

基于厚板的三辊滚弯成形数值模拟及优化

石磊^{1,2}, 朱春东^{1,2,3}, 马荣飞^{1,2}

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 湖北省专用汽车质量检测中心, 湖北 随州 441300;
3. 随州武汉理工大学工业研究院, 湖北 随州 441300)

摘要: 滚弯成形由于结构简单、加工效率高而被广泛用于工业制造领域。首先, 介绍了三辊滚弯技术的成形原理, 借助几何模型对成形半径和上辊压下量之间的关系进行推导; 然后, 使用有限元分析软件 ABAQUS 对三辊滚弯成形的圆形截面工件进行数值模拟, 从模拟结果分析了成形过程中的板材应力分布以及成形半径大小。鉴于板材加工过程中无法避免的回弹现象, 为了提高滚弯成形的加工精度, 对上辊压下量的工艺参数进行调整, 并分析了优化后的工艺参数对工件成形半径的影响规律, 选取最优参数后最终结合试验进行了验证。研究表明, 在单道次滚弯成形中增大上辊压下量有助于补偿回弹、提高工件尺寸的精度, 试验结果与模拟结果也比较吻合。

关键词: 滚弯成形; 板材回弹; 成形半径; 上辊压下量; 数值模拟

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.008

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0056-07

Numerical simulation and optimization on three-roll bending based on thick plate

Shi Lei^{1,2}, Zhu Chundong^{1,2,3}, Ma Rongfei^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Center for Quality Inspection of Special Purpose Vehicles, Suizhou 441300, China;

3. Suizhou-WUT Industry Research Institute Wuhan University of Technology, Suizhou 441300, China)

Abstract: Roll bending is widely used in industrial manufacturing due to its simple structure and high processing efficiency. Therefore, the forming principle of three-roll bending technology was first introduced, and then the relationship between forming radius and upper roll reduction amount was deduced with the help of geometric model. Then, the workpiece with a circular cross-section formed by three-roll bending was numerically simulated by finite element analysis software ABAQUS, and the stress distribution and the forming radius for sheet metal in the forming process were analyzed. In view of the unavoidable springback phenomenon in the sheet metal forming process, in order to improve the processing accuracy of roll bending, the process parameters of upper roll reduction amount were adjusted, and the influence laws of the optimized process parameters on the forming radius of workpiece were analyzed. After selecting the optimal parameters, the verified tests were conducted finally. The results show that increasing the upper roll reduction amount in single pass roll bending is helpful to compensate the springback and improve the dimensional accuracy of workpiece, and the test results fit well with simulation results.

Key words: roll bending; sheet springback; forming radius; upper roll reduction amount; numerical simulation

滚弯成形是一种渐进成形技术, 由于其结构简单、加工效率高, 被广泛用于航空航天、管道制造、汽车工业等领域^[1-3]。近年来, 国内外学者对滚弯成形做了大量的研究, 汪兴等^[4]在考虑卷板机弯卷

过程中板材回弹的基础上, 结合数学-力学的分析, 确定了卷板曲率中心偏移后下辊的精确位移, 建立了板材弯矩和受力与侧辊和下辊位移之间的关系, 提出了四辊卷板机轴辊位移的一种计算方法; Cai Z 等^[5]基于对滚弯过程中加载和卸载的理论分析, 建立了控制薄板弯曲行为的曲率方程; Salem J 等^[6]对不对称三辊滚弯成形进行了研究, 提出了一个可以预测轧辊弯曲力、残余应力的理论模型; Merklein M 等^[7]分析了三辊滚弯成形过程中弯曲模量和滚弯道次对回弹的影响, 结合试验进行了验证; 太原科技大学的仇志强^[8]研究了厚向强度分布对特厚板三辊

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 2019 随州市新能源、轻量化、智能化关键核心技术
研发项目 (随科发 [2019] 9 号)

作者简介: 石磊 (1994-), 男, 硕士

E-mail: SL617618@whut.edu.cn

通信作者: 朱春东 (1963-), 男, 硕士, 博士生导师

E-mail: zcdzcd6252@sina.com

预弯成形的影响; 乔波等^[9]提出了厚板滚弯回弹计算新方法, 新的回弹公式介于模拟结果与经验公式之间, 并且误差在 10% 以内。目前, 对于滚弯的建模和数值模拟的研究较多, 对于滚弯过程中板材的回弹以及工艺优化的研究还较为缺乏, 因此, 利用数值模拟手段, 对三辊滚弯的成形过程以及回弹现象展开研究, 并结合试验予以验证, 对提高板材滚弯加工的精度有着重要的意义。

