

# 热轧带钢精轧过程中传热分析

李连平, 初元璋, 谢建新

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 通过对热轧带钢精轧过程中传热关系的分析, 利用有限差分法建立了带钢精轧过程二维温度场的数值计算模型。结合唐钢热轧生产线的实际条件, 对精轧过程中影响该模型温度场的轧制参数进行了深入的研究, 从而优化了模型的建立, 提高了数值模型模拟结果的可靠性。

**关键词:** 热轧带钢; 轧制参数; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TG335.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-5008 (2004) 04-0017-04

## ANALYSIS OF HEAT TRANSFER IN FINISH ROLLING OF HOT-ROLLING STRIP STEEL

LI Lian-ping, CHU Yuan-zhang, XIE Jian-xin

(Material Science and Engineering Department, Beijing University of Science and Technology, Beijing, 100083)

**Abstract:** Through analysis of heat-transfer process in finish rolling of hot-rolling strip steel, the numerical calculating model of two-dimension temperature field for strip finish rolling is erected with finite difference method. Based on the actual condition of hot-rolling production line of Tang Steel, the rolling parameters to affect the model in rolling process are further studied and with that the erection of model optimized and the stimulate result of numerical model getting more reliable.

**Key Words:** hot-rolling strip steel; rolling parameter; temperature field; numerical stimulate

板带热轧过程中, 温度是影响产品尺寸精度、轧机负荷合理分配的重要因素, 而且轧件温度对金属微观组织的变化以及轧制产品的性能有着极其重要的影响, 因此必须对轧件在轧制过程中的温度进行控制和优化, 以提高最终产品的质量。采用数值模拟方法对轧制过程中轧件的温度场进行模拟仿真分析和优化轧制工艺的重要手段。目前, 轧件温度场数值模拟技术主要采用有限元法和有限差分法, 如用二维有限单元法模拟轧件轧制过程横断面上的温度场<sup>[1]</sup>, 利用商品化软件包 MARC 和 ANSYS, 采用热力偶合法, 计算轧制过程中轧件纵断面的温度分布<sup>[2]</sup>。本文利用 MARC 软件结合唐山钢铁公司热轧薄板厂的实际生产工艺, 对薄板坯连铸连轧过程中精轧过程轧件的温度分布进行了模拟计算, 并且利用现场实测数据, 验证了模型计算结果的可靠性。在此基础上, 对精轧过程中各种工艺因素对轧件温度分布的影响进行讨论, 为改善和优化工艺提供理论基础。

### 1 传热数学模型的建立

#### 1.1 传热分析

以唐钢薄板坯连铸连轧生产线为例 (如图 1 所示), 轧件在精轧过程中, 带钢首先经过精轧除鳞箱去除表面的再生氧化皮, 然后经过 5 机架进行连续轧制, 将带钢轧制到预期的产品厚度。在此过程中, 带钢的热量传递 (如图 2 所示), 包括带钢向环境的辐射和对流传热、与除鳞水的对流换热、与轧辊的接触换热等等, 这些都会导致带钢的温度下降; 此外, 还有带钢变形区内的塑性变形生热和摩擦生热, 这些将导致带钢的温度升高。带钢的最终温度变化规律由这些因素共同决定。概括地讲, 影响带钢温度场的主要工艺因素包括除鳞参数、轧制速度、压下量、轧辊温度以及成品厚度等。

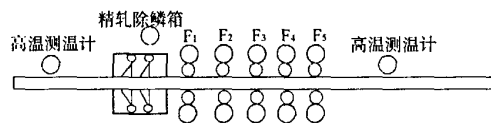


图 1 精轧过程示意图

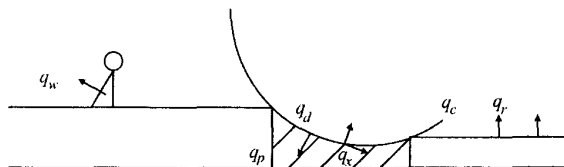


图 2 精轧带钢的热量传递示意图

## 1.2 连续铸轧坯在轧制区的温度场数学模型

连续铸轧区一般分成三个部分，即过热区、结晶区和轧制区。

在结晶区，因为有液-固相界面的存在，金属结晶时，释放出大量的凝固潜热。带钢坯沿着  $Y$  方向（厚度方向）的温度梯度远大于其他两方向的温度梯度。其温度场可以用下式表述：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad (1)$$

