

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.02.007

ZL116 铝合金真空吸铸的有效应力分布预测与控制

潘婷婷, 何涛, 霍元明, 赖磊捷, 余宽平

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:为了减少铸件在真空吸铸凝固成型过程中可能出现热裂等缺陷,课题组采用有限元分析软件 ProCAST 对 ZL116 铝合金铸件的温度场和应力场进行数值模拟,分析了在温度场和应力场下浇注温度、换热系数以及模具壁厚对铸件最大有效应力和铸件中心有效应力的影响;对铸件内部有效应力分布进行了预测,并进行了实验验证。结果表明:在浇注温度为 700 °C,换热系数为 5 000 W/(m²·K),并且模具壁变厚时,可以有效地降低铸件的最大有效应力,铸件中心的有效应力也得到减小;同时铸件内部的有效应力能够均匀分布,减少热裂倾向,得到质量良好的铸件。

关键词:真空吸铸;ZL116 铝合金铸件;ProCAST 有限元分析软件;有效应力;热裂

中图分类号:TG249.9;TB115.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2019)02-0033-06

Prediction and Control of Effective Stress Distribution of ZL116 Aluminum Alloy Vacuum Casting

PAN Tingting, HE Tao, HUO Yuanming, LAI Leijie, YU Kuanping

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract:In order to reduce the defects such as hot cracking of the casting during the vacuum casting solidification molding process, the temperature and stress fields of ZL116 aluminum alloy castings were numerically simulated by the finite element analysis software ProCAST. The effects of casting temperature, heat transfer coefficient and mold wall thickness on the maximum effective stress of the casting and the casting center were analysed under temperature and stress fields. The internal effective stress distribution of the casting was forecasted by experiments. The results show that the maximum effective stress of castings can be effectively reduced and the effective stress in the casting center can be also reduced when the casting temperature is 700 °C, the heat exchange coefficient is 5 000 W/(m²·K) and the mold wall thickens. Under this condition, the internal effective stress of the casting can be evenly distributed to reduce the tendency of hot cracking and obtain the casting with good quality.

Keywords:vacuum suction;ZL116 aluminum alloy castings;ProCAST;effective stress;hot crack

ZL116 系列合金为常用的铸造 Al-Si-Mg 系合金,具有铸造流动性好、气密性好及收缩率小等优点,经过变质和热处理后,具有良好的力学性能、物理性能、耐腐蚀性能和较好的机械加工性能,用途广泛。由于近年来追求轻质化,因铝合金的质量轻,价格适中,在航天航空业,汽车制造业都有着广泛的应用。但是铝合

金铸件在生产过程因有效应力过大而出现的热裂缺陷将严重影响铸件的性能^[1]。

国内外学者针对铸造工艺和生产过程中的铸造应力及其缺陷都进行了大量的研究。叶喜葱等^[2]用 ProCAST 对温度场进行模拟,分析了不同工艺参数对合金真空吸铸凝固过程的影响。Kim 等^[3]分析了不同

收稿日期:2018-09-24;修回日期:2018-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605275);上海市科委地方能力建设重点项目(16030501200);上海工程技术大学研究生科研创新项目(17KY0106)。

第一作者简介:潘婷婷(1993),女,江苏东台人,硕士,主要研究方向为真空吸铸。通信作者:何涛(1979),男,安徽枞阳人,博士,副教授,主要研究方向为机器人、特种成形等。E-mail:hetao@sues.edu.cn

工艺参数对 Al-Si 合金流动性能的影响。任新意等^[4]对钢表面斜纹的缺陷进行了分析与控制。武永红等^[5]研究了不同出模温度对离心铸造铸件热应力的影响。JING 等^[6]研究了快速凝固对真空吸铸铸件成型性能的影响。但是目前对铝合金真空吸铸成型凝固过程中的有效应力分布与控制的研究较少,针对这一现状,课题组利用真空吸铸工艺对 ZL116 铝合金进行了研究。通过 ProCAST 软件对 ZL116 铝合金铸件真空吸铸成型过程中的温度场和应力场进行数值模拟^[7-8],对浇注温度、换热系数和模具壁厚这三个工艺参数的不同组合所产生的有效应力进行分析比较。

