

## 中厚板折叠缺陷影响因素的有限元模拟分析

张春林<sup>1</sup> 程晓茹<sup>1</sup> 任勇<sup>1</sup> 詹胜利<sup>2</sup> 黄大军<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁集团公司热轧总厂, 武汉 430083)

**摘要** 采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 根据轧辊直径 1 160 mm, 轧制速度 1 000 ~ 3 000 mm/s 和坯料规格 (mm) 150 × 1 550 × 2 520 等轧制参数建立的有限元模型对 Q235 钢中厚板折叠进行了模拟计算; 分析了轧制速度、轧件温差 (30 ~ 70 °C) 和压下量 (12 ~ 22 mm) 对轧制头部压扁量的影响。得出随温差、轧制速度、压下量增大, 轧件头部压扁量增大, 在后续的轧制过程会产生折叠缺陷。为减少折叠发生, 应避免上下表面出现较大温差; 当温差较大时应采用小压下量低速轧制。

**关键词** 中厚板 折叠 下扣 压扁 有限元模拟

### Finite Element Analysis of Effect Factors on Folding Defect of Medium and Heavy Plate

Zhang Chunlin<sup>1</sup>, Cheng Xiaoru<sup>1</sup>, Ren Yong<sup>1</sup>, Zhan Shengli<sup>2</sup> and Huang Dajun<sup>2</sup>

(1 College of Material Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hot Rolling Plant, Wuhan Iron and Steel Group Corp, Wuhan 430083)

**Abstract** Based on established finite element model with rolling parameters including roller diameter 1 160 mm, rolling speed 1 000 ~ 3 000 mm/s, slab size (mm) 150 × 1 550 × 2 520, the simulated calculation on folding of medium and heavy plate of steel Q235 has been carried out by using finite element software ABAQUS/Explicit and effect of rolling speed, temperature difference of rolling stock (30 ~ 70 °C), reduction of rolling stock (12 ~ 22 mm) on flattening amount of head of rolling stock is analyzed. It is obtained that with increasing temperature difference, rolling speed and reduction of stock the flattening amount of head of rolling stock increases and the folding defect shall be occurred in following rolling process, in order to decrease folding occurrence the larger temperature difference between top and bottom surface of stock should be avoided, and as the temperature difference is larger it is available to roll by using small reduction and low rolling speed.

**Material Index** Medium and Heavy Plate, Folding, Bending Down, Flattening, Finite Element Simulation

在坯料加热过程中炉底水管的吸热及热气流的上浮, 使坯料下表面温度一般低于上表面, 由于这种上下表面温差的存在, 在轧制过程中就形成了不对称轧制条件使板坯出现扣头现象。扣头的板坯在辊道上运行时会对辊道产生猛烈撞击, 对辊道造成极大的伤害, 影响辊道的使用寿命, 增加了辊道了检修时间和维修费用, 严重影响了轧制的正常进行, 直接影响到轧钢的生产成本<sup>[1]</sup>, 此外扣头的板坯易于形成折叠缺陷, 降低成材率。本文采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对存在温差的板坯进行了轧制模拟, 计算分析了速度、温差、压下量对中厚板折叠缺陷的影响, 文中出现的压扁量是指压扁区的长度。

#### 1 有限元模型

根据现场轧制工艺选取典型的轧制参数建立整体有限元模型进行研究, 在建立模型的过程中需做一些假设, 如材料的材质均匀, 各向同性; 轧辊为刚

性体, 轧制过程中没有变形; 轧件为可变形体, 材料物性参数(热容、热传导系数、对流系数、辐射系数、线膨胀系数、弹性模量)随温度变化; 轧制接触处采用库伦摩擦; 轧件内部温度场沿厚度方向线性分布<sup>[2]</sup>。在以上假设的基础上, 根据现场轧制工艺选取 Q235 为坯料钢种轧辊以解析刚体的形式进行轧制过程的模拟, 坯料和轧辊参数见表 1。

