

马鞍面件柔性夹钳多点拉形实验与数值模拟

彭赫力, 刘纯国, 李明哲

(吉林大学无模成形技术中心, 130025, 长春)

摘要: 为了扩展柔性夹钳在板材多点拉形中的应用,对马鞍面件进行了柔性夹钳多点拉形实验. 实验结果显示,工件被夹持边缘且呈曲线性,验证了柔性夹持技术的可行性. 通过标记圆法测量了各标记圆拉形前后的厚度和长度方向的直径;对马鞍面件柔性夹钳多点拉形过程进行数值模拟,通过模拟结果发现离散夹钳实现了柔性夹持,并且成形件的应力、拉伸应变和厚度分布均匀. 实验值和模拟值的对比结果表明,各标记圆长度的拉伸率分布趋势一致,最大偏差为 0.21%,而且各标记圆厚度减薄率的分布趋势也基本一致,最大减薄量偏差为 0.02 mm,从而验证了数值模拟的正确性和柔性夹钳拉形机的实用性.

关键词: 柔性夹钳; 多点拉形; 拉伸率; 减薄率

中图分类号: TG306 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0109-05

Multi-Point Stretch Forming Experiment and Numerical Simulation of Saddle Part with Flexible Clamp

PENG Heli, LIU Chunguo, LI Mingzhe

(Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Flexible clamp stretch forming experiment of saddle part was conducted to widen the applications of flexible clamp to multi-point stretch forming. The edge line of formed part gets curved, which verifies the feasibility of flexible clamping technology. The thickness and diameter along the length direction of marked circles are calculated. The multi-point stretch forming process of saddle part with flexible clamp is simulated, the numerical results show that the discrete clamp is able to realize the goal of flexible clamping, and the stress, stretching strain and thickness of saddle part are uniformly distributed. A comparison between the experimental and numerical results shows that the length stretching ratios of all marked circles trend to distribute similarly, the maximum deviation is 0.21%; the thickness thinning ratios of all marked circles do so, and the maximum deviation of thickness thinning value is 0.02 mm.

Keywords: flexible clamp; multi-point stretch forming; stretching ratio; thinning ratio

多点成形^[1-2]是一种金属板材三维柔性成形技术,其基本思想是将传统的整体模具离散成一系列排列规则、高度可调的基本体,通过控制基本体高度来形成不同的三维曲面,实现快速、无模、数字化成形. 多点拉形^[3-6]是在多点成形基础上发展起来的一种新的板料成形技术,多点模具的使用显著减少了

模具设计、制造、调试、修复等过程消耗的费用和时间,缩短了新产品的开发周期.

随着工业水平的不断提高,对三维曲面件的需求越来越多,曲面形状越来越复杂,对成形质量和生产效率的要求也越来越高. 现有拉形机在成形横向曲率较大的工件时不易贴模、出现起皱和拉裂、材料

利用率低,而且控制系统复杂、设备价格昂贵^[7-8],为了解决这些缺点,本文研制了多夹钳式柔性拉伸成形设备^[9],实现了多个夹钳的柔性自协调运动,显著提高了成形质量和材料的利用率.本文利用已开发的柔性夹钳拉形机对马鞍面件进行了拉形实验,利用有限元分析软件对拉形过程进行了数值模拟,然后对比分析了模拟和实验结果.

1 柔性夹钳拉形机

本文针对双曲率工件成形难的问题开发了柔性夹钳拉形机,结构如图1所示.该拉形机主要由离散化的夹钳、万向节和液压缸组成,主要特点是:①传统的整体刚性夹钳被柔性离散夹钳代替,每个离散的独立夹钳通过万向节与一组液压缸连接,拉形过程中,夹钳可以根据模具的形面形状绕万向节自由转动,从而实现了加载和变形的互协调;②每组液压缸由水平缸、垂直缸和倾斜缸组成,这样可以更好地适应不同模具型面的成形,例如,当模具成形面纵向曲率较大时,主要由垂直缸和倾斜缸提供拉形力,当模具成形面纵向曲率较小时,则主要由水平缸和倾斜缸提供拉形力;③柔性夹钳拉形机成功利用了多缸液压系统的帕斯卡定理,以及材料的加工硬化特性和最小阻力定律,例如,当马鞍面件拉形开始时,板料的4个直角部分最先与模具接触,端部夹钳受到模具的反作用力最大,随着变形的进行,最先变形的部分因材料的加工硬化而变形缓慢,其他部分在夹钳顺应模具曲面发生旋转时实现变形,使工件容易贴模,从而提高了拉形件的质量.

