

# 筒形件反旋过程三维刚塑性有限元数值模拟<sup>①</sup>

许沂 单德彬 李萍 吕炎

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要** 建立了更加符合筒形件实际强旋过程的有限元模型, 对筒形件反旋过程进行了三维刚塑性有限元数值模拟。获得了筒形件反旋变形时的应力和应变速率分布, 解释了反旋时的胀径、缩径及母线偏转和隆起等问题, 求得了反旋过程中旋压力的变化, 其结果与实测结果吻合较好。

**关键词** 筒形件 反旋 刚塑性有限元 数值模拟

**中图法分类号** TG302

筒形件强旋作为近代塑性加工中的一个新工艺, 在生产薄壁超长高精度筒形件上具有突出的优点, 已得到广泛应用。筒形件强力旋压时, 随着芯模带动毛坯的旋转以及旋轮的进给, 在毛坯壁厚减薄的同时, 其轴向长度增加。在旋压过程中的每一瞬间变形区都受到周围金属约束的影响, 毛坯内各点的应力状态及位移都十分复杂。

随着强力旋压的发展, 各国学者先后对强旋进行了理论分析和实验研究<sup>[1-4]</sup>。近几年来, 随着有限元方法及计算机的发展, 有不少学者尝试用有限元法分析强旋成形过程。文献[5]采用二维刚塑性有限元法对筒形件强力旋压进行了数值模拟。文献[6]采用ADINA非线性有限元分析软件对筒形件强力旋压进行了三维弹塑性有限元分析。文献[7, 8]对筒形件强力旋压变形过程进行了三维弹塑性有限元数值模拟, 求得了变形体中应力、应变、残余应力等的分布, 并对残余应力分布规律进行了研究。文献[9]提出了一种较为精确的三维刚塑性有限元模型, 并对强力旋压进行了模拟。

综上所述, 有限元法作为一种模拟金属塑性成形过程有效的数值方法, 在筒形件强力旋压方面已开始应用。但由于强旋问题的复杂性, 在处理问题时均作了较大程度的简

化<sup>[4-9]</sup>: (1) 均未考虑旋轮圆角半径的影响; (2) 没有精确计算旋轮与毛坯的接触轮廓; (3) 边界条件的施加没有考虑旋压过程中坯料的转动。因此其计算结果误差较大, 不能准确计算出旋压力, 只能作为定性分析。要精确地分析旋压过程, 并完善理论分析的结果, 就要对力学模型、边界条件和变形过程等进行更接近实际情况的假设, 以使用模拟分析结果更好地指导实际生产。

## 1 刚塑性有限元求解列式

刚塑性有限元法的基础是Markov变分原理, 对离散后的单元 $e$ , 其相应的泛函为

$$\pi^e = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS + \int_V \frac{\alpha}{2} \dot{\epsilon}_V^2 dV \quad (1)$$

式中  $\bar{\sigma}$  为等效应力,  $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}}$ ;  $\dot{\epsilon}$  为等效应变速率,  $\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ ;  $F_i$  为力面  $S_F$  上给定的面力;  $u_i$  为速度矢量;  $\alpha$  为解除体积不变约束的惩罚因子, 本文取为  $10^5$ ;  $\dot{\epsilon}_V$  为体积应变速率,  $\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}_i$ 。

① 收稿日期: 1998-11-05; 修回日期: 1999-03-18 许沂, 男, 33岁, 副教授, 博士研究生

集合各单元的泛函得

$$\pi = \sum_j \pi(j) \quad (2)$$

由 Markov 变分原理知, 问题的真解为泛函一阶变分为 0 时的解。对泛函式(2)取一阶变分并求其驻值, 可得到一组代数方程, 即刚度方程

$$\frac{\partial \pi}{\partial V_I} = \sum_j \left( \frac{\partial \pi}{\partial V_I} \right)_{(j)} \quad (3)$$

