

曲面件柔性拉伸成形时的过渡区

程艳艳¹, 李明哲¹, 邢健^{1,2}, 王友¹

(1. 吉林大学 无模成形技术开发中心, 吉林 长春 130025; 2. 东北电力大学 工程训练中心, 吉林 吉林 132012)

摘 要: 利用多夹钳式拉伸成形机能够实现夹持和拉伸成形的柔性化特点, 对投影面为梯形的曲面件分别建立矩形板料和梯形板料夹持有限元模型, 并进行了不同过渡区的矩形板料和梯形板料的数值模拟。结果表明, 随着过渡区最大长度的减小, 板料容易贴模, 成形力减小, 成形件的最大应变值减小, 有效成形区应变、厚度分布更均匀, 成形效果更好。对投影面为梯形的曲面件进行拉伸成形实验, 实验结果与数值模拟结果吻合, 验证了数值模拟的正确性。多夹钳式拉伸成形机能够根据模具形状合理设计过渡区形状, 提高成形质量, 节省材料, 降低拉伸成形成本。

关 键 词: 塑性加工; 板料成形; 拉伸成形工艺; 数值模拟; 过渡区

中图分类号: TG 386 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)10-1435-06

Transition Zones in Flexible Stretch Forming for Surface Parts

CHENG Yan-yan¹, LI Ming-zhe¹, XING Jian^{1,2}, WANG You¹

(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China; 2. Engineering Training Center, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China. Corresponding author: LI Ming-zhe, E-mail: limz@jlu.edu.cn)

Abstract: According to the characteristics that the multi-gripper stretch forming machine can realize the flexibility of clamping and stretching, finite element models of rectangular and trapezoidal sheet metal were built for surface parts of trapezoidal projection plane, and numerical simulations of different transition zones for rectangular and trapezoidal metal sheets were conducted. The results showed that with the decrease of the maximum length of the transition zone, the conformability of the sheet metal to the forming die was increased, the forming force together with the maximum strain of the formed parts decreased while the strains and thickness of the effective forming zone distributed more uniformly and the formability was much better. Stretch forming experiments were done for the surface part of trapezoidal projection plane, and the experimental results were coincident with the numerical simulation results, which proved the validity of simulation. The multi-gripper stretch forming machine can reasonably choose the transition zone shape according to the shape of forming die, which improves forming quality and reduces the material and stretch forming costs.

Key words: plasticity processing; sheet metal forming; stretch forming process; numerical simulation; transition zone

薄板曲面件在航空航天、高速列车、城市建筑等行业应用广泛。随着现代工业的飞速发展, 对薄板曲面件需求量的日益增加, 曲面形状越来越复杂, 成形质量越来越高。为了适应产品的个性化、多样化等需求, 出现了一些柔性成形方法, 如渐进成形^[1]、多点成形^[2]、柔性拉伸成形^[3]等。柔性拉

伸成形包括拉伸成形模具柔性化和夹持方式柔性化。在模具的柔性化方面, 文献[4-5]对可重构模具拉伸成形进行了研究, 文献[6-7]对多点模具拉伸成形进行了研究; 在夹持方式的柔性化方面, 文献[8]研究了多辊下压式拉伸成形, 文献[9]研究了柔性夹钳拉伸成形。

收稿日期: 2014-11-19

基金项目: 欧盟第七框架协议计划国际合作项目(FlexiTool-CT-2010-261925)。

作者简介: 程艳艳(1980-), 女, 吉林省吉林市人, 吉林大学博士研究生, 吉林工业职业技术学院讲师; 李明哲(1951-), 男, 吉林长春人, 吉林大学教授, 博士生导师。

吉林大学李明哲教授研发的多夹钳式拉伸成形机使夹持方式实现了柔性化,成形的薄板曲面件已经成功应用于多个领域.由于多夹钳式拉伸成形机克服了传统的拉伸成形机拉伸成形时所需的过渡区较长、成形质量不稳定、调试周期长、生产成本相对较高等问题,所以对多夹钳式柔性拉伸成形的进一步研究具有重要意义.

