

试验研究

# 粗轧带钢头部翘曲原因分析及控制措施\*

袁福顺,孙蓟泉

(北京科技大学 材料科学与工程学院,北京 100083)

**摘要:**造成带钢头部翘曲的主要因素包括:板坯上下表面温度差、上下轧辊摩擦系数不等、上下轧辊辊速不等、上下轧辊直径不同等。采用Marc有限元软件热力耦合分析法分析了各个影响因素对热轧带钢头部翘曲的影响规律,结果表明,翘曲量随上下表面温度差、摩擦系数比、辊速比及辊径比的增大而增大,但增大趋势各有不同。同时,提出了优化轧制规程、改善加热条件、采用适当的配辊方案、合理选择速度参数等解决带钢翘曲的措施。

**关键词:**带钢;热轧;头部翘曲;有限元;热力耦合

**中图分类号:** TG335.5\*6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4620(2010)04-0023-03

## 1 前言

在带钢粗轧生产阶段,由于轧件厚度方向存在不均匀的温度分布和不均匀变形,轧件一般都处在非对称轧制条件下进行轧制,即轧件上下表面的轧制边界条件不同。在非对称轧制条件下,轧件上下表面的金属流量不同,变形程度不同,从而产生翘头或者扣头<sup>[1-2]</sup>。翘头使得钢坯头部容易与设备或检测仪表发生撞击,严重者导致带钢无法进入轧机,造成堆钢事故;而扣头使得钢坯与机架辊或辊道撞击,导致板坯钻入辊道下部,给生产带来诸多不利。因此,控制轧件头部翘曲一直是热轧工艺的重要研究内容之一。

## 2 有限元模型

### 2.1 基本假设和网格划分

有限元建模过程是为了满足有限元求解的要求而对实际模型的合理简化和假设处理。根据现场实际生产情况及理论分析,宽展对带钢头部翘曲量的影响不大,采用二维有限元分析方法即可得到理想解,因此模型中轧件长度方向取2 000 mm,厚度方向取100 mm,单元大小为5 mm×5 mm,则共有8 000个单元,16 421个节点。从Marc材料库中读取材料C15的各项物性参数赋予轧件有限元模型。

鉴于目前还没有形成统一的对板带钢头部翘曲量的表示方法,本研究板带钢头部翘曲量用其头部弯曲高度 $h$ 表示的,以毫米(mm)为单位。

### 2.2 初始条件及边界条件

有限元计算结果是否精确与边界条件的选取直接相关,考虑各种因素对边界条件的影响,板带

钢热轧过程中主要的边界因素有:1)轧件与除鳞水和冷却水对流换热。除鳞是利用高压水流(1 500~2 000 MPa)冲击轧件表面,这种热量损失属于强迫对流形式,与冷却水对流换热不同,其对流换热系数主要影响因素是水流密度、速度、水压、介质温度、轧件表面温度及材料热物理性能等。2)轧件与轧辊之间的接触热传导。轧件与轧辊接触热传导系数受轧件材质、轧辊材质、轧制速度及轧制压力等多种因素的影响,实验方法很难测得其真实值。3)轧件与周围空气之间的换热主要是对流换热和热辐射,其等效换热系数为对流换热系数与辐射换热系数之和。当轧件在1 000℃左右时,自然对流热量损失占总热量损失的5%左右,因此热辐射是轧件与周围空气之间换热的主要影响因素。根据对实际生产情况有关参数的测试及理论计算,采用如下条件:

初始条件,轧辊直径1 600 mm,辊速300 m/s,轧件温度1 000℃,轧辊温度400℃。

热边界条件,轧件与除鳞水和冷却水对流换热的等效换热系数为1 kW/(m<sup>2</sup>·℃),轧件与周围空气之间的(对流换热和热辐射)等效换热系数为0.17 kW/(m<sup>2</sup>·℃),功热转换系数(变形热)0.95。

