

doi:10.3969/j.issn.1007-2012.2014.05.002

碳钢/不锈钢双金属复合三通液压胀形数值模拟及试验*

范敏郁 黄芳 郭训忠
王文涛 李华冠 陶杰
(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 210016)

摘要: 为研究液压胀形工艺过程中碳钢/不锈钢双金属复合三通的成形性能, 利用有限元模拟软件对碳钢/不锈钢双金属复合三通的液压胀形工艺进行优化计算, 分析主要工艺参数对液压胀形支管高度与壁厚均匀性的影响; 根据工艺参数模拟计算的结果, 对碳钢/不锈钢双金属复合三通进行了实际冷成形试验。结果表明, 内压力越大、摩擦系数越小, 支管高度越高; 摩擦系数越小、轴向进给速度越小, 壁厚均匀性越好。实际冷成形试验结果与有限元模拟结果基本吻合。

关键词: 液压胀形; 复合三通; 碳钢/不锈钢; 支管高度; 壁厚均匀性; 数值模拟

中图分类号: TG394; V261 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2014) 05-0006-05

Numerical simulation and experimental study on hydroforming of carbon steel/stainless steel clad tube tee

FAN Min-yu HUANG Fang GUO Xun-zhong WANG Wen-tao LI Hua-guan TAO Jie

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China)

Abstract: The hydroforming of carbon steel/stainless steel clad tube tee was simulated by the general finite element software to explore the formability of the composite tube in hydroforming and to provide guidance for practical operation. The effects of main processing parameters on the protrusion height and the thickness uniformity were investigated. Based on the simulation, the practical forming was performed and the carbon steel/stainless steel clad tube tee was fabricated successfully. The results showed that the protrusion height increased as the internal pressure rose and the friction coefficient declined. The thickness uniformity was improved with the decrease in friction coefficient and the axial feed rate. It was indicated that the experimental results were approximately accordant with the simulative ones.

Key words: hydroforming; clad tube tee; carbon steel/stainless steel; protrusion height; thickness uniformity; numerical simulation

引言

碳钢/不锈钢双金属复合三通综合了不锈钢耐腐蚀和碳钢结构性能优良特点, 在航空、航天、化工等领域具有广泛的应用前景。采用液压胀形技术制

造双金属复合三通不仅能提高材料利用率, 节约成本, 还可以提高生产效率^[1-4]。因此, 对双金属复合三通的液压胀形进行相关机理及相关工艺研究具有重要意义, 已有学者开展了相关研究。

文献[5]研究了双金属复合三通的成形性能, 给出了一定进给量和内压力作用下的支管最大胀形高度; 文献[6]对铜/黄铜复合三通的液压胀形过程进行了数值模拟和试验, 发现有限元模拟中最大冯米斯应力为 493 MPa, 远低于管坯金属抗拉强度, 复合三通试验结果与模拟结果基本一致; 文献[7-10]在加载路径控制方面开展了大量的研究工作, 开发了加载路径的设计程序, 用于优化内压力和轴向进给之间的配比关系; 文献[11]利用数值模拟, 研究了补料比对 Y 型三通管的壁厚影响规律以及成形中

* 国家自然科学基金资助项目 (51205196); 教育部博士点基金资助项目 (20123218120029); 江苏省重大科技成果转化项目 (BA2012124)。

陶杰 E-mail: taojie@nuaa.edu.cn

作者简介: 陶杰, 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事金属材料成形研究

收稿日期: 2013-12-23; 修订日期: 2014-01-07

产生的缺陷；文献[12]讨论了内压分布对内高压成形Y型三通管壁厚均匀性的影响；文献[13]利用数值模拟，对铁/铝双层复合管件的液压胀形过程进行了计算分析，并重点研究了摩擦系数对三通管件壁厚均匀性的影响规律。

支管高度和壁厚均匀性是评价复合三通胀形性能的重要指标，但目前与其相关的研究还不够系统。本文利用数值模拟对碳钢/不锈钢双金属复合三通的液压胀形过程进行研究，分析内压力、轴向进给速度、摩擦系数等对复合三通液压胀形效果的影响规律，获得了复合三通液压胀形的最佳工艺参数。基于数值模拟结果，进行了实际冷成形试验。

1 有限元模型

复合三通液压胀形的有限元模型如图1所示。该模型包含模具、复合管坯、左冲头、右冲头等4个部分。内层管坯采用六面体单元进行划分，单元数为8760；外层管坯的六面体单元数为8760；模具和冲头均为刚体。管坯尺寸如表1所示，内层为316不锈钢，密度 7.8 g/cm^3 ，杨氏模量207 GPa，泊松比0.3；外层为碳钢，密度 7.89 g/cm^3 ，杨氏模量209 GPa，泊松比0.27。在有限元模型中，变形体不锈钢层和碳钢层的接触采用GLUE，从而保证在成形模拟过程中两者能够实现较好的同步变形。

