

特种成形

Fe/Al 复合管液压胀形数值模拟及试验研究

孙显俊, 陶杰, 郭训忠, 张立伍

(南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为研究液压胀形过程中双金属复合管件的成形性能, 利用有限元模拟方法对 Fe/Al 双金属复合管液压胀形进行了计算。研究了内压和摩擦对复合三通管件减薄率分布的影响, 并比较了纯铁层和纯铝层之间的壁厚减薄率分布差异。根据数值模拟计算的结果, 对 Fe/Al 双金属复合管进行了成形试验研究。研究表明, 成形过程中纯铁层和纯铝层之间结合良好, 通过调节摩擦系数和内压力大小可以控制 Fe/Al 双金属复合正三通管件的成形质量。

关键词: 复合管; 三通管; 液压胀形; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3940.2010.016

中图分类号: TG386.43 文献标识码: B 文章编号: 1000-3940(2010)03-0066-05

FE Simulation and practice of the hydro-bulging process for Fe/Al clad tube T-shape

SUN Xian-jun, TAO Jie, GUO Xun-zhong, ZHANG Li-wu

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

Abstract: In order to explore the formability of Fe/Al clad tube in hydro-bulging process, the finite element method (FEM) was used. The distribution of the thinning ratio of wall at different fluid pressures and friction coefficients was discussed by numerical simulation and the difference of thinning ratio distribution between the pure Fe layer and pure Al layer was found out. With the help of the calculated results, the hydro-bulging process was performed and the Fe/Al clad tube T-shape was fabricated successfully. The results show that the bonding of the interface of Fe/Al clad tube is well, and the quality improvement of the Fe/Al clad tube T-shape can be achieved by regulating the fluid pressure and friction coefficient.

Keywords: Fe/Al clad tube; T-shape; hydro-bulging; finite element simulation

管件液压胀形工艺是近几年发展起来的一种新的塑性成形技术。采用无缝管一次液压胀形, 不仅能显著地提高制件的力学性能, 还可大幅度降低生产成本和提高生产效率。图1所示为三通管液压胀形工艺示意图。原理是将液体介质充入金属管材毛坯的内部, 产生超高压, 由轴向冲头对管坯的两端密封, 并且施加轴向推力进行补料, 两者配合作用使管坯产生塑性变形, 最终与模具型腔内壁贴合, 得到形状与精度均符合技术要求的中空零件^[1-2]。

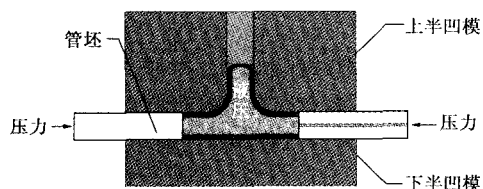


图1 三通管液压胀形成形过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of tee tube hydraulic bulge processing

双金属复合管是根据使用要求采用特殊性能材料作为内衬与普通金属结构材料复合, 从而满足不同工况的耐腐蚀或耐磨损的需求, 具有广阔的市场前景^[3-4]。

管层之间为冶金结合的复合管, 受外力作用时共同变形^[5], 由于涉及到双层金属共同变形问题, 所以采用双金属复合管进行液压胀形的难度较大。目前, 对于单层三通管液压胀形方面的研究较多, 翟江波等^[6]研究比较了轴向压缩胀形和复合胀形过程中应力应变变化规律、胀形支管高度、壁厚分布的差异; 王忠堂等^[7]采用数值模拟方法研究了三通管液压胀形工艺, 给出了不同轴向进给速度下零件的壁厚及等效应变分布, 并分析了轴向进给速度对成形性能的影响。在复合管塑性成形的数值模拟及试验研究方面, 也有部分学者已经进行了初步研究工作。Islam M D等^[8]对铜和黄铜复合管的液压胀形进行了有限元模拟, 但是变形之前铜和黄铜没有实现结合, 两层金属处于分离状态; 王冬平等^[9]对 SA210A1+INCONEL625 复合管的弯曲工艺进行了

收稿日期: 2009-10-19; 修订日期: 2009-12-30

基金项目: 江苏省重大成果转化专项基金资助项目(BA2006067)

