

反热传导法参数对界面传热系数求解精度的影响

刘 阔¹ 廖敦明¹ 陈宇豪¹ 甘 恬¹ 金煜俊¹ 邹鑫锐¹ 袁 贝¹ 顾建华²

[1.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室;2.广东鸿图(南通)模具有限公司]

摘 要 基于反热传导法建立了熔模铸型界面传热系数的一维反算模型。采用先假定界面传热系数以计算温度场,将计算得到的温度场作为已知条件代入反求的方法,验证了反算模型的准确性。为提高界面传热系数的求解精度,讨论分析模型中未来时间步数 r 、正传热中的时间步长 Δt 等参数对求解结果的影响。结果表明,反算误差主要来自计算初期假定值与实际值的偏离以及传热系数在局部特征区域的复杂变化所引起的求解精度误差。减小 r 可增强局部特征区域的反算准确性,间接影响整体反算精度;增大 r 可减弱反算初期计算值与实际值的偏离幅度; Δt 主要影响反算精度的临界值,适当减小 Δt 可以在整体上提高反算精度。

关键词 界面传热系数;数值模拟;反热传导法

中图分类号 TP311;O242;TG249.5

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Parameters on Accuracy of Interface Heat Transfer Coefficient in Inverse Heat Conduction Method

Liu Kuo¹, Liao Dunming¹, Chen Yuhao¹, Gan Tian¹, Jin Yujun¹, Zou Xinrui¹, Yuan Bei¹, Gu Jianhua²

[1.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology; 2. Guangdong Hongtu(Nantong) Mould Co., Ltd.]

Abstract: Based on the inverse heat conduction method, a one-dimensional inverse calculation model of heat transfer coefficient of investment mold interface was established. By assuming the interfacial heat transfer coefficient to calculate the temperature field, which was substituted as the known condition, the accuracy of inverse calculation model was verified. In order to improve the solution accuracy of interface heat transfer coefficient, the influence of future time step r in analysis model and time step Δt in the positive heat transfer on the solution results was discussed. The results indicate that the inverse calculation error mainly comes from the deviation between assumed and actual value at the initial stage of calculation and the solution accuracy error caused by the complex change of heat transfer coefficient in the local feature area. The decrease of r can enhance the accuracy of local feature areas and indirectly affect the overall accuracy of inverse calculation. Increase of r can weaken the deviation between calculated and actual value at the initial stage of inverse calculation. Δt mainly affects the critical value of inverse calculation accuracy, and appropriate reduction of Δt can improve the inverse calculation accuracy on the whole.

Key Words: Interfacial Heat Transfer Coefficient, Numerical Simulation, Inverse Heat Conduction Method

熔模铸造可大批量生产形状复杂、表面品质和尺寸精度高的铸件^[1],但常规铸造过程大多采用“试错法”,研发周期长、生产成本高^[2]。随着计算机技术的发展,数值模拟成为辅助铸造设计和工艺优化的重要手段^[3]。其中,界面传热系数是描述铸件/铸型之间传热行为的重要参数,是对铸造模拟结果影响最大的边界条件,其直接影响模拟结果的准确性和可靠性。

界面传热系数一般随温度和时间不断变化,通过试

验直接测量比较困难,目前最常用的求解方法是反热传导法,其原理是在温度场数值模拟的基础上,以获得与实际温度相近的计算温度为目标,不断迭代调整界面传热系数或界面热流。BECK J V 等^[4-5]通过对反热传导法改进,显著提高了反求结果的准确性和稳定性。COATES B 等^[6]利用反热传导法研究了铸件表面粗糙度和浇注温度对界面传热系数的影响。ZHANG W H 等^[7]在测量叶片熔模铸造温度分布的基础上,采用最优

收稿日期:2022-10-21;修改稿收到日期:2023-03-04

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFB2008300-2);广东省重点领域研发计划资助项目(2019B090921001)

第一作者简介:刘阔,男,1999 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:liukuo@hust.edu.cn

通信作者:廖敦明,男,1973 年出生,教授,武汉(430074),E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

引用格式:刘阔,廖敦明,陈宇豪,等. 反热传导法参数对界面传热系数求解精度的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 210-1 216.

LIU K, LIAO D M, CHEN Y H, et al. Influence of parameters on accuracy of interface heat transfer coefficient in inverse heat conduction method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 210-1 216.

