

· 试验研究 ·

## 轧制参数对板带热轧温度分布的影响

郭志强 杨杰 任学平

(内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010)

**摘要** 提出了一种研究 Q345 钢的模型, 该方法基于使用有限元法(FEM)的热机械分析。为了评估材料在轧制过程中的轧制行为, 采用了有限元程序 Abaqus/Explicit, 并对热轧工艺进行了三维建模。考虑了传热机构的合适模型, 并预测了轧制带材的温度分布和热轧带钢轧制过程中的温度变化。考虑了以下各种工艺参数的影响: 轧制速度(90 ~ 210 r/min), 较高的轧制速度导致变形金属内的温度降低; 压下量(5% ~ 15%), 更高的压下量导致表面和带材中心的温度降低; 带材的初始厚度(115 ~ 345 mm), 在越大的板厚度中受到的热变形影响的区域的尺寸越小; 传热系数[30 ~ 50 W/(m<sup>2</sup> · K)], 随着传热系数的增加, 带材的表面温度和中心温度降低。

**关键词** 热轧带钢 温度分布 热传递 有限元法

## Effects of Rolling Parameters on Temperature Distribution in the Hot Rolling of Strips

Guo Zhiqiang, Yang Jie and Ren Xueping

(School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

**Abstract** A model for the study of hot strip rolling of Q345 is proposed, and the approach is based on thermo-mechanical analysis using the Finite-Element Method (FEM). To assess the rolling behavior of materials during a pass, finite element program Abaqus/Explicit has been employed and the hot rolling process was modeled in three dimensions. The appropriate models for heat transfer mechanisms are considered and the temperature distribution along the rolled strip and the temperature variation during hot strip rolling process is predicted. The effects of various process parameters such as rolling speed(90 ~ 210 r/min), Higher rolling speeds result in lower temperatures in the deformed metal; amount of thickness reduction(5% ~ 15%), higher reductions result in lower surface and strip center temperatures; initial thickness of the strip (115 ~ 345 mm), the smaller the size of the area affected by the thermal deformation in the larger plate thickness and interface heat transfer coefficient[30 ~ 50 W/(m<sup>2</sup> · K)]. As the heat transfer coefficient increases, the surface temperature and center temperature of the strip decrease. are considered.

**Material Index** Hot Strip Rolling, Temperature Distribution, Heat Transfer, Finite-Element Method

板带是钢铁企业中主要的产品, 被广泛运用于运输和建筑等各个行业。带材轧制工艺广泛用于制造半成品产品, 该工艺通常在热加工条件下进行, 以提高轧制金属的可加工性并降低所需的能量。在连续热轧板坯轧制过程中, 了解轧机沿轧机长度的温度分布至关重要, 因为温度是控制轧制过程中产品的尺寸精度和组织性能的主要参数。换句话说, 微观结构的变化, 机械性能以及产品的最终尺寸和轧制力取决于轧制金属内的温度分布<sup>[1]</sup>。

轧辊设计者和制造商一直强调热轧过程中温度分布的知识。因此, 近年来已经进行了大量关于热轧过程中温度分布预测的研究<sup>[2]</sup>。目前使用三种不同的方法: 分析法、有限差分法(FDM)和有限元法(FEM)来计算通过轧缝中的板坯厚度的温度变化。这些方法在考虑发热和热损失方面存在相当大的差异。分析法通常只考虑板坯和轧辊之间热传导。仅在某些条件下, 计算出的温度严格正确。除

了轧辊和板坯之间的热传导之外, 有限差分法考虑通过板坯厚度产生的热量并对表面元件施加摩擦功, 提供了比分析方法更好的预测。众所周知, 三维有限元差分模型难以处理, 因为不存在重新划分设施。有限元法在理论上是最好的方法, 因为它考虑了所有因素, 例如热性能变化或随着位置和时间变化, 内部热生成的不同速率, 并且可以很容易地重新划分网格。

