

单驼峰型薄壁弯管充液压弯-低压压形复合成形工艺优化

魏 玮¹, 赵长坚^{2,3}, 曾祥成⁴

(1. 浙江海亮股份有限公司, 浙江 诸暨 311835; 2. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 江苏 南京 210016;
3. 佛山市液艺科技有限公司, 广东 佛山 528313; 4. 河北石油职业技术大学 工业技术中心, 河北 承德 067000)

摘要: 带弯曲特征和局部大变形量特征金属薄壁异形管件因其高强度、轻质量和优异的服役性能, 在航空航天、新能源汽车等领域应用广泛。针对具有代表性的单驼峰型薄壁构件成形, 提出充液压弯-低压压形复合成形工艺。采用有限元模拟结合实验验证, 具体分析了支撑内压、液压加载路径和压形速度对构件壁厚分布的影响规律。其中, 在充液压弯阶段, 支撑内压为 9 MPa 的条件下, 既可保证材料不发生径向屈服, 又可有效避免壁厚减薄; 而在低压压形阶段, 采用低压胀形和中等压形速度相匹配的方式, 能够使材料进入拉-压区变形, 进而降低壁厚减薄率。最终, 通过实验获得了最大减薄率为 27.5% 的整体单驼峰型薄壁构件, 验证了该工艺的可行性。

关键词: 充液压弯; 低压压形; 薄壁构件; 支撑内压; 液压加载路径; 壁厚减薄

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2026.04.018

中图分类号: TG315.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2026) 04-0170-11

Optimization on composite forming process of hydro-bending and low-pressure forming for single-hump thin-walled bent tube

Wei Wei¹, Zhao Changjian^{2,3}, Zeng Xiangcheng⁴

(1. Zhejiang Hailiang Co., Ltd., Zhuji 311835, China;
2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Foshan Yeyi Technology Co., Ltd., Foshan 528313, China;
4. Industrial Technology Center, Hebei Petroleum University of Technology, Chengde 067000, China)

Abstract: Metal thin-walled special-shaped tubes with bending features and local large deformation characteristics are widely used in fields such as aerospace and new energy vehicles due to their high strength, light weight and excellent service performance. For the forming of representative single-hump thin-walled components, a composite forming process of hydro-bending and low pressure forming was proposed. The influence laws of supporting internal pressure, hydraulic loading path and forming speed on the wall thickness distribution of components were specifically analyzed using finite element simulation combined with experimental verification. When the supporting internal pressure is 9 MPa, it can not only ensure that the material does not undergo radial yielding, but also effectively avoid wall thickness thinning during the hydro-bending stage. During the low-pressure forming stage, the method of matching low-pressure bulging with medium forming speed can make the material enter the tension-compression zone for deformation, thereby reducing the wall thickness thinning rate. Finally, an integral single-hump thin-walled component with a maximum thinning rate of 27.5% was obtained through experiments, verifying the feasibility of this process.

Key words: hydro-bending; low-pressure forming; thin-walled components; supporting internal pressure; hydraulic loading path; wall thickness reduction

金属薄壁异形管件因具有强度高、质量轻、服役性能良好的优势, 在航空航天、新能源汽车、石

油化工等工程领域具有广泛的应用^[1]。在轻量化的整体发展趋势下, 金属管件朝着薄壁化、异形化、整体化发展, 且往往存在弯曲结构、异形截面、凸/凹台、极小圆角等多特征结构相互耦合, 给传统成形技术带来了巨大挑战。

管材液压成形技术是以高压液体为传力介质, 使管材在模具内发生塑性变形, 最终成形为复杂截

收稿日期: 2025-12-24; 修订日期: 2026-02-23

作者简介: 魏 玮 (1993-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: ww857821205@126.com

通信作者: 赵长坚 (1983-), 男, 硕士研究生, 工程师

E-mail: 125307980@qq.com

面或异形结构件的先进成形技术^[2-4]。针对不同结构特征的管材零件,国内外学者基于管材液压成形技术基本原理,相继开发了一些新工艺。针对弯曲结构特征,一般常采用“冲压+拼焊”或数控绕弯工艺成形,但该工艺对于成形径厚比大于20的薄壁管容易出现失稳起皱等缺陷,工艺窗口较窄。充液压弯成形工艺可以实现薄壁管整体弯曲成形,能够有效减轻薄壁管在弯曲时的截面畸变和外侧开裂等缺陷。金先玉等^[5]针对壁厚为0.5 mm、外径为 $\Phi 50.5$ mm的6061铝合金超薄壁管的充液压弯成形进行数值模拟,通过合理控制充液压力和压弯加载路径等关键参数,有效提高了超薄壁管的成形性能。程晓等^[6]针对大径厚比薄壁管材弯曲成形,对比分析了“冲压+拼焊”和充液压弯两种工艺下的成形效果,并实现了壁厚为1.5 mm、弯曲半径为90 mm的0Cr18Ni9不锈钢弯管零件的整体成形。宋鹏等^[7]采用实验和数值模拟研究了5A02铝合金薄壁管材充液压弯成形过程中内压对缺陷的影响规律,通过对应力状态的分析揭示了缺陷的形成机制。苑世剑等^[8]针对不锈钢超薄壁管件提出双层管弯曲成形工艺,研究了内压对截面扁平化、壁厚分布及弯曲缺陷的影响,通过理论分析推导得出双层管屈服压力的表达式,并借助有限元分析阐明了内管的起皱与稳定机理。此外,针对具有复杂截面特征且局部变形量很大的薄壁管件,采用液压成形时需进一步增加管材内部的液压力,有时甚至可能达到几百兆帕。在如此高的内压下,一方面会大幅增加摩擦力影响材料流动,另一方面也对液体密封提出挑战^[9-10]。针对该难题,Hwang Y M等^[11]通过可动模具的创新设计实现了管材大膨胀比成形。Balendra R等^[12]开发出厚壁管件上加工法兰环的工艺,并对管件内部填入聚合物填料,然后应用可移动冲头压缩内部聚合物填料,使其沿轴向缩短而沿径向膨胀,对厚壁管内壁施加压力以促使其以塑性变形的形式成形。Müller K等^[13]提出将锻造工艺和液压成形工艺相结合,首先由上下模具的合模运动对工件进行类似墩粗的加工,然后冲头沿着轴向运动,通过冲头压缩内部液体介质,内部液体压力不断增大完成工件成形。Ngai G等^[14]基于塑性变形理论与零件变形轮廓的演变,提出一个针对厚壁管液压锻造的压力-进给加载路径的数值模型,用于计算瞬时压力、材料进给、应力、应变以及一些其他的几何参数,以便在数值模拟时进行初始工艺设计,从而缩短工艺设计的时间。徐勇等^[15-17]提出管材液力成形技术,

