

铜管变角度增量翻边成形极限的试验研究

侯晓莉, 李 言, 邱 旭, 肖旭东, 杨明顺

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在对薄壁圆管构件进行增量翻边成形时, 管料容易发生破裂、起皱等缺陷, 且材料的变形机制演化复杂, 对加载条件极为敏感, 使得管料在增量翻边成形时的破裂预测和控制比较困难。针对该问题, 选取 T2 紫铜为研究材料, 构建金属管材变角度增量翻边成形试验平台, 采用试验的方式来研究变角度增量翻边成形过程中管料的成形性能, 以实现预测和控制。采用数码显微镜对制件的网格数据进行测量和提取, 并选用插值法对数据进行拟合处理, 分析了变角度增量翻边成形过程中的应变加载路径和制件变形区域的减薄情况, 最终得到关于 T2 紫铜管在变角度增量翻边成形工艺下的成形极限曲线。对成形极限曲线进行分析和研究, 得到了圆管翻边制件破裂区和安全区的应变分布, 实现了制件破裂的预测和控制。

关键词: 变角度; 增量翻边成形; 圆管翻边; T2 紫铜; 破裂; 成形极限曲线

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.022

中图分类号: TG336

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0162-07

Experimental study on forming limit of variable angle incremental flanging for copper tube

Hou Xiaoli, Li Yan, Qiu Xu, Xiao Xudong, Yang Mingshun

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In incremental flanging of thin-walled circular tube components, tube material is prone to fracture, wrinkling and other defects, and the evolution of material deformation mechanism is complex and very sensitive to loading conditions, which makes it difficult to predict and control the fracture of tube material in the incremental flanging forming. Therefore, in order to solve this problem, for T2 copper, a variable angle incremental flanging experiment platform of metal tube was built, and the forming performance of tube material in the variable angle incremental flanging process was studied by experiments to realize the prediction and control of fracture. Then, the mesh data of part was measured and extracted by digital microscope, and the data were fitted by interpolation method. Furthermore, the strain loading path and the thinning conditions of deformation area of parts in the variable angle incremental flanging process were analyzed, and the forming limit curve (FLC) of T2 copper tube under the variable angle incremental flanging process was obtained. Finally, through the analysis and research of FLC, the strain distributions in the fracture and safety areas of circular tube flanging parts were obtained, and the prediction and control of part fracture were realized.

Key words: variable angle; incremental flanging; tube flanging; T2 copper; fracture; forming limit curve

日本学者松原茂夫在 20 世纪 90 年代初最早提出了单点增量成形技术 (Single Point Incremental

Forming, SPIF), 这是一种新型无模塑性等材增量成形技术, 充分利用了“分层制造”思想, 其最大优点在于无需专用模具、柔性好。在过去 20 年间, 国内外学者更多地研究了金属板材单点增量成形加工的成形机理、成形精度、参数优化以及辅助成形等方面, 并取得了大量的研究成果。但各种金属管

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075437, 51905423)

作者简介: 侯晓莉 (1979-) 女, 硕士, 工程师

E-mail: xiaolihou@xaut.edu.cn

Xu X F, Qiu Z Y, Hua R Y, et al. Influence of internal pressure and relative wall-thickness on thin-walled tube bending forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 77-84.

[14] Oh I Y, Han S W, Woo Y Y, et al. Tubular blank design to fabricate an elbow tube by a push-bending process [J]. Journal of

Materials Processing Technology, 2018, 260: 112-122.

[15] Xu X, Fan Y, Wu Y, et al. A novel differential lubrication method for push-bending of L-shaped thin-walled tube with 1D bending radius [J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14: 691-701.

