

筒形件强旋三维刚塑性有限元分析^①

吕 炎 刘英伟 单德彬

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 在建立筒形件强旋有限元力学模型过程中, 旋轮与工件接触区及其边界的描述是重要的一环。在前人研究成果的基础上, 正确地解决了这一问题, 提出了更加接近实际情况的模型, 并用该模型对强旋工艺过程进行了刚塑性有限元分析, 揭示了工件表面的应力应变分布规律。

关键词 强旋 有限元模型 模拟分析

中图法分类号 TG302

三旋轮错旋工艺是一种高效的加工薄壁超长管的方法, 应用于许多工业部门^[1-4]。自该工艺应用于实际生产以来, 各国学者就对它的成形机理进行了研究。但由于早期条件所限, 人们只能采用主应力法、滑移线法和上限法等传统的塑性加工分析方法进行研究。采用这些方法时, 必须将被研究的模型进行一定的简化, 因此所得的结果不太精确。随着有限元方法的发展, 学者们发现此法可以弥补传统方法的不足, 因此尝试将它应用于强旋的研究, 并取得了一些成果^[5-9], 使人们对强旋的认识提高了一个层次。

本文在前人工作的基础上, 对强旋工艺进行了详细的研究, 发现前人所提出的有限元力学模型有待进一步完善。本文对改进后的模型进行了详细的描述, 并用该模型对强旋过程进行了有限元分析。

1 力学模型的提出

1.1 接触区及其边界的研究

强旋过程中, 在接触区存在着速度边界条件, 而接触区的几何形状又影响着速度边界条件的施加, 因此必须正确地描述接触区及其边

界, 这也是本文所提出的模型与前人的不同。

在强旋的初始阶段, 旋轮锥面将在工件的一端压出一个凹坑, 如图 1(a) 所示。其边界为 $EFDB$ 。其中 AC 为凹坑最低处, 也是旋轮的锥母线。随着强旋的进行, 旋轮做进给运动, 工件做旋转运动, 相对来看, 这种运动关系可以等价于工件静止, 而旋轮一边做进给运动一边绕工件旋转, 于是锥母线 AC 将做螺旋运动, 其轨迹为空间螺旋锥面。这样工件表面的金属被 AC “扫过” 后, 也被成形为空间螺旋锥面, 即图 1(b) 中所示的曲面 II。因而工件与旋轮的接触区 $ABCD$ 的边界 AB 与 CD 由锥面 I 与圆柱面 III 及 IV 相贯而成, BD 则由锥面 I 与空间螺旋锥面 II 相贯而成。

以前, 接触区及其轮廓被简化成平面和直线^[7-9]。这样, 当对工件进行有限元网格离散时由于接触区边界的简化, 会影响网格的划分精度; 另外由于接触区由曲面简化成平面, 会使边界条件的施加和整体坐标系下的单元刚度向局部坐标系下的转换出现误差, 从而影响模拟结果的精确性。

1.2 接触区空间斜约束的施加

在强旋工艺中, 工件有三个部位存在速度约束, 一是工件固定端, 二是工件内表面, 还

① 国家教委博士点基金资助项目 951325 收稿日期: 1998-02-16; 修回日期: 1998-06-16

吕 炎, 男, 64 岁, 教授, 博士生导师

有就是旋轮与工件的接触区。本文对前两者的处理与文献[9]一样,因此不再赘述,而第三种约束的处理较复杂,与前人的有所不同,故详述之。如图2所示,假设工件离散后某单元的面1234与旋轮接触。下面以点1为例说明速度边界条件的施加方法。

为使边界条件施加方便,在点1建立一个局部直角坐标系 $1-X_1Y_1Z_1$,其建立原则如下:以过点1的旋轮锥母线作为 X_1 轴;再过点1做一条直线,其方向垂直于旋轮锥面在该点的切平面并指向圆锥外表面,作为 Z_1 轴;最后根据右手螺旋定则确定 Y_1 轴。

