

材料与成形性能

薄壁钛管差温剪切弯曲减薄及扁化特性实验研究

闫晶^{1,2,3}, 吴为^{1,2,3}

(1. 塑性成形技术航空科技重点实验室, 北京 100024; 2. 数字化塑性成形技术及装备北京市重点实验室, 北京 100024; 3. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘要: **目的** 管材差温剪切弯曲成形技术,是实现极小弯曲半径(中心线弯曲半径小于管径)薄壁钛管制造的新型技术。管材的减薄及扁化特性,是实现该过程成形质量精确控制迫切需要解决的关键问题。**方法** 采用实验方法,研究了工艺参数对TA2薄壁钛管差温剪切弯曲过程减薄和扁化的影响。结合响应面法,获得了实验条件下的弯管成形极限。**结果** 管模间摩擦越大,或弯曲行程 H 越大,或外圆角半径 r_o 越小,管材减薄和扁化均越大。**结论** 内圆角半径 $r_i=4.00$ mm,外圆角半径 $r_o=14.15$ mm是管材最佳的弯曲半径匹配, $H \in [30$ mm, 32 mm]能够保证管材稳定成形。

关键词: 减薄; 扁化; 薄壁钛管; 剪切弯曲; 差温约束

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.02.001

中图分类号: TG113.26; TG416.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)02-0001-07

Experimental Study on Thinning and Flattening Characteristics in Shear Bending Process of Ti-alloy Thin-walled Tube under Differential Temperature Fields Constraints

YAN Jing^{1,2,3}, WU Wei^{1,2,3}

(1. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technology, Beijing 100024, China; 2. Beijing Key Laboratory of Digital Plastic Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China; 3. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

ABSTRACT: Tube shear bending technology under differential temperature fields constraints (DTFCs) is a new technology for manufacturing Ti-alloy thin-walled tubes (TATTs) with ultra-small bending radii (tube bending radii < diameters). The thinning and flattening characteristics have become key problems urgently to be solved for improving forming qualities in the shear bending processes under DTFCs of TATTs. The effects of the forming parameters on the thinning and the flattening in these processes of TA2 TATTs were studied using the experimental approach. By combining this approach with the response surface method, the forming limits under the experimental conditions were determined. The larger the friction between the tubes and the dies, the larger the H , or the smaller the r_o , the larger the thinning and the flattening. $r_i=4.00$ mm, and $r_o=14.15$ mm were the optimal combination of the bending radii, and $H \in [30$ mm, 32 mm] enabled stable forming of the tube.

KEY WORDS: thinning; flattening; Ti-alloy thin-walled tube; shear bending; differential temperature fields constraints

极小弯曲半径(中心线弯曲半径小于管径)薄壁 钛管,作为一种关键的轻质高强高性能紧凑管形构

收稿日期: 2016-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51305415)

作者简介: 闫晶(1981—),男,哈尔滨人,博士,高级工程师,主要研究方向为航空钣金成形技术。

件,结合了材料和结构的优势,具有优异的服役性能,在航空、航天等高技术工业将得到越来越广泛的应用。这也迫切需要研究和发展极小弯曲半径薄壁钛管件的成形制造技术。

现有的管材剪切弯曲成形技术^[1]和管材充液剪切弯曲成形技术^[2],均为在室温下的成形过程,由于薄壁钛管室温变形抗力大、塑性低,室温成形难度较大,因此,管材差温剪切弯曲成形技术,为实现极小弯曲半径薄壁钛管的制造提供了新的思路。图1为薄壁钛管差温剪切弯曲成形过程,融合了管材剪切弯曲成形技术和管材不同区域差温控制技术的优势,成形前加热薄壁钛管,提高了难变形材料剪切、弯曲变形的能力;冷却气流降低了管材直段传力区的温度,增加了传力区的承载能力,提高了管材弯曲的成形极限。该技术具有高效省力、成本低和提升难变形材料成形性的优点。

