

① 828-832

包铜钢线热浸镀过程的简化模型*

TG174.443

傅晓 于九明 陈海耿
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110006)

TB331

摘要 在铜线热镀 Cu 实验基础上, 建立简化的动态数学模型, 模拟反向凝固的工艺过程, 研究主要工艺参数影响的规律, 以模拟参数的形式描述界面处的接触热阻, 合理地反映了铜液和钢芯之间的热交换过程。区域离散采用内节点法, 相交潜热的描述采用热焓法, 温度和焓的增加都作为求解变量, 这些措施使得凝固前沿的确定不受网格的限制, 此简化模型可作为在线控制算法的基础。

关键词 反向凝固, 内节点法, 模拟参数法

热浸镀 包铜钢线

中图分类号 TB331, TK124

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)08-0828-03

SIMPLIFIED MODEL OF HOT DIPPING PROCESS OF COPPER-COATED STEEL WIRE

FU Xiao, YU Jiuming, CHEN Haigeng

School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006

Correspondent: CHEN Haigeng, professor, Tel: (024)23893000-7323, E-mail: chenhg@pub.sy.tn.cn

Manuscript received 1999-09-03, in revised form 2000-05-16

ABSTRACT Based on the hot dipping experiment of copper-coated steel wire, a simplified dynamic mathematical model is developed to simulate the process of inverse casting. The influence of chief technology parameters on the process is investigated. Adopting the simulate parameter method, the thermal resistance on the interface is described, and the heat transfer between copper melt and steel wire is reasonably simulated. As for the domain discretization, the method of internal point is used. The thermal enthalpy method is adopted to model the latent heat in phase change, both the temperature and enthalpy increase are taken as object variables, so that moving of the solidification front is independent of the grid distribution during the computation. Based on this simplified model, an algorithm for on-line control can be derived easily.

KEY WORDS inverse casting, method of internal point, method of simulate parameter

符号说明

A_i 控制体 i 的面积, m^2
 c_i 控制体 i 的比热, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
 C_i 控制体外边界的弧长, m
 D 包铜钢线外径, m
 d_s 钢芯直径, m
 H Cu 的热焓, $J \cdot kg^{-1}$
 $H_{L,min}$ 液态 Cu 最低焓, $J \cdot kg^{-1}$
 L 计算域最外边界距中心距离, m
 n_s 钢芯内控制体的最大编号
 r 计算点的径向坐标, m
 r_s 钢区域外径, m

R_j 接触热阻, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 R_{max} 初始接触热阻, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 R_{min} 残余接触热阻, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
 T 温度, K
 T_{Cu} 铜液温度, K
 T_s 钢芯预热温度, K
 T_L Cu 的熔点, K
 τ 时间, s
 τ_R 接触热阻变化的时间, s , 当 $R_{min}=0$ 时, 即为接触热阻存在的时间
 λ 导热系数, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
 ρ_i 控制体 i 的密度, $kg \cdot m^{-3}$

* 国家自然科学基金资助项目 59674035

收到初稿日期: 1999-09-03, 收到修改稿日期: 2000-05-16

作者简介: 傅晓, 女, 1976年生, 硕士生

包铜钢线是一种新型的金属复合材料, 它兼有 Cu 和钢的各种优点, 具有良好的综合性能^[1], 而高速热浸镀法 (HSHD) 是生产包铜钢线的方法之一。本研究的实验装置

如图 1 所示, 其中热浸镀单元为实验的核心部分, 它由熔化炉和结晶器组成。

纯度为 99.99% 的电解 Cu 熔化之后进入结晶器, 经表面净化和预热后的钢丝以高速上行, 穿过熔融的铜液, 于结晶器内完成与 Cu 的复合。在此简单的工艺中, 所发生的凝固过程称为反向凝固^[2], 同时伴随着复杂的传热传质, 而且还可能发生重熔。由于钢芯直径和浸镀所经历时间的数量级仅分别为 1 mm 和 10^{-1} s, 实验研究的测量工作通常只能限于最终镀层厚度, 然后通过走线速度的改变来测定该厚度与时间的关系, 进而推算出包覆比 A 、最大包覆比 A_m 及与之相应的开始重熔时间等。所以, 通过数值模拟来获取动态温度场和凝固场的信息是十分必要的。这有助于实验结果的分析 and 工艺参数优化的研究。作为简化模型, 本研究初次尝试将模拟参数法用于边界条件的简化, 其中包括模拟计算域的确定和钢-Cu 界面上的接触热阻的动态描述。

