

# GKMS60 铜合金低压铸造过程界面换热反算求解及应用

胡柏乐, 曹流, 孙飞, 唐玉龙, 廖敦明\*

(华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 对于低压铸造而言, 铸件与铸型间的换热行为较为复杂, 采用一个经验值会大大降低模拟的准确性. 而界面换热系数受不同材质、界面温度等因素影响, 无法通过单一实验或者理论方法来确定. 本文基于热传导反算法, 自主开发了换热系数反算程序. 该反算法需要根据测温数据来确定材质间的界面换热系数. 设计了单向重力铸造实验, 基于实验中靠近界面处位置测得的温度, 求解得到了 GKMS60 铜合金和模具铜之间的换热系数. 结果表明界面换热系数变化主要发生在液固相区间, 其变化范围在  $1000\sim 2700$  ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ) 之间. 将反算得到的界面系数运用到低压铸造模拟当中, 有效地提高模拟的准确性.

**关键字:** GKMS60 铜合金, 界面换热系数, 反热传导法, 低压铸造

中图分类号: TG249.3

文献标志码: A

## SOLUTION AND APPLICATION OF INVERSE HEAT TRANSFER BETWEEN GKMS60 AND COPPER CHILL IN LOW PRESSURE DIE CASTING PROCESS

Hu Baile, Cao Liu, Sun Fei, Tang Yulong, Liao Dunming

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** For low-pressure casting, the heat transfer behavior of casting and mold is complex. Using the experience value will greatly reduce the accuracy of simulation. The interfacial heat transfer coefficient is affected by materials, interface temperature and other factors and is hardly

---

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)

第一作者简介: 胡柏乐: 男, 1991 年生, 硕士生, 电话: 15623019639 E-mail: hubaile\_huster@163.com.

通讯作者: 廖敦明, 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, 电话: 18071121688 E-mail: liaodunming@hust.edu.cn.

determined by simple experiments or theoretical method. In this study, based on inverse heat conduction, the heat transfer coefficient anti-arithmetic program was developed. In the process of calculating the ITHC, the inverse analysis method need to be on the basis of experiment temperature data. Unidirectional gravity casting experiment was designed. The interface heat transfer coefficient of GKMS60 copper and copper chill is obtained based on measured temperatures near the interface position. And It is found that the IHTC varies in the liquid-solid phase. The values are in the range of approximately 1000-2700(W/m<sup>2</sup>/K). By applying the identified IHTC into low-pressure casting simulation, the accuracy of the numerical simulation is effectively improved.

**Key words:** GKMS60 copper, interfacial heat transfer coefficient, inverse heat conduction, low-pressure casting

目前, 针对铸造的温度场模拟技术已基本成熟, 但是随着技术的不断发展, 提升铸造过程中模拟的精确性就成了诸多研究者需要解决的关键问题之一<sup>[1]</sup>. 其中, 作为边界条件之一的界面换热系数(IHTC)是制约模拟计算准确性的最重要参数之一<sup>[2]</sup>. 而界面换热系数是界面接触条件、物理条件、化学条件及界面温度等因素的综合体现<sup>[3]</sup>. 它的影响因素复杂而多样, 这使得准确评估界面换热系数较为困难. 在实际模拟应用过程中, 界面换热系数常常采用一个经验值, 而这些经验值或者猜测值对于砂型铸造等铸造工艺来说, 计算误差可能不会太大, 但是对于金属型铸造, 因为冷却速度较砂型快得多, 界面换热行为对数值计算的结果的准确性更为重要<sup>[4]</sup>. 但是界面换热系数并不能简单地通过实验或理论方法来确定或求解. 目前, 求解界面换热系数主要方法有间隙跟踪法、多因素回归法及反热传导法<sup>[5, 6]</sup>, 间隙跟踪法和多因素回归法有很大局限性, 而且应用起来较为困难<sup>[7, 8]</sup>. 反热传导法作为一种反分析方法用来求解和研究铸件和铸型间的换热行为. 目前, 诸多学者将该方法应用在界面换热系数反求中. ŞAHİN 等<sup>[9]</sup>利用反热传导法来求解单向凝固过程中 Al-Si 合金分别与铜合金冷却介质、冷铁间的换热系数. Griffiths 等<sup>[10]</sup>研究了 Al-Si 合金与铜冷却介质间不同接触方向上的界面换热系数. 张立强等<sup>[11]</sup>研究了反热传导法中阻尼系数、未来时间步长等参数对计算精度的影响, 并在此基础上求解了 A356 铝合金与铜冷却介质间在水冷条件下的换热系数. 郭志鹏等<sup>[2, 12]</sup>基于热传导反算法, 研究了测温点位置、温度采集频率对计算结果的影响, 并求解了 ADC12Z 铝合金在高压铸造中与铸型间的换热系数. 虽然目前反热传导法被作为主要方法求解不同材