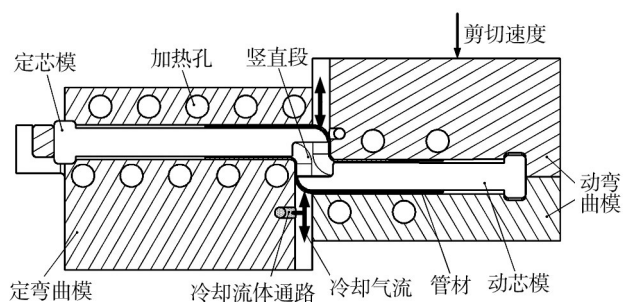


图1 管材差温剪切弯曲示意图

Fig.1 Schematic diagram of tube shear bending process under DTFCs

然而,与传统管材绕弯^[3-5]和推弯^[6]成形技术相比,薄壁钛管差温剪切弯曲过程的应力状态更加复杂,管材内弧面受压,外弧面受拉,竖直段传力区受拉剪。在这样的应力状态下,管材外弧面以及直段传力区易于出现薄厚过度减薄和截面过度扁化的缺陷。管材的减薄和扁化特性已成为实现该过程成形质量精确控制的关键问题。

几十年来,国内外学者分别采用理论解析^[7-8]、数值模拟^[9-12]以及实验研究^[13-15]的方法,研究了管材弯曲过程的减薄和扁化问题。理论解析方法,需要基于实验结果,提出合理的假设,建立壁厚和扁化的理论预测模型,具有明确的物理意义,但是,薄壁钛管差温剪切弯曲过程管材壁厚分布较为复杂,理论解析难以准确全面地获得弯管壁厚和扁化的分布规律^[7-8];采用数值模拟方法研究弯管过程的减薄和扁化,需要结合实验结果,验证有限元分析的可靠性^[9-12];采用实验法研

究薄壁钛管差温剪切弯曲成形过程,不仅可以直观研究管件弯曲的成形规律和分析成形缺陷,获取第一手真实可靠的实验数据,而且可以验证理论分析与有限元模拟结果^[15]。

文中针对TA2薄壁钛管,开展了薄壁钛管差温剪切弯曲实验,研究了工艺参数对薄壁钛管差温剪切弯曲过程减薄和扁化的影响规律,结合响应面法,获得了实验条件下的弯管成形极限。

1 实验

1.1 管材力学性能

针对直径为32 mm,壁厚为1.5 mm的TA2薄壁钛管,依据GB/T 228—2002和GB/T 4338—2006,分别开展室温和热态拉伸测试,获得管材不同温度下的力学性能。管材试样采用线切割沿管材表面加工。对于TA2钛合金,传统热成形温度范围为500~600℃,温度越高,零件氧化越严重,同时,材料晶粒度也会增加。在保证材料变形抗力在一定程度降低的同时,尽可能地选择较低的成形温度,将有利于材料性能的控制^[16]。选择TA2钛管剪切测试的温度范围为300, 350, 400, 450, 500℃,针对每个温度点,分别在不同恒应变速率(0.005, 0.01, 0.05 s⁻¹)条件下,采用高温引伸计测量管材应力-应变曲线,同时记录管材的力学性能。

图2为不同温度下管材的平均力学性能。可以发现, T 越高,管材的屈服强度和断裂强度越低。当 $T \in [400^\circ\text{C}, 500^\circ\text{C}]$ 时,材料的屈服强度的变化不大(见图2a)。由图2b可知,随着 T 的增大, δ 先增大再减小,当 $T=400^\circ\text{C}$ 时, δ 最大, $T>400^\circ\text{C}$ 时, δ 开始减小,但仍然高于室温下的测量结果。可以说,当 $T=400^\circ\text{C}$ 时,管材的塑性和变形抗力达到了最佳匹配。由于管材剪切弯曲过程材料的变形程度较大,管材对模具的反力较大,所以,应该优先考虑降低材料的变形抗力,以提高工装模具抵抗失效的能力。最终,选择 $T \in [400^\circ\text{C}, 450^\circ\text{C}]$,为管材理想的成形温度范围。

1.2 方法

1.2.1 实验条件

针对TA2薄壁钛管,开展管材差温剪切弯曲的实验,实验装置见图3,由弯曲成形模具、冷却气源和ACB-250t热成形机床组成。冷却气源为氩气,通过气管与成形模具相连。模具材料为铸钢ZG35Cr24Ni7SiN。

