

文章编号: 1006-2467(2009)01-0065-06

中厚板多道次热轧过程有限元连续模拟

张金玲¹, 崔振山¹, 王英杰²

(1. 上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200240;

2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 基于有限元软件 Marc, 建立了中厚板多道次轧制过程的三维热力耦合弹塑性有限元模拟模型. 以等效空心辊替代实心辊, 既考虑了轧辊压扁及弯曲变形对其轧件变形的影响, 又减少了单元数目并缩短了计算时间, 构建了能够将多道次轧制过程连续模拟的有限元输入数据生成系统. 通过其网格重划分模块和参数传递模块, 使得前一道次的变形与温度的计算结果可用于后一道次模型的初始形状和初始参数, 避免了网格畸变引起的计算困难, 实现了多道次热轧过程的连续模拟. 以某厂实际生产中的 7 道次连轧参数为例, 进行了 7 道次热轧的连续模拟, 所得各道次轧制力及温度结果与实测值吻合, 轧辊压扁及轧件厚度分布符合实际规律.

关键词: 多道次; 等效空心辊; 热力耦合; 参数传递; 网格重划分

中图分类号: TG 335.5

文献标识码: A

Continuous Finite Element Simulation of Plate Multi-pass Hot Rolling

ZHANG Jin-ling¹, CUI Zhen-shan¹, WANG Ying-jie²

(1. National Die and Mold CAD Engineering Research Center,

Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: A 3-D thermo-mechanical coupled elastoplastic finite element (FE) model was established for the simulation of plate multi-pass hot rolling by means of FE software Marc. The "hollow roll" model was developed to substitute real solid roll, which enables the simulation to involve the effects on plate deformation from roll flattening and bending induced by rolling force and roll bending force, at the same time reduce the number of elements and save computational time. An input data generating system was also established which involves a mesh refinement module and parameter transfer module. Through this system, the calculation results from the former pass can be directly transferred to the next pass input file as initial conditions and the refined mesh can be directly added into the input file too. Thus enables the simulation for multi-pass rolling to run continuously. As an application, a 7-pass plate rolling was simulated and demonstrated. The results show that the simulated rolling force and temperature agree well with the measured data, the distribution of the roll flattening and plate thickness is in the same law with actual production.

Key words: multi-pass; equivalent hollow roll; thermo-mechanical coupled; parameter transfer; mesh refinement

收稿日期: 2008-01-30

基金项目: 高等学校博士点专项科研基金资助项目(20050248007)

作者简介: 张金玲(1989), 女, 河北滦平人, 博士生, 主要从事金属热成形过程的数值模拟、微观组织与产品力学性能研究.

崔振山(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-62827605; E-mail: cuizs@sjtu.edu.cn.

中厚板通常由厚板坯经多道次热轧而成, 轧制过程中的变形量较大. 在对其轧制过程进行模拟时, 为了避免应用有限元法进行模拟时网格畸变造成的计算困难, 必须在道次间重划单元. 但在保证变形区内的单元尺寸足够小时, 网格重划分过程一般需要人工干预, 且需要在新旧单元间传递中间计算结果, 因而难以实现多道次热轧的连续模拟. 目前, 有关中厚板轧制的研究主要停留于单道次的变形方面^[1-4], 而且轧辊多采用刚性体, 这种方法不能反映轧辊变形对轧件变形的影响, 因而不能用于板形研究.

本文以有限元软件 Marc 为平台, 以等效空心弹性轧辊替代实际的实心轧辊, 建立了中厚板多道次热轧三维弹塑性热力耦合有限元模型, 在保证计算精度的前提下, 减少了轧辊单元数目, 节省了计算时间, 且能够反映轧辊弹性变形对轧件变形的影响. 另外, 开发了网格重划分模块和参数传递模块, 构建了基于样板的有限元输入数据生成系统, 使多道次热轧过程的连续模拟可以在无人工干预的条件下完成.

