

# 滚弯成形解析建模与数值分析

赖松柏<sup>1</sup> 陈同祥<sup>1</sup> 于登云<sup>2</sup>

(1 中国空间技术研究院,北京 100094)

(2 中国航天科技集团公司,北京 100048)

**文 摘** 建立了考虑材料塑性强化的滚弯成形力学分析解析模型,推导出了应力应变、残余应力以及回弹半径计算公式。基于非线性有限元软件,对滚弯成形进行了动态模拟,对应力应变状态、塑性应变分布、残余应力以及回弹等进行了分析计算,结果表明:板料滚弯成形初始效应明显,下压点附近曲率不均匀;采用足够的滚弯时间后,中间段的曲率均匀度很好;成形半径与上辊下压量呈近似幂函数关系;多道次滚弯可以减小两端的曲率波动和最大应力应变。最后通过与滚弯成形试验数据的对比,分析和验证了解析模型与数值模型的适用性和精度。

**关键词** 滚弯成形,弹塑性,塑性强化,数值仿真,非线性有限元,回弹

## Analytical Modeling and Simulation of Roll-Bending Process

Lai Songbai<sup>1</sup> Chen Tongxiang<sup>1</sup> Yu Dengyun<sup>2</sup>

(1 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(2 China Aerospace Science and Technology Corp., Beijing 100048)

**Abstract** An analytical model is developed through elastic-plastic mechanics, considering strain-hardening of material, and the formulas of stress, strain, residual stress, springback are given. Based on nonlinear FEM package, the dynamic simulation of roll-bending is also carried out. Then stress state, plastic strain distribution, residual stress and springback are analyzed, together with effect of displacement of toproller and multi-pass. The result shows that curvature near the start point is not uniform, but curvature of the middle section of the plate is very uniform if the rolling time is long enough; the radius of bended plate is a power function of displacement of toproller; multi-pass can reduce the fluctuation of curvature, the maximum stress and strain of the plate in bending. Finally, the analytical model and FE model are verified by experiments.

**Key words** Roll-bending process, Elastic-plastic, Strain-hardening, Simulation, Nonlinear finite element, Springback

### 0 引言

滚弯成形是板料获得圆柱或圆锥曲面经济便捷的成形方法,也是很多双曲面、高阶曲面成形的基本工艺,在航空航天、船舶、石油化工等工业领域中得到了广泛应用。目前滚弯成形工艺参数的确定仍严重依赖试验和操作者的经验<sup>[1-2]</sup>,这阻碍了滚弯成形自适应控制的应用,制约了成形效率和精度的提高;而人们对板料内部应力应变状态、塑性变形分布、残余应力、回弹量等也缺乏足够的理论计算和评估。

考虑材料塑性强化的滚弯成形力学分析复杂,是一个多重非线性动态问题<sup>[3]</sup>。长期以来,人们侧重从工艺和试验角度对成形进行研究,而力学研究较

少。目前已有文献中力学分析多将材料模型简化为理想弹塑性<sup>[2,4]</sup>,或是仅仅针对单道次滚弯,对下压量和成形曲率之间的关系进行研究,以便对滚弯成形进行自适应控制<sup>[1,5]</sup>,尚未发现有文献从力学角度系统分析滚弯成形的材料强化、残余应力-应变、曲率均匀度、成形半径及滚弯道次的影响等问题。

本文建立了一个进行弹塑性分析、残余应力以及回弹计算的解析模型,并对滚弯成形进行了动态数值建模,对平板应力应变状态、塑性应变分布以及回弹曲率等进行了计算,并分析了上辊下压量、滚弯道次等工艺参数对成形结果的影响。最后通过与滚弯成形试验数据的对比,分析和验证了理论解析模型和数

值模型的适用性和精度。

## 1 弹塑性解析分析

### 1.1 简化和假设

(1) 滚弯为平面应变问题, 设板料宽度  $b$  为 1。

(2) 中性层一直与几何中面重合<sup>[3]</sup>。

(3) 采用各向同性线性强化材料模型, 应力应变具有以下关系:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 < \varepsilon < \varepsilon_s \\ \sigma_s + D(\varepsilon - \varepsilon_s) & \varepsilon \geq \varepsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\varepsilon_s$  为屈服应变,  $\sigma_s$  为屈服应力,  $D$  为线性强化模量。

