

文章编号: 1004-0609(2003)04-0881-06

铝铸件凝固模拟边界热交换系数的测定^①

徐 宏^{1, 2}, 侯 华¹, 赵宇宏², 陈 铮²

(1. 华北工学院 材料工程系, 太原 030051; 2. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 铸件/铸型边界热交换系数的准确性是凝固模拟精度的关键因数之一。在实验研究基础上, 应用非线性估算法确定了铝铸件凝固模拟边界热交换系数变化规律, 并通过数学分析建立了一种近似求解边界热交换系数的通用数学模型。通过实际铝铸件进行的模拟验证, 证明了该模型的正确性和通用性。

关键词: 非线性估算法; 热交换系数; 铸件; 凝固模拟

中图分类号: TG 21

文献标识码: A

铸件/铸型边界热交换系数的准确性是影响温度场模拟精度的一个重要因素。边界热交换系数是界面接触状况、物理条件、化学条件以及界面温度等因素综合作用的体现。影响界面换热系数的因素有很多, 其中接触状况起决定作用^[1], 如图 1 所示。这就使得很难确定界面换热系数。

获得边界热交换系数的方法主要有间隙跟踪法、反算法及多因素回归法^[2-4]等。间隙跟踪法通过测量铸件及铸型间的气隙尺寸, 然后根据气隙尺寸估算界面换热系数; 多因素回归法则是利用多因素试验结果进行多元最小二乘回归, 获得某一种条件下界面换热系数的经验公式。上述几种方法都有很大的局限性, 而且应用起来都较困难^[5-7]。

本文作者应用非线性估算法, 通过实验研究确定铸件凝固边界热交换系数变化规律, 由数学分析建立一种近似求解边界热交换系数的通用数学模型。

1 热交换系数非线性估算法数学模型

非线性估算法^[8]的基本原理是: 假设在一定的时间间隔 Δt 内, 界面热流 q 为常数, 并任意给定一个初始值 q_0 , 求出铸件铸型温度场, 并力图使实测温度和计算温度偏差的平方和为最小。偏差平方和是给定热流 q 的函数:

$$F(q) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (T_{ij} - Y_{ij})^2 \quad (1)$$

式中 T_{ij} 和 Y_{ij} 分别为计算温度和实测温度, N_1 是边界条件以外的所有温度测量点的总数。为了减少或消除测量滞后的影响, 在实际计算每一时间间隔 Δt 内的热流时, 考虑 r 个将来温度段, 即将在 $\Delta t(r+1)$ 计算所得的热流 q 作为时间间隔 Δt 内的热流值。因此 $N_2 = r + 1$, 即在实际计算时间段中包括时间间隔总数。

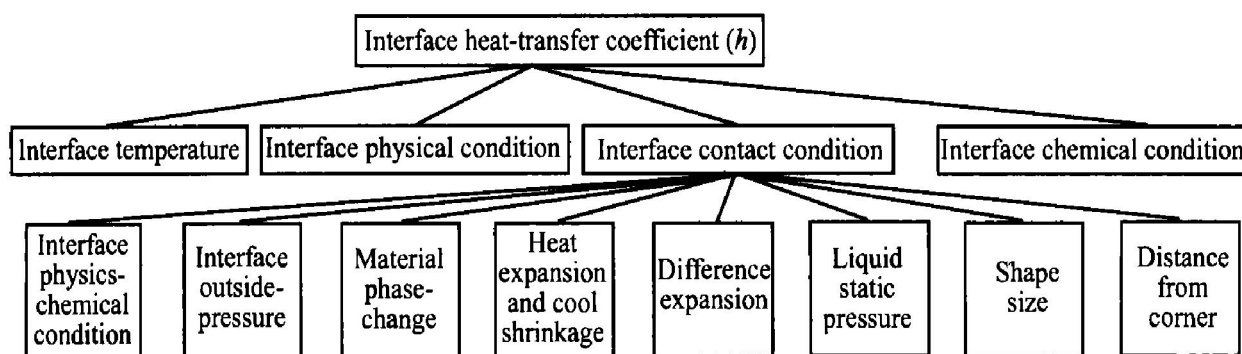


图 1 影响界面热交换因素示意图

Fig. 1 Illustration of factors affecting boundary heat-transfer coefficient

对式(1)求解偏导数, 令 $\frac{\partial F}{\partial q} = 0$, 从而使 $F(q)$ 最小。

$$\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} 2(T_{ij} - Y_{ij}) \frac{\partial F}{\partial q} = 0 \quad (2)$$