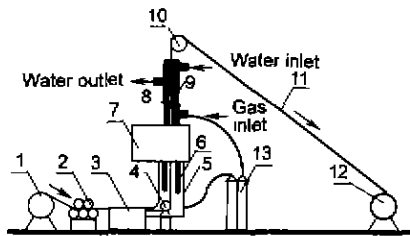


图 1 热模拟实验装置示意图

Fig.1 Schematic drawing of hot modeling equipment

- 1.Pay-off 2.Straightening unit 3.Mechanical cleaning bench 4.Wire feeder 5.Atmosphere shield 6.Pre-heater 7.HSHD device 8.Cast-rolling and smoothing unit 9.Cooling device 10. Guide sheave 11.Copper-coated steel wire 12.Take-up system 13.Reducing gas

1 模型与简化

轴对称的几何条件决定了此过程是一个典型的二维问题, 就工艺的要求而言, 稳定均衡的热浸镀过程是生产优质产品的前提。换言之, 稳态的模拟对于工艺参数的研究也十分重要。对于稳态过程, 当忽略高度方向的热交换时, 二维稳态温度场又可用一维瞬态过程来等价。研究一维模型的另一目的是, 为该工艺的在线控制作必要的理论准备。

微分方程

$$\rho c \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \lambda \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \quad (1)$$

初始条件

$$T|_{\tau=0} = \begin{cases} T_s & r \leq r_s \\ T_{Cu} & r > r_s \end{cases} \quad (2)$$

边界条件

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T \Big|_{r \geq L} = T_{Cu} \quad (3)$$

1.1 相变潜热的热焓法描述

在纯铜的熔化与凝固过程中, 温度是焓的单值函数, 但焓不是温度的单值函数。为了准确描述 Cu 的凝固和重熔过程, 采用热焓法^[3]来描述 Cu 的相变潜热。将焓值分两段定义

$$H = \begin{cases} \int_0^T c(T) dT & T \leq T_L \\ H_{L, \min} + \int_{T_L}^T c(T) dT & T > T_L \end{cases} \quad (4)$$

其中, $c(T)$ 表示比热是温度的函数。

根据式 (4) 的反函数, 可以方便地求得温度。为此, 在 Cu 的计算域中, 必须以 ΔH 作为差分方程的求解变量。而在钢的计算域中, 由于不涉及凝固的相变, 可以直接以温度作为求解变量。

此外, 其他物性参数也均描述为温度的函数。

1.2 离散化与内接点法

所模拟的是动边界问题, 故在空间离散时采用内节点法^[4], 以便简化求解过程。差分方程采用完全隐格式。由于要求解两种变量, 对于比邻界面的控制体, 在方程中 T 和 ΔH 是共存的, 所以差分方程共有六种形式。为节省篇幅, 在此仅列出钢区和 Cu 区中的“内部”节点的两代表形式

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} T_{i-1}^1 + \left(1 + \frac{\Delta \tau}{\Delta r}\right) \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} + C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2}}{\rho_i c_i A_i}}{T_i^1 - \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2} T_{i+1}^1}{\rho_i c_i A_i}} \\ & = T_i^0 \quad i = 1 \cdots (n_s - 1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} \Delta H_{i-1} + \left(\rho_i \frac{\Delta \tau}{\Delta r}\right) \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} + C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2}}{c_i A_i}}{\Delta H_i - \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2} \Delta H_{i+1}}{c_{i+1} A_i}} \\ & = \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} T_{i-1}^0 - \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i-1)/2} \lambda_{(i-1)/2} + C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2}}{A_i} T_i^0 + \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot \frac{C_{(i+1)/2} \lambda_{(i+1)/2} T_{i+1}^0}{A_i}}{i = (n_s + 2) \cdots (n - 1)} \end{aligned} \quad (6)$$

2 模拟参数法在简化模型中的应用

Syogo 提出的模拟参数法是模型化研究中的一种重要的方法 [5]。当对过程有定性的认识, 但对其实质尚缺乏深刻认识时, 采用模拟参数法往往是行之有效的。对于简化模型, 模拟参数法不仅能使问题得以封闭, 还有助于提高模拟的精度。

