

铜合金低压铸造中浇不足缺陷的数值模拟

吴 棣¹ 黄伟明² 廖敦明¹ 曹 流³ 蓝辉强⁴

[1.华中科技大学材料科学与工程学院,材料成形与模具技术国家重点实验室; 2.浙江嘉善北方机械制造有限公司; 3.广州大学智能制造工程研究院; 4.路达(厦门)工业有限公司]

摘 要 浇不足是铜合金低压铸造中常见的缺陷之一,采用数值模拟不仅可以预测铸件最终的浇不足形态,还可以进一步分析浇不足的产生与演化过程,而预测浇不足的关键是处理好合金糊状区对金属液流动的影响。针对铜合金修正了糊状区的变粘度-多孔介质-临界固相率模型,基于变物性参数计算并对比分析了其与变粘度-临界固相率模型模拟结果的差异性。实际生产表明,修正后的变粘度-多孔介质-临界固相率模型可以准确预测出铸件的浇不足缺陷,数值计算模型更可靠。

关键词 铜合金;低压铸造;浇不足;糊状区模型;数值模拟

中图分类号 TG146.1⁺1;TG249.2;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Misrun during Low-pressure Casting of Copper Alloy

Wu Di¹, Huang Weiming², Liao Dunming¹, Cao Liu³, Lan Huiqiang⁴

(1.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology; 2.Zhejiang Beifang Machinery Manufacturing Co., Ltd.; 3.Advanced Institute of Engineering Science for Intelligent Manufacturing, Guangzhou University; 4.Xiamen Lota International Co., Ltd.)

Abstract: Misrun is one of the common casting defects in low-pressure casting of copper alloy. Numerical simulation can not only predict the final morphology of misrun, but also further analyze the formation and evolution of misrun. The key to predict misrun is to deal with the effect of alloy mushy zone on flow behavior. The model of variable viscosity-porous medium-critical solid fraction of copper alloys in the mushy region was modified, and based on the parameters of variable physical properties, the simulated results between it and the model of variable viscosity-critical solid fraction were calculated and analyzed comparatively. The actual production shows that the modified model of variable viscosity-porous medium-critical solid fraction can predict accurately the misrun defects, and the numerical calculation model is more reliable.

Key Words: Copper Alloy, Low-pressure Casting, Misrun, Mushy-region Model, Numerical Simulation

浇不足是铜合金低压铸造生产中常见的缺陷之一^[1,2]。由于充型过程中模具的不透明性以及金属液的高温状态,难以直接观测到浇不足缺陷的形成与演变过程^[3~5]。采用数值模拟不仅可以预测浇不足的最终分布,也能分析浇不足的形成过程,对于优化铸造工艺有着积极意义^[6,7]。在数值模拟中准确预测浇不足的关键是处理好合金糊状区对金属液流动的影响,而现有的处理手段多为设定临界固相率^[8,9]、变粘度^[10,11]等方式,难以准确地表征铸造过程中金属液流动行为的变化,因而确定一种准确的糊状区流动计算模型十分重

要。

针对铸造充型过程中合金糊状区液固转变对金属液流动的影响以及浇不足缺陷,国内外做了大量研究^[9~16]。ARNBERG L等^[11]通过研究铝合金的凝固特性,提出了合金糊状区的变粘度流动模型,该模型可以表征流动受阻随固相率增大而增大的现象,但较难获得金属液在固液区间内准确合理的变粘度模型,而且粘度过大时计算易发散。BAZHENOV V E等^[15]在研究铝合金砂型铸造的流动性和浇不足缺陷时,假定金属液的固相率高于某个临界值会停止计算,该假定模型会强

收稿日期:2020-06-16;修改稿收到日期:2020-09-17

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0229);华合方智能绿色铸造技术联合实验室项目

第一作者简介:吴棣,男,1994年出生,博士研究生,武汉(430074),E-mail:wudi2325@foxmail.com

通信作者:廖敦明,男,1973年出生,教授,武汉(430074),E-mail:liaodunming@hust.edu.cn

引用格式:吴棣,黄伟明,廖敦明,等.铜合金低压铸造中浇不足缺陷的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1):119-123.