通过在工件轴向、径向以及多方向上施加机械力,采用有限元模拟优化与实验验证相结合的方法,实现了极小圆角半径、大变形的汽车排气管类以及 Ω 类复杂管材零件的精确成形。初冠南等^[18]提出充液墩形技术原理,借助内压的支撑,对管坯进行“截面压缩”以成形变截面中空零件,实现了DP600钢质车身B柱的高质量成形。林才渊等^[19]、庄永鹏等^[20]和初冠南等^[21-22]提出充液压制(也称“充液压形”)技术,通过引入模具合模对管材提供额外的成形力,在模具合模力的作用下,充液压形所需的成形内压仅约为内高压成形的5%~15%,并进一步研究了工艺参数对回弹、壁厚均匀性、成形缺陷形成机制等方面的影响。

尽管充液压弯、充液压形等成形技术的提出,可针对性地单一解决弯曲特征、异形截面和局部大变形量等成形难题,但随着金属薄壁构件的功能集成,其结构愈加复杂化,往往存在多特征的相互耦合,需各技术协同成形,各工序之间的交互影响目前仍需进一步研究。因此,本文针对具有典型带弯曲特征的单驼峰型薄壁构件,开展充液压弯和低压压形技术协同成形下的工艺研究,重点分析各工序参数对壁厚减薄率、成形缺陷等的影响规律,以及各工序之间的交互影响。

1 实验材料与方法

1.1 零件结构特征与材料性能

针对某304不锈钢单驼峰型薄壁构件,厚度为1.2 mm,管半径为30 mm,其主体结构如图1a所示,整体上呈现出不同曲率半径的弯曲特征,同时在曲率半径为108 mm弯曲段的右端具有对称凸起小特征,即“单驼峰”特征(图1中方框部分),其中驼峰顶部半径为3 mm,斜边区域长度为9.50 mm,具体尺寸如图1b所示。

采用单向拉伸实验进行1.2 mm厚度的304不锈钢板材的力学性能测试,获取其工程应力-工程应变曲线,如图2所示。其屈服强度、抗拉强度和断裂伸长率等力学性能参数如表1所示。

1.2 工艺原理

根据上述单驼峰型薄壁构件所具有的弯曲特征和驼峰特征,其成形工艺设计为两步,如图3所示。选用直径为 $\Phi 60$ mm的直管作为初始管坯,采用充液压弯技术进行弯曲结构部分的成形,其成形原理与模具结构如图3a所示,成形过程中对管坯内部进

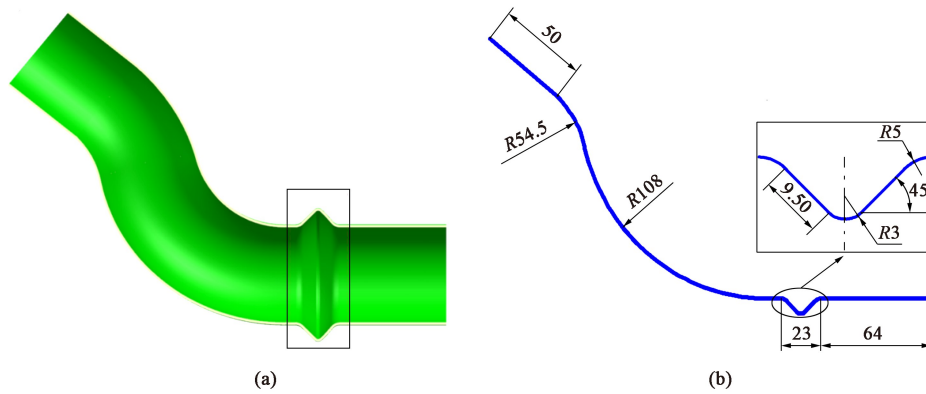


图 1 单驼峰型薄壁构件几何模型

(a) 轴线全剖图 (b) 轮廓尺寸

Fig. 1 Geometric model of single-hump thin-walled component

(a) Full sectional view along axis (b) Outline dimensions

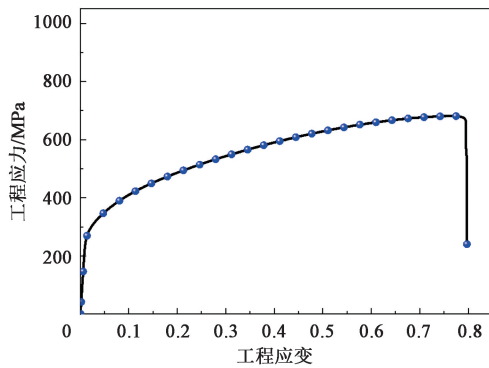


图 2 304 不锈钢的工程应力-工程应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curve of 304 stainless steel

行充液，并保持一定的液体压力以起到支撑作用。

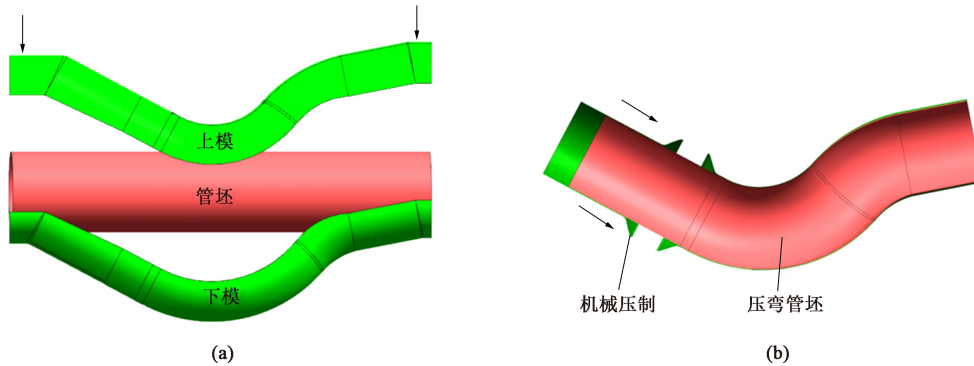


图 3 单驼峰型薄壁构件的工艺设计

(a) Step 1 (b) Step 2

Fig. 3 Process design of single-hump thin-walled component

1.3 有限元模型构建

根据单驼峰型薄壁构件的成形工艺原理，构建了充液压弯和低压压形两步成形的有限元模型，如图 4 所示。模具在模拟过程中定义为刚性体，管材定义为变形体，采用壳单元，材料为图 2 所示的

表 1 304 不锈钢力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of 304 stainless steel

参数	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
数值	279	682	79

随后，采用液压成形技术对驼峰结构部分进行成形，由于驼峰部位塑性变形量较大，且驼峰顶端存在很小的圆角，单纯采用液压成形进行胀形可能导致过度减薄甚至破裂，且工艺窗口较窄。因此，基于液压成形技术原理，进一步利用机械压制对驼峰部位进行辅助成形，如图 3b 所示，通过模具沿着驼峰横截面法向的运动，在驼峰胀形过程的同时施加机械力，进而保证驼峰部位的高质量成形。

304 不锈钢。在管材内部采用均布载荷等效替代液体压力，管材两端的进给方式为位移控制。管材在 Step 1 的充液压弯成形结束后，其壁厚分布信息以及应力应变状态可遗传至 Step 2 中继续进行低压压形，进而实现单驼峰型薄壁构件的全流程成形模拟。

