

文章编号: 1000-0887(2002) 03-0292-07

# 外卷边槽钢辊弯成型过程数值模拟<sup>\*</sup>

韩志武<sup>1</sup>, 刘 才<sup>2</sup>, 陆卫平<sup>3</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 燕山大学 轨机研究所, 秦皇岛 066004;  
3. 长春冷弯型钢总厂, 长春 130042)

(薛大为推荐)

摘要: 拓展了结构分析有限条法, 基于固体力学有限形变理论的更新拉格朗日法(U. L. 法), 建立了弹塑性大变形样条有限条法, 并将其用于模拟外卷边槽钢辊弯成型过程, 分析了带材的变形特点, 获得了变形带材的三维位移场、应变场和应力场。算例表明, 变形带材的角部出现横向压应变峰值, 外卷边辊弯前部位出现纵向拉应变峰值。另外, 带材的横向变形是主要的, 纵向变形较小。

关键词: 辊弯成型; 外卷边槽钢; 有限条法; 数值模拟

中图分类号: TG335. 13 文献标识码: A

## 引 言

辊弯成型是重要的金属产品加工方法之一。许多研究人员曾采用不同的分析方法研究辊弯成型过程。T. R. Walker 和 R. J. Pick<sup>[1]</sup>进行了 ERW 焊管坯几何形状模拟研究, 并且提出一种实验方法, 检验用于模拟成型过程应变历史的管坯轮廓几何形状预测的准确性。R. S. Senanayake<sup>[2]</sup>通过计算和实验技术研究辊弯成型, 并且使用计算机可视化技术计算塑性应变。S. M. Panton<sup>[3]</sup>讨论了辊弯成型过程中的应变变化, 尤其是纵向和剪切应变的关系。G. Neffussi<sup>[4]</sup>采用一种简化方法模拟弹塑性材料辊弯成型过程, 此方法在工作站上得以实现。M. Brunet<sup>[5]</sup>采用二维和三维联合有限元法模拟槽钢辊弯成型过程。F. Heislitz<sup>[6]</sup>总结了使用商业化有限元软件模拟辊弯成型的结果, 同时采用三维有限元软件 PAM\_STAMP 实现了模拟过程。由模拟方法获得的带材变形几何形状和应变分布与早先完成的实验结果进行了对比。N. Duggal<sup>[7]</sup>讨论了一种辊弯成型计算机模拟程序, 模拟结果与文献中的结果进行了对比。

上述研究仅限于分析简单断面槽钢和焊管, 本文基于固体力学有限形变理论中 U. L. 法, 建立了辊弯成型过程弹塑性大变形样条有限条分析模型, 将其引入金属成型领域, 用于分析复杂的外卷边槽钢成型过程, 获得了变形带材的位移、应变和应力信息。

## 1 基本理论与模拟技术

### 1.1 样条有限条分析模型的建立

\* 收稿日期: 2000.05.26; 修订日期: 2001.12.25

作者简介: 韩志武(1969—), 男, 吉林集安人, 副教授, 博士, 主要研究领域: 金属成型数值模拟, 机械 CAD, 人工智能, 地面机械仿生技术与理论等, 发表论文 10 余篇。

在辊弯成型中, 变形金属在串列布置的一系列轧辊中成型为具有一定断面形状的产品。这一系列轧辊在成型过程中被分为几个变形阶段, 本文中的研究对象就是位于一个变形阶段中的金属带材。带材沿轧制线方向被划分成若干个有限条, 而在每一个有限条上又划分若干个 B 样条。样条有限条网格模型如图 1 所示。

