

管材张力减径有限元快速仿真系统的研究*

于 辉¹, 杜凤山¹, 潘 峰², 周晓岚²

(1. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004; 2. 宝钢集团钢铁研究院, 上海 201900)

摘要: 根据张力减径过程的变形特点, 采用组元建模技术, 编写了弹塑性有限元计算程序。利用AutoCAD进行图形后处理, 并通过VB建立人机交互界面, 开发了管材张力减径过程快速仿真系统。研究了管材张力减径的变形过程, 预报了轧后产品几何形状、应力、应变等分布状态。模拟结果与生产实测结果吻合良好, 表明该系统能够胜任钢管张力减径过程模拟及产品质量预报工作。

关键词: 钢管; 张力减径; 弹塑性有限元; 过程模拟; 组元模型

中图分类号: TG335.7; TP15 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2311(2004)05-0006-05

Research of FE Quick Simulation System for Tube Stretch-reducing Process

Yu Hui¹, Du Fengshan¹, Pan Feng², Zhou Xiaolan²

(1. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Baosteel I & S Research Institute, Shanghai 201900, China)

Abstract: Based on the characteristics of tube stretch-reducing process, the elastic FE calculation program is prepared by means of the constituent element modeling technique. After graphic processing with AutoCAD and setting up of man/machine interaction interface via VB, the quick simulation system for tube stretch-reducing process is developed. With the said system, the deformation process during tube stretch-reducing operation is studied, resulting in the forecast of distributions concerning geometry, stress and strain of the rolled product. The simulation result is in compliance with the measurement result of relevant actual operation process, which means that the newly developed system is capable of simulating steel tube stretch-reducing process as well as forecasting product quality.

Key words: Steel tube; Stretch-reducing; Elastic FE; Process simulation; Constituent element model

0 前 言

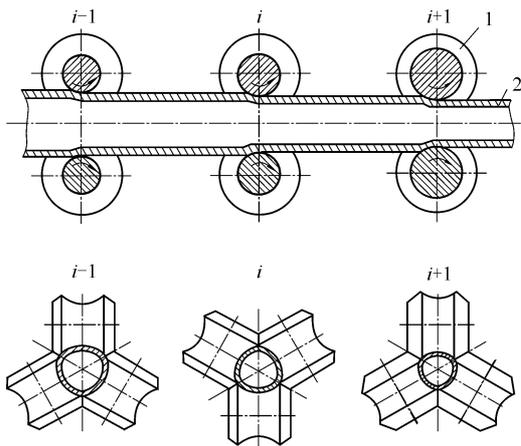
张力减径机是连轧管生产线的重要设备, 多种产品及其质量控制都是依靠张力减径机实现的。其工艺原理(以三辊减径为例)是: 不采用芯棒, 使管材依次通过具有一定几何形状的连接机架孔型, 通过调整各机架中轧辊的转速来形成张力, 将管径减小到要求尺寸, 如图1所示, 被轧制管材不仅受

到径向压缩, 还受到纵向拉伸, 其变形非常复杂, 并且容易产生内多角形、内筋、外青线等产品质量问题, 因此, 系统分析管材在张力减径过程中的变形规律, 已成为张力减径理论与生产实践研究者普遍关注的问题。

由于张力减径在管材生产中的重要地位和人们对管材尺寸精度要求的不断提高以及计算机技术的迅速发展, 近年来国内外学者对管材张力减径问题做了大量的研究工作^[1-3], 但因分析方法及有限元计算时间上的限制, 使系统模拟张力减径过程相当困难。本文利用组元建模技术, 采用解析法描述轧辊孔型, 解决了多机架连续轧制网格畸变和计算时间

*国家自然科学基金资助项目(50344036); 河北省自然科学基金资助项目(500214)。

于 辉(1974-), 男, 在读博士研究生, 从事轧制理论, 轧制过程仿真的研究工作。



1—轧辊 2—钢管

图1 张力减径原理示意

上的困难, 开发出管材减径过程快速仿真软件, 系统地模拟了管材减径过程中的变形规律, 再现了张力减径时管材的变形过程, 预报了管材产品的形状及最终产品质量, 对于优化轧制工艺、缩短新产品开发周期、提高应变能力具有实际意义。