1 模型建立及边界条件处理

根据实验数据所得流动应力是应变、应变速率和温度的函数^[5], 将不同应变速率下的应力、应变关系以各向同性强化流动应力的模型形式写入 Marc 材料库, 建立对应的实际材料应力-应变曲线, 供计算时调用. 根据对称性, 取轧件 1/4 进行建模.

1.1 等效空心轧辊模型

采用等效空心轧辊代替实心轧辊^[6]以保证轧辊简化而不受轧件变形影响. 需要满足: 施加弯矩时弯曲挠度等效; 与轧件接触时轧辊的压扁变形等效. 图 1 所示为等效空心轧辊和实心轧辊的截面图, 其中: 轧辊的外圆直径为 D ; 空心轧辊的内圆直径为 d . 空心轧辊又分为 2 层, 分层直径为 D_1 . 由于轧辊的弹性压扁局部变形只发生在接触区附近, 为保证轧辊的压扁变形等效, 外层单元取轧辊的实际弹性模量; 为保证空心轧辊的弯曲刚度等价于实心轧辊, 应对比实

心轧辊的弯曲刚度确定内层材料的弹性模量.

根据挠度计算方程^[7]

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

式中: w 为挠度; $M(x)$ 为对应坐标 x 处的弯矩; E 为弹性模量; I 为截面惯性矩. 可见, 当辊身长度和受力条件(包括约束条件)一定时, 轧辊的挠度与 EI 成反比. 因此, 若轧辊简化前后抗弯截面模量相等, 则弯曲变形等效.

由图 1 可见, 实心轧辊及空心轧辊外层和内层的截面惯性矩分别为:

实心轧辊

$$I_s = \frac{\pi D^4}{64}$$

空心轧辊外层

$$I_1 = \frac{\pi D_1^4}{64} (1 - \alpha_1^4), \quad \alpha_1 = \frac{D_1}{D}$$

空心轧辊内层

$$I_2 = \frac{\pi D_1^4}{64} (1 - \alpha_2^4), \quad \alpha_2 = \frac{d}{D_1}$$

为了使抗弯截面模量相等, 则 $EI_s = EI_1 + E_k I_2$ (其中: E 为真实轧辊材料的弹性模量; E_k 是空心内层单元的等效弹性模量), 由此得到

$$E_k = \frac{E}{1 - \alpha_2^4} \quad (2)$$

在相同轧制条件下, 分别采用实心轧辊和等效空心轧辊进行模拟, 得到实心辊与等效空心辊的挠度结果如图 2 所示. 可见两者的挠度值接近, 表明空心轧辊模型满足等效挠度要求.

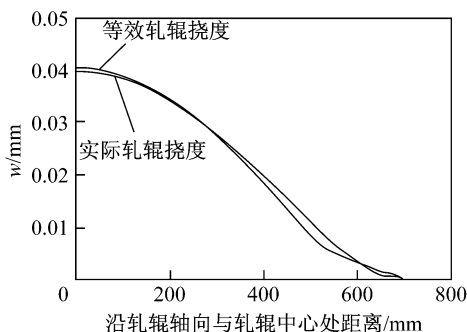


图 2 分别采用空心和实心轧辊模拟的轧辊挠度

Fig. 2 Comparison of the deflection between hollow and solid roll

1.2 热力耦合边界条件

热轧厚板的过程为复杂的热力耦合过程. Marc 采用弱耦合形式, 同时处理热传导和力平衡 2 类不同场方程. 在辐射和对流边界上, 表面换热系数 h 为温度的函数^[8], 即

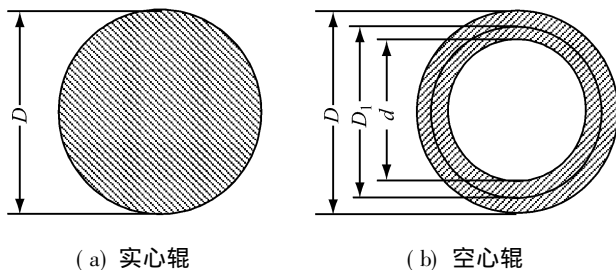


图 1 空心、实心辊截面图对比

Fig. 1 Section of hollow roll and solid roll

$$h = h_c + h_r =$$
$$h_c + \delta \eta (T_i^2 + T_{amb}^2) (T_i + T_{amb}) \quad (3)$$