在轧制区，铸坯已经结晶完毕，铸坯中心不再存在热源，但不可以忽略  $X$  方向（长度方向）的热传导。考虑到铸坯进入精轧区已经很薄，而且热量在铸坯经过铸轧辊表面向冷却水的传递过程中，铸坯本身的热阻在总热阻中所占比例很小，可以忽略不计，这种情况下热传导模型可作为此铸轧速度  $v$  沿轴向（ $X$  方向）运动的导热棒（见图 3）。

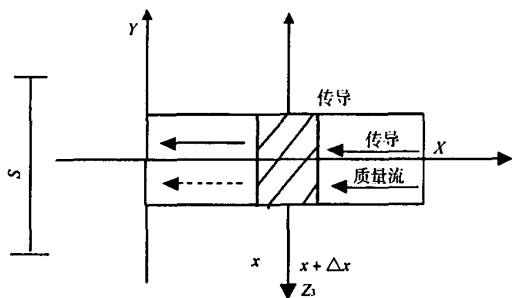


图 3 轧制区传热模型

注：s：铸坯平均厚度； $Z_1$ ：热传导方向

$$T = A_1 e^{ax} + B_1 e^{-bx} + T_w \quad (2)$$

式中：

$$a = \frac{v}{2a} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{v}{a} \right)^2 + \frac{4\beta}{\alpha} \right]^{0.5}$$

$$b = \frac{v}{2a} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{v}{a} \right)^2 + \frac{4\beta}{\alpha} \right]^{0.5}$$

常系数  $A_1$ ， $B_1$  可由边界条件确定。

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{b(T_2 - T_w)}{be^{ax^3} + ae^{-bx^3}} \\ B_1 &= \frac{a(T_2 - T_w)}{be^{ax^3} + ae^{-bx^3}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(T_2 - T_w) - e^{-bx^3} (T_1 - T_w)}{e^{ax^3} + e^{-bx^3}} \\ B_1 &= \frac{(T_2 - T_w) - e^{-bx^3} (T_1 - T_w)}{e^{ax^3} - e^{-bx^3}} \end{aligned} \quad (4)$$

利用式 (1) 和式 (2) 或式 (3)，可以对连续铸轧过程的轧坯在轧制区的温度分布及终轧温度进行计算，从而对工艺参数的制定及轧制性能参数的分析提供较大帮助。式 (2) 还可以作为过程控制数学模型的一个重要组成部分，为实现连铸连轧过程的自动控制提供基础。另外，上述公式也可用于普通热轧的温度场分析。

## 2 对影响轧制过程温度场的工艺参数的分析

在采用有限元法求解温度场的过程中，边界条件是非常重要的因素，它直接影响到分析计算的结果。正确的确定边界条件可以提高计算结果的精确度，使结果更符合实际情况，而边界条件即是指影响轧制过程温度场的工艺参数。边界条件一般有下面几种<sup>[3]</sup>。

第一种边界条件：轧件表面与周围环境的对流和辐射换热。这种边界条件应用在机架间的轧件部分，其公式可写为：

$$-k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{surf}} \xi S (T_4 - T_A^*) + h_{cv} (T - T_A) \quad (5)$$

第二种边界条件：轧制过程中冷却水的作用。轧制过程中每架轧机轧制之后都要用冷却水进行冷却，造成板坯温度下降。这种情况下，板坯与冷却水发生对流，对于板坯的热量损失起决定性作用。其公式可表示如下：

$$-k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{\text{surf}} = h_{\text{water}} (T - T_A) \quad (6)$$