1 基本模型的建立

1.1 组元模型

在用商用软件对多机架张力减径过程进行模拟时, 由于其内核庞大, 在计算过程中要耗费大量的系统资源, 存在着建模复杂, 计算时间过长, 网格易畸变, 对于特定领域不能满足精度要求等问题。同时, 在软硬件的限制下, 对10个机架以上的张力减径连轧模拟很难实现。针对上述问题, 建立了管材快速仿真连轧模型, 即组元模型。该模型就是把张力减径多机架连轧过程分解为前后相接的单个机架的变形过程, 把前一个机架变形的钢管有限元网格和材料特性等作为下一个机架变形分析的初始条件, 将数个机架在模拟过程中需要的边界条件列为一组来整体研究, 如图2所示 (图中 σ_{Bi} 与 σ_{Fi} 分别表示第*i*机架中钢管所受的后张力和前张力)。根据圣维南原理, 前后张力在离开所取钢管截面两端一段距离后的任意横截面上的影响, 与它们在该两端的分布形式无关, 只与张力的合力有关, 为此可设前后张力在钢管截面上均匀分布。在组元模型的基础上进行三维弹塑性有限元分析, 通过信息变换进行过程模拟, 直到所有连轧机架计算完毕为止, 得出管材在各机架出口的壁厚分布。

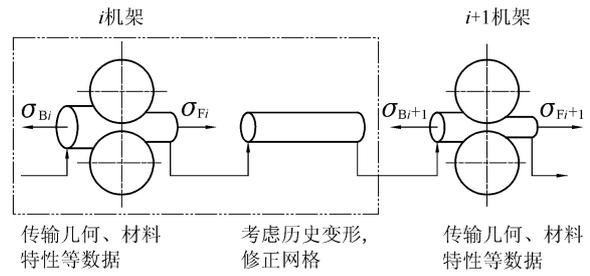


图2 组元建模示意

1.2 张力模型

由于组元模型将机架速度制度作为边界条件输入, 因此机架间的张力作为联系两个机架的边界条件需要事先给定。钢管在机架间受张力的作用, 工程上常用张力系数 x_i 来表示, 定义如下

$$x_i = \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_{si}} \quad (1)$$

式中 σ_{xi} —— 第*i*机架的前张力;

σ_{si} —— 第*i*机架与 (*i*+1) 机架之间钢管的塑性变形抗力。

要将张力系数在各机架上进行分配, 必须求得各机架的张力系数。进入张力减径机的钢管在通过每个机架的孔型时, 要产生切向变形、径向变形和轴向变形, 它们之间存在如下关系

$$x_{1m} = \frac{\varphi_t \times (2 - \varepsilon_m) + (1 - 2\varepsilon_m)}{\varphi_t \times (1 - \varepsilon_m) + 2(\varepsilon_m - 1)} \quad (2)$$

式中 φ_t —— 平均直径的对数减径量 (切向变形);

φ_r —— 对数减壁量 (径向变形);

x_{1m} —— 平均轴向张力系数 (轴向变形);

ε_m —— 平均减壁量。

其中 $\varphi_t = \ln \frac{d_{mK}}{d_{mR}} \quad (3)$

$$\varphi_r = \ln \frac{S_K}{S_R} \quad (4)$$

$$\varepsilon_m = \frac{1}{2} \left(\frac{S_K}{d_{mK}} + \frac{S_R}{d_{mR}} \right) \quad (5)$$

式中 d_{mK} , d_{mR} —— 分别为荒管和成品管平均外径;

S_K , S_R —— 分别为荒管和成品管壁厚。

$$d_{mK} = d_{aK} - S_K \quad (6)$$

$$d_{mR} = d_{aR} - S_R \quad (7)$$

式中 d_{aK} , d_{aR} —— 分别为荒管和成品管外径。

文献 [4] 给出了张力系数在连轧机上的分布,

其中最大张力系数为

$$x_{1\max} = \frac{x_{1m}\varphi_{t\text{总}} - \sum_0^n x_1\varphi_t}{\sum_0^k \varphi_t} \quad (8)$$

式中 $\sum_0^n x_1$ —— 张力升起和降落时单机架张力系数;