轧件自由表面与周围环境的对流和辐射换热在

表 1 轧辊与坯料模拟参数  
Table 1 Simulation parameters of roller and slab stock

类别	项目	参数
轧辊	辊径/mm	1 160
	辊身长/mm	2 800
	轧制速度/(mm · s <sup>-1</sup> )	1 000 ~ 3 000
	材料属性	刚性
坯料	规格(H × B × L)/mm	150 × 1 550 × 2 520
	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	7 850
	上下表面温差/°C	30, 50, 70

传热学中统称为第三类边界条件可用式(1)计算:

$$Q = H(T - T_x) \quad (1)$$

式中:  $Q$ - 热流密度;  $T$ - 轧件表面温度;  $T_x$ - 环境温度;  $H$ - 等效传热系数, 由式(2)给出:

$$H = H_c + H_r \quad (2)$$

式中:  $H_c$ - 对流换热系数;  $H_r$ - 辐射换热系数, 可由式(3)给出:

$$H_r = E\sigma(T + T_x)(T^2 + T_x^2) \quad (3)$$

式中:  $\sigma$ - 波尔兹曼系数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $E$ - 热辐射率, 本文取  $0.8^{[3]}$ 。

轧件与轧辊之间的接触传热可描述为:

$$Q_c = H_c(T - T_d) \quad (4)$$

式中:  $T$ - 环境温度;  $T_d$ - 轧辊表面温度;  $H_c$ - 接触传热系数。

热轧过程中的塑性变形功和摩擦热分别当做体积热和表面热流处理可以转化为热量, 塑性变形热以热功转化系数来定义, 此系数可取为  $0.9^{[4]}$ 。

在轧件上下表面和心部分别施加不同的初始温度场, 以实现轧件上下表面具有一定的温差, 并对轧件施加一稳定的速度实现轧件的顺利咬入。模拟过程中轧件与轧辊之间的接触存在摩擦, 接触性质选用罚摩擦来定义, 然后填入与温度相对应的摩擦系数。不考虑轧辊的弹性变形对热轧扣头的影响, 设轧辊为具有单一温度自由度的解析刚体, 在模拟过程中对轧辊不划分网格, 在其质心设定参考点, 定义刚体约束条件, 使之以一定的初始速度绕其轴线转动。坯料采用六面体八节点实体热力耦合六面体缩减积分单元类型 C3D8RT 进行网格划分, 考虑到轧制过程中轧件头尾及边部变形较大, 网格划分时采用切分法进行, 轧件头尾及边部网格细化, 模型见图 1。

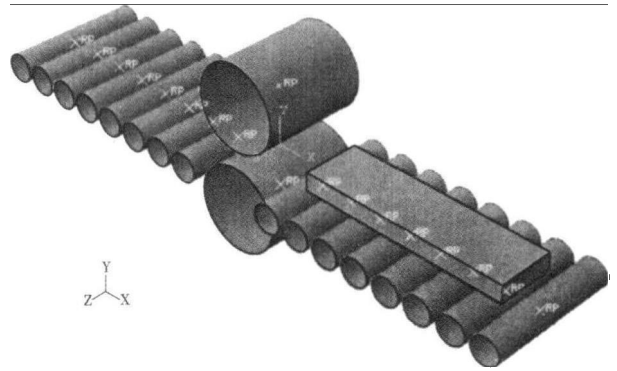


图 1 有限元模型  
Fig.1 Finite element model

## 2 模拟结果分析

### 2.1 温差对轧件头部压扁量的影响

一般情况下坯料出炉之前, 上表面温度大于下表面; 随着轧制的进行, 轧件由于上下表面换热条件不同, 温差会有减少的趋势甚至会出现下表面温度高于上表面的情况, 本文仅对上表面温度大于下表面的情况进行了模拟计算。对模型设定: 轧辊上下辊轧制速度和摩擦系数均相同, 坯料厚度和压下量相对固定, 轧制线标高为 80 mm, 保持这些参数不变仅改变轧件上下表面温差; 在实际的模拟计算过程中, 随温差的改变轧件出轧机时轧件头部运动方向与辊道所成的角度会出现图 2(a, b) 两种情况。图 2(a) 轧件出轧机后头部运动方向与辊道所成角度很小, 轧件头下表面与辊道上表面碰撞, 此时轧件头部的下表面由于碰撞产生变形而头部下端棱角处并没有发生压扁, 在后续的轧制过程中也不会出现折叠缺陷。图 2(b) 轧件出轧机后头部运动方向与辊道所成角度较大, 轧件头部下端棱角处与辊道侧面发生碰撞产生压扁, 在后续轧制过程中产生折叠缺陷, 随温差的增加轧件头部运动方向与辊道所成角度逐渐增大, 轧件头部下端的棱角处更易于与辊

