

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.002

# 多道次双点渐进成形数值模拟与实验研究\*

曹 江<sup>1</sup>, 王秋成<sup>1\*</sup>, 邱 磊<sup>2</sup>, 李 宁<sup>1</sup>, 魏瑞晖<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州博冷科技有限公司, 浙江 杭州 310019)

**摘要:**针对多道次双点渐进成形中材料变形规律问题,建立了典型圆锥台件双点渐进成形有限元模型,采用螺旋轨迹对其多道次成形规律进行了数值模拟,对模拟结果中节点坐标和位移、单元应变和壁厚数据进行了提取,分析了成形过程中节点流动、单元应变及壁厚分布规律,并通过在实验板料表面印制圆形网格和制作标记点进行了多道次双点渐进成形实验,对成形零件网格变化、标记点径向移动和零件壁厚进行了测量分析,验证了模拟结果的正确性。研究表明,多道次双点渐进成形中材料产生明显的径向流动,且随着成形道次增多而增大,同时,成形道次越多零件壁厚均匀性越好;另外,采用变间隔角度设计方法,可改善多道次双点渐进成形零件壁厚分布均匀性,且随着成形道次增多作用越明显。

**关键词:**双点渐进成形;圆锥台件;多道次;成形角度;壁厚

中图分类号:TC386;TH142

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0897-06

## Experimentation and numerical simulation of multi-step two point incremental forming

CAO Jiang<sup>1</sup>, WANG Qiu-cheng<sup>1</sup>, QIU Lei<sup>2</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, WEI Rui-hui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. Hangzhou Boleng Sci-Tech Ltd Company, Hangzhou 310019, China)

**Abstract:** Aiming at investigate material deformation during multi-step two point incremental forming of sheet metal, a FEM model of two point incremental was established. The spiral toolpath was applied to a typical conical part of multi-step forming, node coordinate value, element strain and thickness data were extracted from simulated results, and the effects of the multi-step on node flow, element strain and wall thickness were analyzed. In order to verify simulation results, the circular grid analysis and smear-mark method were utilized to measure the material deformation of multi-step two point incremental forming experiment, the experiment results have a good agreement with stimulation results. The results indicate that a significant radial direction flow is observed during multi-step two point incremental forming, and the material flow further by adding more forming steps, and the more forming steps, the more uniform thickness of sample is discovered. In addition, the thickness distribution of multi-step two point incremental forming parts can be improved by variable interval angle design approach, the more uniform thickness of parts can be obtained by adding more steps.

**Key words:** two point incremental forming (TPIF); conical part; multi-step; forming angle; wall thickness

## 0 引 言

传统的金属板料成形技术广泛地应用于航空、航

天、汽车、医疗器械、饮料容器等行业,由于模具制作周期长、制作费用比较高,故适用于产品定型后的大批量生产。当前对产品零件的需求日益呈现出多品种、小

收稿日期:2015-02-04

基金项目:浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ12E05003)

作者简介:曹江(1990-),男,江西九江人,主要从事金属板料塑性成形技术方面的研究. E-mail: cjve327@yeah.net

通信联系人:王秋成,男,教授,博士生导师. E-mail: wqc@zjut.edu.cn

批量等特点,企业如何快速适应市场需求越来越成为获得竞争优势的关键。而近年来新出现的金属板料渐进成形技术(incremental forming, IF),是一种无模成形(dieless forming)新技术,可明显缩短新产品开发周期,降低新产品制作成本,并具有很高的工艺柔性,可获得形状非常复杂的零件外形<sup>[1]</sup>。根据成形中与板料接触点的个数,可渐进成形技术可分为两类<sup>[2]</sup>:单点渐进成形(SPIF)和双点渐进成形(TPIF)。而根据渐进成形时所采用的道次数目,又可以将其分为单道次成形和多道次成形。相比单点渐进成形方法,双点渐进成形增加了一个全形或局部的支撑模具,且在成形的过程中,需要夹持装置随工具头同步向下移动或者凸模向上运动。根据 Silva M B 等<sup>[3]</sup>学者的研究成果,双点渐进成形零件在成形极限和成形精度上均高于单点渐进成形;双点渐进成形更适应于商业上制作复杂零件<sup>[4]</sup>。