WU D, HUANG W M, LIAO D M, et al. Numerical simulation of misrun during low-pressure casting of copper alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):119-123.

制性使得金属液在达到某一固相率时停止流动,但不能较好地表现出在中等固相率区间金属液的流动状态。闫洁^[16]在研究铝合金熔液的真空渗流铸造过程中将预制体假设为多孔介质,多孔介质的处理方法由 CARMAN DC^[17]提出,其主要思想是将流动区域中固体结构的作用转化为附加在流体上的分布阻力。多孔介质方法适用于凝固中枝晶形成框架但尚未完全阻塞金属液流动时,即中等固相率糊状区的情况。这几种模型都有其局限性,因而为了更好地表征糊状区的流动形态,可以根据材料及生产工艺将 3 种方法组合起来。

曹流等^[18]结合 3 种糊状区处理方法,提出一种基于不同固相率范围的流动计算模型(变粘度-多孔介质-临界固相率模型),即低固相率糊状区采用变粘度方法,中等固相率糊状区使用多孔介质拖拽模型,高固相率糊状区利用临界固相率处理方式。这一模型经过了 S 型铸型水模拟的验证以及简单底注式铸造在不同参数时计算效果的对比分析,但其中的变粘度模型仅适用于铝合金,材料的相关物性参数采用常数,且提出的液固转变流动计算模型尚未提供实际生产案例加以证明。

本课题针对铜合金低压铸造中的浇不足缺陷,详细介绍了变粘度-临界固相率与变粘度-多孔介质-临界固相率两种糊状区流动模型。同时修正了变粘度-多孔介质-临界固相率模型,使其适用于铜合金低压铸造,并基于变物性参数,在芸峰 CAE 平台上实现了流动模拟中的浇不足缺陷计算程序。为了判断模型的可靠性,与实际生产对比分析了采用两种糊状区模型的流动计算结果,进而证明了修正后的变粘度-多孔介质-临界固相率模型的准确性。

1 试验与工艺

基于低压铸造铜合金水龙头件对其浇不足缺陷进行数值模拟。图1为铸造的模具系统与浇不足缺陷示

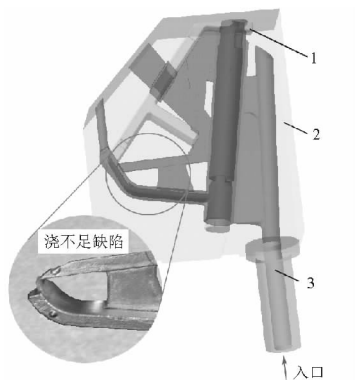


图1 铜合金模具及其与浇不足缺陷

Fig.1 Mould system of Cu alloy and misrun defects

1.砂芯 2.模具 3.升液管

意图,模具系统包括模具、砂芯和升液管,整体轮廓尺寸为 350 mm×130 mm×580 mm。模具材质为 QCr0.5,砂芯为树脂砂,升液管材料为 45 钢,铸件材质为铜合金 LTN60-1,预估铸件质量为 6.5 kg。铸件左侧产生了浇不足现象,见图 1,推测是左侧铸件较薄、冷却较快,因而金属液较早达到了临界固相率,停止流动;模拟上可选用不同的液固转变模型进行计算分析,从而对比判断模型在预测浇不足缺陷上的可靠性。

2 数值模拟分析

2.1 不考虑糊状区的气-液两相流动模型

在流体力学计算时,不考虑合金糊状区对铸造流动过程的影响,可以得到流体的动量方程(Navier-Stokes 方程)^[19]为:

$$(\rho U)_t + \text{div}(\rho U \otimes U) = -\nabla p + \text{div}\tau + S^F \quad (1)$$