作者简介: 孙显俊(1984—), 男, 硕士研究生; 通讯作者: 陶杰

电子信箱: sunxianjun@nuaa.edu.cn; taojie@nuaa.edu.cn

试验研究。根据现有研究情况可知,对于双金属复合管液压胀形的有限元模拟的研究还比较少,尤其是两层材料具有“牵扯效应”的冶金结合复合管塑性成形鲜有报道。因此,对于管层之间冶金结合的双金属复合管的冷成形管件厚度分布进行研究,为进一步探讨复合管的成形性能具有重要意义。

铝具有比重小、塑性高、抗氧化和防腐蚀的特点,但其强度低,可以选择将铝焊接在结构材料上来满足强度要求^[10]。本文选择利用爆炸焊接将纯铁管和纯铝管制造成 Fe/Al 复合管。纯铁和纯铝中所含杂质元素较少,复合管界面元素组成受杂质干扰较少,使得分析界面处 Fe, Al 及其可能产生的金属间化合物的情况变得更为容易;另外,爆炸焊接 Fe/Al 复合管可以为不锈钢/Al 复合管的界面物质组成和界面成形能力提供参考,所以对爆炸焊接 Fe/Al 复合管的研究具有积极意义。

本文利用有限元软件对 Fe/Al 双金属复合正三通管的塑性成形过程进行了模拟计算,研究了内压力和摩擦系数对复合正三通管件减薄率分布的影响,并比较了纯铁层和纯铝层之间的壁厚减薄率分布差异,最后以模拟结果为指导进行了成形试验,成功制备了 Fe/Al 双金属复合正三通管件。

1 有限元模拟

1.1 计算模型

利用通用有限元软件 Marc2007 进行复合管液压胀形工艺的数值模拟。纯铁层外径为 18 mm,厚度为 2.3 mm;纯铝层外径 13.4 mm,厚度为 0.8 mm;两层材料长均为 104 mm。如图 2 所示为三通管液压胀形工艺有限元模型。液压通过在纯铝层内表面施加面载荷来实现;由于管件厚度与直径的比值较大,故没有添加平衡冲头;最后通过控制两端冲头的相向轴向进给来实现整个工艺过程。

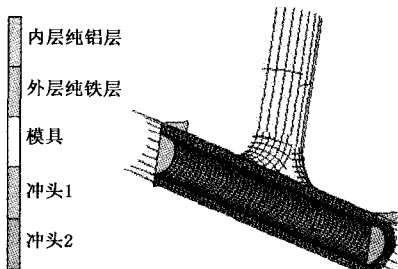


图 2 Fe/Al 复合管液压胀形有限元模型

Fig. 2 FEM model of hydraulic bulge processing of Fe/Al clad tube

纯铁和纯铝的部分材料属性见表 1。采用弹塑性模

型,两种材料的硬化曲线见图 3。Fe/Al 复合管因采用爆炸焊接工艺制备,纯铁和纯铝之间为冶金结合,所以设置两变形体之间应力达到一定程度时才能分离。

表 1 材料性能

Table 1 Material properties

材料	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E / MPa	ν
纯铝	2710	70000	0.33
纯铁	7780	210000	0.26