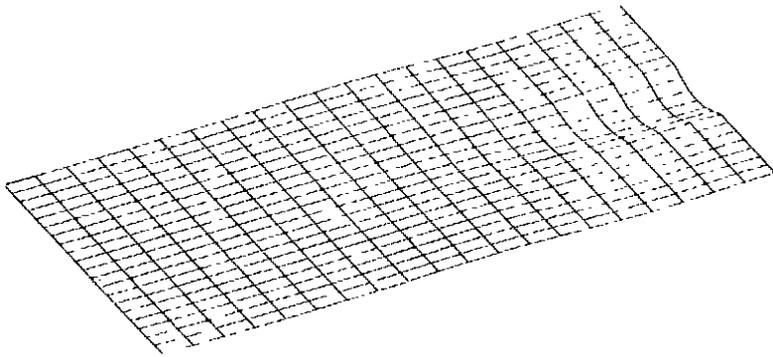


图 1 样条有限条网格模型

在这个理论模型中, 当带材通过轧机时, 忽略带材与轧辊间的摩擦。分析第  $i$  架和第  $i+1$  架机架之间带材的变形时, 由于第  $i+1$  架轧机上辊和下辊的约束作用, 这端带材被认为是固定端, 而另一端带材认为是自由端。在辊弯成型过程中, 位于上下轧辊之间带材的变形认为是由上轧辊将带材压向下轧辊的结果<sup>[8]</sup>。在每一个变形阶段, 带材变形被分为  $M$  个位移增量进行加载。辊弯成型中金属变形并非伴随于整个变形道次, 所以对于变形带材的每一个位移增量, 采用了接触迭代算法判断接触区。

在 U.L. 法中, 当分析在  $t + \Delta t$  时刻带材变形时,  $t$  时刻带材构型被作为参考构型, 因此参考构型是不断变化的。在模拟辊弯成型时, 当变形带材出第  $i$  架轧机时, 弹复后的带材认为是初始分析构型。此时带材的应力状态被认为是分析第  $i+1$  架轧机带材变形的初始应力状态。带材出第  $i$  架轧机时的信息被认为是带材进入第  $i+1$  架轧机的初始信息。这样, 可以连续分析整个成型过程, 并储存每一机架的数据。

### 1.2 位移函数的选取

在 B 样条有限条法中, 位移函数包含两部分: 横向的 Hermitian 三次多项式和纵向的  $B_3$  样条函数。  $B_3$  样条函数满足的特定边界条件。位移函数以矩阵形式表示为:

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_3 & N_4 & 0 & 0 & N_5 & N_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{ \phi_{ui} \} \\ \{ \phi_{vi} \} \\ \{ \phi_{wi} \} \\ 0 \\ \{ \phi_{\theta i} \} \\ \{ \phi_{uj} \} \\ 0 \\ \{ \phi_{vj} \} \\ \{ \phi_{wj} \} \\ \{ \phi_{\theta j} \} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $N_1 = 1 - \xi$ ,  $N_2 = \xi$ ,  $N_3 = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$ ,  $N_4 = b\xi(1 - 2\xi + \xi^2)$ ,  $N_5 = 3\xi^2 - 2\xi^3$ ,  $N_6 = b\xi(\xi^2 - \xi)$ ,  $\xi = y/b$ .  $b$  是条的宽度.  $[\phi_{ui}], [\phi_{vi}], [\phi_{wi}], [\phi_{\theta_i}], [\phi_{uj}], [\phi_{vj}], [\phi_{wj}], [\phi_{\theta_j}]$  是 B 样条函数向量.  $\{u_i\}, \{v_i\}, \{w_i\}, \{\theta_i\}, \{u_j\}, \{v_j\}, \{w_j\}, \{\theta_j\}$  是节线  $i$  和  $j$  的位移参数向量.

### 1.3 应变位移关系的选取

在基于 U. L. 法的有限条分析方法中, 板的大变形应变与位移关系以增量形式表示为

$$\Delta \epsilon_x = \frac{\partial \Delta u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Delta u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta w}{\partial x} \right)^2 \right] - z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_y = \frac{\partial \Delta v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \Delta u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta w}{\partial y} \right)^2 \right] - z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial y^2}, \quad (3)$$

$$\Delta \epsilon_{xy} = \frac{\partial \Delta u}{\partial y} + \frac{\partial \Delta v}{\partial x} + \left[ \frac{\partial \Delta u}{\partial x} \frac{\partial \Delta u}{\partial y} + \frac{\partial \Delta v}{\partial x} \frac{\partial \Delta v}{\partial y} + \frac{\partial \Delta w}{\partial x} \frac{\partial \Delta w}{\partial y} \right] - 2z \frac{\partial^2 \Delta w}{\partial x \partial y}, \quad (4)$$

式中:  $\Delta \epsilon_x, \Delta \epsilon_y, \Delta \epsilon_{xy}$  为增量格林应变;  $\Delta u, \Delta v, \Delta w$  为增量位移.

