

薄壁管数控弯曲成形过程有限元模拟系统的研究*

林 艳 杨 合 詹 梅

(西北工业大学材料科学与工程学院 西安 710072)

摘要: 建立了合理有限元分析模型, 研究了有限元系统中单元的选取, 边界和摩擦条件的处理, 迭代收敛因子的确定以及起皱预测准则的建立等关键技术问题的处理。在此基础上自主开发了可预测起皱的薄壁管数控弯曲成形过程三维刚塑性有限元模拟系统。同时对该有限元系统的起皱预测结果进行了验证, 并给出了一些模拟结果。

关键词: 薄壁管 数控弯曲 有限元法

中图分类号: TG386

0 前言

薄壁弯管零件可以降低产品的重量, 以满足日益为人们所重视的产品性能、绿色和环保制造的要求^[1]。其制造已由原来的手工或半自动生产转变为由效率、精度更高的数控设备来完成。然而, 由于管弯曲的变形特点, 对于大口径、薄壁管的小半径弯曲成形, 起皱是经常发生的质量问题。目前对弯管零件质量的控制仍然大量依靠经验和在生产条件下反复的试验来实现。由于管数控弯曲过程属于多参数交互影响的复杂成形过程, 因此这一方法不仅不能充分发挥数控设备的优势, 而且所得到的结果往往也不尽人意。因此有必要采用一种更为有效的方法来定量分析薄壁管数控精密弯曲成形过程的成形机理以及成形参数对成形过程的影响规律。

对于不同的管弯曲成形过程, 有限元法是一种被广泛采用且较为有效的数值方法。Forde^[2]运用商用软件 Marc 对矩形截面管材的塑性弯曲过程进行了分析, 获得了成形参数对起皱、外侧塌陷及截面畸变的影响规律。参考文献^[3]开发了专用于管热弯成形过程的有限元分析程序, 分析、预报管成形后的截面畸变情况。Yang^[4]采用 PAM-STAMP 初步分析了数控弯管过程, 发现管坯与防皱块之间的间隙是影响起皱的重要因素。有关薄壁管数控弯曲成形过程(如图 1)的深入分析还未见报道。尽管目前可选用成熟的商用软件对该成形过程进行分析, 但

考虑到分析系统所需的针对性和在生产实际中的可用性, 自主开发了可预测起皱的薄壁管数控弯曲成形过程三维刚塑性有限元模拟系统, 为深入了解其成形机理和规律提供手段。同时深入研究了模拟系统中单元的选取, 边界和摩擦条件的处理以及起皱预测准则的建立等关键技术问题的处理。

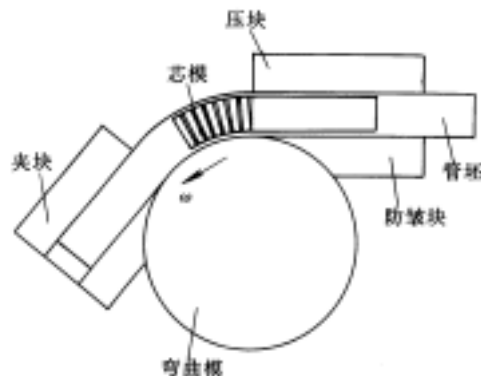


图 1 管数控弯曲过程简图

1 有限元原理

对于薄壁板壳的成形过程, 通常采用弹塑性有限元法进行分析。但对于薄壁件的弯曲过程, 研究表明采用刚塑性有限元法所获得的应力、应变场分布与弹塑性有限元法所获得的接近^[6], 此外刚塑性有限元不需要引入在分析板壳弯曲这类大位移问题时所采用的复杂数学处理。所以综合对计算效率和计算精度的考虑, 采用刚塑性有限元建立薄壁管弯曲成形的有限元分析模型。

根据 Markov 变分原理, 采用罚函数法处理体积不变条件, 刚塑性能量泛函如下式所示^[5]