对于单道次渐进成形,零件厚度分布遵循余弦定律。根据余弦定律可知,当用于成形的板料越薄,成形角度越大时,成形零件越容易出现破裂现象,因此薄板直壁件成形一直是渐进成形研究中的一个难点问题<sup>[5]</sup>。当前,针对薄板陡角零件的渐进成形,多道次成形工艺是一种有效的解决方法。采用多道次渐进成形方法,通过引入更多的变形材料,使得某些局部材料的减薄现象得到减缓,从而制作出厚度分布更加均匀的陡角度成品。近年来,国内外许多学者开展了多道次渐进成形的相关研究,Skjodt M 等<sup>[6]</sup>采用多道次成形方法成功制作了球形件和直筒形样件,国内沈黎萍等<sup>[7]</sup>也成功制作了球形件,而周六如等<sup>[8]</sup>成功制作了方盒形样件,以上研究缺乏对多道次渐进成形机理与变形规律的深入研究,以及成形路径的优化设计等。

本研究针对多道次双点渐进成形中材料变形规律问题,建立典型圆锥台件双点渐进成形有限元模型。

## 1 多道次双点渐进成形数值模拟

### 1.1 材料与样品

本研究采用的板料为 1060 圆形铝板,直径为 160 mm,厚度为 1 mm。板料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

参数	材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	硬化 指数	屈服强 度/MPa
数值	1060 Al	2 700	5 594 0	0.32 4	0.12	116

成形的目标零件如图 1 所示。

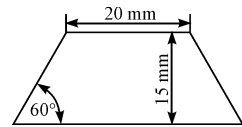


图 1 目标零件

### 1.2 有限元模型的建立

本研究采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 作为数值模拟的平台,所建立的双点渐进成形有限元模型如图 2 所示。

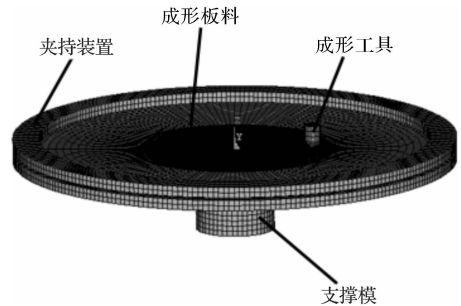


图 2 双点渐进成形有限元模型

结合双点渐进成形过程的特点,夹持装置、支撑模具和成形工具头均不参与变形,因此本研究采用刚体模型;板料的单元类型选用 shell163 显式壳单元,材料模型为三参数 Barlat 材料模型<sup>[9]</sup>,夹持装置、支撑模具和工具头则均采用 solid164 显式实体单元;综合模拟的精度和成本,选择映射法划分网格,将零件成形区域的网格大小设为 1.5 mm,非成形区域设为 3 mm,夹持装置、支撑模具和工具头的网格大小均设为 2 mm。

结合成形特点,有 3 个约束和 3 个接触对需要定义。约束工具头的 3 个平动自由度,夹持装置和支撑模具全约束;3 个接触对分别为板料与工具头、板料与夹持装置、板料与支撑模具,均为面面接触,由于工具头和板料的接触部位会进行良好的润滑,属于边界摩擦类型,摩擦系数取 0.1,在板料与夹持装置、板料与支撑模具之间则无润滑条件,属于干摩擦,摩擦系数取 0.25。

### 1.3 工具头与夹持装置运动轨迹的加载

工具头运动轨迹的加载是板料渐进成形模拟中的一个难点。在 ANSYS/LS-DYNA 中通过将三维运动分解为关于时间参数的 3 个平面运动  $T-X$ 、 $T-Y$  和  $T-Z$  进行加载, $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的坐标可以从已获得的成形轨迹中直接提取,对于时间  $T$  参数则要结合实际加工及有限元计算精度和成本进行设置。本研究进行的是多道次成形,还涉及到轨迹的衔接问题,通过直接将前后道次工具头  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的坐标进行合并,然后分别进行加载,可获得 3 个时间历程曲线,四道次成形时的曲线如图 3(a)、3(b)、3(c) 所示。对于双点渐进成形,在实

