

管材成形

## 矩形焊管多规格柔性冷弯成形回弹分析

管本勇, 丁武学, 任子帅

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对矩形焊管在冷弯成形过程中的回弹问题, 利用 COPRA 软件进行冷弯成形工艺设计, 确定了适用于柔性制造的工艺参数, 基于 ABAQUS 软件建立了 8 种冷弯成形有限元模型, 先后进行显示动力学分析和静力学分析, 模拟板材冷弯成形和卸载过程, 得到了不同模型各道次的回弹角度, 同时, 通过单因素分析法研究了板料厚度、侧壁高度和成形宽度对回弹的影响。结果表明: 最终成形角相同时, 回弹角度呈先增大后减小的趋势; 增大板料厚度、成形宽度和减小侧壁高度均会分别导致冷弯成形中各道次的回弹角度减小, 且回弹角度与板料厚度成线性关系; 在进行弯角二的冷弯成形过程中, 宽度方向板材的等效应力基本不变, 弯角一不会发生回弹现象。

**关键词:** 矩形焊管; 冷弯成形; 柔性制造; 回弹; 板料厚度; 侧壁高度; 成形宽度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.013

**中图分类号:** TH162 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 04-0097-08

## Springback analysis on multi specification flexible cold bending for square rectangular welded pipe

Guan Benyong, Ding Wuxue, Ren Zishuai

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** For the springback problem of square rectangular welded pipes during the cold bending process, the cold bending process design was conducted by COPRA software to determine the process parameters suitable for the flexible manufacturing, and eight finite element models for cold bending were established by ABAQUS software. Then, the dynamic analysis and static analysis were performed to simulate the cold bending and unloading processes of sheet. Furthermore, the springback angles for each pass of the different models were obtained, and the influences of sheet thickness, sidewall height and forming width on the springback were studied by a single-factor analysis method at the same time. The results show that when the final forming angle is the same, the springback angle shows a trend of increasing first and then decreasing. Increasing the sheet thickness and forming width, and reducing the sidewall height could lead to the decrease in the springback angle of each pass in the cold bending, and the springback angle is linearly related to the sheet thickness. During the cold bending process of the bending angle 2, the equivalent stress of sheet in the width direction remains basically unchanged, and there is no springback phenomenon in the bending angle 1.

**Key words:** square rectangular welded pipe; cold bending; flexible manufacturing; springback; sheet thickness; sidewall height; forming width

冷弯成形是一种通过多个不同孔型, 将板材弯曲成所需横截面形状的塑性加工方法<sup>[1]</sup>。矩形焊管是一种闭口型钢, 与相同截面积的圆管相比, 具有强度高、抗弯截面模量大、易于装配以及稳固、美观等优点, 广泛用于车辆、地铁、建筑、造船等行业<sup>[2]</sup>。在冷弯成形过程中, 板料易发生变形回弹, 影响后续的焊接角度以及成形精度和质量。

传统冷弯型钢成形设备限制于单一规格产品的生产, 同时, 针对回弹的研究也多限于对单一产品工艺参数的优化。郑军兴<sup>[3]</sup>通过有限元仿真冷弯成形过程, 分析得到了工艺参数、材料力学性能、板料厚度、机架间距及本构方程对板料回弹的影响。韩飞等<sup>[4]</sup>对超高强钢回弹规律进行研究, 采用不同道次数的对比试验及有限元模拟的方法, 通过优化成形道次和弯曲角度分配降低了回弹角度。赵月伟等<sup>[5]</sup>通过有限元模拟构建了圆管冷弯回弹曲线方程, 通过因素分析优化了上模下压量、下模开口量、上模下行速度和摩擦因数 4 个冷弯成形工艺参数, 降低了回弹角度。Su C J 等<sup>[6]</sup>从冷弯工艺设计方面

收稿日期: 2023-09-20; 修订日期: 2023-12-26

作者简介: 管本勇 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: guanby97@163.com

通信作者: 丁武学 (1966-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: wuxuexie@mail.njust.edu.cn

入手,针对弯曲角度分配提出了一种优化分段边界组合函数,提高了冷弯成形的成形质量并降低了回弹角度。近年来,金属板材冷弯成形装备正朝着柔性化和智能化方向发展。柔性成形装备具备更高的生产灵活性,能够适应不同规格产品的生产需求。因此,在多规格柔性冷弯成形过程中,对于各道次回弹角度的研究具有重要意义,可以推动成形装备的柔性化水平进一步提升。

