

GKMS60 铜合金低压铸造过程界面传热反算求解及应用

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)

摘要 基于热传导反算法,自主开发了传热系数反算程序。该反算法需要根据测温数据来确定材质间的界面传热系数。设计了单向重力铸造试验,基于试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传热系数。结果表明,界面传热系数变化主要发生在液-固相区间,其变化范围在 $1\ 000\sim 2\ 700\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 之间。将反算得到的界面传热系数运用到低压铸造模拟当中,提高了模拟结果的准确性。

关键词 GKMS60 铜合金;界面传热系数;反热传导法;低压铸造

中图分类号 TG146.1⁺1;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2017.12.013

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,

Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Based on inverse heat conduction, the anti-arithmetic program of heat transfer coefficient was developed. In the process of calculating the ITHC, the inverse analysis method is dependent on experiment temperature data. Unidirectional gravity casting experiment was designed. The interface heat transfer coefficient of GKMS60 copper and copper chill was obtained based on measured temperatures near the interface position. The results reveal that the IHTC is changed in the range of approximately $1\ 000\sim 2\ 700\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ in the liquid-solid phase zone. By applying the identified IHTC into low-pressure casting simulation, accuracy of the numerical simulation was improved effectively.

Key Words: GKMS60 Copper, Interfacial Heat Transfer Coefficient, Inverse Heat Conduction, Low-pressure Casting

目前,针对铸造温度场的计算机模拟技术已基本成熟,但是随着技术的不断发展,提高铸造模拟结果的精确性成为研究重点^[1]。其中,界面传热系数(IHTC)是影响模拟结果准确性的最重要参数之一^[2]。而界面传热系数的影响因素复杂,这使得准确评估界面传热系数较为困难。在实际模拟应用过程中,界面传热系数常常采用经验值,这导致模拟结果精确度较低^[3]。

界面传热系数并不能简单地通过试验或理论方法来确定或求解。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传热行为。SAHIN H M等^[4]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、冷铁间的传热系数。GRIF-FITHS W D等^[5]研究了 Al-Si 合金与铜冷却介质间不同接触方向上的界面传热系数。张立强等^[6]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传热系数。郭志鹏等^[2,7]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 铝合金在压铸中与铸型间的传热系数。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传热系数,但主要运用该方法求解了铝合金和铜冷却介质间的界面传热行为,对铜合金与铜冷却介质间的界面传热机制报道较少。

因此,本课题基于 BECK J V 等^[8~10]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,并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

收稿日期:2017-08-22;修改稿收到日期:2017-09-10

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

第一作者简介:胡柏乐,男,1991年出生,硕士研究生,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),电话:15623019639, E-mail:hubaile_huster@163.com

通信作者:廖敦明,男,1973年出生,教授,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),电话:18071121688, E-mail:liaodunming@hust.edu.cn

型间的界面传热系数。因此,设计了单向重力铸造试验,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,进行测温试验,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传热系数随凝固时间的变化。为了验证反求得到的界面传热系数在低压铸造模拟运用中的准确性,设计了低压铸造流动充型试验,试验结果与模拟结果对比表明运用该反算得到的界面传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,提高铸件质量提供参考。

1 热传导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传热系数。热传导反算法求解过程中,根据 BECK J V 等^[8~10]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($q_i=q_1, q_2, \dots, q_t, \dots, q_N$)。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,可用下式表示:

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

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:

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

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

式中, $\phi_{j,t+i}$ 是敏感系数,其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,表达式为:

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

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 ,可用下式求出界面传热系数:

$$H = q / (T_{\text{铸件}} - T_{\text{型}}) \quad (6)$$

式中, H 是界面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; q 是界面热流, W/m^2 ; $T_{\text{铸件}}$ 和 $T_{\text{型}}$ 分别为铸件和模具的表面温度, K 。

1.2 程序验证

采用梯形热流(见图1),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、3、5 mm 处的节点温度曲线 T_1 、 T_2 和 T_3 。

