

## 基于伺服压力机的波纹板冲压成形工艺与回弹研究

刘健<sup>1,2</sup>, 丁明明<sup>2</sup>, 沈铨<sup>2,3</sup>, 张晨阳<sup>2,3</sup>, 林健<sup>1,2</sup>

(1. 宁夏大学机械工程学院, 宁夏银川 750000; 2. 浙江水利水电学院机械与汽车工程学院, 浙江杭州 310018;  
3. 华北水利水电大学机械学院, 河南郑州 450000)

**摘要:** 研究了波纹板的冲压成形工艺及其回弹控制方法。首先对波纹板进行工艺分析并建立其有限元模型, 然后依据仿真结果完成模具结构设计, 最后以回弹角为评价指标, 基于正交试验研究了冲压速度、摩擦因数和凸模圆角半径等工艺参数对波纹板回弹的影响。极差分析发现, 各因素对回弹的影响顺序为: 凸模圆角半径>冲压速度>摩擦因数。最终确定最佳的工艺参数组合为: 凸模圆角半径为 1.8 mm, 冲压速度为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 摩擦因数为 0.13。通过伺服冲压试验发现, 波纹板的回弹角由  $2.64^\circ$  降低至  $1.53^\circ$ 。研究表明, 所采用的波纹板的成形工艺正确, 模具结构设计合理, 并且通过工艺参数优化可以有效降低波纹板的回弹。

**关键词:** 波纹板; 冲压成形; 模具设计; 正交试验; 回弹控制

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.008

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 12-0057-06

## Research on stamping process and springback for corrugated plate based on servo press

Liu Jian<sup>1,2</sup>, Ding Mingming<sup>2</sup>, Shen Cheng<sup>2,3</sup>, Zhang Chenyang<sup>2,3</sup>, Lin Jian<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Hydropower, Hangzhou 310018, China;

3. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The stamping process of corrugated plate and its springback control method were studied. Firstly, the process analysis of corrugated plate was carried out and its finite element model was established, and then the die structure was designed according to the simulation results. Finally, taking the springback angle as the evaluation index, based on orthogonal test, the influences of process parameters such as stamping speed, friction factor and punch fillet radius on the springback of corrugated plate were studied. The range analysis finds that the influencing order of various factors to the springback is as follows: punch fillet radius>stamping speed>friction factor. The best combination of process parameters is the punch fillet radius of 1.8 mm, the stamping speed of  $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  and the friction factor of 0.13. Through servo stamping test, it is found that the springback angle of corrugated plate is reduced from  $2.64^\circ$  to  $1.53^\circ$ . The results show that the used forming process analysis of corrugated plate is correct, the die structure design is reasonable, and the springback of corrugated plate is effectively reduced by optimizing the process parameters.

**Key words:** corrugated plate; stamping; die design; orthogonal experiment; springback control

波纹板是蒸汽发生器干燥器的核心部件, 在离心力、惯性力和附着力的作用下, 蒸汽中的水滴附着在波纹板上并形成水膜, 而水膜更有利于细小水滴的附着, 因此, 波纹板的制造精度不达

标会导致干燥器的分离效率下降, 直接影响到电厂的发电功率和汽轮机的寿命<sup>[1]</sup>。波纹板材料选用 304L 不锈钢, 厚度一般为 1~2 mm, 通常采用冲压成形方式进行批量化生产。波纹板的二维截面形状和尺寸如图 1 所示, 整体长度为 300 mm, 宽度为 203 mm, 厚度为 1.2 mm, 由中部 3 个  $118.5^\circ$  的 V 形槽和最外侧 2 个  $149.25^\circ$  的浅形折弯构成。生产技术要求为线性尺寸公差为  $\pm 1 \text{ mm}$ , 角度公差为  $\pm 0.5^\circ$ 。冲压件在成形卸载后会伴随有一定程度的回弹, 而回弹会直接影响到冲压件的成

收稿日期: 2023-05-16; 修订日期: 2023-08-20

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2020C01062)