化方法得到界面传热系数变化规律。PRABHU K N 等^[8]基于等效比热法计算铝合金单向凝固过程的温度场,通过反热传导法研究了钠变质处理对界面传热系数的影响。ZHAO K M 等^[9]研究热平衡法、Beck 非线性估算法、有限元分析法对界面传热系数反求结果精度的影响,结果证明 Beck 法准确可靠。

虽然目前反热传导法被作为研究界面传热行为的主要方法,但有关影响反算模型准确性的因素的研究较少。因此,本研究将基于反热传导法建立铸件/铸型界面反算模型,同时基于等效比热法建立熔模铸造正传热模型并以文献数据加以验证。先假设界面传热系数已知,然后根据初始条件和边界条件采用正传热数值模拟计算的方法得到研究对象的温度场,再把计算得到的温度场作为已知条件迭代反求界面传热系数,在验证反算模型准确性的基础上详细分析正传热时间步长 Δt 、反热传导计算中的未来时间步数 r 等参数对反算结果的影响,旨在为界面传热系数的精确计算提供参考。

1 界面传热系数反算模型

1.1 铸件/铸型正传热模型

由于反算界面传热系数的计算量远大于相同规模的正向温度场模拟计算量,且铸件不同部位的界面传热状态一般不同,因此采取一维传热模型进行简化分析,见图 1。其中 $O \sim M$ 表示铸件, $M \sim N$ 表示铸型(型壳)。

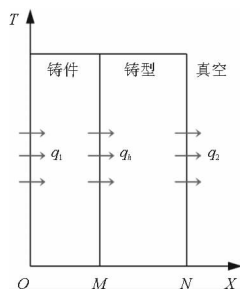


图 1 一维铸型热流及温度场

Fig.1 Heat flow and temperature field of one-dimensional mold

在铸件中,温度分布 T 可以表示为:

$$T = T(x, t, q_1, q_h) \quad (1)$$

式中, x 为平板铸件到铸件对称面的距离; t 为时间; q_1 为铸件对称面的热流密度; q_h 为铸件/型壳热流密度。

在型壳中,温度分布 T 可表示为:

$$T = T(x, t, q_h, q_2) \quad (2)$$

式中, q_2 为辐射传热的热流密度。

边界条件:

$$q_1(0, t) = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (3)$$

$$q_h(N, t) = h(T_w - T_f) \quad (4)$$

$$q_2(M, t) = \sigma \epsilon (T_N^4 - T_B^4) \quad (5)$$

式中, T_w 为界面处型壳温度; T_f 为界面处铸件温度; T_N 为型壳表面温度; T_B 为外部环境温度。

对于微元体,根据能量守恒和傅里叶定律可以在笛卡尔坐标系中推导铸造凝固过程的传热微分方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T_{\text{微}}}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T_{\text{微}}}{\partial x^2} \right) + \dot{Q} \quad (6)$$

式中, ρ 、 c_p 、 k 分别为材料密度、比热容、导热系数; $T_{\text{微}}$ 为微元体温度; t 为时间; $\dot{Q}$ 为热源项,此处表示凝固过程中释放的结晶潜热。本研究采用等效比热法来处理潜热,将潜热的释放变为具有内热源的温度场,即:

$$Q = -L \frac{\partial f_L}{\partial t} \quad (7)$$

式中, L 为合金潜热; f_L 为合金液相率。将式(7)代入式(6)可得基于等效比热法的一维传热方程,即:

当 $T_s \leq T \leq T_L$ 时,一维非稳态热传导方程:

$$\rho \left(c_p + \frac{L}{T_L - T_s} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (8)$$

式中, T_L 为合金液相线温度; T_s 为合金固相线温度。

当 $T > T_L$ 或 $T < T_s$ 时,一维非稳态热传导方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (9)$$

1.2 反热传导法模型

反求铸件/铸型界面传热系数,首先通过铸件或铸型内部已知温度场计算界面热流,然后通过下式计算相应的界面传热系数 h 可表示为:

$$h = \frac{q}{T_c - T_m} \quad (10)$$

式中, q 为热流密度; T_c 为铸件/铸型界面处铸件的温度; T_m 为界面处铸型的温度。

采用 Beck 非线性估算法,将未知热流密度离散为等时间间隔内的热流值,按照时间顺序逐次求解随时间变化的界面热流密度。Beck 非线性估算法的最大特点是引入未来时间步数,通过最小二乘法建立目标函数,减少了反算结果对初始条件的强烈依赖性,同时增强了反算的稳定性和鲁棒性。

图 2 为热流密度分段函数,每个 Δt 时间间隔内的热流密度视为常数,已知 t_n 时刻之前的热流密度值 q_1 、 q_2 、 $\dots$ 、 q_{n-1} ,求 $[t_n, t_{n+1}]$ 时间段内的热流密度 q_n 。为了提高反算法的稳定性,减少温度测量所带来的误差,引入未来时间步数 r ,假设从 t_n 时刻开始 r 个时间步长内的热流密度保持不变,即:

$$q_n = q_{n+1} = \dots = q_{n+r-1} = q_{\text{const}} \quad (11)$$

以 $[t_n, t_{n+r}]$ 时间段内测量温度与模拟计算温度的最小二乘为目标建立热流密度的目标函数,数学表达式为

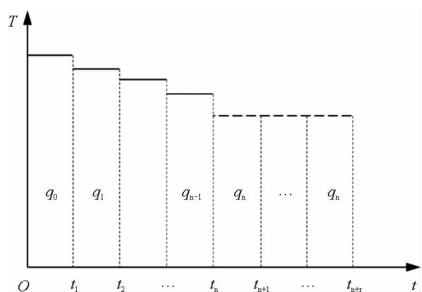


图 2 热流密度分段函数

Fig.2 Piecewise function of heat flux density

$$F(q) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [T_j^i(q) - Y_j^i]^2 \quad (12)$$