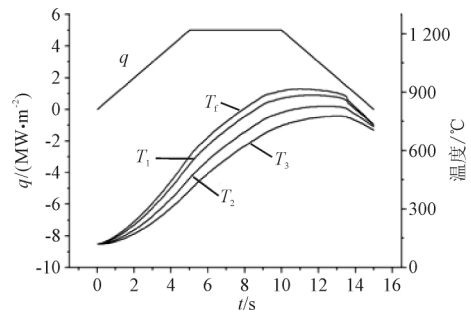


图1 梯形热流(q)及计算得到的网格边界温度(T_f)和 $T_1 \sim T_3$ 的温度曲线

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,计算结果见图2。可以看出,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符合较好,最大误差小于 2%。

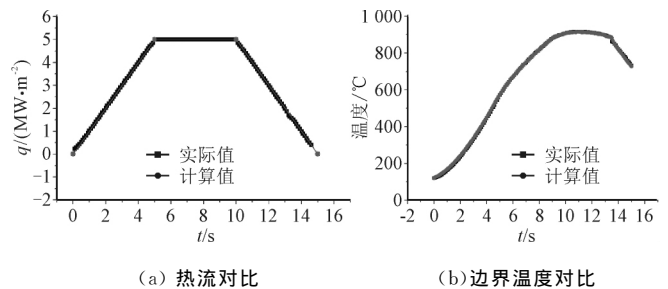


图2 热流和边界温度的计算值与实际值对比

2 界面传热系数反算

2.1 试验设计

利用反热传导法求解 GKMS60 铜合金与铜冷却介质之间的界面传热系数,设计的单向重力铸造凝固试验见图3。其中 T_4 、 T_5 和 T_6 处位置的热电偶分别距离冷却介质表面 5、10 和 40 mm。测温用的热电偶为 $\phi 0.5$ 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

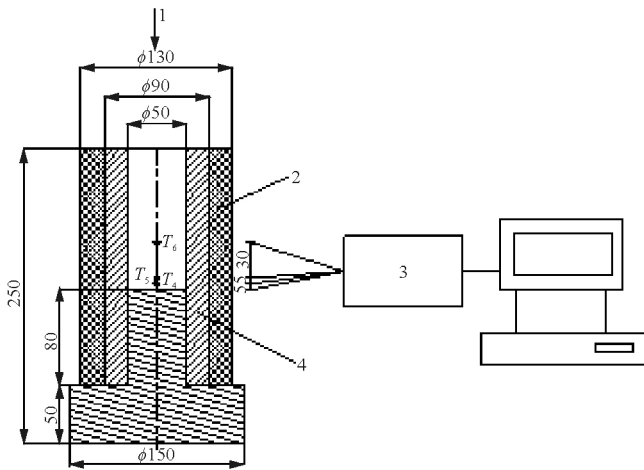


图3 试验设计

1. 浇注方向 2. 石棉 3. 温度采集系统 4. 耐热模具

试验过程中的热量是单向传递的,在耐热模具外包裹石棉以减少与外界环境的热流交换。试验合金为 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见表 1。将 GKMS60 铜合金放置在感应电炉中加热至 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 进行浇注,同时将冷却介质温度加热至 $120\ ^\circ\text{C}$,浇注高度距离耐热模具上表面 $15\ \text{cm}$,浇注时间为 $6\ \text{s}$ 。

表 1 铸件(GKMS60)与冷却介质(QBe0.4)热物性参数

材料	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比热容/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	潜热/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	固相线温度/ $^\circ\text{C}$	液相线温度/ $^\circ\text{C}$
GKMS 60	6.830~8.046	0.392~0.500	140.94	72.5~136.1	880.35	905.79
QBe 0.4	7.879~8.919	0.387~0.496	—	162.7~331.8	—	—

2.2 界面传热系数反求结果

图 4 为测温试验所得的数据。要保证求解界面传热系数的准确性,需要测温点靠近界面^[2]。因此本课题利用 T_4 的温度数据进行传热系数反求。试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得快,随着凝固的进行整个铸件内部温度分布是不均匀的。在反求传热系数过程中,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,本课题利用 $T_4\sim T_6$ 的峰值温度来初始化铸件的温度场。图 5 为反算得到的 GKMS60 合金与冷却介质间的界面传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传热系数通过正热传导数值计算得到。可以看出,在铸件凝固阶段、温度高于液相线温度以上时界面传热系数达到峰值为 $2\ 700\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,在液固相线温度区间界面传热系数值逐渐减小,当温度低于固相线温度以下保持常数为 $1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[6]。