1 工艺介绍

真空吸铸工艺使用的设备是利用非自耗电弧进行真空熔炼,金属液在自身重力和压力差双重作用下进行充型的金属型底漏式真空吸铸设备。底漏式真空吸铸工艺的优点:在真空的铸造充型环境下,避免了易氧化的金属铝等在融化的过程中被氧化;熔融合金液在自身重力和压力差双重作用下进行充填铸型,提高了合金液的充型能力。此种工艺适用于生产薄而且精细的小型精铸件^{[2]50}。底漏式真空吸铸的原理如图 1 所示。操作中,将设备抽真空后再充入氩气保压;接着在氩气保护下,多次熔炼钛锭除去设备中残留的少量氧气;随后将配制好的铝基合金颗粒在熔炼室的熔炼坩埚中熔化,磁搅拌,并反复 3 到 5 次使合金中的成分均匀;然后将铝合金锭转移到吸铸坩埚中并对其加热,当熔融合金液达到需要的温度时,按下吸铸阀,抽去吸铸室内的氩气,熔炼室和吸铸室之间形成压力差,合金液在该压力差和自身重力的同向耦合作用下,从石墨吸口充入到位于吸铸室内的金属型模具中,从而获得铸件。

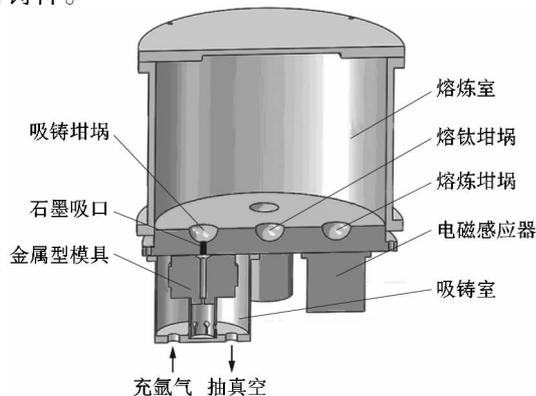


图 1 底漏式真空吸铸原理

Figure 1 Vacuum suction casting principle of bottom leakage type

2 有限元模拟

2.1 材料的热物性参数

研究的铝基合金的化学成分如表 1 所示。在对铸造过程进行数值模拟的前期,需要给出铸件和铸型的各项物理性能参数,由于这些参数都与温度有关,所以也称它们为材料的热物性参数^[9]。本研究中采用 ZL116 合金作为铸造合金,黄铜和紫铜为铸型合金。模拟中利用 ProCAST 软件自身的计算功能,对 ZL116 合金以及黄铜和紫铜的热物性参数进行计算,得到了它们的部分热物性参数,数据如表 2 所示。

表 1 ZL116 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZL116 alloy %

| Si | Mg | Ti | Al |
|------|------|------|--------|
| 6.50 | 0.35 | 0.10 | ≥90.25 |

表 2 材料的热物性参数

Table 2 Thermo physical parameters of materials

| 材料 | 温度/℃ | 热焓数/ (kJ · kg ⁻¹) | 热导率/ (W · m ⁻¹ · K ⁻¹) | 密度/ (kg · m ⁻³) | 泊松比 |
|-------|----------|----------------------------------|--|--------------------------------|------|
| ZL116 | 29 | 2.18 | 184.21 | 2 670.57 | 0.39 |
| | 311 | 273.22 | 185.04 | 2 615.67 | 0.39 |
| | 401 | 366.60 | 185.45 | 2 595.87 | 0.39 |
| | 553(固相线) | 534.54 | 186.02 | 2 559.69 | 0.39 |
| | 625(液相线) | 1 054.97 | 85.02 | 2 417.44 | 0.50 |
| | 651 | 1 084.96 | 86.02 | 2 410.09 | 0.50 |
| | 670 | 1 107.75 | 86.78 | 2 404.54 | 0.50 |
| | 700 | 1 111.63 | 88.77 | 2 395.35 | 0.50 |
| 紫铜 | 553 | 275.81 | 273.02 | 8 772.09 | 0.35 |
| | 625 | 275.35 | 274.67 | 8 750.62 | 0.35 |
| 黄铜 | 553 | 215.28 | 191.73 | 8 558.14 | 0.35 |
| | 625 | 245.18 | 194.05 | 8 539.52 | 0.35 |

