

复杂形状零件单点渐进液压成形厚度分布研究

尚苗 李言* 山顺坤 杨明顺

西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安,710048

摘要:为了分析和提高复杂形状零件的单点渐进成形性能,提出了一种由单点渐进成形和液压成形混合而成的新工艺,用于制造具有尖顶结构的多特征零件。设计了目标制件的成形过程,建立了厚度理论预测模型,分析了不同液压参数在不同成形阶段对目标零件厚度分布的影响。实验结果表明,采用新工艺和合适的液压压力可以成形复杂形零件;与无液压辅助的渐进成形相比,有液压辅助时实验轮廓与理论轮廓的几何误差能够从 11.44% 降低到 5.18%;厚度分布规律与辅助压力、成形高度、成形形状等有关,所建立理论模型能够预测复杂形零件的厚度分布。

关键词:复杂形状;单点渐进成形;液压成形;厚度分布

中图分类号: TG386.4

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Thickness Distribution of Single Point Incremental Hydroforming of Complex Shaped Parts

SHANG Miao LI Yan* SHAN Shunkun YANG Mingshun

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048

Abstract: To analyze and enhance the performances of single point incremental forming for complex shaped parts, a new process combining SPIF and hydroforming was presented for manufacturing multi-featured parts with spire structures. The forming processes of the target parts were designed, the theoretical prediction model of thickness was established, and the effects of different hydraulic parameters on the thickness distribution of the target parts in different forming stages were analyzed. The experimental results show that complex shaped parts may be formed using the new processes and appropriate hydraulic pressures; the geometric errors between the experimental and theoretical profiles may be reduced from 11.44% to 5.18% with assistance compared to SPIF without hydraulic assistance; the thickness distribution patterns are related to the assisted pressure, forming heights, forming shape, etc., and the established theoretical model may be used to predict the thickness distribution of complex shaped parts.

Key words: complex shape; single point incremental forming(SPIF); hydroforming; thickness distribution

0 引言

单点渐进成形(single point incremental forming, SPIF)技术是一种使用成形刀具通过逐点累积变形的方式将板材加工成所需形状零件的一种加工方式^[1-2]。与传统冲压、拉伸等成形工艺相比, SPIF 技术不需要设计和配备专用的模具,具有低成本、短周期、绿色环保无污染等优点^[3],同时,由于其成形力小、成形极限高、成形性能好^[4],近年来在航空航天、汽车制造、医用植入物等领域成形罩、壳、盖、板等薄壁零件时常有应用^[5]。SPIF 常被用于圆锥台、凸曲台、圆顶等凹特征的成形。LI 等^[6]在超声辅助 SPIF 的研究中

成形了圆锥台;施文强等^[7]在壁厚均匀临界角的研究中成形了凸曲台;GANDLA 等^[8]在多道次质量参数的研究中成形了圆顶。

为了在渐进成形过程中获得多种特征的复杂形状零件,部分学者尝试通过翻转成形板材、增加成形工具数量和添加支撑模具的方式成形凹凸制件。AMBROGIO 等^[9]通过翻转板材得到了具有凹特征和凸特征的复杂形状制件。ULLAH 等^[10]采用在板材两侧增加成形工具的策略获得了凹凸曲面。ZHANG 等^[11]通过在板材背面增加支撑模具的方式得到了凹凸零件。然而,板材的反复翻转会增加成形时间和额外工序;增加工具和模具也会使成形设备更加复杂,增加生产成本,降低 SPIF 的灵活性。

收稿日期:2024-07-04

基金项目:国家自然科学基金(52075437)

为了在 SPIF 中简单、高效地获得复杂形制件, KHALIFA 等^[12]采用活性介质作为 SPIF 中的软支撑,对毛坯施加能够使板材发生弹性变形的压力后,工具按照预定义的路径对零件进行渐进成形。工具从毛坯边缘移向板材中心成形出凹特征,从毛坯中心移向边缘成形出凸特征,然而,由较小压力的弹性变形获得的凸特征,其成形精度较低,也不易成形一些特殊轮廓(如尖顶结构等)。TANDON 等^[13]将 SPIF 与拉伸成形相结合,得到了渐进拉伸混合成形新工艺,通过创建预制件及工具叠加拉应力的方式改善了凹特征的减薄现象,提高了制件的几何精度。混合成形中的预制件为凸特征的成形提供了可能,然而这种成形方式却很少用于成形具有多特征的复杂形状制件。

基于以上研究,本文将液压胀形、液压支撑引入 SPIF,形成一种单点渐进液压成形(single point incremental hydroforming, SPIH)新工艺,用于成形具有特殊结构的凹凸形复杂零件。同时,采用 1060 铝板,以成形具有尖顶结构的多特征零件为例,设计了 SPIH 过程,建立了厚度理论模型,分析了不同液压参数对目标零件厚度分布和成形精度的影响。

