

## 基于可控拉深筋的高强度板拉深性能优化及预测

周 杰, 阳德森, 李 路, 华俊杰

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**合理地调节拉深筋阻力可以有效地改善板料拉深的成形质量,为此提出可控拉深筋技术以提高高强度钢板成形性能.以 JAC590Y 高强度钢板为研究对象,首先通过正交试验设计和数值模拟软件 Dyanform 相结合,研究三种不同类型的拉深筋运动轨迹对平底盒形件成形性能的影响,以极限拉深深度评判成形性能优劣,确定了优化的拉深筋运动轨迹类型为上升—静止—下降路线,并通过极差分析得到其主要影响因素  $H_1$  和  $H_2$ ,同时结果表明三类可控拉深筋运动轨迹均能提高高强度钢板的成形性能.然后基于优化的可控拉深筋运动轨迹类型,通过模拟试验数据建立其各个因子与极限拉深深度的 GA-BP(遗传算法-反向传播)神经网络预测模型,检验表明该模型能够较好地预测因子对极限拉深深度的影响,预测值与测试值的误差在 5%以内.

**关键词:** 可控拉深筋; 盒形件; 高强度钢板; 数值模拟; 遗传神经网络

中图分类号: TG 386

文献标识码: A

### Formability Improvement and Prediction of High Strength Steel Based on Controllable Drawbead

ZHOU Jie, YANG Desen, LI Lu, HUA Junjie

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The drawing quality could be improved effectively by a reasonable drawbead restraining force, so the controllable drawbead technology was put forward to improve the formability of high strength steel (HSS). The JAC590Y HSS was selected as an example and three different types of drawbead trajectories to the formability effects were investigated by orthogonal tests and numerical simulation. The optimal type trajectory, ascent-halt-descent, was determined according to the limit drawing depth. The main influence factors  $H_1$ ,  $H_2$  were obtained by range analysis and the numerical simulation results indicate that the three types of drawbead trajectories can all improve the formability of HSS.

Then the genetic algorithm back propagation (GA-BP) neural network of controllable drawbead trajectory factors-limit drawing depth was constructed by test data of the optimal type trajectory. The estimated values of the limite drawing depth were close to the simulation data and the errors were within 5%.

**Key words:** controllable drawbead; box; high strength steel; numerical simulation; genetic algorithm back propagation neural network

在冲压成形过程中,通过施加足够大压边力增加板料与模具之间的摩擦阻力以实现所需的拉深阻力,但在某些情况下,过大的压边力可能超过设备所能提供的载荷极限.特别是形状复杂的汽车覆盖件在拉深成形过程中须设置拉深筋来提供足够的拉深阻力,以满足在相对较低压边力条件下提供较大的拉深阻力,同时拉深筋能平衡零件各处的材料流动状况.然而为获得零件冲压成形过程中的最优应变路径,拉深阻力并非恒定不变,一直以来国内外大量研究人员主要是依靠变压边力等工艺措施实现拉深阻力变化的需要,对通过调整拉深筋高度来控制拉深阻力变化的研究很少.近年来,国外有学者对可控拉深筋进行了相关研究,通过监测成形过程中的拉深阻力,来调节拉深筋的高度位置,进而控制板料拉深的成形质量.美国密西根科技大学 XU Siguang、B M Lawrence 和 W J Emblom 等<sup>[1-3]</sup>通过实验和模拟仿真技术相结合的方法将可控拉深筋技术成功运用于铝板 6111-T4,并同时得到其相关成形规律.这些研究为可控拉深筋技术应用于难成形材料,尤其是高强度钢板,提供了必要的理论基础和实用意义.

