

镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟

李静怡¹ 赵宇宏¹ 陈利文¹ 牛晓峰² 侯 华¹

(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.太原理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 采用铸造模拟软件 EasyCast 和 NovaCast 对镁合金隔板铸件低压铸造工艺过程进行数值模拟,发现隔板铸件凝固过程未遵循顺序凝固原则并有缩孔产生,通过添加冷铁进行工艺改进。模拟结果发现,改进前后,两款软件预测的凝固温度场基本一致,缩孔尺寸略有差异,但缩孔位置大致相同,表明模拟结果可信。结果表明,铸件厚壁部分容易产生缩孔、缩松缺陷,通过冷铁的设置,能够有效加强补缩效果,改善缩孔缺陷。

关键词 EasyCast; NovaCast; 数值模拟; 低压铸造

中图分类号 TG249.2; TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Low Pressure Casting Process for Magnesium Alloy Plate Casting

Li Jingyi¹, Zhao Yuhong¹, Chen Liwen¹, Niu Xiaofeng², Hou Hua¹

(1.School of Materials Science and Engineering, North University of China;

2.School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: The self-developed casting simulation software EasyCast and the NovaCast software were used to simulate the low-pressure casting process of magnesium alloy partition. It was found that the solidification process of plate castings didn't follow the principle of sequential solidification, and there existed shrinkage cavity. The process was improved by adding chiller. Before and after the improvement, the solidification temperature field predicted by the two software were basically the same. Although the size of the shrinkage cavity predicted was slightly different, the position of shrinkage cavity was roughly the same. It shows that the simulation conclusion is reliable. As a result, most of the casting thickness is prone to shrinkage cavity and porosity. Through setting chiller, the effect of shrinkage can be enhanced and shrinkage cavity can be improved.

Key Words: EasyCast, NovaCast, Numerical Simulation, Low Pressure Casting

镁合金隔板铸件作为水下兵器的组成部分,对铸件性能有着严格的要求。镁合金因较低的密度在轻量化材料中具有较高的优势^[1]。传统的砂型铸造造型困难、不易清砂、难以保证铸件的尺寸精度及表面粗糙度,而低压铸造能够保证在充型过程中金属液的平稳充型^[2],减少缺陷产生,生产出尺寸精度较高的铸件。采用低压铸造工艺,满足隔板性能需求,能更好地保证铸件的品质^[3]。

传统铸造工艺设计主要依靠实际经验,尤其是复杂件,需要反复试模,修改铸造工艺,需要花费较多的人力物力^[4]。随着计算机技术的发展,数值模拟技术在铸造

生产中的应用越来越广泛。对铸造过程模拟的网格划分方式和求解算法也有了长足的进展,从最初的差分网格^[5,6],再到四面体网格^[7]、自适应六面体网格^[8]甚至混合网格^[9]。当前,ProCAST、FLOW-3D、MAGMA 以及 NovaCast 等铸造软件已得到广泛应用^[10]。自主开发的 EasyCast 是一套集三维实体造型文件接口、计算网格剖分、铸造过程仿真、铸造缺陷预测及结果 VTK 显示为一体的集成软件系统。

本课题利用 EasyCast 软件和 NovaCast 软件,针对低压铸造镁合金隔板中缺陷的产生部位和特点进行模拟分析,研究其缺陷产生的机理,并通过对低压铸造工

收稿日期:2020-10-21;修改稿收到日期:2020-12-01
基金项目:山西省科技重大专项资助项目(20191102008,20191102007);国家自然科学基金资助项目(52074246,22008224);山西省平台基地和人才专项资助项目(201805D211036);中央引导地方科技发展专项资金资助项目(YDZX20191400002796);国防基础科研资助项目(JCKY2020408B002)
第一作者简介:李静怡,女,1996 年出生,硕士研究生,太原(030051),E-mail:lijingyi753@163.com
通信作者:赵宇宏,女,1974 年出生,教授,太原(030051),E-mail:zhaoyuhong@nuc.edu.cn
引用格式:李静怡,赵宇宏,陈利文,等. 镁合金隔板铸件低压铸造工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):588-592.
LI J Y, ZHAO Y H, CHEN L W, et al. Numerical simulation of low pressure casting process for magnesium alloy plate casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):588-592.

