

带筋管充液压形实验研究

初冠南, 张坤, 陈刚, 李伟, 丁名区, 林才渊

(哈尔滨工业大学(威海), 山东 威海 264209)

摘要:为探讨带筋管整体成形的可行性,通过实验方法初步探讨了带筋管整体成形的力学条件及关键影响因素。实验结果表明,在消除筋板内环的径向、轴向和环向自由度后,充液压形工艺可实现带筋管的整体成形;采用充液压形工艺可以成形出高径比为5,径厚比为42.5的带筋椭圆紫铜管件。单自由度影响实验表明,侧翻和起皱是带筋管充液压形的两类典型缺陷,消除轴向自由度,可抑制侧翻缺陷的发生,消除环向自由度同时保持环向拉应力状态,有助于消除起皱缺陷。

关键词:带筋管;整体成形;充液压形;缺陷

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.01.006

中图分类号: TG394

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)01-0031-05

Hydro-assisted Forming for Stiffened Tube with Ultra-ratio of Radius to Thickness

CHU Guan-nan, ZHANG Kun, CHEN Gang, LI Wei, DING Ming-qu, LIN Cai-yuan

(Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

ABSTRACT: To explore the practicality of whole forming for stiffened tube, hydro-assisted forming is carried out. The mechanical boundary conditions and the key parameters are also explored. Experiment results illustrate it is possible for stiffened tube whole forming under hydro-assisted. The main mechanical boundary conditions are removing all degrees of freedom of the inner side of rib. A stiffened tube with elliptic cross section is formed successfully, whose ratio of height to inner radius and inner radius to thickness reach to 5 and 42.5 respectively. Wrinkling and collapse are two typical defects during hydro-assisted forming. It is useful to eliminate axial degree of freedom for preventing collapse defect. Eliminating hoop degree of freedom is help to prevent wrinkling.

KEY WORDS: stiffened tube; whole forming; hydro-assisted; defect

战机技能指标的实现,迫切需要大量采用结构效益十分显著的大型整体复杂薄壁壳体^[1],薄壁带筋筒形件是其中的典型代表^[2-4]。其在减轻结构重量,提高结构效率,改善结构可靠性,提高机体寿命等方面,具有其他结构无法比拟的作用^[5-7]。然而,由于该类构件的整体化、薄壁轻量化、形状复杂化,成形比较困难。厚壁带筋构件的成形方法有喷射成形、等温模锻、熔模铸造、反重力铸造和强力旋压

等^[8-10]。上述方法主要用于壁厚3 mm以上构件的成形。对于带环向加强筋的薄壁筒形件的加工,加工方法不多,目前主要采用分体成形组合焊接的方式,完成该类零件的成形加工,成形周期长,精度难保证,特别是纵向焊缝的引入大大降低了疲劳寿命^[11-12],越来越不能满足现代航空装备的性能要求。

针对上述现状,文中提出用带筋管充液压形技

收稿日期: 2014-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(51475121);山东省中青年科学家科研奖励基金(BS2013ZZ009)

作者简介: 初冠南(1979—),男,山东莱阳人,工学博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为内高压成形、管材成形技术。

术实现薄壁环筋构件的整体成形,避免引入焊接工序和焊接热变形,提高构件可靠性和成形精度,降低工艺难度。

1 技术思想及研究方案

1.1 技术思想

带筋管充液压形的技术思想,是在封闭截面结

构内压作用下同时引入环向拉持力 $\sigma_{\theta 1}$ 和反向弯矩 M_1 的受力特征,提高临界失稳应力,消除起皱失稳缺陷,实现带筋管的整体成形的力学条件。成形时,首先在腔体内部充填液体介质,液体压力引入了环向拉持力 σ_{θ} (如图 1 所示);与此同时,液体压力还构成了弯矩 M_1 ,其方向恰好与压形引入的弯矩 M_2 的方向相反,因此降低了合弯矩 M 。通过调整内压 p ,使环向应力小于临近失稳应力,实现带筋管的整体成形。

