

# 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管波形冲压成形尺寸对截面变形的作用规律

程传峰<sup>1</sup>, 金明<sup>2</sup>, 王项如<sup>1</sup>, 朱英霞<sup>3</sup>, 程一峰<sup>3</sup>, 盘朝奉<sup>4</sup>, 王园<sup>3</sup>

(1. 安徽新富新能源科技股份有限公司, 安徽 安庆 246001)

(2. 安徽环新集团股份有限公司, 安徽 安庆 246001)

(3. 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

(4. 江苏大学汽车工程研究院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 薄壁微小通道波形扁管是建设新能源汽车锂电池组恒温系统的绝佳材料, 成形尺寸是影响其冲压成形截面变形的关键因素。建立了实验验证的 3003Al-H14 微小通道薄壁扁管的波形冲压-回弹有限元模型。基于所建模型, 研究了截面高度、管坯壁厚、内外面相对弯曲半径缩放系数等成形尺寸, 对截面变形率和平均截面变形率的作用规律。研究发现: ① 横截面上边缘孔的截面变形率通常较大, 其余孔的截面变形率相对较小且大小一致; 纵截面上孔的截面变形率呈现波峰波谷高、中间段低的分布特点。② 扁管的截面变形率随着截面高度增大而增大, 当截面高度超过 4 mm 时, 扁管内的筋显著弯折, 横截面塌陷严重。③ 扁管的平均截面变形率随着壁厚增大呈指数函数下降; 当壁厚等于 0.1 mm 时, 所有截面都畸变严重, 而当壁厚超过 0.3 mm 时, 最大截面畸变率下降至 24.71%。④ 内外面相对弯曲半径的缩放系数越大, 则内外面的实际弯曲程度越小, 平均截面变形率也越小。研究成果对薄壁微小通道波形扁管的精确成形具有科学意义和工程价值。

**关键词:** 微小通道管; 冲压; 薄壁件; 成形尺寸; 截面变形

**中图分类号:** TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)03-0265-08

**引用格式:** 程传峰, 金明, 王项如, 等. 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管波形冲压成形尺寸对截面变形的作用规律[J]. 中国材料进展, 2024, 43(3): 265-272.

CHENG C F, JIN M, WANG X R, *et al.* Effect of Forming Size on Sectional Deformation of Wave Stamping of 3003Al-H14 Micro Channel Flat Tube[J]. Materials China, 2024, 43(3): 265-272.

## Effect of Forming Size on Sectional Deformation of Wave Stamping of 3003Al-H14 Micro Channel Flat Tube

CHENG Chuanfeng<sup>1</sup>, JIN Ming<sup>2</sup>, WANG Xiangru<sup>1</sup>, ZHU Yingxia<sup>3</sup>,  
CHENG Yifeng<sup>3</sup>, PAN Chaofeng<sup>4</sup>, WANG Yuan<sup>3</sup>

(1. ANHUI XMAX New Energy Technology Co., Ltd., Anqing 246001, China)

(2. ANHUI ARN GROUP Co., Ltd., Anqing 246001, China)

(3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(4. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The thin-walled flat tube with microchannels is an essential component for the construction of the constant temperature system in lithium-ion battery packs for new energy vehicles. The dimensions used in forming this component are critical factors that influence the deformation of the stamped section. An experimentally verified finite element model has

been developed for the waveform stamping-springback of 3003Al-H14 thin-walled flat tubes with microchannels. This model was used to investigate the impact of forming dimensions such as section height, tube blank wall thickness, and relative bending radius scaling factors of the inner and outer surfaces on the section deformation ratio and average section deformation ratio. The research findings are as follows: ① The section deformation ratio of the holes at the upper edge of the cross-section is generally larger, while the deformation ratio of the remaining holes is relatively small and con-

收稿日期: 2021-11-05 修回日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51601070, 51875263); 江苏省自然科学基金项目(BK20181447)

第一作者: 程传峰, 男, 1974 年生, 高级工程师

通讯作者: 朱英霞, 女, 1986 年生, 副教授, 硕士生导师,

Email: xia166109@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202111005

sistent in size. The section deformation ratio of the holes on the longitudinal section exhibits a distribution pattern with high peaks and valleys and low values in the middle section. ② The section deformation ratio of the flat tube increases with the increase in section height. When the section height exceeds 4 mm, the ribs inside the flat tube significantly bend, leading to severe collapse of the cross-section. ③ The average section deformation ratio of the flat tube decreases exponentially with increasing wall thickness. When the wall thickness equals 0.1 mm, all sections exhibit severe distortion, while when the wall thickness exceeds 0.3 mm, the maximum section distortion ratio decreases to 24.71%. ④ A larger scaling factor of the relative bending radius of the inner and outer surfaces results in a smaller actual bending degree of these surfaces and a smaller average section deformation ratio. This study has scientific significance and engineering value for the precise forming of thin-walled microchannel waveform flat tubes.