式中  $j$  代表第  $j$  个单元,  $I$  为总体编号下的第  $I$  个节点。

刚度方程(3)是一组以节点速度分量为未知量的非线性方程组, 需对其进行线性化处理, 然后采用牛顿-拉普森(Newton-Raphson)迭代法对其进行求解。线性化的具体过程是: 在一假定的初始速度场  $V = V_0$  附近将式(3)用泰勒(Taylor)级数展开, 并略去二阶以上的高阶微量, 得到

$$\left[ \frac{\partial \pi}{\partial V_I} \right]_{V=V_0} + \left[ \frac{\partial^2 \pi}{\partial V_I \partial V_J} \right]_{V=V_0} \Delta V_J = 0 \quad (4)$$

上式的矩阵形式记为

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{V} = \mathbf{f} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{K}$  为刚度矩阵;  $\mathbf{f}$  为节点力矢量残差。

## 2 有限元模型的建立

筒形件强力旋压过程中, 筒形坯料与旋轮之间的相对运动实际上是一个螺旋式的送进过程, 旋轮经过后在坯料上形成的轨迹为一空间螺旋面。接触区域为旋轮表面与毛坯螺旋面和柱面相贯部分, 其形状及大小决定于坯料、旋轮尺寸、进给量、减薄率、旋轮数目等。强旋时接触轮廓的大小及旋轮圆角半径对胀径、变形均匀性、旋压力等具有重要影响。因此, 为了更加精细地分析旋压成形, 本文中严格按照反旋时的实际接触情况, 考虑了旋轮圆角半径, 采用数值计算方法求出了接触区轮廓, 图 1 中根据计算结果画出了强旋时的接触轮廓线。

本文模拟中, 采用三旋轮沿周向呈 120°均

布方式, 并处于同一平面。为了提高有限元计算的精度, 同时考虑计算效率问题, 取毛坯的 1/3 作为力学模型。在接触区及其附近细分了有限元网格, 以充分反映接触轮廓和旋轮圆角大小的影响。模型离散后的网格图见图 1, 共有 1620 单元, 2440 个节点。

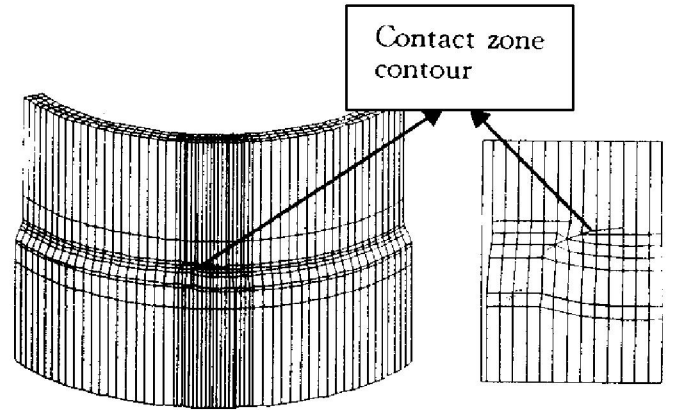


图 1 有限元网格

Fig. 1 Finite element mesh

在模拟过程中, 旋轮与坯料接触表面速度边界条件的施加, 既考虑了旋轮的轴向进给又考虑了坯料随芯轴的旋转, 接触面上任一节点的法向速度均由芯轴转速、进给比根据坯料和旋轮的几何关系求得, 所施加的速度边界条件与反旋过程实际相符, 其具体计算方法另有文章介绍。

## 3 模拟计算结果

本文选择反旋过程中不同的旋轮位置进行了刚塑性有限元计算。计算中, 芯轴直径  $d$  为 70mm, 旋轮直径  $D$  为 170mm, 旋轮圆角半径  $R_0$  为 3mm, 旋轮工作角  $\alpha$  为 25°, 毛坯原始壁厚  $t$  为 5mm, 减薄率  $e$  为 30%, 芯轴转速  $\omega$  为 120r/min, 旋轮轴向进给比  $f$  为 1.6m/rev, 材料流动应力  $\bar{\sigma} = 225(1 + \bar{\epsilon})$  MPa。下面给出了部分计算结果。