第三种边界条件：精轧过程中板坯与轧辊之间的接触传导。当轧件接触轧辊而发生变形时，轧件温度发生了明显的变化。计算说明由板坯变形而产生的塑性变形热与轧辊的接触热传导，对轧件的温度场影响最大。其中由轧件变形引起的温度增加是第四种边界条件。此处所讲的是轧件的热量通过接触面传向轧辊，引起轧件的表面温度下降。轧件表面的温降有以下两种计算方法：

第一种方法：这种方法认为，在板坯和轧辊之间存在热阻。它的有限差分分析方法同水冷，且除了以板坯、工作辊之间的传热系数  $h_{\text{oc}}$  代替水冷系数  $h_{\text{water}}$  外，表达式也相同。

第二种方法：该方法假定板坯和轧辊之间在两

者接触的地方是完全结合（不存在热阻）的，且在两者接触的地方有相同的温度表面。从而可以给出如下热流方程：

$$q = \frac{-k(T_{\text{BLK}} - T_{\text{BND}}) \exp(-\frac{x^2}{4at})}{\sqrt{\pi at}} \quad (7)$$

基于上面的假设有  $Q_{\text{slab}}$ （板坯散失热量）=  $Q_{\text{roll}}$ （轧辊吸收热量）， $T_{\text{BND}}$  可以事先计算出来。在接触时间（ $t_c$ ）内，通过对式（7）积分就可以计算出总的热量损失  $Q$ 。则微元体（厚度为  $d_0$ ）表面温降就可以通过下式计算：

$$\Delta T = Q/d_0 \rho c \quad (8)$$

第四种边界条件：即是上面所提到的轧件变形所引起的表面温度增加。在轧件变形过程中，除了接触表面温度受接触热传导的影响下降外，轧件内部各点的温度都会有不同程度上升。但是由于变形所引起的温度变化是不均匀的，不同的节点，其温度增量  $\Delta T_i$  是不一样的。因此，这种条件下的温度计算，需要考虑变形区内每一个节点的温升。 $\Delta T_i$  可以按照下式计算：

$$\Delta T_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{\rho c} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (9)$$

由于各节点温度不一样，变形热引起的温升也不一样，所以各节点变形后达到的温度也不一样。特别是变形区表面，由于温度较低，获得的变形热比中部多。

第五种边界条件：轧制过程中摩擦功转变成的热使轧件升温。

摩擦是一种非常复杂的物理现象，与接触表面的硬度、温度、法向应力及相对滑移速度等特性相关。

（1）库仑摩擦模型。这种摩擦模型除了不用于块体锻压成型外，在许多加工工艺分析和一般的其他有摩擦的实际问题中都被广泛地采用，基于节点应力的库仑摩擦模型为：

$$\sigma_{fr} = -\mu \sigma_n t \quad (10)$$

实际上，摩擦存在粘性摩擦与滑动摩擦的本质区分，且由粘性摩擦到滑动摩擦存在着突变，如果在数值计算中引入这种不连续性，往往会导致数值计算困难，MARC 采用了一个修正的库仑摩擦模型：

$$\sigma_{fr} = -\mu \sigma_n \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_r}{c}\right) t \quad (11)$$

$c$  为相对滑动速度，低于它则采用粘性摩擦模型，默认值为 1.0，本次模拟中，作者采用了修正库仑摩擦模型， $c$  的值取 0.1。这样经平滑处理后，处于接触的节点总是存在某种程度的滑动，这对于轻压过程中，支撑辊对从动辊来说是合理可取的。