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

* 国家自然科学基金(59975076, 50175092)、国家杰出青年科学基金(50225518)高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和陕西省自然科学基金(2002E223)资助项目。20020815 收到初稿, 20030120 收到修改稿

式中 $\bar{\sigma}, \dot{\bar{\epsilon}}$ ——等效应力、等效应变速率
 V ——单元体积
 F_i, v_i ——节点所受外力、节点速度
 S_F ——力已知面
 α ——罚因子
 $\dot{\bar{\epsilon}}_V$ ——体积应变率

2 有限元模拟系统关键技术处理

2.1 单元的选取

薄壁管材结构在几何上具有一个方向的尺寸比其他方向小得多的特点,其三维成形问题,通常可采用相对自由度壳单元,其实质是将相对自由度概念引入等参实体单元^[7]。这可以避免采用连续实体单元分析成形过程时,为保持单元在各个方向尺寸相近而导致单元总数过分庞大,使实际分析无法进行。但该单元在处理边界条件时不能直接采用置“1”法或置大数法。因此提出一种同时具有相对自由度和绝对自由度的八节点六面体壳单元,如图2所示。

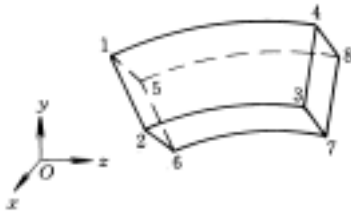


图2 具有绝对和相对自由度的八节点六面体壳单元

对于八节点六面体等参单元的形函数、节点速度矢量和节点位移矢量分别为

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(1 + \zeta_i \zeta) \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_i = \{u_{xi} \quad u_{yi} \quad u_{zi}\} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_i = \{x_i \quad y_i \quad z_i\} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (4)$$

八节点六面体相对绝对自由度壳单元的形函数、节点速度矢量和节点位移矢量分别为

$$\bar{N}_i = N_i + N_{i+4} \quad \bar{N}_{i+4} = N_{i+4} \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_i = \mathbf{u}_i \quad \bar{\mathbf{u}}_{i+4} = \mathbf{u}_{i+4} - \mathbf{u}_i \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (6)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i \quad \bar{\mathbf{x}}_{i+4} = \mathbf{x}_{i+4} - \mathbf{x}_i \quad i = 1, 2, \dots, 4 \quad (7)$$

则对于单元内部任一点的速度和位移为

$$\mathbf{v} = \bar{\mathbf{N}} \bar{\mathbf{u}} \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = \bar{\mathbf{N}} \bar{\mathbf{x}} \quad (9)$$

2.2 摩擦条件的选取

管的冷弯成形过程是非稳态的塑性变形过程,其塑性变形区只集中在局部小区域,而管坯的大部分区域属于非变形区,即刚性区。因此在采用有限元法模拟薄壁管数控弯曲成形过程时宜选取库仑摩

擦模型^[8]来描述管坯与模具的接触情况

$$\sigma_f = \mu |\sigma_n| \quad (10)$$

式中 σ_f ——摩擦应力

μ ——摩擦因数, $0 \leq \mu \leq 0.577$

σ_n ——接触面上的正应力

通过反复迭代求解法来获得表面正压力分布及大小,并求出摩擦力。

2.3 减速因子的确定

刚塑性有限元法采用 N-R 迭代法求解,每次求得的是节点速度增量 $\Delta \mathbf{u}$,并以此修正下次迭代前的节点速度场 \mathbf{u} ,即

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{n-1} + \beta \Delta \mathbf{u}_n \quad (11)$$