材在工业领域中有着广泛的应用,可以借鉴研究金属板材单点增量成形时的思路 and 想法对金属管端成形加工开展研究。

渐进翻边成形极限主要受制于成形区的材料减薄,从而导致成形制件的破裂。Jeswiet J 等^[1]总结了对成形极限影响较大的 4 个因素,即加工材料的厚度、层进给量、进给速度及工具头大小。周六如^[2]通过对成形的圆锥台及直壁筒形件进行测量,发现材料的厚度变化遵循正弦定律,增加变形区初始厚度可以增加翻边极限。Bhattacharya A 等^[3]和 Li Y L 等^[4]在未选取一定成形工具尺寸的情况下分别研究了轴向进给量对成形极限的影响,得到了不同的结论,成形工具尺寸与轴向进给量存在交互影响,需要进一步的研究。

将单点增量成形技术应用在管材翻边成形中可以有效地降低高强度材料的弯矩^[5],但是,在试验中也发现该工艺过程会使得管材出现一些严重缺陷,如起皱、变形磨损和断裂等^[6-7]。贾俐俐等^[8]以筒形件在单点增量成形过程中的壁厚均匀化和成形极限为目标,对多道次加工轨迹进行优化,获得了高径比为 0.5 的直壁筒形工件。李娟等^[9]对异形孔的翻边性能进行研究,发现外曲和直线段翻边区域的翻边性能较好,内曲翻边区域由于材料变形较大,翻边性能较差。罗云华等^[10]针对管端内卷成形建立了力学模型,对于管端外翻边成形,从能量的角度出发提出了管材周向变形能的增量控制卷曲翻边规律,最终研究结果表明,周向变形能量越小,容易导致管端发生卷曲变形。Wen T 等^[11-12]利用单点球形工具进行了管端膨胀以及管壁开槽和翻边,研究了不同工艺参数下的成形力、壁厚和几何形状,

并使用锥形工具取代了半球形工具,将单点增量成形扩展到管端区域。吴航等^[13]针对圆管与方管管壁的长圆形和矩形翻孔,设定了多组渐进成形参数的加工方案,探讨了不同加工条件下管壁的变形特点及其影响因素。

国内外学者以提高增量成形质量、降低和避免缺陷为目标,从增量成形的翻边机理、途径方法以及改善手段等多方面开展了学术研究,形成了一定的成果。本文将数字图像显微观测和网格分析法相结合,对管材制件破裂区域的应变分布进行研究^[14-15],分析了变角度增量翻边成形过程中的应变加载路径和制件变形区域的减薄情况,在处理应变数据时引入插值分析法,从而获得 T2 紫铜管材料在变角度增量成形过程中的成形极限,最终实现对该种管材制件破裂失效的预测和控制。

1 成形原理

铜管变角度增量成形的翻边原理如图 1 所示。机床为卧式车床,由成形零件及短芯轴、球头工具棒、三爪卡盘组成成形装置。短芯轴置于金属铜管一端,用于防止三爪夹紧铜管时夹紧力过度作用而导致变形,成形零件及短芯轴随车床主轮回转;球头工具棒安装在车床刀架上做进给运动。图 1a 中, V_x 、 V_z 分别为成形工具沿 X 轴方向(铜管的径向)和 Z 轴方向(铜管的轴向)的进给速度; n 为主轴转速; t_0 、 t 分别为铜管的原始厚度和变形后厚度; R 、 r 分别为金属铜管的外半径和内半径; L 为铜管初始长度; α 为成形工具每次偏转的角度变化量。

