

数值模拟参数对铸钢件缩孔缩松预测精度的影响

吉晓霞, 常军委, 韩 兴, 刘孝山, 朱 琳

(中国一重天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

摘要: 采用ProCAST软件对ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB铸钢件进行了铸造过程数值模拟研究和缩孔缩松预测, 通过解剖试验得到冒口内实际缩孔缩松分布。研究了不同模拟参数对冒口内缩孔缩松预测精度的影响, 得到预测的缩孔缩松与实测结果较为吻合的最优计算参数。

关键词: 模拟参数; 缩孔缩松; 解剖; 数值模拟

金属的充型和凝固过程是一个非常复杂的物理过程, 涉及多种物理现象的耦合, 如流体力学^[1]、相变^[2]、缩孔缩松^[3]、宏观偏析^[4-5]、铸件和模具之间的热传导^[6]以及铸件凝固过程中产生的热应力等^[7]。

随着计算机技术的快速发展, 数值模拟技术已经在铸造行业得到了广泛的应用。铸造过程数值模拟技术不仅可用于优化模具尺寸和浇注工艺^[8-9]、预测铸件的内部缺陷^[10-11], 而且替代了传统的试错方法^[7, 12], 降低了试验成本, 提高了生产效率。另外, 伴随着 ProCAST、ADSTEFAN、MAGMA 等优秀铸造过程仿真软件的出现^[9, 13-14], 铸造过程变得更加透明, 并在此技术上实现了可视化, 与铸造相关的设计和优化变得更加容易和便捷。

大量的研究表明, 数值模拟和试验检测相结合的方法是优化铸件浇注参数和提高铸件质量的有效工具。将实测结果与模拟结果相比较, 通过调整模拟参数, 使模拟结果尽可能接近实测, 如此可以建立适用于特定金属材料的铸造模拟计算模型, 进而准确预测铸造缺陷, 优化工艺设计。因此, 研究不同模拟参数对铸钢件凝固过程的影响具有现实意义。本试验以实际浇注的一个试验件为研究对象, 采用 ProCAST 软件对其进行铸造过程数值模拟计算, 研究模拟参数对缩孔缩松预测精度的影响, 得到使模拟结果与实测较为吻合的模拟参数。

1 计算方法

采用ProCAST软件模拟铸件凝固过程一般可以分为三个部分, 分别为几何模型网格划分、参数设置和计算及结果分析。模拟计算结果的准确性很大程度上取决于网格质量、计算域内材料热物性参数及计算的参数设置是否准确等。

1.1 几何模型

试验铸件如图1所示, 重约3 t, 最大外形尺寸约1 440 mm × 1 800 mm × 1 020 mm, 材质为ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB, 化学成分见表1。采用普通砂型铸造, 面砂为厚度40 mm的铬铁矿砂, 背砂为硅砂。其铸造工艺如图2所示, 采用开放式浇注系统, 内浇道入口位于铸件厚度方向的中间位置。

1.2 计算参数设置

根据表1所示化学成分, 利用ProCAST软件自带物性参数计算得到铸件材料热物性, 其中液相线温度为1 498 °C, 固相线温度为1 412 °C, 其他物性参数见图3a、b、c、d。铬铁矿砂和硅砂的物性参数来自ProCAST软件自带材料数据库, 见图3e、f、g。

作者简介:

吉晓霞(1984-), 女, 工学硕士, 研究方向为铸造过程CAD/CAE分析。E-mail: jixiaoxia1984920@126.com

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)12-1355-07

收稿日期:

2019-07-22 收到初稿,

2019-09-03 收到修订稿。



图1 试验件实物图

Fig. 1 Steel casting for test research

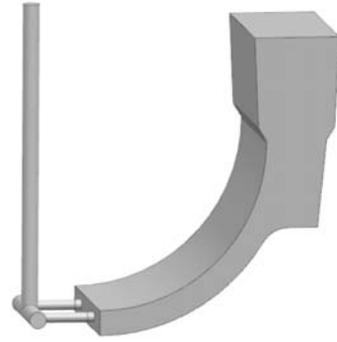
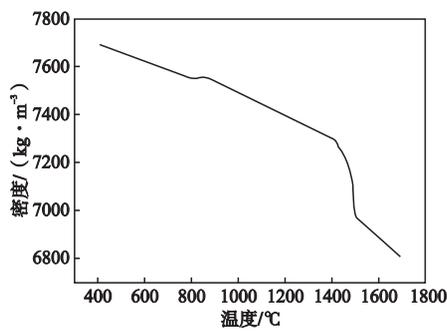


图2 试验件铸造工艺图

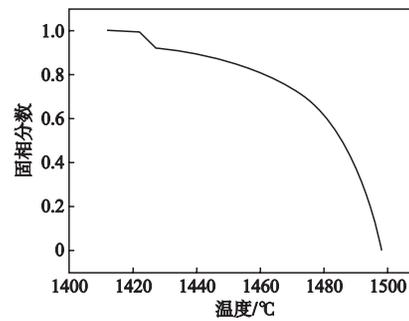
Fig. 2 Casting process of steel casting for test

表1 ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB steel casting

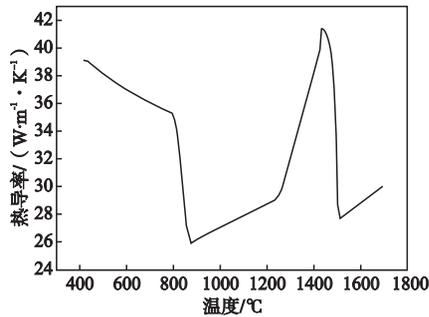
												$w_B / \%$	
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N	B	Co	Ti	Al	
0.14	0.25	0.94	9.37	0.26	1.4	0.21	0.055	0.019	0.013	0.93	0.014	0.014	