利用铸件 T_4 和 T_5 的温度数据验证反算得到的界面传热系数。图 6 为试验温度与数值计算温度的对比,

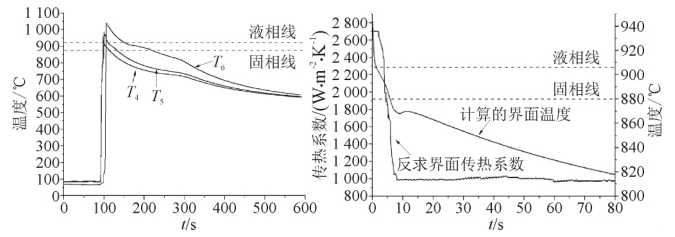
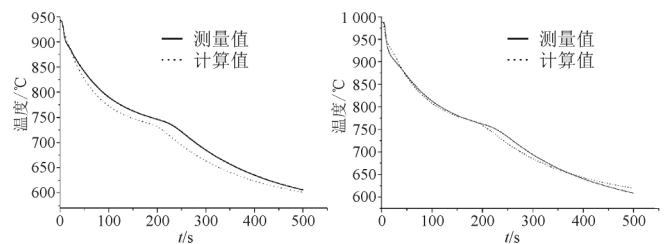


图 4 铸件内部不同位置的测温曲线 图 5 反求的界面传热系数与计算的界面温度随时间的变化

计算温度通过反算得到的界面传热系数求解正传热模型得到。可以看出,计算的界面温度与试验温度相符合,距离界面 $5\ \text{mm}$ 位置温度最大误差低于 $15\ ^\circ\text{C}$,距离界面 $10\ \text{mm}$ 位置最大误差低于 $10\ ^\circ\text{C}$ 。计算温度与试验测量温度产生误差的原因可能是因为在测温试验中很难准确地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。同时,在测温试验中,无法知道某一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,这些因素会造成温度计算值与测量值的差异。然而,温度误差小于 $20\ ^\circ\text{C}$ 范围内都是可以接受的。因此,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传热系数是准确的。



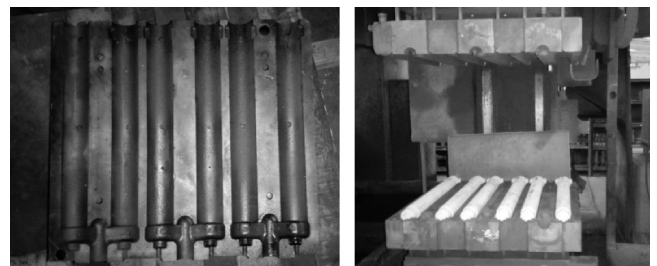
(a) 距离界面 5 mm

(b) 距离界面 10 mm

图 6 温度测量值与温度计算值比较

3 低压铸造试验

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传热系数应用在低压铸造模拟中的准确性。试验用模具见图 7。通过放置不同厚度的砂芯浇注得到壁厚分别为 2.3 、 2.8 、 3.0 和 $3.5\ \text{mm}$ 的铸件。试验模具材质为 QBe0.4,砂芯材料为树脂砂。试



(a) 金属型

(b) 砂芯

图 7 模具示意图

验条件:浇注温度为 1 010 ℃,模具温度为 120 ℃,浇注压力为 50 kPa,升压时间为 5 s,保压时间为 10 s。

通过大量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,界面传热系数设置为反求得到的界面传热系数。实际产品和模拟结果见图 8。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,结果见图 9。可以看出,模拟充型高度和实际产品的高度具有较好的一致性,但仍然存在误差,这是因为实际浇注产品时,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。然而最大高度差不超过 3 mm,能较准确地预测铸件的充型高度。因此,反传导法得到的界面传热系数运用到低压铸造模拟中,提高了数值模拟的准确性。