已经有许多研究涉及在热轧过程中预测板坯中的温度分布。Hollander<sup>[3]</sup>是较早研究该过程的, 他开发了一维有限差分模型来控制热轧带钢轧制过程中的温度分布。王锡臣<sup>[4]</sup>利用基于有限差分法的一维传热模型, 并假设工作是均匀的, 以预测工作辊和轧制金属的温度分布。陈水宣<sup>[5]</sup>研究了热轧板坯轧制过程中的温度分布。Sheppard 和 Wright<sup>[6]</sup>开发了有限差分模型, 可以模拟轧制过程中轧辊和钢带的温度分布。戚新军和徐筱芾等人<sup>[7]</sup>通过对安

阳钢铁公司 1780 热轧生产线热轧温度及产品性能的跟踪研究,分析热轧温度的分布和控制范围对冷轧带钢的板型的影响。鲁怀敏<sup>[8]</sup>结合现场测量结果,应用有限元分析软件对轧制过程的温度场进行模拟,通过对二者的比较验证了有限元分析的正确性。

## 1 有限元建模

使用有限元软件 ABAQUS 建立三维轧制模型以来模拟带钢 Q345 钢的热轧过程(图 1)。当使用拉格朗日和欧拉有限元(FE)配方方法模拟大应变和金属成形应用时,会出现许多问题。开发了一种更通用的方法:任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法来克服这些困难。结合拉格朗日和欧拉配方的优点,ALE 更适合处理热轧过程中的网格变形,网格纠缠和特殊的边界条件变化。沿中心线采用对称性,模型中考虑了四分之一的板带。使用灵敏度分析来确定改变网格密度对预测模型结果的影响。通过板带厚度来增加元素的数量对模型预测结果没有显著影响。已经采用贯穿厚度方向的网格密度梯度来精确地描述轧制期间方案变量的巨大梯度。工作辊几何形状限制为 90°截面,厚度为 5 mm。在带钢和工作辊中,采用四节点双线性平面应变元件。所选元素适用于耦合热应力分析。板材的几何形状和工作辊如图 1 所示。由于问题的高度非线性,取决于工艺参数,如压下量和轧制速度,每次模拟通过至少需要长达几个小时。

金属加工过程中的速度场可以通过最小化能量函数来预先确定:

$$\delta\pi = \int \bar{\sigma} \delta \bar{\varepsilon} dV - \int F_i \delta u_i dS = 0 \quad (1)$$

式中:  $V$ - 变形体的体积;  $S$ - 边界面。真实速度场  $v_i$

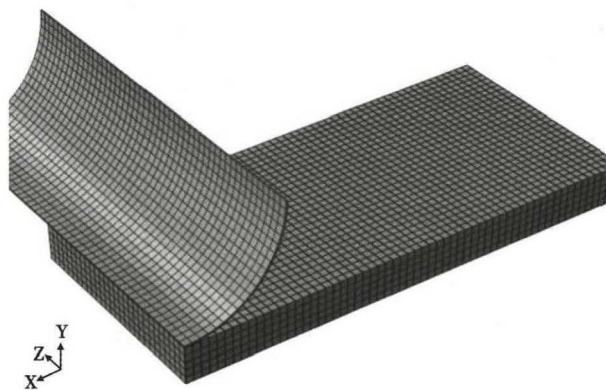


图 1 Q345 钢热轧过程有限元模型

Fig 1 FEA model for steel Q345 in hot rolling process

$$\text{满足功能的静止条件,即: } \frac{\partial \pi}{\partial v_i} \quad (2)$$

为了计算真实速度场,采用有限元方法,其中工作域被分成称为元素的小区域,同时应用控制方程。热轧是一种热机械过程,通过求解与变形分析相结合的热传导方程进行分析。在轧制过程中,带钢和工作辊的温度分布可以使用方程(3)中所示的控制偏微分方程计算:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

