

## 不锈钢 / Al 固液轧制复合过程温度场模拟 \*

许光明 崔建忠

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110006)

**摘要** 通过分析固液相轧制复合不锈钢 / Al 工艺的特点, 对轧制复合过程的边界条件进行了简化, 利用能量平衡法和有限差分方法推导了数学模型, 并计算了固液相轧制复合时的温度场和极限轧制速度, 其结果与实验时所测得的值基本相符。

**关键词** 固液相轧制复合, 温度场, 极限速度, 不锈钢 / Al

**中图分类号** TG335.81, TG335.85, O242.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(1999)02-0131-33

## SIMULATION OF TEMPERATURE FIELD IN LIQUID/SOLID ROLLING BONDING OF STEEL/Al

XU Guangming, CUI Jianzhong

School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110015

Correspondent: XU Guangming, doctor, Tel: (024)23893000-7747

Manuscript received 1998-10-23

**ABSTRACT** Based on analyzing the characteristic of liquid-solid rolling bonding which is used to produce stainless steel/Al clad plates, the boundary condition was simplified, the energy balance and finite difference method were adopted to deduce the mathematical model, the model was used to calculate the temperature field and the maximum rolling speed of the process, the result was closed to the measured one. The calculated result was useful to the research.

**KEY WORDS** solid/liquid rolling bonding, temperature field, limited speed, stainless steel/Al

目前, 生产钢 / Al 复合板比较成熟的工艺有冷轧复合、热喷镀、粉末冶金等。这些方法工艺复杂、投资大、复合强度低、生产成本低。固液相轧制复合则具有工艺简单、投资少、复合强度高、生产成本低等优点。然而, 该工艺难度大, 在研究工作中需要解决的问题也较多, 如钢 / Al 界面润湿与结合、轧制区的凝固、浇注温度、钢带预热温度等。其中, 凝固和复合是实现工艺过程的关键, 所以计算复合过程的温度场是掌握工艺特点和确定工艺参数的关键。该工艺主要流程为: 钢板 → 酸碱洗 → 打磨 → 预热 → 轧制复合 → 精轧 → 退火。轧制复合是工艺的关键和难点所在, 轧制速度、浇注温度、轧辊冷却强度、钢板预热温度等对轧制复合区的凝固及复合强度有着决定性的作用。固液相轧制复合的特点是存在液穴, 液穴的形状及位置决定着工艺是否能正常进行和复合板的性能, 但液穴的形状随浇注温度、轧制速度和冷却强度的变化而改变, 因此必须严格控制轧制复合中的工艺参数, 从而保

证得到最有利的液穴形状和位置, 使工艺能顺利进行。

### 1 计算模型的建立

#### 1.1 边界条件

为了对轧制复合过程的温度场进行数值模拟, 必须对一些边界条件进行简化:

(1) 由于轧辊与轧件的接触弧长较短, 可以把弧近似看作弦处理。

(2) 假设轧辊与轧件完全接触, 不产生塑性变形。

(3) 假设钢 / Al 结合牢固, 且忽略界面形成的金属间化合物对导热的影响。

(4) 假设 Al 在恒温下凝固, 且忽略由于凝固而产生的液体流动。

(5) 由于下辊无冷却水, 接触面积小, 且不锈钢的导热系数很小, 为了方便计算, 把不锈钢表面都看作是辐射边界。

(6) 把辊套看作平板近似处理, 认为在与 Al 液接触前辊套的温度为室温。

#### 1.2 离散化及差分格式的推导

利用有限差分方法对温度场进行数值模拟, 首先必须对计算范围进行离散<sup>[1]</sup>, 网格划分如图 1 所示。

\* 国家 863 计划资助项目 715-009-0060

收稿日期: 1998-10-23

作者简介: 许光明, 男, 1966 年生, 讲师, 博士

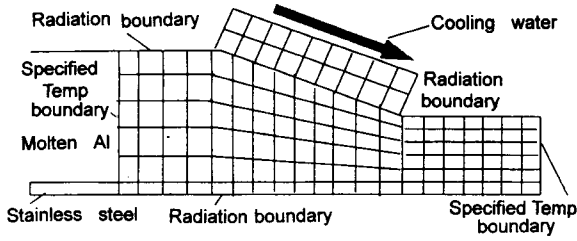


图1 网格划分

Fig.1 A schematic showing the mesh

对于固液相金属来说, 每个网格的能量变化主要由传质引起的传热、热传导和潜热组成<sup>[2]</sup>, 即

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(v_x Q)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y Q)}{\partial y} \right] - \left[ \frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \right] + G \quad (1)$$

式中,  $Q$  表示能量,  $v$  表示速度,  $G$  表示内热源,  $T$  表示温度,  $K$ ;  $x, y$  及下标分别表示轧制方向和高度方向。

对于本文二维传热而言, 在计算传质引起的传热时, 认为在变形区中的纵向速度不改变传质, 即忽略纵向传质, 在横向上对于每一个网格都遵守秒流量相等原理。因此在网格  $(i, j)$  与其周围网格  $(i, j+1), (i, j-1), (i-1, j), (i+1, j)$  的传热关系中, 由横向传质引起的传热<sup>[1]</sup> 为

$$Q1_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = v_{(i-1,j)} dy \cdot \rho T_{(i-1,j)} c dt \quad (2)$$

$$Q1_{(i,j) \rightarrow (i+1,j)} = v_{(i,j)} dy \cdot \rho T_{(i,j)} c dt \quad (3)$$

由热传导引起的传热为

$$Q2_{(i-1,j) \rightarrow (i,j)} = \lambda_{(i-1,j)(i,j)} dx \frac{T_{(i-1,j)} - T_{(i,j)}}{dy} dt \quad (4)$$

$$Q2_{(i,j-1) \rightarrow (i,j)} = \lambda_{(i,j-1)(i,j)} dx \frac{T_{(i,j-1)} - T_{(i,j)}}{dy} dt \quad (5)$$

$$Q2_{(i+1,j) \rightarrow (i,j)} = \lambda_{(i+1,j)(i,j)} dx \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i,j)}}{dy} dt \quad (6)$$

$$Q2_{(i,j+1) \rightarrow (i,j)} = \lambda_{(i,j+1)(i,j)} dx \frac{T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)}}{dy} dt \quad (7)$$

式中,  $dx, dy$  均为距离步长,  $T_{i,j}$  为节点  $(i, j)$  的温度,  $dt$  为时间步长,  $\rho, c$  分别为材料的密度和比热,  $\lambda_{(i-1,j)(i,j)}$  为相邻网格  $(i-1, j)$  与  $(i, j)$  间的平均导热系数, 且

$$\lambda_{(i-1,j)(i,j)} = \frac{2\lambda_{i-1,j}\lambda_{(i,j)}}{\lambda_{(i-1,j)} + \lambda_{(i,j)}}$$

因此, 节点  $(i, j)$  的热量增加量为

$$\Delta Q = v_{(i-1,j)} dy \cdot \rho T_{(i-1,j)} c dt - v_{(i,j)} dy \cdot \rho T_{(i,j)} c dt + \lambda_{(i-1,j)(i,j)} dy \frac{T_{(i-1,j)} - T_{(i,j)}}{dx} dt +$$

$$\lambda_{(i,j-1)(i,j)} dx \frac{T_{(i,j-1)} - T_{(i,j)}}{dy} dt + \lambda_{(i+1,j)(i,j)} dy \frac{T_{(i+1,j)} - T_{(i,j)}}{dx} dt + \lambda_{(i,j+1)(i,j)} dx \frac{T_{(i,j+1)} - T_{(i,j)}}{dy} dt \quad (8)$$

