

# 冲击液压载荷作用下双金属薄壁管内压力与 型腔体积变化的关系\*

## RELATIONSHIP BETWEEN INTERNAL PRESSURE AND CAVITY VOLUME CHANGE BASED ON LIQUID IMPACT LOADING TO BIMETALLIC THIN-WALLED TUBES

刘建伟<sup>\*\*1,2</sup> 孙昌迎<sup>1</sup> 李玉寒<sup>2</sup> 姚馨淇<sup>1</sup> 范祥文<sup>1</sup>

(1. 桂林电子科技大学 机电工程学院, 桂林 541004)

(2. 桂林电子科技大学 机电综合工程训练中心, 桂林 541004)

LIU JianWei<sup>1,2</sup> SUN ChangYing<sup>1</sup> LI YuHan<sup>2</sup> YAO XinQi<sup>1</sup> FAN XiangWen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology,  
Guilin 541004, China)

(2. National Demonstration Center for Experimental Education of Mechanical and Electrical Engineering Training,  
Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**摘要** 双金属薄壁管冲击液压胀形技术是在液压胀形与冲压成形基础上发展起来的一种复合成形技术。冲击液压载荷作用下的双金属薄壁管成形所需内压力源自于管坯型腔体积的压缩,其大小随液体体积压缩量变化而变化,为此提出了基于冲击液压载荷作用下双金属薄壁管的内压力形成机理的研究。首先介绍了双金属薄壁管冲击液压胀形的成形原理;然后,通过对内外管轴向冲击液压预成形与径向冲击液压成形过程中内压力形成的理论分析,构建了管坯型腔内压力与体积变化之间的数学模型;同时,利用 Ansys Workbench 有限元模拟技术获得了内外管轴向冲击液压预成形与径向冲击液压成形过程的内压力,通过有限元模拟与理论分析结果的对比发现,两者具有较好的一致性,并通过模型误差优化了内压力数学模型,为双金属薄壁管冲击液压胀形技术的进一步研究奠定了良好的理论与应用基础。

**关键词** 双金属薄壁管 冲击液压成形 液压胀形 内压力 有限元模拟

**中图分类号** TH123.4

**Abstract** Liquid Impact Forming (LIF) of bimetallic thin-walled tubes is a composite forming technology developed on the basis of tube hydroforming and stamping. Internal pressure required for the formation of the bimetallic thin-walled tubes under liquid impact loading is derived from the compression of the volume of the tube blank, and its size varied with the compression of liquid volume. For this purpose, investigation on forming mechanism and variation law of the internal pressure of the bimetallic thin-walled tubes is proposed. Firstly, forming principle of LIF of bimetallic thin-walled tubes was introduced. Secondly, theory of internal pressure was analyzed in the process of the axial impact hydraulic performing and the radial forming of bimetallic thin-walled tubes. Mathematical model between the internal pressure and volume change in the tube blank cavity was obtained. Thirdly, generation regularity of internal pressure of the axial and the radial liquid impact of the bimetallic thin-walled tubes was performed using ANSYS WORKBENCH. Through comparison of numerical simulation and theoretical analysis, it is not difficult to find that they were a good consistency, and the internal pressure model is optimized by the model error revision, which lays a good theoretical and application basis for further research on LIF of bimetallic thin-walled tubes.

**Key words** Bimetallic thin-walled tubes; Liquid impact forming; Tube hydroforming; Internal pressure; Finite element simulation

*Corresponding author: LIU JianWei, E-mail: liujianwei78988@163.com, Tel: +86-773-2208506*

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51765013), and the Guangxi Science and Technology Program Project (No. 2018AD19207), and the Training Program for Thousands of Young and Middle-aged Backbone

\* 20190501 收到初稿, 20190704 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51765013), 广西科技计划项目 (2018AD19207), 广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目资助。

\*\* 刘建伟, 男, 1978 年 12 月生, 江西萍乡人, 汉族, 桂林电子科技大学机电工程学院教授, 工学博士。主要从事金属塑性成形和特种加工技术等方面的研究。

Teachers in Guangxi Colleges and Universities.

Manuscript received 20190501, in revised form 20190704.

