

⑤
23-28

管材弯曲成型过程的有限元模拟

张华^① 张湘伟^② 廖林灿^② 倪霖^②

TG 335.7

(^① 重庆大学建筑工程学院, 重庆, 400044; ^② 重庆大学机械工程学院; 第一作者 36岁, 男, 博士生, 讲师)

TG 356.5

摘要 采用拖带坐标系下的退化壳单元, 以及动态显式有限元方法求解管材在弯管机上的弯曲成型问题。管材的材料特性假定满足 Hill 各向异性的弹塑性准则, 弯管机的弯曲模和压力模被假定为刚性表面, 接触力通过罚参数方法计算。通过文中的几个算例表明, 该方法是有效的。

关键词 壳体; 接触问题; 有限元; 弯管机

中国图书资料分类法分类号 O242.21; TP315.71

管材

弯曲成型

0 引言

在汽车、摩托车、空调等制造业中, 大量应用弯管机对管材进行弯曲加工作业。在传统的管材弯曲加工工艺设计中, 对于弯曲成型中出现的问题(例如破裂、起皱、延伸量、回弹等), 只能通过简单的成型极限规则和经验来估计。由于很难事先准确地估计出这些可能出现的问题, 需要花费大量的时间来开机试车, 调整加工工艺。

管材弯曲成型过程是一个包括几何非线性、材料非线性和接触非线性在内的复杂问题。有限元方法以其很强的适应性在工程分析的许多方面得到了广泛的应用, 在金属成型性分析中也得到很好的应用^[1]。通过用有限元方法对管材弯曲成型过程的模拟, 在弯管机的模具和加工工艺设计阶段就找出成型过程中可能会出现的问题, 并加以修正, 最大限度地减少试车和修模的次数, 缩短了试制的周期, 也更符合现代产品开发的需要。

作者采用有限元方法对管材弯曲成型过程进行了分析。采用修正 Lagrangian 描述方法和拖带坐标系, 单元采用退化壳单元, 管材的材料特性假定满足 Hill 各向异性的弹塑性准则, 模具被假定为刚性表面, 接触力通过罚参数方法计算, 摩擦力由库仑定律计算。通过几个算例表明, 作者提出的方法是有效的。

1 基本公式

1.1 退化壳单元(Degenerated Shell Element)

根据 Mindlin-Reissner 理论, 这种单元的位移场由两组独立变量——中面上结点的位移和转动来描述。4 节点的四边形双线性形函数单元是一种简单有效的单元。如图 1 所示, 壳单元上任意点的坐标可表示为^[2]

· 收文日期 1998-04-15

国家教育部博士点基金资助项目

$$x(\xi, \eta, \zeta) = N^a(\xi, \eta)X^a + N^a(\xi, \eta) \cdot \zeta \cdot V^a \quad (1)$$

其中: N^a 为 a 点的插值形函数, V^a 为壳单元在 a 点的法向向量。

则壳单元上任意点的速度可表示为

$$v_r(\xi, \eta, \zeta) = N^a(\xi, \eta) \cdot v_r^a + N^a(\xi, \eta) \cdot \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot h \cdot \theta_r^a$$

或者为

$$v_r(\xi, \eta, \zeta) = \bar{N}_{rj}^a(\xi, \eta, \zeta) \bar{v}_j^a \quad (2)$$

其中, v_r^a 和 θ_r^a 分别表示 a 节点的速度和转动角速度。

$$\bar{v}_j^a = [v_1, v_2, v_3, \theta_1, \theta_2]$$

$$\bar{N}_{rj}^a(\xi, \eta, \zeta) = \begin{cases} N^a(\xi, \eta) \cdot \delta_{ri} & (r = 1, 2, 3) \\ -0.5 \cdot N^a(\xi, \eta) \cdot h \cdot \delta_{2i} & (r = 4) \\ 0.5 \cdot N^a(\xi, \eta) \cdot h \cdot \delta_{1i} & (r = 5) \end{cases}$$

速度梯度可以写成下面的形式

$$L_{ij}(\xi, \eta, \zeta) = \partial v_i(\xi, \eta, \zeta) / \partial x_j = \bar{N}_{rj}^a(\xi, \eta, \zeta) \bar{v}_r^a \quad (3)$$