**Key words:** micro-channel tube; stamping; thin-walled parts; forming dimensions; cross-sectional deformation

## 1 前言

目前,在航空航天、汽车、通讯、军工等领域,大量设备正向着微型化、高功率和结构高密度的方向发展<sup>[1]</sup>,因此工作时的热流密度远大于常规尺度的设备,如果散热不够理想,其工作性能和寿命会受到严重影响<sup>[2]</sup>。因此,传热性能优异且同时具备节能、降本、环保优势的薄壁多孔微小通道扁管被越来越多的研究者和制造厂商应用于微型化、高功率和结构高密度集成化设备的散热系统中。

薄壁多孔微小通道扁管是一种采用精炼铝棒,通过热挤压-熔焊工艺和表面镀锌防腐处理制造成形的薄壁多孔扁形管<sup>[3]</sup>。由于薄壁微小通道扁管具有十分突出的环保、增效、节能、降本 4 大优势,因此早在 1996 年就在汽车空调系统中获得应用。与传统的管翅式换热器相比,薄壁多孔微小通道扁管换热器的传热效率可以提高 14%~33%。在获得相同制冷效果的前提下,所需制冷剂的量可减少 35%<sup>[4]</sup>。

薄壁多孔微小通道扁管的结构精细复杂,加工制造难度较高,常用的材料主要有 1050、1060、1100、1A97、3003、3F03、3102 和 3103 铝合金<sup>[5,6]</sup>。

多孔微小通道的导热性能与流道的尺寸和横截面形状密切相关<sup>[7]</sup>,因此很多学者针对多孔微小通道扁管的空间结构展开了研究。夏国栋团队<sup>[8]</sup>和谢忱创<sup>[9]</sup>均研究发现,波形结构的薄壁多孔微小通道扁管能大大提高新能源汽车电池组的散热能效。最新的研究成果也表明,较之平行微小通道,波形微小通道能使流通的冷却液再循环和回流,进而强化扁管的能效传递,且相同工况下,波形微小通道扁管的温度分布更均匀<sup>[10-12]</sup>。

现有研究说明,多孔微小通道波形扁管将是解决新能源汽车锂电池组和机车电控元件这类发热密集、温度敏感型零部件恒温问题的绝佳材料<sup>[10,11]</sup>。然而由于缺乏薄壁多孔微小通道扁管的波形成形工艺与技术,上述研究成果依旧停留在理论研究阶段,迫切需要对薄壁多孔微小通道扁管的波形成形工艺展开研究。

李大永团队研究了多孔微小圆通道扁管<sup>[13]</sup>、多层平

行流微小通道换热器<sup>[4]</sup>和折叠式薄壁多孔扁管<sup>[14]</sup>的绕弯成形能力。绕弯成形与本文研究的波形冲压同属管类的二次塑性成形工艺。李大永团队的研究结果表明:①薄壁多孔微小通道扁管的弯曲半径和截面尺寸对绕弯成形结束后微小通道的截面变形有重要影响;②截面变形是薄壁多孔微小通道扁管最为显著的弯曲成形缺陷,也是对其导热性能影响最严重的缺陷,且与常规管材不同的是,其通道的纵截面变形比横截面变形更显著。上述研究结果与工艺方法对本研究具有较好的借鉴意义,但是其研究对象接近板材,获得的数据与经验规律不能直接用于管材。

本文以适用于高密度集成化设备散热系统的 3003Al-H14 薄壁多孔微小通道扁管为研究对象,对其波形冲压工艺过程中成形尺寸对截面变形的影响规律展开了研究。本研究对波形微小通道的精确塑性成形发展具有很好的科研价值和技术指导意义。

## 2 建立 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的波形冲压成形有限元模型

### 2.1 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的成形尺寸与材料参数

3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的横截面存在“筋”与孔,孔的个数  $m$  通常很多。横截面宽度  $l$  远大于高度  $h$ ,因此呈现扁状。管材壁厚  $t$  极薄,通常情况下  $t \leq 0.8$  mm。如图 1 所示,薄壁微小通道扁管的成形尺寸参

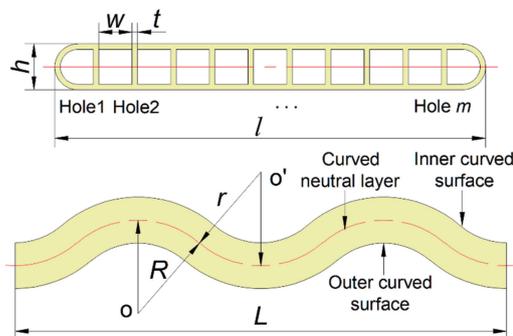


图 1 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的成形尺寸示意图

Fig. 1 The geometric dimensions of the 3003Al-H14 thin-walled micro-channel flat tube

数还包括: 横截面孔的内径宽度  $w$ , 纵截面总长  $L$ , 内弯曲面波形半径  $r$  (至弯曲中性层), 与外弯曲面波形半径  $R$  (至弯曲中性层), 参数值如表 1 所示。

表 1 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的成形尺寸参数值

Table 1 The geometric dimensions values of the 3003Al-H14 thin-walled micro-channel flat tube

Forming size	Value
Cross section width $l$ /mm	59.1
Cross section height $h$ /mm	2.5
Wall thickness of tube blank $t$ /mm	0.3
Inner width of single hole $w$ /mm	1.8
Number of holes $m$	28
Total length of longitudinal section $L$ /mm	100
Wave radius of inner curved surface $r$ /mm	6
Wave radius of outer curved surface $R$ /mm	10

### 2.2 3003Al-H14 微小通道薄壁扁管的材料本构模型

为了获得材料的应力-应变曲线, 将 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管沿横截面宽度方向切割为完全相同的 3 部分, 分别作为拉伸试样进行了拉伸实验。实验按照国标 GB/T 228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法》进行, 拉伸速度设置为 1 mm/min。拉伸后的试样断裂状态如图 2 所示。

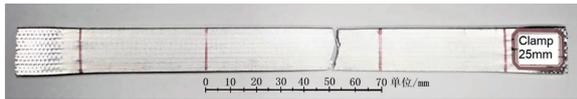


图 2 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管拉伸断裂试样照片

Fig. 2 Fracture state of the tensile specimen of the 3003Al-H14 thin-walled micro-channel flat tube

