

聚氨酯橡胶硬度对薄壁三通管内高压成形的影响

张云峦¹, 吴天华², 张 羽¹, 黄景论¹, 王 凯¹, 杜思敏³

(1. 中航贵州飞机有限责任公司, 贵州 安顺 561019; 2. 空军装备部驻安顺地区军事代表室, 贵州 安顺 561019;
3. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 以外径为 $\Phi 24$ mm、壁厚为 1.5 mm、长度为 120 mm 的 H85 黄铜管为例, 以壁厚增减量不超过 30% 为合格品作为前提, 以生成最大支管胀形高度的橡胶硬度为最佳参数, 结合胀形实验和有限元仿真共同分析了 60~90 HA 范围内 7 种不同硬度的聚氨酯橡胶棒对等径三通管成形质量的影响。研究表明: 随着橡胶硬度的逐渐增大, 支管胀形高度增大, 壁厚差减小, 壁厚分布越均匀; 当橡胶硬度大于 85 HA 时, 支管顶部减薄率大于 30%; 当橡胶硬度小于 70 HA 时, 直管端部和底部增厚率大于 30%。此次研究中, 橡胶硬度为 85 HA 时, 成形三通管的最大壁厚为 1.899 mm、最小壁厚为 1.06 mm、支管胀形高度为 17.132 mm, 成形效果最佳。管坯整体壁厚分布规律为支管顶部减薄、直管端部增厚, 且增厚区明显大于减薄区。

关键词: 聚氨酯橡胶棒; 内高压胀形; 橡胶硬度; 壁厚分布; 支管高度; 减薄

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.013

中图分类号: V262.3⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 01-0091-07

Influence of polyurethane rubber hardness on internal high pressure forming for thin-walled T-tube

Zhang Yunluan¹, Wu Tianhua², Zhang Yu¹, Huang Jinglun¹, Wang Kai¹, Du Simin³

(1. Guizhou Aviation Industry Group Co., Ltd., Anshun 561019, China;

2. Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Anshun Area, Anshun 561019, China;

3. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: For H85 brass tube with outer diameter of $\Phi 24$ mm, wall thickness of 1.5 mm and length of 120 mm, taking the increase or decrease amount of wall thickness without exceeding 30% as a qualified product and the rubber hardness generating the maximum branch tube bulging height as the best parameter, combining the bulging experiment and finite element simulation, the influences of the polyurethane rubber rods with seven different hardnesses in the range of 60~90 HA on the forming quality of equal-diameter T-tube were analyzed. The research results show that with the gradual increasing of rubber hardness, the bulging height of branch tube increases, the wall thickness difference decreases, and wall thickness is more evenly distributed. When the rubber hardness is greater than 85 HA, the thinning rate at the top of branch tube is greater than 30%, and when the rubber hardness is less than 70 HA, the thickening rates at the end and bottom of straight tube are greater than 30%. Furthermore, when the rubber hardness is 85 HA in this study, the forming effect is the best with the maximum wall thickness of 1.899 mm, the minimum wall thickness of 1.06 mm and the bulging height for branch tube of 17.132 mm for the T-tube formed. In addition, the distribution law of the overall wall thickness for tube billet is that the top of branch tube is thinned and the end of straight tube is thickened, and the thickened area is obviously larger than the thinned area.

Key words: polyurethane rubber rod; internal high pressure forming; rubber hardness; wall thickness distribution; branch tube height; thinning

三通管被广泛应用于汽车制造业与航空航天领域, 是各种中高压管路中的基础元件之一, 其主要作用是承担多通道管路的汇集与分流。传统的三通

管大多采用铸造、焊接方式加工而成, 其缺点是零件焊接处在长时间的高压作用下容易开裂, 导致零件性能下降。基于此因素, 管材内高压胀形工艺应运而生, 通过胀形介质产生的内压力一次性成形无缝三通管件, 使得零件整体性能大幅度提高, 并且在结构上采用“以空代实”的方法以达到节能减重的长远目标, 属于先进制造技术^[1-2]。