从上式可得到变形率张量 D 和转动张量 W

$$D_{ij} = \frac{1}{2} (L_{ij} + L_{ji}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n (\bar{N}_{rj}^a + \bar{N}_{ri}^a) \cdot \bar{v}_r^a \quad (4)$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} (L_{ij} - L_{ji}) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^n (\bar{N}_{rj}^a - \bar{N}_{ri}^a) \cdot \bar{v}_r^a \quad (5)$$

1.2 弹塑性本构方程

假定:

1) 弹性行为满足小应变线弹性和各向同性;

2) 塑性行为满足变形率与温度无关, 加工硬化, Hill 各向异性和组合流动规则。变形率 D_{ij} 可以分解成弹性部分 D_{ij}^e 和塑性部分 D_{ij}^p , 即 $D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p$ (6)

则 Cauchy 应力的 Jauman 应力率由 Hooke 定律可以写为

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \cdot D_{kl} = C_{ijkl} (D_{kl} - D_{kl}^p) \quad (7)$$

其中, $C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$ 是线弹性本构方程, λ 和 μ 是 Lamé 常数。

对于与速率无关的加工硬化塑性材料, 应满足下面的屈服条件

$$f(\sigma, h) = \bar{\sigma}(\sigma) - Y(h) = 0 \quad (8)$$

上式中, $Y(h)$ 是屈服应力, $\bar{\sigma}(\sigma)$ 是等效应力, 根据 Hill 各向异性屈服条件, $\bar{\sigma}(\sigma)$ 可以表示为

$$\bar{\sigma}^2 = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23} + 2M\sigma_{31} + 2N\sigma_{12} \quad (9)$$

通过利用塑性组合流动准则, 变形率的塑性部分 D_{ij}^p 可以写成

$$D_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (\Lambda \text{ 是塑性乘子, } \Lambda > 0) \quad (10)$$

定义 $Z_{ij} = \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}}$; 则 $D_{ij}^p = \Lambda Z_{ij}$ 。

通过推导可以得到塑性乘子 Λ 的表达式

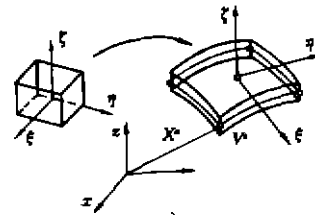


图1 退化壳单元

$$\Delta = \frac{4\mu^2 Z_y Z_M}{H + 2\mu Z_m Z_m} D_M \quad (H \text{ 是加工硬化系数}) \quad (11)$$

因此,最终得到弹塑性应力率的本构方程的表达式为 $\dot{\sigma}_{ij} = C_{ij}^p \cdot D_M$ (12)

其中
$$C_{ij}^p = C_{ij}^e - \frac{4\mu^2 Z_y Z_M}{H + 2\mu Z_m Z_m}$$

1. 3 有限元分析

对于动力问题的有限元方程可以写成下面形式

$$M\ddot{U} + C\dot{U} = P - F \quad (13)$$

其中, M 是质量矩阵, C 是阻尼矩阵, P 是外力向量, F 是内力向量。

利用求解动力方程的中央差分格式, 上面的有限元方程变成以下形式^[5]

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C\right)U^{t+\Delta t} = P - F + M \frac{1}{\Delta t^2}(2U - U^{-\Delta t}) + C \frac{1}{2\Delta t}U^{-\Delta t} \quad (14)$$

如果 M 和 C 被简化为对角线矩阵, 则就不需要解联立方程就可以求出未知量, 式中 Δt 是时间步长。由于上式是条件稳定, 因此要求 Δt 应该满足条件 $\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_n}{\pi}$ (15)

其中, T_n 是结构特征值的最小周期。

在上面动力有限元方程的内力向量 F 的各分量可由以下方程定义

$$F_i^e \delta U_i^e = \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta D_{ij} d\Omega \quad (16)$$

从上式可推导出内力的计算公式:

$$F_i^e = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \sigma_{ij} N_{i,j} |J| d\xi d\eta d\zeta \quad (17)$$

