

## CSP 连轧过程温度和轧制力的有限元分析

李传瑞<sup>1</sup> 王立涛<sup>1</sup> 葛仁余<sup>1</sup> 常崇志<sup>2</sup> 王建钢<sup>2</sup> 薛越<sup>2</sup>

(1 安徽工程科技学院机械系, 芜湖 241000; 2 包头钢铁公司, 包头 014010)

**摘要** 借助 Marc 商用软件, 采用弹塑性大变形热力耦合有限元法, 对 0.19% ~ 0.20% C 钢 68 mm 薄板坯 CSP 6 道次连轧过程的温度以及轧制力进行模拟, 分析了轧制过程中各道次轧件温度和轧制力的分布与变化规律。结果表明, 在轧件变形过程中, 接触热传导和变形热是影响温度变化的主要因素, 二者的综合作用决定了轧件的温度变化规律; 轧制结束后, 轧件从表面向内在一定厚度范围内出现明显的温度梯度, 超过该临界厚度值, 轧件温度基本保持不变。在轧制稳定阶段, 轧制力在微小范围内波动。

**关键词** 热力耦合 有限元法 连轧 温度 轧制力

## Finite Element Analysis on Temperature and Rolling Force during Continuous Rolling of CSP Process

Li Chuanrui<sup>1</sup>, Wang Litao<sup>1</sup>, Ge Renyu<sup>1</sup>, Chang Chongzhi<sup>2</sup>, Wang Jiangang<sup>2</sup> and Xue Yue<sup>2</sup>

(1 Mechanics Department, Anhui University of Technology and Science, Wuhu 241000;

2 Baotou Iron and Steel Co, Baotou 014010)

**Abstract** The simulation on temperature and rolling force of 68 mm slab of 0.19-0.20C steel during 6 passes rolling of compact strip production (CSP) process has been carried out by commercial software Marc with heavy deformed elastic-plastic thermal-mechanical coupled finite element method to analyze distribution and change of temperature and rolling force of workpiece at each pass in rolling process. Results show that during deformation of workpiece, contact heat conduction and deforming heat are main factors to influence temperature change, and both combined effects determine the law of temperature change of workpiece during deformation process; there is an obvious temperature gradient from surface to centre with certain depth of workpiece, and beyond the critical depth, the temperature of workpiece maintains constant; and the rolling force keeps little variation during stable rolling stage.

**Material Index** Thermal-mechanical Coupled, Finite Element Method, Continuous Rolling, Temperature, Rolling Force

目前应用较多的薄板坯连铸连轧技术是 CSP 技术<sup>[1]</sup>。本文建立大变形弹塑性有限元模型, 采用热力耦合分析技术, 模拟薄板坯热轧过程, 分析了薄板坯热变形过程中温度与轧制力的分布与变化规律。

### 1 现场轧制条件及有限元计算模型

#### 1.1 现场轧制条件

包钢薄板连铸连轧厂采用 6 机架轧制, 薄板坯宽度为 1 500 mm, 厚度为 68 mm; 成品宽度为 1 518 mm, 厚度为 9.5 mm (表 1)。材质为普碳钢 Q235, 其化学成分为 (%): 0.19 ~ 0.20C、0.17Si、0.38Mn、0.020P、0.005S。

模拟过程中把轧辊视为恒温刚性体, 取 1/2 厚度轧件进行分析, 轧件长度取为 340 mm。

#### 1.2 有限元计算模型

借助 Marc 商用软件, 采用更新的 Lagrange 法描述的大变形弹塑性有限元模型 (图 1)。材料的屈服准则采用 Von Mises 准则, 流动准则采用 Prandtl/

表 1 模拟轧制工艺参数

Table 1 Parameters of rolling process of simulation

| 道次 | 轧辊直径/<br>mm | 轧辊转速/<br>(r · s <sup>-1</sup> ) | 压下率/<br>% |
|----|-------------|---------------------------------|-----------|
| 1  | 736         | 1.386                           | 38.23     |
| 2  | 773         | 2.328                           | 38.09     |
| 3  | 784         | 3.546                           | 30.77     |
| 4  | 794         | 4.423                           | 22.22     |
| 5  | 575         | 7.130                           | 21.42     |
| 6  | 583         | 7.993                           | 13.64     |