## 引言

双金属薄壁管是由两种不同材料的金属管组成,其结合了金属内外管材的综合特性,在满足管材的耐腐蚀性同时又保证了管材的刚度强度,在工业、医疗、食品等领域的输送用管、换热器用管和器械用管等方面具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

目前,双金属薄壁管成形技术主要有热挤压法、液压胀形法、爆炸焊接法、复合板焊接法、粉末冶金法、离心铸造法、喷射成型法、堆焊法等方法<sup>[3]</sup>。因液压胀形法具有结构轻量化、强度与刚度高等特点,同时又具有效率高、工艺简单、成本低等冲压成形优点<sup>[17]111-119</sup>,解决了传统液压成形技术必须依赖专门的液压供给装置等问题。

刘富君等<sup>[5-6]</sup>利用内外管周向应变的变形协调条件,得出液压胀合的适用条件以及胀合内压力与残余接触应力间的计算关联式。王学生等<sup>[7]</sup>研制了一种不锈钢衬里复合管液压成形装置,并对管材的应力应变状态、残余接触应力、成形内压力等方面进行了全面分析与研究。Hossein Seyedkashi S M 等<sup>[8]</sup>提出了一个可用于管材成形的模型,并构建了力的基本方程,同时为避免起皱,成功预测了成形所需内压力。A G Olabi 等<sup>[9]</sup>对双金属管的成形与失效进行了有限元模拟与试验研究,总结出轴向进给与内部内压力之间的关系。Mehran Mohammadi 等<sup>[10]</sup>对铝/铜双金属管进行液压胀形模拟与试验,通过设定不同内压力大小来获取极限应变并绘制了成形极限图。Jing Liu 等<sup>[11]</sup>研究了 316L 薄壁件的液压成形特性,通过模拟研究发现尺寸因素对波纹管的壁厚减薄程度和回弹值影响较大,其研究结果对实现精密成形提供了较好的参考。Seyed Jalal Hashemi 等<sup>[12]</sup>研究了低压液力对铝管零件成形的影响。Nikhare C 等<sup>[13-14]</sup>对比研究了管材在自由胀形与径压胀形环境下的应力分布及成形性。Huang C M 等<sup>[15]</sup>设计了一款使管材冲击液压胀形为三角形截面的模具,同时,验证了冲击液压胀形过程中受到内部内压力以及模具外力的影响。Javad Shahbazi Karami 等<sup>[16]</sup>利用 6063 薄壁铝管进行了冲击液压胀形模拟与试验,验证了圆管的弯曲强度大于六角形截面。刘建伟等<sup>[17]111-119[18]</sup>具体阐述了冲击液压胀形法的成形过程,设计了冲击液压胀形装置,对管材的成形进行了力学分析,并在管材的生产方面,摆脱了以往液压成形必须依赖专门液压供给装置的束缚,降低了成本,提高了效率。

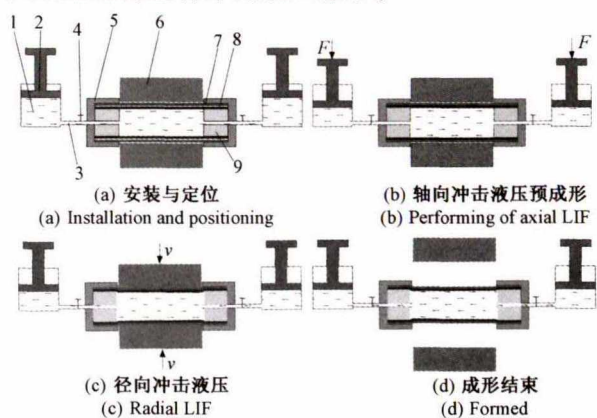
然而,冲击液压载荷作用下双金属薄壁管成形过

程是瞬间完成,管件成形所需内压力完全源自于管坯型腔体积的压缩,其大小随液体体积压缩量变化而变化,因此,本文对冲击载荷作用下双金属薄壁管的内压力形成机理展开研究。

## 1 成形原理

金属薄壁管冲击液压成形 (Liquid Impact Forming, LIF) 是在液压胀形和冲压成形基础上发展起来的一种新型复合成形技术,其具有受力均匀、结构轻量化、刚度强度高、液压胀形特点,同时又具有效率高、工艺简单、成本低等冲压成形优点<sup>[17]111-119</sup>,解决了传统液压成形技术必须依赖专门的液压供给装置等问题。

双金属薄壁管冲击液压胀形技术是利用 LIF 技术完成双金属管坯的一种成形方法,其原始几何参数如表 1,其成形原理如图 1 所示,图 1a 安装与定位:将双金属管定位于盛满液体的箱体中,通过连接管将内管两端与压缩容器相连;图 1b 轴向冲击液压预成形:对压缩容器的推杆施加轴向压力  $F$ ,使内管型腔液体受压而自发产生内部压力,发生塑性变形贴合外管,完成轴向冲击液压预成形;图 1c 径向冲击液压成形:启动压力机使上下模具匀速相向运动,通过径向压缩外管使双金属管冲压变形,同时内管因体积的再次压缩自发产生内压力而发生冲击液压胀形;图 1d 成形结束:上下模具在压力机的作用下完成合模,再反向运动,完成一次双金属薄壁管冲击液压胀形。