φ_t —— 单机架切向变形;

$\sum_0^k \varphi_t$ —— 具有最大张力的所有机架的切向变形之和。

但是, 求得的最大张力系数必须满足条件 ($x_{1\max} \leq 0.84$), 否则钢管将被拉断。根据事先设定的钢管毛坯及成品的直径和壁厚, 根据上述公式即可迭代计算出各机架钢管的前后张力。

1.3 轧制变形区有限元模型

张力减径机(三辊)的孔型是呈 120° 对称, 根据其几何特点, 可把钢管的计算模型减少到整个截面的 $1/6$, 相应建立与钢管模型接触的轧辊辊面 60° 圆弧(1个孔型底部至辊缝), 作为轧辊模型的计算模型, 如图3所示。

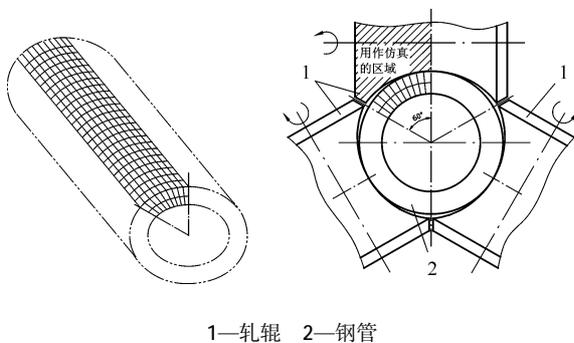


图3 三辊张力减径的有限元模型示意

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钢管的有限元网格。

1.4 轧辊孔型曲面解析模型

钢管张力减径过程属于采用孔型的一种轧制过程, 研究孔型对钢管的作用, 需要将孔型曲面引入到模拟分析过程中。由于轧辊刚度远远大于钢管刚度, 通常将轧辊作为刚体处理, 可以用轧辊表面来代替。对孔型曲面的描述主要是针对轧辊孔型表面的几何信息。由于钢管减径过程中所使用的孔型曲

面均为母线, 是圆弧和直线的回转曲面, 因此, 为提高仿真速度, 采用解析法描述轧辊孔型表面, 建立了高阶拟合函数来精确定位, 即

$$F(x, y, z) = \sqrt{x^2 - z^2} - \varphi(y) \quad (9)$$

式中, $\varphi(y) = a_0 + a_1y + a_2y^2 + \dots + a_ny^n$, 各项系数 a_0, a_1, \dots, a_n 由最小二乘法求出。

由于轧辊孔型为回转曲面, 在轧制过程中, 轧辊孔型曲面位置、形状不变。

2 张力减径有限元快速仿真系统

图4为张力减径有限元快速仿真系统人机交互界面。该系统分别用于数据前处理, 仿真计算。开发AutoCAD R13进行图形后处理, 输出二维和三维图形(图5), 描述钢管壁厚值及其变化规律、应力场和应变场等。