其中 β 的取值范围为 $0 < \beta \leq 1$ 。

计算表明, β 对解的收敛性和收敛速度有很大的影响。如果选取不当,甚至使迭代发散,速度场失真。减速因子 β 的选择方法很多,原则上既要保证速度场具有收敛趋势,又要提高速度场的收敛速度。这里就是基于该原则采用三次因式法自动选择减速因子 β ^[9]。即通过式(12)获得 β 。

$$a\beta^3 + b\beta^2 + c\beta + d = 0 \quad (12)$$

式中

$$a = -\sum \Delta \mathbf{u}_k^T \left[\int_V \frac{\bar{\sigma}}{2\dot{\bar{\epsilon}}^3} \left(g - \frac{12}{\dot{\bar{\epsilon}}^3} h^2 \right) \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}_k dV \right]$$

$$b = -\sum \Delta \mathbf{u}_k^T \left[\int_V \frac{3\bar{\sigma}}{2\dot{\bar{\epsilon}}^3} \left(g - \frac{2}{\dot{\bar{\epsilon}}^2} h^2 \right) \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}_k dV \right]$$

$$c = \sum \Delta \mathbf{u}_k^T \left[\int_V \left(\frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \left(\mathbf{K} - \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \mathbf{K} \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^T \mathbf{K} \right) + \alpha \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{C}^T \mathbf{B} \right) \Delta \mathbf{u}_k dV \right]$$

$$d = \sum \Delta \mathbf{u}_k^T \left[\int_V \left(\frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \mathbf{K} \mathbf{u}_k dV + \alpha \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{C}^T \mathbf{B} \mathbf{u}_k dV - \int_{S_F} \mathbf{N} \mathbf{F} dS \right) \right]$$

$$g = \Delta \mathbf{u}_k^T \mathbf{K} \Delta \mathbf{u}_k$$

$$h = \Delta \mathbf{u}_k^T \mathbf{K} \mathbf{u}_k$$

α ——罚因子

\mathbf{B} ——应变率矩阵

\mathbf{u}_k ——第 k 个迭代步的速度列阵

$\Delta \mathbf{u}_k$ ——第 k 个迭代步的速度增量列阵

\mathbf{D} ——等效应变速率系数矩阵

$$\mathbf{C} = \{1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B}$$

2.4 起皱预测判据的建立

能量准则广泛应用于板壳成形过程中起皱预

测。其基本原理为^[10]：当薄壳因干扰力由一个平衡状态变为另一平衡状态时，若势能增加，表明前一平衡状态是稳定的。相反则前一平衡状态是不稳定的。若势能保持不变，此时就是两个平衡状态转变的临界状态。于该临界状态相对应的载荷即为临界载荷。有公式表示为

$$U = T \tag{13}$$

式中 U ——使受压薄壳产生失稳起皱的能量

T ——壳体压缩变形区的塑性变形能

由于篇幅所限，具体的推导过程不再赘述。这里建立的 U 具体表达为

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{t}{2} \iint \frac{E_s}{1-\nu^2} \left(\frac{w^2}{R^2} + \frac{w^2}{r_0^2} + 2\nu \frac{w^2}{Rr_0} \right) Rr_0 \\
 & d\varphi d\theta + \frac{t^3}{24} \iint \frac{E_r}{1-\nu^2} \left[\left(\frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{w}{r_0^2} \right)^2 + \right. \\
 & \left. \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\sin \theta}{Rr_0} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{w}{R^2} \right)^2 + 2\nu \right. \\
 & \left. \left(\frac{1}{r_0^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{w}{r_0^2} \right) \left(\frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\sin \theta}{Rr_0} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{w}{R^2} \right) + 2(1-\nu) \left(\frac{1}{Rr_0} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi \partial \theta} - \frac{\sin \theta}{R^2} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right)^2 \right] Rr_0 d\varphi d\theta
 \end{aligned} \tag{14}$$

式中 w ——起皱波纹的波幅

$$w = \frac{\sqrt{r_0 R_0} \omega dt \varphi_1}{\pi m} \sqrt{\frac{R \cos \theta}{R_0} [1 - \cos(2\pi m \varphi / \varphi_1)]}$$