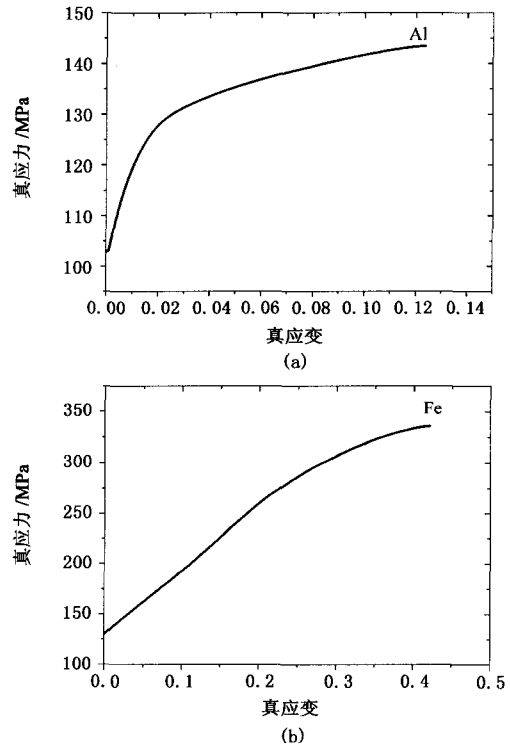


图 3 材料硬化曲线

(a) 纯铝 (b) 纯铁

Fig. 3 Hardening curve

(a) Pure Al (b) Pure Fe

1.2 模拟结果

主要研究两处截面线上的壁厚减薄率分布,截面线为图 4 所示的 A 和 B,从管件端部开始,沿箭头方向每两个节点取一个厚度值,取值点见图 4。A 和 B 区都是复合管塑性成形过程中的典型区域:A 区主管部分增厚程度最小,且材料越过圆弧区补充到支管区绕过的角度最大,材料流动比较困难,管件厚度不均匀性较为明显;B 区为复合管增厚最为明显的区域,增厚程度最大。模拟结果中 Fe 和 Al 接触状态没有出现异常,这说明管件成形过程中两层材料结合良好,没有出现分离现象。图 5 所示为纯铝层与纯铁层界面的接触状态图。

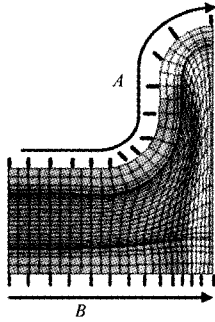


图 4 截面轮廓线及厚度取值点示意图

Fig. 4 Sketch map of section profile and thickness value pick up position

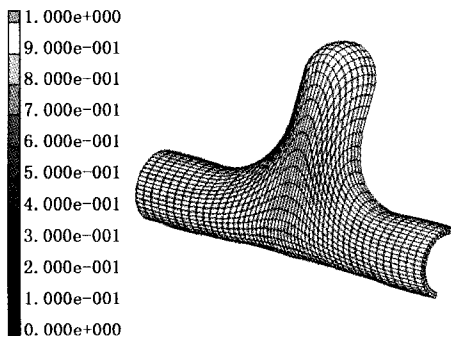


图 5 纯铝层与纯铁层界面的接触状态图

Fig. 5 Contact state of interfaces

1. 2. 1 内压力对成形效果的影响

(1) A 区厚度减薄率。图 6a 所示为复合管 A 区减薄率曲线，从图中可知，对于任一成形压力，主管区皆出现增厚现象。共同的变化规律还体现在圆

弧区厚度变化值较大，尤其是内压力超过 70 MPa 时壁厚减薄尤为明显，支管处的减薄率较大，故内压力不可过大。

由图 6 所示复合管、纯铁层和纯铝层 A 区减薄率分布曲线可知，纯铁层减薄率的变化趋势与复合管具有很大的相似性，而纯铝层与复合管差距较大。减薄率分布曲线的这种差异原因主要有两个，一是纯铁层厚度比纯铝大，另一个是纯铁的屈服强度比纯铝高，故纯铁层的成形性能决定了复合管的成形性能。

比较图 6b 和图 6c 纯铁和纯铝层 A 区厚度减薄率分布曲线可知，随着内压力的增加减薄率都逐渐增加，而其明显的不同点在于纯铁层刚进入圆弧区 (a 处) 时减薄率出现明显的极小值，即该位置出现了材料堆积，而纯铝层该位置厚度基本没有变化，这跟材料屈服强度与内压力的大小有关。模拟过程中的内压力大小与纯铝屈服强度相差不多，但小于纯铁的屈服强度。对于纯铝层，内压力大小在纯铝屈服点附近甚至超过其屈服点，所以材料更容易屈服，材料更容易流动，这也就增加了材料的均匀性，所以材料在圆弧区堆积不明显。而纯铁则不然，但对于纯铁层，随着压力的增加，越接近纯铁的屈服强度，a 处的减薄率波动逐渐减小即材料堆积现象逐渐消失；结合纯铝层该区域减薄率分布曲线，可知屈服强度与内压力之间的差值决定了 a 处材料的厚度均匀性，差距越小 a 处厚度均匀性越好。

