

# 换热器板片波纹结构辊压成形工艺设计

贾伟涛<sup>1</sup>, 马立峰<sup>2</sup>, 乐启炽<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 太原科技大学 山西省冶金设备设计理论与技术重点实验室, 山西 太原 030024)

**摘要:** 不锈钢换热板片的形状参数较为复杂, 考虑到传统冲压成形工艺制备效率低、缺陷多等问题, 提出了一种辊压成形和冲压工艺相结合的加工方法, 基于冲压工艺及冷弯成形工艺中的弯曲理论, 对板片波纹结构的辊压工艺参数进行了数学建模和优化设计. 研究表明: 换热器板片波纹结构可采用制备效率高的辊压工艺单道次成形, 通过量化研究变形回弹, 板片各物理参数加工精度基本满足技术标准.

**关键词:** 换热板片; 辊压成形; 冲压工艺; 数学建模; 变形回弹

**中图分类号:** TQ 320.66; TG 335 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)03-0379-06

## Roll Forming Process Design of Corrugated Structure of Heat Exchanger Plate

JIA Wei-tao<sup>1</sup>, MA Li-feng<sup>2</sup>, LE Qi-chi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Metallurgical Equipment Design and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China. Corresponding author: LE Qi-chi, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The shape parameter of stainless-steel heat exchanger plate is complex. Considering that the traditional stamping preparation process has a low efficiency, a roll forming process combined with stamping process was put forward. According to the bending theory of the stamping process and cold-bending formation process, mathematical models of rolling parameters about the corrugated structure were established and further optimized. The results show that the corrugated structure of heat exchanger can be formed by single-pass rolling process with a high preparation efficiency. Through the quantitative study of the deformation resilience, the processing accuracy of the physical parameters of the plate is basically satisfied with the technical standard.

**Key words:** heat exchanger plate; roll forming; stamping process; mathematical models; deformation resilience

板式换热器是一种高效、紧凑的换热设备, 板片质量直接影响到板式换热器的散热性能和工作状况<sup>[1]</sup>. 目前, 制备换热器不锈钢波纹板片的主要加工工艺为模具配合压力机一次冲压成形. 冲压过程中应变速率较大, 硬化作用较明显, 导致板料真实应力急剧升高, 然而材料的断裂抗力仅取决于原子间的结合力, 加工过程中基本保持稳定不变, 因此应变速率越大金属越易断裂<sup>[2]</sup>, 宏观表现为板片波纹结构极易出现裂纹等缺陷, 并且

传统的单件冲压制备方法由于需要采用人工放件, 因此具有一定的危险性, 而且为了控制波纹的形状, 冲压过程中需要一定的保压时间, 如此严重影响了板片的制备效率. 为了探索工艺创新, 本文设计了特种孔型辊连续辊压和冲压相结合的成形工艺, 其中波纹结构占板片的主要部分, 也是影响换热效率的重要部分, 设计采用高精度辊压成形, 较为复杂的垫片槽及定位结构延续使用模具冲压成形, 而后焊接两结构. 该工艺通过在降低成形速

收稿日期: 2015-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB632203); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB0301104).

作者简介: 贾伟涛(1986-), 男, 河北定州人, 东北大学博士研究生; 马立峰(1977-), 男, 山西太原人, 太原科技大学教授; 乐启炽(1968-), 男, 福建大田人, 东北大学教授, 博士生导师.

率的条件下实现波纹结构的连续化生产、有效降低板片制备缺陷及减少人工参与来缩短产品的开发周期,提高生产效率和材料利用率. 辊压成形是一个连续的加工过程,尤其适用于全焊式板式换热器板片的制备,该类板片采用更为先进的全焊接工艺密封,无垫片设计,由此可省去垫片槽及定位结构的冲压成形过程.

为实现大批量、高效率辊压生产,设计单道次辊压成形工艺. 变形程度较大时设计成形道次过少,易产生尺寸超差、扭曲和回弹,因此设计单道次成形时精度控制为研究重点.

## 1 设计原则

所设计的单道次辊压成形工艺流程见图 1.

