

板坯连铸二冷区表面传热系数的预测方法

巫英伟, 卢 义, 索晓娜, 王秋旺

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用求解导热反问题的方法,构造了求解铸坯表面传热系数的导热反问题数学模型,采用修正的直接法对导热微分方程进行差分,建立了各时间节点与空间节点之间的关系式,实现了不同喷水条件下的表面传热系数-表面温度对应关系的求解,并用实测数据对表面传热系数进行了预测.结果表明,修正后的直接法避免了计算结果的大幅振荡,使解的精度及鲁棒性能得到大大改善.研究结果为板坯连铸机二冷区喷水制度的正确制订奠定了坚实的理论基础.

关键词: 板坯连铸;导热反问题;传热系数;直接法

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)01-0026-05

Prediction Method of Surface Heat Transfer Coefficients of Secondary Cooling Area for Continuous Casting Slab

Wu Yingwei, Lu Yi, Suo Xiaona, Wang Qiawang

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A modified direct numerical method for solving the inverse heat conduction problem for slab continuous casting is proposed. By discretizing the differential equations and setting up the relationship between time nodes and space nodes, the corresponding heat transfer coefficients of different surface temperature were obtained under different water spraying conditions, furthermore, the heat transfer coefficients were predicted based on the experimental data. Compared with the competing methods, the modified direct numerical method enables to avoid the unstable results during the initial period, and improves the solution accuracy and robustness significantly. The method can be used to correctly water spraying system for the secondary cooling region of slab continuous casting.

Keywords: slab continuous casting; inverse heat conduction problem; heat transfer coefficient; direct numerical method

连铸二次冷却对铸坯质量有显著的影响.在设备和工艺一定的条件下,喷淋水传热占主导地位^[1],因此对喷淋水的控制是影响铸坯质量最重要的因素.如果预先知道二冷区在某一喷水流程下铸坯外表面各处的传热系数和温度或水流密度,就可以方便地采用求解正问题的方法得到铸坯内部的温度场,可见表面传热系数的预测对于选择或布置最佳的喷水流程起着极其重要的作用.但是,二冷区喷水冷却过程是复杂的两相流动,采用理论方法分析求

解在目前情况下尚有许多困难,而采用实验手段直接研究又存在实验数据整理方法上的困难,且费时费力.因此,将两者结合,利用求解导热反问题的方法获得不同喷水条件下传热系数的规律就成为非常有效而现实的手段.

目前,国内外一些学者对连铸二冷区表面传热系数的预测进行了研究^[1-5],获得了水流密度分布特性和表面传热系数的函数关系式.但是,研究表明^[1],影响二冷区的传热因素有铸坯表面温度、水流

密度、水滴速度、水滴直径以及喷嘴状态等,将水流密度作为确定表面传热系数的惟一因素,会对铸坯内部温度场的确定造成较大的偏差,而且由于连铸机自身结构和喷嘴布置等的综合影响,连铸机二冷区表面的水流密度分布难以测定,很难准确地找到其对应的传热系数.如果将影响二冷区传热的因素(除铸坯表面温度外)归一为喷水条件,通过实验得到各喷水条件下的表面传热系数-表面温度的对应关系式,就可以方便地利用 TDMA^[6]算法从结晶器出口开始,逐次求解流动板坯表面温度和内部温度场.

1 物理模型及数学描述

1.1 物理模型

图 1 所示为板坯连铸示意图,钢水从上方垂直流入连铸机,经过二冷区的连续喷水冷却,最后形成的板坯由水平段送出.设板坯厚度方向为 x 方向,宽度方向为 y 方向,拉坯方向为 z 方向,考虑到连铸生产为稳态过程,二冷区板坯两侧均喷水,其中间区域对称(无热量交换),即为绝热面,故沿板坯厚度方向可取板厚的一半作为研究对象,其边界条件为一侧对流,一侧绝热.另外,在实际连铸过程中,沿板坯宽度方向和拉坯方向的导热相对于厚度方向显然可以忽略不计,因此对板坯导热问题的研究可转化为对如图 2 所示实验件的研究.实验件为一钢板,厚度为 δ ,初温为结晶器出口处温度,其上表面为对流换

