

文章编号:1000-582X(2010)06-042-07

# 可控拉深筋高强度钢板盒形件拉深工艺数值仿真

周 杰<sup>a</sup>, 华俊杰<sup>a</sup>, 阳德森<sup>a</sup>, 庄燕燕<sup>b</sup>, 易宗华<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院, 重庆 400044; b. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘 要:**拉深筋高度变化对板料成形时的拉深阻力影响显著,而高强度钢板又是当今难成形板料之一,为此提出可控拉深筋技术以提高高强度钢板成形性能。建立 JAC590Y 高强度钢板固定拉深筋盒形件拉深成形数值模拟模型及实验装置,通过模拟和实验结果对比分析,得到不同拉深筋高度对高强度钢板成形性能影响显著。依据板料拉深过程中拉深力变化规律设计上升——停止——下降的可控拉深筋运动路径,将此路径应用到类似盒形件的高强度钢板汽车引擎盖边板拉深成形中,获得成形良好的 20 组方案且可控拉深筋对零件最小厚度影响显著。最终对这 20 组零件最小厚度均值进行极差分析,得到可控拉深筋最优路径组合及主要影响因子  $H_2$ ,通过 GA-BP 神经网络及回归分析预测因子  $H_2$  影响下零件最小厚度变化规律。

**关键词:**可控拉深筋;高强度钢板;数值模拟;盒形件;拉深成形;GA-BP 神经网络;回归分析

**中图分类号:** TG386.3i

**文献标志码:** A

## Deep drawing simulation for high-strength steel box of controllable drawbead

ZHOU Jie<sup>a</sup>, HUA Jun-jie<sup>a</sup>, YANG De-sen<sup>a</sup>, ZHUANG Yan-yan<sup>b</sup>, YI Zong-hua<sup>a</sup>

(a. College of Material Science and Engineering; b. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** As blank drawing resistance in sheet metal forming process can be significantly influenced by the changes of drawbead height, and high-strength steel (HSS) is one of the materials difficult to be formed, so a controllable drawbead technology is proposed to improve the formability of HSS. A numerical simulation model and an experimental device of JAC590Y-HSS box deep drawing with fixed drawbead are established. Comparative analysis of simulation and experimental results show that the difference of fixed height drawbeads has a significant effect on the formability of HSS. A controllable drawbead moving path of ascent-halt-descent is designed based on the variations of deep drawing force in the sheet metal forming process. Then the path is applied to the formation of an automobile engine tunnel-side panel which is similar to the box deep drawing. Twenty group test schemes of good formation are obtained, in which the part smallest thickness is significantly influenced by controllable drawbead. Moreover, in the twenty group test schemes, the optimized combination of moving path and main influence factor  $H_2$  are found by range analysis of part average smallest thickness. Finally, the correlation between part smallest thickness and factor  $H_2$  is predicted by using GA-BP neural network and regression analysis.

收稿日期:2009-12-24

基金项目:科技部技术创新资助项目(07C26215110824);重庆大学创新基金重点资助项目(200811B1B0130302)

作者简介:周杰(1965-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为精密塑性成形、材料成形过程数值模拟仿真与优化算法,(Tel)023-65111493;(E-mail)cqhuajunjie@163.com.

**Key words:** controllable drawbead; high-strength steel; numerical simulation; box; drawing; GA-BP network; regression analysis

板料成形是一种十分重要的金属塑性加工方法,它广泛应用于汽车、航空、航天等领域。汽车工业在国民经济中占有重要地位,它是衡量一个国家工业水平的重要标志。近年来世界汽车工业面临三大问题:能源、公害和安全,这使得高强度钢板代替普通钢板成为必然趋势。高强度钢板可以减轻汽车重量并增加其安全性,但由于其自身材料特性,存在的最大问题是成形性能差和回弹。当今国内外大多数学者主要采用变压边力、优化固定拉深筋的分布及形状、热成形和液压成形来控制高强度钢板成形质量。笔者提出一种新的成形工艺方法——可控拉深筋技术,以提高高强度钢板成形性能。目前仅美国密西根科技大学的 Xu Siguang、Bohn Michael Lawrence 和 William J. Emblom 等人通过实验和数值模拟相结合将可控拉深筋技术应用于铝板 6111-T4 成形<sup>[1-3]</sup>。为可控拉深筋技术提供了必要的理论基础和应用指导。