文献[10]对传统拉伸成形和多夹钳式柔性拉伸成形的过渡区进行研究,研究结果表明多夹钳式柔性拉伸成形可以缩短过渡区的长度,减小成形误差,提高成形精度;文献[11]研究了多夹钳式柔性拉伸成形规则形状曲面件时过渡区长度对矩形板料成形的影响.本文通过有限元软件对投影面为梯形复杂曲面件的多夹钳式拉伸成形的过渡区进行研究,以矩形板料与梯形板料为毛坯分析成形件在不同形状过渡区时的成形力、应变、厚度等变化问题,了解其分布规律.通过选择适当的过渡区形状,获得更好的成形效果,并节约材料.对数值模拟结果进行了实验验证,为实际拉伸成形过程中选择最佳的过渡区提供有力的理论和实践依据.

1 拉伸成形时的过渡区

过渡区是指从夹钳到模具边缘之间的板料悬空区域,如图 1 所示.在拉伸成形过程中通过过渡区将夹钳的拉伸力传递到板料的有效成形区,其长度影响着板料的成形质量,也决定着材料利用率.材料利用率用式(1)表述,由式(1)可知,减小过渡区的面积是提高材料利用率的根本途径.

$$\eta = \frac{A_1}{A_0} \times 100\% = \frac{A_1}{A_1 + A_2 + A_3} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η 为材料利用率; A_0 为拉伸成形件毛坯总面积; A_1 为有效成形区板料面积; A_2 为过渡区板料面积; A_3 为夹持区板料面积.

从图 1a 可以看出,传统横向拉伸成形时,由于夹钳是一个刚性整体,所以板料被夹持边缘与钳口形状一致,呈直线.成形件要借助过渡区来实现从夹持边缘的直线到模具边缘曲线的过渡,所以往往设定 300 ~ 500 mm 长度的过渡区;模具边缘曲率越大,所需的过渡区越长.从图 1b 可以看出,过渡区明显减小,板料被夹持边缘可随夹钳运动形成近似于模具边缘的曲线,这是由多夹钳式拉伸成形机的特点决定的.

图 2 为多夹钳式拉伸成形机示意图,将相同方向的液压缸编为一排,拉伸成形时水平缸、倾斜

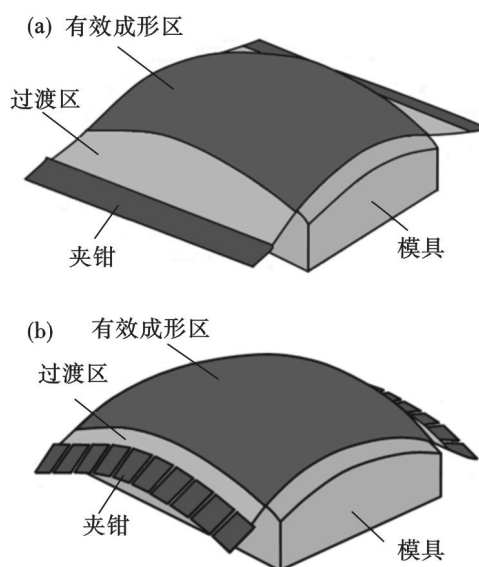


图 1 拉伸成形工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stretch forming process

(a)—传统拉伸成形; (b)—多夹钳式柔性拉伸成形.

缸和垂直缸分别对板料施加水平力、倾斜力和垂直力.每排液压缸通过一个三位四通电磁换向阀和一个溢流阀控制,应用多缸液压系统的帕斯卡定理保证每排液压缸施加的拉力是相同的.每个夹钳可以产生独立的相对位移和摆动,从板料边缘的近似曲线到模具边缘的目标曲线曲率变化很小,所以要求很小的过渡区甚至无过渡区即可完成拉伸成形.

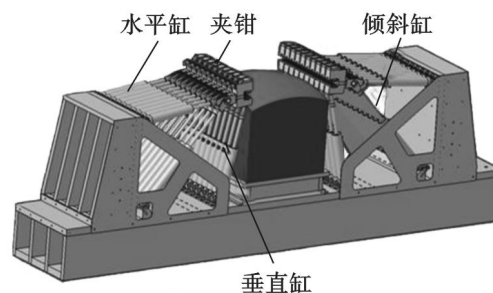


图 2 多夹钳式拉伸成形机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-gripper stretch forming machine

2 有限元模型

在拉伸成形投影面为梯形的曲面件时,板料毛坯可以采用矩形毛坯,也可以采用梯形毛坯.本文采用 ABAQUS 有限元分析软件对投影面为梯形的曲面件多夹钳式柔性拉伸成形过程进行模拟,预测板料拉伸成形的成形力、应变、厚度等分布规律,对过渡区进行研究.