图 2、图 3 分别是旋轮行程为  $s = 1$  mm, 7 mm 时坯料表面的应力和应变速率分布(图中只取了变形区附近 20°角范围内部分表面)。图 4 是旋压力在反旋过程中的变化,  $p$  为总旋压

力,  $p_r$  为径向分力,  $p_\theta$  为切向分力,  $p_z$  为轴向分力。本文由于采用了更加精确的力学模型, 其模拟结果和文献[2]的实测结果符合得很好。

### 4 结果分析

筒形件反旋时, 旋轮接触区域在旋轮的作用下沿径向产生压缩变形, 沿轴向和切向产生伸长变形, 轴向和切向的变形受周围金属的强烈阻碍, 故旋轮接触区金属处于三向压应力状态(见图2、图3)。接触区金属沿轴向和切向的伸长变形带动接触区周围金属的变形, 沿周向旋轮前后变形区的金属轴向受拉应力、切向受较小的压应力, 在轴向产生被动伸长。由于环形外端的强烈限制, 其切向产生压缩, 径向产生伸长, 且在旋轮接触区前方金属变形区比后方变形区大得多(图2(e)、图3(e)), 这是由于反旋时旋轮在切向给坯料一向前的作用力所致。

沿轴向旋轮前后变形区金属在轴向产生压缩变形, 径向和切向产生伸长变形。

在起旋阶段(图2), 毛坯端部为自由端, 已变形外端较小, 对接触区金属变形限制不大, 接触区金属变形引起的周围金属的变形及变形范围则较大, 且旋轮后的金属产生较大的切向伸长变形, 结果造成起旋段扩张, 成为“喇叭口”现象, 此时旋压力也较小(图4)。随着旋压过程的不断进行, 已变形外端不断增大, 变形趋于稳定, 反旋变形进入稳定阶段(图3), 此时旋压力基本保持不变(见图4)。

有限元分析的结果很好地解释了强旋时的扩径、缩径和坯料母线偏转及隆起现象。旋轮接触区前后存在两个产生切向收缩变形的区域(图2(e)和图3(e)), 当两个区域的切向收缩变形大于接触区切向伸长量时产生缩径, 而当两个区域的切向收缩变形小于接触区切向伸长量时产生扩径。旋轮接触区周向前后两个收缩变