本文以矩形焊管为研究对象,建立板材冷弯成形及回弹仿真模型并进行数值模拟计算,得到了不同规格、各道次的回弹角度,研究了在柔性冷弯成形过程中不同板料厚度、侧壁高度和成形宽度对各道次回弹的影响规律,为柔性冷弯成形的回弹控制及修正提供了重要的理论依据。

## 1 矩形焊管冷弯成形工艺参数设计

本文所研究的矩形焊管为封闭对称截面,如图 1 所示,其中,对各弯角和直线段进行了编号。其截面共有 4 个成形弯角,由于截面对称可分为弯角一和弯角二。对于此截面共设计 12 个冷弯成形道次,同时,基于商用软件 COPRA 对矩形焊管进行冷弯成形工艺参数设计。

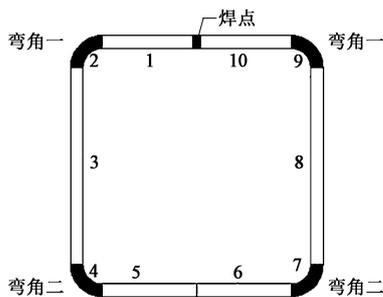


图 1 方矩形焊管截面形状

Fig. 1 Cross section shape of square rectangular welded pipe

### 1.1 辊花图设计

12 个成形道次均采用中心层不变的弯曲方法,弯曲成形角度如表 1 所示。根据矩形焊管截面的特点,将冷弯成形过程划分为 3 个阶段,如图 2 所示。第 1 阶段进行边 1 和边 10 的内弯,通过 3 个道次将弯角一冷弯成形至 72°;第 2 阶段进行边 3 和边 8 的内弯,通过 6 个道次将弯角二冷弯成形至 72°;第 3 阶段为 3 个空弯道次,将 4 个弯角冷弯成形至 85°。

### 1.2 机架间距选取

机架间距又称道次间距,是指相邻两个轧机成形辊水平方向上的轴心距离<sup>[7]</sup>,对板材的成形效果

表 1 各道次弯曲角度分配

Table 1 Allocation of bending angles for each pass

道次	弯角一	弯角二
1	25°	—
2	50°	—
3	72°	—
4	—	13°
5	—	26°
6	—	39°
7	—	52°
8	—	61°
9	—	72°
10	75°	75°
11	80°	80°
12	85°	85°

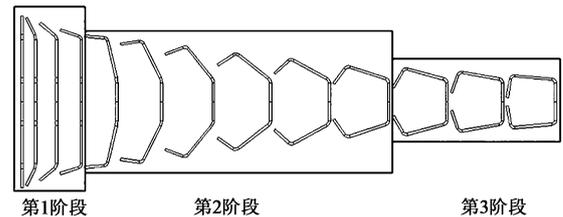


图 2 冷弯成形工艺辊花图

Fig. 2 Roller pattern diagram of cold bending process

具有极大影响。在冷弯成形中,机架间距需大于变形区长度,否则板材的边部会产生较大的纵向应变,从而产生边浪缺陷。其中,变形区长度  $L$  的计算公式为:

$$L = \sqrt{\frac{8a^3\theta}{3t}} \quad (1)$$

式中:  $L$  为变形区长度, mm;  $a$  为弯曲边长度, mm;  $\theta$  为弯角增量, rad;  $t$  为板材厚度, mm。

由式 (1) 计算得到最大变形区长度为 945.31 mm,因此,1000 mm 的机架间距可满足各道次的成形要求。由于实际生产中会采用较大辊径以扩大成形区域长度,则 1000 mm 的机架间距并不足以满足各道次轧辊的空间排布,因此,适当扩大机架间距为 1200 mm。

### 1.3 轧辊轴径和成形辊尺寸确定

根据实际生产经验,轧辊轴径取为  $\Phi 190$  mm。成形平辊的中心距按道次顺序依次增加 1 mm,即上、下平辊的半径依次增加  $\Phi 0.5$  mm,这样可以保证板材处于绷直状态,防止板料堆积变形<sup>[8]</sup>。其中,第 1 道次的上平辊半径取为 345 mm,下平辊半径取为 240 mm。

