矩形盒拉深变压边力加载规律及预测

李奇涵，王红强，刘海静，李笑梅，侯建文，朱培
（长春工业大学 机电工程学院，长春 130012）

摘要：目的 解决板料拉深过程中出现拉裂、起皱、拉深不充分等缺陷的问题。**方法** 利用专业分析板料成形的软件 Dynaform，研究分析了非轴对称件矩形盒，在几种典型的变压边力下的拉深成形性能，获得了成形效果较好的加载模式，进而利用仿真软件 Dynaform 获取了样本数据。**结果** 建立了矩形盒拉深成形变压边力网络模型并对其学习训练，最后对神经网络预测结果及仿真结果所得到的变压边力加载曲线进行多项式拟合，获取了最佳压边力控制曲线。**结论** 在板料拉深过程中，通过控制压边力的大小，能够较好地发挥材料的流动性，改善制件的最终成形效果。

关键词：矩形盒件；变压边力；拉深成形；神经网络；预测
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.04.006
中图分类号：TG386 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2016)04-0033-05

Loading Law of Variable Blank-holder Force and Its Prediction in Rectangular Box Deep Drawing

LI Qi-han, WANG Hong-qiang, LIU Hai-jing, LI Xiao-mei, HOU Jian-wen, ZHU Pei
(School of Mechanical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

ABSTRACT: In order to eliminate the defects of cracking, wrinkling and inadequate stretching in the stretching process, the tensile forming properties of a rectangular box with a non-axial symmetric rectangular box under the typical variable blank holder force were studied by using the software Dynaform of the professional analysis of sheet metal forming. A more ideal loading mode of forming effect was obtained. Then the sample data was obtained by the simulation software Dynaform. A network model of variable blank holder force in rectangular box drawing forming was established and then studied and trained. Finally, the polynomial fitting of the curve of variable blank holder force was obtained by the neural network prediction results and the simulation results, and the optimal blank holder force control curve was obtained. In the stretching of sheet metal, control on the blank-holder force can better give play to the mobility of materials and improve the final shape effect.

KEY WORDS: rectangular box parts; variable blank-holder force (VBHF); drawing forming; neural networks; prediction

矩形盒件作为板料拉深成形中较为典型的冲压件，压边力是冲压成形过程中一个重要的工艺参数。由于传统的拉深机所控制的压边力是恒定的，不能随着拉深行程的变化而变化，在很程度上制约了板料的成形性，最终会影响到制件的成形精度，所以传统的控制压边力的方法已不能满足冲压工艺现代化的需求。为此，一些研究人员提出变压边力的概念，即在板料拉深过程中，随着时间和拉深行程的变化来改变压边力的大小，通过实验及实际生产证明，采用变压边力可以显著提高制件的成形质量[1—2]。本文选取非轴对称件矩形盒为研究对象，通过对几种比较典型的压边力加载模式仿真分析，得到了较优的控

收稿日期：2015-12-30
作者简介：李奇涵（1970—），男，博士，教授，主要研究方向为金属板料冲压成形数值模拟与工艺优化、材料成形智能控制技术。

制曲线；以此曲线为初始压边力控制曲线，利用 CAE 专用分析软件 Dynaform 对矩形盒进行若干次模拟仿真，可以获取样本数据，并通过神经网络技术，最终得到矩形盒拉深成形过程中最佳的压边力控制曲线[3—4]。

1 有限元模型的构造

板材采用冷轧热镀锌钢板 DQSK36 钢板，凸模尺寸通过 Dynaform 软件自动偏置获得，凹凸模具的单边间隙：δ=1.1t=0.9 mm，为节省材料，选择毛坯形状为椭圆形[5]，其长半轴为 a、短半轴为 b，为了能得到良好的冲压成形效果，选择单向自下而上式的冲压模式。通过 Dynaform 软件还可以对该模型进行有限元网格划分，并对划分后局部区域进行手动修改，最终划分结果如图 1 所示。

