

# 热连轧粗轧调宽轧制过程边角部 金属流动三维数值模拟<sup>\*</sup>

王晓南<sup>1)†</sup> 邱洪双<sup>1)</sup> 梁冰洁<sup>1)</sup> 夏小明<sup>1) 2)</sup>

1) 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

2) 上海梅山钢铁股份有限公司热轧板厂, 上海 210039)

(2009 年 1 月 15 日收到, 2009 年 2 月 25 日收到修改稿)

以梅山钢铁股份有限公司热轧机组的粗轧板坯边部出现“黑线”为背景, 对孔型立辊的 5 道次可逆立-平轧制过程进行了数值模拟. 模拟结果表明: 孔型立辊轧制能更有效地纠正双鼓变形, 避免产生边部夹层; 轧件的边角部金属在轧制过程中逐渐流动到轧件的上下表面; 在相同轧制工艺条件下, 随着孔型内倒角半径的增加翻平量逐渐增大. 轧制过程中, 低温、高应力应变状态的金属在轧件边部的累积最终可能导致轧件边部沿长度方向产生“黑线”缺陷; 合理地设计立辊的形状和优化立轧压下制度可以避免边部夹层的产生, 并减少“黑线”缺陷甚至消除该缺陷.

关键词: 热连轧, 数值模拟, “黑线”缺陷

PACC: 4790, 8140

了理论依据.

## 1. 引言

在热连轧粗轧调宽轧制过程中, 轧件边角部金属在变形区内发生了复杂的三维金属流动. 因此, 利用实验方法对边角部金属流动进行理论分析十分困难. 采用有限元技术对其进行数值模拟是分析和优化粗轧轧制工艺的重要手段. 利用有限元技术对多道次可逆粗轧调宽过程进行数值模拟主要有以下三种方式: (1) 针对每道次分别建立轧制模型进行模拟; (2) 直接建立多道次连轧模型进行模拟; (3) 利用几何模型更新方法和有限元方法分析多道次轧制过程<sup>[1-4]</sup>.

本文运用 ANSYS/LS-DYNA 中的重启动方法分析了 5 道次立-平可逆轧制过程, 利用单个轧制几何模型<sup>[5]</sup>求解多道次可逆轧制的问题. 该方法能够很好地反映轧件性能参数随温度变化的特性, 并充分考虑前一道次的应力应变对后一道次的影响, 既可兼顾轧件头尾形状, 又能更好地控制轧制参数, 为实现板坯多道次可逆轧制分析提供了新方法. 针对不同孔型立辊形状<sup>[6, 7]</sup>对边角部金属流动的影响进行了对比分析, 为解决边部夹层和“黑线”等缺陷提供

## 2. 有限元模型

模拟中, 立辊直径为 1100 mm, 水平辊直径为 1200 mm. 图 1 所示为孔型立辊尺寸, 其中内倒角半径  $R(x)$  分别取为 30, 50 和 80 mm. 为了减少单元数量, 模拟中做了以下两个方面的简化处理: 第一, 轧辊采用刚性体模型; 第二, 在满足稳定轧制的条件下缩短轧件长度, 轧件长度取 300 mm, 故轧件的原始尺寸为 300 mm × 1200 mm × 179 mm. 由于轧制模型几何形状对称, 所以采用 1/4 轧制区域进行计算模拟. 图 2 为立-平轧制有限元模型. 为了便于对比两者的计算结果, 轧件均划分为 34500 个单元, 且有限元节点号一致. 在轧制过程中, 轧件边部变形较为剧烈, 故将边部单元进行细化. 由于轧制属于大应变问题, 故轧件选用双线性等向强化模型. 轧件的钢种为 J55, 除 Fe 外, 其他主要化学成分为  $w(C) = 0.34\% - 0.39\%$ ,  $w(Si) = 0.20\% - 0.35\%$ ,  $w(Mn) = 1.25\% - 1.50\%$ . 变形抗力采用  $\sigma_s = A\epsilon^n \dot{\epsilon}^m e^{B/T_k}$  公式拟合, 其中  $A, n, m, B$  为系数,  $\dot{\epsilon}$  为应变速率,  $\epsilon$  为

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB605208)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: wxn\_neu@qq.com

真应变,  $T_k$  为开氏温度. 整个轧制模型采用 8 节点六面体进行离散. 模拟共进行 5 道次的轧制, 立辊只在奇数道次进行轧制, 平辊 5 道次均进行轧制. 运用 ANSYS/LS-DYNA 中的重启动方法, 通过修改轧件的初始速度和材料属性来实现多道次可逆轧制的数值模拟.