为应对来自汽车轻量化的挑战,钢铁企业将开

收稿日期: 2009-09-04

基金项目: 科技部技术创新基金资助项目(07C26215110824); 重庆大学研究生科技创新基金重点资助项目(200811B1B0130302)

作者简介: 周 杰(1965—)男,教授,工学博士,主要研究方向为精密塑性成形、材料成型过程数值模拟仿真与优化. E-mail: yds330@163.com

发的重点放在了高强度钢板上.如今,高强度钢板和超高强度钢板的发展和应用于汽车的节能和减排提供了重要通道,它在抗碰撞性能、耐蚀性能和成本方面较其他材料仍具有较大的优势,尤其是用于车身结构件与覆盖件、悬挂件、车轮等零部件.最新的应用情况表明,有些铝、镁合金零件,如保险杠、车轮、骨架、前门、后门、横梁等,又转而采用高强度钢板设计<sup>[4]</sup>.高强度钢板的采用提高了车身的抗凹陷性和抗断裂强度,但高强度钢板材料性能与普通钢板相比有很大的差别,主要表现在高强度钢板具有较高的强度,但是塑性较差,总的延伸率小.因此冲压成形时,材料流动难以控制,板料的应力和应变分布不均,容易产生深冲裂纹、起皱、回弹大和成形精度难以控制等质量问题.

基于高强度钢板的难成形性和可控拉深筋技术的优势,本文提出将可控拉深筋技术运用到高强度钢板冲压成形过程中,以 JAC590Y 高强度钢板平底盒形件为研究对象,通过正交试验设计和数值模拟相结合,研究不同类型的拉深筋运动轨迹对零件成形性能的影响,获得优化的可控拉深筋轨迹类型,以提高高强度钢板的成形性能,并建立轨迹中影响因子与极限拉深深度的 GA-BP(遗传算法-反向传播)神经网络预测模型.

## 1 可控拉深筋技术

拉深筋在板料拉深成形中占有非常重要的地位.在拉深成形过程中,板料变形需要一定大小且沿周边适当分布的拉力,这种拉力来自冲压设备的作用力、法兰部分毛坯的变形抗力和压料面的作用力.而仅仅依靠压边力作用下模具和材料之间的摩擦力往往是不够的,需要在压料面上设置能产生很大阻力的拉深筋以满足毛坯塑性变形和塑性流动的要求.同时,利用拉深筋可以在较大范围内控制变形区毛坯的变形大小和变形分布,抑制破裂、起皱、面畸变等冲压质量问题的产生.因此,拉深筋设置得是否合理对冲压成形的成败有着很大的影响.

目前,在板料成形中,拉深筋都是采用固定的结构形式与凹模或压边圈形成一个整体,在整个成形过程中,拉深筋的位置及尺寸都是不变的,如果零件成形质量效果不佳,钳工常用抛光和堆焊等方式调节拉深筋形状以提高零件的成形质量,这种固定的拉深筋结构在制造过程中方便快捷,但是在后续的

模具调试过程中增加了钳工的研磨时间和劳动强度,同时,固定拉深筋在板料成形过程中不能实时调整板料径向的进料阻力.

由于拉深筋阻力与拉深筋高度之间存在着较好的线性增长关系,且对拉深筋阻力的影响幅度也较大,因此,利用筋高在较大范围内调整拉深筋的阻力是拉深筋调整时的首选方案<sup>[5]</sup>.为此,有学者提出了可控拉深筋,图 1 是带有这种结构的拉深模具示意图,图中,  $F$  为压边力,  $V_1$  为凸模运动速度,  $V_2$  为可控拉深筋运动速度.可控拉深筋拉深是在原有的普通拉深基础上,采用独立活动的拉深筋代替传统固定拉深筋,实现了实时控制法兰区板料向凹模型腔流动的速度,同时改变其径向拉深阻力.在冲压成形过程中其他工艺参数不变的条件下运用可控拉深筋拉深技术可以进一步提高板材的拉深性能,增加大高径比、难成形材料零件的成形性能,同时可控拉深筋具有调节方便、控制灵活的特点,因此,该技术正日益受到重视.

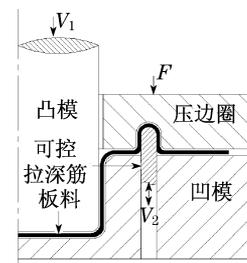


图 1 可控拉深筋拉深模具示意图

Fig.1 Die with the controllable drawbead

## 2 数值模拟

随着薄板冲压成形的计算机仿真技术日渐成熟,数值模拟技术在冲压工艺与模具设计中发挥越来越大的作用.成熟的仿真技术不仅可减少试模次数,在一定条件下还可使模具和工艺设计一次合格从而避免修模,从而大大缩短新产品开发周期,降低开发成本,提高产品品质和市场竞争力.因此,本文通过数值模拟软件 Dynaform 对基于可控拉深筋的 JAC590Y 高强度钢板拉深过程进行模拟分析.