### 1.4 坐标转换矩阵的修正

在基于 U. L. 法的有限条法中,  $t$  时刻构型被选为参考构型. 分析  $t + \Delta t$  时刻带材变形时, 要进行局部坐标系和公共坐标系之间的转换. 局部坐标系和公共坐标系如图 2 所示.

$t$  时刻公共坐标系下的条元节点坐标可以获得, 则  $t$  时刻局部坐标系下该条元的方向余弦为:

$$[N_x] = [N_x \quad N_y \quad N_z]^T, \quad (5)$$

$$[N_y] = [N_x \quad N_y \quad N_z]^T, \quad (6)$$

$$[N_z] = [N_x \quad N_y \quad N_z]^T. \quad (7)$$

参考图 2, 所有条元的方向余弦值均可得到, 因此可以形成坐标转换矩阵  $[N]$  为:

$$[N] = \begin{bmatrix} \{N_x\}^T \\ \{N_y\}^T \\ \{N_z\}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & N_y & N_z \\ N_x & N_y & N_z \\ N_x & N_y & N_z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

获得了坐标转换矩阵以后, 条元刚度矩阵可以转换到公共坐标系下进行组装. 求解整个刚度方程获得公共位移, 然后将公共位移转换到  $t$  时刻构型局部坐标系下, 计算条元的应变和应力. 最后, 再将  $t$  时刻构型的应变和应力转换到  $t + \Delta t$  时刻的应变和应力.

### 1.5 弹塑性本构方程的建立

考虑 Prandtl-Reuss 塑性流动理论和 Mises 塑性条件, 弹塑性本构关系为:

$$\tau_{ij}^I = D_{ijkl}^{ep} V_{kl}, \quad (9)$$

式中:  $\tau_{ij}^I$  为  $t$  时刻构型的 Jaumann 应力率,  $V_{kl}$  为变形率,  $D_{ijkl}^{ep}$  为弹塑性矩阵.

### 1.6 平衡方程建立及其求解

因为在 U. L. 法中  $t$  时刻构型作为参考构型, 所以  $t + \Delta t$  时刻的虚功方程可以表示为:

$$\int_V \mathcal{E}' S dv = \int_V \delta u^t p dv + \int_{A_t} \delta u^t q dA_t, \quad (10)$$

式中:

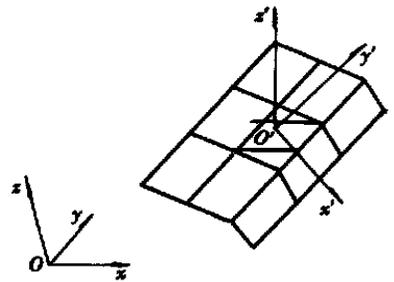


图 2 局部与公共坐标系

$V$  为  $t$  时刻物体构型占据的区域,  $A_t$  为  $t$  时刻外力作用的边界,  $p$  为参考于  $t$  时刻的体力载荷矢量,  $q$  为参考于  $t$  时刻的面力载荷矢量,  $E$  为  $t + \Delta t$  时刻格林应变,  $S$  为  $t + \Delta t$  时刻 Kirchhoff 应力,  $\delta u$  为虚位移

平衡方程中引入本构关系后, 条元刚度矩阵为

$$[K]^e = [K_0]^e + [K_{\sigma}]^e + [K_l]^e, \tag{11}$$

式中:  $[K_0]^e$  为弹塑性小位移刚度矩阵,  $[K_{\sigma}]^e$  为初始应力刚度矩阵,  $[K_l]^e$  为弹塑性大位移刚度矩阵。