其中:  $\rho$ - 轧件的密度;  $c$ - 轧制金属的比热容;  $k$ - 轧件的传热系数;  $\dot{Q}$ - 由变形引起的发热体积率。使用方程(4)可计算  $\dot{Q}$ :  $\dot{Q} = \eta \sigma \dot{\varepsilon}$  (4)

式中:  $\sigma$ - 有效流变应力/MPa;  $\dot{\varepsilon}$ - 有效应变速率/ $s^{-1}$ ;  $\eta$ - 变形能转换为热的效率。分布的表面热通量  $q_{\text{fric}}$  也是由摩擦滑动产生的,并且沿着接触弧在入口和出口区域附近快速上升,引起相对滑移的显著变化。它对热轧过程中热平衡的总体贡献很低,但如果考虑它,其值确定如下:  $q_{\text{fric}} = |\tau \nu|$  (5)

式中:  $\tau$ - 剪切应力/MPa;  $\nu$ - 滑动速度/( $mm \cdot s^{-1}$ )。由于工作辊在辊缝中的获得带材损失的热量,因此需要同时解决带材和工作辊的控制方程。为此,工作辊中的热传递可写为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho_r c_r \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

式中:  $\rho_r, C_r, k_r$ - 工作辊的密度,比热容和热传导率。假设与整体热流相比,工作辊中沿周向(即  $\theta$  坐标)的热传导可忽略不计,并且板带顶部界面处的热传导与底部的热传导相同。 $Z$  坐标轴沿着工作辊的长度延伸。

### 1.1 热边界条件

带钢在变形区的边界条件如下所示:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{con}} (T - T_R) - q_{\text{fric}} \quad (7)$$

对于工作辊:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{con}} (T_s - T) |_{r=R} - q_{\text{fric}} \quad (8)$$

式中:  $h_{\text{con}}$ - 界面传热系数;  $T_r, T_s$ - 工作辊表面温度和带材表面温度。应该注意的是,在工作辊和轧制金属之间发生对流传热,界面传热系数控制这两种介

质之间的热连续性。

考虑到上述边界条件并参考模型,模型中的边界定义为:

(1) 在板带的中心平面图中,假定对称性:

$$-k_{\text{strip}} \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ 当 } t > 0, y = 0 \quad (9)$$

$$-k_{\text{strip}} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ 当 } t > 0, z = 0 \quad (10)$$

(2) 在工作辊表面下方 5 mm 处,假设绝热条件为:

$$-k_{\text{strip}} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ 当 } t > 0, r = r_{5 \text{ mm}} \quad (11)$$

(3) 在带材和工作辊之间的接触界面处,假设界面传热系数:

$$q_{\text{strip}} = -q_{\text{roll}} = h(T_{\text{strip}} - T_{\text{roll}}) \\ t > 0, y = \frac{\gamma(t)}{2} \text{ 或者 } r = R \quad (12)$$

式中:  $R$ - 轧辊的外径;  $h$ - 界面传热系数/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>];  $\gamma$ - 钢带的厚度/mm;  $q$ - 热通量/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>]. 界面传热系数  $h$  设定为 40 kW/(m<sup>2</sup> · k), 工件与空气之间的传热系数设定为 20 kW/(m<sup>2</sup> · k)。

### 1.2 机械边界条件

沿着板带/轧辊界面施加板带和辊的机械相互作用力的共同边界条件。接触区域的界面摩擦力与法向力成正比,如方程(13)所示:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu P \quad (13)$$

式中:  $\tau_{\text{crit}}$ - 临界剪切应力/Pa;  $\mu$ - 摩擦系数。ABAQUS 中的摩擦算法提供了几种不同的选项来描述静态和动态摩擦条件。对于这项研究,假设静态摩擦没有过渡到动态摩擦条件。通过在厚度方向沿着板带中心线的零位移边界条件保持板带变形对称。这允许减少几何复杂度并减少计算时间。通过在轧辊中心施加位移和旋转速度来在模型中引入辊缝和轧制速度。