接触边界条件,摩擦生热系数0.8,上下工作辊与轧件接触表面的摩擦系数0.2,轧件与轧辊之间的接触热传导系数为20 kW/(m<sup>2</sup>·℃)。

## 3 影响带钢翘曲的因素及规律

### 3.1 上下表面温度差对带钢头部翘曲的影响

其他工艺条件相同,仅钢坯上、下表面存在温度差,且上表面温度高于下表面温度,轧件变形如图1所示。由于在变形区轧制力相等,金属的变形抗力受变形温度、变形速度、变形程度影响,温度高的区域变形速度快,变形程度大,必然会使 $L_1 > L_2$ ,即 $\Delta H_1 > \Delta H_2$ 。轧件上表面的前滑值比轧件下表面

\*“十一五”国家科技支撑计划基金项目(2006BAE03A06)。

收稿日期:2010-06-13

作者简介:袁福顺,男,1984年生,北京科技大学材料与工程学院材料加工专业2008级硕士研究生。

的前滑值大,在将钢板从中性层分为上、下两半部分的情况下,上轧辊从变形区轧出的金属体积将比同一时间内下轧辊从变形区轧出的金属体积大,结果形成图1所示的翘曲形状。

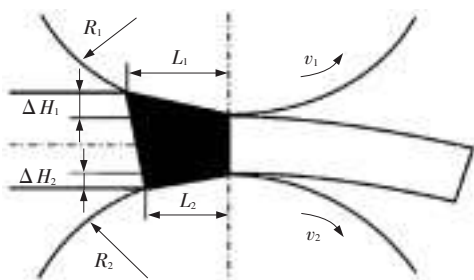


图1 轧件上下表面存在温度差时轧出的轧件形状

为定量研究温度在带钢厚度方向上分布不均对翘曲量的影响,设定带钢下表面的温度为1000℃,上表面温度在所研究的模拟模型分别设定为:970、960、950℃。所得翘曲量和上下表面温度差(30、40、50℃)的关系如图2a所示。由图2a可得出:1)在该轧制工艺参数条件下,当上下表面温度差相同时,不同压下率间产生的翘曲量增加趋势相差不大,因为此时温度差相同,随着压下量的增加,即变形程度增加,温度高区域金属的变形抗力受变形速度和变形程度的影响比温度低区域金属的变形抗力增加得多,最终导致轧件的中性层偏向一侧,量变化程度很小,即产生的翘曲量增加趋势相差不大。2)在相同压下率,所得翘曲量随上下表面温度差的增大而增大,变形温度是影响金属变形抗力的主要因素,温度高,金属的变形抗力低,上下表面温度差对板形的翘曲量影响很大,尤其是在大的压下率工艺条件下。因此在实际带钢生产中,应控制好轧件上下表面温度差,避免带钢头部翘曲影响正常生产。

### 3.2 摩擦系数比对带钢头部翘曲的影响

摩擦问题十分复杂且摩擦机理及作用很难用数学模型准确地描述,所以实际生产情况下如何控制摩擦的影响是轧制工艺研究中的一个难点。轧件和轧辊接触表面的摩擦力的大小及分布与接触弧长度和钢板的平均厚度的比值以及摩擦系数有关。根据摩擦力方向、分布,将整个变形区根据摩擦力划分为前滑区、中性点、后滑区。为研究摩擦系数比及不同压下量对板带钢头部翘曲的影响,当压下量增加时,摩擦力增大,接触弧长变长,同时中性点前移,即前滑区变短。当改变摩擦系数时,接触弧长基本不变,但摩擦力值随摩擦系数增大而增大,中性点后移<sup>[3]</sup>。本研究设定下工作辊与轧件的接触摩擦系数为0.2,上工作辊与轧件的摩擦系数在每个模型中定为:0.24、0.28、0.32。得到在不同摩擦