1 成形原理

三辊滚弯机一般由两个下辊和一个上辊组成, 下辊只发生转动, 不发生平动, 上辊在电机作用下发生转动以及完成垂直方向上的压力加载^[10-11]。其中三辊滚弯成形原理如图 1 所示, A_1 为滚弯成形后左下辊和板料的接触点、 B_1 和 B_1' 分别为成形前后上辊和板料的接触点、 C_1 为成形后右下辊和板料的接触点、 D_1 和 D_1' 为成形前后上辊的圆心, δ 为板料进给速度, d 为两个下辊的中心距。三辊卷板机对板材进行滚弯时, 主要分为以下过程: 首先, 两个下辊保持固定, 板材放置于轧辊之间使其和下辊接触; 然后上辊进行一定位移的下压 ($D_1 D_1'$), 从而使板材发生一定曲率的弯曲变形; 接着上辊在电机作用下发生转动, 轧辊和板材之间的摩擦力使得两个下辊跟随转动, 驱动板材向前卷制, 从而连续的局部塑形变形促使工件的最终成形。

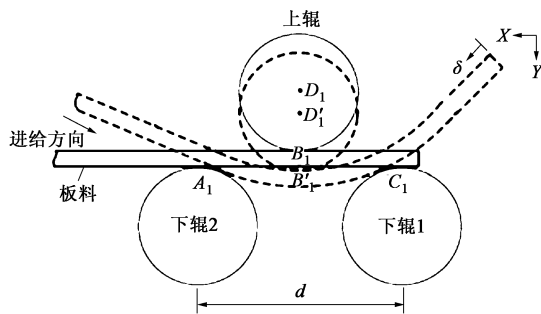


图1 滚弯成形原理简图
Fig. 1 Schematic diagram of roll bending principle

2 成形半径和上辊压下量之间的关系

在其他工艺参数一定的情况下, 板材在滚弯后的成形半径主要与上辊压下量有关, 为了推导成形半径和上辊压下量之间的关系, 滚弯完成后板料和轧辊的位置有两种情况: 第1种位置如图2所示^[12-13], 其上辊压下量小于两下辊的半径; 第2种

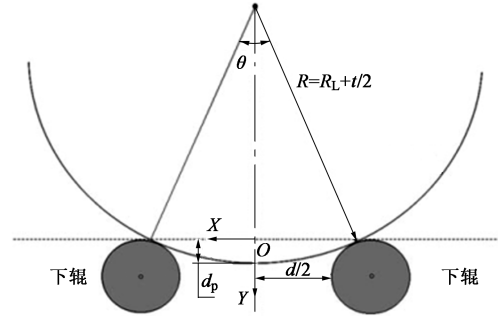


图2 压下量小于下辊半径示意图
Fig. 2 Schematic diagram of reduction amount less than radius of lower roller

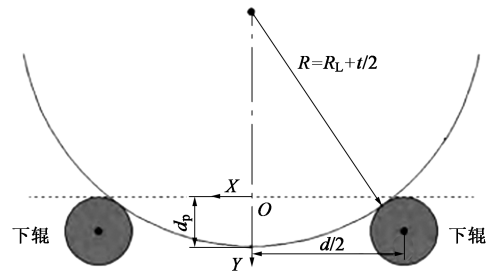


图3 压下量大于下辊半径示意图
Fig. 3 Schematic diagram of reduction amount more than radius of lower roller

位置如图3所示, 其上辊压下量大于两个下辊的半径。虽然两种情况下的位置不同, 但是成形半径和上辊压下量之间的关系是一致的, 这里只对第1种位置作一个推导过程, 第2种位置则同理。其中, d_p 、 R 、 R_L 、 t 分别为上辊压下量、上辊圆心到板材中性层的半径、上辊半径、板料的厚度。