实际成形过程中,夹持装置会同步向Z向运动,因此除了对工具头轨迹的加载外,还需要给出夹持装置的运动轨迹,在第一道次加工时夹持装置的运动轨迹为工具头Z向轨迹,当第一道次加工完成后,后续道次夹持装置位置保持不变,夹持装置四道次成形时间历程曲线如图3(d)所示。相比等高轨迹,螺旋轨迹在层与层之间不存在下刀问题,无压痕,成形质量更好,故选用螺旋轨迹进行成形模拟,而由于通用的CAM软件无法直接生成该类型加工轨迹,本研究通过Matlab编程的方法来获取圆锥台件多道次双点渐进成形下的螺旋加工轨迹。

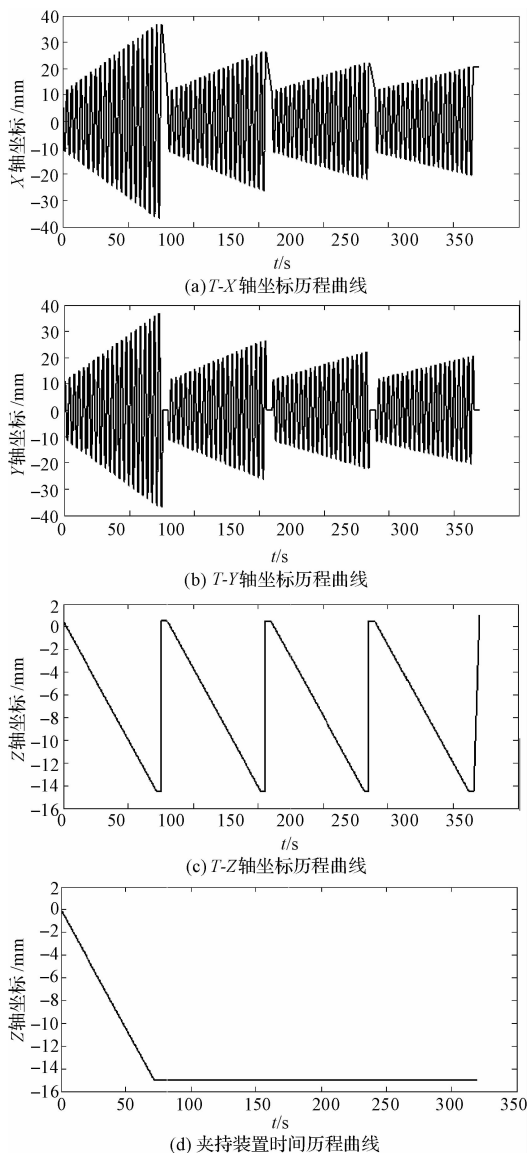


图3 工具头与夹持装置运动轨迹时间历程曲线

## 2 多道次双点渐进成形路径设计

### 2.1 多道次渐进成形路径规划遵循的原则

(1) 顺逆相间原则。采用顺逆相间原则将可以有

效地避免所加工的零件出现扭曲现象,以及材料单向堆积现象,因此,针对相邻的两个道次应尽量采用相反方向的轨迹。

(2) 变形合理原则。多道次渐进成形,理想情况应是每一道次的变形量合理且均匀。在渐进成形过程中,成形的影响因素较多,只通过参数的选择难以达到对成形的定量控制,因此,除了要选取合理的加工参数外,还要给每一道次分配合理的变形量。在多道次成形中,变形量的合理分配很大程度取决于所选取的成形角度,因为成形角度与零件的壁厚密切相关。

### 2.2 多道次双点渐进成形路径设计方案

本研究对壁角为60°的典型圆锥台件分别进行单道次、两道次和四道次成形,对两道次和四道次成形均设计了两种方案,该方案如图4所示,两道次成形方案I和II的间隔角度分别为30°和15°,四道次成形方案I按固定间隔角度设计,固定为10°,方案II则按变间隔角度设计,随着成形角度的增大,逐渐减小间隔角度,分别为15°、10°和5°。为遵循顺逆相间原则,前、