在板料拉深过程中当过大的压边力还不至于提供零件成形所需的拉深阻力时,就必须设置拉深筋来提供较大的阻力,而不同拉深筋高度对拉深阻力的影响显著<sup>[4-6]</sup>。拉深筋是板料拉深成形过程中必不可少的一个重要工艺参数,特别在汽车覆盖件拉深成形中尤为重要。由于车身轻量化的要求,高强度钢板被要求大量使用,而这些材料的成形性能较差,为此提高高强度钢板成形性能已成为模具制造中一个新的挑战<sup>[7-8]</sup>。笔者首先建立高强度钢板固定拉深筋盒形件拉深实验装置,获得不同固定拉深筋高度对零件成形性能的影响。然后依据板料拉深过程中拉深力变化规律设计可控拉深筋运动路径,并将此可控拉深筋路径应用于类似盒形件的高强度钢板覆盖件拉深成形模拟中,以提高高强度钢板成形性能。最终实现可控拉深筋技术广泛应用于汽车覆盖件成形。

## 1 不同固定拉深筋高度对高强度钢板成形性能的影响

### 1.1 固定拉深筋高强度钢板盒形件有限元模型

采用数值模拟软件 Dynaform 建立 JAC590Y 高强度钢板固定拉深筋平底盒形件拉深成形有限元模型,如图 1 所示。凸模尺寸为 147.8 mm × 97.8 mm,凸模圆角半径为 8.9 mm,凹模尺寸为 150 mm × 100 mm × 55 mm,其底部和入模圆角半

径均为 10 mm,侧壁圆角半径为 30 mm;拉深筋形状为半圆形直球头,圆角半径为 5 mm,短边拉深筋长为 40 mm,长边拉深筋长为 90 mm,坯料尺寸为 270 mm × 230 mm × 1 mm。材料主要参数如下:杨氏模量为 207 GPa,泊松比为 0.28,硬化指数为 0.204,强度系数为 1 033 MPa,各向异性指数  $r_0 = 0.643, r_{45} = 1.107, r_{90} = 0.772$ 。材料应力应变关系为:  $\bar{\sigma} = 1\,033(0.007\,6 + \bar{\epsilon})^{0.204}$ 。板料单元采用 BT 壳单元,接触类型为单向面——面接触,凸模、凹模、固定拉深筋及压边圈均视为刚性体。摩擦条件为库仑摩擦,板料与所接触刚体的摩擦系数均取值 0.125。压边采用定间隙的方法,间隙为 1.1 mm。应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

$$a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\sigma_y^m$$

式中:  $\sigma_y$  为屈服应力,  $K_{i=1,2}$  为应力张量不变量,  $a, c$  为各向异性常数,  $m$  为应变速率<sup>[9]</sup>。

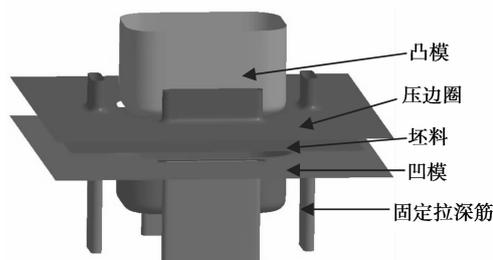


图 1 固定拉深筋盒形件有限元模型

### 1.2 模拟及实验结果

模拟设置与实验过程一样,分别获得不同固定拉深筋高度在 1、2、3、4 和 5 mm 时盒形件的极限拉深深度,最终得到模拟与实验条件下零件极限拉深深度,如表 1、2 所示。从表中可以看出,模拟和实验数据很接近,最大相差不超过 3.1%,表明盒形件有限元模型的准确性,所建立的数值模拟模型可以代替物理实验。其中实验比模拟值略小,主要是由于实验装置的系统误差、板料性能的差异和测量等原因引起的,但变化趋势是一致的。实验和模拟结果表明不同拉深筋高度对高强度钢板成形影响显著,拉深筋高度越高,产生的阻力越大,零件的成形性越差,因此选择适合高度的拉深筋对高强度钢板成形尤为重要。实验装置及实验冲压零件如图 2 所示,在实验中通过调整垫块来调整拉深筋高度,从实验

中选取了拉深筋高度为 3 mm 时的实验冲压零件。

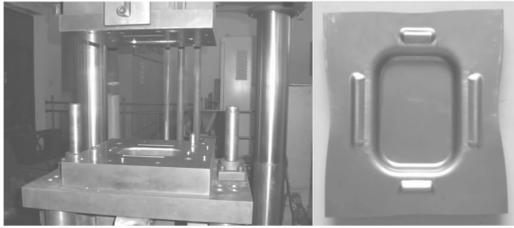


图 2 固定拉深筋盒形件实验装置及实验冲压零件

表 1 不同固定拉深筋下盒形件极限拉深深度模拟结果

固定拉深筋高度 /mm	固定拉深筋种类					
	1	2	3	4	5	6
1	35.399	39.503	36.398	39.8	36.398	39.4
2	34.799	38.595	35.296	39.595	35.096	38.498
3	33.811	38.196	33.098	39.001	33.601	37.899
4	31.198	36.101	29.497	36.101	31.198	36.495
5	27.601	32.899	25.398	32.699	27.898	32.996