为求 T_{ij} 和 $\frac{\partial F}{\partial q}$, 对 $T_{ij}(q)$ 在 $q = q_l$ 处应用台劳级数展开得到

$$T_{ij}(q) = T_{ij}(q_l) + \frac{\partial T_{ij}}{\partial q}(q - q_l) \quad (3)$$

令

$$\Phi_{ij} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial q}, \Delta q_{l+1} = q_{l+1} - q_l = \varepsilon q_l$$

将 $q = q_{l+1} = (1 + \varepsilon) q_l$ 代入式(3) 得到 $q = q_{l+1}$ 处

$$\Phi_{ij} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial q} = \frac{T_{ij}[(1 + \varepsilon) q_l] - T_{ij}(q_l)}{\varepsilon q_l} \quad (4)$$

$$T_{ij} = T_{ij}(q_l) + \Phi_{ij} \Delta q_{l+1} \quad (5)$$

式中 Φ_{ij} 为敏感系数。当 ε 取 0.001 或更小时, 由式(4) 可得到足够精确 Φ_{ij} 值, 而 $T_{ij}[(1 + \varepsilon) q_l]$ 和 $T_{ij}(q_l)$ 可通过利用 $q_l(1 + \varepsilon)$ 和 q_l 作为界面热流求解铸件铸型温度场得到。将式(4) 和式(5) 代入式(2) 并简化得到

$$\Delta q_{l+1} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (Y_{ij} - T_{ij}(q_l)) \Phi_{ij} / \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} \Phi_{ij}^2 \quad (6)$$

从上式可得到热流 q 的修正值。过程是: 从 $q_l = q_0$ 开始, 取 $\varepsilon = 0.001$ 或更小, 求出 Φ_{ij} , $T_{ij}(q_l)$, 再求出修正值 Δq_{l+1} , 然后令 $q_{l+1} = q_l + \Delta q_{l+1}$, 并用同样的方法求出下次迭代修正值 Δq_{l+1} , 直到 $|\Delta q_{l+1}/q_l| < \varepsilon_2$ (取 $\varepsilon_2 = 0.001$ 或更小) 为止, 便认为求到了该时刻段内的热流值 $q_{l+1} = q_l + \Delta q_{l+1}$, 利用 q_{l+1} 即可得到铸件、铸型温度场 T_1, T_2 , 利用公式

$$h = q_{l+1} / (T_1 - T_2) \quad (7)$$

求出界面热交换系数 h , 但它是属于 Δt 时间间隔内的。然后再转入下一时刻时间间隔内 h 的计算。

2 实验

2.1 实验条件

铸件实验模型如图 2 所示。铸件材质为 ZL104, 化学成分如表 1 所示, 浇铸温度为 700°C [9]。铸型材质分别为硅砂及锆砂, 粘结剂为 PEPSET 树脂。

2.2 测温条件

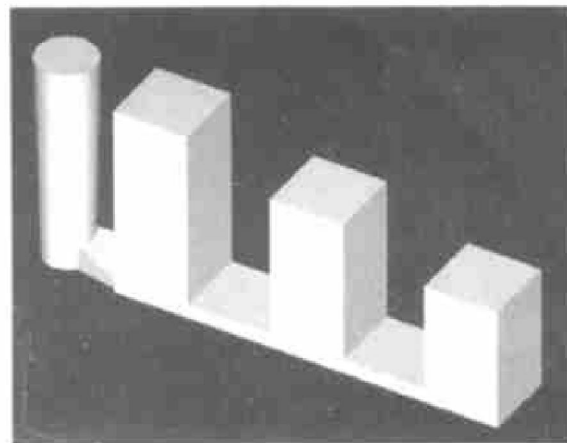


图 2 试件模型

Fig. 2 Test casting model

表 1 铝合金成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of aluminium alloy(%)