式中, T_j^i 和 Y_j^i 分别为在 t_i 时刻 j 测量点的模拟计算温度和试验测量温度。当 $F(q)$ 达到极小值时, 可以认为此时假定的界面热流 q_n 为真实的热流密度。

为了使 $F(q)$ 极小化, 对式(12)求偏导, 即:

$$\frac{\partial F}{\partial q} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [T_j^i(q) - Y_j^i] S_j^i(q) = 0 \quad (13)$$

式中, $S_j^i(q)$ 为敏感系数, 表示铸件或铸型单元体的温度随单位热流改变的响应速率, 其表达式为:

$$S_j^i(q) = \frac{\partial T_j^i(q)}{\partial q} \quad (14)$$

对模拟计算温度 $T_j^i(q)$ 进行 Taylor 级数展开, 忽略高阶项, 可得:

$$T_j^i(q) = T_j^i(q_i) + S_j^i(q) (q - q_i) \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)可得:

$$q = q_i + \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [Y_j^i - T_j^i(q_i)] S_j^i(q)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [S_j^i(q)]^2} \quad (16)$$

令 $q = q_{i+1}$, 则有迭代值:

$$\Delta q = q_{i+1} - q_i = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [Y_j^i - T_j^i(q_i)] S_j^i(q)}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=n}^{n+r} [S_j^i(q)]^2} \quad (17)$$

其中敏感系数可以通过差分方法近似得到:

$$S_j^i(q) \approx \frac{Y(q_i + \epsilon q_i) - Y(q_i)}{\epsilon q_i} \quad (18)$$

式中, ϵ 是数值差分计算的一个很小的判别量, 如 0.001。迭代计算界面热流时, 先计算测量点的敏感系数, 进而求得热流的迭代量, 不断修正 q_i 直到满足以下判别条件:

$$|\Delta q / q_{\text{corr}}| < \epsilon' \quad (19)$$

ϵ' 取值可非常小(如 0.000 1), 此时迭代量相较于

修正值极小, 再通过对目标函数的极小值迭代求解效果不明显, 可以认为此时的 q_{corr} 使得目标函数取得极小值, 也就是模拟计算温度与试验测量温度达到最小意义上的二乘。为了增强反算模型的收敛性, 设置最大迭代次数 N , 当迭代计算 N 次仍不满足判别条件时, 可以将判别值加 0.000 1 重新计算, 直到循环迭代满足要求。当前时间步长的热流 q_i 求解完毕, 转而进入下一时间步的计算, 直至所有时刻内的热流 $q(t)$ 都被计算为止。界面传热系数反求流程见图 3。

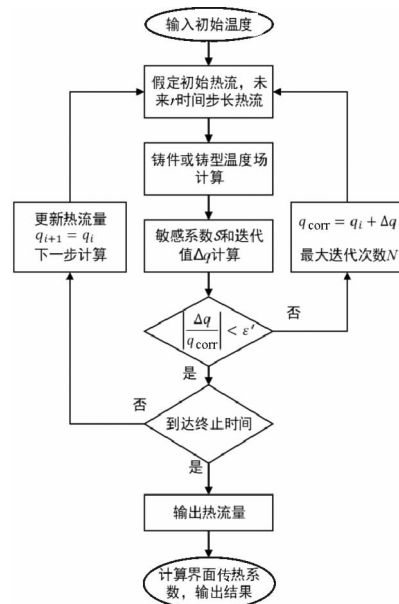


图 3 界面热流反求流程

Fig.3 Reverse process of interface heat flow

2 结果讨论与分析

2.1 正传热模型验证

参考邵衍等^[10]设计的熔模铸造平板件测温试验, 铸件平板尺寸为 170 mm × 170 mm × 25 mm, 采用对称设计以获得更多的试验数据。铸件材质为 TC4 合金, 型壳的面层材料采用 ZrO_2 , 背层采用高岭土, 平均厚度为 18 mm。考虑到平板件高度和宽度远大于厚度, 因此平板中央部位的铸件/铸型方向可近似视为一维传热。测温方案参考文献^[10]进行, 见图 4。

对于一侧的平板铸件, 从上到下依次是 T_{A1} 、 T_{A2} 、 T_{A3} , 分别放置在冒口、铸件中央、浇道, 用以测量铸件温度变化; 在平板中央距离铸件/型壳界面的 3、6、9 mm 处放置热电偶 T_{B1} 、 T_{B2} 、 T_{B3} , 用以测量不同厚度处型壳的温度变化。