2.2 有限元模型的建立

选用 SolidWorks 软件进行实体建模,因为要研究真空吸铸工艺下铸件的力学性能,所以铸件形状选取最简单的圆柱试棒,根据铸件形状画出它的模具图,将其导入 ProCAST 软件中装配和划分面网格,并生成体网格。铸件模型和铸型网格如图 2 所示。

2.3 边界条件及参数设置

根据现有实验设备的实际情况以及实验过程中的实际操作情况,将模拟过程中的石墨直径设为 3 mm,铸型初始温度设为 20 ℃,浇注速度设为 9 g/s,冷却条件设置为空冷。考虑到实验过程中模具与铸件之间的换热系数与模具材料有关,因此模具分别采用紫铜和黄铜 2 种材料。根据刘桐旺对金属型换热系数的研

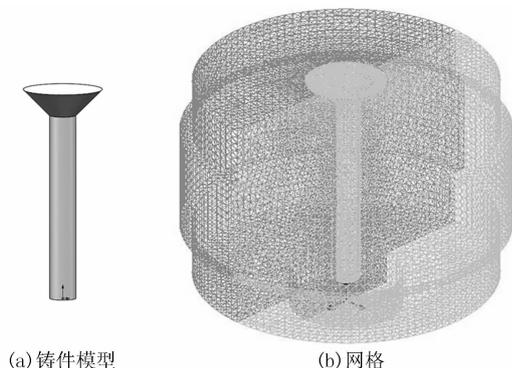


图2 铸件示意图及铸型的面网格图

Figure 2 Casting schematic and surface mesh of the mold

究,此处的模拟条件中紫铜的换热系数可以设为 $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,黄铜的换热系数则可设为 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [10]。

影响真空吸铸有效应力的因素主要有浇铸温度、换热系数、模具壁厚、铸型温度以及浇注速度等因素 [11],本次实验主要从浇铸温度和换热系数以及模具壁厚这3个工艺参数来分析 [12]。不同工艺参数设置的实验安排如表3所示。浇注温度分别选择 $650, 675$ 和 $700\text{ }^\circ\text{C}$,换热系数选择 $5\,000$ 和 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,模具壁厚选择 55 和 45 mm ,一共进行9组真空吸铸有限元模拟实验。

3 真空吸铸应力场数值模拟过程及分析

在铸件铸造成型的过程中,如果铸件的最大应力大于铸件的最大抗拉强度时,铸件会产生裂纹缺陷 [13]。通过 ProCAST 软件中的应力分析模块分析了铸件在不同工艺参数下的应力 [14-16]。笔者就浇注温度、换热系数和模具壁厚对铸件成型过程中产生的有

表3 不同工艺参数设置的实验安排表

Table 3 Experimental setting of different process parameters

| 序号 | 浇注温度/ $^\circ\text{C}$ | 换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$ | 模具壁厚/mm |
|----|------------------------|--|---------|
| 1 | 650 | 5 000 | 55 |
| 2 | 675 | 5 000 | 55 |
| 3 | 700 | 5 000 | 55 |
| 4 | 650 | 2 000 | 55 |
| 5 | 675 | 2 000 | 55 |
| 6 | 700 | 2 000 | 55 |
| 7 | 650 | 5 000 | 45 |
| 8 | 675 | 5 000 | 45 |
| 9 | 700 | 5 000 | 45 |

效应力进行了研究,根据模拟结果对工艺参数进行了优化 [17]。

3.1 浇注温度对有效应力的影响

换热系数设为 $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,分别选取浇注温度为 $650, 675$ 和 $700\text{ }^\circ\text{C}$,模拟铸件在不同浇注温度下的有效应力分布,如图3所示。从图中可以看出,铸件在 $675\text{ }^\circ\text{C}$ 时,最大的有效应力达到 96.55 MPa ,而温度为 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,铸件的最大有效应力明显较小,并且 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,铸件的有效应力分布更均匀。图4为不同浇注温度在铸件中心点的温度-有效应力变化曲线图。铸件温度在达到液相线 $625\text{ }^\circ\text{C}$ 后,凝固速率稍快,期间有效应力变化不明显,但当铸件温度达到固相线 $553\text{ }^\circ\text{C}$ 后,凝固速率加快,有效应力快速增大。浇注温度越大,有效应力增长速度越慢,浇注温度 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,铸件中心的有效应力值最小,为 34.45 MPa 。因此适当提高浇注温度,可以降低有效应力并且铸件内部的有效应力分布更均匀。