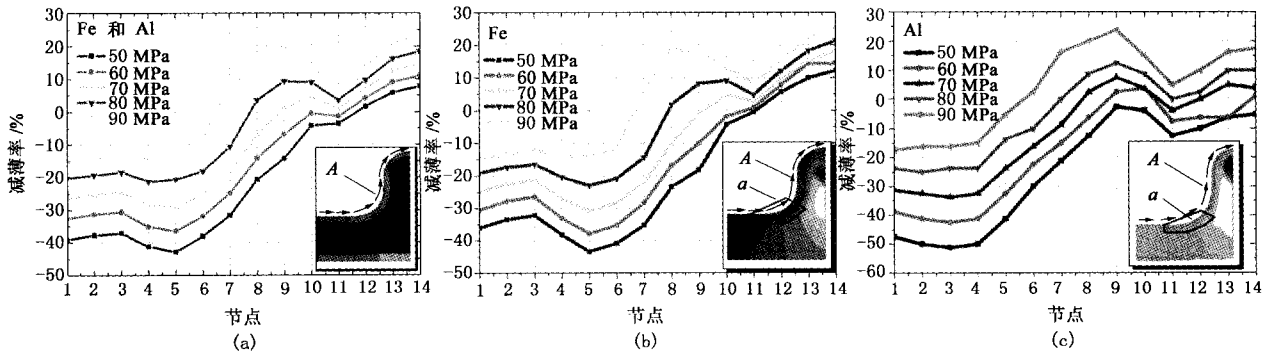


图 6 不同内压下 A 区各层减薄率曲线

(a) 复合管 (b) 纯铁层 (c) 纯铝层

Fig. 6 Thinning ratio curves of A zone layers under different inner pressures

(a) Clad tube (b) Pure Fe layer (c) Pure Al layer

(2) B 区厚度减薄率。观察图 7 所示纯铁层和复合管层减薄率曲线，纯铁层和复合管层的减薄率变化趋势依然有很大的相似性。界面线 B 区域在冲头的作用下沿轴向发生压缩变形，导致材料增厚，

特别是 b 部分增厚严重。压力越小增厚越严重，随着内压力的增加，材料增厚程度逐渐减小，但厚度减薄率曲线各部分曲率并没有明显变化，所以在 B 区域内压力主要对管件厚度产生影响，对厚度分布

特种成形栏目是由北京机电研究所塑性工程技术中心赞助刊出

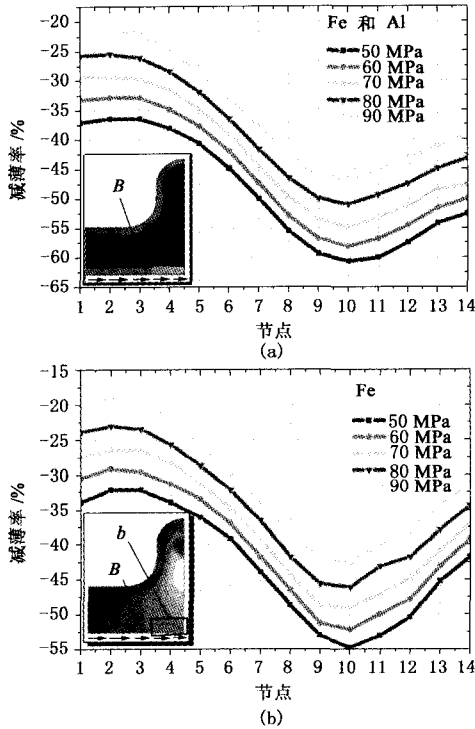


图 7 不同内压下 B 区各层减薄率曲线
(a) 复合管 (b) 纯铁层

Fig. 7 Thinning ratio curves of B zone layers under different inner pressures
(a) Clad tube (b) Pure Fe layer

