

连铸板坯矫直过程应力应变的有限元模拟

邢广厂 朱苗勇 林启勇 刘旭东
(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要 采用弹塑性有限元分析法, 对拉速 1.0 m/min、厚度 230 mm 的板坯, 在 3 套不同的辊列布置的单点矫直、四点矫直、连续矫直进行应力应变的有限元模拟。结果表明: 铸坯等效 Von Mises 应力值和铸坯水平方向应力按单点矫直、四点矫直、连续矫直依次减小; 与单点矫直相比, 四点矫直减小了每次矫直的变形量和应变速率; 连续矫直时, 在变形区内等效应变沿长度方向呈线性变化, 最大值为 1.11%, 等效塑性应变速率较低, 约为 $5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 其应变速率最低, 是比较理想的矫直方式。

关键词 连铸板坯 矫直 应力应变 有限元法

Finite Element Simulation of Stress and Strain of Concasting Slab during Straightening

Xing Guangchang, Zhu Miaoyong, Lin Qiyong and Liu Xudong
(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The finite element simulation of stress and strain of 230 mm slab with casting rate 1.0 m/min and 3 different roller ways layout-single-point, four-point and continuous straightening have been carried out by elastoplastic finite element method. The results showed that the equivalent Von Mises stress and horizontal stress of slab decreased in turn in single-point, four-point and continuous straightening; compared with single-point straightening, the each point straightening stress and strain rate decreases obviously in four-point straightening; and in continuous straightening, the equivalent plastic strain changes linearly in deformation area up to maximum value 1.11% with lower equivalent plastic strain rate-about $5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, its strain rate is minimum, it is a ideal straightening process.

Material Index Concasting Slab, Straightening, Stress and Strain, Finite Element Method

现阶段, 高效连铸技术备受重视。高效连铸技术是一项系统技术, 其中连铸坯的矫直技术就是起到重要作用的辅助技术。铸坯矫直过程是铸坯在外力作用下由弯变直的过程。目前, 铸坯矫直已从铸坯的固态矫直发展到带液芯矫直, 从一点矫直到多点矫直和连续矫直, 都体现了矫直技术的不断进步^[1]。

试验利用 Marc 软件分别模拟分析了连铸坯单点矫直、四点矫直、连续矫直的运行过程, 得到了连铸坯矫直形式的基本变形特征, 可为板坯辊列提供设计依据和生产指导。

1 有限元模型建立

模拟的主要目的在于揭示连铸板坯矫直过程中的变形规律, 在模拟过程中, 不考虑连铸坯料鼓肚、错位的影响, 矫直过程完全凝固, 材料遵循密塞斯屈服准则和普朗特-柔埃斯流动准则, 忽略铸坯宽面对

表 1 铸坯材料的物理性能

Table 1 Physical properties of casting slab

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ ($10^{-5} \cdot \text{K}^{-1}$)
7 400	27.52	559.044	25.13	0.356 2	2.667

窄面变形的影响。

铸坯材料的物理性能见表 1^[2-4]。

单点矫直的有限元模型见图 1(a), 铸机基本圆弧半径为 10.5 m。四点矫直的有限元模型见图 1(b), 铸机基本圆弧半径为 10.5 m, 铸机半径依次从 13.5 m 到 19.5 m 到 38.0 m, 最后变成 ∞ 。连续矫直的有限元模型见图 1(c), 铸机半径为 10.5 m。连铸坯厚度为 230 mm, 拉坯速度为 1.0 m/min。

连铸坯料为可变形接触体, 辊子为具有热传导的刚性接触体。边界条件有铸坯下部终点的位移约束, 铸坯表面与周围环境的对流和辐射传热边界条

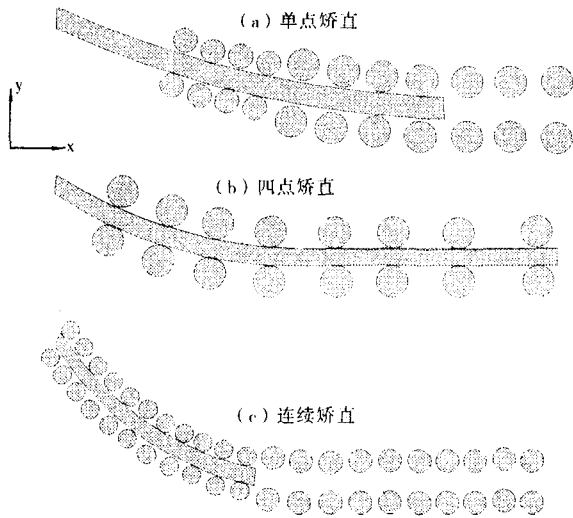


图 1 连铸板坯矫直的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of conasting slab straighten process

