

引文格式: 唐浩兴, 杨帆, 路胜海, 等. 管壁螺纹槽渐进成形的变形与缺陷分析[J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 89-93.

TANG Haoxing, YANG Fan, LU Shenghai, et al. Thread grooving deformation and defect analysis of thin-walled tubes during incremental forming[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(10): 89-93.

管壁螺纹槽渐进成形的变形与缺陷分析*

唐浩兴¹, 杨帆¹, 路胜海², 刘龙琴¹, 周银¹, 郑宇¹, 温彤¹

(1. 重庆大学, 重庆 400044;
2. 河钢集团有限公司, 石家庄 050023)

[摘要] 基于单点渐进成形原理, 以外径 38mm、壁厚 1mm 的 Al6061 管为对象, 应用物理试验和数值模拟方法研究了管壁螺纹槽渐进成形的变形特点、壁厚分布及回弹现象。利用 Glock 铰链模型分析了壁厚变化规律, 探讨了槽深度、间距和进给量等对回弹的影响。结果表明, 该渐进成形工艺可实现薄壁管螺纹槽的柔性加工, 实际成形的槽间距参数与设计误差在 6% 以内; 随着槽深度增加, 管壁减薄加剧, 但螺纹槽内壁厚由于变形的“铰链”效应, 底部反而可能增厚; 管壁回弹量随着螺纹槽深度和工具头单次进给量增加而增大, 其中单次进给量为 0.25mm, 比 1.5mm 时的回弹量减少约 40.2%。此外, 较小槽间距(Δl)可使临近材料反复变形并提高结构的局部刚度, 有抑制回弹的作用, 其中 $\Delta l=10\text{mm}$ 比 $\Delta l=50\text{mm}$ 时管壁回弹量减小约 38.5%。

关键词: 渐进成形; 薄壁管; 螺纹槽; 变形; 回弹

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.10.089



唐浩兴

博士研究生, 主要研究方向为薄壁件的成形工艺及缺陷控制。

螺(波)纹薄壁管在航空航天、交通运输等领域的热交换以及动力、输送系统中有着重要应用^[1-2]。目前, 螺纹管的成形方法主要有拉拔、热轧、挤压和滚珠旋压等^[3-4]。其中, 挤压工艺可以通过变换模具上的翅片或沟槽, 得到内凹或外凸螺纹, 效率高、批量生产时效益好; 滚珠旋压工艺中, 钢球使摩擦磨损大幅减少, 模具寿命大幅提高。但整体上, 这些方法均需要专用模具, 特别是在小批量或产品试制时缺乏优势。

渐进成形是一种基于局部成形、连续变形方式的低成本板料柔性加工工艺^[5-7]。近年来, 该工艺逐渐扩展到了管件等多种类型的薄壁件成形, 如管壁的翻孔、局部成形、管端扩(缩)口及压槽等^[8-10]。管壁凹螺纹槽的渐进成形是利用一个简单的棒

状工具头, 通过挤压管壁并配合管坯的自身运动而达到成形效果^[11]。与旋压等工艺相比, 其优点是无须专用模具, 管径及螺纹槽参数调节方便、柔性高, 可大幅节省成本。但目前针对管壁压槽渐进成形的研究很少, 且大多侧重于管壁厚度均匀性、工具头与坯料之间的接触状态, 以及设备参数等对成形质量的影响等。Wei 等^[12]采用了高压水射流加工环形槽。由于摩擦力小, 不需要额外的润滑, 得到的制件壁厚差异小。Grzanic 等^[13]建立了径向压入管壁的解析模型预测壁厚的最大减薄量, 但忽略了弹性变形、高估了成形力。石珣等^[14]研究了内旋压成形槽的三向载荷变化及管壁应变分布情况, 认为主轴转速是主要影响因素。侯晓莉等^[15]以 T3 紫铜材料为例, 研究了管壁内外

* 基金项目: 国家自然科学基金(51575066); 重庆市基础研究与前沿探索专项(cstc2020jcyj-msxmX0420)。

侧应力应变的分布规律,发现连接区的拉力和摩擦力的共同作用使得管壁高度增大,局部位置隆起导致轮廓高度曲线差异变大。Guo^[16]和王成^[17]等认为增加单次进给量虽然增大了成形力,但可以使变形更加均匀。总体上,由于管壁渐进成形的变形模式与在压力机上的传统冲压工艺存在很大差异,目前对相关规律的认识不足,有必要针对实践中普遍存在的回弹控制、壁厚减薄及制件精度低等问题开展研究。