收稿日期: 2021-01-11; 修订日期: 2021-04-13

作者简介: 张云峦 (1979-), 男, 学士, 工程师

E-mail: 284713873@qq.com

不同胀形介质成形的管件质量各有千秋,目前使用最广泛的是利用高压液体成形管件,常见的有油液、乳化液等^[3],国内外对此也作了相关研究,例如:Strano M 等^[4]结合仿真与实验,优化了液压成形过程的加载路径;Nikhare C 等^[5]通过研究认为胀形力与材料的屈服应力有关;燕山大学杜冰等^[6]建立了不同模式管坯的几何尺寸下的表达式;刘忠利等^[7]仿真分析了汽车排气管的液压成形过程,通过优化工艺参数使零件的壁厚差达到最小。

需要注意的是,液压成形也存在一定不足,例如需要严格考虑密封问题,整个实验必须专设液压控制系统以调节胀形力大小,这无疑增加了生产成本^[8]。以弹性体为胀形介质可以很好地填补液压胀形的不足,整个实验对设备要求较低,在普通四柱式液压机上即可完成,撤掉进给量后弹性体能迅速恢复原状,可重复使用,这也更加贴合绿色制造的理念^[9]。Thiruvarduchelvan S^[10-11]早期对聚氨酯橡胶胀形三通管进行了研究,认为增大摩擦力可以抑制管坯壁厚过分减薄。华侨大学的陈志忠等^[12]研究了模具参数对橡胶介质胀形三通管的影响,结果表明,斜面冲头比阶梯冲头的成形质量更好。

本文以 H85 黄铜为原始管坯,利用有限元软件 ABAQUS 完成了等径三通管的成形仿真分析,通过 7 组实验研究了聚氨酯橡胶硬度(内压力)对成形结果的影响,最终在壁厚增减率不超过 30% 的合格范围内取得支管胀形高度最大的三通管,并借助四柱式液压机进行实验验证。

1 三通管胀形原理

如图 1 所示,将聚氨酯橡胶棒(长度 $l_0 = 118 \text{ mm}$, 直径 $d_0 = \Phi 20 \text{ mm}$)装入无缝空心黄铜管(外径 $d'_0 = \Phi 24 \text{ mm}$, 内径 $d_1 = \Phi 21 \text{ mm}$, 管长 $l_1 = 120 \text{ mm}$, 壁厚 $t_0 = 1.5 \text{ mm}$)内,其中管坯外径与模具内腔保持 0.5 mm 的单边间隙。图 1 中, Δl 为轴向进给冲头的轴向进给量; Δh 为限位式反压装置的压缩量; Δh_0 为限位式反压装置与管坯之间的距离,即反压高度; h 为通过导管成形三通后成形部分的胀形高度。闭合模具后安装在四柱式液压机(图 2a)上,两个轴向进给冲头同时对聚氨酯橡胶棒和管坯持续施力,金属进入塑性变形阶段,轴向进给冲头持续施力使管坯与模具过渡圆角逐渐贴合,金属材料在内压力和轴向力的共同作用下沿着型腔的自由空间成形支管,当支管顶部触碰到限位式反压装置时开始施加平衡力,在 3 种力的配合作用下支管胀形高度逐渐增大,直至达到理想高度。

