

计算机应用

铸造充型过程中浇不足缺陷的数值计算研究

曹流, 廖敦明, 胡柏乐, 张影, 陈涛

(华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 浇不足是铸造生产中常见的缺陷, 目前实验手段只能测量和分析铸件最终的浇不足缺陷分布, 难以直接观测浇不足缺陷的形成和演变过程, 准确预测浇不足缺陷的关键在于处理凝固过程中流动行为的转变。在已有的处理流动行为转变的基础上, 提出一随固相率变化的浇不足缺陷计算模型, 即高固相率区采用临界固相率方法, 低固相率区采用变粘度方法, 中等固相率区采用多孔介质拖拽模型。计算了一组多壁厚铜合金低压铸造工艺, 对比分析了模拟和实验铸件充型高度, 结果对应较好, 证明了所提出的浇不足缺陷计算模型的正确性。

关键词: 浇不足; 充型过程; 多孔介质; 变粘度; 铸造; 数值模拟

中图分类号: TG249; TP391.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2018) 06-0487-05

Study on Numerical Simulation of Misrun Defect During Casting Filling Process

CAO Liu, LIAO Dun-ming, HU Bai-le, ZHANG Ying, CHEN Tao

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract : Misrun is a common defect in casting production. The current experiment measures can only be used for analyzing the final distribution of misrun defect, the formation process of which is difficult to be observed directly. The key to accurately predict the defect is the way to handle with the conversion of flow behavior during the solidification process. On the basis of the existing methods for treating the conversion of flow behavior, a calculation model for misrun defect based on solid-fraction is developed, i.e. the critical solid-fraction method being adopted for the mushy region with high solid-fraction, the variable viscosity method for the mushy region with low solid-fraction, and the porous media drag-based model for the mushy region with middle solid-fraction. A set of low pressure die casting crafts with different wall thicknesses were simulated, and the casting filling height of simulation results coincides with the experiment results, which certifies the correctness of the adopted model.

Key words : misrun; filling process; porous media; variable viscosity; casting; numerical simulation

浇不足是铸造生产中常见的缺陷, 显著影响充填铸件的完整度, 严重时导致铸件直接报废^[1-2]。目前实验手段只能测量和分析铸件最终的浇不足缺陷分布, 难以直接观测铸造过程中浇不足缺陷的形成和演变过程^[3]。模拟仿真技术可以有效地预测可能出现的浇不足缺陷, 从而提前对工艺过程进行优化^[4]。准确预测浇不足缺陷的关键在于处理凝固过程中流动行为的转变, 在计算流体力学领域中, 国内外学者对此进行了一些相关的研究^[5-7]。Carman^[8]将糊状区等效为多孔介质, 在达西定律的基础上提出了随固相率变化的多孔介质拖拽力模型, 即Carman-Koseny公式; Frehse^[9]等采用一随切变速率而变化的粘度来计算不可压缩牛顿流体

的稳流过程, 根据流体性质实现粘度随着切变速率的变化而增大或减小; Wang^[10]等采用模拟仿真手段对熔模铸造充型凝固过程进行了计算, 认为流体单元固相率高于某个临界值之后便停止流动。因此, 结合已有的凝固过程中处理流动行为的转变方法, 并在此基础上提出更为合理和全面的计算模型, 对准确预测铸造过程中浇不足缺陷具有重要价值。

本文对铸造充型过程中流动行为的转变机理进行分析, 在已有的处理流动行为转变的方法基础上, 提出一随固相率变化的浇不足缺陷计算模型。控制方程离散采用FVM法, 压力-速度耦合采用PISO算法, 界面追踪采用VOF算法, 开发了考虑流动行为转变的铸造

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-0229), 国家数控重大专项 (2012ZX04010-031)。