质间的界面换热系数,但大部分文献运用该方法求解了铝合金和铜冷却介质间的界面换热行为,对铜合金与铜冷却介质间的界面换热机制报道较少。

通过以上分析,本文基于 BECK 等<sup>[13-15]</sup>提出的反热传导法,开发了热传导反算程序.通过施加在网格边界上的已知热流,利用热传导反算程序计算得到热流,与实际热流进行对比,验证了自主开发的反算程序的准确性.该热传导反算法需要根据测温数据来确定铸件-铸型间的界面换热系数.因此,设计了单向重力铸造实验,考虑到低压铸造中实际模具的温度,将铜冷却介质加热到一定温度,进行测温实验,并基于铸件内温度数据成功地应用该反热传导模型求解分析了 GKMS60 铜合金与铜冷却介质间的界面换热系数随凝固时间的变化规律.为了验证反求得到的界面换热系数在低压铸造模拟运用中的准确性,设计低压铸造流动充型实验,实验结果与模拟结果对比表明运用该反算得到的界面换热系数提高了数值模拟的准确性,从而为制定有效的生产工艺方案,提高铸件质量提供了重要的参考和应用价值。

## 1 界面换热系数反算算法及自主开发程序验证

### 1.1 热传导反算法

热传导反算法主要是根据铸件或者冷却介质内测量得到的温度数据来确定界面换热系数.热传导反算法求解过程中,根据 Beck<sup>[13-15]</sup>的非线性估算法,可以将待求的随时间变化的热流离散为若干个时间间隔为 $\Delta\theta$ 的热流值( $q_i=q_1, q_2...q_t...q_N$ ).在求解  $t$  时刻热流时,为了提高反算法的稳定性,引入了未来时间步长  $R$  的概念,即假设  $t$  以及  $t$  以后  $R$  个时间间隔之内的热流值是相等的.即:

$$q_t = q_{t+1} = q_{t+2} = \dots = q_{t+R} \quad (1)$$

其中每一个 $\Delta\theta$ 的热流  $q_t$  是通过测量温度与计算温度误差值最小的判据迭代计算获得,可用式(2)表示:

$$F(q_t) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^R (T_{j,t+i} - C_{j,t+i})^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

式中,  $i$  和  $j$  分别为时间和测温位置,  $J$  为测温位置总数,  $R$  为未来时间步长,  $q_t$  为  $t$  时刻的界面热流,  $T$  和  $C$  分别为计算温度和实测温度.函数  $F$  是通过迭代计算的目标函数.通过数学推导,可通过以下两式求解界面热流:

$$\Delta q_t = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N (T_{j,t+i} - C_{j,t+i}) \phi_{j,t+i}}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N \phi_{j,t+i}^2} \quad (3)$$

$$q_{t+1} = q_t + \Delta q_t \quad (4)$$

式中， $\phi_{j,t+i}$  是敏感系数，被定义为在铸件或铸型内某位置温度随着单位热流变化的响应，其表达式如下：

$$\phi_{j,t+i} = \frac{\partial T_{j,t+i}}{\partial q_{j,t+i}} \quad (5)$$

在迭代计算热流时，通过式(4)不断修正  $q_t$ ，当式(2)中测量的温度与计算的温度差值满足给定的收敛误差值时，即得到当前计算的热流  $q_t$ 。重复以上的过程，直到所有时刻内的热流  $q$  被计算得到为止。

当反求出所有时刻的热流  $q$ ，可用下式公式求出界面换热系数：

$$H = q / (T_{\text{casting}} - T_{\text{mold}}) \quad (6)$$

式(6)中， $H$  是界面换热系数(W/m<sup>2</sup>/K)， $q$  是界面热流(W/m<sup>2</sup>)， $T_{\text{casting}}$  和  $T_{\text{mold}}$  分别表示铸件的表面温度和模具的表面温度(K)。

