

文章编号: 1000-582X(2012)11-047-06

# 工艺参数对多辊下压式柔性拉形影响的数值模拟

张昊晗<sup>1</sup>, 李明哲<sup>1</sup>, 付文智<sup>1</sup>, 陈雪<sup>1,2</sup>, 冯朋晓<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 无模成形技术开发中心, 长春 130025; 2. 北京大学 机械工程学院, 吉林 132021)

**摘要:** 多辊下压式拉形方法是基于新原理的柔性拉形方法。为了研究不同工艺参数对该拉伸成形过程和成形质量的影响, 使用非线性动态显式有限元分析软件对该新工艺的成形过程进行模拟。模拟结果表明压辊装置与模具距离越近板料合模越容易, 成形效果也越好, 而夹持装置和压辊装置之间的距离对成形结果影响不大。进行了相关实验验证, 结果表明数值模拟结果与实验结果趋势一致。

**关键词:** 数值模拟; 金属板材; 成形; 柔性机构; 塑性加工; 拉形

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

## Numerical simulation of influence for the process parameters on multi-roll flexible stretch forming

ZHANG Haohan<sup>1</sup>, LI Mingzhe<sup>1</sup>, FU Wenzhi<sup>1</sup>, CHEN Xue<sup>1,2</sup>, FENG Pengxiao<sup>1</sup>

(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. College of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin 132021, China)

**Abstract:** Multi-roll stretch forming (MRSF) process is a new flexible process. Through extensive numerical simulations of the MRSF process, it is found that the smaller the distance between die and rollers is, the more easily the shape can be formed, and the better the quality of formed part can be. However, the distance between clamps and rollers has little effect on the formed parts. The corresponding stretch forming experiment has been done and the results show that the simulation trend is consistent with the experimental results.

**Key words:** numerical simulation; plate metal; forming; flexible structures; plastic working; stretch forming

拉伸成形是航空制造领域常用的板料成形方法, 主要用于生产构成飞机气动外形的大型蒙皮零件<sup>[1]</sup>。一直以来, 中国各大飞机制造厂使用的传统拉形机多为手动, 存在自动化程度低, 控制精度差等问题, 拉形件的成品率较低<sup>[2-3]</sup>。随着计算机控制技术和电液伺服技术的发展, 国外一些厂家生产了能够精确控制夹钳运动轨迹的数控拉形机<sup>[4]</sup>, 这些拉

形机性能稳定, 操作方便, 故障少, 专业化程度高。然而其笨重的设备, 复杂的控制系统, 昂贵的造价令很多生产厂家望而却步。此外随着多点技术的不断发展, 多点拉形模<sup>[5-6]</sup>已经在一些领域逐渐代替了传统的实体模具, 这对拉形机的柔性又提出了新的要求。开发造价便宜、控制简单、成形质量好并能够配合多点拉形模, 随着模具曲面的不同而自我调整拉

收稿日期: 2012-06-30

基金项目: 欧盟第六框架协议计划航空航天领域国际合作项目 (ASTS-CT-2006-030877)

作者简介: 张昊晗(1982-), 男, 吉林大学博士研究生, 主要从事板料成形方向的研究; (E-mail) zhang\_haohan@126.com。

李明哲(联系人), 男, 吉林大学教授, 博士生导师, (Tel) 0431-85094340; (E-mail) limz@jlu.edu.cn。

形轨迹的柔性拉形设备成了拉形设备研究的新方向。

为了提高拉形工艺的成形质量和柔性,国内外很多学者提出将传统拉形机夹钳离散为多个的成形方法,并取得了很好的效果<sup>[6-11]</sup>。吉林大学无模技术中心将离散化的思想融入拉形装备的设计中,提出了一种新的拉伸成形方法——多辊下压式柔性拉形。该方法采用离散为多个的可摆头的压辊下压板材悬空区的方式来使板材贴模成形,能够很好地控制板料各位置的拉伸量,使板材贴模容易,拉伸均匀,成形质量好。