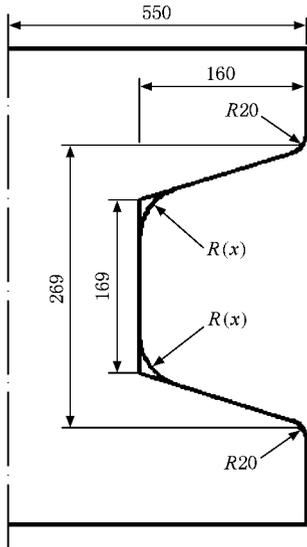


图 1 孔型立辊尺寸(单位为 mm)

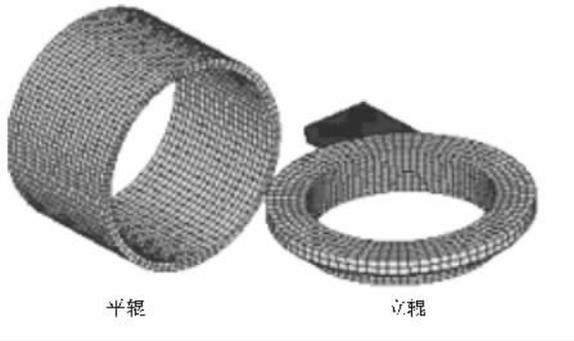


图 2 立、平轧制有限元模型

### 3. 数值模拟结果分析

#### 3.1. 立轧后板坯边角部金属流动分析

图 3 所示为第 1 道次和第 5 道次立轧后边角部金属位置变化, 曲线 1、曲线 2、曲线 3 和曲线 4 分别代表  $R30$ 、 $R50$ 、 $R80$  和轧件原始边界, 节点  $a$  为轧件长度方向中心上的边角部节点. 在图 3(a) 中, 曲线 3 上节点  $a$  的横坐标值小于曲线 1 和曲线 2 上节

点  $a$  的横坐标值, 三条曲线上节点  $a$  的纵坐标值基本相同. 这是由于孔型立辊侧壁抑制了轧件在侧压过程中的局部变形, 而且孔型辊内倒角半径越大节点  $a$  的横向位移就越大, 即向轧件的宽度中心移动越多. 在图 3(b) 中, 经过第 5 道次立轧后, 曲线 3 上节点  $a$  的横坐标值小于曲线 1 和曲线 2 上节点  $a$  的横坐标值, 且曲线 3 上节点  $a$  的纵坐标值略小于两者. 这是由于在第 1 道次立轧中, 随着内倒角半径的增大, 横向变形的渗透程度随之增大. 在粗轧过程中, 轧件的厚度变化比较剧烈, 立辊的孔型在第 5 道次立轧过程中的抑制局部变形作用减弱或消失, 形成了所谓的“狗骨形”. 第 3 道次边角部金属流动规律与第 5 道次类似.

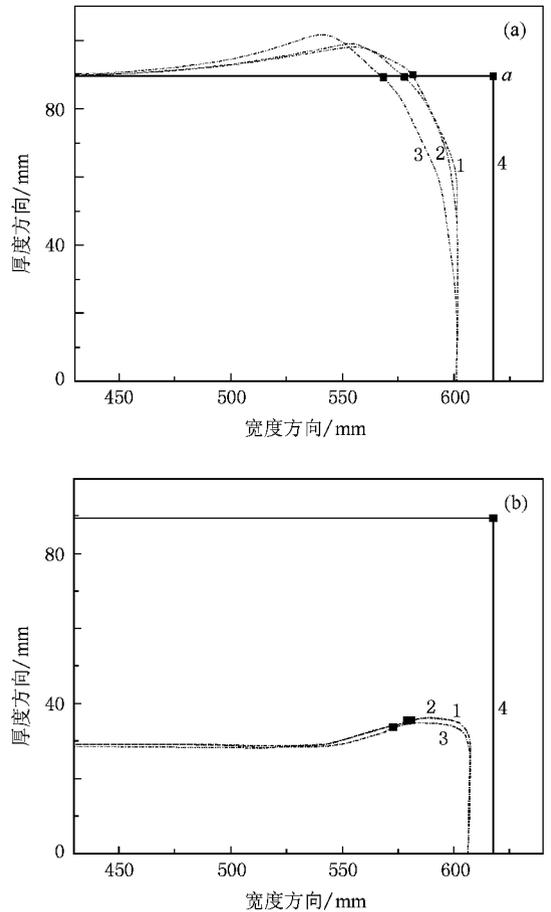


图 3 立轧后边角部金属位置变化 (a) 第 1 道次 (b) 第 5 道次

#### 3.2. 平轧后板坯边角部金属流动分析

图 4 所示为第 1 道次和第 5 道次平轧后边角部金属位置的变化, 其他三个道次的边角部金属流动规律与之类似. 图 4 中曲线 1、曲线 2、曲线 3 和曲线 4 分别代表  $R30$ 、 $R50$ 、 $R80$  和轧件原始边界, 节点  $a$