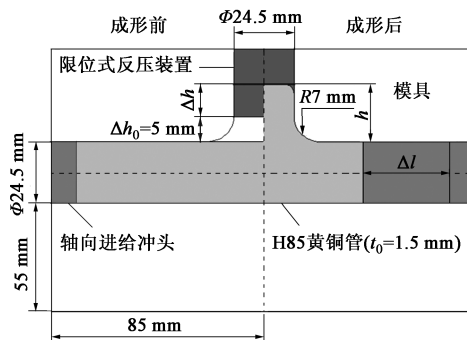


图 1 三通管成形前后示意图

Fig. 1 Schematic diagram of T-tube before and after forming

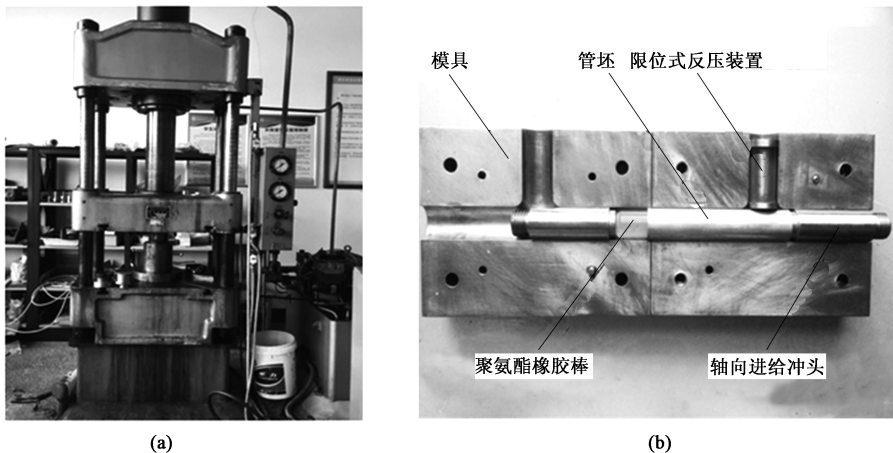


图 2 实验器材

(a) YB32-1000 四柱式液压机 (b) 实验模具与材料

Fig. 2 Experimental equipments

(a) YB32-1000 four-column hydraulic press (b) Experimental mold and material

2 有限元分析

2.1 有限元模型建立

利用 CATIA 软件进行几何建模，转存 CATPart 格式后将其导入 ABAQUS 分析软件中，依据胀形原理和成形中所涉及到的主要部件，建立如图 3 所示的 1/4 模型，简化后的模型包括成形模具、限位式反压装置、聚氨酯橡胶棒、轴向进给冲头以及管坯共 5 个部分。

黄铜材料的强度高、硬度大且耐腐蚀，是制造三通管的优选材料，其力学特性和应力-应变曲线分别如表 1 和图 4 所示。另外，橡胶材料采用 Moo-

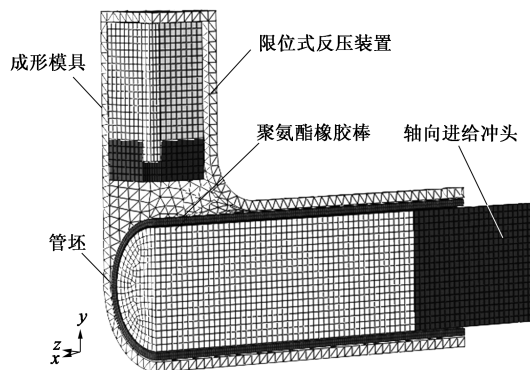


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

ney-Rivlin 模型。

表 1 H85 黄铜管材性能参数

Table 1 Property parameters of H85 brass tube material

参数	密度	杨氏模量	泊松比	屈服强度	抗拉强度	伸长率	各向异性参数		
	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/MPa	ν	R_{el}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	R_0	R_{45}	R_{90}
数值	8.7	175000	0.3	305	224	24	1.65	1.59	1.89

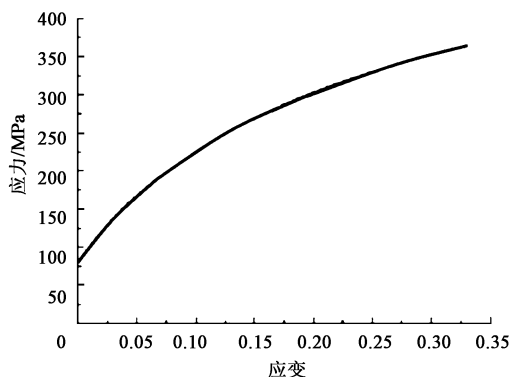


图 4 H85 黄铜材料的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of H85 brass material

