

用数值模拟的方法分析轧辊间距对冷弯成型的影响

付磊

(四川理工学院机械工程学院, 四川 自贡 643000)

摘要:应用三维非线性有限元分析技术,利用 ANSYS 软件的 LS-DYNA 动态分析模块模拟了板料冷弯成型的整个过程,得到了板料成型过程中轧辊间距对轧件应力、应变的影响规律。结果表明,有限元模拟得出的板料应力、应变分布规律与实际情况相符合,采用非线性有限元法对冷弯成型过程进行数值模拟是可行的。

关键词: ANSYS/LS-DYNA; 冷弯成型; 轧辊间距; 数值模拟

中图分类号: TG 33

文献标识码: A

引言

冷弯成型 (Cold Roll Forming) 是通过串联配置的多道次成型轧辊,把卷材、带材等金属板带不断地进行横向弯曲,以制成特定断面的型材。板料的辊弯成形工艺属于金属材料的冷弯成型的三维弹塑性大变形范畴。在成型过程中,板带依次经过各道次轧辊,逐步弯曲成所需要的截面,是一个经历大变形、有限应变的过程^[1]。不仅是横向弹塑性弯曲变形和纵向弹性拉压变形的综合,而且还受外部边界摩擦、孔型几何约束、材料自身加工硬化等因素的影响,具有明显的几何非线性、物理非线性和边界非线性特点,要精确地模拟冷弯成型仿真过程比较困难^[2]。为此,本文采用非线性有限元法对冷弯成型过程中板料的应力、应变分布情况进行仿真研究与分析,并利用 ANSYS 有限元软件的 LS-DYNA 动态分析模块,对不同厚度的 P150L 型钢板成型过程进行了仿真模拟,分别模拟成型过程中成型辊的间距变化对板料圆角部位应力、应变的影响,为进一步深入研究冷弯成型规律奠定基础。

1 冷弯成型原理

1.1 大变形弹塑性本构关系

本构理论可以分为两大类:一类是全量理论(形变

理论),它建立了塑性变形的全量应变与应力之间的关系。另一类是增量理论(流动理论),表达材料处于塑性状态时,应力与应变增量或应变速率之间关系的理论。在冷弯成形的加工过程中,为了反映常温下板料的塑性变形与变形历史的密切关系,一般采用增量理论。用有限元求解时,采用 Prandtl-Reuss 理论,应力和应变分别改用 Jaumann 导数和变形率,则本构方程的分量形式可以表示为^[3]:

$$\sigma_{ij}^{\nabla} = D_{ijkl}^{\text{ep}} \dot{e}_{kl} \quad (1)$$

$$D_{ijkl}^{\text{ep}} = \mathcal{X} \begin{bmatrix} \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{ij} \delta_{kl} \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \right) \\ - \frac{3\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{1}{3G} \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{e}} \right)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: D_{ijkl}^{ep} 为弹塑性刚度矩阵; δ_{ij} 为克罗内克符号; G 为刚性模量; σ'_{ij} 为应力偏量; σ'_{kl} 为应力偏量; $\bar{\sigma}$ 为等效应力,根据 Mises 屈服准则: $\bar{\sigma}^2 = 1.5\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}$; \bar{e} 为等效塑性应变; v 为剪切应变。

1.2 材料的非线性分析

1.2.1 Von Mises 屈服条件

在金属材料三维变形问题中一般采用 Von Mises 材料屈服准则,在一定的变形条件下,当受力物体内一点的应力偏张力的第二不变量 J_2 ,达到某一定值时,该点就开始进入塑性状态^[4]。即:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_s^2 = \mathcal{K}^2 \quad (3)$$

用主应力表示为:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 = \mathcal{K}^2 \quad (4)$$

式中: σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为 x 、 y 、 z 方向应力; σ_s 为材料的屈服应力; \mathcal{K} 为材料的剪切屈服强度。

与等效应力 $\bar{\sigma}$ 比较, Von Mises 屈服条件表示为:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} = \sigma_s \quad (5)$$

1.2.2 流动准则

流动准则定义塑性应变增量的分量和应力分量以及应力增量分量之间的关系。为提出流动准则可采用下列表达式^[5]:

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p, k) = 0 \quad (6)$$

包括总应力 σ_{ij} 、总塑性应变 ϵ_{ij}^p 和硬化参数 k 。如果 ϵ_{ij}^p 和 k 保持为常数则上式解释为应力空间的超表面。塑性势的总的微分形式可写为:

$$df = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}^p} d\epsilon_{ij}^p + \frac{\partial f}{\partial k} dk \quad (7)$$

如果 $df < 0$ 表明指向屈服表面的纯弹性变化, 而塑性应变和硬化参数没有变化即:

$$dg = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} < 0 \quad (8)$$

如果 $dk = 0$ 可解释为中性加载; $dk > 0$ 则发生塑性流动。确定 ϵ_{ij}^p 和 σ_{ij} 关系的流动准则, 必须采用增量形式。

Druker 的材料稳定性假设指出在引起塑性流动的加载循环中, 净功必须大于零。塑性耗散功是总功中的不可逆部分, 可表达为:

$$d\epsilon_{ij}^p d\sigma_{ij} \geq 0 \quad (9)$$

在塑性流动中须有: $\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} > 0$ 因此, 塑性应变增量可以写为