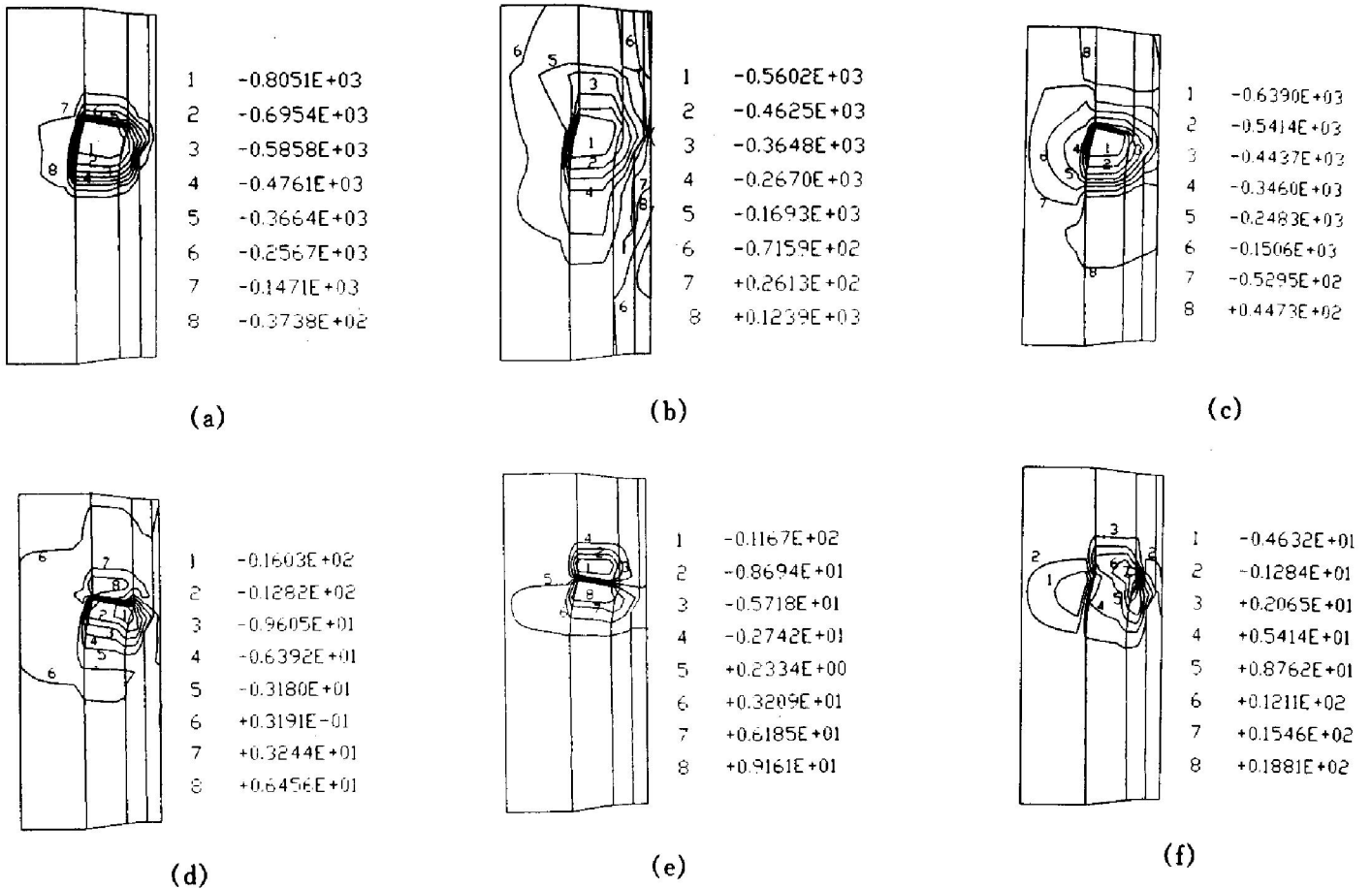


图2 坯料表面上的应力和应变速率分布( $s = 1 \text{ mm}$ )

Fig. 2 Distributions of stress and strain rate on surface ( $s = 1 \text{ mm}$ )

(a)  $-\sigma_r$ ; (b)  $-\sigma_\theta$ ; (c)  $-\sigma_z$ ; (d)  $-\dot{\epsilon}_r$ ; (e)  $-\dot{\epsilon}_\theta$ ; (f)  $-\dot{\epsilon}_z$