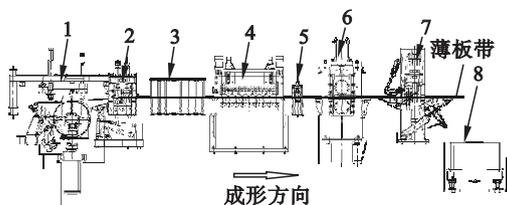


图 1 单道次辊压成形工艺及装置

Fig. 1 Single-pass rolling process and device

1—开卷机开卷导向;2—夹送辊导向;3—温度自动感应加热炉加热;4—矫直单元对板带进行矫直;5—导向夹送辊导向;6—特种孔型轧机进行连续辊压成形;7—V型剪刀飞剪机进行定尺剪切;8—落料收集.

板片波纹主要技术参数均以波纹垂直截面(K-K)为参照,其包括:波纹夹角 $\beta$ (多为 $120^\circ$ )、板片厚度 $t$ 、波纹法向节距 $L$ 、波纹深度 $h$ 、侧翼弯曲角 $\varphi_0$ 、波纹圆角半径 $R$ ,具体含义见图 2.

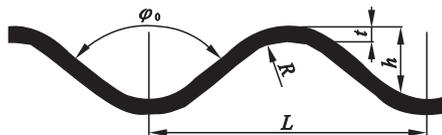


图 2 板片波纹结构主要技术参数

Fig. 2 Main technical parameters of the corrugated part

波纹板片辊压成形属于连续体成形范畴,其成形机理比较复杂,简化其成形原理可得成型辊类似于“连续弯曲模具”啮合的同时对板料进行连续弯曲作用,如图 3a 所示;进齿和退齿过程类似于冲压时模具加载及卸载过程,如图 3b 所示. 辊压成形时可实现三点接触,两齿根和一齿顶处受轧压,侧翼模具间留有间隙基本不受齿间的钳压,如此可有效保证系统的稳定性和成型辊的使用寿命.

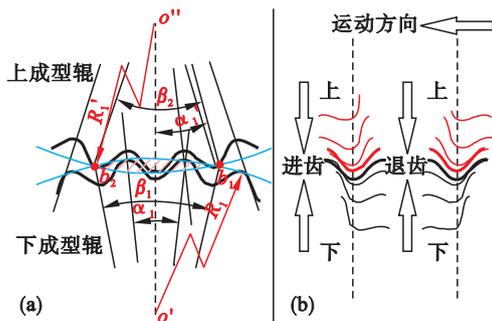


图 3 辊压成形原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of roll forming process

(a)—啮合过程; (b)—进齿和退齿过程.

## 2 工艺设计及优化

### 2.1 辊型设计

辊压成形的加工对象为波纹状板片,模具齿顶作为主要成形结构设计成圆弧状. 在辊压时进行承压分析,圆弧与圆弧接触为非线接触,齿面对板料不会因产生较高的线压力而导致板料断裂,所以齿沟也设计成圆弧状. 圆弧之间采用齿顶与齿沟圆弧的切线相连接以提高加工过程的稳定性.

出于换热效率考虑,通常板片厚度为 $0.6\text{ mm}$ 左右,忽略板料厚度可得两辊顶轨迹的交替部位,即啮合区域也是板料的加工区域,见图 3a 的阴影部位. 为保证波形的均匀相等,辊压后波纹波距(两相邻辊齿齿顶周距)必须相等,此为啮合工作的首要条件,因此设计上下成型辊相同工艺参数进行啮合辊压,啮合工作区域内的齿数 $N$ 计算见式(1),式中参数含义见图 3.

$$\left. \begin{aligned} \cos(\beta_1/2) &= (R_1 + z + R_2)/2R_1, \\ N &= \beta_1/\alpha_1 + \beta_2/\alpha_1' = 2\beta_1/\alpha_1 = \\ &4\arccos[(R_1 + z + R_2)/2R_1]/\alpha_1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

### 2.2 成型辊辊齿间隙

NB/T 47004—2009(JB/T 4752)规定板片最薄处厚度应不小于板片厚度的 $75\%$ <sup>[3]</sup>,为保证波纹板片的辊压精度,必须合理确定凸凹模之间的间隙. 凸凹模的单面间隙值一般可按下式计算<sup>[4]</sup>:

$$z = t_{\max} + C \cdot t. \quad (2)$$

式中: $z$ 为凹模单面间隙; $t_{\max}$ 为板料的最大厚度; $t$ 为板厚的基本尺寸; $C$ 为间隙系数.