本次仿真在 Step Manager 中定义两步分析步，分别为 Initial 和 Step-1：Initial 分析步用来定义管坯外壁与模具内腔、管坯端面与冲头端面、聚氨酯橡胶棒与管坯内壁、聚氨酯橡胶棒与冲头端面之间的接触属性；Step-1 分析步用来定义冲头对聚氨酯橡胶棒和管坯的加载情况。

接触面之间采用面-面接触算法，这种算法利用材料性能准确计算接触刚度，同时定义管坯外壁与模具内腔、管坯端面与冲头端面之间的摩擦因数为 0.1，聚氨酯橡胶棒与管坯内壁、聚氨酯橡胶棒与冲头端面之间的摩擦因数为 0.2。

仿真分析中，为了固定模具位置，在模具中间位置选取参考点后限制其 6 个自由度 ($U1 = U2 =$

$U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$)，约束限位式反压装置 4 个侧面的自由度，使其只能在平行于支管型腔的方向移动。实际操作中，液压机带动轴向进给冲头匀速进给，为了最大限度地贴合实验，在两个轴向进给冲头顶端同样设置参考点并施加速度载荷。

为了保证模拟结果的准确性，将管坯的网格划分得较为细密，模具和轴向进给冲头的变形结果不予参考，因此，网格划分应适当粗糙，以提高计算速度。

另外，为了节约运算时间，放大实际冲压速度，虚拟轴向进给冲头进给速度 $V = 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 有限元结果分析

在复合胀形成形中，合理的轴向补料可以使胀形区材料的分布趋于均匀，提高材料膨胀率，是确定液压缸行程的重要参数。确定轴向进给冲头的轴向进给量 Δl 约为 25 mm，定义模拟进给时间为 0.1 s，分别对 60、65、70、75、80、85 和 90 HA 这 7 种不同硬度的聚氨酯橡胶棒进行分析，并优化出最佳参数。图 5 为等径三通管的数值模拟结果，表 2 列出了 7 组实验的仿真结果。以支管顶部单元沿径向移动位移代表支管胀形高度，在设定壁厚增减量不超过 30% 为合格品的前提下，编号为 3、4、5、6 的等径三通管符合生产要求；其中，编号 1 和 2 的等径三通管由于其橡胶硬度过小，最大壁厚明显超出合格范围；相反，编号 7 的等径三通

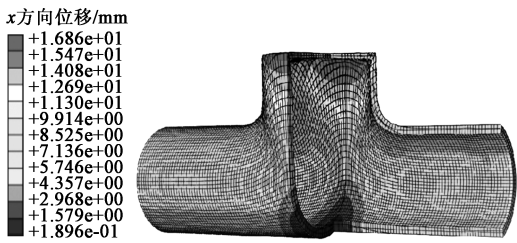


图 5 等径三通管数值模拟结果
Fig. 5 Numerical simulation result of equal-diameter T-tube

管的橡胶硬度过大, 导致支管顶部壁厚过度减薄, 同样不符合要求。综合表 2 结果可知, 硬度为 85 HA 的聚氨酯橡胶棒能够在合格范围内取得支管胀形高度最大的三通管件, 是最理想的胀形硬度。

如图 6 所示, 在横剖面从支管顶部沿着过渡圆角直至直管端部每隔 1 mm 均匀取点, 共取点 40 个, 同时, 将纵剖面从支管顶部到直管底部同样均匀取点。为了更加直观地分析壁厚分布走势, 将筛选出的编号为 3、4、5、6 的这 4 组仿真结果绘制成

表 2 不同橡胶硬度时的仿真结果
Table 2 Simulation results under different rubber hardnesses

编号	橡胶硬度/ HA	支管胀形高度 h/mm	最大壁厚 T_{max}/mm	最小壁厚 T_{min}/mm	壁厚差 $\Delta t/\text{mm}$
1	60	13.712	1.983	1.051	0.932
2	65	14.832	1.961	1.053	0.908
3	70	15.732	1.950	1.054	0.896
4	75	16.482	1.932	1.061	0.871
5	80	16.932	1.902	1.063	0.839
6	85	17.132	1.899	1.060	0.839
7	90	17.222	1.883	1.049	0.834