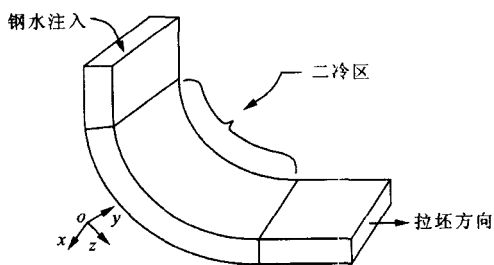


图 1 连续铸造过程示意图

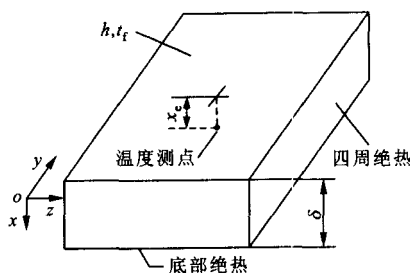


图 2 测温钢板示意图

热,下表面及侧面绝热(敷设耐火砖),实验时先将板坯置于加热炉中加热至均匀的高温,然后迅速置于事先加工好的实验台架上,对上表面使用一定的喷水方式进行冷却,板坯表面温度逐渐降低,这一过程实际上就模拟了板坯连铸不同阶段的换热情况.在板坯不同位置沿厚度方向离开对流换热表面距离为 x_e 的位置处布置传感器测量不同时刻的温度,通过求解导热反问题的方法,可计算出此喷水条件下表面传热系数与表面温度之间的对应关系.

1.2 数学描述

为了求解钢板表面传热系数,首先需知道表面的热流密度 $q(\tau)$. 根据上述板坯实验件的边界条件和初始条件,由于表面的法向热流比切向热流大得多,故可将切向热流略去,认为 $q(\tau)$ 仅随时间变化,将其简化为沿 x 方向的一维非稳态导热问题.

为估算 $q(\tau)$,在离对流边界距离为 x_e 处埋设测温传感器,在不同时刻 τ 测得相应的温度为 $f(\tau)$,设 $x=0$ 为对流边界, $x=\delta$ 为绝热边界,求解实验钢板表面传热系数的导热反问题的控制方程及其定解条件如下式所示

$$\rho C(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (0 < x < \delta, 0 < \tau \leq \tau_m) \quad (1a)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (0 \leq x \leq \delta, \tau = \tau_m) \quad (1b)$$

$$t(x_e, \tau) = f(\tau) \quad (x = x_e, 0 < \tau < \tau_m) \quad (1c)$$

$$\frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (x = \delta, 0 \leq \tau \leq \tau_m) \quad (1d)$$

同理,对于两个测量点的实验件,可以建立如下的控制方程

$$\rho C(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (0 < x < \delta, 0 < \tau \leq \tau_m) \quad (2a)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (0 \leq x \leq \delta, \tau = \tau_m) \quad (2b)$$

$$t(x_{e1}, \tau) = f_1(\tau) \quad (x = x_{e1}, 0 < \tau < \tau_m) \quad (2c)$$

$$t(x_{e2}, \tau) = f_2(\tau) \quad (x = x_{e2}, 0 < \tau < \tau_m) \quad (2d)$$

2 导热微分方程及定解条件的离散

一维非稳态导热问题的空间与时间离散网格如图 3 所示,界面的当量导热系数与比热容可利用调和平均法^[6]确定.

2.1 控制方程与边界条件差分形式的建立

将式(1a)转化为如下形式的区域内部节点的差分方程

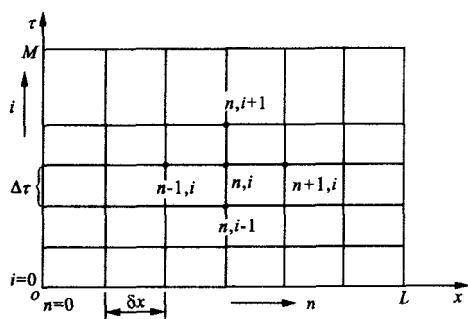


图3 一维非稳态导热时间-空间区域的离散化

$$\frac{1}{a(t)} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\lambda'(t)}{\lambda(t)} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 \quad (0 < x < \delta, 0 < \tau \leq \tau_m) \quad (3)$$

式中 $\lambda' = \frac{d\lambda}{dt}; a(t) = \frac{\lambda(t)}{\rho C(t)}$

以 n 表示空间节点, i 表示时间节点, 将温度离散值按泰勒级数展开并截断, 可将二阶微商表示成二阶差商, 一阶微商表示成一阶差商, 形式如下

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \Big|_{n,i+1} &= \frac{t_{n+1,i+1} - 2t_{n,i+1} + t_{n-1,i+1}}{\delta x^2} + O(\delta x^2) \\ \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{n,i} &= \frac{t_{n+1,i} - t_{n-1,i}}{2\delta x} + O(\delta x^2) \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} \Big|_{n,i} &= \frac{t_{n,i+1} - t_{n,i}}{\Delta \tau} + O(\Delta \tau) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $t_{n,i} = t(n\Delta x, i\Delta \tau)$