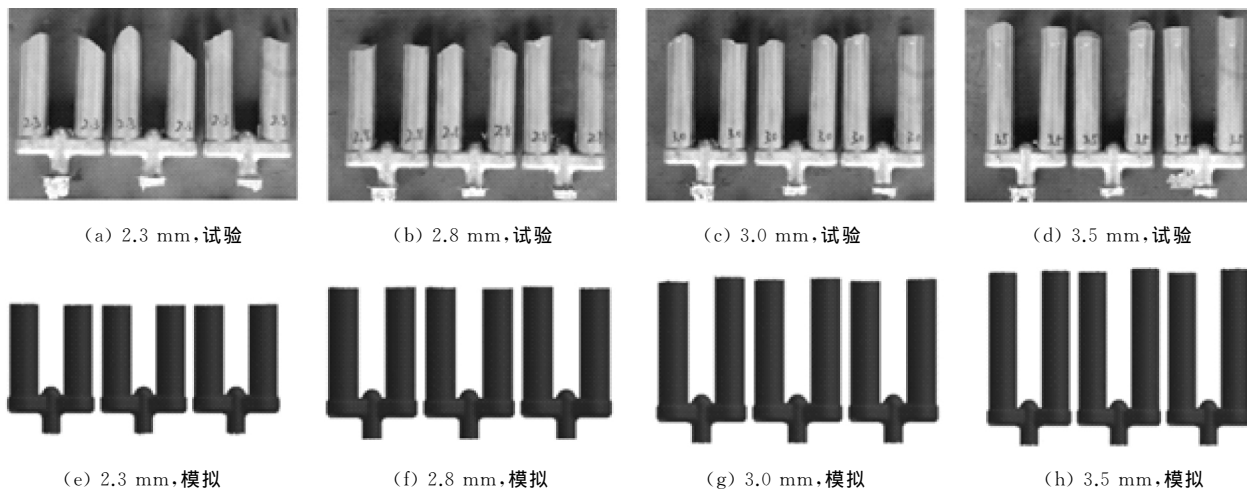


图 8 不同壁厚下实际铸件与模拟结果比较

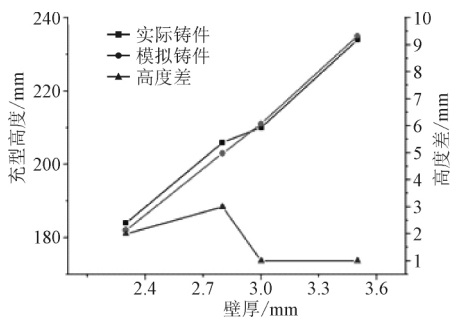


图 9 实际铸件与模拟铸件的充型高度比较和高度差随壁厚的变化

4 结论

(1) 基于非线性反算法,开发了界面传热反算程序,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传热系数,结果表明,界面传热系数变化主要发生在液固相区,变化范围在 1 000 ~ 2 700 W/(m² · K) 之间,在液相区和固相区分别为常数。

(3) 将反求得到的界面传热系数运用到低压铸造模拟中,模拟结果与试验结果相符合,提高了数值模拟的准确性。

参考文献

[1] 曹永友,熊守美,郭志鹏. 压铸压室内部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,曹尚铤,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] 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):1 750-1 754.

[4] ŞAHİN H M, KOCATEPE K, KAYIKCI R, et al. Determination of unidirectional heat transfer coefficient during unsteady-state solidification at metal casting-chill interface[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 19-34

[5] GRIFFITHS W D. The heat-transfer coefficient during the unidirectional solidification of an Al-Si alloy casting[J]. Metall. Mater. Trans., 1999, B 30:473-482.

[6] 张立强,李落星,谭文芳,等. 铸造凝固界面传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.

[7] 郭志鹏,熊守美,曹尚铤,等. 铝合金 ADC12Z 压铸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.

[8] BECK J V, BLACKWELL B, CLAIR C. Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems[M]. London: Wiley,1985.

[9] BECK J V. Transient sensitivity coefficient for thermal contact conductance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1967 (10):1 615-1 619.

[10] 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.

(编辑:刘晨辉)