

张力减径过程管形预报的有限元模型

于 辉¹, 汪飞雪¹, 黄华贵¹, 徐海亮¹, 杜凤山¹

(1. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 根据张力减径机的孔型特点, 建立了全系统三维弹塑性有限元分析模型, 对 18 机架张力减径过程进行数值模拟, 通过研究横向壁厚分布, 得出减径钢管产品沿圆周方向的壁厚分布不均, 产生内多边形缺陷, 并将模拟结果与实测结果进行对比, 验证了所建立模型的准确性。本模型可以对钢管减径进行产品质量预测, 为分析产品缺陷、指导工艺设计提供了依据。

关键词: 钢管; 有限元; 张力减径; 横向壁厚

中图分类号: TG335.7 **文献标识码:** A

0 引言

张力减径是热轧无缝钢管或焊管生产的一种加工方法, 张力减径机 (SRM) 作为关键设备对尺寸精度 (主要包括壁厚精度和外径精度) 控制的好坏直接影响产品的质量和成材率^[1]。钢管张力减径 (简称张减) 时金属变形发生在三维空间, 受到孔型形状、张力分布、机架间距等多种复杂因素的影响, 容易产生横向壁厚不均而在钢管内部形成内多边形, 造成产品质量缺陷。为此, 国内外有关学者做了大量的研究工作, 大多对横向壁厚不均进行定性讨论^[2-5], 或者利用有限元法进行几个机架张减过程模拟, 分析横向壁厚分布, 以便优化部分孔型^[6-7]。

本文针对无缝钢管 18 机架三辊张力减径过程, 进行系统三维弹塑性有限元建模分析, 模拟钢管减径过程中的金属变形, 定量分析横向壁厚和外径分布, 钢管断面出现了内六方, 并与现场实测数据进行对比, 验证模型的准确性, 为提高无缝钢管产品质量具有重要指导作用。

1 有限元模型建立

1.1 张减过程描述

张减时无缝钢管内部不带芯棒, 依次通过预先

设定的孔型, 构成孔型的 3 个轧辊曲面呈 120°对称, 奇数机架与偶数机架互成 60°排列, 对钢管进行连续加工, 在减径的同时实现减壁, 通常轧制温度在 950 °C 至 1050 °C 之间, 如图 1 所示。钢管的成品外径靠参与变形的机架数目确定, 壁厚则靠各机架轧辊的转速控制, 因此, 可以通过调整各机架轧辊转速来调节机架间的张力, 灵活的生产一定范围内不同壁厚的钢管, 而不必制造其它不同规格的管坯。

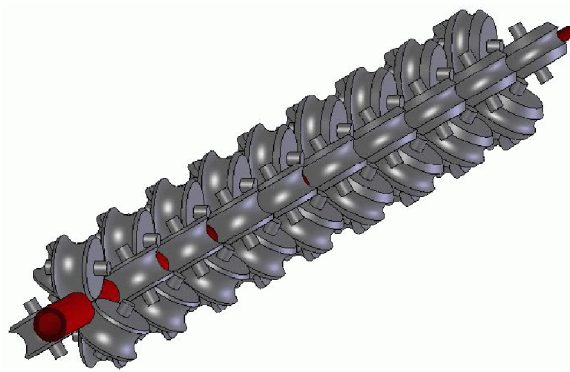


图 1 张力减径工作原理

Fig. 1 Schematic of 3-roll stretch reducing rolling

1.2 计算模型基本理论

钢管在张减时产生弹塑性变形, 不仅存在材料上的非线性, 还存在大位移变形所引起的几何非线性。

收稿日期: 2008-02-29 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50344036)

作者简介: 于 辉 (1974-), 男, 山东泰安人。博士研究生。主要研究方向为轧制过程工艺理论及数值模拟。

性,微元体的变形不仅存在刚体位移、纯变形,还伴有刚性转动发生。根据虚功原理,采用 U. L. 法在时间 t 到 $t+\Delta t$ 间隔内建立虚功方程为

$$\{\Delta d^*\}_n^T \{\Delta f\}_n = \int_V [Q^*]: [\Delta S] dV \quad (1)$$

式中, $\{\Delta d^*\}_n^T$ 为 n 单元节点位移增量向量; $\{\Delta f\}_n$ 为作用于 n 单元节点力增量; $[Q^*]: [\Delta S]$ 为虚位移梯度张量 $[Q^*]$ 与 Lagrange 应力张量 $[\Delta S]$ 的张量积。