### 2.1 有限元模型的建立

在实际生产中拉深件多为非轴对称形状,而盒形件是典型的非轴对称形的拉深件,在盒形件拉深过程中材料的变形较复杂,故以盒形件为研究对象对拉深工艺作进一步的探讨更具有实际意义.而且盒形件也

是金属薄板拉深成形中较为典型的冲压件,其变形规律具有一定的典型性,研究这类件的成形规律,不仅对这类件成形工艺参数和工艺步骤的确定是至关重要的,同时也是进一步认识复杂件成形规律的基础.为此,本文以平底盒形件为几何特征,建立可控拉深筋拉深成形有限元模型如图2所示.

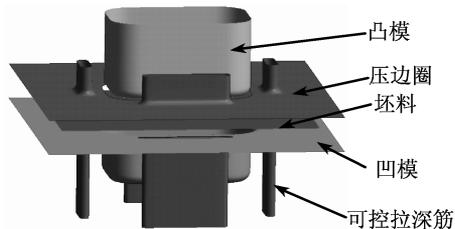


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

凹模型腔尺寸为  $100\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ ,其底部圆角和入模圆角均为  $R10\text{ mm}$ ,侧壁转角圆角为  $R30\text{ mm}$ ,凸模与凹模单边间隙为  $1.1\text{ mm}$ ,拉深筋圆角半径为  $5\text{ mm}$ ,宽度为  $10\text{ mm}$ ,短拉深筋长为  $40\text{ mm}$ ,长拉深筋长为  $90\text{ mm}$ ,端部均为球头形状,坯料尺寸为  $270\text{ mm} \times 230\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,模拟中选用高强度钢板 JAC590Y,材料性能参数来源于 Dynaform 软件中的材料数据库,即:杨氏模量  $E = 207\text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.28$ ,硬化指数  $0.204$ ,强度系数为  $1\ 033\text{ MPa}$ ,各向异性指数为  $r_0 = 0.643$ ,  $r_{45} = 1.107$ ,  $r_{90} = 0.772$ .板料单元采用BT(Belytschko-Tsay)壳单元,

网格的大小为  $2.5\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ ,分析过程中采用自适应网格细化.接触类型为单向面一面接触,凸模、凹模、可控拉深筋及压边圈视为刚性体.摩擦条件为库仑摩擦,板料与所接触刚体的摩擦系数均取经验值  $0.125$ .为消除压边力对研究结果的干扰,压边采用定间隙的方法,间隙为  $1.1\text{ mm}$ .数值模拟中采用各向异性材料屈服特性的三参数 Barlat 屈服准则,其屈服函数如下:

$$\alpha |K_1 + K_2|^m + \alpha |K_1 - K_2|^m + c |2K_2|^m = 2\sigma_y^m \quad (1)$$

式中: $\sigma_y$  为屈服应力; $K_1$  和  $K_2$  为应力张量不变量; $\alpha, c$  为各向异性常数; $m$  为应变速率<sup>[6]</sup>.

## 2.2 拉深筋运动轨迹及试验方案的设计

在板料成形过程中,拉深阻力的变化可以通过调整压边力或拉深筋得以实现,因此压边力和拉深筋阻力在对板料成形的作用是相当的,由文献[7]中可知优化的变压边力曲线为先上升再下降的规律,这是由于拉深初期需要一定的拉深阻力使材料发生变形,而在成形后期由于材料硬化加剧需要更多的板料流入凹模型腔参与成形,基于以上分析,设计了三种类型的可控拉深筋运动轨迹,如图3所示,各参数意义标示如下:拉深筋运动最高位置为  $5\text{ mm}$ , $P_i$  ( $i$  为  $1, 2, 3, 4, 5$ ) 为凸模接触板料后的运动行程; $H, H_1, H_2$  为凸模运动到某一位置时拉深筋的位置;轨迹一的  $P_3$ 、轨迹二的  $P_5$  和轨迹三的  $P_3$  均为各轨迹下的凸模下死点位置.