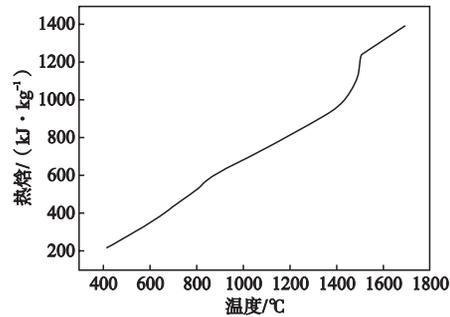
(a) 铸件材料密度



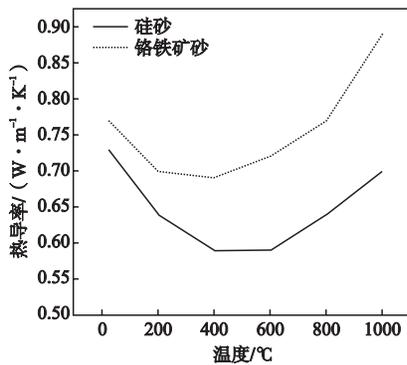
(b) 铸件材料固相分数



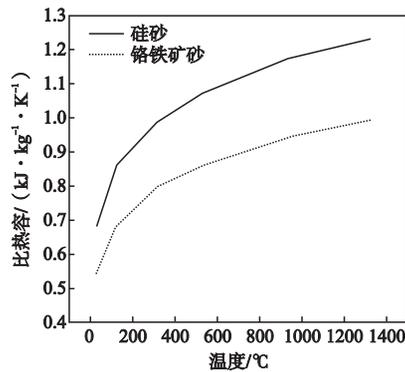
(c) 铸件材料热导率



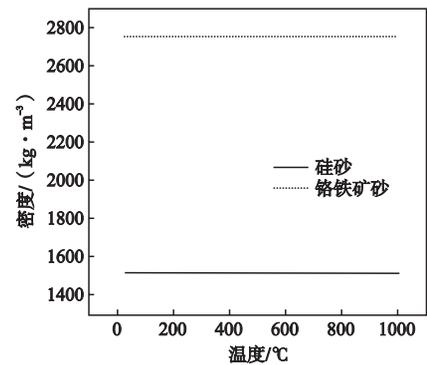
(d) 铸件材料热焓



(e) 型砂热导率



(f) 型砂比热容



(g) 型砂密度

图3 主要热物性参数

Fig. 3 Main thermal physical properties

初始参数设置如表2所示。其中,参数pipefs是用来判断缩管的固相率临界值,取值范围0~1,软件默认值为0.3,缩管是由冒口钢液自由面收缩而产生的,也叫一次缩孔。参数macrofs是用来判断宏观缩孔缩松的固相率临界值,取值范围0~1,软件默认值为0.7,当固相率低于0.7,形成宏观缩孔缩松,固相率在0.7~1之间,形成微观缩松;参数feedlen指补缩距离,数值为几毫米到几厘米之间,软件默认5 mm,通常是在固相率高于macrofs以上使用。表示微观缩松发生在距离macrofs等值面大于feedlen的范围,而在macrofs等值面与feedlen等值面之间的范围内,仍然产生宏观缩孔缩松。数值模拟计算中采用的铸件-砂型界面换热系数如图4所示,表示为JHTC,冒口上方覆盖剂的添加采用在钢液自由表面设置热流及换热的方式,钢液表面与空气换热系数表示为free HTC。初步只计算温度场,不计算流场。

2 初步计算结果

图5所示为初步计算的凝固过程分析。可见铸件顺序凝固性较好,最后凝固部位在冒口中部靠下位置处。

将铸件冒口在几何中心位置处进行火焰切割解剖,再对剖面进行打磨处理,可观察到剖面处的缩孔缩松形貌。初步模拟缩孔预测与实际解剖结果进行对比分析如图6所示,可见模拟一次缩孔和二次缩孔形貌深度与实测存在一定差别。为使模拟结果与实测尽可能吻合,需对表2中的模拟参数进行调整,每调整其中一个参数,其他参数保持不变。

3 数值模拟参数变化对计算结果和精度的影响

3.1 缩管临界固相率 pipefs、宏观缩孔缩松临界固相率 macrofs 及补缩距离 feedlen 的影响

图7为pipefs对冒口内缩孔的影响。随着pipefs取值

增大,冒口上方缩管深度减小,缩管下方二次缩孔范围变小,整体缩孔深度变浅。原因是:用于判断缩管的值越小,产生缩管的固相率区间越大,缩管深度就越深,收缩量越大。

图8为macrofs对缩孔的影响。随着macrofs取值增大,冒口上方缩管深度加深,缩管下方二次缩孔范围变大,整体缩孔深度加深。原因是:用于判断宏观缩孔的macrofs值越大,宏观缩孔缩松产生的固相率区间越大,收缩量就越大。

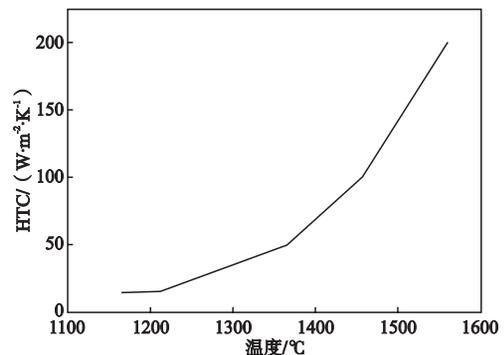


图4 铸件-砂型界面换热系数

Fig. 4 Interface heat transfer coefficient between casting and sand mold

表2 初始模拟计算参数
Table 2 Initial simulation parameters

参数名称	参数设置
缩管临界固相率/%	0.3
宏观缩孔缩松临界固相率/%	0.7
补缩距离/mm	5
钢液表面与空气换热系数/(W·m ² ·K ⁻¹)	1
铸件-砂型界面换热系数	图4所示曲线
浇注温度/°C	1 558
是否计算充型	否