单元刚度矩阵由 3 部分构成, 即

$$[K]_n = [K^e]_n + [K^\sigma]_n + [K^w]_n \quad (2)$$

式中, $[K]_n$ 为单元刚度矩阵; $[K^e]_n$ 为纯变形矩阵; $[K^\sigma]_n$ 为应力校正矩阵; $[K^w]_n$ 为等体积变形矩阵。

1.3 几何模型的建立

每个机架轧辊孔型的几何特点是孔型曲面为相对于轧辊轴线对称的旋转面, 因此可以取与钢管对应的半个轧辊曲面作为研究对象, 把管坯的计算模型减少到整个截面的 1/6, 全系统有限元模型如图 2 所示。模型简化后, 对称边界条件由对称面上的节点速度来确定, 其在对称面法线方向上的速度为零。采用八节点等参元来建立描述管坯的有限元网格, 有限元网格划分时沿钢管半径方向分为两层, 圆周方向分为 12 份, 共 13 个数据点, 如图 3 所示。钢管材质为 20 号钢, 轧辊与管坯之间的摩擦系数取 0.4, 采用 Von Mises 屈服准则。

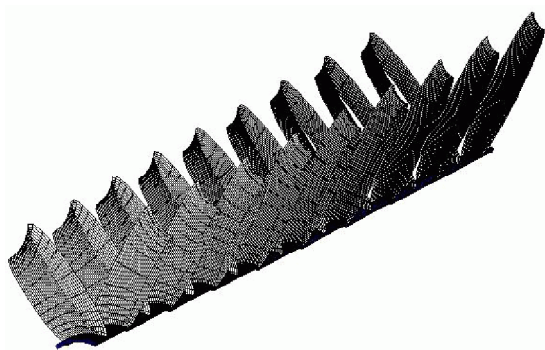


图 2 有限元分析模型

Fig. 2 FEM model

2 试验及模拟结果分析

2.1 模拟条件及实现

机架数目为 18 架, 荒管尺寸为 $\Phi 152.5 \times 10.25$

mm, 成品管尺寸为 $\Phi 70 \times 10$ mm, 入口温度 950°C , 入口速度 1.44 m/min , 出口速度 3.46 m/min , 机架间距为 310 mm 。

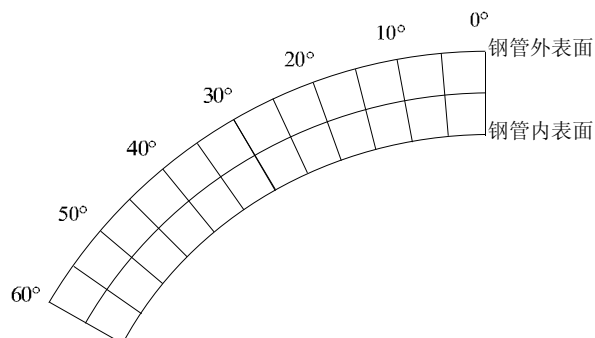


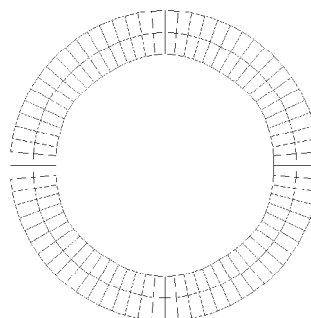
图 3 钢管横断面单元划分

Fig. 3 Tube section element mesh

模拟分析时, 假定连轧荒管横向和纵向壁厚均匀, 轧件视作变形体, 轧辊视作刚性体, 各机架轧辊转速根据实际转速给定, 不需人为给定张力。模拟时先给轧件一个与轧制方向相同的速度, 待第一架轧辊咬入后, 施加在轧件上的速度变为零, 然后轧件在轧辊摩擦力的带动下依次进入后续机架, 直至从最后一个机架轧出。图 4 为在某钢管公司 18 机架张减机组上进行的试验产品与模拟结果形状, 两者吻合较好。



