

12 395-398

# 连铸铸坯表面温度辐射测量的反问题研究\*

吴蓓 殷晓静 / 张欣欣  
(北京科技大学热能工程系, 北京 100083)

TF777  
TF345.03

**摘 要** 在冶金连铸生产条件下, 由于在铸坯表面和辐射高温计之间存在着辐射-吸收性介质, 因此无法准确获得铸坯表面的真实温度。本文构造了此条件下的连铸测温模型, 即在两不透明的无限大平板间存在一灰的水蒸气区和一非灰的水雾区。并在此基础上进行了反问题的研究, 通过迭代法估计连铸坯表面的真实温度。研究了各参数对最终计算结果的影响, 其中, 水雾区厚度及其减弱系数影响最大, 需在计算中给予足够重视; 其余参数影响很小, 可以忽略。

**关键词** 连铸测温, 辐射, 反问题, 数学模型, 表面温度  
**中图分类号** TF01

辐射测温

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2000)04-0395-04

## INVESTIGATION OF INVERSE PROBLEM FOR SURFACE TEMPERATURE RADIOMETRIC MEASUREMENT OF CONTINUOUS CASTING BLANK

WU Bei, YIN Xiaojing, ZHANG Xinxin  
Department of Energy Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083  
Correspondent: ZHANG Xinxin, professor, Tel: (010)62332741,  
E-mail: xzzhang@public.intercom.com.cn  
Manuscript received 1999-12-08, in revised form 2000-01-03

**ABSTRACT** Under the production conditions of metallurgical continuous casting, the true surface temperatures of casting blanks are inaccessible because of the radiation-absorption mediums existing between the surface of casting blank and the radiation thermometer. Assuming one gray water-vapor region and one non-gray water-fog region between two opaque infinite flat slabs, the thermometric model of continuous casting is developed to investigate inverse problem, estimating the true surface temperatures of casting blanks with an iteration procedure. The effects of various parameters on the calculation results are studied. It has been proved that the thickness and weakening coefficient of water-fog region are the key factors. Other parameters are much less influential so that they can be omitted during the calculation procedure.

**KEY WORDS** continuous casting thermometry, radiation, inverse problem, mathematical model, surface temperature

物体表面温度的非接触式测量是实现在线测量和在线控制的重要手段之一, 并被广泛用于生产实践中。但在冶金连铸生产过程中, 恶劣的测温环境和辐射-吸收性介质的存在, 严重干扰了辐射高温计测量信号的准确性<sup>[1]</sup>。文献 [2] 在辐射理论的基础上提出了一个较为简单的连铸测温模型。而在本论文的正问题模型中包含了一个非灰的水雾区, 使得模型更接近于实际生产条件。在此基础上本

论文对反问题进行了研究, 提出了解决方法, 研究了模型的各影响因素。

### 1 物理模型及数学描述

#### 1.1 物理模型

使用辐射方法测量高温物体表面温度的物理模型如图 1 所示。在两不透明的无限大平板间存在一灰水蒸气区 (左边) 和一非灰的水雾区 (右边), 分别由下标 p 和 s 表示。为了便于讨论水雾区厚度和两区折射率的影响, 假设有一自然界面 ( $S_0$ ) 存在于两区之间。高温板 ( $S_2$ ) 和低温板 ( $S_1$ ) 分别代表连铸坯表面和周围环境, 它们之间的距离  $L + H$  可以理解为连铸机机壳到铸坯之间的距离, 水雾区厚度  $H$  为喷嘴到铸坯的距离。辐射测温探头

\* 国家教育部优秀青年教师基金资助项目

收到初稿日期: 1999-12-08, 收到修改稿日期: 2000-01-03

作者简介: 吴 蓓, 女, 1973 年生, 硕士生

可位于水蒸气区内的任意位置,但不进入水雾区.图中  $K$  为减弱系数;  $\tau_\nu$  为单色透射率;  $\tau_{0\nu}$  为入射辐射的单色透射率;  $I_\nu^+$  和  $I_\nu^-$  分别为正、负半球空间的单色辐射强度;  $\mu$  为角的余弦值,下标  $\nu$  为辐射频率.