Al	Cu	Mg	Si	Fe	Other
90.4	1.36	0.414	6.58	0.608	0.638

测温装置采用自行设计组装的仪器, 测温采用多通道测温系统, 使用微机控制、监测和显示温度曲线。热电偶为镍铬镍硅热电偶(d 0.5 mm), 在铸件中布置 2 根热电偶, 离界面分别为 2 和 4 mm, 在铸型中布置 2 根热电偶, 离界面分别为 5 和 20 mm。

2.3 结果及分析

在不同砂型情况下离界面 2mm 处铸件测温结果如图 3(a) 和(b) 所示; 离界面 5 mm 处铸型测温结果如图 3(c), (d) 所示; 离界面 5 和 20 mm 处锆砂型的铸型测温结果如图 3(e), (f) 所示。

从图 3(a), (b) 可见, 在测量点温度升高到最高点(约 640°C) 的随后 75 s 内, 锆砂型平均冷却速度为 3.6°C/s , 而硅砂约为 1.5°C/s ; 从图 3(c), (d) 中可以看出, 锆砂铸型中界面附近铸型的升温速度比硅砂铸型快, 可以得出锆砂激冷比硅砂好; 图 3(e), (f) 为距界面不同距离的锆砂型的温度曲线, 可见, 测温点离铸件越远, 砂型温度变化趋于缓和, 尤其在 20 mm 以后砂型温度变化不大。

在图 3(a)~(d) 数据基础上, 采用非线性估算法的反算法计算界面热交换系数 h 。图 4~7 所示为热流密度 q 和热交换系数 h 计算结果曲线。

比较锆砂与硅砂的 $q-t$ 曲线及 $h-t$ 曲线可见: 锆砂铸型/铸件界面的热流密度 q 与热交换系数 h 均比硅砂铸型/铸件界面的大。铸件/铸型界面 q 值是逐渐下降的, 而 h 先急剧上升到一最高值,