## 1.2 程序验证

采用梯形热流，如图 1 所示，将此热流施加在网格边界的一端，另一端边界条件设为绝热。网格单元总长度为 50 mm，程序中设置空间步长为 0.1 mm，时间步长为 0.1 s，初始温度为 120 °C，计算得到网格边界点的温度曲线  $T_f$  和距离网格边界 1 mm，3 mm，5 mm 处的节点温度曲线  $T_{1\text{mm}}$ 、 $T_{3\text{mm}}$  和  $T_{5\text{mm}}$ 。

以边界处的温度值  $T_f$  为初始值，采用自主开发的反算程序，求解网格边界处的热流和利用反求出来的热流计算得到边界温度值。计算结果如图 2 所示，反算出来的热流值及计算的边界温度值与实际热流值及边界温度值非常吻合，最大误差小于 2%。因此，对比结果表明基于自主开发的反算程序的准确性。

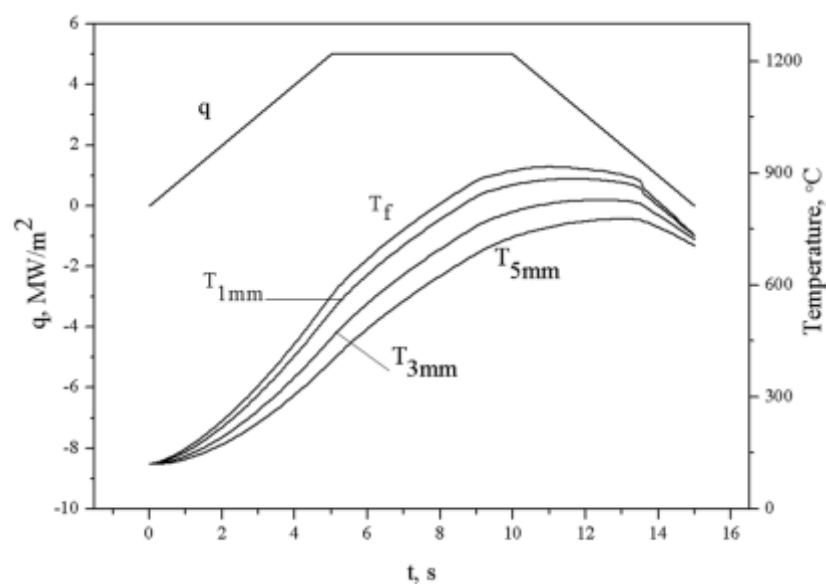


图 1 梯形热流( $q$ )及计算得到的网格边界温度( $T_f$ )和

距离网格边界 1 mm( $T_{1mm}$ )、3 mm( $T_{3mm}$ )和 5 mm( $T_{5mm}$ )的温度曲线

**Fig.1** Trapezoid shape heat flux( $q$ ) and the calculated surface temperature ( $T_f$ ) and internal temperatures located at 1 mm( $T_{1mm}$ ), 3 mm( $T_{3mm}$ ), 5 mm( $T_{5mm}$ ) from the surface

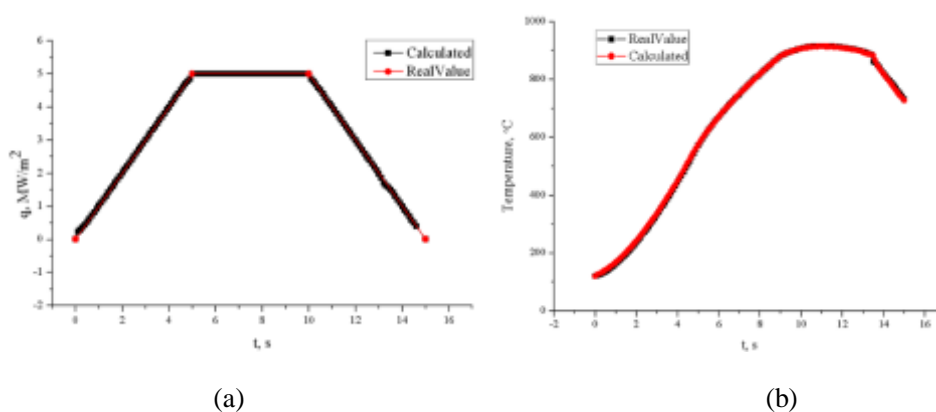


图 2 计算得到的热流和边界温度与实际热流和边界温度对比

**Fig.2** Comparisons between calculated heat flux and surface temperature and the accurate values: (a) Comparison between calculated heat flux and the accurate value; (b) Comparison between calculated temperature and the accurate value