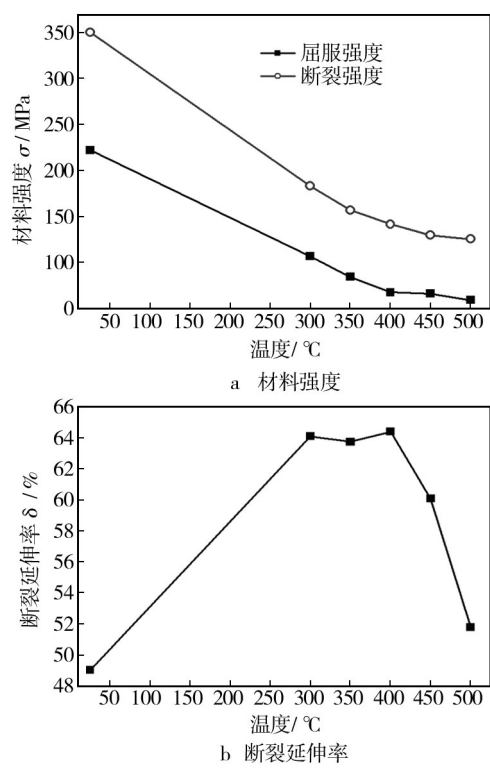


图2 TA2管材平均力学性能
Fig.2 Average mechanical properties of TA2 tube

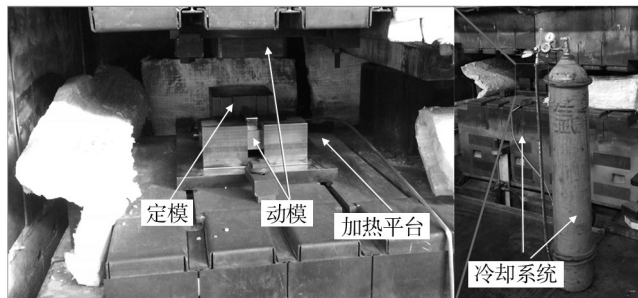


图3 薄壁钛管差温剪切弯曲实验装置
Fig.3 Experimental apparatus of TATT shear bending process under DTFCs

成形前模具由热成形机床的上下平台闭式加热，隔热保温效果好，能够保证模具实现均匀加热。模具温度由置于模具中热电偶测量，热电偶位于弯曲模型腔径向，距弯曲模型腔10~15 mm，模具达到成形温度后，将管材置于弯曲模型腔，通过热模具闭式加热带材。管材加热开始，模具温度低于成形温度50℃左右，这是由于管材自身温度较低引起的模具温降，但是由于管材热阻较小，只需10~15 min，就能较均匀地达到成形温度。然后，定弯曲模和定芯模固定不动，动弯曲模和动芯模以一定的速度竖直向下运动，对管材施加剪力，管材发生剪切弯曲变形。当管材经过模具圆角，管材弯曲变形区逐步转变为竖直段传力区后，在模

具的冷却流体通路中，通入2.5 MPa的冷却惰性气流，降低管材传力区的温度，直至达到设定的行程。

上述过程，管材温度的变化，取决于3种传热机制，即管材与模具间的热传导、管材与周围环境间的对流换热(管材与空气间的自然对流换热，以及管材与冷却气流间的强制对流换热)、管材与周围环境间的热幅射。管材通过模具加热，管材与模具相互接触，热传导对于管材的加热过程将起重要的作用。然而，在管材的弯曲过程中，管材、模具的初始成形温度基本相同，且成形时间较短，管模间隙较大，很大程度上减小了管模热传导对管材温度场分布和应变场的影响，因此可以说，对流换热为管材弯曲成形过程中不同区域温度变化的主要传热机制。

为减小管材的壁厚减薄，采用图4所示的管坯几何结构，坡口端置于成形模具的固定端，平口端置于成形模具运动端。图5为芯模结构。弯曲实验前，管材坡口端内外表面，以及成形模具型腔表面均匀涂敷空干固体薄膜润滑剂T-50，以减小管模间的摩擦。实验参数：内圆角半径 $r_i=4.00$ mm，外圆角半径 $r_o= D_m/2$ 或 $D_m/2- \delta'$ ，弯曲模型腔直径 $D_a=33.30$ mm，芯模直径 $D_m=28.35$ mm，坡口角度 $\theta=20.00^\circ \sim 30.00^\circ$ ，弯曲行程 $H=20.00 \sim 55.00$ mm，冷却气源压力 $p=2.50$ MPa，管材成形温度 $T''=400.00$ ℃，环境温度 $T'=25.00$ ℃。

