

· 试验研究 ·

热轧 U 型钢板桩精轧过程金属流动行为的有限元分析

刘 升¹ 张振兴² 龚 娜¹ 洪 玫¹ 商贵芳¹ 金 巧¹

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁集团公司港务公司, 武汉 430082)

摘 要 针对热轧 U 型钢板桩(SY390BZ /% :0.23C、1.60Mn、0.44Si、0.18V、0.18Ti、0.05Nb) 轧制过程中产生翘曲缺陷, 采用有限元分析软件 ABAQUS 显式动力学算法, 结合实验室试验测量参数, 对钢板桩的精轧过程进行了仿真计算。在仿真计算的基础上, 根据轧制平面内节点位移矢量分布情况, 分析了轧件横向和纵向断面内金属流动规律。模拟结果显示轧件断面在孔型轧制的压下方向上存在零位移线, 表明 U 型钢板桩轧制中坯料翼缘和锁口处在轧制压力方向上轧件内金属流动存在位移中性面, 并伴有轧件锁口凸缘处金属流动过快, 腹板处金属流动较慢而产生翘曲的现象。

关键词 U 型钢板桩 SY390BZ 钢 精轧 金属流动行为 有限元分析

Finite Element Analysis on Metal Flow Behavior of Hot Rolled U-Section Steel Sheet Pile during Finishing Rolling Process

Liu Sheng¹, Zhang Zhenxing², Gong Na¹, Hong Mei¹, Shang Guifang¹ and Jin Qiao¹

(1 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Stevedoring Co, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp, Wuhan 430082)

Abstract According to the buckling defects of hot rolled U-section sheet pile (steel SY390BZ /% : 0.23C, 1.60Mn, 0.44Si, 0.18V, 0.18Ti, 0.05Nb) formed during rolling process, the numerical-simulated calculation on finishing process of sheet pile has been carried out by using the dynamic-explicit-calculated method of finite element software ABAQUS and combined with experimental-measured parameters in lab. Based on simulation calculation, according to the distribution of node displacement vector on rolling plane, the rule of metal flow pattern of lateral and longitudinal section is analyzed. Simulation results show that there are zero displacement lines on work-piece section in pass reduction direction, it indicates there is a neutral flow plane for work piece metal flow in rolling force direction at flange and locker of U-section sheet pile work piece in rolling process, in company with fast flow of metal at locker flange and slow flow of metal at web of work piece thus to occur buckling phenomenon.

Material Index U Section Steel Sheet Pile, Steel SY390BZ, Finishing Rolling, Metal Flow Behavior, Finite Element Analysis

随着我国基建工程的不断发展, 国内对于热轧钢板桩^[1]的需求量不断增多, 如今计算机仿真分析在型钢轧制过程中的应用^[2-3]逐渐深入, 尤其在孔型设计的优化、产品尺寸的预估以及工艺优化等方面都有着广泛的应用。钢板桩的轧制过程是孔型轧制工艺中一个典型的几何、材料和边界三重非线性问题, 其腹板和翼缘的相互作用使得轧制中金属流动极其复杂。

传统经典工程分析法无法分析此种复杂三维金属流动和应力应变规律, 借助有限元分析软件对典型 H 型钢的轧制过程^[4-6]进行模拟分析已取得了很好的工业生产效果。本文通过采用 ABAQUS 有限元软件, 结合钢厂生产线的实际情况, 对热轧 U 型钢板桩的精轧过程进行了仿真计算, 深入分析了精轧过程中金属流动情况, 为解决缺陷提供数据支撑

和理论支持。

1 模型与边界条件

1.1 显式动力学的有限元基本理论

在 abaqus/explicit 中是应用中心差分法对运动方程进行显式的时间积分, 其应用一个增量步的动力学条件计算下一个增量步的动力学条件。

在动力学有限元理论中, 系统的平衡方程可以如下描述:

$$M\ddot{u}(t) + K\dot{u}(t) + Iu(t) = P(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ - 分别表示系统的节点加速度向量和节点速度向量; M 、 K 、 I 、 P - 分别表示系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点外加载荷向量; t - 时间; Δt - 时间变化量。

