

## 支架类槽钢冷弯成形参数设计及优化

顾泽中<sup>1</sup>, 孟珂<sup>1</sup>, 任 锐<sup>1</sup>, 周家银<sup>1</sup>, 陈英豪<sup>2</sup>

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江伟联科技股份有限公司, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 为避免支架类槽钢在冷弯成形过程中出现弯角减薄和圆角变尖的缺陷、提高节点的刚度与极限承载能力、改善构件的力学性能, 针对其成形道次数与弯曲角增量的设计及优化进行研究。考虑坯料厚度、弯曲角度和弯曲半径等参数, 计算实际用料宽度、确定成形顺序; 根据成形道次数经验公式, 计算总道次数; 利用弯曲角分配公式, 计算每道次间的弯曲角增量, 并利用 Hauschild 模型进行有限元仿真分析; 利用仿真结果调整各道次的弯曲角增量, 确定最优道次数和弯曲角增量。最后, 结合生产设备验证优化结果的有效性。结果表明: 基于 COPRA 软件仿真结果分析出冷弯过程中超过极限值的不合理应变, 通过改变成形道次数和弯曲角增量来降低冷弯过程中的最大应变值, 可有效减少弯角减薄和圆角变尖的缺陷。

**关键词:** 支架类槽钢; 冷弯成形; 弯曲角; 成形道次数; Hauschild 模型

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.013

**中图分类号:** TG316.1<sup>+</sup>4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0090-06

## Design and optimization on cold bending parameters for sporting channel steel

Gu Zezhong<sup>1</sup>, Meng Ke<sup>1</sup>, Ren Kun<sup>1</sup>, Zhou Jiayin<sup>1</sup>, Chen Yinghao<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310000, China;

2. Zhejiang Weilian Technology Co., Ltd., Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** In order to avoid the defects of bending angle thinning and fillet sharpening in cold bending process of sporting channel steel, improve the joint stiffness, ultimate bearing capacity and mechanical properties of components, the design and optimization of the number of forming passes and the bending angle increment were researched. Then, considering the parameters such as blank thickness, bending angle and bending radius, the actual material width was calculated, and the forming sequence was determined. Furthermore, the total number of passes was calculated according to the empirical formula for the number of forming passes, and the bending angle increment between each pass was calculated by the bending angle distribution formula. In addition, the finite element simulation analysis was conducted by Hauschild model, the bending angle increment between each pass was adjusted by the simulate results to determine the optimal pass number and the bending angle increment. Finally, the validity of the optimization results was verified in combination with the production equipment. The results show that the unreasonable strain exceeding the limit value during the cold bending process is analyzed based on the simulation results of software COPRA, and the maximum strain value in the cold bending process is reduced by changing the number of forming passes and the bending angle increment, which can effectively reduce the defects of bending angle thinning and fillet sharpening.

**Key words:** sporting channel steel; cold bending; bending angle; number of forming passes; Hauschild model

支架类槽钢被广泛应用于消防、供暖、通风、空调、燃气、热力、电力、通讯、太阳能等国家重点领域和工程, 具有安装简便、高效以及施工劳动强度低等诸多优点, 是国家制造业发展的重点。冷弯成形, 作为一种先进、节能、高效的板带金属成

形工艺, 被广泛应用于各种类型槽钢的生产制造中。成形道次数和弯曲角增量是槽钢冷弯成形工艺中最重要的参数。成形道次数过小, 会导致弯曲角增加, 继而引发成形应变增加, 导致产品产生波浪、褶皱、圆角变尖等缺陷; 成形道次数过多, 虽会使单次成形弯曲角变小, 制造容易, 但会导致工位冗余、设备制造成本增加, 造成资源浪费。因此, 有必要针对成形道次数和弯曲角增量的优化方法进行研究。