目前,对于多辊下压式柔性拉形的研究主要在吉林大学,李明哲等人<sup>[12]</sup>成功开发了多辊下压式柔性拉形实验装置,并使用该装置进行了基础实验研究,证明了该拉形方式的可行性和实用性。张昊晗等人<sup>[13]</sup>建立了多辊下压式柔性拉形的有限元模型,使用数值模拟方法,对比分析了传统拉形和多辊下压式拉形的两种成形方式的工艺特点。由于多辊下压式柔性拉形是一种新型拉形工艺,因此目前对于该拉形工艺参数对拉形过程的影响研究较少。张昊晗等人<sup>[14]</sup>对在不同润滑条件下,使用不同组合的阻尼压辊和滚动压辊时多辊下压式柔性拉形过程进行数值模拟;茅梦云等人<sup>[15]</sup>设计了几种压辊加载方式,并使用数值模拟方法对相关压辊加载方式进行了对比研究。由于以上研究都没有针对压辊装置、模具和夹持装置的相对位置进行探讨,而这三者之间的相对位置参数对多辊下压式拉伸成形件质量影响较大;笔者使用动态显式非线性有限元软件对不同模具、压辊装置和夹持装置相对距离时的多辊下压式柔性拉形过程进行了数值模拟,研究了模具、压辊装置和夹持装置相对距离不同对拉形过程、贴模难易程度和成形件质量的影响,并进行了相关实验验证。

## 1 多辊下压式柔性拉形工艺基本原理

图 1 为由吉林大学无模成形技术中心开发设计的多辊下压式柔性拉形实验装置<sup>[15]</sup>。图 2 为多辊下压式柔性拉形示意图,其机械结构主要有离散压辊装置、多点柔性浮动夹持装置和模具三部分。其中离散压辊装置由在夹持装置和模具之间横向并排布置若干个独立的可在  $y-z$  平面内摆头的压辊构成;而多点柔性浮动夹持装置由在模具的两端横向并排布置的上下若干个可在  $y-z$  平面内摆头的压板组成。模具可以使用实体模或多点模具。

