

# 大型薄壁 U 形波纹管轴向低压压形的形状精度

杨 程<sup>1</sup>, 李斯棠<sup>2</sup>, 孙 磊<sup>3</sup>, 林才渊<sup>2</sup>, 胡德友<sup>4</sup>, 初冠南<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 材料科学与工程学院, 山东 威海 264209;  
3. 哈工大(威海) 创新创业园有限责任公司, 山东 威海 264209; 4. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

**摘要:** 为了克服大直径 U 形波纹管液压成形时成形内压过高、设备吨位要求大等缺点, 提出了一种轴向低压压形工艺成形该类零件。通过实验与数值模拟分析相结合的方式, 分析了初始内压、最终内压和轴向进给 3 种工艺参数对形状精度(圆角填充、回弹)的影响。对于圆角填充, 初始内压和轴向进给的增大, 会导致管坯在波峰圆角区贴模更紧密, 在波谷圆角区脱模程度加重, 而当最终内压较小时, 波峰的填充不完全。对于回弹, 初始内压和轴向进给的增大以及最终内压的减小均有利于抑制回弹。最终得出了最佳工艺参数组合, 即初始内压为 1.2 MPa、最终内压为 4.0 MPa、轴向进给为 31.5 mm。同时, 对波纹管的应力状态进行分析, 得出了回弹产生的原因, 并通过模具修正对回弹进行补偿。最终, 实验成形了尺寸精度在 0.5 mm 以内、内径为  $\Phi 340$  mm、壁厚为 1.5 mm 的 U 形波纹管, 验证了工艺的可行性。

**关键词:** 波纹管; 轴向低压压形; 形状精度; 初始内压; 最终内压; 轴向进给

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.020

**中图分类号:** TG394      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0145-09

## Shape accuracy for large thin-wall U-shaped bellows under axial low pressure hydroforming

Yang Cheng<sup>1</sup>, Li Sitang<sup>2</sup>, Sun Lei<sup>3</sup>, Lin Caiyuan<sup>2</sup>, Hu Deyou<sup>4</sup>, Chu Guannan<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;  
2. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology-Weihai, Weihai 264209, China;  
3. Harbin Institute of Technology-Weihai Innovation Park Co., Ltd., Weihai 264209, China;  
4. Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China)

**Abstract:** In order to overcome the disadvantages of high internal pressure and large equipment tonnage during the hydroforming of U-shaped bellows with large diameter, an axial low pressure hydroforming process was proposed to produce this part, and the influences of initial internal pressure, final internal pressure and axial feeding on the shape accuracy (corner filling and springback) were analyzed by combining finite element simulation analysis and experiment. Then, for the corner filling, the increase of initial internal pressure and axial feeding caused the tube to adhere to the die more closely in the corner area of wave crest, and the degree of demoulding in the corner area of wave valley was increased. When the final internal pressure was small, the filling of wave crest was incomplete. For the springback, the increase of initial internal pressure and axial feeding and the decrease of final internal pressure were beneficial to restrain springback. And the best process parameters were the initial internal pressure of 1.2 MPa, the final internal pressure of 4.0 MPa and the axial feeding of 31.5 mm. At the same time, the stress state of bellows was analyzed, and the reason of springback was obtained, then the springback was compensated by die modification. Finally, the U-shaped bellows with the inner diameter of  $\Phi 340$  mm, the wall thickness of 1.5 mm and the dimension accuracy of less than 0.5 mm were formed experimentally, which verifies the feasibility of the process.

**Key words:** bellows; axial low pressure hydroforming; shape accuracy; initial internal pressure; final internal pressure; axial feeding

波纹管是一种截面呈波纹状的管类零件, 是受

热受压管道系统和设备中位移补偿的核心元件, 被广泛应用于航天、化工、船舶、核能等领域。波纹管的分类方法有很多, 按照材料可分为金属波纹管和非金属波纹管; 按照截面形状可分为 U 形、C 形和 S 形等基本波形<sup>[1-5]</sup>。其中, U 形波纹管受力时应力分布均匀, 能对大的位移进行补偿, 应用广泛; C 形波纹管的耐腐蚀性能良好, 制作容易, 主要功能为减振降噪; S 形波纹管的结构比较复杂, 刚度大, 主要用于缓冲和隔振<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2021-10-24; 修订日期: 2022-01-25

基金项目: 国家基金委航天联合基金重点项目 (U1937205); 国家自然科学基金面上项目 (51475121); 山东省重大科技创新工程 (2020CXGC010303)

作者简介: 杨 程 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: szhhit@163.com

通信作者: 初冠南 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: chuguannan@hit.edu.cn

波纹管的常见成形工艺主要包括焊接成形、滚压成形和液压成形。焊接成形是将板材冲压为多个波纹单元,再将波纹单元焊接形成波纹管的成形工艺<sup>[7]</sup>,所用焊接方式一般有激光焊、氩弧焊和等离子焊等。焊接成形工艺在形状精度要求高以及材料塑性差的波纹管的成形中应用广泛,但生产效率低下,而且焊缝处的组织分布不均匀,容易发生腐蚀失效<sup>[8]</sup>。滚压成形是利用三辊滚压成形机的主动轮和一对从动轮与管坯的摩擦力,并依靠辊轮径向和轴向的进给形成所需波纹管的成形工艺<sup>[9]</sup>。该工艺所成形的波纹管的直径较大,目前最大为  $\Phi 8 \sim \Phi 10$  m,对设备要求不高,模具更换方便,但是受到材料塑性的限制,所得波纹管的波深系数较小,并且由于辊轮不断挤压管坯造成波纹管表面的机械损伤较为严重且波峰、波谷的壁厚差异大,减薄不均匀<sup>[10]</sup>。液压成形的原理是将管坯放入模具中,向管坯内通入一定压力的液体,管坯在液体压力的作用下贴合模膛完成成形<sup>[11]</sup>。成形过程中管坯受力均匀,成形出的波纹管具有质轻、表观质量优良和壁厚减薄适中等优点。单波累积成形可以只更换模具即可生产出各种波纹管,降低成本的同时也提高了生产效率。但是,液压成形对于设备要求高,模具的成本也较高<sup>[12]</sup>。