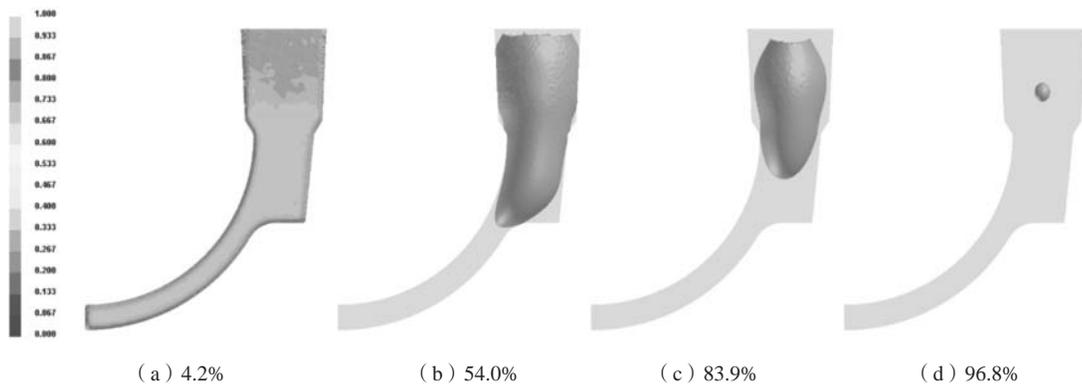


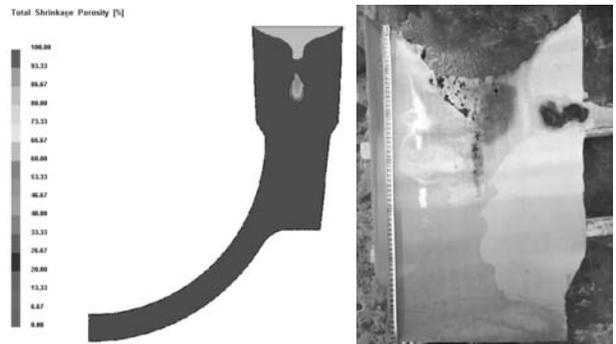
图5 凝固过程分析

Fig. 5 Solidification process of casting

图9为feedlen对冒口内缩孔的影响。随着feedlen取值增大，冒口上方缩管深度不变，缩管下方二次缩孔范围变大，整体缩孔深度加深。原因是：在macrofs等值面与feedlen等值面之间的范围内产生宏观缩孔缩松，feedlen值越大，macrofs等值面与feedlen等值面之间的范围越大，产生宏观缩孔缩松的量就越大。

3.2 冒口钢液表面与空气换热系数的影响

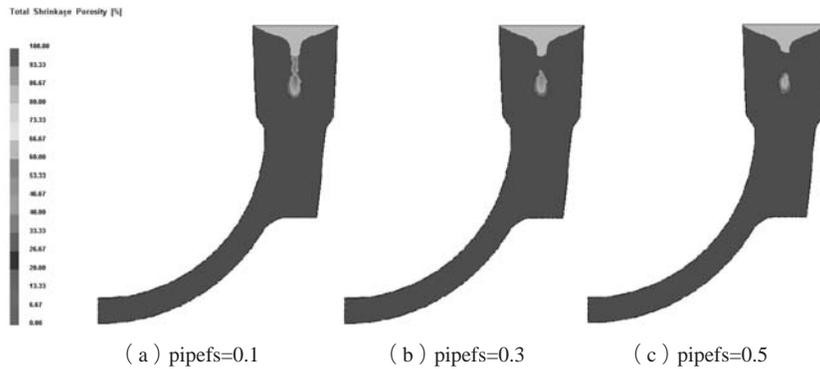
图10为冒口钢液表面换热系数free HTC对冒口内缩孔的影响，四种情况分别表示换热系数的取值为1、2、5、7 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 。随着换热系数增大，缩管深度变浅，缩管下方二次缩孔范围变大，而且与缩管之