(a) 试验产品



(b) 模拟结果

图 4 试验产品及模拟断面形状

Fig. 3 Section shape of experiment and simulation results

2.2 横向壁厚分析

为测得钢管减径后的几何尺寸(外径及壁厚),从轧后冷却下来的成品钢管截取一段作为试样,进行端面处理后,利用扫描仪直接将钢管截面图输入到计算机中。再将截面图以1:1的比例插入到AUTOCAD软件平台中,与有限元网格相对应,按照图3所示,从0°开始到60°,在1/6管坯的横截面上每隔5°测量一次,得到钢管截面的外径和壁厚值,同时在有限元网格上进行外径和壁厚测量,见表1,外径比较见图5,壁厚比较见图6。

表1 外径和壁厚测量值与模拟结果

Tab. 1 Measurement and simulation results of diameter and wall thickness

测量位置/(°)	外径/mm		壁厚/mm	
	测量值	模拟值	测量值	模拟值
0	69.65	69.2796	9.41	9.7416
5	69.7	69.2792	9.53	9.8142
10	69.83	69.3794	9.82	9.963
15	69.98	69.7042	10.22	10.1692
20	69.93	69.9260	10.48	10.2353
25	69.6	69.9242	10.36	10.4197
30	69.39	69.9320	10.18	10.5585
35	69.69	69.5438	10.19	10.4384
40	69.77	69.3318	10.06	10.3229
45	69.62	69.4750	9.81	10.2405
50	69.61	69.5190	9.58	10.1288
55	69.65	69.4925	9.51	9.978
60	69.75	69.3974	9.47	9.8196
均值	69.71	69.5526	9.89	10.1407

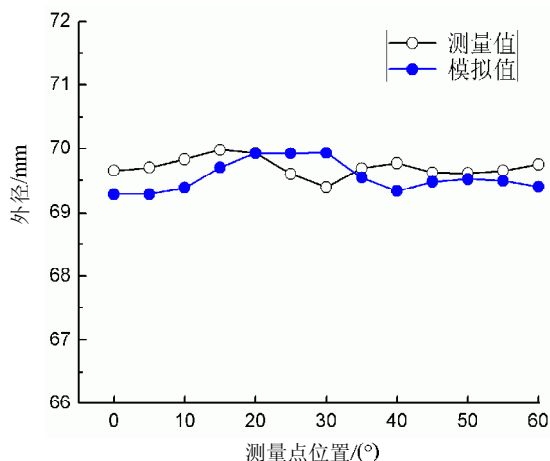


图5 外径比较

Fig. 5 Diameter comparison

由图4、图5和图6可知,模拟结果与实际轧制产品断面形状接近,都出现了典型的内六方形

状。外径均值相差0.15mm,壁厚均值相差0.24mm,实测外径偏差为-0.03%~0.87%,不圆度为0.21%,模拟外径偏差为-0.1%~1%,不圆度为0.23%;实测壁厚偏差为-5.9%~4.81%,模拟壁厚偏差为-2.6%~5.6%,比较接近。由表1可知成品钢管各测量点壁厚不均,对应孔型的底部和辊缝两侧部位壁厚小于平均壁厚,低于产品的理想壁厚(10mm),而孔型侧壁中间部位壁厚大于理想壁厚。

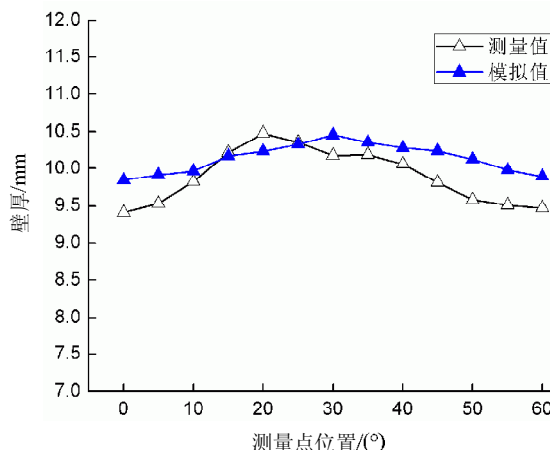


图6 壁厚比较

Fig. 6 Wall thickness comparison

为了分析钢管经过各个机架时地壁厚分布,在模拟的稳态轧制阶段,取各个机架的钢管出口断面进行横向壁厚测量,进行平均壁厚值计算,得到如图7所示的壁厚分布,这与文献[1]中的解析公式计算的壁厚分布一致。由于产品出现了内六方形,在其横断面的圆周方向上存在6个最大壁厚点和6个最小壁厚点,因此采用如图8所示方法度量其内多边形程度,内多边形程度用参数 P 表示

$$P = \frac{S_{cm} - S_{bm}}{S_{cm} + S_{bm}} \quad (3)$$

式中, $S_{cm} = \sum S_c / 6$, $S_{bm} = \sum S_b / 6$, S_c 为钢管断面厚点处的壁厚; S_b 为钢管断面薄点处的壁厚。