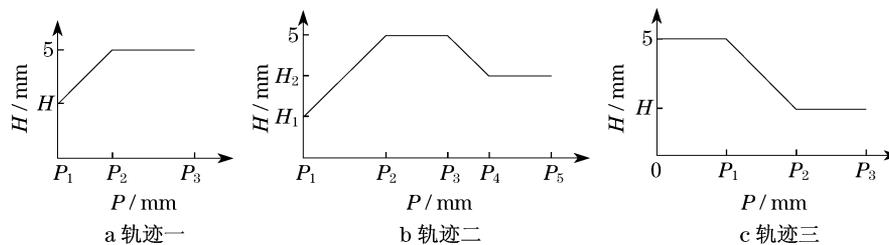


图3 三种不同类型的拉深筋运动轨迹

Fig.3 Three typical controllable drawbead trajectories

正交试验设计具有均衡分散性和整齐可比性的特点,能用较少的试验反映比较全面的情况,故运用正交试验来确定三种类型的运动轨迹试验方案.为了节省试验次数,一般应尽量选用较小的表,因此三种类型的轨迹均选择正交试验表  $L_{25}(5^6)$  确定试验组.为了确定可控拉深筋运动轨迹二和轨迹三中下降时的凸模位置,首先对  $5\text{ mm}$  固定拉深筋拉深成形过程进行了模拟,得知零件拉深深度为  $27.6\text{ mm}$  时出现了破裂,故轨迹二  $P_2$  点和轨迹三  $P_4$  点选取

破裂点前后位置,以研究拉深筋在破裂点前或后停止,哪种情况更优.不同拉深筋运动轨迹下的具体因子及其水平值见表1.

本文取零件出现危险点时的极限拉深深度作为衡量成形性能优劣的指标,危险点是指在成形极限图(forming limit diagram, FLD)上最接近破裂线而有发生破裂倾向的点,破裂线如图4所示.根据正交试验设计的方案,通过数值模拟试验来考察可控拉深筋运动轨迹对零件成形质量的影响.

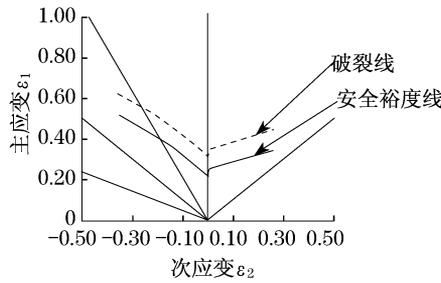


图 4 成形极限图及安全裕度线示意图

Fig.4 Forming limit diagram and safety margin line

2.3 模拟结果分析

通过模拟分析,得到各试验条件下的极限拉深深度值如图 5 所示。

模拟结果可知三种类型的拉深筋运动轨迹下的极限拉深深度均大于采用固定高度为 5 mm 拉深筋

的极限拉深深度,表明通过可控拉深筋可以改善高强度钢板盒形件的成形性能.这是因为在拉深初期,拉深筋高度较大可使材料发生大的塑性变形而产生硬化,从而提高材料抗破裂能力,后期拉深筋高度降低减少了径向拉深阻力,可使法兰区材料及向凹模型腔中补充,这样材料的极限变形能力进一步提高.从图 5 中可知,极限拉深深度由大到小的轨迹分别是:轨迹二、轨迹三和轨迹一,故高强度钢板盒形件优化的拉深筋运动轨迹类型为上升—静止—下降。

为了进一步分析在不同类型的拉深筋运动轨迹下的零件的应变状态情况,对相应类型轨迹的优化运动路径下的零件成形极限图进行了对比,这些成形极限图均为固定拉深筋下的极限拉深深度 27.6 mm 时的状态。

表 1 拉深筋各类运动轨迹因素及水平表

Tab.1 Factors and levels of different typical drawbead trajectories

水平	轨迹一 因素			轨迹二 因素			轨迹三 因素					
	H	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	H	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>
1	0	0	9	0	17	26	0	4	0	9	17	26
2	1	1	10	1	18	27	1	3	1	10	18	27
3	2	2	11	2	19	28	2	2	2	11	19	28
4	3	3	12	3	20	29	3	1	3	12	20	29
5	4	4	13	4	21	30	4	0	4	13	21	30