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

式中: $d\epsilon_{ij}^p$ 是塑性应变增量的分量; $d\lambda$ 是一正的待定量, 它的具体数值与材料的硬化法则有关。

1.2.3 硬化准则

为了了解发生初始屈服后, 板带被继续加载及卸载后又重新加载时屈服条件的变化情况, 就必须研究硬化准则。在冷弯成型过程中, 材料若进入塑性后再继续加载, 则应力空间中的屈服面将发生变化, 这就是硬化。

硬化后的新屈服面称为后继屈服面。一般情况下, 后继屈服面取决于应力、塑性应变以及总的塑性功, 其数学表达式可写为^[6]:

$$f(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^p, K) = 0 \quad (11)$$

式中: K 为体现塑性功的参数, 与塑性应变历史有关。

在非线性有限元分析中, 一般有两种硬化方式: 各向同性硬化 (BISO) 和随动硬化 (BKIN)。本文在模拟冷弯成型全过程时, 材料硬化模型采用随动硬化模型 (BKIN)。

2 冷弯成型有限元模型的建立

2.1 冷弯成型过程有限元模拟对象

本文以连续辊式冷弯成型机组所成型的带材 P150L 钢板为研究对象。生产实际中, 金属带材宽度为 510mm, 厚度为 10mm, 机架间距为 1500mm, 8 道次连续辊弯得到成品 C 型钢, 8 道次分别是 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 85° 、 90° 。用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件对 P150L 型钢板成型过程进行数值模拟。着重分析了金属板料在成型过程中的变形规律及应力、应变变化规律。并研究了轧辊间距对冷弯成型过程的影响。

2.2 成型轧辊有限元模型的简化

对带材 P150L 钢板连续冷弯成型进行建模分析时。对于轧辊, 由于成型时板带是在常温、低速条件下发生的变形, 且轧辊的刚性远远大于板带的刚性, 将成型轧辊定义为刚性体, 金属板料定义成变形体^[7]。实际生产中板料成型全过程经历了 8 个道次。模拟时道次取 7 个道次, 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 85° 、 90° 。在模拟中不取 0° 是因为它不参加变形, 只是起到输送板料作用, 这样总共有 30 个成型辊。30 个刚性成型轧辊采用 SOLID164 单元体划分网格, 网格沿周向划分 50 个等分, 这样刚性成型轧辊共划分为 860 个单元, 材料模型为刚性材料。分别建立了轧辊间距为 0.7m 的有限元计算模型如图 1 所示, 0.8m 的有限元计算模型如图 4 所示。

2.3 变形体金属板材的简化

在数值模拟分析中, 板材尺寸取 $510\text{mm} \times 10\text{mm} \times 800\text{mm}$, 圆角弯曲半径为 0.01 m, 用 SHELL163 (壳单元)。材料模型为双线性随动硬化模型 (BKIN), 单元尺寸大小设定为 0.02m, 板料的初速度为 8m/s。接触方式为面对面的自动接触, 既有滑动摩擦同时伴随有滚动摩擦, 静、动摩擦系数 f_s 与 f_d 分别取 0.20 和 0.15。

3 轧辊间距对轧件应力应变影响

本文模拟的带材模型采用工程实际中比较常用的

冷弯成型带材 P150L 钢板。由单向拉伸实验测得材料的各项参数为: 密度 $\rho = 6750 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 泊松比 $\mu = 0.22$, $\sigma_b = 580 \text{MPa}$, 弹性模量 $E = 215 \text{GPa}$, 屈服应力 $\sigma_s = 450 \text{MPa}$ 。求解时间设置为 0.5s , 移动位移设置为 3.0m , 划分了 90 个荷载步。在成型分析时, 根据成型特点, 各成型辊等速旋转。

本节主要讨论了在成型道次和成型角度相同的条件下, 成型辊的间距对板料圆角部位应力、应变的影响。本节分别模拟计算带材 P150L 钢板在轧辊间距为 0.7m 下成形过程的横向应力如图 2 等效弹性应变如图 3 轧辊间距为 0.8m 的横向应力如图 5 等效应变如图 6 成形过程中板料圆角处应变随轧辊间距的变化曲线如图 7, 各项计算参数与上相同。