1 SPIH 原理及过程设计

1.1 SPIH 原理

常规 SPIF 中不需要任何模具,仅使用一个成形刀具按照预定义的加工轨迹对待成形板材进行逐层挤压成形。SPIF 成形圆锥台制件时的原理如图 1 所示^[14]。根据正弦定理,成形零件表面任意位置的厚度 δ 可由初始板材厚度 δ_0 与该位置的成形角 α 获得^[14]。

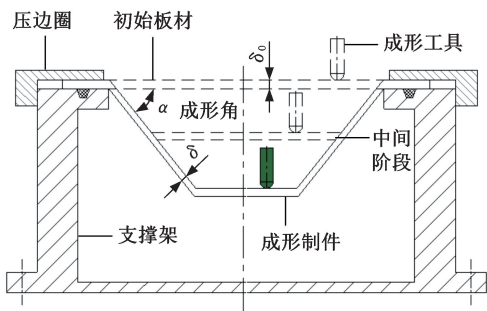


图 1 SPIF 原理^[14]
Fig.1 Schematic of SPIF^[14]

SPIF 的成形装置主要包括压边圈、支撑架和成形刀具。基于 SPIF 成形装置,为待成形板材增加一套液压系统可得到 SPIH 成形装置,如图 2 所示。液压系统为待成形板材的背部提供可控压力。当液压压力较大时,板材会发生液压胀形,

为复杂零件凸特征的成形创造条件;当液压压力较小时,板材会得到柔性的液压支撑,能够促进厚度分布和成形精度的提高^[3]。通过合理设计成形轨迹和辅助压力,不同形状、不同尺寸和具有多个凹凸特征的复杂形状零件可被成形。

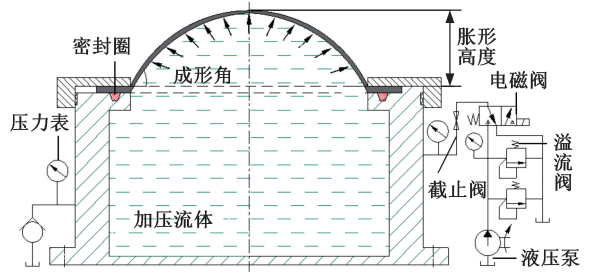


图 2 SPIH 原理
Fig.2 Schematic of SPIH

1.2 多特征零件 SPIH 过程设计

以成形具有尖顶结构的三特征零件为例,采用 SPIH 工艺对目标制件的成形过程进行设计。目标制件的理论轮廓如图 3 所示。凸特征标记为特征 1,凹特征标记为特征 2,具有尖顶结构的圆锥特征标记为特征 3。为了实现这 3 个特征, SPIH 成形过程可以设置为三个阶段。第一阶段仅使用液压胀形成形出圆顶壳体,为凸特征 2 和圆锥特征 3 的成形创造条件,如图 2 所示。壳体母线边缘的切角记为液压胀形的成形角。胀形高度和成形角随着液压压力的增大而增大直至板材产生破裂。第二阶段,采用液压支撑 SPIF 工艺在圆顶壳体上成形一个凹下去的特征 2,特征 2 的成形轨迹如图 4 所示。特征 2 口径处的切角记为凸曲台的成形角。第三阶段,对圆顶壳体还未参与渐进成形的中心区域,采用液压胀形 SPIF 工艺成形一个圆锥特征 3,特征 3 的成形轨迹如图 5 所示。从多特征零件成形过程可以看出, SPIH 工艺是在一次装夹中制造,没有增加模具或成形刀具,没有翻转板材,没有变换成形刀具方向,更没有更换更小直径的成形刀具去成形尖顶结构。