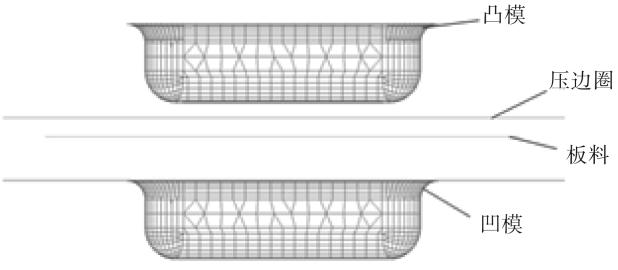

图 1 有限元分析模型
Fig.1 Finite element analysis model

2 板材的选取及外形尺寸的确定

根据实际需要和冲压性能，本次研究的拉深材料为冷轧热镀锌钢板 DQSK36，厚度为 1 mm，具体材料性能参数：泊松比为 0.28，强度系数为 520.4 MPa，硬化指数为 0.232，抗拉强度为 271 MPa，屈服强度为 184 MPa，0°，45°，90° 的厚向异性指数分别为 1.731，1.352，2.179。传统加工工艺中，一般是通过多次试冲，选取矩形毛坯，此种方式不仅浪费材料，而且还会造成板料在拉深过程中角部多余材料的堆积现象，致使板料与模具摩擦阻力增加，影响板料的流动性，容易引起板料在拉深过程中厚度变化不均和变形集中区域破裂[6]。为了优化毛坯形状，可以采用 Dynaform 中坯料工程模块中的坯料尺寸估算功能，对坯料进行评估，具体评估结果如图 2 所示，图 3 为经过 Dynaform 评估后，经计算所得的矩形盒拉深成形毛坯初始尺寸。

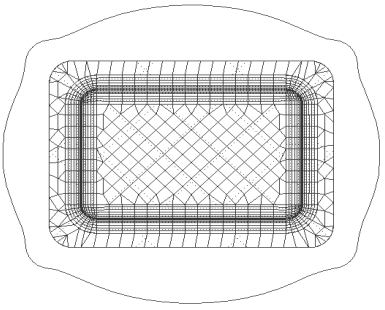

图 2 毛坯预估轮廓
Fig.2 Forecasted outline of the workblank

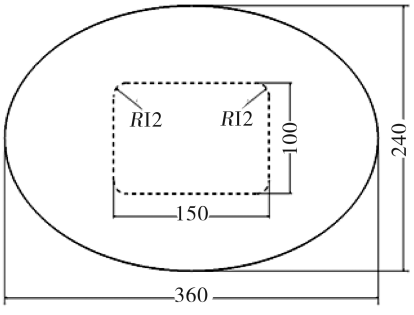

图 3 矩形盒板料拉深初始尺寸
Fig.3 Initial dimensions of rectangular box sheet drawing

3 几种典型的压边力控制曲线仿真分析

通过前面恒定压边力下的模拟仿真分析可知，矩形盒在整个拉深过程的变形较复杂。在板料拉深成形过程中，随着凸模的下移，板料由平面开始逐渐向圆角区域和平面区域转化，由于受到凸模、凹模和压边圈的共同作用，特别是受到凹模与压边圈的约束，板料在拉深过程中不同时间和下行的不同位置，其各部分所受的作用力均不同，由此导致板料在拉深过程中各时刻发生的形变也不同，因此，在板料拉深过程中，针对板料不同部位施加不同的作用力，对制件的最终成形效果有重要影响，这里，通过输入多组变化的压边力仿真分析，选出以下几种比较有代表性的变压边力加载模式（a 递减型、b 递增型、c 正梯型、d “Λ”型）对矩形盒拉深过程进行分析，具体形式见图 4。