### 2.3 凸凹模圆角半径

板材在弯曲过程中,极限变形程度表示为 $r_{\min}/t$ ( $r_{\min}$ 和 $t$ 为弯曲件最小内半径和厚度),弯曲过程中,相对弯曲半径必须大于极限程度,否则

断裂。板料弯曲时,外表不发生破裂的条件是: $\varepsilon_{OR} \leq \delta_{max}$  ( $\varepsilon_{OR}$  和  $\delta_{max}$  为变形区外表面切向应变和材料允许的延伸率)。令  $\varepsilon_{OR} = \delta_{max}$ , 此时的相对弯曲半径即为最小相对弯曲半径<sup>[5]</sup>:

$$r_{min}/t = [1/\delta_{max} - 1]/2. \quad (3)$$

在不小于最小相对弯曲半径的条件下,凸模圆角半径  $r_1$  通常取  $r_1 = (0.7 \sim 1.0)R$ , 考虑到三点接触弯曲的原理应用,则取  $r_1 = (0.7 \sim 0.8)R$ . 凹模圆角半径  $r_2:r_2 = r_1 + t$ , 其中  $R$  为波纹结构波纹圆角半径(成品),  $r_1$  和  $r_2$  为模具的凸、凹模圆角半径.

### 2.4 考虑回弹的凸模侧翼弯曲角设计

由于回弹直接影响了弯曲件的形状和尺寸,因此在设计和制造模具时,必须预先考虑材料的回弹<sup>[6]</sup>. 忽略板片的伸长和压缩,根据等体积法可得回弹前后板料长度不变,只考虑变形回弹,鉴于波形的对称性,取某段波形进行独立研究,以波谷点  $G$  为位置不变点,回弹示意图见图 4. 假设波形弯曲直臂部分在回弹前后保持平直且忽略其长度回弹量,则波形的回弹量仅取决于板料与凸凹模的圆角接触部分. 圆弧部分的回弹量主要导致了卸载后波形圆角半径的增大,波形段 1 和 3 的曲线会向外张开,进而引起侧翼段 2 的形变,导致侧翼弯曲角发生变化,因此可通过求解此侧翼弯曲角的变化量来表征波形卸载后的回弹量,本文提出研究表征回弹量的物理量:回弹角  $\Delta\varphi$ , 计算公式: $\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1$ . 假设辊压过程中板坯弯曲的属性为自由弯曲,易得回弹角  $\Delta\varphi$  与凸模侧翼弯曲角  $\gamma$ , 波纹深度  $h$ , 齿顶圆角半径  $r_1$ , 板料厚度  $t$  等有关. 考虑到波形的对称性,通过试验不同规格模具及板坯同时控制压下速度及温度因素来量化研究图 5 中相邻波形 1,3 对波形 2 回弹的影响作用<sup>[7-8]</sup>, 试验装置示意图见图 5.

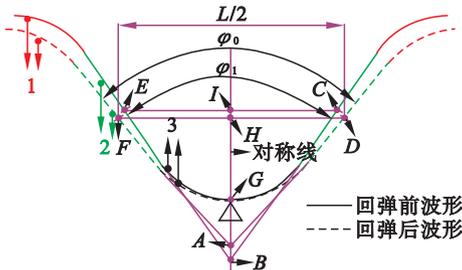


图 4 板料回弹前后形状示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plate before and after deformation resilience

根据标准 NB/T 47004—2009 (JB/T 4752) 对板片参数范围的基本规范要求,本研究针对试

验范围  $\{\gamma: 90^\circ \sim 120^\circ, h: 2.8 \sim 3.8 \text{ mm}, r_1: 1.4 \sim 2.6 \text{ mm}, t: 0.2 \sim 1.4 \text{ mm}, r_2 = r_1 + t\}$ , 采用均匀设计法制定包含  $\gamma$  等 4 因素的  $U_7(7^4)$  试验方案<sup>[9]</sup>, 具体试验方案安排如下:

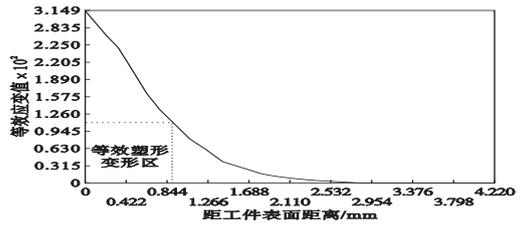


图 5 回弹试验装置示意图

Fig. 5 Sketch map of resilience test device

由于回弹角极小,传统物理试验方法统计误差较大,鉴于此,本文依托于有限元数值分析手段结合物理试验的方法来精确统计回弹角.