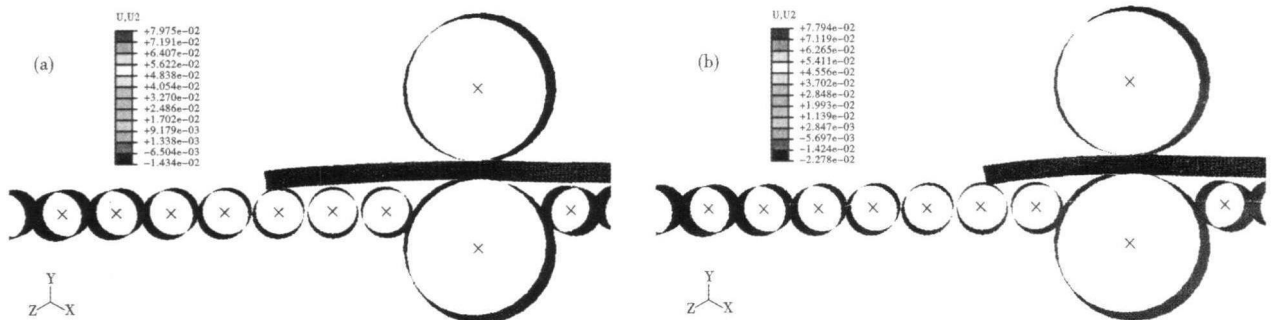


图 2 轧件头部下扣与辊道所成较小角度(a)和较大角度(b)  
Fig.2 Small angle (a) and bigger angle (b) between roller way and bending-down head of stock

道碰撞产生压扁,模拟结果显示,在不同压下量下随坯料上下表面温差增大头部压扁量总体呈现上升趋势,具体如图 3(a)所示,在实际轧制过程中由于上下表面温差存在下扣量大于轧制线标高时轧件头部就会撞上辊道使轧件头部压扁,在后续的轧制过程中轧件头部压扁部位即会形成折叠缺陷,因此要控制好加热和轧制过程温降。

### 2.2 压下量对轧件头部压扁量的影响

调整压下量可以控制轧件头部下扣量从而控制轧件头部压扁量的大小,本文通过对不同压下量的模拟计算分析了不同压下量对轧件头部压扁量的影响。在实际轧制过程中轧件上下表面温差恒定的情况下,压下量的变化会导致整个轧制过程呈不同的

不对称轧制状态,通过模拟计算可知轧件头部下扣量随压下量的增加而增大,这就导致轧件在出轧机之后轧件头部运动方向与辊道所成角度随下扣量的增加而增大,因此轧件头部压扁量随压下量的增加而增大,如图 3(b)所示。坯料上下表面存在温差时应采用小压下量轧制,这样可以减少折叠缺陷的产生。

### 2.3 轧制速度对轧件头部压扁量的影响

在实际生产中轧件要发生塑性变形,应力必须大于材料的屈服应力,而轧件出轧机时的速度大小直接影响轧件与轧机撞击力的大小,当撞击力大于轧件材料的屈服应力时轧件产生折叠,模拟计算之前对模型进行如下设定:轧辊上下辊轧制速度和摩擦系数均相同,坯料厚度、压下量和温差相对固定,轧