成形后的管件，采用碱崩酸洗的方法去除表面氧化膜。采用游标卡尺测量管件外弧面和竖直段的椭

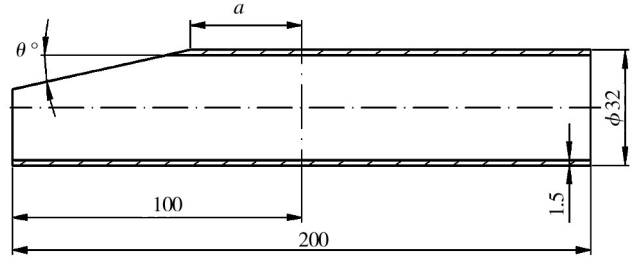


图4 管坯结构
Fig.4 Geometrical shape of a tube blank

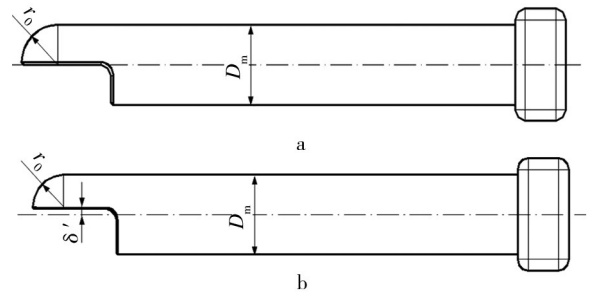


图5 芯模结构
Fig.5 Geometrical shape of mandrel

圆率,然后将管件沿轴向对称面剖开,采用百分表测量管材的厚向应变分布,测量范围如图6所示,厚向应变测量范围包括管材剪切变形区和内外弯圆弧面。

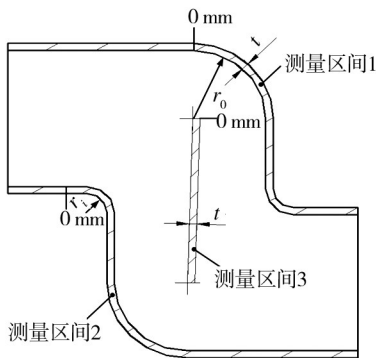


图6 管件测量区间

Fig.6 Measurement range of a tube part

1.2.2 成形指标

薄壁钛管差温剪切弯曲过程,壁厚过度减薄采用最大减薄率描述:

$$I_t = (t - t')/t \quad (1)$$

式中: t 为管材初始壁厚; t' 为管材最薄点的壁厚; I_t 的临界值为0.25。

横截面过度扁化采用最大椭圆率描述:

$$I_d = (D - D')/D \quad (2)$$

式中: D 为管材初始直径; D' 为管材最扁处的直径; I_d 的临界值为0.05。

1.3 响应面模型

采用响应面法,分别建立 I_t 、 I_d 的多项式回归模型,即通过组合设计 N 个实验数据求得成形指标的二次回归方程^[17]:

$$I_t = \beta'_0 + \sum_{j=1}^q \beta'_j x_j + \sum_{h < j} \beta'_{hj} x_h x_j + \sum_{j=1}^q \beta'_{jj} x_j^2 \quad (3)$$

$$I_d = \beta''_0 + \sum_{j=1}^q \beta''_j x_j + \sum_{h < j} \beta''_{hj} x_h x_j + \sum_{j=1}^q \beta''_{jj} x_j^2 \quad (4)$$

式中: (β'_0, β''_0) , (β'_j, β''_j) , $(\beta'_{hj}, \beta''_{hj})$, $(\beta'_{jj}, \beta''_{jj})$ 分别为方程的常数项、线性项、交互项以及2次项回归系数, x_j 为工艺参数, q 为工艺参数总数, j 为工艺参数的个数。

$$N = 2^j + 2j + 3 \quad (5)$$

式中:第1项表征各本构参数皆取2水平(+1,-1)的全面实验数;第2项表征第 j 个本构参数取常数水平,其他 $j-1$ 个本构参数取0水平,进行实验的点数;第3项表征各本构参数均取0水平的实验数。