表 2 不同固定拉深筋下盒形件极限拉深深度实验结果

固定拉深筋高度/mm	固定拉深筋种类					
	1	2	3	4	5	6
1	35.26	38.6	35.3	38.9	36.3	39.1
2	33.9	38.5	34.2	38.6	34.8	38.2
3	33.9	37.3	33.1	39.1	33.5	38.1
4	30.5	36.1	29.6	36.2	31.2	36.4
5	26.8	32.7	25.3	32.6	27.9	33

其中固定拉深筋种类 1-6 分别代表半圆形直球头拉深筋、半圆形斜球头拉深筋、矩形直球头拉深筋、矩形斜球头拉深筋、梯形直球头拉深筋和梯形斜球头拉深筋。

## 2 可控拉深筋技术

### 2.1 可控拉深筋技术原理

由于拉深筋高度对板料成形的影响显著,为此提出可控拉深筋技术。可控拉深筋拉深成形是在原有的普通拉深成形基础上,辅以可以独立控制的拉深筋高度代替传统固定拉深筋,实现了控制法兰区

板料向凹模型腔流动的速度,进而改变其径向拉深阻力。其成形原理如图 3 所示。

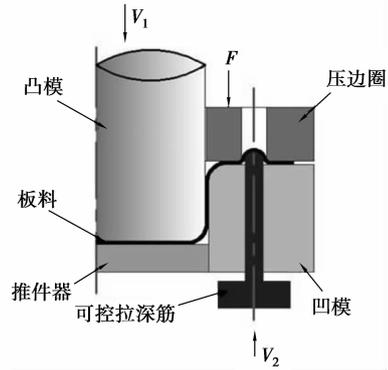


图 3 可控拉深筋拉深成形示意图

### 2.2 拉深筋运动路径设计

拉深过程中拉深力主要包括法兰部分材料的拉深变形阻力,凹模圆角处的弯曲反弯曲阻力,以及法兰部分、凹模圆角处的摩擦力。其中只有法兰部分的拉深变形阻力是随着行程的改变而变化,它是由于冷作硬化作用而增大的。在成形初期,法兰的变形不大,冷作硬化小,此时虽然法兰面积大,但拉深力并不大。从初期到中期,材料冷作硬化的增长速度超过法兰面积减少速度,拉深力就增大起来。如果过了中期继续进行变形,法兰面积减少的速度超过了冷作硬化增加的速度,于是拉深力有下降的趋势<sup>[10]</sup>。

由于在零件拉深过程中不同阶段的拉深力是在不断变化的,因此相应法兰区的板料阻力也要相应变化。通过可控拉深筋来实时调节拉深筋高度以改变板料拉深阻力,显然不同拉深筋运动路径会对零件成形时拉深力起着重要的影响。由于在成形过程中拉深力是由小变大又逐渐变小的过程,拉深筋提供的阻力应与之相适应,本文后续研究可控拉深筋路径设置为上升——停止——下降形式,如图 4 所示。

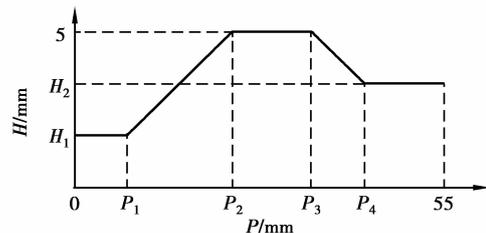


图 4 可控拉深筋运动路径

### 3 可控拉深筋高强度钢板覆盖件拉深成形

对汽车覆盖件来讲,数值模拟技术是评价其设计最为有效的分析工具。覆盖件的成形质量,关键在于拉深工序的工艺性设计。当前,数值模拟试验方法已经成为塑性成形领域中一种非常重要的技术手段<sup>[11-12]</sup>。为了研究可控拉深筋对高强度钢板汽车覆盖件成形的影响,以引擎盖边板为研究对象,其轮廓形状类似于盒形件,将图 4 设计的拉深筋运动路径应用到此零件的拉深成形中。

#### 3.1 引擎盖有限元模型

材料同样选择 JAC590Y 高强度钢板,拉深筋圆角半径为 5 mm,坯料尺寸为 845 mm×635 mm×1.32 mm。考虑到该零件的对称性,为了节省计算时间,在定义好对称面后只对其一半进行模拟分析。此模型的边界条件与 1.1 相同,引擎盖边板有限元模型如图 5 所示,零件最大深度为 70 mm。