2 接触问题和加载方式

2. 1 接触力的搜导和计算

作用在管材上的外力是弯管机的管材与模具之间的接触力, 由于模具的刚度远大于管材的刚度, 因此, 在接触力的求解中, 忽略模具的变形, 把模具假定为刚体。如图 2 所示, 由于弯管机上的模具表面形状相对比较规则, 可以近似地看成旋转面。因此, 可以用解析表达式来描述。在成型加工过程的有限元分析中, 当管材有限元网格结点侵入压力模或弯曲模内部时, 由于它们已经被假定为

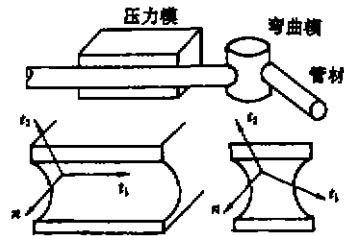


图 2 弯管机的示意图

刚性表面, 因此, 在网格的该结点与模具的接触点上就应该有某个反弹力(接触力), 使网格的结点返回到模具表面。接触点的局部坐标如图 2 所示, 在局部坐标上侵入点到模具表面的法向距离为侵入量, 用 Δd 表示。

法向接触力的表达式可以写成

$$f_n = k\Delta d \quad (18)$$

其中, k 是罚刚度, 管材与模具之间的接触力假定服从经典的库仑摩擦定律, 切向接触力应为

$$f_i = -\text{sign}(v_i) \tau k \Delta t, \quad (i = 1, 2) \quad (19)$$

其中, v 是摩擦系数, t 是局部坐标上接触点的切向单位矢量, $-\text{sign}(v_i)$ 表示与切向速度方向相反。

2.2 边界条件和加载方式

如图2所示, 前段由于与弯曲臂一起运动, 不发生变形, 因此, 作为固定约束处理, 而其它部分为自由。中段作为主要参与变形的部分, 因此, 划分了较细的网格。弯曲臂带动整个管材转动, 而压力模限制管材的中段和后段转动, 由弯曲模和压力模产生的接触力, 使管材发生变形。

3 算例和分析

管材的直径为 22.2 mm, 壁厚为 2 mm, 弹性模量 $E = 210$ GPa, 泊松比 $\mu = 0.3$, 应力应变关系为 $\sigma = 610.0(0.0125 + \bar{\epsilon}_p)^{0.2182}$ MPa, $\sigma_y = 210.0$ MPa, 弯曲臂的转动速度 $\omega = 500^\circ \text{ s}^{-1}$, 摩擦系数为 0.1, 弯曲角度为 60° , 分别以弯曲半径为 50 mm 和 150 mm 两种情况进行弯曲成型。

为了减小动态的影响, 弯曲臂的转动速度用一条曲线来表示^[3]

$$\omega(t) = 500^\circ \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \right) \text{ s}^{-1} \quad (20)$$

其中 T 为总的计算时间。为了保证计算的稳定性, 式(14)中的时间步长 Δt 取为 10^{-6} s。

3.1 弯曲半径为 50 mm, 弯曲角度为 60°

管材的长度取为 260 mm, 其中前段(不参与变形的部分)为 60 mm, 图3所示为成型后的形状, (a)为计算结果, (b)为实验结果。图4显示管材成型后的内、外和中面线, 表1为这些线长度的计算值与实验值的比较, 而这些线在变形前都为 260 mm。图5显示成型后, 弯曲变形部分各截面的长轴和短轴的变化情况。

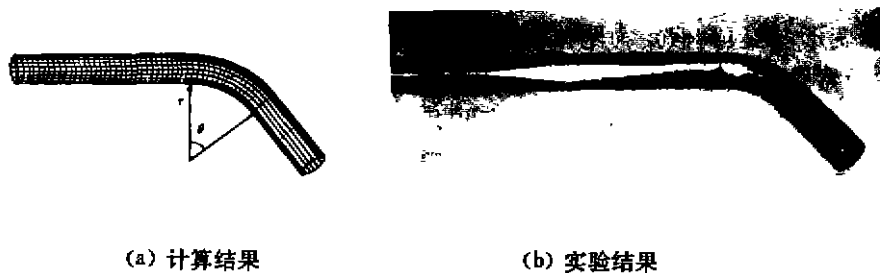


图3 成型后的形状, $r = 50$ mm, $\theta = 60^\circ$

3.2 弯曲半径为 150 mm, 弯曲角度 60°

管材的长度取为 360 mm, 其中前段(不参与变形的部分)为 60 mm, 图6所示为成型后的形状。图7显示管材成型后的内、外缘和中面线, 表2为这些线长度的计算值与实验值的比较, 而这些线在变形前都为 360 mm。图8显示成型后, 弯曲变形部分各截面的长轴和短轴