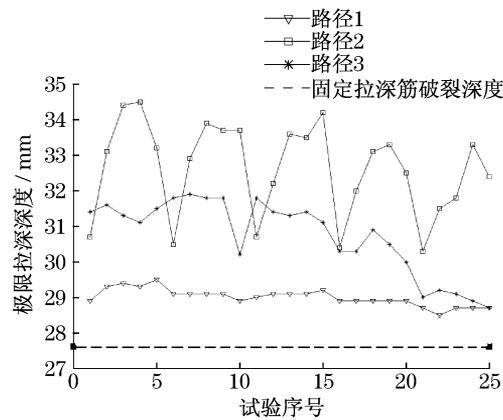


图 5 各试验条件下的极限拉深深度值

Fig.5 Maximum drawing depths of different test schemes

从图 6 所示的各拉深筋轨迹下的成形极限图可以得知,在相同的拉深深度 27.6 mm 时,固定拉深筋下零件的应变状态已经达到破裂线,继续拉深,零件将产生破裂失效.轨迹一下的零件应变状态虽然离破裂线较远,但零件已经有局部区域应变超过了安全裕度线(见图 4 所示);轨迹二和轨迹三的成形

极限图显示零件所有区域的应变均未超过安全裕度线,但轨迹二下的零件应变状态离安全裕度线更远,因此相对轨迹三来说,轨迹二优化路径下的零件有更大的成形裕度。

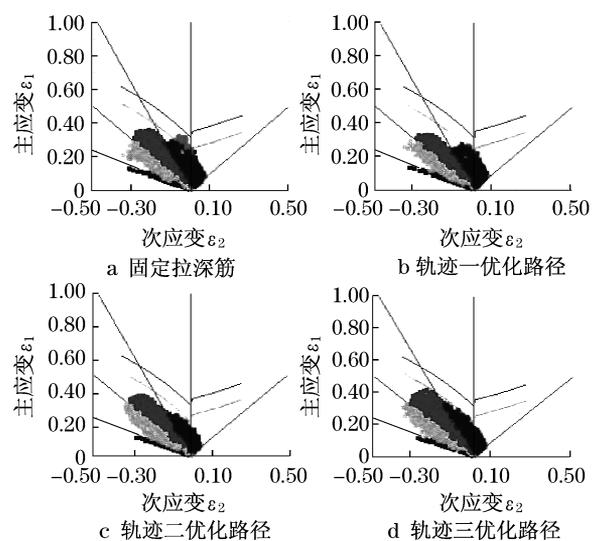


图 6 不同类型的拉深筋运动轨迹下的成形极限图

Fig.6 Forming limit diagram of different drawbead trajectories

从以上分析可以得知,轨迹二类型为优化的可控拉深筋运动轨迹类型,下面对其重点进行讨论.对极限拉深深度进行极差分析,计算出每个因子各水平下极限拉深深度的均值,均值越大,表明此因子的该水平值可得到大的极限拉深深度,为此因子的最佳水平,轨迹二下各因子各水平的极限拉深深度均值如图 7 所示,得到运动轨迹二的最佳各因子的水平组合为  $H_1(1)H_2(4)P_1(3)P_2(4)P_3(1)P_4(3)$ ,即  $H_1$  为 0 mm,  $H_2$  为 1 mm,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  分别为 2, 12, 17, 28 mm. 从  $P_4$  各水平的极限拉深深度均值可知,当凸模运动到破裂点附近的 28 mm 时,拉深筋停止,可以得到较大的拉深深度. 而拉深筋在破裂点前停止相对于在破裂点后停止,拉深深度要大.