图4 张力减径有限元快速仿真系统界面

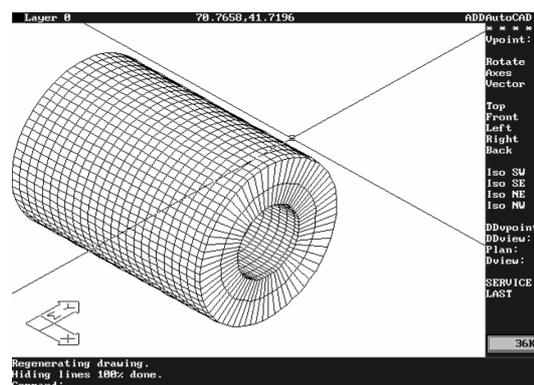


图5 系统后处理中的管材三维变形

在前处理中分别完成孔型设计、有限元模型的建立、边界条件处理、张力计算及模型加载等。数值模拟完成有限元快速计算, 后处理则根据有限元

计算结果和要求输出管材任意截面的二维图形或三维变形图，系统流程如图6所示。

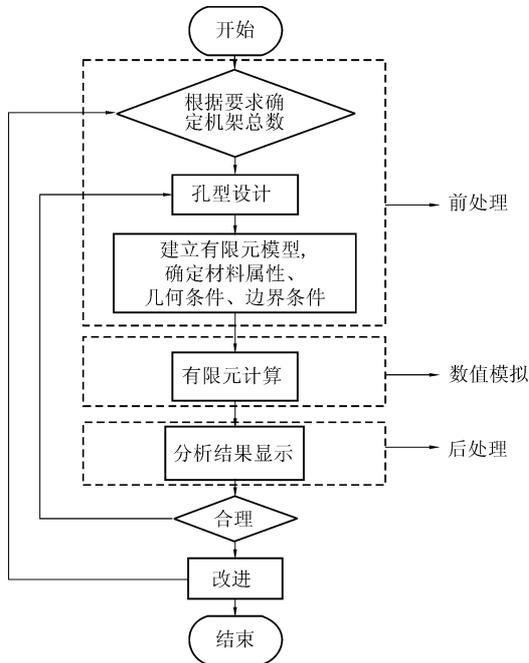


图6 快速仿真系统流程

3 轧制实例及分析

为了验证所开发的钢管张力减径有限元快速仿真软件的可靠性，将仿真结果与工业生产结果进行比较。由于没有在线测量装置，对轧后钢管进行的几何尺寸（外径、内径及壁厚）测量，是利用扫描仪直接将钢管截面图输入到计算机中，以1:1的比例插入到AutoCAD图中，将扫描得到的图形的1/6截面在圆周方向上分成与有限元网格相同的份数，由此得到钢管截面的内外径尺寸，如图7所示。

某厂用三辊张力减径机生产Φ121 mm×25 mm规格的产品，其工艺参数见表1。在P233微机上运算时间约为50 min，仿真速度非常可观，实验产品测量值与模拟计算值见表2，表2中实测外径误差： $[(\text{实测外径}-121)/121] \times 100\%$ ；壁厚计算误差： $[(\text{壁厚计算值}-25)/25] \times 100\%$ ；其他误差计算相同。实验产品形状如图8所示，模拟图形如图9所示，实测与模拟壁厚比较如图10所示。

上述模拟计算值与实际轧制测量值的比较结果表明，产品断面形状接近，内径、外径误差较小，壁厚变化规律一致，实测产品和模拟结果都出现轻微“内六方”；实测壁厚误差为0.45%，模拟壁厚

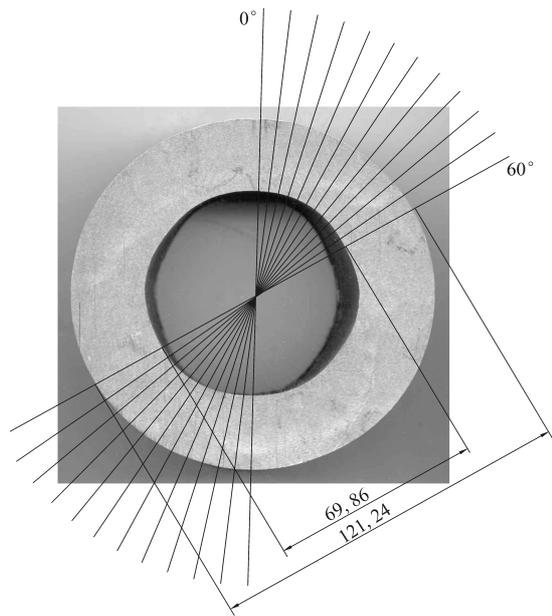


图7 试验产品测量位置示意

表1 三辊张力减径机工艺参数

钢种	荒管外径/mm	机架间距/mm	钢管入口速度/(m·mm ⁻¹)	总机架数/架
20钢	152.5	310	1.44	10
钢管出炉温度/℃	荒管壁厚/mm	轧辊名义直径/mm	钢管出口速度/(m·mm ⁻¹)	成品规格/mm
1 050	25	330	3.46	Φ121×25

表2 实验产品测量值与模拟计算值比较(冷态)