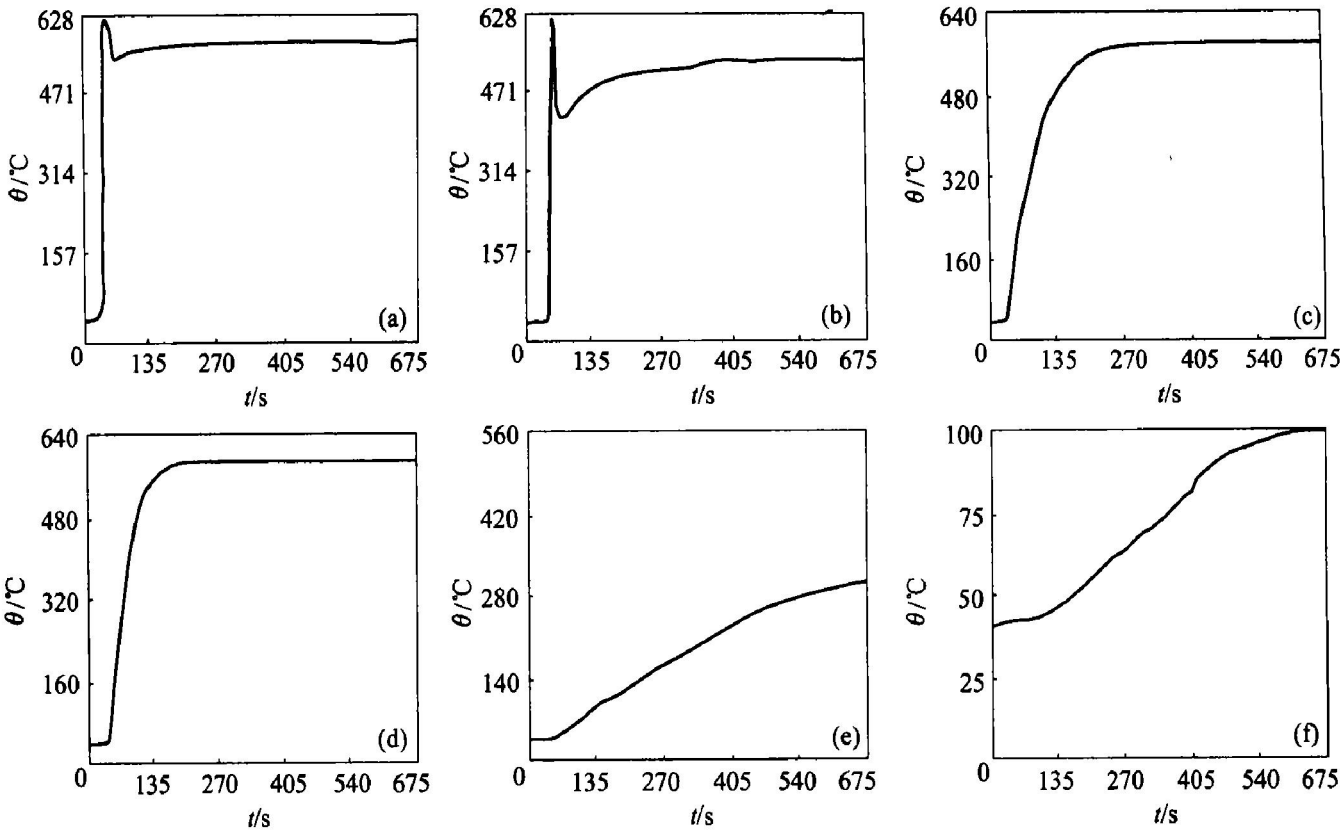


图 3 测温结果

Fig. 3 Results of measuring temperature

- (a) —Casting temperature curve of Si sand mould; (b) —Casting temperature curve of Zr sand mould;
(c) —Mould temperature curve of Si sand mould; (d) —Mould temperature curve of Zr sand mould;
(e) —Temperature curve for Zr sand at 5 mm from interface; (f) —Temperature curve for Zr sand at 20 mm from interface