模拟材料选用拉伸性能较好的 ST14,主要力

学性能参数为弹性模量 207 GPa、屈服强度 176.3 MPa、应变强化指数 596 MPa、强化系数 0.247、泊松比 0.28。模具尺寸如图 3 所示。

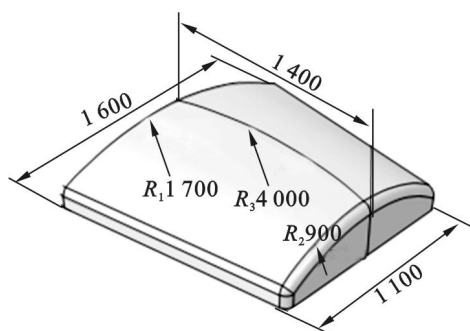


图 3 模具尺寸示意图 (mm)

Fig. 3 Schematic diagram of die size (mm)

为了节约计算时间,建立 1/2 有限元模型。图 4 为多夹钳式柔性拉伸成形的有限元模型,为了与实际拉伸成形更加接近,模具采用四节点三维刚体单元 R3D4 划分网格,板料采用四边形壳单元 S4R 划分网格。

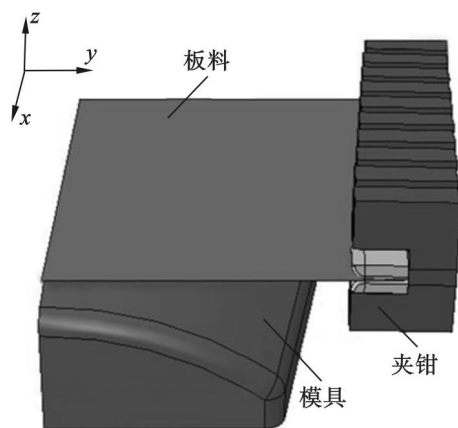


图 4 多夹钳式柔性拉伸成形有限元模型

Fig. 4 Finite element model of MGFSF

由于模具投影面为梯形曲面,板料长边和短边的过渡区长度不同,将长边设为定值,改变短边长度,即可获得不同尺寸的过渡区。本文将模具长边的过渡区定为 0,改变模具短边的过渡区长度 L_d ,分别为 250, 100 和 0 mm,即可获得三种不同形状的拉伸成形板料。如图 5 所示,可以看出随着 L_d 的减小,过渡区面积减小。为了便于说明,引入过渡区面积 $S = 0.5L_dH$,板料宽度 H 为 1 200 mm,可知三种形状的板料过渡区面积分别为 150 000, 60 000 和 0 mm²,分别用 S_1 (矩形), S_2 (梯形) 和 S_3 (梯形) 表示三种过渡区面积的板料。

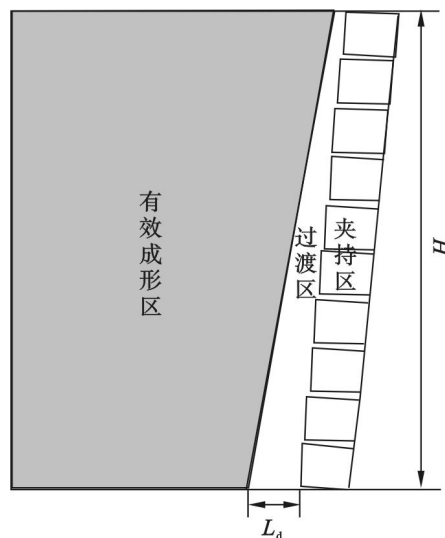


图 5 过渡区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of transition zone

3 模拟结果分析

3.1 不同过渡区的成形情况

为了使板料更好地贴模,对板料施加水平力、倾斜力和垂直力。图 6 为水平力 20 kN、倾斜力 8 kN、垂直力 15 kN 时不同过渡区板料与模具贴合情况。可以看出 S_1 和 S_2 均未贴模,并且随着过渡区面积的增大,未贴模现象更加严重。而 S_3 完全