(a) 缩孔预测结果 (b) 实际缩孔分布

图6 冒口一次缩孔和二次缩孔

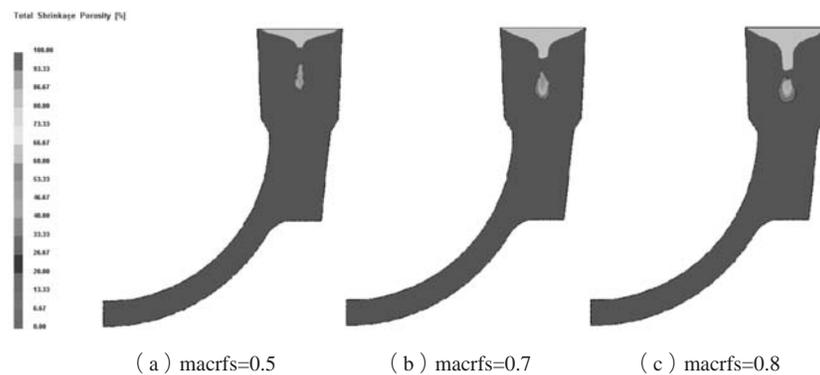
Fig. 6 Shrinkages in riser zone of casting



(a) pipefs=0.1 (b) pipefs=0.3 (c) pipefs=0.5

图7 缩管临界固相率pipefs对冒口内缩孔的影响

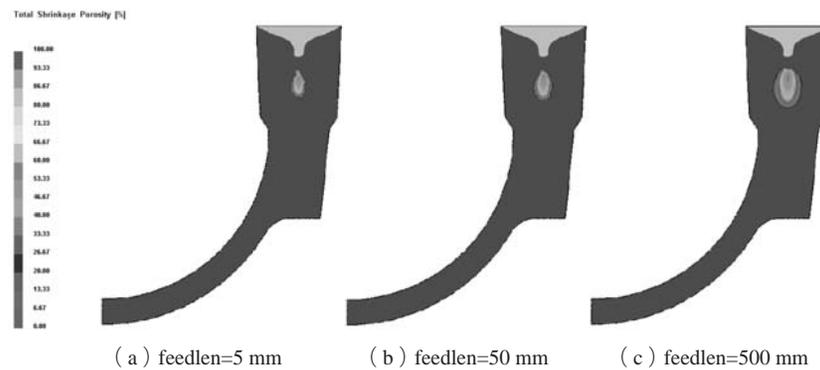
Fig. 7 The impact of pipefs on shrinkage cavity/porosity in riser zone of casting



(a) macrofs=0.5 (b) macrofs=0.7 (c) macrofs=0.8

图8 宏观缩孔缩松临界固相率macrofs对冒口内缩孔的影响

Fig. 8 The impact of macrofs on shrinkage cavity/porosity in riser zone of casting



(a) feedlen=5 mm (b) feedlen=50 mm (c) feedlen=500 mm

图9 补缩距离feedlen对冒口内缩孔的影响

Fig. 9 The impact of feedlen on shrinkages in riser zone of casting

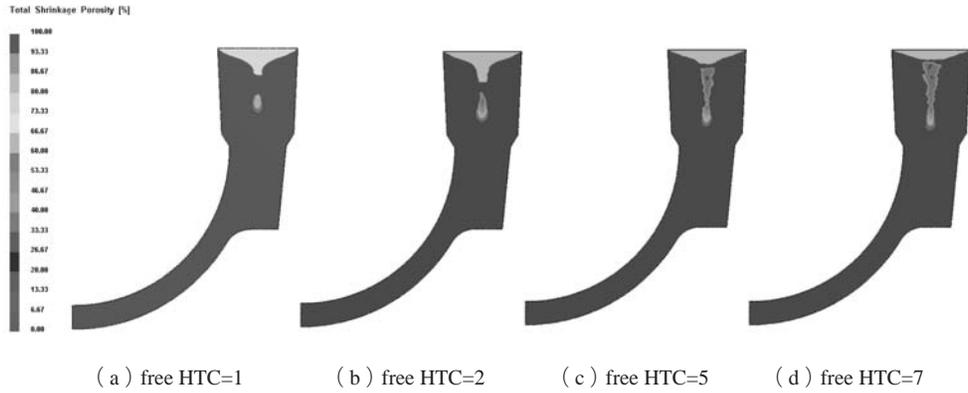


图10 钢液表面换热系数free HTC对冒口内缩孔的影响
Fig. 10 The impact of free HTC on shrinkages in riser zone of casting