1. 压缩容器 Compression containers; 2. 推杆 Push rod; 3. 连接管 Connecting pipe; 4. 阀门 Valve; 5. 保护套 Protective jacket; 6. 模具 Mold; 7. 外管 Outer tube; 8. 内管 Inner tube; 9. 堵头 Plug

图 1 双金属薄壁管胀形原理图

Fig.1 The bulging principle of bimetallic thin-walled tubes

表 1 双金属薄壁管原始几何参数  
Tab.1 Original geometric parameters of bimetallic thin-walled tubes

材料牌号 Material brand	外直径 External diameter $r/mm$	内直径 Inner diameter/ mm	外半径 External radius/mm	内半径 Innerradius/ mm	壁厚 Wall thickness/ mm	内外管间隙 Gap between internal and external tubes/mm	成形长度 Forming length/mm
AA6010	$d_0 = 36$	$d_1 = 34$	$r_0 = 18$	$r_1 = 17$	$t_1 = 1$	$\delta = 0.5$	$l_1 = 90$
SS304	$D_0 = 38$	$D_1 = 37$	$R_0 = 19$	$R_1 = 18.5$	$t_0 = 0.5$		$l_0 = 90$

## 2 内压力形成的理论分析

### 2.1 轴向冲击液压预成形阶段

在轴向冲击液压预成形阶段中,两端推杆压缩液体时,由于液体具有一定的压缩性,根据液体体积压缩定义可知

$$\Delta V = -\frac{V_0 \Delta P}{K_1} \quad (1)$$

式中, $\Delta V$ 表示液体受压缩后体积改变量, $\Delta V = V_i - V_0$ , $V_0$ 表示双金属薄壁管型腔与两端压缩容器的初始液体体积, $V_i$ 表示双金属薄壁管腔内与两端压缩容器任意时刻液体体积; $\Delta P$ 表示液体受压缩后内压力改变量, $\Delta P = P_i - P_0$ ,其中 $P_0$ 和 $P_i$ 分别为管内初始内压力和管内任意时刻的内压力, $P_0 = 0$ ;  $K_1$ 表示体积弹性模量。

根据装置几何关系可知任意时刻体积关系式为

$$\begin{cases} V_0 = 2\pi R^2 H + \pi r_1^2 l_1 \\ V_i = 2\pi R^2 (H - H_i) + \pi r_a^2 l_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $H$ 表示压缩容器液体初始高度, $H_i$ 表示压缩容器任意时刻压缩高度, $R$ 表示压缩容器推杆半径(即压缩容器内径), $r_1$ 表示内管的内半径, $r_a$ 表示内管任意时刻的内半径,且预成型后内外管刚好贴合时的内管内半径 $r_a = r_1 + \delta$ 。由此可得

$$\Delta V = V_i - V_0 = \pi(r_a^2 - r_1^2)l_1 - 2\pi R^2 H_i \quad (3)$$

由式(1)、式(2)、式(3)可得

$$P_{i1} = P_0 - \frac{K_1 [\pi(\delta^2 + 2r_1\delta)l_1 - 2\pi R^2 H_i]}{2\pi R^2 H + \pi r_1^2 l_1}$$

### 2.2 径向冲击液压阶段

在径向冲击液压成形阶段中,双金属内外管坯各阶段截面面积演变如图 2 所示,由于变形截面为对称布置,为简化模型参数,仅以四分之一弧  $A_1M_1B_1$  为对象进行体积变化的分析

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{2}\pi(r_1 + \delta) \\ C_2 = l_{A_2C_2} + l_{C_2M_2D_2} + l_{D_2B_2} \\ C_3 = l_{A_3C_3} + l_{C_3M_3D_3} + l_{D_3B_3} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 分别是各个阶段中四分之一截面管件初始弧长、预成形后弧长、成形中期周长和成形后周