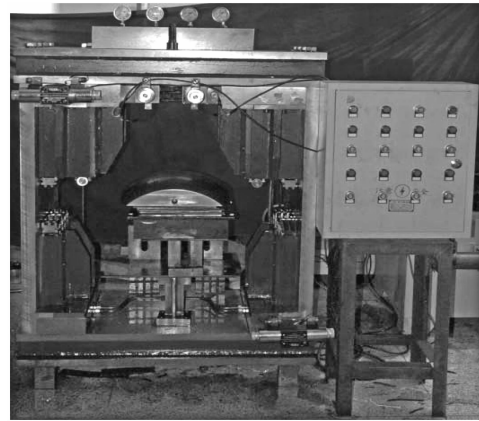


图 1 多辊下压式拉形装置

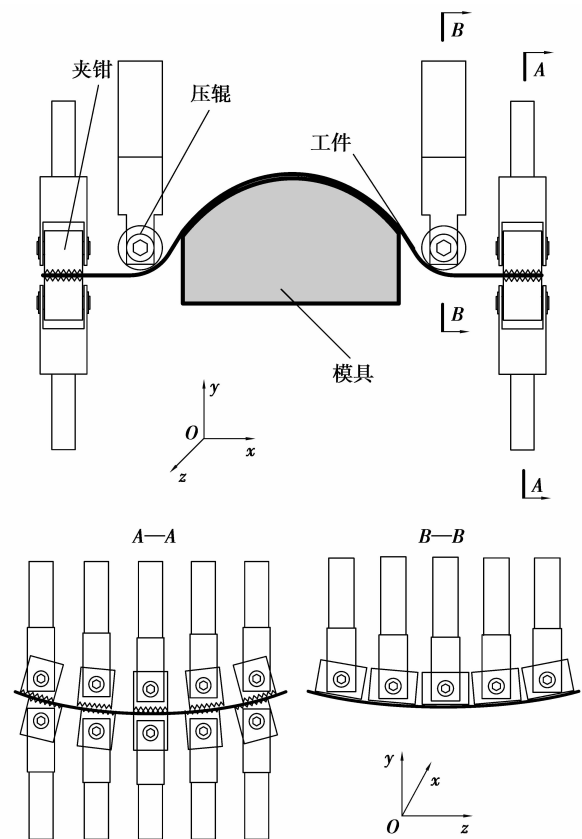


图 2 多辊下压式拉形工艺示意图

其典型的成形过程如图 3 所示,首先对夹持装置上下压板施加相同的压力,使上下压板的压力平衡并将板材夹紧。然后对每个独立的压辊都施以相同的逐渐增大的压力,使板材合模成形。在板材变形过程中,每个独立的压辊会跟随所在位置板材的变形情况被动摆头,这样能使压辊对板材的施力方向始终垂直于板材。如图 2 中  $B-B$  所示,当板材合模成形时,各压辊随板材变形被动摆头,呈与模具的端面相同的弧形。与此同时上下压板的液压缸跟随所成形的三维曲面发生位移,压板摆头,直至压板

的反变形力与传递到板材上的变形力达到平衡,获得非等高的与模具端面较接近的弧形(见图 2 中 A—A),从而实现柔性浮动夹持。最后,当板材完全合模成形后,进行卸载,得到所需工件。

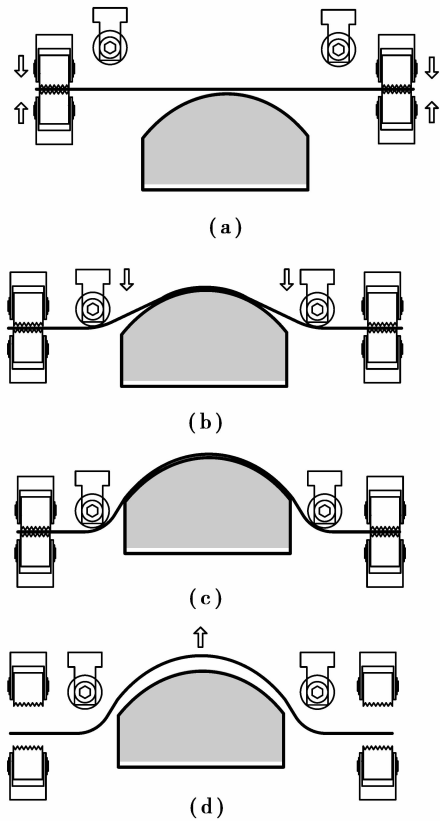


图 3 多辊下压式拉形时典型成形过程

## 2 有限元模型的建立

本例使用的材料为 2024-O 铝合金,该材料是飞机蒙皮件的常用材料,其常温下的力学物理性能为:弹性模量为 40.49 GPa,泊松比为 0.33,屈服强度为 75.3 MPa,密度为 2 720 kg/m<sup>3</sup>。通过拉伸实验获得的应力应变曲线如图 4 所示。

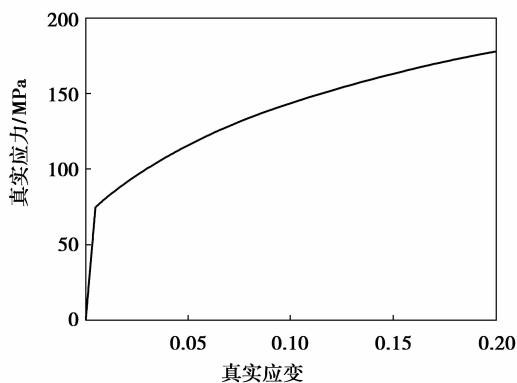


图 4 2024-O 铝合金应力应变曲线

由于本例中的拉形件为马鞍面件具有对称性,因此只对该工件的 1/4 进行建模。图 5 为板材 1/4 有限元模型平面示意图,使用动态显式非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对多辊下压式柔性拉形工艺进行有限元数值模拟。板材采用 shell163 单元,对于模具、离散夹钳和离散压辊均采用刚性四节点单元进行划分。 $x$  轴和  $z$  轴分别为该模型的对称轴, $x$  轴方向为板材的拉伸方向,在  $x$  轴和  $z$  轴上分别施加了对称约束。 $l$  为离散压辊的轴线所在平面到模具端面的距离, $L$  为悬空区长度(即压板端面到模具端面之间的距离)。各压辊的直径为 60 mm,离散为每排 5 个,压辊间距为 6 mm,压板离散为 5 个每排,各压板尺寸为 60 mm,压板间距为 5 mm。板材厚度为 1 mm,板材尺寸为 720 mm×300 mm,有效成形区域为 300 mm×300 mm,目标马鞍形曲面方程为