## 2 界面换热系数反求

### 2.1 实验设计

利用反热传导法求解 GKMS60 铜合金与铜冷却介质之间的界面换热系数, 设计如图 3 所示的单向重力铸造凝固实验. 图中 T1、T2 和 T3 处位置的热电偶分别距离冷却介质表面 5

mm、10 mm 和 40 mm. 测温用的热电偶为直径 0.5 mm 的 S 型热电偶, 一端用双孔内径为 1 mm, 外径为 4 mm 的陶瓷管保护后插入铸件型腔内. 热电偶数据采集系统是 NATIONAL INSTRUMENTS 多功能 16 通道数据采集仪, 采集频率为 75 次/s. 为了保证实验过程中的热量是单向传递的, 在耐热模具外包裹石棉减少与外界环境的热流交换. 实验中使用的铸件材料为 GKMS60 铜合金, 冷却介质材料为 QBe0.4, 铸件与冷却介质的物性参数如表 1 所示. 将 GKMS60 铜合金放置在感应电炉中加热至 1100 ℃进行浇注, 同时将冷却介质温度加热至 120 ℃, 浇注高度距离耐热模具上表面 15 cm, 浇注时间为 6 s.

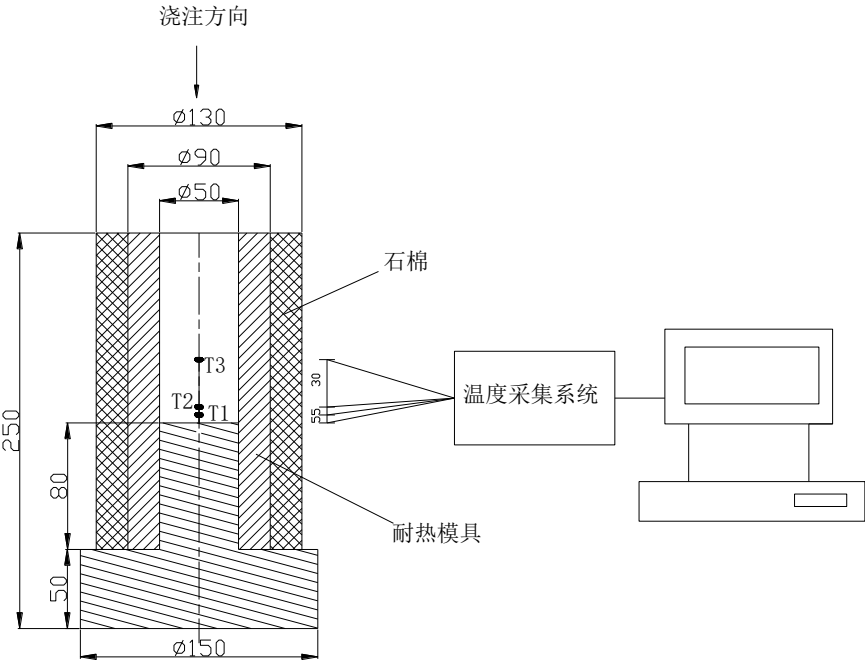


图 3 实验设计(单位: mm)

Fig.3 Experimental design (Unit: mm)

表 1 铸件(GKMS60)与冷却介质(QBe0.4)热物性参数

Tab.1 Thermal physical parameters of casting(GKMS60) and mold(QBe0.4)

材料	密度 $\rho$ / 10 <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>	比热 $C$ / KJ/(Kg·K)	潜热 $L$ / KJ/Kg	热导率 $K$ / W/(m·k)	固相温度 T/K	液相温度 T/K
GKMS60	6.830~8.046	0.392~0.5	140.94	72.5~136.1	880.35	905.79
QBe0.4	7.879~8.919	0.387~0.496	-	162.7~331.8	-	-