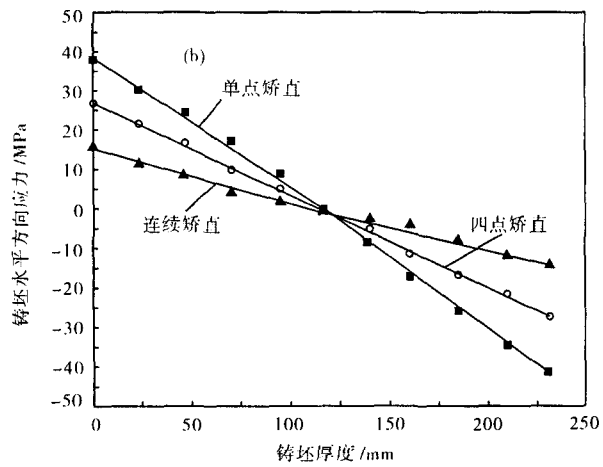
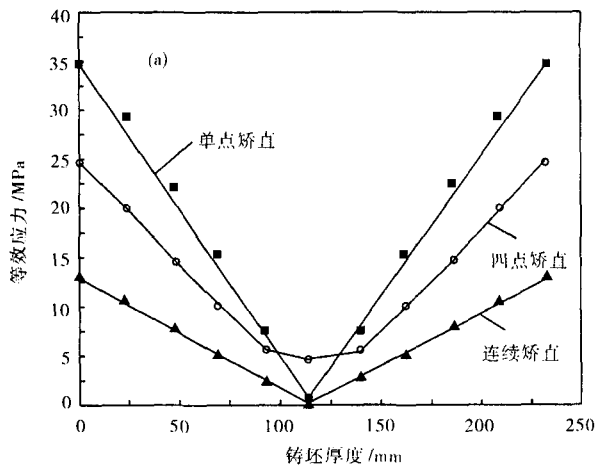


图 2 铸坯等效 Von Mises 应力(a)、水平方向应力(b)沿厚度方向的分布

Fig. 2 Distribution of equivalent Von Mises stress (a) and horizontal stress (b) in direction of slab thickness

中内侧弧受拉,外侧弧受压,并且内弧侧的应力略大于外弧侧,中性面偏向于外弧侧,所以内弧侧比外弧侧易产生裂纹。应力数值按单点矫直、四点矫直、连续矫直的顺序依次减小。

2.2 沿铸坯表面的应变分布

图 3(a)可以看出,单点矫直开始后,塑性应变急剧增大,在很短的时间内达到最大,最大值约为 1.09%。由矫直应变计算公式^[5],可得单点矫直时铸坯表面的总应变为 1.10%,模拟结果和理论值相当接近,说明了单点矫直模拟变形结果的正确性。

四点矫直把单点矫直 1 次完成的变形分 4 次完成,较大的减小了应变值,显著降低了铸坯产生内裂

纹的几率,坯料与辊子之间的接触传热边界条件以及考虑铸坯的塑性变形热的传热边界条件。载荷工况采用热机耦合,求解迭代过程采用全牛顿拉普逊方法,分析调用更新的拉格朗日大位移程序,采用相对位移容差作为非线性迭代的收敛判定依据,采用固定步长控制增量步。

2 结果与分析

2.1 沿铸坯厚度方向的应力变化规律

由图 2(a)可以看出,沿着铸坯的厚度方向,等效应力数值在外表面最大,中部逐步降低,并且沿着铸坯中心呈对称分布。单点矫直时铸坯表面等效应力值最大,其次为四点矫直,连续矫直显著降低了等效应力的数值,减小了铸坯产生内裂纹的几率,是比较理想的矫直方式。

由图 2(b)可知,铸坯水平方向正应力从上表面到下表面由正值变化到负值,说明铸坯在矫直过程

纹的几率。模拟得到 4 次变形大小依次为 $\epsilon_1 = 0.24\%$, $\epsilon_2 = 0.26\%$, $\epsilon_3 = 0.29\%$, $\epsilon_4 = 0.30\%$, 4 次变形的总和为 1.09%。模拟结果和矫直应变计算公式^[5]得到的理论值也相当接近,说明了多点矫直模拟变形结果的正确性。

连续矫直在变形区内,等效应变沿长度方向呈线性变化,由零逐步上升到最大值 1.11%,变形比较均匀。

从图 3(b)可以看出,对于单点矫直,在很短的时间内变形速率急剧上升到 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,随后变形速率急剧下降到零。四点矫直可以极大地降低应变速率,在 4 个矫直点附近,应变速率的峰值几乎相