2 结果与讨论

2.1 摩擦的影响

当管材与模具间润滑剂涂敷不足时,由于管模间的摩擦较大,随着弯曲行程的增加,管材竖直段传力区的拉应力剧烈增加,管材竖直段同时发生过度扁化以及过度减薄,承载能力急剧下降,甚至出现“细颈”,最终发生开裂,见图7。



图7 管材细颈及开裂

Fig.7 Tube necking and fracture

2.2 冷却气流的影响

图8为冷却气流对测量区间3厚向应变的影响。可以发现,成形过程中施加冷却气流,对竖直段传力区施加主动冷却控制,可在一定程度上减小传力区的壁厚减薄,壁厚减薄最大降低约20%。这是因为,随着传力区温度的降低,管材的变形抗力增大,材料的变形程度减小,同时材料的本构参数的变化,提高了管材的塑性,因此壁厚减薄减小。

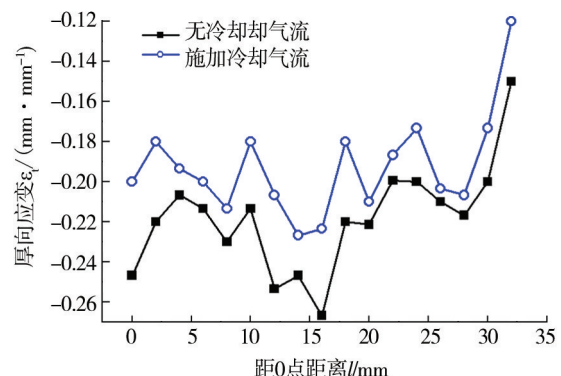


图8 冷却气流对厚向应变的影响

Fig.8 Effect of cooling gas flow on normal strains

2.3 坡口角度的影响

采用不同的管坯结构参数开展实验,实验管件见

图9。图10为坡口角度对管材厚向应变的影响。可以发现,当 $\theta=20^\circ$ 时,测量区间1和区间3的管材壁厚减薄较大,区间2的壁厚减薄较小(见图10a)。这是因为,管材破口端与模具的接触作用较小,管材坡口端的外圆角附近的剪切弯曲变形程度较大,管材测量区间1和区间3的壁厚减薄较大。当 $\theta=30^\circ$ 时,管材的壁厚减薄减小,不同区间的管材厚向应变差别减小(见图10b)。这是因为,随着坡口角度的增加,增加了管材坡口端的位移,减小了管材外圆角附近的切向拉应力,管材的区间1和区间3的壁厚减薄减小;同时区间1和区间2的外圆角处的材料相向位移的差距减小,区间2的壁厚减薄增加。

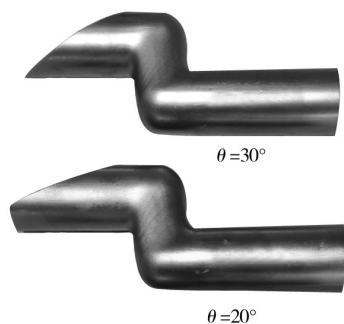
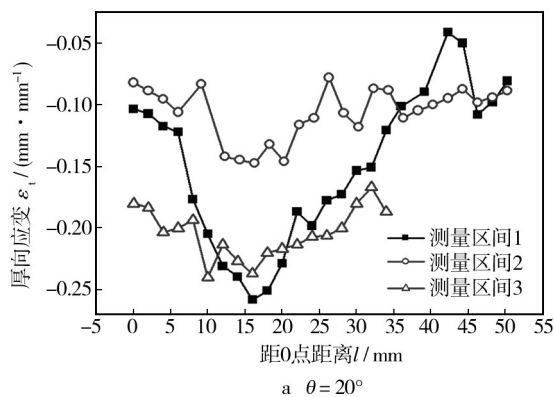
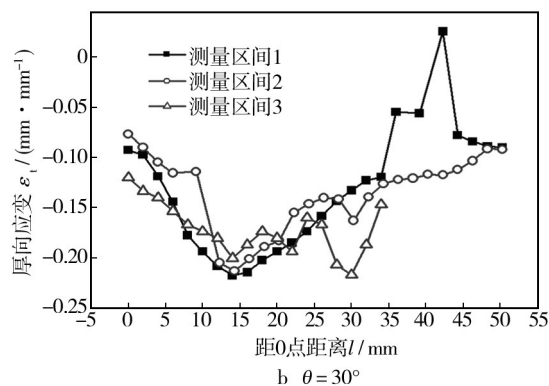