拉伸实验获得的真应力-应变曲线如图 3 所示, 材料力学性能参数如表 2 所示。

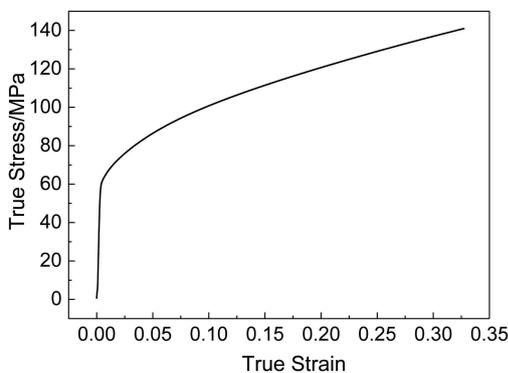


图 3 3003Al-H14 微小通道扁管拉伸真应力-应变曲线

Fig. 3 The true stress-strain curve of the tensile test of the 3003Al-H14 micro-channel flat tube

表 2 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的材料力学性能参数

Table 2 Material mechanical performance parameters of 3003Al-H14 thin-walled micro-channel flat tube

Material parameters	Value
Material	3003Al-H14
Poisson's ratio	0.28
Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2730
Elastic modulus/GPa	12.54
Initial yield strength/MPa	34.36
Tensile strength/MPa	141.03
Elongation/%	38.74
Material parameters $A$ /MPa	49.930
Material parameters $K$ /MPa	152.826
Material parameters $n$	0.472

采用各向同性硬化模型描述 3003Al-H14 材料的应力应变关系。其屈服条件  $f$  如公式(1)所示:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s - (A + K \varepsilon_p^n) = 0 \quad (1)$$

其中,  $s$  为偏应力,  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变, 硬化参数  $A$ 、 $K$  和  $n$  的取值来自图 3 中应力应变曲线拟合, 结果如表 2 所示。

### 2.3 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的波形冲压-回弹有限元模型

所有的截面变形数据都取自回弹发生之后, 所以建立了 3003Al-H14 微小通道薄壁扁管的波形冲压-回弹有限元模型。该模型包括冲压成形和回弹 2 步, 分别采用动态显示算法和静态隐式算法, 如图 4 所示。冲压过程的结构包括上模、下模和扁管这 3 部分, 如图 4a 所示。扁管与上模接触的成形面为内弯曲面, 与下模接触的成形面为外弯曲面。扁管与上、下模之间的摩擦条件, 均为机械油润滑。扁管的网格采用 S4R 壳单元。

采用 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的波形冲压实验验证所建有限元模型的可靠性。模拟边界条件设置和实验条件对比如表 3 所示。

图 5 对比了模拟和实验获得的薄壁微小通道扁管波形冲压件。由图 5a 和 5b 可知, 所建立的有限元模型可以准确模拟管坯横、纵截面的起皱状态、截面变形状态。图 5c 对比了某一特定纵截面上的截面变形率预测情况与实验数据, 发现有限元模拟的平均预测误差为 16.82%, 最大预测误差为 24.32%, 均在合理误差范围内。综上, 认为所建 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的波形冲压-回弹有限元模型能够较为可靠地预测扁管冲压过程中的截面变形。

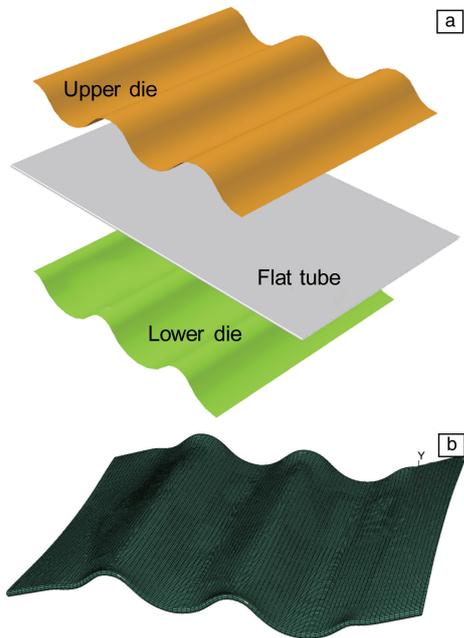


图 4 薄壁微小通道扁管波形冲压-回弹有限元模型: (a) 冲压过程, (b) 回弹过程

Fig. 4 The finite element model of corrugated stamping-springback processes of thin-walled micro-channel flat tube: (a) stamping process, (b) springback process

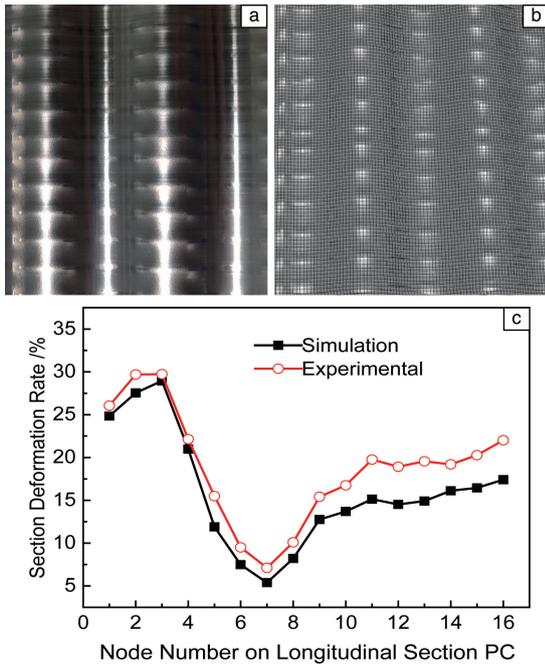


图 5 薄壁微小通道扁管波形冲压的实验和模拟结果对比: (a) 实验截面变形状态, (b) 模拟截面变形状态, (c) 代表纵截面 PC 上截面变形率的模拟预测值和实验值对比