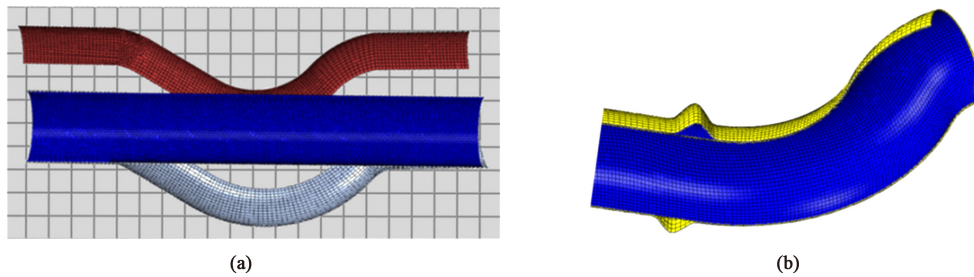


图 4 单驼峰型薄壁构件的有限元模型

(a) Step 1 (b) Step 2

Fig. 4 Finite element model of single-hump thin-walled component

2 结果与讨论

2.1 充液压弯工序的成形结果分析

2.1.1 极限屈服内压

假设管材经受内压 p_i 和轴向力 F ，材料为理想弹塑性材料，不考虑材料强化效应，在管材中心区域取一个微元，有以下平衡方程：

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{p_i}{t} \quad (1)$$

式中： σ_1 和 σ_2 分别为管材的主、次应力； t 为管材瞬时厚度； ρ_1 和 ρ_2 分别为管材沿径向和轴向的瞬时曲率半径。

采用 Von Mises 屈服准则（平面应力），则等效应力 $\bar{\sigma}$ 可表示为：

$$\bar{\sigma} = \sqrt{(1 - \alpha + \alpha^2)} \cdot \sigma_1 \quad (2)$$

其中：

$$\alpha = \sigma_2 / \sigma_1 \quad (3)$$

结合式 (1)、式 (2) 和式 (3)，则可得到管材内压表达式：

$$p_i = \frac{\bar{\sigma} t}{\sqrt{(1 - \alpha + \alpha^2)}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{\alpha}{\rho_2} \right) \quad (4)$$

在弹性变形和塑性变形的临界状态下，满足以下条件：

$$\rho_1 = (d_0 - t_0) / 2 \quad (5)$$

$$\rho_2 = \infty \quad (6)$$

$$t = t_0 \quad (7)$$

$$\bar{\sigma} = R_{p0.2} \quad (8)$$

式中： d_0 为管材初始外径； t_0 为管材初始壁厚； $R_{p0.2}$ 为管材的规定非比例延伸强度。

将式 (5) ~ 式 (8) 代入式 (4) 中可得：

$$p_{iy} = \frac{2R_{p0.2}t_0}{(d_0 - t_0) \sqrt{(1 - \alpha + \alpha^2)}} \quad (9)$$

式中： p_{iy} 为管材的极限屈服内压，当 $p_i \geq p_{iy}$ 时，管材发生塑性变形。

2.1.2 壁厚分布规律分析

支撑内压是充液压弯的关键工艺参数：若内压过低则管材内表面的支撑力不足，管材在轴向上的摩擦力较低，材料流动较大，弯曲内侧易出现局部材料堆积，引发起皱缺陷；若内压过大则导致轴向摩擦力变大，材料流动困难，虽能有效改善弯曲内侧的起皱缺陷，但管材弯曲外侧易因过度减薄而引发开裂。因此，合适的支撑内压才可协同弯曲内、外侧的材料流动，避免成形缺陷，提高壁厚均匀性。根据式 (9) 和表 2 计算可知，当支撑内压 $p_i < 11.5$ MPa 时，管材在周向上不发生屈服，实际成形过程中可避免“咬模”现象。因此，设计支撑内压分别为 7、8、9、10 和 11 MPa，基于充液压弯模拟研究支撑内压对壁厚减薄的影响，结果如图 5 所示。

表 2 式 (9) 中相关计算参数

Table 2 Relevant calculation parameters in formula (9)

参数	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	t_0/mm	d_0/mm	α
数值	279	1.2	$\Phi 60$	1

由图 5 可知，在支撑内压 p_i 为 7 和 8 MPa 条件下成形时，管材弯曲成形后出现了严重的起皱缺陷，如图 5a 和图 5b 所示，在弯曲段内侧出现沿周向分布的轻微皱纹，同时在与周向皱纹相垂直的部位则出现严重的死皱缺陷。随着支撑内压的进一步增加，当 $p_i \geq 9$ MPa 时，因为支撑内压的增加提供了更大的径向力和摩擦力，从而有效消除了起皱缺陷。如图 6 所示，进一步对不同支撑内压下弯管的弯曲段内、外侧最小壁厚进行分析，在支撑内压 p_i 为 9、10 和 11 MPa 条件下，弯曲段内侧的壁厚分别为 1.27、1.25 和 1.18 mm，而弯曲段外侧的壁厚分别为 1.12、1.10 和 1.06 mm。综合对比可以看出，支

