维普资讯 http://www.cqvip.com

第29卷第3期 武汉科技大学学报(自然科学版) Vol. 29, No. 3
2006年6月 J. of Wuhan Uni. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition) Jun. 2006

三辊微张力减径过程金属变形行为模拟与分析

马靳江[1],吕立华[1],袁 泉[2]

(1. 重庆大学,重庆, 400044;2. 四川理工学院,四川 自贡, 643000)

摘要:采用ANSYS有限元分析软件,对无缝钢管三辊张力定径过程的金属变形行为进行模拟,较直观适时地反映该过程的金属变形状态,详细讨论该过程由咬入到稳定轧制的金属流动变化状态及方式。分析得到的应力应变分布结果能够较好地解释钢管定减径过程中出现的壁厚不均等现象,模拟结果与实际生产中钢管变形行为状态基本一致。

关键词:钢管;三辊微张力定减径;有限元

中图分类号:TG335.71 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-3090(2006)03-0237-04

Simulation and Analysis of the Metal's Deformation during 3-Roll Tiny-Tension Reducing

MA Jin-Jiang[1], *LU Li-Hua*[1], *YUAN Quan*[2]

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: The deformation of the seamless steel tube in the 3-roll tiny-tension reducing process was simulated and reflected visually by the ANSYS, a finite element analysis software. From biting to rolling, the change and condition of metal transformation were discussed in detail. The distribution of the stress and the strain can well explain the unequal wall thickness in the tension reducing process, and the deformation in the simulation is identical to that in practical production.

Key words: steel tube; 3-roll tiny-tension reducing; FEM

在无缝钢管生产工艺中,为减少孔型磨损及管内空缺陷,提高成品管的尺寸精度,三辊定减径机得到广泛使用。成品钢管尺寸精度受到减径前尺寸、减径量、孔型形状、摩擦条件及张力大小等因素的影响,因此,研究该成型过程中的金属变形行为,对于充分提高产品质量具有较重要的意义。

一般地,进行有限元分析的基本构架为:创建有限元模型、施加载荷并求解、结果后处理分析[1]。在建立模型时,要充分考虑所需的建模参数、边界条件及计算机运算速度等因素。对于8架三辊微张力定减径过程而言,各架减径过程中金属变形均为周向压缩、径向减小和长度延伸,只是钢管尺寸和受力大小略有不同,故本文以第二机架钢管定减径过程为例,利用ANSYS/LS-DYNA大型通用有限元分析软件,并以三维弹塑性有限元法为理论基础进行模拟分析,其余各架的模拟仅需改变模型的几何尺寸及相应的边界条件。

1 模型的建立

由于钢管减径过程的复杂性及计算条件的局限性,在模拟时需要对实际轧制过程做一定的简化与假设[2]:

(1)忽略轧制过程中变形工具产生的弹性变形,假设变形工具为刚体。

(2)变形工具与轧件之间的摩擦符合库仑摩擦定律。

(3)假设在整个轧制过程中,钢管各部分的初始温度与变形工具的表面温度保持一致。

(4)取轧件和孔型接触体的1/6(如图1阴影

收稿日期:2005-05-26

作者简介:马靳江(1980-),男,重庆大学材料科学与工程学院,硕士生.

维普资讯 http://www.cqvip.com

部分所示)作为研究对象。

(5)钢管在定径过程中承受微张力时,管材直径和壁厚的变化均发生在减径机的各机架上,机架间的变形可忽略。

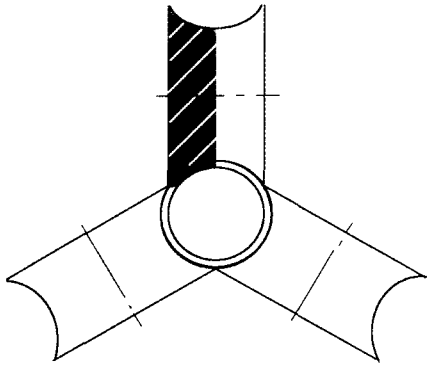


图 1 有限元模型的分析部位示意图

2 边界条件的确定

2.1 材料属性

在有限元模拟中,材料特性包括描述材料性质的各个物理量,如材料的密度、热容、弹性模量、屈服应力、剪切模量等[3]。本文计算选用 ANSYS/LS-DYNA 单元数据库中的 SOLID164 单元(八节点六面体单元),并用以上各个物理量定义其材料特性。