基于文献^[10]已给出的热物性参数以及可供参考的界面传热系数, 通过本研究的一维正传热模型计算平板件中央部位铸件/型壳的温度场, 再与文献中的数据

作对比,可以验证正传热模型是否准确。结果见图 5。

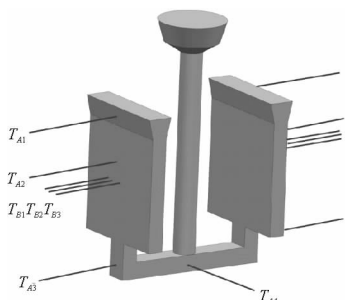


图 4 测温方案

Fig.4 Temperature measurement scheme

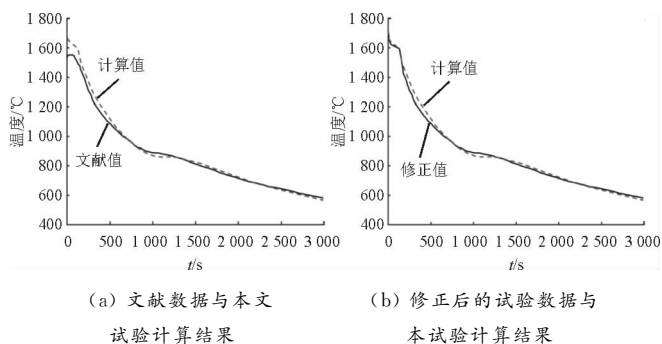


图 5 文献数据与计算数据对比

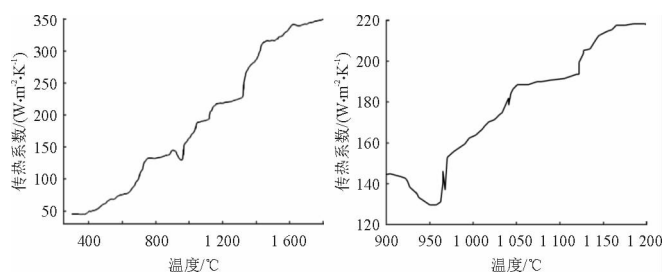
Fig.5 Comparison between data in literature and calculated data

使用钨铼热电偶测量铸件温度,热电偶外加石墨管用以保护,导致测得的试验温度与实际温度有一定差距,见图 5a,通过正传热模型所计算的温度曲线在浇注前期与文献中试验数据相差较大,而凝固区两条曲线基本一致。通过数值模拟,基于文献数据计算出浇注前期的温度,并且计算的型壳温度与实际测量值基本相同,所以可以通过文献的数值模拟结果修正浇注期间的温度数据,结果见图 5b,可见修正后的试验温度曲线(浇注前期)与正传热模型计算结果基本吻合。经计算,传热模型温度计算值与文献值偏差约为 3%,验证了建立的正传热模型及相应计算方法的准确性。

2.2 反算结果与讨论

为了验证反热传导法求解界面传热系数的准确性和有效性,并同时提高界面传热系数的求解精度,采用假设—验证—讨论的方法。为了保证验证的普遍性和适用性,假定界面传热系数是随温度变化的 $h(T)$,见图 6a。界面传热系数本身可能因为潜热释放、外界干扰等因素在局部区域发生复杂变化,这对反求精度具有较高的要求,所以需要设置局部区域复杂变化的假定值以验证反算模型的准确性,假定的界面传热系数见图 6。为方便表述,假定界面传热系数用 h 表示,反求的传热系数用 h' 表示。

通过正传热模型计算的型壳内距离界面 2、6、



(a) 全部温度范围的假定值

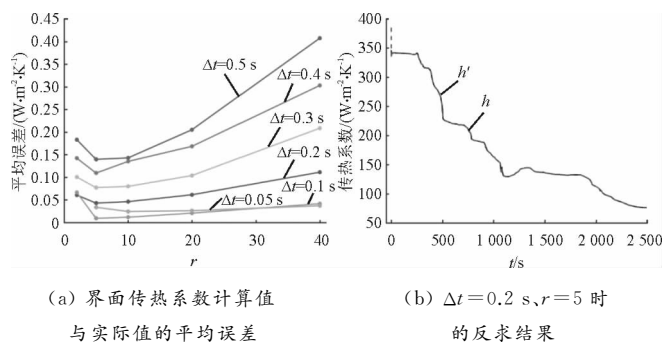
(b) 局部特征区域的假定值

图 6 假定的界面传热系数

Fig.6 Assumed interface heat transfer coefficient

10 mm 的温度数据来反求界面热流和界面传热系数,已知初始条件、界面处铸件温度和外界环境温度,反求假定的界面传热系数。

图 7 为界面传热系数反求结果。由图 7a 可知, $r=2$ 、 $\Delta t=0.05$ s 的情况计算不收敛,增大热流修正结束的判别条件 ϵ' 至 0.001 时仍无法收敛。在 $r \leq 10$ 的范围内,计算值与实际值的平均误差小于 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,证明界面传热系数的反算结果是准确的。由图 7b 可以看出,在反求的初始阶段计算值与实际值存在些许偏差,但随着计算继续进行, h' 逐渐向 h 靠近,之后两条曲线基本重合,进一步证明反求模型的准确性。