dt ——有限元计算中加载步的时间步长

ω ——弯曲模的旋转加工速度

R_0 ——管弯曲半径

r_0 ——管径

φ_1 ——沿管弯曲方向的塑性变形区

φ ——管弯曲方向的坐标

θ ——管截面切向方向的随动坐标

E_r ——减缩模量, $E_r = 4EE_t / (\sqrt{E} + \sqrt{E_t})^2$

E_t ——切线模量, $E_t = d\bar{\sigma} / d\bar{\varepsilon}$

E_s ——割线模量, $E_s = \bar{\sigma} / \bar{\varepsilon}$

ν ——泊松比

t ——管壁厚度

$R = R_0 - r_0 \cos \theta$

$$T = \sum_{i=1}^m \bar{\sigma}_i \dot{\bar{\varepsilon}}_i dt \tag{15}$$

式中 m ——压缩变形区的单元数

dt ——有限元计算中加载步的时间步长

$\bar{\sigma}$ ——单元的平均等效应力值

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ ——单元的平均等效应变速率

在所研究的有限元模拟系统中，通过计算每一加载步的 U 和 T 可以实现对管弯曲成形过程中起皱现象的预测，即当 $T/U < 1$ 时成形过程中不发生皱屈，否则管内侧出现皱纹。

3 有限元模拟系统的建立

基于上述的刚塑性有限元原理和关键技术处理，采用面向对象的程序设计方法，按照软件规范化条件进行编制，并结合现有的图形处理软件和工具开发了用于薄壁管数控弯曲成形过程分析的有限元数值模拟系统。此模拟系统具有计算效率高、分析能力强、可移植性好、便于扩充和维护等特点。

本模拟系统有主控模块和各功能模块等各模块，共由 43 个子程序构成，其有限元分析过程如图 3 所示。

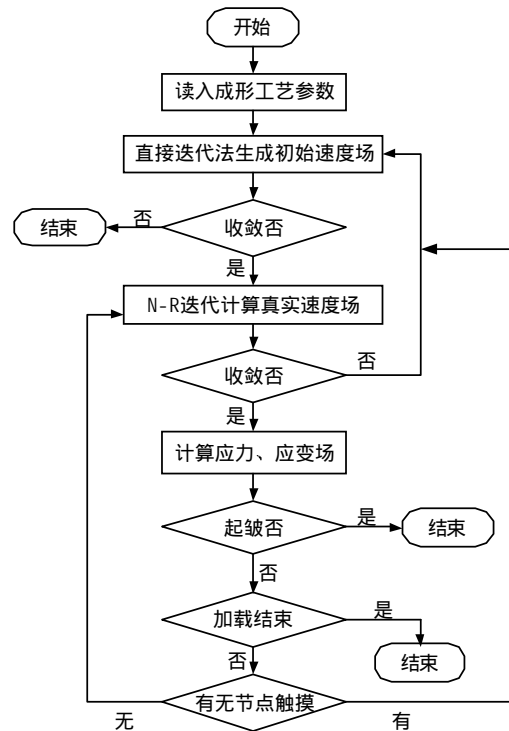


图 3 薄壁管数控弯曲成形过程有限元模拟系统结构

4 实例与分析

4.1 有限元系统的检验

基于上述有限元原理和关键技术处理，同时将该系统的起皱预测结果和参考文献[11]的生产上实际采用值进行了比较(如图 4 所示)。比较结果表明

模拟结果与该值接近，这证明了模拟系统预测结果的适用性和可靠性。因此采用该系统可研究成形参数对管弯曲成形过程及其成形极限的影响规律。

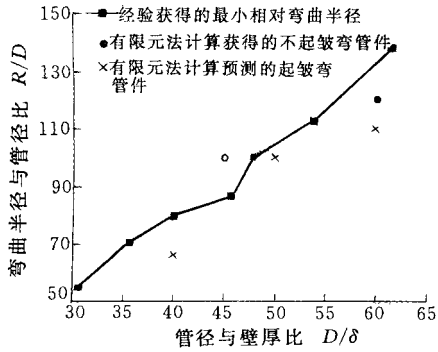


图4 模拟系统预测结果与经验值的比较

4.2 计算实例

对材料为LF21M(本构关系为 $\sigma=184\bar{\epsilon}^{0.354}$)，管外径为63 mm，壁厚为1.5 mm的管坯，弯曲半径为120 mm的弯曲成形过程进行模拟。其中加工参数：弯曲模转速为0.2 rad/s，摩擦因数为0.1。