Fig. 5 Comparisons of experimental and simulative results of corrugated stamping of thin-walled micro-channel flat tubes: (a) experimental wrinkle state, (b) simulative wrinkle state, (c) comparison of the simulative and experimental values of the cross-section deformation rate on the representative longitudinal section PC

表 3 模拟条件设置和实验条件对比

Table 3 Comparisons of simulative and experimental conditions

Boundary conditions	Simulation	Experiment
Coefficient of friction between upper die and tube blank	0.09	Mechanical oil lubrication
Coefficient of friction between lower die and tube blank	0.09	Mechanical oil lubrication
Stamping speed/(mm/s)	9.5~30.5	Fast
Stamping time/s	1	1

### 3 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管波形冲压的截面变形描述及模拟研究条件

本研究中截面变形量(率)的取值来自两横、两纵四条代表截面,其位置和截面上的节点编号如图 6 所示。可以看到代表横截面 PP<sub>1</sub> 是波峰横截面,CC<sub>1</sub> 是波谷横截面;代表纵截面 PC 是位于边缘孔对称线上的纵截面,P<sub>1</sub>C<sub>1</sub> 是位于中央孔对称线上的纵截面。由于肋板的截面变形量非常小,因此横、纵截面上代表节点 *i* 的选取皆对应于各孔的对称线,如图 6 所示。

截面变形率  $\delta h$  和平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  的计算公式为:

$$\delta h = \frac{\Delta h}{h} \times 100\% = \frac{h-h_1}{h} \times 100\% \quad (2)$$

$$\bar{\delta h} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\delta h)_i \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

其中,  $\Delta h$  为截面变形量,  $h_1$  为微小通道薄壁波形扁管冲压成形后的截面高度, *i* 为代表截面上的节点编号。

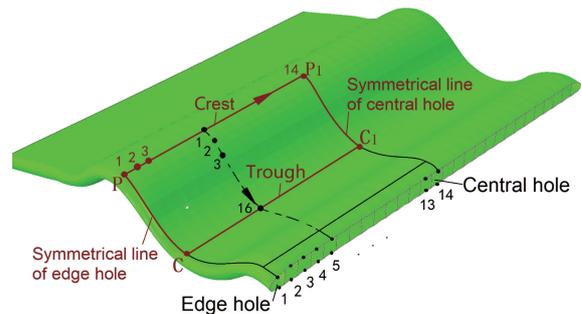


图 6 代表横截面 PP<sub>1</sub>、CC<sub>1</sub> 和代表纵截面 PC、P<sub>1</sub>C<sub>1</sub> 的截面位置,及其截面上的节点编号顺序

Fig. 6 The representative cross sections PP<sub>1</sub>, CC<sub>1</sub> and the representative longitudinal sections PC, P<sub>1</sub>C<sub>1</sub>, and the node number sequence on the sections

为了揭示 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管波形冲压的成形尺寸-截面变形作用规律,结合实际生产中所需扁管的成形尺寸,设置模拟研究范围如表 4 所示。表 4 中的基础值是 1.3 节中的实验设置值,也是模拟研究的基础

数据。成形尺寸包括截面高度  $h$ 、管坯壁厚  $t$ 、内弯曲面波形半径  $r$ ，以及内、外面相对弯曲半径  $r/R$  的同步缩放系数  $\beta$ 。其中  $\beta$  的含义如式(4)：

$$\frac{r}{R} = \frac{10 \cdot \beta}{6 \cdot \beta} \quad (4)$$

表4 模拟研究成形尺寸值

Table 4 The geometric dimensions values of the 3003Al-H14 micro-channel thin-walled flat tube

Forming sizes	Base value	Value setting
$h/\text{mm}$	2.5	1, 2.5, 4, 7, 10
$t/\text{mm}$	0.3	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9
$R=6, r/\text{mm}$	10	3, 6, 10, 12, 24
$r/R=10 \text{ mm}/6 \text{ mm}, \beta$	1	0.5, 1, 2, 4

## 4 结果与讨论

### 4.1 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管波形冲压的截面变形分布特征

图7给出了使用表4基础模拟研究数据的情况下，薄壁微小通道扁管的截面变形率分布情况。从图7可以看出：①代表横截面  $PP_1$ (波峰)和  $CC_1$ (波谷)的截面变形率  $\delta h$  分布趋势完全一致，边缘孔的变形最为严重，其它孔的变形率相对较小且基本一致。②代表纵截面  $PC$ (边缘孔纵截面)和  $P_1C_1$ (中央孔纵截面)的截面变形率  $\delta h$  分布趋势完全一致，呈现两端点高、中央段低的波动分布趋势。以上说明，薄壁微小通道扁管的截面变形情况复杂，横、纵截面变形分布规律差异较大。由于横截面  $PP_1$  的平均截面变形率要高于  $CC_1$ ，纵截面  $PC$  的平均截面变形率要高于  $P_1C_1$ ，因此将  $PP_1$  和  $PC$  截面作为后续研究对象。