(4) 变形前呈平面状态的横截面变形后仍为平面, 且垂直于中面。

(5) 板材处于单向应力状态, 忽略剪切应力和轴向纤维层之间的挤压力。

(6) 忽略板料与上辊接触处的截面转角, 即假定接触点位于上辊正下方。

### 1.2 应力应变计算

如图 1 所示, 以平板纵向为  $x$  轴, 厚向为  $y$  轴建立坐标系。对于平面应变问题,  $E' = E/(1-\nu^2)$ ,  $D' = D/(1-\nu^2)$ , 其中  $E$ 、 $D$  为材料单向拉伸的弹性模量和强化模量, 当板材都处于弹性变形阶段有

$$\sigma_1 = E'\varepsilon_1 = \frac{E'y}{\rho} \quad (2)$$

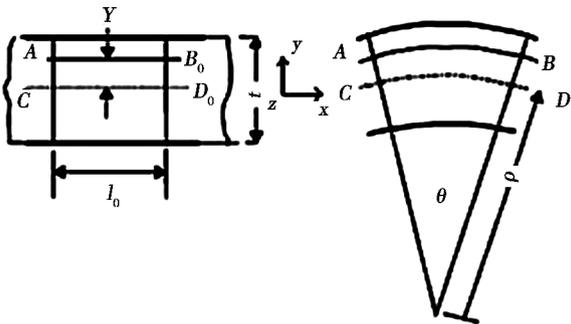


图 1 板料弯曲时的变形

Fig. 1 Deformation of plate under bending moment

由于板料弯曲为平面应变问题且无横向挤压, 故  $\varepsilon_3 = 0$ ,  $\sigma_2 = 0$ , 由胡克定律可得

$$\sigma_3 = \nu\sigma_1 \quad (3)$$

当等效应力  $\bar{\sigma}$  达到单拉屈服应力  $\sigma_s$  时, 板料开始屈服, 于是有

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} = \sqrt{\nu^2 - \nu + 1}\sigma_1 = \sigma_s \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{\nu^2 - \nu + 1}}\sigma_s = \sigma_s' \quad (5)$$

根据胡克定律, 横截面沿厚度方向轴向应力分布为

$$\sigma_1 = \begin{cases} \frac{E'y}{\rho} & |y| < \frac{t_s}{2} \\ \sigma_s' + D'\left(\frac{y}{\rho} - \frac{\sigma_s'}{E'}\right) & \frac{t_s}{2} \leq |y| \leq \frac{t}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $t_s$  为只发生弹性变形的板料厚度, 可由下式求得

$$t_s = \frac{2\rho\sigma_s'}{E'} \quad (7)$$

于是, 可求板内弯矩

$$M = \frac{D't^3}{12\rho} + \frac{(E' - D')\sigma_s't^2}{4E'} - \frac{(E' - D')\rho^2\sigma_s'^3}{3E'^3} \quad (8)$$

板料在成形过程中, 与上辊接触点获得最大成形曲率  $1/\rho_{\min}$ , 板内弯矩也最大。由简化条件(6)和图 2 可求最小成形半径  $\rho_{\min}$  (中性层),  $U$  为上辊下压量。

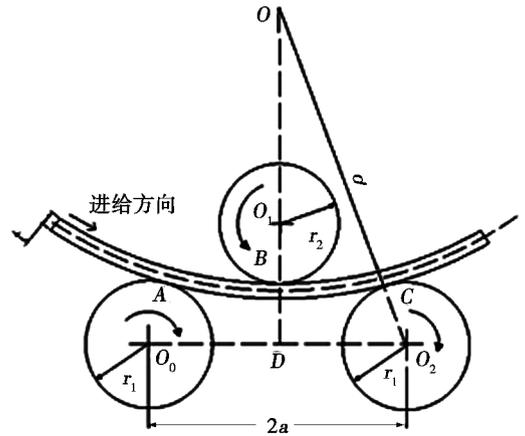


图 2 滚弯成形在理想圆弧假定下的几何关系

Fig. 2 Geometric parameters of roll-bending process with the assumption of cycle

在直角三角形  $ODO_2$  中有

$$\left(\rho_{\min} + \frac{t}{2} + r_1 - U\right)^2 + a^2 = \left(\rho_{\min} + \frac{t}{2} + r_1\right)^2 \quad (9)$$