(1) 变形网格图

图5为管坯在弯曲角度分别为18°、36°、54°、72°、90°时的变形网格图。本系统可以可视化地显示任一变形阶段管坯各部分的变形状态和变形程度。对于这种多参数交互影响的复杂成形过程，普通的试验方法和理论解析法是难以做到的。

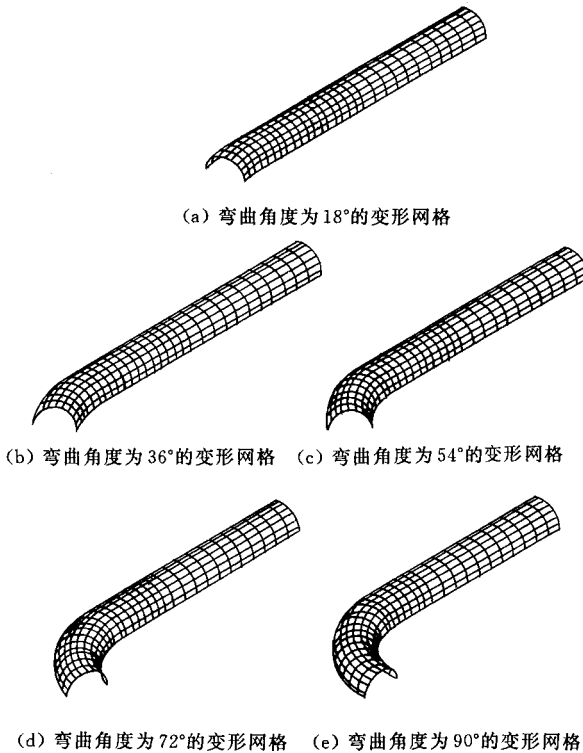


图5 不同弯曲角度下管坯变形网格图

(2) 最大轴向压应力在成形过程中的分布

图6表示弯曲模转速分别为0.2 rad/s, 0.4 rad/s和1.0 rad/s时管坯在弯曲角为72°、90°的轴向应力分布图。从图中可以看出随着加工速度的提高，管坯所受的最大压应力和拉应力增加。这主要是由于当加工速度减小时，管坯参与塑性变形的区域增大，从而使得变形区的最大应变值降低。成形速度对管坯应力状态的影响通常很难采用解析方法获得。而采用试验方法则很难保证加工速度的选取在安全范围内，而不会对设备和模具装置造成损害。

