

小径厚比金属波纹管无模成形工艺

张自成, 戴文龙, 童腾腾, 程琦文
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 传统成形工艺制备的波纹管存在过度减薄及性能恶化等问题, 限制了其在航空航天领域的应用, 利用局部加热和轴向压缩诱导管坯发生轴向屈曲从而成形的无模成形工艺制备波纹管。为了利用无模成形工艺获得径厚比较小、波纹均匀、综合性能良好的波纹管, 采用试验与有限元模拟相结合的方法, 对加热温度、变形区宽度、压缩比对成形载荷、波纹管波纹形状、波峰高度、波峰间距以及波峰厚度的影响规律进行了研究。研究表明: 随着加热温度的升高, 波纹管的成形载荷显著降低; 随着变形区宽度的增加, 波峰高度和波峰间距呈增加趋势, 而波峰厚度呈减小趋势; 随着压缩比的增加, 波峰高度呈增加趋势, 波峰间距呈减小趋势。

关键词: 波纹管; 无模成形; 成形载荷; 波峰高度; 波峰厚度; 波峰间距

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.033

中图分类号: TH306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0254-06

Dieless forming process of metal bellows with small radius-to-thickness ratio

Zhang Zicheng, Dai Wenlong, Tong Tengting, Cheng Qiwen

(School of Mechanical and Automatic Engineering, Northeast University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The excessive thinning and performance deterioration of bellows prepared by the traditional forming process limit the application of bellows in the aerospace field. Therefore, the bellows was fabricated by the dieless forming process that induced the axial buckling of tube blank by local heating and axial compression. Furthermore, in order to obtain the bellows with small radius-to-thickness ratio, uniform corrugation and good comprehensive performance by using dieless forming process, the influence laws of heating temperature, deformation zone width and compression ratio on forming load, corrugation shape of bellows, peak height, peak spacing and peak thickness were studied by combining experiment and finite element simulation. The research results show that with the increasing of heating temperature, the forming load of bellows decreases significantly. As the width of the deformation zone increaseing, the peak height and peak spacing tend to increase, while the peak thickness tends to decrease. With the increasing of compression ratio, the peak height tends to increase, and the peak spacing shows a decreasing trend.

Key words: bellows; dieless forming; forming load; peak height; peak thickness; peak spacing

金属波纹管是具有横向波纹的圆柱形金属薄壳, 是金属软管的核心元件, 具有轴对称的特点, 材质多为碳钢、不锈钢和铝合金等^[1]。主要特点为在载荷作用下可以产生一定的位移, 从而使波纹管的几何形状变形, 载荷特性变为非线性^[2-3]。金属波纹管与普通金属光滑管相比, 具有一定的挠性, 可伸缩和吸收振动^[4]。金属波纹管作为补偿元件、敏感元件、密封元件、减震元件、阀门元件及管路连接

件, 被广泛应用于机械工业、仪表、电力、交通运输、航空、航天及原子能工业等领域^[1,5-10]。金属波纹管的传统成形工艺主要有液压成形、机械成形、焊接成形、橡胶成形和沉积成形等^[11], 目前液压成形和机械成形工艺的应用较为广泛。在传统金属波纹管成形工艺中, 管坯多处于拉应力状态, 导致波纹管壁厚局部或整体减薄^[12-15]。同时, 成形过程中的拉应力还会促进管坯内孔洞缺陷扩展延伸, 造成管材破裂及强度下降等缺陷, 导致服役场所受到较大限制^[12,16-17]。此外, 传统金属波纹管成形装置普遍较为复杂, 通常需要高强度模具和大吨位压力机辅助成形, 而且波纹管液压成形工艺中还需要完整的密封系统, 造成波纹管生产成本较高、生产效率较低^[18]。此外, 针对径厚比较小的金属管材, 采用

收稿日期: 2023-02-25; 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 辽宁省自然科学基金计划项目 (2022-YGJC-77);
国家自然科学基金资助项目 (51304046)