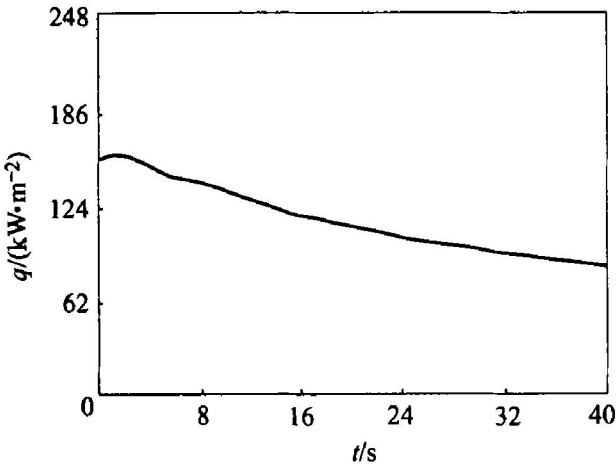


图 4 硅砂型/铸件界面 $q-t$ 曲线

Fig. 4 $q-t$ curve of Si sand mould/casting

然后再平稳下降。界面热交换系数 h 不是一常数, 而是一随时间而变化的函数, 随凝固时间增大而减小至一基本稳定值。

3 热交换系数近似计算方法

边界条件, 这里指的是铸件与铸型交界面或不同种类造型材料之间的交界面。根据界面是否存在

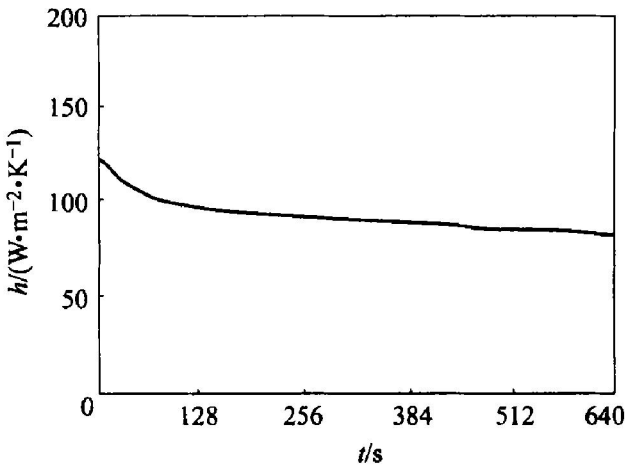
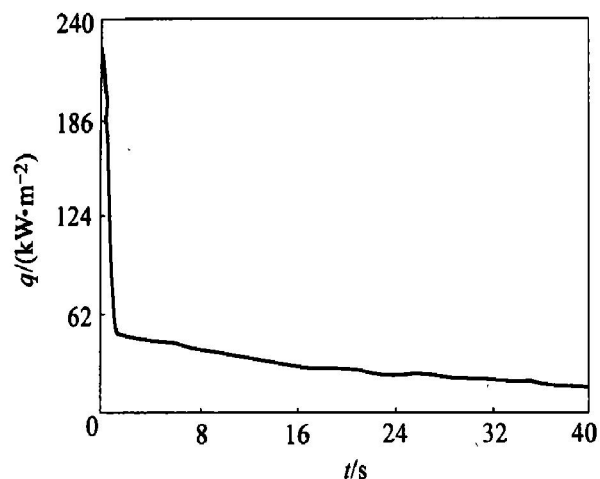
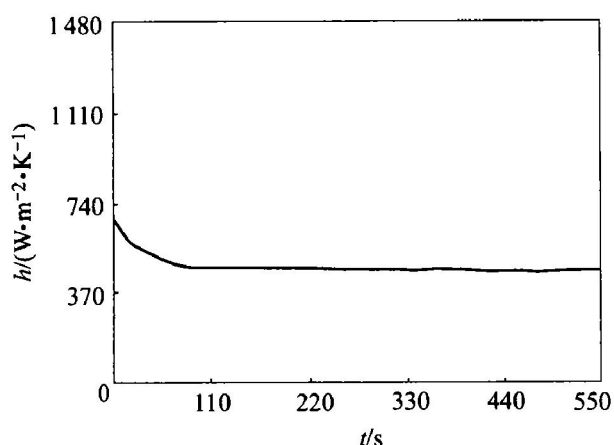


图 5 硅砂型/铸件界面 $h-t$ 曲线

Fig. 5 $h-t$ curve of Si sand mould/casting

热阻, 可分为理想接触和非理想接触。所谓理想接触是指不存在界面热阻, 界面上温度连续, 热流连续。所谓非理想接触界面指的是存在着一定热阻的界面, 其热流连续, 但温度不连续。

铸件凝固过程中涉及到冒口和大气、铸件和铸型(或砂芯和冷铁)、冷铁和砂型(或砂芯)、铸型和空气等多种边界条件, 这些界面上都存在热阻。如果界面换热系数为 h , 则界面两侧相邻节点之间的

图6 锆砂型/铸件界面 $q-t$ 曲线Fig. 6 $q-t$ curve of Zr sand mould/casting图7 锆砂型/铸件界面 $h-t$ 曲线Fig. 7 $h-t$ curve of Zr sand mould/casting

等效导热系数 λ_e 为^[10]

$$\frac{\Delta x}{\lambda_e} = \frac{\Delta x/2}{\lambda_1} + \frac{\Delta x/2}{\lambda_2} + \frac{1}{h} \quad (8)$$

式中 Δx —单元宽度; λ_1 —界面一侧材料导热系数; λ_2 —界面另一侧材料导热系数。

研究表明:界面上 h 不是一常数,而是随时间而变化的函数,随凝固时间增大而减小。 h 值的选定对计算精度影响很大,但精确确定 h 难度也很大,作者研究了一种近似求解 h 的方法。

h 的变化与铸型的激冷作用有关^[11, 12]。各种铸型的激冷能力差别很大。铸型温度场(在铸件凝固阶段)的解析解为

$$\theta(x, t) = \theta_1 - (\theta_2 - \theta_1) \operatorname{erf}(x/2\sqrt{at}) \quad (9)$$

则铸件流入砂型的热流密度可写为

$$\begin{aligned} q(t) &= -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda (\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{\pi at} \\ &= 0.56b(\theta_2 - \theta_1) / \sqrt{t} \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ 为砂型的蓄热系数, t 为时间。