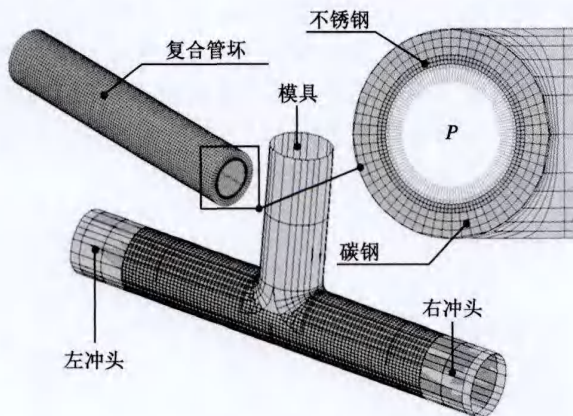


图1 有限元模型

Fig. 1 Model of FEM

表1 管坯尺寸/mm

Tab. 1 The dimensions of tube blank in mm

管长	内径	外径	内层壁厚	外层壁厚	总壁厚
292.00	80.05	89.77	0.98	4.01	4.99

2 成形工艺参数对复合三通液压胀形的影响

2.1 成形工艺参数对支管高度的影响

在管坯液压胀形过程中，支管的形成主要是依靠管坯局部减薄和轴向补料实现。当胀形区过度减薄、轴向补料较少时，胀形支管则无法继续增高，甚至产生过早破裂。因此，支管高度是评价管件胀形性能的一项重要指标。影响支管高度的主要工艺参数为摩擦系数和内压力。

2.1.1 摩擦系数对支管高度的影响

采用30 MPa的内压力和2 mm/s的轴向进给速度，分别在0.01、0.02、0.03、0.04和0.05不同摩擦系数下进行碳钢/不锈钢双金属复合三通的液压胀形试验，模拟结果如图2所示。由图中可以看出，当摩擦系数从0.01增加到0.05时，支管高度由73.3 mm降低到68.8 mm。摩擦系数增大，导致管坯金属流动的摩擦阻力增大。支管胀形所需金属主要是依靠支管周围主管金属的补给。当管坯金属流动受阻时支管补料不足，支管顶端出现壁厚减薄现象；当管坯金属过多聚集在支管圆角半径处，而支管顶端壁厚减薄严重时，支管高度则难以继续增加。因此，在碳钢/不锈钢双金属复合三通液压胀形过程中摩擦系数不宜过大，必要时应在管坯外表面和模具内表面涂覆润滑剂以降低摩擦系数。

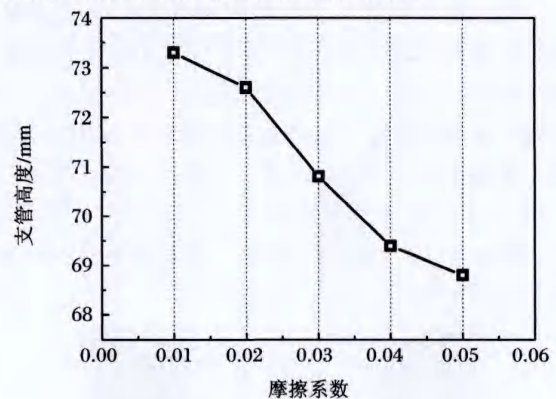


图2 支管高度与摩擦系数的关系

Fig. 2 Relationship between protrusion height and friction coefficient

2.1.2 内压力对支管高度的影响

内压力的作用，一是成形，即在成形时作用在管坯的内表面，使管坯受到均匀的内部高压，支管型腔内的金属变薄产生凸起；二是压迫管坯金属，

使之紧贴凹模而不发生向内弯曲或屈曲等失稳现象。试验中,进给量、进给速度分别为 50mm、2mm/s,仅改变内压力大小,研究内压力对胀形高度的影响。由图 3 中可以看出,当内压力从 20 MPa 增加到 60 MPa 时,支管高度由 59.0 mm 增加到 93.3 mm。说明内压力增大,支管的胀形力增大,同时导致管坯金属流动的摩擦阻力增大,造成管坯金属流动困难。当摩擦系数较小时,随着内压力增大,胀形力增加的作用要大于摩擦力增加的影响,使支管高度增加更有效;因此,当摩擦系数较小时,应尽量增大内压力以增加支管高度。