本研究所采用的模拟参数主要有计算域的尺度和 Cu 钢界面上的接触热阻等, 并采用两个最重要的工艺参数, 即最大包覆比和开始重熔时间, 作为调整和确定模拟参数的标准。包覆比定义为

$$A = \frac{D^2 - d_b^2}{d_s^2} \quad (7)$$

2.1 计算域的确定

计算域应包括热交换最剧烈的区域, 其外沿采用第一类边界条件, 体现了对此区域的能量补给。以实验条件作为模拟的重点, 在 $d_s=2.8 \text{ mm}$, $T_s=293 \text{ K}$, $T_{Cu}=1393 \text{ K}$ 的条件下, 计算域对两个指标的影响示于图 2。根据模拟结果, 在实际计算中取钢液中节点数为钢芯中节点数目的 8 倍。

2.2 接触热阻

考虑到氧化等因素在 Cu 钢界面处所造成的接触热阻

对于热交换有较大的影响 [6], 本研究采用动态的方式加以描述, 接触热阻与时间的最简单函数关系为

$$R_j = \frac{R_{\min} - R_{\max}}{\tau_R} + R_{\max} \quad (8)$$

模拟表明, 残余热阻 R_{\min} 在 $0-1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 范围内变化, 所引起的最大包覆比和开始重熔时间的变化分别为 0.15% 和 10^{-2} s , 相对而言是微小的。因此在最终的模拟计算中取 $R_{\min}=0$ 。初始接触热阻的值以及动态接触热阻存在的时间对最大包覆比和开始重熔时间的影响示于图 3。根据上述的两个指标的选择, 确定 $R_{\min}=0$,

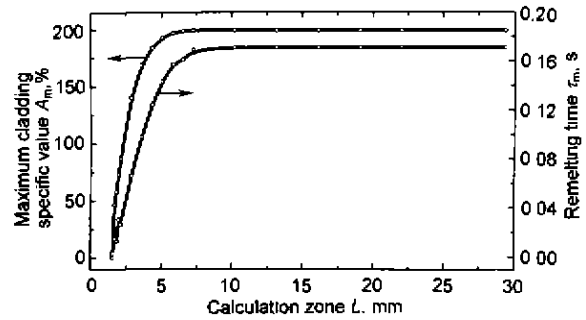


图 2 计算域对最大包覆比及开始重熔时间的影响
Fig.2 Effect of calculation zone on A_m and τ_m

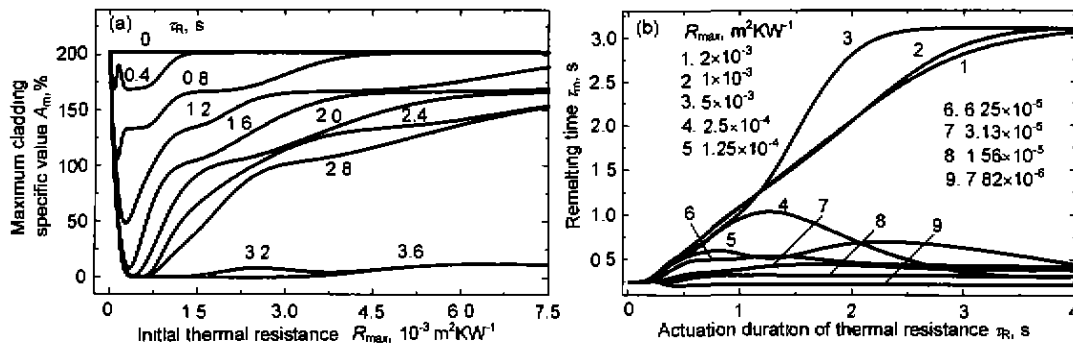


图 3 R_{\max} 及 τ_R 对最大包覆比及开始重熔时间的影响
Fig.3 Effect of R_{\max} and τ_R on A_m (a) and τ_m (b)