为轧件长度方向中心上的边角部节点.平轧过程中,采用  $R80$  的孔型立辊立轧后轧件上节点  $a$  的横坐标值最小, $R50$  次之, $R30$  最大;而三条曲线上节点  $a$  的纵坐标值相同,同时平轧过程板坯横断面均呈现单鼓形.这是由于“狗骨峰”的位置向宽展中心移动;“狗骨”变形的峰值厚度减小,从而在后续平轧时使得轧件边角部处“狗骨”的纵向压下减小,金属横向流动较均匀,因此使得表面宽度回展量减小,不易产生双鼓形.这表明孔型立辊能够更好地抑制双鼓变形,更为有效地避免边部夹层.立轧过程宏观上抵消了部分的宽展变形,使得轧件的尺寸得到控制,微观上使得角部金属处于三向压应力状态,避免了角部金属在轧制过程中一直处于不利的拉应力状态和由此产生的裂纹、“黑线”等缺陷.这说明立轧具有一定的修复微小缺陷的作用,从而改善和提高了带钢的边部质量.

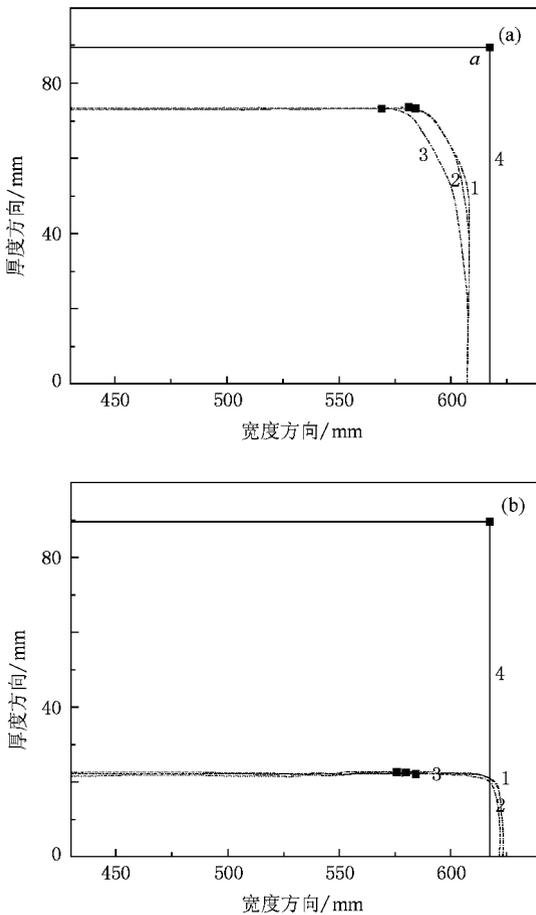


图4 平轧后边角部金属位置变化 (a)第1道次 (b)第5道次

### 3.3. 翻平现象及“黑线”缺陷形成机理分析

通过绘制轧件边角部金属的流动规律图得知,

在既定的轧制工艺条件下,用内倒角半径  $R(x)$  分别为 30, 50 和 80 mm 的孔型立辊轧制时,发生翻平现象的临界点分别在距轧件上表面为 23.84663, 29.8083 和 41.73164 mm 处,即孔型立辊的内倒角半径越大产生的翻平量越大, $R(x) = 80$  mm 的翻平量比  $R(x) = 30$  mm 多 75%,比  $R(x) = 50$  mm 的翻平量多 40% 左右.金属翻平量的大小取决于接触条件和轧件的几何尺寸,当轧件侧表面的减少量大于轧辊与轧件接触面积的增加量时则发生翻平现象.翻平现象主要存在于平轧过程中,轧件边角部金属受到强烈的拉应力作用流动到轧件上表面.随着平轧过程的进行,新生成的边界推动着原始的边界向板坯宽度中心移动,原始边界金属及每道次新生成边界金属在板坯边部逐渐累积,最终有可能在板坯边部沿长度方向产生“黑线”缺陷.由于不同的立辊形状可以有效地改善轧件边角部金属的流动情况,因此合理地设计立辊的形状和优化立轧压下制度可以避免边部夹层的产生,并减少“黑线”缺陷甚至消除该缺陷.