注: 开轧温度 1 015 °C; 轧辊温度 150 °C; 环境温度 20 °C。

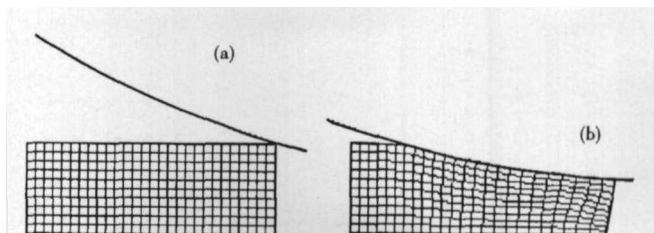


图 1 轧件变形前 (a)、后 (b) 有限元模型

Fig. 1 Finite element model for workpiece before (a) and after (b) deformation

Reuss 法则。用四边形单元离散1/2轧件,轧件长度方向取 100 个单元,厚度方向取 10 个单元,单元边长 3.4 mm,单元总数1000个。

### 2 边界条件

(1) 轧件对称面上所有节点的位移  $u_y$  为 0;

(2) 轧件与轧辊接触面上采用剪切摩擦规律

$$\sigma_{fr} \leq -m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} t \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{fr}$ - 切向摩擦应力;  $m$ - 摩擦因子;  $\bar{\sigma}$ - 等效切应力;  $t$ - 切向单位矢量。

(3) 轧件与轧辊存在接触传热; 轧件的自由表面与周围环境间有对流和辐射换热; 同时轧件本身由于塑性变形及摩擦会产生变形热, 使温度上升。

①接触传热:  $q_1 = -\lambda(\partial T/\partial y) = \alpha(T - T_g)$  (2)

式中:  $q_1$ - 热流密度;  $\lambda$ - 热传导系数;  $\alpha$ - 换热系数;  $T$ - 轧件表面温度;  $T_g$ - 轧辊温度。计算中  $\alpha$  取  $11 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[2]}$ 。

②对流和辐射换热:  $q_2 = (h + h_c)(T - T_e)$  (3)

式中:  $h$ - 对流换热系数;  $h_c$ - 辐射换热系数;  $T_e$ - 周围环境温度。计算中  $h$  取为  $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})^{[2]}$ 。  $h_c$  可根据辐射定律写成:

$$h_c = \sigma \epsilon (T + T_e)(T^2 + T_e^2) \quad (4)$$

式中:  $\sigma$ - 波尔兹曼常数;  $\epsilon$ - 材料热辐射率。

③轧件由于变形以及轧件与轧辊间的接触摩擦会产生变形热, 转化系数为  $0.9^{[3]}$ 。接触产生的热量平均分配到轧件和轧辊上。

(4) 将轧件对称面作为绝热边界来处理。

(5) 在轧制过程中, 当轧件在稳定轧制状态时, 将前、后张力添加到轧件中。

(6) 根据现场测量计算, 将冷却热流通量添加

到轧件中。

材料的热物理性能参数和变形抗力模型取自 Marc 材料库, 按照上述初始条件和边界条件, 模拟计算轧件的热变形过程。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 轧制变形过程中不同厚度部位节点的温度分布

分析轧件的温度场, 主要从 4 个特殊节点(51、152、253、1061)进行分析。其中, 51 节点是轧件表面上的中心节点; 152 节点是离轧件表面 3.4 mm 厚的中心节点; 253 节点是离轧件表面 6.8 mm 厚的中心节点; 1061 是轧件心部的节点。

由图 2(a) 可见, 当第 1 道次轧制时间为 0.73 s 时, 表面节点(51)由于轧件与轧辊间的接触热传导占主导地位, 因此温度迅速下降, 经过 0.23 s, 温度由最初的  $1015 \text{ C}$  降至  $805 \text{ C}$ ; 到 0.96 s 时, 由于塑性变形热起主要作用, 因此该节点温度逐渐上升, 到轧制结束, 温度为  $942 \text{ C}$ , 升高  $137 \text{ C}$ , 开始温度升高较快, 然后逐渐变慢, 最终趋于平稳。