### 1.3 材料属性

假设板带为具有随温度变化的弹性模量和泊松比的热粘塑性材料。在轧制过程中材料所经历的温度,应变和应变速率范围很大,因此有必要将带材的塑性行为定义为温度,应变和应变速率的函数。这是使用双曲正弦函数完成的,如方程(14)所示,它将材料的稳态的流变应力与应变速率和变形温度联系起来:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(\frac{-Q_{\text{def}}}{R\theta}\right) \left[ \sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \quad (14)$$

式中:  $A, \xi, m$ - 材料常数;  $\dot{\epsilon}$ - 平均等效塑性拉伸应变率;  $\sigma$ - 等效拉伸应力/MPa;  $Q_{\text{def}}$ - 变形的激活能/(kJ · mol<sup>-1</sup>);  $\theta$ - 绝对温度。Q345 变形的双曲正弦方程的系数总结在表 1 中<sup>[9]</sup>, Q345 钢的化学成分如表 2 所示。

为了在模型中实现这种材料行为,生成了在指定的应变速率和温度下的流变应力的数据表并输入到 ABAQUS 中。对于模型内的每个温度和应变率,基于表格数据点之间的线性插值计算每个积分点处的流变应力。用于处理数据的 Q345 弹性常数作为温度的函数列于表 3 中。

Q345 的热物理性质如表 4 所示。假设板带的密度恒定在 7 850 kg/m<sup>3</sup>。

钢工作辊定义为杨氏模量为 200 GPa 的弹性材料。工作辊和带材之间的弹性模量的巨大差异导致工作辊表现为几乎刚性的材料。

如前面部分所述,热模型和机械模型通过方程(3)~(8)和(14)相互耦合。

表 1 Q345 钢的双曲正弦常数  
Table 1 Sinh constant of steel Q345

A	Q/(kJ · mol <sup>-1</sup> )	$\xi$	m
9.047 × 10 <sup>13</sup>	344.2	7	0.106 2

表 2 Q345 钢化学成分/%  
Table 2 Chemical composition of steel Q345 /%

C	Mn	Si	P	S
≤0.2	1.0 ~ 1.6	≤0.55	≤0.035	≤0.035

表 3 Q345 钢的弹性模量和泊松比  
Table 3 Elastic modulus and Poisson ratio of steel Q345

温度/°C	E/GPa	$\nu$
300	191.3	0.299
400	181.5	0.303
500	169.9	0.307
600	156.7	0.311
700	141.0	0.318
900	115.4	0.345

表 4 Q345 钢的热力学性能  
Table 4 Thermodynamics parameters of steel Q345

温度/°C	比热容/[J · (kg · K) <sup>-1</sup> ]	热传导/[W · (m · K) <sup>-1</sup> ]
25	452	40.02
500	692	35.81
850	603	26.81
1 050	634	29.19
1 200	658	30.97

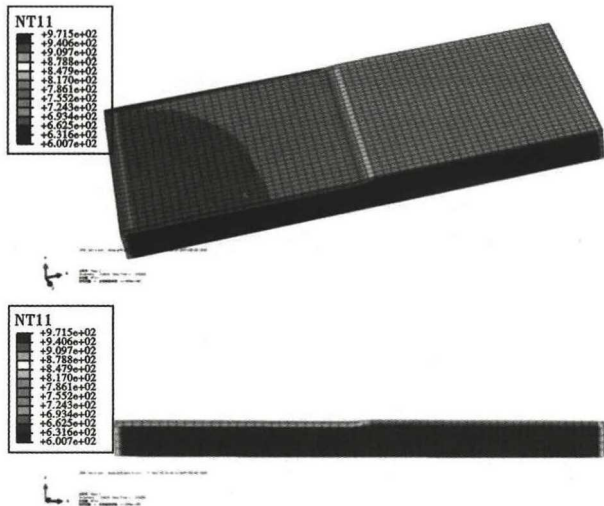


图 2 压下量为 10%, 初始温度为 970 °C Q345 热轧过程中的网格变形和温度分布

Fig.2 Mesh distortion and temperature distribution during hot rolling of steel Q345 with a reduction of 10% and initial temperature of 970 °C