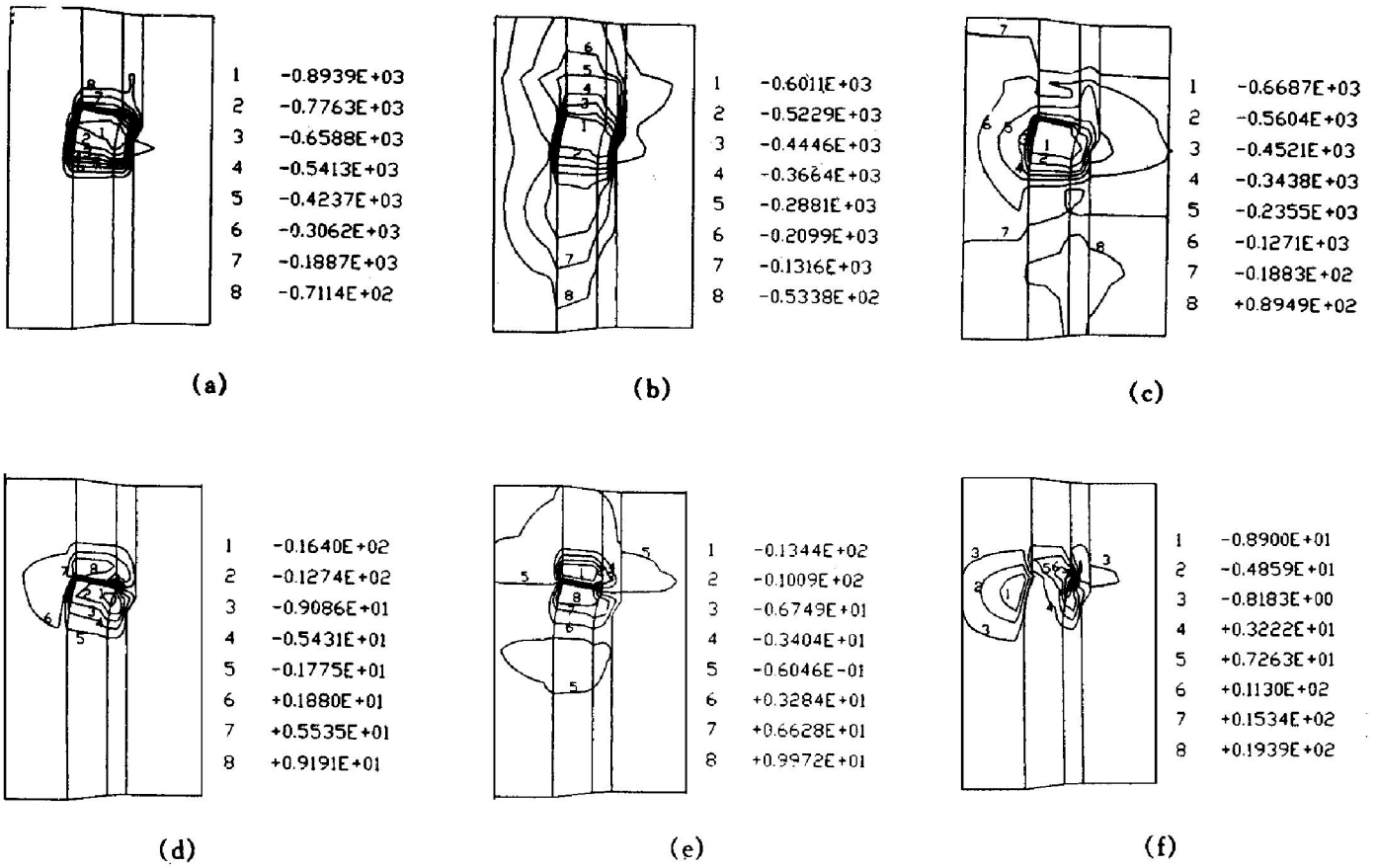


图3 坯料表面上的应力和应变速率分布( $s = 7 \text{ mm}$ )

Fig. 3 Distributions of stress and strain rate on surface ( $s = 7 \text{ mm}$ )

(a)  $-\sigma_r$ ; (b)  $-\sigma_\theta$ ; (c)  $-\sigma_z$ ; (d)  $-\dot{\epsilon}_r$ ; (e)  $-\dot{\epsilon}_\theta$ ; (f)  $-\dot{\epsilon}_z$