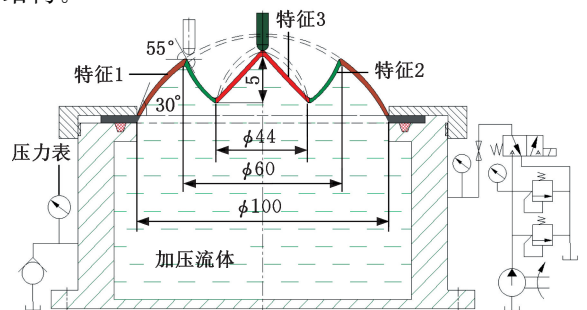


图 3 目标制件理论轮廓
Fig.3 Theoretical contours of target part

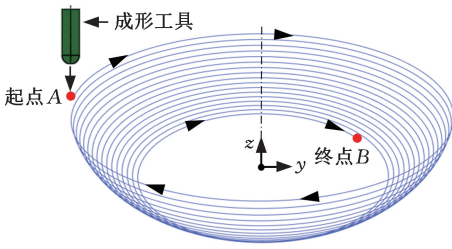


图 4 特征 2 的成形轨迹

Fig.4 Forming trajectory for feature 2

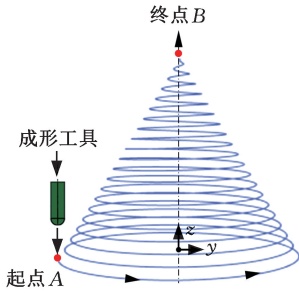


图 5 特征 3 的成形轨迹

Fig.5 Forming trajectory for feature 3

2 厚度理论模型的建立

厚度的不均匀分布容易降低制件强度、引起板材破裂、造成成形失效^[3]。正弦定理常用于预测具有固定曲率的单特征制件的成形厚度 δ 。然而,对于复杂形状的零件,需要建立新的厚度预测模型。针对本文研究的具有尖顶结构的三特征零件,基于体积不变定理建立的厚度几何模型如图 6 所示。图 6a 所示为第一阶段成形后的几何模型,图 6b 所示为目标制件的几何模型。第一阶段成形后,液压胀形的成形角记为 θ_i 。成形角 θ_i 和任一质点处的胀形高度 z_i 会随着液压压力的增大而增大。当液压压力为 p 时,实验获得沿 x 截

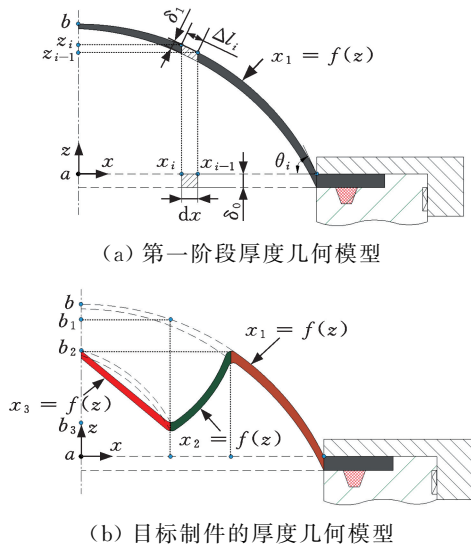


图 6 厚度几何模型

Fig.6 Thickness geometry model

面的各测量点的成形高度 z ,通过线性拟合可以得到第一阶段的曲线方程:

$$x_1 = f(z) \tag{1}$$

在 SPIH 过程中,假设板材上的质点均不发生径向流动,只存在剪切变形,满足塑性变形中的体积恒定原理。初始板材上宽度为 dx 的微单元对应的高度记为 dz ,变形之后的高度记为 z_i ,曲线方程 $f(z)$ 的一阶导数记为 $f'(z)$ 。微单元厚度由 δ_0 变为 δ_i 。微单元绕 z 轴旋转一周后的圆锥台的表面积记为 A_i 。根据体积不变原理,有

$$\delta_0 \pi |x_{i-1}^2 - x_i^2| = \delta_i A_i \tag{2}$$

由圆锥台表面积计算公式有

$$A_i = 2\pi |f(z_i)| \sqrt{1 + (f'(z_i))^2} \Delta z_i \tag{3}$$

因此,当成形高度 z 的区间为 $[a, b]$ 时,得到旋转壳体的表面积 A 和理论厚度 δ 分别为

$$A = \int_a^b 2\pi |x_1(z)| \sqrt{1 + (x_1'(z))^2} dz \tag{4}$$

$$\delta = \frac{\delta_0 |f^2(z_{i-1}) - f^2(z_i)|}{2 |f(z_i)| \sqrt{1 + (f'(z_i))^2} \Delta z_i} \tag{5}$$

由图 4 和图 5 可以得到第二阶段、第三阶段的曲线方程 x_2 和 x_3 。将曲线方程 x_1, x_2 和 x_3 代入式(4)中,可以获得特征 1、特征 2 和特征 3 的表面积 A_1, A_2, A_3 。通过下式可以直接预测目标制件的理论厚度 δ :

$$\begin{aligned} \delta_0 (\pi R^2) = \delta A = \delta (A_1 + A_2 + A_3) = \\ \delta \left[\int_a^{b_2} 2\pi |x_1(z)| \sqrt{1 + (x_1'(z))^2} dz + \right. \\ \left. \int_{b_3}^{b_2} 2\pi |x_2(z)| \sqrt{1 + (x_2'(z))^2} dz + \right. \\ \left. \int_{b_3}^{b_2} 2\pi |x_3(z)| \sqrt{1 + (x_3'(z))^2} dz \right] \tag{6} \end{aligned}$$

