

无缝钢管张力减径有限元模拟的摩擦模型及其应用

于 辉¹, 杜凤山¹, 臧新良¹, 潘 峰², 周晓岚²

(1. 燕山大学机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 上海宝钢集团公司钢管分公司, 上海 200941)

摘 要:采用在轧辊和钢管之间附加一层动态接触摩擦单元的方法,建立了钢管张力减径过程有限元模拟的摩擦模型。通过判断摩擦单元与轧辊的接触或脱离情况(不必确定摩擦力的大小和方向),利用其剪切变形来模拟轧辊与钢管接触表面的摩擦作用,实现了钢管产品张力减径过程的快速准确预报。

关键词:无缝钢管;张力减径;有限元模拟;摩擦模型

中图分类号:TG335.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0963(2006)03-0026-04

Friction Model for Finite Element Simulation of Seamless Tube Stretch-Reducing Process and Its Application

YU Hui¹, DU Feng-shan¹, ZANG Xin-liang¹, PAN Feng², ZHOU Xiao-lan²

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

2. Tube Subcompany of Baoshan Iron and Steel Co, Shanghai 200941, China)

Abstract: A friction model for finite element simulation of tube stretch-reducing process was built by means of using a layer of dynamic contact friction element between the roller and the tube meshes. The friction action of the contact surface between the roller and the tube can be simulated by judging the contact condition or the separate condition between the friction element and the roller and using the shearing deformation of the friction element. The fast and accurate prediction of tube product in the stretch-reducing process was realized.

Key words: seamless tube; stretch reducing; finite element simulation; friction model

张力减径作为热轧无缝钢管生产中的最后一道成形工序,成品钢管都是通过调整各机架轧辊的孔型和转速实现的。目前,国内外钢管生产厂家在热轧无缝钢管生产中已广泛应用张力减径技术,其工艺原理(以三辊减径为例)为:不使用芯棒,通过控制机架间的速度差所形成的张力,使钢管在系列孔型中减径、减壁(见图1)。被轧制管材内表面自由,在径向压缩的同时被纵向拉伸,变形过程十分复杂。特别是钢管与轧辊表面接触时,两者之间的摩擦状况与钢管及轧辊表面的粗糙度、接触压力、温度、材料特性及润滑状况等因素有关,而且摩擦力的大小和方向直接影响金属的流动规律、应力和应变分布,进而影响产品壁厚变化。因此,建立可靠的摩擦模

型是保证计算精度的关键。

国内外学术界对塑性加工数值模拟的摩擦问题进行过许多研究^[1~4]。在采用有限元法分析塑性加工问题时,尽管在理论上已经得到了较为严格的数学证明,但是各种复杂边界条件对其计算精度影响很大。处理摩擦问题时,常采用库仑摩擦和剪切摩擦,在接触表面单元节点上直接施加摩擦力,这对于某些复杂变形(如孔型轧制)过程,由于摩擦力分布规律不易准确掌握,模拟过程中很难保证其准确性。因此,有限元分析中的接触摩擦问题至今没有较为完善的统一模式。

笔者在研究板带轧制三维接触摩擦模型的基础上^[5],考虑张力减径过程的孔型形状以及工件接触

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,博士生; **E-mail:**grayfish@ysu.edu.cn; **修订日期:**2005-07-16

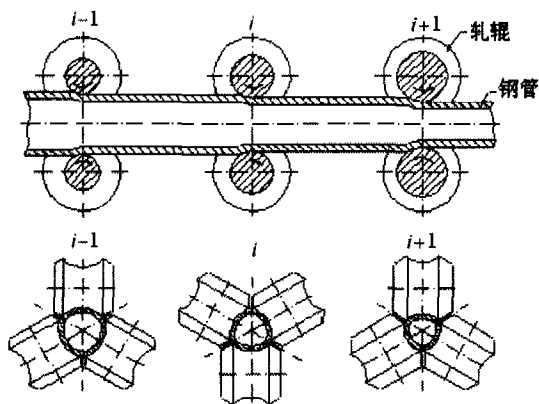


图1 张力减径原理

Fig. 1 Principle of Stretch-reducing

的摩擦介质的状况,在轧辊和钢管之间附加一层极薄的动态接触摩擦单元,通过摩擦单元形状改变来模拟轧辊与轧件之间的接触摩擦。考虑钢管减径与板带轧制具有不同特点,应在每次加载后修正摩擦单元,使其保持弹性性质。采用空间解析曲面函数描述方法建立模拟轧辊孔型的几何模型,并使解析曲面函数与摩擦单元连接的坯料节点保持动态连接,将这一模型用于无缝钢管张力减径非线性有限元建模中,取得了良好的效果。工业试验也验证了所建模型的准确性,并实现了钢管产品的快速精确预报。