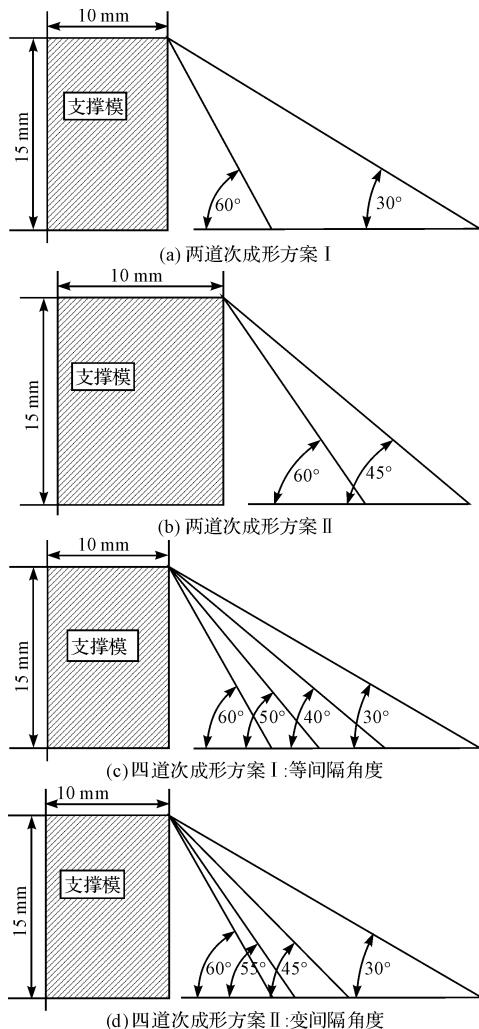


图4 两道次和四道次成形路径设计方案

后道次的成形轨迹均按相反方向设计。

模拟中所采用的成形工具头直径为 6 mm, 成形轨迹为螺旋轨迹, 螺旋轨迹最重要的两个参数是螺距和步进旋转角<sup>[10]</sup>, 螺距设为 0.75 mm, 步进旋转角度设为 1°, 考虑加工速度平稳, 以单个螺距来计算, 匀速走完一个螺距为 3.6 s。

## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 节点流动分析

通过绘制节点流动曲线图, 可以观察到多道次成形过程中的材料流动规律。根据四道次成形方案 I, 分别提取第一、二、三道次及成形结束后, 在中心 XZ 截面上各节点坐标, 绘制各道次的半截面曲线, 并间隔几个节点, 将各道次对应的节点采用虚线连接, 该虚线即为节点流动曲线(曲线图如图 5 所示)。由图 5 可知, 在第一道次时, 节点几乎没有径向移动, 从后续道次开始, 各节点明显向内部移动, 那么材料会从较大的圆周上流动到较小的圆周上, 周向的应变将发生明显负增长。

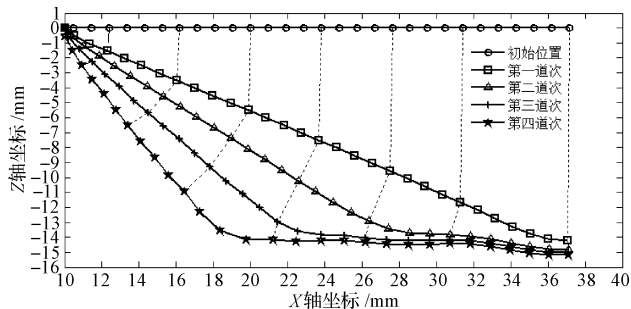


图 5 四道次方案 I 节点流动曲线示意图

为了比较不同道次数目和道次设计下材料流动情况, 本研究取零件斜壁区域对应的相同节点号, 绘制该节点随时间在 X 方向上的位移曲线(曲线图如图 6 所示)。由图 6 可知, 在单道次成形中节点位移量很小, 而随着成形道次增多, 节点流动非常明显, 则说明从非零件形状区域流入零件形状区域的材料越多, 同时发现, 在相同道次不同间隔角度下, 节点径向移动量基本