(a) 界面传热系数计算值与实际值的平均误差

(b) $\Delta t=0.2$ s, $r=5$ 时的反求结果

图 7 界面传热系数反求结果

Fig.7 Inverse calculation results of interface heat transfer coefficient

从图 7 可以看出,反热传导法中的未来时间步数 r 影响反算精度。当 r 增大时,平均误差减小,在 $r=5$ 附近取得最小值,之后增加 r ,平均误差不断增大。同一 Δt 的情况下,传热系数计算值与实际值的平均误差明显存在临界情况,而减小 Δt 可以有效降低平均误差的临界值。 $\Delta t=0.3$ s 时的平均误差在整体上明显低于 $\Delta t=0.5$ s 的,但过小的 Δt 反而可能引起反算精度的降低,比如 $\Delta t=0.05$ s 的平均误差略微高于 $\Delta t=0.1$ s 的情况。

图 8 是不同 r 和 Δt 对反求结果的影响。从图 8a 和图 8b 可以看出, r 增大可能会减小反算刚开始阶段计算值与实际值的偏差,但使得反算曲线 h' 的曲率半径增大,无法精准计算局部特征区域的实际数值。从

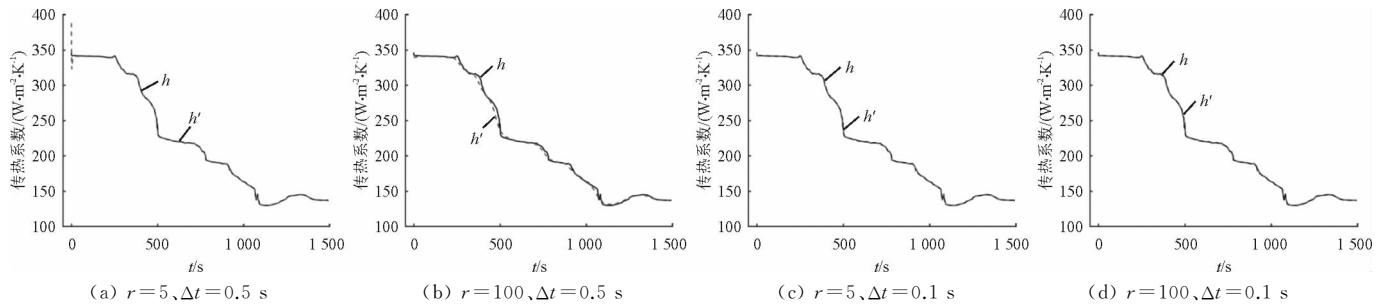


图 8 r 和 Δt 对反算结果的影响

Fig.8 Influence of r and Δt on the result of inverse calculation

图 8a 与图 8c、图 8b 与图 8d 可以看出,减小 Δt 也会减小计算初期的偏差,同时提升界面传热系数局部特征区域的反算精确度。

由以上分析可知, r 和 Δt 对反算结果的准确性主要表现在两个方面,即初期反算偏差,计算刚开始阶段,计算值与实际值形成巨大偏差,随着计算进行,偏差逐渐减小;局部特征反算误差,由于界面传热系数是随温度变化的,且受到相变潜热、铸件初始温度、流体压力、外界干扰等多种因素的影响,局部区间内的传热系数可能存在复杂变化,当 h' 的曲率半径过大时,无法准确反映局部特征区域的实际情况。

由图 8 发现,初期偏差主要发生在计算开始后的 100 s 之内,时间参数 r 和 Δt 对 100 s 之后阶段的影响主要体现在局部特征反算误差。为方便描述,将计算开始的 100 s 称为计算初期,100 s 之后阶段称为计算中后期。

2.2.1 初期偏差

图 9 为反算初期计算值与实际值的平均误差。可以看出,增大 r 可显著降低平均误差,但当 r 继续增大,

尤其是 $r \geq 20$ 后,平均误差基本不变。图 10 为 $\Delta t = 0.5$ s 时 r 对前期偏差的影响。可以看出, $r=20$ 的前期偏差已基本达到临界,增大到 $r=40$ 的变化可以忽略不计,与图 9 相符。

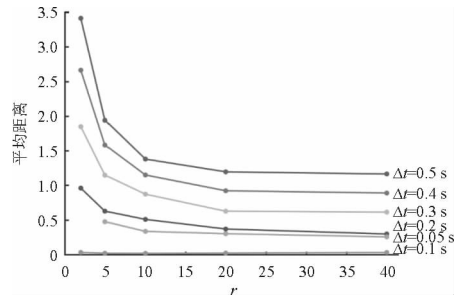


图 9 计算初期的平均误差

Fig.9 Average error at the initial stage of calculation

从图 9 还可以看出,减小 Δt 能够明显降低前期偏差的临界值,前期偏差在整体上大幅降低。图 11 为 $r=5$ 时 Δt 对前期偏差的影响。可以看出,在 Δt 从 0.5 s 降至 0.1 s 的过程中,前期偏差逐渐减小至基本为 0,但过小的 Δt 可能引发前期偏差的反向增大,如 $\Delta t=0.05$ s,这与图 9 中 $\Delta t=0.05$ s 的平均误差反而比 $\Delta t=0.1$ s