以 D_1 点建立坐标系, D_1 点的 X 轴坐标 $X_{D_1} = 0$, 根据图3中轧辊和板料的几何关系建立几何模型, 如图4所示。其中, O_1 为成形后上辊的圆心, O 为两个下辊的上顶点连线和 Y 轴的交点, O_2 为下辊的圆心, A 为两个下辊圆心连线和 Y 轴的交点, B 为以 O_1 为圆心、半径为 R 的圆与 Y 轴的交点, C 为上下辊圆心连线和下辊的交点。

由图4所示几何模型示意图可得下压量 d_p 为:

$$d_p = OA - AB = R_0 - AB \quad (1)$$

式中: $OA = R_0$, R_0 为两个下辊的半径; AB 为 A 点和 B 点间的距离。

在三角形 $O_1 A O_2$ 中, 由勾股定理可得:

$$O_1 A = \sqrt{O_1 O_2^2 - A O_2^2} = \sqrt{(R_L + t/2 + R_0)^2 - (\frac{d}{2})^2} \quad (2)$$

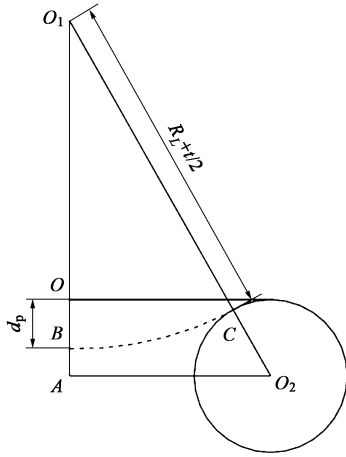


图 4 压下量大于下辊半径时的几何示意图

Fig. 4 Geometric schematic diagram of reduction amount more than radius of lower roller

$$AB = O_1A - O_1B, O_1B = O_1C = R_L + \frac{t}{2} \quad (3)$$

将 O_1B 代入到式 (3) 中得:

$$AB = \sqrt{(R_L + \frac{t}{2} + R_0)^2 - (\frac{d}{2})^2} - (R_L + \frac{t}{2}) \quad (4)$$

所以下压量为:

$$d_p = R_0 - AB = R_L + \frac{t}{2} + R_0 - \sqrt{(R_L + \frac{t}{2} + R_0)^2 - (\frac{d}{2})^2} \quad (5)$$

将式 (5) 整理后可得:

$$|y_{D_1} - y_{D_1'}| = d_p = R_L - \sqrt{1 - (\frac{d/2}{R_L + t/2 + R_0})^2} \times (R_L + t/2 + R_0) \quad (6)$$

式中: y_{D_1} 、 $y_{D_1'}$ 为成形前后上辊圆心的纵坐标。

由式 (6) 可知, 工件的半径大小主要由上辊压下量决定, 当已知目标工件的曲率半径时, 在不考虑板材滚弯回弹的情况下, 可以根据式 (6) 计算上辊压下量, 由于未考虑回弹现象, 最终的成形半径和目标半径之间会有所误差, 但是可以为上辊压下量的设置提供理论参考意义。

3 有限元模型的建立

3.1 几何模型

对称式三辊卷板机的 3 个轧辊直径为 $\Phi 540$ mm, 两个下辊中心距为 600 mm, 利用 ABAQUS 建立模型, 图 5 为三辊滚弯的有限元模型。轧辊在滚弯过

程中的变形量相对于板材来说可以忽略不计, 因此将其定义为刚体; 板材在滚弯过程中发生弹塑性变形, 将其定义为可变形体^[12]。板材与轧辊间采用面面接触, 将 3 个工作辊的表面定义为主面, 板材表面定义为从面。采用罚函数摩擦接触算法, 摩擦因数取 0.3。



图 5 三辊滚弯成形的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of three-roll bending

3.2 材料模型

由于轧辊为离散性刚体, 不需要进行材料属性的设置, 选用的板材为 Q235 钢, 厚度为 20 mm, 板材宽度为 300 mm, 长度为 3150 mm。材料的基本力学参数如表 1 所示。由于在分析过程中需要在 ABAQUS 中设置材料的应力-应变关系, Q235 钢材的应力-应变曲线如图 6 所示。

表 1 Q235 钢材料基本参数

Table 1 Basic parameters of Q235 steel material

参数	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	密度/(g · cm ⁻³)
数值	210	0.3	235	7.8