## 2 冷弯成形有限元模型的建立

本文板材为普通低碳钢 Q235，具体力学性能参数如表 2 所示<sup>[9]</sup>。所建立的冷弯成形有限元模型如图 3 所示，12 组成形轧辊依次排布，成形底线设定在同一水平面上。在成形过程中，轧辊的变形忽略不计，设置为刚体，板材为可变形体，其塑性数据如表 3 所示。

表 2 材料性能参数

Table 2 Material performance parameters

参数	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3})$
数值	200000	0.28	$7.85 \times 10^{-9}$

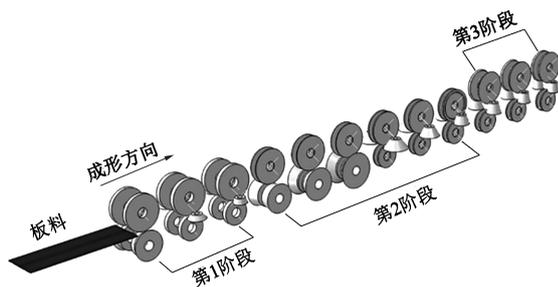


图 3 冷弯成形有限元模型

Fig. 3 Finite element model for cold bending

表 3 真实应力与塑性应变的关系

Table 3 Relationship between true stress and plastic strain

真实应力 $\sigma_{\text{true}}/\text{MPa}$	塑性应变
235.0000	0.00000
277.0189	0.01563
315.8385	0.02500
367.0568	0.04036
413.6646	0.06250
466.4596	0.10000
519.2546	0.17500
546.2038	0.24023
600.3740	0.28710

在冷弯成形过程中，每个道次均会发生板材与轧辊的接触摩擦，因此，在有限元模型中将添加接触，设置为表面与表面接触，其中切向行为选择罚摩擦方式且摩擦因数为 0.2，法向行为选择硬接触<sup>[10]</sup>。

由于管形、轧辊和冷弯工艺均具有对称性，本文在板材的对称面添加对称约束，对 1/2 模型进行有限

元分析。冷弯成形过程是轧辊绕轴旋转，板材依靠摩擦水平前移，本文板材成形速度设为  $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，因驱动方式为上辊驱动，所以只设置上辊存在恒定的角速度，下辊自由旋转<sup>[11]</sup>。

在冷弯过程中，板材在宽度方向上各部分的变形量是不相同的，板材中部区域几乎不形变，因此，该部分网格尺寸设置得较大，在弯角部位进行网格细化。这样设置不仅可以提高运算速度、节省计算时间，而且可以提高仿真的准确性。在弯角位置上，板材宽度方向的网格尺寸为 3 mm，其他区域在宽度方向的网格尺寸为 10 mm。板材在长度方向的网格尺寸为 10 mm，厚度方向划分为 3 层。网格单元类型采用八结点线性六面体单元 (C3D8R)，板材的网格尺寸如图 4 所示。

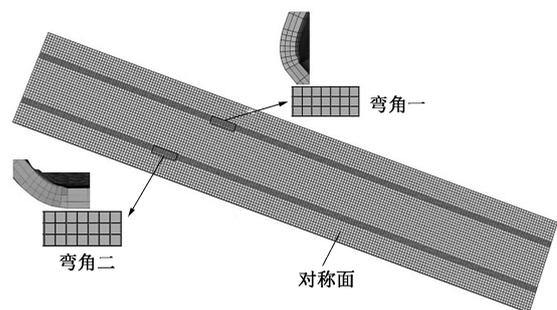


图 4 板料网格划分 (1/2 模型)

Fig. 4 Grid division of sheet (1/2 model)

为了能够较准确地模拟方矩形焊管冷弯成形后的回弹过程，将经过显示动力学分析得到的板材导入至通用静力学分析中计算回弹<sup>[12]</sup>。

本文通过单因素分析来研究板料厚度  $t$ 、侧壁高度  $H$  和成形宽度  $B$  对回弹角度的影响。模拟方案如表 4 所示，其中  $R$  为弯角外径， $r$  为弯角内径。

表 4 模拟方案设计 (mm)

Table 4 Simulation schemes design (mm)

模型	$H$	$B$	$t$	$R$	$r$
1	80	80	4	$\Phi 8$	$\Phi 4$
2	200	100	4	$\Phi 8$	$\Phi 4$
3	200	120	4	$\Phi 8$	$\Phi 4$
4	200	150	4	$\Phi 8$	$\Phi 4$
5	200	200	4	$\Phi 8$	$\Phi 4$
6	200	200	6	$\Phi 12$	$\Phi 6$
7	200	200	8	$\Phi 16$	$\Phi 8$
8	200	200	10	$\Phi 20$	$\Phi 10$