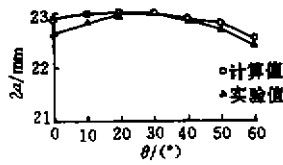
的变化情况。

表 1 塑性变形的比较

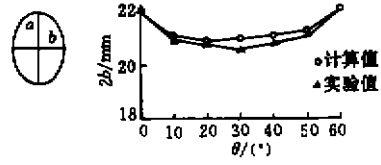
	计算值/mm	实验值/mm	误差/%
AB	271.01	273	0.7
CD	260.27	260	0.1
EF	248.64	249	0.1



图 4 塑性变形情况



(a) 长轴的变化



(b) 短轴的变化

图 5 管材的截面沿弯曲角的变化



(a) 计算结果

(b) 实验结果

图 6 成型后的形状, $r=150\text{ mm}$, $\theta=60^\circ$

表 2 塑性变形的比较

	计算值/mm	实验值/mm	误差/%
AB	371.36	374	0.7
CD	360.23	360	0.1
EF	348.73	347	0.5

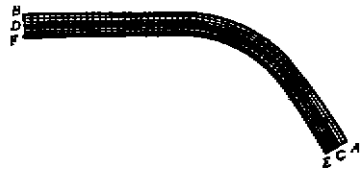
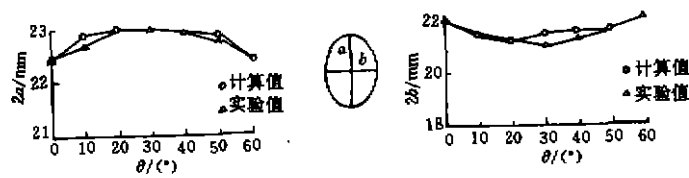


图 7 塑性变形情况

4 结 论

笔者采用壳单元和动态显式有限元方法对管材在弯管机上的弯曲成型过程进行了模拟



(a) 长轴的变化

(b) 短轴的变化

图8 管材的截面沿弯曲角的变化

分析,取得了一些初步成果。从算例与试验的结果比较来看,能较准确的模拟管材在弯曲成型过程中的管材的延伸量和截面的变化。由于采用动态显式有限元解法,具有较高的计算效率,可以在微机上实现管材弯曲成型过程的模拟。作者只是对管材的弯曲成型问题进行初步的研究,对于回弹量的计算、管材成型过程中破坏的标准、有限元网格的自适应再分割等方面还需要作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Lefebvre D, Haug E, Hatt F. Industrial applications of computer simulation in stamping. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994, 46: 351~389
- 2 Kawka M, Makinouchi A. Shell element formulation in the static explicit FEM code for formulation of sheet stamping. NUMISHEET' 93, Isehara, Japan, 1993: 97~107
- 3 Galbraith P C, Halquist J O. Shell element formulations in LS-DYNA3D; Their use in modelling sheet metal forming. NUMISHEET' 93, Isehara, Japan, 1993: 151~160
- 4 李光耀. 三维板料成型过程的显式有限元分析. *计算结构力学及其应用*. 1996, 13(3): 253~268
- 5 张汝清. *计算结构动力学*. 重庆: 重庆大学出版社, 1987: 125~150
- 6 汪凌云, 刘静安. *计算金属成型力学及应用*. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 178~252

The Finite Element Simulation of Pipe Bend Forming

Zhang Hua Zhang XiangWei Liao LinCan Ni Lin

(College of Architectural Engineering, Chongqing University)

ABSTRACT A dynamic explicit finite element method is used to pipe bend forming processes on bender in this paper. The degenerated shell element and co-rotational coordinate system are employed. The material of pipe is assumed to satisfy Hill's anisotropic elasto-plastic yield condition. The bend die and press die are assumed as rigid surfaces and the contact force is computed by penalty method. Several numerical examples are given. They show that this method is effective.

KEYWORDS shell; contact problem; finite element; pipe bender

(责任编辑 钟学恒)