式中, ρ 为密度,kg/m³; U 为速度,m/s; t 为时间,s; ∇ 为“符号矢量”; p 为压力,Pa; τ 为应力张量,Pa; div 为散度; S^F 为力源项,Pa/m,流体中可表示如下:

$$S^F = C\kappa \nabla\varphi + \rho g \quad (2)$$

式中, C 为表面张力系数,N/m; κ 为界面处的曲率,m⁻¹; g 为重力加速度,m/s²; φ 为 VOF 界面追踪算法^[20]的控制体积比,相应的控制方程为:

$$\varphi_t + U \cdot \nabla\varphi = 0 \quad (3)$$

而保证金属液质量守恒的连续性方程为:

$$\rho_t + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (4)$$

将式(1)与式(4)耦合计算出速度场后,可以结合下式得到流场温度:

$$(\rho T)_t + \text{div}(\rho T U) - D\Delta T = S_T \quad (5)$$

式中, T 为温度,℃; D 为扩散系数,kg/(m·s); Δ 为 Laplace 算子; S_T 为热源项,kg·℃/(m³·s)。

2.2 糊状区流动计算模型

在铸造充型过程中,会发生液固转变,因而铸造模拟中需要考虑金属的糊状区行为。在凝固初期(固相率较低),枝晶间尚未形成有效连接,枝晶会跟随液相流动;在凝固中期(固相率中等),枝晶间初步连接,液相在枝晶间流动,小的枝晶也会随液相流动;在凝固后期(固相率较高),枝晶间牢固连接,液相不再流动^[18]。

基于凝固的 3 个阶段,采用两种方式定义凝固初期和中期的糊状区流动模型:一是凝固初期和中期同时定义为变粘度模型;二是凝固初期定义为变粘度模型,凝固中期定义为多孔介质模型。这就产生了两种组合模型:变粘度-临界固相率模型和变粘度-多孔介质-临界固相率模型。

(1)变粘度-临界固相率模型 该模型对常规气-液

两相耦合流动模型进行补充,首先定义临界固相率参数 f_{up} ,满足 $0 < f_{up} < 1$, f_{up} 的值与铸造方法、材料等有关。

当固相率 $0 \leq f < f_{up}$ 时,枝晶形成、生长,金属液尚能流动,此时认为流体粘度随固相率变化而变化。修改式(1)应力张量 τ 中的粘度 μ 即可,通过文献[11]中的变粘度公式来计算流体粘度随固相率的变化,文献中针对的是铝合金材料,因而对公式进行修改,使其适用于铜合金:

$$\mu_e = \mu_0 \left(1 - \frac{f}{f_{up}}\right)^m \tag{6}$$

式中, μ_e 为等效动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_0 为液相动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; m 为变粘度指数,可采用试验或者试验对比模拟结果获得。

当固相率 $f_{up} \leq f \leq 1$ 时,枝晶间牢固连接,金属液不再流动。对于重力铸造、低压铸造等常规铸造方法,糊状区流动速度 U 为 0。

(2)变粘度-多孔介质-临界固相率模型 该模型在文献[18]中有详细说明。首先定义下临界固相率参数 f_{down} 和上临界固相率参数 f_{up} ,二者满足 $0 < f_{down} < f_{up} < 1$, f_{down} 和 f_{up} 的值与铸造方法、材料等有关。

当固相率 $0 \leq f < f_{down}$ 时,枝晶随液相一起流动,此时认为流体粘度随固相率变化而变化,变粘度公式与式(6)相同。

当固相率 $f_{down} \leq f < f_{up}$ 时,液相在枝晶间流动,小的枝晶也会随液相流动,此时假定粘度为固相率 f_{down} 时的粘度不变,而将糊状区的影响等效为多孔介质的拖拽作用,其力的方向与速度方向相反,此时式(2)力源项 S^F 将添加多孔介质拖拽项,计算公式为:

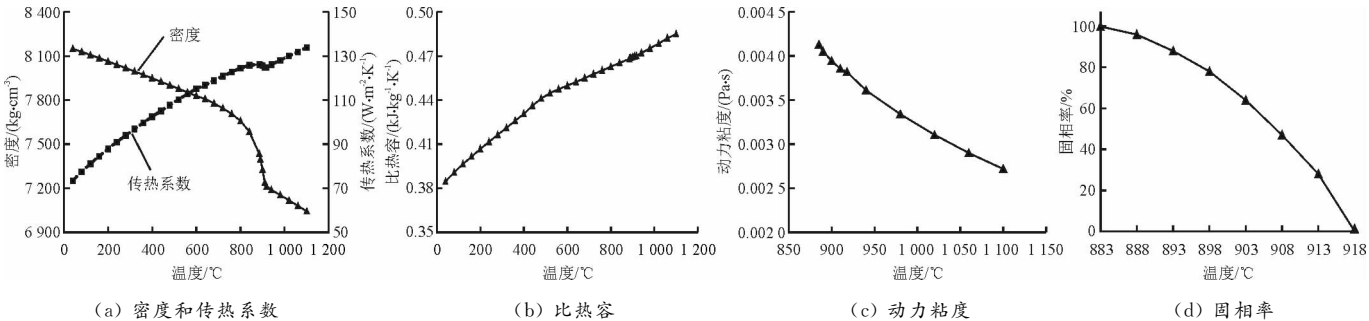


图 2 铸件材料物性参数随温度变化曲线

Fig.2 The variation curves of physical properties of the casting material with temperature

表 1 模拟计算中相关参数

Tab.1 Related parameters in simulation calculation

网格大小/mm	重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	空气密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	空气动力粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	表面张力系数/ $\text{C}/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	上临界固相率 $f_{up}/\%$	下临界固相率 $f_{down}/\%$	变粘度指数 $m/\%$	自定义常数 K_0/s^{-1}	进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	进口压力/Pa	出口压力/Pa	铸件-模具传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	铸件-砂芯传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	其他传热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
1.3×10^{-3}	{0,0,-9.8}	1	1×10^{-5}	1.2	67	15	-150	10	1 010	0 s,0; 5 s, 5×10^4 ; 10 s, 5×10^4	0	铸件液相,1 500;铸件固相,700	铸件液相,1 000;铸件固相,500	1 000

3 试验结果与讨论

采用变粘度-临界固相率的方法计算铜合金件低压铸造的流动状态时,在不同充型率下的流动状态见图 3,色标为铸件温度。可以看出,金属液高度在充型过程中左低右高,这主要是由于左侧型腔厚度较小,冷却较快,金属液粘度更大。充型到 80.5% 时,流体前沿温度达到合金液相线温度,见图 3b,随着温度继续降低,流体粘度逐渐增大,因而流动阻力增大,但对左侧金属液的阻碍作用不明显;流体前沿的凝固达到临界固相率时,金属液停止流动,左侧型腔近乎充满,见图 3c。

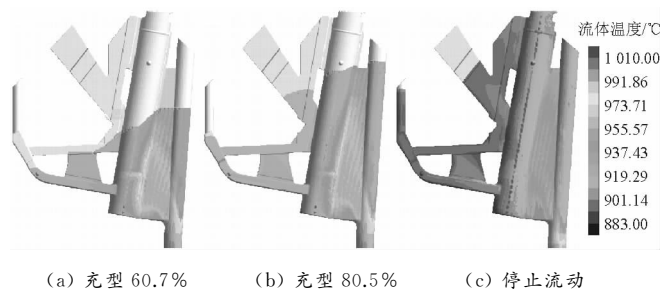


图 3 变粘度-临界固相率模型不同充型率下的流体温度

Fig.3 The fluid temperature based on the model of variable viscosity-critical solid fraction under different filling rates

采用变粘度-多孔介质-临界固相率的方法计算铜合金低压铸造件的流动状态,其在不同充型率下的流动状态见图 4。可以看出,在充型过程中,铸件左右两侧的高度差距较大,左侧金属液流动较慢、液面较低。充型到 79.2% 时,流体前沿达到了液相线温度,见图 4b,流体粘度逐渐增大;流体前沿温度继续降低,固相率处于上、下临界固相率之间时,使用多孔介质模型处理糊状区的拖拽作用;流体前沿达到临界固相率时,金属液停止流动,见图 4c,显然模型预测铸件左侧存在浇不足缺陷。