间的距离减小，趋向衔接，整体缩孔深度加深。原因是：钢液与空气界面换热系数越大，冒口上表面凝固越快，凝固结束时缩管越浅，冒口中钢液补缩越差，二次缩孔范围就越大。

3.3 铸件 - 砂型界面换热系数的影响

三种不同的铸件-砂型界面换热系数如图11所示，其中MHTC是Magma软件常用铸钢件-砂型界面换热系数，JHTC是根据实际浇注经验得到的铸钢件-砂型界面换热系数，HTC=500表示铸钢件-砂型界面换热系数为 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。图12为三种界面换热系数对冒口内缩孔的影响，可见不同换热系数情况下，缩管深度基本相同，缩管下方二次缩孔范围略有不同，但缩管和二次缩孔总体范围变化不大。表明换热系数对冒口整体缩孔缩松影响不大。由于所选三种换热系数没有明显的比较规律，其对缩孔缩松预测结果的影响有待于进一步研究。

3.4 浇注温度的影响

图13为浇注温度对冒口内缩孔的影响。随着浇注温度升高，缩管深度有所加深，缩管下方二次缩孔

范围基本不变，深度略有加深。原因是：浇注温度越高，液态收缩量越大，一次缩孔就越大。

3.5 计算充型的影响

图14是计算充型对冒口内缩孔的影响，充型时间57 s。由图可见，计算充型对缩管及二次缩孔的形貌和深度影响较小，原因在于充型时间很短，充型过程对钢液凝固影响很小。

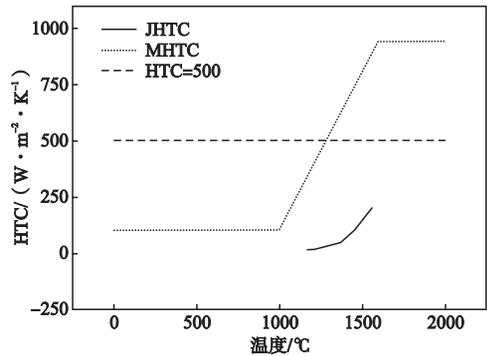


图11 三种不同的铸件-砂型界面换热系数
Fig. 11 Three different kinds of casting-sand HTC

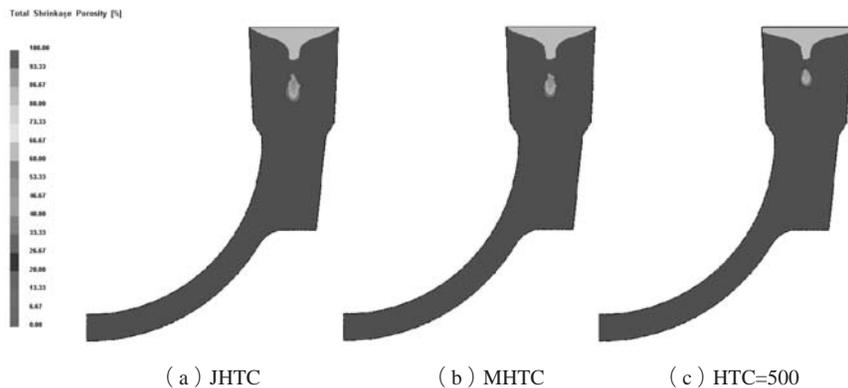


图12 铸件-砂型界面换热系数对冒口内缩孔的影响
Fig. 12 The impact of casting-sand HTC on shrinkages in riser zone of casting