将式(4)代入式(3), 且假设物性参数根据前一时层的温度求得, 可以得到

$$-\frac{a_{n,i}\Delta \tau}{\delta x^2} t_{n-1,i+1} + \left[1 + 2\frac{a_{n,i}\Delta \tau}{\delta x^2} \right] t_{n,i+1} - \frac{a_{n,i}\Delta \tau}{\delta x^2} t_{n+1,i+1} = t_{n,i} + \frac{a_{n,i}\Delta \tau}{\delta x^2} \frac{\lambda'_{n,i}}{4\lambda_{n,i}} (t_{n+1,i} - t_{n-1,i})^2 \quad (5)$$

$$\lambda_{n,i} = \lambda(t_{n,i}), \lambda'_{n,i} = \lambda'(t_{n,i}), a_{n,i} = \frac{\lambda(t_{n,i})}{\rho C(t_{n,i})}$$

一维非稳态导热空间的节点划分及测温点示意图见图4. 由式(1b)可得初始条件的差分形式如下

$$t_{n,0} = t_0, \quad n = 0, 1, \dots, L \quad (6)$$

由式(1c)可得测点温度的差分形式如下

$$t_{k,0} = f(i\Delta \tau), \quad i = 0, 1, \dots, M \quad (7)$$

边界条件的差分形式如下:

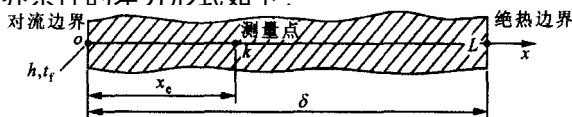


图4 一维非稳态导热空间节点划分及测温点示意图

对于 $x = 0$ 的对流边界条件, 利用热平衡法建立如下关系式

$$(1 + 2f_{0,i}) t_{0,i+1} - 2f_{0,i} t_{1,i+1} - z_l = 0 \quad (8)$$

式中 $f_{0,i} = \frac{\lambda(t_{0,i})\Delta \tau}{\rho C(t_{0,i})\delta x^2}$

$$z_l = t_{0,i+1} + \frac{2a_{0,i}\Delta \tau}{\lambda_{0,i}\delta x} q$$

对于 $x = \delta$ 的绝热边界条件, 利用热平衡法建立如下关系式

$$-2f_{L,i} t_{L-1,i+1} + (1 + 2f_{L,i}) t_{L,i+1} = t_{L,i} \quad (9)$$

式中 $f_{L,i} = \frac{\lambda(t_{L,i})\Delta \tau}{\rho C(t_{L,i})\delta x^2}$

对于两个测量点的离散方法与上类似, 在此不再赘述.

2.2 计算程序流程图及求解方法

计算程序流程图见图5. 对于关系式(5)~(9), 可以组合为以 q 和 $t_{n,i}$ ($n = 0, 1, \dots, L; i = 0, 1, \dots, M; t_k$ 可测得, 因此为已知值) 为未知变量的线性方程组^[7].