其中, R 为板材初始半径。

3 实验装置及方案设计

3.1 实验装置

SPIH 作为一种 SPIF、液压支撑和液压胀形混合成形的新工艺,其成形装置是在 SPIF 实验装置的基础上设计和搭建了一套液压系统,以满足 SPIH 过程中液压支撑和液压胀形的压力需求, SPIH 实验装置如图 7 所示。

SPIH 实验在秦川机床厂生产的三轴立式数控铣床上进行,成形装置主要包括液压系统、成形刀具、压边圈和支撑架等。液压系统包括油箱、液压泵、压力表、溢流阀、单向阀、截止阀、出油管、回油管、密封圈等。成形刀具选用的是由江苏铸鸿铸造有限公司生成的 X210CrW12 型钨系高速棒料钢磨削制成的圆顶形工具,具有较高的刚度和硬度以及良好的耐磨性。成形刀具的直径为 10

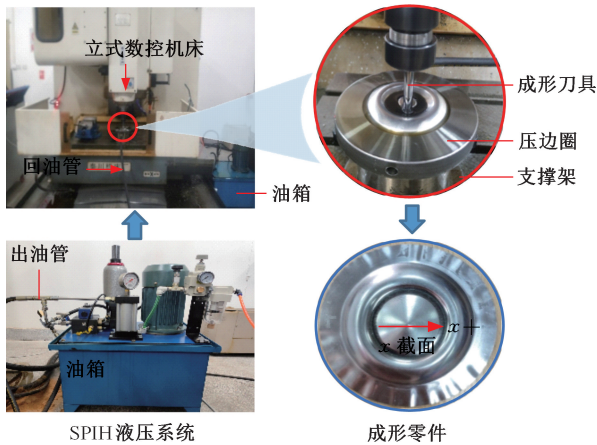


图 7 SPIH 的实验装置

Fig.7 Experimental device of SPIH

mm, 进给速度设定为 600 mm/min。压边圈和支撑架均采用 45 钢。环形压边圈的内径为 100 mm, 圆筒形支撑架的内壁直径为 120 mm。液压胀形的有效区域是直径为 100 mm 的圆形区域, 渐进成形的有效区域在直径为 90 mm 的圆形区域。初始板材采用厚度为 1 mm 的 Al1060, 将其切割成直径为 136 mm 的圆形薄板。液压油选用 L-HM46 号抗磨液压油。利用绘图软件生成特征 2 和特征 3 的螺旋加工轨迹, 如图 4 和图 5 所示。加工轨迹层间距均为 0.5 mm, 机床的主轴转速设定为 1000 r/min^[5]。SPIH 成形完成后, 采用三坐标测量机测量板材上各点的成形高度。最终成形制件被沿 x 截面(图 7)进行线切割, 然后使用双尖顶测微器测量制件沿 x 截面上各测量点的厚度^[3]。测量仪器精度均为 0.001 mm, 测量点间距均为 1 mm。

3.2 实验方案设计

由 1.2 节可知, 目标制件的实验过程包括 3 个阶段。将第一阶段液压胀形的压力记为 p_1 , 第二阶段和第三阶段液压辅助胀形的压力记为 p_2 和 p_3 。为了分析不同液压压力对目标制件成形性能的影响, 提出了四种实验方案, 如表 1 所示。方案 A 表示压力仅在第一阶段参与成形。方案 D 表示压力参与整个过程的成形, 且在不同的成形阶段压力是不同的。在方案 B 和方案 C 中, 液压流体除了在第一阶段为板材提供液压胀形外, 还需要在第二阶段或第三阶段为 SPIF 提供一定压力的液压支撑或液压胀形。

表 1 实验方案

Tab.1 Experimental schemes

实验方案	一阶段	二阶段	三阶段
A	p_1		
B	p_1	p_2	
C	p_1		p_3
D	p_1	p_2	p_3

为了确定液压胀形和液压支撑的压力范围, 在不同压力下对初始厚度为 1.006 mm、直径为 100 mm 的 1060 铝板进行液压胀形。室温下每组实验进行 5 次, 取其平均值作为最终的实验结果。获得最大胀形高度和成形角随压力的变化规律如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 当液压压力小于 0.3 MPa 时, 板材几乎不发生塑性变形; 当液压压力在 0.4~2.7 MPa 时, 板材会产生塑性变形; 当压力大于 2.7 MPa 时, 受夹具的刚性夹紧和较大液压压力的影响, 板材边缘附近的剪切段长度会不足, 进而使板材边缘会率先发生破裂。

