55

螺形波纹管旋压成形过程的尺寸变化特点

李剑,廖丹佩,詹艳然

(福州大学 机械工程及自动化学院,福州 350108)

摘要:目的研究波纹管旋压成形过程中的尺寸变化规律。方法 对螺形波纹管旋压成形过程进行 了数值模拟和实验研究,探究了其应变分布规律及各主要尺寸的变化情况。结果 波峰外径、波距 及轴向长度减小,而波谷外径、母线长度及波谷处壁厚会相应增加。结论 研究结果可为管坯尺寸 选择及制件尺寸的补偿提供依据。

关键词:螺形波纹管;旋压;数值模拟;尺寸变化

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.02.012

中图分类号: TG376.9 文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2016)02-0055-04

Characteristics of the Dimensional Change during the Spinning Process of Spiral Bellows

LI Jian, LIAO Dan-pei, ZHAN Yan-ran

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

ABSTRACT: The work was aimed to study the dimensional change of spiral bellows during the spinning process. Numerical simulations and experimental study were conducted for the spinning process of spiral bellows to find out the law of strain distribution, and the variations of main dimensions. The crest diameter, wavelength, and the axial length were reduced, while the diameter of the trough, the bus length, and the thickness at the trough were increased accordingly. The research results can provide reference for the dimension selection of tube blank, and the dimensional compensation of the workpieces.

KEY WORDS: spiral bellows; spinning; numerical simulation; dimensional change

金属波纹管是一种具有挠性和横向波纹的薄壁管 类零件,在热电系统、敏感元件、化工、医药等行业中有 广泛的应用^[1-3]。波纹管的成形方法有很多种^[4-8],而对 于小直径且任意长度的波纹管,旋压成形是目前最有 效的工艺方案^[9-11],其成形工艺过程为:先将卷料开 卷,卷圆成直筒后将其焊接成直缝焊管,再通过旋压 机旋压成形后盘卷存放,整个过程在一条生产线上连 续进行,管坯只作轴向运动而没有旋转;旋轮保持对 管坯一定的压下量,同时围绕管坯公转,且在管坯摩 擦的作用下自转。由于管坯不旋转,因此这种方法可 以成形任意长度的波纹管,但由于旋轮压过管坯后无 法再返回,只能采用一次成形,因此实现波纹管单道 次稳定旋压是问题的关键。文中通过数值模拟和试 验研究相结合的方法,探讨螺形波纹管旋压成形的应 变分布规律及波纹管各主要尺寸的变化情况。

1 有限元模型的建立

研究的任意长度螺形波纹管形状尺寸如图1所示,材料为304不锈钢。为了探讨此类波纹管旋压成 形后的应变分布规律及主要尺寸的变化情况,本文首 先采用数值模拟方法进行研究。

收稿日期: 2015-12-17

作者简介:李剑(1991—),男,福建人,硕士生,主要研究方向为旋压理论及工艺。

通讯作者: 詹艳然(1961—),女,重庆人,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为塑性成形及模具CAD/CAE。



图1 波纹管零件 Fig.1 Shape of bellows

为了便于数值模拟和旋压工艺试验的顺利进行, 在不改变管坯和旋轮的相对运动关系的条件下,将管 坯和工具的运动进行一定的简化:成形过程中管坯左 端固定(见图2),并随主轴一同旋转;右端不受约束可 自由伸缩;旋轮和V形支撑块在径向以相同的速度相 向进给的同时,匀速轴向运动(见图2a);当管坯绕轴 线转动一圈时,旋轮径向运动到达预设压下位置,此 时支撑块刚好接触管坯(见图2b),此后旋轮和支撑块 不再作径向运动,而是保持匀速轴向运动。



图2 波纹管旋压成形过程



由于波纹管旋压成形属于连续的局部成形,塑性 变形区较小且位置一直在变化,而周围区域处于弹性 状态。为了获得较为精确的数值模拟结果,采用弹塑 性有限元法进行模拟。模拟选取管坯直径为**Φ**35 mm、壁厚为0.8 mm、管坯长度为150 mm;取旋轮直径 为**Φ**140 mm、圆角半径为*R*8 mm。管坯采用精度较高 的4节点壳体单元进行网格划分^[12-13],并且将网格划 分在管坯的外表面。旋轮和支撑块定义为刚体,不进 行网格划分。管坯材料为304不锈钢,其应力-应变 模型为 σ =1426 ε ^{0.28},弹性模量为207 GPa,泊松比为 0.28¹¹⁴;模拟及工艺试验中管坯转速为60 r/min,摩擦 因数为0.05,旋轮压下量为2.7 mm,旋轮和支撑块轴 向进给比为12 mm/r。