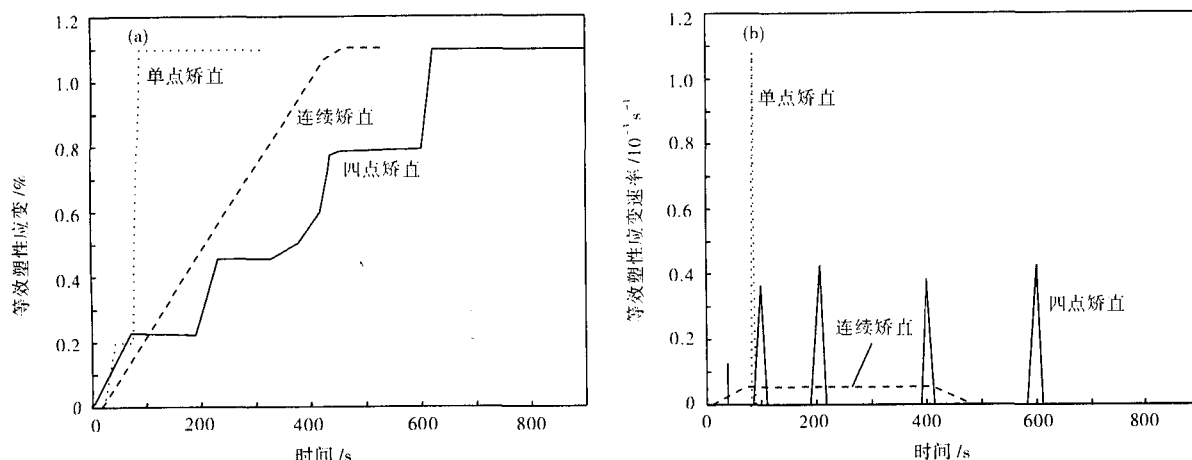


图 3 铸坯上表面等效应变(a)、上表面等效应变速率(b)的变化

Fig.3 Variation of equivalent plastic strain (a) and equivalent plastic strain rate (b) of upper surface of casting slab

等,近似为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。连续矫直铸坯在矫直区内表面等效塑性应变速率比较低且基本保持恒定,约为 $5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,连续矫直的应变速率最低,产生内裂纹的几率也最小。

3 结论

(1)铸坯等效应力和铸坯沿水平应力数值按单点矫直、四点矫直、连续矫直依次减小,应力值在外表面最大,沿着铸坯中心呈对称分布,内弧侧比外弧侧易产生裂纹。

(2)单点矫直开始后,塑性应变和应变速率急剧增大,最大值分别约为 1.09% 和 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,随后急剧下降到零。

(3)与单点矫直相比,四点矫直减小了每次矫直的变形量,在 4 个矫直点附近,应变速率的峰值几乎相等,近似为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

(4)连续矫直等效应变沿长度方向呈线性变

化,由零逐步上升到最大值 1.11%,等效塑性应变速率比较低且基本保持恒定,约为 $5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。连续矫直的应变速率最低,是比较理想的矫直方式。

参考文献

- 曹广畴. 现代板坯连铸. 北京:冶金工业出版社,1994:92
- Friedman E. Thermo Mechanical Analysis of the Welding Process Using the Finite Element Method. Transaction of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, August, 1975:206
- Wray P, Holmes M F. Plastic Deformation of Austenitic Region at Intermediate Strain Rates. Metallurgical Transactions A, 1975, 6(6):1189
- Samarasekera I V, Brimacombe J K. The Thermal Field in Continuous-casting Moulds. Canadian Metallurgical Quarterly, 1979, 18:251
- 文石斧. 现代弧形连铸机的多点矫直和连续矫直. 重型机械, 1989 (1):60

邢广厂(1972-),男,硕士,2006年东北大学毕业,材料加工过程中的有限元模拟。

收稿日期:2006-04-28

下期要目

重钢 5 流方坯连铸中间包控流装置的数理研究	陈登福等
Fe ₄ N 及氮在铁基体中的平衡固溶度公式	雍岐龙等
齿轮钢淬火过程多场耦合分析	宋广胜等
BH08G 焊接用钢的热变形行为及动力学再结晶模型	魏立群
连铸坯凝固偏析的原位统计分布分析	薛正良等
280 mm × 380 mm 方坯连铸结晶器钢水流场的数值模拟	刘坤等
铜含量对超高强度低碳贝氏体钢力学性能的影响	宋新莉等