图 5 引擎盖边板有限元模型

#### 3.2 模拟试验方案设计

汽车覆盖件由于其结构复杂、变形复杂,其成形规律难以定量把握,以目前技术水平还不能对多次拉深工艺参数的确定。而且多次拉深形成的冲击线、弯曲痕迹线也会影响油漆后的表面质量,这对覆盖件是不允许的,因此汽车覆盖件的成形都是采用一次拉深成形的方法<sup>[13]</sup>。

图 6 为引擎盖边板成形模拟结果,图中红色代表破裂区,紫红色和浅紫红色代表起皱区域,绿色代表充分塑性变形区域即安全区,浅灰色代变形不充分区域。图 6(a)是没有使用拉深筋的成形零件,从图可知零件在法兰及侧壁起皱很严重,且整个零件变形很不充分,特别在零件侧壁部位,说明不设置拉深筋使得零件出现了大量起皱且变形不充分,这同时也会影响零件的质量及引起成形后出现较大的回弹。图 6(b)是使用固定 5 mm 拉深筋的成形零件,从图中可知零件在成形深度为 65.2 mm 时发生破裂,零件还没成形到所要求的最大拉深深度(70 mm)。所以在原工艺参数不改变的前提下,传统工艺不能解决高强度钢板难成形的问题,转而只

能采用成形性能更好的普通低碳钢板代替其成形,但在引入可控拉深筋技术之后便有了新的解决方案。

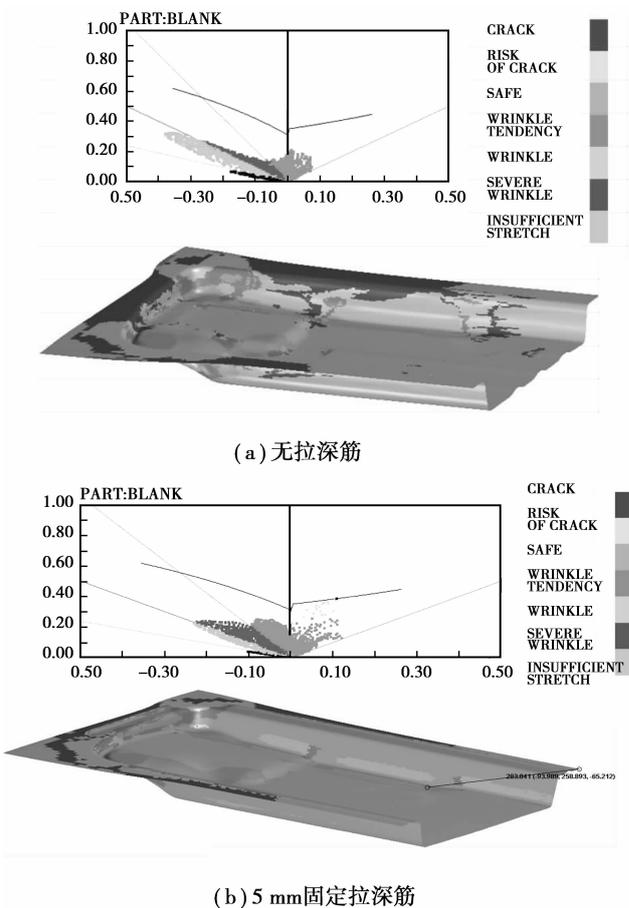


图 6 引擎盖边板模拟结果

该汽车引擎盖边板可控拉深筋运动路径设置为上升——停止——下降,选择正交试验表  $L_{25}(5^6)$ <sup>[14]</sup>,因子及水平取值如表 3 所示。其中  $P$  表示凸模从接触板料开始运动后的位移, $H$  表示凸模运动到某一位置时拉深筋运动的位置,各路径下拉深筋运动最高位置均为 5 mm。

表 3 因子及水平值

水平	因子					
	$H_1$	$H_2$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
1	0	4	0	21	41	61
2	1	3	2	23	43	63
3	2	2	4	25	45	65
4	3	1	6	27	47	67
5	4	0	8	29	49	69

### 3.3 模拟结果分析

图 7 为各试验组下的模拟结果,从图中模拟结果表明:第 1、6、11、16、21 组试验方案下极限拉深深度均没有拉深到零件最大深度,其它 20 组试验方案下的拉深深度都达到了零件成形深度。没有拉深到零件深度的这些试验组都是因子  $H_2$  在水平 1 下的取值,表明此时可控拉深筋路径对零件的成形性能提高不明显。所以将因子  $H_2$  在水平 1 下的 5 组试验组去除,以分析其它 20 组可控拉深筋运动路径方案对该零件成形性能的影响。