值得指出, 本文所采用的方法在文献[7]的基础

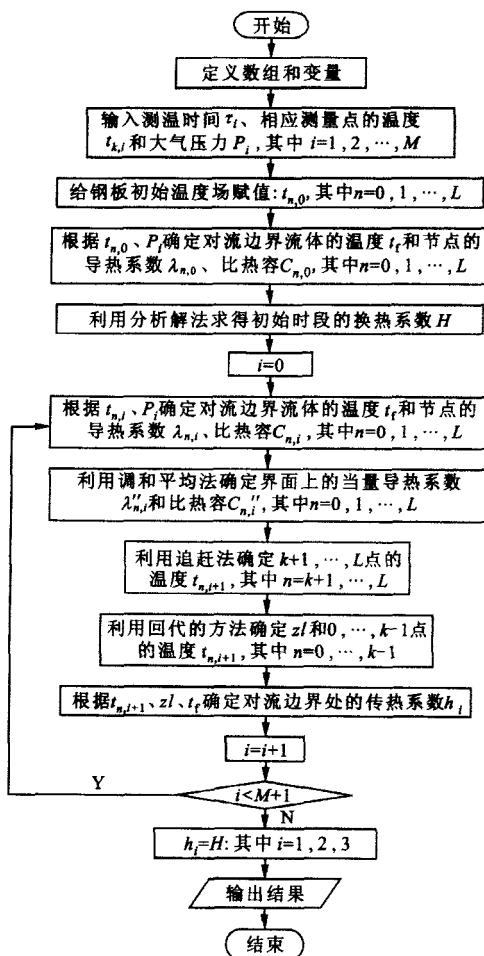


图5 计算程序流程图

上有较大的改进.首先,本文将测量点到绝热边界部分当作已知区,使用求解速度较快的追赶法^[8]进行求解,再回代得出未知区(对流边界到测量点)的温度场,使得计算程序能够方便地求解.其次,在用上述直接法求解时,不可避免地会出现初始时段传热系数的突跳,但由于在最初的一段时间内实验件温度分布较均匀,热物性参数近似为常数,所以可利用分析解^[9]求解初始时段(例如取前6 s)的传热系数值以替换直接法求解出现的突跳值,结果表明可有效缓解初始时段传热系数的突跳.

3 程序校核算法验证

为了验证上述传热系数计算模型和计算程序的正确性,假设了板坯表面传热系数随时间变化的函数关系式,并利用 TDMA^[6]算法计算得到对应上述测量点的温度随时间变化的关系式,以替代实测温度值.本文选取了如下两种形式的表面传热系数 h 随时间 τ 的变化关系式

$$h = 0.01\tau^2 + 0.1\tau + 350 \quad (10)$$

$$h = 200\sin(0.1\tau) + 700 \quad (11)$$

值得指出,上述两式中 h 随 τ 的变化与随表面温度 t 的变化是一致的,也就是说,在连铸二冷过程中,随着冷却过程的不断进行, t 不断变化(降低).

根据式(10)、(11)所描述的边界条件,利用求解导热正问题的方法,可以很方便地得到非稳态导热问题的温度场.利用这一温度场中某一固定位置的温度随时间的变化规律,作为求解导热反问题的输入条件(即相当于实验过程中测点温度随时间的变化),计算所得 h 随 t 和 τ 的变化规律及其与按式(10)、(11)所描述的预定值的比较示于图6和图7中.

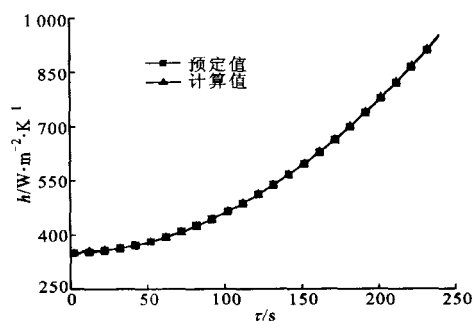
由图6和图7可以看出,通过本文的直接法计算得到的 h 随 t 的变化值与预定值吻合良好(最大相对误差小于5%,发生在初始时段,这主要是由于初始的一段时间板坯温度变化比较剧烈的缘故),从而验证了本文传热系数计算模型和计算程序的正确性.

4 程序应用结果及结论

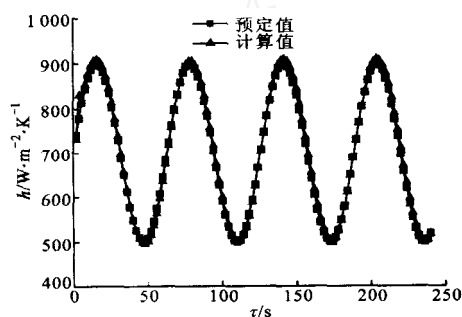
图8是根据实验数据来预测表面传热系数的计算结果.值得指出,图中当表面温度降到250℃以下时表面传热系数急剧增大是由于水的沸腾由膜态沸腾转为过渡沸腾,热流增大而温差减小的缘故.预测结果与文献^[2]中的趋势是一致的,说明采用本文方

法预测的结果是合理的.