作者简介: 刘健 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 3492607072@qq.com

通信作者: 丁明明 (1964-), 男, 硕士, 教授

E-mail: dingliumming@163.com

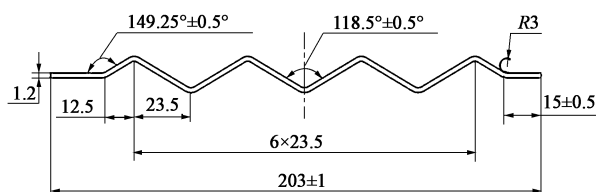


图 1 波纹板二维截面的形状和尺寸

Fig. 1 Two-dimensional cross-section shape and dimensions of corrugated plate

形精度与质量, 因此, 对回弹的预测和控制是提高冲压件成形精度的关键。

## 1 成形工艺分析与有限元模型

### 1.1 成形工艺分析

金属板料在受力弯曲变形时, 材料的横向部分会产生最大应力与应变, 内侧金属纤维受压缩而缩短, 外侧金属纤维受拉伸而伸长<sup>[2]</sup>。由于波纹板需要经历多次折弯, 若一次同时成形, 材料会由于不规则流动使波纹板存在破裂风险, 因此, 需要进行分步成形。考虑到波纹板结构的对称性, 可以分 3 次由中间向两侧依次进行成形, 使材料由中间向两侧流动, 从而避免波纹板发生破裂。除此之外, 由于材料的塑性变形能力较差, 在冲压成形卸载后会有一定程度的回弹, 因此, 在有限元建模仿真以及模具设计时应综合考虑。

### 1.2 有限元模型

在建立波纹板的有限元模型前, 需要对波纹板的坯料尺寸进行计算, 利用 Dynaform 有限元软件的 BSE 模块, 调用 MSTEP 求解器<sup>[3]</sup>, 计算得到波纹板的坯料为长度 300 mm、宽度 227 mm、厚度 1.2 mm 的长方形薄板。

由于 304L 不锈钢晶体内的原子排列方式不尽相同, 所以又呈现出各向异性的特征<sup>[4]</sup>。为了准确描述材料的受力变形行为, 本文选用 Dynaform 软件中 36 号材料模型对其进行仿真预测。36 号材料模型为 3 参数的 Barlat 材料模型, 适用于任何金属薄板的成形分析, 且考虑了材料的各向异性行为。304L 不锈钢的化学成分如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

表 1 304L 不锈钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of 304L stainless steel (% , mass fraction)

C	Si	Mn	S	P	Fe
≤0.03	≤1.0	≤2.0	≤0.03	≤0.045	余量

304L 不锈钢在室温下的力学性能可按照 GB/T 228.1—2021<sup>[6]</sup> 在万能拉伸试验机上进行单向拉伸试验测得。表 2 为 304L 不锈钢在室温下的力学性能参数, 可以发现平行于轧制方向的材料的拉伸性能最好, 垂直于轧制方向的材料的拉伸性能次之, 与轧制方向成 45° 的材料的拉伸性能最差。

表 2 304L 不锈钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 304L stainless steel

参数	数值
杨氏模量 $E/\text{GPa}$	193
泊松比 $\nu$	0.28
密度 $/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	7.93
屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	≥205
抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	≥520
各向异性系数 $r_0$ (平行于轧制方向)	1.01
各向异性系数 $r_{45}$ (与轧制方向成 45°)	0.85
各向异性系数 $r_{90}$ (垂直于轧制方向)	0.91

在 Solidworks 三维绘图软件中绘制波纹板冲压成形所需要的工具装配体, 并将其保存为数据交换格式 igs 文件。为了减少计算时间、提高计算效率, 本文将工具体三维模型建立为面体, 应用壳单元进行分析计算<sup>[7]</sup>。

将保存好的 igs 工具体模型文件导入 Dynaform 软件中, 对所有的零件层进行命名编辑和网格划分。将板料划分为边长为 2 mm 的四边形网格, 工具体应用工具网格进行划分, 划分好的有限元模型如图 2 所示。