$$f(x, y) = \sqrt{(600 - \sqrt{300^2 - y^2})^2 - x^2} \quad (1)$$

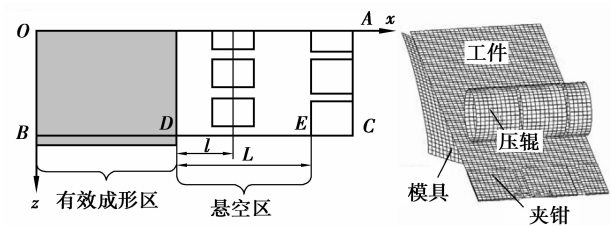


图 5 多辊下压式拉形过程有限元模型

## 3 数值模拟结果

### 3.1 压辊与模具之间距离对成形效果的影响

通过对多辊下压式拉形过程的有限元模拟,发现压辊与模具之间的距离对该拉形工艺的成形效果影响很大。保持悬空区长度为  $L=140$  mm 不变,改变压辊装置与模具之间的距离,分别对  $l=40, 70, 100$  mm 情况下,该工艺的成形效果进行数值模拟,得到各独立压辊在工件成形时位置的数值模拟光照图。如图 6 所示,离散压辊和模具的距离越近则各压辊所排列的形状和模具的端面曲线形状越接近;而且压辊对板材施加压力的方向与模具端面法线方向越接近,施力方向越好。

为了验证上述结论,笔者又分别对 3 种情况下成形件最大主应变(拉伸方向应变)进行了分析。如图 7(a)、(b)和(c)分别为上述 3 种情况下成形件最大主应变分布图,从图中可以看出压辊装置距离模具越近成形件的应变越小,而压辊装置距离模具越远成形件应变越大。这说明压辊装置距离模具越近