式中: h_c 为对流换热系数, 取 $52 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_r 为辐射换热系数; δ 为波耳兹曼常数; η 为黑体辐射系数, 取 0.9; T_i 为轧件表面温度; T_a 为环境温度。

根据各道次不同的轧制情况, 轧辊与轧件之间的摩擦系数 $\mu = 0.30, 0.29, 0.28, 0.25, 0.25, 0.25, 0.23$; 在轧制变形区内, 接触换热系数受接触体表面粗糙度和接触压力等影响, 本次模拟中依次取 20, 20, 20, 20, 25, 25 和 $25 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。变形功及摩擦功的功热转换系数分别取 0.90 和 $0.85^{[9, 10]}$ 。

1.3 轧辊驱动方法及弯辊力

在有限元模拟中, 若采用刚性辊模型, 则可直接施加转速以驱动轧辊转动。但在以体单元离散的弹性辊中无法直接施加转动自由度, 必须通过刚体带动。根据 Marc 软件的功能, 在轧辊有限元模型的端面处生成 1 个相同大小的刚性圆盘, 并将其与弹性辊端面“粘接”在一起。在圆盘的中心点和 1 个边缘点各设置 1 个控制点, 中心控制点具有 3 个平动自由度, 在其上施加垂直轴向的弯辊力, 以实现轧辊弯曲变形; 边缘控制点有 3 个转动自由度^[11], 通过转角与时间的关系施加绕 x 轴的转速, 则在弹性辊上施加弯辊力并实现转动驱动。

1.4 轧件咬入的实现和有限元求解方法

采用准静态算法进行求解, 建立“微小惯性力”驱动模型, 即在轧件的前进方向和重力方向分别施加微小体积力, 其中前进方向的体积力取为重力的 $1/100$, 以使轧件与轧辊接触前获得初始运动; 重力方向的体积力则小于实际重力, 以便消除数值奇异的作用。方程求解采用 Newton-Raphson 迭代方法。

2 网格重划分以及和多道次连续计算模型

为了使多道次模拟能够连续进行而不加人工干预, 必须对网格畸变进行重划分, 并对前后道次之间的中间结果进行传递。

2.1 网格重划分

在多道次轧制后, 轧件网格会严重畸变而导致精度下降, 甚至不能收敛。可以依据单元内角和边长比来判断网格是否需要重划分。例如, 单元内角应控制在 $30^\circ \sim 150^\circ$; 边长比大于 $1/5$, 且轧制变形区内至少有 7~8 排单元。因此, 在 Marc 运行环境外部开发了 1 套六面体网格重划分方法。