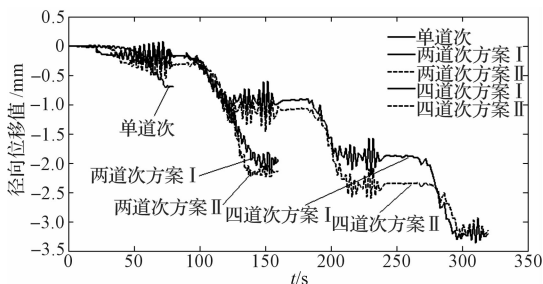


图 6 节点随时间变化的位移曲线图

相同。这说明成形道次数目是材料径向流动的最主要影响因素。

### 3.2 应变分析

通过对应变的分析, 可进一步了解多道次双点渐进成形下的材料变形规律。本研究通过选取零件斜壁相同位置的单元, 绘制随时间变化的应变曲线图(曲线图如图 7 所示)。由图 7 可知, 在单道次成形中, 第一主应变迅速增长为一个较大的数值, 第二主应变几乎为零, 而在两道次和四道次成形中, 第一主应变和第二主应变均随着成形道次的增多不断增大, 且处在同一量级, 这进一步证实了 3.1 节中周向应变负增长的情况。

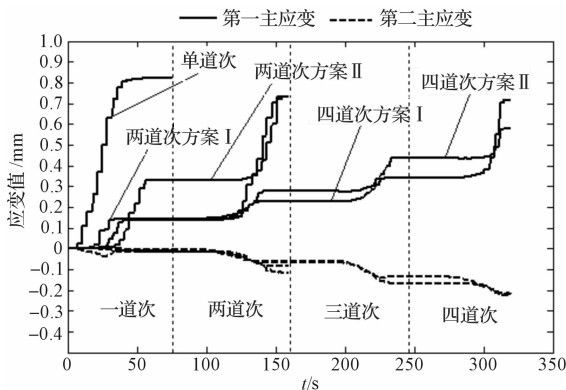


图 7 随时间变化的应变曲线图

另外, 本研究通过对比两道次的两个方案发现, 最大第一主应变和最大第二主应变值差异均较小; 对比四道次的两个方案发现, 最大第二主应变值差异较小, 而方案 I 的最大第一主应变值则要明显高于方案 II, 这是由于在前三道次时, 方案 I 的成形角度均未超过方案 II, 第一主应变值始终低于方案 II, 而进行第四道次时, 第一主应变值则迅速增长超过方案 II 的第一主应变值, 这说明随着成形道次的增多, 成形角度对应变值的影响增大。

### 3.3 壁厚分析

根据零件壁厚分布情况, 可以直接对道次数目的影响和路径设计的合理性进行评估。过中心 XZ 截面方向零件单元壁厚变化曲线图如图 8 所示。可以发现, 随着成形道次的增多, 最小壁厚值不断增大, 如相比单道次成形, 两道次和四道次成形最小壁厚分别提高了约 25% 和 50%, 壁厚分布的均匀程度也不断提高。同时还发现, 对于两道次成形方案 I 和方案 II, 斜壁厚度分布差异很小, 最小壁厚分别为 0.521 mm 和 0.534 mm, 仅相差约 2.6%, 而对于四道次成形的两种方案, 方案 II 和方案 I 的最小壁厚分别为 0.642 8 mm 和 0.597 7 mm, 采用方案 II 的最小壁厚提高约 7.5%,

斜壁厚度分布更均匀。因此,随着成形道次增多,成形角度对壁厚分布均匀性的影响越明显。

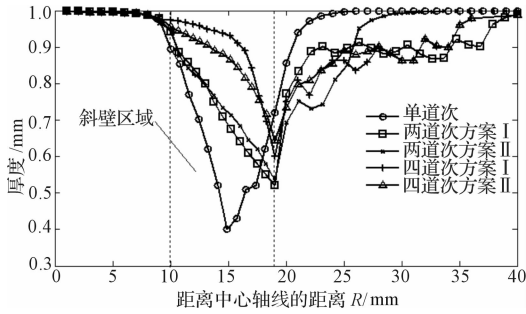


图8 截面单元壁厚分布比较图

### 4 实验验证

基于本课题组开发的渐进成形专用机床<sup>[11]</sup>,笔者采用螺旋进刀方式,以机床润滑油作为润滑剂,对模拟中各个方案进行渐进成形实验;本研究采用的材料参数与模拟中相同,工具头直径为6 mm,加工速度按照走完一个螺旋3.6 s来设置。在实验板料上印制2 mm的圆形网格,并在同一截面方向,从中心点开始等距离制作红点标记,有网格和红点标记的一面为非成形面。