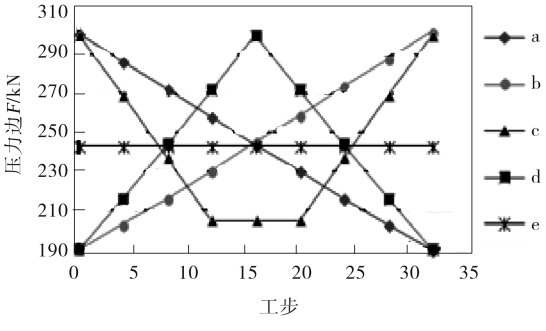

图 4 几种典型压边力加载模式
Fig.4 Loading modes of several typical blank-holder force

4　仿真结果分析

通过设定的恒定压边力和变压边力控制曲线对矩形盒拉深仿真，最后仿真结果数据如图 5—7 所示。其中：a-递减型，b-递增型，c-正梯型，d-“Λ”型，e-恒定型。

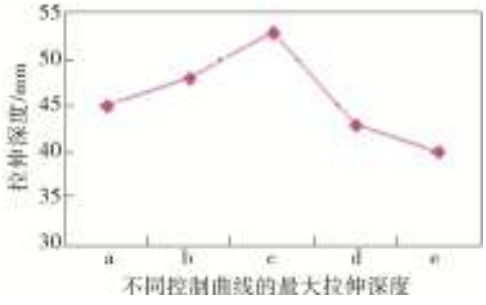

图 5 几种加载模式下所对应的最大拉深深度

Fig.5 The corresponding maximum deep drawing depth of several loading modes

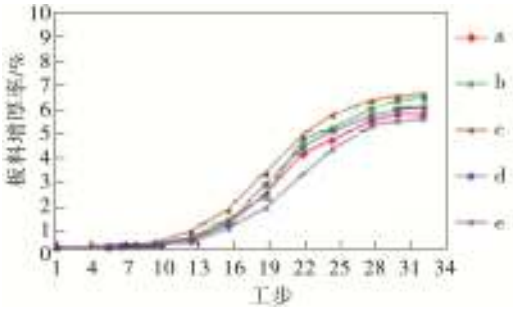

图 6　最大增厚率与工步的关系

Fig.6 The relationship between the maximum thickening rate and working step

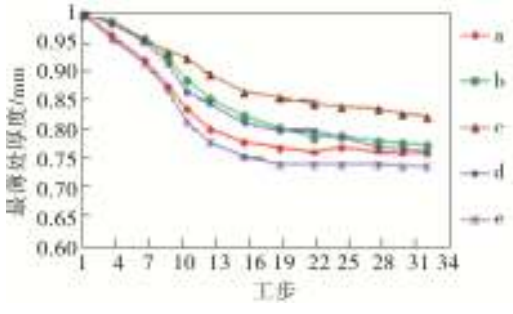

图 7　最大减薄率与工步的关系

Fig.7 The relationship between the maximum reduction rate and the working step

通过以上针对矩形盒在几种不同常见控制曲线仿真模拟结果，可以得出以下结论：板料拉深过程中的最大拉深深度，c（53 mm）>b（48 mm）>a（53 mm）>d（43 mm）>e（40 mm）；板料拉深过程中最薄处厚度，c(0.823 mm)>b（0.771 mm）>d（0.762 mm）>a（0.758 mm）>e（0.737 mm）；板料拉深过程中最大增厚率，c（6.6%）>b（6.4%）>d（6.0%）>a（5.7%）>e（5.5%）。

具体统计结果如表 1 所示。

表 1　矩形盒在几种加载模式下的仿真指标

Table 1 Simulation indicators of rectangular box under load modes

加载曲线代号	最大减薄率/%	最大增厚率/%	最薄处厚度/mm	最厚处厚度/mm
a	24.2	5.7	0.758	1.057
b	22.9	6.4	0.771	1.064
c	17.7	6.6	0.823	1.066
d	23.8	6.0	0.762	1.060
e	26.3	5.5	0.737	1.055

通过上述分析及模拟结果可知，板料拉深过程中，采用变压边力技术对制件最终成形性能有较好的改善作用，其中曲线 a 对矩形盒角部的破裂有较好的抑制效果，曲线 b 对矩形盒法兰区域起皱有较好的抑制效果，d 代表的“Λ”型加载模式可以较好地改善矩形盒的拉深性，c 代表的正梯型加载模式兼具以上几种加载模式的优点，对矩形盒最终成形有较好的效果。而最大减薄率的大小是衡量制成件效果好坏的重要标准，其值越大表示制件发生破裂的趋势越明显；相反最大增厚率标志着制成件起皱程度，其值越大表示制件发生起皱的趋势越明显，但本次拉深仿真结果显示，以上加载模式的最大增厚率无显著差别。通过以上介绍，在 c 代表的正梯形加载模式下矩形盒最终成形效果较好。