图9 不同坡口角度的管件($H=30\text{ mm}$)

Fig.9 Tube parts with different slope angles($H=30\text{ mm}$)



a $\theta=20^\circ$



b $\theta=30^\circ$

图10 坡口角度对厚向应变的影响

Fig.10 Effect of θ on normal strains

2.4 弯曲行程的影响

采用不同的弯曲行程开展实验,实验管件见图11。可以发现,实验管材均无起皱。图12为弯曲行

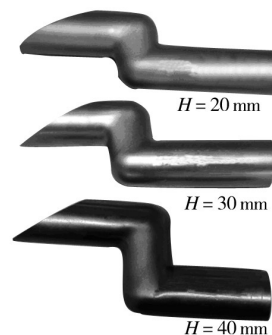
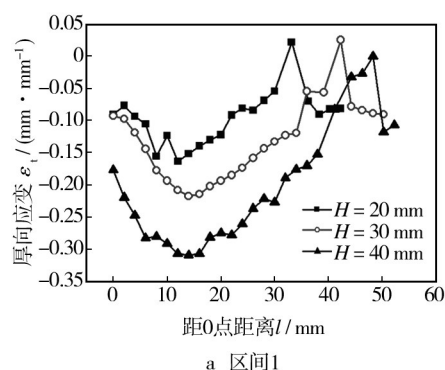
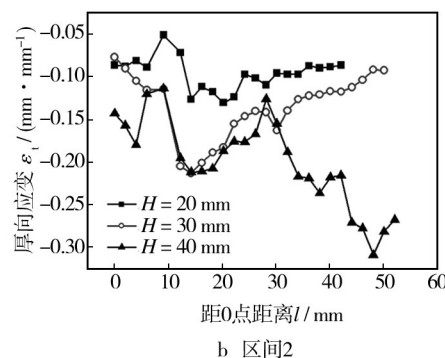


图11 不同弯曲行程的管件

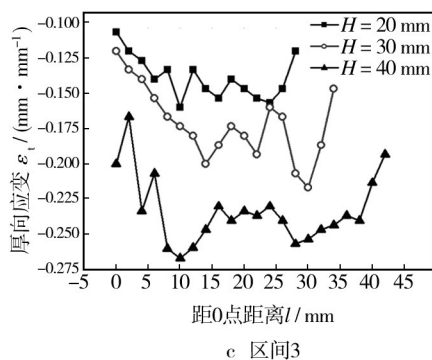
Fig.11 Tube parts with different moving displacements



a 区间1



b 区间2



c 区间3

图12 弯曲行程对厚向应变的影响

Fig.12 Effect of H on normal strains

程对管材厚向应变的影响。可以发现, H 越大, 管材的减薄程度越大, 区间1和区间3的厚向应变对 H 的变化较为敏感。此外, 随着 H 的增加, 管材竖直段传力区的横截面扁化程度也将增加(见图13a), 直至“细颈”初现(见图13b), 因此, H 可以衡量管材的成形极限, 且 H 的最大值将由 I_t 和 I_d 共同决定。