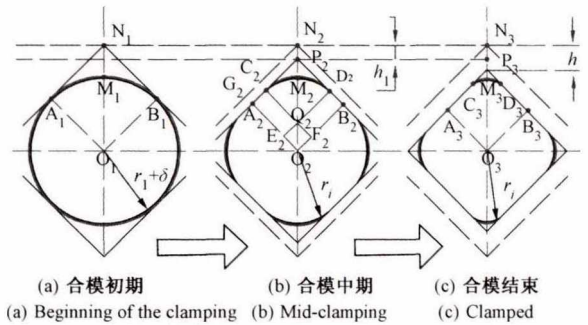


图 2 双金属薄壁管截面面积演变图

Fig.2 Evolution of section area of bimetallic thin-walled tubes

长。成形过程不考虑管间摩擦、材料流动性能、回弹等影响,且双金属薄壁管按理想状态完全填充模具型腔。预成形后变形过程中,根据弧长不变假设可知

$$C_1 = C_2 = C_3 \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可知

$$\begin{aligned} l_{A_2C_2} = l_{D_2B_2} &= \frac{1}{2}(C_1 - l_{M_2C_2D_2}) = \\ &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2}\pi(r_1 + \delta) - \frac{1}{2}\pi r_1 \right] = \\ &= \frac{1}{4}\pi(r_1 + \delta - r_1) \end{aligned} \quad (7)$$

由图 2b 的几何关系可得

$$\begin{cases} r_1 + \delta = l_{O_2C_2} = l_{O_2E_2} + l_{E_2A_2} + l_{A_2C_2} \\ l_{O_2E_2} = l_{O_2F_2} = l_{A_2C_2} \\ l_{A_2C_2} = \frac{\sqrt{2}}{2}h_i \\ l_{E_2A_2} = r_i \end{cases} \quad (8)$$

式中, $r_i$ 表示某一时刻金属薄壁内管的填充内半径; $h_i$ 表示某一时刻的合模高度,由于模具匀速闭合,因此 $h_i = vT_i$ , $v$ 表示合模速度, $T_i$ 为合模时间。由式(7)和式(8)有

$$r_i = r_1 + \delta - \frac{2\sqrt{2}}{4 - \pi}h_i = (r_1 + \delta) - \frac{2\sqrt{2}}{4 - \pi}vT_i \quad (9)$$

所以,四分之一胀形区截面积  $S_i$

$$\begin{aligned} S_i &= S_{O_2E_2Q_2F_2} + 2S_{A_2E_2Q_2C_2} + S_{C_2Q_2D_2} = \\ &= l_{E_2Q_2}^2 + 2l_{E_2Q_2}l_{A_2E_2} + \frac{1}{4}\pi r_i^2 = \end{aligned}$$

$$\left[ \frac{\pi}{4}(r_1 + \delta - r_i) \right]^2 + 2 \frac{\pi}{4}(r_1 + \delta - r_i)r_i + \frac{1}{4}\pi r_i^2 \quad (10)$$

由此得到某一时刻整个胀形截面积  $S_1$  为

$$S_1 = 4S_i \quad (11)$$

由式(9)、式(10)与式(11)有

$$S_1 = \frac{2\pi^2 - 8\pi}{(4 - \pi)^2} h_i^2 + \pi (r_1 + \delta)^2 \quad (12)$$

因此,金属薄壁管胀形区长度的初始体积  $V_0$ 、变形某一时刻体积  $V_i$  分别为

$$\begin{cases} V_0 = S_0 l_0 = \pi (r_1 + \delta)^2 l_0 \\ V_i = S_i l_0 = \left[ \frac{2\pi^2 - 8\pi}{(4 - \pi)^2} h_i^2 + \pi (r_1 + \delta)^2 \right] l_0 \end{cases} \quad (13)$$

体积变化量为

$$\begin{aligned} \Delta V_i(T) = V_i - V_0 &= \frac{2\pi^2 - 8\pi}{(4 - \pi)^2} l_0 h_i^2 + \pi (r_1 + \delta)^2 l_0 - \\ &\pi (r_1 + \delta)^2 l_0 = \frac{2\pi^2 - 8\pi}{(4 - \pi)^2} l_0 h_i^2 = \\ &\frac{2\pi^2 - 8\pi}{(4 - \pi)^2} l_0 v^2 T_i^2 \end{aligned} \quad (14)$$

根据双金属薄壁管在受到冲击载荷作用下,管坯型腔的体积随之减小,由于液体具有一定的压缩性,当其受到压缩时便自发产生液体内部压力,联立式(1)与式(14)可知,有任意时刻管坯型腔内内压力与合模参数的关系式

$$\begin{aligned} P_{i2} = P_{i1} - \frac{K_1(2\pi^2 - 8\pi)}{V_0(4 - \pi)^2} l_0 h_i^2 = \\ P_{i1} - \frac{1}{\pi} \frac{K_1(2\pi^2 - 8\pi)}{(4 - \pi)^2 (r_1 + \delta)^2} h_i^2 \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)也可表示为