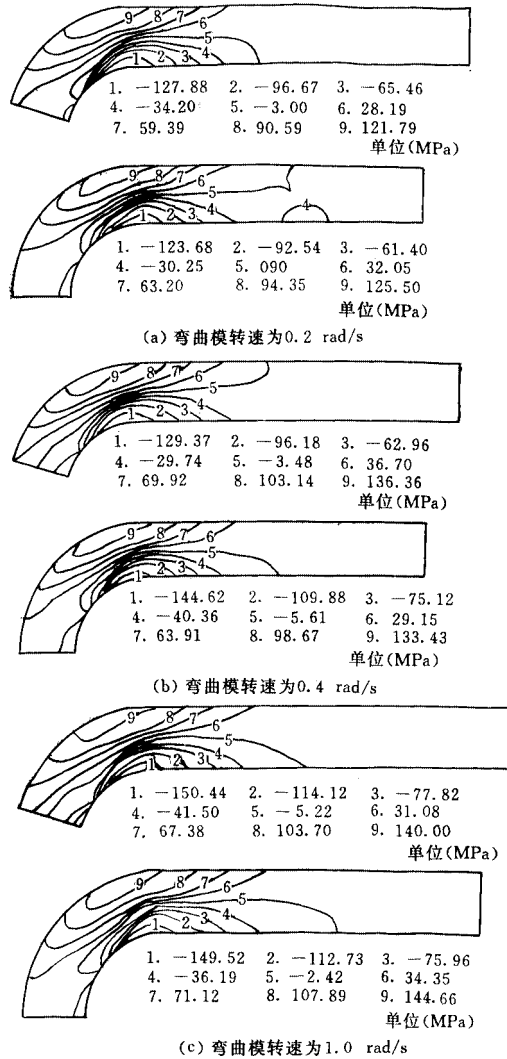


图6 不同弯曲速度下轴向压应力在成形过程中的分布

本系统可以定量考虑多个交互影响的加工参数，而且还可以对参数进行任意的改变以获得它们对成形过程中管坯变形状况和应力分布的影响规律。这不仅克服了理论解析方法存在的问题，同时还可以避免试验研究中参数选择不当造成设备和模具被破坏的可能性。因此所开发的有限元模拟系统可以为制定合理管弯曲加工参数以避免质量缺陷的产生提供了可靠的手段和依据。

5 结论

基于刚塑性变分原理, 采用相对自由度壳单元研究开发了薄壁管数控弯曲成形过程的三维刚塑性有限元模拟系统。同时深入研究了该模拟系统所涉及及关键问题的处理, 提出了解决方案, 并对模拟系统的起皱预测结果进行了验证。验证结果表明了模拟系统的适用性。此外还对不同弯曲模转速下的弯曲成形过程进行模拟, 模拟结果显示该系统可以定量计算管坯在不同成形参数下和不同变形阶段的变形状况和应力、应变分布。这不仅克服了理论解析方法存在的问题, 同时还可以避免试验研究中参数选择不当造成设备和模具被破坏的可能性。所开发的有限元模拟系统可以为制定合理管弯曲加工参数以避免质量缺陷的产生并提高成形精度提供了可靠的手段和依据。

参 考 文 献

- 1 Erman Tekkaya A. State-of-the-art of simulation of sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000(103): 14~22
- 2 Forde Paulsen, Torgeir Welo. Application of numerical simulation in the bending of aluminum-alloy profiles. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996(58): 274~285
- 3 胡福泰. 异型管材与型材无模弯曲工艺理论及实验研究: [博士学位论文]. 齐齐哈尔: 东北重型机械学院, 1995
- 4 J B, Jeon B H, Oh S I. The tube bending technology of a hydroforming process for an automotive part. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001(111): 175~181
- 5 吕丽萍. 有限元法及其在锻压工程中的应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1989
- 6 Kobayashi S, Oh S I, Altan T. *Metal Forming and the Finite Element Method*. New York: Oxford University Press, 1989
- 7 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法. 北京: 清华大学出版社, 1995
- 8 谢水生, 王祖唐. 金属塑性成形工步的有限元数值模拟. 北京: 冶金工业出版社, 1997
- 9 张新泉. 三次因子法——一种加快刚塑性有限元法迭代收敛的新算法. *塑性工程学报*, 1996, 3(2): 24~31
- 10 刘鸿文. 板壳理论. 杭州: 浙江大学出版社, 1987
- 11 王同海. 管材塑性加工技术. 北京: 机械工业出版社, 1998

DEVELOPMENT OF FEM SIMULATION SYSTEM FOR THIN-WALLED TUBE NC BENDING PROCESS

Lin Yan Yang He Zhan Mei
(Northwestern Polytechnical University)

Abstract: Thin-walled tube NC bending process will be widely employed in automobile and aviation industries for its high efficiency, precision and satisfaction of lightweight products. The deform law of this process must be studied in order to totally manufacture qualified parts by obtaining optimized parameters. The key problems concerned with the FEM simulation system, such as element election, boundary condition and friction are studied. A 3D rigid-plastic FEM simulation system is developed for the thin-walled tube NC bending process based on the above research. Moreover the stress distribution during the process with varied rotate velocity of the bend die is analyzed.

Key words: Thin-walled tube NC bending process
FEM simulation

作者简介: 林艳, 女, 1976年出生, 博士研究生。主要从事先进塑性加工技术及计算机仿真研究。