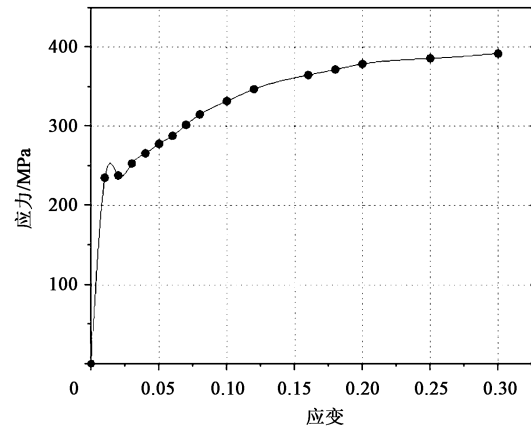


图 6 Q235 钢的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of Q235 steel

3.3 创建分析步及载荷的设定

在三辊滚弯成形过程中, 鉴于模拟的是单道次滚弯成形, 因此分析步设为 2 个: 第 1 个分析步里, 包括板材的预弯阶段, 如图 7 所示, 这时两个下辊除轴向 (即 Z 轴方向的旋转自由度 UR_3) 可以转动

外,其他两个方向保持固定约束(即 X 、 Y 轴方向的位移 U_1 、 U_2 和速度 V_1 、 V_2 均为0),而上辊同时定义一个向下(Y 轴方向)的位移量(U_2),其他两个方向固定约束(即 X 轴方向的位移和速度 U_1 、 V_1 以及沿 Z 轴方向的旋转自由度 UR_3 均为0);在第2个分析步里,如图8所示,两个下辊除轴向(UR_3)可以转动外,其他两个方向进行固定约束(X 、 Y 轴方向的位移 U_1 、 U_2 均为0),对上辊轴向定义一个角速度($\Omega_3=0.23 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$),其他两个方向进行固定约束(X 、 Y 轴方向的位移 U_1 、 U_2 和速度 V_1 、 V_2 均为0),从而上辊开始转动带动板材向前卷制,最终成形工件。

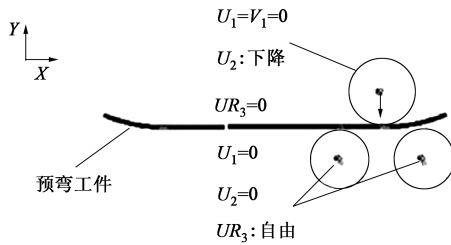


图7 预弯阶段的约束设定

Fig. 7 Constraint setting in pre-bending stage

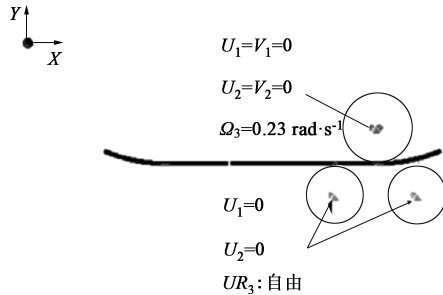


图8 成形阶段的约束设定

Fig. 8 Constraint setting in forming stage

上辊压下量的设定:根据目标工件的半径为500 mm,在不考虑回弹的情况下,利用式(6)来计算上辊压下量。将 $R_L=500 \text{ mm}$, $d=600 \text{ mm}$, $R_0=270 \text{ mm}$, $t=20 \text{ mm}$ 代入式(6),可得 $d_p \approx 60 \text{ mm}$ 。

3.4 模拟结果分析

3.4.1 应力场分布

板材在单道次滚弯成形过程中主要分为3个阶段:接触阶段、预弯结束阶段和成形阶段。板材在接触阶段的应力分布如图9所示,应力最大值为80 MPa;预弯结束阶段的应力分布如图10所示,应力最大值为251 MPa;预弯阶段结束后,板材开始成形,随着板材的逐步滚弯,最终成形后的板材

应力分布和形状如图11所示,最大应力值为276 MPa。从形状来看,工件滚弯后存在缺口,和目标尺寸存在误差。利用式(6)设置压下量,由于未考虑回弹现象,因此,误差的存在也在情理之中。