采用均匀设计法的试验结果没有整齐可比性,分析结果不能采用一般的方差分析方法,需采用四元线性回归模型回归分析表 1 中各方案试验统计得到的回弹角数据<sup>[10]</sup>. 设计时将凸模侧翼弯曲角  $\gamma$  做小些,从而产生较合适的过正变形有效补偿回弹量  $\gamma$  为: $\gamma = \varphi_0 - \Delta\varphi$ .

表 1 回弹试验方案  
Table 1 Resilience test scheme

变量	1	2	3	4	5	6	7
$\gamma/(\circ)$	90	95	100	105	110	115	120
$H/\text{mm}$	2.8	3.2	3.6	2.6	3	3.4	3.8
$r_1/\text{mm}$	1.8	2.4	1.6	2.2	1.4	2.0	2.6
$t/\text{mm}$	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	1.4

### 2.5 回弹对波纹深度加工精度的影响

波形具有对称性,针对半波形  $EGC(FGD)$  研究考虑,见图 4,其中  $EGC$  为回弹前形状,  $FGD$  为回弹后形状即最终成形标准,  $C, D, E, F$  为对称点,假设回弹前后波谷点  $G$  位置不变,因为  $\Delta\varphi$  相对  $\varphi_0$  很小,可假设  $A, B$  点重合,则回弹角  $\Delta\varphi$  对整波形波纹深度加工精度的影响值  $\delta(\Delta\varphi)$  的确定如下:

$$\left. \begin{aligned} L_{AD} &= L_{FD}/2\cos(\varphi_0/2) \approx L_{BC}, \\ L &= 2L_{FD}, \\ L_{IH} &= L_{GI} - L_{GH} = L_{BI} - L_{BH} \approx L_{BI} - L_{AH} = \\ &= L[\cos(\varphi_1/2) - \cos(\varphi_0/2)]/[4 \cdot \sin(\varphi_0/2)], \\ \delta(\Delta\varphi) &= 2L_{IH}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $L_{AD}$  为  $A$  点和  $D$  点间的直线距离;  $L_{FD}, L_{BC}, L_{IH}, L_{GI}, L_{GH}, L_{BI}, L_{BH}, L_{AH}$  与  $L_{AD}$  标识相同.

### 2.6 齿形参数设计模型

以成型辊上相邻两个辊齿为例,见图 6,对辊

齿参数进行解析可得各参数间的数学关系:

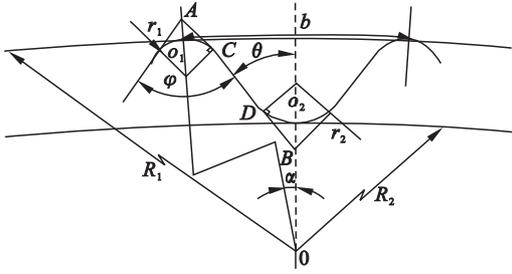


图 6 下成型辊辊齿参数

Fig. 6 Roller gear parameters of lower forming roller

$$\left. \begin{aligned} L_{AO} &= R_1 - r_1 + r_1 / \sin(\varphi/2); L_{BO} = R_2 + r_2 - r_2 / \sin\theta, \\ L_{AO} \sin(\varphi/2) &= L_{BO} \sin\theta = L_{OD}; R_1 - R_2 = h + \delta(\Delta\varphi), \\ \left[ R_1 - r_1 + \frac{r_1}{\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)} \right] \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) &= \left[ R_2 + r_2 - \frac{r_2}{\sin\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right)} \right] \sin\left(\frac{\varphi}{2} + \alpha\right), \\ 2\pi R_1 = nb = nL, \alpha &= \pi/n, \theta = \varphi/2 + \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $n$  为成型辊所有齿数;  $h + \delta(\Delta\varphi)$  为设计齿高(齿顶到齿沟的距离);  $R_1$  为齿顶相对辊中心的半径;  $R_2$  为齿沟相对辊中心的半径;  $2\alpha$  为齿形分度角;  $2\theta$  为齿形角;  $L_{AO}$  为  $A$  点和  $O$  点间的直线距离,  $L_{BO}$  和  $L_{OD}$  与  $L_{AO}$  标识相同;  $b$  为周节弧长(相邻齿顶间的弧长);  $L$  为板片波纹法向节距。