测量点位 置/(°)	外径/mm		内径/mm		壁厚/mm	
	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值
0	121.29	122.54	70.59	71.53	25.35	25.51
5.45	121.35	122.20	70.71	71.79	25.32	25.20
10.90	121.49	121.82	70.88	72.20	25.31	24.81
16.36	121.15	121.43	71.20	72.60	24.98	24.42
21.82	121.13	120.95	71.45	72.66	24.84	24.14
27.27	120.98	120.69	71.52	72.74	24.73	23.97
32.73	120.93	120.69	71.46	72.74	24.74	23.97
38.18	120.96	120.95	71.28	72.66	24.84	24.14
43.64	120.90	121.43	71.00	72.60	24.95	24.42
49.09	121.03	121.82	70.65	72.20	25.19	24.81
54.55	121.14	122.20	70.34	71.73	25.40	25.23
60.00	121.24	122.55	69.84	71.53	25.70	25.51
平均值	121.13	121.60	70.91	72.25	25.11	24.68
误差/%	0.11	0.50	-0.13	1.76	0.45	-1.29



图8 实验产品形状

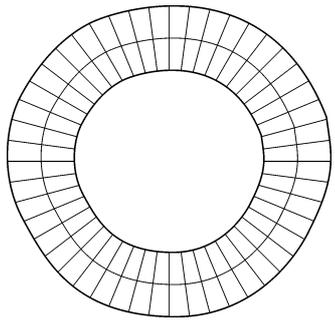
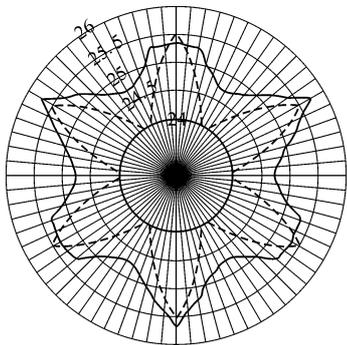


图9 模拟图形



—— 实测壁厚 ---- 计算壁厚

图10 实测壁厚与模拟计算壁厚比较示意

误差为-1.29%，均小于允许误差5%。因此，该仿真系统是可靠的，可以对钢管减径过程的有关参数进行预报。同时，根据每个机架钢管的金属流动状况及壁厚分析，可以确定内角缺陷的形成原因及准确位置。

4 结 论

根据组元建模技术，开发针对管材张力减径过程的有限元快速仿真系统，能够对管材的尺寸精度、应力、应变等进行分析，并通过工业试验验证该仿真系统的可靠性及高效性。

通过管材减径过程的计算机模拟，可以方便地研究工艺参数对轧制过程的影响，对于充实张力减径轧制理论，进行产品质量预报、工艺参数优化、轧辊孔型优化、缩短开发新产品周期等具有重要的理论意义和实用价值。

5 参 考 文 献

- 1 Laila S. Bayoumi. Analysis of flow and stresses in a tube stretch-reducing hot rolling schedule[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2003, 45(3): 553-565.
- 2 杜凤山, 刘 才. 复杂孔型约束下三辊减径过程大变形有限元方法与CAD/CAM一体化研究[J]. 钢铁, 1996, 31(3): 46-50.
- 3 Du Fengshan, Liu Cai. Analysis of flow field on hollow tube in 3-rolls reducing[J]. 机械工程学报(英文版), 1994, 7(3): 170-175.
- 4 龚 尧, 周国盈. 连轧钢管[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 59-61.

(收稿日期: 2004-03-24)

(修定日期: 2004-05-06)

● 信 息

中国首条ERW660焊管生产线在大庆试车成功

由大连三高应用技术发展公司(以下简称大连三高公司)设计制造的中国首条大口径高频焊管生产线——ERW660机组,于2004年8月15日在大庆市一次调试成功,并且成功试制出 $\Phi 508 \text{ mm} \times 11.6 \text{ mm}$ 的高频焊管。这是由中国自行设计制造的机组生产出的第1根口径在508 mm以上的高频直缝焊管,其诞生标志着大口径高频直缝焊管依赖进口或者在国内由进口机组生产成为历史。

该项目是由大连三高公司在国外全排辊成型(FCF)技术基础上设计制造的,并且自行调试成功。该生产线的建成,标志着中国大口径高频焊管设备必须依赖进口的历史终结,也标志着中国的高频焊管设备制造业从此跨入了世界前列。

(大连三高应用技术发展公司)