艺设计的改进,消除铸造缺陷,改善镁合金隔板铸件的品质。

1 实体建模及网格剖分

图 1 为镁合金隔板铸件实体模型及浇注系统。铸件直径为 314.8 mm,最小壁厚为 7.2 mm,顶端有直径约为 30 mm 的冒口。可以看出,隔板属于大平板薄壁铸件,采用低压铸造工艺生产,浇注系统见图 1b。在计算中对最小壁厚都保证 2~3 层网格,因此,选用 4 mm 作为网格尺寸,对应网格数量约为 160 万个,以保证数值模拟计算的准确性。

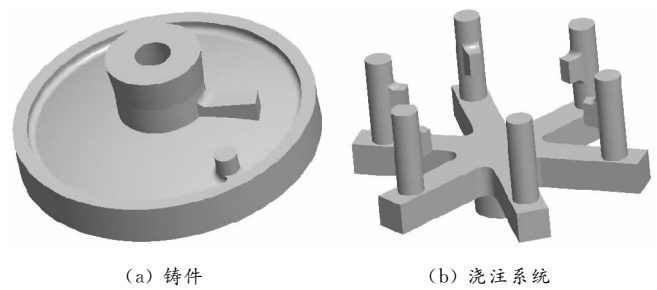


图 1 铸件实体模型及浇注系统
Fig.1 Solid casting model and gating system

2 参数设置

2.1 材料的选择

铸件材质为 ZM5 镁合金,其成分见表 1。

表 1 ZM5 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZM5 magnesium alloy %					
wB					
Al	Zn	Mn	Si	Fe	Mg
8.35	0.62	0.35	0.25	0.08	余量

在 EasyCast 数据库中有 ZM5 镁合金的参数,可直接选用。在 NovaCast 中需要赋予铸造材料相关热物性性能参数,铸造模拟过程中常用的热物性参数主要包括:导热系数、密度、比热容、固相分数、杨氏模量、泊松

比、屈服强度、热膨胀系数、硬化系数、结晶潜热、相变温度等,对 ZM5 合金进行热物理性能参数测定和热物理性能参数计算,建立 ZM5 铸造镁合金材料性能参数数据库。现选取 ZM5 合金热物性参数如下:液相线温度为 603 ℃,固相线温度为 493 ℃。根据其固、液相线温度,选择浇注温度为 700 ℃。

2.2 边界条件设置

在 EasyCast 软件中 Boundary Selection 对话框按实际传热边界确定传热系数,铸镁-砂边界取 C600;而铸件与冷铁接触取 C10000。NovoCast 软件利用气隙尺寸等效计算铸件/铸型传热边界。根据气隙设定值计算每个边界铸型材料的排热量。设置材料的气隙尺寸为 2 μm,并将该气隙尺寸应用于全部材料。

2.3 充型参数设置

低压铸造工艺过程包括:升液、充型、结壳(砂型铸造)、增压、保压(结晶凝固)^[11]。充型后,进行增压和保压一段时间,由于压力的施加,会使金属产生塑性流动,从而对金属的致密度有利^[12]。

EasyCast 设置对液态合金增压到 20 kPa,自下而上充入型腔,保压压力一般在充型压力的基础上增加 6~30 kPa,设置为 40 kPa,保压时间一般以金属液凝固后浇道残留长度为 20 mm 左右为宜,根据经验,设置为 130 s。在 NovaCast 中,充型参数的设置有所不同,设置好充型方式为低压铸造后,加压时间设置为 5 s,压力加至 20 kPa,保压压力设置为 40 kPa,不需要设置保压时间。

3 模拟结果分析

3.1 凝固过程分析

顺序凝固可以避免因凝固收缩而引起的金属液无法补缩的现象,从而降低缩孔、缩松缺陷产生的可能性。两种软件凝固过程模拟结果分别见图 2 和图 3。

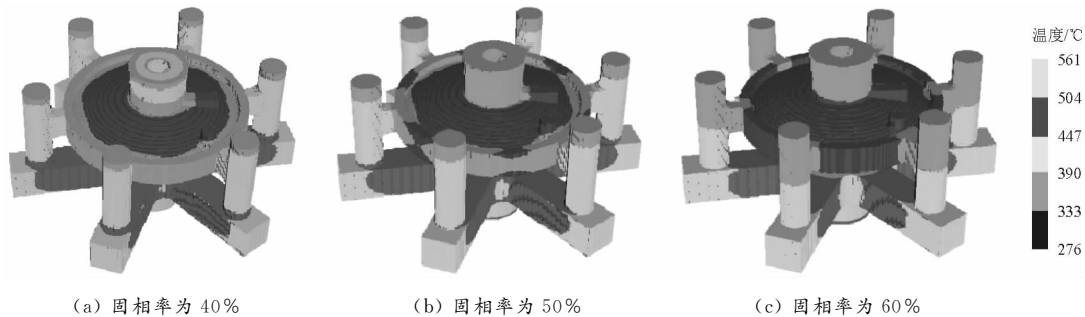


图 2 EasyCast 凝固过程温度场模拟
Fig.2 Temperature field during the solidification process of EasyCast