加工过程中, 假设板料与辊齿充分贴合, 则  $\varphi = \gamma = \varphi_0 - \Delta\varphi$ , 可求得

$$nL \sin(\varphi/2) / 2\pi + r_1 - r_1 \sin(\varphi/2) = (nL/2\pi - h - \delta(\Delta\varphi) + r_2) \sin((\varphi/2) + \pi/n) - r_2. \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} n &= (r_2 - h - \delta(\Delta\varphi)) \pi \cos(\varphi/2) / [r_1 - r_1 \sin(\varphi/2) + r_2 + (h + \delta(\Delta\varphi)) \sin(\varphi/2) - r_2 \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2) / 2]; \\ R_1 &= L(r_2 - h - \delta(\Delta\varphi)) \cos(\varphi/2) / [2r_1 - 2r_1 \sin(\varphi/2) + 2r_2 + 2(h + \delta(\Delta\varphi)) \sin(\varphi/2) - 2r_2 \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2)]; \\ R_2 &= L(r_2 - h - \delta(\Delta\varphi)) \cos(\varphi/2) / [2r_1 - 2r_1 \sin(\varphi/2) + 2r_2 + 2(h + \delta(\Delta\varphi)) \sin(\varphi/2) - 2r_2 \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2)] - h - \delta(\Delta\varphi); \\ \alpha &= [r_1 - r_1 \sin(\varphi/2) + r_2 + (h + \delta(\Delta\varphi)) \sin(\varphi/2) - r_2 \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2) / 2] / [(r_2 - h - \delta(\Delta\varphi)) \cos(\varphi/2)]; \\ \theta &= \varphi/2 + [r_1 - r_1 \sin(\varphi/2) + r_2 + (h + \delta(\Delta\varphi)) \sin(\varphi/2) - r_2 \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2) / 2] / [(r_2 - h - \delta(\Delta\varphi)) \cos(\varphi/2)]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

回归后:  $\Delta\varphi = -0.204 \cdot \gamma + H + 1.071 \cdot r_1 - 0.381 \cdot t + 19.005$ , 方程显著性检验:  $U = 21.71$ ,  $Q = 0.0374$ ,  $F = 1160.43$ . 其中,  $U$  为回归平方和,  $Q$  为剩余平方和,  $F$  为  $F$  检验值,  $m$  为因素数量. 取显著水平  $\alpha = 0.005$ , 查取  $F$  分布临界表可得:  $F_{0.005}(4, 2) = 199.2 < F$ , 故回归方程高度显

著. 将  $\varphi, r_1, r_2, h$  代入式(6), 可计算成型辊辊齿数  $n$  的值,  $n$  非整数时需注意修整, 为了提高辊压效率, 辊齿数  $n$  一般取值较大, 则  $\alpha = \pi/n$  较小, 即  $\sin(\pi/n) \approx (\pi/n)$ ,  $\cos(\pi/n) \approx 1$ . 对式(6)进行转换以方便数学求解:

$$nL \sin(\varphi/2) / 2\pi + r_1 - r_1 \sin(\varphi/2) \approx (nL/2\pi - h + r_2) [\sin(\varphi/2) + \pi \cos(\varphi/2) / n] - r_2. \quad (7)$$

由式(7)可快速求出  $n$  值, 代入式(5), 可求出齿形几何参数  $R_1, R_2, \alpha, \theta$ , 见式(8).

## 2.7 实例分析

选用维克斯企业某型号板片进行分析验证, 该板片波纹结构设计参数如表 2 所示.