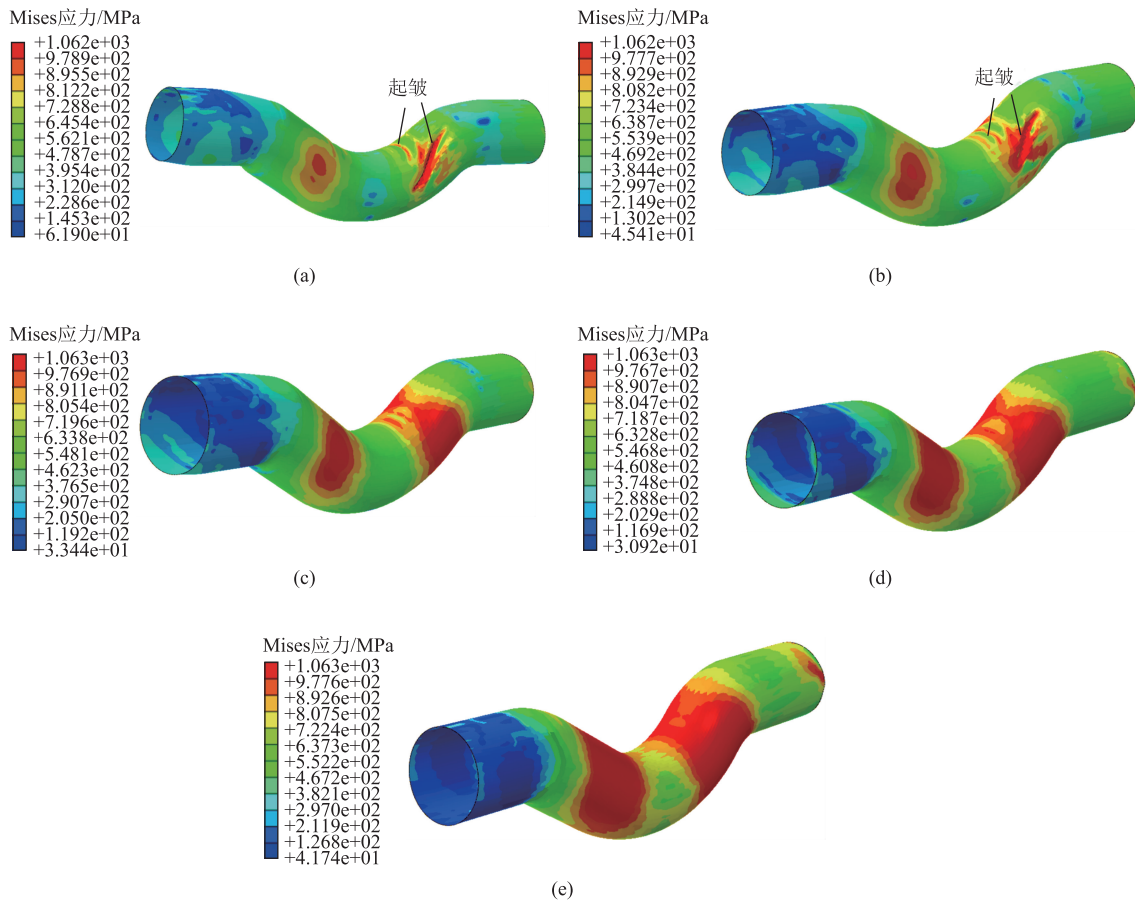


图 5 不同支撑内压下的充液压弯模拟结果

(a) 7 MPa (b) 8 MPa (c) 9 MPa (d) 10 MPa (e) 11 MPa

Fig. 5 Simulation results of hydro-bending under different supporting internal pressures

撑内压 p_i 为 9 和 10 MPa 时, 弯曲段内侧出现了一定程度的增厚, 而当支撑内压进一步增加至 11 MPa 后, 由于支撑内压过大限制了材料在轴向上的充分流动, 导致弯曲段内侧出现减薄。在弯曲段外侧壁厚均出现不同程度的减薄, 其中支撑内压 p_i 为 9 MPa 时减薄最小。因此, 为避免后续低压压形过程出现严重的过度减薄, $p_i=9$ MPa 为充液压弯工序成形最理想的支撑内压值。

2.2 低压压形工序的成形结果分析

2.2.1 不同液压加载路径对成形壁厚的影响分析

在经过支撑内压 $p_i=9$ MPa 的充液压弯成形后, 进一步针对驼峰特征进行低压压形, 根据低压压形技术原理, 管材内的液压加载路径与机械力加载过程中的压形位移匹配性对最终成形结果影响较大。因此, 以进给位移 4 mm 为分界线, 匹配不同升压速率, 如图 7a 所示 3 条液压压力-时间曲线, 匹配图 7b 所示进给位移-时间曲线, 得到 3 种不同斜率的液压加载路径, 如图 7c 所示。由于进给位移随着时间变化为直线, 而升压速率在进给位移为 4 mm

前不同, 导致了图 7c 中 4 mm 线上下部分斜率 (k_{11} 与 k'_{11} , k_{22} 与 k'_{22} , k_{23} 与 k'_{23}) 不同, 其中 $k_{11} > k_{22} > k_{33}$, 研究这 3 种不同斜率的液压加载路径对壁厚的影响规律。

图 8a~图 8c 分别为不同液压加载路径下的低压压形有限元模拟结果, 针对驼峰区域的顶部 R3 圆角区, 分别统计其内、外侧的壁厚分布, 在路径 1、路径 2 和路径 3 加载下, 驼峰圆角区的最大壁厚分别为 1.01、0.95 和 1.07 mm, 而最小壁厚分别为 0.81、0.70 和 0.88 mm。综合对比发现, 随着斜率的逐渐增大, 驼峰圆角区内、外侧的壁厚减薄逐渐降低, 当采用路径 3 的液压加载路径时, 壁厚减薄最小, 且内、外侧的壁厚差较小, 仅为 0.19 mm, 表明其壁厚均匀性更佳。

为进一步分析 3 种不同斜率加载路径下所引起的壁厚差异, 分别提取驼峰区域的左侧和右侧低压压形过程中的变形应变路径, 如图 9a 和图 9b 所示, 其中, ε_1 为主应变, ε_2 为次应变。对于驼峰左侧, 路径 1 和路径 3 的应变路径均为先由单拉区域向平

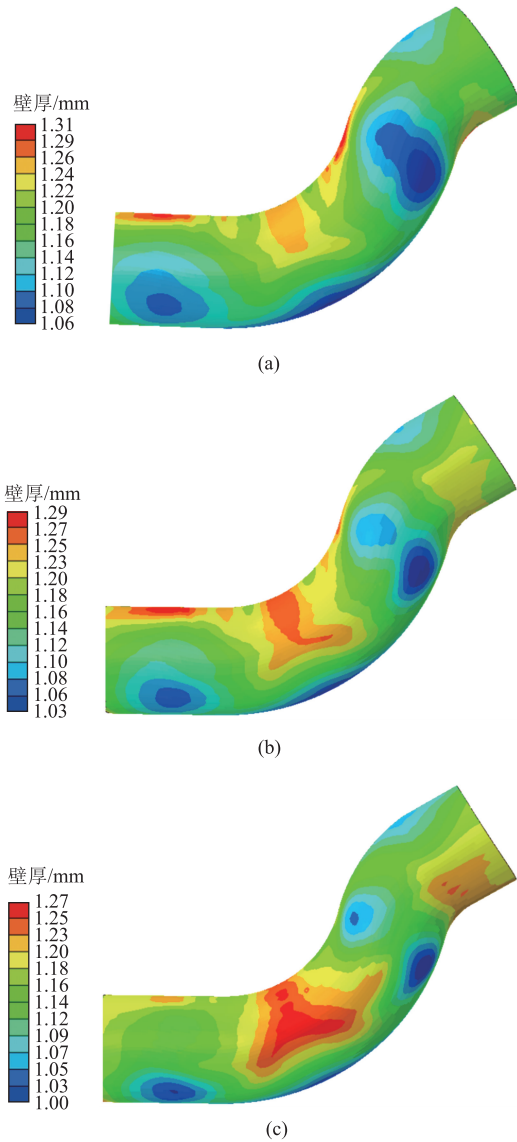


图 6 不同支撑内压下的充液压弯壁厚模拟结果
(a) 9 MPa (b) 10 MPa (c) 11 MPa

Fig. 6 Wall thickness simulation results of hydro-bending under different supporting internal pressures

面应变和双拉区域转变，并在变形后期再次转变为单拉应变，即整体变形过程以拉-压变形路径为主，而路径 2 的整体变形路径则以双拉区为主。对于驼峰右侧，在变形初期，路径 1、路径 2 和路径 3 均由平面应变向双拉区转变，而在变形后期则转变为单拉应变，即整体变形以双拉向单拉转变为主。造成这种左、右侧的应变路径不同的主要原因在于：在单驼峰特征成形过程中，压形仅在左侧进行，因此，随着变形的进行压形位移逐渐增大，驼峰区域的轴向压力也随之增大，这造成了左侧应变路径在变形后期呈现为拉-压变形；而驼峰区域右侧在变形初期以胀形为主，直至变形后期由于轴