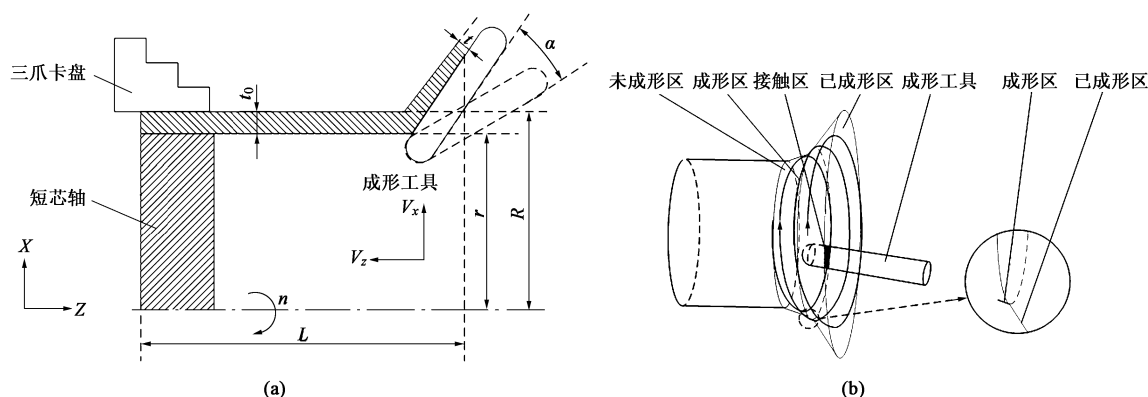


图 1 成形原理 (a) 及成形轨迹 (b) 图

Fig. 1 Forming principle (a) and forming track (b) diagrams

成形过程中,通过刀架控制球头工具棒按照铜

管的翻边高度要求进行偏转,每次偏转时变化角度,

移动至指定位置后沿 Z 轴方向螺旋成形轨迹对管壁进行加工, 完成 Z 向进给后, 球头工具棒退回至起始位置, 改变其与铜管制件管壁间的夹角, 再完成第 2 次 Z 向进给, 如此反复多次角度变化和 Z 向进给来完成多次累加成形的管件预翻边过程^[16]。预翻边过程完成后, 将球头工具棒前移至球头部分接触翻边区域与不变形区域的交界处, 然后球头工具棒沿 X 轴方向进给, 完成铜管翻直边角度校形过程。

2 试验过程

2.1 试验装置及参数

试验平台采用卧式车床, 如图 2 所示。利用三爪卡盘配合短芯轴夹持管料, 短芯轴置于铜管一端内侧, 起到支撑薄壁管件以防止加持端变形的作用。铜管制件由三爪卡盘和短芯轴固定于车床主轴, 随主轴一起做周向回转, 通过调整刀架来实现球头工具棒与管壁之间的角度变化。试验管料选用工业管件常用的 T2 紫铜, 该材料是一种纯铜, 其中含有微量元素, 具有良好的导电性和焊接性、较强的抗腐蚀能力和优良的塑性成形性能。表 1 为试验用铜管制件的主要化学成分组成。球头工具棒采用具有较高刚度、硬度和耐磨性的钨系高速钢磨制, 保证工艺过程中工具不变形。选用昆仑 L-HM46 抗磨液压油为润滑油。



图 2 试验装置

Fig. 2 Experimental device

表 1 T2 紫铜管的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of T2 copper tube (%, mass fraction)

Cu+Ag	Fe	Pb	Sb	As	S	Bi
99.96	0.005	0.005	0.002	0.002	0.005	0.001

薄壁铜管的外径为 $\Phi 69$ mm、总长度为 50 mm、厚度为 1.1 mm。对试验用材料进行拉伸试验, 测得的主要性能参数如表 2 所示。试验中主要成形参数如表 3 所示。

表 2 T2 紫铜管的性能参数

Table 2 Performance parameters of T2 copper tube

参数	密度/ ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 R_m/MPa
数值	8.9×10^{-3}	107.9	0.33	318

表 3 试验中主要成形参数

Table 3 Main forming parameters in experiment

参数	球头工具棒半径/ mm	球头工具棒初始 角度/($^\circ$)	每次增加角度/ ($^\circ$)	主轴转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	轴向进给速度/ ($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)	目标翻边高度/ mm
数值	5	5	5	200	0.1	14

2.2 应变测量

零件的局部区域在生产加工中如出现明显的颈缩痕迹, 即认为零件失效, 但是颈缩是金属材料细微组织发生的变化, 极不易观测。因此, 铜管常温下的翻边成形极限可依据破裂极限定义, 即铜管在变角度增量翻边成形过程中出现任何破损现象即判断此时达到成形极限^[15]。

采用正方形网格分析和显微镜图像相关性的方法完成对变角度增量翻边成形的应变测量, 如图 3 所示。图 3c 中, L_0 为正方形网格变形前的原始边长, L_{ai} 和 L_{bi} 为第 i 条提取带网格变形后的网格长

度和宽度, $L_{a(i+1)}$ 和 $L_{b(i+1)}$ 为第 $(i+1)$ 条提取带网格变形后的网格长度和宽度, 其中 $1 \leq i \leq 3$ 。