设点1的局部坐标系与整体坐标系之间的变换矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} L_{XX_1} & L_{YY_1} & L_{ZX_1} \\ L_{XY_1} & L_{YY_1} & L_{ZY_1} \\ L_{XZ_1} & L_{YZ_1} & L_{ZZ_1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

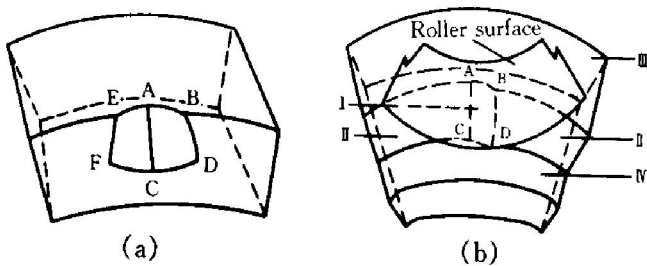


图1 旋轮与工件的接触情况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact situation between roller and workpiece

(a) —Initial contact situation;
(b) —Contact situation during spinning

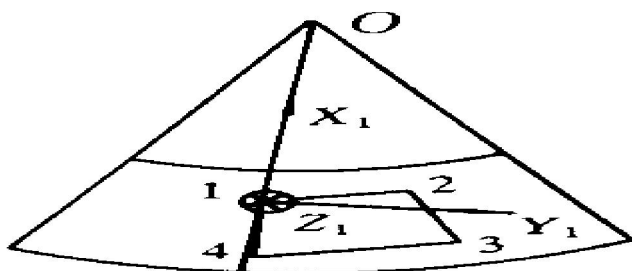


图2 接触点局部坐标系的建立

Fig. 2 Establishment of local coordinate system on contact point

式中 L_{XX_1} 为整体坐标系下 X 轴与局部坐标系下 X_1 轴夹角的方向余弦,矩阵中其余元素的含意与此类似。

接触区节点的边界速度的施加基于如下事实:在某一时刻,当旋轮做进给运动时,点1在旋轮表面滑动,但在 Z_1 方向上紧贴在旋轮表面而不离开,其大小等于旋轮进给速度在 Z_1 方向上的分速度,设旋轮在整体坐标系下的进给速度为

$$U = [u_X \quad u_Y \quad u_Z]^T \quad (2)$$

则点1在局部坐标系 Z_1 方向的速度为

$$v_{Z_1} = u_X L_{XZ_1} + u_Y L_{YZ_1} + u_Z L_{ZZ_1} \quad (3)$$

一般情况下旋轮只做进给运动,因此 $u_X = u_Y = 0$ 。其它接触节点也做如此处理,只是在不同点处变换矩阵(1)有所不同。

由于接触节点的速度边界条件是在各自点的局部坐标系下施加的,因此还要把该单元在整体坐标系下的刚阵和载荷列阵变换到局部坐标系下,再将他们迭加到整体刚阵中,然后计算得出1,2,3及4点的速度也是在各自局部坐标系下的,还要变换到整体坐标系下。

2 模拟结果

由于视觉所限,不可能同时将三个旋轮作用处的应力应变表达出来,但由于错距旋压中的三旋轮均匀分布,因此应力和应变分布有一定周期性,所以只将一个旋轮作用区及其周围部分区域的应力和应变以等值线表示出来(图3)。由于强旋时金属主要沿 θ , r 及 z 流动,因

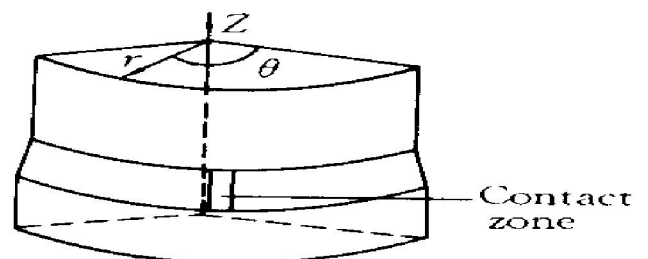


图3 局部坐标系及接触区示意图

Fig. 3 Schematic diagram of local coordinate system and contact zone

此只画出这3个方向的等值线。

正旋模拟结果见图4, 反旋模拟结果见图5。文献[7]的模拟条件与本文相同, 在接触面上, 除了 Z 向的正应变分布区域的大小与本文实验结果有些不同外, 其结果的分布趋势与本文大致相同。