由于液压成形的波纹管具有整体性好、综合性能优良和生产效率高等优点,使得液压成形成为了波纹管成形的重要技术。围绕影响液压成形的各种工艺参数和成形质量问题,国内外学者展开了大量研究。Faraji G 等<sup>[13]</sup>通过有限元模拟分析了材料性能和各种工艺参数对波纹管成形的影响,结果表明,材料的性能对回弹的影响较大,并通过实验验证了模拟的准确性。Lin Y S 等<sup>[14]</sup>建立了波纹管液压成形模型,分析了尺寸比对波纹管最小厚度与可成形性的影响,结果表明,尺寸比越大,波纹管的最小厚度越小,越容易破裂,且各成形参数间存在相互作用。刘静等<sup>[15-16]</sup>采用有限元模拟的方法,分析了 U 形金属波纹管液压成形过程中波纹管的变形特征,获得了内压和模具行程等工艺参数对波纹管液压成形的影响规律,其中内压是影响壁厚减薄和胀形高度的主要工艺参数,而挤压速度对壁厚和波高的影响较小。李慧芳等<sup>[17]</sup>使用有限元模拟方法,得到了液压成形的  $\Omega$  形波纹管的壁厚减薄分布情况以及卸载前后的等效应力-等效应变分布规律,并通过实验验证了数值模拟的有效性。Liu J 等<sup>[18]</sup>使用 ABAQUS 对 4 层 U 形波纹管的液压成形过程进行了

分析,讨论了不同条件下波纹管的变形行为,包括各阶段各层的应力-应变分布、壁厚变化、形状精度等,并以此来评定波纹管的成形质量。彭赫力等<sup>[19]</sup>通过有限元模拟分析了不同工艺参数对 5A06 铝合金波纹管液压成形的影响,结果表明,随着内压的增大,波纹管的模具贴合程度变好,并通过实验对模拟结果进行了验证,可以得到满足设计要求的波纹管。

目前,大直径 U 形波纹管液压成形的成形内压过高,对于设备的吨位要求过大。同时,液压成形的波纹管的减薄率过大,难以满足设计要求。王彪<sup>[20]</sup>通过有限元模拟分析了不同加载路径对于  $\Omega$  形波纹管轴向低压压形的影响,得出梯形加载方式的成形效果最佳的结论,并通过实验得到了满足设计要求的波纹管。但是,上述研究忽视了各工艺参数对成形的影响,也未对波纹管成形后的回弹进行分析补偿。对此,本研究针对 U 形波纹管大直径和小减薄率的成形难题,提出了轴向低压压形工艺。通过对 5A03 铝合金 U 形波纹管成形过程进行数值模拟,分析了不同工艺参数对波纹管形状精度的影响,并根据实验结果,通过模具修正进行回弹补偿,成形出满足设计要求的波纹管,验证了该工艺的可行性。

## 1 U 形波纹管的结构尺寸及材料制备

本文研究的 U 形波纹管的波形结构尺寸如图 1 所示,其中,波谷圆角半径和波峰圆角半径均为 9.5 mm,  $H'$  为侧壁区长度。波纹管 内径为  $\Phi 340$  mm、壁厚为 1.5 mm,要求最大壁厚减薄率小于 15%,且成形后金属波纹管与标准尺寸间的差距小于 0.5 mm。

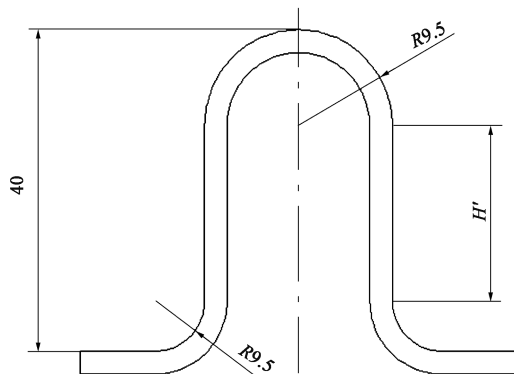


图 1 U 形波纹管的波形结构尺寸

Fig. 1 Structural dimensions of wave shape for U-shaped bellow

U 形波纹管成形所用的管坯为 5A03 铝板经卷

制成筒，再对其进行搅拌摩擦焊而成的铝管。选用转速为  $400\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、焊接速度为  $100\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  的搅拌摩擦参数进行焊接，5A03 铝板经搅拌摩擦焊焊接后，切割制成拉伸试样，对试样进行常温拉伸实验，应变速率为  $0.0067\text{ s}^{-1}$ ，得到其工程应力-工程应变曲线如图 2 所示，焊后的 5A03 铝合金管坯的力学性能如表 1 所示。

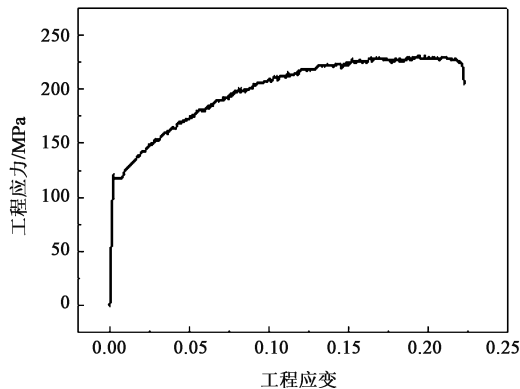


图 2 焊后 5A03 铝合金的工程应力-工程应变曲线  
Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curve of 5A03 aluminum alloy after welding