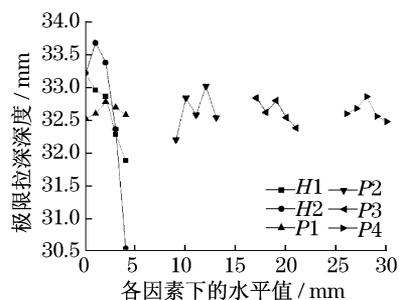


图 7 轨迹二各因子各水平的极限拉深深度均值  
Fig.7 Average drawing depths at different factors and levels in trajectory II

极差值越大,表明该因子相对于其他因子对极限拉深深度的影响程度越大,由此得到各因子对极限拉深深度的影响程度,因子极差值见表 2,可知对极限拉深深度影响最大的两个因子为  $H_1$  和  $H_2$ .

表 2 轨迹二下各因子极差值

因子	$H_1$	$H_2$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
极差值	1.322 0	3.140 6	0.259 2	0.819 6	0.460 2	0.381 2

### 3 极限拉深深度的 GA-BP 神经网络预测模型

人工神经网络是一个并行和分布式的信息处理网络结构,由许多个神经元组成,可以实现类似人脑的概括、类比和推广能力,因而可以直接从大量数据中提取规则,通过联想记忆和推广等能力来获取所需要的数据.利用人工神经网络所具有很强的多输入、多输出的非线性映射能力的特点,可以实现多变

量之间的各种非线性映射.板料拉深成形涉及几何、材料和接触三重非线性问题,目前还不能从理论上完整地建立各种工艺参数和成形结果之间的数学联系,本文基于神经网络强大的函数映射能力,建立可控拉深筋运动轨迹各因子与极限拉深深度之间的映射关系,以预测各因子对高强度钢板拉深成形性能的影响.

BP 神经网络是应用较普遍的一种人工神经网络,目前其应用实例约占神经网络应用实例的 80%<sup>[8]</sup>,成为人工神经网络的经典代表,其结构简单、工作状态稳定,突出的优点是具有很强的非线性映射能力和柔性的网络结构,但传统 BP 神经网络具有易陷入局部极小、泛化能力差等缺陷.遗传算法的发展使神经网络结构和权值的优化有了一个崭新的面貌,它的搜索能够遍及整个解空间,容易得到全局最优解.用遗传算法优化神经网络,可以使神经网络具有自进化、自适应能力,获得较好的优化网络<sup>[9]</sup>.

本文基于轨迹二下的正交试验模拟数据,运用遗传算法的神经网络结构来建立可控拉深筋运动轨迹——极限拉深深度的 GA-BP 神经网络. GA-BP 神经网络选取三层构造,输入层参数为  $H_1, H_2, P_1, P_2, P_3, P_4$ ,输出层参数为极限拉深深度,经过反复试取,隐含层节点数取 11,输入层和隐含层的传递函数选择 S 型正切函数,输出层和隐含层的传递函数选择线性函数,输入和输出数据均通过归一化处理,学习算法选择 L-M 算法<sup>[10]</sup>. 权值优化时的编码方案采用实数编码方式,初始群体个数设定为 50,种群的最大遗传代数数为 200. 遗传操作参数设置为:复制概率为 0.1,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.03,最优个体选择概率为 0.09,通过 MatlabR2007a 进行编程实现. 经过 200 次迭代,程序得到最小的误差平方和为 2.10,如图 8 所示.

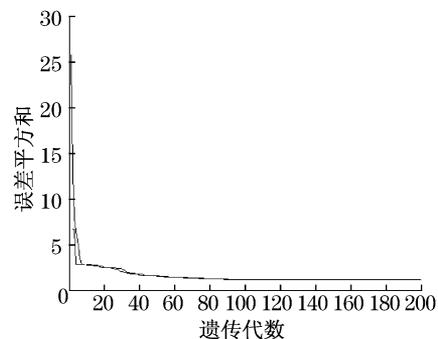


图 8 GA-BP 网络误差平方和变化曲线  
Fig.8 Curve of sum-squared error changes in the GA-BP network

将极差分析得到的各因子最佳水平组合以及在各因子水平值中随机选取的4种组合,共5组数据来检验GA-BP神经网络的精度.将这5种组合轨迹下的有限元仿真值与GA-BP神经网络的预测值相比较,得出其相对误差如表3所示.从表3可知,最大的相对误差为3.07%,反映了构建的GA-BP神经网络具有较好的预测能力,可以代替真实模型预测各因子对高强度钢板拉深性能的影响.