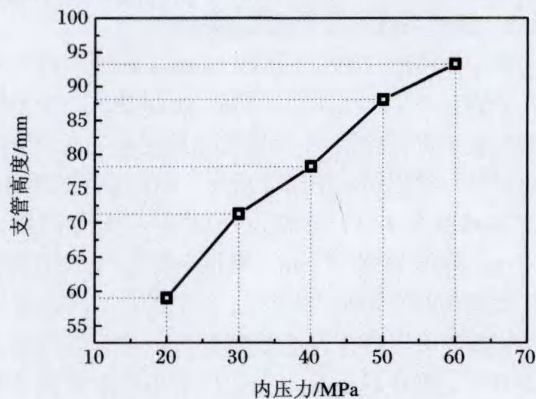


图 3 支管高度与内压力的关系

Fig. 3 Relationship between protrusion height and internal pressure

2.2 成形工艺参数对壁厚均匀性的影响

液压胀形管件对于壁厚均匀性有严格的要求,壁厚差过大会影响液压胀形管件的使用性能和寿命,因此研究影响液压胀形管件壁厚均匀性的主要工艺参数具有重要意义。试验选取三通管件 3 个剖面研究三通管件的壁厚分布规律,如图 4 所示。图中 A 区和 B 区均是从左至右取点, C 区为从上至下取点。模拟参数为内压力 50 MPa,摩擦系数 0.05,轴向进给速度 2 mm/s。

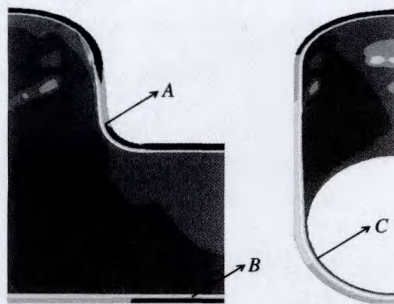


图 4 复合三通

Fig. 4 The clad tube tee

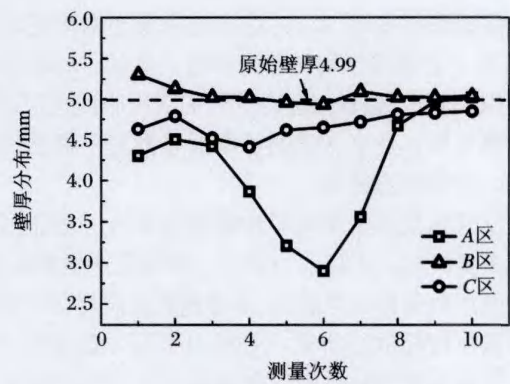


图 5 壁厚分布

Fig. 5 Distribution of thickness

图 5 中, A 区各部分壁厚差较大,支管根部的过渡圆角处存在明显减薄区域,最小壁厚为 2.99 mm,减薄率为 40%; B 区壁厚分布较为均匀,没有出现明显的减薄现象; C 区顶部存在减薄现象,最小壁厚为 4.41 mm,减薄率为 11.6%,减薄率小于 12%,总体壁厚分布较为均匀。因此可以认为, C 区符合碳钢/不锈钢双金属复合三通的壁厚均匀性要求;而 A 区为探讨碳钢/不锈钢双金属复合三通的壁厚均匀性的区域。

2.2.1 摩擦系数对壁厚均匀性的影响

分别采用不同摩擦系数进行碳钢/不锈钢双金属复合三通的液压胀形试验,获得如图 6 所示结果。由图中可以看出,当摩擦系数从 0.01 增加到 0.07,壁厚差则由 0.38 mm 增加到 3.53 mm。摩擦系数增大,管坯金属流动的摩擦阻力增大,胀形区轴向补料不足,壁厚减薄严重;同时管坯金属在凹模圆角处堆积,壁厚增厚率增加,从而导致壁厚分布不均匀,壁厚差过大。