收稿日期: 2018-04-16收到初稿, 2018-04-24收到修订稿。

作者简介: 曹流 (1991-), 男, 博士, 从事铸造充型过程数值模拟研究。E-mail: caoliu@hust.edu.cn

通讯作者: 廖敦明, 博士, 教授。E-mail: ldmhust73@163.com

充型过程流动场计算代码。为了证明所采用计算模型的准确性，计算了一组多壁厚铜合金低压铸造工艺，对比分析模拟和实验铸件充型高度。

1 物理模型及数值求解

1.1 浇不足缺陷计算模型

在计算凝固过程中流动行为的转变之前，需了解铸造充型过程中流动行为的转变机理，即枝晶生长与液相流动之间的相互作用。在凝固初始阶段，枝晶间还未形成有效连接，未能对液相流动产生大的影响，枝晶会跟随液相运动；当凝固进行到一定程度之后，枝晶间形成相互连接，对液相流动起到一定的阻碍作用，但由于枝晶间连接还不是很充分，液相可以在枝晶间流动，枝晶也会受到液相的作用而运动；在凝固后期阶段，枝晶间形成了牢固的连接，液相无法在枝晶间流动，枝晶对液相起到堵塞作用。

由上述分析可知，可以通过考虑不同凝固阶段来获得浇不足缺陷计算模型。首先定义两个参数用于区分不同凝固阶段：下临界固相率 F_{down} 和上临界固相率 F_{up} ，易知 F_{down} 和 F_{up} 需满足 $0 < F_{down} < F_{up} < 1$ ， F_{down} 和 F_{up} 的数值需结合实际生产来确定。当固相率 $\gamma < F_{down}$ 时，枝晶未能对液相流动产生大的影响，此时可以认为流体的粘度发生变化，通过增大粘性力来体现枝晶对液相流动的影响。本文采用文献[6]所提出的变粘度公式来计算固相率增加时流体粘度的变化：

$$\mu_{equivalent} = \mu_{liquid} \cdot \left(1.0 - \frac{\gamma}{F_{up}}\right)^{-1.55} \quad (1)$$

式中： $\mu_{equivalent}$ 为等效动力粘度，Pa·s； μ_{liquid} 为液相动力粘度，Pa·s。

当固相率满足 $F_{down} \leq \gamma \leq F_{up}$ 时，枝晶对液相流动起到一定的阻碍作用，此时可以将糊状区等效为多孔介质，将糊状区对液相流动的影响等效为多孔介质对液相流动的拖拽作用。本文采用文献[8]所提出的Carman-Koseny公式来计算多孔介质拖拽系数 K_γ ：

$$K_\gamma = \rho D_{drag} \cdot \frac{\gamma^2}{(1.0 - \gamma)^3} \quad (2)$$

式中： ρ 为密度，kg/m³； D_{drag} 为自定义常数，用于表征拖拽力的大小，具体取值需结合实际实验进行确定，1/s。

当固相率时 $\gamma > F_{up}$ ，枝晶间形成了牢固的连接，液

相无法在枝晶间流动。对于一般铸造过程如重力铸造等，可以认为此时固相区速度为零；对于一些特殊铸造过程如连续铸造等，由于铸造过程中施加了额外的作用力，可以认为此时固相区速度为对应的抽拉速度。本文所采用的计算公式为：

$$\vec{U}_{solid} = \vec{U}_{pull} \quad (3)$$

式中： \vec{U}_{solid} 为固相区速度，m/s； \vec{U}_{pull} 为抽拉速度，m/s。

对于一般铸造过程， \vec{U}_{pull} 的数值为零。

1.2 气-液-固多相流耦合数学模型及数值求解

在获得浇不足缺陷计算模型之后，本文采用VOF算法来表征不同区域的相体积比。控制体积比 ϕ 分布规律的方程为体积比方程^[11]：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \vec{U}) = 0 \quad (4)$$

式中， \vec{U} 为速度，m/s。

Navier-Stokes方程^[12]即动量方程用于控制速度 \vec{U} 的变化：

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) - \nabla \cdot \vec{\tau} = -\nabla p + \vec{S} \quad (5)$$

式中： t 为时间，s； $\vec{\tau}$ 为应力张量； p 为压力，Pa； \vec{S} 为源项。

当将糊状区对液相的阻碍作用等效为多孔介质拖拽力时，多孔介质拖拽力会以体积力的形式整合到动量方程中，此时的源项 \vec{S} 为：

$$\vec{S} = C\kappa \nabla \phi + \rho \vec{g} - K_\gamma (\vec{U} - \vec{U}_{pull}) \quad (6)$$