当单元内角在可用范围内但边长比不满足要求时, 需要在轧制方向对网格进行加密, 此时, 通过插

值得到新增节点的坐标为

$$x_i = \frac{1}{2}(X_I + X_{I+NZ}) \quad (4)$$

式中: NZ 为沿轧制方向相邻两排对应节点的编号差; X 为旧节点坐标; x 为新节点坐标。

当单元内角不满足要求时, 需要在轧件所在的空间内重新计算各节点的坐标。针对中厚板的变形特点, 将其处理为

$$x_{N0+j} = X_{N0} \quad (5)$$

式中: $N0$ 为轧制方向上各排节点的初始编号; $j = 1, NZ - 1$ 。

图 3 所示为网格重划分前后轧件单元的质量对比。可见其单元边长比及内角均获得了明显改善。

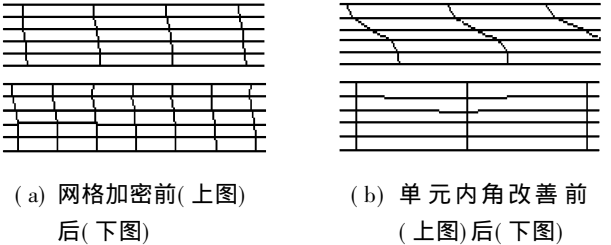


图 3 网格重划分前后单元的质量对比

Fig. 3 Comparisons of mesh quality before and after refinement

2.2 参数传递

各道次的计算结果可以节点参数的方式由计算程序输出到指定文件, 当网格重新划分后, 根据新节点在旧网格中的相对位置, 可以建立插值函数以计算所对应新节点的各项数值。为了将这些参数作为初始条件赋值给下一道次的计算模型, 以前一道次的有限元输入数据为模版开发了 Fortran 程序, 将下一道次的节点坐标、单元构成和节点初始条件写成数据文件, 从而自动生成了下一道次的有限元输入数据。

3 模拟结果与讨论

应用以上方法对某厂中厚板的 7 道次热轧过程进行了连续模拟, 坯料的原始宽度和厚度分别为 840 和 40 mm, 轧制规程见表 1。根据轧制变形的对称性, 取其宽度和厚度的 $1/2$ 建立有限元模型。另外, 考虑到第一道次的变形区长度约为 85 mm, 为了减小计算量, 轧制计算模型的长度取为 400 mm。

图 4 给出了各道次温度模拟结果及其出口处表面温度的实测值。可见, 表面温度的模拟值与实测值较接近。在辊缝内, 因轧辊的急冷作用而导致轧件表面温度迅速下降, 塑性功转化的热量导致心部温度稍有上升; 轧件出辊缝后, 由于厚度方向的温度差,

表 1 轧制规程
Tab. 1 Rolling schedule

道次	压下量/ mm	出口厚度/ mm	轧辊直径/ mm	轧辊线速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	17.81	22.80	822	1.31
2	6.82	15.38	822	1.95
3	4.34	10.47	822	2.91
4	2.30	7.69	617	4.04
5	1.50	5.89	617	5.46
6	1.21	5.00	617	6.58
7	0.04	4.38	617	7.42

心部热量迅速传至表面, 使表面温度回升而心部温度下降. 这种变化过程符合实际规律.

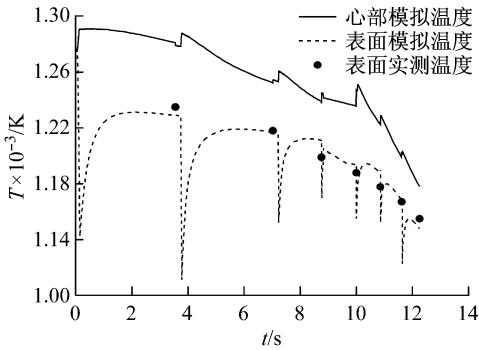


图 4 各道次温度模拟结果及其出口处表面温度的实测值
Fig. 4 Temperature transformation of each pass

图 5 所示为各道次轧制力(F)的模拟值与实测值对比, 可见两者吻合较好, 最大误差为 10.9%.

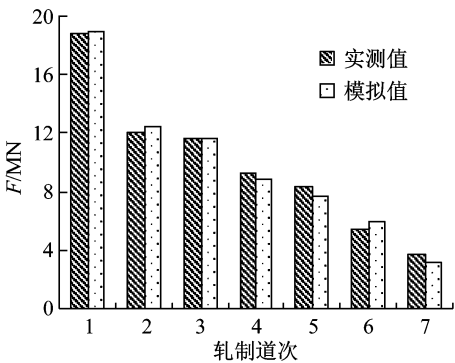
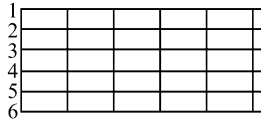
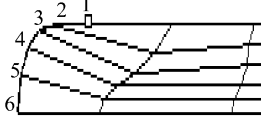