5　预测模型的设计

矩形盒拉深过程临界压边力对其成形效果的影响受多种因素的制约，其中包括模具几何参数（凹模圆角半径 r_d、凸模圆角半径 r_p、转角半径 r_c）、拉深成形高度 h、材料性能（厚向异性指数 r、硬化指数 n）、摩擦 因数μ、材料厚度 t 等多种因素的影响[7]。本文预测的目的就是根据上述参数自动地获得较理想的压边力 Q，所以，在创建神经网络预测模型时，可以把上述参数作为输入向量，输出向量为 Q。在隐含层中采用 S 型的激活函数，输入层和隐含层间使用非线性的 sigmoid 传递函数，隐含层与输出层采用不必归一化处理的 purelin 函数[8]。在 Matlab 所提供的神经网络工具箱中编写训练程序，借鉴经验[9]构建的网络模型结构如图 8 所示。

样本数据本应该通过机床的拉深试验获取，但考虑到现有条件和时间关系，本文采用 CAE 分析软

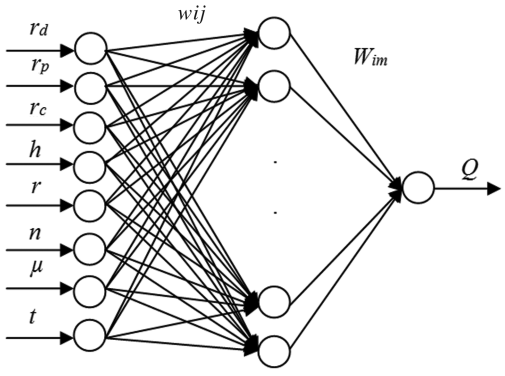

图 8 压边力预测神经网络模型

Fig. 8 Neural network model for predicting of blank-holder force

件 Dynaform 来获取，该有限元分析软件可以得到训练所需要的模拟数据，进而可以作为学习样本使用。为了能够获得足够的样本数据，用“固定间隙法”对不同尺寸、不同材质的矩形盒件在不同条件下仿真模拟[8]。获得的部分样本数据如表 2 所示。

表 2 样本数据

Table 2 Sample data

序号	t	r_d	r_p	r_c	h	r	n	μ
1	0.7	8.0	8.0	12.0	3.6	1.6	0.22	0.12
2	0.8	8.0	8.0	12.0	5.0	1.7	0.22	0.13
3	1.0	8.0	8.0	12.0	6.4	1.8	0.22	0.14
4	0.7	9.0	6.0	10.0	7.8	1.7	0.24	0.14
5	0.8	9.0	6.0	10.0	8.2	1.8	0.24	0.12
6	1.0	9.0	6.0	10.0	9.6	1.6	0.24	0.13
7	0.6	6.0	9.0	8.0	11.0	1.7	0.26	0.13
……								

通过神经网络预测结果及各种加载模式下的仿真成形效果，找出一些即能拉深成功又能使最大减薄率最小的点（判别条件是最大减薄率≤30%），通过拟合以上获取点，便可得到如图 9 所示的最优压边力控制曲线。

最优压边力控制曲线下矩形盒仿真结果如图 10 和 11 所示。由图 10 厚度分布图可以观察到，矩形盒在拉深过程中稳定性好，厚度分布均匀，最大减薄率较小；由图 11 成形极限图可以观察到，矩形盒主体部分均处于安全区域，起皱现象有所改善，就整体成形效果而言，也得到了明显的改善。