（2）摩擦模型。试验表明，当法向力或法向应力太大时，库仑摩擦模型常常与试验结果不一致。由库仑定律预测的摩擦应力会超出材料的流动应力或失效力，此时需采用非线性摩擦系数的库仑定律加以修正，或采用基于剪切应力的摩擦模型。这种基于剪切应力的摩擦模型认为摩擦应力是材料等效剪切应力的一部分：

$$\sigma_{fr} = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} t \quad (12)$$

剪切修正摩擦模型为：

$$\sigma_{fr} = -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \arctan\left(\frac{v_r}{c}\right) t \quad (13)$$

这种模型适应所有能够处理分布载荷的应力分析单元。

（3）粘—滑摩擦模型。这是新库仑摩擦类型（基于节点力），它能够模拟从粘性摩擦到滑动摩擦的突变。

（4）系数的确定。由以上摩擦系数可知，摩擦系数是人为给定并对模拟结果有决定性影响的参数。选取适当的摩擦系数是获得精确模拟结果的关键，确定摩擦系数的常用方法有：直接测量轻压下过程中的摩擦系数，由实测获得，这种方法对于复杂的轻压下过程来说，比较难实现；利用经验公式或实际经验确定<sup>[4]</sup>；有限元模拟计算确定，比其他方法容易且能精确模拟确定参数的模拟结果与实际结果，通过反复模拟计算确定摩擦系数。

传热边界条件实际上是比较复杂的<sup>[5-9]</sup>，现场的不同散热环境也有很大差别。用大变形弹塑性热耦合有限元方法分析板坯热轧变形和温度场是完全可行的，计算结果和实测结果基本一致。在确定传热边界条件时，应该充分注意不均匀传热边界条件对轧制温度场的影响。在一般自然对流情况下，根据模拟计算和实测温度数据的对比，对流散热系数取 0.02 ~ 0.04 kW/(m<sup>2</sup>·℃)，常数接触热传导系数取 15 ~ 40 kW/(m<sup>2</sup>·℃) 时，模拟结果与实际结果基本一致。在接触速度较快的变形过程中，接触热传导和塑性变形热是影响轧件温度的主要原因。对流和辐射散热是热边界条件的主要形式，在高温下主要是热辐射的影响。

### 3 结论

结合唐钢 CSP 精轧过程的温度场进行分析, 可以得出精轧过程影响温度场分布的工艺参数, 参数包括除鳞参数、轧制速度、压下量、轧辊温度以及成品厚度等。温度场模拟计算中, 共有五种边界条件会对轧制过程的温度场分布产生较大的影响, 进一步研究各种传热边界条件下的换热系数的关系式和取值非常有实用价值。开发的热轧模型在边界条件的确定下可以模拟连续精轧条件下温度场的变化, 提高模拟的可靠性。

文章中公式所引用的符号及释义:

$\alpha$ ——热扩散率;

$k$ ——铸轧坯材料在铸轧温度下的热导率,  $W/(m \cdot K)$ ;

$\rho$ ——铸轧坯材料在铸轧温度下的密度,  $kg/m^3$ ;

$c$ ——轧坯材料在铸轧温度下的压热容,  $J/(kg \cdot K)$ ;

$\xi$ ——辐射率;

$T_w$ ——冷却水的温度,  $K$ ;

$T_2$ ——铸坯凝固终了处的温度,  $K$ ;

$T_1$ ——铸轧区出口处 ( $x=0$ ) 的平均温度,  $K$ ;

$h_{cv}$ ——对流转换系数,  $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$h_{water}$ ——水冷系数,  $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$S$ ——Stefan - Boltzman 常数,  $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;

$T_A$ ——环境温度,  $K$ ;

$q$ ——热流量,  $J/(m^2 \cdot s)$ ;

$T_{BLK}$ ——主体温度,  $K$ ;

$T_{BND}$ ——边界平面温度,  $K$ ;

$x$ ——距边界平面的距离,  $m$ ;

$\bar{\sigma}_i$ ——平均变形抗力,  $kN$ ;

$d_1, d_2$ ——入口处和出口处轧件厚度,  $mm$ ;