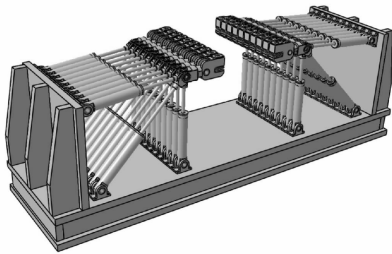


图1 柔性夹钳拉形机结构图

2 成形实验

马鞍面件拉伸成形的实验设备为柔性夹钳拉形机(见图2),该拉形机的最大拉形力为200 t,工作行程为400 mm,左右各10个离散夹钳.拉形模具为多点模具,其型面尺寸为1 200 mm×1 200 mm,冲头个数为30×30,单个冲头球面半径为30 mm,

方体截面尺寸为40 mm×40 mm,最大行程为400 mm.



图2 基于多点模具的柔性夹钳拉形装置

图3为实验工装图,图中的夹钳呈曲线状,说明在马鞍面件的拉形过程中夹钳发生了转动,实现了柔性夹持的目标,获得了成形质量较好的工件,如图4所示.拉伸应变和厚度测量采用标记圆法,根据标记圆拉形前后长度方向的直径来计算拉伸应变,根据标记圆拉形前后的厚度计算减薄量.为了方便实验测量,实验前在板料上标记各标记圆的顺序和位置,并测量各标记圆圆心距工件对称中心的距离,如图5所示.



图3 马鞍面件柔性夹钳多点拉形实验工装图



图4 马鞍面件实验照片

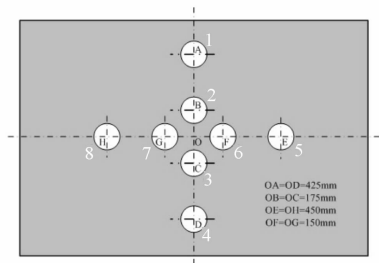


图5 标记圆的位置

利用超声波测厚仪、游标卡尺对标记圆区域拉伸前后的厚度、沿拉伸方向的长度进行测量,拉伸前后的马鞍面件标记圆的厚度 δ 和拉伸方向的长度 l 的测量数据见表 1。

表 1 标记圆厚度与拉伸方向的长度

标记圆	δ/mm		l/mm	
	拉形前	拉形后	拉形前	拉形后
1	3.90	3.84	100.38	102.75
2	3.91	3.86	100.37	101.99
3	3.91	3.86	100.36	102.02
4	3.89	3.83	100.47	102.94
5	3.89	3.84	100.25	101.97
6	3.88	3.85	100.24	101.58
7	3.90	3.86	100.31	101.82
8	3.91	3.86	100.27	102.07

3 数值模拟

3.1 有限元模型

本文采用有限元分析软件 ABAQUS 对马鞍面件柔性夹钳多点拉形的过程进行数值模拟。模拟用板材料为铝合金 5083P-O, 尺寸为 $1\,800\text{ mm}\times 1\,200\text{ mm}\times 3.9\text{ mm}$, 密度为 $2\,780\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 66.57 GPa , 泊松比为 0.33 , 屈服强度为 145 MPa , 应力 σ -应变 ϵ 曲线如图 6 所示。采用 Mooney-Rivlin 弹性模型^[10], 弹性垫材料为聚氨酯($1\,300\text{ mm}\times 1\,200\text{ mm}\times 20\text{ mm}$), 多点模尺寸为 $1\,200\text{ mm}\times 1\,200\text{ mm}$, 冲头个数为 30×30 , 单个冲头球面半径为 30 mm , 方体截面尺寸为 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$, 仅对与工件接触的基本体球冠表面部分建模。柔性夹钳的夹料块尺寸为 $100\text{ mm}\times 110\text{ mm}$, 为降低建模难度, 夹钳仅保留与板料接触的表面, 并简化为刚体。

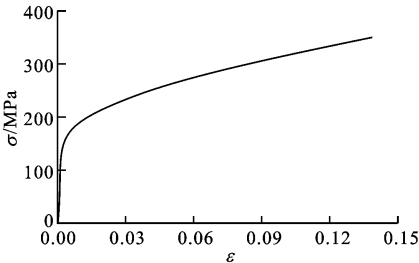
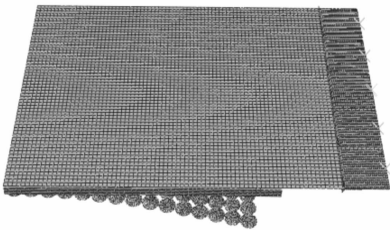