模型 5、模型 6、模型 7、模型 8 的板料厚度  $t$  分别为 4、6、8 和 10 mm，其他参数相同，通过仿真计算分析板料厚度对回弹角度的影响。模型 1、模型 2、模型 3、模型 4 和模型 5 在成形弯角一时，成形高度分别是 40、50、60 和 75 mm，通过仿真计算分析侧壁高度对回弹角度的影响。模型 2、模型 3、模型 4 和模型 5 的成形宽度  $B$  分别为 100、120、150 和 200 mm，其他参数相同，通过仿真计算分析成形宽度对回弹角度的影响。

### 3 仿真结果分析

ABAQUS 静力学仿真结束后，根据计算结果进行后处理分析，表 5 为数值模型在不同道次的回弹角度数值。从表 5 中可以发现，柔性冷弯成形过程中，在冷弯工艺参数相同的情况下，不同板料厚度、侧壁高度和成形宽度的管材在各道次的回弹角度具有极大的差异。

表 5 模型各道次回弹角 (°)  
Table 5 Springback angles of each pass for models (°)

道次		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
模型 1	弯角一	0.66	0.98	0.92	0	0	0	0	0	0	0.46	0.81	1.26
	弯角二	0	0	0	1.60	1.79	2.12	1.86	1.72	1.71	0.99	1.33	1.44
模型 2	弯角一	0.78	1.11	1.02	0	0	0	0	0	0	0.60	1.11	1.55
	弯角二	0	0	0	1.97	2.11	2.30	2.19	2.03	1.95	1.20	1.52	1.64
模型 3	弯角一	0.86	1.18	1.09	0	0	0	0	0	0	0.61	1.16	1.67
	弯角二	0	0	0	1.94	2.09	2.29	2.17	2.01	1.93	1.18	1.51	1.62
模型 4	弯角一	0.91	1.23	1.12	0	0	0	0	0	0	0.63	1.22	1.81
	弯角二	0	0	0	1.85	2.03	2.26	2.14	1.96	1.88	1.12	1.48	1.58
模型 5	弯角一	0.97	1.30	1.17	0	0	0	0	0	0	0.65	1.29	1.96
	弯角二	0	0	0	1.70	1.94	2.21	2.07	1.87	1.79	1.03	1.44	1.51
模型 6	弯角一	0.83	1.19	1.05	0	0	0	0	0	0	0.55	1.05	1.64
	弯角二	0	0	0	1.62	1.84	2.12	1.93	1.80	1.69	0.97	1.36	1.44
模型 7	弯角一	0.65	1.06	0.93	0	0	0	0	0	0	0.45	0.82	1.33
	弯角二	0	0	0	1.53	1.75	2.04	1.80	1.72	1.61	0.92	1.29	1.37
模型 8	弯角一	0.51	0.91	0.81	0	0	0	0	0	0	0.35	0.58	1.01
	弯角二	0	0	0	1.48	1.65	1.98	1.66	1.65	1.53	0.86	1.21	1.30

#### 3.1 不同道次的回弹情况

图 5a 和图 5b 分别是模型 1~模型 8 在不同道次

两个弯角处的回弹角度情况。从图 5 中可以发现，在道次 1~道次 3 的成形过程中，弯角一实现从 0°~

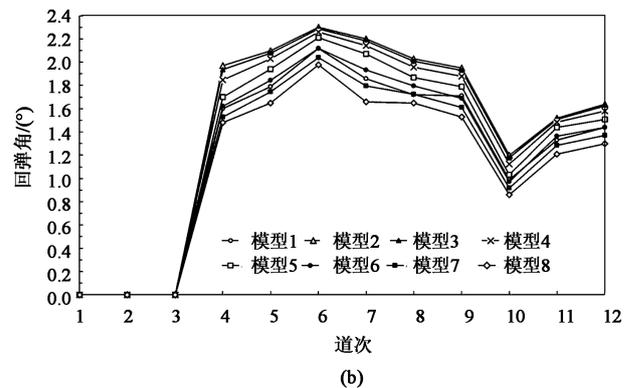
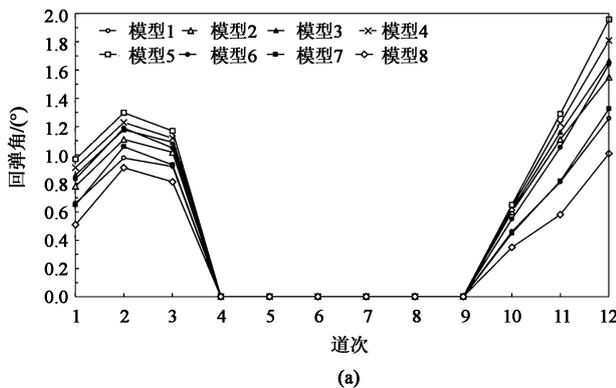