国内外学者针对冷弯成形道次数和弯曲角增量的优化进行了大量研究。Safdarian R 等<sup>[1]</sup>针对冷弯成形中易产生纵向弯曲的问题, 采用数值模拟和拉伸试验相结合的方法, 发现了弯曲角增量和板材厚

收稿日期: 2021-09-13; 修订日期: 2021-12-18

基金项目: 浙江省重点研发项目 (2020C01085); 浙江省“万人计划”杰出人才项目 (2018R51008)

作者简介: 顾泽中 (1998-), 男, 学士

E-mail: 1369961361@qq.com

通信作者: 任 锐 (1979-), 男, 博士, 副教授

E-mail: renkun\_2008@sina.com

度等参数与断面边缘纵向应变的变化规律。Mohammdi N H 等<sup>[2]</sup>针对型材冷弯成形过程中的边缘起皱等问题, 采用有限元分析方法, 分析了边缘起皱成形机理, 通过试验验证发现了内、外凸缘宽度与冷弯成形过程中的边缘起皱缺陷呈正相关的规律。Abeyrathna B 等<sup>[3]</sup>针对超高强度钢存在的冷弯回弹问题, 对 DP600、DP1000 和 MS900 型高强度钢沿滚动方向进行拉伸试验, 建立弯曲角增量与纵向应变的关系模型, 优化了 AHSS 和 UHSS 冷弯工艺, 为发展先进的冷弯成形过程监控提供依据。Badr O M 等<sup>[4]</sup>针对 Ti-6Al-4V 合金板材冷弯过程中的回弹现象和形状缺陷, 基于 HAM 模型设计滚压试验和数值分析, 分析定弧长与定半径方法对回弹的影响, 发现定半径方法可减小回弹、提高成形精度。国内学者任巍<sup>[5]</sup>针对铜管制备过程效率低下的问题, 对铜管的拉伸变形量进行了理论计算和试验验证, 建立了弯曲角度等工艺参数与拉伸变形量间的计算模型, 提高了设计效率和材料利用率。郝文博等<sup>[6]</sup>基于有限元仿真对外卷边槽钢冷弯成形过程的受力分布和应力分布进行分析, 优化弯曲角增量等参数, 确定了外卷边槽钢冷弯成形的最优成形工艺。付志强等<sup>[7]</sup>为减小方形管冷弯成形的纵向延伸, 建立了非线性有限元模型, 总结出方形管冷弯过程中纵向伸长率的变化规律, 并对轧制弯角等工艺参数进行优化。马立廷等<sup>[8]</sup>针对变曲率冷弯成形调试时间长、废品率高的问题, 分析拉弯成形原理, 结合 CAE 分析与现场验证, 提出一种拉弯角度等工艺参数的确定方法。前人诸多研究成果为冷弯工艺提供了合理的设计依据和可靠的优化方法, 但是针对支架类槽钢成形道次数和弯曲角增量设计及优化方法的研究未见述及。

本文针对支架类槽钢冷弯成形过程中成形道次数和弯曲角增量的参数设计及优化进行研究。首先, 考虑坯料厚度、弯曲角度和弯曲半径等参数, 计算实际用料宽度, 确定成形顺序; 其次, 根据成形道次数计算公式, 确定总道次数; 利用弯曲角分配公式, 计算每道次间的弯曲角增量; 建立抗震支架有限元模型, 并进行仿真分析<sup>[9]</sup>, 结合应变曲线图优化弯曲角增量, 获得最优的弯曲角增量组合; 最后, 结合生产设备验证优化结果的有效性。