## 2 结果与讨论

带材上半部分的温度分布如图 2 所示。

轧制参数取自文献[10]。初始厚度为 230 mm, 压下率为 10%, 轧制速度为 150 r/min。板带的初始温度为 970 °C 以及辊直径为 650 mm。很明显, 板带的各个区域中的温度分布不均匀, 并且表面区域中的温度变化大于中心区域。同样如预期的那样, 在带材和工作辊之间的接触区域中发生最大的热传递, 这导致表面温度的下降。

图 3 显示了在不同位置的热轧过程中的温度变化。板坯的初始厚度为 230 mm, 轧后厚度为 206.93 mm。很明显, 表面区域承受最大温度变化, 而内部区域温度不会发生显著变化。应当注意, 对于该样品, 因为板带厚度较大, 温度变化在表面有较大的趋势, 而在 1/2 和 1/4 厚度方向的温度变化基本维持相等的量。

在轧制过程中, 带材的温度取决于几个参数, 例如轧制速度, 压下量, 界面传热系数和带材的初始厚度。详细研究了这些参数对带钢温度分布的影响。

(1) 轧制速度是热轧带钢轧制过程中最重要的参数之一, 因为该因素直接控制应变速率、流变应力、轧制力、变形热和界面传热系数。

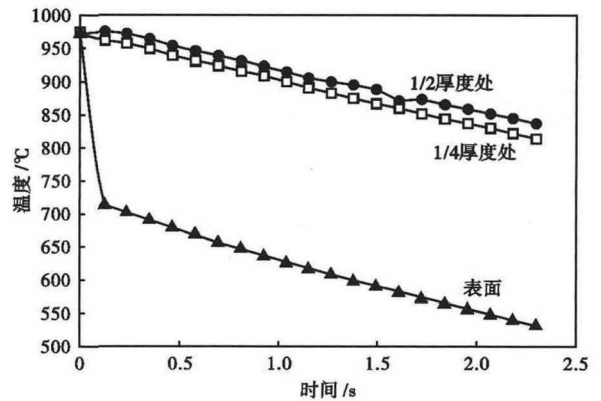


图 3 变形金属不同点的温度变化

Fig.3 Variation of temperature at different point of deforming metal

图 4(a,b) 显示了该参数对带材表面和中心区域的温度变化的影响, 板坯的初始厚度为 230 mm, 轧后厚度分别为: 206.96、206.93、207.06 mm。提高轧制速度会增加轧制力、界面热系数和变形热, 同时减少工作轧辊与带材之间的接触时间。这些改变的结果是降低了变形区中的金属冷却速率。如图 4(a, b) 所示, 预测表明, 较高的轧制速度导致变形金属内的温度降低, 并且表面区域之间的温度梯度也降低。然而在中心区域, 由于板厚度较大, 在厚度方向的热传递较慢, 所以轧制速度的变化对中心区域温度变化的影响极小。

(2) 压下量是影响热轧带钢轧制过程中温度分布的另一个重要因素。压下量对温度分布的影响在图 5(a,b) 中给出, 板坯的初始厚度为 230 mm, 轧后厚度分别为 218.4、206.93、195.58 mm。样品轧制初始温度为 970°C, 轧制速度为 150 r/min。由于与工作辊的接触时间较长, 预计较高的压下率会导致较高的温度下降, 另一方面, 在高压下轧制中, 变形