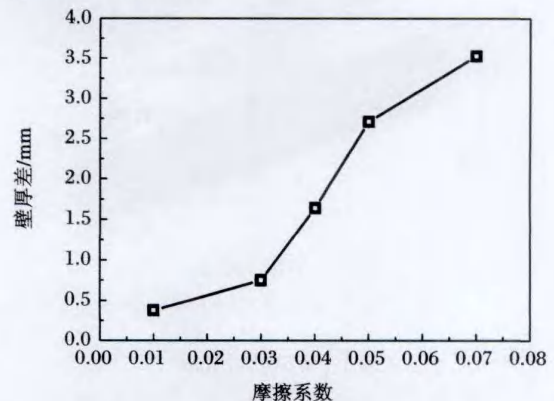


图 6 摩擦系数对壁厚均匀性的影响

Fig. 6 The effect of friction coefficient on the uniformity of thickness

2.2.2 轴向进给速度对壁厚均匀性的影响

分别在不同轴向进给速度下进行碳钢/不锈钢双金属复合三通的液压胀形试验,获得如图7所示结果。图中轴向进给速度小于3 mm/s时,壁厚差变化较小;轴向进给速度进一步增加时,壁厚差显著增加。当轴向进给速度较小时,应变速率较小,管坯金属塑性、流动性较好,主管金属能够及时补充到支管部位,壁厚分布较为均匀;当轴向进给速度较大时,应变速率增大,管坯金属塑性、流动性下降,主管金属不能及时补充到支管部位而在凹模圆角处堆积,导致支管顶部出现明显减薄区域,以及主管过渡区圆角处出现明显增厚区域,壁厚不均匀程度大幅增加。因此,碳钢/不锈钢双金属复合三通液压胀形时,应严格控制轴向进给速度,不宜过大。

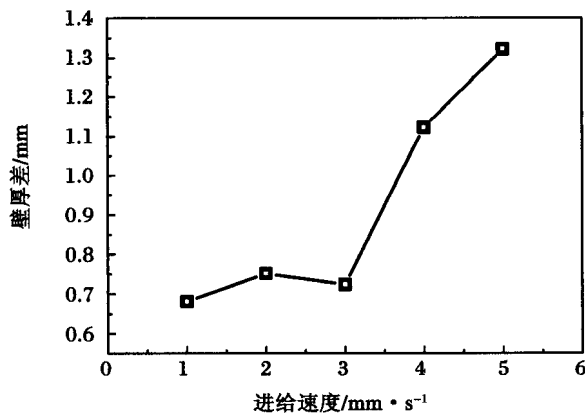


图7 进给速度对壁厚均匀性的影响

Fig. 7 The effect of feed rate on the uniformity of thickness

2.2.3 内压力对壁厚均匀性的影响

在碳钢/不锈钢双金属复合三通液压胀形过程中,液体产生压力使管壁贴模,如果压力过大将导致支管胀形高度过高,支管壁厚减薄严重。因此,合理控制内压力是液压胀形能够得到理想管件的重要条件。由图8中可以看出,当内压力从20 MPa增加到60 MPa时,壁厚差则由1.21 mm增加到1.38 mm。内压力增大,管坯金属流动的摩擦阻力增大,造成管坯金属流动困难,致使管件顶端补料不足、壁厚减薄,凹模圆角处管坯金属堆积、壁厚增厚,从而导致壁厚差增加。但是,由于摩擦系数较小,因内压力增大而增大的摩擦阻力仍然偏小,所以壁厚差增加幅度也较小。因此,在合理控制摩擦系数的情况下,内压力对壁厚均匀性的影响较小。

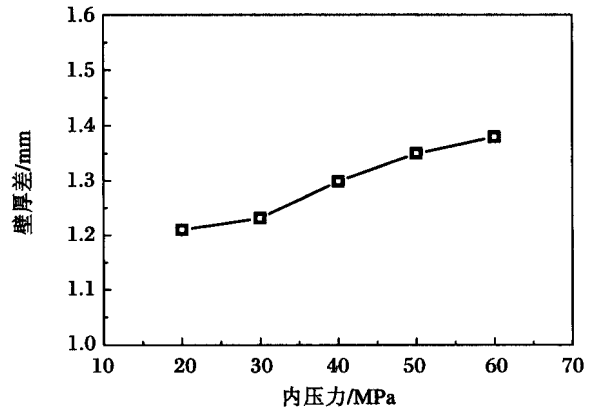


图8 内压力与壁厚差的关系

Fig. 8 The effect of internal pressure on the uniformity of thickness

3 复合三通液压胀形试验

通过有限元模拟获得复合三通的液压胀形主要工艺参数的优化结果如表2所示。试验选用二硫化钼作为润滑剂,摩擦系数范围在0.04~0.06,接近模拟参数^[14-15]。其他工艺参数选取有限元模拟优化值,在内高压成形设备上对复合三通的液压胀形试验,制造的复合三通如图9所示。对试验所得复合三通进行尺寸测量,并与图10所示模拟结果对比,获得如表3所示数据。由表面可知,液压胀形试验所得结果与模拟结果基本一致,但复合三通支管高度稍低于模拟结果,减薄率稍高于模拟结果,这是由于选用二硫化钼作为润滑剂,以及实际冷成形时所选摩擦系数稍高于模拟所定的摩擦系数所致。