## 1 参数计算方法研究

如图 1 所示, 在冷弯成形过程中, 弯曲角内径部分被压缩、外径部分被拉伸, 坯料的中性面向弯曲内

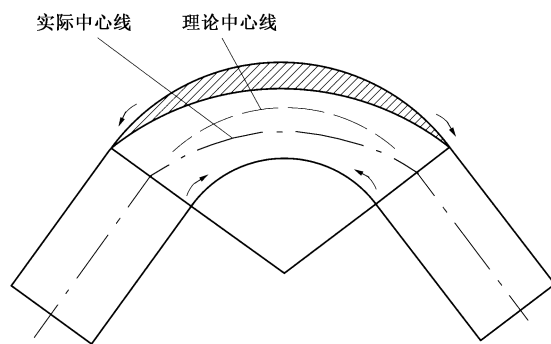


图 1 冷弯成形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cold bending

径方向移动。为保证产品达到预期的尺寸精度, 需要使坯料的设计中心线与实际中心线保持一致, 即要根据最终成形中心线尺寸计算实际用料宽度。

常用的弯曲方法有定长度弯曲、定半径弯曲、混合弯曲。定半径弯曲方法相对于另外两种方法可以有效减少回弹<sup>[4]</sup>, 故而本文拟采用定半径弯曲方法。采用定半径弯曲方法计算坯料的实际宽度, 需将坯料分为折弯部分与直线部分分别进行计算。

实际宽度  $L$  的计算公式为:

$$L = \sum l_b + \sum l_g \quad (1)$$

式中:  $l_b$  为折弯实体部分宽度, mm;  $l_g$  为直线实体部分宽度, mm。

对于折弯实体部分, 利用定半径弯曲标准公式<sup>[10]</sup>可计算得到其实际用料宽度, 表达式为:

$$l_b = \frac{\pi}{180} (R + kT) \theta \quad (2)$$

式中:  $R$  为弯曲半径, mm;  $k$  为弯曲处非线性经验系数;  $T$  为坯料厚度, mm;  $\theta$  为弯曲角, ( $^\circ$ )。

成形道次数的设置会影响弯曲角增量, 若成形道次数过少, 各道次间的弯曲角增量会相应地增大。成形道次数的确定受许多因素的影响, 目前没有一个标准的方法用来计算成形道次数, 大多数设计者均是根据经验来决定成形道次数。George T H<sup>[10]</sup>提出的道次数经验公式综合考虑了坯料厚度、截面形状以及坯料的材料力学性能等多方面因素, 具有较大的参考价值, 可为成形道次数的计算提供指导, 即:

$$N = \left( 0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{T^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right) \cdot \left( \frac{R_{el}^{2.1}}{0.003R_m} \right) 0.15 \cdot s(1 + 0.5z) + e + f + 5sz \quad (3)$$

式中:  $N$  为总的成形道次数;  $h$  为截面最大高度, mm;  $\alpha$  为成形基本中心线一侧的成形角, ( $^\circ$ );  $R_{el}$  为屈服强度, MPa;  $R_m$  为抗拉强度, MPa;  $s$  为形

状系数； $z$  为预冲孔连续系数； $e$  为额外增加的道次数； $f$  为公差系数。

同成形道次数一样，弯曲角增量的计算也没有一个标准的计算方法，通常也是依靠设计者的经验来确定。本文采用弯曲角分配公式<sup>[11]</sup>来计算弯曲角增量，所得的弯曲角增量在理论上可满足生产的需求，即：

$$\cos\theta_i = 1 + (1 - \cos\theta_0) [2(\frac{i}{N})^{3+a} - 3(\frac{i}{N})^{2+a}] \quad (4)$$

式中： $\theta_0$  为最终弯曲角度，(°)； $\theta_i$  为第  $i$  道次的弯曲角度， $i=1, \cdots, N$ ； $a$  为变动指数，取 0.1。

2 典型抗震支架的初始工艺设计

2.1 典型抗震支架槽钢的截面尺寸参数

典型的抗震支架槽钢采用 Q235 钢材，它包括共计 14 处圆弧段，圆弧段的分布和中性层的尺寸如图 2 所示。其中，圆弧段 3、4、5、6、9、10、11、12 共计 8 处的圆弧段为分布在槽钢两侧的槽钢筋的组成部分，可在板材整平后、冷弯成形前利用轧辊压制而成；剩余的圆弧段 1、2、7、8、13、14 共计 6 处圆弧段则由压筋后的钢板坯料冷弯加工而成，该 6 处圆弧段的弯曲角和弯曲半径分别为 90°和 1 mm。