于是板材回弹前最小成形半径

$$\rho_{\min} = \frac{U^2 + a^2}{2U} - \frac{t}{2} - r_1 \quad (10)$$

由(8)式可知板材最大弯矩为

$$M_{\max} = \frac{D't^3}{12\rho_{\min}} + \frac{(E' - D')\sigma_s't^2}{4E'} - \frac{(E' - D')\rho_{\min}^2\sigma_s'^3}{3E'^3} \quad (11)$$

### 1.3 回弹和残余应力计算

板材进入回弹区域时弯矩逐渐减小, 发生弹性卸载, 当完全卸载时, 弯矩  $M=0$ , 则

$$\Delta M = M_{\max} \quad (12)$$

设  $\rho_f$  为板材完全卸载后的半径, 则有

$$\Delta\varepsilon_1 = \frac{y}{\rho_{\min}} - \frac{y}{\rho_f} \quad (13)$$

$$\Delta\sigma_1 = E'\Delta\varepsilon_1 = \left(\frac{1}{\rho_{\min}} - \frac{1}{\rho_f}\right)E'y \quad (14)$$

于是

$$\Delta M = 2 \int_0^{\frac{t}{2}} \Delta \sigma_1 y dy = \frac{E' t^3}{12} \left( \frac{1}{\rho_{\min}} - \frac{1}{\rho_f} \right) \quad (15)$$

联立(12)-(15)式可得最终成形半径

$$\rho_f = \frac{\rho_{\min} E' t^3}{E' t^3 - 12 M_{\max} \rho_{\min}} \quad (16)$$

板料横截面残余应力

$$\sigma_{1f} = \sigma_1 - \Delta \sigma_1 \quad (17)$$

将(7)式和(15)式代入上式有

$$\sigma_{1f} = \begin{cases} \frac{E' y}{\rho_f} & |y| < \frac{t}{2} \\ \frac{(D' - E') y}{\rho_{\min}} + \frac{E' y}{\rho_f} + \sigma'_s - \frac{D' \sigma'_s}{E'} & \frac{t_s}{2} \leq |y| \leq \frac{t}{2} \end{cases} \quad (18)$$

若采用指数强化模型,可由相同方法建立解析模型。其应力应变关系为:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (19)$$

板料弯曲内部弯矩

$$M = 2 \int_0^{t/2} K' \varepsilon_1^n y dy = \frac{K' t^{2+n}}{(2+n) 2^{1+n} \rho^n} \quad (20)$$

回弹后最终成形半径

$$\rho_f = \frac{\rho_{\min} E' t^3}{E' t^3 - 12 M_{\max} \rho_{\min}} \quad (21)$$

式中,  $M_{\max} = \frac{K' t^{2+n}}{(2+n) 2^{1+n} \rho_{\min}^n}$ ,  $K' = K / (1 - \nu^2)$ 。

## 2 数值分析

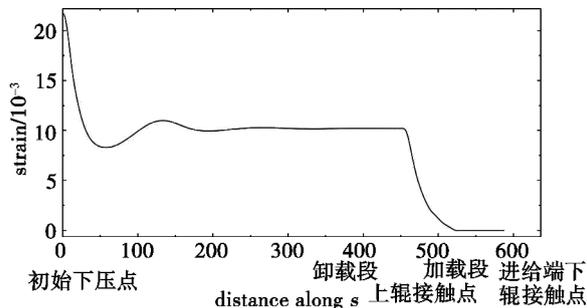
### 2.1 应力和变形分析

板材的滚弯成形涉及材料、几何及边界条件非线性。数值仿真的精度主要决定于建模的准确性。本文对滚弯成形建立一个二维平面应变模型,辊轴采用刚体模型,板料厚度方向采用5个线性减缩积分单元。材料模型采用离散的应力应变实验数据点和Von Mises 屈服准则,在非线形计算时,程序会进行线性插值来求对应的塑性应力。

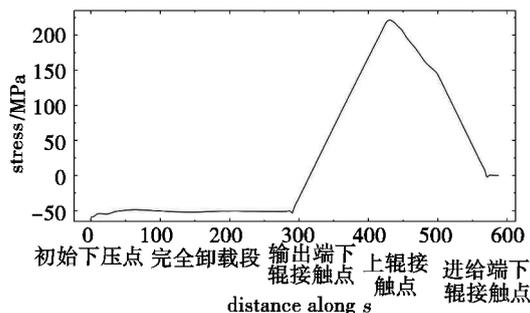
板料通过接触摩擦实现进给,接触问题的处理主要包括接触搜索算法以及接触力的计算,本文采用主从接触搜索算法,接触力计算采用求解较方便的罚函数法。由于滚动过程板料与滚轴之间没有相对滑动速度,采用经典库仑摩擦模型可以满足有限元计算精度和稳定性的要求。数值仿真采用精确度和可靠性都较高的隐式时间积分算法,但在计算高度非线性的接触问题时,该算法收敛比较困难,需要采用较小的时间步长,合理设置分析步和边界条件,尽量避免边界条件剧烈变化。