2.2 界面换热系数反求结果

图 4 为测温实验所得的数据. T1、T2 和 T3 分别为距离冷却介质表面 5 mm、10 mm 和 40 mm 处热电偶得到的温度数据. 文献<sup>[2]</sup>指出了要保证求解界面换热系数的准确性, 需要测温点靠近界面, 因此本文利用 T1 的温度数据进行换热系数反求. 实验中铸件是单向凝固的, 靠近界面处的温度比远离界面处的温度降的快, 随着凝固的进行整个铸件内部温度分布是不均匀的. 在反求换热系数过程中, 需要多次迭代计算正热传导过程. 正热传导计算需要设置铸件的初始温度值, 本文利用 T1、T2 和 T3 的峰值温度来初始化铸件的温度场. 图 5 所示为反算得到的 GKMS60 与冷却介质间的界面换热系数和铸件表面温度随时间的变化曲线, 铸件的界面温度是应用反算得到的界面换热系数通过正热传导数值计算得到. 从图 5 可以看出, 在铸件凝固阶段但温度高于液相线温度以上时界面换热系数达到峰值为 2700 (W/m<sup>2</sup>/K), 在液固相线温度区间界面换热系数值逐渐减小, 当温度低于固相线温度以下保持一个常数为 1000 (W/m<sup>2</sup>/K). 该规律与文献<sup>[11]</sup>所报道的相近。

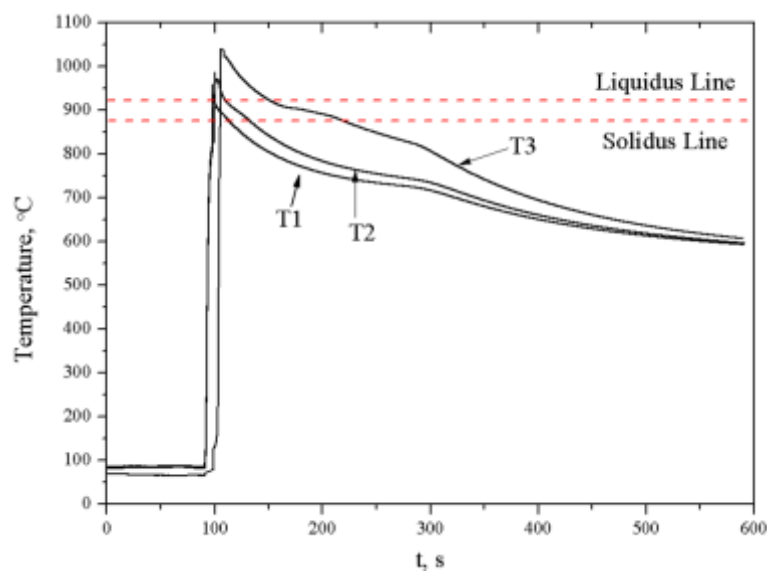


图 4 铸件内部不同位置的测温曲线

Fig.4 Measured curves of temperature at different positions of casting

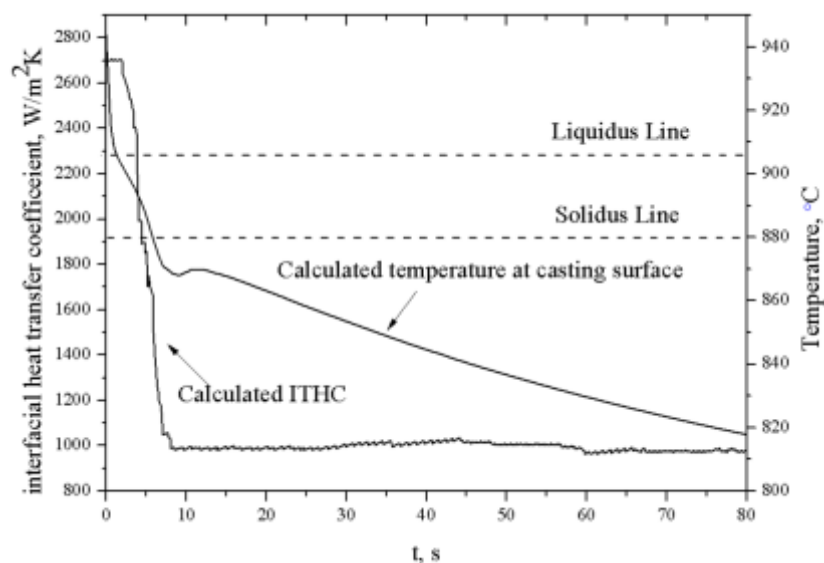
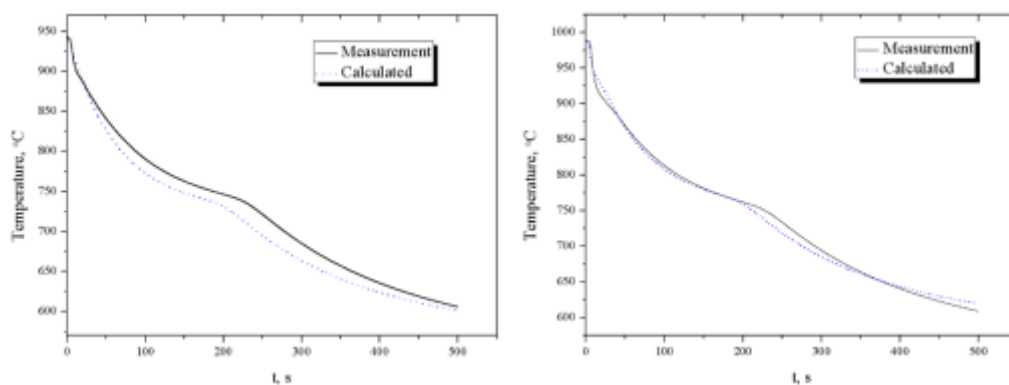