3.6 综合调整参数设置

综合考虑前述各影响因素, 经过多种组合因素计算, 采用表3所示的优化参数设置, 其缩孔预测结果与实际结果较为接近, 如图15所示。

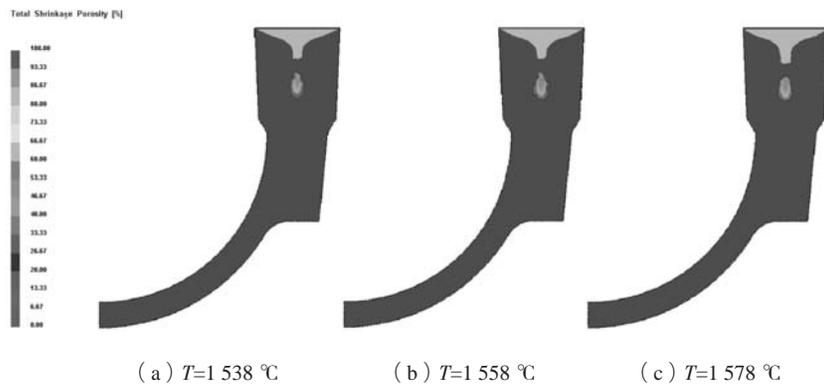


图13 浇注温度对冒口内缩孔的影响

Fig. 13 The impact of pouring temperature on shrinkages in riser zone of casting

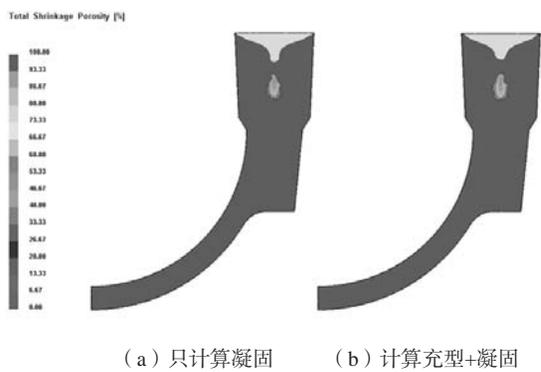


图14 计算充型对冒口内缩孔的影响

Fig. 14 The impact of computing filling on shrinkages in riser zone of casting

表3 优化模拟计算参数
Table 3 Optimized simulation parameters

参数名称	参数设置
缩管临界固相率/%	0.3
宏观缩孔缩松临界固相率/%	0.9
补缩距离/mm	5
钢液表面与空气换热系数/($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	6
铸件-砂型界面换热系数	图4所示曲线
浇注温度/ $^{\circ}C$	1 558
是否计算充型	否
铸件热物性参数	ProCAST软件计算
型砂热物性参数	ProCAST软件自带

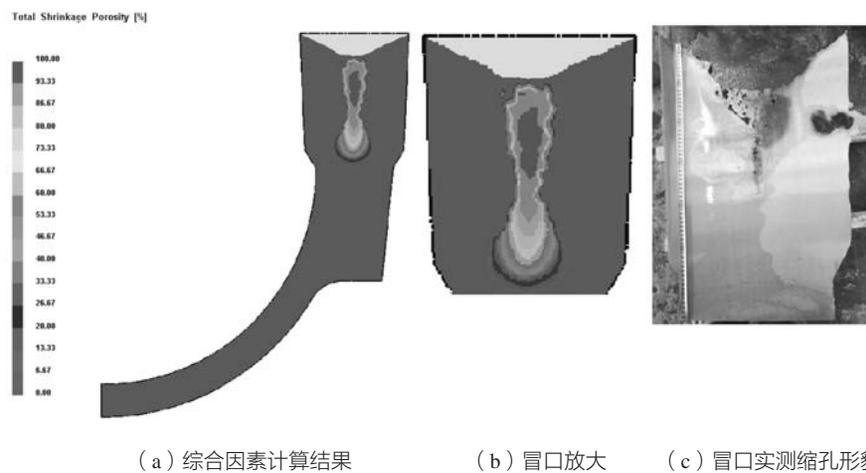


图15 综合参数对冒口内缩孔的影响

Fig. 15 The impact of optimized simulation parameters on shrinkage cavity/porosity in riser zone of casting