这样热交换系数为

$$h = 0.56b / \sqrt{t} \quad (11)$$

在计算开始时为避免 h 无穷大, t 可以取计算时间步长 dt 。从公式(11)看,当 t 逐渐增大时 h 趋向零,为避免此种情况发生, t 计算到铸件凝固结束。

4 实际考核验证

图8所示为壳体铸件工艺图,铸件材质为ZL104,浇注温度为700℃,铸件产生缩松缺陷X射线透视结果如图9所示。根据界面热交换系数近似计算数学模型,某一时刻温度场模拟及最终缩松预测结果如图10和图11所示。对比图9及图11可知实际结果与模拟预测结果吻合。

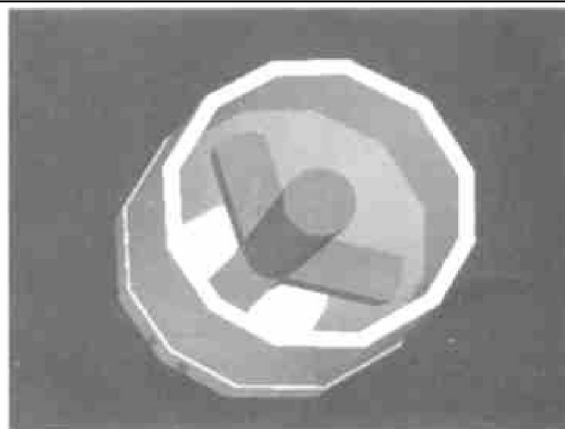


图8 铸造三维工艺图

Fig. 8 3-D casting technology

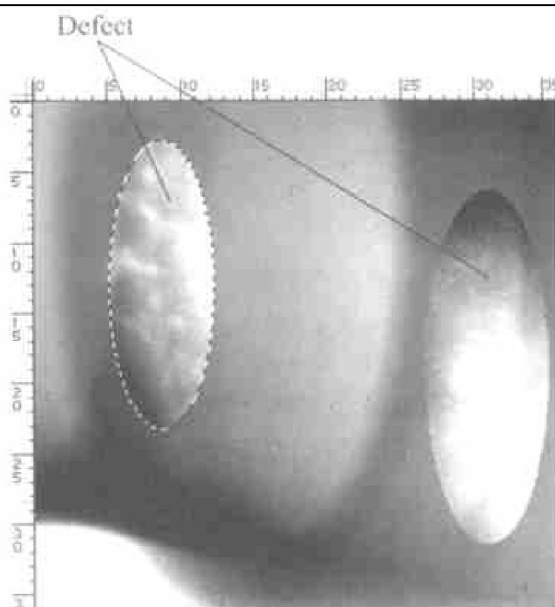


图9 X射线透视结果

Fig. 9 X-ray perspective result

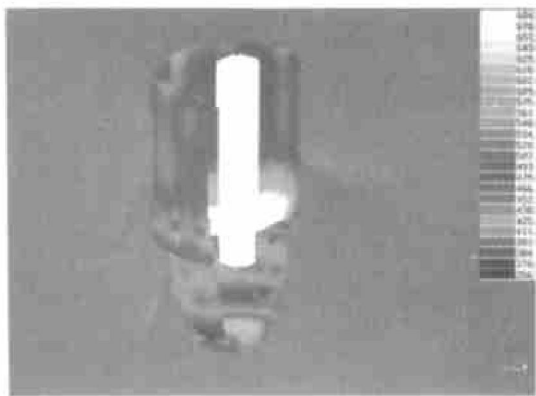


图 10 某一时刻温度模拟
Fig. 10 Temperature simulation result

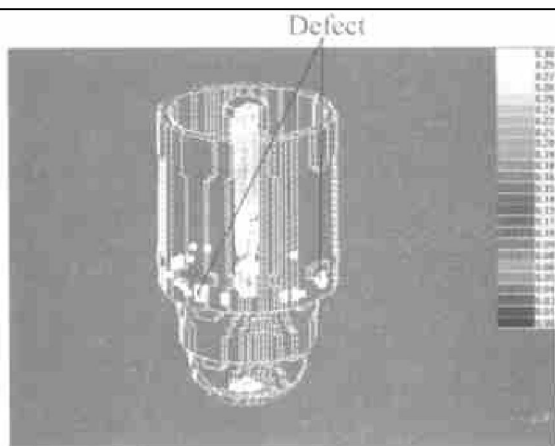


图 11 缺陷预测结果
Fig. 11 Defects predication result

5 结论

1) 铸件凝固过程中边界热交换系数不是一常数, 而是一随时间变化的函数, 随凝固时间增大而减小至一基本稳定值。

2) 通过实际与模拟对比, 证明所建立的近似求解边界热交换系数数学模型正确并具有通用性。

REFERENCES

- [1] 陈国权, 林家骝. 影响铸件/铸型界面热交换因素综述[J]. 铸造技术, 1992(5): 36-37.
CHEN Guo-quan, LIN Jia-liu. Summarization of factor for influencing heat-transfer coefficient on cast/mould interface[J]. Foundry Technology, 1992(5): 36-37.
- [2] Ho K, Pehlke R D. Mechanisms of heat transfer at a metal/mold interface[J]. AFS Transactions, 1984, 92: 587-598.
- [3] Hwang J C, Chuang H T, Jong S H, et al. Measurement of heat transfer coefficient at metal/mold interface

during casting[J]. AFS Transactions, 1994, 102: 877-883.

- [4] LIU Ba-cheng, CHENG Jun. The study on interfacial heat transfer behavior during solidification of casting[A]. Second International Conference on Computer Application in Foundry Production[C]. Bulgaria, 1988. 86-90.
- [5] 程 军. 计算机在铸造中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 130-133.
CHENG Jun. Computer Application on Foundry[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. 130-133.
- [6] 郝守卫, 柳百成, 张卓琪, 等. 凝固过程热传导的反问题[J]. 清华大学学报, 1989, 29(2): 36-43.
HAO Shou-wei, LIU Ba-cheng, ZHANG Zhuo-qi, et al. Inverse question of heat transfer for solidification process[J]. Journal of Tsinghua University, 1989, 29(2): 36-43.
- [7] 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.
- [8] Beck J V. Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conduction problem[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1979, 22(13): 703-801.