因此, 在外管表面上对 $L_0 = 1.5$ mm 的正方形网格进行电化学蚀刻, 以便根据两个相邻点之间的间距变化来确定翻边后铜管长度方向和宽度方向的应变情况。

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{L_a}{L_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{L_b}{L_0} \quad (2)$$

式中: ε_1 为第一主应变, 即翻边后铜管长度方向的

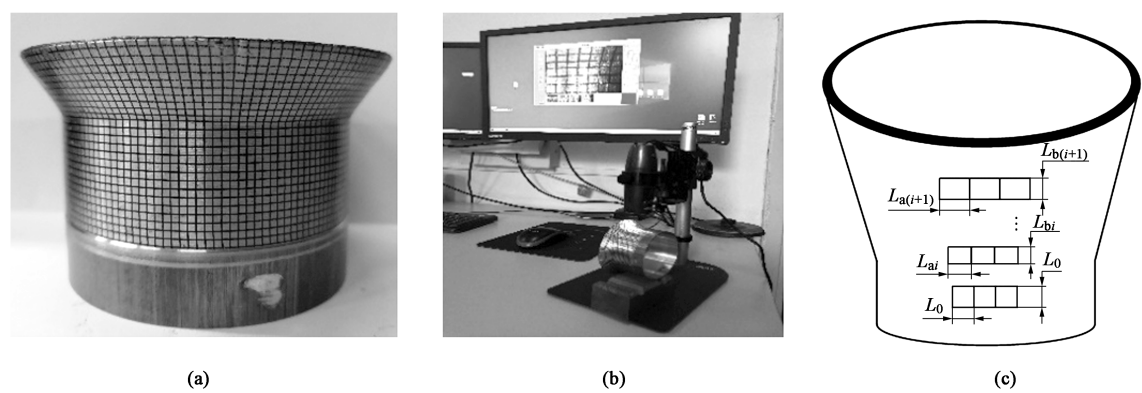


图 3 管端变角度增量翻边成形的应变测量
(a) 成形试件 (b) 显微检测 (c) 应变演变

Fig. 3 Strain measurement of variable angle incremental flanging for tube end
(a) Forming part (b) Microscope measurement (c) Strain evolution

应变； ε_2 为第二主应变，即翻边后铜管宽度方向的应变； L_a 、 L_b 为网格变形后的长度和宽度。

在测量过程中，观测成形过程不同阶段的管端变形情况，以获得特定点的应变演化图。并且，成形过程结束后沿翻边表面子午线方向测量变形情况。测得的 3 条提取带的网格变形数据如表 4 所示。根据表 4 数据计算得到 3 条提取带的应变数据如表 5 所示。

表 5 3 条提取带的长度和宽度方向的应变数据

Table 5 Strain data along length and width directions of three extraction bands

网格数	第 1 条提取带		第 2 条提取带		第 3 条提取带	
	ε_1	ε_2	ε_1	ε_2	ε_1	ε_2
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.008	-0.054	0.007	-0.063	0.000	-0.054
3	0.004	-0.355	-0.040	-0.398	-0.040	-0.388
4	0.017	-0.235	0.038	-0.261	-0.060	-0.272
5	0.058	-0.223	0.059	-0.233	0.017	-0.255
6	0.088	-0.183	0.100	-0.168	0.059	-0.217
7	0.167	-0.207	0.111	-0.174	0.110	-0.193
8	0.251	-0.204	0.243	-0.120	0.119	-0.176
9	0.311	-0.138	0.311	-0.114	0.242	-0.135
10	0.329	-0.125	0.454	-0.095	0.245	-0.127
11	0.313	-0.080	0.592	-0.087	0.245	-0.089
12	0.315	0.075	0.645	0.031	0.255	0.083

表 4 3 条提取带实测网格变形数据 (mm)

Table 4 Actual measured mesh deformation data of three extraction belts (mm)