图 5 各道次回弹角度的变化规律

(a) 弯角一 (b) 弯角二

Fig. 5 Variation laws of springback angles in each pass

(a) Bending angle 1 (b) Bending angle 2

72°的弯曲，其中最大回弹角度均在道次2的成形过程中，同时，可清晰看出模型5各道次弯角一的回弹角度最大，模型8的最小；在道次4~道次9的成形过程中，弯角二通过6个道次实现从0°~72°的弯曲，其中道次6的回弹角度均是最大的，同时，可清晰看出模型2在各道次弯角二的回弹角度最大，模型8的最小。

前9个道次均为实弯道次，后3个道次即道次10~道次12为空弯道次。从图5a和图5b中可以发现，弯角一和弯角二在空弯道次的回弹角度均呈增大趋势，且最后3个空弯道次的成形角度分别为3°、5°和5°，均比较小，但是回弹角度与成形角度的比值远远高于实弯道次，这是在冷弯成形中尽量减少空弯道次的原因。

板材在冷弯成形过程中由于强烈的塑性变形会产生冷作硬化现象，冷作硬化会引起板材晶粒的细化和晶界的增多，增大材料的屈服强度，使其回弹能力提高；随着弯曲角度的持续增大，弯角处越来越多的材料发生塑性变形，弹性变形区越来越小，导致其回弹能力下降。因此，2个弯角在实弯道次的成形过程中，回弹角度均先增大后减小。

弯角一在各道次的等效塑性应变变化规律如图6所示。从图6中可以发现，在冷弯成形过程中，弯角处的等效塑性应变呈阶梯状不断增大。其中，弯角一的等效塑性应变在时间0.17~0.37s之间无变化，说明此时弯角二的成形过程不会对弯角一的成形角度产生影响，因此，弯角一在道次4~道次9的成形过程中的回弹角度均为0°。

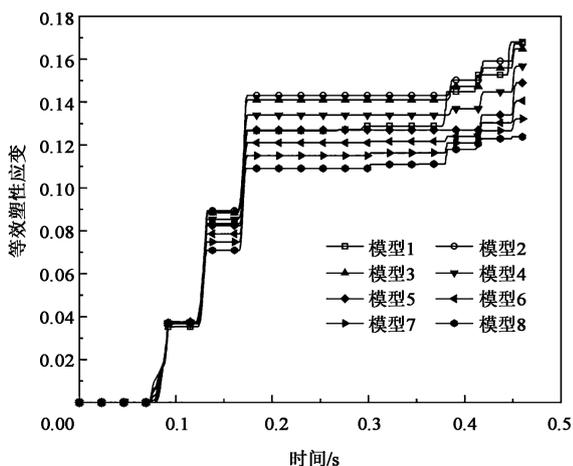


图6 等效塑性应变变化规律

Fig.6 Variation laws of equivalent plastic strain

### 3.2 板料厚度对回弹的影响

图7为保持侧壁高度为200mm、成形宽度为

200mm、 $R/r$ 为2.0时，板料厚度对回弹角度的影响结果。从图7中可以发现，在成形过程中，随着板料厚度的增加，回弹角度逐渐减小，且回弹角度与板料厚度成线性关系。