## 2 有限元分析与模具设计

### 2.1 有限元分析

在成形工艺分析部分, 选择工序为单动成形, 参考面选择零件的上表面 (即凸模工具体的底部圆角半径为  $R3 \text{ mm}$ ), 设定凸模工具体的冲压速度为  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 凹模工具体保持静止, 工具体之间的摩擦因数设定为 0.12。

在回弹分析部分, 为了准确计算和观察波纹板成形后的回弹, 板料的单元网格选用 16 号全积分计算公式, 积分点数目选择 7, 分析方法选择单步隐式算法。此外, 由于波纹板结构具有对称性, 可通过在成形后波纹板中间的 V 形槽底部添加两个节点来约束波纹板的全部自由度<sup>[8]</sup>。

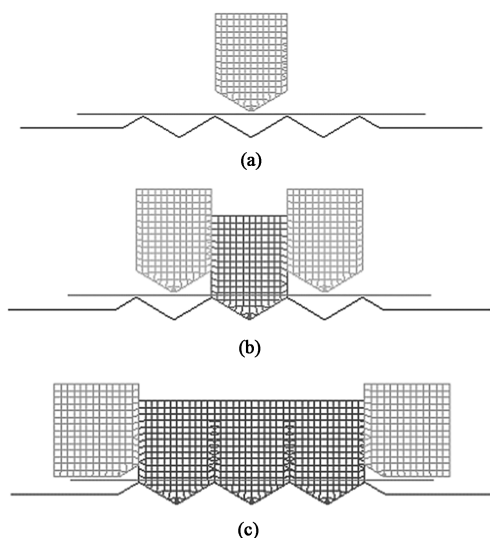


图 2 波纹板的有限元模型

(a) 工步 1 (b) 工步 2 (c) 工步 3

Fig. 2 Finite element models of corrugated plate

(a) Step 1 (b) Step 2 (c) Step 3

波纹板的成形情况如图 3 所示。从成形极限云图可以发现, 波纹板的成形性较好, 变形充分, 无开裂和起皱现象, 表明所采用的波纹板的成形工艺正确。从厚度变化云图可以发现, 整个波纹板面的厚度变化不明显, 最大厚度为 1.21 mm, 最小厚度为 1.18 mm, 最大减薄率为 1.68%, 最小增厚率为 0.78%, 基本保持在 1.2 mm 左右, 表明材料流入量

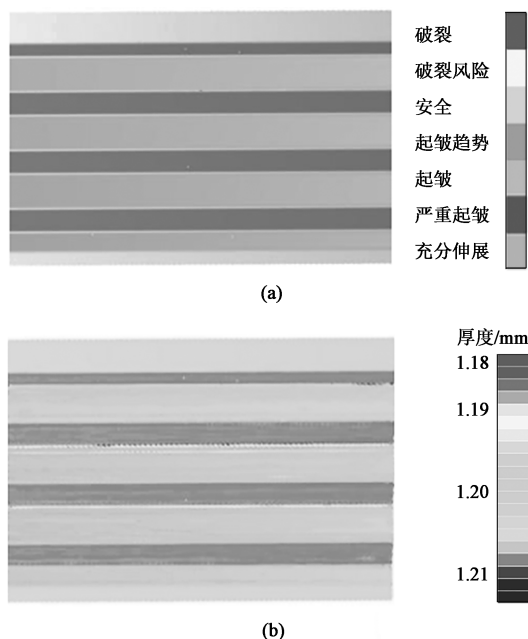


图 3 波纹板的成形情况

(a) 成形极限云图 (b) 厚度变化云图

Fig. 3 Forming condition of corrugated plate

(a) Forming limit nephogram (b) Thickness variation nephogram

均匀, 符合设计要求。

波纹板的回弹情况如图 4 所示, 在 Dynaform 软件中给波纹板创建一个横截面, 以中部 3 个 V 形槽为对象, 利用两线夹角工具测量出 V 形槽回弹后的成形角度<sup>[9]</sup>, 测量结果从左至右依次为 117.48°、119.25°和 117.63°, 可以发现, 中间的 V 形槽发生了正向回弹, 而两侧的 V 形槽发生了负向回弹。