表 2 某型号板片波纹结构参数

波纹圆角 / ( $^\circ$ )	波纹法向节距/mm	波纹深度 /mm	波纹圆角半径 /mm
120	13.16	3	2
热交换面积 / $m^2$	形状尺寸 /mm	弯曲角 / ( $^\circ$ )	板厚/mm
1.15	630 $\times$ 240	110	0.6

该板片材料为 304 不锈钢, 为 DEFORM 材料库中包含的材料, 直接选择该材料按表 1 中试验方案进行弹塑性有限元分析, 统计各组试验方案模拟的回弹结果, 见表 3.

表 3 回弹角模拟结果

变量	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta\varphi / (^\circ)$	5.0	5.1	3.5	2.2	1.0	1.1	0.6

著. 经统计回弹角拟合模型的最大拟合相对误差约为 6.7%. 根据表 2 中的设计参数, 辊压相关工艺参数的计算结果见表 4.

成型辊辊齿数  $n$  的大小直接决定了生产效率, 由于波纹节距加工精度要求不高, 依据式(8)通过调整  $L$  值来优化  $n$  值, 不同  $L$  值时相对应  $n$

值见表 5。

表 4 板片波纹结构计算及设计参数

Table 4 Calculation and design parameters of plate corrugation

$L/\text{mm}$	$\varphi_0/(\text{°})$	$z/\text{mm}$	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$
13.16	110	0.66	1.9	2.6
$h + \delta(\Delta\varphi)/\text{mm}$	$n$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$
3.6	32	67	63.4	5.625
$\delta(\Delta\varphi)/\text{mm}$	$\gamma/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$\theta/(\text{°})$	$N$
0.6	102.67	7.73	56.96	4

工作区域啮合齿数过多工作机构震动较大, 过少加工效率低下, 综合式(1), 式(8) 可得, 啮合齿数  $N$  关于法向节距呈一一对应函数关系, 见式(9), 经分析  $N$  关于  $L$  呈负相关性. 综合评比加工过程的稳定性、辊压效率及设计精度, 取  $L =$

$$N = \frac{[(r_2 - h) \cos(\varphi/2)] \cdot 4 \arccos \left\{ 1 - (h - z) \cdot \left[ \frac{(2r_1 + 2r_2)(1 - \sin(\varphi/2)) + [2hs \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2)]}{2[(r_1 + r_2)(1 - \sin(\varphi/2)) + h \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2)]/2} \right] \right\}}{2[(r_1 + r_2)(1 - \sin(\varphi/2)) + h \sin(\varphi/2) - L \cos(\varphi/2)]} \quad (9)$$

根据表 6 中的设计参数建立三维模型, 并导入 deform-3D, 板料属性选为考虑回弹作用的弹塑性, 辊压速度 0.1 m/s, 板片的加工温度为恒温 150 °C.

### 2.8 辊压结果分析

观察图 7 可知新设计的辊压工艺可以制备板片的波纹结构, 设计过程较为合理. 为验证工艺参数及模型设计的准确性, 下文对波纹板片重要参数进行精度分析.

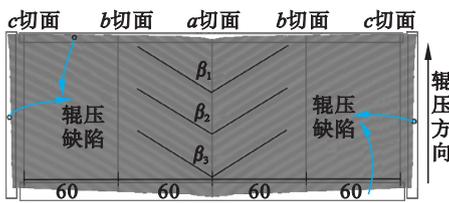


图 7 辊压成形的结果  
Fig. 7 Rolling forming result

辊压过后纵向测量不同位置波形的波纹圆角,  $\beta_1 = 121.2^\circ$ ,  $\beta_2 = 120.4^\circ$ ,  $\beta_3 = 120.8^\circ$ , 相比较设计目标  $120^\circ$  误差较小. 在板片上截取中心对称面  $a$ 、相隔对称面 60 mm 处  $b$  及相隔对称面 120 mm 处  $c$ , 见图 7, 图 8, 测量统计各切面波形参数, 见图 9.

由图 9 可得: 横向(板宽), 由中心对称面到两边部, 由于受相邻介质的约束逐渐减小, 回弹量逐渐增大, 边部尤其严重; 纵向(辊压方向), 与横向趋势相同, 由中部向头尾回弹量逐渐增大, 变化趋势与波纹夹角  $\beta$  相同; 受边界区域约束少、回弹

12.66 mm, 此时法向节距  $L$  的最大相对误差约为 3.8%, 经计算  $N$  为 6, 优化合理, 优化后的工艺参数见表 6.