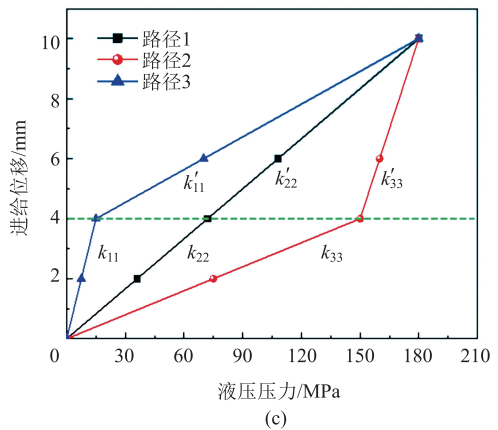
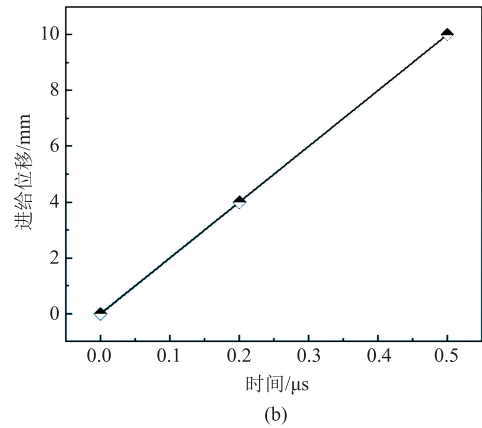
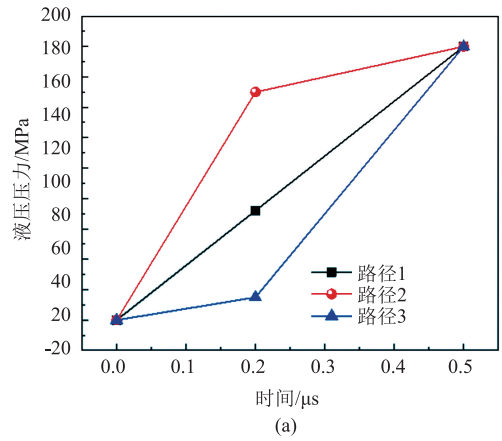


图 7 低压压形工序的不同液压加载路径
(a) 液压压力-时间曲线 (b) 进给位移-时间曲线
(c) 液压加载路径

Fig. 7 Different hydraulic loading paths in low-pressure forming process
(a) Hydraulic pressure-time curves (b) Feeding displacement-time curves (c) Hydraulic loading paths

向压力增大而传递至右侧，才会导致出现拉-压变形。

图 10 为不同液压加载路径下驼峰特征的变形过程，对比分析可知，在压形位移一定的条件下，路径 2 变形前期以胀形为主，且胀形高度较大，这是因为路径 2 在前期液压增压速度较大，使管材迅速

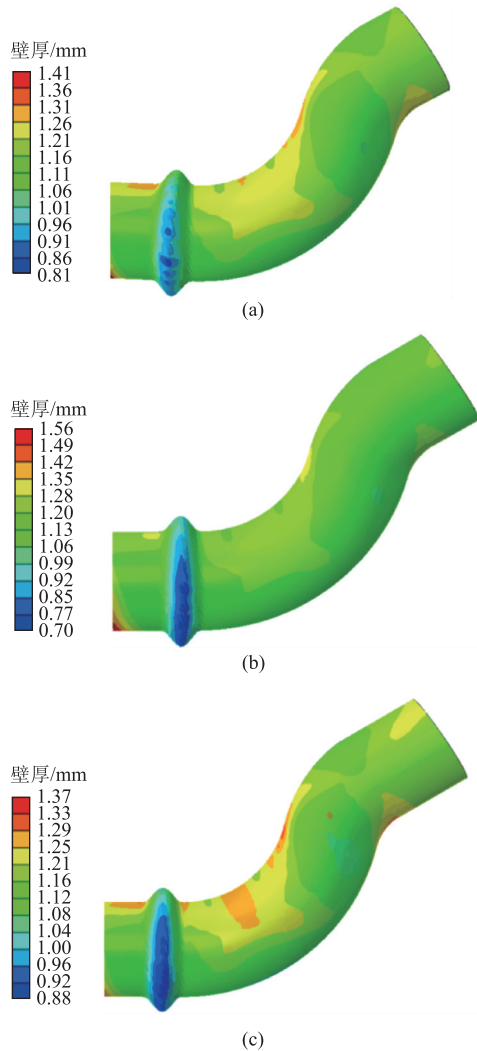


图 8 3 种液压加载路径下低压压形壁厚分布云图
(a) 路径 1 (b) 路径 2 (c) 路径 3

Fig. 8 Cloud maps of wall thickness distribution in low-pressure forming under three hydraulic loading paths
(a) Path 1 (b) Path 2 (c) Path 3

发生屈服，导致压形的速度与胀形的速度不匹配。而在路径 1 和路径 3 条件下，变形初期驼峰轮廓出现了一定的左右不对称性，这主要是因为路径 1 和路径 3 的液压增压速度相对较慢，管材的胀形速度有所降低，在胀形的同时实现了对驼峰左侧的压形。随着变形的进一步发生，压形所产生的轴向力传递至右侧，并最终形成左、右对称的驼峰结构。材料在压应力作用下的抗失稳能力更强，因此，对于低压压形过程，应尽可能保证材料在拉-压区域下发生变形，这样能更好地避免壁厚的过度减薄。故综合分析可知，在驼峰特征的低压压形过程中，应先采用低压胀形匹配压形过程，然后再进一步增压以达到贴模，即采用路径 3 为最佳。

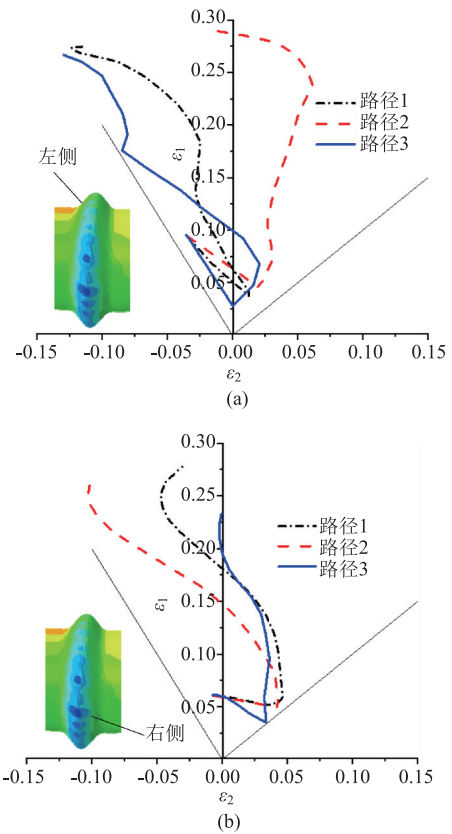


图 9 驼峰区域的应变路径分析
(a) 左侧 (b) 右侧

Fig. 9 Strain path analysis of hump area
(a) Left side (b) Right side

2.2.2 不同压形速度对成形壁厚的影响分析

由上文结果可知，在驼峰变形前期采用低压胀形并配合一定的压形速度可有效抑制壁厚减薄。因此，在上述路径 3 的液压加载路径的前提下，进一步分析不同压形速度对成形壁厚的影响规律，分别采用 3 种压形速度，且 $v_3 > v_2 > v_1$ ，分别对应路径 3-1、路径 3-2 和路径 3-3，具体如图 11 所示。