本文利用物理试验与数值模拟,研究了薄壁铝管螺纹槽渐进成形工艺及其变形特点,探讨了管壁的回弹及其影响因素,分析了壁厚的变化规律。

1 试验及方法

管坯材料为 Al6061 铝合金,主要力学性能参数见表 1。图 1 为管壁螺纹槽渐进成形的原理示意。成形设备采用图 2 (a) 所示的 CA6136 卧式车床,主轴控制卡盘带动管坯以角速度 $\omega=45\text{r/min}$ 自转。试样外径 38mm,壁厚 1mm,长度统一为 160mm。工具头材料为 Cr12MoV 模具钢,表面粗糙度 $R_a 1.2\mu\text{m}$,热处理硬度 HRC60,直径 d 为 10mm。螺纹槽设计深度 h 为 0.5mm、1mm 和 1.5mm,相邻槽的设计间距 Δl 为 10mm。

数值模拟在 Abaqus 软件进行,分析模型如图 2 (b) 所示。考虑到渐进成形是一个不断重复加载-卸载的变形过程,为使模拟结果更加精确,应考虑管壁连续变形与局部回弹的交互作用。因此本文采用隐式求解器,成形结束时卸载。材料假设为各向同性强化的弹塑性模型, Ludwig 本构关系为

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$$

式中, σ 、 ε 分别为真实应力与塑性应变。网格采用四边形减缩积分薄壳单元 S4R。

物理试验中,工具头与管之间采用机油作为润滑剂,模拟时接触界面

的摩擦系数设置为 0.2。

2 结果与讨论

2.1 管壁螺纹槽渐进成形的基本变形

图 3 为 3 种不同深度管壁螺纹槽渐进成形的试验与模拟结果。可以看出,螺纹槽分布均匀、清晰。图

3 (b) 的模拟结果中,管壁的等效塑性应变呈现了局部集中现象,且槽深 h 为 1mm 和 1.5mm 时尤为明显。其原因为:(1)成形过程中工具头连续加载造成材料流动不同步;(2)管壁各位置的变形顺序差异导致不协调;(3)工具头卸载后管壁的瞬时回弹

表 1 Al6061 铝合金的材料性能参数
Table 1 Mechanical properties of Al6061

材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	杨氏模量 E/GPa	泊松比 ν	屈服强度 σ_0/MPa	硬化指数 n	强度系数 K
Al6061	2900	68.9	0.33	188	0.5	246.3

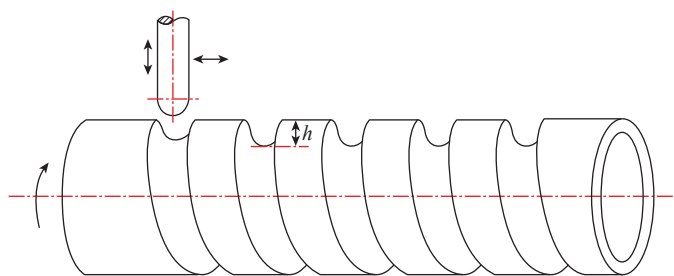


图 1 管壁螺纹槽渐进成形的原理示意
Fig.1 Schematic of thread grooving by incremental tube forming

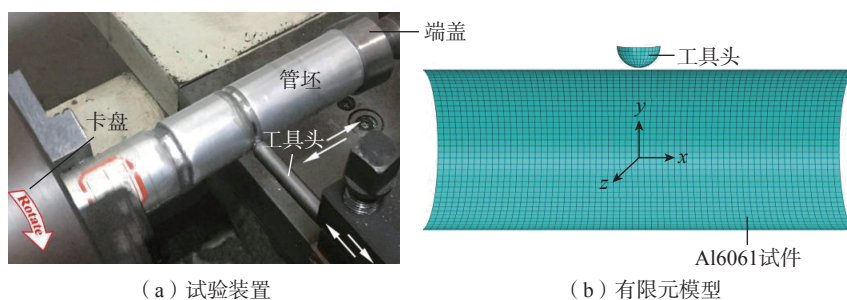


图 2 管壁渐进压槽成形的试验装置与有限元模型
Fig.2 Experimental setup and finite element model of incremental tube wall grooving