对比 EasyCast 和 NovaCast 两个模拟软件的凝固过程。从图 2a 可以看出,铸件顶端的圆柱体在冷却过

程中,圆柱体中间区域冷却较慢,而铸件圆形薄壁处先于顶端圆柱处凝固,所以顶端圆柱处极有可能产生缩

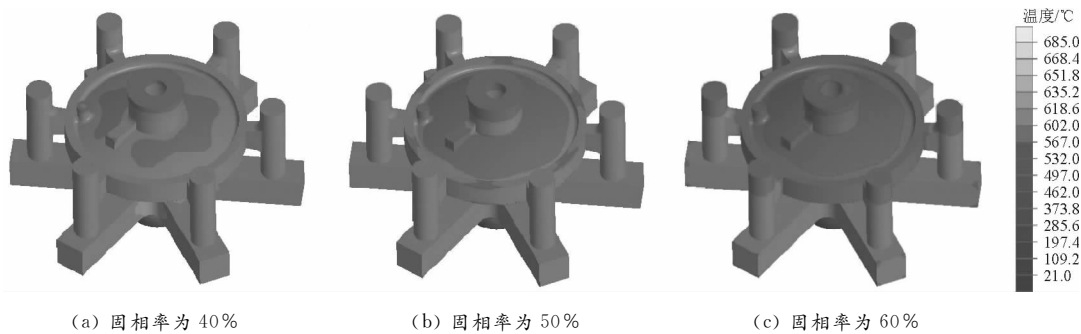


图 3 NovaCast 凝固过程温度场模拟

Fig.3 Temperature field during the solidification process of NovaCast

孔、缩松缺陷。由图 3 可以看出，NovaCast 模拟同样是圆形薄壁处远优先于顶端凝固，未遵循顺序凝固原则。

通过模拟可知，两款软件的凝固过程模拟结果基本一致，都表明在铸件顶端厚大处可能形成缺陷，随后进行缩孔缺陷预测分析。

3.2 缩孔分析

图 4 为两种软件的缺陷预测结果。可以看出，缩孔存在于铸件顶端。两款软件的模拟结果基本一致，缩孔产生的位置大致相同，而且都没有完全集中于冒口处，不同的是缩孔的形状尺寸。从图 4a 可以看出，铸件顶端的缩孔呈现上小下大的形貌，而图 4b 呈现上大下小的状态。为了解决缩孔问题，考虑在铸件顶端设置冷铁，从而改变其凝固速度，形成顺序凝固使缩孔集中于顶端冒口处，提高过冷度，增加更多的晶核，细化晶粒尺寸^[13,14]。