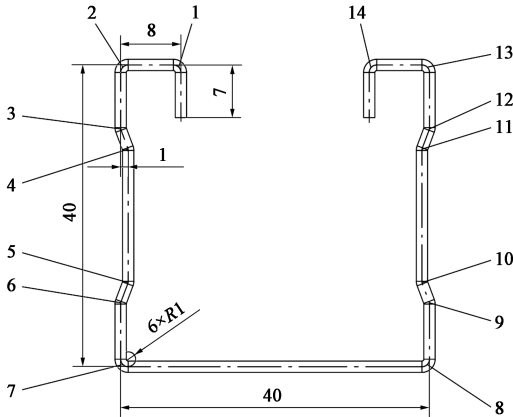


图 2 支架槽钢截面图  
Fig. 2 Section diagram of sporting channel steel

折弯部分实际用料宽度与坯料厚度、弯曲角以及弯曲处非线性经验系数有关。弯曲处非线性经验系数是与弯曲半径、坯料厚度和材料力学特性有关的经验系数，其确定方法如式（5）所示<sup>[10]</sup>：

$$k = 0.567 \left( \frac{\frac{R}{T} + 0.25}{1.2 \frac{R}{T} + 1} \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_{eL}^{2.5}}{2051 R_m^{1.41}} \right) \quad (5)$$

根据坯料厚度、弯曲角和弯曲处非线性经验系数等参数，利用式（1）和式（2）计算得到坯料进料宽

度为 153.667 mm，最终选择板料宽度为 153 mm。

2.2 计算成形道次数和弯曲角增量

成形道次数的计算与截面最大高度、坯料厚度、屈服强度等参数有关，本文所研究的抗震支架的相关材料参数如表 1 所示。

表 1 典型抗震支架槽钢材料性能

Table 1 Material properties of typical anti-seismic sporting channel steel

参数	$h/m$	$T/mm$	$\alpha/(^\circ)$	$R_{eL}/MPa$	$R_m/MPa$	$s$	$z$	$e$	$f$
数值	0.041	2	270	235	460	1	0	0	0.5

将各参数代入式（3）中得出理论所需的成形道次数为 19。实际生产中，为降低生产风险、提高产品合格率，可额外增加 2 个道次，故将成形道次数确定为 21。结合图 2 所示的支架槽钢截面图，将各圆弧段道次数分配如下：圆弧段 1、14 需要的成形道次数为 5，圆弧段 2、13 需要的成形道次数为 6，圆弧段 7、8 需要的成形道次数为 9，连同初始机架的第 0 道次，共计 21 道次。

弯曲角增量的确定与成形道次数和总弯曲角度等参数相关，利用式（4）可计算各圆弧段的弯曲角增量，如表 2 所示。

表 2 各圆弧段的弯曲角增量分配

Table 2 Allocation of bending angle increment for each arc segment

成形道次	弯曲角增量/(°)					
	圆弧段 1	圆弧段 2	圆弧段 7	圆弧段 8	圆弧段 13	圆弧段 14
0	0	—	—	—	—	0
1	24	—	—	—	—	24
2	47	—	—	—	—	47
3	67	—	—	—	—	67
4	82	—	—	—	—	82
5	90	0	—	—	0	90
6	—	20	—	—	20	—
7	—	39	—	—	39	—
8	—	57	—	—	57	—
9	—	73	—	—	73	—
10	—	84	—	—	84	—
11	—	90	0	0	90	—
12	—	—	13	13	—	—
13	—	—	26	26	—	—
14	—	—	39	39	—	—
15	—	—	52	52	—	—
16	—	—	63	63	—	—
17	—	—	73	73	—	—
18	—	—	81	81	—	—
19	—	—	87	87	—	—
20	—	—	90	90	—	—