本文采用直接法求解一维非稳态导热反问题,利用内部测点估算了实验件的表面状况,并做了相

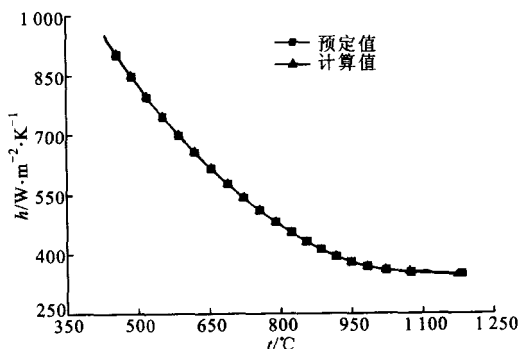


(a) $h = 0.01\tau^2 + 0.1\tau + 350$

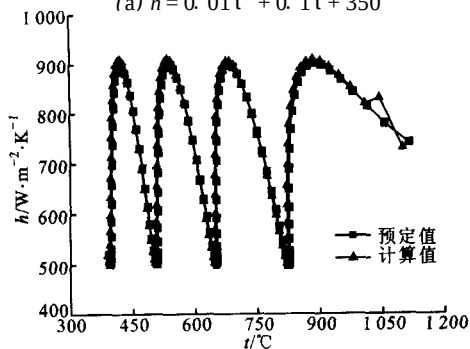


(b) $h = 200\sin(0.1\tau) + 700$

图6 表面传热系数随时间的变化



(a) $h = 0.01t^2 + 0.1t + 350$



(b) $h = 200\sin(0.1t) + 700$

图7 表面传热系数随表面温度的变化

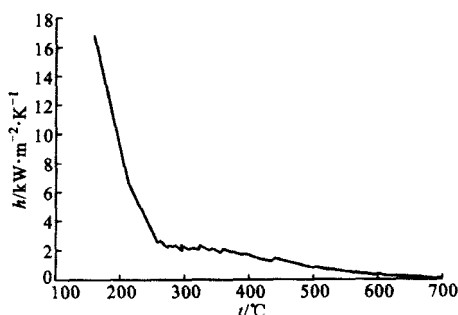


图8 利用实测数据的计算结果

应的改进,即改变矩阵形式,使用追赶法编制出计算程序,其稳定性及精度均能满足要求,且加快了计算机求解的速度.使用直接法求解,不可避免地会在初始时段出现振荡,因此在理论分析的基础上对初始时段采用分析解进行计算,可缓解计算出现的振荡.通过两个算例的验证表明,计算值与预定值吻合良好.

参考文献:

- [1] 蔡开科. 连铸二冷区凝固传热及冷却控制[J]. 河南冶金, 2003, 11(1): 3-7.
- [2] 文光华, 迟景灏, 黄云飞. 连铸机二冷段喷嘴冷态和

热态的实验研究[J]. 重型机械, 1997, 15(12): 24-26, 38.

- [3] Yao M, Yin H B, Fang D C. Real-time analysis on non-uniform heat transfer and solidification in mould of continuous casting round billets[J]. ISIJ International, 2004, 44(10): 1696-1704.
- [4] Constales D, Kacur J, Van Keer R. On the optimal cooling strategy for variable-speed continuous casting[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 53(3): 539-565.
- [5] Ha J S, Cho J R, Lee B Y, et al. Numerical analysis of secondary cooling and bulging in the continuous casting of slabs[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3): 257-261.
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 80-81, 263-294.
- [7] Oleg M A. Inverse heat transfer problems[M]. New York: Springer-Verlag, 1994. 125-149.
- [8] 李乃成, 邓建中. 数值计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 23.
- [9] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 1998. 71-80.

(编辑 荆树蓉)

我国成功开发出排放满足欧 标准的二甲醚汽车

日前,由一汽集团大连柴油机厂、西安交通大学和无锡油泵油嘴研究所3家单位共同承担的“十五”清洁汽车关键技术研究开发及示范应用项目中的二甲醚汽车研究开发课题,成功开发出了排放满足欧 标准的二甲醚汽车样车.此二甲醚汽车样车已累计行驶超过4 500 km,经济性和动力性良好.经噪声检测,发动机燃烧噪声和整车的加速行驶车外噪声与原柴油机/车相比有明显降低.

二甲醚是近几年来国际上新兴的一种代用燃料,适用于压燃式内燃机.燃用二甲醚燃料不但能够保持柴油机热效率高、动力性好等优点,更重要的是能够有效解决传统柴油机上最难解决的碳烟和氮氧化物排放问题.目前,对二甲醚作为车用燃料的研究在国际上日益受到关注,二甲醚发动机、二甲醚汽车的研究开发和示范运行也在不断深入开展.

西安交通大学和一汽集团大连柴油机厂等单位于2003年初联合申报并承担了二甲醚汽车的研究开发任务.在随后的两年多时间里,课题承担单位围绕二甲醚汽车的核心技术,以CA498A高速柴油机为研究平台,开展了适合于低黏度、低沸点二甲醚发动机的高低压燃料供给系统、二甲醚发动机燃烧系统参数优化、二甲醚汽车提高动力性和降低排放等研究,自主设计开发了适合二甲醚燃料的等压出油阀油泵、二甲醚发动机低涡流气缸盖等关键部件,成功开发出高效低污染的二甲醚发动机及整车.

(来源:中国有色金属信息网)