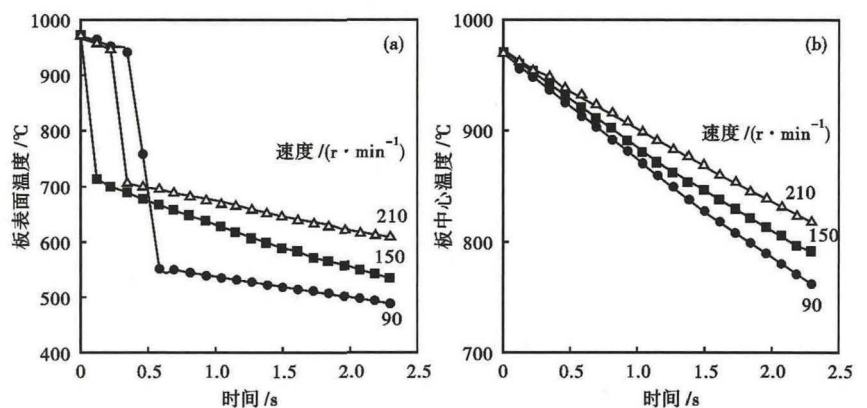


图 4 轧制速度对 (a) 带材表面点和 (b) 带材中心点温度变化的影响

Fig.4 Effect of rolling speed on the temperature history for (a) a point at strip surface and (b) a point in the strip center

热也会增加。从图5中可以看出,在变形的第一步,变形热的影响大于接触时间的影响;压下量越小,温度越高;对于5%的压下量,在中心点温度达到971℃。但在最终接触时间是主要参数,并在更高的压下量情况下导致较低的温度。

(3)带材的初始厚度也影响热轧带钢轧制过程中的温度分布情况,板坯的初始厚度分别为:115、230、345 mm,轧后厚度分别为:92.06、206.93、310.52 mm;初始厚度会影响机械功和机械功产生的热量,板带的厚度也影响沿板带厚度的热传导。厚度越大,板带中心和表面之间的热传导越慢。从图3中可以明显看出,增加入口板带的厚度会导致更多的机械功和机械功的发热,因此在板带的表面和中心产生较低的温降。

在考虑到带材初始厚度的影响的情况下,图6中示出了板带的上半部分中的温度分布状态。如图6(a)为115 mm初始板厚,温度分布范围在218.1~976.2℃;图6(b)为230 mm初始板厚,温度分布范

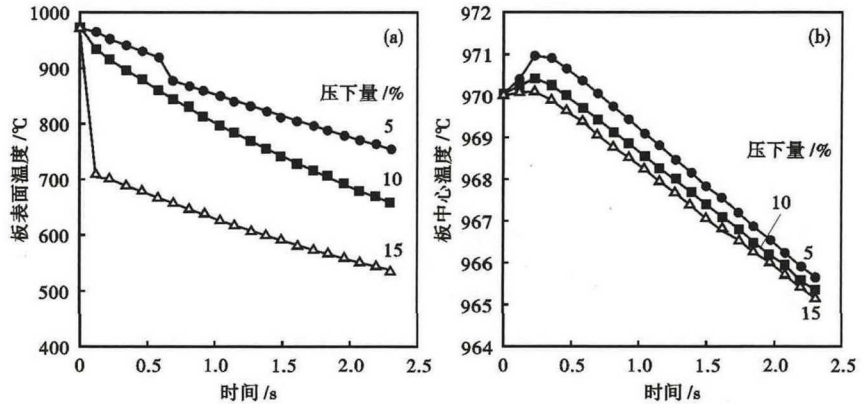


图5 压下量对(a)带材表面点和(b)带材中心点温度变化的影响  
Fig. 5 Effect of reduction on the temperature history for (a) a point at strip surface and (b) a point in the strip center

围在469.2~973.7℃;而图6(c)初始板厚为345 mm,温度分布范围在600.7~971.5℃。由此可见,由于更多的机械功和更慢的热传导性,在越大的板厚度中受到的热变形影响的区域的尺寸越小。