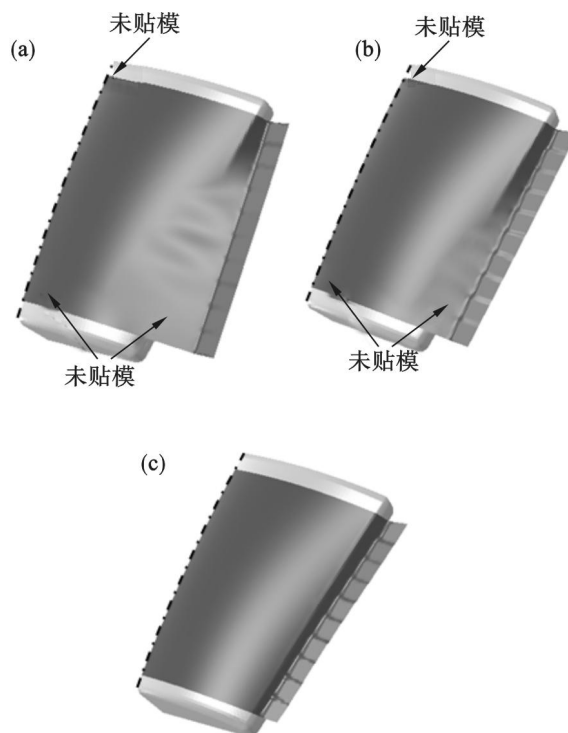


图 6 板料与模具贴合情况

Fig. 6 Conformability extent of sheet metal to forming die

(a)— S_1 ; (b)— S_2 ; (c)— S_3 .

贴模,无起皱拉裂现象,成形效果良好.这是因为多夹钳式拉伸成形机能够根据模具的形状实时调整每个夹钳相应的位移和转角,过渡区面积减小,可以更好地控制成形.

图 7 为成形力相同时成形件沿 OA 、 OB 、 AC 三个方向的形状误差.沿三个方向 S_1 的成形件形状误差均最大,贴模程度最差; S_2 的成形件形状误差小一些,贴模程度有所改善; S_3 的成形件形状误差为 0 mm,能够完全贴模,成形效果最好.

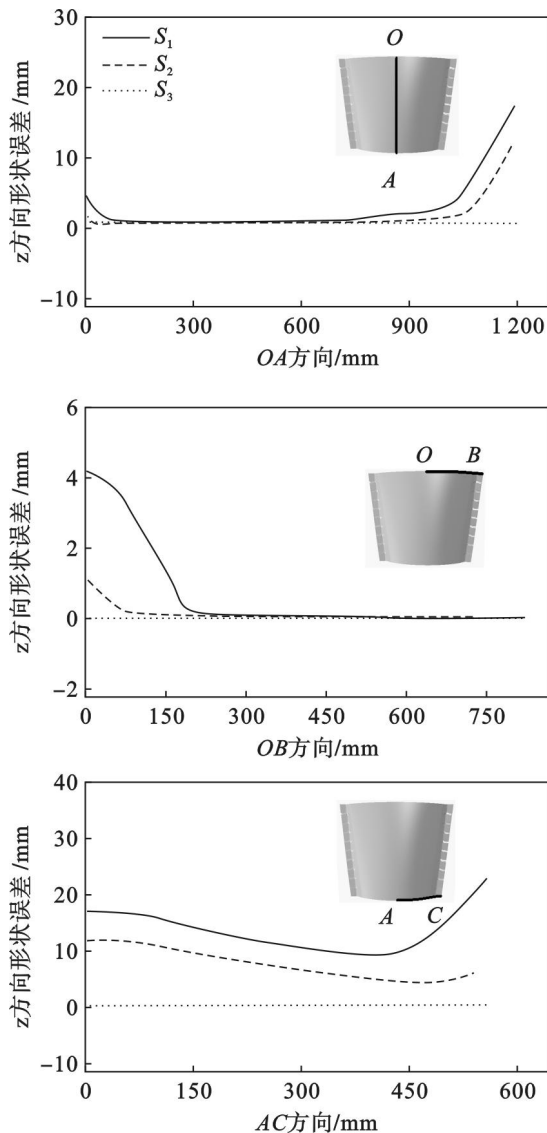


图 7 z 方向形状误差

Fig. 7 Shape errors along z-direction

为使板料贴模,经数值模拟可知水平力和倾斜力不变,垂直力增加到 18 kN 可使 S_2 贴模,垂直力增加到 20 kN 可使 S_1 贴模.