作者简介: 张自成 (1981-), 男, 博士, 副教授

E-mail: zhangzicheng@me.neu.edu.cn

传统波纹管成形方法成形较为困难。

本文利用无模成形工艺制备金属波纹管，该工艺成形过程中对管材进行局部加热，同时进行轴向压缩，诱导管坯发生轴向屈曲，从而获得波纹管^[19]。该工艺采用局部加热使管坯局部软化，利用管坯两端的速度差产生对管材的压力，从而使软化部位发生轴向屈曲而自然隆起形成波纹，可通过移动管坯实现波纹管波纹的连续成形。该工艺的成形设备简单，对管坯尺寸无限制，不需要模具，生产成本低。成形过程中可以在线调整波形，管坯壁厚成形后无减薄现象。适用于利用传统工艺生产的常规波纹管成形，也适用于传统工艺无法生产的壁厚较大、径厚比较小的金属波纹管成形。本研究对小径厚比管材无模成形过程中，加热温度、变形区宽度、压缩比对成形载荷、波纹管波纹形状、波峰高度、波峰间距以及波峰厚度的影响规律进行了研究。

1 试验材料及方法

波纹管成形试验在自制的波纹管无模成形机上进行，其原理如图 1 所示。采用电磁感应加热的方法实现金属管材的局部加热，通过调整加热感应线圈的圈数可以实现加热长度的调整。试验中利用红外线测温仪对变形区的温度进行实时测量，加热区两侧采用水冷的方法进行变形区温度梯度的控制。金属管材两端的移动速度由卡具的移动速度确定。

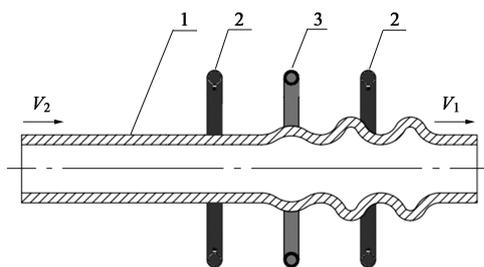


图 1 金属波纹管无模成形工艺原理图

1. 金属管材 2. 水冷系统 3. 加热线圈

Fig. 1 Principle diagram of dieless forming process for metal bellows

试验采用具有较小径厚比的 SUS304 (JIS) 不锈钢管，管材尺寸为 $\Phi 13.8 \text{ mm}$ (外径 D_0) $\times 2 \text{ mm}$ (厚度 t) $\times 200 \text{ mm}$ (长度 l)，径厚比 $D_0/t = 6.9$ 。为了研究加热温度、变形区宽度、压缩比对成形载荷、波纹管波纹形状、波峰高度、波峰间距以及波峰厚度的影响规律，加热温度分别采用 1100、1150 和 1200 $^{\circ}\text{C}$ ，变形区宽度分别采用 17、25 和 33 mm，压缩比 C ($C = V_2/V_1$ ，其中， V_1 为波纹管的进给速度，

V_2 为波纹管的压缩速度) 分别采用 1.7、1.8 和 1.9，本文中 $V_1 = 0.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验结束将波纹管沿中间切开，对波峰间距、波峰厚度和波峰高度进行测量。

2 有限元模型的建立及可靠性验证

2.1 金属波纹管无模成形工艺有限元模型建立

本文有限元模拟采用商业软件 Deform-3D (Ver. 11)，图 2 为金属波纹管无模成形工艺的有限元模型。为了简化计算，根据传热过程的特点，在加热部分将感应加热简化为对流传热，对水流冷却也做相同的假设处理。通过设定合适的加热和冷却过程中的传热系数，实现对试验中加热和冷却过程的模拟。因为模型为轴对称结构，为了提高计算效率，采用 1/2 模型。夹头材料的类型为刚性体，管材的类型为塑性体，网格尺寸为 0.5 mm。管材的物理性质如表 1 所示，有限元模拟中采用的边界条件如表 2 所示。

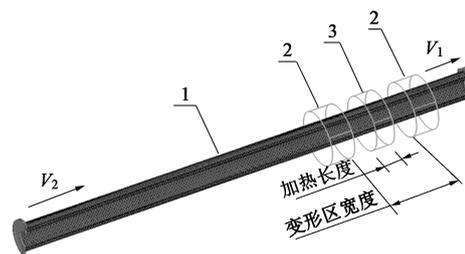


图 2 金属波纹管无模成形工艺的有限元模型

1. 金属管材 2. 水冷系统 3. 加热线圈

Fig. 2 Finite element model of dieless forming process for metal bellows

表 1 SUS304 不锈钢管材的材料参数

Table 1 Material properties of SUS304 stainless steel tube

参数	弹性模量/ GPa	泊松比	导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	辐射率
数值	210	0.3	22	495	0.7