3 COPRA 仿真建模与分析

在 COPRA 中对初始设计方案进行仿真分析。首先，绘制图 2 所示的支架槽钢截面中性线，利用多义线合并的方法将中性线转换成槽钢截面图，厚度定义为 2 mm；然后，将支架槽钢下底面的实体中心设置为展开基准平面，即展开过程中的展开点；最后，将支架槽钢以表 2 中给出的各圆弧段弯曲角增量逐道次展开，以定半径的展开方法形成辊花图。COPRA 提供了三角级数、线性、多项式、管成形以及 Hauschild 模型。其中，Hauschild 模型中涉及了更多与实际生产相关的参数，例如辊根直径、材料指数和伸长率等，其模拟结果与实际生产结果更为接近，故选取 Hauschild 模型方法进行仿真。支架槽钢材料为 Q235B 钢，材料的性能参数如表 3 所示；轧辊

半径设置为：上辊半径为 100 mm，下辊半径为 90 mm，并且每架递增 0.5 mm，机架间距设置为 450 mm；轧辊的速度按照实际生产中的轧制速度，选取为  $20\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ；网格划分按照最终截面将圆角部分细化，其余使用较粗的网格，圆角部分设置纵向网格数为 29、横向网格数为 30，其余部分网格数均设置为 15。

表 3 Q235B 钢材料力学性能参数

Table 3 Mechanical property parameters of Q235B steel material

参数	杨氏模量/ GPa	屈服强度/ MPa	硬度/ HRC	伸长率/%	泊松比 $\nu$	应变硬化指数	各向异性指数
数值	210	235	25	26.7	0.3	0.1323	2

依据上述方案进行仿真，得到各道次的应变值曲线，并将成形过程以辊花图显示，结果如图 3 所示。

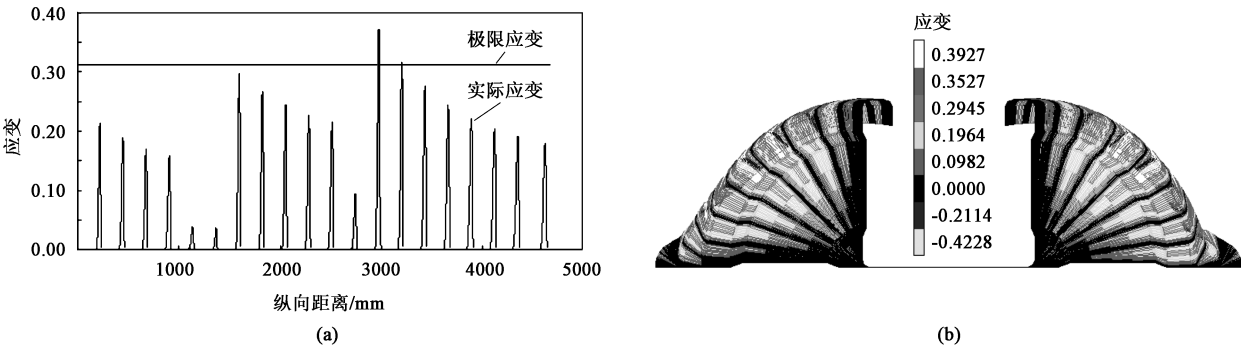


图 3 初始方案的应变曲线 (a) 和应变分布 (b)  
Fig. 3 Strain curve (a) and strain distribution (b) of initial scheme

由仿真结果可知：在圆弧段 2、13 处弯曲的第 1 道次（总道次的第 7 道次），应变值接近极限应变值，设计中应尽量保证各圆弧段的初始道次应变值相对较小，否则在实际生产过程中易出现边部上翘的情况<sup>[12]</sup>。观察得知，同弧段弯曲的第 11 和 12 道次的应变余量较大，可以通过减小第 7 道次的弯曲角增量、增加第 11 和 12 道次的弯曲角增量的方法，在保证同弧段应变不超过极限应变值的情况下，使得第 7 道次的应变值适当减小。在圆弧段 7、8 处的弯曲过程中，第 1 道次的应变值最大，超过了材料的应变极限值，说明在弯曲过程中板料的局部应力过大，容易使材料减薄而产生圆角变尖等缺陷，增加了板材开裂的趋向。