采用四道次方案II双点渐进成形的圆锥台如图9所示。观察零件非成形面的圆形网格变化可知,参与零件成形的区域,圆形网格在周向的直径均产生不同程度减小,且在零件斜壁开口处,周向直径减小达到最大,这与模拟中第二主应变的分布情况相同(分布云图

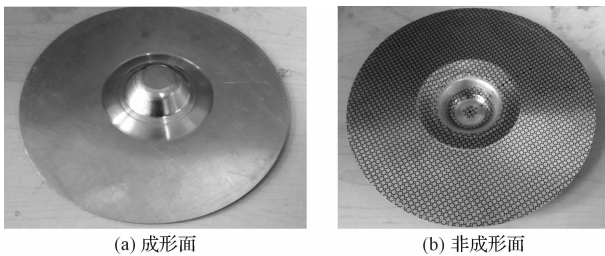


图9 采用四道次方案II实验成形的圆锥台

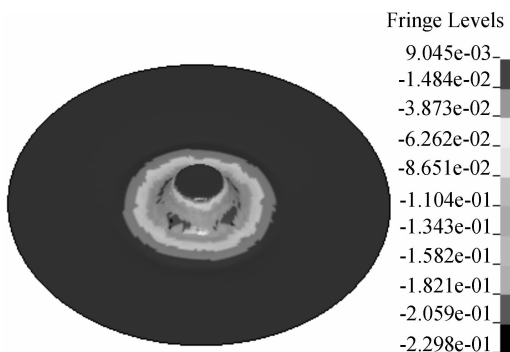


图10 四道次方案II模拟结束后第二主应变分布云图

如图10所示)。本研究采用游标卡尺测量实验网格数据,通过取对数计算最大第二主应变值约为-0.2 mm,与模拟误差约为9%,实验和模拟结果基本相符。

本研究采用游标卡尺测量各红色标记点的径向距离,并根据各点初始位置计算所产生的径向位移值,各方案下各标记点径向位移值的比较如图11所示。可发现各标记点径向移动值均随着成形道次的增多而增大,对四道次成形的两种方案,各标记点径向位移值相差很小,对两道次的两种方案,由于方案I参与变形的材料面积大于方案II,则在7号点之后将没有可比性,而在7号点之前两方案各标记点径向位移值基本相同,因此验证了模拟中得出的成形道次数目是材料径向流动的主要因素。

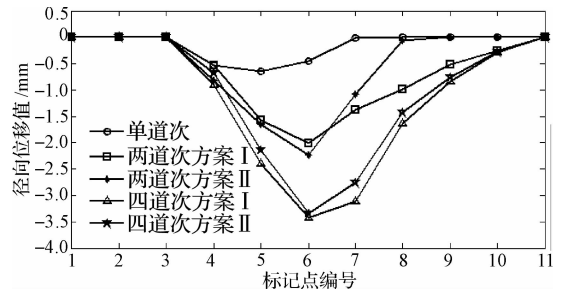


图11 各标记点径向位移值的比较

针对实验成形零件,沿着中心截面方向,并间隔相同距离测量斜壁厚度,测量设备为专用的厚度计(包括一个测量表和一个顶针),将测量结果绘制成厚度变化曲线图(曲线图如图12所示),可发现成形道次越多,最小壁厚越大,壁厚分布也越均匀,且成形角度对壁厚分布均匀性的影响增大。取四道次方案II下的模拟和实验斜壁厚度变化曲线进行比较的结果如图13所示。由图13可知,壁厚变化规律一致,且最大壁厚误差控制在5%以内,因此可认为模拟与实验结果基本吻合。