模拟结果分析如下:

(1) 无论正旋还是反旋, 旋轮直接作用区的金属在轴向、径向和切向都处于压应力状态; 在径向处于压缩变形, 在切向处于伸长变形, 在轴向则部分伸长、部分压缩。

(2) 在非直接作用区, 应力应变分布有些

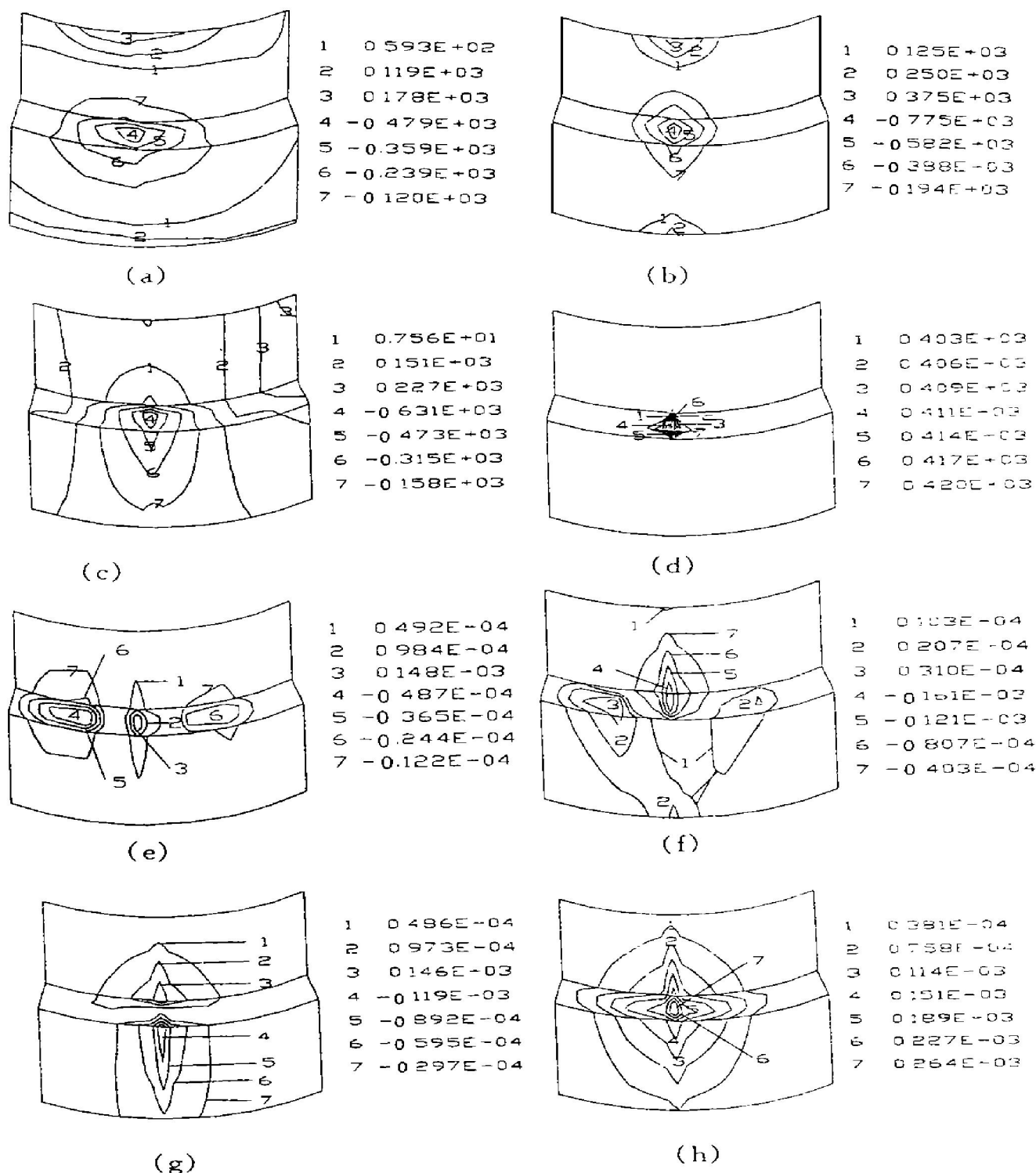


图4 正旋时表面应力和应变分布

Fig. 4 Stress and strain distributions on surfaces of forward spinning

(a) $-\sigma_0$; (b) $-\sigma_r$; (c) $-\sigma_z$; (d) $-\bar{\sigma}$; (e) $-\epsilon_0$; (f) $-\epsilon_r$; (g) $-\epsilon_z$; (h) $-\bar{\epsilon}$