根据能量平衡法<sup>[3]</sup>, 即  $\Delta Q = \rho c dx \cdot dy (T^{(t+dt)} - T^t)$  得到差分

$$T_{(i,j)}^{(t+dt)} = F_0 T_{(i,j)}^t + F_1 T_{(i-1,j)}^t + F_2 T_{(i,j+1)}^t + F_3 T_{(i+1,j)}^t + F_4 T_{(i,j-1)}^t \quad (9)$$

其中,  $F_1 = \frac{v_{(i-1,j)} dy \cdot \rho_{(i-1,j)} c_{(i-1,j)} dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dx \cdot dy} + \frac{\lambda_{(i-1,j)(i,j)} dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dx^2}$

$$F_2 = \frac{\lambda_{(i,j+1)(i,j)} dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dy^2}$$

$$F_3 = \frac{\lambda_{(i+1,j)(i,j)} dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dx^2}$$

$$F_4 = \frac{\lambda_{(i,j-1)(i,j)} dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dy^2}$$

$$F_0 = 1 - \frac{v_{(i,j)} dt}{dx} - \frac{[\lambda_{(i-1,j)(i,j)} + \lambda_{(i+1,j)(i,j)}] dt}{\rho_{(i,j)} c_{(i,j)} dx^2} - \frac{[\lambda_{(i,j+1)(i,j)} + \lambda_{(i,j-1)(i,j)}] dt}{\rho_{(i,j)} \cdot c_{(i,j)} \cdot dy^2}$$

对于边界网格的节点, 其推导过程与其相似, 不再重复, 但对于重要边界必须进行处理, 如轧辊与 Al 接触边界, 热辐射边界等。

### 1.3 边界处理

1.3.1 辐射边界 对于辐射边界网格, 边界在  $dt$  时间内的传热为

$$Q = \epsilon_{1,2} \sigma_0 (T_{i,j}^4 - T_v^4) S \cdot dt \quad (10)$$

式中,  $\epsilon_{1,2}$  —— Al 表面与空气的综合辐射率, 且

$$\epsilon_{1,2} = 1 / \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right);$$

$T_{i,j}, T_v$  —— 边界节点和空气的温度;

$S$  —— 辐射面积;

$\sigma_0$  —— Boltzman 常数。

1.3.2 对流边界 对于辊套内表面与冷却水的边界属强制对流边界, 根据 Newton 冷却定律, 对流时壁面与流体的换热热流密度  $q$  为

$$q = a_c (T_g - T_w) \quad (11)$$

式中,  $a_c$  为换热系数, 与冷却水的温度、流速及物理性能有关;  $T_g, T_w$  分别为辊套和冷却水的温度。

1.3.3 潜热的处理 采用温度回升法来处理潜热问题, 即在 Al 液的温度达到熔点以下时将发生凝固, 如网格的固相率增加  $\Delta g_s$ , 由于潜热的放出, 网格的温度将回升

$$\Delta T = \frac{\Delta g_s \cdot L}{c_p} \quad (12)$$

式中,  $L$  为 Al 的凝固潜热,  $c_p$  为网格的平均比热。

## 2 计算结果及分析

在如下的工艺参数条件下对其温度场进行了计算: Al 液浇注温度为 780 °C; 轧制速度为 2.5 m/min; 冷却水流速为 1 m/s; 轧辊直径 360 mm; 辊套导热系数为 39 W/(m·K); 钢板厚度 0.5 mm; Al 液入口厚度 10 mm; 轧制后复合板厚度 3 mm. Al 的物理参数取自文献 [3], 不锈钢及辊套的传热参数取自文献 [2]. 计算得到的结果如图 2 所示. 在实验中, 测定该条件下的复合板出口处表面温度为 350 °C 左右, 比计算值偏高, 其主要原因在于: (1) 嘴子的保温效果好, Al 液在出嘴子时降温小; (2) 假设的辊套与 Al 完全接触进行导热, 与实际不一致; (3) 冷却水的流速不能完全达到处处相等。