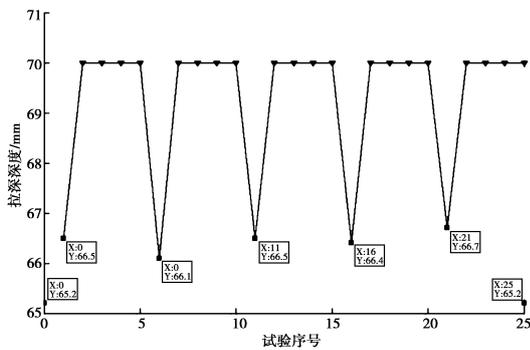


图 7 各试验组下的模拟结果

#### 3.3.1 零件厚度分布规律

板料在成形过程中,各部分的流动速度不一致,有些材料流动快,有些材料流动很慢甚至不流动,从而造成材料在有些部分发生不同程度的变薄和增厚。变薄会造成零件的强度不够,甚至破裂。增厚会影响零件的外观,浪费材料。因此现将所筛选 20 组方案下最终成形零件的壁厚分布规律来评价其成形质量,如图 8 所示。

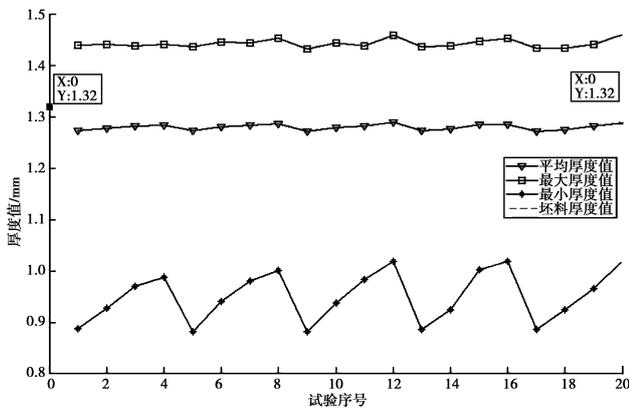


图 8 各试验组下的厚度分布规律

在成形过程中参数在其波动范围内可能使零件质量出现各种缺陷,所以通过充分的塑性变形使零

件获得壁厚均匀是很关键的。图 8 表明了零件平均厚度值、最大厚度值、最小厚度值的变化趋势是一致的;其中最小厚度值的变化幅度最为明显,即可控拉深筋对零件危险部位厚度影响很明显,选取不同的参数组合会使零件得到不同的成形性能。图 9 为试验组 1 和 4 的模拟结果,同时成形零件显示 52 000 多个有限元单元节点厚度值的变化规律,试验组 1 下单元节点的最小厚度值在 0.9 mm 以上波动,而试验组 4 下单元节点的最小厚度值在 1 mm 以上波动,最大厚度值都控制在 1.45 mm 附近。从而表明了试验组 4 获得的零件减薄率小于试验组 1 获得的零件减薄率,试验组 4 获得的零件出现破裂可能性更小,获得产品的合格率越大。

#### 3.3.2 可控拉深筋各因子对零件成形性能的影响

通过以上零件的厚度分布规律表明不同的拉深筋运动路径组合方案对零件的成形性能有很大的影响。以下通过图 8 中可控拉深筋各因子不同水平下最小厚度均值进行极差分析,来判断各因子的影响程度,见表 4。

表 4 因子各水平下最小厚度均值及极差值

水平	因子					
	$H_1$	$H_2$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
1	0.943		0.949	0.951	0.953	0.961
2	0.951	0.884	0.959	0.948	0.953	0.957
3	0.955	0.931	0.948	0.954	0.953	0.953
4	0.958	0.981	0.953	0.949	0.953	0.946
5	0.949	1.010	0.948	0.954	0.949	0.940
极差值	0.015	0.126	0.011	0.006	0.004	0.021

由表 4 各因子对应最小厚度均值的极差值可以得出,因子  $H_2$  最小厚度的极差值最大、变化趋势最为明显、变化幅度最大,表明因子  $H_2$  相对于其它因子提高零件的成形性能作用显著,零件最小厚度随  $H_2$  的增大而减小。此汽车引擎盖边板可控拉深筋拉深成形的最优化运动路径水平组合为  $H_1(4)H_2(5)P_1(2)P_2(5)P_3(3)P_4(1)$ ,即  $H_1$  为 3 mm、 $H_2$  为 0 mm、 $P_1$  为 2 mm、 $P_2$  为 29 mm、 $P_3$  为 45 mm、 $P_4$  为 61 mm。