以初始下压点为基点,由板料凸面(外层)塑性应变沿弧长  $s$  方向分布(图3)可见:滚弯成形有明显

的初始效应,在离初始下压点附近的区域,塑性变形与均匀段相差很大,且波动较大,在远离初始下压点约  $2a$ (下棍间距)的区域,塑性变形一致性与滚弯速度相关,采用足够的滚弯时间后,其曲率均匀度很好。板料在上辊下压处应力最大,在完全卸载后存在较大的残余应力,沿厚度方向残余应力如图4所示。



(a) 等效塑性应变



(b) 轴向应力

图3 板料凸面等效塑性应变和轴向应力沿弧长  $s$  分布曲线

Fig. 3 PEEP and S11 distribution along path-s on outer surface of plate

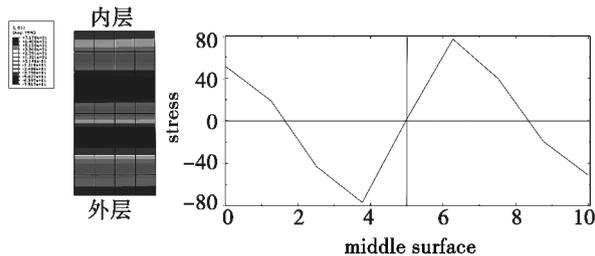


图4 完全卸载段厚度方向残余轴向应力分布

Fig. 4 Residual S11 along thickness of plate after unloading

### 2.2 工艺参数及材料属性对成形影响分析

数值仿真结果表明:在其他参数不变时,下棍间距增大,成形曲率半径会增大;下棍半径增大,成形曲率半径会减小;板料厚度增大,成形曲率半径会减小;材料屈服应力增大,回弹量增大,成形曲率半径增大;上棍轴半径对单道次滚弯结果影响较小,上棍半径增大,成形半径有稍许增大,对于多道次滚弯,上棍半径的影响可以忽略;滚弯加载速率对成形半径影响较小,但对成形曲率均匀度有影响,速率越慢,变形越均匀。

摩擦因数对滚弯成形的影响很大,当摩擦因数较小时,辊轴与板料之间发生相对滑动,只有板料局部发

生变形;当摩擦因数 $\geq 0.14$ 时,辊轴与板料之间无相对滑动。而当滚动顺利开始之后,摩擦因数对成形过程的应力应变几乎没有影响,对成形曲率半径也无影响。

上辊下压量  $U$  和滚弯道次是滚弯成形控制的主要参数。工程中一般通过控制下压量的大小来获得不同曲率半径的成形板料。但是,下压量与成形半径之间的关系非常复杂,至今仍没有满意的理论模型<sup>[1]</sup>。

模拟板料在不同下压量下的滚弯成形,得到成形半径值,对数据进行曲线拟合,得到一个幂函数关系式: $\rho = 88159.54U^{-1.6816}$ 。由图 5 可知,仿真数据和幂函数模型吻合得很好,成形曲率半径和下压量之间近似幂函数关系。

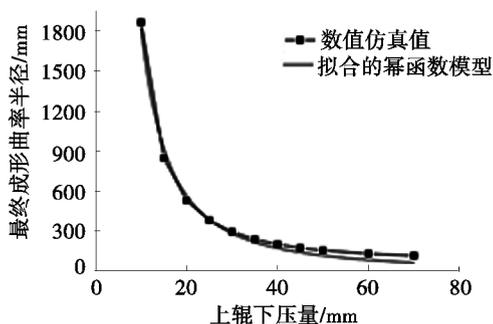
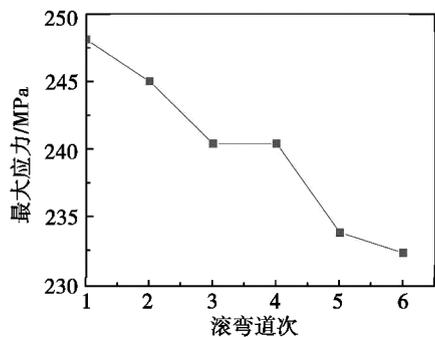
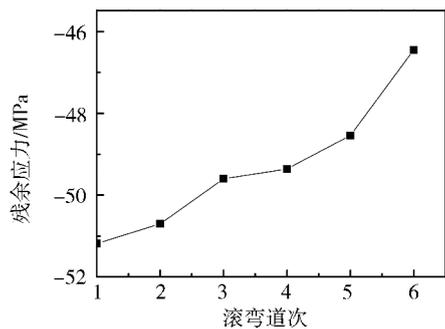