在求解平衡方程时, 要对平衡方程采用线性化处理, 即忽略其中大位移刚度矩阵  $[K_l]^e$ 。同时, 进行载荷不平衡项迭代。在每一步迭代过程中,  $[K_0]^e$ ,  $[K_{\sigma}]^e$  和  $\{R\}$  都要根据上次迭代结果进行修正。 $\{R\}$  是初始应力节点力列矩阵。对每一迭代步, 有限条方程是线性的, 但是对每一增量步以及整个加载过程来讲, 有限条方程是非线性的。

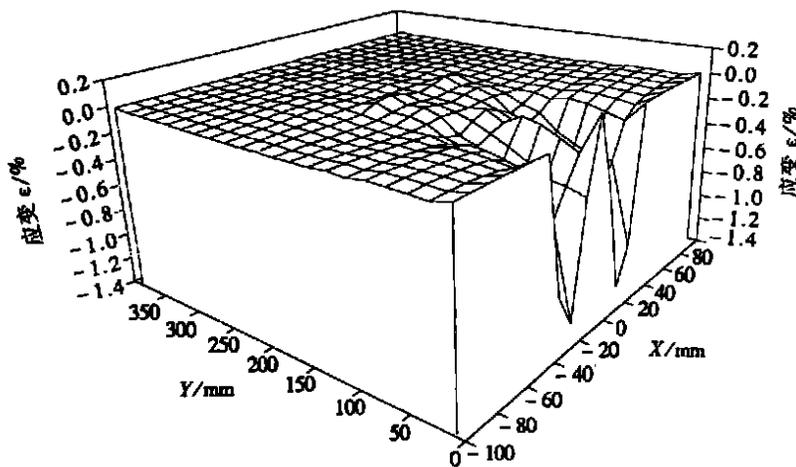


图3 横向薄膜应变三维分布

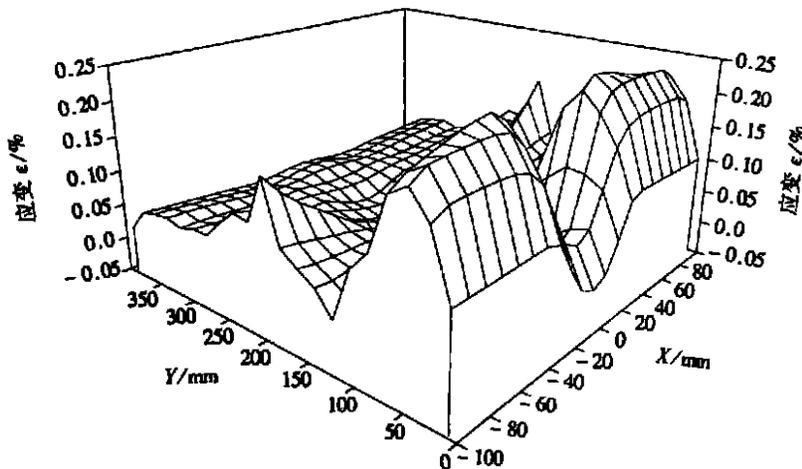


图4 纵向薄膜应变三维分布

## 2 计算实例和结果分析

采用上述理论模型模拟外卷边槽钢的成型过程, 计算条件如表 1 所示。

图 3 和图 4 分别是带材横向和纵向薄膜应变的三维分布。图 5 和图 6 分别是带材横向和纵向薄膜应力的三维分布。X 是带材沿板宽方向位移, Y 是带材沿轧制线方向位移。图 7 是外卷边槽钢成型空间曲面图。