表 1 焊后 5A03 铝合金管坯的力学性能  
Table 1 Mechanical properties of 5A03 aluminum alloy tube blank after welding

| 参数                                      | 数值   |
|---|------|
| 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 2700 |
| 屈服强度 $R_{\text{eL}}/\text{MPa}$         | 121  |
| 抗拉强度 $R_{\text{m}}/\text{MPa}$          | 229  |
| 断后伸长率 $A/\%$                            | 20.1 |
| 弹性模量 $E/\text{GPa}$                     | 65.2 |
| 泊松比 $\nu$                               | 0.3  |

## 2 有限元建模

对管坯成形进行有限元模拟时，考虑到载荷、管坯的对称性以及计算成本，选择二维轴对称模型进行分析。由于模具的部分刚度远大于管坯，故将模具部分设为解析刚体，无需进行网格划分，从而大大提升了计算效率。将管坯设置为变形体模型，其本构关系为 J. H. Holloman 表达式<sup>[21]</sup>，材料设为均质且各向同性，材料性能如表 1 所示。

对波纹管的成形过程进行模拟，采用动力显示分析步，虚拟加载时间设为  $0.01\text{ s}$ 。接触属性采用罚函数，摩擦因数设为 0.1。管坯沿壁厚方向划分为 4 层网格，沿轴向的网格尺寸为  $0.6\text{ mm}$ ，网格形状以四边形为主，单元类型采用轴对称一阶减缩实

体单元 (CAX4R)。共有网格节点 1255 个，网格数为 1000。图 3 为 U 形波纹管轴向低压压形工艺有限元模型。实际成形过程中，采用一个一个波形累积成形的方式，每个波形的成形互不影响。

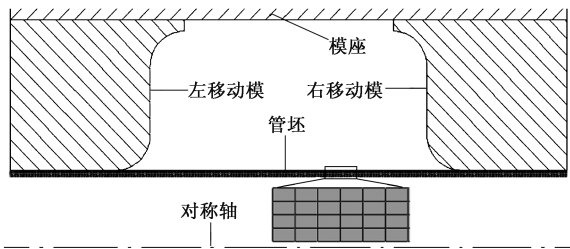


图 3 U 形波纹管轴向低压压形单波累积工艺有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of axial low pressure hydroforming process with single wave accumulation for U-shaped bellow

## 3 有限元模拟结果

### 3.1 工艺参数对 U 形波纹管形状精度的影响

#### 3.1.1 初始内压下 U 形波纹管的形状精度

本研究使用管坯与模具的贴合程度即管坯与模具的距离来衡量成形后波纹管的形状精度。U 形波纹管卸载后的回弹变形情况如图 4 所示。其中， $H_0$  和  $H$  分别为卸载前后波纹管的高度， $\Delta H$  为卸载前后波纹管的高度差， $L_0$  和  $L$  分别为卸载前后左右波谷圆角根部之间的距离，两者之间的差值为  $\Delta L$ 。选用  $\Delta H$  和  $\Delta L$  来表征回弹程度的大小，两者的绝对值越大，表示回弹程度越大。

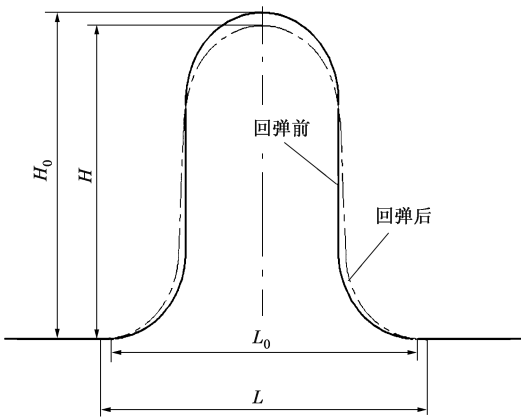


图 4 U 形波纹管卸载后回弹变形情况  
Fig. 4 Springback deformation condition of U-shaped bellow after unloading

选择不同初始内压，分别为 1.1、1.2、1.3 和 1.4 MPa，保持单侧轴向进给为  $31.5\text{ mm}$ 、最终内压为  $4.0\text{ MPa}$  不变。图 5 为不同初始内压下 U 形波纹

管的脱模程度,采用管坯与模具间的最大距离来表示波纹管与模具的脱模距离。最大初始内压为 1.1 MPa 时,波峰圆角的脱模距离达到了 0.23 mm,而波谷圆角的脱模距离为 0.03 mm;当初始内压为 1.4 MPa 时,波峰圆角的脱模距离减小为 0.13 mm,

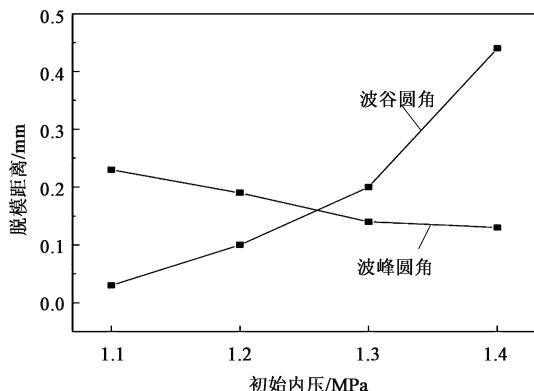


图 5 不同初始内压下 U 形波纹管的脱模程度

Fig. 5 De-moulding degree of U-shaped bellows under different initial internal pressures

而波谷圆角的脱模距离增大至 0.44 mm。可以得出,随着初始内压的增大,改善了波峰圆角的填充,但是加剧了波谷圆角的脱模。

波谷圆角脱模是由于管坯变形区轴向周长大于波形展开长度过多,使得在合模过程中移动模对管坯侧壁区材料的作用大于成形内压及摩擦的阻碍作用,管坯侧壁区沿径向向管内移动而形成。初始内压增大时,管坯变形区轴向周长变大,波谷圆角的脱模程度增大。U 形波纹管成形过程中波峰圆角的填充过程如图 6 所示,其中,  $M$  为波峰  $D$  点和侧壁  $C$  点上受到的弯矩,  $F_D$  和  $T_D$  分别为波峰  $D$  点受到的模具法向支撑力和环向力,  $N_C$  和  $T_C$  分别为侧壁  $C$  点受到的模具法向支撑力和环向力,  $P$  为成形内压。管坯在成形内压  $P$  的支撑作用下,通过模具的轴向进给对波峰圆角区产生压形作用,使得管坯弯曲变形,从而完成波峰圆角填充。随着初始内压的增大,管坯变形区的轴向周长越大,  $C$  点、 $D$  点与模具接触越早,从而减小了波峰圆角的脱模程度。