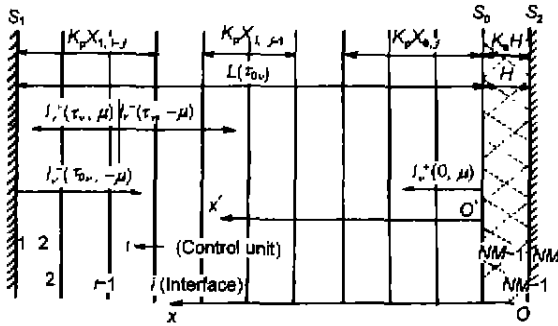


图1 物理模型及其坐标系

Fig.1 Physical model and its coordinate system

1.2 数学描述

为了简化模型,忽略上述系统内的导热和对流换热.而辐射能量不仅被两非透明边界反射和吸收,且由于两层介质的折射率不同,还会在自然界面发生折射.当生产处于稳定状态时,辐射测温计的响应时间远小于铸坯表面温度的变化时间,因此认为整个系统是稳态的.任意控制体  $i$  的辐射热交换公式如下

$$\sigma \sum_{p=1}^N n_{p,m}^2 \left[ \epsilon_{2p}(S_2 V_i)^S_{p,t-0} (\alpha_{p,T_{S_2}} T_{S_2}^4 - \alpha_{p,T_i} T_i^4) + \sum_{j=2}^{NM-1} (V_j V_i)^S_{p,t-0} (\alpha_{p,T_j} T_j^4 - \alpha_{p,T_i} T_i^4) + \epsilon_{1p}(V_i S_1)^S_{p,t-0} (\alpha_{p,T_{S_1}} T_{S_1}^4 - \alpha_{p,T_i} T_i^4) \right] = 0 \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $\epsilon$  为发射率;  $N$  为谱带数;  $n_{p,m}$  为介质在  $p$  谱带的折射率;  $\alpha_{p,T_i}$  是温度为  $T_i$  的黑体介质在  $p$  谱带发射能量占总发射能量的份额; 上标  $S$  表示镜反射.中括号内的第一项为高温表面  $S_2$  与控制体  $i$  之间的辐射热交换,第二项为控制体  $i$  与  $j$  ( $i$  和  $j$  的变化范围为 2 到  $NM-1$ ) 之间的辐射热交换;第三项为低温表面  $S_1$  与控制体  $i$  之间的辐射热交换.而  $(S_i S_j)^S_{p,t-0}$ ,  $(S_i V_j)^S_{p,t-0}$  和  $(V_i V_j)^S_{p,t-0}$  则分别代表表面与表面、表面与控制体以及控制体与控制体之间的总辐射交换系数<sup>[3]</sup>.它们之间的关系如下

$$(S_i V_j)^S_{p,t-0} = (S_i S_j)^S_{p,t-0} - (S_i S_{j+1})^S_{p,t-0} \quad (2a)$$

$$(V_i V_j)^S_{p,t-0} = (S_{i+1} S_j)^S_{p,t-0} - (S_i S_j)^S_{p,t-0} - (S_{i+1} S_{j+1})^S_{p,t-0} + (S_i S_{j+1})^S_{p,t-0} \quad (2b)$$

当  $i$  从 2 变化到  $NM-1$  时,可以得到由  $NM-2$  个方程构成的代数方程组.配合边界条件式 (3),则可以求得辐射-吸收性介质内的温度分布.

$$x = 0, \quad T = T_{S_2} \quad (3a)$$

$$x = L + H, \quad T = T_{S_1} \quad (3b)$$

1.3 辐射强度的求法

根据已经求得的温度场并利用辐射射程积分方程求解辐射强度.由于辐射高温计可以处于水蒸气区的任意位置而不进入水雾区,因此取自然界面为坐标原点,见图 1 中的  $x'$  坐标.计算辐射强度的公式如下

$$I_\nu^+(\tau_\nu, \mu) = I_\nu^+(0, \mu) e^{-\tau_\nu/\mu} + \int_0^{\tau_\nu} (1/\mu) I_{\nu,b}[T(\tau'_\nu)] e^{-(\tau_\nu - \tau'_\nu)/\mu} d\tau'_\nu \quad (4a)$$

$$I_\nu^-(\tau_\nu, -\mu) = I_\nu^-(\tau_{0\nu}, -\mu) e^{-(\tau_{0\nu} - \tau_\nu)/\mu} + \int_{\tau_\nu}^{\tau_{0\nu}} (1/\mu) I_{\nu,b}[T(\tau'_\nu)] e^{-(\tau'_\nu - \tau_\nu)/\mu} d\tau'_\nu \quad (4b)$$