表3 样本数据检验

Tab.3 The test of sample data

序号	$H_1$	$H_2$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	有限元结果	预测值	相对误差/%
26	0	1	2	12	17	28	34.800	34.548	0.723
27	1	3	3	11	20	30	32.396	32.887	1.490
28	1	2	1	13	17	27	34.200	34.163	0.108
29	4	0	4	10	19	29	33.395	32.974	1.260
30	2	2	0	9	21	26	32.796	31.788	3.070

## 4 结论

(1) 可控拉深筋技术通过改变板料在拉深成形过程的应力应变状态,使材料的变形朝着有利方向发展,极大地提高了材料的变形极限,因此该技术是提高高强度钢板等低塑性、难成形材料成形性能,获得较大极限拉深深度的有效措施之一,对于该技术的进一步研究可进一步扩大高强度钢板的应用范围.

(2) 本文建立了三种类型的可控拉深筋运动轨迹,通过正交试验方案,运用有限元数值软件Dynaform模拟分析,得到了优化的拉深筋运动轨迹类型为上升—静止—下降路线,并且得到了此轨迹类型的最佳各因子水平组合.而且三种类型的可控拉深筋运动轨迹下得到的极限拉深深度均大于5 mm固定拉深筋下的极限拉深深度.

(3) 通过运动轨迹二所得的数据建立可控拉深筋运动轨迹各因子与极限拉深深度两者之间的GA-BP神经网络,可以有效地预测各因子对高强度钢板拉深性能的影响.

### 参考文献:

[1] XU Siguang. On the formability of sheet metals: part A: prediction of forming limits based on Hill's 1993 yield criterion. part B: effect of drawbeads on sheet formability[D].

Michigan: Michigan Technological University. Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, 1998.

[2] Lawrence B M. Optimization of the sheet metal stamping process: closed-loop active drawbead control combined with in-die process sensing [D]. Michigan: Michigan Technological University. Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, 1999.

[3] Emblom W J. Closed-loop control of the sheet metal stamping process with active drawbeads, a flexible blankholder and variable active blank holder forces [D]. Michigan: Michigan Technological University. Department of Mechanical Engineering-Engineering Mechanics, 2006.

[4] 中国科学技术协会. 车辆工程学科发展报告(2007~2008) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.

China Association for Science & Technology. Report on advances in automotiv engineering(2007 - 2008) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008.

[5] 金森, 郭宝锋, 李硕本, 等. 半圆形拉深筋尺寸参数对其阻力的影响[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(1): 32.

JIN Miao, GUO Baofeng, LI Shuoben, et al. The relation between circle drawbead restraining force and its dimension parameters[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(1): 32.

[6] 林忠钦, 李淑慧, 于忠奇, 等. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

LIN Zhongqin, LI Shuhui, YU Zhongqi, et al. Stamping simulation of body cover panels [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[7] 王武荣, 陈关龙, 林忠钦, 等. 板料成形中的新型可控压边力技术研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(1): 102.

WANG Wurong, CHEN Guanlong, LIN Zhongqin, et al. A new strategy for the optimization of variable blank holder force in sheet metal forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(1): 102.

[8] 何国球, 马行驰, 陈成澍, 等. 基于神经网络的受流器滑块材料载流磨损预测[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 1404.

HE Guoqiu, MA Xingchi, CHEN Chengshu, et al. Prediction on electrical sliding wear behavior of collector shoe material based on neural network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(10): 1404.

[9] 潘江峰, 钟约先, 袁朝龙. 基于多目标遗传算法的板料拉深成形工艺参数优化设计[J]. 中国机械工程, 2006(S1): 74.

PAN Jiangfeng, ZHONG Yuexian, YUAN Chaolong. Process parameters optimization of sheet metal forming in drawing process based on multi-objective genetic algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2006(S1): 74.

[10] 仲高艳, 康敏. 基于神经网络的数控超声加工效果建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1620.

ZHONG Gaoyan, KANG Min. Modeling and simulation for effect in numerical controlled ultrasonic machining based on artificial neural network [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1620.