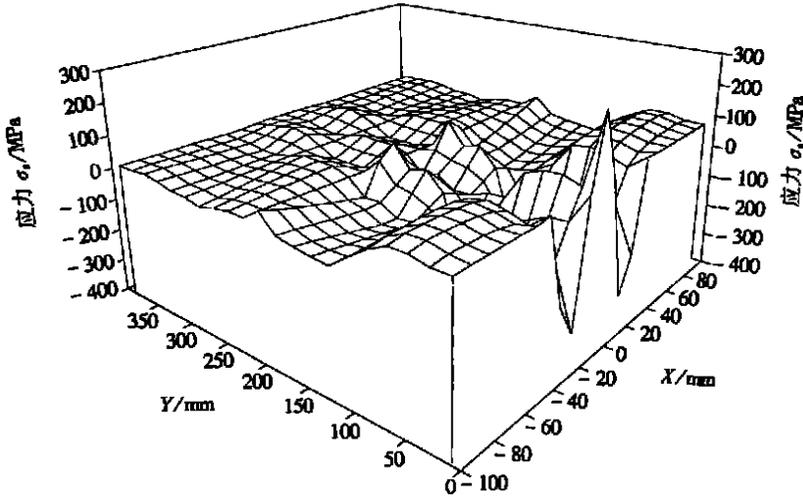


图 5 横向薄膜应力三维分布

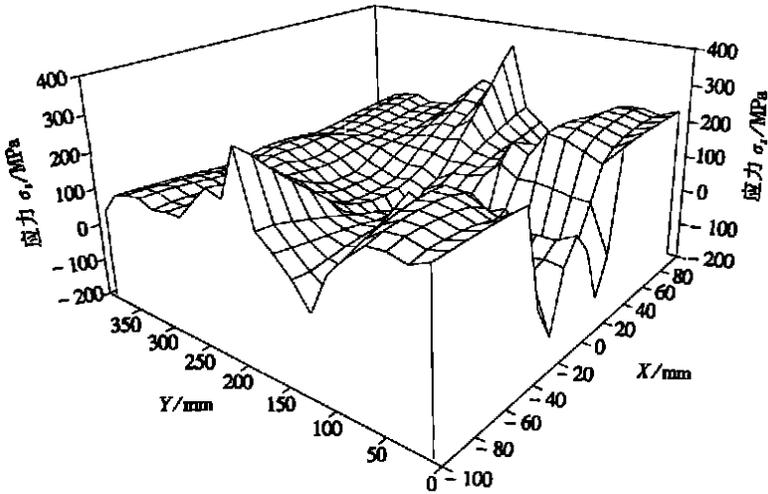


图 6 纵向薄膜应力三维分布

对于变形带材横向薄膜应变的分布, 在带材的角部出现压应变峰值, 而在带材外卷边部位应变变化很小。对于变形带材纵向薄膜应变的分布, 在变形带材的外卷边轧辊前部位出现拉应变峰值, 而在外卷边中间部位有较大拉应变。

对于变形带材薄膜应力的分布, 其具有与薄膜应变相似的分布规律, 但是更为复杂。对于横向薄膜应力的分布, 在变形带材角部出现压应力峰值, 而在腹板部位出现拉应力峰值。对于纵向薄膜应力的分布, 在变形带材的角部出现压应力峰值, 而在外卷边中间部位出现拉应力峰

值。

表 1 计算条件

屈服应力	强化系数	弹性模量	泊松系数	带材宽度	带材厚度	机架间距
$\sigma_s/\text{MPa}$	$H/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$b/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$L/\text{mm}$
315.0	3000.0	210 000	0.3	200.0	2.0	400.0