工件越容易合模成形,而距离越远则越不容易合模,即压辊和模具距离较近的工件可以在较小的拉伸下成形,这降低了过度拉伸的可能。

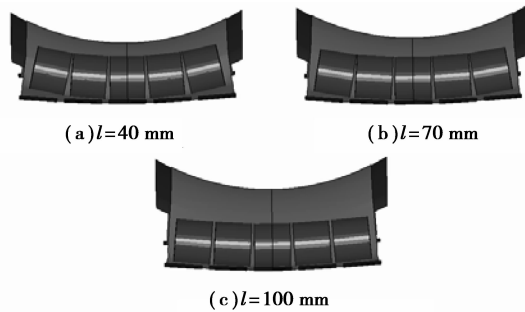


图 6 压辊与模具距离不同时压辊排列形状

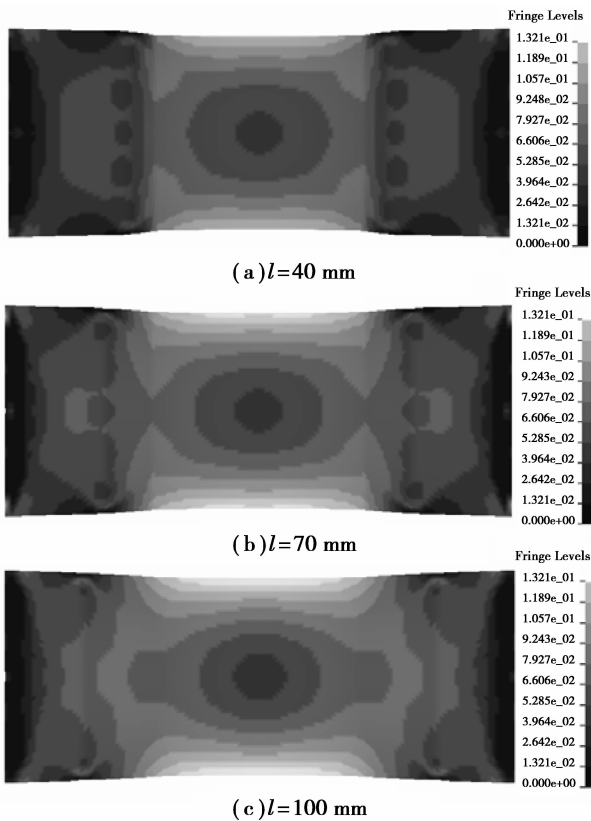


图 7 压辊与模具距离不同时成形件最大主应变分布

表 1 列出了压辊和模具距离不同时工件成形区最大主应变极值,从表中可以看出,上述 3 种情况下板料成形区的最大主应变极值之差分别为 0.058 6, 0.068 5 和 0.079 9,即压辊装置和模具之间距离越近成形区应变分布越均匀。对比最大主应变的最大、最小值,在  $l=40$  mm 的情况下得到成形件的最大主应变最小值为 0.050 3,最大值为 0.108 9 均为 3 种情况下最小。这说明各压辊装置距离模具越近工件越容易成形,且成形质量越好。

表 1 不同  $l$  值下成形件最大主应变极值表

压辊对称轴到模具 端面距离 $l/\text{mm}$	成形件有效成形区最大主应变		
	最大值	最小值	极值之差
40	0.108 9	0.050 3	0.058 6
70	0.120 2	0.051 7	0.068 5
100	0.132 1	0.052 2	0.079 9

马鞍形面工件的中心点  $O$  附近最不易被拉伸,因此拥有成形区域内最大板厚,而  $B$  点为板料最先合模的位置,往往是板材板厚最小的位置;所以对称轴  $OB$  为马鞍形件板厚变化最大的线,对研究上述 3 种情况时成形件板厚的分布很有意义。提取  $OB$  上各单元的板厚数据绘制不同压辊装置与模具距离时成形件板厚沿对称轴  $OB$  的分布曲线。如图 8 所示,压辊装置距离模具越近,则成形件板厚相对越厚,且越均匀,这说明压辊装置与模具的距离越近成形件获得的板厚分布越好。

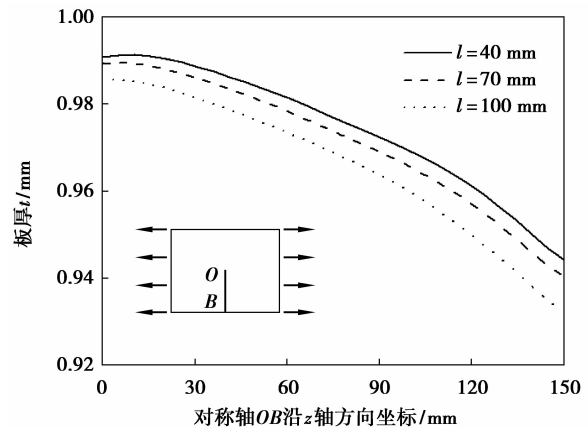


图 8 压辊与模具距离不同时成形件板厚对比

变形和板厚分布是否均匀是衡量拉形件质量的重要指标,同时回弹大小也是考察拉形件是否合格的重要内容。笔者对上述 3 种情况下的拉形件进行了回弹计算。将中心点  $O$  点固定,然后计算板料回弹。提取回弹量最大的侧边  $BD$  上节点的回弹量绘制出不同情况下板材回弹量对比图。如图 9 所示,3 种情况下拉形件的回弹量均小于 0.4 mm,回弹较小,符合实际生产要求。但是随着压辊和模具之间距离的增大,成形件的回弹量也变大,这说明缩小压辊和模具之间的距离能够提高拉形件的形状精度,提高拉形件的成形质量。