基于上述仿真结果分析，说明产品的工艺不合理，需要对弯曲角增量进行优化。优化原则为：保证冷弯过程中的最大应变值不超过极限应变值；同

一圆弧段各道次的应力变化应尽量平滑，在保证成形道次数最少的前提下，充分利用各道次。

基于上述原则对弯曲角增量进行如下优化：（1）对圆弧段 2、13 处的弯曲角增量进行重新分配，可通过减小第 7、8、9 道次的弯曲角增量，适量增大第 11 道次的弯曲角增量值；（2）对于圆弧段 7、8 处的弯曲角增量进行重新分配，需要适量增加 1~2 个道次数，并降低初始方案中的第 13、14、15 道次的弯曲角增量。改进后的弯曲角增量分配表如表 4 所示。

4 改进方案设计与分析

使用 COPRA 软件对改进方案再次进行仿真分析，得到的仿真结果如图 4 所示。经过调整弯曲角增量，第 13 道次的应变值降低至 0.20%，第 7 道次的

表 4 改进方案的弯曲角增量分配

Table 4 Allocation of bending angle increment for optimized scheme

道次	圆弧段 1	圆弧段 2	圆弧段 7	圆弧段 8	圆弧段 13	圆弧段 14
0	0	—	—	—	—	0
1	15	—	—	—	—	15
2	27	—	—	—	—	27
3	48	—	—	—	—	48
4	69	—	—	—	—	69
5	90	0	—	—	0	90
6	—	12	—	—	12	—
7	—	25	—	—	25	—
8	—	39	—	—	39	—
9	—	55	—	—	55	—
10	—	72	—	—	72	—
11	—	90	0	0	90	—
12	—	—	4	4	—	—
13	—	—	10	10	—	—
14	—	—	16	16	—	—
15	—	—	25	25	—	—
16	—	—	34	34	—	—
17	—	—	44	44	—	—
18	—	—	55	55	—	—
19	—	—	66	66	—	—
20	—	—	78	78	—	—
21	—	—	90	90	—	—

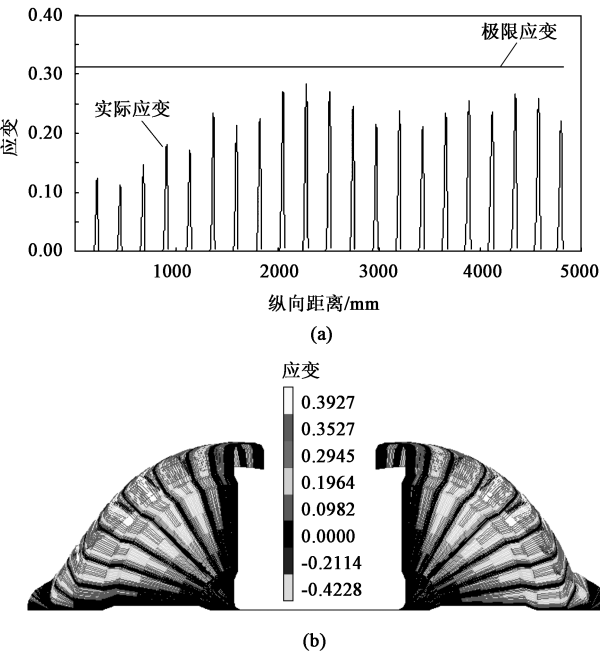


图 4 优化方案的应变曲线 (a) 和应变分布 (b)