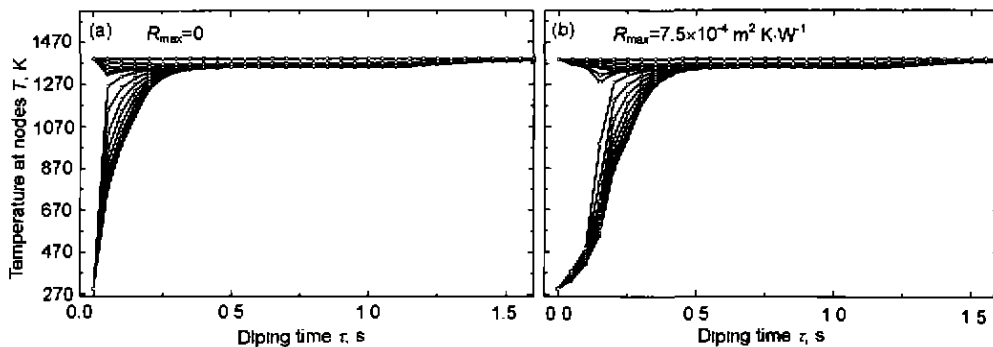


图 4 接触热阻对温度场模拟的影响
Fig.4 Effect of contact thermal resistance on the simulation of temperature field
(a) $R_{\max}=0$ (b) $R_{\max}=7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

$R_{\max}=7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, $\tau_R=0.4 \text{ s}$. 模拟中考虑热阻与否, 对于动态温度场的影响对比于图 4.

应当指出, 如果再增加一个模拟参数, 即可模拟接触热阻随时间的非线性规律.

2.3 对比实验

由于条件的限制, 实验的可测量主要是包覆比. 但包覆比与时间的曲线已包括了最大包覆比和开始重熔时间的信息, 故以此曲线对模拟计算与实验进行对比, 示于图 5.

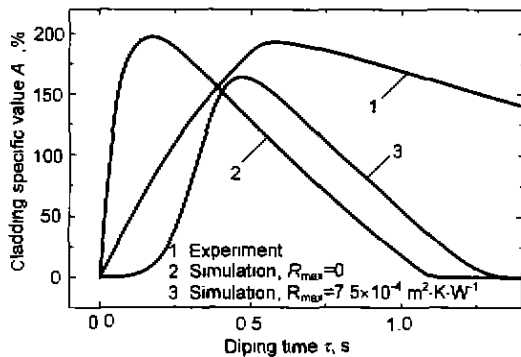


图 5 模拟计算与实验的比较

Fig.5 Comparison of the simulation with experimental data

可以看出, 如果不考虑接触热阻 ($R_{\max}=0$), 则计算的最大包覆比 A_m 与实验值接近, 但开始重熔时间 τ_m 短于实验值. 考虑接触热阻之后, τ_m 趋于接近, 但 A_m 又略偏小. 此外, 模拟计算的曲线过了峰值之后与实验偏离较明显. 进一步的分析认为, 模型未考虑铜液表面张力的作用, 是产生上述误差的主要原因. 表面张力使得复合线离开液面时, 在线的表面有铜液粘滞, 在外界环境的温度下, 粘滞的铜液迅速凝固, 成为包覆层的“附加”部分. 可以认为, 如果模型再考虑粘滞作用, 模拟结果将会更加合理, 而模拟参数法可作为描述粘滞作用的简便方法.

3 结果与讨论

模拟的目的是找出工艺条件对热浸制过程的影响的定量规律, 以便在实验研究的后期以及实际生产中实现操作参数的优化.

3.1 铜液温度的影响

如图 6 所示, 铜液的过热度对最大包覆比和开始重熔时间都有较大的影响, 随铜液过热度的增大, 最大包覆比和开始重熔时间都明显下降. 其原因在于, 当钢芯直径一定时, 铜液的过热度增加, 单位质量的 Cu 固化所放出的总热量随之增加, 而钢芯所能吸收的热量基本不变, 所以包覆层厚度减小, 最大包覆比也相应下降. 此外, 增大铜液的过热度也使钢芯升温速度和升温极限均有提高, 从而导致热浸制过程提前转入重熔阶段.

3.2 钢芯直径的影响

从图 7 可以看出, 最大包覆比受钢芯直径尺度的影响并不明显, 随着 d_s 的增大, 最大包覆比只是缓慢地减小. 但是, 钢芯直径对开始重熔时间影响却较显著. 由于随钢芯直径的增加, 它所能吸收的热量也增加, 从而延长与铜液进行热交换的过程, 使得界面处热流转向的时间也随之延迟, 即推迟了重熔的开始.