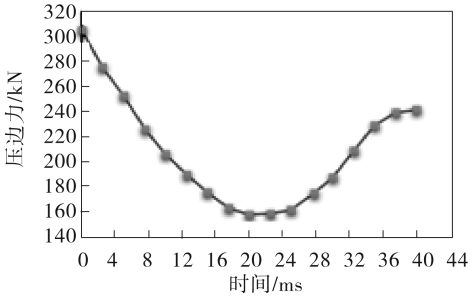

图 9 拟合后的压边力控制曲线

Fig.9 The control curve of the blank-holder force after fitting

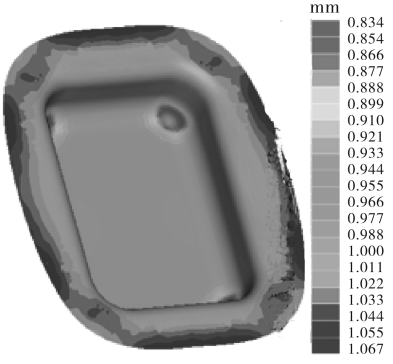

图 10 拟合曲线下的制件厚度分布

Fig.10 The distribution image of the thickness of the parts under fitting curve

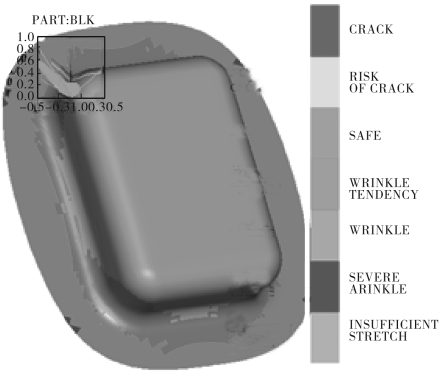

图 11 拟合曲线下的制件成形极限图

Fig.11 The forming limit chart of the parts in fitting curve

6 结论

1）在板料拉深过程中，通过控制压边力的大小（随着时间及凸模或者凹模的位置变化），能够较好地发挥材料的流动性，改善制件的最终成形效果。

2）针对非轴对称件（矩形盒件），采用正梯形变压边力控制曲线对制件最终成形效果较好。

3）可以通过仿真分析获取样本数据，通过神经网络技术获取最佳压边力控制曲线。

4）训练样本数据如果可以经过冲压机等生产工具获取，最终压边力的预测精度将会更高。

参考文献：

[1] 龚红英, 朱伟, 张质良, 等. 变压边力控制与矩形件拉深成形特性的相关性研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 49—55.
GONG Hong-ying, ZHU Wei, ZHANG Zhi-laing. Research of Variable Blank Holder Force Control and Correlation of Rectangular Box Deep Drawing Properties[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 49—55.

[2] 张晓斌, 孙宇, 代珊. 基于径向基神经网络杯形件拉深成形变压边力预测技术研究[J]. 机械设计, 2007, 24(8): 36—38.
ZHANG Xiao-bin, SUN Yu, DAI Shan. A Study on the Prediction Technology of Variable Blank-holding Force for Deep Drawing Forming of Cup Shaped Parts Based on Radial Basis Neural Network[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(8): 36—38.

[3] YOSHIHARA, SYOIEHIRO. Fuzzy Controlled Variable Blank Holding Force Technique for Circular Cup Deep Drawing of Aluminum Alloy Sheet[J]. Society of Manufacturing Engineers, 1995(6): 95—127.

[4] OBERMEYER E J, MAJLESSI S A. A Review of Recent Advances in the Application of Blank-holder Force Towards Improving the Forming Limits of Sheet Metal Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 75: 222—234

[5] 黄小明, 陈鹤峥, 胡世光. 板材的基本成形性与模拟成形性的相关性研究[J]. 金属成形工艺, 1991, 9(1): 51—56.
HUANG Xiao-ming, CHEN He-zheng, HU Shi-guang.

[6] 王元勋, 王书恒, 沈为, 等. 矩形盒拉深时变压边力的数值模拟[J]. 中国机械工程, 2007, 18(10): 1226—1229.
WANG Yuan-xun, WANG Shu-heng, SHEN Wei, et al. Numerical Simulation of Variable Blank-holder Force in Box Deep Drawing Process[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(10): 1226—1229.

[7] 王东哲, 娄臻亮, 张永清, 等. 板材变压边力拉深成形方盒件数值模拟[J].上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1543-1546.
WANG Dong-zhe, LOU Zhen-liang, ZHANG Yong-qing, et al. Numerical Simulation of Variable Blank Holder Force in Box Deep Drawing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2001, 35(10): 1543—1546.

[8] PAPELEUX Luc, PONTHOT Jean-Philippe. Finite Element Simulation of Spring Back in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125—126: 785—791.

[9] 谢晖, 钟志华. 基于 CAE 和神经网络的压边力优化[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 105—109.
XIE Hui, ZHONG Zhi-hua. Optimization of Binder Force Based CAE and Neural Net[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 105—109.

[10] 陈浩,凌有铸,陈孟元,徐海东.基于模糊滑模变结构的PMSM 矢量控制的仿真研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2015,32(2):27—32.
CHEN H, LING Y Z, CHEN M Y, XU H D. Research on the Simulation of PMSM Vector Control Based on Fuzzy Sliding Mode Variable Structure[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2015, 32(2): 27—32.

[11] 苏婷婷. 含有非线性干扰的时滞竞争性神经网络指数同步[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(5): 9——12.
SU T T. Exponential Synchronization of Delayed Competitive Neural Networks with Nonlinear Perturbations[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2015, 32(5): 9—12.