Fig. 4 Strain curve (a) and strain distribution (b) of optimized scheme

应变值降低至 0.25%，成形过程中的应变值均小于应变极限值。且由仿真结果可知，各道次的应变分布较为均匀，说明各道次间的弯曲角增量分配较优化前更加合理，各道次的使用更加充分。

将轧辊模具按照改进方案进行修改，并进行试轧，得到的产品如图 5 所示。经过测量得到产品尺寸如表 5 所示，将产品的实际尺寸与标准尺寸进行对比，发现实际尺寸在标准误差范围内，说明设备生产合格。

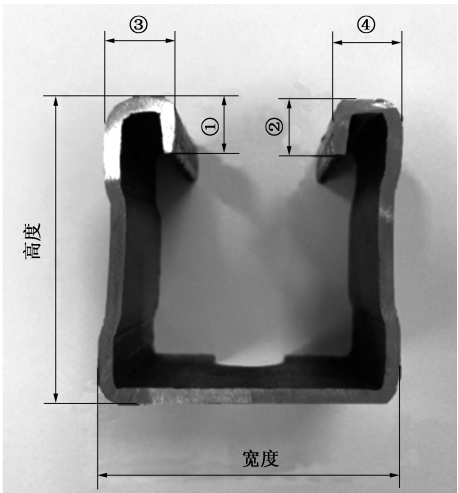


图 5 产品尺寸图

Fig. 5 Size diagram of product

表 5 产品的实际尺寸与标准尺寸的对比 (mm)

Table 5 Comparison between actual sizes and standard sizes of product (mm)

参数	高度	宽度	①	②	③	④
标准尺寸	41.0±0.5	41.0±0.5	8.0±0.5	8.0±0.5	10.0±0.5	10.0±0.5
实际尺寸	41.28	40.73	7.82	7.87	9.90	9.78

5 结论

(1) 本文针对支架类槽钢冷弯成形过程中由于应变过大导致的弯角减薄、圆角变尖问题，考虑坯料厚度、弯曲角度和弯曲半径等参数，基于 Hauschild 模型对冷弯过程进行有限元仿真分析，提出成形道次数和弯曲角增量的优化方法。