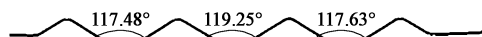


图 4 波纹板的回弹截面测量结果

Fig. 4 Measurement results of springback section for corrugated plate

设波纹板单个 V 形槽回弹前的角度为  $\alpha_0$ 、回弹后的角度为  $\alpha'$ , 则回弹角  $\Delta\alpha$  为:

$$\Delta\alpha = |\alpha' - \alpha_0| \quad (1)$$

波纹板中部 3 个 V 形槽总的回弹角为  $\sum \Delta\alpha_i$ , 其中,  $\Delta\alpha_i$  为第  $i$  个回弹角,  $i = 1, 2, 3$ 。此时  $\sum \Delta\alpha_i = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3 = |117.48^\circ - 118.5^\circ| + |119.25^\circ - 118.5^\circ| + |117.63^\circ - 118.5^\circ| = 2.64^\circ$ 。

## 2.2 模具设计

在有限元仿真结果的基础上, 本文设计了一种杠杆式波纹板模具。由于波纹板需要经历 5 次弯曲成形, 故而模具设计的关键是能使凸模机构实现先后次序运动, 即要求凸模工作部分在自然状态下呈现出阶梯形的高度差, 以便于先后接触板料。根据波纹板的结构特点, 本文将凸模机构的工作部分设计为由 5 根紧密接触且对称分布的筋条组成。

波纹板模具的装配关系如图 5 所示, 为实现凸模机构以先后次序接触板料, 需要在连接筋条 1 和筋条 2 的螺钉上布置模具弹簧, 使其与凸模垫板之间形成弹性连接<sup>[10]</sup>。

由于高度差的原因, 筋条 1 会最先接触板料, 当波纹板中间的 V 形槽成形后, 模具杠杆机构 (图 6) 将带动两侧的筋条 2 向下运动, 筋条 3 则通过螺钉刚性连接到凸模固定板上, 从而实现波纹弯曲的先后成形。

## 3 基于正交试验的回弹分析

### 3.1 正交试验设计

以波纹板中部 3 个 V 形槽回弹的角度之和  $\sum \Delta\alpha_i$  为评价指标, 基于正交试验探究冲压速度、

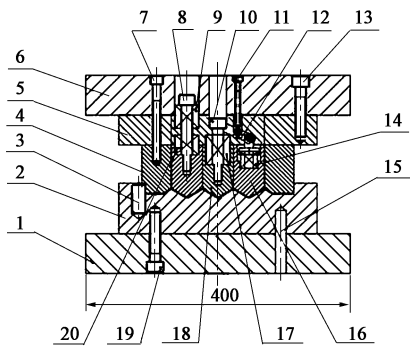


图 5 波纹板的模具装配图

1. 凹模座 2. 凹模 3. 挡料销 4. 筋条 3 5. 凸模垫板  
6. 凸模固定板 7. 内六角螺钉 1 8. 卸料螺钉 2 9. 弹簧 2  
10. 卸料螺钉 1 11. 内六角螺钉 2 12. 杠杆机构  
13. 内六角螺钉 3 14. 弹簧 3 15. 定位销 16. 筋条 2  
17. 弹簧 1 18. 筋条 1 19. 内六角螺钉 4 20. 弹簧 4

Fig. 5 Assembly diagram of dies for corrugated plate

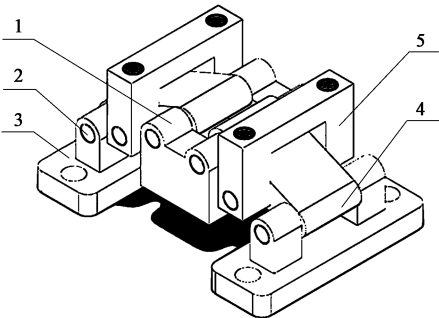


图 6 杠杆机构示意图

1. 托板 1 2. 销轴 3. 托板 2 4. 杠杆 5. 支座
- Fig. 6 Schematic diagram of lever mechanism

摩擦因数和凸模圆角半径等冲压工艺参数和模具结构参数对波纹板回弹的影响。

每个试验因素均设置 4 个水平，为了确保试验因素组合均匀分散，提高试验的容错率<sup>[11]</sup>，本文选用  $L_{16}(4^3)$  正交表，共需进行 16 组试验。正交实验的因素水平设置如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平