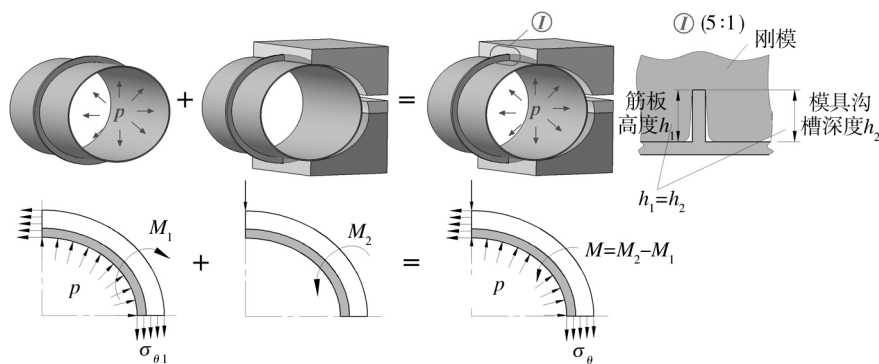


图 1 带筋管充液压形原理示意图

Fig. 1 Schematic of stiffen tube hydro-assisted forming

1.2 研究方案

文中主要通过实验探究带筋管整体成形的可行性。带筋管成形本质上是坯料截面的曲率变化,由初始的圆形截面逐步转变为实际所需的复杂截面形式,如图 2 所示。共有 3 类变形模式:局部曲率半径减小,如 A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3 段;曲率半径增大,如 C_1D_1, C_2D_2 段;圆弧展平后曲率又反向减小,如 C_3D_3 段。实际上第 3 类仍可归为曲率半径增大和减小,因此带筋管整体成形的根本问题是曲率半径改变。考虑到圆截面成形为椭圆截面,同时包含了曲率半径减小和增大,故选择椭圆截面构件作为实验试件,以此为基础分析带筋管整体成形可行性。

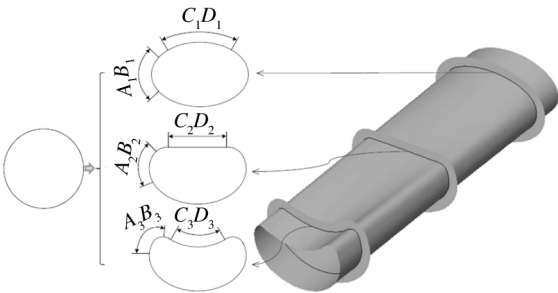


图 2 截面圆角变化示意图

Fig. 2 Typical cross section shape of stiffen tube

带筋管充液压形时内环自由度为全约束,为探讨带筋管整体成形的关键力学条件,根据实际筋板可能具有的约束情况,另外设计 3 组不同自由度约束工况实验,对比得到带筋管整体成形的关键力学条件。具体实验条件如表 1 所示。

表 1 自由度约束情况
Table 1 Experiment scheme

方案	内压 /MPa	圆环内边缘自由度		
		径向	轴向	环向
带筋管 充液压形	0/3/6	平移	×	×
		转动	×	×
空环 压形	0	平移	○	×
		转动	○	×
径向支撑 充液压形	3	平移	×	○
		转动	×	×
扇环充 液压形	3	平移	×	○
		转动	×	○

注:○为不约束,×为约束

各实验方案的边界条件如下。

1) 带筋管充液压形。内环的径向、轴向和环向全约束。实现方法是,将筋板内环焊接在管坯上,因

为管坯密封固定,所以内环径向、轴向和环向自由度为全约束。

2) 空环压形时,内环具有径向自由度,验证径向自由度对筋板成形的影响。实现方法是直接采用圆环压形,同时利用图 1 所示的沟槽约束筋板轴向自由度。

3) 径向支撑充液压形时,内环具有轴向自由度,验证轴向自由度对成形的影响。实现方法是,筋板与筒体只组合在一起而不焊接,同时将图 1 中沟槽间隙增至不影响筋板轴向移动或变形。