#### 3.3.3 GA-BP 神经网络构造可控拉深筋因子 $H_2$

##### 对零件成形的影响规律

BP 神经网络是在感知机基础上发展起来的,其每一层连接权值都可以通过学习来调节。传统 BP 神经网络易陷入局部极小点、收敛速度慢、泛化能力

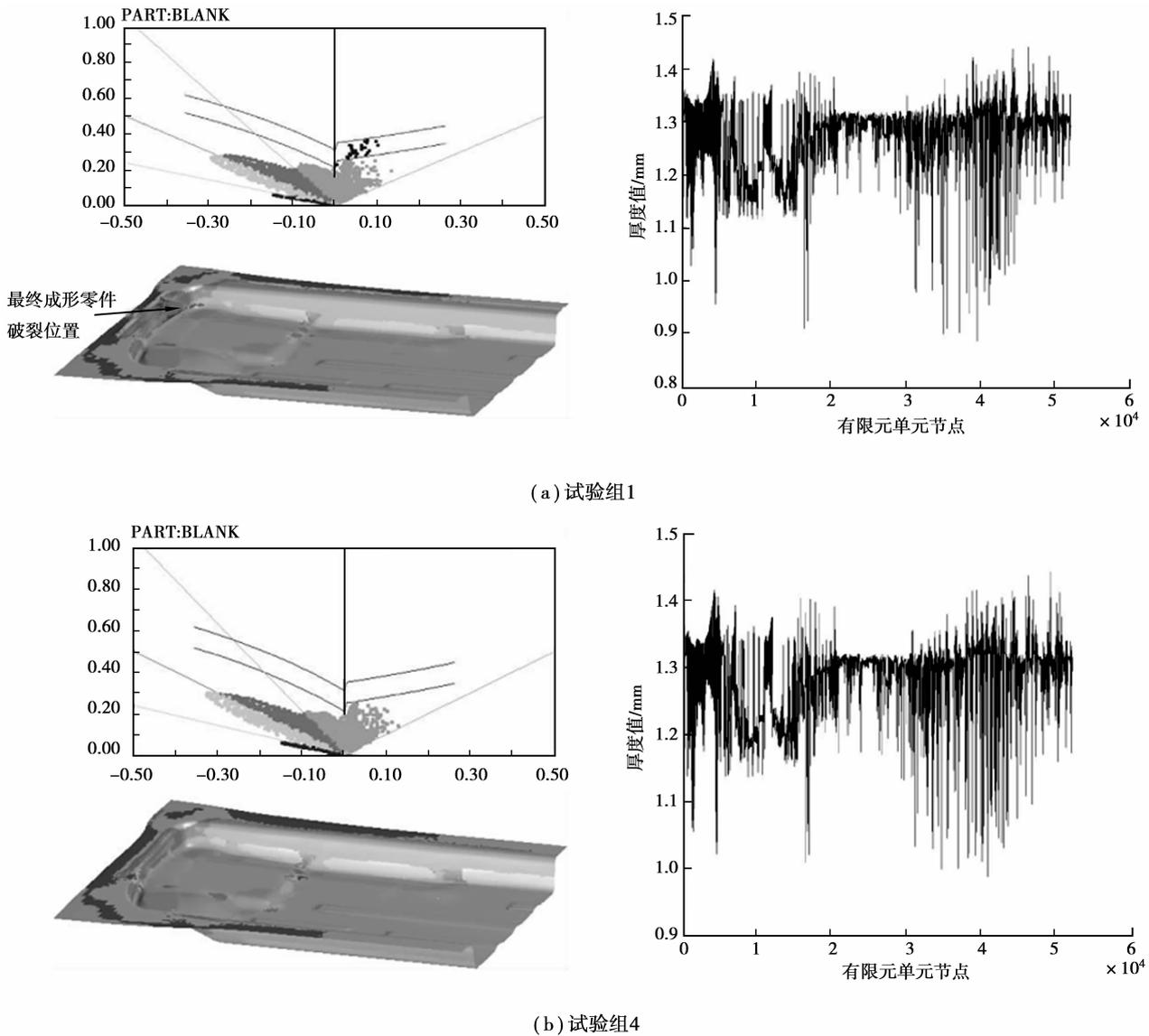


图 9 零件最终数值模拟成形结果

差等。遗传算法的发展使神经网络结构和权值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>[15-16]</sup>。通过极差分析得到可控拉深筋因子  $H_2$  对该零件的成形影响最为显著,下面采用基于遗传算法的多层前馈神经网络结构和权值同时进化的方法来构建因子  $H_2$  对零件成形影响规律的响应模型,即 GA-BP 神经网络。

GA-BP 神经网络选取 3 层构造,网络输入数据为样本数据为表 1 构造正交表去除第 1、6、11、16、21 组外共 20 组中的各因子水平值,隐含层选择 11 个节点,输出数据为对应各组的最小厚度值。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。权值优化时的编码方案采用实数编码方式,初始群体设定为 50 个个体,种群的最大遗传代数为 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。如图 10 所示经过 200 次迭代,程序得到最小的误差平方和值 3.133,表明该网络与模拟结果数据具有很强的吻合性。