对于次表面(距离轧件表面 3.4 mm 厚)的中心节点(152), 在轧制时间为 0.73 s 时, 由于塑性变形热起主要作用, 因此该节点温度略微升高; 然后, 由于受轧件与轧辊间的接触热传导的影响, 温度又逐渐降低; 最终, 在接触热传导、塑性变形热共同作用, 温度基本保持不变。

对于距离轧件表面 6.8 mm 厚的中心节点(253), 其变化趋势与次表面节点的温度变化相同, 但数值变化略微减少。

对于轧件心部节点(1061), 受接触热传导的影响较少, 温度没有明显降低; 由于塑性变形热的作用, 从 0.73 s 开始, 温度略有上升; 到 0.96 s 时, 温度升高为  $1021 \text{ C}$ , 升高值为  $6 \text{ C}$ 。

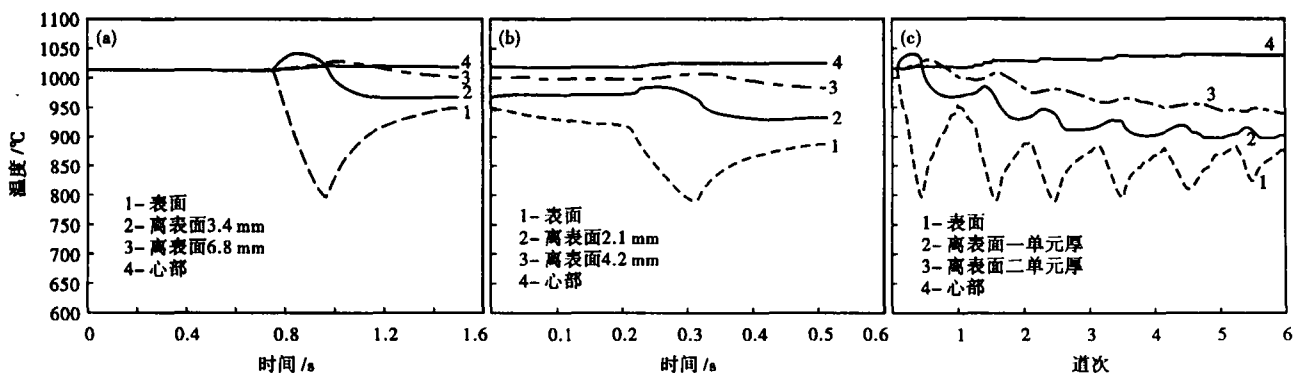


图 2 不同厚度节点温度随时间变化曲线:(a)第1道次;(b)第2道次;(c)全过程,1~6道次

Fig. 2 Variable curves of temperature vs time at different thickness node: (a) 1-st pass; (b) 2-nd pass; (c) whole process, 1~6 pass

图2(b)所示,第2道次轧制过程中,轧件不同厚度部位节点的温度随时间的变化趋势与第1道次大致相同,只是轧件离开第1道次在1、2两个道次机架间运行时,受到机架间冷却水的作用,因此温度会略微降低。与第1道次相比,影响轧件温度的因素除了接触热传导、塑性变形热与对流辐射换热外,还有机架冷却水的影响。各道次轧制过程中不同部位节点的温度随时间的变化如图2(c)所示。

可以看出,在第1道次,轧件表面温度降低值以及升高值最大;随着道次的增加,温度降低和升高的程度逐渐减少;到最后一个道次,温度降低的数值最少,升高的也最少。

3.2 各道次轧制结束后轧件沿厚度方向的温度分布

由图3(a)可见,从轧件表面向内一定厚度(临界厚度)范围内存在明显的温度梯度。当离表面厚度为12 mm时,温度值较高;超过该临界厚度,随厚度增大,温度基本保持不变。另外可以看出,轧制结束后,轧件表面温度较低,约为942℃;心部温度较高,约为1021℃;表面和心部相差79℃。其余各道次轧制结束后沿厚度方向的温度分布趋势与第1道次相同,只是临界温度不同,如表2所示。