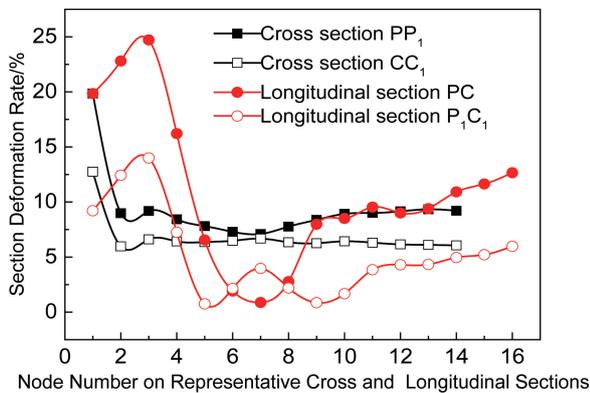


图7 代表横截面  $PP_1$ 、 $CC_1$  和代表纵截面  $PC$ 、 $P_1C_1$  的截面变形率

Fig. 7 Distributions of the section deformation rate of the representative cross sections  $PP_1$ ,  $CC_1$  and the representative longitudinal sections  $PC$ ,  $P_1C_1$

### 4.2 截面高度对截面变形率的作用规律

图8a给出了不同截面高度  $h$  下的波峰横截面变形情况。可以看出当横截面的宽度不变时， $h$  值越大，横截面的中空度越高，截面刚度越差，因而变形程度越大。当  $h$  达到 2.5 mm 时，由于筋的折弯并不显著，整体横截面尚能保持一定的形状精度，但边缘孔率先出现了较为显著的截面塌陷，这是由于边缘孔的材料流动较之其它孔要自由。而当  $h=4$  mm 时，筋发生显著的弯折，导致整体横截面塌陷严重。当  $h=7$  mm 时，孔的截面刚度进一步变差，筋的弯折加剧，整体的横截面塌陷也愈加严重，如图8a和8b所示。

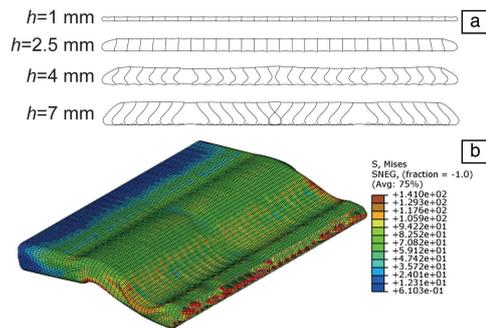


图8 不同截面高度  $h$  下扁管截面变形情况：(a) 不同  $h$  下的波峰横截面对比图，(b)  $h=7$  mm 时的扁管截面变形图

Fig. 8 Sectional deformation of flat tubewith different section heights ( $h$ ): (a) comparison of cross-sections of wave crests with different  $h$ , (b) cross-section deformation of flat tube with  $h = 7$  mm

图9分析了  $PP_1$  和  $PC$  截面上，截面变形率  $\delta h$  的分布特征，以及平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  随  $h$  的变化趋势。结合图8a和图9a可知，除了边缘孔外，波峰横截面上所有孔的截面变形较为均匀一致。 $h \geq 4$  mm 时，孔的变形程度显著增大，且四分之一横截面处的孔呈现最大的塌陷。由图9b可知，扁管纵截面上的  $\delta h$  呈波峰和波谷两端点高、中间低的分布趋势。由图9c可知，对于波峰横截面，平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  随  $h$  先减小后增大，最佳  $h=2.5$  mm，此时  $\bar{\delta h}=9.31\%$ ；而对于边缘孔纵截面， $\bar{\delta h}$  随  $h$  增大而增大，当  $h \geq 4$  mm 时，这种增大趋势变得缓慢，最佳  $h=1$  mm，此时  $\bar{\delta h}=3.33\%$ 。

综上，在波峰截面上， $\bar{\delta h}$  随  $h$  先降低后增大，最佳  $h=2.5$  mm。在边缘孔纵截面上， $\bar{\delta h}$  随  $h$  增大而增大，最佳截面高度  $h=1$  mm。 $h \geq 4$  mm 时，扁管内的筋显著弯折，且横截面塌陷严重。

### 4.3 壁厚尺寸对截面变形率的作用规律

图10分析了不同管壁厚度  $t$  下， $PP_1$  和  $PC$  截面上截

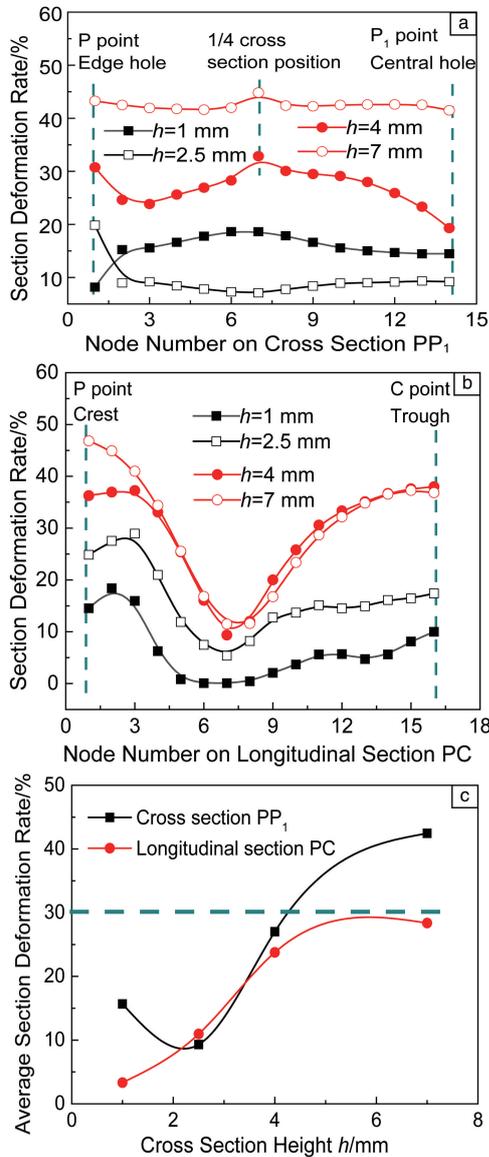


图 9 不同截面高度 ( $h$ ) 下的扁管截面变形率 ( $\delta h$ ) 分布和平均截面变形率 ( $\overline{\delta h}$ ) 变化趋势: (a)  $PP_1$  截面的  $\delta h$  分布, (b) PC 截面的  $\delta h$  分布, (c)  $PP_1$  和 PC 截面的  $\overline{\delta h}$  随  $h$  的变化趋势