图 12a~图 12c 分别为不同压形速度路径下的低压压形有限元模拟结果，针对驼峰区域的顶部 R3 圆角区，分别统计其内、外侧的壁厚分布，在路径 3-1、路径 3-2 和路径 3-3 加载下，驼峰圆角区的最大壁厚分别为 1.07、1.08 和 0.55 mm，而最小壁厚分别为 0.88、0.88 和 0.58 mm。综合对比发现，随着压形速度的逐渐增大，驼峰圆角区内、外侧的壁厚减薄先增加后降低的趋势，其中在路径 3-3 条件下出现严重减薄，存在极大的破裂风险，而路径 3-1 和路径 3-2 的成形结果相差不大。

进一步对路径 3-1 和路径 3-2 条件下的驼峰区

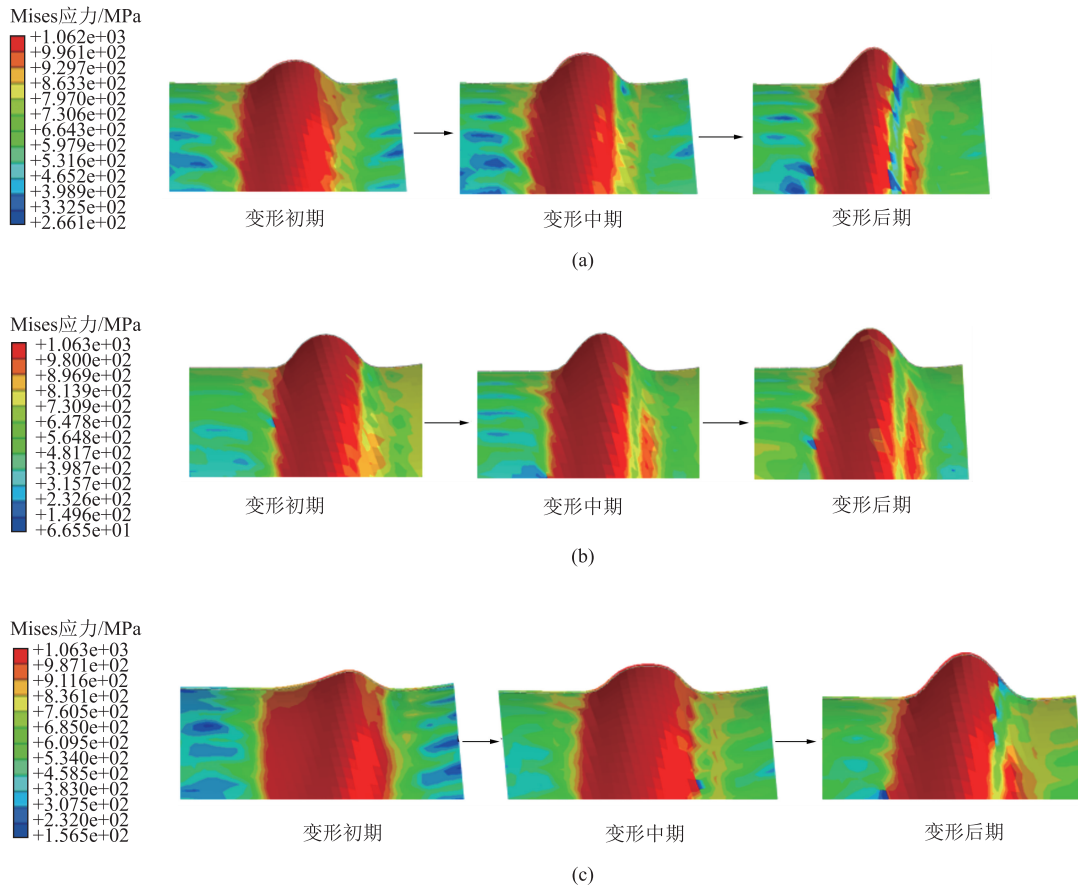


图 10 不同液压加载路径下的驼峰变形过程

(a) 路径 1 (b) 路径 2 (c) 路径 3

Fig. 10 Hump deformation process under different hydraulic loading paths

(a) Path 1 (b) Path 2 (c) Path 3

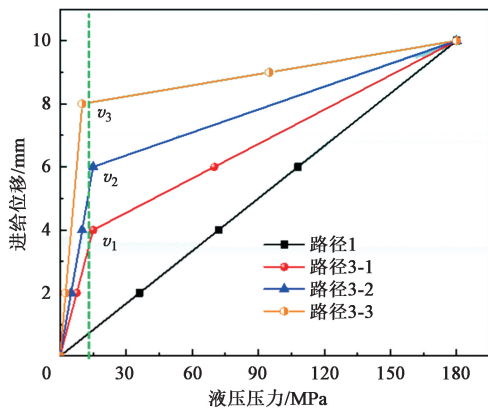


图 11 低压压形工序不同压形速度路径

Fig. 11 Different forming speed paths in low-pressure forming process

域壁厚分布进行分析，分别在驼峰的内侧、中间和外侧区域沿着驼峰轮廓提取 16 个测量点的壁厚信息，如图 13a 所示，其中图 13b~图 13d 分别为路径 3-1 和路径 3-2 下的内侧、中间和外侧区域壁厚分布对比。可以看出，路径 3-2 条件下驼峰内侧和中间区域的壁厚均略高于路径 3-1；而在驼峰外

侧，路径 3-2 和路径 3-1 在最小壁厚位置相差不大。因此，整体上路径 3-2 的壁厚分布要优于路径 3-1。

2.3 充液压弯-低压压形工艺验证

进行工艺验证研究，第 1 步，采用 9 MPa 支撑内压进行压弯成形，成形过程较为简单，将管坯放入模具型腔内，将管坯两端通过冲头固定，合模成形。第 2 步，基于有限元模拟得到的加载路径 3-2，得到实验件如图 14 所示，从成形结果可以看出，经过充液压弯-低压压形复合成形的零件无明显缺陷。采用壁厚仪进行壁厚检测，在零件驼峰位置按照图 13a 所示取点位置选取测量点对壁厚进行测量，同时与有限元模拟结果进行对比，对比结果如图 15 所示。从结果中可以看出，有限元模拟结果和实验结果较为接近，实验壁厚略低于有限元模拟结果，最小壁厚值为 0.87 mm，较初始壁厚 1.2 mm，减薄了 27.5%，符合实际使用工况 30% 的要求。