网格数	第 1 条提取带		第 2 条提取带		第 3 条提取带	
	L_{a1}	L_{b1}	L_{a2}	L_{b2}	L_{a3}	L_{b3}
1	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500	1.500
2	1.513	1.421	1.511	1.409	1.500	1.421
3	1.506	1.052	1.441	1.007	1.441	1.018
4	1.525	1.186	1.557	1.156	1.413	1.143
5	1.589	1.200	1.591	1.188	1.525	1.162
6	1.638	1.249	1.657	1.268	1.591	1.207
7	1.772	1.220	1.676	1.260	1.674	1.237
8	1.927	1.224	1.912	1.330	1.689	1.258
9	2.048	1.307	2.048	1.339	1.910	1.311
10	2.084	1.324	2.363	1.364	1.916	1.322
11	2.050	1.385	2.711	1.375	1.916	1.373
12	2.055	1.617	2.858	1.547	1.936	1.630

3 结果和讨论

图 4 中展示了变角度增量成形管端翻边过程中翻边变形区域各个点的应变加载路径。如图 4 所示，

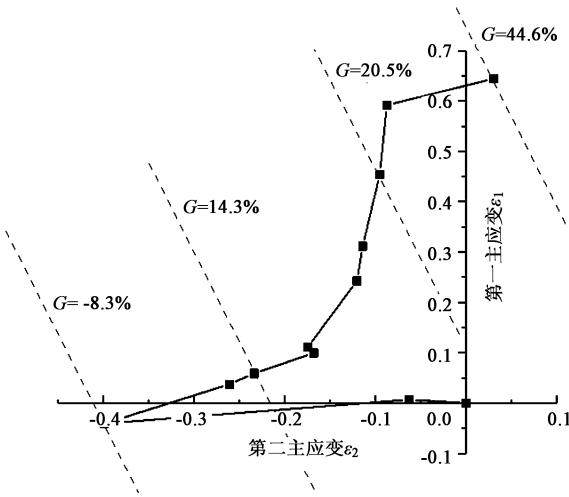


图 4 翻边变形区域的应变加载路径
Fig. 4 Strain loading paths in flanging deformation area

变角度增量翻边成形时,铜管从减薄量 $G = 14.3\%$ 开始接近线性变化趋势。减薄量在应变加载路径上的变化差异表明,增量成形管端的翻边断裂是在沿整个管末端周边产生大量变薄后而实现的。同时发现,在翻边根部和原管件连接处出现周向和轴向均受压的现象,呈现压应力,材料内部在挤压过程中向该区域流动。

3.1 减薄情况

试验中翻边的目标高度为 14 mm,翻边的最终高度约为 15 mm。为研究铜管翻边厚度的减薄状况,采用电火花线切割机沿成形制件的径向方向,切取宽度为 2 mm 的切片,沿翻边区域由管内向管端方向均匀标记 14 个取样点,厚度值记为 S_j ,取样点位置如图 5 所示。使用基恩士廓形仪观察每个取样点处对应的厚度值。

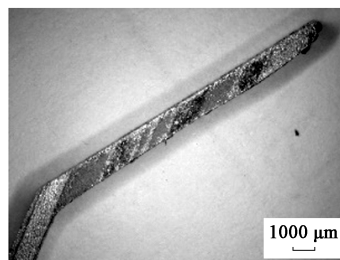
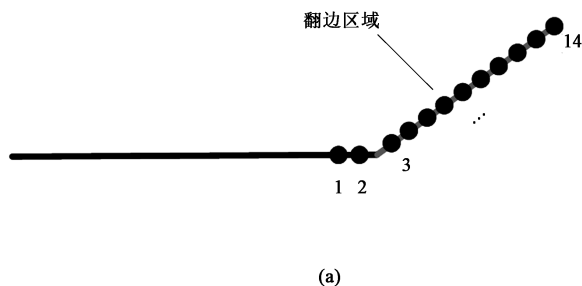