1 孔型轧制摩擦元模型

所建立的三辊孔型轧制摩擦元模型如图2所示。在轧辊与钢管单元之间附加一层摩擦单元,其上节点与轧辊辊面连接,下层节点连接钢管单元,规定在变形区之外摩擦单元刚度为零。根据有限元理论,可知单元刚度矩阵为:

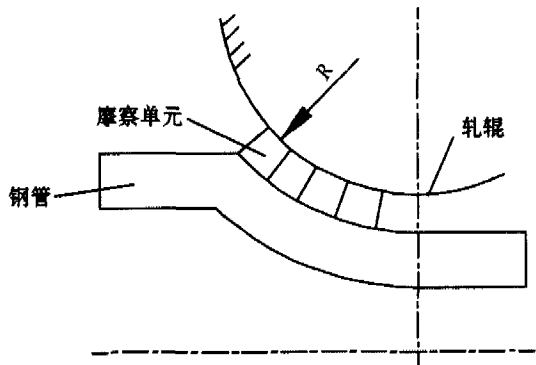


图2 轧辊与钢管间摩擦单元的附加示意图

Fig. 2 Schematic of friction element between roller and tube

$$[K_e] = [B]^T [D] [B] \cdot V_e \quad (1)$$

式中, $[B]$ ——几何矩阵; $[D]$ ——本构矩阵; V_e ——单元体积。

引入摩擦元后,摩擦元刚度矩阵为:

$$[K_{ef}] = \beta [B]^T [D] [B] \cdot V_{ef} \quad (2)$$

式中, β ——摩擦因子 $[\beta = m / (1 - m)]$; m ——摩擦系数; V_{ef} ——摩擦元体积。

则单元刚度矩阵变为:

$$[K] = [K_e] + [K_{ef}] \quad (3)$$

因摩擦元附加在钢管单元上,计算时需判断它与轧辊的接触或脱离情况。与轧辊接触时,摩擦元的上层节点固定于轧辊上,摩擦元各节点沿轧辊的法向位移和轴向位移约束为零。通过摩擦元的剪切变形来模拟轧辊与钢管接触表面的摩擦作用。按照式(2)赋予摩擦元刚度值,将摩擦元刚度矩阵与钢管总刚度矩阵进行叠加,建立整体平衡方程。如果与轧辊未接触或者脱离接触,摩擦元不起作用,刚度为零。因此,在轧辊与钢管单元之间附加摩擦元进行物理特征模拟,可在不用假设摩擦力的大小、方向及中性点位置的情况下模拟张力减径过程,使模拟效果更符合实际情况。

2 应用实例及分析

将上述方法应用于某厂三辊张力减径机组。张力减径后钢管产品规格为: $\phi 121.00 \text{ mm} \times 25.00 \text{ mm}$ 。工艺参数为:荒管外径 $\phi 152.5 \text{ mm}$,荒管壁厚 25 mm ,机架间距 310 mm ,轧辊名义直径 330 mm ,钢管入口及出口速度分别为 1.05 m/s 、 1.38 m/s ,总机架数 10 。

2.1 有限元模型的建立

由于张力减径过程中轧制力较小,轧辊可被视为刚性体,忽略轴承和机架的弹性影响。三辊张力减径机的3个孔型呈 120° 对称。根据其几何特点,取与钢管对应的半个轧辊曲面作为研究对象,即把管坯的计算模型减少到整个截面的六分之一,如图3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,在对称面法线方向上的速度为零。基于动态摩擦单元模型,采用八节点等参元建立钢管的有限元网格,编写了三维弹塑性有限元仿真软件,模拟钢管张力减径过程。