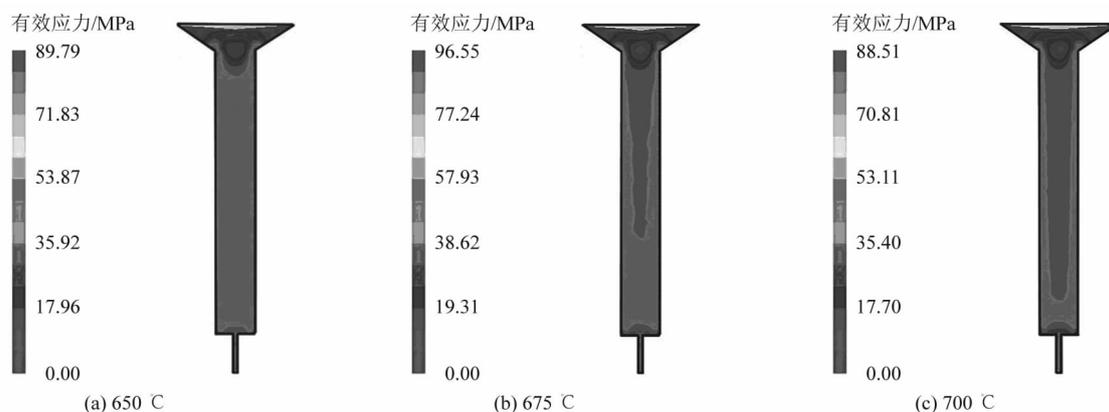


图3 不同浇注温度下的有效应力分布

Figure 3 Effective stress distribution at different pouring temperatures

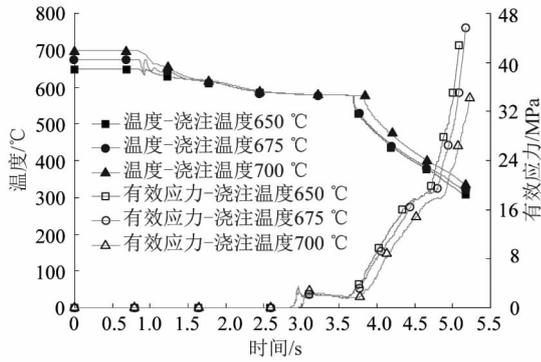


图4 不同浇注温度在中心点的温度-有效应力变化曲线

Figure 4 Temperature-effective stress curve of different casting temperatures at the central point

3.2 换热系数对有效应力的影响

浇注温度 700 °C 时,分别选取换热系数 5 000 W/(m²·K)和 2 000 W/(m²·K),模拟铸件在不同换热系数下的有效应力分布,如图 5 所示。从图 5 可以看出,随着换热系数的减小,铸件的有效应力也随之增大,铸件在 2 000 W/(m²·K)时,最大的有效应力达到 90.33 MPa,并且有效应力的分布也较不均匀。图 6 为不同换热系数在中心点的温度-有效应力变化曲线图。如图 6 所示,铸件的温度曲线同样是在固液相线发生突变,另外,换热系数从 5 000 W/(m²·K)减小到 2 000 W/(m²·K),凝固时间增加了 50 %。随着换热系数的减小,有效应力的增长速度变慢,但铸件成型后,2 种换热系数最终在铸件中心的有效应力基本保持不变。因此,换热系数的提高,能够导致铸件凝固成型速率的提高,能够带来有效应力最大值的降低,并且也使得铸件内部的有效应力分布得更为均匀。