边界条件为

$$I_\nu^-(\tau_{0\nu}, -\mu) = \rho_1 I_\nu^+(\tau_{0\nu}, \mu) + \epsilon_1 I_{\nu,b}(T_{S_1}) \quad (5a)$$

$$I_\nu^+(0, \mu) = t_{0p} \epsilon_2 I_{\nu,b}(T_{S_2}) e^{-K_a H/\mu} + M \times I_\nu^-(0, -\mu) + t_{0p} I_{\nu,b}(T_{12}) (1 - e^{-K_a H/\mu}) \quad (5b)$$

经整理便得到水蒸气区内任一点的辐射强度求解公式

$$I_\nu^+(\tau_\nu, 1) = \{t_{0p} \epsilon_2 I_{\nu,b}(T_{S_2}) e^{-K_a H - \tau_\nu} (n_0/n_{m\nu})^2 + M \epsilon_1 I_{\nu,b}(T_{S_1}) e^{-\tau_{0\nu} - \tau_\nu} + t_{0p} I_{\nu,b}(T_{12}) (1 - e^{-K_a H}) \cdot e^{-\tau_\nu} (n_0/n_{m\nu})^2 + \int_0^{\tau_\nu} I_{\nu,b}[T(\tau'_\nu)] e^{-(\tau_\nu - \tau'_\nu)} d\tau'_\nu + M \rho_1 \int_{\tau_\nu}^{\tau_{0\nu}} I_{\nu,b}[T(\tau'_\nu)] e^{-2\tau_{0\nu} - \tau_\nu + \tau'_\nu} d\tau'_\nu + M \int_0^{\tau_{0\nu}} I_{\nu,b}[T(\tau'_\nu)] e^{-\tau_\nu - \tau'_\nu} d\tau'_\nu / [1 - M \rho_1 e^{-2\tau_{0\nu}}] \quad (6)$$

式中,  $I_{\nu,b}$  为黑体单色辐射强度;  $t_{0p}$  为水蒸气区的减弱光学厚度;  $\rho$  为反射率;  $n_0$  和  $n_{m\nu}$  分别为水蒸气和水雾折射率,并有

$$M = \rho_0 + t_{0p}^2 \rho_2 e^{-2K_a H} / (1 - \rho_0 \rho_2 e^{-2K_a H})$$

最后再将辐射强度转变为温度信号

2 反问题及其计算

在上述测量体系内,辐射测量反问题可以表述为已知某种辐射高温计(此处以比色高温计为例)对高温板坯表面温度的测量值和必要的参数,估计板坯的真实温度.所

使用的迭代法<sup>[4]</sup>的示意图如图 2 所示。首先, 输入所有参数和板坯的测量值, 假设一个板坯的温度并利用正问题模型计算出测量值的大小, 将计算出的测量值与实际测量值加以比较。若能满足精度要求则此假设温度即为板坯表面的真实温度; 若不能满足精度要求, 重新设定板坯温度, 并重复上述计算步骤直至达到精度要求为止。

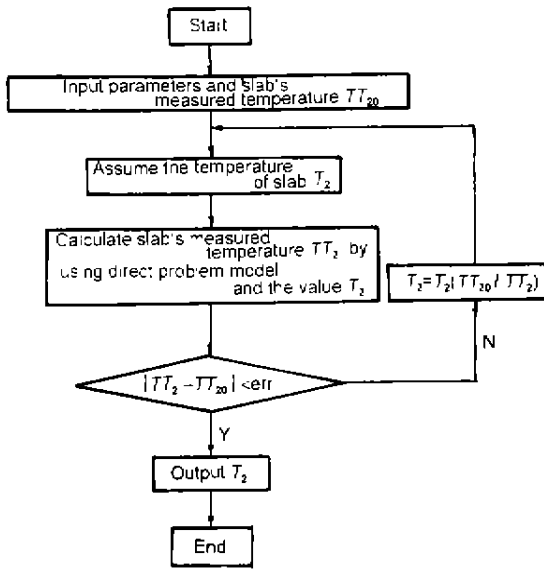


图 2 反问题计算框图

Fig.2 Flow chart of inverse problem

### 3 计算结果及讨论

通过对比色高温计的模拟计算, 讨论不同参数对最终估计结果的影响。模拟计算条件如下: 低、高温板发射率  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  均为 0.8; 水蒸气分压占总压力的份额为 80%, 水蒸气区厚度  $L=1$  m, 折射率  $n_0=1.0$ ; 水雾区厚度  $H=0.1$  m, 减弱系数  $K_s=1.5$   $m^{-1}$ , 折射率  $n_v=1.3$ 。选择高温板典型温度 1000, 1300 和 1600 K 进行分析。