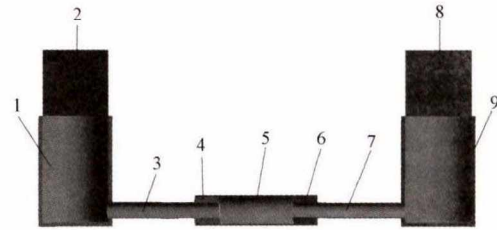
$$P_{i2} = P_{i1} - \frac{K_1(2\pi^2 - 8\pi)}{\pi(4 - \pi)^2 (r_1 + \delta)^2} v^2 T_i^2 \quad (16)$$

### 3 Ansys Workbench 有限元模拟分析

#### 3.1 轴向冲击液压预成形阶段

##### 3.1.1 模拟参数设定

根据双金属薄壁管冲击液压胀形原理,将胀形各部件的三维建模与装配导入 Ansys Workbench 软件,模型如图 3 所示。金属内管、连接管和压缩容器间设定为静态液体,液体边界对称,符合管材液压冲击成形分析的初始条件,且液体区域压力中心为管材的对称中心。采用 46# 液压油,体积模量为 700 MPa,成形温度为 22 °C,加载初始压力为 0 MPa,推杆速度  $v = 10$  mm/s,采用六组推杆轴向压缩的时间,分别为  $t = 0.2$  s、0.3 s、0.31 s、0.32 s、0.33 s、0.34 s。



1、9 压缩容器 Compression containers; 2、8 推杆 Push rods; 3、7 连接管 Connecting pipes; 5. 双金属薄壁管 Bimetallic thin-walled tube; 4、6 堵头 Plugs

图 3 双金属薄壁管轴向冲击液压阶段装置示意图

Fig.3 Diagram of the device for the axial LIF of bimetallic thin-walled tubes

##### 3.1.2 模拟结果分析

轴向冲击液压阶段的双金属薄壁管成形过程中通过 6 组不同推杆轴向压缩的时间,产生了与之对应的 6 组最大内压力  $P_{max}$ ,在内压力  $P_{max}$  作用下,双金属薄壁管的等效应力及其胀形如图 4 所示。由图可知:随着推杆距离的增大,内管受到轴向冲击液压力不断增大,产生的等效应力相应增大,所发生的形变量增大;当推杆轴向压缩的时间  $t = 0.34$  s 时,内外管刚好贴合,且外管开始发生弹性变形。

表 2 不同推杆参数下模拟与理论产生的最大内压力值对比

Tab.2 Comparisons of maximum hydraulic pressure between simulation and theory under different push rod parameters

时间 Time $t/s$	推杆行程 Stroke length $H'/mm$	理论最大内压力 Theoretical maximum internal pressure $P_{max1}/MPa$	模拟最大内压力 Simulate maximum internal pressure $P_{max2}/MPa$	最大内压力偏差 Maximum internal pressure deviation $F/\%$
0.2	2	7.435	6.962	6.362
0.3	3	11.152	10.462	6.187
0.31	3.1	11.523	10.825	6.259
0.32	3.2	11.894	11.182	5.986
0.33	3.3	12.266	11.529	6.008
0.34	3.4	12.647	11.866	6.175

注:最大内压力偏差  $F = 100\% (P_{max1} - P_{max2}) / P_{max1}$

3.1.3 模拟与理论结果对比分析

模拟与理论中 6 组不同推杆参数下产生的内压力比较如表 2 所示,从表中结果可知:模拟与理论的最大内压力具有较好的一致性,引起偏差的主要原因是:理论分析中忽略了双金属薄壁管的预成形时不同零件材料特性和变形行为的差异性,而在有限元模拟中这些参数对结果可能产生一定的影响。

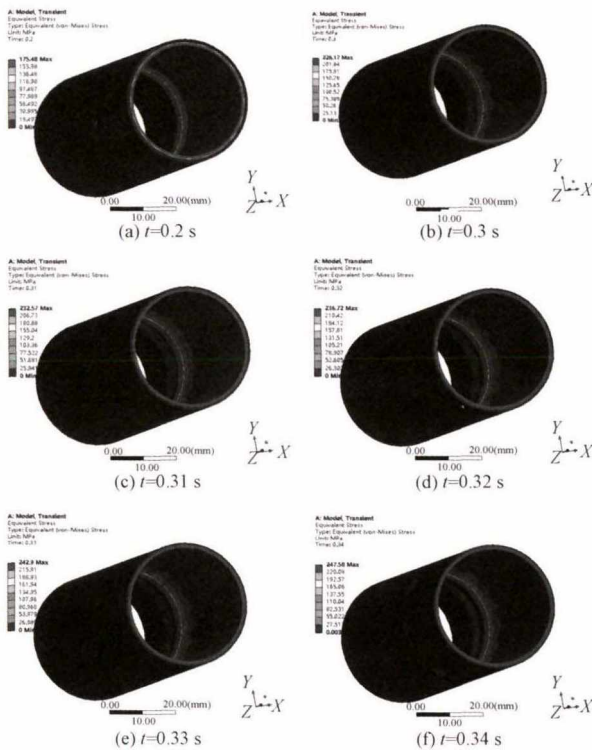


图 4 不同推杆轴向压缩时间下双金属薄壁管胀形图  
Fig.4 Diagram of forming of bimetallic thin-walled tubes under different axial liquid impact time of push rod