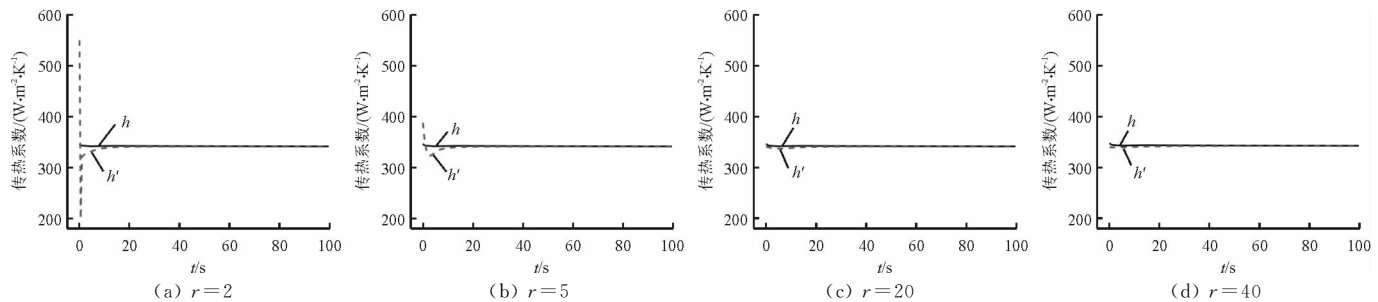


图 10 r 对初期反算偏差的影响($\Delta t=0.5$ s)

Fig.10 Influence of r on initial inverse calculation deviation($\Delta t=0.5$ s)

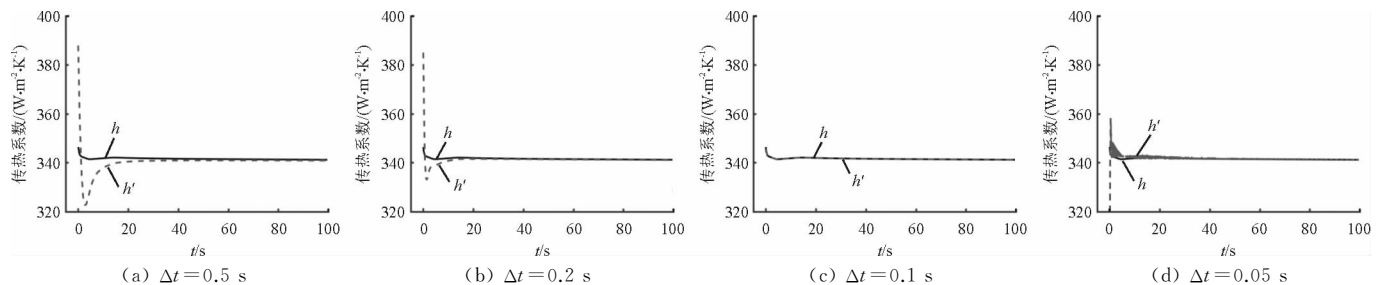


图 11 Δt 对初期反算偏差的影响($r=5$)

Fig.11 Influence of Δt on initial inverse calculation deviation($r=5$)

高的结果相符。

2.2.2 局部特征反算误差

图 12 为计算中后期计算值与实际值的平均误差。可以看出,除了 $\Delta t=0.1$ s,其余时间步长内的平均误差都随着 r 的增加而增大,从理论上说 r 越小,假定的界面热流与实际值越相近,反算的误差越小,且存在临界最小值,减小 Δt 可以有效降低计算中后期的平均误差,但过小的 Δt 可能引起误差的反向增大,如 $r=5$ 、 $\Delta t=0.05$ s 的平均误差反而比 $\Delta t=0.1$ s 时的高。

为了分析 $\Delta t=0.1$ s 时平均误差随 r 先减小后增加的现象,选取 3 组计算结果分析,见图 13。可以看出,当 $\Delta t=0.1$ s、 $r=2$ 时,计算值 h' 围绕着实际值 h 小幅度振荡,反算结果不稳定;增大 r 或提高 Δt 均可增强

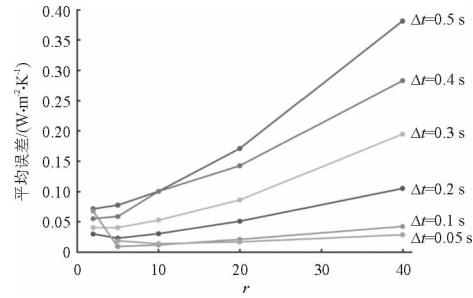


图 12 计算中后期的平均误差
Fig.12 Average error in the middle and later stages of calculation