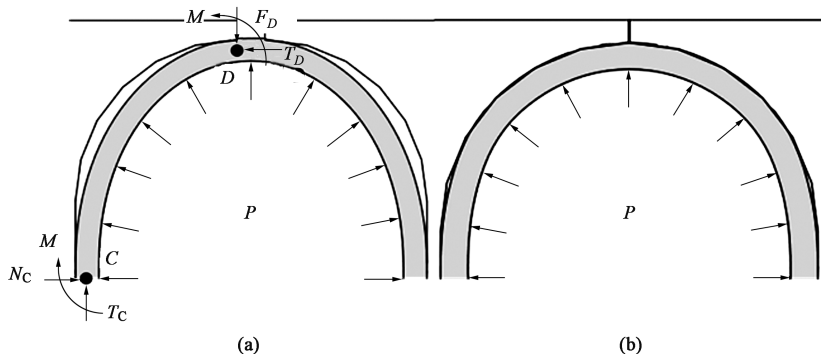


图 6 波峰圆角填充力学原理

(a) 合模前 (b) 合模后

Fig. 6 Mechanical principle of wave crest fillet filling

(a) Before clamping (b) After clamping

图 7 给出了不同初始内压下 U 形波纹管的回弹程度。当初始内压为 1.1 MPa 时,卸载前后波纹管的高度差  $\Delta H$  为 0.37 mm、左右波谷圆角根部之间的距离差  $\Delta L$  为 4.2 mm;当初始内压为 1.4 MPa 时,  $\Delta H$  减小为 0.12 mm、 $\Delta L$  减小为 3.21 mm。可以得出,随着初始内压的增大,波纹管的回弹程度变小,这与初始内压增大时波谷圆角区管坯的塑性变形增大有关。还可以得出,卸载前后左右波谷圆角根部之间的距离差  $\Delta L$  远大于波纹管的高度差  $\Delta H$ ,表明 U 形波纹管的回弹主要表现在左右波谷圆角根部之间的距离变大。其原因在于:波峰圆角在卸载前内表面受到压应力的作用、外表面受到拉应力的作用,内外表面存在压力差,卸载后应力向相反

方向释放的趋势较大,从而在轴线上产生较大回弹。

### 3.1.2 轴向进给下 U 形波纹管的形状精度

图 8 为不同轴向进给下 U 形波纹管的脱模程度,选用不同的单侧轴向进给,分别为 31.0、31.5、32.0 和 32.5 mm,保持初始内压为 1.2 MPa 和最终内压为 4 MPa 不变。当单侧轴向进给为 31.0 mm 时,波谷圆角与模具紧密贴合,波峰圆角的脱模距离达到了 0.49 mm;当单侧轴向进给为 32.5 mm 时,波谷圆角的脱模距离增大为 0.44 mm,波峰圆角的脱模距离减小为 0.10 mm。可以得出,随着轴向进给的增大,波谷圆角的脱模距离变大,而波峰圆角的变化与波谷圆角的变化呈现相反的趋势。轴向进给的作用与初始内压的作用相似,原理



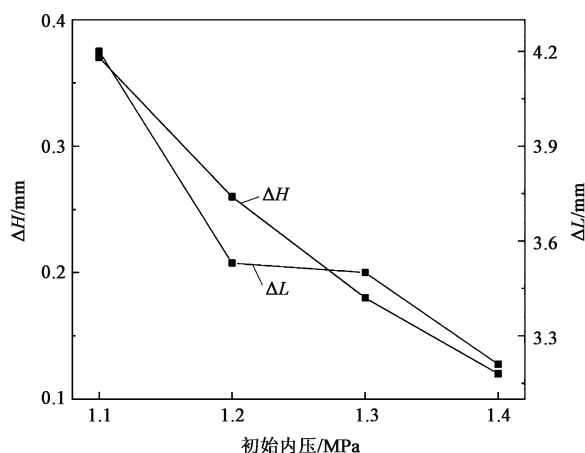


图 7 不同初始内压下 U 形波纹管的回弹程度

Fig. 7 Springback degree of U-shaped bellows under different initial internal pressures