(4)最后考虑了带钢与工作辊之间的表面传热系数的影响,板坯的初始厚度:230 mm,轧后厚度分别为:206.91、206.93、206.95 mm。表面传热系数可以显著改变温度分布和受热影响区域的深度。图7

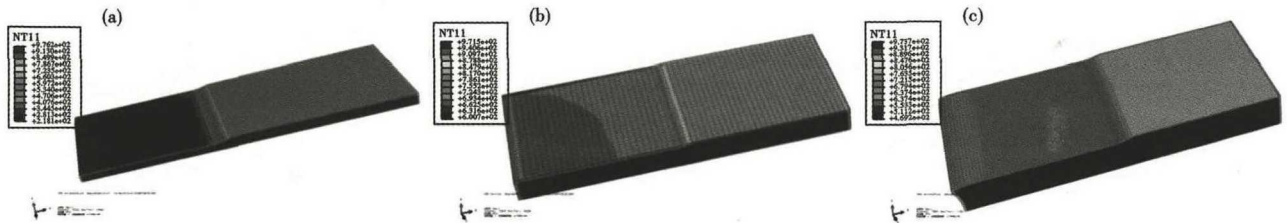


图6 初始带钢厚度115 mm(a),230 mm(b)和345 mm(c)对带钢温度分布的影响  
Fig. 6 Effect of initial strip thickness 115 mm (a), 230 mm (b) and 345 mm (c) on strip temperature distribution

显示了界面传热系数分别为30、40、50 W/(m<sup>2</sup>·K)对带材表面和中心温度的影响。该参数直接影响从受热金属到工作辊的热通量的大小。传热系数越高,热流率越高。因此,随着传热系数的增加,金属的表面温度降低。还应注意,界面传热系数是轧制力,辊速,润滑和表面情况的函数。

### 3 模型验证

为了验证有限元模型,试验以厚度为230 mm的Q345B板坯为原

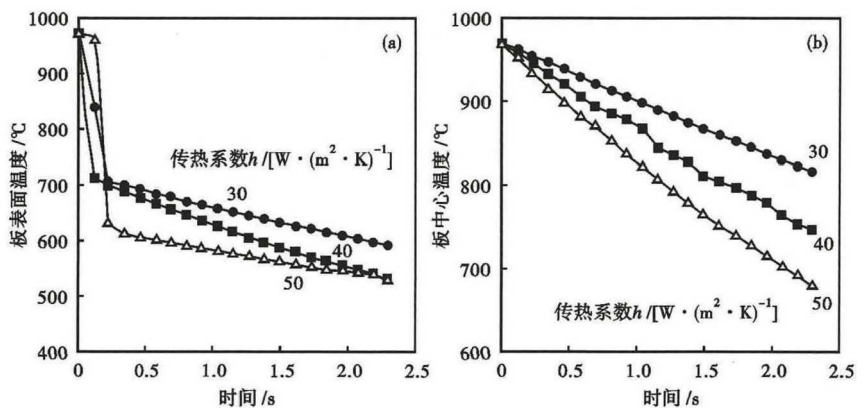


图7 表面传热系数对(a)带材表面点和(b)带材中心点温度变化的影响  
Fig. 7 Effect of heat transfer coefficient on temperature history for a point at strip surface (a) and a point in the strip center (b)