Table 3 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	冲压速度 $v/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	摩擦因数 $\mu$	凸模圆角半径 $r/\text{mm}$
1	2	0.12	1.8
2	3	0.13	2.0
3	4	0.14	2.2
4	5	0.15	2.4

在 Dynaform 软件中建立如表 4 所示的 16 组工

艺参数组合模型，对波纹板进行成形后的回弹分析，并计算每组试验下波纹板的回弹量。

表 4 正交试验方案及结果

Table 4 Schemes and results of orthogonal experiment

方案	冲压速度 $v/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	摩擦因数 $\mu$	凸模圆角半径 $r/\text{mm}$	$\sum \Delta\alpha_i/(\circ)$
1	2	0.12	1.8	2.17
2	2	0.13	2.0	2.08
3	2	0.14	2.2	2.23
4	2	0.15	2.4	1.96
5	3	0.12	2.0	2.48
6	3	0.13	1.8	2.24
7	3	0.14	2.4	1.82
8	3	0.15	2.2	2.19
9	4	0.12	2.2	1.92
10	4	0.13	2.4	2.39
11	4	0.14	1.8	2.64
12	4	0.15	2.0	2.11
13	5	0.12	2.4	2.13
14	5	0.13	2.2	2.26
15	5	0.14	2.0	1.94
16	5	0.15	1.8	2.32

3.2 极差分析

通过对正交试验结果进行极差分析，得出各试验因素对波纹板回弹的影响程度，并筛选出最佳的工艺参数组合。正交试验的极差分析结果如表 5 所示。

表 5 极差分析结果 ( $^\circ$ )

Table 5 Range analysis results ( $^\circ$ )

参数	冲压速度 $v$	摩擦因数 $\mu$	凸模圆角半径 $r$
水平 1 均值	2.11	2.18	2.34
水平 2 均值	2.18	2.24	2.15
水平 3 均值	2.27	2.16	2.15
水平 4 均值	2.16	2.15	2.08
极差 $R$	0.16	0.09	0.26
排序	凸模圆角半径>冲压速度>摩擦因数		
最佳组合	冲压速度为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，摩擦因数为 0.13，凸模圆角半径为 1.8 mm		

极差分析结果表明，各因素对波纹板回弹的影响顺序为：凸模圆角半径>冲压速度>摩擦因数；最佳的工艺参数组合为：冲压速度为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，摩擦因数为 0.13，凸模圆角半径为 1.8 mm。



图 7 为评价指标随试验因素的变化趋势，可以发现：在特定的因素水平范围内，随着冲压速度的提高，波纹板的回弹量呈现出先增大后减小的趋势；随着摩擦因数的提高，波纹板的回弹量呈现出先增大后减小的趋势；随着凸模圆角半径的增大，波纹板的回弹量呈现出逐渐减小的趋势。

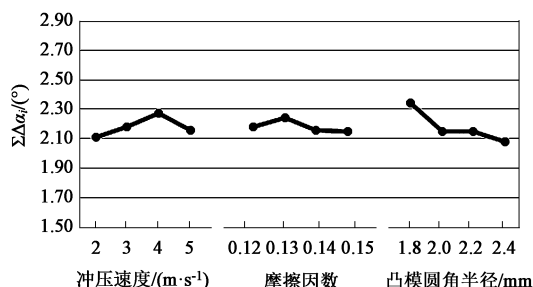


图 7 评价指标随试验因素的变化趋势

Fig. 7 Variation trends of evaluation index with experimental factors

### 3.3 伺服冲压试验

在伺服压力机上设定冲压速度为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，使用润滑油调节板料与凹模之间的摩擦因数在 0.13 左右，凸模圆角半径为 1.8 mm，采用单次曲柄模式进行波纹板的冲压成形试验。安装有波纹板模具的伺服压力机如图 8 所示。成形后的波纹板冲压件如图 9 所示。