图9 接触阶段的应力分布

Fig. 9 Stress distribution of contacting stage



图10 预弯结束阶段的应力分布

Fig. 10 Stress distribution of end of pre-bending stage

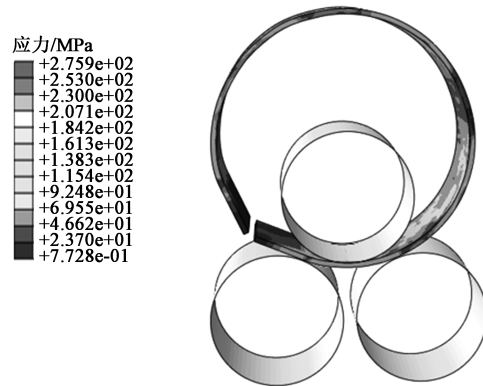


图11 成形阶段的应力分布

Fig. 11 Stress distribution of forming stage

3.4.2 成形半径的确定

在板材的滚弯过程中,板材变形会积聚大量弹性应变能,当作用在板料上的外载荷卸掉之后,弹性应变能释放,板材的形状、尺寸均发生变化,这对工件的加工制造来说很难避免,但可以采取一些措施进行补偿。在滚弯模拟过程中由于不易测量成形件的半径,这里为了测量板材在回弹前后的半径,在板材的下表面沿着长度方向上等距离取12个节点,他们在同一平面,通过将这些坐标导入到Origin中,从而得到工件半径大小。图12为拟合后的半径,当压下量

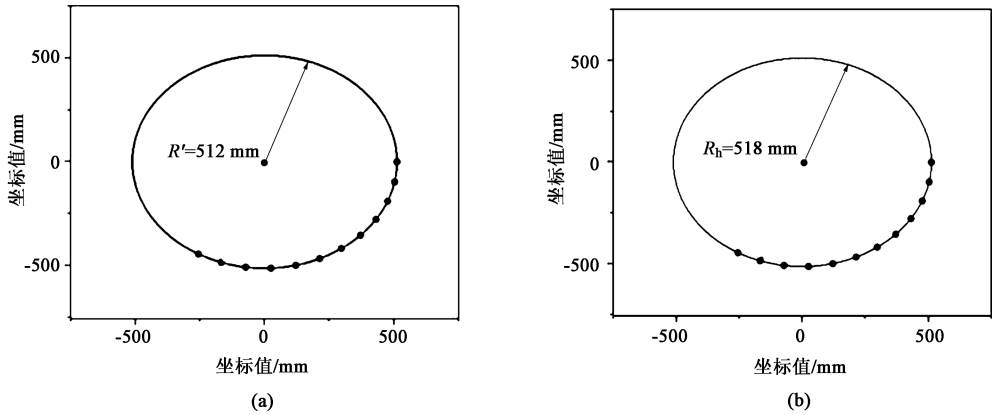


图 12 板材回弹前后的半径
(a) 回弹前 (b) 回弹后
Fig. 12 Radiuses before and after springback for plate
(a) Before springback (b) After springback

设为 60 mm 时, 单道次滚弯成形过程中, 回弹前的半径为 512 mm, 回弹后的半径为 518 mm。

根据文献 [14] 推导的回弹理论模型, 在三辊滚弯成形过程中, 回弹后的成形半径 R_h 可以由式 (7) 计算^[14]:

$$R_h = \frac{Et(2R' - t)}{2Et - 2R'(\sigma_w + \sigma_v)} + \frac{t}{2} \quad (7)$$