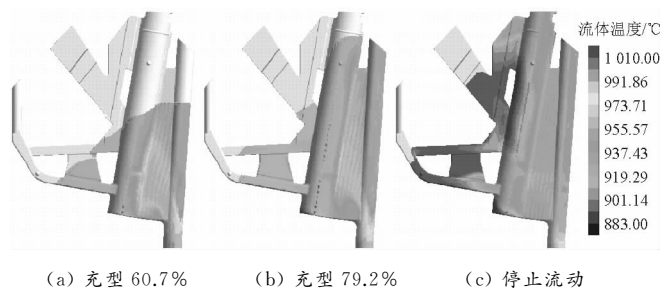
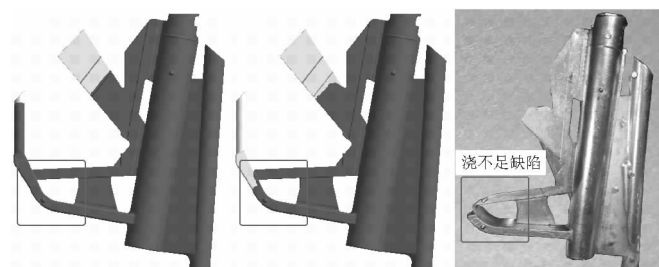


图 4 变粘度-多孔介质-临界固相率模型不同充型率下的流体温度

Fig.4 The fluid temperature based on the model of variable viscosity-porous medium-critical solid fraction under different filling rates

通过对上述两种糊状区模型的模拟结果与实际浇不足缺陷进行对比,结果见图 5。可以看出,采用变粘

度-临界固相率模型时,最终的充型高度比实际生产要高,见图 5a、图 5c,没有预测出铸件的浇不足缺陷,即变粘度模型在模拟糊状区枝晶的阻碍作用上有较大误差。而采用变粘度-多孔介质-临界固相率模型时,准确模拟出了铸造的浇不足缺陷,见图 5b、图 5c。两种模型的差异主要在于中等固相率阶段的处理,明显地,仅仅靠增加粘度很难模拟出枝晶对金属液流动的影响,且粘度增加到一定程度会增加计算发散的风险,因而考虑多孔介质的模型对于浇不足缺陷的预测更为可靠。



(a) 变粘度-临界固相率模型的模拟结果 (b) 变粘度-多孔介质-临界固相率模型的模拟结果 (c) 实际浇不足缺陷

图 5 两种模型的模拟结果与实际结果对比

Fig.5 Comparison of simulation results of the two models with the actual results

4 结 论

(1)详细介绍了变粘度-临界固相率与变粘度-多孔介质-临界固相率两种糊状区组合流动模型。

(2)修正了糊状区的变粘度-多孔介质-临界固相率模型,使其适用于铜合金,并基于变物性参数实现了铸造充型的浇不足缺陷计算程序。

(3)对比分析了变粘度-临界固相率模型与变粘度-多孔介质-临界固相率模型在计算铜合金低压铸造浇不足缺陷时模拟结果上的差异。

(4)实际生产表明,修正后的变粘度-多孔介质-临界固相率模型可以准确预测出铸件的浇不足缺陷,流动计算模型更可靠。

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] GRZEŚKOWIAK K, WOJCIECHOWSKI M, SYTEK K. The effect of the method of pouring liquid metal into mould on misrun formation in the castings made with lost-wax casting technology [J]. Archives of Mechanical Technology and Automation, 2013, 33(4): 15-19.
- [3] HU B H, TONG K K, NIU X P, et al. Design and optimisation of runner and gating systems for the die casting of thin-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(1-2): 128-133.