4 结论

通过研究数值模拟参数对缩孔缩松预测结果及精度的影响, 得到了能使预测结果与实测结果较为吻合的模拟参数, 这些参数对于ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbN材料的砂型铸造模拟具有一定的适用性。

参考文献:

- [1] SERGEY V S, SAMUEL P. Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22 (2) : 229-248.
- [2] NI J, BERKERMANN C. A volume-average two-phase model for transport phenomena during solidification [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1991, 22 (3) : 349-346.
- [3] ROY N, SAMUEL A M, SAMUEL F H. Porosity formation in Al-9wt pct Si-3 wt pct Cu alloy system; metallographic observation [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A: 415-429.
- [4] REDDY A V, BECKERMANN N C. Modeling of macrosegregation due to thermosolutal convection and contraction driven flow in direct chill continuous casting of an Al-Cu round ingot [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28 (3) : 479-489.
- [5] KRANE M J M, INCROPERA F P, GASKELL D R. Solidification of a ternary metal alloy: a comparison of experimental measurements and model predications in a Pb-Sb-Sn system [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1998, 29 (3) : 843, 853.
- [6] LOULOU T, ARTYUKHIN E A, BARDON J P. Estimation of thermal contract resistance during the first stages of metal solidification process: experimental setup and results [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42 (12) : 2129-2142.
- [7] BELLET M, DECULTIEUX F, MENAI M, et al. Thermomechanics of the cooling stage in casting processes: three dimensional finite element analysis and experimental validation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1996, 27 (1) : 81-99.
- [8] 孙智刚, 林琳, 王耀琨. 模拟软件在优化上注钢锭模设计中的应用 [J]. 大型铸锻件, 2011 (3) : 23-25.
- [9] 李成斌, 范正结. 大钢锭的凝固工艺数值模拟研究 [J]. 宝钢技术, 2011 (4) : 59-62, 67.
- [10] 李振彦, 安红萍, 陈慧琴. 大型锻造用钢锭凝固缩松缺陷的数值模拟 [J]. 太原科技大学学报, 2012, 33 (4) : 306-310.
- [11] 张向琨, 石伟, 高国峰, 等. 空心钢锭凝固过程温度场模拟与缩孔、缩松预测 [J]. 铸造, 2000, 49 (6) : 344-348.
- [12] 李振彦, 陈慧琴. 55t 大型锻造用钢锭缩松缺陷的模拟与试验研究 [J]. 铸造设备与工艺, 2012 (5) : 15-18.
- [13] HU H, CHU Y, CHENG P. Die design and process optimization of die cast V6 engine block [J]. China Foundry, 2005, 2 (1) : 21-27.
- [14] 杨弋涛. 金属凝固过程数值模拟及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

Effect of Simulation Parameters on Prediction Accuracy of Shrinkage and Dispersed Shrinkage in Riser of Steel Castings

Ji Xiao-xia, CHANG Jun-wei, HAN Xing, LIU Xiao-shan, ZHU Lin
(CFHI, Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., Tianjin 300457, China)

Abstract:

ProCAST software was used to simulate the casting process of ZG13Cr9Mo2Co1NiVNbNB steel castings and predict the shrinkage defects. The shrinkage defects in riser zone was first measured by dissection way, and then simulated by using different process parameters to obtain optimal simulation parameters. The impact of simulation parameters on the prediction accuracy of shrinkage and dispersed shrinkage in riser zone was studied. The results show that the predicted shrinkage defects results are more close to the actual measured ones.

Key words:

simulation parameter; shrinkage and dispersed shrinkage; dissection; numerical simulation