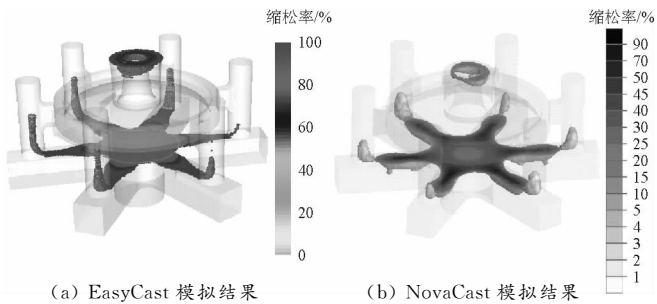


图 4 缩孔缺陷位置预测

Fig.4 Predicted location of shrinkage cavity defect by the EasyCast and NovaCast

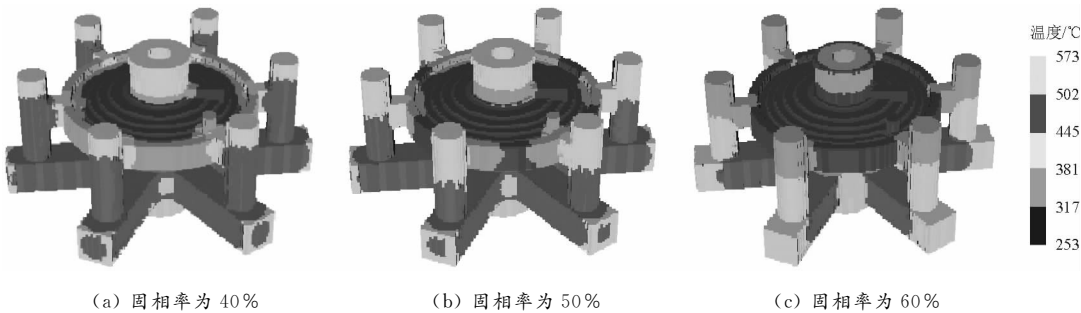


图 6 EasyCast 凝固过程温度场模拟

Fig.6 Temperature field during the solidification process of EasyCast

4 方案优化

通过分析得知，缩孔产生于铸件顶端，为了增强补缩能力，添加冷铁^[15,16]。已知铸件顶端设置了直径约为 30 mm 的冒口，于是设置冷铁将铸件顶端凸起处上下包围，上表面放置约 8 mm 的冷铁，下表面放置 12 mm 厚的冷铁，并且在隔板四周下端添加冷铁，尽可能使缩孔集中于冒口处，以避免铸件缩孔，见图 5。

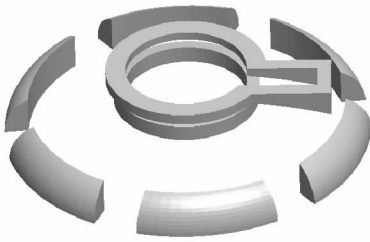


图 5 冷铁设置

Fig.5 Chill setting

4.1 凝固过程分析

添加冷铁后，凝固过程得到很大改善，图 6 为 EasyCast 的凝固过程温度场，可见铸件薄壁部分先凝固，但是相对于图 2，铸件顶端圆柱处与薄壁处的温差明显减小，有利于将缺陷集中到冒口顶端，因此需要对缩孔预测结果进行观察，从而进一步分析缺陷。图 7 为添加冷铁后的 NovaCast 的凝固过程温度场，和 Easy-Cast 表现了相近的凝固趋势，凝固过程有所改善。

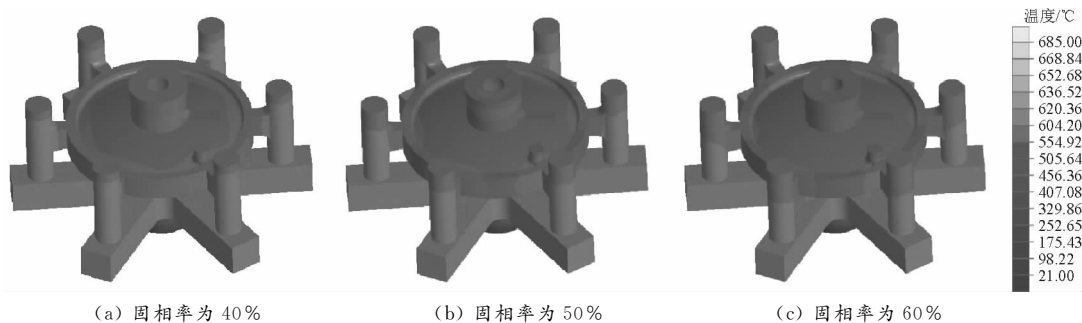


图 7 Novacast 凝固过程温度场模拟

Fig.7 Temperature field during the solidification process of NovaCast

4.2 缩孔分析

对改进工艺后的铸件缩孔进行预测,图 8 为 Easy-Cast 和 NovaCast 的缩孔位置预测。由图 8 和图 4 对比可知,两软件预测的缩孔都有着很明显的变化,通过添加冷铁,将缺陷集中于顶端冒口处,保证了铸件的品质。两软件模拟的铸件缩孔尺寸和位置虽有细微差异,但是工艺优化后的模拟结果改进趋势相同,可见添加冷铁后,能够改善镁合金的凝固过程,改变缩孔产生的位置及尺寸。