系数比(1.2、1.4、1.6)、不同压下率下与带钢头部翘曲量的关系如图2b所示。

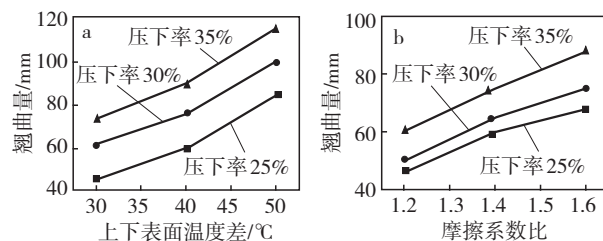


图2 轧件头部翘曲量与上下表面温差及摩擦系数比的关系

由图2b可看出,在此轧制工艺条件下,随着摩擦系数比的增加,摩擦系数大的一侧轧件受到的摩擦力增大,金属的塑性流动受到抑制,所以带钢头部翘曲量相应增加,但是随着辊摩擦系数比的增大,摩擦系数大的一侧轧件的中性点相对后移,即前滑值比原来有所增加,所以轧件头部翘曲量增加幅度有减缓的趋势。在相同的摩擦系数比条件下,压下率增大,摩擦力增大,摩擦系数大的一侧轧件中性点相对于摩擦系数小的一侧轧件中性点前移,即前滑值相对变小,轧件上下表面金属流动的面积差增大,导致轧件头部翘曲量在相同的摩擦系数比条件下随着压下量的增加而增加的趋势增大。

### 3.3 辊速比对带钢头部翘曲的影响

由于存在上下工作辊线速度不等,引起变形区中两个工作辊与轧件接触面上的摩擦力不对称,从而导致变形区存在搓轧区。在搓轧区,上、下两辊的摩擦力方向不同,导致快辊的力矩比慢辊的大。由此快辊一侧轧件受到剪应力较大,金属流动量大,会造成带钢头部翘曲<sup>[4-5]</sup>。本模型设定上工作辊辊速为300 mm/s,只单独改变下工作辊辊速,下工作辊辊速分别为:301.5、303.0、304.5 mm/s。轧件翘曲量与辊速比(1.005、1.010、1.015)及压下率的关系如图3a所示。由图3a可看出,在此模拟条件下,由于辊速的不同,轧件上下表面金属的延伸率、前滑和出口流动速度不一致,快辊侧的金属延伸率和出口流动速度比慢辊侧大,这将造成轧件向慢速辊侧弯曲。随着相对辊速的增加,快速辊侧金属的延伸率和出口流动速度增大,从而使轧件头部翘曲量增加。当压下量增加时,快速辊侧金属的流动量也将相应增大,轧件头部翘曲量也随着增加。从轧件头部翘曲量与辊速比的关系来看,随着辊速比的增大,头部翘曲量增加速率增大。

### 3.4 工作辊异径比对带钢头部翘曲的影响

当其他轧制工艺参数全部相同,仅当上、下工作辊辊径不相等时,对轧件头部翘曲有两种影响:1)两辊的轧制力相等,则在小辊径一侧产生的压下量大于大辊径一侧的压下量,则小辊径一侧金属流

动量大,使轧件弯向大辊径侧。2)两辊角速度相同,则大辊一侧的轧件表面金属在单位时间内流动的距离长,使轧件弯向小辊一侧。由以上分析可知,当上下轧辊的辊径不同时,两辊圆周速度和压下量对轧件头部弯曲的影响相反。当压下量较小时,两辊圆周速度差别的影响起主导作用,即轧件头部弯向小直径工作辊;当压下量较大时,两辊压下量的差起主导作用,即轧件头部弯向大直径工作辊。在模拟计算时所使用的工艺参数与实际生产相符合,采用上工作辊的直径参数为1 600 mm,下工作辊直径参数在每个工况条件下分别为1 616、1 632、1 648 mm,得到带钢头部翘曲量与工作辊异径比(1.01、1.02、1.03)及压下率的关系如图3b所示。

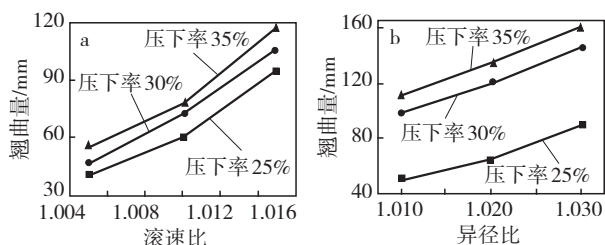


图3 轧件头部翘曲量与辊速比及异径比的关系

由图3b可看出:随着异径比及压下率的增加带钢头部翘曲量增加。当辊径比较小时,在较大的压下率条件下,带钢头部翘曲量才会很大,当辊径比较大时,在较小的压下率条件下,带钢头部就会出现很大翘曲量。