2.2 结果分析

为了验证摩擦模型的精度,将模拟结果与工业实

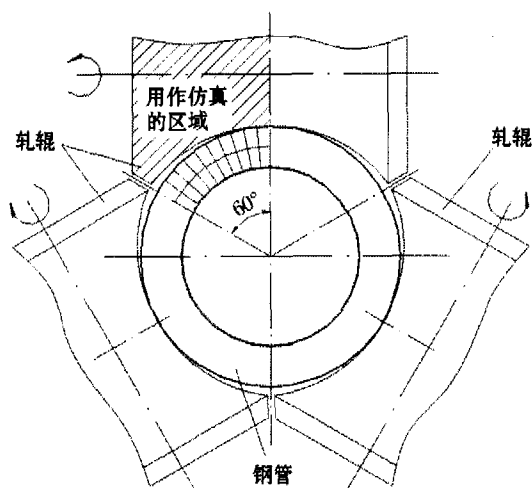


图3 单机架有限元模型

Fig. 3 Finite element model of each stand

际生产结果进行对比。在 P2/266 微机上仅用约 30 min 即可完成 10 台机架的模拟; 而用商用软件 MARC 运算时, 在相同条件下大约需要 1 天。模拟结果与实际生产结果十分接近(见图 4)。

为了分析模拟结果与工业实际生产结果的差异, 测量了管壁厚度。用扫描仪直接将钢管截面图输入计算机, 将扫描得到的图形的六分之一截面在圆周方向上分成与有限元网格相同的份数。测得的钢管截面壁厚值见图 5, 所得壁厚分布情况列于表 1。实测壁厚与模拟计算壁厚的对比见图 6。

结果表明, 模拟计算的断面形状与实际轧制产品接近, 内径和外径误差较小, 壁厚变化规律一致, 实测产品和模拟结果都呈现轻微内六方形状。该产品壁厚公差要求为 5%, 故壁厚波动允许范围为 23.75~26.25 mm。由表 1 可知, 实测壁厚和计算壁厚在壁厚公差允许范围之内, 实测壁厚平均值为 25.11 mm, 计算壁厚平均值为 24.68 mm。证明该模型计算结果较可靠, 可用此模型对钢管减径过程的有关参数进行预报, 以便根据金属的流动状况及壁厚分析确定内角缺陷的形成原因及准确位置。

3 结 论

建立了张力减径轧制过程的动态摩擦元模型, 解决了复杂轧制情况下的摩擦问题。在此基础上开发了无缝钢管张力减径过程的三维弹塑性有限元模拟软件, 其仿真时间仅是 MARC 计算时间的 1/40, 且模拟精度较高, 并经工业试验验证了该模型的准确性。

应用该仿真系统可对无缝钢管减径过程进行产品质量预报, 在短时间内可获得钢管减径过程孔型设计和产品壁厚控制等工艺参数。这对新产品开发、

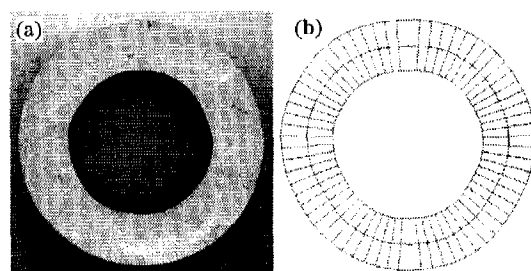


图4 实际产品(a)和模拟计算结果(b)

Fig. 4 Manufactured product (a) and simulated result (b)

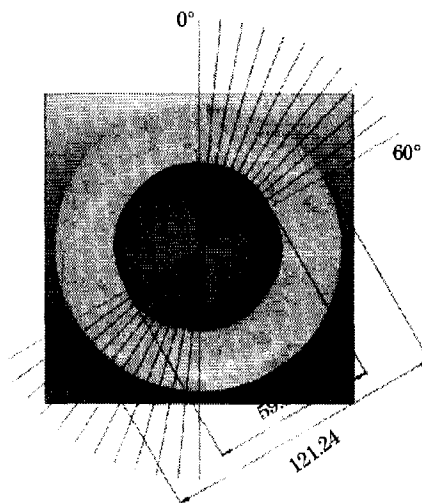


图5 壁厚测量位置

Fig. 5 Measuring position of wall thickness

表1 壁厚分布

Table 1 Distribution of wall thickness

测量角度/(°)	0	5.45	10.9	16.36	21.82	27.27	32.73	38.18	43.64	49.09	54.55	60
实测壁厚/mm	25.35	25.32	25.31	24.98	24.84	24.73	24.74	24.84	24.95	25.19	25.40	25.70
模拟壁厚/mm	25.51	25.20	24.81	24.42	24.14	23.97	23.97	24.14	24.42	24.81	25.23	25.51