表 2 有限元模型的边界条件

Table 2 Boundary conditions of finite element model

参数	环境和 冷却源 温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却源热对流 系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$)	加热源热对流 系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$)	空气热对流 系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$)
数值	23	3500	37000	20

2.2 金属波纹管无模成形工艺有限元模型可靠性验证

图 3 为当管材处于无压缩状态时，试验与有限元模拟中变形区的温度分布曲线对比图，其中横坐标零点为变形区中心点。加热温度为 1200 $^{\circ}\text{C}$ ，加热

长度为 8 mm，变形区宽度为 25 mm。从图 3 可以看出，试验和模拟中管材变形区的温度从加热线圈中间加热位置向变形区两端呈现下降趋势。试验温度曲线上，温度最高点左侧的温度变化速率较右侧大，这是由于：曲线左侧的测量点从冷却区向变形区移动，管材温度从常温迅速被加热至最高温度；曲线最高点右侧的测量点从变形区向冷却区移动，此时管材温度较高，温度下降速率减慢。试验和模拟获得的温度分布曲线较为一致。该结果表明，本文建立的金属波纹管无模成形工艺有限元模型在管材温度分布趋势方面的预测较为准确。

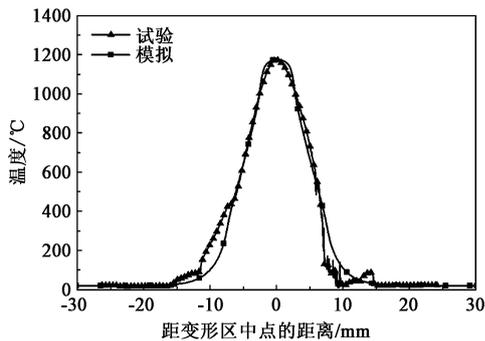


图 3 试验和模拟中管材表面温度分布曲线

Fig. 3 Temperature distribution curves on surface of tube in experiment and simulation

图 4 为波纹管试样的纵截面试验和模拟结果，成形压缩比 $C = 1.9$ 、波纹管的进给速度 $V_1 = 0.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，加热长度为 16 mm，变形区宽度为 33 mm。从图 4a 可以看出，试验所得金属波纹管的波纹比较均匀，波峰间距为 7.50 mm，波纹管的最大直径为 $\Phi 18.80 \text{ mm}$ ，波峰厚度为 2.80 mm。模拟结果中波纹管的波峰间距为 7.82 mm，波峰厚度为 2.76 mm。通过对比试验与模拟结果可知，波纹管的波峰间距和波峰厚度较为一致，误差值分别为 4.20% 和 1.42%。通过分析试验与模拟结果中的波峰间距和波峰厚度可以看出，有限元模型是可靠的。

3 结果与讨论

3.1 加热温度对成形载荷的影响

图 5 为不同加热温度条件下，波纹管成形过程中成形载荷随变形时间的变化曲线。成形过程采用的压缩比为 1.9，加热长度为 17 mm，变形区宽度为 37 mm。可以看出，随着加热温度的降低，成形载荷明显增加：当加热温度为 1100 °C 时，最大成形载荷约为 12 kN；当加热温度为 1200 °C 时，最大成