如图 7 所示的壁厚分布图。在横剖面壁厚分布图 (图 7a) 中, 壁厚增大主要集中在支管顶部到过渡圆角处, 且壁厚的增长速率较快, 从过渡圆角处到直管端部无明显增厚现象, 壁厚趋于平稳。在纵剖面壁厚分布图 (图 7b) 中, 支管顶部的壁厚明显减薄, 然后沿着轮廓持续稳定增长, 并且在直管底部壁厚达到最大值。

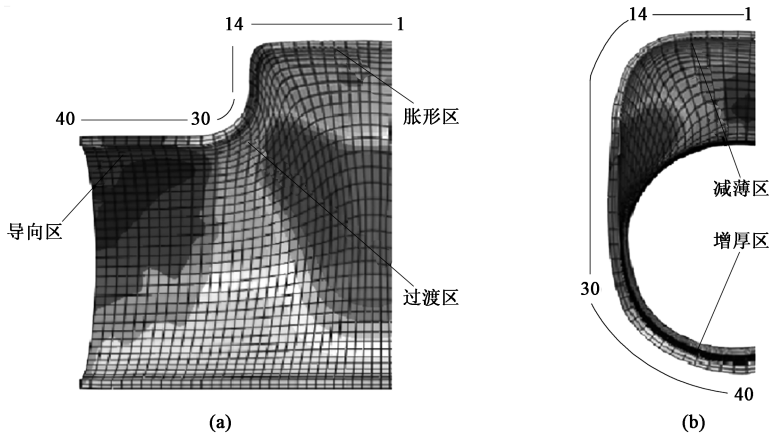


图 6 仿真成形结果的剖面图
(a) 横剖面 (b) 纵剖面
Fig. 6 Section views of simulation forming results
(a) Cross section (b) Longitudinal section

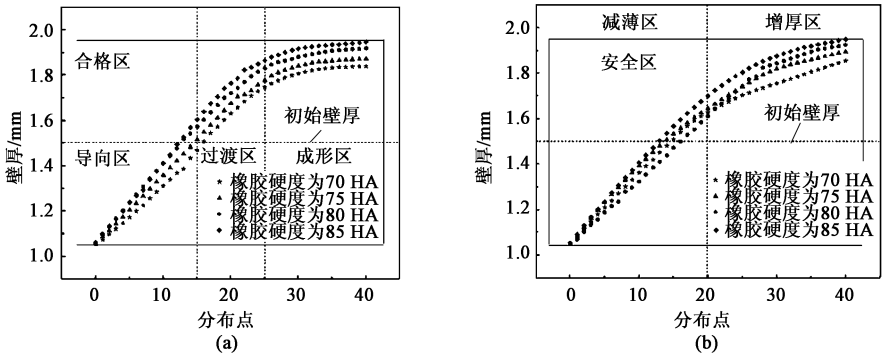


图 7 仿真结果的壁厚分布图
(a) 横剖面 (b) 纵剖面
Fig. 7 Wall thickness distribution diagrams of simulation results
(a) Cross section (b) Longitudinal section

通过对不同硬度的聚氨酯橡胶棒的模拟研究可得, 橡胶硬度控制在 70~85 HA 以内, 才能成形壁厚增减量不超过 30% 的三通管, 橡胶硬度过大或过小, 得到的三通管都会超出合格范围。橡胶硬度较大时, 在轴向进给冲头的作用下产生于管坯内壁的内压力也增大, 加快了材料流动, 有利于支管成形, 支管胀形高度如图 8a 所示, 随着橡胶