2 模拟结果与分析

2.1 应变分布

图 3 为成形结束时,整个波纹管的应变分布情况。由图 3 可知,每个波的各向应变分布基本一致。 成形后波纹管波谷处径向、环向和轴向应变均最大, 且该区域径向应变为正,环向应变和轴向应变均最大, 表明波谷处壁厚增加、直径减小、轴向缩短。从波谷 到波峰,各向应变不断减小,波峰处达到最小,从数值 上看波峰处径向应变与环向应变为负,轴向应变为正 且数值不大,表明波峰处壁厚减小、直径减小而轴向 伸长,但各向应变均较小。



2.2 母线的长度变化

为了分析成形前后波纹管母线和轴线长度的变化,取成形稳定的4个波进行研究,跟踪节点A和B(见图3d),计算变形前两点之间的轴向距离和变形后两点之间沿母线方向的长度。为了便于测量,将两点在管坯外表面沿母线方向上的单元长度总和设为两

点沿母线方向的长度。测量结果如下:旋压成形前两 点的轴向距离为49 mm,成形后两点沿母线方向的长 度为50.51 mm,成形后波纹管母线长度约增加3.1%。

2.3 波距大小

图4所示的是成形结束时,相邻2个波谷之间的距离(波数编号见图3d),可以看出,波距尺寸在一个很小的范围内波动。剔除尚未进入稳态成形阶段的第一个 波距,其他波距的平均值为11.836 mm,标准差为0.014 mm,与图1要求的尺寸12 mm相比减小了1.37%,表明 波纹管旋压成形后轴向尺寸有一定的缩短。



图4 成形后的波距大小 Fig.4 Wavelength at the end of forming

2.4 波纹管内外径尺寸

由于模拟中壳体单元网格划分在管坯外表面,为 了表述及测量方便,这里将波峰处和波谷处的外径作 为波纹管的外径和内径。由图1可知,零件尺寸要求 波峰外径为 Φ35 mm,波谷外径为 Φ29.6 mm。根据模 拟结果,得到波纹管内外径的分布情况(见图5):波纹 管外径平均值为 Φ34.29 mm,标准差为0.09 mm,和目 标波峰外径相比,减小了 2%;波纹管内径平均值为 Φ 31.39 mm,标准差为0.11 mm,与目标波纹管内径相比 增加了 6%。这是由于旋轮与支撑块压力的作用,导 致旋压过程中波纹管横截面变为椭圆形。短轴为旋



图5 波纹管内外径分布

Fig.5 Distribution of inner and outer diameters of the spiral bellows

轮与支撑块方向,其长度为29.60 mm,椭圆横截面的 产生必将导致波纹管内径有所增大。

3 试验研究

为了验证模拟结果的准确性,在PS-CNCSXY750 数控旋压机上进行试验,所用的工艺参数和数值模拟 相同。图6为试验获得的零件。



图 6 试验获得的零件 Fig.6 Bellows formed by spinning experiment

3.1 波距大小

考虑到单独测量每个波距的误差大,采用对旋压 成形结束后波纹管5个稳定波形求平均值的方法来确 定。由图7可知,波纹管后5个波距平均值*L*≈58.5/5= 11.7 mm,与数值模拟结果的平均值11.836 mm相比仅 偏差1.14%,验证了波距模拟结果的准确性。



图 7 试验波纹管波距测量 Fig.7 Wavelength measurement of the test spiral bellows

3.2 波纹管内外径尺寸

为便于与数值模拟结果进行对照,对试验波纹管的测量,也以波峰、波谷的外径作为波纹管的外径与内径,结果如图8所示。从图8可以看出,试验成形的波纹管外径尺寸平均值约为Φ34.36 mm,标准差为0.1 mm,与模拟结果Φ34.29 mm相比偏差0.2%,标准差相差0.01 mm;而内径尺寸平均值约为Φ 31.08 mm,标准差为0.09 mm,与模拟结果Φ31.39 mm相比偏差1%,标准差相差0.02 mm。试验结果与

57

模拟结果基本吻合,验证了模拟结果的准确性。



图8 波纹管内外径分布对比

Fig.8 Distribution of inner and outer diameters of the spiral bellows

4 结论

1)波谷处是变形最大的地方,该处环向和轴向均为压缩应变,径向为伸长应变,宏观表现为该处壁厚增加、直径减小且长度缩短的变形特征;波峰处变形最小,具有壁厚减小、直径减小和长度增加的变形特点。