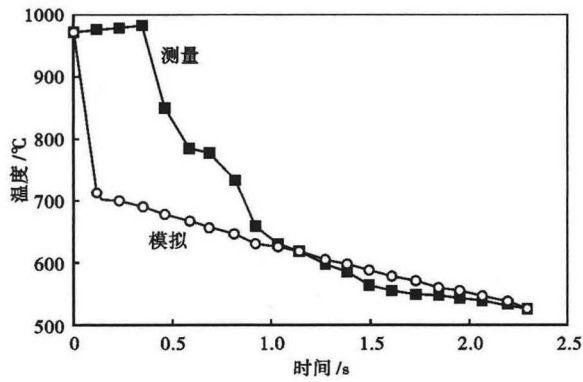


图 8 实际测量温度与模拟温度对比

Fig. 8 Comparison between measured temperature and simulated temperature

料,第 1 道次前的带材厚度为 230 mm,宽度为 1 285 mm。所有道次的初始温度为 970 °C,工作辊直径为 1 300 mm。模型几何尺寸和实际实验几何尺寸相同,诸如轧制带材的温度的输出结果被用作第 2 道次的初始条件,并且类似地,每次道次的初始条件取自先前的道次。设置 3 种不同轧制速度分别为 90、150、210 r/min,以第 1 道次为例,压下率为 10%,得到出口厚度分别为 206.87、206.98、206.99 mm,与模拟结果基本吻合。简而言之,以轧制速度为 612.3 m/min(即 150 r/min)为例,板坯出口厚度为 206.98 mm,减少 10%,与实际吻合。测

得轧制速度为 612.3 m/min 时,轧制过程中各时间的板坯表面温度如图 8 红色曲线。如图 8 所示,模拟值和测量值之间存在良好的一致性。

#### 4 结论

(1) 轧制板坯的温度分布不均匀,导致在变形过程带钢表面区域中比板坯中心区域承受更多的温度变化。

(2) 轧制速度是控制带材热轧过程中温度分布的最重要参数之一。较高的轧制速度导致变形金属内的温度降低,并且中心区域和表面区域之间的温度梯度也降低。

(3) 压下量是控制温度分布的另一个参数。在变形的第一步中,压下量影响的效果不明显,但总体上更高的压下量导致表面和带材中心的温度降低。

(4) 带材的初始厚度也影响热轧带钢轧制过程中的温度分布状态。更大的板带的入口厚度导致更多的机械功和变形热,因此在板带的表面和中心处发生较低的温度下降。而且,在越大的板厚度中受到的热变形影响的区域的尺寸越小。

(5) 考虑了带钢与工作辊之间的传热系数的影响。随着传热系数的增加,带材的表面温度和中心温度降低。

#### 参考文献

- [1] Galantucci L M, Tricarico L. Thermo-Mechanical Simulation of a Rolling Process with An FEM Approach, Journal of Materials Processing Technology[J]. 1999,75(1):494-501.
- [2] Montmitonnet P, Bucssla P. A Review on Theoretical Analyses of Rolling in Europe, ISIJ International[J]. 1991,31:525-538.
- [3] Hollander F. Mathematical Models in Metallurgical Process Development, Iron Steel Institute[J]. 1970,123:46-74.
- [4] 王锡臣. 中厚板轧机轧制参数模型的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学硕士学位论文,2009:14-18.
- [5] 陈水宜. 热轧带钢温度建模和数值模拟[D]. 杭州:浙江大学博士论文,2008:32-37.
- [6] Sheppard T, Wright D S. Structural and Temperature Variations during Rolling of Aluminium Slabs, Metals Technology [J]. 1981, Vol. 8:46-57.
- [7] 戚新军,徐筱芩. 热轧温度对冷轧带钢板形的影响及控制措施[J]. 冶金丛刊,2012. Sum. 197, No. 1:34-35.
- [8] 鲁怀敏. Q345 小 H 型钢轧制过程温度场有限元分析[J]. 沙洲职业工学院学报,2012. Vol. 15, No. 1:7-12.
- [9] 黄光杰,钱宝华,游红. 45 钢高温拉伸峰值应力和变形储能与 Z 参数的关系函数研究[J]. 材料工程,2007(12):21-25.
- [10] 董瑞,李振亮. 粗轧板坯侧向弯曲的有限元模拟[J]. 内蒙古科技大学学报,2011,30(2):175-177.

郭志强(1963-),男,硕士(1986年北京科技大学),教授,1983年包头钢铁学院(本科)毕业,机械力学行为及结构分析研究。E-mail:919452849@qq.com

收稿日期:2019-04-09