图 5 单道次滚弯成形半径和下压量之间的关系曲线  
Fig. 5 Relationship between final radius and toproller displacement for single roll-pass

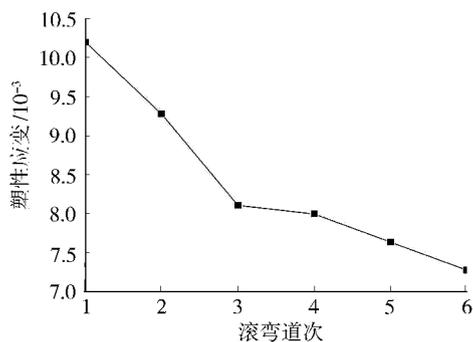
对于各种道次滚弯,板料最大应力出现在最后一个下压步结束时刻(图 6)。多道次滚弯可以使加载更温和,极限应力应变随着道次的增加而减小。对于端点以外的均匀段,道次越多,塑性变形越小,当道次达到一定数目之后,塑性变形趋于稳定。



(a) 最大应力



(b) 残余应力



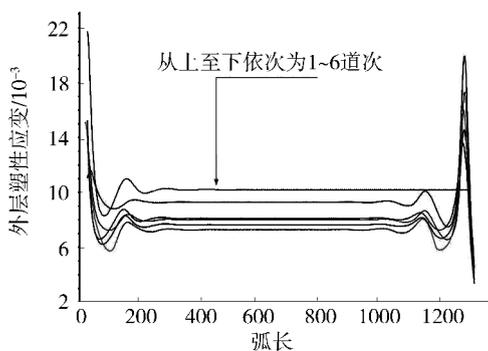
(c) 塑性应变

图 6 不同道次滚弯成形应力应变对比

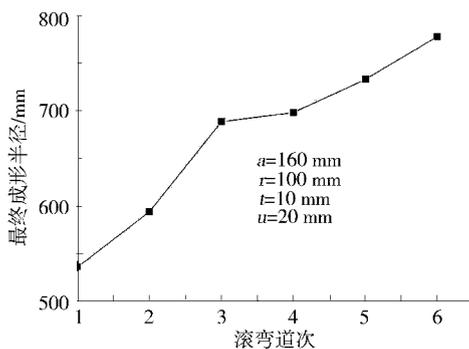
Fig. 6 Comparison of stress and strain for different roll-pass bending

单道次,  $u=20$ ; 2 道次,  $u=10+10$ ; 3 道次,  $u=7+7+6$ ; 4 道次,  $u=7+5+4+4$ ; 5 道次,  $u=7+4+3+3+3$ ; 6 道次,  $u=7+4+3+3+2+1$ 。

滚弯道次对最终成形半径影响也很大(图 7)。



(a) 塑性应变



(b) 成形半径

图 7 不同道次滚弯成形塑性应变分布及成形曲率半径  
Fig. 7 PEEQ distribution and final radius for different roll-pass bending

由图 7 可知,滚弯道次越多,塑性变形波动越小,成形半径越大;随着滚弯道次增多,成形半径会向上趋于定值。这是由于:在相同的下压量和其他滚弯参数下,两下辊轴之间的成形板料曲率越均匀,上辊轴下压点处的最大变形曲率半径  $\rho_{\min}$  越接近于(10)式计算得到的解析值;而板料曲率相差越大,  $\rho_{\min}$  越小。当上辊轴下压点两边都接近直边时(如板料初始下压点的情况),在相同的下压量和其他参数下,  $\rho_{\min}$  最小。由于单道次滚弯,进给段板料接近直边,和卸载

段相差较大,所以其最小成形半径 $\rho_{\min}$ 比多道次小,所以最终成形半径也较小,随着道次的增加, $\rho_{\min}$ 逐渐增大并接近于(10)式得到的解析值。由于解析求解中,假设板料呈理想圆弧状,因此,滚弯道次越多,板料曲率相差越少,解析方法的几何简化误差也越小。