3.3 钢芯预热温度的影响

图 8 表明, 钢芯预热温度升高, 最大包覆比及重熔时间均随之下降. 钢芯的预热缩小了 Cu 与钢之间的温差,

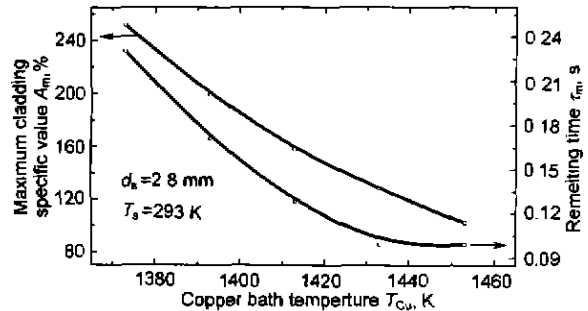


图 6 铜液温度对最大包覆比及开始重熔时间的影响

Fig.6 Effect of T_{Cu} on A_m and τ_m

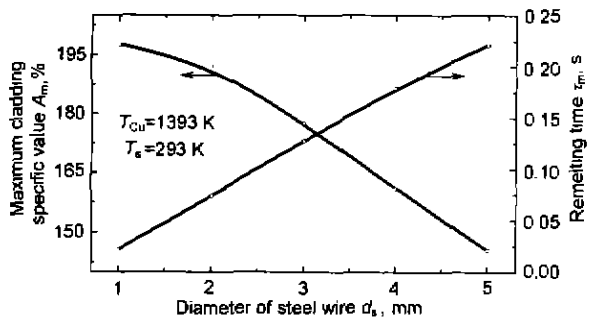


图 7 钢芯直径对最大包覆比及开始重熔时间的影响

Fig.7 Effect of d_s on A_m and τ_m

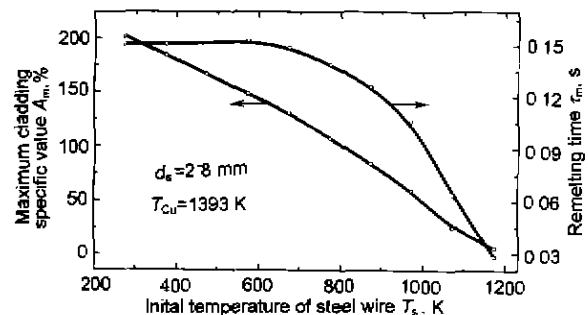


图 8 钢芯预热温度对最大包覆比及开始重熔时间的影响

Fig.8 Effect of d_s on A_m and τ_m

减小了钢芯从铜液中吸收的热量, 从而造成 Cu 的固化量的减少, 使镀层厚度下降, 重熔时间也相应地提前.

4 结论

(1) 针对热浸镀过程的传热特点, 在不同材料的计算域中, 以不同的物理量作为求解变量, 所推导的复合变量的差分方程有效地处理了潜热和动边界问题.

(2) 在铜液温度为 1393 K 的条件下, 最大包覆比可达 200%, 说明该工艺有较大的控制范围. 直径对包覆比影响不明显, 所以过热温度、预热温度和接触时间等参数的组合有较好的普适性. 预热温度的变化对包覆比及重熔时间的影响较显著, 因此, 实用中可以作为控制参数.

(3) 以模拟参数的形式描述动态接触热阻, 比较有效地减小了开始重熔时间的模拟计算误差. 在更深入的研究中, 应考虑粘滞作用对浸镀复合过程的影响, 以进一步减

小最大包覆比和开始重熔时间的模拟误差.

参考文献

- [1] Kirchberg K. *Neue Hütte*, 1987; 3: 103
- [2] Yu J M, Wang Q J, Xiao Y Z, Chen J Y. *Chin J Non-ferrous*, 1999; 9: 474
(于九明, 王群骄, 孝云栋, 陈金英. 中国有色金属学报, 1999; 9: 474)
- [3] Zhu X H, Yang B J, Su J Y. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 1986; 2: 23
(朱宪华, 杨秉俭, 苏俊义. 西安交通大学学报, 1986; 2: 23)
- [4] Tao W Q. *Numerical Heat Transfer*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988: 11
(陶文铨. 数值传热学 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 11)
- [5] Syogo M. *Fuel Combustion Eng*, 1982; 49: 531
(松永省吾. 燃料及燃烧, 1982; 49: 531)
- [6] Fitzgerald T J, Singer R F. *Metall Mater Trans*, 1997; A28(6): 1377