Fig. 9 The section deformation rate ( $\delta h$ ) distributions and average section deformation rate ( $\overline{\delta h}$ ) variation trends of flat tubes with different heights ( $h$ ): (a)  $\delta h$  distribution of  $PP_1$  section, (b)  $\delta h$  distribution of PC section, (c)  $\overline{\delta h}$  variation trends of  $PP_1$  and PC sections with  $h$

面变形率  $\delta h$  的分布特征, 以及平均截面变形率  $\overline{\delta h}$  随  $t$  的变化趋势。由图 10a 和 10b 可知,  $PP_1$  和 PC 截面上的  $\delta h$  分布特征同图 9a 和 9b 中的基本一致, 即波峰横截面上孔的变形较为均匀, 而边缘孔纵截面的截面变形率呈现波峰和波谷端较高、中间段较低分布特征。

由图 10c 可知, 随着  $t$  的增大,  $\overline{\delta h}$  呈指数函数下降趋势。由于扁管的  $h$  保持不变, 即  $h=2.5$  mm, 因此  $t$  越大, 横截面特征越趋向板材, 进而导致平均截面变形程度越低。

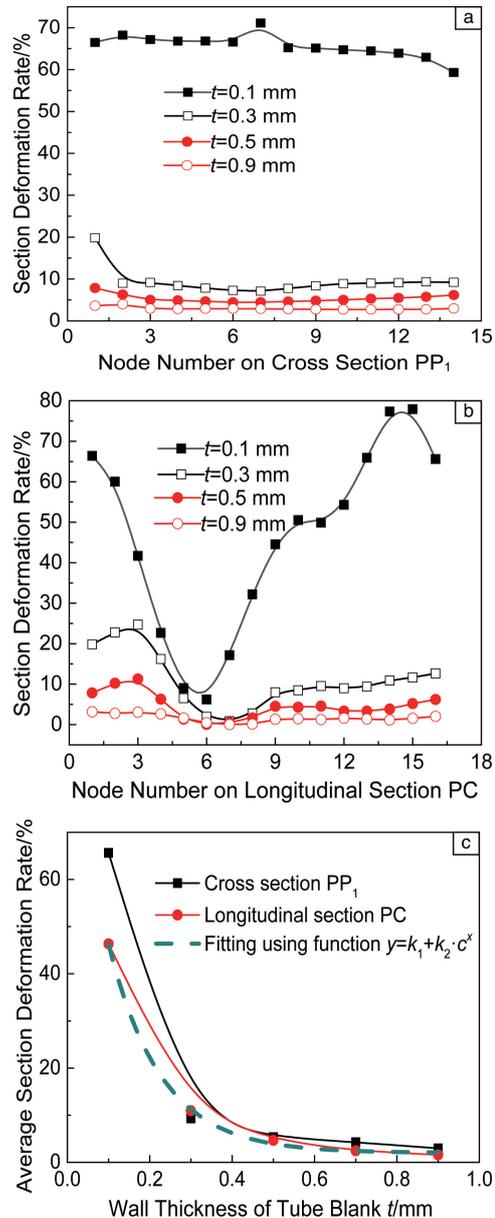


图 10 不同管壁厚度 ( $t$ ) 下的扁管截面变形率 ( $\delta h$ ) 分布和平均截面变形率 ( $\overline{\delta h}$ ) 变化趋势: (a)  $PP_1$  截面的  $\delta h$  分布, (b) PC 截面的  $\delta h$  分布, (c)  $PP_1$  和 PC 截面的  $\overline{\delta h}$  随  $t$  的变化趋势

Fig. 10 The section deformation rate ( $\delta h$ ) distributions and average section deformation rate ( $\overline{\delta h}$ ) variation trends of flat tubes with different wall thicknesses ( $t$ ): (a)  $\delta h$  distribution of  $PP_1$  section, (b)  $\delta h$  distribution of PC section, (c)  $\overline{\delta h}$  variation trends of  $PP_1$  and PC sections with  $t$

$t=0.1\text{ mm}$  时, 管材壁厚极薄, 截面刚度不足以支撑波形冲压成形, 因此所有截面都会产生严重的变形, 最大截面变形率甚至能达到 78%。而当  $t$  增大至  $0.3\text{ mm}$  时, 薄壁微小通道扁管的最大截面变形率降至 24.71%。当  $t=0.9\text{ mm}$  时,  $PP_1$  横截面上的最大截面变形率只有 3.99%, 平均截面变形率  $\bar{\delta h}=2.98\%$ ; PC 纵截面上的最大截面变形率只有 3.17%, 平均截面变形率  $\bar{\delta h}=3.17\%$ 。