图 8 波纹板的成形设备

Fig. 8 Forming equipment of corrugated sheet

为了准确测量出波纹板冲压件的成形尺寸，本文借助三维激光扫描仪提取到波纹板表面的点云数据，之后通过 Geomagic 逆向建模软件将扫描得到的点云数据与标准的波纹板数模进行最佳拟合对齐<sup>[12]</sup>，对齐后测量出波纹板冲压件的成形角度，测量结果如图 10 所示。

可以发现，波纹板冲压件的表面点云数据基本



图 9 波纹板冲压件

Fig. 9 Stamped part of corrugated plate

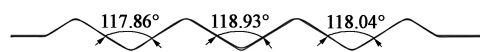


图 10 波纹板冲压件扫描测量结果

Fig. 10 Scanning measurement results of stamped part for corrugated plate

上与标准的波纹板数模重合，说明波纹板的成形性较好。波纹板冲压件的 V 形槽角度从左至右依次为  $117.86^\circ$ 、 $118.93^\circ$  和  $118.04^\circ$ ，此时的回弹角之和  $\sum \Delta\alpha_i = \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2 + \Delta\alpha_3 = |117.86^\circ - 118.5^\circ| + |118.93^\circ - 118.5^\circ| + |118.04^\circ - 118.5^\circ| = 1.53^\circ$ 。相较于未优化前的  $2.64^\circ$ ，波纹板的回弹角下降了  $1.11^\circ$ ，说明通过工艺参数优化可以有效降低波纹板冲压成形卸载后的回弹。

## 4 结论

(1) 仿真结果表明，采用分步成形的冲压方式，波纹板的成形性较好，材料流入量均匀，无开裂和起皱现象，说明波纹板的成形工艺正确，有限元模型可靠。

(2) 通过伺服冲压试验发现，杠杆式波纹板模具结构可以实现预期动作，成形后的波纹板无开裂和起皱现象，并且成形精度较高，说明模具设计合理。

(3) 正交试验结果表明，各因素对波纹板回弹的影响顺序为：凸模圆角半径 > 冲压速度 > 摩擦因数；最佳的工艺参数组合为：冲压速度为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，摩擦因数为 0.13，凸模圆角半径为 1.8 mm。在最佳工艺参数组合下进行波纹板伺服冲压试验，波纹板的回弹角下降了  $1.11^\circ$ ，说明通过工艺参数优化可以有效降低波纹板冲压成形卸载后的回弹。

### 参考文献：

- [1] 上海核工程研究设计院. 一种压水堆蒸汽发生器干燥器用双钩波形板 [P]. 中国: CN201510225440.1, 2015-08-12.

- Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute. A double-hook corrugated plate for steam generator dryer of pressurized water reactor [P]. China: CN201510225440.1, 2015-08-12.
- [2] 胡海朝, 赵淑怡. 基于 Dynaform 的高强钢 U 形件回弹影响因素研究 [J]. 模具工业, 2022, 48 (4): 1-5.  
Hu H C, Zhao S Y. Research on influencing factors of springback of high strength steel U-shaped parts based on Dynaform [J]. Die & Mould Industry, 2022, 48 (4): 1-5.
- [3] 王佳坡, 鲍梦媛, 石宝东, 等. 先进金属材料制备成形与质量管控理论技术研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (10): 21-31.  
Wang J P, Bao M Y, Shi B D, et al. Theoretical and technological research on fabrication and quality control of advanced metal materials [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (10): 21-31.
- [4] 李艳丽, 魏继业, 马亚鑫, 等. 扫描速度对激光选区熔化成形 304L 不锈钢板材高温持久性能的影响 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (9): 111-118.  
Li Y L, Wei J Y, Ma Y X, et al. Effect of scanning speed on high temperature durability of 304L stainless steel sheet formed by laser selective melting [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (9): 111-118.
- [5] GB/T 20878—2007, 不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分 [S].  
GB/T 20878—2007, Stainless and heat-resisting steels—Designation and chemical composition [S].
- [6] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [7] 张慧妍, 刘延辉, 宣守强, 等. 基于 Dynaform 的 316L 不锈钢拉深成形分析 [J]. 模具工业, 2021, 47 (9): 1-5.  
Zhang H Y, Liu Y H, Xuan S Q, et al. Analysis of deep drawing forming of 316L stainless steel based on Dynaform [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (9): 1-5.
- [8] 王金荣, 涂芬芬, 冷志斌, 等. 基于 DYNAFORM 的折边机折弯回弹研究 [J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56 (1): 93-97.  
Wang J R, Tu F F, Leng Z B, et al. Research on springback of folding machine based on DYNAFORM [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56 (1): 93-97.
- [9] 韦钦洋. 钣金 V 形自由折弯回弹预测研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.  
Wei Q Y. Research on Springback Prediction of Sheet Metal V-shaped Free Bending [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [10] 祝兴民, 莫云霞, 何清月, 等. 一种中卡汽车纵梁折弯模具的研发应用 [J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57 (2): 78-80.  
Zhu X M, Mo Y X, He Q Y, et al. A bending mould research and development of auto longeron card application [J]. China Metalforming Equipment and Manufacturing Technology, 2022, 57 (2): 78-80.
- [11] 孙庆东, 张翔, 张军, 等. 基于 Dynaform 和正交试验的汽车后备箱拉延工艺优化 [J]. 现代制造工程, 2022, (8): 60-64.  
Sun Q D, Zhang X, Zhang J, et al. Optimization of car trunk drawing process based on Dynaform and orthogonal test [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022, (8): 60-64.
- [12] 张川, 韩永松, 陈卫林, 等. 航空零部件三维扫描与逆向建模 [J]. 机械制造, 2022, 60 (7): 41-42, 54.  
Zhang C, Han Y S, Chen W L, et al. Aerospace parts 3D scanning and reverse modeling [J]. Machinery, 2022, 60 (7): 41-42, 54.
- +++++
- (上接第 47 页)
- [2] 程学鹏. 冷弯型钢残余应力分布的理论分析与有限元模拟 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2017.  
Cheng X P. Theoretical Analysis and Finite Element Simulation of Residual Stress on Cold-formed Profiled Steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2017.
- [3] 牛丽丽. 超高强度钢辊弯成形工艺变形机理分析 [D]. 北京: 北方工业大学, 2017.  
Niu L L. The Deformation Mechanism Analysis of the Roll Forming Process for Ultra High Strength Steel [D]. Beijing: North China University of Technology, 2017.
- [4] Paralikas J, Salonitis K, Chrysosouris G. Optimization of roll forming process parameters—A semi-empirical approach [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 47 (9-12): 1041-1052.
- [5] Bui Q V, Ponthot J P. Numerical simulation of cold roll-forming processes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 202: 275-282.
- [6] Safdarian R, Moslemi Naeini H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 92: 130-136.
- [7] Matthias Moneke, Peter Groche. Counter measures to effectively reduce end flare [A]. International ESAFORM Conference on Material Forming [C]. Dublin, 2017.
- [8] 韩钧, 肖爱达, 王晓瑜, 等. 高强度工程机械用钢 LG700QT 的开发 [J]. 辽宁科技大学学报, 2012, 35 (2): 123-125.  
Han J, Xiao A D, Wang X Y, et al. Development of high strength engineering machinery steel LG700QT [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning, 2012, 35 (2): 123-125.
- [9] 小奈弘, 刘继英. 冷弯成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
奈弘ちかん, Liu J Y. Cold Bending Forming Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [10] Halmos G T. 冷弯成形技术手册 [M]. 刘继青, 艾正青, 译. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
Halmos G T. Cold Bend Forming Technology Manual [M]. Translated by Liu J Q, Ai Z Q. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [11] 李湃. 锂电池极片辊压过程轧制力模型研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.  
Li P. Research on Rolling Force Model of Lithium Battery Pole Plate Rolling Process [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.
- [12] 刘晓立. 复杂截面超高强度钢连续辊弯成型回弹预测与控制研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.  
Liu X L. Research on Spring Back Prediction and Control Method of Complex Cross Sectional Ultra High Strength Steel in Cold Roll Forming [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018.