表 5 板片波纹结构  $L$  值与相对应  $n$  值

Table 5  $L$  and the corresponding  $n$  of plate corrugation

$L/\text{mm}$	12.26	12.287	12.4	12.5	12.66
$n$	200	180	100	90	60

表 6  $L = 12.66 \text{ mm}$  时的设计参数  
Table 6 Design parameters for  $L = 12.66 \text{ mm}$

$L/\text{mm}$	$\varphi_0/(\text{°})$	$z/\text{mm}$	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$
12.66	110	0.66	1.9	2.6
$h + \delta(\Delta\varphi)/\text{mm}$	$n$	$R_1/\text{mm}$	$R_2/\text{mm}$	$\alpha/(\text{°})$
3.6	60	120.9	117.3	3
$\delta(\Delta\varphi)/\text{mm}$	$\gamma/(\text{°})$	$\Delta\varphi/(\text{°})$	$\theta/(\text{°})$	$N$
0.6	102.67	7.73	54.335	6

程度大等因素影响, 板形出现如图 7 所示的几处辊压缺陷. 经统计板片重要参数, 辊压精度较高, 整体满足加工要求, 见表 7.

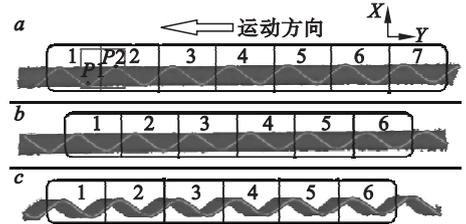


图 8 波纹板  $a, b, c$  切面示意图  
Fig. 8 Schematic diagram at  $a, b, c$  section of the corrugated part

波纹深度  $h$  是影响换热效率的重要设计参数, NB/T 47004—2009 (JB/T 4752) 要求加工精度为  $\pm 0.2 \text{ mm}$ , 由式(4) 计算可得, 回弹量导致波纹深度减小 0.6 mm, 因此回弹的量化作用不可忽略, 观察图 9 可得  $P1, P2$  点  $x$  坐标差值即波纹深度  $h$ , 统计两参照点  $x$  坐标值的时间历程曲线, 见图 10.

由图 10 可知,  $0 \sim 0.0223 \text{ s}$ , 两点差值变化不大, 表明参照部位未进入变形区, 受之前加工过程影响参照部位虽未进入变形区, 但两点  $x$  向坐标值已经有所扰动; 随着变形的继续,  $0.0223 \text{ s}$  时刻参照部位进入变形区域, 表现为两点  $x$  距离差的增大, 参照点变形的先后顺序:  $P1 - (P1, P2) - P3$ , 相对应差值增大趋势为: 平缓—急剧—平缓.  $0.08028 \text{ s}$  后, 参照部位均离开辊齿的直接接触,

由于波形的回弹作用、相邻波纹成形时的影响以及加工过程中板片翘曲影响,坐标值出现微弱波动。观察图 10 中波纹深度变化曲线可得,起始处波纹深度  $h$  受回弹作用波动较大,随着加工部位的远离,回弹基本结束;但由于板料的连续性,波纹深度仍有较小震荡,并逐渐趋于平稳,经验证换热板片考虑回弹因素所设计的辊压工艺具有很高的加工精度,整体满足 NB/T 47004—2009 (JB/T 4752) 精度要求,平均残差值为 0.002 334 mm。