图 5 轧制力模拟值与实测值对比
Fig. 5 Comparison of rolling force between simulated and actual

图 6 所示为经过三道次轧制后轧件头部单元形状与原始形状的对比如. 可见, 因轧制过程的表面摩擦而导致头部侧面节点发生了上翻现象. 在实际生产中可以通过减小摩擦来缓解头部上翻的畸变. 在模型中, 角部单元已不再是六面体单元, 因此, 为了保



(a) 原始轧件头部



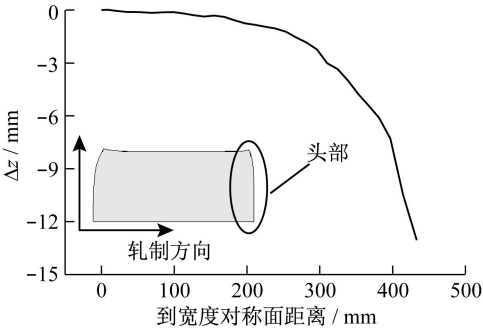
(b) 经三道次轧制后轧件头部

图 6 经过三道次轧制前后轧件头部单元形状

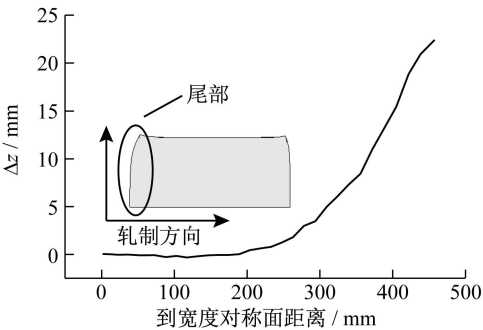
Fig. 6 Deformation of the head after three passes

证其后道次的模拟精度, 单元的重划分很有必要.

图 7 所示为第 3 道次轧后, 在轧件头部和尾部沿宽度方向各取一排节点, 各节点与中心对称面处的节点在轧制方向上的位移差 Δz 沿宽度方向分布. 可见头部一排节点宽度对称面处的位移最大, 边部节点的位移最小, 而尾部一排节点规律恰好相反, 导致轧件最终呈现头尾舌形的变形特征.



(a) 轧件头部一排节点轧制方向



(b) 轧件尾部一排节点轧制方向

图 7 轧件头尾节点轧制方向位移

Fig. 7 Displacement in rolling direction of the nodes on the head and trail

图 8 给出了模拟所得各道次轧件厚度及轧辊变形沿宽度方向的分布曲线. 轧辊变形包括压扁及弯曲 2 部分, 从中心到边部呈逐渐减小趋势, 局部略有增大. 由第 1、第 2 道次轧件厚度的变化可见轧件中间相对较薄, 在 1/4 宽度处最厚, 而边部出现骤减

区,这主要是由于轧件中间处于平面应变状态,仅发生压下及延伸变形,而且弯辊力的效果在中部比边部明显,综合作用导致轧件中间处厚度相对较小;而轧件边部处于平面应力状态,金属宽展相对容易,同时边部的轧辊压扁最小,导致边部的上、下工作辊间

辊缝最小,所以边部轧件厚度发生骤减;在 1/4 宽度区域弯辊效果没有中间处明显,轧辊压扁变形较边部大,所以此处的轧件厚度略有增加.随着道次压下量的减小,轧件厚度趋于均匀,但由于边部金属流动相对容易,轧件仍存在边部减薄区.