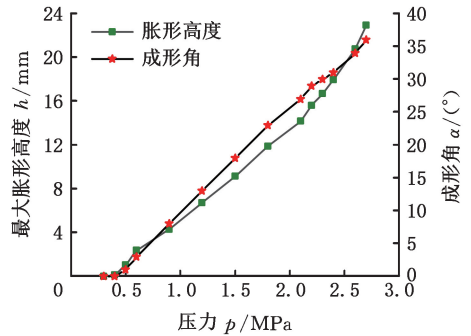


图 8 不同液压参数下最大胀形高度和成形角

Fig.8 Bulging height and forming angle for different pressures

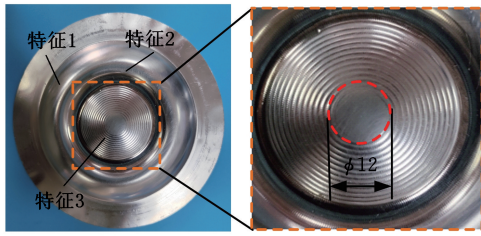
从图 3 中可以观察到, 特征 1 的成形角为 30°。由图 8 可知, 获得 30°成形角需要的液压压力为 2.3 MPa, 因此第一阶段胀形压力 p_1 可以选择 2.3 MPa。由图 3 可以看出, 第二阶段成形的是凹特征 2, 为了防止较大压力使板材产生较大回弹或塑性变形, 第二阶段的液压压力 p_2 可以选择 0.18 MPa 的液压支撑。由图 3 可以看出, 第三阶段成形的圆锥特征 3 是凸特征, 为了防止成形刀具向下挤压板材时高度产生过大的塌陷, 第三阶段的液压压力 p_3 可以选取 0.4 MPa 的液压胀形。 p_2 和 p_3 产生液压支撑和液压胀形的判断依据与图 8 相似, 分别对第二阶段和第三阶段进行胀形实验后根据弹性变形和塑性变形压力范围确定。

4 实验结果和分析

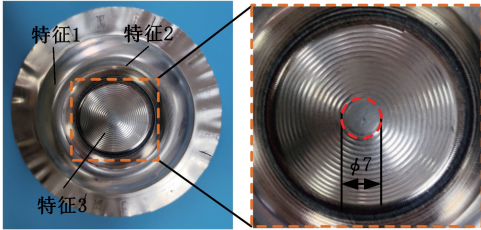
4.1 液压参数对成形精度的影响分析

为了研究不同液压压力对制件成形精度的影响, 比较四种实验方案成形目标制件的实验轮廓和成形高度。四种实验方案获得的实验轮廓如图 9 所示, 高度测量装置如图 10 所示, 成形制件沿 x 截面的成形高度如图 11 所示。

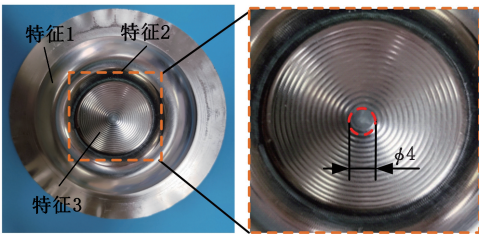
由实验轮廓(图 9)可以观察到, 随着液压压力的逐渐增大, 特征 3 的顶部直径逐渐减小, 直径由 12 mm 减小至 7 mm, 再减小至 4 mm, 最后减小为一点(顶部直径小于 1 mm)。这说明, 采用



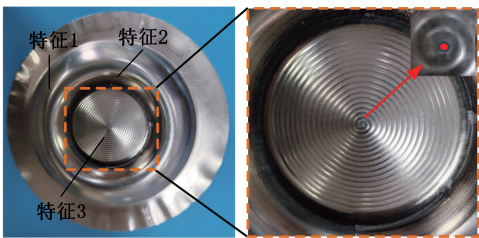
(a) 方案 A 的实验轮廓



(b) 方案 B 的实验轮廓



(c) 方案 C 的实验轮廓



(d) 方案 D 的实验轮廓

图 9 四种成形方案的实验轮廓

Fig.9 Experimental profiles of four forming schemes

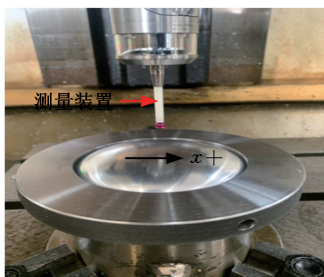


图 10 高度测量装置

Fig.10 Height measuring device

SPIH 工艺可以成形出多特征零件,也能成形出具有尖顶结构的复杂形状零件。同时发现,复杂形状零件的成形,没有使用模具,没有改变实验装置,没有增加额外工序;尖顶结构的成形也没有更换成更小直径的成形刀具(刀具直径为 10 mm)。

