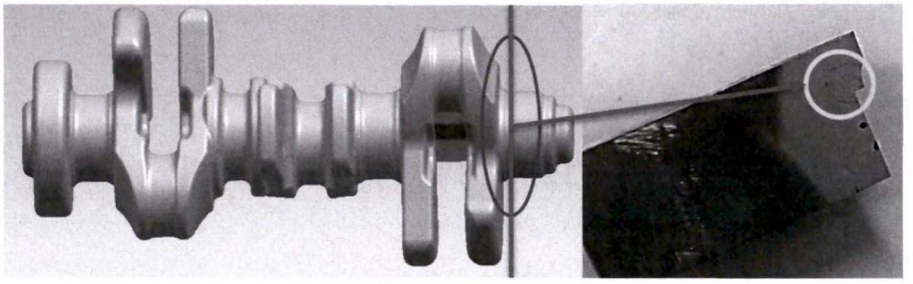
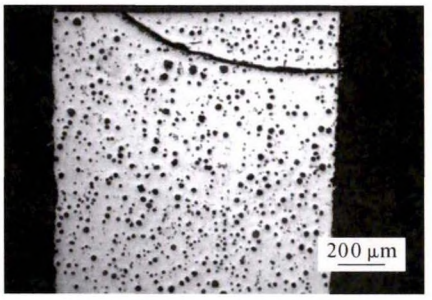
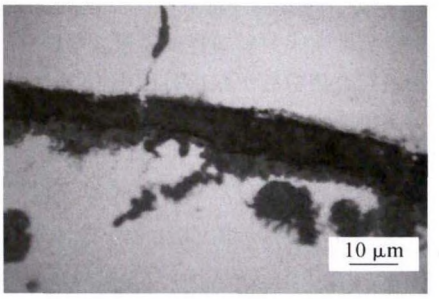


图4　第四主轴颈裂缝缺陷

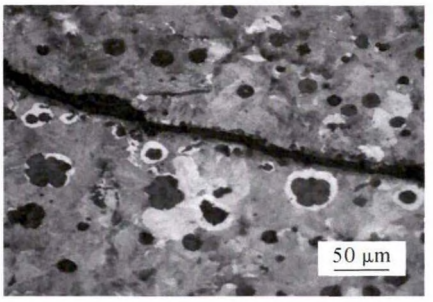
Fig.4　Crack defects in the fourth main journals



(a)裂缝附近组织(OM,25X)



(b)裂缝宽度(OM,1000X)



(c)裂缝两侧组织对比(OM,200X)

			235.7	235.3
	260.2	258.2	259.2	
262.3				255.8
		265.6		
			266.3	
	262.6			

(d)裂缝两侧硬度分布图(HV)

图5　裂缝缺陷

Fig.5　Crack defects

4　结论

（1）成功运用EKK CAPCAST软件预测汽车用球墨铸铁曲轴铸造过程中可能产生的缺陷种类，位置和大小，并通过生产试验证实了模拟预测的准确性。

（2）EKK CAPCAST软件模拟汽车曲轴铸造过程中反映充型阶段平稳，无湍流现象；预测凝固阶段第四主轴颈易因凝固顺序不同产生较大收缩应力进而形成收缩裂缝缺陷。生产试验证实第四主轴颈心部位置因凝固顺序不同步而产生了裂缝缺陷，并且

裂缝包裹区域体积大小与预测缺陷形成区域体积在同一个数量级。

(3)基于模拟预测和生产试验分析,对铸造工艺方案进行优化,建议在第一连杆颈处增加冷铁,避免第一、第二主轴颈产生铸造缺陷;增大尾端冒口颈利于尾端冒口对第四主轴颈补缩进而消除第四主轴颈裂缝缺陷。

参考文献:

[1] 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.

[2] Mane V V, Khire M Y. Investigation of Critical Design Parameters Causing Shrinkage Related Castings Defects of Cast Iron Component Supported by Simulation[J]. International Journal of Advance Engineering and Research Development,2017(12):887-897.

[3] 张帆,魏胜辉,卢景秀,等. 球墨铸铁连杆铸件凝固过程数值模拟运行参数的确定[J]. 铸造,2018(4):327-330.

[4] Sun Y, Luo J, Mi G F. Numerical simulation and defect elimination in the casting of truck rear axle using a nodular cast iron [J]. Materials and Design, 2011(32) :1623-1629.

[5] 毕海香,于建忠,李永刚,等. 减少大型球墨铸铁气缸盖缩松缺陷探讨[J]. 铸造,2018(9):853-855.

[6] 肖飞,谢世坤,张庭芳,等. 铝合金变速箱低压铸造充型与凝固仿真及优化[J]. 热加工工艺,2015(5):53-57.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

招贤纳士

襄阳聚力新材料科技有限公司

一、招聘销售工程师

任职要求:

1. 本科及以上学历,铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业,熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验,对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上,对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

二、招聘销售经理

任职要求:

1. 大专及以上学历, 铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业,熟练掌握办公软件,懂产品市场宣传,营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向,诚信可靠,乐观向上,抗压力强。
5. 逻辑思维清晰,做事干净利落,工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

三、销售助理

任职要求:

1. 男性,30 岁以下,本科学历,身体健康,适合经常出差。
2. 性格外向,诚信可靠,乐观向上,抗压力强。
3. 逻辑思维清晰,做事干净利落,工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com