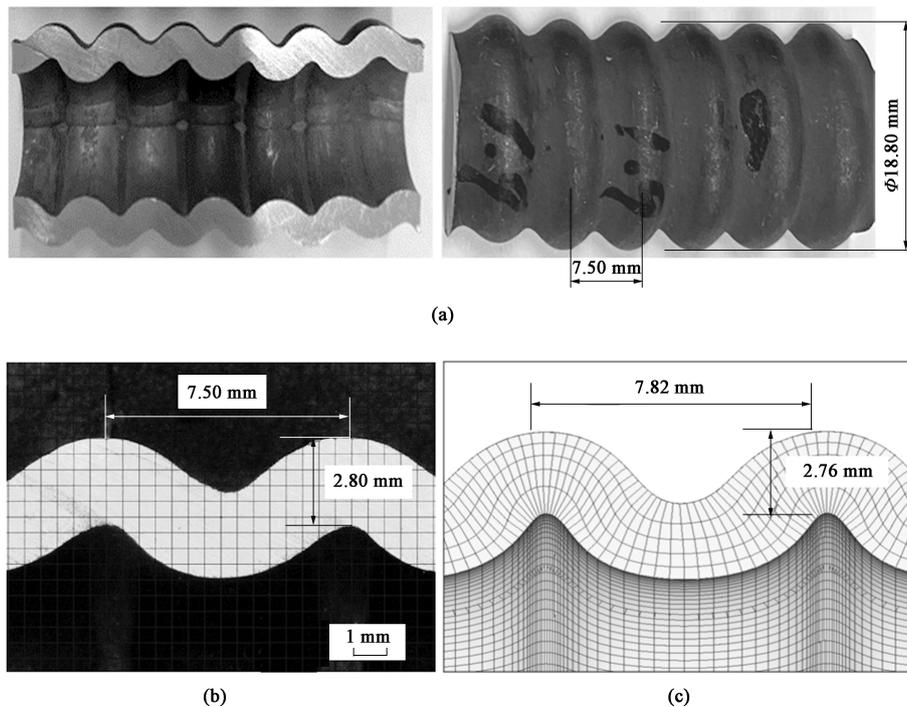


图 4 波纹管试样纵截面试验和模拟结果

(a) 波纹管试样 (b) 测量显微镜下试样纵截面 (c) 波纹管纵截面图模拟结果

Fig. 4 Experiment and simulation results of longitudinal section for bellow sample

(a) Bellow sample (b) Longitudinal section of sample under measuring microscope (c) Simulation result of longitudinal section for bellow sample

形载荷约为 5.6 kN。不同加热温度条件下，成形载荷随变形时间的增加，逐渐趋于平稳，当加热温度为 1200 ℃ 时，成形载荷迅速达到最大值，并维持波纹状波动；当加热温度为 1100 ℃ 时，成形载荷达到最大值的用时较长，这是由于成形开始时，加热温度较低，随着成形过程的推进，管材被压缩，成形时需要的成形载荷也逐渐增大。当变形区温度分布趋于稳定后，成形载荷变化也逐渐趋于稳定。进入稳定变形阶段后，3 种不同的加热温度变化均呈现出波纹状波动，这是由于在变形过程中，波纹隆起之前，未发生向外变形，仅增厚，因此，需要较大的成形载荷促使管材向外隆起。当管材开始向外隆起后，由于塑性变形开始，需要的成形载荷较增厚时小；当波峰达到最高时，成形载荷最小，随后逐渐增大；当波谷形成时，成形载荷再一次增大。因此，波纹管成形过程中成形载荷呈现波纹状波动。

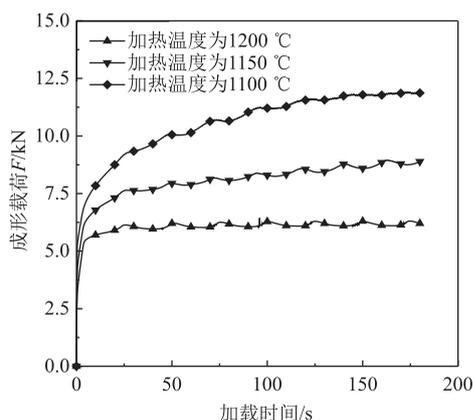


图 5 加热温度对成形载荷的影响

Fig. 5 Effect of heating temperature on forming load

3.2 压缩比对波纹管波峰间距、波峰高度和成形载荷的影响

图 6 为压缩比对波峰间距和波峰高度的影响规律。试验加热温度为 1200 ℃、加热长度为 17 mm、变形区宽度为 37 mm。从图 6 可以看出，随着压缩比从 1.7 增加至 1.9，试验和有限元模拟所得波峰间距均呈现减小趋势。当压缩比为 1.9 时，波峰间距最小，试验所得波纹管的波峰间距为 7.50 mm，有限元模拟所得的波峰间距为 7.82 mm，有限元模拟结果与试验结果吻合较好。此外，波峰高度随着压缩比从 1.7 增加至 1.9，呈现增大趋势。当压缩比为 1.9 时，波峰高度最大，试验和模拟所得波纹管的波峰高度分别为 18.80 和 19.42 mm，吻合较好。波纹管无模成形过程中，在管材的周向隆起，