比较四种实验方案成形制品沿 x 截面的成形高度(图 11)可以发现,实验高度和理论高度的

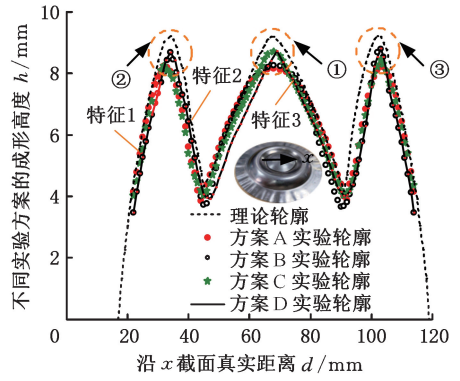


图 11 成形制品沿 x 截面的成形高度

Fig.11 Forming height of formed parts along x -section

分布趋势基本一致;实验高度普遍小于理论高度,这与设定的压力、板材的回弹等因素有关。四种实验方案中,各测量点的实验高度与理论高度的几何偏差主要出现在区域①、区域②和区域③。采用方案 A,即第二阶段和第三阶段都没有液压辅助时,区域①、区域②和区域③的最大高度几何偏差分别为 10.51%、11.44%和 10.83%。采用方案 B,即只有第二阶段有 0.18 MPa 的辅助压力时,区域①、区域②和区域③的最大高度几何偏差分别为 5.62%、10.29%和 6.35%。采用方案 C,即第三阶段有 0.4 MPa 的辅助压力时,区域①、区域②和区域③的最大高度几何偏差分别为 9.66%、5.32%和 8.33%。采用方案 D,即第二阶段和第三阶段都有液压辅助,且辅助压力分别为 0.18 MPa 和 0.4 MPa 时,区域①、区域②和区域③的最大高度几何偏差分别为 5.59%、5.18%和 4.33%。这说明在 SPIH 过程中,合适压力的液压支撑有利于复杂形状零件的成形,增大零件的成形高度,降低了实验轮廓与理论轮廓的高度几何偏差,提高了零件的成形精度和成形性能。

4.2 液压参数对厚度分布的影响分析

为了分析液压参数对成形制品厚度分布的影响规律,比较了不同辅助压力下各成形阶段的理论厚度和实验厚度,如图 12 所示。图 12a、图 12b、图 12c 所示分别为第一阶段、第二阶段、第三阶段结束后板材厚度的分布情况。

在图 12a 中,从第一阶段成形后实验厚度分布规律可以看出,随着胀形高度的增大,圆顶厚度逐渐减小,到达圆顶顶点时最小厚度为 0.826 mm。实验最小厚度与理论厚度的误差为 0.025 mm,约为理论厚度的 3.03%。这说明所建立的厚度理论模型可用于液压胀形的厚度预测。在胀形板材边缘所处区域①内,由于压边圈的刚性夹紧和液压压力引起的塑性变形,板材厚度发生了局部突变,即在局部微小范围内厚度先急剧减小后急剧增大。这主要是由板材边缘附近的剪切段