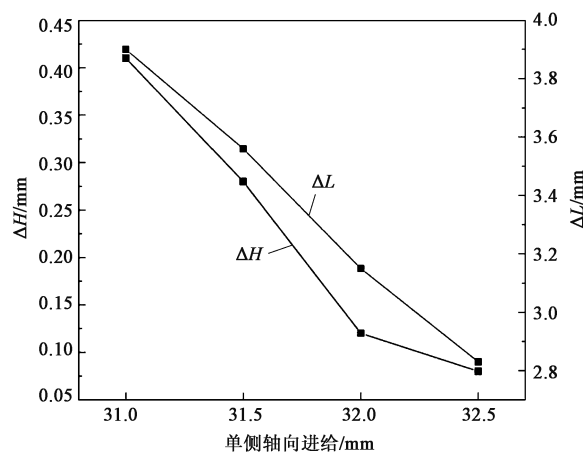


图 9 不同轴向进给下 U 形波纹管的回弹程度

Fig. 9 Springback degree of U-shaped bellows under different axial feedings

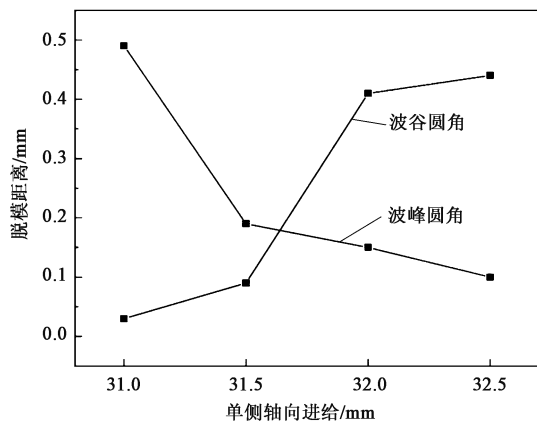


图 8 不同轴向进给下 U 形波纹管的脱模程度

Fig. 8 De-moulding degree of U-shaped bellow under different axial feedings

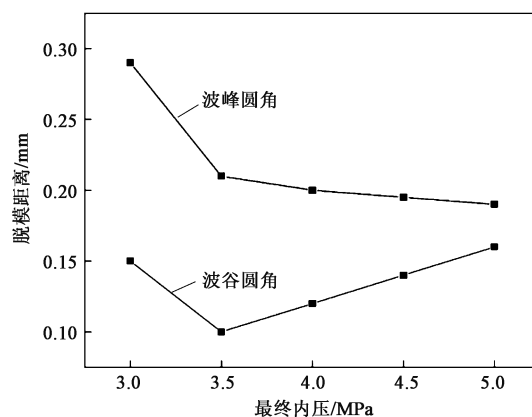


图 10 不同最终内压下 U 形波纹管的脱模程度

Fig. 10 De-moulding degree of U-shaped bellow under different final internal pressures

如 3.1.1 节所述。

图 9 为 U 形波纹管在不同轴向进给下的回弹程度。当单侧轴向进给为 31.0 mm 时, 卸载前后波纹管的高度差  $\Delta H$  为 0.41 mm、左右波谷圆角根部之间的距离差  $\Delta L$  为 3.9 mm; 当单侧轴向进给为 32.5 mm 时,  $\Delta H$  减小为 0.08 mm、 $\Delta L$  减小为 2.83 mm。可知, 随着单侧轴向进给的增大, 波纹管的回弹程度减小。

### 3.1.3 最终内压下 U 形波纹管的形状精度

图 10 为不同最终内压下 U 形波纹管的脱模程度, 选择不同的最终内压, 分别为 3.0、3.5、4.0、4.5 和 5.0 MPa, 保持初始内压为 1.2 MPa 和轴向进给为 31.5 mm 不变。当最终内压为 3.0 MPa 时, 波峰圆角脱模距离为 0.29 mm, 波谷圆角的脱模距离为 0.15 mm; 当最终内压为 5.0 MPa 时, 波峰圆角的脱模距离为 0.19 mm, 波谷圆角的脱模距离为 0.16 mm。可以得出, 最终内压的增大可以改善波

峰圆角的填充效果, 但是改善效果并不明显, 而且会轻微加大波谷圆角的脱模距离。

图 11 为不同最终内压下 U 形波纹管的回弹程度。随着最终内压从 3.0 MPa 增大至 5.0 MPa, 卸载前后左右波谷圆角根部之间的距离差  $\Delta L$  只减小了 0.34 mm, 并且波纹管的高度差  $\Delta H$  的变化很小。可以得出, 在一定范围内最终内压的增大只能轻微抑制波纹管的回弹程度。这与轴向压形过程中内压只起支撑作用, 并未使管材产生胀形效果有关。

### 3.2 回弹应力

模拟选择最优的工艺参数组合进行成形, 具体为: 初始内压为 1.2 MPa、最终内压为 4.0 MPa、单侧轴向进给为 31.5 mm, 得到的等效应力分布如图 12 所示。

提取 U 形波纹管内外表面的轴向、环向应力状

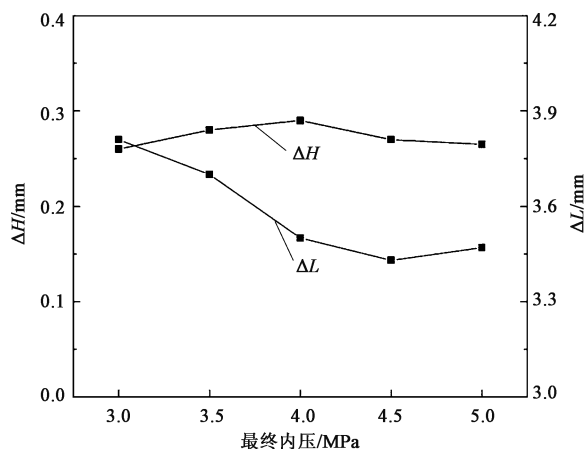
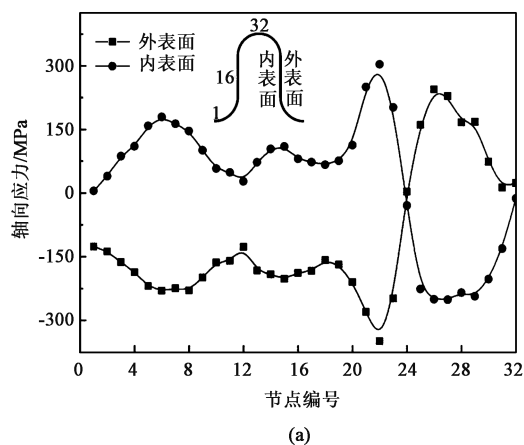


图 11 不同最终内压下 U 形波纹管的回弹程度

Fig. 11 Springback degree of U-shaped bellows under different final internal pressures

态,如图 13 所示。可以看出:在波谷圆角区外表面的轴向与环向均受压应力作用,在内表面的



(a)