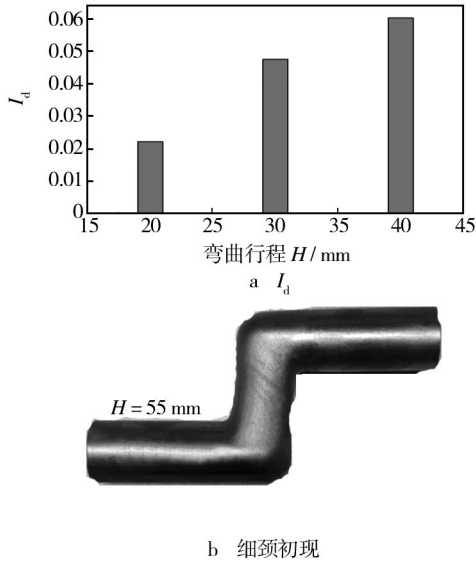


图13 弯曲行程对扁化的影响
Fig.13 Effect of H on flattening

2.5 弯曲行程和外圆角半径的影响

根据表1所示的响应面设计开展实验, 成形后的管件见图14。可以发现, 随着 H 的增加和 r_o 的减小, 管材均没有出现起皱, 管材的成形指标如表1所示, 进而建立了 I_t 和 I_d 的响应面模型:

$$\begin{cases} I_t = 0.9392 + 0.0072H - 0.1165r_o + 0.0035r_o^2 \\ I_d = 0.0325 + 0.0093H - 0.0237r_o + 0.0016r_o^2 - 0.0006Hr_o \end{cases}$$

表1 响应面实验设计

Table 1 Experimental design for response surface

序号	参数		I_t	I_d
	H/mm	r_o/mm		
1	30	12.15	0.261	0.044
2	30	14.15	0.210	0.048
3	35	10.15	0.376	0.067
4	40	12.15	0.330	0.067
5	35	12.15	0.295	0.060
6	40	14.15	0.280	0.060
7	40	10.15	0.405	0.098
8	30	10.15	0.328	0.063
9	35	14.15	0.254	0.054

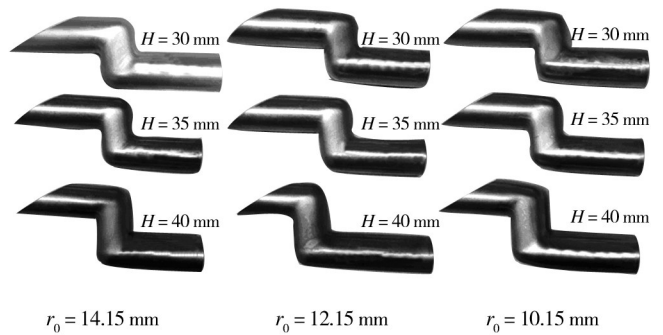


图14 响应面实验管件

Fig.14 Tube parts of response surface experiment

图15为 I_t 和 I_d 的响应面。可以发现, r_o 越小, 或者 H 越大, I_t 和 I_d 均越大; H 越大, r_o 对 I_t 和 I_d 的影响越大; r_o 越小, H 对 I_t 和 I_d 的影响越大。同时, 实验条件下, $r_i = 4$ mm 与 $r_o = 14.15$ mm 为管材最佳弯曲半径匹配, $H \in [30 \text{ mm}, 32 \text{ mm}]$ 时, 能够保证管材稳定成形。