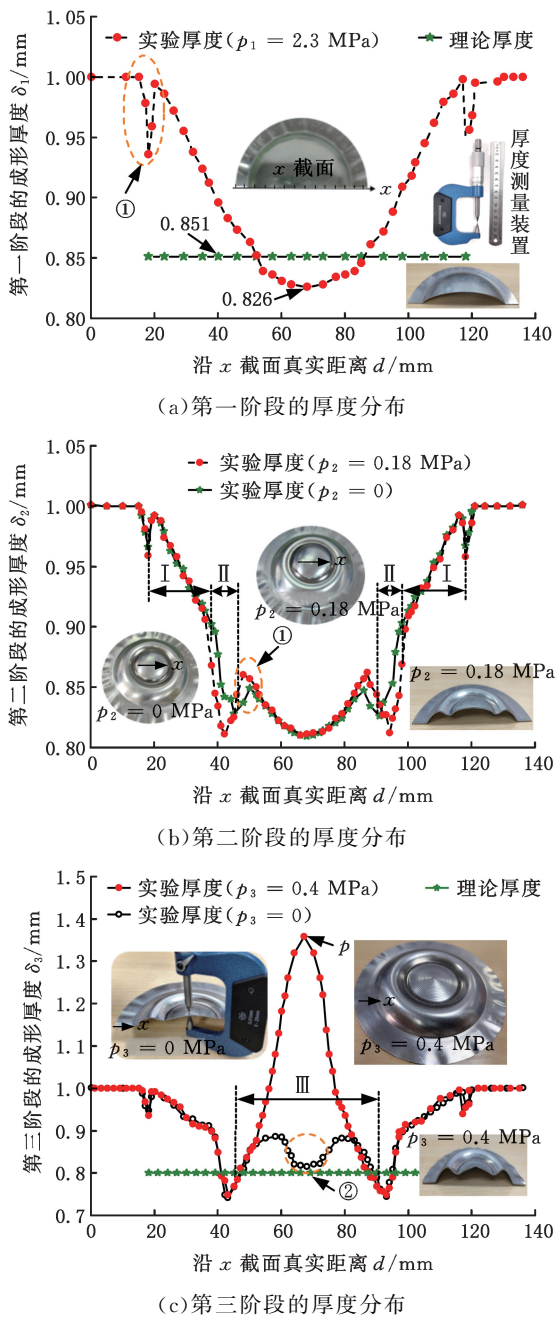


图 12 各成形阶段的厚度分布

Fig.12 Thickness distribution of each forming stage

长度不足而引起的。液压压力越大,边缘厚度急剧减薄现象越严重,易造成边缘位置率先破裂,这在 3.2 节中也得到了验证。

在图 12b 中,将表 1 中的方案 A 和方案 B(或方案 D)在第二阶段成形后的实验厚度进行比较,以分析不同压力对中间阶段厚度分布的影响。参与第二阶段的板材变形主要发生在特征 2 的渐近成形区域 II 内。从区域 II 的厚度变化趋势可以看出,随着液压压力的增大,成形高度减小,即凹特征的成形深度增大,板材厚度减小。这是因为一定压力的液压支撑,会防止已生成凸特征 1 的成形高度随着成形刀具的下压而减小,即增大了凸特征 1 的成形高度(见图 11 中的区域 ②)。因此,

合适压力的液压支撑有利于提高零件的成形高度和成形精度。同时,在特征 2 与特征 3 的过渡区域 ① 内,随着液压压力增大,厚度逐渐增大。这说明,合适压力的液压支撑能够促进更多材料流入未 SPIH 的区域 ①,有利于圆锥特征 3 的成形。

在图 12c 中,将表 1 中的方案 A 和方案 D 在第三阶段成形后的实验厚度和理论厚度进行比较,以分析不同压力对目标制件厚度分布的影响。参与第三阶段 SPIH 的板材变形主要发生在特征 3 的主成形区域 III。无液压辅助时,区域 III 内的厚度沿 x 截面先增大后减小。厚度的增大与第三阶段成形的圆锥形状有关。由于成形圆锥的截面直径小于成形前对应截面位置的圆顶直径,因此成形刀具会逐渐向板材中心挤压材料,导致参与成形的圆锥厚度增大。无液压辅助时,区域 III 内厚度 δ 的减小与第三阶段低的成形高度有关;低的成形高度导致圆锥的顶部区域未参与成形(图 9a)。因此未参与第三阶段渐进成形的顶部区域 ② 的厚度分布与该区域在第二阶段成形后的厚度分布趋势相似。有液压辅助时,随着圆锥成形高度的增大,区域 III 内的厚度逐渐增大,到达圆锥顶点 P 时厚度最大。这是由于有液压辅助时,板材受到了向上的柔性支撑,制件成形高度增大。圆锥成形高度越大,截面直径越小,成形刀具向板材中心挤压的材料越多,厚度越大;增大的厚度不会引起板材的过度减薄和破裂,从而抑制了成形失效。这说明目标制件厚度变化规律与液压压力、成形高度、成形形状密切相关。同时,在板材减薄区域内,实验厚度与理论厚度的偏差为 6.62%,这说明厚度理论模型对于复杂形零件的壁厚预测有效。

5 结论

1) 采用 SPIH 工艺可以在一次装夹中实现复杂凹凸形零件的单点渐进成形。成形过程中不需要使用任何模具,不需要翻转板材或变换成形工具方向,也不需要更换或增加成形刀具去成形尖顶结构。

2) 在 SPIH 过程中,合适压力的液压支撑和液压胀形有利于增大制件的成形高度,降低实验轮廓与理论轮廓之间的几何偏差,从而提高制件的成形精度和成形性能。在本研究中,与无液压辅助的 SPIH 相比,整个渐进成形过程中增加液压辅助时,实验轮廓与理论轮廓的几何精度偏差由 11.44% 降低到 5.18%。