中心差分计算方法中节点加速度和节点速度可

以通过位移来表示,如下式所示:

$$\ddot{u}_i = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{i-\Delta t} - 2u_i + u_{i+\Delta t}) \quad (2)$$

$$\dot{u}_i = \frac{1}{2\Delta t}(u_{i+\Delta t} - u_{i-\Delta t}) \quad (3)$$

将(2)式和(3)式代入(1)式,可以得出位移在各离散时间点的关系式(4):

$$u_{i+\Delta t} \left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}K \right) = P(t) - u_i \left(I - \frac{2}{\Delta t^2}M \right) - u_{i-\Delta t} \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}K \right) \quad (4)$$

1.2 模型的简化和网格的划分

钢厂生产型号为 SP-U500 × 200 × 16.0 的热轧 U 型钢板桩产品,先经两辊开坯孔型轧机往复轧制,再由粗轧孔型轧制,后经 DCBA 孔型完成精轧过程。

本文为研究精轧过程坯料的金属流动性规律,从 D 孔型开始进行仿真模拟分析。坯料尺寸和精轧 DCBA 对称孔型图如图 1 所示。钢板桩断面满足对称型,但是根据试验测量得知轧制过程中其翼缘

和锁扣处存在形变的不均匀性,故不对模型进行尺寸简化。进行轧制过程的仿真时,模型中轧件长度选用 1 500 mm,为了以研究轧件的流动变形为主,故将轧辊简化为刚体,轧件为弹性体,采用 6 面体单元进行自适应划分网格,并在圆角方向尽可能均匀划分,模型如图 2 所示。

1.3 材料属性等基本计算参数

热轧 U 型钢板桩的材料为 SY390BZ,其化学成分(%)为 0.23C、1.60Mn、0.44Si、0.010P、0.002S、0.18V、0.05Nb、0.18Ti 的铸坯,为简化计算模型可以看作是理性弹塑性材料,计算使用的材料常数如下:轧件密度 $\rho = 7.825 \text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$;泊松比为 $\nu = 0.3$;屈服极限 $\sigma_s = 390 \text{ MPa}$ 。运用增量加载法的修正 Newton-Raphson 算法^[7]进行轧制过程中节点的非线性大变形位移问题求解,材料属性遵循 Von mises 屈服准则,基本计算参数如表 1 所示。

1.4 接触体及边界条件的定义

建立模型时精轧 4 个道次的接触体主要为上下

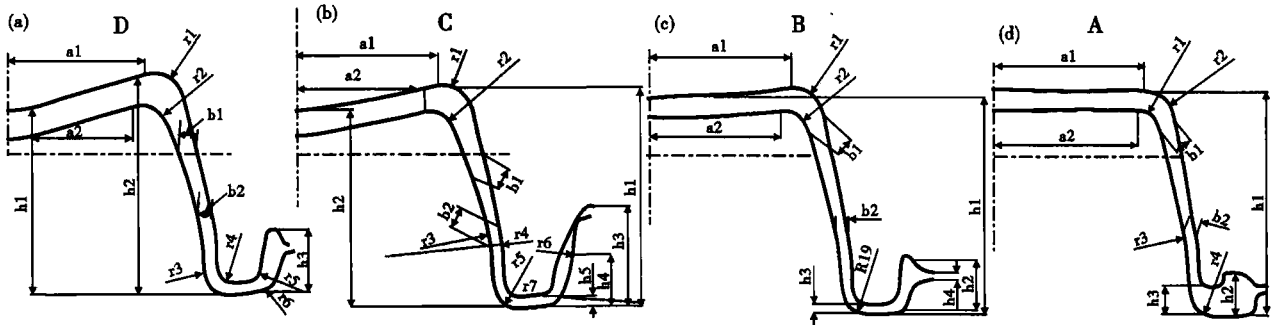


图 1 D(a)C(b)B(c)A(d)轧机孔型尺寸
Fig.1 Pass dimension of DCBA mill: (a) D, (b) C, (c) B, (d) A