图 5 成形制件取样点位置

(a) 取样点示意图 (b) 试样切片

Fig. 5 Locations of sampling points for forming part

(a) Schematic diagram of sampling points (b) Specimen slice

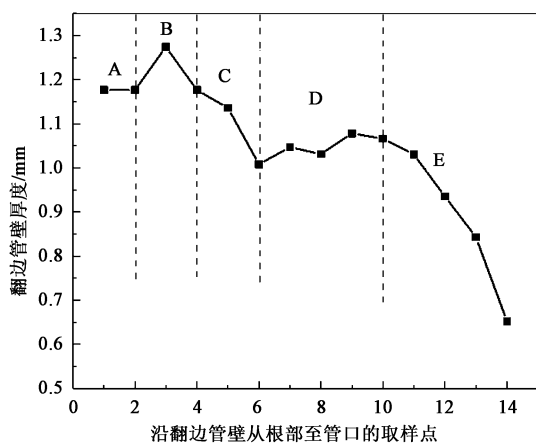


图 6 成形制件的厚度变化曲线

Fig. 6 Thickness variation curve of forming parts

3.2 成形极限

由于测量数据存在离散性、跳跃性和人为测量误差,因此,通过对区间内的数值进行插值能够有

效地减少数据跳跃并去除误差数据点。数值分析中常用三次样条插值法,因为其函数的高准确性和平滑可导性而被广泛应用。

将观测数值导入 Origin 软件,得到如图 6 所示变化曲线,可以明显看到减薄情况在铜管制件的不同区域存在差异。其中,区域 A 为管件初始状态;区域 B 为管材弯角附近,由于管材弯曲导致材料向周围流动,弯角处周围的厚度反而增加;区域 C 为弯曲处与变形区域中部的交界处,由于材料流动及管材变形量的影响,管材厚度逐渐减小;区域 D 为靠近管端部分,厚度有轻微的波动,但是几乎无减薄现象,这是由于成形工具的轴向进给过程将管端材料向翻边区域中部挤压,引起材料局部积累,从而导致该区域的局部厚度增加;区域 E 为管端部分,由于材料参与变形量大,沿管端整个周向发生大量减薄后引发管材断裂,导致材料严重减薄,壁厚的急剧降低与沿整个管端周边出现的微裂纹有关。

效地减少数据跳跃并去除误差数据点。数值分析中常用三次样条插值法,因为其函数的高准确性和平滑可导性而被广泛应用。

本文利用 MATLAB 编写三次样条插值程序来完成数据的拟合。将翻边成形破裂区域内 1~12 的网格编号设置为初值 X_0 ,插值步长选取为 0.05, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为 3 条提取带上测量的长宽方向的实际变形。将翻边成形后矩形网格的长轴形变量 (L_a) 记为横向网格形变,将短轴形变量 (L_b) 记为纵向网格形变,得到分别如图 7 和图 8 所示的横纵向网格形变插值曲线^[14-15]。

由图 7 和图 8 中被测的 3 条变形带数据的插值曲线看出,网格形变插值曲线的整体重合度较高,横向网格形变插值曲线在第 9 和第 10 网格出现了较大误差,这是因为已经处于最大形变(破裂区)。如图 9 所示,第 9 网格未破裂,但是第 10 网格则明