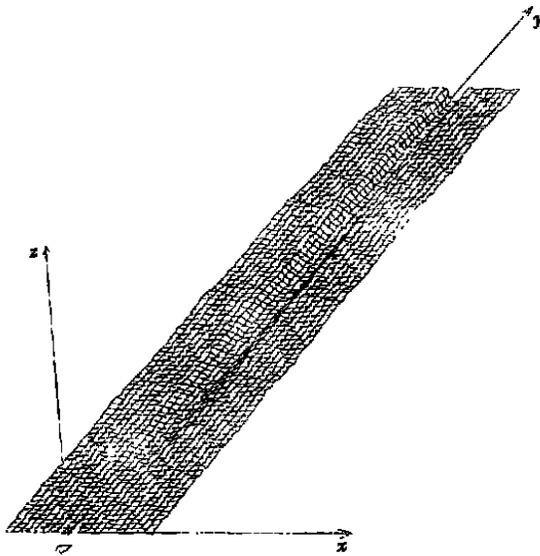


图 7 外卷边槽钢成型空间曲面构型

就整个外卷边槽钢成型过程而言, 可以分析出外卷边槽钢的腿部和角部是大变形部位, 而且横向变形是主要的, 纵向变形较小。因此, 在进行外卷边槽钢轧辊孔型设计时, 仔细分析带材横向变形的合理分布是非常重要的, 这将有利于生产优质产品。

### 3 结 论

本文提出了基于 U. L. 法的弹塑性大变形样条有限条法, 并将其引入金属辊弯成型领域, 用于分析外卷边槽钢辊弯成型过程。采用该理论模型分析了外卷边槽钢成型时变形带材的三维位移场、应变场和应力场, 分析结果表明外卷边槽钢成型过程非常复杂, 其腿部和角部是大变形部位。在孔型设计时, 要仔细考虑带材变形过程中起主要作用的横向变形的分配。本软件系统还可以用于分析其它开口简单断面型材成型过程。

#### [参 考 文 献]

- [1] Walker T R, Pick R J. Developments in the geometric modeling of an ERW pipe skelp[J]. J Mater Process Tech, 1991, 25: 35—54.
- [2] Senanayake R S, Cole I M, Thirumarudchelvan S. The application of computational and experimental techniques to metal deformation in cold roll forming[J]. J Mater Process Tech, 1994, 45: 155—160.
- [3] Pantan S M, Duncan J L, Zhu S D. Longitudinal and shear stain development in cold roll forming[J].

- J Mater Process Tech, 1996, **60**: 219—224.
- [4] Nefussi G, Proslie G, Gilormini P. A simulation of cold\_roll forming for elastoplastic materials[J]. Int J Mech Sci, 1998, **40**(1): 15—25.
- [5] Brunet M, Mguil S, Pol P. Modeling of a roll\_forming process with a combined 2D and 3D FEM code [J]. J Mater Process Tech, 1998, **80\_81**: 213—219.
- [6] Heislitz F, Livatyail H, Ahmetoglu M A. Simulation of roll forming process with the 3\_D FEM code PAM\_STAMP[J]. J Mater Process Tech, 1996, **59**: 59—67.
- [7] Duggle N, Ahmetoglu M A, Kinzel G L. Computer aided simulation of cold roll forming—a computer program for simple section profiles[J]. J Mater Process Tech, 1996, **59**: 41—48.
- [8] Liu C, Zhou Y, Lu W. Numerical simulation of roll\_forming by B\_spline finite strip method[J]. J Mater Process Tech, 1996, **60**: 215—218.

## Numerical Simulation of Roll Forming for Channel Section With Outer Edge

HAN Zhi\_wu<sup>1</sup>, LIU Cai<sup>2</sup>, LU Wei\_ping<sup>3</sup>

(1. School of Biology and Agricultural Engineering, Jilin University  
, Changchun 130025, P R China;

2 Institute of Rolling Mill, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, P R China;

3 Changchun Cold\_Rolled Forming Section Steel General Works,  
Changchun 130042, P R China)

**Abstract:** The finite strip method in structural analysis has been extended, and elastic\_plastic large deformation spline finite strip method based on the Updated\_Lagrange method (U. L method) was established to simulate roll forming process of channel section with outer edge. The deformation characteristics of strip was analyzed, and the three dimensional displacement field, strain field and stress field of deformed strip were got. The calculation example proves that the peak transverse pressing membrane strain is on the corner part of the deformed strip, and the peak longitudinal stretching strain is on the outer edge part of the deformed strip in front of rolls. In addition, the transverse deformation of the deformed strip is principal, and the longitudinal deformation is small.

**Key words:** roll forming; channel section with outer edge; finite strip method; numerical simulation