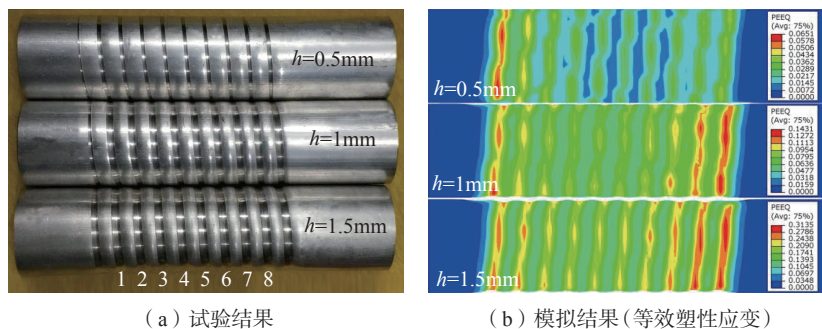


图 3 不同深度的螺纹槽成形结果
Fig.3 Results of incremental tube wall grooving with various denting depths

量不一致。随着槽深增大,应变集中现象加剧。

测量试样中间 8 个槽的间距所得平均值如图 4 所示。可见槽间距与设计值偏差很小(均 <6%),且分布较均匀。

图 5 为相邻螺纹槽间距 $\Delta l=40\text{mm}$,槽深度 $h=3\text{mm}$ 的壁厚分布模拟结果。可以看出,螺纹槽底部出现了增厚,而与管壁连接处的过渡区域则出现减薄。这种壁厚变化现象不同于冲压的胀形等,但可用图 6 所示^[9]的管横截面 Glock 铰链模型解释。在槽中间的 BAB' 区域,当工具头由 A 下压至 A' 时,弧长缩短,因此材料主要受压且向中心聚集, A' 处槽底部材料堆积造成管壁增厚;在 $A'A''$ 之间,随着弧 BA'' 和 $A''B'$ 变长,拉应力开始占主导地位,槽底部壁厚开始减小。因此,当槽深 $h \leq 2.5\text{mm}$ 时,管壁局部增厚随着槽深而增大,而后逐渐减小。局部最大减薄量随槽深度增加而增大,如图 7 所示。而在槽与管壁连接的过渡区域,由于一直为拉应力,因此管壁减薄。

2.2 回弹的影响因素

2.2.1 槽深度与单次进给量

图 8 为一次进给和槽深 $h=1.5\text{mm}$ 时单次进给(0.25mm、0.5mm、0.75mm 和 1.5mm)时的回弹量对比。在每次加载或成形结束后,卸载工具头并待管壁完全弹性回复后再次加载或测量 h 进行计算。可知,一次成形时,槽越深,回弹量越大。模拟比试验

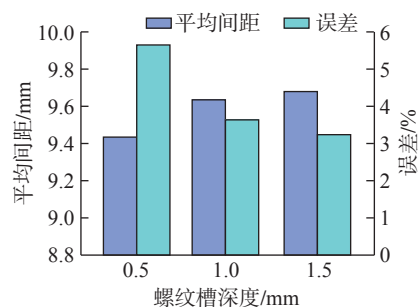


图 4 试验所得螺纹槽的平均间距及其误差
Fig.4 Average spacings and errors for thread grooves with different depths by experiment

结果偏低的原因可能是材料模型中杨氏模量略小,前者弹性变形及回弹占比较少。但二者的平均误差约为 9.73%,精度较高。而多道次成形时,单次进给量越小,回弹越少。如进给量为 0.25mm 比 1.5mm 时的回弹量减少约 40.2%。原因有两点:(1)当进给量较小时,管壁局部变形较小,参与回弹的材料少;(2)多道次加载过程中,后续加载会使已回弹的一部分重新进入塑性状态,减小了弹性变

形所占比例。

2.2.2 槽间距

图 9 和 10 为槽深 $h=1.5\text{mm}$ 时,4 种不同相邻槽间距 Δl (10mm、20mm、40mm 和 50mm)的螺纹管成形的模拟结果。随着 Δl 增大,最大塑性应变逐渐减小,而回弹量逐渐增大。这是由于 Δl 变大,临近区域不参与变形的材料增多,对已变形部分存在一定牵制作用,促进了凹槽的回弹。如果间距较小,在成形相邻槽