$\sigma_n$ ——接触节点法向应力,  $kN$ ;

$\sigma_{fr}$ ——切向 (摩擦) 应力,  $kN$ ;

$\mu$ ——摩擦系数,  $m/s$ ;

$v_r$ ——滑动速度,  $m/s$ ;

$t$ ——相对滑动方向上的切向单位向量,  $t = v_r / |v_r|$ 。

### 参考文献:

- [1] 赵坚, 赵琳. 优质钢缺陷 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991.
- [2] Davis G L, Shin Y K. Solidification Technology in the Foundry and Cast House [M]. London: The Metal Society, 1979.
- [3] Laasraoui A and Jonas J J. Prediction of Temperature Distribution, flow Stress and Microstructure during The Multipass [J]. Hot Rolling of Steel Plate and Strip, ISIJ, VOL. (31): 28.
- [4] Tszeng T C, Kobayashi S. Stress Analysis to Continuous Casting [J]. Int. J. Mach. Tools Manufact, 1989, 129, (1): 121 - 140.
- [5] Kobayashi S, Tomono H, Gunji K. Mathematical Analysis of Solidification Process with Consideration on Solute Segregation [J]. Transactions ISIJ, 1988, (28): 214 - 217.
- [6] Laasraoui A, Jonas J J. Prediction of Temperature Distribution, Flow Stress and Microstructure During the Multipass Hot Rolling of Steel Plate Strip [J]. ISIJ Int., 1991, 31 (1): 95 - 105.
- [7] Laasraoui A, Jonas J J. Prediction of Steel Flow Stresses at High Temperature and Strain Rates [J]. Metall. Trans., 1991, 22A (7): 1545 - 1558.
- [8] Panigrahi B K. Processing of Low Carbon Steel Plate and Hot Strip - an Overview [J]. Bull. Master. Sci., 2001, 24 (4): 361 - 371.
- [9] Purcell A, Yue S. Smart Calibration Module for Predicting Temperature During Hot Rolling [J]. I&SM, 2000, (2): 49 - 54.

(上接第 40 页)

### 6 结束语

在结晶器内坯壳发生粘结及粘结引起的漏钢是影响唐钢薄板坯连铸生产顺行的主要问题, 严重损坏设备以及降低薄板坯的质量和生产效率。根据漏钢坯壳的特点研究了坯壳粘结、扩展机理, 并针对现场的工艺、设备等实际情况, 分析了引起坯壳粘结的原因, 提出了相应的解决措施。在不断完善工艺操作参数的基础上, 薄板坯连铸机粘结检测系统的投入, 成功预报和避免了许多潜在的粘结及粘结漏钢事件。目前, 唐钢薄板坯连铸机粘结漏钢已经避免, 粘结发生率也由热试初期的 0.2 次/炉下降到 0.079 次/炉。当然, 预防薄板坯连铸的粘结是一个长期的工作, 不仅生产管理、工艺操作及

设备状态等需要进一步改进和完善, 对粘结检测系统也要以生产实践的数据为基础, 对粘结的特性进行分析总结, 修改和完善系统参数的设定, 提高粘结预报的准确性, 降低误报率。

### 参考文献:

- [1] 张耀萍. 连铸粘附性漏钢预报装置工作原理及应用分析 [J]. 冶金自动化, 1993, 17 (6): 10.
- [2] Blazek K E. 粘结漏钢和悬挂漏钢的研究 [J]. 第四届国际连铸会议文集 (布鲁塞尔). 北京: 中国金属学会连续铸钢学会编译, 1988, 215 - 227.
- [3] Mukai T, Yamaguchi K, Ogibayshi S. The mechanism of breakout during continuous casting operation [J]. Transactions ISIJ, 1986, Vol. 26: 224 - 247.
- [4] 张洪波. 高速连铸时结晶器振动形式及振动参数的选择 [J]. 连铸, 1999, (4): 26.