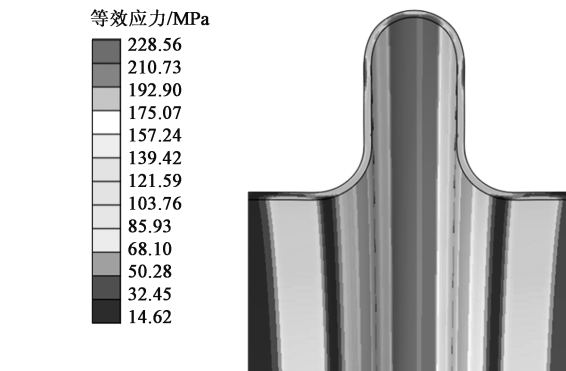
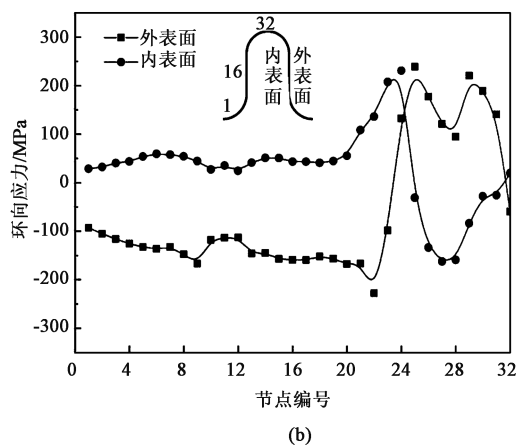


图 12 等效应力分布图

Fig. 12 Distribution diagram of equivalent stress

轴向与环向均受拉应力作用;而在波峰圆角区管坯外表面的轴向与环向均受拉应力作用,在内表面的轴向与环向均受压应力作用。可见管坯内、外表面的应力状态相反,与弯曲变形相似,因此,管坯在卸载后将产生图 4 所示的回弹变形。



(b)

图 13 内外表面应力状态

(a) 轴向应力 (b) 环向应力

Fig. 13 Stress conditions at internal and external surfaces

(a) Axial stress (b) Circumferential stress

#### 4 U 形波纹管的轴向低压压形实验结果

实验选择的工艺参数为:初始内压为 1.2 MPa、最终内压为 4.0 MPa、单侧轴向进给为 31.5 mm。所用实验装置如图 14 所示,实验模具主要包括:上/下模座、左/右密封冲头、移动模、减力柱和左/右推板等 5 个部分,利用千斤顶控制轴向进给,所用的移动模通过过盈配合装配在模座型腔上,成形过程中通过密封冲头推动从而完成成形。实验采用气

压站提供内压,提供的最大气体压力为 30 MPa。

情况。可以得出,波纹管在卸载前与模具贴合良好,但是在卸载后产生了回弹。由于左右波谷圆角根部之间的距离不易测量,因此,通过游标卡尺测得的波纹管卸载后左右侧壁区下端之间的距离差来表示回弹。在波纹管周向均匀选取 10 个节点,测量每个节点的侧壁区下端之间的距离,得到其平均值为 22.61 mm,而其设计要求中规定标准宽度为 19 mm,进而计算得到左右侧壁区下端之间的距离差为 3.61 mm,与模拟结果的 3.32 mm 相比,波纹管的实际回弹比模拟值稍大,误差约为 8% (实验规定误差  $\leq 10\%$ ),验证了模拟的准确性。

因此,根据实验及模拟的回弹情况,通过修改

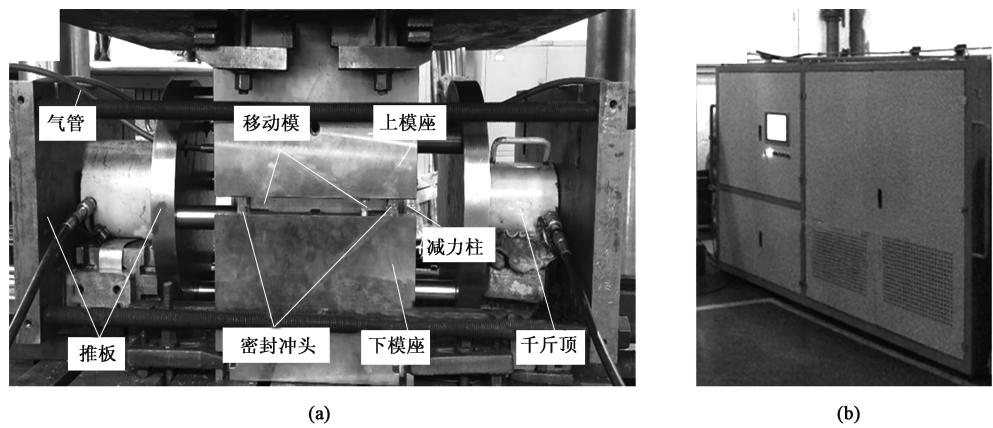


图 14 实验装置  
(a) 实验模具    (b) 气压站  
Fig. 14 Experimental device  
(a) Experimental die    (b) Pressurizing system

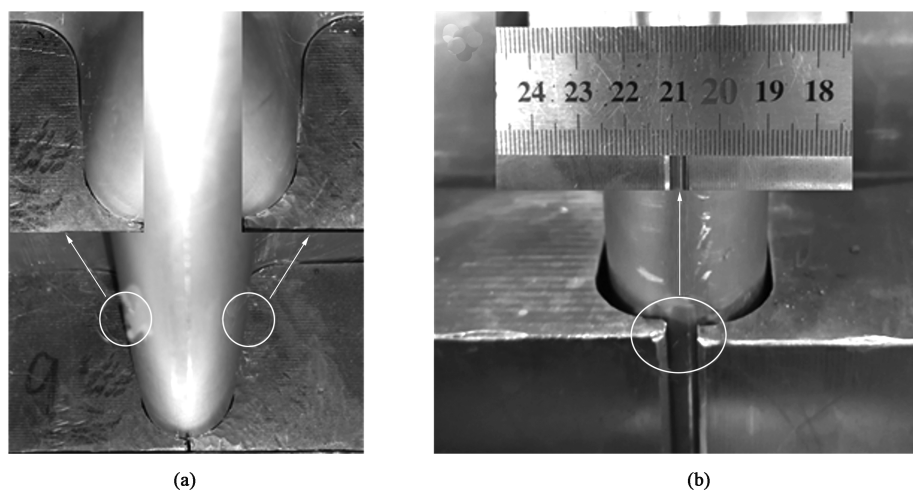


图 15 U 形波纹管实际成形后的形状精度  
(a) 卸载前    (b) 卸载后  
Fig. 15 Shape accuracy of U-shaped bellows after actual forming  
(a) Before unloading    (b) After unloading