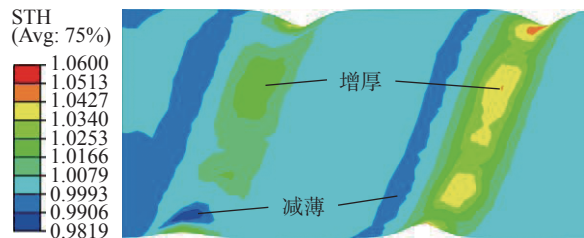


图 5 螺纹管局部厚度分布云图($h=3\text{mm}$)

Fig.5 Contour of thickness for thread groove ($h=3\text{mm}$)

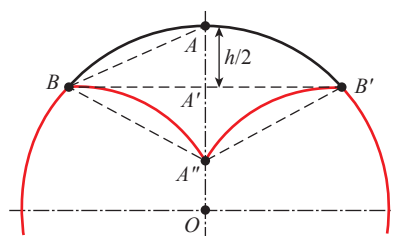


图 6 Glock 铰链模型^[9]

Fig.6 Glock's hinge model^[9]

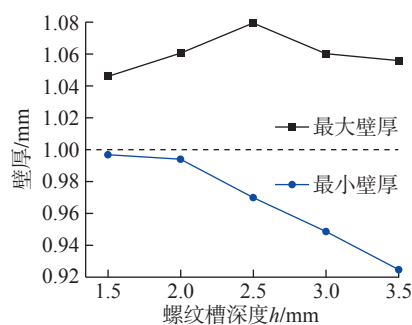
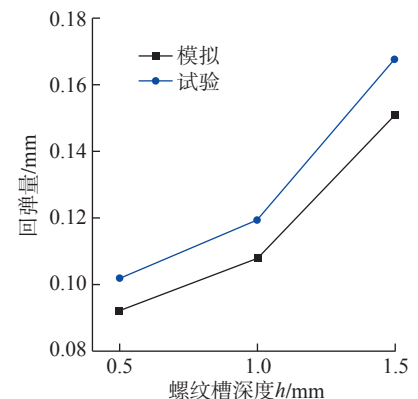
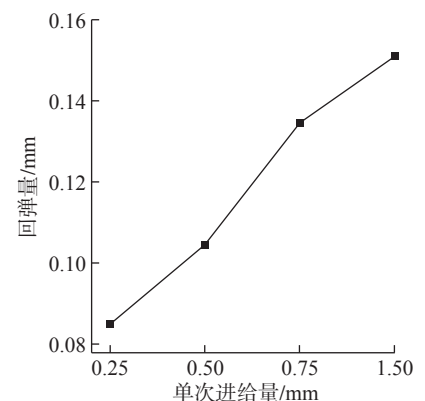


图 7 模拟得到的螺纹管壁厚与槽深度 h 的关系

Fig.7 Relationship between wall thickness and thread groove depth h by simulation



(a) 一次进给成形



(b) 多道次成形 ($h=1.5\text{mm}$, 模拟值)

图 8 螺纹槽深度和单次进给量对回弹的影响

Fig.8 Influences of groove depths and single step size on springback

时,槽之间已变形材料占比增大,有的甚至经历了两次塑性变形(图10中 $\Delta l=10\text{mm}$),同时凹槽导致管壁局部刚度增加,对临近材料的回弹也有抑制作用,故回弹减小。如与 $\Delta l=50\text{mm}$ 相比, $\Delta l=10\text{mm}$ 的回弹量减小了约38.5%。此外,由图11可知,随着 Δl 增大,成形所需合力减小,但总体差别不大。

3 结论

以外径38mm、壁厚1mm的Al6061管为对象,利用试验和数值模拟研究了管壁螺纹槽渐进成形的变形特征。主要结论如下。

(1) 试验所得不同深度的螺纹

槽轮廓清晰、分布均匀,槽间距与设计值误差小于6%,说明该渐进成形工艺可实现薄壁波纹管的小批量加工,柔性高、质量好、成本低。

(2) 随着槽深度增加,管壁减薄加剧;但螺纹槽内壁厚分布与普通胀形不同,由于变形的“铰链”效应,底部可能出现增厚。

(3) 减小工具头的单次进给量可有效地控制管壁回弹,如单次进给量为0.25mm比1.5mm时的回弹量减少约40.2%;同时较小的槽间距 Δl 使得局部刚度提高、材料反复变形,也可抑制回弹,如 $\Delta l=10\text{mm}$ 比 $\Delta l=50\text{mm}$ 管壁的回弹量减小约38.5%。