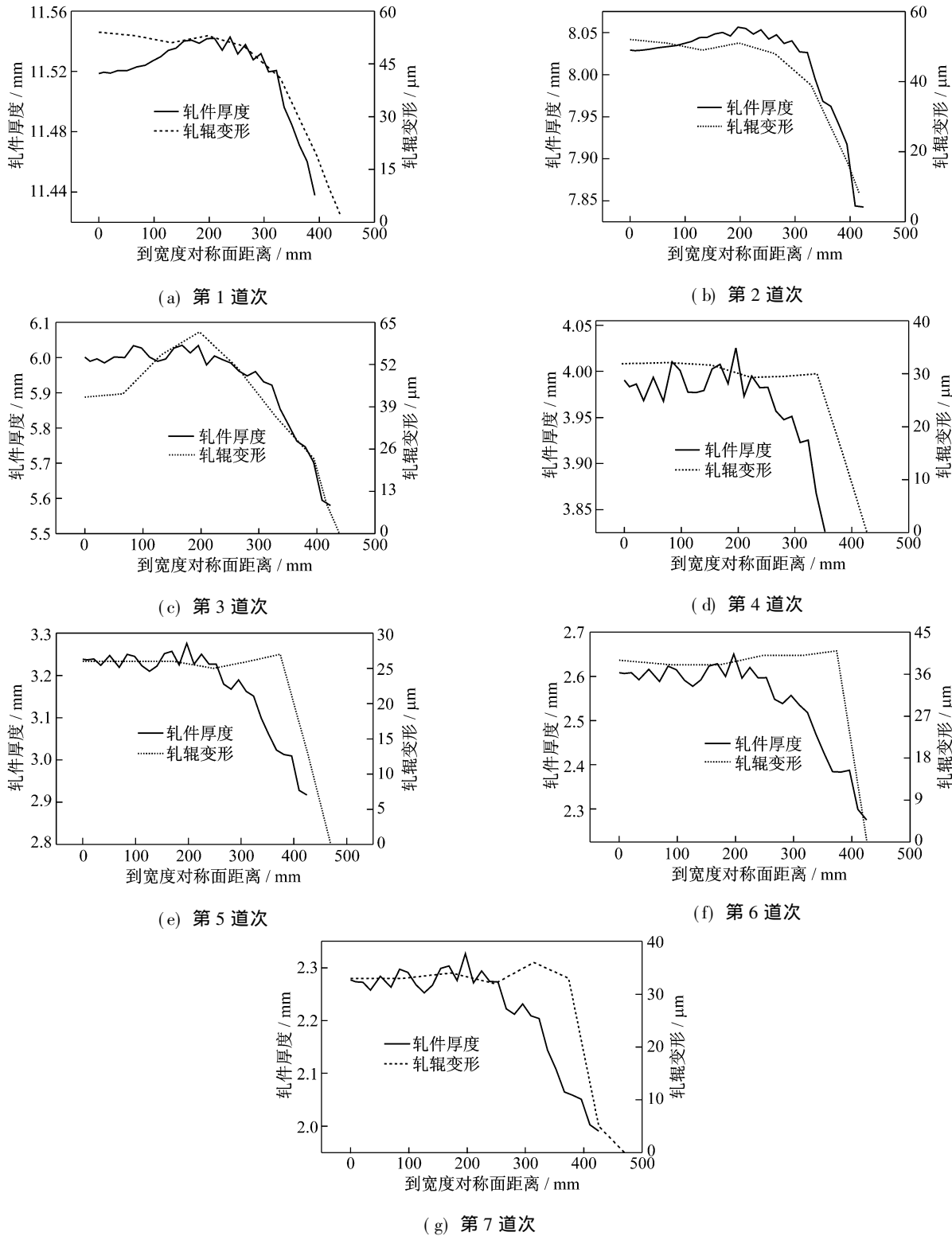


图 8 各道次轧件厚度及轧辊变形沿宽度方向的分布情况

Fig. 8 Distribution of roll deformation and plate thickness along width direction

4 结 语

本文针对多道次热轧中厚板的生产特点建立了三维弹塑性热力耦合有限元模型,开发了等效空弹性轧辊模型,在保证计算精度的前提下节约了计算时间,为热轧中厚板多道次连续模拟奠定了基础.模拟所得轧辊变形及轧件厚度沿宽度方向的分布曲线符合实际轧制特点,准确地反应了轧辊弹性变形对轧件变形的影响,有利于进行板形研究.