#### 3.1 水雾区厚度的影响

图 3 为水雾区厚度  $H$  对最终估计结果的影响。厚度  $H$  变化范围在 0.1—0.3 m 之间<sup>[5]</sup>。虚线为正问题计算出的测量值, 在此模拟实际生产中板坯的测量信号值 ( $H=0.1$  m 时); 实线为板坯的实际温度值; 而点划线为  $H$  改变时的反问题估计值 ( $H=0.1$  m 为比较的标准)。从图可见, 随着水雾区厚度的增加, 其吸收能力也增加, 于是高温板坯需要输出更多的能量来补偿被吸收掉的能量, 这就导致了反问题的估计值高于板坯的真实温度值。从图中还可以看出, 当高温板坯的温度水平提高后, 反问题计算的绝对误差随之增大, 最大可达 23 K。以上结果说明水雾区厚度  $H$  是对最终估计结果的一个重要影响因素。

#### 3.2 水雾区减弱系数的影响

另外一个对最终估计结果影响较大的因素是水雾区减弱系数, 其影响如图 4 所示。将  $K_s=1.5$   $m^{-1}$  作为

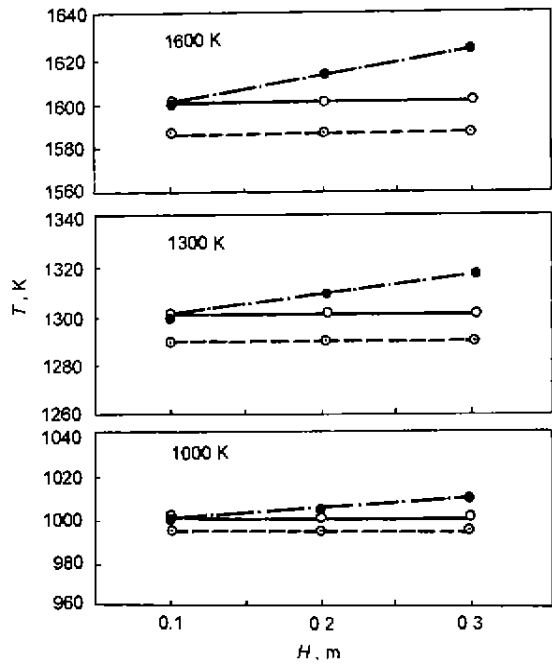


图 3 水雾区厚度对估计结果的影响

Fig.3 The effects of the thickness ( $H$ ) of water fog region  
--- calculated — measured - · - · estimated

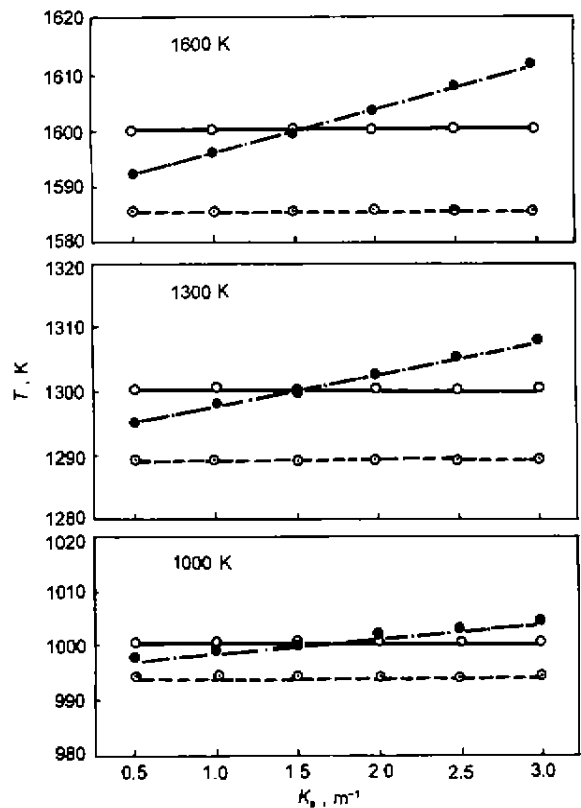


图 4 水雾区减弱系数对估计结果的影响

Fig.4 The effects ( $K_s$ ) of weakening coefficient of water fog region  
--- calculated — measured - · - · estimated