在存在轧辊异径比的情况下,压下率对带钢头部翘曲的影响较为敏感。同一异径比时,随着压下量的增大,轧件头部翘曲量迅速增大,随后其增加趋势减缓。其原因是在压下率较小时,两辊角速度相同,则大辊一侧的轧件表面金属在单位时间内流动的距离长,使轧件弯向小辊一侧。随着压下率的增加,两辊的轧制力相等,使在小辊径一侧产生的压下量大于大辊径一侧的压下量,则小辊径一侧金属流动量增加,减弱了由于辊速差对带钢头部翘曲的影响。所以带钢头部翘曲量增加趋势减缓。

## Cause Analysis and Control Measures of Strip Head Bending in Rough Rolling

YUAN Fu-shun, SUN Ji-quan

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** There are many reasons resulting in the head bending of steel strip. The asymmetry in the upper and lower layers of the steel strip is the main factor, including uneven temperature, different friction, different peripheral velocity, unequal radius of the upper roll and lower roll, etc. Marc finite element analysis software was adopted to study bending of the steel strip. Two-dimension thermal-mechanical coupled models were proposed to simulate rolling of strip. The results showed that curling at the front end of steel strip was increased with the uneven temperature, friction coefficient ratio, roller speed ratio and the roller diameter ratio, but the increasing trends are different. At the same time, the measures that can solve the curling at the front end of steel strip were put forward, that were optimizing the schedules and the heating conditions, the adoption of appropriate roller programs, selecting the reasonable parameter of the speed.

**Key words:** strip steel; hot rolling; head bending; finite element; thermo-mechanical coupling

## 4 带钢翘曲的解决措施

1)压下率的大小不是带钢头部产生翘曲的根本原因,而是压下量耦合不对称轧制因素促使带钢头部翘曲,在非对称轧制生产中必须考虑压下率对板带钢翘曲的影响。不同的压下率是不对称轧制中用于调整带钢头部翘曲最主要的几个轧制参数之一。因此,在满足轧制工艺要求的前提下,优化轧制规程可以减缓板带钢头部翘曲现象。

2)轧件上下表面的冷却水流量、喷射方式的差异导致轧件上下表面存在温差,而板带钢头部翘曲量对轧件上下表面的温度差较敏感,因此要改善加热条件,注意调节冷却工艺,降低上下表面温差,以减小轧件头部翘曲量。

3)在本模拟的不对称工艺参数的轧制条件下,上下辊摩擦系数比对带钢头部翘曲量的影响量最小,而辊径比对带钢头部翘曲量影响最大。因此可采用适当的配辊方案,消除其他不对称因素造成板带钢头部翘曲量的影响,获得良好板形。

4)粗轧的上下工作辊是通过两个独立的转速可调电机传动的,合理选择控制速度调节参数,使轧制过程中上下轧辊的速度不同,即辊速比不同,可以有效控制其他因素对板带钢头部翘曲造成的不良影响。

### 参考文献:

- [1] 孙蓟泉,张海滨,于成全.热轧带钢头部翘曲原因分析[J].钢铁研究学报,2006,18(7):31-34.
- [2] 庞玉华,刘长瑞,王伯建,等.板带材轧制头部翘曲的影响因素[J].钢铁研究学报,2007,19(5):35-36.
- [3] 程晓茹,胡衍生,李虎兴,等.中厚板轧制轧件头部弯曲模拟计算[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2001,24(3):228-230.
- [4] 朱光明,杜凤山,孙登月,等.板带轧制变形区内摩擦力分布的有限元模拟[J].冶金设备,2002,8(4):2-3.
- [5] 赵志业.金属塑性变形与轧制理论[M].北京:冶金工业出版社,1980.