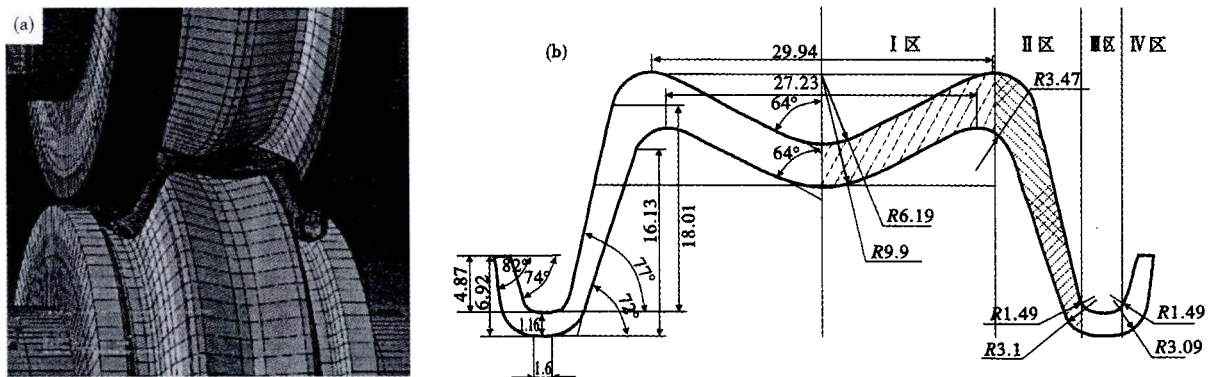


图 2 U 型钢板桩三维动态弹塑性有限元模型:(a) D 孔;(b) 坯料断面图

Fig.2 Three dimensional elastic-plastic dynamic finite element model of U section steel sheet pile; (a) D pass; (b) sectional view of work piece

表1 基本参数和轧制规程表

Table 1 Basic rolling parameters and rolling regulation schedule

序号	辊型	翼缘厚度值/mm	孔缝值/mm	轧制转速/(r·s ⁻¹)
1	D _上	11.6	23	0.538
2	D _下			0.488
3	C _上	10.1	20	0.553
4	C _下			0.459
5	B _上	9.4	17.5	0.411
6	B _下			0.594
7	A _上	9.6	16	0.408
8	A _下			0.631

注: 辊料面对面接触; 库伦摩擦; 主动传动; 实刚性辊

辊和轧件的接触,在模拟轧制时为了精确计算过程中将会出现的前滑现象,其求解时的边界条件及定义的具体设置如下^[8]:

(1)上下孔型轧辊:分别定义上下辊为通过位置控制的刚体,在接触体定义中分别给出转动中心坐标及三维转动角度,并作为主动辊驱动钢板桩完成轧制;定义上下辊和钢板桩的接触为刚体-弹塑性体接触,接触面之间设定为现场测得的摩擦系数。

(2)轧件咬入条件:为了使得模拟计算过程更加接近实际,坯料由初始位置至临界咬入点是通过传动辊施加的推力,在模型中直接定义初始情况是由外加一小推力作用在坯料一端,使其具有进入孔型中的动力,待其稳定轧制时,该推力就取消。

2 仿真结果及分析

2.1 坯料在孔型轧制中沿伸长方向的金属流动规律及位移分布

U型钢板桩属于异形断面,较之工字钢、H型钢、T字钢和槽钢都要复杂,为便于分析可将钢板桩分4个部分:腹板部、翼缘部、锁口底部腰处和锁口端部凸缘,分别如图2(b)中的I、II、III、IV区。模型中定义Y向为压下方向,Z向为轧制方向,X向为轧件宽展方向。图3中(a,b,c,d)均是描述压下方