4) 扇环充液压形时,内环具有环向自由度,验证环向自由度对成形的影响。实现方法是取 1/3 圆环焊接在管坯上,环向上可自由伸缩变形。

坯料的制备方法:筒体直接选用无缝管,筋板则通过线切割从板材(壁厚与管材相同)上切割得到,然后将筒体和筋板钎焊在一起或套接在一起。各试件形状如图 3 所示。

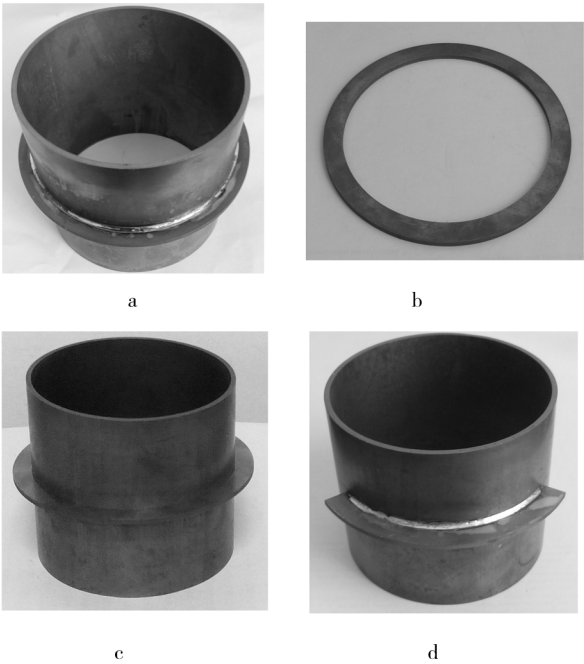


图 3 初始坯料
Fig.3 The initial shape of blank

实验材料为紫铜,其中管坯外径 $D=85\text{ mm}$ 、壁厚 $t_T=2\text{ mm}$,紫铜板壁厚 $t_R=2\text{ mm}$ 。为保证管坯和筋板材料力学性能一致,实验前对二者进行完全退火处理。实验中腔体内部液体压力同为 5 MPa 。

实验中通过椭圆度 λ 定量描述变形程度(椭圆度是指椭圆的长半轴与短半轴之比),同时结合筋高厚比 h/t_R (筋板高度 h 与壁厚 t_R 之比)变化分析

成形极限。实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数
Table 2 Parameters of stiffened tube

带筋管 充液压形		空环压形		径向支撑 充液压形		扇环 充液压形	
h/t_R	λ	h/t_R	λ	h/t_R	λ	h/t_R	λ
3	1.3	3	1.05	3	1.3	3	1.3
	2.0				2.0		2.0
4	1.3			4	1.3	4	1.3
	2.0				2.0		2.0
5	1.3						
	2.0						

2 结果及讨论

2.1 带筋管充液压形可行性

实验结果如图 4 所示。当筋板高厚比为 3 和 4 时,2 种椭圆度实验件均顺利成形。对于高厚比为 5 的试件,椭圆度 $\lambda=1.3$ 时,能顺利成形,椭圆度 $\lambda=2$ 时,筋板起皱。上述实验结果说明,带筋管具有整体成形的可行性。

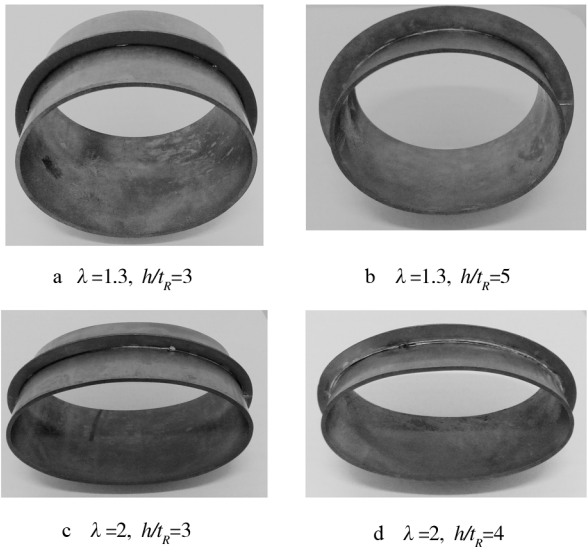
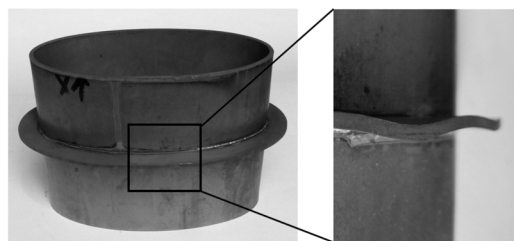