图 4 机架间距为 0.8m 时的模型图

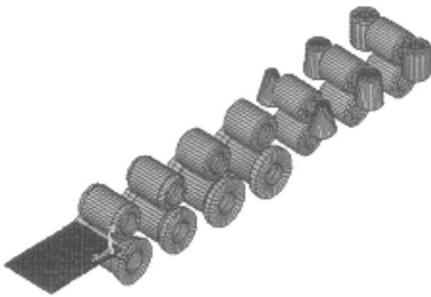


图 1 机架间距为 0.7m 时模型图

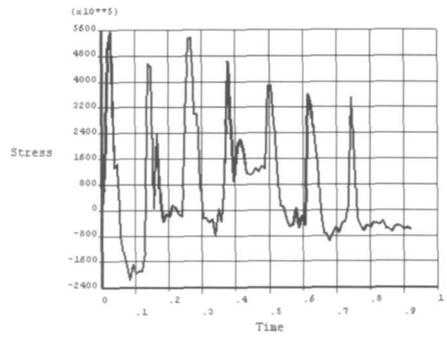


图 5 节点 2034 横向应力 σ_x 随时间变化规律 (0.8m)

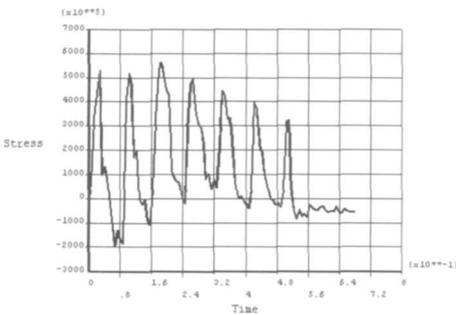


图 2 节点 2034 横向应力 σ_x 随时间变化规律 (0.7m)

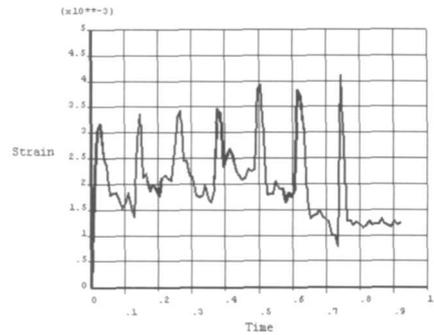


图 6 节点 2034 的等效弹性应变随时间变化规律 (0.8m)

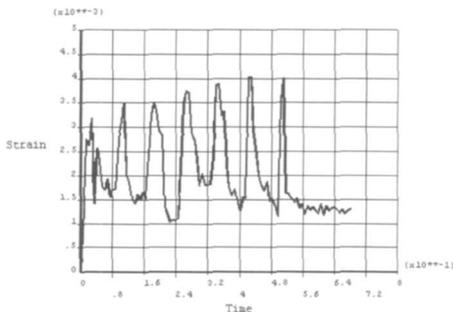


图 3 节点 2034 的等效弹性应变随时间变化规律 (0.8m)

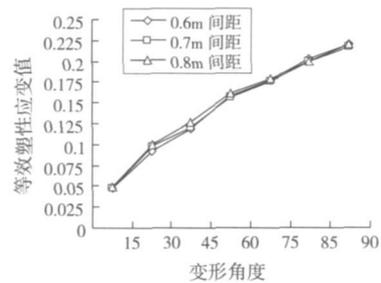


图 7 板料圆角处应变随轧辊间距的变化曲线图

由以上 1~ 7 的图形可以看出: 随着机架间距的增大, 加载位置带材边部受到的横向压应变变化不大, 纵向拉应变有所减小; 纵向和横向应力数值相应减小, 但变化幅度很小; 最大等效应力值和塑性等效应变值的变

化幅度很小。

4 结 论

本文对 P150L 钢板成型过程进行了仿真模拟, 分别得到了成型过程中成型辊的间距变化对板料圆角部位应力、应变的影响。得出: 在成型道次和成型角度相同的条件下对板料圆角部位应力、应变的影响很小, 总体来说, 机架间距的增大有利于带材的成型, 但无明显效果。同时机架间距增大导致生产线加长, 轧机占地面积变大, 增加了生产成本。因此, 在满足成型的条件下, 机架间距不必太大。

参 考 文 献:

[1] 崔高建, 吕相艳, 迟正洪. 成型技术的发展现状

[J]. 机械制造, 2005, 43(10): 41-44

[2] 刘才. 弹塑性有限元法对轧制过程的模拟 [J]. 东北重型机械学院学报, 1987, 11(3): 66-67.

[3] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995

[4] 岳崇锋, 冯光宏, 余万华, 等. Q450 冷弯成型角钢有限元数值模拟 [J]. 武汉科技大学出版社, 2010, 33(1): 23-27.

[5] 陈火红, 杨剑, 薛小香, 等. 新编 Marc 有限元实例教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[6] 蒋友谅. 非线性有限元法 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1988

[7] 刘相华. 刚塑性有限元及其在轧制中的应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

Analysis of the Influence of Roll Spacing on Cold Roll Forming Process by Numerical Simulation

FU Lei

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract 3D nonlinear finite element technique is used to simulate the whole cold roll forming process of plate dynamically based on LS-DYNA module of ANSYS. The influence rule of roll spacing on stress and strain of plate during cold roll forming was obtained. The results indicate that the distribution of the stress and strain of plate obtained from the finite element simulation is in accordance with the actual situation. It is feasible to use the nonlinear finite element method to simulate the cold forming process.

Key words ANSYS/LS-DYNA; cold roll forming; roll spacing; numerical simulation