(2) 利用优化后的成形道次数和弯曲角增量进行产品生产，经测量，产品的实际尺寸在标准误差范围内，且弯角减薄、圆角变尖的缺陷得到了有效改善。

参考文献：

[1] Safdarian R, Naeini H M. The effects of forming parameters on the

- cold roll forming of channel section [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 92: 130–136.
- [2] Mohammadi N H, Moslemi N H, Safdarian R. Effect of forming parameters on edge wrinkling in cold roll forming of wide profiles [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 181–194.
- [3] Abeyrathna B, Rolfe B, Weiss M. The effect of process and geometric parameters on longitudinal edge strain and product defects in cold roll forming [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92: 743–754.
- [4] Badr O M, Rolfe B, Weiss M. Effect of the forming method on part shape quality in cold roll forming high strength Ti-6Al-4V sheet [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 32 (4): 513–521.
- [5] 任巍. 铜管弯管工艺参数计算方法 [J]. *制冷与空调*, 2020, 20 (9): 39–41, 45.
- Ren W. Calculation methods of bending process parameters of copper tube [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2020, 20 (9): 39–41, 45.
- [6] 郗文博, 赵云涛, 李万全. 外卷边槽钢辊弯成型过程模具的设计及可靠性分析 [J]. *机械管理开发*, 2020, 35 (1): 14–16.
- Xi W B, Zhao Y T, Li W Q. Die design and reliability analysis of roller bending forming process of coiled channel steel [J]. *Mechanical Management and Development*, 2020, 35 (1): 14–16.
- [7] 付志强, 安子军, 杜凤山, 等. 方矩形管连续辊弯成型延伸规律 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2015, 45 (2): 487–493.
- Fu Z Q, An Z J, Du F S, et al. Elongation of rectangular tube in continuous roll forming [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2015, 45 (2): 487–493.
- [8] 马立廷, 刘东海, 高强, 等. 反向弧度变曲率拉弯成型中工艺参数研究分析 [J]. *制造技术与机床*, 2019, (11): 82–85.
- Ma L T, Liu D H, Gao Q, et al. Research and analysis of technological parameters in reverse radius variable curvature bending [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2019, (11): 82–85.
- [9] 成骏, 阚小如, 陶义建. 基于 Dynaform 的飞机封严板压窝成形工艺分析与优化设计 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (1): 37–42.
- Cheng J, Kan X R, Tao Y J. Analysis and optimal design on press dimple forming process for aircraft seal plate based on Dynaform [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (1): 37–42.
- [10] George T H. 冷弯成型技术手册 [M]. 刘继英, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- George T H. *Cold Bending Technical Manual* [M]. Translated by Liu J Y. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [11] 小奈弘. 冷弯成型技术 [M]. 刘继英, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Hiroshi Ona. *Cold Bending Technology* [M]. Translated by Liu J Y. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [12] 王传红, 骆晶, 黄勇军, 等. 基于 COPRA 的电梯导轨辊弯成型仿真与模具调试研究 [J]. *机械设计与制造*, 2020, (1): 72–74, 79.
- Wang C H, Luo J, Huang Y J, et al. Research on simulation and die debugging of roll forming of elevator guide tube based on COPRA [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020, (1): 72–74, 79.
- +++++
- (上接第 89 页)
- [5] 洪腾蛟, 董福龙, 丁凤娟, 等. 铝合金在汽车轻量化领域的应用研究 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (4): 1–6.
- Hong T J, Dong F L, Ding F J, et al. Application of aluminum alloy in automotive lightweight [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (4): 1–6.
- [6] 左哲, 牛超, 陈新平, 等. 基于冲压回弹控制的 A 柱上边梁零件智能设计方法研究 [J]. *塑性工程学报*, 2021, 28 (1): 38–44.
- Zuo Z, Niu C, Chen X P, et al. Research on intelligent design method of A-pillar upper side beam part based on stamping springback control [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28 (1): 38–44.
- [7] 李一凡, 黄海. 铝合金游艇外板冲压成形缺陷分析及优化设计 [J]. *船舶工程*, 2021, 43 (1): 102–107.
- Li Y F, Huang H. Defect analysis and optimization design of stamping forming of aluminum alloy yacht outer panel [J]. *Ship Engineering*, 2021, 43 (1): 102–107.
- [8] 徐涛涛, 孔垂品, 李俊杰, 等. 汽车覆盖件冲压工艺分析系统 [J]. *塑性工程学报*, 2020, 27 (5): 74–82.
- Xu T T, Kong C P, Li J J, et al. Process analysis system for stamping of automobile panel [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2020, 27 (5): 74–82.
- [9] 李欣, 孙延朋, 王丹, 等. 汽车前地板成形有限元数值模拟 [J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2019, 49 (5): 1608–1614.
- Li X, Sun Y P, Wang D, et al. Finite element numerical simulation of automobile front floor forming [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2019, 49 (5): 1608–1614.
- [10] 胡玉明, 余小鲁. 铝合金侧围拉延工艺分析与优化 [J]. *锻压技术*, 2020, 45 (5): 43–48.
- Hu Y M, Yu X L. Analysis and optimization of drawing process for aluminum alloy side frame [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, 45 (5): 43–48.
- [11] 孟宝, 贺伟林, 万敏. 航空发动机金属封严环成形回弹预测与控制 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (9): 145–153.
- Meng B, He W L, Wan M. Prediction and control of springback for aeroengine metallic sealing ring forming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (9): 145–153.
- [12] 刘帅, 刘金富. 冲压成形回弹分析及对策 [J]. *模具工业*, 2020, 46 (7): 30–33.
- Liu S, Liu J F. Springback of analysis stamping forming process and countermeasures [J]. *Die & Mould Industry*, 2020, 46 (7): 30–33.