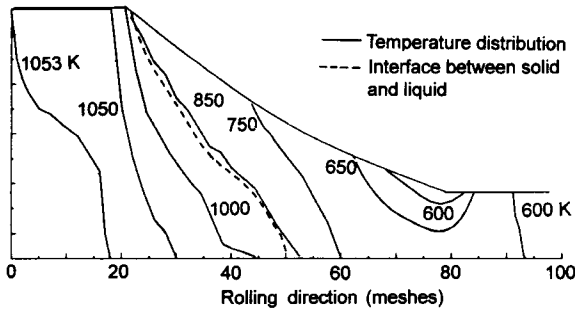


图 2 温度场分布图

Fig.2 The calculated temperature distribution

同时, 根据变形区的组织对液穴的长度进行了近似测定, 测得液穴长大约为 12 mm, 而计算值为 14 mm, 两者比较接近。

另外, 利用温度场的计算模型计算了固液相轧制复合的最高速度. 最高速度采用如下定义: 能产生出表面平整、光洁复合板的最大轧制速度, 即液穴尖端到达轧辊中心连线的速度. 在上述条件下计算的最高速度为 8.4 m/min, 而实际达到的速度为 3.5 m/min, 存在一定的差距. 这是因为在实验中由于边缘与中间的冷却不同, 边缘冷却速度高, 使得在轧制速度未能达到最大速度前就出现了各种河流花样. 有时由于边缘凝固较快, 使得边缘 Al 层很厚, 板中间的 Al 不

能与轧辊接触, 产生“泡汤”现象. 因此, 控制 Al 液横向温度分布将是提高轧制复合速度的关键。

随轧制速度降低, 轧辊接触面积虽不变, 但接触时间增加, 液穴端部向后移, 凝固厚度增加, 变形增大, 当增大到钢带产生裂纹时的速度为最小轧制速度 (此速度无法计算, 根据实验确定为 1.8 m/min) 时, 对应的固态 Al 厚约 7 mm. 与极限速度相对应的液穴形状和位置如图 3 所示。

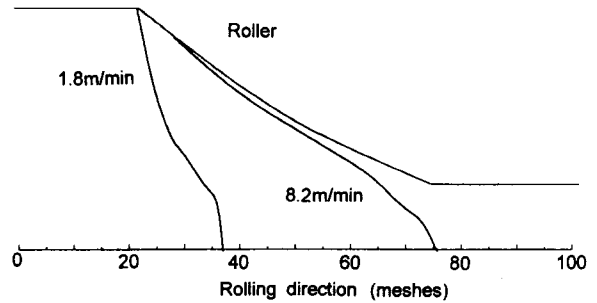


图 3 与极限速度相对应的液穴形状和位置

Fig.3 The shape of liquid cave vs the limited speed

## 3 结论

(1) 对不锈钢 /Al 复合板固液相轧制复合温度场的模拟计算和实测表明, 所采用的假设合理, 数值模型可靠。

(2) 由于不锈钢的导热系数很小, 热传递主要通过上辊对 Al 的吸热进行的. 厚度方向上的温度梯度从入口到出口逐渐减小. Al 层表面温度在出口处最低, 随后略有回升。

(3) 复合板内外的温度分布在出轧辊后很快趋于一致. 液穴形状和位置与固液相轧制复合的速度有密切关系。

## 参考文献

- [1] Guo K L. *Mathematical calculation heat translation*. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 1987: 47 (郭宽良. 数值计算传热学. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1987: 47)
- [2] Chen H Q, Li H J, Cao Y. *Mathematical simulation of ingot solidifying procession*, Chongqing: Chongqing University Press, 1991: 42 (陈海清, 李华基, 曹 阳. 铸件凝固过程数值模拟. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 42)
- [3] Wang Z T, Tian R Z. *Handbook of aluminum alloy and its forming*. Changsha: Central South University of Technology Press, 1988: 151 (王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988: 151)