3.2 不同过渡区的应变分布

由图 8 可知 S_1 、 S_2 和 S_3 成形件完全贴模时沿拉伸方向的最大应变值分别为 15.011%、12.121%、8.279%,由 S_1 到 S_3 应变值减小了

44.847%.有效成形区沿拉伸方向的最大应变值分别为 4.284%、3.700% 和 3.206%,由 S_1 到 S_3 应变值减小了 25.163%.从模拟结果可以看出,随着过渡区面积的减小,成形件的最大应变和有效成形区的最大应变都减小,而且分布越来越均匀.这是因为随着过渡区面积的减小,夹持时夹钳的位置与投影面为梯形的模具更加接近,拉伸成形时夹持边缘与模具型面的曲率变化的相近度更高,成形力随之减小,因此改善了工件的应变分布状态.

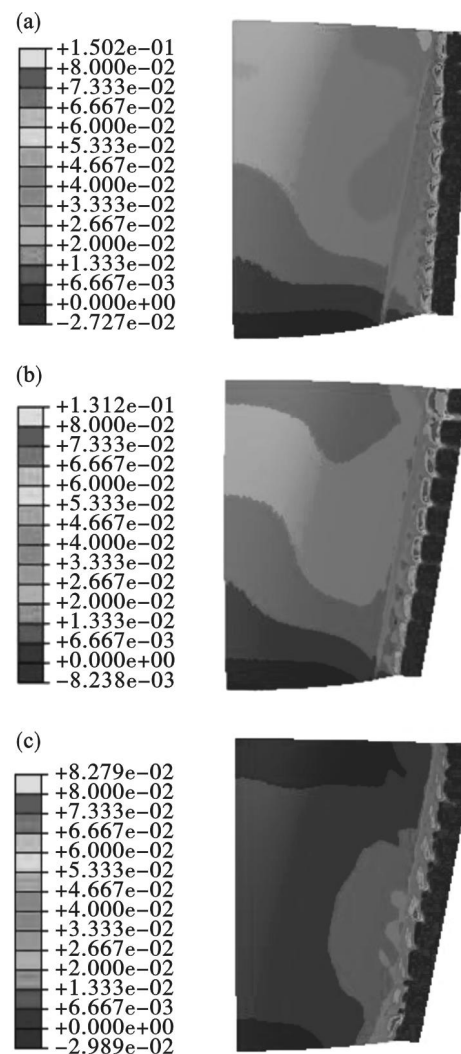


图 8 成形件沿拉伸方向的应变分布

Fig. 8 Strain distribution of forming part along stretching direction

(a)— S_1 ; (b)— S_2 ; (c)— S_3 .

3.3 不同过渡区的厚度分布

图 9 为成形件沿 OA 、 OB 、 AC 三个方向的厚度分布曲线,不同过渡区的成形件厚度的变化趋势较为相似,最小厚度都出现在板料与夹钳夹持边缘的交界处.随着板料过渡区面积的减小,成形件的有效成形区厚度分布更均匀.