硬度的增大, 支管胀形高度逐渐增大, 如图 8b 所示。但并非橡胶硬度越大越好, 橡胶硬度过大时, 支管顶部补料不足, 壁厚过分减薄, 容易发生破裂。橡胶硬度较大时, 产生于管坯内壁的内压力不足, 随着轴向进给量的增大, 材料堆积在过渡圆角处不易流动, 容易发生屈曲、起皱现象。因此, 橡胶硬度是分析成形结果的重要工艺参数。

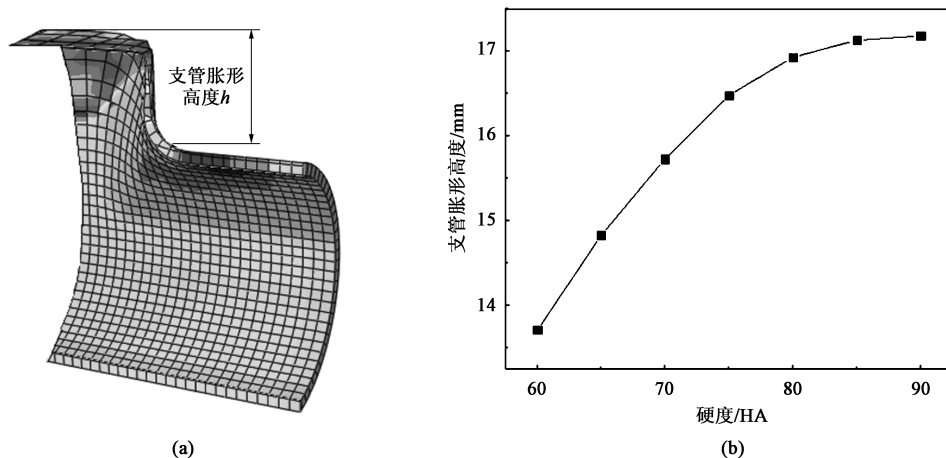


图 8 聚氨酯橡胶硬度与支管胀形高度关系图

(a) 支管胀形高度 h 示意图 (b) 支管胀形高度与聚氨酯橡胶硬度的关系曲线

Fig. 8 Relationship diagram between hardness of polyurethane rubber and bulging height of branch tube

(a) Schematic diagram of branch tube bulging height h (b) Relationship curve between branch tube bulging height and polyurethane rubber hardness

3 实验结果分析

有限元计算中, 金属大变形导致一些单元发生畸变, 出现仿真结果失真等现象, 实验中由于精度、尺寸等问题导致无法精准获取实验结果, 根据仿真结果选用 70、75、80 和 85 HA 这 4 种硬度的聚氨酯橡胶棒进行实验分析, 表 3 列出了 4 组实验的实验数据。综合对比后发现误差均控制在 4% 以内, 与预期结果吻合较好, 综合分析, 85 HA 是本次研究的胀形介质中的最佳橡胶硬度。

表 3 不同橡胶硬度成形三通管的实验结果

Table 3 Experimental results of forming T-tube under different rubber hardnesses

编号	橡胶硬度/ HA	支管胀形高度 h/mm	最大壁厚 T_{\max}/mm	最小壁厚 T_{\min}/mm	壁厚差 $\Delta t/\text{mm}$
3	70	15.740	1.949	1.051	0.898
4	75	16.485	1.930	1.061	0.869
5	80	16.935	1.906	1.062	0.844
6	85	17.131	1.901	1.059	0.842

图 9 为实验成形结果, 可以直观地看到, 零件成形情况较好, 无明显起皱、破裂现象。支管胀形高度随着橡胶硬度的增大逐渐增大, 与仿真结果相同。如图 10 所示, 将成形后的三通管沿支管顶部横、纵向剖开后均匀布点, 生成如图 11 所示的壁厚分布图, 壁厚分布较为均匀, 没有较大起伏, 总体走势与仿真壁厚分布图相同, 实验结果可信。