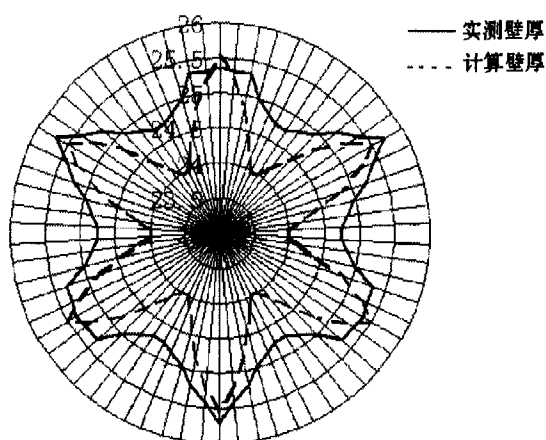


图6 实测壁厚与模拟计算壁厚的比较

Fig. 6 Comparison of measured wall thickness with simulated one

制定新产品生产工艺规程等具有指导作用。

参考文献:

- [1] LIU C. Simulation of Strip and Slab Rolling Using an Elastic-Plastic Finite Element Method [D]. University of Birmingham, 1985.
- [2] Kobayashi S, Oh S I, Altan T. Metal Forming and the Finite Element Method [M]. Oxford University Press, 1989.
- [3] Hartley P, Pillinger I. European Developments in Simulating Forming Presses Using Three-Dimensional Finite-Element Analysis [J]. Journal of Materials, 1991, 10: 12-14.
- [4] 肖 宏, 申光亮. 三维弹塑性接触边界元法对摩擦的处理[J]. 工程力学, 1997, 14(4): 84-88.
- [5] 杜凤山, 刘 才. 板带轧制过程中的三维接触摩擦模型[J]. 应用力学学报, 1995, 12(2): 79-82.

(上接第20页)

将轧辊设计成斜槽底表面的孔型辊,即可利用立辊的孔型增大变形渗透程度,又可在板坯厚度与孔型高度不匹配时,利用立辊的锥形提高变形过程的稳定性。

4 结 论

(1)立辊形状不同,变形渗透程度不同,轧后板坯横断面及平面形状也不相同。采用孔型立辊轧边的变形结果好于平辊身立辊及锥形立辊轧边的变形结果。

(2)采用孔型立辊和锥形立辊轧边能提高变形的稳定性。将孔型立辊设计成斜槽底表面的辊形时,能发挥其提高变形渗透程度及变形稳定性的综合优势。

参考文献:

- [1] 平井信恒. 厚板压延における歩留り向上技術[J]. 鉄と鋼,

1981, 67(15): 2270-2284.

- [2] 井上正敏, 西田俊一, 大森和郎, ほか. 厚板圧延におけるトリミングフリー厚鋼板製造技術の確立[J]. 川崎製鉄技報, 1988, 20(3): 183-188.
- [3] 张 军, 田锡亮, 王振宇. 厚板齐边轧制技术的探讨[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 1995, 18(3): 280-285.
- [4] 金兹伯格 V B. 高精度板带材轧制理论与实践[M]. 姜明东, 王国栋, 等译. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [5] Fukumura M, Fujikake M, Fujita F, et al. Elasto-Plastic Finite Element Simulation of the Flat Rolling Process by Dynamic Explicit Method [A]. Kiuchi M, eds. Proceedings of the 7th International Conference on Steel Rolling (Steel Rolling'98) [C]. Chiba: The Iron and Steel Institute of Japan, 1998. 260-265.
- [6] 张玉华, 朱希玲, 李 冰, 等. 彩涂板压型过程的有限元模拟[J]. 钢铁, 2003, 38(11): 36-39.
- [7] 李尚健. 金属塑性成形过程模[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.