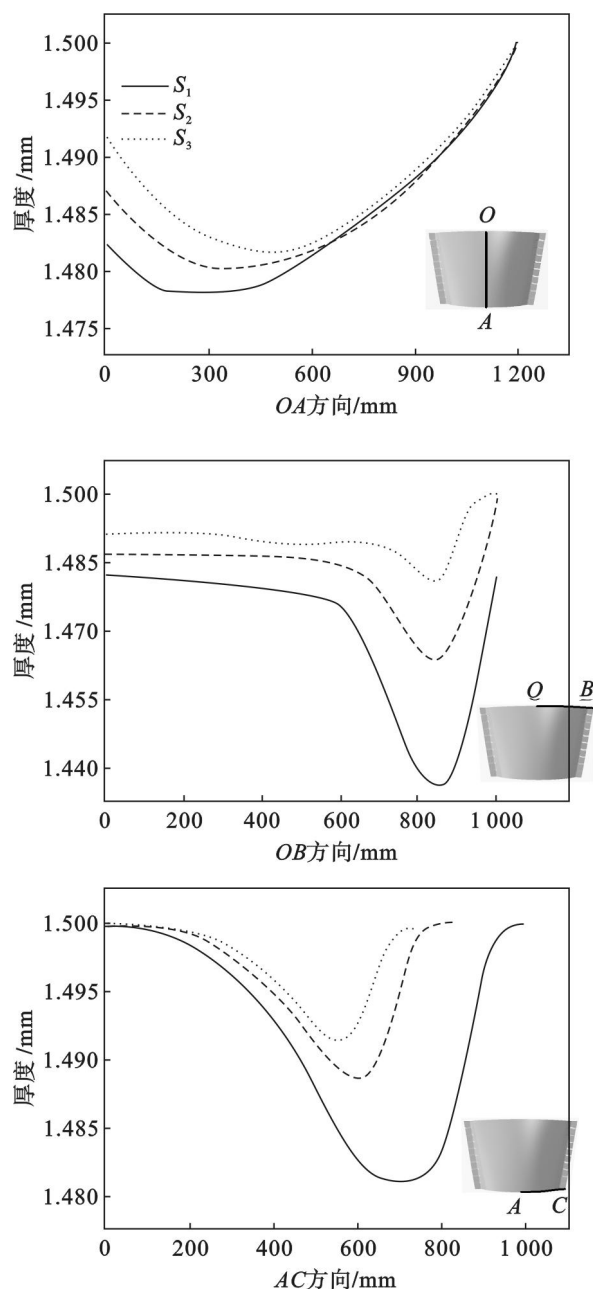


图 9 成形件的厚度分布曲线

Fig. 9 Thickness distribution curves of formed parts

4 实验结果

在多夹钳式拉伸成形机上对 ST14 进行了拉伸成形实验,图 10 为 S_1 和 S_2 的成形件.由图可知两种形状过渡区的成形件均无起皱和拉裂现象,能够完全贴模,成形效果较好.两个成形件夹持区的相邻夹钳之间产生了变形,这是因为在拉伸成形过程中每个夹钳随模具形状产生了转动和位移,相邻夹钳之间的板料自由流动形成的; S_2 的成形件在过渡区和夹持区交界位置产生的变形比 S_1 的小,降低了拉裂风险,这些现象与模拟结果相吻合.

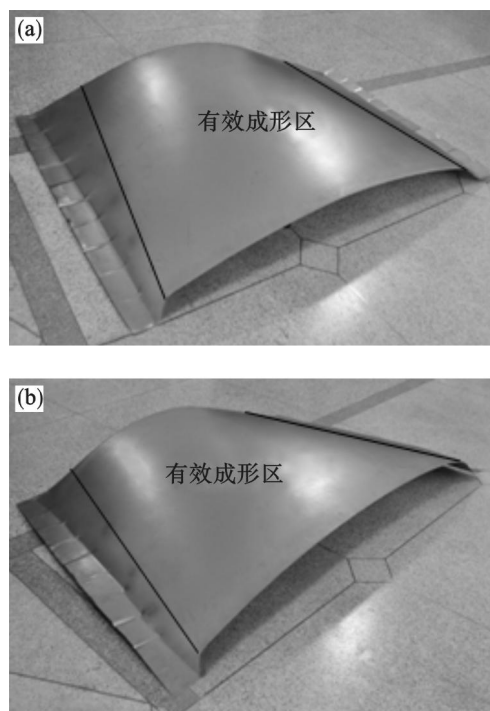


图 10 实验拉伸成形件

Fig. 10 Parts of stretch forming experiments

(a)— S_1 ; (b)— S_2 .

为了获得成形件的表面形状,通过三维光学扫描仪对以梯形板料为毛坯的成形件进行扫描,提取成形件的点云数据,与投影面为梯形的目标曲面进行对比.成形件与目标件的对比形状误差云图如图 11 所示,由图可以看出,形状误差基本分布在 $-1.909 \sim 1.909$ mm 范围内,符合生产许可误差 ± 2 mm 的要求,成形效果较好.验证了多夹钳式拉伸成形机能够用过渡区较小的梯形板料拉伸成形投影面为梯形曲面件的可行性.

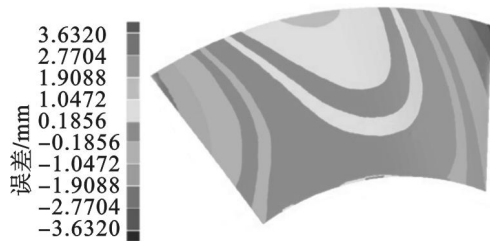


图 11 有效成形区形状误差云图

Fig. 11 Diagram of shape errors of effective forming zone

5 结 论

1) 多夹钳式拉伸成形机拉伸成形投影面为梯形的曲面件时,能够改变常规的矩形板料夹持,根据模具形状优化过渡区形状,减小过渡区面积,从而节省板料.