4 结论

(1) 若橡胶硬度较小, 对材料流动不利, 堆积在过渡圆角处容易发生屈曲、起皱现象。若橡胶硬度较大, 无法及时补偿支管顶部所需材料, 壁厚减薄严重, 容易发生破裂。研究结果显示, 橡胶硬度在 70~85 HA 范围内最合适, 能够成形符合要求的三通管件。

(2) 随着橡胶硬度的增加, 壁厚差逐渐减小, 支管胀形高度逐渐增加, 成形情况越好, 但并不是越大越好, 当聚氨酯橡胶硬度大于 85 HA 时, 支管胀形高度无明显增长且顶部壁厚过分减薄, 超出安全范围。

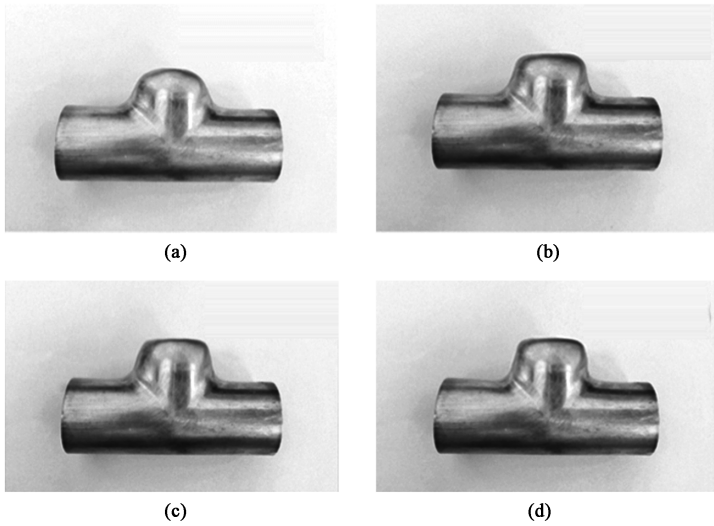


图 9 不同硬度的聚氨酯橡胶棒成形三通管的实验结果
(a) 70 HA (b) 75 HA (c) 80 HA (d) 85 HA

Fig. 9 Experimental results of forming T-tubes for polyurethane rubber rods with different hardnesses

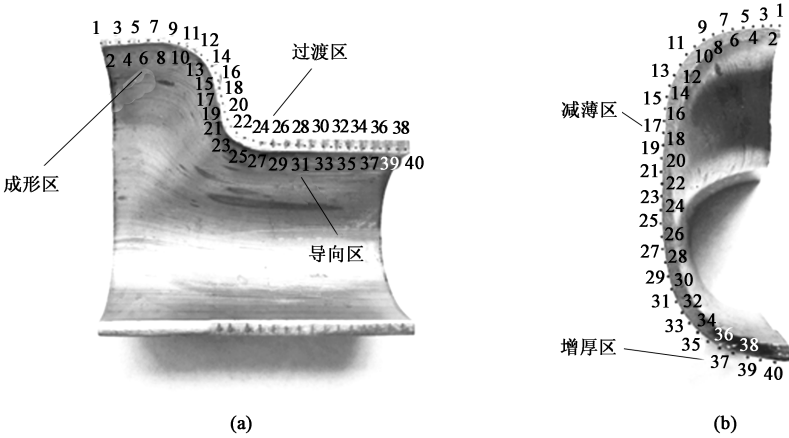


图 10 实验结果剖面图
(a) 横剖面 (b) 纵剖面

Fig. 10 Sectional views of experimental results
(a) Cross section (b) Longitudinal section