图 5 反求的界面换热系数与计算的界面温度随时间的变化

Fig.5 Variation of calculated ITHC and calculated surface temperature with time

利用铸件内部距离界面 5 mm 和 10 mm 处(即 T1 和 T2)的温度数据验证反算得到的界面换热系数. 图 6 为实验温度与数值计算温度的对比, 计算温度通过反算得到的界面换热系数求解正传热模型得到. 从图 6 可以看出, 计算的温度结果与实验温度结果相吻合, 距离界面 5 mm 位置温度比较结果最大误差低于 15 K, 距离界面 10 mm 位置温度比较结果最大误差低于 10 K. 计算温度与实验测量温度产生误差的原因可能是因为在测温实验中很难准确的将热电偶放置在中心线上, 而在数值模拟过程中假设热电偶的位置处于中心线上, 这样造成了温度测量的误差. 同时, 在测温实验过程中, 无法知道某时刻的铸件整体的温度场分布, 而在计算正热传导中需要初始化铸件的温度, 温度场初始化的误差会导致计算温度有所偏差. 综上, 这些因素会造成计算温度与测量温度的差异. 然而, 根据文献<sup>[11]</sup>, 数值计算温度与测量温度误差小于 20 K 都是可以接受的. 因此, 温度比较结果表明反热传导法计算 GKMS60 铜合金与铜冷却介质间的界面换热系数是准确的.





(a) (b)

图 6 测量温度与计算温度比较

**Fig.6** Comparisons of calculated and measured temperatures: (a) At location of 5mm from interface;(b) At location of 10mm from interface

### 3 低压铸造实验验证

决定金属型铸件冷却速率主要有三个因素：铸件的导温能力、铸型的导温能力、铸件与铸型间的界面换热系数，当铸件与铸型材料确定，那么界面换热系数成为影响铸件冷却速率的主要因素. 本文以 GKMS60 铜合金薄壁件为研究对象，验证反热传导法求解的界面换热系数应用在低压铸造模拟中的准确性. 实验用模具为一模三腔，模具设计如图 7 所示. 通过放置不同厚度的砂芯进行浇注得到不同壁厚的铸件，铸件壁厚分别为 2.3 mm、2.8 mm、3.0 mm 和 3.5 mm. 实验所用的铸件材料为 GKMS60，模具材料为 QBe0.4，砂芯材料为树脂砂. 实验条件：浇注温度为 1010 ℃，模具温度为 120 ℃. 浇注压力为 50000Pa，升压 5 s，保压 10 s.