移动模来补偿波纹管卸载后的回弹。首先，根据模拟的回弹对移动模的尺寸进行修正，如图 16 所示。将波纹管侧壁区下端之间的距离减小，将其从 19 mm 减小为 16 mm，同时将波峰圆角半径从 9.5 mm 减小为 9.2 mm，其余尺寸保持不变。

根据修改后的移动模进行 U 形波纹管的轴向低压压形模拟，保持工艺参数一致，得到修正后的 U 形波纹管的回弹情况如图 17 所示。可以看出，修正后的波纹管与标准尺寸形状相比：在波谷圆角与侧壁的过渡区域与标准尺寸存在偏差，最大尺寸差为 0.19 mm；在波峰圆角与侧壁的过渡区与标准尺寸存在偏差，最大尺寸差为 0.21 mm。其余位置与标准尺寸的形状基本相同，同时修正后的波纹管与标准尺

寸间的尺寸差均小于 0.5 mm，满足零件尺寸要求。

根据上述 U 形波纹管修正模拟验证，说明对移动模进行修正可有效补偿 U 形波纹管轴向低压压形后的回弹变形。而 U 形波纹管实际回弹后的侧壁区厚度变化与模拟值相差 10% 以内，因此，可采用数值模拟中的修正尺寸对移动模进行修正，并进行 U 形波纹管的轴向低压压形实验。所得 U 形波纹管成形后的形状精度如图 18 所示。可以看出，采用标准尺寸的卡具与成形后的 U 形波纹管各处贴合良好，在波峰圆角区有轻微的缝隙。游标卡尺测得的侧壁区下端波形厚度为 19.81 mm、侧壁区上端波形厚度为 19.97 mm，波形两侧尺寸与标准尺寸相比，尺寸差在 0.5 mm 以内，得到了符合形状精度要求的 U 形波纹管。

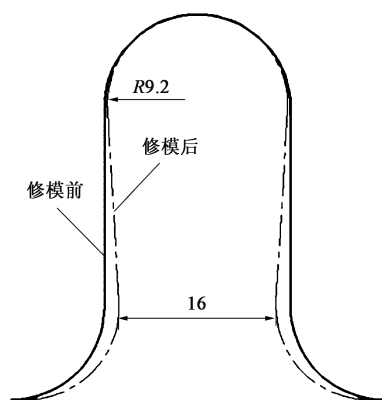


图 16 移动模回弹补偿修正方式

Fig. 16 Modified method of springback compensation for moving die

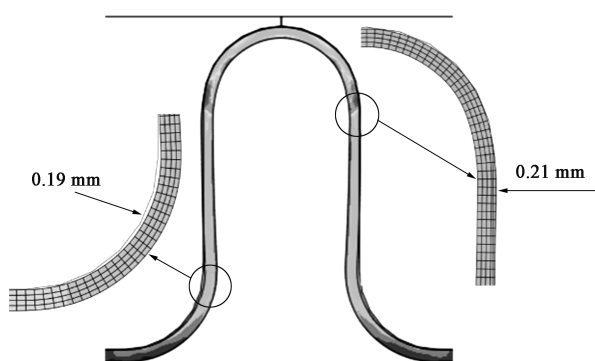


图 17 移动模修正后 U 形波纹管的回弹情况

Fig. 17 Springback condition of U-shaped bellow after moving die compensation

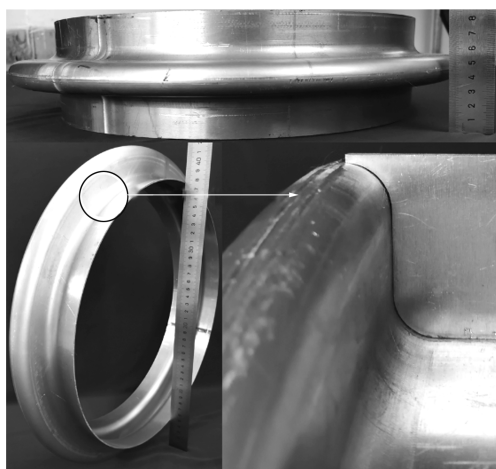


图 18 移动模修正后 U 形波纹管实际成形的形状精度

Fig. 18 Shape accuracy of actual forming for U-shaped bellow after moving die compensation

## 5 结论

(1) 通过对不同工艺参数下 U 形波纹管轴向低

压成形过程的分析得出:随着初始内压和轴向进给的增大,管坯在波峰圆角区贴模更紧密,在波谷圆角区脱模程度加重,波纹管回弹减小;当最终内压较小时,管坯对波峰的填充不完全,同时最终内压有限度地增大对回弹变形有一定程度的抑制作用。

(2) 对 U 形波纹管进行了应力分析,得出波纹管内外表面的应力状态相反。在波峰圆角区外表面轴向与环向均受拉应力作用、内表面均受压应力作用,卸载后应力向相反方向释放的趋势较大,因此,波纹管在轴线方向产生较大回弹。