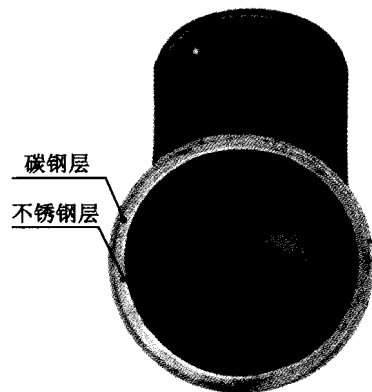


图9 复合三通件

Fig. 9 The clad tube tee

表 2 优化后的工艺参数

Tab. 2 Optimized processing parameters

内压力/MPa	摩擦系数	轴向进给量/mm	进给速度/mm · s ⁻¹
30	0.03	50	2

表 3 复合三通尺寸

Tab. 3 The dimensions of the clad tube tee

	支管高度/mm	壁厚差/mm	减薄率/%
模拟结果	70.80	1.23	10.2
试验结果	63.35	1.45	11.4

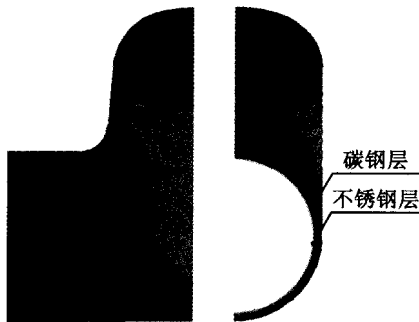


图 10 模拟结果

Fig. 10 Simulation result

4 结 论

1) 影响碳钢/不锈钢双金属复合三通支管高度的主要工艺参数为内压力和摩擦系数。内压力越大,摩擦系数越小,支管高度越高。

2) 影响碳钢/不锈钢双金属复合三通壁厚均匀性的主要工艺参数为摩擦系数和轴向进给速度。摩擦系数越小,轴向进给速度越小,壁厚均匀性越好。

3) 碳钢/不锈钢双金属复合三通有限元模拟优化后的工艺参数为,内压力 30 MPa,摩擦系数 0.03,轴向进给量 50 mm,轴向进给速度 2 mm/s。实际冷成形试验结果与有限元模拟结果基本一致,支管高度达到 63.35 mm,壁厚减薄率为 11.4%。

致 谢

江苏华阳金属管件有限公司同仁为本研究项目碳钢/不锈钢双金属复合三通的试验提供了有效帮助,特表示感谢。

参考文献

[1] 苑世剑,何祝斌,刘钢等. 内高压成形理论与技术的新进展[J]. 中国有色金属学报,2011. 21(10):2523-2533

- [2] Hu S G, Research of hydroforming technology for special-shaped cross-section pipe [J]. Advanced Materials Research,2011. 142:51-54
- [3] 王仲仁,滕步刚,汤泽军. 塑性加工技术新进展[J]. 中国机械工程,2009. 10(1):108-112
- [4] 苑世剑,韩聪,王小松. 空心变截面构件内高压成形工艺与装备[J]. 机械工程学报,2012. 48(18):21-27
- [5] Hashmi M S J, Islam M D, Olabi A G. Experimental and finite element simulation of formability and failures in multilayered tubular components[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering,2007. 24(1):201-218
- [6] Islam M D, Olabi A G, Hashmi M S J. Feasibility of multilayered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology,2006. 174(1):394-398
- [7] Kadkhodayan M, Heidari M, Erfani-Moghadam A. An investigation into the optimization of loading path in t-shape of tube hydroforming[C]//Pohang: AIP Conference Proceedings,2010. 1252:1101
- [8] An H, Green D E, Johrendt J. A hybrid-constrained MOGA and local search method to optimize the load path for tube hydroforming[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2012. 60(9-12):1017-1030
- [9] Mohammadi F, Mashadi M M. Determination of the loading path for tube hydroforming process of a copper joint using a fuzzy controller [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2009. 43(1-2):1-10
- [10] Olabi A G, Alaswad A. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming[J]. Advances in Engineering Software,2011. 42(10):815-820
- [11] 滕步刚,程东明,郭斌等. 补料比对 Y 型三通管内高压成形影响研究[J]. 锻压技术,2008. 33(5):34-37
- [12] 彭俊阳,张文达,刘钢等. 内压分布对内高压成形 Y 型三通管壁厚均匀性的影响(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2011. (2):423-428
- [13] 孙显俊,陶杰,郭训忠等. Fe/Al 复合管液压胀形数值模拟及试验研究[J]. 锻压技术,2010. 35(3):66-70
- [14] 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009
- [15] Vollertsen F, Prange T, Sander M. Hydroforming: needs, developments and perspectives [J]. Advanced Technology of Plasticity,1999. (2):1197-1209