反算结果的稳定性。

图 14 为局部特征区域的反求结果。从图 14a~图 14e 可以看出,随着未来时间步数 r 增大,反算曲线

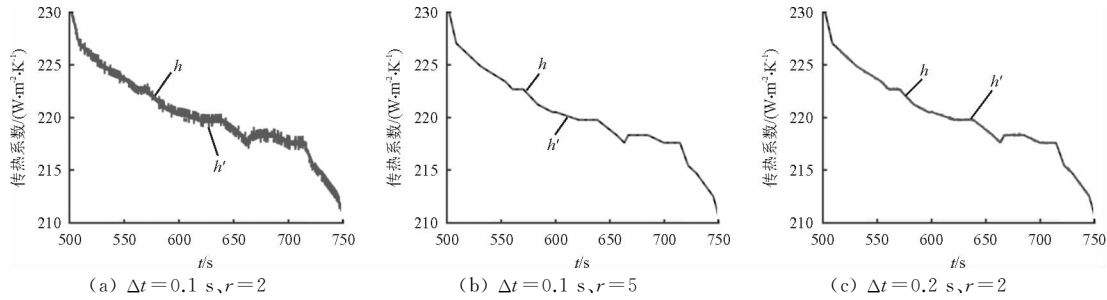


图 13 反算结果的小幅震荡(局部区域)
Fig.13 Small amplitude oscillation of inverse calculation results

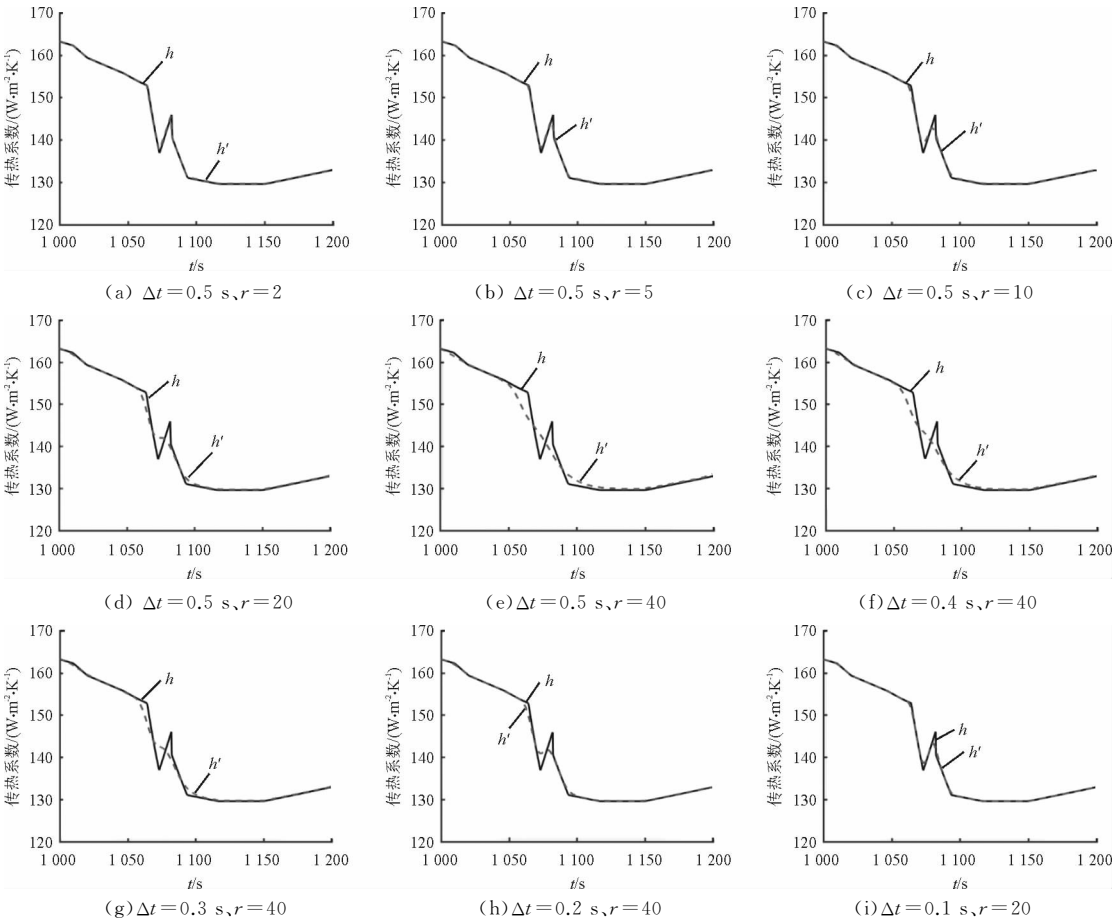


图 14 局部特征区域的反求结果
Fig.14 Reverse results of local feature area

h' 的局部曲率半径随之增大,无法反映局部特征区域界面传热系数的复杂变化情况,间接影响整体计算精度。从图 14e~图 14i 可以看出,减小时间步长 Δt 有助于减小局部特征区域反算误差,这与图 12 中减小 Δt 可降低平均误差的结论相符。