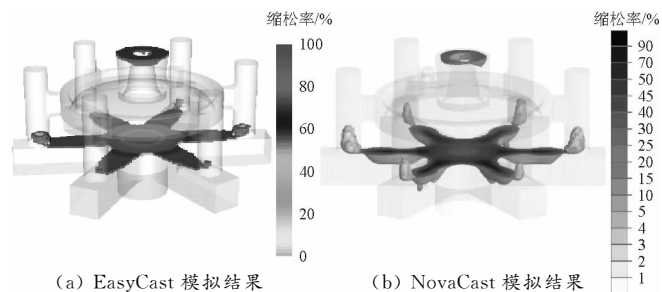


图 8 缩孔缺陷预测位置

Fig.8 Predicted location of shrinkage cavity defect by EasyCast and NovaCast

通过使用 EasyCast 和 NovaCast 软件对同一个镁合金隔板铸件进行数值模拟计算,对比了工艺改进前后的凝固温度场和缩孔缺陷预测,可以发现两款软件的凝固趋势和缩孔位置基本一致,但缩孔尺寸和形状存在差异。可能的原因为两款软件在设置边界条件上存在差异:EasyCast 设置的是传热系数,而 NovaCast 通过设置间隙尺寸等效传热系数;另外,两款软件在设置充型参数上存在差异:EasyCast 设置参数时需要设置保压时间和保压压力,NovaCast 需设置加压时间和保压压力。另外,EasyCast 采用了有限差分法,将方程中的偏微分操作离散为相邻网格之间的差商^[17],而 NovaCast 采用了有限体积法。还有,铸件凝固模拟的可视化技术大多集中体现在最终数值结果的可视化及计算中间运行阶段的可视化上^[18]。EasyCast 采用了 VTK 显示模式,NovaCast 采用 OpenGL 显示模式。

虽然模拟结果存在细微的差异,但是对该镁合金隔板铸件的方案改进结论是相同的,都表明了添加冷铁能

够有效地改善凝固顺序,消除铸件中的缩孔缺陷。

5 结 论

(1)在凝固温度场模拟过程中,发现镁合金隔板铸件的圆形薄壁处先于顶端壁厚部分凝固,EasyCast 和 NowaCast 两款软件的模拟,都得到了初始方案在铸件顶端可能形成缩孔缺陷。

(2)采用 EasyCast 和 NowaCast 软件对镁合金隔板缩孔预测,结果是隔板顶端存在缩孔缺陷,添加冷铁将缩孔的位置集中于冒口顶端,且缩孔尺寸减小。但由于边界条件、充型参数、网格计算方式不同,导致在缩孔预测时存在着尺寸上的微小差异。

(3)通过在镁合金隔板添加冷铁改进了工艺,改善凝固过程,保证了铸件的品质。

参 考 文 献

- [1] CHEN L W, ZHAO Y H, WEN Z Q, et al. Modelling and optimization for heat treatment of Al-Si-Mg alloy prepared by indirect squeeze casting based on response surface methodology[J]. Materials Research-Ibero-american Journal of Materials, 2017, 20(5): 1 274-1 281.
- [2] 王群, 孙占春, 范云波. 铝合金箱体低压铸造数值模拟及其优化设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(3): 284-287.
- [3] HOU H, ZHAO Y H. Prediction method of shrinkage cavity and shrinkage porosity in solidification process under low-pressure casting[J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoence, 2012, 9(9): 1 447-1 452.
- [4] 孔维兵, 胡心平, 王洪飞, 等. 铝镁合金金属型拉伸试样铸造工艺的优化[J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 83-86.
- [5] DABADE U A, BHEDASGAONKAR R C. Casting defect analysis using design of experiments (Do E) and computer aided casting simulation technique[J]. Procedia Cirp, 2013(7): 616-621.
- [6] SUN Y Y, ZHAO Y H, ZHAO B J, et al. Multi-component phase-field simulation of microstructural evolution and elemental distribution in Fe-Cu-Mn-Ni-Al alloy[J]. Calphad, 69(2020): 101 759.
- [7] 曹流, 廖敦明, 周聪, 等. 基于有限元法的多材质铸造温度场模拟软件开发[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(11): 1 163-1 166.
- [8] ZHAO Y H, ZHANG B, HOU H, et al. Phase-field simulation for the evolution of solid/liquid interface front in directional solidification process[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019(6): 1 044-1 052.
- [9] SANG W M, LI F W. An unstructured/structured multi-layer hybrid grid method and its application[J]. Chinese Journal of Computation Physics, 2004(4): 345-357.