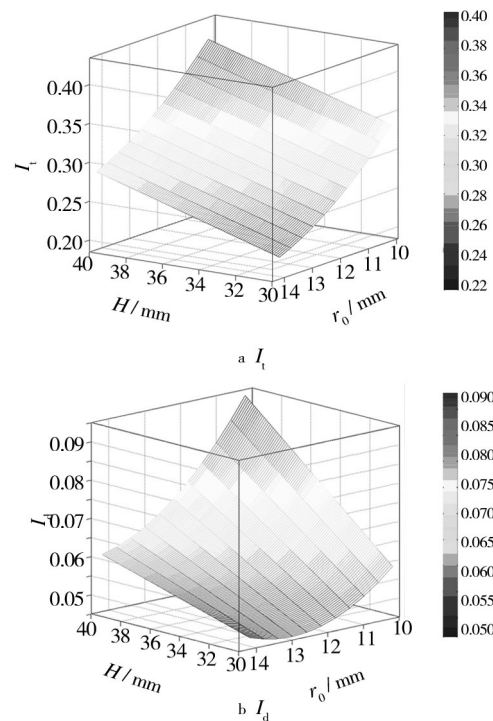


图15 I_t 和 I_d 的响应面

Fig.15 Response surface of I_t and I_d

3 结语

1) 管模间的摩擦较大时, 随着弯曲行程的增加, 管材竖直段出现“细颈”, 最终发生开裂。冷却气流能够改善管材的壁厚减薄。

2) θ 越大, 管材减薄越小, 当 $\theta = 30^\circ$ 时, 管材的壁厚减薄最小, 同时不同区间的管材厚向应变差别减小。

3) H 越大, 管材的减薄越大, 区间1和区间3的厚

向应变对 H 的变化较为敏感;管材竖直段传力区的扁化程度也将增加,直至“细颈”初现。

4) r_0 越小,或者 H 越大, I_t 和 I_d 均越大; H 越大, r_0 对 I_t 和 I_d 的影响越大; r_0 越小, H 对 I_t 和 I_d 的影响越大。同时,实验条件下, $r_1=4$ mm与 $r_0=14.15$ mm为最佳的圆角半径匹配, $H\in[30$ mm, 32 mm]时,能够保证管材稳定成形。

参考文献:

- [1] GOODARZI M, KUBOKI T, MURATA M. Deformation Analysis for the Shear Bending Process of Circular Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162(5): 492—497.
- [2] YUAN S J, HAN C, WANG Y, et al. Shear Hydro-bending of Light Alloy Tubes[C]//Special edition: 10th International Conference on Technology of Plasticity, Aachen: 2011, 361—366.
- [3] SONG F F, YANG H, LI H, et al. Springback Prediction of Thick-walled High-strength Titanium Tube Bending[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 23(5): 1336—1345.
- [4] JIANG Z Q, ZHAN M, YANG H, et al. Deformation Behavior of Medium Strength TA18 High-pressure Tubes during NC Bending with Different Bending Radii[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 57—64.
- [5] YAN J, YANG He, ZHAN Mei, et al. Forming Characteristics of Al-alloy Large-diameter Thin-walled Tubes in NC-bending Under Axial Compressive Loads[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 3(4): 461—469.
- [6] ZENG Y S, LI Z Q. Experimental Research on the Tube Push-bending Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 122(2-3): 237—240.
- [7] TANG N C. Plastic-Deformation Analysis in Tube Bending[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(12): 751—759.
- [8] WANG J, AGARWAL R. Tube Bending Under Axial Force and Internal Pressure[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128(2): 598—605.
- [9] LI Heng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Role of Mandrel in NC Precision Bending Process of Thin-walled Tube[J]. International Journal Machine & Tools Manufacture, 2007, 47(7): 1164—1175.
- [10] YANG H, GU R J, ZHAN M, et al. Effect of Friction on the Cross Section Quality of Thin-walled Tube NC Bending[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(4): 878—886.
- [11] HOKOOK L, TYNE C J V, FIELD D. Finite Element Bending Analysis of Oval Tubes Using Rotary Draw Bender for Hydro-forming Applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168(2): 327—335.
- [12] ZHANG Z Y, YANG H, LI H, et al. Thermo-mechanical Coupled 3D-FE modeling of Heat Rotary Draw Bending for Large-diameter Thin-walled CP-Ti Tube[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(9): 1187—1203.
- [13] 申世军, 杨合, 詹梅, 等. 铝合金大口径薄壁管数控弯曲实验研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(6): 78—82.
SHEN Shi-jun, YANG He, ZHAN Mei, et al. Experimental Study on Large Diameter and Thin-walled Aluminum Tube NC Bending Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(6): 78—82.
- [14] OLIVEIRA D A, WORSWICK M J, GRANTAB R, et al. Effect of Lubricant in Mandrel-rotary Draw Tube Bending of Steel and Aluminum[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2005, 44(1): 71—78.
- [15] 寇永乐, 杨合, 詹梅, 等. 薄壁管数控弯曲截面畸变的实验研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 26—31.
KOU Yong-le, YANG He, ZHAN Mei, et al. Experimental Study on Cross-section Ovalization of Thin-walled Tube in NC Bending Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(5): 26—31.
- [16] 理有亲, 林兆荣. 钛板冲压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
LI You-qin, LIN Zhao-rong. Ti-alloy Sheet Metal Forming Technology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1986.
- [17] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
REN Lu-quan. Regression Design and Its Optimization[M]. Beijing: Science Press, 2009.