3) 在现有的实验工况下,可以通过三个阶段成形具有尖顶结构的三个特征零件。在第一阶段的液压胀形中,圆顶的厚度会随着胀形高度的增

大而逐渐减小。在第二阶段液压支撑 SPIH 中,随着液压压力的增大和成形高度的减小,成形区域内的厚度会越来越小。在第三阶段液压胀形 SPIH 中,有液压辅助时,成形区域内的厚度会随着圆锥成形高度的增大而增大。目标制件的厚度分布会随着液压压力、成形高度、成形形状的变化而呈现出不同的分布趋势。在目标制件厚度减薄区域内,实验厚度与理论厚度的偏差在允许范围内,验证了所建立的厚度理论模型对复杂形旋转类零件壁厚预测的有效性。

本研究下一步计划是对各成形参数(如层间距、液压参数、板厚等)进行分析和优化,对成形质量、成形极限等作具体研究。

参考文献:

- [1] ULLAH S, LI Yanle, LI Xiaoqiang, et al. A Review on the Deformation Mechanism and Formability Enhancement Strategies in Incremental Sheet Forming[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, 23(1):1-36.
- [2] LIU Zhaobing, CHENG Kai, PENG Kerui. Exploring the Deformation Potential of Composite Materials Processed by Incremental Sheet Forming: a Review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118(7/8):2099-2137.
- [3] 尚苗,李言,杨明顺,等. 液压支撑单点渐进成形临界角研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(1):181-189.
SHANG Miao, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Study on Critical Angle in Single-point Incremental Forming With Hydraulic Supporting[J]. China Mechanical engineering, 2024, 35(1):181-189.
- [4] LI Yan, PANG Qiu, HU Zhili. Research on the Accuracy of Dieless Single Point Incremental Forming Based on Machine Vision[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 114:59-66.
- [5] MANDALOI G, NAGARGOIE A, GUPTA A K, et al. A Comprehensive Review on Experimental Conditions, Strategies, Performance, and Applications of Incremental Forming for Deformation Machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2022, 11(144):1-14.
- [6] LI Pengyang, HE Jin, LIU Qiang, et al. Evaluation of Forming Forces in Ultrasonic Incremental Sheet Metal Forming[J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 63:132-139.
- [7] 施文强,高锦张. 1060 铝板凸曲台件外轮廓支撑渐进成形壁厚均匀临界角研究[J]. 锻压技术, 2019, 44(9):27-33.
SHI Wenqiang, GAO Jinzhang. Research on Critical Angle of Uniform Wall Thickness in Incremental Forming with Outer Contour Support for Convex Curved Part of 1060 Aluminum Sheet[J]. Forging & Stamping technology, 2019, 44(9):27-33.
- [8] GANDLA P K, PANDRE S, SURESH K, et al. A Critical Analysis of Formability and Quality Parameters for Forming a Dome Shape Using Multi-stage Strategies in Incremental Forming Process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19:1037-1048.
- [9] AMBROGIO G, DE N L, FILICE L, et al. Some Considerations on the Precision of Incrementally Formed Double-curvature Sheet Components[C]// Proceedings of the 9th ESAFORM Conference on Material Forming. Poland, 2006:199-202.
- [10] ULLAH S, LI X, XU P, et al. Experimental and Numerical Investigation for Sheet Thickness Thinning in Two-point Incremental Forming (TPIF) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122:2493-2512.
- [11] ZHANG Zixuan, REN Huaqing, XU Rui, et al. A Mixed Double-sided Incremental Forming Toolpath Strategy for Improved Geometric Accuracy [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of ASME, 2015, 5(137):1-12.
- [12] KHALIFA N B, THIERY S. Incremental Sheet Forming with Active Medium[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2019, 1(68):313-6.
- [13] TANDON P, SHARMA O. Experimental Investigation into a New Hybrid Forming Process: Incremental Stretch Drawing[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2018, 3(232):475-486.
- [14] 陈继平,钱健清,王会廷. 渐进成形锥形件壁厚的正弦定理预测精度研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(22):2760-2766.
CHEN Jiping, QIAN Jianqing, WANG Huiting, et al. Study on Wall Thickness Prediction Accuracy by Sine Law for Incrementally Formed Conical Parts[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(22):2760-2766.

(编辑 王艳丽)

作者简介:尚苗,女,1986年生,副教授、博士研究生。研究方向为先进制造与现代加工技术。发表论文20余篇。E-mail: goodseeding@outlook.com。李言*(通信作者),男,1964年生,教授、博士研究生导师。研究方向为深孔加工、新型加工原理及成形技术。出版专著1部,发表论文30余篇。E-mail: jyxy-ly@xaut.edu.cn。

本文引用格式:

尚苗,李言,山垵坤,等.复杂形状零件单点渐进液压成形厚度分布研究[J].中国机械工程,2025,36(6):1338-1344.
SHANG Miao, LI Yan, SHAN Shunkun, et al. Study on Thickness Distribution of Single Point Incremental Hydroforming of Complex Shaped Parts[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1338-1344.