图 4 实验结果照片
Fig.4 Formed shape of stiffen tube

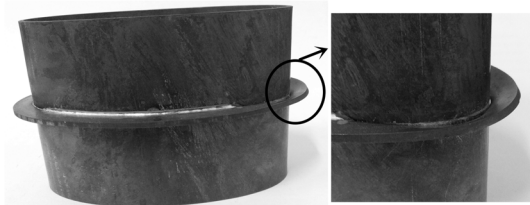
2.2 带筋管整体成形的主要缺陷形式

带筋管充液压形实验共发现 2 类缺陷形式:筋板起皱和筋板侧翻,结果如图 5 所示。2 类缺陷均发生在大变形程度($\lambda=2$)和大筋高($h/t_R=5$)情况

下。



a 起皱



b 侧翻

图 5 缺陷形式($\lambda=2$, $h/t_R=5$)

Fig. 5 Typical defects

2.3 约束形式对筋板成形的影响

2.3.1 径向自由度对成形的影响

径向自由时,即使筋板高度降至 6 mm,椭圆度仅为 1.05 时即发生严重的起皱和侧翻,如图 6 所示。说明径向自由度对成形影响很大,导致起皱和侧翻 2 类缺陷。

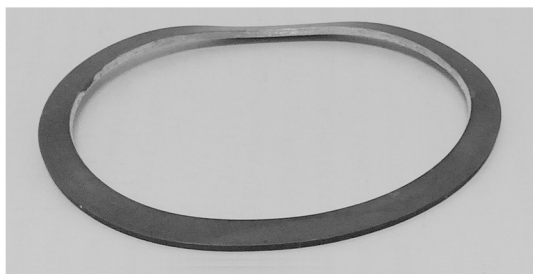


图 6 空环压形

Fig. 6 Shape of deformed ring without supporting

2.3.2 轴向自由度对成形的影响

轴向自由时的变形情况如图 7 所示。筋高 $h/t_R=3$ 的筋板,压形至 $\lambda=1.3$ 时内侧翻转,对比图 4 的实验结果,说明约束轴向自由度对抑制侧翻是有益的。

2.3.3 环向自由度对成形的影响

环向自由时的变形情况如图 8 所示。在没有环筋的环向拉力时,筋高 $h/t_R=3$ 时即严重起皱。对比图 4 的实验结果,说明环向拉力对抑制起皱是有益

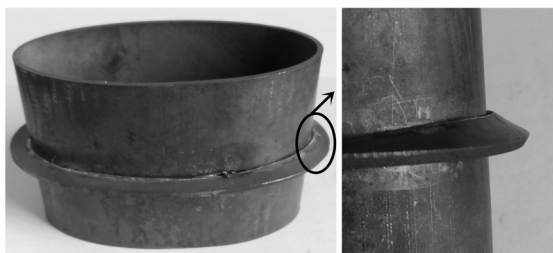


图 7 径向支撑充液压形

Fig. 7 Shape of ring with radial and hoop supporting

益的。

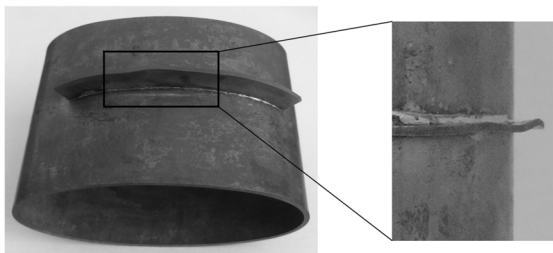


图 8 扇环压形实验照片

Fig. 8 Shape of ring with axial and radial supporting

3 讨论分析

从各边界条件的实验结果可以看出,径向自由度对成形效果影响最大。空环压形时,即使筋板高度很低,变形量很小,仍同时发生起皱和侧翻。约束径向自由度后内压 5 MPa 时,可成形筋高为 10 mm 的带筋管。模具沟槽可防止筋板侧翻,环向力有助于消除起皱缺陷。考虑到内压是影响环向力的主要因素,因此提高内压可进一步提高成形极限,或成形壁厚更薄的构件。

4 结论

- 1) 消除内环的径向、轴向和环向自由度,并对环筋施加环向拉应力,带筋管可整体成形。
- 2) 单自由度影响实验表明,径向存在自由度易导致侧翻和起皱缺陷,消除轴向自由度对抑制侧翻是有益的,消除环向自由度有助于消除起皱缺陷。
- 3) 选用紫铜管通过充液压形,成功成形出了高径比为 5,径厚比为 42.5 的带筋椭圆管件。