(3) 综合考虑不同工艺参数对 U 形波纹管形状精度的影响,得到最优工艺参数为:初始内压为 1.2 MPa、单侧轴向进给为 31.5 mm、最终内压为 4.0 MPa。同时,对移动模进行修正补偿后进行 U 形波纹管成形,得到的波纹管的侧壁区下端波形厚度为 19.81 mm、侧壁区上端波形厚度为 19.97 mm,波形高度波形两侧的尺寸差在 0.5 mm 以内,符合形状精度要求,验证了波纹管轴向低压成形工艺的可行性。

### 参考文献:

- [1] 马伟,李德雨,钟玉平.波纹管的发展与应用[J].河南科技大学学报:自然科学版,2004,25(4):28-31.  
Ma W, Li D Y, Zhong Y P. Development and application of bellows [J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2004, 25 (4): 28-31.
- [2] 杨玲.膨胀节波纹管优化设计研究[D].重庆:西南农业大学,2003.  
Yang L. Optimization Design Research on Expansion Joint Bellows [D]. Chongqing: Southwest University, 2003.
- [3] Lin C, Chu G, Sun L, et al. Radial hydro-forming bending: A novel method to reduce the springback of AHSS tubular component [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 160: 1-20.
- [4] 肖巧.柔性环形金属波纹管旋压-滚压联合精密成型技术研究[D].秦皇岛:燕山大学,2019.  
Xiao Q. Study on Combined Spinning-rolling Precision Molding Technology for Flexible Annular Metal Bellows [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.
- [5] Belyaev A K, Zinovieva T V, Smirnov K K. Theoretical and experimental studies of the stress-strain state of expansion bellows as elastic shells [J]. St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics, 2017, 3 (1): 7-14.
- [6] 蔡善祥,李建国,裴信廉. JB 4731—93《压力容器波形膨胀节》标准介绍(二)[J].压力容器,1993,18(5):12-26.  
Cai S X, Li J G, Pei X L. JB 4731—93 "Introduction to the bellows standard for pressure vessels" [J]. Pressure Vessel Technology, 1993, 18 (5): 12-26.
- [7] 任明辉,王春炎,田鑫,等.波纹管的微束等离子焊接与制造技术[J].焊接,2012,7(7):51-51.



- Ren M H, Wang C Y, Tian X, et al. Microbeam plasma welding and manufacturing technology of metal bellows [J]. Welding & Joining, 2012, 7 (7): 51-51.
- [8] 黄乃宁. 特种金属波纹管研制 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2003.
- Huang N N. Research on Metal Bellows of Special Purpose [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2003.
- [9] 曹宝璋, 陈永忠, 俞彬, 等. 金属波纹管成型方法的分析与比较 [J]. 管道技术与设备, 2001, 78 (2): 11-15.
- Cao B Z, Chen Y Z, Yu B, et al. Analysis and comparison of shaping methods of metal bellow [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2001, 78 (2): 11-15.
- [10] 余龙兵. 大口径弹性金属波纹管成型机床及其关键技术的研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015.
- Yu L B. The Study of Large Caliber Elastic Metal Bellows Forming Machine Tool and Its Key Technology [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015.
- [11] Mirzaali M, Liaghat G H, Naeini H M, et al. Optimization of tube hydroforming process using simulated annealing algorithm [J]. Procedia Engineering, 2011, (10): 3012-3019.
- [12] 苏明. 金属波纹管液压成形工艺优化系统开发 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- Su M. System Development for Optimizing Metal Bellows Hydroforming [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [13] Faraji G, Mashhadi M M, Norouzfard V. Evaluation of effective parameters in metal bellows forming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (7): 3431-3437.
- [14] Lin Y S, Hsu Y C, Shih J C. Investigation of forming characteristics in bellows hydroforming [A]. International Conference on Computer Engineering & Technology [C]. Chengdu, 2010.
- [15] 刘静, 王有龙, 李兰云, 等. 工艺参数对双层 304 不锈钢波纹管液压胀形的影响 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (4): 11-20.
- Liu J, Wang Y L, Li L Y, et al. Influence of process parameters on hydroforming forbi-layered 304 stainless steel bellows [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (4): 11-20.
- [16] 刘静, 王有龙, 李兰云, 等. 多层 U 形不锈钢波纹管液压胀形仿真分析 [A]. 第十四届全国膨胀节学术会议论文集-膨胀节技术进展 [C]. 合肥, 2016.
- Liu J, Wang Y L, Li L Y, et al. FE simulation of multi-layered U-shaped stainless-steel bellows in hydroforming [A]. Proceedings of the 14<sup>th</sup> Expansion Joint Meeting-Expansion Joint Technology Progress [C]. Hefei, 2016.
- [17] 李慧芳, 叶梦思, 钱才富, 等. 多层多波  $\Omega$  形波纹管液压成形的数值模拟 [J]. 压力容器, 2018, 35 (6): 70-77.
- Li H F, Ye M S, Qian C F, et al. Numerical simulation of hydraulic forming of a multi-layered and multi-corrugated  $\Omega$ -shape bellows [J]. Pressure Vessel Technology, 2018, 35 (6): 70-77.
- [18] Liu J, Lyu Z, Liu Y, et al. Deformation behaviors of four-layered U-shapedmetallic bellows in hydroforming [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 12: 3479-3494.
- [19] 彭赫力, 张小龙, 李中权, 等. 波纹管液压成形数值模拟和实验 [J]. 航天制造技术, 2015, (2): 23-30.
- Peng H L, Zhang X L, Li Z Q, et al. Numerical simulation and experiment of bellows hydroforming [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, (2): 23-30.
- [20] 王彪. 5A03 铝合金波纹管轴向低压压形工艺 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Wang B. Axial Low Pressure Forming Process of 5A03 Aluminum Alloy Bellows [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] Lin C Y, Chun G N, Sun L, et al. Radial hydro-forging bending: A novel method to reduce the springback of AHSS tubular component [J]. International Journal of Machint Tools and Manufacture, 2021, 160: 103650.

## 《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2022 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊; · 报道内容全, 发行量大。
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