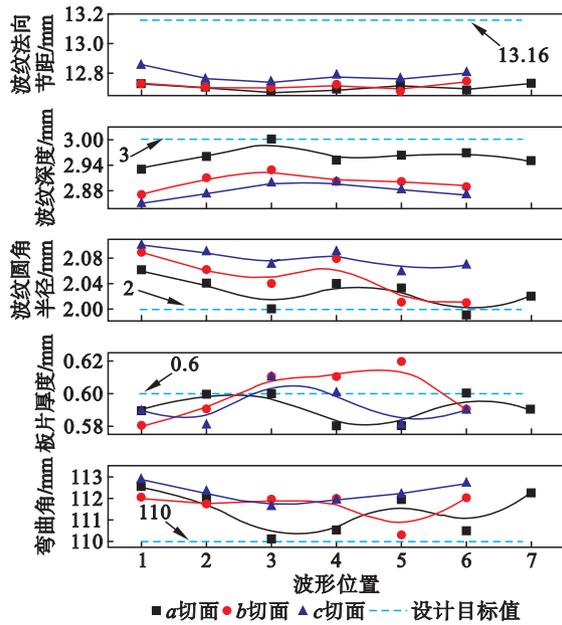


图 9 各切面参数

Fig. 9 Parameters of each section

表 7 各参数加工精度

Table 7 Machining accuracy of each parameter

精度	$L/mm$	$h/mm$	$R/mm$	$t/mm$	$\varphi_0/(^\circ)$
平均残差	-0.428 9	-0.084 8	0.050 0	-0.005 8	1.747 4
相对误差	-3.26%	-2.83%	2.5%	-1.0%	1.6%

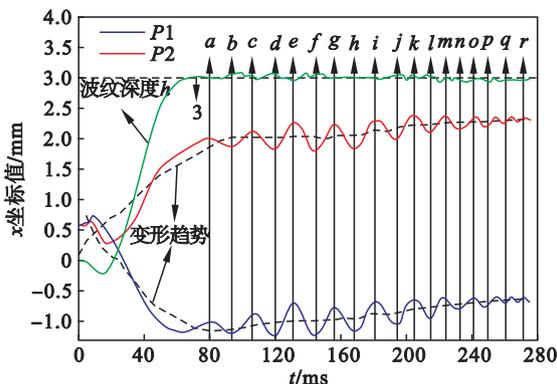


图 10  $P_1, P_2$  的  $x$  坐标时间历程曲线

Fig. 10 Time history curves of  $x$  coordinate distance of  $P_1, P_2$

### 3 结 论

1) 单道次辊压工艺可实现板片波纹结构的高效率、低投入制备,其连续性作业显著提高了板片的制备效率。

2) 辊压过程中,变形回弹主要通过作用波纹深度及侧翼弯曲角来影响波纹结构的成形精度,其中辊齿参数的确定需要综合考虑回弹量以及形变量、耦合辊压工艺参数进行设计建模。

#### 参考文献:

[ 1 ] Sarraf K, Launay S, Tadrist L. Complex 3D-flow analysis and corrugation angle effect in plate heat exchangers [ J ]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 94: 126 - 138.

[ 2 ] El Budamusi M, Weinrich A, Becker C, et al. Forming limit extension of high-strength steels in bending processes [ J ]. *Key Engineering Materials*, 2014, 611: 1110 - 1115.

[ 3 ] 国家能源局. 板式热交换器: NB/T47004—2009 (JB/T 4752) [ S ]. 北京: 新华出版社, 2010. (National Energy Board. Plate heat exchanger; NB/T47004—2009 (JB/T 4752) [ S ]. Beijing: Xinhua Press, 2010.)

[ 4 ] 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 46 - 70. (Xiao Jing-rong, Jiang Kui-hua. Stamping process [ M ]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 46 - 70.)

[ 5 ] 官英平, 李洪波, 王凤琴. 板材弯曲最小相对弯曲半径计算方法探讨 [ J ]. *金属成形工艺*, 2003 (5): 52 - 53. (Guan Ying-ping, Li Hong-bo, Wang Feng-qin. Discussion about calculation methods of the minimum relative bending radius for plate bending [ J ]. *Metal Forming Technology*, 2003 (5): 52 - 53.)

[ 6 ] 戚鹏. 板料成形过程的回弹控制与工艺参数优化研究 [ D ]. 济南: 山东大学, 2006. (Qi Peng. Study on springback control and process optimization during sheet metal forming [ D ]. Jinan: Shandong University, 2006.)

[ 7 ] Teimouri R, Baseri H, Rahmani B, et al. Modeling and optimization of spring-back in bending process using multiple regression analysis and neural computation [ J ]. *International Journal of Material Forming*, 2014, 7 (2): 167 - 178.

[ 8 ] Leu D K. Position deviation and springback in V-die bending process with asymmetric dies [ J ]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79 (5/6/7/8): 1 - 14.

[ 9 ] Fang K T, Lin D K J, Winker P, et al. Uniform design: theory and application [ J ]. *Technometrics*, 2000, 42 (3): 237 - 248.

[ 10 ] Fang K T. Theory, method and applications of the uniform design [ J ]. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 2002, 9 (4): 305 - 315.