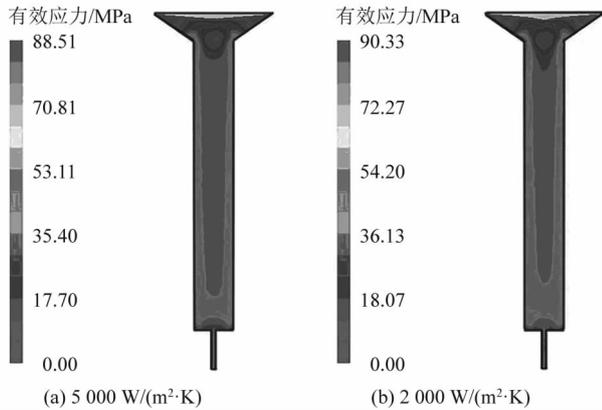


图5 不同换热系数下的有效应力分布
Figure 5 Effective stress distribution under different heat transfer coefficients

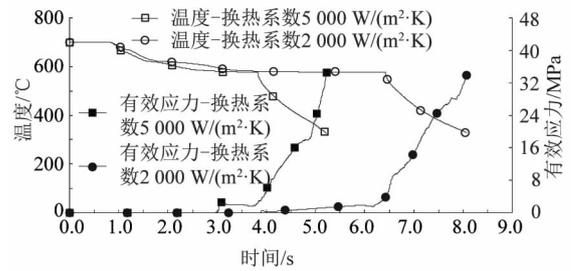


图6 不同换热系数在中心点的温度-有效应力变化曲线

Figure 6 Temperature-effective stress curve of different heat transfer coefficients at central point

3.3 模具壁厚对有效应力的影响

选取浇注温度为 700 °C,换热系数为 5 000 W/(m²·K),模具壁厚分别为 55 和 45 mm,并以此为模拟对象。模具壁厚测量位置示意如图 7 所示。图 8 所示为不同壁厚时的有效应力分布。

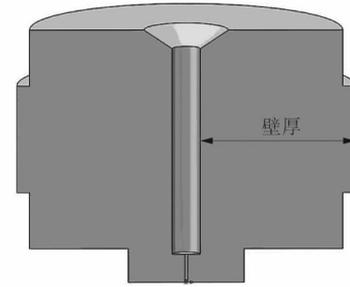


图7 模具壁厚示意图

Figure 7 Schematic diagram of die wall thickness

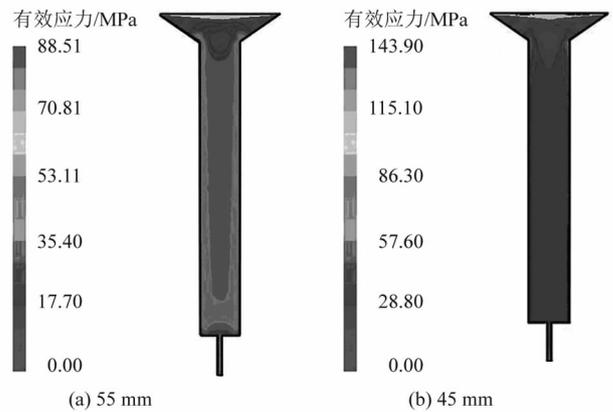


图8 不同模具壁厚下的有效应力分布
Figure 8 Effective stress distribution under different thickness of die wall

从图 8 可以看出,模具壁厚为 55 mm 时,铸件的最大有效应力为 88.51 MPa;模具壁厚为 45 mm 时,铸件的最大有效应力为 146.90 MPa,壁厚减小有效应力

增大。虽然壁厚为 45 mm 时铸件整体的有效应力分布更均匀,但平均值都偏大,不利于铸件的力学性能。

图 9 为不同模具壁厚在中心点的温度-有效应力变化曲线图。从图 9 可以看出,壁厚为 55 mm 和 45 mm 时铸件中心的温度曲线几乎重合在一起;壁厚变化同样对有效应力的影响不大,2 条应力曲线也几乎重合。结合图 8 和图 9,我们可以发现,模具壁厚对铸件的最大有效应力值的影响最为明显。因此,根据工艺要求合理增大模具壁厚,可以明显地降低铸件的最大有效应力值。模具壁厚的增加使得铸件凝固时散热更加平稳快速^[18],减少了成型缺陷,提高了铸件质量。