由式(3)可得到实测内多边形程度 P 为0.054,模拟内多边形程度 P 为0.04。因此该模型计算结果可靠,可用此模型对钢管减径过程的有关参数进行预报。

3 结语

利用三维弹塑性有限元法对18机架张力减径

过程进行数值模拟,对钢管外径和横向壁厚分布进行研究,得到钢管减径产品断面呈内六方形状,并与试验结果进行了比较,验证了模型的可靠性。利用该模型可方便地对钢管张力减径过程进行产品尺寸和管形预报,为分析产品缺陷、指导工艺设计提供了离线手段。

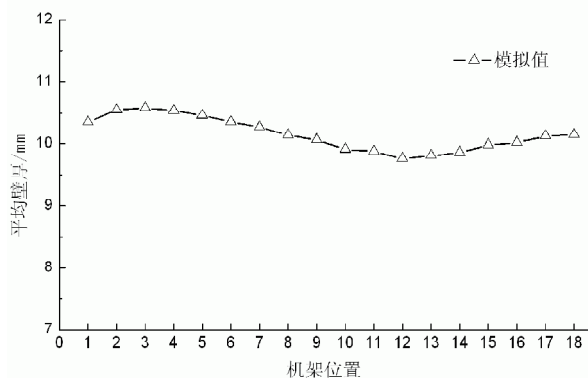


图7 平均壁厚分布

Fig. 7 Average wall thickness distribution

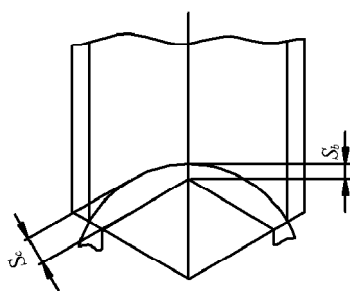


图8 内多边形度量

Fig. 8 Bore polygon measurement

参考文献

- [1] 龚尧, 周国盈. 冷轧钢管 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [2] Sodani Y, Hirakawa T, Mihara Y. Mechanism polygoning formation of tube bore in stretch reducing [J]. Advanced Technology of Plasticity, 1987, 2 (8): 24-28.
- [3] 刘高翔. 钢管微张力减径内棱缺陷的探讨 [J]. 钢管, 1990, (2): 38-41.
- [4] 赵晓林, 边勇兴. 钢管“内六方”成因分析及对策 [J]. 钢管, 2004, 33 (3): 35-38.
- [5] 马辉, 韩明旭. 无缝钢管张力减径过程中产生内多边形的原因分析 [J]. 鞍钢技术, 2006, (1): 20-22.
- [6] 潘克云, 王先进, 秦国庆. 椭圆孔型张减过程模拟及横向壁厚分布预测 [J]. 宝钢技术, 2000, (2): 44-48.
- [7] 周晓岚. 张力减径机不同孔型横向壁厚分布的有限元模拟分析 [J]. 宝钢技术, 2004, (4): 30-32.

FEA model for tube shape prediction in stretch reducing rolling process

YU Hui¹, WANG Fei-xue¹, HUANG Hua-gui¹, XU Hai-liang¹, DU Feng-shan¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: Based on the characteristic of stretch reducing mill, the whole systematic 3D elasto-plastic finite element analysis has been established to simulate the deformation process of seamless tube on the 18-stand stretch reducing mill. The transverse wall thickness of stretch-reduced tube product is unevenness to result in the formation of bore polygon by researching its distribution. The analysis was verified by comparing finite element analysis results with experiment measurements. The model can be used to predict the product quality for tube stretch reducing rolling process and the simulation results can be used for analyzing product flaws and instructing technological design.

Key words: tube; finite element analysis; stretch reducing; transverse wall thickness