2.2 摩擦条件

在钢管减径过程中,金属与变形工具之间的摩擦机制十分复杂。轧件与变形工具之间的摩擦机制分为三种,即干摩擦、液体摩擦和混合摩擦。在不同的轧制条件下,摩擦状况不同,一般包括其中的两种或同时包括三种[4]。为简化计算,本文假设变形工具与钢管表面之间仅存在干摩擦,摩擦系数符合库仑定律,接触面上单位摩擦力 f 与接触面上的正压力 p 成正比,即

$$f = \mu p$$

式中:μ——摩擦系数,本文选用 $\mu = 0.3$。

2.3 速度条件

实际生产中,一般是采用低速咬入、高速轧制和低速抛出的轧制方法。

2.4 温度条件

有限元模拟必须考虑轧制过程的初始温度场,其中包括轧件和变形工具的温度场。对于轧件的温度,通常可用两种方法加以确定:①认为轧件各部分的初始温度不同,给定精确的温度;②忽略轧件各部分的温度差,认为轧件具有相同的初始温度,因而只给定一个初始温度。通常情况下,确定轧件的精确温度场有两种方法,即通过实际测量或采用有限元法求解热平衡方程[5]获得。由于本文重点在于分析轧制过程的金属变形,而不是研究轧制过程的温度场,为简化计算模型,此处给定一个温度作为轧制的初始温度场,并计算出轧件在该温度下的热膨胀尺寸作为入口尺寸。本文设定钢管的初始温度为 890 ℃。

3 钢管定减径过程有限元模型

在 ANSYS/LS-DYNA 的前处理模块,根据上述分析及大变形弹塑性有限元方法,建立轧件和轧辊接触体的三维有限元模型,其基本计算参数如表 1 所示。

表 1 基本参数表

轧辊	直径/mm	600
	速度/r·min^{-1}	34.33
	材料模型	刚性
轧件	样品几何尺寸/mm	ϕ221.63×6.63×100
	密度/kg·m^{-3}	7 800
	弹性模量/GPa	120
	屈服应力/MPa	41.2
	剪切模量/MPa	408
	泊松比	0.29
	轧件速度/m·s^{-1}	0.8
轧件初始温度/℃		890
接触摩擦系数		0.3

求解模块采用更新的 Lagrange 算法、Prantl-Reuss 流动准则以及 Von-Mises 屈服准则处理轧制过程中轧件的大变形问题。为计算方便,轧辊采用刚性辊,轧件的强化准则采用经典的双线性随动强化准则(BKIN),轧辊和轧件之间的摩擦采用库仑摩擦机制[6]。与隐式分析时的轧辊表现形式不同,对刚性辊也要划分单元[7]。

由于孔型和轧件都具有对称性,可取轧件和孔型接触体的 1/6 作为研究对象来建立有限元模型,并在轧件厚度方向对称面上施加对称约束。考虑到轧件在轧制过程中有一定长度的稳态轧制过程,为计算方便,轧件取 100 mm 长。为了计算准确,单元划分应尽可能多些。划分单元时采用 *ANSYS* 智能网格划分,模拟时采用 1 329 个单元和 2 112 个节点。

钢管单元选用 ANSYS/LS-DYNA 单元数据库中的 SOLID164 八节点六面体弹塑性单元,如图 2 所示。在钢管的 1/6 横截面上,沿径向将钢管壁厚分为 3 等份,沿周向将钢管分为 13 等份,同时沿纵向将钢管分为 11 个截面,1/6 轧件共包括 429 个单元。

轧辊单元也选用 SOLID164 单元并定义为刚性,其网格划分如图 2 所示。轧辊共包括 900 个单元。

维普资讯 http://www.cqvip.com

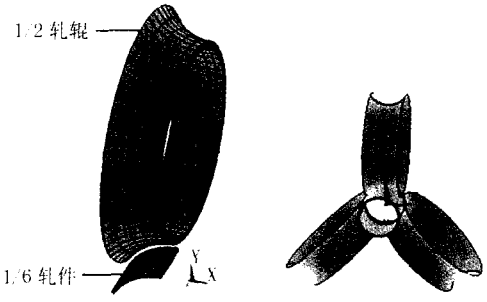


图 2　钢管定减径过程的有限元模型

定减径过程模拟如下：使刚性辊外径以恒定的角速度绕中心轴线旋转，钢管以等于轧辊外径线速度的初始速度向轧辊孔型槽运动，咬入后靠轧辊和钢管之间的摩擦力带动钢管继续运动，直至轧制过程完成。