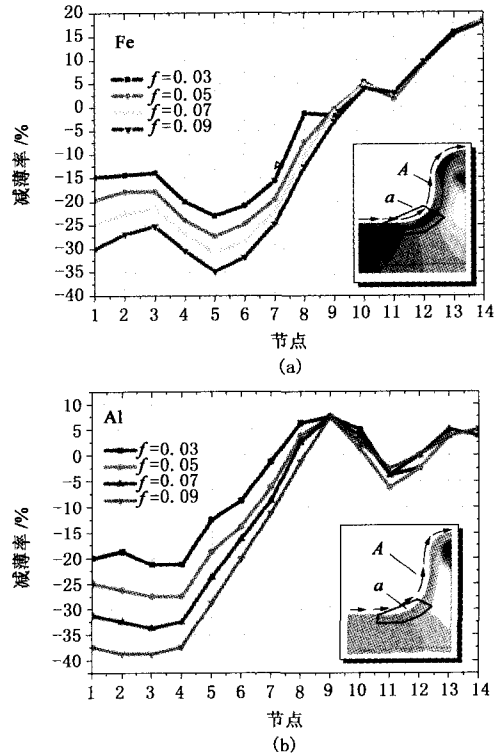


图 8 不同摩擦系数下 A 区各层减薄率曲线
(a) 纯铁层 (b) 纯铝层

Fig. 8 Thinning ratio curves of A zone layers with different f
(a) Pure Fe layer (b) Pure Al layer

的影响不大。

1.2.2 摩擦系数的影响

(1) A 区的各层减薄率变化。观察比较图 8 所示纯铁层和纯铝层厚度减薄率曲线可知, 摩擦系数越小, 减薄率曲线上最大值和最小值的差就越小, 即厚度分布越均匀, 这主要也是跟低摩擦系数下金属流动受到的阻碍较小, 支管处金属容易得到补充有关。纯铁层与模具接触, 受到摩擦系数的直接影响; 纯铝与纯铁为冶金结合, 界面结合强度高, 这就使纯铁和纯铝的变形有一定的协调性, 纯铝层随着纯铁层的增厚而增厚。而纯铁层在不同摩擦系数条件下 a 部分减薄率曲线都出现了极值且曲率没有明显的变化, 所以摩擦系数不是 a 处产生金属堆积的直接原因。

(2) B 区减薄率变化。由图 9 所示纯铁层减薄率曲线可知, 摩擦系数越大壁厚减薄率越小; 纯铁层 B 部分, 摩擦系数越小, 壁厚越均匀。由此可见, 摩擦系数是影响 B 部分厚度不均匀的重要因素。对于纯铁层该区域变形较大, 加工硬化严重, 随着摩擦系数的增加, 材料受到的摩擦力越大, 材

料流动受到的阻碍就越大, 所以材料会在 b 部分产生堆积, 从而在减薄率曲线上出现极值; b 区最左侧的相对移动距离最大, 克服摩擦力做功最大, 所以金属流动最困难, 所以在该处产生堆积, 即减薄率曲线上此处出现极值。

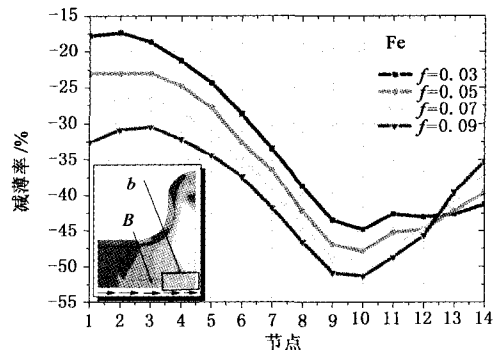


图 9 不同摩擦系数下纯铁层 B 区减薄率曲线
Fig. 9 Thinning ratio curves of B zone layers of Fe with different f

2 成形实验

根据模拟计算结果可知, 实际成形过程中可以通过改变摩擦系数和内压力来控制 Fe/Al 双金属复

合管的成形质量, 摩擦系数越低越好, 而内压力过大过小都不妥。

管坯下料尺寸为 104 mm, 与数值模拟中的管坯尺寸相同; 左右推进距离均为 25 mm, 推进速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 内压力为 70 MPa。成形前先将管坯表面喷涂润滑剂, 以降低管坯表面摩擦系数。二硫化钼摩擦系数范围是 0.05~0.1, 靠近模拟参数, 故选择二硫化钼作为润滑剂。图 10 所示为 Fe/Al 双金属三通管件 1/4 实物图。表 2 为三通管典型位置厚度模拟值和实际值, 取值点见图 10, 模拟值取内压力为 70 MPa, 摩擦系数为 0.07 时的模拟结果。经比较, 管件成形后沿截面线 A 的厚度分布与模拟结果较为接近; 而由于成形后界面线 B 上管件过度增厚, 导致其结果与模拟值有不小差距, 但增厚程度不影响管件的质量, 所以认为成形试验是成功的, 即能够成功制备出 Fe/Al 双金属复合三通管件。