将已建立的 GA-BP 神经网络来对因子  $H_2$  进行预测分析,其它因子取值为最优拉深筋路径水平组合确定的值,因子  $H_2$  选择在区间  $[0, 3]$  每隔 0.01 mm 取值,预测因子  $H_2$  下成形零件最小厚度

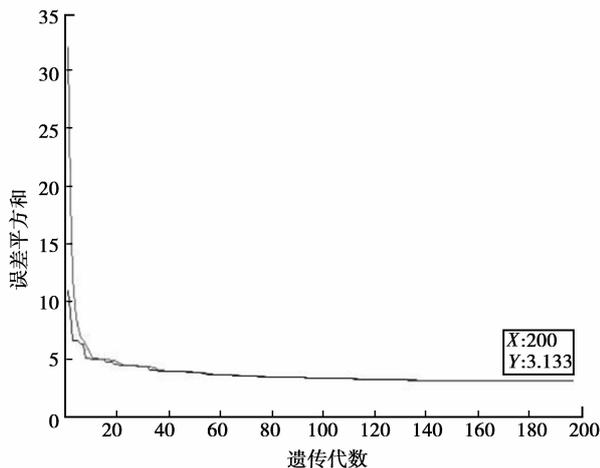


图 10 GA-BP 网络训练过程误差平方和变化曲线

值变化规律,如图 11 所示。

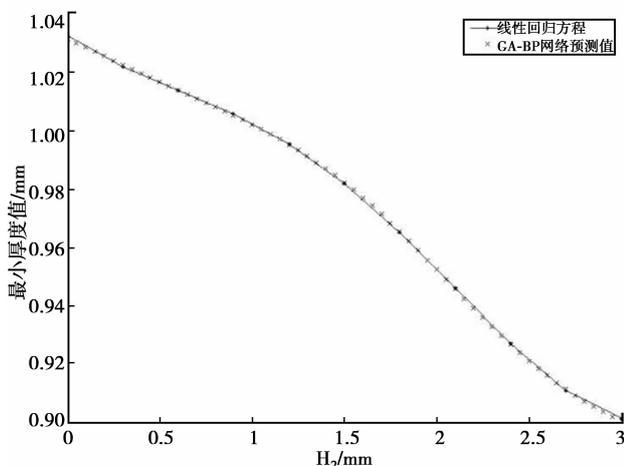


图 11 因子  $H_2$  对零件最小壁厚变化规律

从图 11 可以看出,零件最小壁厚值变化规律和极差分析结果一致,对这些数据点进行回归分析,得到回归方程为: $Y=0.005X^4-0.027X^3+0.036X^2-0.044X+1.032$ ,其中  $X$  为  $H_2$  的取值, $Y$  为最小厚度值, $R$  为 0.999 9。该回归方程和数据点具有很强的吻合性,此方程从数量关系上表示了  $H_2$  对零件最小厚度值的影响规律。

## 4 结 论

1)建立了固定拉深筋高强度钢板盒形件有限元模型,通过模拟和实验结果对比分析得出,不同固定拉深筋高度对高强度钢板成形影响显著,并验证了有限元模型的准确性。

2)提出了可控拉深筋运动原理模型,设计了上升—停止—下降的可控拉深筋运动路径。然后将可

控拉深筋技术应用到类似盒形件的高强度钢板引擎盖边板拉深成形中,确定成形到零件最大拉深深度的 20 组试验方案。分析了这 20 组方案下成形零件厚度分布规律,得到最小厚度变化波动明显。对最小厚度均值进行极差分析后得到拉深筋运动路径最优组合及主要影响因子  $H_2$ 。构造 GA-BP 神经网络并预测分析后得到因子  $H_2$  对零件最小壁厚值的影响规律。

3)通过研究表明可控拉深筋技术对高强度钢板成形,特别对汽车覆盖件成形优势很突出,以拉深筋实时控制来提高零件的成形性能。当今电气控制技术已非常成熟,所以将可控拉深筋应用到实际生产领域已成为很大的可能。

## 参考文献:

- [1] XU S. 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, 1998.
- [2] BOHN M L. Optimization of the sheet metal stamping process: Closed-loop active drawbead control combined with in-die process sensing [D]. Michigan: Michigan Technological University, 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, 2006.
- [4] MOHAMEDS N, MOHAMED IM. Numerical design optimisation of drawbead position and experimental validation of cup drawing process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206 (1/3): 83-91.
- [5] 李金燕,傅建,彭必友,等.基于数值模拟的等效拉延筋设计与优化[J].塑性工程学报,2007,14(5):14-22.  
LI JIN-YAN, FU JIAN, PENG BI-YOU, et al. Design and optimization of the equivalent drawbead based on numerical simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(5):14-22.
- [6] 易国锋,柳玉起,李明林,等.基于有限元逆算法的板料成形模拟拉深筋的灵敏度优化[J].中国机械工程,2007,18(1):87-90.  
YI GUO-FENG, LIU YU-QI, LI MINGLIN, et al. Optimization of drawbead restraining forces in sheet metal forming process by sensitivity analysis method based on inverse approach of FE [J]. Journal of China Mechanical Engineering, 2007, 18(1):87-90.