4　结果分析与讨论

4.1　变形分析

整个轧制过程分为咬入阶段和稳态轧制阶段。图 3 为轧件出口横断面应力分布图，图 4 为轧件沿轧制方向应变分布图。由图 3 和图 4 可见，在轧制过程中，无论沿钢管横向或纵向，应力、应变的分布都是不均匀的。

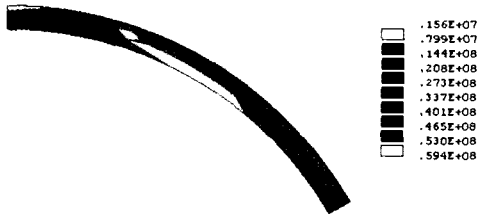


图 3 轧件出口横断面应力分布图

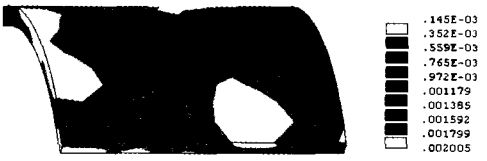
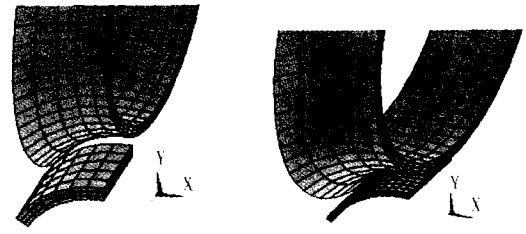


图 4　轧件沿轧制方向应变分布图

图 5 所示为钢管在咬入阶段和稳态轧制阶段的轧制情况。钢管在椭圆孔型中进行轧制时，因孔型形状与荒管横断面不相适应造成局部点接触，来料首先与轧辊孔型侧壁接触，由于钢管空心，开始时仅几点接触轧辊孔型或接触面积很小，故钢管首先产生压扁变形（管壁塑性弯曲），特点是只有断面形状的变化，周长、壁厚无变化，无延伸。待接触面增至一定程度后，孔型侧壁对管子的支撑作用增加，在轧辊拽入力作用下进入减径区，金属开始变形的第二阶段——减径，此时管子平均直径和平均周长减小，金属轴向延伸，管壁有所增厚。由于横断面上各处金属应力状态不同，因而增厚也是不同的。



（a）咬入阶段　　（b）稳态轧制阶段

图 5　轧制过程分析图

4.2　应力分析

图 6 是钢管表面沿轧制方向等效应力分布俯视图。从图 6 中可见，在轧件变形区域，开始咬入时轧件首先和轧辊接触的部位（与辊缝接触区域附近）处于较强的三向压应力状态，变形量越大，三向压应力状态越强，随着变形向孔型顶部发展，压应力状态逐渐增强并达到最大值 56.2 MPa。在轧件纵向上，孔型底部附近处的咬入弧长比辊缝附近的咬入弧长小，这是由于轧件与孔型辊缝附近先接触之故。轧件刚进入轧辊时压力梯度较小，接近轧辊出口时压力梯度较大，中间最小。

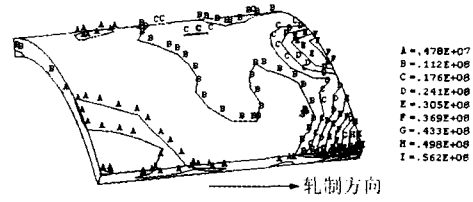


图 6　轧件沿轧制方向应力分布等高线图

4.3　应变分析

图 7 所示为轧件出口处沿横断面上的等效应变。由图 7 中可见，轧制时轧件与轧辊孔型顶部

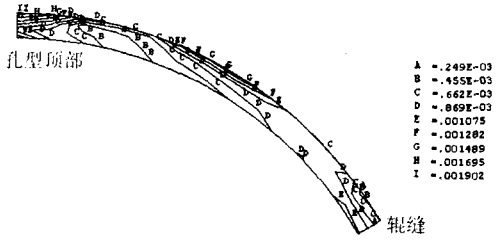


图 7 轧件出口横断面应变分布等高线图

最先接触，发生压扁变形，但只是断面形状的变化，周长、壁厚无变化，无延伸；随着压扁的发展，孔型壁与轧件接触表面不断增加，至一定程度后在径向接触应力作用下开始减径，平均直径减小，荒管出现延伸，壁厚有所增加，当轧件表面完全同轧辊接触后，进入稳定轧制阶段，由于椭圆孔型和辊缝的原因，孔型顶部出单位压力最大，辊缝处最小，使得轧件在与孔型底部接触区域附近等效应