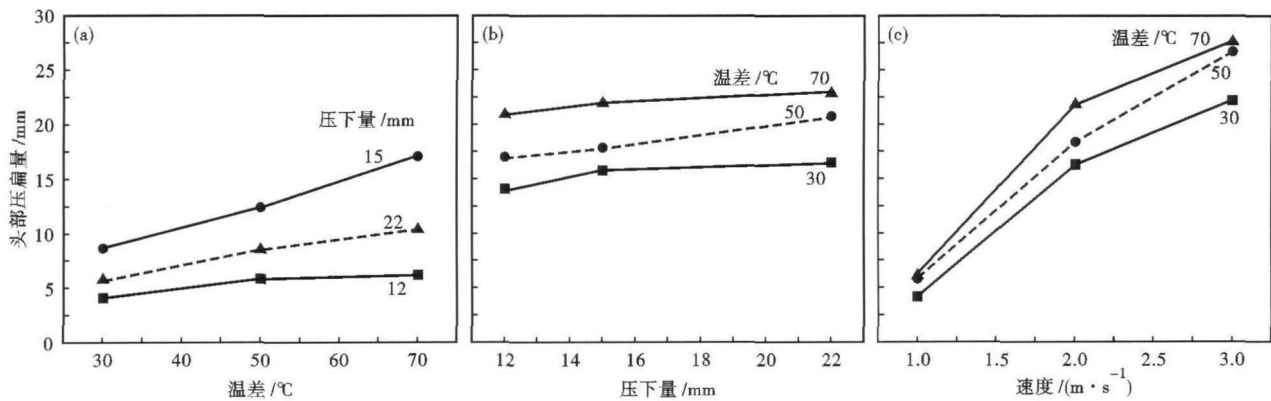


图 3 温差(轧制速度 1 m/s)(a),压下量(轧制速度 2 m/s)(b)和轧制速度(压下量 12 mm)(c)对轧件头部压扁量的影响  
Fig. 3 Effect of temperature difference (rolling speed 1 m/s) (a), reduction of stock (rolling speed 2 m/s) (b) and rolling speed (reduction of stock 12 mm) (c) on flattening amount of head of stock

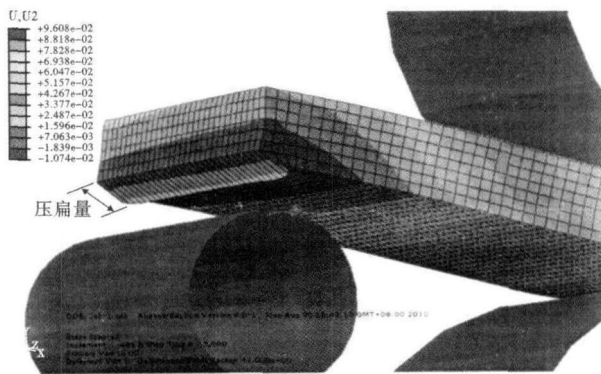


图 4 轧件头部压扁量  
Fig. 4 Flattening amount of head of stock

制线标高为 80 mm,保持这些参数不变仅改变轧制速度,模拟结果显示,在温差和压下量一定的情况下,轧件头部的压扁量随速度的增加而增大,见图 3(c)。在轧件上下表面温差为 70 °C,轧制速度为 3 m/s,压下量为 22 mm 时,轧件头部折叠如图 4 所示。

## 4 结论

(1) 轧件头部压扁时在后续的轧制过程中会在压扁区产生折叠缺陷,轧件头部压扁量随温差、速度、压下量的增大总体上呈增加的趋势。

(2) 实际轧制过程中,应控制好加热制度和轧制过程温降,避免上下表面出现较大温差。当存在温差时,为减少折叠缺陷应采用低速小压下量轧制。

### 参考文献

- 胡衍生,程晓茹,李虎兴,等. 中厚板轧制头部弯曲的实验研究. 武汉科技大学学报(自然科学版),2003,3:3
- 叶立勇. 超低碳钢热轧变形规律有限元模型:[硕士论文]. 武汉: 武汉科技大学,2009
- 王国栋. 中国中厚板轧制技术与装备. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- 李传瑞. 薄板坯 CSP 连轧热力耦合有限元模拟:[硕士论文]. 包头: 内蒙古科技大学,2004

张春林(1983-),男,硕士生,2008 年中原工学院毕业,材料成型过程计算机控制。

收稿日期:2010-10-19