 2)波纹管旋压成形过程中,波距及波纹管外径 有所减小;内径尺寸及波纹管母线长度有所增加,但 成形后管的轴向长度有少量的减小。

3)在确定旋压工艺参数及初始管坯尺寸的时候,应考虑到成形过程中各主要尺寸的变化情况,尤 其是波纹管横截面变椭圆而使其内径增加的情况,并 进行相应的补偿和控制。

参考文献:

- 谭羽非,陈家新.新型不锈钢波纹管性能及强化传热的实验研究[J].热能动力工程,2003(1):47—49.
 TAN Yu-fei, CHEN Jia-xin. Experimental Study on the Performance of New Type Stainless Steel Corrugated Pipe and Heat Transfer Enhancement[J]. Thermal Power Engineering, 2003(1):47—49.
- [2] FURUSHIMA T, HUNG N Q, MANABE K, et al. Development of Semi-dieless Metal Bellows Forming Process. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213: 1406–1411.
- [3] 赵文珍,任洁,吴洪新,等. 厚壁换热波纹管加工新工艺方法[J]. 沈阳工业大学学报,1996(4):30—33.
 ZHAO Wen-zhen,REN Jie,WU Hong-xin,et al. New Process Method of Thick Wall Heat Transfer Corrugated Pipe[J]. Journal of Shenyang University of Technology,1996(4):30—33.
- [4] 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, 2007,194:1-6.

- [5] 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(2):11—15.
 CAO Bao-zhang, CHEN Yong-zhong, YU Bin, et al. Analysis and Comparison of Shaping Methods of Metal Bellow[J].
 Pipeline Technique and Equipment, 2001(2):11—15.
- [6] FARAJI G, MASHHADI M M, NOROUZIFARD V. Evaluation of Effective Parameters in Metal Bellows Forming Process
 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 3431–3437.
- [7] 王刚,张凯峰,吴德忠,等. 钛合金波纹管超塑成形工艺研究[J]. 锻压技术,2003,28(4):28—31.

WANG Gang, ZHANG Kai-Feng, WU De-Zhong, et al. Superplastic Forming Technology Parameters of Titanium Alloys Bellows[J]. Forging & Stamping Technology, 2003, 28 (4):28—31.

- [8] HASHEMI R, FARAJI G, ABRINIA K, et al. Application of the Hydroforming Strain-and Stress-limit Diagrams to Predict Necking in Metal Bellows Forming Process[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 46:551-561.
- [9] 樊荣珍,杨裕国,李良福.薄壁管螺旋槽的旋压工艺研究
 [J].金属成形工艺,1999,17(1):17—19.
 FAN Rong-zhen, YANG Yu-guo, LI Liang-fu.Research for the Spinning Technology of the Thin Spiral-fluted Tube[J]. Metal forming Technology, 1999,17(1):17—19.
- [10] 杨志军,陈新,李克天,等.基于有限元模拟的内螺纹铜管 旋压成型参数确定[J].塑性工程学报,2010,(4):76—81.
 YANG Zhi-jun, CHEN Xin, LI Ke-tian, et al. Ball Spin Forming Parameters Determination for Inner Grooved Copper Tubes Based on FEM Simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering,2010,(4):76—81.
- [11] 詹梅,石丰,邓强,等.铝合金波纹管无芯模缩径旋压成形 机理与规律[J]. 塑性工程学报,2014,(2):108—115.
 ZHAN Mei, SHI Feng, DENG Qiang, et al. Forming Mechanism and Rules of Mandreless Neck-spinning on Corrugated Pipes[J]. Journal of Plasticity Engineering,2014,2:108—115.
- [12] JEON H M, LEE Y, LEE P S, et al. The MITC3+ Shell Element in Geometric Nonlinear Analysis[J]. Computers and Structures, 2015, 146:91-104.
- [13] SANTOSH KAPURIA, MAYANK PATNI, M YAQOOB YA-SIN. A Quadrilateral Shallow Shell Element Based on the Third-order Theory for Functionally Graded Plates and Shells and the Inaccuracy of Rule of Mixtures[J]. European Journal of Mechanics – A/Solids, 2015, 49:268—282.
- [14] 李维钺. 中外钢铁材料力学性能速查手册[M]. 北京:机械 工业出版社,2006.

LI Wei-yue. Handbook of Mechanical Properties of Iron and Steel Materials at Home and Abroad[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.