式中： C 为表面张力系数，N/m； κ 为界面处的曲率； \vec{g} 为重力加速度，m/s²。式(6)中右端第一项表示表面张力，右端第二项表示重力，右端第三项表示多孔介质拖拽力。可以看出，施加的多孔介质拖拽力大小与速度大小成正比，方向为速度反方向，从而可以起到阻碍液相流动的效果。

本文采用有限体积法(FVM)^[13]对控制方程进行离散，FVM的离散思想是分别针对单个控制单元，对控制方程两端进行体积分，并进行相应的插值操作，最终获得可求解的离散式。采用PISO算法^[14]进行压力-速度耦合求解，PISO算法是一种非迭代的瞬态流场求解算法。图1为本文的计算流程图。

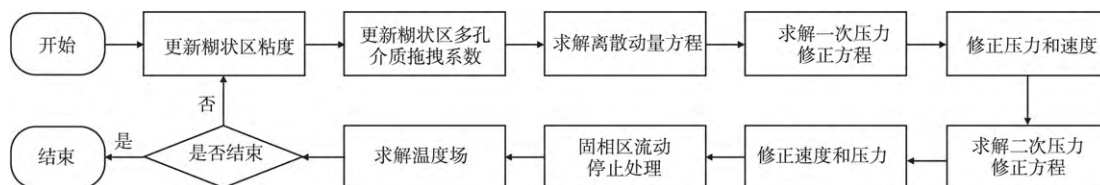


图1 计算流程图

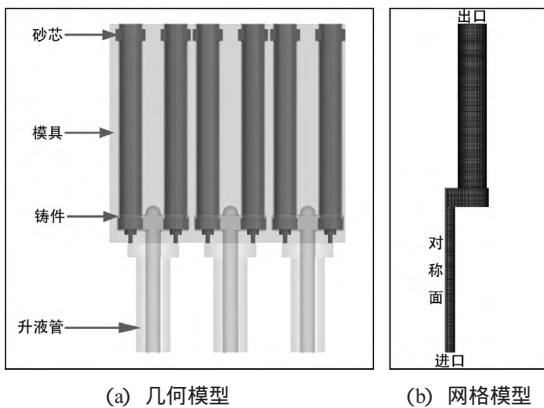
Fig. 1 Flowchart of calculation

2 结果与讨论

根据上述物理模型及数值求解流程，本文完成了考虑凝固过程中流动行为转变的铸造充型过程计算代码编程。为了验证所采用流场模型的准确性，计算一组多壁厚铜合金低压铸造工艺，获得不同壁厚下的充型高度，并与实际试验结果进行对比。另外需要说明的是，本文所采用的前处理网格划分工具为ICEM CFD，后处理工具采用开源后处理软件ParaView。

2.1 多壁厚低压铸造工艺试验方案及模拟参数设置

图2为多壁厚铜合金低压铸造工艺的几何及网格模型，其中，实际试验中为尽可能避免设备状况波动对充型结果的影响，采用了一模三腔工艺，而模拟计算中为了减少计算量，采用了单个铸件的对称模型。此铸造工艺模型的整体尺寸为：400 mm×555 mm×150 mm。为了获得不同壁厚的铸件，实际试验中在模具内部放置不同直径的砂芯，得到的多壁厚铸件壁厚尺寸分别为：2.3 mm、2.5 mm、2.8 mm、3.2 mm和3.5 mm。图3为铜合金低压铸造试验中的模具和砂芯实物图。试验所采用的铜合金为GKMS60，模拟过程中所设置的参数如表1所示。其中，上、下临界固相率依据商用化软件Fluent的物性参数库进行设定。



(a) 几何模型 (b) 网格模型
图2 多壁厚铜合金低压铸造工艺

Fig. 2 Low pressure casting processes of copper alloy with multi-wall thicknesses