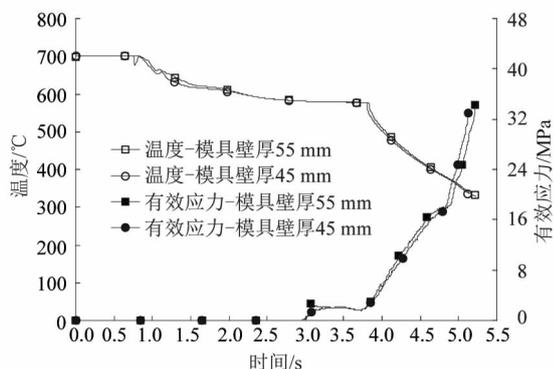


图 9 不同模具壁厚在中心点的温度-有效应力变化曲线

Figure 9 Temperature-effective stress curve of different mold wall thickness at central point

4 工艺参数优化与实验验证

课题组利用有限元模拟软件 ProCAST 对铸件的温度场以及应力场进行模拟,可以得到铸件的有效应力分布,以及铸件中心的有效应力值。在铸造生产过程中,有效应力越大,越容易出现热裂倾向,热裂纹的出现会大大降低产品的生产合格率,所以,对铸件热裂纹产生的准确预测,将对铸造业的发展有着极其重要的意义。笔者通过改变浇注温度,换热系数,模具壁厚 3 个参数对铸造过程进行了模拟,模拟结果表明:在浇注温度为 700 °C,换热系数为 5 000 W/(m²·K),模具壁厚为 55 mm 时,能有效地降低铸件的有效应力,减少热裂倾向,从而提高铸件的质量。图 10 为该优化工艺参数下 3 次实验得到的铸件试棒轴向剖视图,经测得试棒的平均抗拉强度为 199.79 MPa,远大于模拟结果中的有效应力 88.51 MPa,所以,该工艺参数下的试棒热裂倾向得到有效的控制。

5 结语

1) 浇注温度对铸件的有效应力影响明显。适当提



图 10 优化工艺参数下铸件试棒的轴向剖视图

Figure 10 Axial section view of casting rods under optimized process parameters

高浇注温度,可以有效降低铸件的有效应力,同时也使得铸件内部有效应力分布均匀,从而提高铸件的质量。

2) 不同的换热系数对铸件的有效应力影响较小。但换热系数高,能够加快铸件的凝固速率,生成的缺陷也较少,铸件内部的有效应力也随之减小,形成热裂的可能性也随之变小。

3) 模具壁厚的大小对铸件的有效应力影响很大。模具壁越厚,在铸件凝固成型过程中作用越大。模拟试验结果表明,模具壁变厚,能大大地降低铸件的最大有效应力值。

参考文献:

- [1] 刘正,张斯博,毛萍莉,等. 稀土钇对 Mg-Zn-Y-Zr 合金热裂敏感性的影响[J]. 中国有色金属学报:英文版,2014(4):907.
- [2] 叶喜葱,吴彬彬,罗爱娇,等. 金属型底浇式真空吸铸钛铝基合金凝固的有限元模拟[J]. 机械工程材料,2016,40(9):49.
- [3] KIM Y C, CHOI S W, KIM C W, et al. Influence of process parameters on the fluidity of high pressure die-casting Al-Si alloys [J]. Advanced Materials Research, 2013, 813:171.
- [4] 任新意,王松涛,高慧敏,等. 冷轧薄规格高强钢表面斜纹缺陷分析与控制[J]. 中国冶金,2017,27(10):59.
- [5] 武永红,李永堂,齐会萍,等. 铸锻成形高温出模环形铸坯的热力耦合模拟[J]. 特种铸造及有色合金,2016,36(2):200.
- [6] JIANG Hongjie, CAO Shanshan, KE Changbo, et al. Fine-grained bulk NiTi shape memory alloy fabricated by rapid solidification process and its mechanical properties and damping performance [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2013, 29(9):855.
- [7] 秦文真,赵军,李安海. 铝合金活塞铸造过程中模具易失效区域预测[J]. 材料工程,2017,45(2):60.
- [8] 李俊文. 铝合金挤压铸造热-力行为实验研究与数值模拟[D]. 广州:华南理工大学,2014:65.
- [9] 王毓男. 锰质量分数对 Fe-Mn-C 钢热物性参数的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(10):51.
- [10] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆:重庆大学,2016:47.

(下转第 44 页)