非线性估算法需要假设未来时刻的热流密度相等,往后搜寻时间步,通过最小二乘确定迭代目标,未来时间步数太小,即反热传导法中的计算数据太少,可能会造成初期偏差以及反算结果的振荡,之后逐渐趋于稳定;未来时间步数过大,那么假定的热流密度可能与实际值偏差较大,出现“过稳定”现象,即反算得到的传热系数曲线的曲率半径过大,无法反映局部特征区域界面传热系数的复杂变化,只是在曲线整体趋势走向上与实际相近。

正传热中的时间步长减小,非线性估算法中假设的热流密度与实际值相近,反算结果更加准确;时间步长过小时,未来时间内(即 $r\Delta t$)的温度数据实际上近乎相等,最小二乘的约束优化效果也会相应减弱,甚至会出现不收敛的现象,并且过小的 Δt 需要庞大的计算量和时间成本。

考虑到不同测试平台的性能可能存在区别,以 $\Delta t=0.5\text{ s}$ 、 $r=2$ 时的界面传热系数反算总时间为基准,将计算时间除以该基准,得到相对计算时间,结果见图 15。结合分析可知,减小 r 可以在增强传热系数计算精度的同时缩短计算时间;而减小 Δt 虽然也可以减小低反算误差,但计算的时间成本大大增加,所以实际反算界面传热系数时,必须结合计算精度需求和计算时间成本综合考虑 Δt 的选取。

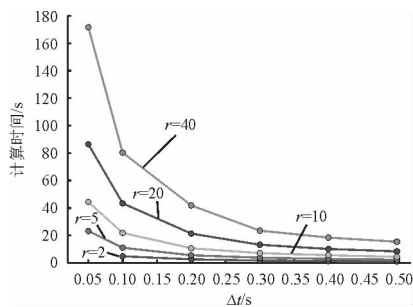


图 15 相对计算时间

Fig.15 Relative calculation time

3 结 论

(1)基于反热传导法建立界面传热系数反算模型求解界面传热系数的误差主要有两方面:一是计算开始阶段计算值与实际值出现明显的偏离现象,二是界面传热系数在局部区间的复杂变化对求解精度提出了更高的要求,反算值可能无法准确反映传热系数在特定区域的

实际变化情况。

(2)时间步长对传热系数每一个小区间的求解精度有较大的影响,减小时间步长有助于降低求解开始阶段的偏离幅度,提高局部特征区域传热系数的计算精度,但时间步长过小因数据量不够,求解精度反而下降,与此同时计算时间显著增加。

(3)未来时间步数将未来 r 个时间步近似为同一热流密度,未来时间步数越小,假设越与实际相符,从而间接影响整体反算的准确性,但过小易引起求解初始阶段计算值与实际值的偏差以及反算结果的局部小幅度振荡,所以在实际中应增大未来时间步数,以增强反算的抗干扰能力,降低反算结果对初始值的强烈依赖性,减少求解初始阶段界面传热系数计算值与实际值的偏离幅度。未来时间步数过大时,将未来时间内的热流密度视为相同这一假设不成立,计算结果虽然仍在整体趋势上与实际值相同,但无法反映局部特征区域传热系数的复杂变化。

参 考 文 献

- [1] 吕志刚.铸造技术路线图:熔模铸造[J].铸造, 2017, 66(4): 317-321.
- [2] 傅骏,向召伟,邓珍波,等.基于熔融沉积技术的快速熔模铸造工艺实践[J].金属世界, 2015(1): 38-41.
- [3] 刘东戎,杨智鹏,王丽萍,等.铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述[J].哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3):96-100.
- [4] BECK J V, BLACKWELL B, CLAIRE C. Inverse Heat Conduction: Ill-posed Problems[M]. London: Wiley, 1985.
- [5] BECK J V, LITKOUHI B, STCLAIRE C R. Efficient numerical solution of the nonlinear inverse heat conduction problem[J]. Mechanical Engineering, 1980, 102: 96-104.
- [6] COATES B, ARGYROPOULOS S A. The effects of surface roughness and metal temperature on the heat-transfer coefficient at the metal mold interface[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2007, A38: 243-255.
- [7] ZHANG W H, XIE G N, ZHANG D. Application of an optimization method and experiment in inverse determination of interfacial heat transfer coefficients in the blade casting process[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1 068-1 076.
- [8] PRABHU K N, RAVISHANKAR B N. Effect of modification melt treatment on casting/chill interfacial heat transfer and electrical conductivity of Al-13Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2003, A360(1-2): 293-298.
- [9] ZHAO K M, WANG B, CHANG Y, et al. Comparison of the methods for calculating the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 79: 17-26.
- [10] 邵珩,李岩,南海,等.熔模铸造条件下 Ti-6Al-4V 合金铸件与陶瓷型壳间界面传热系数研究[J].金属学报, 2015, 51(8): 976-984.

(编辑:刘晨辉)