变化。在图4(f)及5(f)中,旋轮作用区侧前方的等值线1,2及3表明该区内的金属在径向处于伸长变形,随着过程的积累会造成旋轮前金属的隆起。

(3) 在图4(g)及5(g)中,等值线3所围成的区域处于旋轮直接作用下,因此其轴向伸长是主动的;在这一区域的带动下,两侧区域的

金属也伸长,但属于被动伸长,同时使这一区域的金属处于拉应力作用,如图4(c)及5(c)中等值线1,2及3所示。

(4) 由于旋轮两侧的金属轴向被动伸长,使得这部分金属在切向处于压缩状态,如图4(e)及5(e)中等值线4,5,6及7所示。

(5) 直接作用区金属的切向伸长量和其两

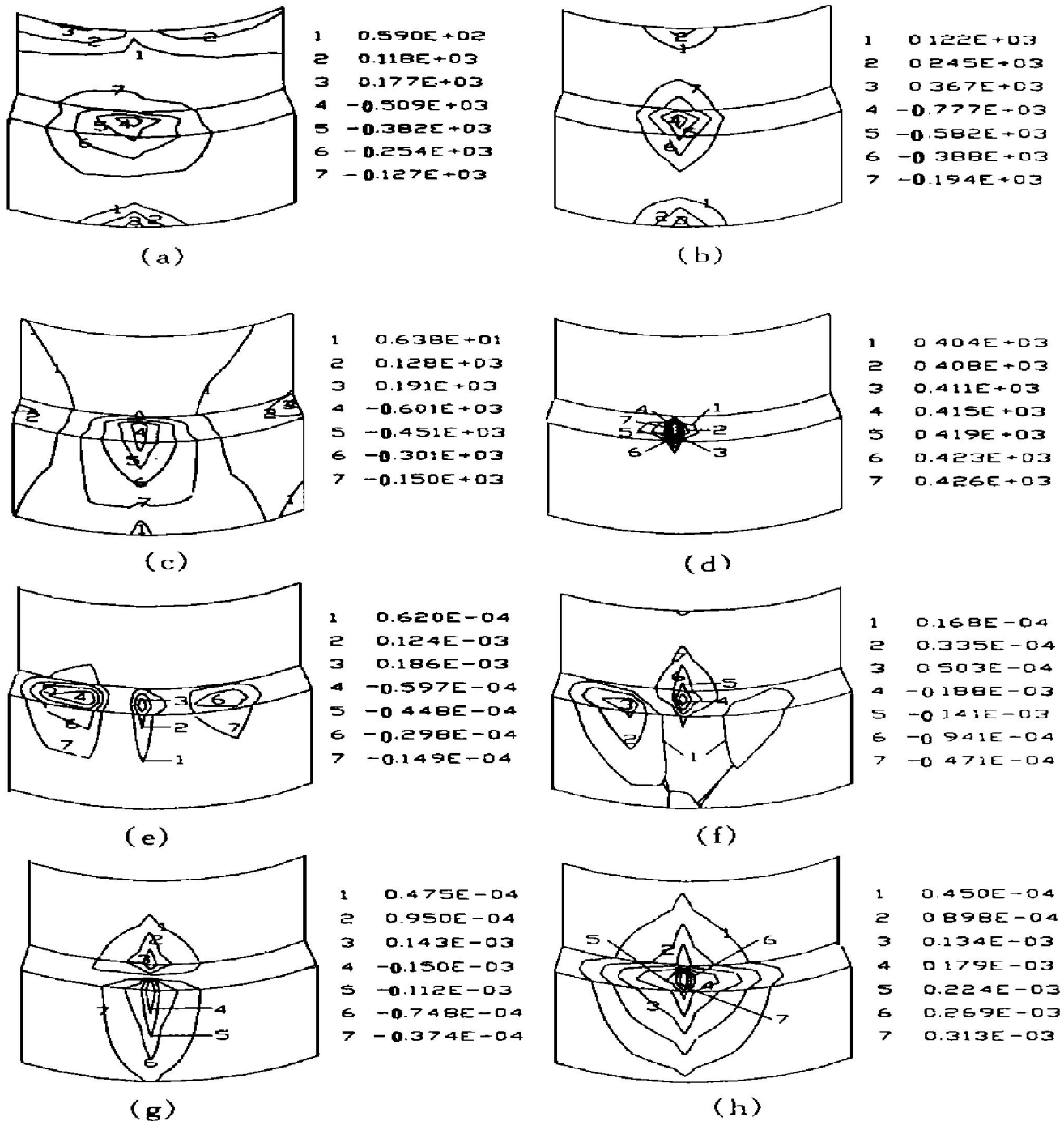


图5 反旋时表面应力和应变分布

Fig. 5 Stress and strain distributions on surfaces of backward spinning

(a) $-\sigma_0$; (b) $-\sigma_r$; (c) $-\sigma_z$; (d) $-\bar{\sigma}$; (e) $-\varepsilon_0$; (f) $-\varepsilon_r$; (g) $-\varepsilon_z$; (h) $-\bar{\varepsilon}$

侧金属的切向压缩量的和将直接影响到旋压件的胀径和缩径, 如果伸长量大于压缩量, 则胀径, 反之缩径。

3 结束语

(1) 提出了较为完善的有限元力学模型, 采用该模型进行模拟所得的结果较好地反映了强旋实际情况。

(2) 模拟结果揭示了强旋的变形机理。

REFERENCES

- 1 Stand Ford S and Martin Elizabeth. *Metallugia*, 1987, (10): 454.
- 2 Rotaresca M I and Theoretical A. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, (54): 224.
- 3 Prakash R and Sighal R P. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, (54): 192.
- 4 Kerrichi Kawai, Satake Makoto, Inove Yokio *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, (48): 135.
- 5 Xue Kemin, Wang Zhen, Lu Yan *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, (69): 172.
- 6 Xue Kemin, Lu Yan and Zhao Xianming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, (69): 176.
- 7 Zhou Zhaoyao(周照耀). PhD Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1994: 97.
- 8 Zhao Xianming(赵宪明). PhD Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995, 6.
- 9 Li Kezhi(李克智). PhD Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1996, 9.

3D RIGID-PLASTIC FEM ANALYSIS OF CYLINDRICAL WORKPIECE POWER SPINNING

Lu Yan, Liu Yingwei and Shan Debin

School of Materials Science and Engineering,

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

ABSTRACT The contact zone between roller and workpiece and its contour's definition are the cruxes of establishing the FEM mechanical model. On the basis of the study results of predecessors, this problem was solved rightly and a FEM simulation model of cylindrical workpiece power spinning, which conforms to the nature of the technology, was proposed and used to simulate the technology process, and the stress and strain distributions on the surface of workpiece were revealed.

Key words power spinning finite element method model simulation analysis

(编辑 黄劲松)