3.2 径向冲击液压成形阶段

3.2.1 模拟参数设定

双金属薄壁管内管在轴向冲击液压预成形后,实现了内外管的贴合,在此情况下构建了双金属薄壁管径压冲击液压胀形三维模型,导入 Ansys Workbench

中,采取 ACT 静水插件方式,生成模型如图 5 所示。在轴向冲击液压预成形内压基础上,设定上下模具合模速度  $v = 10 \text{ mm/s}$ ,选用的六组模具型腔截面边长  $a$  分别为 31 mm、32 mm、33 mm、34 mm、35 mm、36 mm。

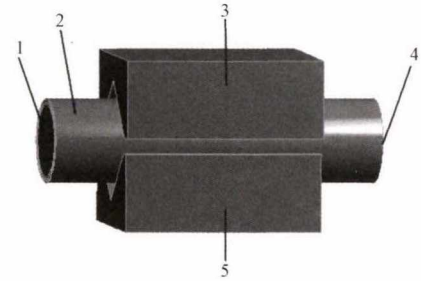


图 5 双金属薄壁管径向冲击液压阶段装置示意图  
Fig.5 Diagram of the device for the radial LIF of bimetallic thin-walled tubes

3.2.2 模拟结果分析

不同模具型腔截面边长的模拟结果如图 6 所示,图中不难发现:型腔截面边长  $a = 31 \text{ mm}$ 、 $32 \text{ mm}$  的模具时,因型腔截面边长较小,上下模具对内外管挤压变形程度较大,导致双金属管出现不均匀的飞边现象;型腔截面边长  $a = 33 \text{ mm}$ 、 $34 \text{ mm}$ 、 $35 \text{ mm}$ 、 $36 \text{ mm}$  的模具时,双金属薄壁管的内外管圆角贴合较好,且  $a = 33 \text{ mm}$  的填充性最好,随着模具型腔截面边长  $a$  值的增大,管坯型腔体积压缩减小,自发产生的内压力随之降低,双金属复合管成形圆角填充性随之降低。同时,随着模具型腔截面边长的增加,内管体积型腔变化随之减少,导致双金属薄壁管等效力减小,成形所产生的残余应力也随之减小。

3.2.3 模拟与理论结果对比分析

模拟与理论中 6 组不同模具截面边长作用下产生的内压力参数对比如表 3 所示,结果不难发现:模拟与理论的内压力曲线具有较好的一致性,理论结果普遍高于模拟结果,最大偏差为 13.15%,导致此结果的主要原因是:在理论分析中,为降低数学模型构建的难

表 3 最大内压力数值模拟值与理论值对比

Tab.3 Comparison of numerical simulation and theoretical values of maximum hydraulic pressure

模具序号 Mold number	模具型腔截面边长 Mold cavity section side length $a \times a / (\text{mm} \times \text{mm})$	最大合模高度 Maximum closing height $h_i / \text{mm}$	理论最大内压力 Theoretical maximum internal pressure $P_{\text{max1}} / \text{MPa}$	模拟最大内压力 Simulate maximum internal pressure $P_{\text{max2}} / \text{MPa}$	最大内压力偏差 Maximum internal pressure deviation $F / \%$
模具 1 No. 1	31×31	4.949	142.801	124.096	13.10
模具 2 No. 2	32×32	4.242	108.270	94.031	13.15
模具 3 No. 3	33×33	3.535	79.051	71.336	9.76
模具 4 No. 4	34×34	2.828	55.147	50.681	8.10
模具 5 No. 5	35×35	2.121	36.553	33.778	7.60
模具 6 No. 6	36×36	1.414	23.271	21.408	8.00

注:最大内压力偏差  $\text{Maximum internal pressure deviation } F = 100\% (P_{\text{max1}} - P_{\text{max2}}) / P_{\text{max1}}$

度、提高实际分析的可操作性,对双金属薄壁管的成形的胀形长度、型腔体积、管坯弧长、管间作用力等方面进行简化与理想化处理,而在有限元模拟中,各模具参数、变形条件、力学性能等方面均采用真实情况进行设定,所以导致了两者间存在一定偏差。