前油封法兰盘气孔缺陷分析及解决

朱洪军¹ 吕海霆¹ 周 健²

(1.大连科技学院机械工程学院; 2.大连亚明汽车部件股份有限公司)

摘 要 通过某前油封法兰盘压铸件缺陷分析,借助鱼骨图质量工具,确定气孔位置及产生的原因,并依据有关压铸理论以及数值模拟技术,优化了铸件排气系统及排溢系统。结果表明,运用数值模拟技术,合理布置排气槽与渣包可以有效地解决压铸件的气孔缺陷,解决该铸件两处气孔缺陷。

关键词 前油封法兰盘;气孔;数值模拟;鱼骨图

中图分类号 TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.01.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Defect Analysis and Solution of Oil Seal Flange

Zhu Hongjun¹, Lü Haiting¹, Zhou Jian²

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian Institute of Science and Technology;
2.Dalian Yaming Automobile Parts Co., Ltd.)

Abstract: Based on the defects analysis of a front oil-seal flange and using the fishbone diagram quality tool, the origination of air hole defects in the product and its location were analyzed. To solve the air hole defects, the exhausting system and overflow system were optimized according to the die-casting theory and numerical simulation analysis. The results reveal that through the numerical simulation and rational arranging exhausting system, the gas hole defects can be solved effectively.

Key Words: Oil Seal Flange, Gas Hole, Numerical Simulation, Fishbone Diagram

收稿日期:2020-08-22;修改稿收到日期:2020-09-17

第一作者简介:朱洪军,男,1973 年出生,高级工程师,辽宁大连(116052),E-mail:2410400497@qq.com

引用格式:朱洪军,吕海霆,周健. 前油封法兰盘气孔缺陷分析及解决[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(1):123-126.

ZHU H J, LÜ H T, ZHOU J. Defect analysis and solution of oil seal flange[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(1):123-126.

[4] 刘东戎, 杨智鹏, 王丽萍, 等. 铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3): 96-100.

[5] 徐耀增. 电磁离心铸造热流磁耦合数值模拟[D]. 西安:长安大学, 2013.

[6] 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(1): 616-621.

[7] LI C Z, TANG H Y, LI J S, et al. Numerical simulation of misrun defect of bimetallic composite pipe by investment casting[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 251(1): 442-445.

[8] RAVI K R, PILLAI R M, AMARANATHAN K R, et al. Fluidity of aluminum alloys and composites: A review[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2008, 456(1-2): 201-210.

[9] LEE J H, WON C W, CHO S S, et al. Effects of melt flow and temperature on the macro and microstructure of scroll compressor in direct squeeze casting[J]. Mater. Sci. Eng., 2000, 281(1-2): 8-16.

[10] 韩昌仁, 周铁涛, 柴增田, 等. 熔模精密铸造蜡模充型过程的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2001, 3(1): 38-39.

[11] ARNBERG L, BÄCKERUD L. Solidification Characteristics of Aluminum Alloys: Dendrite Coherency[M]. Schaumburg: American Foundrymen's Society, 1996.

[12] JAKUMEIT J, SUBASIC E, BÜNCK M. Prediction of misruns in thin wall castings using computational simulation[A]. Shape Casting, 5th International Symposium, San Diego, 2014[C]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

[13] 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[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2012, 33(1): 1-8.

[14] PETROVA A V, BAZHENOV V E, KOLTYGIN A V. Prediction of misruns in ML5 (AZ91) alloy casting and alloy fluidity using numerical simulation[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2018, 59(6): 617-623.

[15] BAZHENOV V E, PETROVA A V, KOLTYGIN A V. Simulation of fluidity and misrun prediction for the casting of 356.0 aluminum alloy into sand molds[J]. International Journal of Metal Casting, 2018, 12(3): 514-522.

[16] 同洁. 基于多孔介质特征的铸造渗流有限元模型的建立[J]. 铸造技术, 2007, 28(11): 1 514-1 517.

[17] CARMAN P C. Fluid flow through granular beds[J]. Chemical Engineering Research and Design, 1997, 75(S): S32-S48.

[18] 曹流, 孙飞, 陈涛, 等. 铸造充型过程中液固转变影响流动行为的数值计算[J]. 金属学报, 2017, 53(11): 1 521-1 531.

[19] CONSTANTIN P, FOIAS C. Navier-Stokes Equations[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1988.

[20] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. J. Comput. Phys., 1981, 39(1): 201-225.

(编辑:张正贺)