综上, 随着  $t$  的增大, 扁管的截面特征趋向板材,  $\bar{\delta h}$  呈指数函数下降趋势。 $t=0.1\text{ mm}$  时, 截面刚度过低, 所有截面都会产生严重的畸变, 最大截面变形率甚至能达到 78%。而当  $t \geq 0.3\text{ mm}$  时, 薄壁微小通道扁管的最大截面变形率降至 24.71%, 且随着  $t$  的增大,  $\bar{\delta h}$  下降趋势变缓, 并最终趋向稳定临界值。

#### 4.4 内外面相对弯曲半径对截面变形率的作用规律

图 11 给出了外弯曲面波形半径  $R=6\text{ mm}$  的情况下, 内弯曲面波形半径  $r$  对平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  的作用规律。可以看到, 波峰横截面  $PP_1$  和边缘孔纵截面 PC 这两条曲线的变化趋势完全不同。边缘孔纵截面 PC 的  $\bar{\delta h}$  随  $r$  增大呈指数下降趋势, 最佳成形尺寸  $r=24\text{ mm}$ , 此时  $\bar{\delta h}=4.82\%$ 。这是因为  $r$  越大, 内弯曲面的相对弯曲程度越小, 因而纵截面的变形程度也越小。但  $r$  越大, 又意味着冲压深度越大, 必然导致横截面的变形程度增大。因此, 在冲压深度和内弯曲面相对弯曲程度的双重影响下, 波谷横截面  $PP_1$  的  $\bar{\delta h}$  随  $r$  的变化呈现先下降后增大的复杂趋势。但整体波动幅度较小, 可以采用直线拟合其变化趋势, 最佳成形尺寸  $r=12\text{ mm}$ , 此时  $\bar{\delta h}=9.17\%$ 。

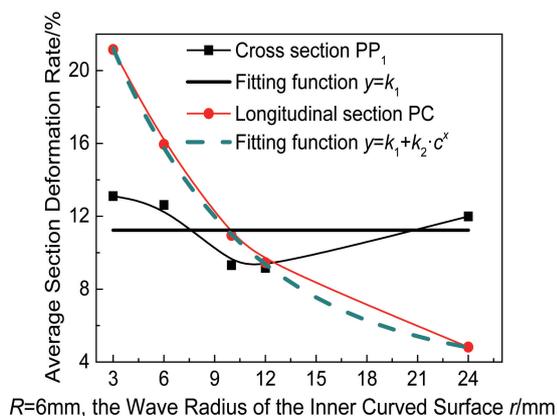


图 11 不同内弯曲面波形半径  $r$  下的平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  变化趋势  
Fig. 11 Variation trends of average section deformation rate  $\bar{\delta h}$  with wave radius  $r$  of inner curved surface

图 12a 给出了  $r/R=10\text{ mm}/6\text{ mm}$  时, 同步缩放系数  $\beta$  对平均截面变形率  $\bar{\delta h}$  的作用规律。可以看到波峰横截面  $PP_1$  和边缘孔纵截面 PC 这两条曲线的变化趋势基本相同, 即  $\bar{\delta h}$  随  $\beta$  呈指数函数下降趋势。图 12b 对比了不同  $\beta$  下的波峰横截面变形程度, 可以看到随着  $\beta$  的增大, 截面变形程度显著变小。 $\beta$  越大, 内、外弯曲面相对弯曲程度越低, 因而横、纵截面的变形程度越低。最佳缩放系数  $\beta=4$ , 此时成形尺寸  $r/R=40\text{ mm}/24\text{ mm}$ , 波峰横截面  $\bar{\delta h}=2.04\%$ , 边缘孔纵截面  $\bar{\delta h}=1.75\%$ 。

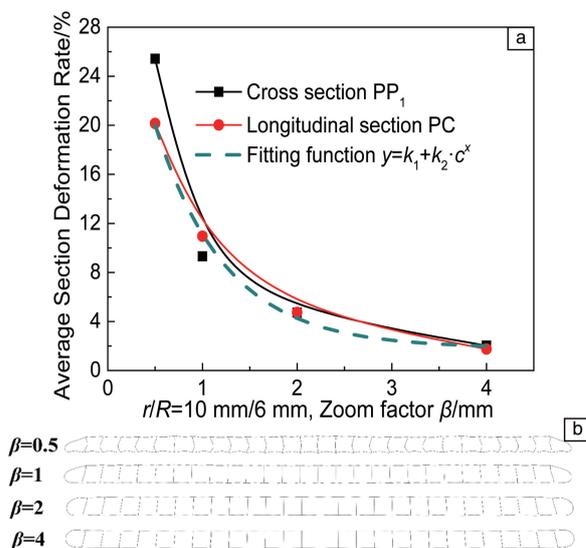


图 12  $r/R=10/6$  时, 平均截面变形率 ( $\bar{\delta h}$ ) 随同步缩放系数 ( $\beta$ ) 的变化趋势: (a)  $PP_1$  和 PC 截面的  $\bar{\delta h}$  随  $\beta$  的变化趋势, (b) 不同  $\beta$  下的波峰横截面对比

Fig. 12 Variation trends of average section deformation rate ( $\bar{\delta h}$ ) with synchronous zoom factor ( $\beta$ ), when  $r/R=10/6$ : (a)  $\bar{\delta h}$  variation trends of  $PP_1$  and PC sections with  $\beta$ , (b) comparison of cross-sections of wave crests with different  $\beta$

综上, 内外面相对弯曲半径  $r/R$  对截面变形率  $\delta h$  的作用规律与内、外弯曲面的弯曲程度存在关联一致性, 弯曲程度越小,  $\bar{\delta h}$  越小。但是当  $R$  保持不变、 $r$  发生变化的时候, 波峰横截面的变形程度还要考虑冲压深度的影响。