参考文献:

- [1] 颜鸣皋,吴学仁,朱知寿. 航空材料技术的发展现状与

- 展望[J]. 航空制造技术, 2003(12):19—25.
- YAN Hao-gao, WU Xue-ren, ZHU Zhi-shou. Recent Progress and Prospects for Aeronautical Material Technologies [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2003(12):19—25.
- [2] HYAE K Y, HONG S Y, GUN Y L, et al. Experimental Investigation of Friction Coefficient in Tube Hydroforming [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011(S1):194—198.
- [3] SHEN G, FURRER D. Manufacturing of Aerospace Forgings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2):189—195.
- [4] 刘劲松, 张士宏, 曾元松, 等. 网格整体壁板增量成形有限元模拟[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(5):515—517.
- LIU Jin-song, ZHANG Shi-hong, ZENG Yuan-song. Simulation of Incremental Forming on Integral Panel Skin with Grid-type Ribs [J]. Materials Science and Technology, 2004, 12(5):515—517.
- [5] 刘钢, 苑世剑, 何祝斌. 镁合金管件热态内高压成形研究进展[J]. 精密成形工程, 2009, 1(1):27—32.
- LIU Gang, YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin. Development of Warm Hydroforming for Magnesium Alloy Tubes [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1(1):27—32.
- [6] YAN Yu, WAN Min, WANG Hai-bo, et al. Design and Optimization of Press Bend Forming Path for Producing Aircraft Integral Panels with Compound Curvatures [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23:274—282.
- [7] Andreza S FRANCHIM, Valdemir S CAMPOS, Dilermando N TRAVESSA, et al. Analytical Modeling for Residual Stresses Produced by Shot Peening [J]. Materials and Design, 2009, 30:1556—1560.
- [8] 王红, 任冬亮, 齐冲. 椭圆管件正圆过程影响塑性极限的关键参数探析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5):102—107.
- WANG Hong, REN Dong-liang, QI Chong. Analysis of Key Parameters of the Plastic Limit during Round Setting of Oval Tube [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5):102—107.
- [9] 薛克敏, 江树勇, 康达昌. 带纵向内筋薄壁筒形件强旋成形[J]. 材料科学与工艺, 2002, 3(3):287—290.
- XUE Ke-min, JIANG Shu-yong, KANG Da-chang. Power Spinning Deformation of Thin-walled Cylinders with Longitudinal Inner Ribs [J]. Materials Science and Technology, 2002, 3(3):287—290.
- [10] 卞如冈, 崔维成, 万正权, 等. 焊接残余应力对疲劳寿命影响的定量研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(7):776—783.
- BIAN Ru-gang, CUI Wei-cheng, WAN Zheng-quan, et al. A Quantitative Study on the Effect of Welding Residual stresses on fatigue life [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7):776—783.
- [11] PAVLOVSKY V I, MASUBUCHI K. Residual Stresses and Distortion in Welded Structures [M]. WRC Bulletin 388, 1994.
- [12] 初冠南, 张彩英, 鲁国春. 初始缺陷对耐压结构承载性能影响[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5):80—84.
- CHU Guan-nan, ZHANG Cai-ying, LU Guo-chun. Influence of Initial Imperfections on the Bearing Capacity of Pressure resistant Structure [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5):80—84.

(上接第21页)

- [5] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Theoretical Basis and Application of Magnesium-base Lightweight Alloys [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002.
- [6] ROUCOULES C, YUE S, JONAS J J. Effect of Alloying Elements on Metadynamic Recrystallization in HSLA Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995, 26(1):181—190.
- [7] MABUCHI M, AMEYAMA K, IWASAKI H, et al. Low Temperature Superplasticity of AZ91 Magnesium Alloy with Non-equilibrium Grain Boundaries [J]. Acta Materialia, 1999, 47(7):2047—2057.
- [8] JONAS J J, SELLARS C M, TEGART W J. Strength and Structure Under Hot-working Conditions [J]. International Materials Reviews, 1969, 14(1):1—24.
- [9] PRASAD Y, GEGEL H L, DORAIVELU S M, et al. Modeling of Dynamic Material Behavior in Hot Deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10):1883—1892.
- [10] KIM H Y, KWON H C, LEE H W, et al. Processing Map Approach for Surface Defect Prediction in the Hot Bar Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205(1):70—80.