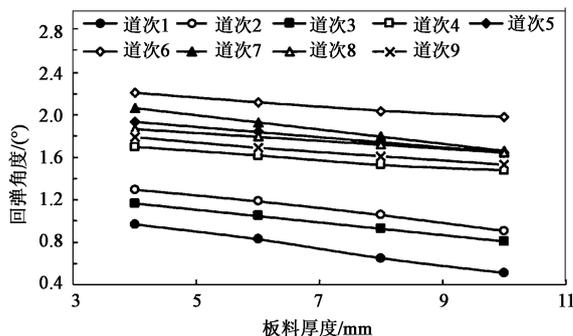


图7 板料厚度对回弹角度的影响

Fig.7 Influence of sheet thickness on springback angle

刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力，是材料或结构弹性变形难易程度的表征。刚度越大的材料，相同条件下其弹性变形越小，则回弹角度也越小。抗弯刚度  $F$  的计算公式为：

$$F = EI/l \tag{2}$$

式中： $E$ 为弹性模量； $I$ 为截面惯性矩； $l$ 为截面弯曲长度。

弯角处弯曲截面为矩形，则截面惯性矩  $I$  的计算公式为：

$$I = \Delta l^3 t/12 \tag{3}$$

式中： $\Delta l$ 为单位长度。

将式(3)代入式(2)中，可得式(4)：

$$F = Et\Delta l^3/12l \tag{4}$$

由式(3)和式(4)可知，截面惯性矩  $I$  和抗弯刚度  $F$  与板料厚度  $t$  成线性关系，当板料厚度  $t$  增大时，弯曲截面的惯性矩就会增大，从而增大了板材的抗弯刚度即提高了抵抗弹性变形的能力，减小了回弹角度。当板材较薄时，其弯曲过程中的应力集中主要发生在弯曲表面附近，导致局部塑性变形集中；而当板材较厚时，弯曲截面的惯性矩较大，弯曲应力相对分布更均匀，在弯曲过程中，材料的塑性变形将在整个截面上发生。因此，在相同的冷弯成形工艺情况下，板料厚度越大，回弹角度越小，且回弹角度与板料厚度成线性关系。

### 3.3 侧壁高度对回弹的影响

侧壁高度是指板材冷弯后形成的两个侧边的高度差。矩形焊管弯角一处第  $i$  道次的侧壁高度  $H_i$  的计算公式为：

$$H_i = \left( R_i \tan \frac{\alpha_i}{2} + L_1 \right) \times \sin \alpha_i \quad (5)$$

矩形焊管弯角二处第  $i$  道次的侧壁高度  $H_i$  的计算公式为:

$$H_i = \left( R_i \tan \frac{\alpha_i}{2} + L_3 \right) \times 2 \sin \alpha_i \quad (6)$$

式中:  $R_i$  为道次  $i$  的弯角外径;  $\alpha_i$  为道次  $i$  的弯曲角度;  $L_1$ 、 $L_3$  为直线段 1、直线段 3 的长度。

由式 (5) 计算得到, 在成形弯角一时, 模型 1~模型 5 在第 3 道次的侧壁高度分别为 34.19、43.70、53.21、67.48 和 91.26 mm, 其他参数相同, 进行仿真计算, 侧壁高度对回弹角度的影响如图 8 所示。从图 8 可以清楚得看出, 在成形过程中, 随着侧壁高度的增加, 回弹角度逐渐增大。

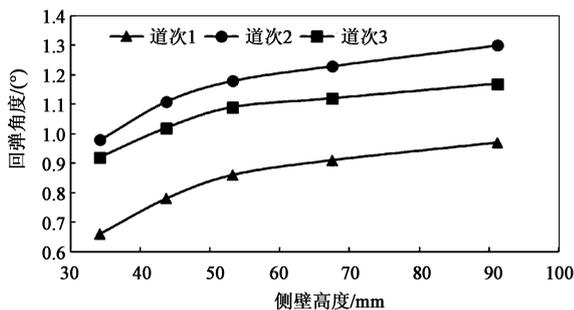


图 8 侧壁高度对回弹角度的影响

Fig. 8 Influence of sidewall height on springback angle

读取板材在弯角一冷弯成形过程中侧壁弯角处的等效应力值, 如图 9 所示。从图 9 中可看出模型 1~模型 5 在冷弯成形中, 随着弯曲边长度的增大, 相同时间时板材内的等效应力值也随之快速增长, 板材在道次间的变形越剧烈, 但是在道次成形阶段的应力值大小基本相同, 无较大差距。