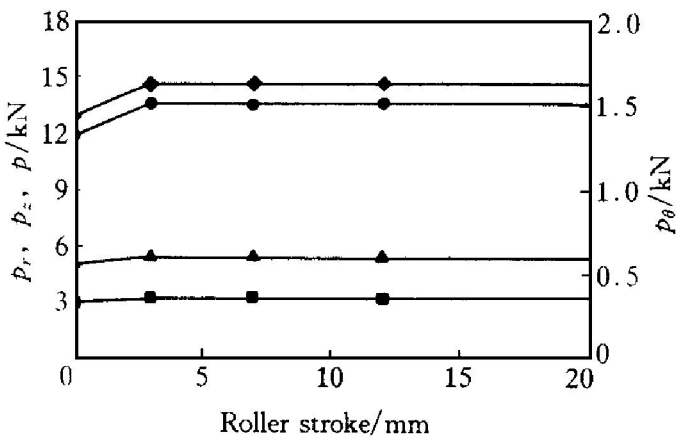


图4 反旋过程中旋压力和旋轮行程的关系

Fig. 4 Relationship between spinning force and roller stroke in backward spinning

●  $-p_r$ ; ■  $-p_\theta$ ; △  $-p_z$ ; ◆  $-p$

形区域的变形大小不同,其前区大于后区,这样变形的结果造成接触区金属沿周向向前流

动,从而导致旋压后坯料母线的偏转。旋轮接触区轴向前方金属的轴向压缩(图2(f),图3(f))和径向伸长(图2(d),图3(d))的结果使金属产生塑性堆积,从而在旋轮前产生隆起。

## 5 结论

(1) 所建立的筒形件反旋三维刚塑性有限元分析模型,考虑了旋轮圆角半径、旋轮与坯料的实际接触面、旋轮的轴向进给、毛坯随芯轴的旋转,故能更好地反映实际变形情况。

(2) 通过三维刚塑性有限元模拟,获得了筒形件反旋变形时的应力和应变速率分布及旋压力,其结果反映了筒形件反旋时的实际变形情况,能够较好地解释反旋过程中的胀径、缩径及母线偏转和隆起现象。

## REFERENCES

- 1 Ma Ze'en(马泽恩). In: The Collection of 1st National Conference on Spinning(第一届全国旋压会议论文集). Beijing: National Defence Press, 1980: 33-51.
- 2 Hayama and Hiroaki Kudo. Bulletin of the JSME, 1979, 22(167): 769-775.
- 3 Chen Kuoxian(陈适先). In: The Collection of 1st National Conference on Spinning(第一届全国旋压会议论文集). Beijing: National Defence Press, 1980: 1-13.
- 4 Chen Kuoxian(陈适先). Journal of Mechanics Engineering(机械工程学报), 1982, 18(3): 41-50.
- 5 Zhou Zhaoyao(周照耀) *et al.* Forging & Stamping Technology(锻压技术), 1997, 1: 29-33.
- 6 Zhao Xianming(赵宪明) *et al.* Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报), 1998, 5(3): 61-63.
- 7 Xue K M, Wang Z, Lu Y *et al.* Journal of Materials Processing Technology, 1997, 69: 172-175.
- 8 Li Kezhi(李克智) *et al.* Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报), 1998, 5(3): 57-61.
- 9 Liu Yingwei(刘英伟) *et al.* Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报), 1998, 5(3): 51-54.

## 3D RIGID-PLASTIC FEM NUMERICAL SIMULATION ON BACKWARD TUBE SPINNING

Xu Yi, Shan Debin, Li Ping and Lu Yan

*School of Materials Science and Engineering,*

*Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China*

**ABSTRACT** A finite element model which fits well with the nature process of tube spinning was built and the process of backward tube spinning was simulated by 3D rigid-plastic FEM. The distributions of stress and strain rate have been obtained. The results can well interpret the radial expansion and radial contraction, deflection of the generatrices and upheaval, etc. The varying of the working force in backward tube spinning is given, it agrees with the experimental result well.

**Key words** cylindrical workpiece backward tube spinning rigid-plastic FEM numerical simulation

(编辑 袁赛前)