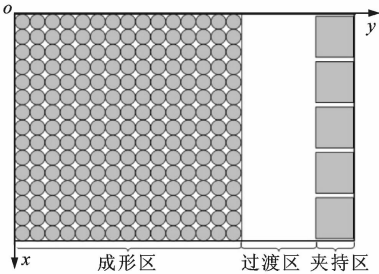
图 6 5083P-O 铝合金板的实际应力-应变曲线

目标马鞍面件的双向半径分别为 $2\,500\text{ mm}$ 和 $4\,000\text{ mm}$, 数值模拟时, 考虑到马鞍面件的对称性, 为了节约计算时间, 只建立 $1/4$ 有限元模型(见图

7), 模型由多点模、弹性垫、板料和夹钳 4 部分组成。多点模和夹钳采用四节点三维四边形刚体单元 R3D4 来划分网格, 弹性垫采用 8 节点 6 面体减缩积分实体单元 C3D8R 来划分网格, 板料采用四边形壳单元 S4R 来划分网格。多点模、弹性垫、板料和夹钳之间的接触类型为面面接触, 弹性垫与多点冲头、弹性垫与板材之间的摩擦系数为 0.1 , 板材与夹钳之间的摩擦系数为 0.5 , 采用位移加载方式, 虚拟拉形速度为 0.1 m/s 。



(a)有限元模型



(b)板材 1/4 模型平面

图 7 柔性夹钳多点拉形有限元模型及模型平面

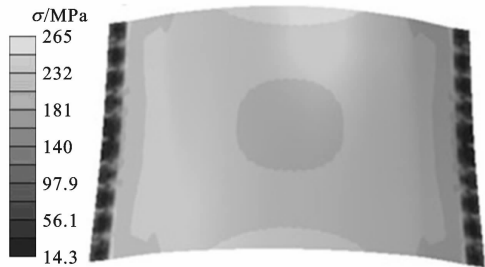
3.2 数值模拟结果

图 8 为马鞍面件柔性夹钳多点拉形应力、拉伸应变和厚度的分布云图, 由图 8 可知, 马鞍面件成形区应力的最大值为 265 MPa , 最小值为 202.3 MPa ; 成形区拉伸应变 ϵ_y 的最大值为 3.332% , 最小值为 0.99% ; 成形区厚度的最大值为 3.879 mm , 最小值为 3.830 mm 。在柔性夹钳多点拉形方式下, 马鞍面件成形区的应力、拉伸应变和厚度分布均匀, 工件被夹钳夹持边缘呈曲线状, 夹钳在成形过程中发生了转动, 因此实现了柔性夹持的目标。

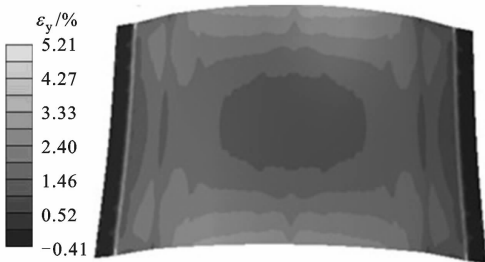
由于文中结果是基于 $1/4$ 模型的模拟, 因此标记圆 1 与 4、2 与 3、5 与 8、6 与 7 的数值相同。标记圆 1、2、5、6 的拉伸应变和厚度的数值模拟结果如表 2 所示。

表 2 标记圆拉伸应变及厚度的数值模拟结果

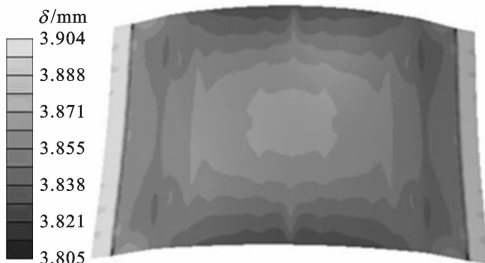
标记圆	1	2	5	6
$\epsilon_y/\%$	2.25	1.52	1.64	1.42
δ/mm	3.86	3.87	3.87	3.87



(a)应力分布图



(b)拉伸应变分布图



(c)厚度分布图

图 8 马鞍面件的数值模拟结果

4 成形实验与数值模拟的对比分析

图 9 为柔性夹钳多点拉形实验和数值模拟得到的 8 个标记圆的拉伸应变曲线. 由图 9 可知, 实验结果与数值结果趋势基本一致, 实验结果普遍大于数值结果, 数值模拟和拉形实验的拉伸应变最大值与最大偏差都位于标记圆 4, 其最大值分别为 2.25% 和 2.46%, 实验和数值模拟的最大偏差为 0.21%. 由于模拟条件比实际拉形条件理想化, 例如摩擦条件、板材性能批次差异等, 因此这些因素都可能引起数值结果与实验结果的偏差.