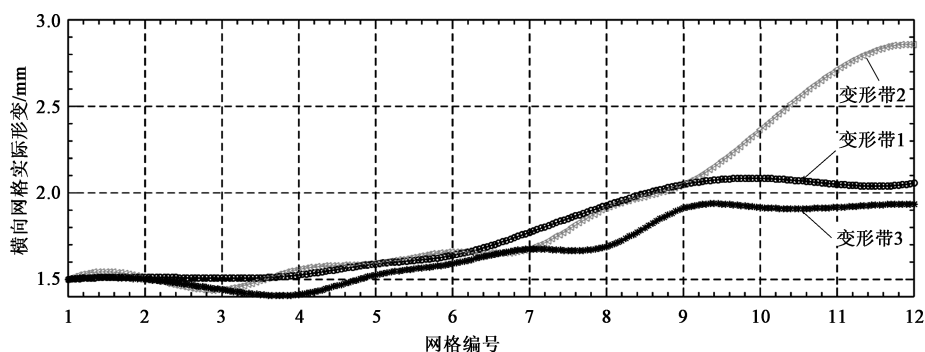


图 7 横向网格形变插值曲线

Fig. 7 Interpolation curves of transverse mesh deformation

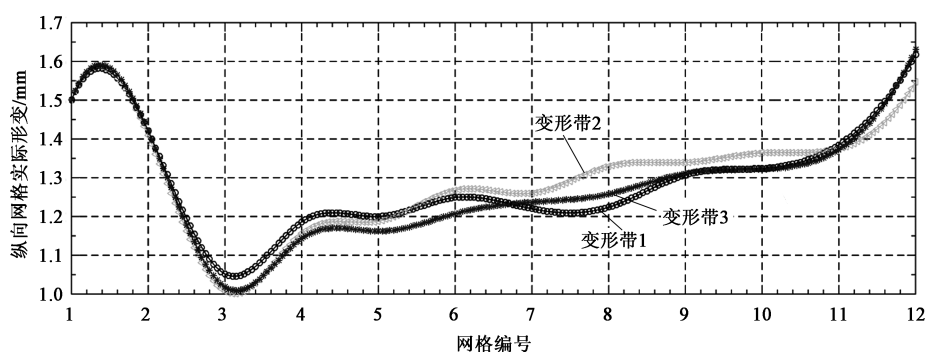


图 8 纵向网格形变插值曲线

Fig. 8 Interpolation curves of longitudinal mesh deformation

显破裂, 因此, 提取第 9 和第 10 网格连续区间插值拟合曲线数据作为成形极限来绘制成形极限曲线 (Forming Limit Curve, FLC)。将形变矩形网格长度方向的应变作为平面第一主应变 ε_1 , 将宽度方向的应变作为平面第二主应变 ε_2 , 得到破裂区第 9 和第 10 网格的极限应变, 然后绘制为如图 10 所示的 T2 紫铜管的成形极限曲线^[15]。依图 10 可见, FLC 将整个区域分为安全区与破裂区, 安全区在 FLC 以下, 此时可以认为管料的变形是安全的, 而在 FLC 以上时管料则会发生失稳或破裂。通常仿真模拟时使用 Keeler 公式来实现 FLC 方程, 然而通过大量钢材试验推导出的 Keeler 公式并不能很好地预测紫铜等其他材料的拉伸、胀形等成形过程。若将试验获得的 FLC 作为模拟时的破裂判据, 则能更准确地预测成形过程中的破裂问题^[17]。从而有效地指导改进成形形状、工具、润滑条件等成形工艺, 以获得最优的成形性和生产率。

4 结论

(1) 从减小成形力、提高增量成形质量角度出

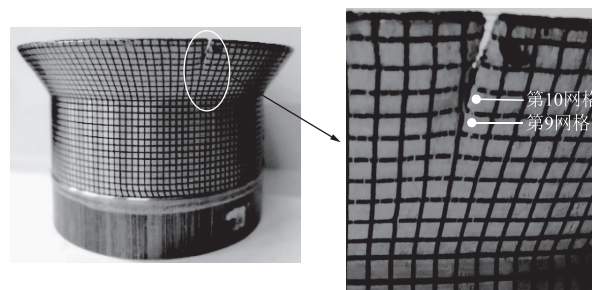


图 9 实际破裂区域

Fig. 9 Actual fracture area

发, 本文提出了一种金属管材变角度增量翻边成形技术, 分析了该工艺的原理, 并通过搭建试验平台验证了该工艺的可行性。

(2) 该成形工艺在轴向进给过程中将管端材料向翻边区域中部挤压, 引起材料局部积累, 从而导致区域厚度局部增加, 而在金属管末端显著且均匀的变薄之后, 管末端没有颈部发育, 在大量局部拉伸后会导致破裂。