式中: E 为材料的弹性模量; R' 为回弹前的成形半径; σ_w 、 σ_v 分别为变形区的板材上、下表面的纵向应力大小。

这里利用回弹理论公式计算回弹后的半径, 在板材变形区的上、下表面分别取 9 个节点, 如图 13 所示, 分成 3 组求平均值, 最终得到的结果如表 2 所示。

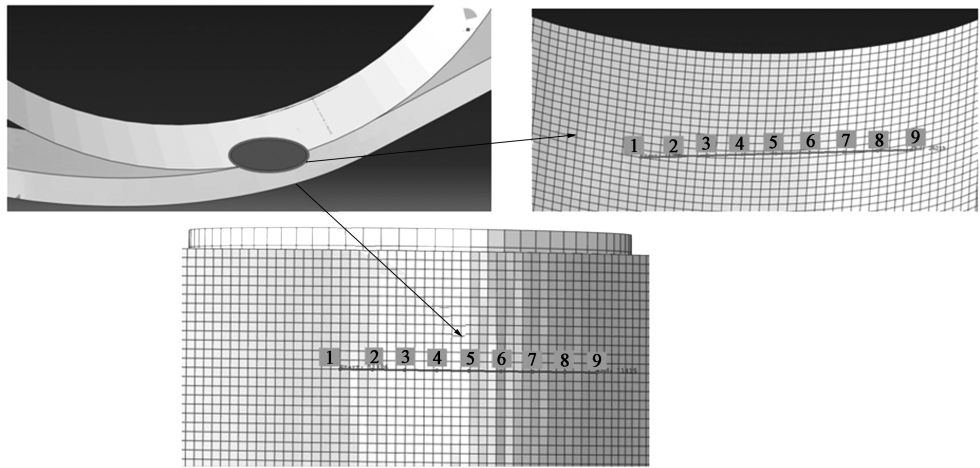


图 13 变形区上、下表面节点的分布
Fig. 13 Distributions of nodes on upper and lower surfaces of deformation zone

表 2 利用回弹模型计算的回弹前后半径
Table 2 Radiuses before and after springback calculated by springback model

序号	纵向应力		R'/mm	R_h/mm
	σ_w/MPa	σ_v/MPa		
1	-31	63	512	514.3
2	-32	65	512	513.7
3	-30	62	512	514.8
平均值	-31	63	512	514.3

由表 2 可知, 厚板滚弯成形过程中, 在滚弯变形区的上表面板材主要受压应力, 下表面的板材受拉应力, 并且拉应力大于压应力。基于有限元模拟得到的回弹前半径, 利用回弹公式计算的回弹后半径平均值为 514.3 mm, 通过有限元模拟得到的回弹后半径为 518.0 mm, 虽然存在一定的误差, 但具有较高的精度。通过分析可知, 厚板在滚弯成形过程中的回弹量较小, 这主要因为板材的厚度越大, 材料抵抗变形的能力也

就越强,厚度大的板材的表面应变和应力值较大,成形过程中发生弹性变形的材料较少,发生塑性变形的材料较多,使得弹性变形在总变形中所占的比重相对较小^[14],卸载后的回弹量也相应越小。而对于薄板滚弯成形,由于板材厚度较小,发生弹性变形的材料较多,回弹量也就越大。

4 滚弯成形的优化

在单道次滚弯成形有限元模拟中,当上辊压下量设为60 mm时,板材经过弹性恢复后,其半径会增大,从而导致加工误差,为了实现加工精度的提高,对成形过程中的优化十分有必要。在实际生产中,三辊滚弯机的两下辊中心距很难进行调节,轧辊的角速度对成形影响不大,因此,这里的优化方案选择增大上辊压下量,从而进行回弹的补偿。

由于板材的回弹量较小,后续的上辊压下量不能太大,否则会造成板材的重叠,这里将上辊压下量依次按照60~65 mm进行设置,通过数值模拟方法确定回弹后的半径,如图14所示。从图14可知,

当上辊压下量从60 mm增加至64 mm时,板材回弹后的半径为502 mm,比较接近目标尺寸,当继续增加上辊压下量时,板材滚弯后末端已发生重叠现象从而造成半径过小。因此,增加上辊压下量有助于回弹的补偿,从而提高尺寸精度,该方法操作简单,不需要改变其他参数。其中上辊压下量为64 mm时,其成形过程如图15所示,滚弯成形后圆形工件的形状较为完整,未出现不闭合现象。

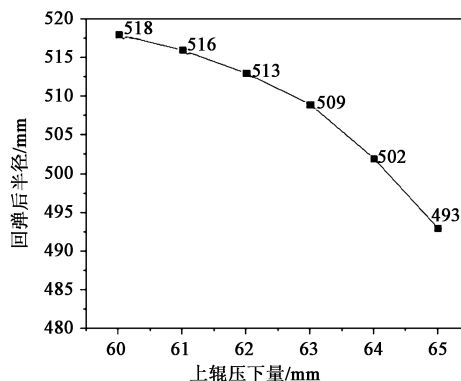


图14 回弹后半径和上辊压下量关系

Fig. 14 Relationship between radius after springback and reduction amount of upper roller