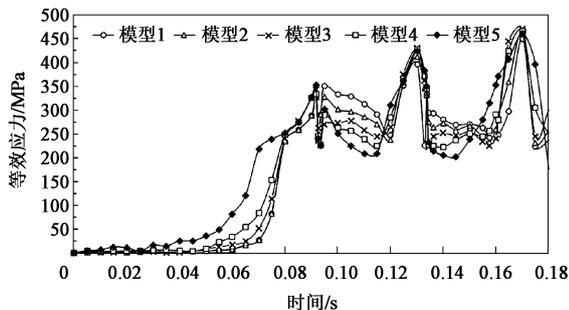


图 9 侧壁弯角的等效应力分布

Fig. 9 Equivalent stress distribution of sidewall bending angle

板材经过轧辊组的冷弯成形后, 弯角处存在较大的应力集中, 板材运动到道次之间时会发生回弹

从而释放内部应力。板材回弹成形后留在板材内的应力称为残余应力, 残余应力的大小、分布直接影响回弹量的大小。残余应力的分布可以理解为回弹后留在板材内未释放出来的内能, 分布得越复杂, 应力值越较大, 越能说明在回弹过程中释放的能量越小, 回弹量也就越小。

图 10 为模型 1~模型 5 的弯角在道次间的残余应力值曲线。从图 10 中可看出, 在相同成形道次之间, 模型 5 板料弯角处的残余应力最小, 且模型 1~模型 5 的道次间残余应力值依次减小, 说明模型 5 板料的弯角处在回弹过程中释放的能量最大, 且模型 1~模型 5 弯角处在回弹过程中释放的能量依次增大, 回弹角也就越大。因此, 在相同的冷弯成形工艺情况下, 随着侧壁高度的增大, 回弹角度也逐渐增大。同时道次 1、道次 2 之间的残余应力最大, 道次 3、道次 4 之间的次之, 道次 2、道次 3 之间的残余应力最小。所以, 图 5a 中弯角一在成形过程中, 道次 2 的回弹角度最大, 道次 3 的次之, 道次 1 的回弹角度最小。

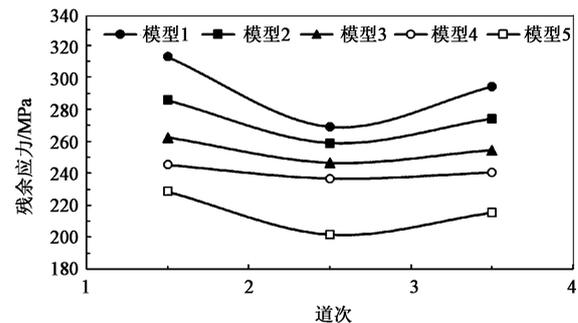


图 10 侧壁弯角残余应力分布

Fig. 10 Residual stress distribution at sidewall bending angle

### 3.4 成形宽度对回弹的影响

图 11 为保持板料厚度为 4 mm、侧壁高度为 200 mm、 $R/r$  为 2.0 时, 成形宽度对回弹角度的影响结果。从图 11 中可以发现, 在成形过程中, 随着成形宽度的增加, 回弹角度逐渐减小。

在冷弯成形过程中, 由于相邻道次弯曲角度的不同, 板料边缘会产生拉应力。提取板材宽度方向边缘在冷弯成形过程中的等效应力值, 如图 12 所示。从图 12 中可以清晰地发现, 在整个成形过程中, 板料边缘的应力值均小于板材的弹性变形极限, 且成形宽度越大的模型板料在宽度方向边缘的拉应力越小。其中, 若边缘拉应力大于材料的弹性变形极限, 就会导致边缘产生塑性变形和较大的纵向应变, 从而产生边浪缺陷。