所开发的网格重划分模块及参数传递模块避免了网格畸变所带来的计算困难,并使后一道次的模型建立在前一道次的计算结果之上,解决了热轧中厚板多道次连续模拟中的困难,实现了多道次热轧过程的连续模拟.模拟所得各道次的轧制力、温度结果与现场实测数据吻合并具有较高精度.

参考文献:

- [1] Dyja H, Korczak P. The thermo-mechanical and micro-structural model for the FEM simulation of hot-plate rolling [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 1999, 30: 463-467.
- [2] 董洪波, 康永林. 有限元模拟技术在板带钢轧制中的应用[J]. 轧钢, 2004, 21(2): 44-47.
DONG Hong-bo, KANG Yong-lin. Application of finite element simulation in hot rolling of strip [J]. **Steel Rolling**, 2004, 21(2): 44-47.
- [3] 姚林龙. 大型工业轧机的三维板带轧制解析[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(1): 57-61.
YAO Lin-long. Three-dimension analysis of strip rolling in a large production mill [J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2003, 25(1): 57-61.
- [4] 喻海良, 刘相华. 多道次立-平轧制热力耦合有限元分析[J]. 热加工工艺, 2007, 36(1): 85-88.
YU Hai-liang, LIU Xiang-hua. Coupling analysis of multipass V-H rolling process by FEM [J]. **Hot Working Technology**, 2007, 36(1): 85-88.
- [5] 刘才, 崔振山. 板材热轧热力耦合有限元模拟[J]. 机械工程学报, 1998, 34(4): 35-39.
LIU Cai, CUI Zhen-shan. Thermo mechanical coupled finite element modeling of slab hot rolling [J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 1998, 34(4): 35-39.
- [6] GUO Zhong-feng, LI Chang-sheng, XU Jian-zhong. Analysis of temperature field and thermal crown of roll during hot rolling by simplified FEM [J]. **Journal of Iron and Steel Research**, 2006, 13(6): 27-30.
- [7] 单辉祖. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [8] 张金玲, 崔振山, 胡宏勋. 多道次中厚板热轧过程的综合数值解析法模拟[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 32-36.
ZHANG Jin-ling, CUI Zhen-shan, HU Hong-xun. Simulation of multi-pass plate hot rolling by a mixed numerical and analytic method [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2008, 42(1): 32-36.
- [9] 朱谷君. 工程传热传质学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1989.
- [10] 陈如欣, 胡忠明. 塑性有限元法及其在金属成形中的应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [11] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(上接第 64 页)

- [3] 蒋爱萍, 韩志刚, 韩丹. 无模型控制系统在加热炉温度控制中的应用[J]. 控制工程, 2004, 11(5): 388-391.
JIANG Ai-ping, HAN Zhi-gang, HAN Dan. Application of model free control systems to temperature control of heat furnace [J]. **Control Engineering of China**, 2004, 11(5): 388-391.
- [4] LÜ F L, CHEN S B, DAI S W. A model-free adaptive control of pulsed GTAW [C]//**Lect Notes Contr Inf**. Berlin: Springer Press, 2007, 362: 333-339.
- [5] 王建军. 铝合金脉冲 TIG 焊熔池动态特征的视觉信息获取与自适应控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [6] Fan Chong-jian, LÜ Feng-lin, Chen Shan-ben. A visual sensing system for seam tracking and welding control in aluminum gas tungsten arc welding [C]//**The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Taiwan: IEEE Press, 2007: 2700-2705.
- [7] 樊重建, 王建军, 陈善本. 铝合金钨极弧焊熔池被动视觉信息传感[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 42-45.
FAN Chong-jian, WANG Jian-jun, CHEN Shan-ben. Passive visual sensing in aluminum alloy weld pool in gas tungsten arc welding [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2008, 42(1): 42-45.
- [8] 侯忠生. 非参数模型及其自适应控制理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 134-140.