维普资讯 http://www.cqvip.com

变最大,与辊缝接触区域附近等效应变最小。

4.4 壁厚分析

钢管的壁厚增加可以看作是金属的展宽。图 8 是轧件出口横断面上的展宽应变图。实际上,

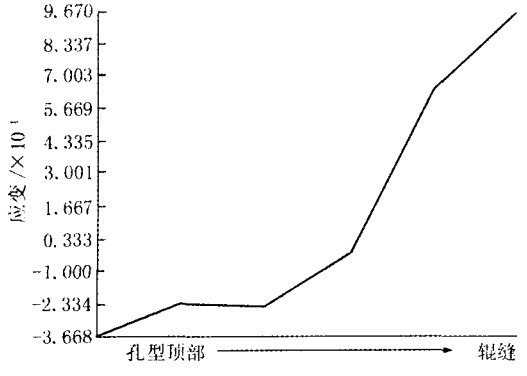


图 8 轧件沿出口横断面展宽应变变化图

无论是定、减径还是张力减径,壁厚沿横向(孔型宽度上)都是不均匀的。如图 8 所示,孔型顶部及其附近处的金属因减径变形而产生延伸和展宽时,由于受孔型槽壁的限制,因此展宽(管壁增厚)只能向内进行;而在辊缝处的金属可以向外增厚;同时,孔型顶部处的单位压力最大,辊缝处最小,因而孔型顶部处金属将向辊缝部位流动。由于上述原因,从而使得减径过程中出现横向壁厚不均匀,在孔型顶部最小,而由孔型顶部至辊缝处逐渐增大。

三辊定径轧制时相邻两机架轧辊轴线呈 60°夹角,即相邻两架共六个轧辊的轴线投影为一正六角形。钢管三辊定径轧制过程中,金属在前一机架与轧辊孔型顶部接触的部分到下一机架时就处于辊缝处。根据上述模拟分析结果,金属展宽造成横向壁厚不均(壁厚由孔型顶部至辊缝处逐渐增大),而不均程度亦可由上述模拟结果得到,这样在进入下一机架时,可根据前一机架的厚度不均程度来调整辊缝值 使得该机架轧出钢管壁厚在横向上(孔型顶部至辊缝)分布趋于均匀,这对于制定、优化钢管定减径工艺及提高成品钢管尺寸精度有良好的指导意义。

5 结语

在适当的假设及边界条件基础上建立起有限元模型,利用有限元分析软件可以直观、适时地对钢管金属变形过程进行有限元仿真模拟,并对减径过程的应力应变分布及轧制力和壁厚变化规律作出分析,不仅能给出金属的塑性流动模式、各种物理量的分布规律,而且还能预测塑性成形过程的缺陷,优化塑性成形过程。

本文得到的变形区应力应变分布状态,以及轧制力和壁厚的变化规律,与实际生产中钢管的变形结果基本一致,并且模拟结果能够较好地解释壁厚不均等现象。分析得到壁厚不均分布程度对于调整后邻机架的辊缝及轧制速度等具有较好的指导意义,可进一步改善钢管壁厚分布均匀程度,提高成品管尺寸精度。

参 考 文 献

[1] 易日. 使用 ANSYS6.1 进行结构力学分析[M]. 北京: 北京大学出版社,2002. 235—380.

[2] Owen D R J, Hinton E. Finite Element in Plasticity—Theory and Practice[M]. Swansea U K:Pinerige Press limited Company, 1980. 113—140.

[3] 乔端,钱仁根. 非线性有限元及其在塑性加工中的应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1990. 27—35.

[4] 吕立华. 轧制理论基础[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991.65—68.

[5] C Liu, P Hartley, C E N Sturgess, et al. Simulation of Cold Rolling of Strip Using an Elastic-Plastic Finite Element Technique[J]. International Journal of Mechanical Science, 1985, 27(11,12):829—839.

[6] 刘才,杜风山,连家创. 薄板连轧过程的变形和应力场. 机械工程学报[J]. 1992.,28 (1):104—108.

[7] 刘立忠,刘相华,王国栋. 轧制过程的显式动力有限元模拟[J]. 力学与实践. 2001,23(5):34—35.

[责任编辑 郑淑芳]