- [9] 徐 宏, 程 军, 钟雪友. 铝合金铸件缩孔缩松模拟预测新技术[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S1): 34-38.
XU Hong, CHENG Jun, ZHONG Xue-you. The new technology of shrinkage cavity and shrinkage porosity simulation predication for aluminium alloy casting. The Chinese Journal of nonferrous metals, 2001, 11(S1): 34-38.
- [10] 陈海清. 铸件凝固过程数值模拟[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991. 75-82.
CHEN Hai-qing. Numerical Simulation of Solidification Process for Casting[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991. 75-82.
- [11] 陈国权, 林家骝. 铝合金铸件/金属型界面间隙及换热系数通用化研究[J]. 铸造, 1993(8): 1-6.
CHEN Guo-quan, LIN Jia-liu. General research on gap and heat-transfer coefficient on cast/metal mould interface for aluminium alloy casting[J]. Foundry, 1993(8): 1-6.
- [12] 程 军, 柳百成. 铸件-铸型界面热交换参数的通用化处理[J]. 铸造, 1991(2): 22-25.
CHEN Jun, LIU Ba-cheng. General treatment of heat-transfer coefficient on cast-mould interface[J]. Foundry, 1991(2): 22-25.

Determination of boundary heat-transfer coefficient for casting solidification simulation

XU Hong^{1, 2}, HOU Hua¹, ZHAO Yurong², CHEN Zhen²

(1. Department of Materials Engineering, North China Institute of Technology, Taiyuan 030051, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

Abstract: The boundary heat-transfer coefficient at casting / mould interface is a key factor affecting solidification simulation accuracy. Based on experimental research, the boundary heat-transfer coefficient for casting solidification simulation was determined by using non-linear estimate calculation method. The approximate method to calculate boundary heat-transfer coefficient was also established by mathematics analysis. The general model of boundary heat-transfer coefficient is a function with change of time. At last, the simulation results were contrasted with actual casting results and it was verified that the general model is responsible.

Key words: non-linear estimate calculation method; boundary heat-transfer coefficient; casting; solidification simulation

(编辑 吴家泉)