图 10 为柔性夹钳多点拉形实验和由数值模拟得到的 8 个标记圆的板厚减薄率 δ_b 曲线. 由图 10 可知, 整体上拉形实验得到的板厚减薄率大于数值模拟得到的板厚减薄率, 拉形实验的板厚最大减薄率为 1.54%, 数值模拟的板厚最大减薄率为 1.03%, 二者的偏差为 0.51%, 板厚减薄率差值换

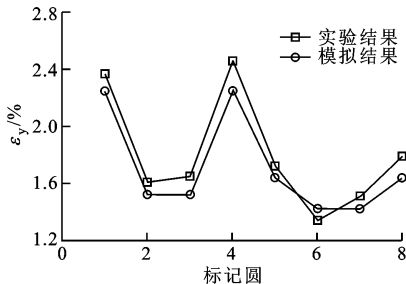


图 9 各标记圆的拉伸应变曲线

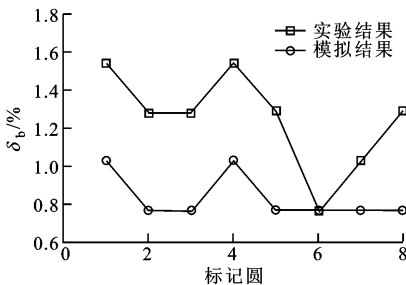


图 10 各标记圆的板厚减薄率曲线

算成板厚减薄量的差值为 0.02 mm, 但都属于超声波测厚仪的合理误差范围. 根据拉伸应变越大厚度就越小, 即减薄率越大的特性, 可知板厚减薄率曲线与拉伸应变曲线的趋势相一致.

5 结 论

(1) 马鞍面件柔性夹钳的多点拉形实验结果表明, 柔性夹钳拉伸成形机的离散夹钳在拉形时可以随模具形状进行自动调节, 从而满足了夹钳柔性化的设计要求. 成形件各标记圆的拉伸应变和厚度测量数据表明, 马鞍面件应变和厚度分布都呈均匀性.

(2) 通过对马鞍面件柔性夹钳的多点拉形进行数值模拟可知, 有限元模拟准确地再现了拉形时柔性夹钳的自协调现象, 且马鞍面件有效成形区的应力、拉伸应变和厚度分布均匀.

(3) 马鞍面件柔性夹钳的多点拉形实验结果和数值模拟结果表明, 在合理的偏差及测量误差范围内, 实验结果与数值模拟结果吻合得较好, 从而验证了马鞍面件柔性夹钳的多点拉形数值模拟的正确性, 同时也体现了柔性夹钳拉形机的实用性.

参考文献:

[1] 李明哲, 中村敬一. 基本的な成形原理の检讨: 板材多点成形法の研究第 1 報 [C]//平成 4 年度日本塑性加工春季講演会. 横浜, 日本: 日本塑性加工协会, 1992: 519-522.

- [2] LI M Z, CAI Z Y, SUI Z, et al. Multi-point forming technology for sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/2/3): 333-358.
- [3] 周朝晖,蔡中义,李明哲. 多点模具的拉形工艺和数值模拟 [J]. 吉林大学学报:工学版, 2005, 35(2): 287-291.
- ZHOU Zhaohui, CAI Zhongyi, LI Mingzhe. Stretching process based on multi-point die and its numerical simulation [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2005, 35(2): 287-291.
- [4] CAI Zhongyi, WANG Shaohui, XU Xudong, et al. Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 396-407.
- [5] WANG Shaohui, CAI Zhongyi, LI Mingzhe. Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5/6/7/8): 475-483.
- [6] WANG Shaohui, CAI Zhongyi, LI Mingzhe. FE simulation of shape accuracy using the multi-point stretch forming process [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 2010, 38(2/3): 223-236.
- [7] 侯红亮,余肖放,曾元松. 国内航空钣金装备技术现状与发展 [J]. 航空制造技术, 2009(1): 34-39.
- HOU Hongliang, YU Xiaofang, ZENG Yuansong. Current and development status of sheet metal equipment and technology in Chinese aviation industry [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(1): 34-39.
- [8] 韩奇钢,付文智,冯朋晓,等. 多点成形技术的研究进展及应用现状 [J]. 航空制造技术, 2010(24): 87-89.
- HAN Qigang, FU Wenzhi, FENG Pengxiao, et al. Research development and application of multi-point forming technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24): 87-89.
- [9] 陈雪,李明哲,付文智,等. 球形件多钳式柔性拉形的数值模拟 [J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 32-35.
- CHEN Xue, LI Mingzhe, FU Wenzhi, et al. Numerical simulation of multiple grippers flexible stretch forming for spherical part [J]. Forging and Stamping Technology, 2010, 35(4): 32-35.
- [10] AI-QURESHI H A. Analysis of simultaneous sheet metal forming operations using elastomer technique [C]//9th International Conference on Metal Forming. Birmingham, UK: Elsevier Science SA, 2002: 751-755.

(编辑 管咏梅)