(下转第 66 页)

- [8] WU J R, LI Q S. Structural parameter identification and damage detection for a steel structure using a two-stage finite element model updating method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62:231-239.
- [9] WU Z, YU S S, ZHOU J L. An approach to image noise reduction based on multi-wavelet transform and multi-level threshold[J]. Engineering and Application of Computer, 2004, 13:14-15.
- [10] 陆冬, 汤宝平, 何启源, 等. 模态参数识别中频响函数估计的最小二乘优化[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3):6-10.  
LU DONG, TANG BAO-PING, HE QI-YUAN, et al. Least-square-based optimization of frequency response function estimation in modal parameters identification [J]. Journal of chongqing university: Natural science edition, 2007, 30(3):6-10.
- [11] 王卫华, 杨转运, 刘会. 利用 LSCE 方法识别桥梁气动导数研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(1):85-88.  
WANG WEI-HUA, YANG ZHUAN-YUN, LIU HUI. Identification of aerodynamic derivatives for bridge sections by LSCE method [J]. Journal of experiments in fluid mechanics, 2009, 23(1):85-88.
- [12] 罗光坤, 张令弥. 基于 Morlet 小波变换的模态参数识别研究[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7):135-138.  
LUO GUANG-KUN, ZHANG LING-MI. Study on identification of modal parameters based on morlet wavelet transformation [J]. Journal of vibration and shock, 2007, 26(7):135-138.
- [13] SONG H Z, ZHONG L, HAN B. Structural damage detection by integrating independent component and support vector machine [J]. International Journal of Systems Science, 2006, 37(13):961-967.
- [14] 李富才, 何正嘉, 陈进. 小波域相关滤波法及其早期故障预示应用[J]. 振动工程学报, 2005, 18(2):145-148.  
LI FU-CAI, HE ZHENG-JIA, CHEN JIN. Wavelet transform domain correlation filter and its application in incipient fault prognosis [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(2):145-148.
- [15] 潘泉, 张磊, 孟晋丽, 等. 小波滤波方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [16] 孙鑫晖, 张令弥, 王彤. 基于左矩阵分式模型的短记录数据模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12):15-18.  
SUN XIN-HUI, ZHANG LING-MI, WANG TONG. Modal parameters identification of short data sequence based on left matrix fraction description[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12):15-18.

(编辑 陈移峰)

(上接第 48 页)

- [7] NARAYANASAMY R, PARTHASARATHI N L, SATHIYA N C, et al. A study on fracture behaviour of three different high strength low alloy steel sheets during formation with different strain ratios [J]. Materials and Design, 2008, 29(9):1868-1885.
- [8] TAKAHASHI M, UENISHI A, YOSHIDA H, et al. Advanced high strength steels for automobile body structures[J]. Materials Science Forum, 2007, 539/543(5):4386-4390.
- [9] 林忠钦. 车身覆盖件冲压成形仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 中川威雄(日), 阿部邦雄(日). 板料冲压加工[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1982.
- [11] SUI F, MORON P, ICHCHOU M, et al. Dynamic analysis of an automobile floorpan using a hybrid approach of the finite element method and statistical energy analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, 222(D12):2435-2445.
- [12] 赵立红, 江树勇, 郑玉峰, 等. 柱面扁壳类覆盖件刚度的数值模拟研究[J]. 材料科学与工艺, 2009, 17(2):227-231.  
ZHAO LI-HONG, JIANG SHU-YONG, ZHENG YU-FENG, et al. FEM numerical analysis on panel stiffness of cylindrical shallow shell of automotive body[J]. Journal of Material Science and Technology, 2009, 17(2):227-231.
- [13] 崔令江. 汽车覆盖件冲压成形技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [14] 洪伟, 吴承祯. 试验设计与分析: 原理·操作·案例[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [15] LI S, CHEN H B, YUN J X, et al. Optimization for cyclosporine blood concentration prediction based on genetic algorithm-BP neural network [C]// 2nd International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, September 1-2, 2008, Jingzhou, Hubei, China. Yangtze University, Jingzhou, China: [s. n.], 2008:161-165.
- [16] HUANG Y S, LIN Y F, QIU Z L. Freight prediction model based on GABP neural network[C]// Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design, October 17-18, 2008, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE, 2008:229-232.

(编辑 张小强)