基于 Krging 的压射机构铸造工艺参数多目标优化

朱阳辉^{1,2} 游东东^{1,2} 朱权利^{1,2}
(1.华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心;
2.华南理工大学广东省金属新材料制备与成形重点实验室)

摘 要 压射机构是挤压铸造设备中进行充填成形的重要装置,其组件的配合间隙决定了充型过程中的精度和稳定性。为了使压射过程中组件的配合间隙变化最小,针对初始间隙值、浇注温度等压射机构与工艺的关键参数,以间隙率和温差为目标,提出了一种基于 Kriging 元模型的多目标优化方法。结果表明,所建 Kriging 元模型精度高于 0.97;最优工艺参数:铸件浇注温度为 701 ℃,压室预热温度为 338 ℃,压室壁厚为 16 mm,初始间隙为 0.106 1 mm,压射速度为 56 mm/s。优化后,间隙率减小了 10%,换热温差减小了 49%,充型过程更加稳定。

关键词 压射机构;工艺参数;多目标优化;挤压铸造

中图分类号 TG233.1;TG249.2 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.015 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-objective Optimization of Injection Mechanism and Casting Process
Parameters Based on the Krging Model
Zhu Yanghui^{1, 2}, You Dongdong^{1, 2}, Zhu Quanli^{1, 2}
(1.National Engineering Research Center of Near-net-shape Forming for Metallic Materials,
South China University of Technology; 2.Guangdong Key Laboratory for Advanced
Metallic Materials Processing, South China University of Technology)

Abstract: Injection mechanism is important for filling and forming in squeeze casting equipment. The fit clearance of its components greatly affects the accuracy and stability in the injection process. To minimize the change of fitting clearance during injection, a multi-objective optimization method based on the Kriging metamodel was proposed which taken into account for the clearance rate and temperature difference as the objectives, and considered the key parameters of the injection mechanism and process such as initial clearance and pouring temperature. The results show that the accuracy of Kriging metamodel is higher than 0.97. Meanwhile, the optimized process parameters were presented as follows: casting pouring temperature of 701 ℃, shot-sleeve preheating temperature of 338 ℃, shot-sleeve wall thickness of 16 mm, initial clearance of 0.1061 mm and injection velocity of 56 mm/s, where the clearance rate is reduced by 10% and the heat transfer temperature difference is reduced by 49% after optimization. In addition, the filling process is more stable.

Key Words: Injection Mechanism, Process Parameters, Multi-objective Optimization, Squeeze Casting

收稿日期:2020-10-22;修改稿收到日期:2020-11-27
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875209);广东省自然科学基金资助项目(2017A030313320)
第一作者简介:朱阳辉,男,1996 年出生,硕士研究生,广州(510640),E-mail:zyh19961208@163.com
通信作者:游东东,男,1973 年出生,副教授,广州(510640),E-mail:youdde@scut.edu.cn
引用格式:朱阳辉,游东东,朱权利. 基于 Krging 的压射机构铸造工艺参数多目标优化[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(5):592-596.
ZHU Y H, YOU D D, ZHU Q L. Multi-objective optimization of injection mechanism and casting process parameters based on the Krging model[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5):592-596.

[10] 李日.铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精通[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[11] 侯华,叶云. 金属工艺学实习教程[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[12] CHEN L W, HOU H, JIN Y C, et al. Indirect squeeze casting process of aluminum alloy based on response surface method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(4): 1 174-1 179.

[13] CHEN L W, ZHAO Y H, HOU H, et al. Development of AZ91D magnesium alloy-graphene nanoplatelets composites using thixomolding process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 778:359-374.

[14] HOU H, ZHAO Y H. Simulation for the fluctuation effect on the dendrites growth with phase field method[J]. Materials Science Forum., 2011, 1534: 1 338-1 348.

[15] 侯华,靳玉春,赵宇宏,等.液态成型工艺及 CAD[M]. 北京:国防工业出版社,2012.

[16] 陈国桢,肖树则,姜不居.铸件缺陷和对策手册[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

[17] CHEN T, LIAO D M, ZHOU J X. Numerical simulation of casting thermal stress and deformation based on finite difference method[J]. Mater. Sci. Forum, 2013, 762: 224-229.

[18] 刁宝成,焦永和.计算机图形学[M].北京:高等教育出版社,1999.

(编辑:张正贺)