3.3 轧制力的分布

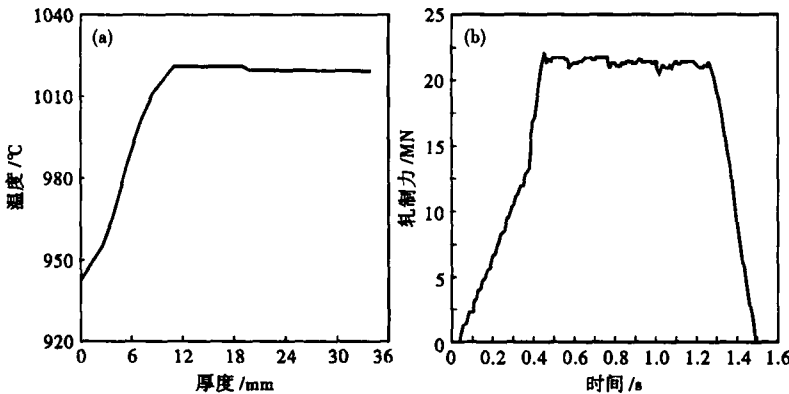


图3 (a)第1道次轧制结束后轧件沿厚度方向的温度分布;(b)第1道次轧制力随时间变化曲线

Fig.3 (a) Distribution of temperature of workpiece along thickness direction after 1-st pass; (b) variable curve of temperature vs time in 1-st pass

表2 各道次轧制结束后轧件临界厚度/mm

Table 2 Critical thickness of workpiece after rolling at each pass /mm

| 道次 | 厚度  |
|----|-----|
| 1  | 12  |
| 2  | 10  |
| 3  | 7.5 |
| 4  | 5   |
| 5  | 4.5 |
| 6  | 4   |

由图3(b)可见,从轧件接触轧辊进入咬入阶段,轧制力逐渐增大;当轧制时间为0.45 s时,轧制力达到一定值,然后在一个微小范围内波动,轧制进入稳定阶段。当轧制时间为1.28 s时,轧制力开始下降,表明轧件快要离开轧辊,轧制由稳态变为非稳态,直至轧制结束。由图3(b)可知,模拟结果所得到的轧制力为22.203 MN;而现场轧机记录的轧制力为22.239 MN,由此可知预测的误差为0.16%。可见,模拟结果比较接近实际生产。

其余各道次轧制力的变化与分布趋势与第1道次相同,只是轧制力大小不同(表3)。由表3可以看出,各道次轧制力模拟值与实测值能够较好的吻

表3 轧制力模拟值与测量值的比较

Table 3 Comparison of simulated and measured values of rolling force

| 道次 | 模拟值/MN | 测量值/MN | 误差/% |
|----|--------|--------|------|
| 1  | 22.203 | 22.239 | 0.16 |
| 2  | 23.085 | 23.176 | 0.39 |
| 3  | 20.293 | 20.407 | 0.56 |
| 4  | 18.200 | 18.347 | 0.80 |
| 5  | 17.618 | 17.775 | 0.88 |
| 6  | 10.290 | 10.483 | 1.84 |

合,误差为0.16%~1.84%,模拟结果比较接近实际生产。

4 结论

(1) 轧件变形过程中,接触热传导和变形热是影响温度变化的主要因素,二者的综合作用决定了轧件各点的温度变化规律。

(2) 轧制结束后,轧件从表面到心部在一定厚度范围内出现明显的温度梯度,超过该临界厚度值,轧件温度基本保持不变。

安徽工程科技学院青年基金资助项目

参考文献

- 田乃媛. 薄板坯连铸连轧. 北京:冶金工业出版社,1998
- 杨世铭. 传热学. 北京:高等教育出版社,1987
- Wertheimer T B. Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Processes. Swansea, Pineridge Press Ltd.,1982:425

李传瑞(1971-),男,讲师,硕士,内蒙古科技大学毕业,材料加工工程研究。

收稿日期:2008-01-08