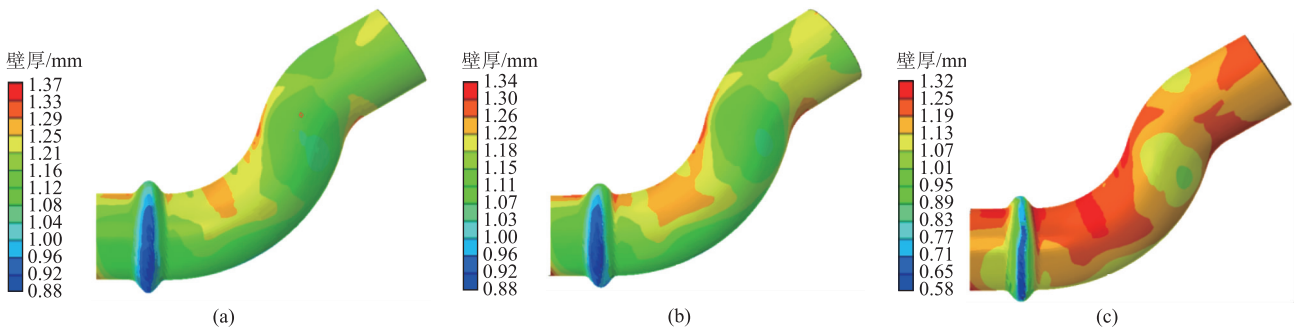


图 12 3 种压形速度路径下的壁厚分布云图

(a) 路径 3-1 (b) 路径 3-2 (c) 路径 3-3

Fig. 12 Cloud maps of wall thickness distribution under three forming speed paths

(a) Path 3-1 (b) Path 3-2 (c) Path 3-3

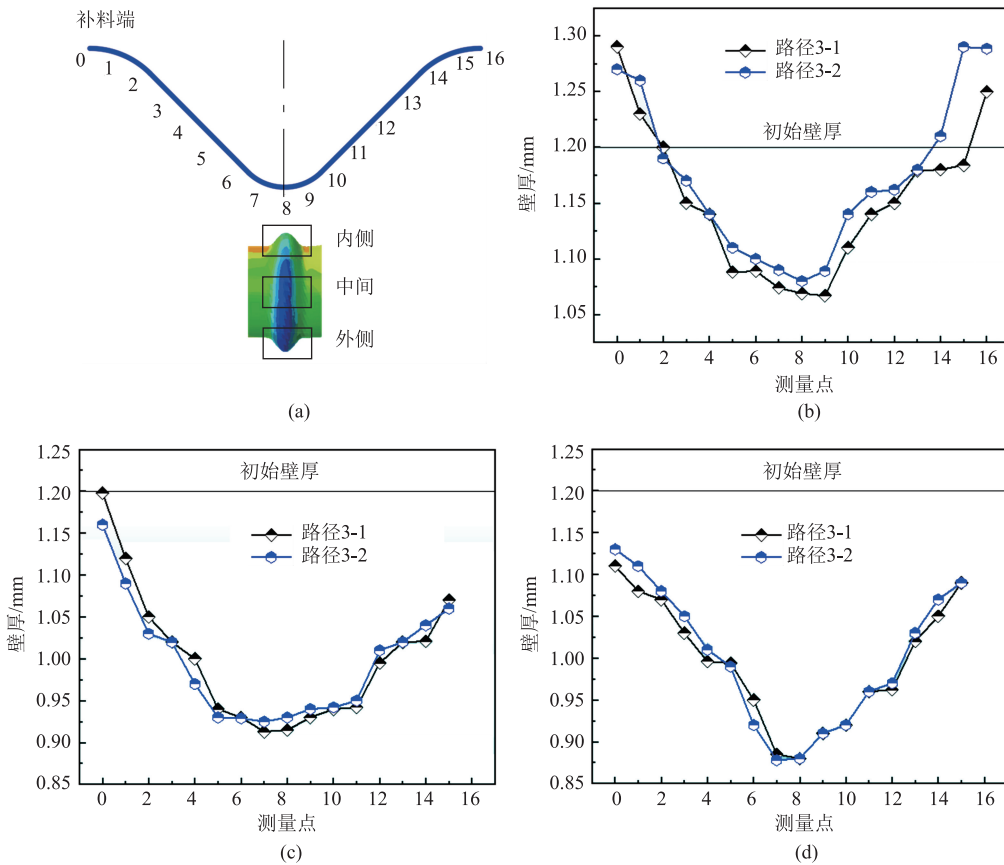


图 13 路径 3-1 和路径 3-2 条件下的驼峰壁厚分布

(a) 取点位置 (b) 内侧 (c) 中间 (d) 外侧

Fig. 13 Distributions of hump wall thickness under path 3-1 and path 3-2 conditions

(a) Selected point positions (b) Inner side (c) Middle (d) Outer side

3 结论

(1) 支撑内压对充液压弯工序的壁厚影响较大, 在保证管材不发生屈服的条件下, $p_i=9 \text{ MPa}$ 为充液压弯工序成形最理想的支撑内压值。

(2) 采用低压压形对驼峰特征进行成形时,

采用低压胀形配合一定的压形速度可将驼峰区域调控至拉-压应变路径, 从而可有效抑制壁厚减薄。

(3) 通过充液压弯-低压压形复合成形工艺可实现弯曲特征单驼峰型薄壁构件的无缺陷成形, 成形件的最大减薄率为 27.5%, 符合实际使用工况。



图 14 实验验证件

Fig. 14 Experimental verification component

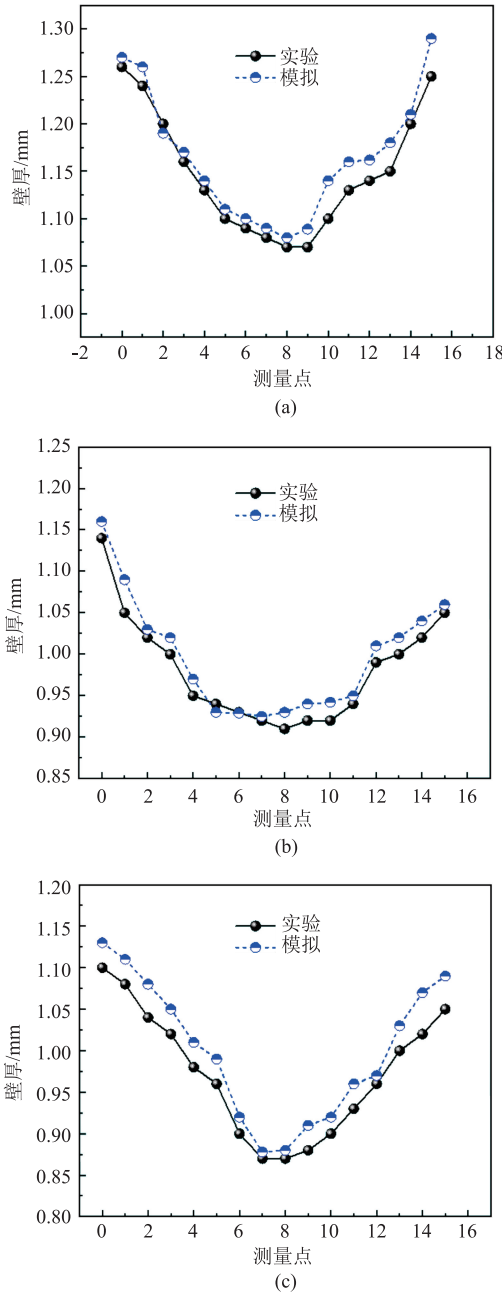


图 15 驼峰位置实验和模拟壁厚分布

(a) 内侧 (b) 中间 (c) 外侧

Fig. 15 Experimental and simulated wall thickness distribution at hump position

(a) Inner side (b) Middle (c) Outer side

参考文献:

[1] 林忠钦, 黄庆学, 苑世剑, 等. 中国塑性成形技术和装备 30 年的重大突破与进展 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (4): 2-45.
Lin Z Q, Huang Q X, Yuan S J, et al. Major breakthrough and progress in metal forming technology and equipment of China in the last 30 years [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (4): 2-45.

[2] Xu Y, Zhang S H, Cheng M, et al. Formability improvement of austenitic stainless steel by pulsating hydroforming [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of engineering Manufacture, 2015, 229 (4): 609-615.

[3] Lee M G, Korkolis Y P, Kim J H. Recent developments in hydroforming technology [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2015, 229: 572-596.

[4] Chu G N, Chen G, Chen B G, et al. A technology to improve formability for rectangular cross-section component hydroforming [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72: 801-808.

[5] 金先玉, 李华冠, 凌娟, 等. 6061 铝合金超薄壁管的充液压弯数值模拟与试验 [J]. 塑性工程学报, 2015, 22 (5): 69-75.
Jin X Y, Li H G, Ling J, et al. Numerical simulation and experimental investigation on press-bending with internal pressure of ultra thin-walled tube of 6061 aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22 (5): 69-75.

[6] 程晓, 王渭平, 田晨, 等. 薄壁大直径管路充液压弯成型技术研究 [J]. 航天制造技术, 2021 (3): 49-51.
Cheng X, Wang W P, Tian C, et al. Research on hydro-bending forming technology in the thin-walled and large diameter tube [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021 (3): 49-51.

[7] 宋鹏, 王小松, 徐永超, 等. 内压对薄壁铝合金管材充液压弯过程的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2011, 21 (2): 311-317.
Song P, Wang X S, Xu Y C, et al. Influence of internal pressure on hydro-bending of thin-walled aluminum alloy tube [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21 (2): 311-317.

[8] Hu L, Teng B G, Yuan S J. Effect of internal pressure on hydro bending of double-layered tube [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of engineering Manufacture, 2013, 226: 1717-1726.

[9] 刘超, 吴娜, 杨志安, 等. 内压对汽车桥壳管件充液压制成形影响的分析与试验 [J]. 锻压技术, 2025, 50 (6): 95-101.
Liu C, Wu N, Yang Z A, et al. Analysis and test of influence of internal pressure on hydroforming for automobile axle housing tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2025, 50 (6): 95-101.

[10] 陈一哲, 鲁栋, 马小瑶, 等. 超薄不锈钢波纹管液压成形力学分析与工艺研究 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (7): 179-

189.

Chen Y Z, Lu D, Ma X Y, et al. Mechanics analysis and process research on hydroforming of ultra-thin stainless [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (7): 179-189.

[11] Hwang Y M, Hsieh S Y, Kuo N J. Study of large-expansion ratio tube hydroforming with movable dies [J]. Key Engineering Materials, 2017, 725: 616-622.

[12] Balendra R, Qin Y. Injection forging: Engineering and research [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145 (2): 189-206.

[13] Müller K, Stonis M, Lücke M, et al. Hydroforging of thick-walled hollow aluminum profiles [J]. Material Forming Esaform, 2012, 504-506: 181-186.

[14] Ngaile G, Alzaharani B. Analytical and numerical modeling of thick tube hydroforging [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2223-2229.

[15] Xu Y, Ma Y, Zhang S H, et al. Numerical and experimental study on large deformation of thin-walled tube through hydroforging process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 87 (5-8): 1885-1890.

[16] Xia L L, Xu Y, El-Aty A A, et al. Deformation characteristics in hydro-mechanical forming process of thin-walled hollow component with large deformation: Experimentation and finite element modeling [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104 (9-12): 4705-4714.

[17] 徐勇, 李明, 夏亮亮, 等. 异形排气管多向局部加载液力成形工艺 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (22): 2763-2771.

Xu Y, Li M, Xia L L, et al. Hydro-mechanical forming process combined with multi-directional local loading for special-shaped exhaust pipes [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (22): 2763-2771.

[18] 初冠南, 陈钢, 孙磊, 等. 充液锻形技术原理及应用 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (2): 1-6.

Chu G N, Chen G, Sun L, et al. Technique principle and application of hydro-forging [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (2): 1-6.

[19] 林才渊, 邹隆勋, 历吴恺, 等. 高强钢管状件充液压形截面回弹规律 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (3): 66-74.

Lin C Y, Zhou L X, Li W K, et al. Springback law on section for high-strength steel tubular components by hydroforming [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (3): 66-74.

[20] 庄永鹏, 汪叶杰, 王刚, 等. V形截面管充液压制圆角充填行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2024, 31 (7): 132-139.

Zhuang Y P, Wang Y J, Wang G, et al. Research on corner filling behavior of V-shaped cross-section tube during hydro-pressing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (7): 132-139.

[21] Chu G N, Chen G, Lin Y L, et al. Tube hydroforging-A method to manufacture hollow component with varied cross section perimeters [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 265: 150-157.

[22] Chu G N, Sun L, Wang G D, et al. Axial hydro-forging sequence for variable-diameter tube of 6063 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272: 87-99.



我们藉行业 **翘楚之势**
为您搭建 **广阔的信息桥梁**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会合办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(CSCD)、中国科技期刊引证报告(核心版, CJKR)、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、RGCSE中国核心学术期刊、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、中国科技期刊数据库、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)。

金属塑性工程行业专业技术(月刊)期刊 国内外公开发行

地址: 北京市海淀区学清路18号 《锻压技术》编辑部 100083
电话: 010-62920652 82415085
E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst_adv@163.com (广告咨询)

发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>





主要栏目

综述	技术交流
锻造	节能技术
模具	摩擦与润滑
轧制	计算机应用
标准化	装备与成套技术
管材成形	加热与热处理
板料成形	材料与成形性能
特种成形	理论与实验研究
测试技术	挤压与拉拔
失效分析	

全国各地邮局均可订阅，逾期未订上者可与编辑部联系邮购

- ◆ 国内邮发代号: 2-322
- ◆ 国外邮发代号: BM5549
- ◆ 国内定价: 25元/册, 300元/年
- ◆ 国内刊号: CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号: ISSN 1000-3940




杂志网站 微信公众号