(3) T2 紫铜管在变角度增量翻边成形工艺下的形变量处于毫米级, 将印制网格和数码显微镜相结合来测量破裂区域的网格, 从而获取制件的成形极

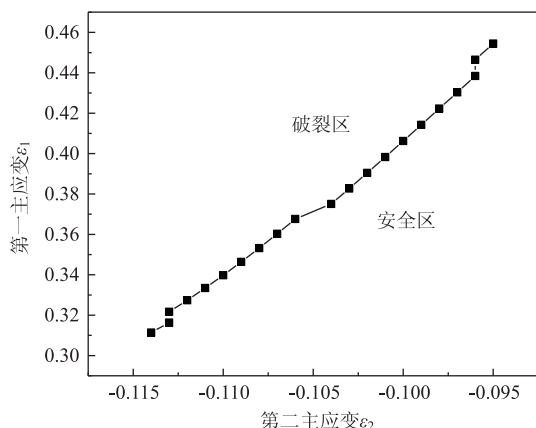


图 10 T2 紫铜管的成形极限曲线

Fig. 10 Forming limit curve of T2 copper tube

限。经试验验证,该方法兼具一定的实用性和可行性。为了避免离散数据误差,提出基于插值曲线的数据优化处理方法,分析了拟合优化的T2紫铜成形极限曲线,得到了该材料制件在变角度增量翻边成形工艺下破裂区域的应变分布情况,实现了制件破裂的有效预测和控制。

参考文献:

- [1] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54 (2): 88-114.
- [2] 周六如. 板料数控增量成形变形区厚度变化规律的研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (18): 50-54.
Zhou L R. Research on the thickness change laws in numerical control incremental sheet forming [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (18): 50-54.
- [3] Bhattacharya A, Maneesh K, Reddy N V, et al. Formability and surface finish studies in single point incremental forming [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2011, 133 (6): 621-627.
- [4] Li Y L, Liu Z B, Lu H B, et al. Experimental study and efficient prediction on forming forces in incremental sheet forming [J]. Advanced Materials Research, 2014, 939: 313-321.
- [5] Becker C, Tekkaya A E, Kleiner M. Fundamentals of the incremental tube forming process [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63 (1): 253-256.
- [6] 刘天聪. 翻边成形制件的常见缺陷及修正方法 [J]. 模具技术, 2000, (4): 70-73.
Liu T C. The common-flaws of the flange and correction measure [J]. Die and Mould Technology, 2000, (4): 70-73.
- [7] Bagudanch I, Centeno G, Vallengano C, et al. Forming force in single point incremental forming under different bending conditions [J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 354-360.
- [8] 贾俐俐, 高锦张, 王书鹏. 直壁筒形件多道次增量成形工艺研究 [J]. 中国制造业信息化, 2007, 36 (19): 133-135.
- [9] 李娟, 陈东升, 王辉, 等. 2024 铝合金异形孔渐进成形工艺研究 [J]. 精密成形工程, 2018, 10 (4): 55-60.
Li J, Chen D S, Wang H, et al. Research on incremental forming process of 2024 aluminum alloy with special shaped hole [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10 (4): 55-60.
- [10] 罗云华, 张祥林, 黄早文. 管材向内翻卷变形的力学分析 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33 (12): 16-18.
Luo Y H, Zhang X L, Huang Z W. Mechanical analysis of the deformation produced by internal inversion on round tubes [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2005, 33 (12): 16-18.
- [11] 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]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78 (9-12): 1769-1780.
- [12] 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.
- [13] 吴航, 游建豪, 周银, 等. 管壁异形渐进翻孔成形的力与变形特征分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (8): 103-108.
Wu H, You J H, Zhou Y, et al. Analysis on force and deformation characteristics of incremental hole-flanging on tube wall with special shapes [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (8): 103-108.
- [14] 张成兴. 1060 铝薄板超声振动单点增量成形极限研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
Zhang C X. Research on Forming Limit of Ultrasonic Vibration Single Point Incremental Forming of 1060 Aluminum Sheet [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [15] 侯晓莉, 李言, 杨明顺, 等. 铝板数控单点渐进成形的成形极限曲线研究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (8): 960-967.
Hou X L, Li Y, Yang M S, et al. Research on FLC in CNC single point incremental forming of aluminum sheets [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (8): 960-967.
- [16] 邱旭, 高新勤, 侯晓莉, 等. 金属管材变角度单点渐进翻边成形方法研究 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (4): 566-572.
Qiu X, Gao X Q, Hou X L, et al. Research of forming method of variable angle single point in incremental flanging of metal tube [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41 (4): 566-572.
- [17] 曹晓卿, 刘毅, 王敬伟, 等. AZ31 镁合金薄板在热态下的成形极限图及其应用 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (3): 550-554.
Cao X Q, Liu Y, Wang J W, et al. Forming limit diagram and application of AZ31 magnesium alloy sheet at elevated temperatures [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (3): 550-554.