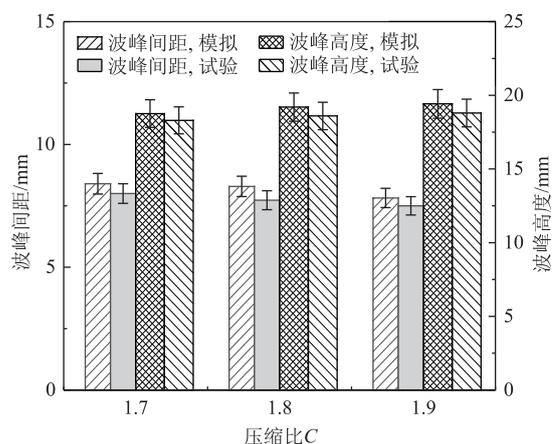


图 6 压缩比对波峰间距和波峰高度的影响

Fig. 6 Effect of compression ratio on peak spacing and peak height

在轴向受到压力作用，随着压缩比的增大，波峰间的距离因为波纹被压缩而逐渐靠近，导致波峰间距减小。同时，随着压缩比增大，管材的隆起高度也逐渐增大，导致波峰高度增大。

图 7 为压缩比对成形载荷最大值和最小值的影响规律。可以看出，随着压缩比的增大，最大成形载荷变化不大，最小成形载荷呈现轻微增加。成形载荷达到最大值时管材发生局部屈曲，屈曲发生的临界载荷仅与管材几何尺寸和材料特性有关。由于变形区温度的波动，导致材料流变应力变化，因此，屈曲临界载荷也出现了波动。屈曲发生后，管材轴向刚度降低，成形载荷下降，到达成形载荷最小值时，波峰高度增加缓慢，新的波纹开始形成。由于压缩比大，管材在轴向压缩时的应变速率大，变形抗力大，成形载荷最小值也较大。

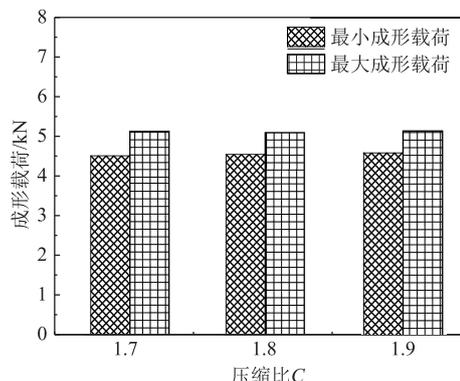


图 7 压缩比对成形载荷最大值和最小值的影响

Fig. 7 Effect of compression ratio on maximum and minimum values of forming load

3.3 变形区宽度对温度分布及波纹形状的影响

图 8 为变形区宽度对管材温度分布的影响，加

热温度为 1200 ℃、加热长度为 17 mm、压缩比为 1.9。通过改变冷却线圈与加热线圈间的距离来改变变形区宽度。由图 8 可知,随着变形区宽度的增加,管材变形区的温度梯度减小。高温区宽度增加较小,低温区宽度增加较多。随着变形区宽度增加,加热线圈与冷却水的距离增大,受加热影响的管材区域增大,温度沿管材轴向降低较慢,形成较低的温度梯度。图 9 为采用不同变形区宽度时管材的温度分布。可以看出,随着变形区宽度的增加,成形过程中高温区的长度增加。相同成形时间下,当变形区宽度较小时,波纹形成的速度较快(图 9a 中第 3 个波纹),同时,在加热长度相同时,适当加大变形区宽度,可以增加波纹管的波峰高度。因此,通过改变水冷线圈和加热线圈间的距离能够有效地改变成形过程中管材变形区的温度分布,从而改变波纹的形状。

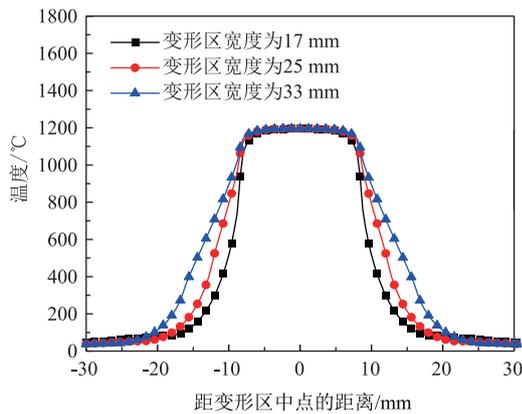


图 8 变形区宽度对管材温度分布的影响
Fig. 8 Effect of deformation zone width on temperature distribution of tube