综合上述分析,减小压辊装置和模具之间的距离能够使离散压辊的施力方向更好,成形件更容易成形,且能得到变形和板厚分布更均匀和回弹量更

小的拉形件。

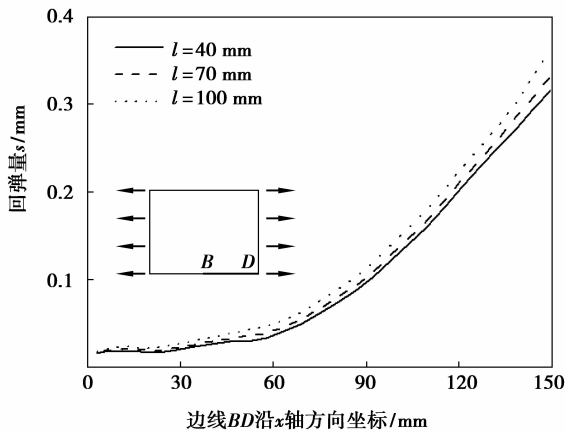


图 9 压辊与模具距离不同时成形件回弹对比

### 3.2 悬空区长度对成形效果的影响

保持上述分析结果中压辊和模具之间的最佳距离  $l=40$  mm 不变,改变夹持装置和模具之间距离(即板料悬空区长度),对多辊下压式柔性拉形工艺的成形效果进行数值模拟,对比分析悬空区长度不同的情况下板料有效成形区最大主应变极值对比图。从图中可以看出,在保持压辊和模具之间距离不变的情况下,随着悬空区的增长,拉伸方向最大和最小的应变总体呈减小的趋势;但变化不大,均在 0.008 以内,对成形件质量影响较小。因此在满足其他设计条件的基础上,减小板料悬空区长度能够有效的节省板料。

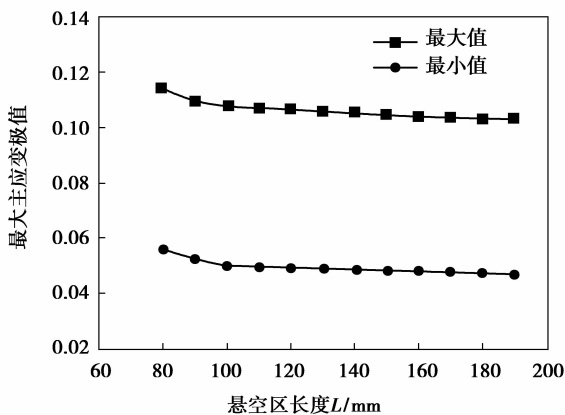


图 10 悬空区长度不同时最大主应变极值

## 4 实验验证

为了验证以上数值模拟结果的准确性,根据现有实验条件,使用多辊下压式柔性拉形实验装置(见图 1)对压辊与模具距离对成形结果的影响进行了

实验验证。实验使用材料为 2024-O 铝合金板,其原始板材尺寸为  $720\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,有效成形区域为  $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ;模具选用鞍形面实体模具,尺寸为  $320\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ ,目标曲面方程见公式(1)。使用超声波测厚仪对成形件对称轴  $OB$  上板厚进行了测量,绘制了不同压辊与模具距离时板厚分布对比图。如图 11 所示,压辊与模具之间距离越大,板厚越薄;距离越小,板厚越厚。由于成形件板厚是由拉伸量决定的,拉伸量越小板厚越厚,因此压辊距离模具越近时成形所需要达到的拉伸量越小,即板料可以在小拉伸量下成形,贴模更容易。此外随着压辊距离模具之间距离逐渐减小,板厚分布也更均匀,这与数值模拟结果趋势一致,证明了数值模拟结果的准确性。