图 7 模具示意图

**Fig.7** Schematic diagram of mold: (a) Metal mold; (b) Sand core is placed in the mold

通过大量的浇注试验得到不同壁厚的铸件并统计不同壁厚铸件的平均充型高度. 利用华铸 CAE 软件模拟其浇注过程，界面换热系数设置为反求得到的界面换热系数. 实际产品和模拟结果如图 8 所示，图中 Products 代表实际浇注得到的铸件，Simulation 代表模拟结果，(a)、(b)、(c)和(d)分别代表壁厚为 2.3 mm、2.8 mm、3.0 mm 和 3.5 mm 的铸件. 从图 8 中可以看出，实际铸件的充型高度随着壁厚的增加而逐渐增加，模拟结果与实际趋势一致. 通过统计不同壁厚铸件的模拟充型高度，与实际铸件充型高度进行对比. 结果如图 9 所示，壁厚为 2.3 mm 的铸件实际充型高度为 184 mm，模拟的充型高度为 182 mm，误差值为 2 mm (1.08%

的相对误差). 壁厚为 2.8 mm 的铸件充型高度为 206 mm, 实际模拟的充型高度为 203 mm, 误差值为 3 mm (1.45%的相对误差). 壁厚为 3.0 mm 的铸件实际充型高度为 210 mm, 模拟的充型高度为 211 mm, 误差值为 1 mm (0.47%的相对误差). 壁厚为 3.5 mm 的铸件实际充型高度为 234 mm, 模拟的充型高度为 235 mm, 误差值为 1 mm (0.43%的相对误差). 实际产品的高度与模拟的高度产生误差的原因可能是实际浇注产品时, 由于多次浇注, 模具温度可能发生变化, 而模拟中设置的模具温度都是一致的, 这样就导致因实际工况的变化而产生误差. 然而由上分析, 铸件模拟的高度与实际铸件的高度相吻合, 最大高度差不超过 3 mm, 能准确的预测铸件的充型高度. 因此, 通过反传导法得到的界面换热系数运用到低压铸造模拟当中, 提高了数值模拟的准确性.

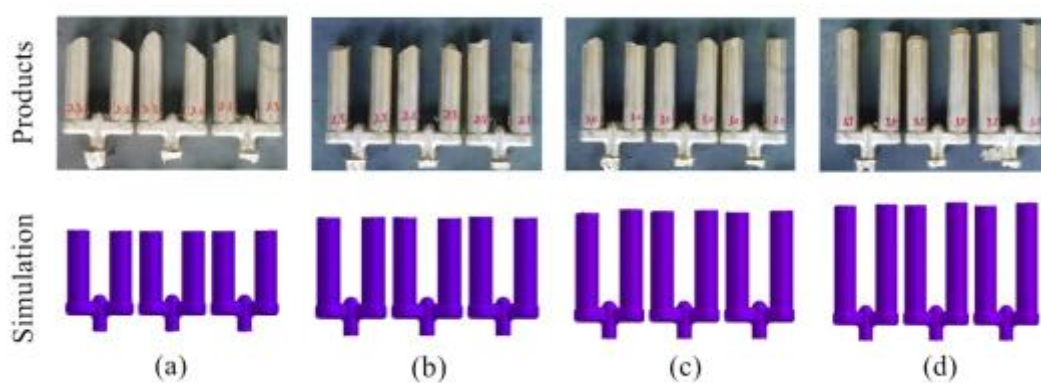


图 8 实际铸件与模拟结果比较

**Fig.8** Comparisons of experiment and simulation results: (a) The casting wall thickness of 2.3 mm; (b) The casting wall thickness of 2.8 mm; (c) The casting wall thickness of 3.0 mm; (d) The casting wall thickness of 3.5 mm