向金属流动变化情况。

图3(a)表示的是在咬入瞬间首先和轧辊接触的是锁口部分,其质点在Y向的流动变化图,图3(b)是锁口轧制后接着被咬入的是腹板肩部,其质点在Y向流动变化图,图3(c)是钢板桩截面全部被咬入时各处内部质点Y向流动变化图,图3(d)则是轧件在D孔型中进入稳定轧制阶段截面质点在Y向的流动变化图。由图3可以看出钢板桩在轧制时同一截面各部分质点流动不均,导致这种现象的原因可能是在异形断面轧制时轧件会产生纵向附加拉应力和附加压应力。

图3中首先出现的是锁口部位的延伸,接着是腹板部位的延伸,截面腹板面积大于锁口,其质点位移无法直接传递到锁口处质点,使得同一时间内锁口处和腹板处延伸量不等,而轧件又是一个整体,受轧件整体性限制,延伸大的部分受延伸小的部分的牵制,使延伸大的部分锁口处受到附加拉应力作用,延伸小的部分腹板处受到附加压应力作用,由于附加拉压应力的存在改变了质点在轧制中的位移流动方向,于是形成了图3(c)中的翼缘处的质点位移流动的变化。随着轧制的继续进行,锁口处的延伸愈来愈大再联合腹板处的延伸可能导致翘曲现象。

通过分析图3可知,翼缘内侧金属的轧制状态刚好是侧壁压下;翼缘内表面金属与辊面侧壁接触,两者之间产生一定的粘着作用,在轧辊旋转作用下,与翼缘内侧接触的辊面上质点均有向压下方速度分量,带动翼缘内侧金属向下流动;而腹板处相当于开口切深轧制,金属向边部翼缘端自由宽展;锁口底部相当于平板轧制,该处金属流动遵循平板轧制规律,分别向锁口凸缘和翼缘底部流动;锁口凸缘相当于开口切深轧制,其金属向边部凸缘底部自由流动。故而在I区和II区之间以及III区和IV区之间产生一处流动很小的区域,称为零位移线区域或是位移中性面区域,在轧制过程中可作为调节轧制参数的依据。

2.2 坯料在孔型轧制中沿宽展方向的金属流动规律及位移分布

图4是描述轧件在轧制阶段宽展方向的金属位移矢量图,易看出锁口凸缘部分变形是不均匀的,腹板肩部的变形也是不均匀的,图4(b)是轧件在X向位移矢量图,易看出轧



图3 DCBA孔型中坯料Y向位移图:(a)锁口、(b)腹肩、(c)腹板(Y向)流动、(d)稳定轧制阶段轧件Y向位移变化图

Fig.3 Diagram of displacement of work piece in Y direction in DCBA passes; flow at (a) locker, web shoulder (b), (c) web in Y direction and (d) diagram of displacement of work piece in Y direction during stable rolling stage

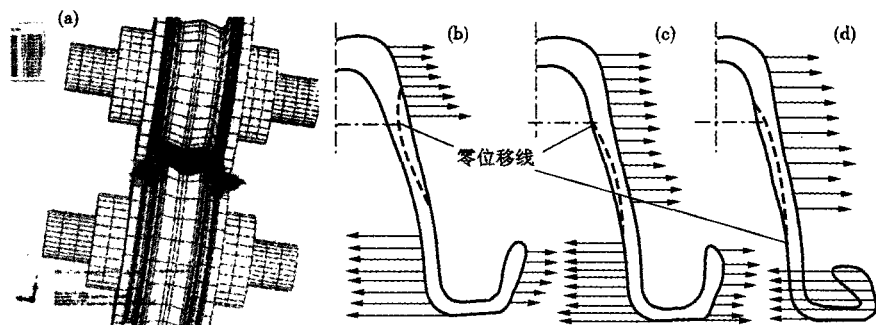


图 4 DCBA 孔型中坯料 X 向位移图: (a)D、(b)C、(c)B 和 (d)A 孔位移矢量
 Fig. 4 Diagram of displacement of work piece in X direction in DCBA passes: displacement vector of pass D (a), C (b), B (c) and A (d)