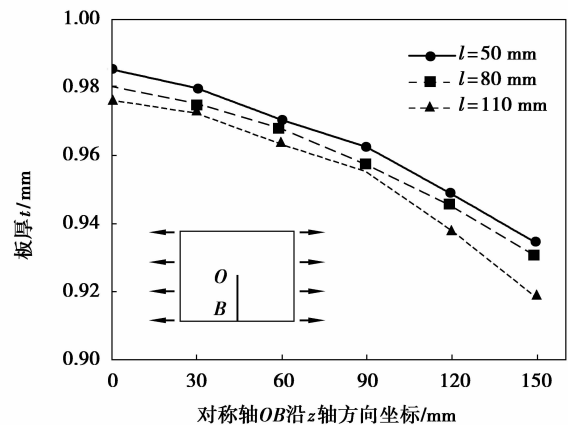


图 11 压辊与模具距离不同时成形件板厚分布实验值

## 5 结论

1) 压辊与模具之间的距离对多辊下压式柔性拉形成形过程影响很大,在保持板料悬空区长度一定的情况下,压辊和模具之间的距离越小,板料合模越容易,压辊对板料的施力方向越接近模具端面的法线方向,成形件拉伸越均匀,板厚越均匀,回弹量也越小。因此在满足其他设计条件的基础上,应尽量缩小离散压辊和模具之间的距离。

2) 保持压辊对称轴和模具端面之间距离为 50 mm 不变的情况下,板料悬空区长度对成形件的应变分布影响不大,因此在满足其他设计条件下,尽量缩短板料悬空区长度能够有效节省板料。

### 参考文献:

- [1] 孔永明,周贤宾,吕杰武,等.蒙皮拉形模拟前置处理软件开发及关键技术研究[J].塑性工程学报,2001,8(2): 29-31.

- KONG Yongming, ZHOU Xianbin, LÜ Jiewu, et al. Key technology research and software development on pre-processing of skin forming simulation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2001, 8(2): 29-31.
- [2] 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.
- [3] Yan A M, Klappka I. Springback in stretch forming process of aeronautic panel production by finite element simulation [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(Sup): 201-204.
- [4] 罗红宇, 李东升, 张彦敏, 等. 数控蒙皮拉形试验机系统开发与应用研究[J]. 试验技术与试验机, 2006(4): 31-33.
- LUO Hongyu, LI Dongsheng, ZHANG Yanmin, et al. Research & development on numerical control skin stretch forming testing system[J]. Testing Technology and Testing Machine, 2006(4): 31-33.
- [5] 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): 333-338.
- [6] Cai Z Y, Wang S H, Xu X D, 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.
- [7] Siegert K, Fann K J, Rennet A. CNC-controlled segmented stretch-forming process[J]. CIRP Annals: Manufacturing Technology, 1996, 45(1): 273-276.
- [8] Siegert K, Rennet A, Fann K J. Prediction of the final part properties in sheet metal forming by CNC-controlled stretch forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 141-146.
- [9] 谭富星, 许旭东, 李光俊, 等. 柔性夹持多点拉形过程的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1160-1164.
- TAN Fuxing, XU Xudong, LI Guangjun, et al. Numerical simulation in the process of Multi-point stretch forming with flexible clamp mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9): 1160-1164.
- [10] Chen X, Li M Z, Fu W Z, et al. Research on multi-head stretch forming technology of sheet metal[C]// Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), June 26-28, 2010, Wuhan, China. Piscataway: IEEE Press, 2010, 1: 2952-2955.
- [11] 陈雪, 李明哲, 付文智, 等. 基于多点模的板材柔性夹钳拉形夹持力[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(1): 95-99.
- CHEN Xue, LI Mingzhe, FU Wenzhi, 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.
- [12] 吉林大学. 板材拉形机: 中国, 200910067003. 6[P]. 2009-05-25.
- [13] 张昊晗, 李明哲, 付文智, 等. 多辊下压式柔性拉形工艺及其数值模拟[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(1): 89-94.
- ZHANG Haohan, LI Mingzhe, FU Wenzhi, et al. Technology and numerical simulation of multi-roll-pressing stretch forming process[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(1): 89-94.
- [14] Zhang H H, Li M Z, Fu W Z, et al. Numerical simulation of multi-roll stretch forming process with different lubrication and rollers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 110/111/112/113/114/115/116: 1512-1518.
- [15] 茅梦云, 何鑫华, 李永丰, 等. 柔性压辊拉形机原理及其数值模拟研究[J]. 锻压技术, 2010, 35(5): 100-104.
- MAO Mengyun, HE Xinhua, LI Yongfeng, et al. Flexible-roller stretching machine principle and study of its numerical simulation [J]. Forging and Stamping Technology, 2010, 35(5): 100-104.

(编辑 王维朗)