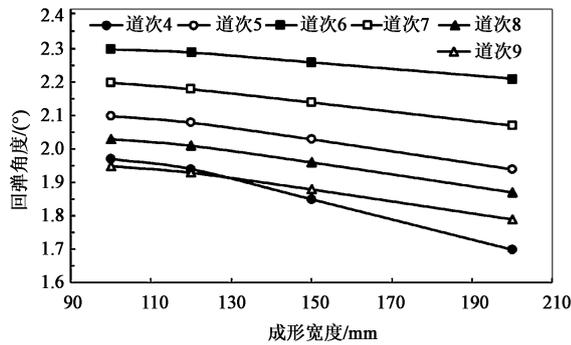


图 11 成形宽度对回弹角度的影响

Fig. 11 Influence of forming width on springback angle

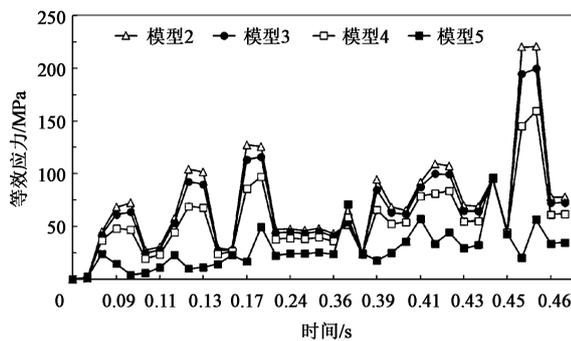


图 12 沿宽度方向板料边缘等效应力分布

Fig. 12 Distribution of equivalent stress at edge of sheet in width direction

图 12 中 0.21~0.31 s 这段时间是弯角二的成形过程，在此期间板材边缘应力基本不变。由图 6 可知，弯角二的成形过程对弯角一的弯曲角度无影响，弯角一在弯角二的成形过程中回弹角度为 0°。那么在模拟卸载过程时，板材边部拉应力的释放未造成弯角一的回弹，那只能是弯角二的回弹缓解了边部拉应力的释放，且边部拉应力越大，弯角二的回弹角度就越大。如图 13 所示，a 点所在截面被轧辊组所约束，所以在 ab 段的拉应力释放时，会加剧 b 点所在截面侧边的回弹现象，从而加大弯角二的回弹角度。因此，在相同的冷弯成形工艺情况下，随着成形宽度的增大，回弹角度逐渐减小。

### 4 结论

(1) 冷弯成形作为增量成形工艺，在最终成形角相同时，回弹角度呈先增大后减小的趋势。

(2) 增大板料厚度、成形宽度和减小侧壁高度均会分别导致冷弯成形中各道次的回弹角度减小，其中回弹角度与板料厚度成线性关系。

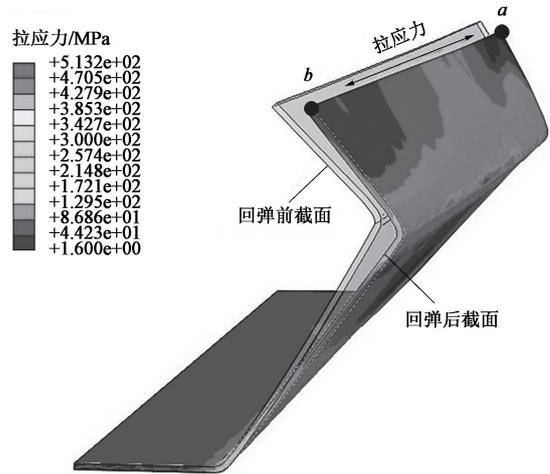


图 13 边缘拉应力对回弹的影响

Fig. 13 Influence of edge tensile stress on springback

(3) 方矩形焊管冷弯成形过程中，在进行弯角一的冷弯成形时，弯角二由于未冷弯变形而不会发生回弹；在进行弯角二的冷弯成形过程中，沿宽度方向板材的等效应力基本不变，弯角一也未继续发生回弹现象。

### 参考文献：

[1] 郑一鸣. 高强度厚壁矩形型钢柔性冷弯生产线的设计与有限元模拟 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.  
Zheng Y M. Design and Finite Element Simulation of Flexible Cold Forming Production Line of High Strength Thick-walled Rectangular Profiled Steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.

[2] 张国宽, 李晓, 田晓燕. 热轧方矩形管的开发 [J]. 钢管, 2015, 44 (4): 39-43.  
Zhang G K, Li X, Tian X Y. Development of hot-rolled square and rectangular tubes [J]. Steel Pipe, 2015, 44 (4): 39-43.

[3] 郑军兴. 回弹影响因素的有限元模拟研究 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (12): 1587-1590.  
Zheng J X. Finite element simulation research on the factors affecting on the springback [J]. Foundry Technology, 2009, 30 (12): 1587-1590.

[4] 韩飞, 李荣健. 超高强度钢多道次辊弯成形回弹规律研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (2): 73-81.  
Han F, Li R J. Springback law of ultra high strength steel in multiple stands roll forming process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (2): 73-81.

[5] 赵月伟, 帅美荣, 楚志兵, 等. 焊管冷弯回弹曲线方程构建及工艺优化 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (7): 98-105.  
Zhao Y W, Shuai M R, Chu Z B, et al. Construction of springback curve equation and process optimization of welded pipe during cold bending [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (7): 98-105.

(下转第 111 页)