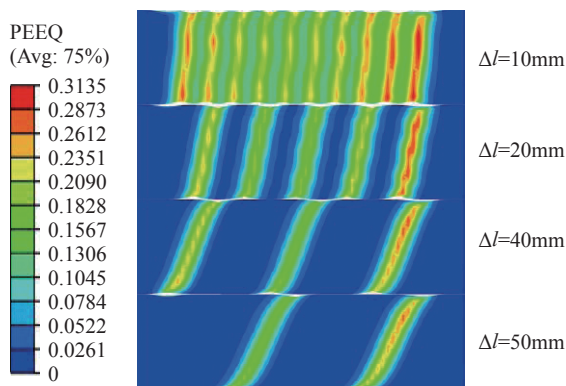


图9 不同间距的等效塑性应变云图($h=1.5\text{mm}$)

Fig.9 Contours of equivalent plastic strain for thread tubes ($h=1.5\text{mm}$)

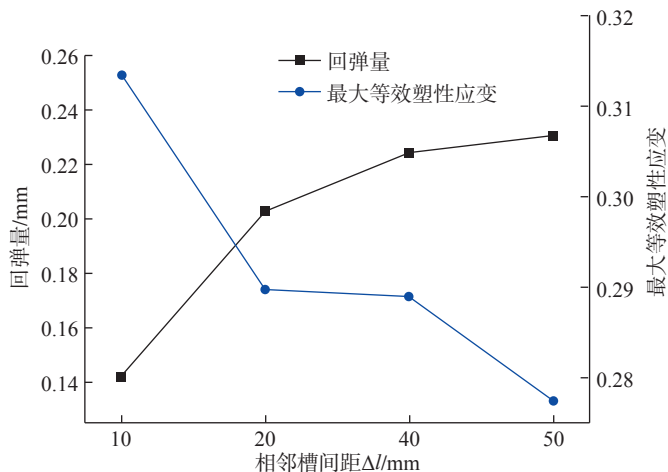


图10 模拟得到的螺纹槽相邻间距对回弹量和最大塑性应变的影响
Fig.10 Influences of adjacent groove spacings on springback and the maximum plastic strain by simulation

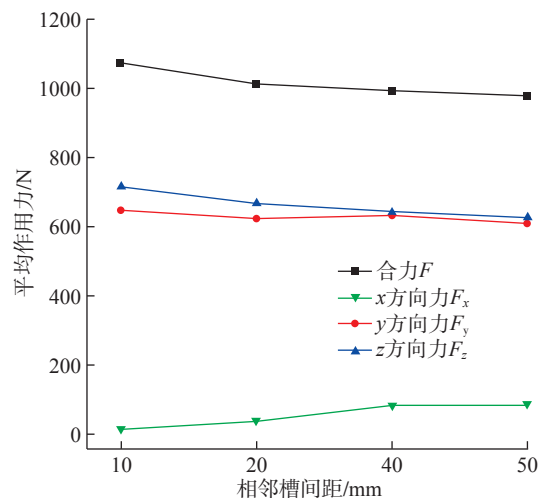


图11 不同间距螺纹槽成形所需各方向分力及合力对比($h=1.5\text{mm}$)
Fig.11 Comparison of components and resultants of forces for forming thread grooves with different spacings ($h=1.5\text{mm}$)

参考文献

[1] 黄世璋,阮波,高效伟.超临界压力低温甲烷波纹管强化换热数值研究[J].航空学报,2017,38(5):120515.

HUANG Shizhang, RUAN Bo, GAO Xiaowei. Numerical investigation of heat transfer enhancement of cryogenic-propellant methane in corrugated tubes at supercritical pressures[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5): 120515.

[2] 严伟,朱景文,周卫雪.金属波纹管液氧流动的涡脱落特性仿真[J].上海航天(中英文),2020,37(6):137-142.

YAN Wei, ZHU Jingwen, ZHOU Weixue. Simulation of vortex shedding characteristics of liquid oxygen flow in metal bellows[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2020, 37(6): 137-142.

[3] KUBOKI T, ISHIKAWA M, KAJIKAWA S, et al. An extrusion method of tube with spiral inner fins by utilizing generation of spiral outer fins/grooves[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 305-308.

[4] 何坤.5083铝合金动态本构模型及内螺纹管成形工艺仿真研究[D].长沙:湖南大学,2018.