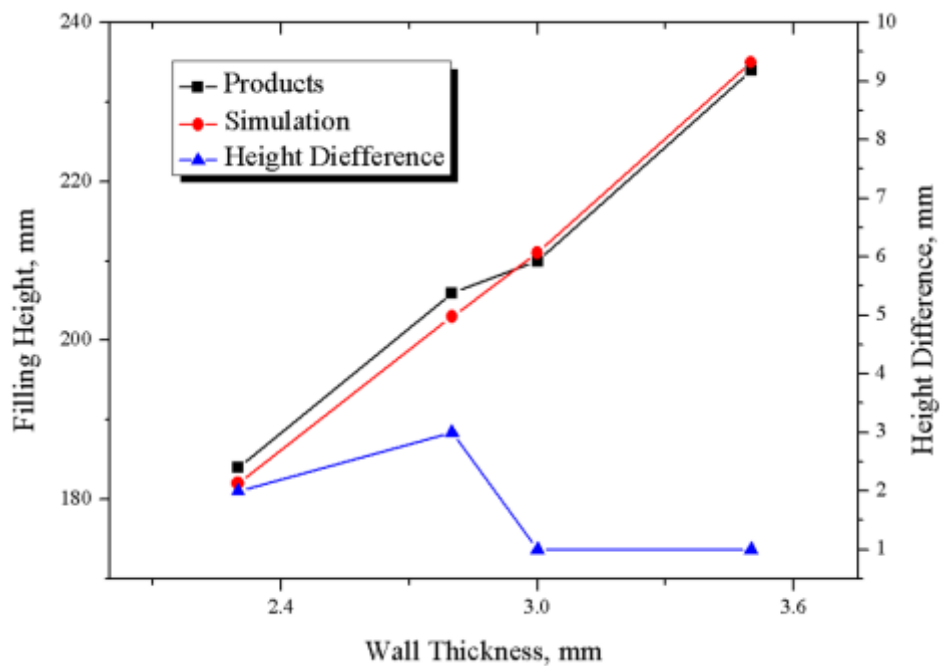


图 9 实际铸件与模拟铸件的充型高度比较和高度差随壁厚的变化

Fig.9 The filling height comparisons of actual and simulative casting; Variation of height difference with casting wall thickness

## 4 结论

1. 基于非线性反算法，开发了界面换热反算程序，通过给定已知热流验证了该反算程序的准确性.
2. 应用该反热传导模型计算求得了 GKMS60 铜合金与铜冷却介质间的界面换热系数，结果表明界面换热系数变化主要发生在液固相区，变化范围在  $1000\sim 2700(\text{W}/\text{m}^2/\text{K})$  之间，在液相区和固相区分别保持为一个常数.
3. 将反求得到的界面换热系数，运用在低压铸造模拟当中，模拟结果与实验结果相吻合，提高了数值模拟的准确性，为优化工艺方案和提升产品质量提供了重要的参考.

## 参考文献

- [1] 曹永友, 熊守美, 郭志鹏. 压铸压室内界面传热反算模型的建立和应用[J]. 金属学报, 2015, 51 (6): 745-752.
- [2] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铉, 等. 热传导反算模型的建立及其在求解界面热流过程中的应用[J]. 金属学报, 2007, 43 (6): 607-611.
- [3] 徐宏, 侯华, 赵宇宏. 铝铸件凝固模拟边界热交换系数的测定[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13 (4): 881-885.
- [4] 杜凤山, 张沛, 许志强, 等. 铝铸锭凝固边界热交换规律及温度场模拟[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17 (11): 1750-1754.
- [5] Hang J C, Chuang H T, Jong S H. Measurement of heat transfer coefficient at metal/mold interface during casting[J]. AFS Transactions, 1994, 102:877-883.
- [6] Ho K, Pehlke R D. Mechanisms of heat transfer at a metal/mold interface[J]. AFS Transaction 1984, 92:587-598.
- [7] 郝守卫, 柳百成, 张卓琪. 凝固过程传热导的反问题[J]. 清华大学学报, 1989, 29 (2): 36-43.
- [8] Krishnan M, Sharma D G R. Determination of heat transfer coefficient between casting and chill in unidirectional heat flow[J]. AFS Transactions, 1994, 102:769-774.
- [9] ŞAHİN H M, KOCATEPE K, KAYIKCI R, AKAR N. Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting-chill interface[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 19-34
- [10] Griffiths WD. The heat-transfer coefficient during the unidirectional solidification of an Al-Si alloy casting. Metall Mater Trans B 1999, 30:473-82.
- [11] 张立强, 李落星, 谭文芳, 等. 铸造凝固界面换热系数求解的反热传导模型[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (1): 83-90.
- [12] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铉, 等. 铝合金 ADC12Z 高压铸造过程中铸件与铸型间界面热交换系数的研究[J]. 金属学报, 2007, 43 (1): 103-106.
- [13] Beck J V, Blackwell B, Clair C. Inverse heat conduction: ill-posed problems[J]. Wiley, London, 1985.
- [14] Beck J V. Transient sensitivity coefficient for thermal contact conductance[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1967, 10:1615-1619.
- [15] Beck J V, Litkouhi B, Stclair C R. Efficient numerical solution of the nonlinear inverse heat conduction problem[J]. Mechanical Engineering, 1980, 102:96-104.