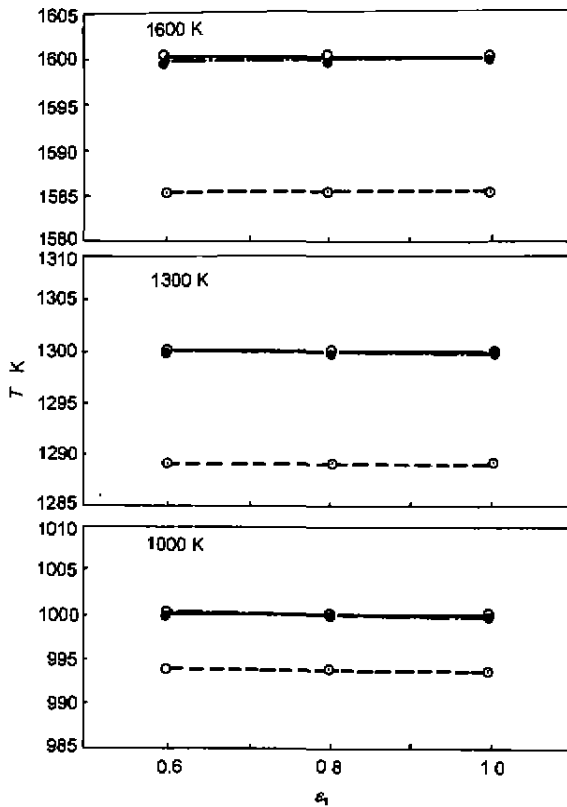


图5 低温板发射率对估计结果的影响

Fig.5 The effects of emissivity ( $\epsilon_1$ ) of low-temperature slab  
 --- calculated — measured - · - · - estimated

为标准情况,发现随水雾区减弱系数的增加,反问题的估计值也增加,但最大绝对误差仅略大于 11 K.

### 3.3 其它影响因素

对于本模型还有其它一些影响因素,如高、低温板的发射率,低温板温度,水蒸气分压,水蒸气区厚度,以及

自然界面折射率等.但这些因素对估计结果的影响远小于水雾区厚度和减弱系数.此处仅以低温板发射率  $\epsilon_1$  为例加以说明(图5).反问题的最终估计结果几乎不随低温板发射率而变化,而且最大绝对误差也只有 0.29 K.

由以上分析可见,在实际估计算法中必须对那些影响大的因素给予充分考虑,而对于那些影响小的因素则可将它们看作名义参数,在估计算法中给一合理值即可.

## 4 结论

(1) 根据连铸生产的实际情况,考虑喷水后所形成的水雾的影响,建立了模拟板坯温度辐射测量的物理模型和数学模型;

(2) 在正问题的基础上建立了反问题模型,并用迭代法进行了求解;

(3) 计算分析表明,水雾区厚度及减弱系数的影响远大于其它因素,在实际估算中必须予以考虑,而其它影响较小的因素则可作为名义参数处理.

## 参考文献

- [1] Sun H B, Yin X J, Yang J. *Radiation Heat Transfer*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 298  
(孙鸿宾, 殷晓静, 杨 晶. 辐射换热. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 298)
- [2] Li C, Yin X J, Zhang X X. In: Zhang B Y, Han L D, Zhao X N eds., *TEMP BEIJING '97, Proc Int Conf of the Temperature and Thermal Measurements*, Beijing: Standards Press of China, 1997: 263
- [3] Tan H P, Yu Q Z, Lallemand M. *J Eng Thermophys*, 1989; 10: 295  
(谈和平, 余其铮, Lallemand M. 工程热物理学报, 1989; 10: 295)
- [4] Chahine M T. *J Atmos Sci*, 1970; 27: 960
- [5] Mizikar E A. *Continuous Casting*. Vol.II, Iron and Steel Society of AIME, 1984: 125