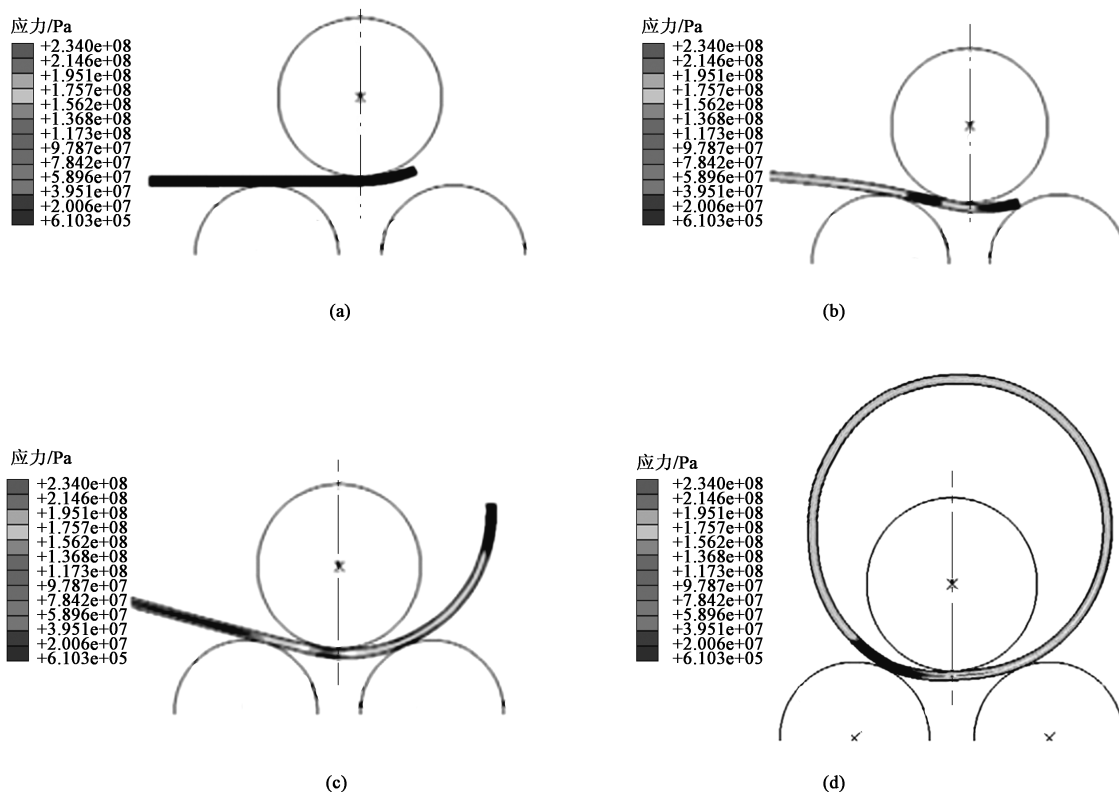


图15 上辊压下量为64 mm时的成形过程

(a) 开始阶段 (b) 预弯结束阶段 (c) 成形阶段 (d) 成形后阶段

Fig. 15 Forming process for upper roll reduction amount of 64 mm

(a) Start stage (b) End of pre-bending stage (c) Forming stage (d) End of forming stage

5 试验验证

为了对单道次三辊滚弯成形的优化方案进行验证, 将上辊压下量设为 64 mm, 在三辊卷板机上进行试验, 试验得到的结果和模拟结果如图 16 所示。从图 16 可知, 试验结果的成形半径为 504 mm, 有限元模拟结果为 502 mm, 误差相对较小, 说明上述优化方案是可行的, 同时也说明有限元模型具有较高的精度。