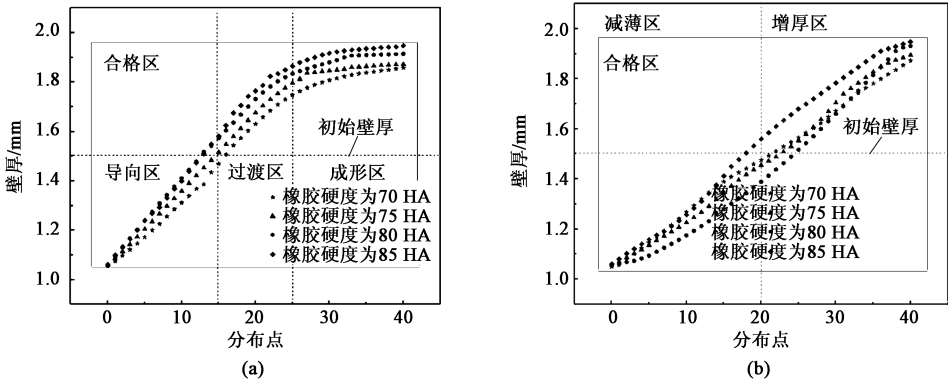


图 11 实验结果壁厚分布图
(a) 横剖面 (b) 纵剖面
Fig. 11 Wall thickness distribution diagrams of experimental results
(a) Cross section (b) Longitudinal section

(3) 在成形过程中, 从横剖面来看, 沿着直管顶部到过渡圆角处壁厚明显增大, 到直管端部壁厚逐渐趋于平缓。从纵剖面来看, 壁厚稳定增大, 无明显起伏。

参考文献:

- [1] 陈名涛, 肖小亭, 刘易凡, 等. 内压和加载路径对并列双支管内高压成形性的影响 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (5): 19-24.
Chen M T, Xiao X T, Liu Y F, et al. Effects of the internal pressure and loading path on hydroforming of the parallel arrangement multi-way tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (5): 19-24.
- [2] 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.
Yuan S J, He Z B, Liu G, et al. New developments in theory and processes of internal high pressure forming [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (10): 2523-2533.
- [3] 杨兵, 宋忠财, 张卫刚, 等. 管件液压成形的影响因素 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39 (11): 1767-1770.
Yang B, Song Z C, Zhang W G, et al. The effect factors on the tube hydroforming process [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39 (11): 1767-1770.
- [4] Strano M, Altan T. An inverse energy approach to determine the flow stress of tubular materials for hydroforming applications [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146 (1): 92-96.
- [5] Nikhare C, Weiss P D. Buckling in low pressure tube hydroforming [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 1 (28): 1-10.
- [6] 杜冰, 赵长财, 刘一江, 等. 管材内高压成形变形模式研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (16): 126-134.
- [7] 刘忠利, 郭训忠, 骆心怡, 等. 汽车排气管件内高压成形数值模拟及试验 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (4): 88-92.
Liu Z L, Guo X Z, Luo X Y, et al. Numerical simulation and experiment of the hydroforming for automobile exhaust pipe [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (4): 88-92.
- [8] 张彦敏, 宋志真, 孙爱学. 弹、塑性传力介质下三通管轴压胀形工艺分析 [J]. 塑性工程学报, 2008, 2 (15): 136-139.
Zhang Y M, Song Z Z, Sun A X. Analysis of axial force and internal pressure bulging process for tri-branch tube with the elastic and plastic medium [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 2 (15): 136-139.
- [9] 邹钱生, 刘斌. 模具结构参数对橡胶介质胀形三通管的影响 [J]. 华侨大学学报, 2013, 34 (2): 121-125.
Zou Q S, Liu B. Influence of mold structure parameters on T-shapes tubes by compound bulging using rubber medium [J]. Journal of Huaqiao University, 2013, 34 (2): 121-125.
- [10] Thiruvarduchelvan S. A novel hydraulic-pressure augmented deep-drawing process for high draw ratios [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, (54): 355-361.
- [11] Thiruvarduchelvan S. The potential role of flexible tools in metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, (122): 293-300.
- [12] 陈志忠, 刘斌. 采用橡胶介质的三通管胀形数值模拟 [J]. 华侨大学学报, 2011, 5 (32): 485-491.
Chen Z Z, Liu B. Simulation of bulge forming process for three-way tube using rubber medium [J]. Journal of Huaqiao University, 2011, 5 (32): 485-491.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2022 年广告征集工作已经开始。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件 (旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧) 等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