### 3.4. 模拟结果与现场数据对比分析

为了验证模拟的正确性,对各道次轧制后板坯的宽度进行了校核.表1为  $R50$  孔型辊轧制的宽度对比表,实测值由上海梅山钢铁股份有限公司热轧板厂 1422 mm 热连轧机组提供.通过计算可知,模拟值与现场数据基本符合,说明模拟中所采用的方法具有合理性和可行性,且具有一定的现场指导意义.分析产生误差的主要原因如下:在数值模拟中,将轧辊看做是刚性体,不发生弹性变形,由于轧辊的圆柱体形状影响着轧制时横向和纵向变形间的关系,也就是影响变形区内金属流动的纵横阻力比,从而影响了轧件的宽展.轧制温度对宽展也有一定的影响,由于模拟的时间比较短,温度影响因子较小,所以模拟中忽略了温度场的影响,而是在重启动的过程中对每一道次修改轧件的材料属性来保证模拟的准确性.

表1 孔型立辊轧制的宽度对比

道次	实测值/mm	模拟值/mm	误差/mm
1	1222.4	1215.850	-6.550
2	1231.3	1223.910	-7.390
3	1223.7	1227.398	3.698
4	1230.4	1240.098	9.698
5	1224.8	1247.706	22.906

## 4. 结 论

1) 孔型立辊轧制能够更好地抑制双鼓变形的产生,更有利于避免边部夹层缺陷.

2) 边角部金属在轧制过程中流动到轧件的上下表面.在相同的轧制工艺条件下,随着孔型立辊内倒角半径的增加,翻平量逐渐增大.

3) 边角部的金属在轧制过程中始终处于低温、高应力应变状态,并且逐渐流动到轧件上下表面,每道次新生成的边界金属均处于相同的状态,最终可能导致轧件边部沿长度方向产生“黑线”缺陷.

4) 合理地设计立辊的形状和优化立辊压下制度可以避免边部夹层的产生,并减少“黑线”缺陷甚至消除该缺陷.

- [ 1 ] Nikaido H , Naoi T , Shibata K 1984 *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.* **277** 129
- [ 2 ] Xiong S W , Liu X H , Wang G D 2000 *J. Mater. Process. Technol.* **101** 146
- [ 3 ] Xiong S W , Liu X H , Wang G D 1997 *J. Mater. Eng. Perform.* **6** 757
- [ 4 ] Chen R , Liu L W , Li M W , Yao X D , Yu Y 2007 *China Metall.* **17** 29 ( in Chinese ) [ 陈 韧、刘立文、李梦炜、姚祥东、于 勇 2007 中国冶金 **17** 29 ]

- [ 5 ] Yu H L , Liu X H , Li C S 2005 *J. Northeastern Univ. ( Nat. Sci. )* **26** 982 ( in Chinese ) [ 喻海良、刘相华、李长生 2005 东北大学学报(自然科学版) **26** 982 ]
- [ 6 ] Zhang C G , Han J T , Liu J , Yu W H 2005 *J. Plast. Eng.* **13** 74 ( in Chinese ) [ 章传国、韩静涛、刘 靖、余万华 2005 塑性工程学报 **13** 74 ]
- [ 7 ] Liu H , Gao C R , Wang G D , Liu X H 2003 *J. Plast. Eng.* **10** 86 ( in Chinese ) [ 刘 慧、高彩茹、王国栋、刘相华 2003 塑性工程学报 **10** 86 ]

# Three-dimensional numerical simulation of the edger and corner metal's flow on edging rolling on roughing of hot continuous rolling process<sup>\*</sup>

Wang Xiao-Nan<sup>1)†</sup> Di Hong-Shuang<sup>1)</sup> Liang Bing-Jie<sup>1)</sup> Xia Xiao-Ming<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> *State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China*

<sup>2)</sup> *Hot Rolling Plant of Meishan Iron and Steel Company of Shanghai, Shanghai 210039, China*

( Received 15 January 2009 ; revised manuscript received 25 February 2009 )

## Abstract

Based on the seam-defect appearing on the plate edge of rough-rolling medium billet in the Meishan Iron and Steel Company's hot-rolling units, the five-pass reversible vertical-horizontal rolling of different vertical roll shapes process is simulated numerically. The results show that groove vertical rolls rolling can inhibit double bulging deformation better. On the same rolling process conditions, the value of side tumbling on groove vertical rolling is larger than that on flat vertical rolling, and the value of side tumbling increases with the groove fillet radius increasing. During the rolling process, that the metal at low temperature, high strain and high stress cumulates on the edge of the workpiece may bring the seam-defect along the length of the workpiece. The edge interlayers could be avoided by reasonably designing the vertical roll shape and optimizing the vertical roll's screw system, thereby reducing or avoiding the occurrence of seam-defects.

**Keywords** : hot continuous rolling, numerical simulation, seam-defect

**PACC** : 4790, 8140

<sup>\*</sup> Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB605208 ).

<sup>†</sup> E-mail : wxn\_neu@qq.com