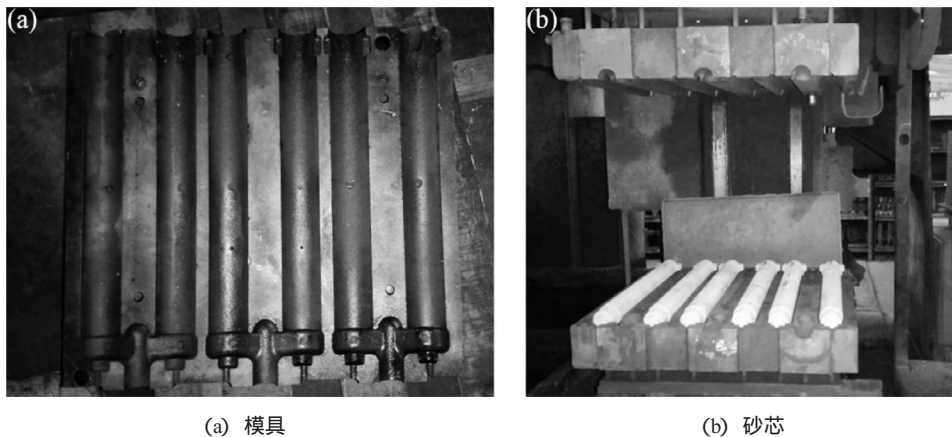
表1 模拟计算过程中所设参数

Table 1 Parameters required for calculation

参数	数值
铜合金密度/(kg·m ⁻³)	7 000
空气密度/(kg·m ⁻³)	1
铜液动力粘度/(Pa·s)	3.22e-3
空气动力粘度/(Pa·s)	1e-5
铜液与空气间表面张力系数/(N·m ⁻¹)	1.2
重力加速度/(m·s ⁻²)	{0, 0, -9.8}
进口压力	0 s, 0 bar; 5 s, 0.5 bar;
	10 s, 0.5 bar
出口压力/Pa	0
铜合金液相线温度/°C	921.4
铜合金固相线温度/°C	890
铜合金潜热/(J·g ⁻¹)	153
铜合金比热容/(J·g ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.48
铜合金导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	120
进口温度/°C	1 015
铸件-升液管换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	500
铸件-模具换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	2 000
铸件-砂芯换热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	1 000
下临界固相率 F_{down}	0.15
上临界固相率 F_{up}	0.67
D_{drag}/s^{-1}	10

2.2 模拟与试验结果对比及分析

图4为不同壁厚铸件的工艺模拟结果对比，包括最终铜相分布以及最终速度分布。从最终铜相模拟结果可以看出，随着壁厚不断加大，铸件最终充型高度逐渐增加，其原因是壁厚越大，铸件内部降温越慢，使得液面前沿凝固较慢，从而更多的铜液可以进入型腔；从最终速度模拟结果可以看出，当前沿凝固完全后，前沿速度降至零，使得液相无法继续进入型腔。图5为试验中不同壁厚工艺的最终铸件形态，从结果中可以看出，实际试验中由于设备状况波动及其他因素的影响，同一模具中的三个试样充型高度并不一致，但随着壁厚不断加大，基本可以反映出铸件充型高度不断



(a) 模具 (b) 砂芯

图3 铜合金低压铸造试验

Fig. 3 Copper alloy low pressure casting experiment

加大的趋势。将实际铸件中的三个试样铸件充型高度进行平均，图6为不同壁厚工艺的模拟与试验充型高度对比，需要说明的是，铸件充型高度指的是升液管上端面至铸件顶端的垂直距离。由对比结果可以看出，

模拟与试验充型高度基本一致，高度值有细微差别，最大高度差仅为4.88 mm，可以认为模拟和试验结果对应较好，因此，可以认为本文所采用流场模型的准确性得以验证。

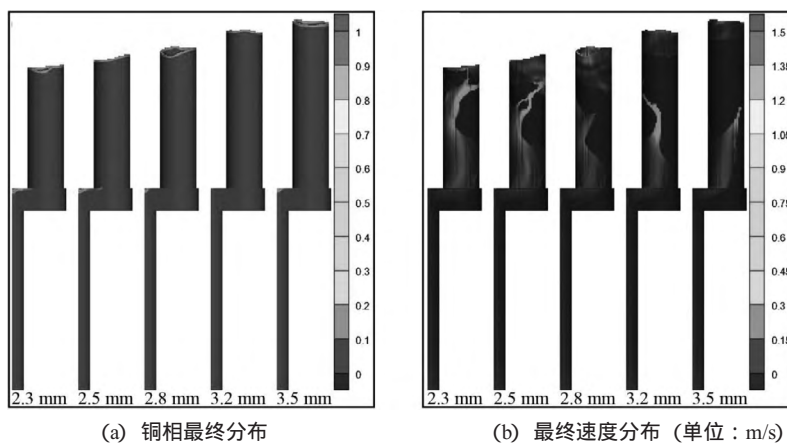


图4 不同壁厚铸件的工艺模拟结果

Fig. 4 Simulated results of different casting processes for alloy castings with multi-wall thicknesses