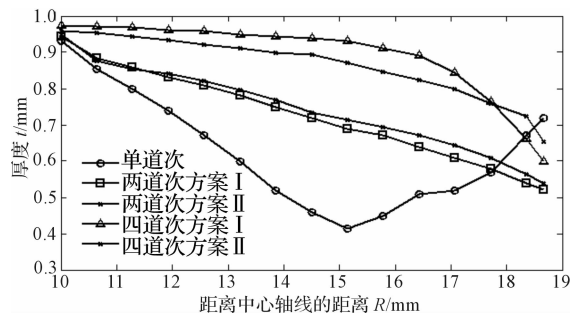


图12 各成形零件斜壁厚度分布的比较

### 5 结束语

(1)通过以上单道次、两道次和四道次双点渐进成形模拟,研究结果表明,多道次双点渐进成形中材料

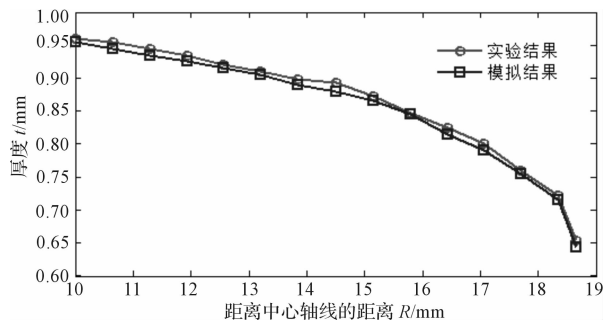


图 13 模拟和实验零件斜壁厚度分布比较

产生明显的径向流动,在周向方向的应变,特别是零件开口区域,出现明显的负增长;成形道次数目是材料径向流动的主要影响因素,随着成形道次增多,材料径向流动增大;同时,成形道次越多,零件最小壁厚越大,厚度分布均匀性越好,且成形角度对壁厚分布均匀性的影响增大;

(2)考虑成形角度影响的变间隔角度路径设计方法,可提高多道次双点渐进成形零件壁厚分布均匀性,且成形道次越多作用越明显。

(3)在成形板料表面印制圆形网格和制作标记点进行验证实验,通过观察网格变化、以及对各标记点的径向移动和对零件斜壁厚度值的测量比较发现,模拟结果与实验结果基本吻合。

#### 参考文献 (References) :

[1] CAO J, XIA Z C, GUTOWSKI T G, et al. A Hybrid Forming System; Electrical-Assisted Double Side Incremental Forming (EADSIF) Process for Enhanced Formability and Geometrical Flexibility[R]. Northwestern University, 2012.

- [2] JESWIET J, MICARI F, HIRT G, et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal[J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2005, 54(2) : 88-114.
- [3] SILVA M B, MARTINS P A F. Two-point incremental forming with partial die: theory and experimentation[J]. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2013, 22(4) : 1018-1027.
- [4] ATTANASIO A, CERETTI E, GIARDINI C, et al. Asymmetric two points incremental forming: improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization[J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2008, 197(1) : 59-67.
- [5] 王 莉,莫健华,黄树槐. 金属薄板直壁件数字化渐进成形过程的实验研究[J]. 锻压技术, 2004(6) : 9-11.
- [6] SKJODT M, BAY N, ENDEL T B, et al. Multi stage strategies for single point incremental forming of a cup[J]. **International Journal of Material Forming**, 2008, 1(1) : 1199-1202.
- [7] 沈黎萍,高锦张,蒋 松,等. 板料渐进成形半球形件的路径研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(6) : 40-44.
- [8] 周六如. 基于数控渐进成形技术的方形盒成形工艺[J]. 锻压技术, 2009(4) : 65-68.
- [9] 高锦张. 板料数控渐进成形技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [10] 朱 虎,扶建辉,姜在宽. 金属板材数控渐进成形螺旋线轨迹生成[J]. 农业机械学报, 2009(10) : 223-226.
- [11] WANG Qiu-cheng, HU Hai-han. Experimentation and design of prototype device for three point incremental forming [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2014 ( 494 ) : 579-582.

[编辑:李 辉]

#### 本文引用格式:

曹 江,王秋成,邱 磊,等. 多道次双点渐进成形数值模拟与实验研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7) : 897 - 902.

CAO Jiang, WANG Qiu-cheng, QIU Lei, et al. Experimentation and numerical simulation of multi-step two point incremental forming[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(7) : 897 - 902.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>