件轧制时在宽展方向的金属流动也是不均匀。

通过分析图 4 中轧件在轧制时各处的 X 向位移变化图和位移矢量图可以发现:热轧钢板桩轧制过程中金属流动在宽展方向存在零位移线,图中虚线处;在沿着轧制方向上形成纵向位移中性面。当改变孔型压下参数和坯料的原始尺寸厚度,这种特殊零位移线也在变化:随着压下量的增加,零位移线向下延伸,腹板肩部金属流动也变得过激。在现场实际生产中,热轧 U 型钢板桩截面上由于圆角较多,在腹板肩部处由于金属流动变化过激容易导致微裂纹缺陷,这是由于零位移线在大压下量下移动的原因造成。

3 结论

(1) 热轧 U 型钢板桩的轧制断面,可将其分成 4 个简单区域加以分析研究,其内部金属流动位移变化情况可分为平板轧制和开口切深孔型轧制两种轧制状态,且两种轧制状态的金属之间存在零位移线和位移准中性面。

(2) 轧件在轧制时也会存在零位移线和纵向位

移中性面,且在压下参数和坯料原始尺寸发生改变时也会产生一定的变化;压下量增大,零位移线向下方移动。这种变化与 U 型钢板桩实际生产时出现微裂纹的位置有一定的联系,在腹板圆角处易出现微裂纹。

(3) 模拟分析中存在翘曲缺陷和内裂纹缺陷与生产实际十分吻合。

武汉科技大学青年科技骨干培育计划资助基金(2011xz005)

参考文献

- [1] 任安超,周桂峰,吉玉,等. 热轧钢板桩的发展和前景[J]. 特殊钢,2009,30(1):22-24.
- [2] 李浩进,杭乃勤,孙志亮,等. 钢板桩轧制过程充型模拟及轧制力有限元分析[J]. 特殊钢,2012,33(1):5-8.
- [3] 王欣,王长松,尹佐勇,等. H 型钢轧制过程的计算机仿真[J]. 北京科技大学学报,2003,25(6):560-562.
- [4] Xi T, Qin Y F, Zhang J. Analysis of Deformation of Breakdown Rolling of H-beam[J]. Steel Roll,2004,16(12):47-49.
- [5] Wang H G, Yang X D, Zang Y. Research on Residual Geometrical Shape of H-beam Rolling Straightening[J]. Forging Technol, 2006,31(4):109-111.
- [6] Duan M N, Zang Y, Ma G T, et al. The FEM Model of H-beam Rolling and its Application[J]. Iron Steel,2006,46(11):42-45.
- [7] 刘升,李浩进,王伯文. 方圆管固定短芯棒拉拔工艺分析[J]. 武汉科技大学学报,2011,34(6):414-418.
- [8] 崔丽红,臧勇,章博,等. 多辊矫直过程中 H 型钢断面的应力演变规律[J]. 北京科技大学学报,2008,30(8):942-946.

刘升(1984-),男,博士研究生,工程师,材料加工过程的数值模拟以及产品质量控制、轧钢工艺优化及设计。
 E-mail:Liu.sh2008@163.com

收稿日期:2013-03-25

下期要目

250 t 钢包精炼底吹氩吹孔位置优化的水模型试验	倪修华等
150 t RH 精炼终点钢水酸溶铝含量的控制	李双江等
150 t 钢包底吹氩喷嘴布置优化的水模型研究	陈序等
100 kg 中频感应炉底吹氧搅拌的水模拟研究	齐洪杰等
拉速对小方坯结晶器液面波动影响的数值模拟	韩毅彤等
高铝无磁钢 20Mn23Al2V 板坯连铸结晶器保护渣的研究	张宇斌等
70 t BOF-LF-VD-CC 流程转炉钢氮含量控制的工艺实践	郭志强等
120 t 顶底复吹转炉双渣脱磷一次倒渣的工艺实践	武贺等
冷轧奥氏体不锈钢带材宽度对板形影响的分析	李志峰等