## 5 结论

建立了 3003Al-H14 薄壁微小通道扁管的波形冲压成形-回弹有限元模型, 分析过程包括冲压过程和回弹过程, 结构包括上模、下模和微小通道薄壁扁管 3 部分。从截面变形预测的角度验证了所建有限元模型的可靠性。基于所建模型, 研究了成形尺寸对截面变形率  $\delta h$  和平均

截面变形率  $\overline{\delta h}$  的作用规律。成形尺寸包括截面高度  $h$ 、管坯壁厚  $t$ 、内弯曲面波形半径  $r$ ，以及内外面相对弯曲半径  $r/R$  的同步缩放系数  $\beta$ 。通过研究得出以下结论：

(1) 薄壁微小通道扁管的截面变形情况复杂，横、纵截面呈现完全不同的截面变形分布趋势。波峰横截面和波谷横截面的截面变形情况基本一致，即：边缘孔的截面变形量通常较大，其余孔的截面变形相对较小且基本一致。边缘孔纵截面和中央孔纵截面的截面变形率分布趋势基本一致，呈现波峰、波谷高，中间段低的波动特点。

(2) 在波峰横截面上， $\overline{\delta h}$  随  $h$  先降低后增大，最佳  $h=2.5$  mm。在边缘孔纵截面上， $\overline{\delta h}$  随  $h$  增大而增大，最佳  $h=1$  mm。横截面宽度不变时， $h$  越大，扁管的截面刚度越差，当  $h \geq 4$  mm 时，扁管内的筋出现了显著弯折现象，且横截面塌陷严重。

(3) 随着  $t$  的增大，扁管的横截面特征趋向板材， $\overline{\delta h}$  呈指数下降趋势。 $t=0.1$  mm 时，截面刚度过低，所有截面都会产生严重的畸变，最大截面变形率甚至能达到 78%。而当  $t \geq 0.3$  mm 时，最大截面变形率下降至 24.71%。

(4)  $R$  保持不变时， $r$  越大，内弯曲面的相对弯曲程度越小，冲压深度越大，因此波峰横截面的  $\overline{\delta h}$  随  $r$  先减小后增大，但整体波动幅度较小。而边缘孔纵截面的  $\overline{\delta h}$  随  $r$  呈指数下降趋势，最佳成形尺寸  $r=24$  mm。 $r/R$  保持不变时，波峰横截面和波谷横截面的  $\overline{\delta h}$  均随  $\beta$  呈指数下降趋势，最佳  $\beta=4$ ，此时成形尺寸  $r/R=40$  mm/24 mm。

## 参考文献 References

- [1] 吴克兵. 科技创新与应用[J], 2018, 238(18): 91-92.  
WU K B. Technology Innovation and Application [J], 2018, 238(18): 91-92.
- [2] 王新泽. 科技创新导报[J], 2018, 15(3): 23-24.  
WANG X Z. Science and Technology Innovation Herald[J], 2018, 15(3): 23-24.
- [3] 方文利, 唐鼎, 李大永, 等. 塑性工程学报[J], 2015, 22(1): 12-17.  
FANG W L, TANG D, LI D Y, *et al.* Journal of Plasticity Engineering [J], 2015, 22(1): 12-17.
- [4] 张志伟, 张卿卿, 唐鼎, 等. 塑性工程学报[J], 2011, 18(4): 106-111.  
ZHANG Z W, ZHANG Q Q, TANG D, *et al.* Journal of Plasticity Engineering [J], 2011, 18(4): 106-111.
- [5] 伍波, 李龙, 周德敬. 轻合金加工技术[J], 2016, 44(2): 9-15.  
WU B, LI L, ZHOU D J. Light Alloy Fabrication Technology [J], 2016, 44(2): 9-15.
- [6] 葛洋, 姜未汀. 化工进展[J], 2016, 35: 10-15.  
GE Y, JIANG W D. Chemical Industry and Engineering Progress [J], 2016, 35: 10-15.
- [7] SHARMA J P, SHARMA A, JILTE R D, *et al.* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry [J], 2020, 140: 1-32.
- [8] 曹磊. 电动汽车电池热管理中的温度控制及优化[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.  
CAO L. Temperature Control and Optimization of Battery Thermal Management in Electric Vehicle [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
- [9] 谢忱忱. 汽车文摘[J], 2020(12): 31-38.  
XIE C C. Automotive Digest [J], 2020(12): 31-38.
- [10] 崔焱朝. 微通道换热器及相变蓄冷系统模拟与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
CUI Y C. Simulation and Optimization of Microchannel Heat Exchanger and Phase Change Cooling Storage System [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [11] XIA G D, CAO L, BI G L. Journal of Power Sources [J], 2017, 367: 90-105.
- [12] 刘宏龙. 我国动力电池技术落后于产业规划[EB/OL]. (2016-01-25) [2021-11-4]. [http://www.cnautonews.com/qclbj/1\\_hy/201601/t20160125\\_443261.htm](http://www.cnautonews.com/qclbj/1_hy/201601/t20160125_443261.htm).  
LIU H L. China's Power Battery Technology Lags Behind the Industrial Planning. (2016-01-25) [2021-11-4]. [http://www.cnautonews.com/qclbj/1\\_hy/201601/t20160125\\_443261.htm](http://www.cnautonews.com/qclbj/1_hy/201601/t20160125_443261.htm).
- [13] ZHANG Q Q, TANG D, LI D Y, *et al.* Journal of Materials Processing Technology [J], 2010, 210: 1876-1884.
- [14] TANG D, CHEN X L, ZHAO L L, *et al.* Materials [J], 2019, 12: 3744-3754.

(编辑 费蒙飞)