HE Kun. Dynamic constitutive model of 5083 aluminum alloy and finite element simulation on the forming process of inner-grooved aluminum tube[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[5] EMMENS W C, VAN DEN BOOGAARD A H. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet

forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 3688–3695.

[6] 王华毕, 魏目青, 徐旺丁. 变角度缓面零件渐进成形刀具轨迹优化[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(2): 59–63.

WANG Huabi, WEI Muqing, XU Wangding. Tool path optimization for variable angle surface parts in single point incremental forming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(2): 59–63.

[7] 方继钊, 温彤, 刘克帆, 等. 基于多向无模渐进成形的薄板柔性卷边工艺[J]. 锻压技术, 2018, 43(6): 42–46, 88.

FANG Jizhao, WEN Tong, LIU Kefan, et al. Flexible curling of thin-walled sheet based on multi-directional incremental forming process without die[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(6): 42–46, 88.

[8] WEN T, ZHENG J, QING J, et al. Outwards and inwards crimping of tube ends by single-point incremental forming[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 854–859.

[9] YANG C, WEN T, LIU L T, et al. Dieless incremental hole-flanging of thin-walled tube for producing branched tubing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11): 2461–2467.

[10] WEN T, YANG C, ZHANG S, et al. Characterization of deformation behavior of thin-walled tubes during incremental forming: A study with selected examples[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9–12): 1769–1780.

[11] TANG H X, WEN T, CHEN X. Incremental grooving of thin-walled tubes filled with discrete media[M]//Forming the Future. Cham: Springer International Publishing, 2021: 2179–2187.

[12] WEI S G, XU L P, HE K, et al. Experimental study on manufacturing metal bellows forming by water jet incremental forming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1–4): 129–133.

[13] GRZANCIC G, LÖBBE C, BEN KHALIFA N, et al. Analytical prediction of wall thickness reduction and forming forces during the radial indentation process in incremental profile forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267: 68–79.

[14] 石珣, 李言, 杨明顺, 等. 金属波纹管单点增量成形过程研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(20): 2507–2514.

SHI Xun, LI Yan, YANG Mingshun, et

al. Study on single point incremental forming processes of corrugated tubes[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(20): 2507–2514.

[15] 侯晓莉, 李言, 石珣, 等. 多波纹金属管单点增量成形试验与模拟研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(6): 58–62.

HOU Xiaoli, LI Yan, SHI Xun, et al. Experiment and simulation on single point incremental forming of multi-corrugated metal tube[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2018, 41(6): 58–62.

[16] GUO X Z, WANG C, XU Y, et al. Incremental forming characteristics of hollow parts with grooves[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(1–4): 829–837.

[17] 王成, 余耀晖, 王辉, 等. H62铜螺旋波纹管增量成形研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 98–102.

WANG Cheng, YU Yaohui, WANG Hui, et al. Research on incremental forming of H62 copper spiral corrugated tube[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 98–102.

通讯作者: 温彤, 教授, 博士, 研究方向为管材成形的新技术、工艺、理论及应用。

Thread Grooving Deformation and Defect Analysis of Thin-Walled Tubes During Incremental Forming

TANG Haoxing¹, YANG Fan¹, LU Shenghai², LIU Longqin¹, ZHOU Yin¹, ZHENG Yu¹, WEN Tong¹

(1. Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, China)

[ABSTRACT] According to the principle of single-point incremental forming, experiment and numerical simulation were employed to study the deformation features, thickness distribution and springback during incremental thread grooving on thin-wall tubes, where Al6061 tubes with outer diameter of 38mm and thickness of 1mm were used. The wall thickness variation was discussed by using Glock's hinge model, and the effects of groove depth, spacing and feed rate on springback were clarified. Results show that incremental tube grooving on tubular parts can meet the demand of flexible manufacturing, and the errors of groove spacing between the experiment and expectation are within 6%. With the groove depth increasing, wall thinning intensifies, but due to the hinge effect the bottom wall thickness may increase. The springback of tube wall increases with a deeper groove and a larger single step size of tool head, the springback decreases about 40.2% when the single step size is 0.25mm compared with 1.5mm. In addition, the materials near the grooves may deform repeatedly and the local structural stiffness will improve under a small groove spacing (Δl), which can inhibit springback, the springback decreases about 38.5% when Δl is 10mm compared with 50mm.

Keywords: Incremental forming; Thin-walled tube; Spiral grooving; Deformation; Springback

(责编 七七)