图 10a 和图 10b 分别为变形区宽度对波峰高度、

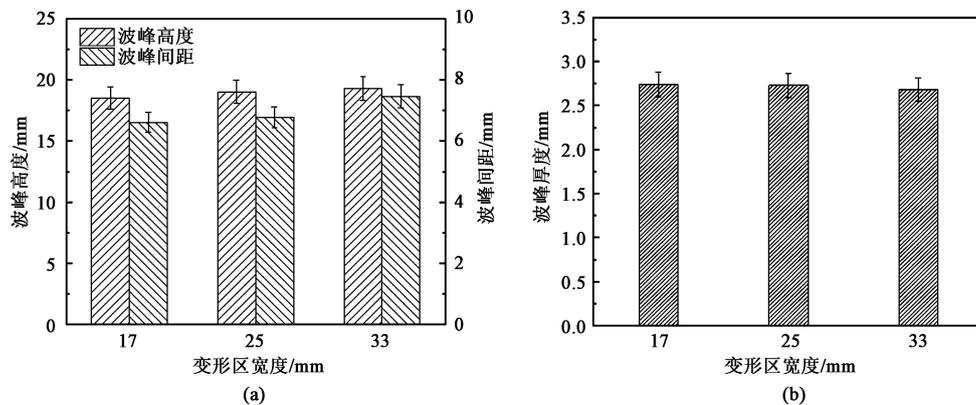


图 10 变形区宽度对波峰高度和波峰间距 (a) 及波峰厚度 (b) 的影响
Fig. 10 Effects of deformation zone width on peak height and peak spacing (a) and peak thickness (b)

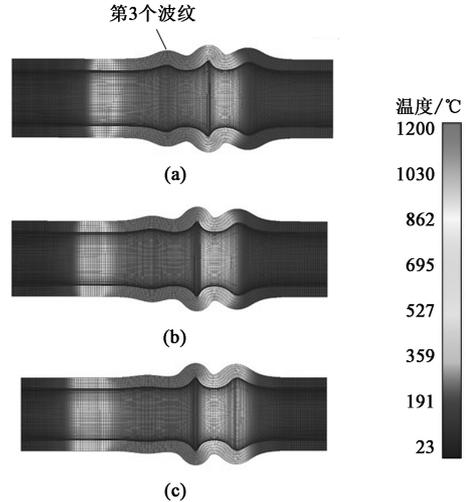


图 9 采用不同变形区宽度时管材的温度分布图
(a) 17 mm (b) 25 mm (c) 33 mm
Fig. 9 Temperature distribution diagrams of tube under different deformation zone widths

波峰间距和波峰厚度的影响。由图 10 可知,随着变形区宽度的增加,波峰间距和波峰高度均呈现增大趋势,波峰厚度呈现微弱下降趋势。当变形区宽度为 33 mm 时,波峰间距约为 7.50 mm、波峰高度为 19.30 mm。随着变形区宽度的增加,波纹管高温区域的长度较大,延缓了波纹进入冷却区的时间,波纹受压缩的时间增加,导致波峰高度增加。同时,变形区宽度增加会导致下一个屈曲发生时间延缓,因此,波峰间距增加。此外,随着变形区宽度的增加,变形区的平均温度升高,变形阻力减小,成形载荷减小,挤压应力减小,使得波纹隆起更加容易,因挤压导致的管材壁厚的增加量减小,因此,波峰厚度增加量减小。

4 结论

(1) 随着加热温度的升高,成形载荷显著降低。当加热温度为1200℃时,成形载荷迅速进入稳定阶段,并呈现稳定的波纹状波动。

(2) 随着压缩比的增加,波峰高度呈增加趋势,波峰间距呈减小趋势。随着压缩比从1.7增加至1.9,波峰高度增加了3.52%,波峰间距缩小了6.9%。

(3) 随着变形区宽度的增加,波峰高度和波峰间距呈现增加趋势,波峰厚度呈现微弱下降趋势。随着变形区宽度从17 mm增加至33 mm,波峰间距增加了13%,波峰高度增加了4.1%。

参考文献:

- [1] 吉慧琴. 浅谈军民两用波纹管的成形[J]. 工程与试验, 2019, 59(3): 105-107.
Ji H Q. Discussion on the forming of military and civilian dual-purpose bellows [J]. Engineering & Test, 2019, 59(3): 105-107.
- [2] 刘锁. 波纹管补偿器失效原因及可靠性探究[J]. 科学技术创新, 2020, (13): 173-174.
Liu S. Investigation on the failure causes and reliability of bellows compensator [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020, (13): 173-174.
- [3] 杨慧毅, 钟玉平, 张小文. 波纹管动力学分析研究进展[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(1): 91-95, 100.
Yang H Y, Zhong Y P, Zhang X W. Development of dynamic analysis of bellows [J]. Development and Application of Materials, 2020, 35(1): 91-95, 100.
- [4] 张益明, 余凌, 吴泽日. 国内波纹管加工发展及其特点[J]. 中国金属通报, 2019, (5): 102-103.
Zhang Y M, Yu L, Wu Z R. Domestic bellows processing development and its characteristics [J]. China Metal Bulletin, 2019, (5): 102-103.
- [5] Kumar Krovvidi S C S P, Goyal S, Bhaduri A K. Design, analysis and experimental validation of Inconel-625 bellows for critical applications [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39: 1733-1737.
- [6] Gomes da Silva M J, Frago H A P, Barrio R C A G, et al. Stress corrosion of an austenitic stainless steel expansion joint, a case study [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 300-310.
- [7] 李江洋, 王伟霞. 汽车进气波纹管隔振研究[J]. 北京汽车, 2020, (5): 28-30.
Li J Y, Wang W X. Research on vibration isolation of automobile intake bellows [J]. Beijing Automotive Engineering, 2020, (5): 28-30.
- [8] 唐冬. 波纹管膨胀节在高炉煤气系统中的腐蚀失效分析[J]. 中国设备工程, 2020, (19): 133-135.
Tang D. Corrosion failure analysis of bellows expansion joints in blast furnace gas system [J]. China Plant Engineering, 2020, (19): 133-135.
- [9] 刘小华. 换热器波纹管使用缺陷及解决方法[J]. 现代农机, 2020, (4): 57-58.
Liu X H. Heat exchanger bellows use defects and solutions [J]. Modern Agricultural Machinery, 2020, (4): 57-58.
- [10] 张丽君, 李彦男, 底柯, 等. 某船用柴油机排气波纹管故障分析与改进[J]. 柴油机, 2020, 42(3): 25-29.
Zhang L J, Li Y N, Di K, et al. Failure analysis and design improvements on exhaust bellow of a marine diesel engine [J]. Diesel Engine, 2020, 42(3): 25-29.
- [11] Lee S W. Study on the forming parameters of the metal bellows [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131: 47-53.
- [12] Liu J, Lyu Z Y, Liu Y, et al. Deformation behaviors of four-layered U-shaped metallic bellows in hydroforming [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3479-3494.
- [13] Kang B H, Lee M Y, Shon S M, et al. Forming various shapes of tubular bellows using a single-step hydroforming process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 194(1-3): 1-6.
- [14] 郭煜敬, 王志刚, 金光耀, 等. 液压成形波纹管减薄率的数值模拟研究[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(1): 58-62.
Guo Y J, Wang Z G, Jin G Y, et al. Numerical simulation research on thickness reduction ratio of the bellows [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47(1): 58-62.
- [15] Jiang L F, He Y, Lin Y C, et al. Influence of process parameters on thinning ratio and fittability of bellows hydroforming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(7-8): 3371-3387.
- [16] Pavithra E, Kumar V S S. Experimental investigation and numerical analysis on fatigue life of bellows [J]. Material Today: Proceedings, 2018, 5(9): 18848-18856.
- [17] 全琼蕊, 陈基东, 谢善, 等. 某发动机波纹管组件裂纹原因分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(24): 178-182.
Quan Q R, Chen J D, Xie S, et al. Analysis on reasons for cracks in bellow component [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(24): 178-182.
- [18] Sun E, Wang T, Zhu S Q. An experimental study of bellows-type fluidic soft bending actuators under external water pressure [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(8): 087005.
- [19] Zhang Z C, Furushima T, Manabe K I, et al. Development of die-less metal bellows forming process with local heating technique [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 229(4): 664-669.