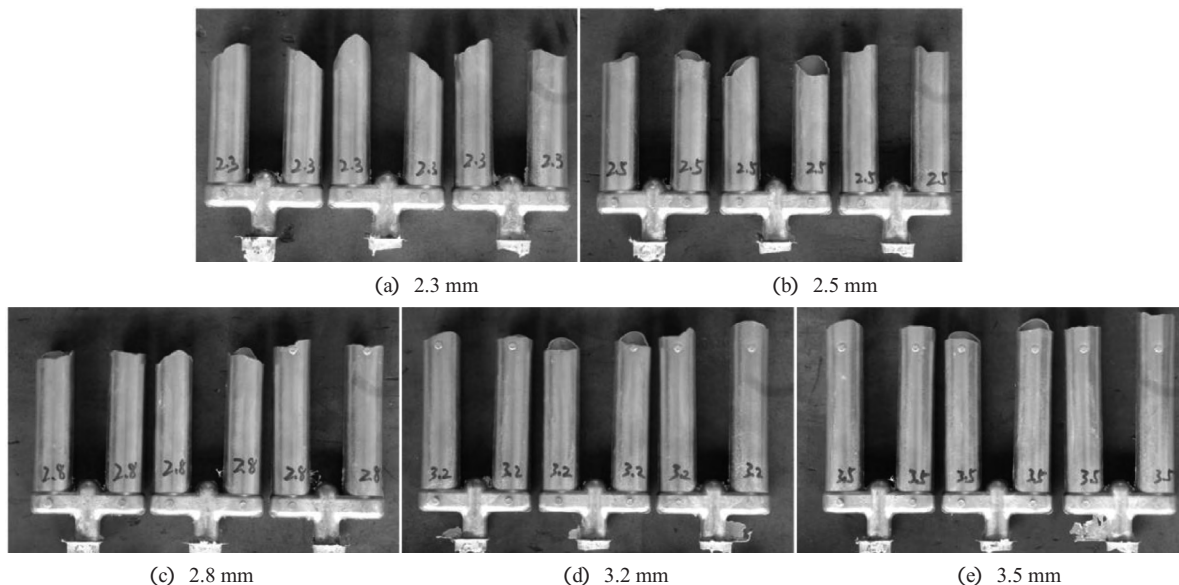


图5 试验中不同壁厚工艺的最终铸件形态

Fig. 5 Final shapes of castings with different wall thicknesses in experiment

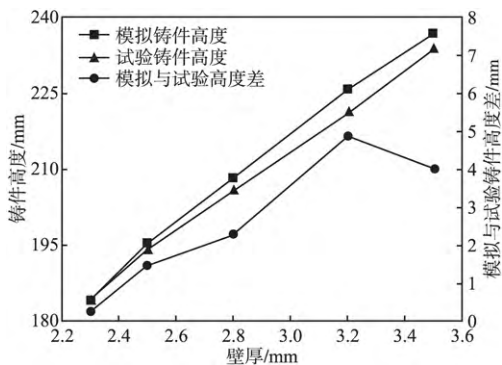


图6 不同壁厚铸件工艺的模拟与试验充型高度对比

Fig. 6 Filling height comparison between alloy castings with different wall thicknesses in simulation and in experiment

3 结语

(1) 提出一随固相率变化的浇不足缺陷计算模

型，即高固相率区采用临界固相率方法，低固相率区采用变粘度方法，中等固相率区采用多孔介质拖拽模型。

(2) 设计了一组多壁厚铜合金低压铸造工艺，对比分析了模拟和试验铸件充型高度，结果对应较好，证明了所提出的浇不足缺陷计算模型的正确性。

(3) 采用基于固相率变化的浇不足缺陷计算模型处理实际铸造充型过程前，需结合实际试验确定相关参数：多孔介质拖拽参数、下临界固相率和上临界固相率。

参考文献：

[1] Rajkolhe R, Khan J G. Defects, causes and their remedies in casting process: a review [J]. International Journal of Research in Advent Technology, 2014, 2 (3) : 375-383.