2) 随着过渡区面积的减小,板料更易贴模,成形力减小,成形件的最大应变减小,有效成形区应变、厚度的分布更均匀,成形效果更好。

3) 由数值模拟可知 S_3 进行拉伸成形投影面为梯形曲面件的效果更好,有必要对现有的多夹钳式拉伸成形机进行改进。增大其夹钳的摆动角度,进一步提高柔性,以适应更多的非规则形状曲面件的拉伸成形。

参考文献:

- [1] Attanasio A, Ceretti E, Giardini C. Optimization of tool path in two points incremental forming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177: 409–412.
- [2] Li M Z, Cai Z Y, Liu C G, et al. Recent developments in multi-point forming technology[C]// The 8th International Conference on Technology of Plasticity. Verona, 2005: 707–708.
- [3] 陈雪,李明哲,付文智,等. 基于多点模的板料柔性夹钳拉伸夹持力[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(1): 95–99. (Chen Xue, Li Ming-zhe, Fu Wen-zhi, et al. Clamping force of sheet metal flexible grippers stretch forming based on multi-point die[J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2011, 41(1): 95–99.)
- [4] Walczyk D F, Lakshmikanthan J, Kirt D R. Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels[J]. *Journal of Manufacturing System*, 1998, 17(4): 287–296.

- [5] Papazian J M. Tools of change: reconfigurable forming dies raise the efficiency of small-lot production[J]. *Mechanical Engineering*, 2002, 124(2): 52–55.
- [6] Cai Z Y, Wang S H, Xu X D, et al. Numerical simulation of multi-point stretch forming process of sheet metal[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(1): 396–407.
- [7] Wang S H, Cai Z Y, Li M Z. Numerical investigation of the influence of punch element in multi-point stretch forming process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 49(5/6/7/8): 475–483.
- [8] Zhang H H, Li M Z, Fu W Z, et al. Study of multi-point flexible floating clamping system of multi-roll stretch forming process[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 291/292/293/294: 282–285.
- [9] Chen X, Li M Z, Zhang H H, et al. The effect of discrete grippers on sheet metal flexible-gripper stretch forming[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 121/122/123/124/125/126: 488–492.
- [10] 彭赫力. 柔性夹钳拉伸过程及其数值模拟研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 53–55. (Peng He-li. Research on process and numerical simulation of flexible clamp stretch forming[D]. Changchun: Jilin University, 2013: 53–55.)
- [11] Wang Y, Li M Z. Research on three-dimensional surface parts in multi-gripper flexible stretch forming[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71: 1701–1717.

(上接第 1434 页)

参考文献:

- [1] Tian Y, Tang S, Wang B X, et al. Development and industrial application of ultra-fast cooling technology[J]. *Science China—Technological Sciences*, 2012, 55(6): 1566–1571.
- [2] Nayak S S, Misra R D K, Hartmann J, et al. Microstructure and properties of low manganese and niobium containing HIC pipeline steel[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2008, 494(1): 456–463.
- [3] Tian Y, Tang S, Wang G D, et al. Industrial trial production of X70 pipeline steel under ultra fast cooling conditions[J]. *Frontiers of manufacturing and Design Science*, 2012, 121/122/123/124/125/126: 3340–3344.
- [4] Nakata H, Kami C, Mathuo N. Development of API X80 grade electric resistance welding line pipe with excellent low temperature toughness[J]. *JFE Technical Report*, 2008, 12: 27–31.

- [5] 王国栋. 以超快速冷却为核心的新一代 TMCP 技术[J]. 上海金属, 2008, 30(2): 1–5. (Wang Guo-dong. The new generation TMCP with the key technology of ultra fast cooling[J]. *Shanghai Metals*, 2008, 30(2): 1–5.)
- [6] Zhi Y, Liu X H, Wang G D. Re-reddening on strip surface after water cooling[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2007, 14(3): 26–30.
- [7] Mohapatra S S, Ravikumar S V, Pal S K, et al. Ultra fast cooling of a hot steel plate by using high mass flux air atomized spray[J]. *Steel Research International*, 2013, 84(3): 229–236.
- [8] Yuan G, Li Z L, Li H J, et al. Control and application of cooling path after rolling for hot strip based on ultra fast cooling[J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(7): 1805–1811.
- [9] Lienhard J H, Lienhard V J H. A heat transfer textbook[M]. Lexington: Phlogiston Press, 2005.