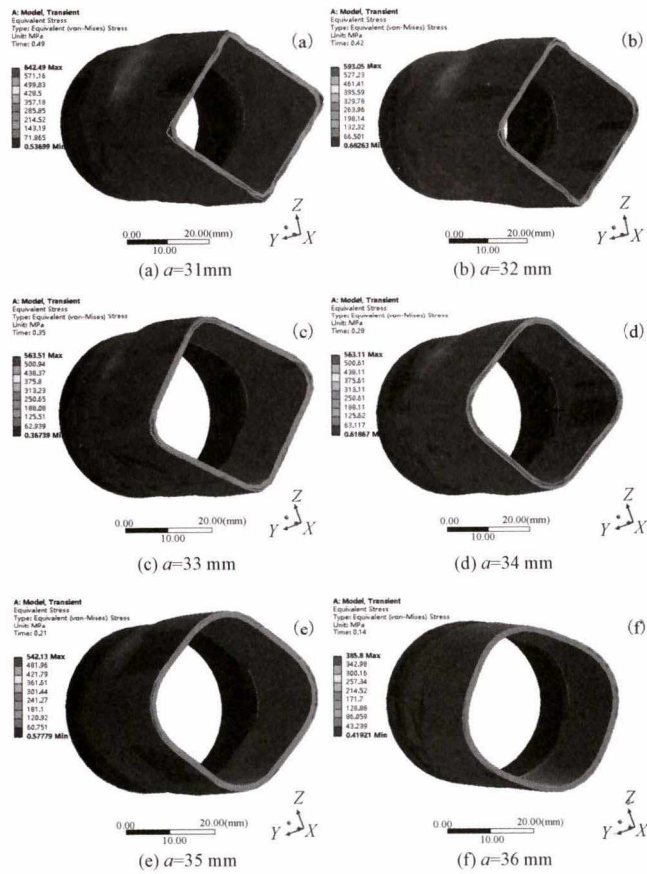


图 6 不同模具型腔截面边长下双金属薄壁管的胀形图

Fig.6 Forming sketch of bimetallic thin-walled tubes with different mold cavity section side lengths

通过理论与模拟数值的对比分析,对结果进行加权修正,表示为

$$P_{\max} = P_{\max 1} (1 - \bar{F}) \quad (19)$$

式中,  $P_{\max}$  表示修正后的最大内压力值;  $\bar{F}$  表示最大内压力偏差平均值,根据表 3 计算可得  $\bar{F} = 9.95\%$ ,修正前后最大内压力对比如图 7 所示。

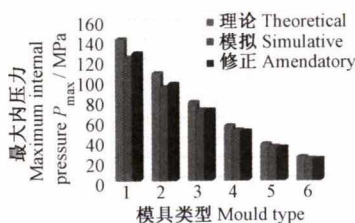


图 7 最大内压力修正前后对比图

Fig.7 Contrast chart before and after maximum internal pressure correction

## 4 结论

冲击液压胀形技术作为液压胀形与冲压成形基础上发展起来的一种复合成形技术,因其具有受力均匀、结构轻量化、刚度强度高、成形效率高、工艺简单、成本低等优点,具有很好的应用前景。本文以 1Cr18Ni9 不锈钢外管与 AA6010 铝合金内管组成的双金属薄壁管为研究对象,通过对其冲击液压胀形过程中型腔体积与内压力间的理论分析、数值模拟的研究,得到了以下结论:

1) 建立了冲击液压载荷作用下双金属薄壁管成形过程中管坯型腔内压力理论模型。在轴向冲击液压胀形阶段,管坯型腔内压力与推杆行程的关系式为  $P_{i1} = P_0 - \frac{K_1 [\pi(\delta^2 + 2r_1\delta)l_1 - 2\pi R^2 H_i]}{2\pi R^2 H + \pi r_1^2 l_1}$ ; 在径向冲击液压胀形阶段,管坯型腔内压力与合模高度的关系式为  $P_{i2} = P_{i1} - \frac{1}{\pi} \frac{K_1(2\pi^2 - 8\pi)}{(4 - \pi)^2 (r_1 + \delta)^2} h_i^2$ 。

2) 通过对冲击液压载荷作用下的双金属薄壁管成形过程中管坯型腔内压力形成的有限元模拟分析,不难发现轴向、径向冲击液压胀形阶段的理论与模拟结果具有较好的一致性。同时,通过对径向冲击液压胀形阶段内压力误差修订,优化了其数学模型。