- [2] 王荣, 王维昌. 铸件浇不足和冷隔缺陷的成因及防止措施 [J]. 金属加工: 热加工, 2008, 17: 60-62.
- [3] 徐贵强, 鞠富, 郝素斌, 等. 精铸支架浇不足缺陷解决方案 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (2): 180-182.
- [4] Dabade U A, Bhedasgaonkar R C. Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique [J]. Procedia CIRP, 2013, 7: 616-621.
- [5] Jana S, Kättlitz O, Hediger F, et al. Predictions of misruns using three-phase coupled mold-filling and solidification simulations in low pressure turbine(LPT)blades [C] //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 33 (1): 1-8.
- [6] Arnberg L, Bäckerud L, Chai G. Solidification characteristics of aluminum alloys: dendrite coherency [M]. 1st ed. Schaumburg: American Foundrymen's Society, 1996.
- [7] Voile V R, Prakash C. A fixed grid numerical modeling methodology for convection diffusion mushy region phase-change problem [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1987, 30 (9): 1709-1719.
- [8] Carman P C. Fluid flow through granular beds [J]. Transactions Institution of Chemical Engineeres, 1937, 15: 150-166.
- [9] Frehse J, Málek J, Steinhauer M. On analysis of steady flows of fluids with shear-dependent viscosity based on the Lipschitz truncation method [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2003, 34 (5): 1064-1083.
- [10] Wang C, Hu H, Luo J. Computer simulation of investment casting based on procast software [J]. Foundry Technology, 2007, 28 (10): 1360.
- [11] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39 (1): 201-225.
- [12] Constantin P, Foias C. Navier-Stokes equations [M]. 1st ed. Chicago: University of Chicago Press, 1988.
- [13] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. 1st ed. New York: Pearson Education, 2007.
- [14] Park T S. Effects of time-integration method in a large-eddy simulation using the PISO algorithm: part I-flow field [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2006, 50 (3): 229-245.

(编辑: 张允华, zyh@foundryworld.com)

(上接第 486 页)

- 2013, 24 (2): 76-82.
- [4] Kazemi M, Kiani-Rashid A R, Nourian A, et al. Investigation of microstructural and mechanical properties of austempered steel bar-reinforced ductile cast iron composite [J]. Materials & Design, 2014, 53 (1): 1047-1051.
- [5] 刘平, 刘腾, 王渠东. 固液双金属复合铸造研究进展 [J]. 材料导报 A: 综述篇, 2014, 28 (1): 26-30.
- [6] 于杨, 马幼平, 杨蕾, 等. 不锈钢/高铬铸铁固-液复合铸造的研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36 (2): 65-68.
- [7] 陈忠士, 傅高升, 程超增, 等. 双金属汽车刹车毂复合铸造工艺的研究 [J]. 铸造, 2012, 61 (1): 101-104.
- [8] 刘耀辉, 刘海峰, 于思荣. 液固结合双金属复合材料界面研究 [J]. 机械工程学报, 2000, 36 (7): 81-85.
- [9] 许春伟, 李炎, 魏世忠, 等. 液-固双金属复合界面研究新进展 [J]. 热加工工艺, 2006, 35 (20): 70-73.
- [10] 张恒大, 刘子安. 铸铁-硬质合金复合铸造的机理 [J]. 铸造, 2000, 49 (6): 334-335.
- [11] 方健, 于赞, 王洪金. 灰铸铁/碳钢的复合铸造界面的研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (2): 122-124.
- [12] 刘继雄, 董瑞, 赵爱民, 等. 高铬铸铁-碳钢双金属复合铸造界面形貌和性能 [J]. 铸造, 2012, 61 (8): 886-889.
- [13] 刘智恩. 材料科学基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2003: 193-210.

(编辑: 刘冬梅, ldm@foundryworld.com)