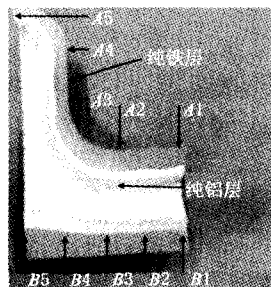


图 10 Fe/Al 双金属复合三通
Fig. 10 Fe/Al clad tube T-shape

表 2 Fe/Al 双金属复合三通局部厚度模拟值和实际值

Table 2 Simulation and experiment results of thickness in the typical location of Fe/Al clad tube T-shape

类型	关键点	厚度/mm	关键点	厚度/mm
模拟值	A1	4.32	B1	4.61
	A2	4.36	B2	4.70
	A3	3.02	B3	5.36
	A4	3.0	B4	5.57
	A5	2.65	B5	5.09
实际值	A1	4.62	B1	5.44
	A2	4.82	B2	5.52
	A3	3.10	B3	5.58
	A4	2.76	B4	6.94
	A5	2.62	B5	8.24

3 结论

(1) 内压力是液压胀形三通管的重要参数, 选择的合理与否直接影响成形和壁厚分布, 内压力不应太大, 也不应过小。

(2) 摩擦系数主要影响液压胀形三通管的厚度均匀性, 摩擦力越小, 管件厚度均匀性越好。实际成形过程中应该润滑管坯表面, 尽量降低摩擦系数。

(3) Fe/Al 复合三通管能够成功制备, 其成形性能和其纯铁层的成形性能相似, 成形过程中纯铁层和纯铝层界面结合良好。

参考文献:

- [1] 韩英淳, 于多年, 马若丁. 汽车轻量化中的管材液压成形技术 [J]. 汽车工艺与材料, 2003, (8): 23-27.
- [2] Dohman F, Hartl C. Tube hydroforming research and practical application [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71 (5): 174-186.
- [3] Chitkara N R, Aleem A. Extrusion of axi-metallic tubes: some experiments using hollow billets and the application of a generalised slab method of analysis [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, (43): 2857-2882.
- [4] 赵卫民. 金属复合管生产技术综述 [J]. 焊管, 2003, 26 (3): 10-14.
- [5] 陈海云, 曹志锡. 双金属复合管塑性成形技术的应用及发展 [J]. 化学设备与管道, 2006, 43 (5): 16-18.
- [6] 翟江波, 余心宏, 翟妮芝. 三通管复合胀形与轴向压缩胀形工艺研究 [J]. 实验研究, 2007, (2): 82-86.
- [7] 王忠堂, 张士宏, 梁海成, 等. 三通管内高压成形工艺研究 [J]. 锻压技术, 2008, 33 (2): 45-46.
- [8] Islam M D, Olabi A G, Hashmi M S J. Feasibility of multi-layered tubular components forming by hydroforming and finite element simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174: 394-398.
- [9] 王冬平, 谢茂平, 方友忠, 等. SA210A1+INCONEL 625 复合管的弯制 [J]. 东方电气评论, 2003, 17 (3): 169-171.
- [10] 王宝云, 马东康, 李争显, 等. 内爆发制备铝/不锈钢细长双金属复合管的研究 [J]. 焊接, 2005, (9): 54-57.

郑重声明

本刊已加入中国学术期刊网络出版总库、CNKI 系列数据库、中国期刊网、万方数据资源系统等。本刊一次性支付给作者的稿酬中包括上述电子版和网络版的著作权使用费。如作者不同意将文章收入此类数据库, 请做出书面声明, 本刊将作适当处理。

《锻压技术》编辑部