### 3 解析模型和数值模型的试验验证

为了验证建立的解析模型和数值模型的正确性,采用这两种模型对几个铝合金和碳素钢试验件成形试验进行计算,各滚弯试验工艺参数如表1所示,并将成形半径和试验值<sup>[1,6]</sup>进行对比(表2)。

表1 各滚弯成形试验工艺参数

试件	材料	尺寸	上辊下辊下辊			下压量
			直径	直径	间距	
1	2024-O	600×400×2	50	50	72	5
2	2024-T3	600×400×2.5	50	90	130	11=5+6
3	2024-O	600×400×1.5	50	90	130	10=1+4+2+2+1
4	7075-T62	600×400×2	50	90	130	19.5=1+5+5+3+2+2+1.5
5	Q275	1500×400×5	188	163	470	18
6	Q275	1500×400×5	188	163	470	25

表2 滚弯成形半径解析计算值和仿真值与试验值对比

Tab.2 Comparison of final radiuses among analytical model, FE model and experiments

试件	滚弯道次	试验值/mm	解析结果				数值结果	
			线性强化模型值/mm	误差/%	指数强化模型值/mm	误差/%	仿真值/mm	误差/%
1	1	87	119.8	37	133.6	53	84.8	-2.5
2	2	328	436.2	33	189.3	-42	315.2	-3.9
3	5	449	471.1	4.9	291.4	-35	426.6	-5.0
4	7	212	197.6	-6.7	165.7	-21.8	205.4	-3.1
5	1	1412.7	1597.7	13.1	1514.2	7.1	1446.8	2.4
6	1	1047.1	1171.7	11.9	1069.3	2.1	1075.6	2.7

数值模型采用真实的应力应变试验数据,也没有进行几何关系的简化,所以对于不同的材料和滚弯道次,其计算精度均较高,误差<5%,验证了数值模型的正确性,可以用数值虚拟试验代替大量的工程物理试验。

建立的解析模型有一定的适用范围。解析模型误差大小表明:铝合金材料强化效应接近线性强化,而碳素钢材料与指数强化模型更吻合。对于单道次或两道次滚弯,且弯曲半径较小时,由于几何简化误差较大,计算值偏离试验值,如试验件1和试验件2;但对于多道次滚弯成形(试验件3和试验件4)或成形半径较大(试验件5和试验件6)时,若铝合金采用线性强化模型,碳素钢采用指数强化模型,计算结果和试验值较吻合(误差<7.1%)。解析模型计算量很小,可以对滚弯成形进行快捷地分析和计算。

### 4 结论

铝合金采用线性强化模型误差较小,而碳素钢材料与指数强化模型更吻合;对于多道次或成形曲率较小的滚弯成形,建立的塑性强化解析模型计算结果和试验结果都很接近(误差<7.1%),可以对滚弯成形进行快捷地计算和分析。

由数值分析可知:板料滚弯初始效应明显,下压点附近曲率很不均匀;中间段的曲率与滚弯速率相关,采用足够的滚弯时间后,曲率均匀度很好;工艺参

数和材料属性对成形结果影响很大,成形半径与上辊下压量呈近似幂函数关系;多道次滚弯可以减小两端的曲率波动和最大塑性应力应变;滚弯道次越多,成形半径越大。数值仿真计算精度较高(误差<5%),可以采用数值虚拟试验代替工程物理试验来确定成形工艺参数,这能大大减少试验成本和时间。

### 参考文献

- [1] Gandhi A H, Raval H K. Analytical and empirical modeling of top roller position for three-roller cylindrical bending of plates and its experimental verification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 268-278
- [2] 茅云生, 侯磊, 王呈方. 板材滚弯成形的理论计算与自动控制模型[J]. 中国造船, 2003, 44(2): 74-80
- [3] 余同希, 章亮焱. 塑性弯曲理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [4] 杨建国, 方洪渊, 胡军峰, 等. 校平、滚弯连续工艺下大尺寸板材残余应力[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(4): 593-596
- [5] Yeong Park. Modeling and adaptive control of a roll bending process[D]. Cambridge, Ma: Massachusetts Institute of Technology, 1987
- [6] 成志忠. 铝合金壁板滚弯成形技术研究[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010

(编辑 吴坚)