## 参考文献 (References)

- [1] 周飞宇. 双层金属复合管液压成形工艺研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 1-5.  
ZHOU FeiYu. Research on bi-layered tubular components forming by hydroforming [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 1-5 (In Chinese).
- [2] 王开坤, 王 晰, 汪富玉, 等. 等壁厚双层管半固态共挤压成形的数值模拟[J]. 锻压技术, 2010, 35(1): 40-43.  
WANG KaiKun, WANG Xi, WANG FuYu, et al. Numerical simulation of thixo-co-extrusion for double-layer tube with equal wall thickness [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(1): 40-43 (In Chinese).
- [3] 刘建伟, 杨年炯, 武敏建, 等. 金属双层管冲击液压胀形装置设计与力学分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 81-84.  
LIU JianWei, YANG NianJiong, WU MinJian, et al. Equipment design and mechanical analysis of liquid impact forming technology to bimetallic tube [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(7): 81-84 (In Chinese).
- [4] 刘建伟, 刘心宇, 杨连发, 等. 基于数字散斑相关法的管材胀形轮廓方程的构建[J]. 锻压技术, 2014, 39(4): 131-135.  
LIU JianWei, LIU XinYu, YANG LianFa, et al. Constructing curvilinear equation of bulging profile for tube based on digital speckle correlation method [J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(4): 131-135 (In Chinese).
- [5] LIU FuJun, ZHENG JinYang, PING Xu, et al. Forming mechanism

- of double-layered tubes by internal hydraulic expansion [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2004, 81(7): 625-633.
- [ 6 ] 刘富君, 郑津洋, 郭小联, 等. 双层管液压胀合的原理及力学分析 [J]. *机械强度*, 2006(1): 99-103.  
LIU FuJun, ZHENG JinYang, GUO XiaoLian, et al. Principle and mechanics analysis for bimetallic tube formed by hydraulic expansion [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2006 ( 1 ): 99-103 ( In Chinese ).
- [ 7 ] 王学生, 李培宁, 王如竹, 等. 双金属复合管液压成形压力的计算 [J]. *机械强度*, 2002(3): 439-442.  
WANG XueSheng, LI PeiNing, WANG RuZhu, et al. Calculation of hydro-forming pressure for bi-metal clad pipe [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002(3): 439-442 ( In Chinese ).
- [ 8 ] Hossein Seyedkashi S M. Process analysis of two-layered tube hydroforming with analytical and experimental verification [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(2): 169-175.
- [ 9 ] A G Olabi, A Alaswad. Experimental and finite element investigation of formability and failures in bi-layered tube hydroforming [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012 (42): 815-820.
- [ 10 ] Mehran Mohammadi, Javad Shahbazi Karami, Seyed Jalal Hashemi. Forming limit diagram of aluminum/copper bi-layered tubes by bulge test [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017(92): 1539-1549.
- [ 11 ] Jing Liu, Hongwei Li, Yang Liu, et al. "Size effect" related hydroforming characteristics of thin-walled 316-L bellow considering pressure change [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018(98): 505-522.
- [ 12 ] Seyed Jalal Hashem, Farzad Rahman. Investigation of the geometry of rectangular cross section aluminum parts in low pressure tube hydroforming process [J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2018, 71(6): 1445-1453.
- [ 13 ] Nikhare C, Weiss M, Hodgson P D. Die closing force in low pressure tube hydroforming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010 ( 210 ): 2238-2244.
- [ 14 ] Nikhare C. Pressurization system in low pressure tube hydroforming [J]. *Modeling and Numerical Simulatio of Material Science*, 2013, 3(3): 71-78.
- [ 15 ] Huang C M, Liu J W, Zhong Y Z, et al. Exploring liquid impact forming technology of the thin-walled tubes [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014 ( 633/634 ): 841-844.
- [ 16 ] Javad Shahbazi Karami, Seyed Davoud Nourbakhsh, Kian Tafazzoli Aghvami. Experimental and numerical assessment of mechanical properties of thin-walled aluminum parts produced by liquid impact forming [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018(96): 4085-4094.
- [ 17 ] Jianwei Liu, Xinyu Liu, Lianfa Yang, et al. Investigation of tube hydroforming along with stamping of thin-walled tubes in square cross-section dies [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230 ( 1 ): 111-119.
- [ 18 ] 刘建伟, 姚馨淇, 李玉寒, 等. 液压胀形环境下管材的力学行为 [J]. *锻压技术*, 2019, 44(2): 1-7.  
LIU JianWei, YAO XinQi, LI YuHan, et al. Mechanical behavior of tube in hydroforming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2019, 44 ( 2 ): 1-7 ( In Chinese ).