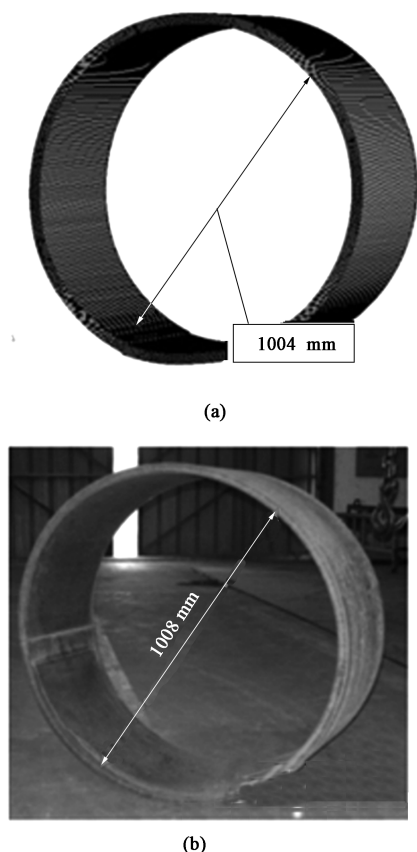


图 16 模拟 (a) 和试验 (b) 结果
Fig. 16 Simulation (a) and experiment (b) results

6 结论

(1) 在单道次或者多道次三辊滚弯成形过程中, 上辊压下量可由理论公式计算, 虽存在误差, 但是具有一定的精度。

(2) 三辊滚弯成形中, 板材会发生回弹现象, 增大上辊压下量可以对回弹进行补偿, 利用有限元方法确定理论压下量的增量, 使得工件尺寸接近目标尺寸, 而试验结果和模拟结果也比较符合, 从而为实际生产提供指导。

参考文献:

- [1] Fu Z, Mo J, Zhang W. Study on multiple-step incremental air-bending forming of sheet metal with springback model and FEM simulation [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2009, 45: 448-458.
- [2] Paralikas J, Salonitis K, Chrysosouris G. Investigation of the effect of roll forming pass design on main redundant deformations on profiles from AHSS [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2011, 56: 475-491.
- [3] Feng Z, Champlaud H. Comparison between numerical simulation and experimentation of asymmetrical three-roll bending process [J]. *ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2010, 3: 33-37.
- [4] 汪兴, 陈柏金, 向青林. 四辊卷板机轴辊位移的一种计算方法 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (2): 154-159.
Wang X, Chen B J, Xiang Q L. A calculation method of roller displacement for four-roller bending machine [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (2): 154-159.
- [5] Cai Z, Lan Y. Analysis on the straight-end problem in thin-plate three-roll bending [J]. *Appl. Mech. Mater.*, 2011, 80: 585-590.
- [6] Salem J, Champlaud H, Feng Z. Experimental analysis of an asymmetrical three-roll bending process [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2016, 83: 1823-1833.
- [7] Merklein M, Hagenah H, Cojutti M. Investigations on three-roll bending of plain tubular components [J]. *Key. Eng. Mater.*, 2009, 410: 325-334.
- [8] Zhang Z Q, Fu J, Song J. Influence of material strength distribution along thickness on three-roller edge pre-bending of thick plate [J]. *J. Jilin. Univ.*, 2015, 45: 878-883.
- [9] 乔波, 付建华, 李永堂, 等. 厚板滚弯回弹计算新方法 [J]. *锻压装备与制造技术*, 2013, 48 (6): 87-90.
Qiao B, Fu J H, Li Y T, et al. A new method for calculating springback in roll bending of heavy plate [J]. *Forging Equipment and Manufacturing Technology*, 2013, 48 (6): 87-90.
- [10] Feng Z, Champlaud H. Three-stage process for improving roll bending quality [J]. *Simul. Model. Pract. Theory*, 2011, 19: 887-898.
- [11] Hua M, Sansome D, Rao K. Continuous four-roll plate bending process: Its bending mechanism and influential parameters [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1994, 45: 181-186.
- [12] Fu Z, Tian X, Chen W. Analytical modeling and numerical simulation for three-roll bending forming of sheet metal [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, 69: 1639-1647.
- [13] 付泽民, 徐佳, 张锁怀, 等. 金属板材三辊滚弯成形解析建模与数值模拟 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (2): 33-39.
Fu Z M, Xu J, Zhang S H, et al. Analytical modeling and numerical simulation for three-roll bending of sheet metal [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24 (2): 33-39.
- [14] 王艳, 崔西民, 许光辉, 等. 三辊滚弯成形过程的回弹研究与试验分析 [J]. *塑性工程学报*, 2017, 24 (5): 44-51.
Wang Y, Cui X M, Xu G H, et al. Springback research and experimental analysis of three roll bending process [J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2017, 24 (5): 44-51.