

## 基于 Dynaform 灰斗车拉深成形响应面优化分析

刘尚保<sup>1</sup>, 龚红英<sup>1</sup>, 尤 晋<sup>1</sup>, 施为钟<sup>1</sup>, 廖泽亮<sup>2</sup>, 廖泽寰<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620; 2. 上海东芙冷锻制造股份有限公司, 上海 201100)

**摘要:** 针对灰斗车拉深成形过程中产生的缺陷问题, 基于图像方法对试样进行单向拉伸试验, 获得材料真实力学性能参数。借助 Dynaform 软件对成形过程进行数值模拟, 以冲压速度  $v$ 、压边力  $F$  和摩擦因数  $C$  作为影响板料成形质量的因素, 以最大减薄率  $y_1$  和最大增厚率  $y_2$  作为优化目标, 采用 Box-Behnken (BBD) 设计响应面试验, 建立工艺参数与  $y_1$ 、 $y_2$  之间的二次多项式响应目标函数, 得到影响灰斗车拉深成形质量的最优工艺参数组合。最后, 通过数值模拟及实际生产进行验证, 试验结果表明, 该方案有效提高了灰斗车零件的成形质量, 消除了灰斗车成形缺陷, 为此类拉深件的缺陷优化提供了有效参考。

**关键词:** 灰斗车; 拉深成形; 响应面; 冲压速度; 压边力; 摩擦因数

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.012

**中图分类号:** TG386

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 07-0086-09

## Response surface optimization analysis on gray hopper deep drawing based on Dynaform

Liu Shangbao<sup>1</sup>, Gong Hongying<sup>1</sup>, You Jin<sup>1</sup>, Shi Weizhong<sup>1</sup>, Liao Zeliang<sup>2</sup>, Liao Zehuan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Dongfu Cold-forging Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

**Abstract:** For the defect problem in deep drawing process of gray hopper, the unidirectional tensile experiment of specimens was carried out based on image method, and the real mechanical property parameters of material were obtained. Then, the forming process was numerically simulated by software Dynaform. Furthermore, taking stamping speed  $V$ , blank holding force  $F$  and friction factor  $C$  as the factors affecting the forming quality of sheet metal, and taking the maximum thinning rate  $y_1$  and the maximum thickening rate  $y_2$  as the optimization objectives, the response surface method (RSM) experiment was designed by Box-Behnken (BBD), and the quadratic polynomial response objective function between process parameters and  $y_1$  and  $y_2$  was established to obtain the optimal process parameter combination that affected the forming quality of the gray hopper. Finally, the experimental results show that the scheme can effectively improve the forming quality of the gray hopper, eliminate the forming defects of the gray hopper, and provide an effective reference on the defect optimization for this kind of deep drawing parts which was verified by the numerical simulation and actual production.

**Key words:** gray hopper; deep drawing; response surface; stamping speed; blank holder force; friction factor

灰斗车具有大型轴对称特征, 通常在建筑工地、厂房等场所用于运输和装卸物料, 其在拉深成形中容易产生开裂、局部起皱、叠料等缺陷。对于冲压成形缺陷的研究, 么大锁<sup>[1]</sup>以某汽车引擎盖外板为研究对象, 采用正交试验法和极差分析法, 研究工艺参数对外板零件成形质量的影响,

得到最优的成形工艺方案, 试验与仿真结果一致, 零件主体成形良好, 证明了试验方案的可靠性。Feng Y 等<sup>[2]</sup>提出了一种新的多目标变压边力优化方法, 采用多目标人工蜂群算法从 VBHF-Kriging 模型中得到 VBHF-Pareto 最优集, 减少了拉深过程中产生的开裂、起皱及回弹问题。Chen D Y 等<sup>[3]</sup>通过 Dynaform 有限元分析研究了一种混合式板料内高压成形工艺, 以制造具有不对称型腔深度及主要侧向胀形特性的新型大容量油底壳, 通过对工艺参数进行优化, 认为该复合板液压成形工艺可以生产出无缺陷的优质发动机油底壳。王排岗等<sup>[4]</sup>以正交试验数据为基础, 基于灰色关联分析方法, 将多目标优化问题转化为单目标灰色关联

收稿日期: 2021-06-22; 修订日期: 2021-09-13

基金项目: 汽车蓄能器壳体零件冷温段复合成形技术开发 ((12) CL-003)

作者简介: 刘尚保 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2276862275@qq.com

通信作者: 龚红英 (1974-), 女, 博士, 教授

E-mail: ghyw1974@163.com

度优化问题。最终获得超声滚挤压最优加工工艺参数。Zafar R 等<sup>[5]</sup>针对成形较小的纤维-金属压板零件,采用液压机械拉深对多个毛坯进行研究,讨论了腔压和压边力等工艺变量对褶皱形成、变薄、边缘移动和成形性的影响。

本文通过分析材料的力学特性,采用数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 方法结合单向拉伸试验,通过 VIC-3D 采集图像软件,测试位移场及应变场,采用虚拟引伸计代替传统机械引伸计获得应变值,再处理数据获得真实应力-真实应变曲线及材料参数,将获得的相关材料参数导入有限元模型进行分析。为了解决零件成形缺陷问题,通过响应面法 (Response Surface Mothed, RSM) 设计 Box-Benhknen (BBD) 试验,建立工艺参数与最大减薄率、最大增厚率之间的二次响应函数,通过分析得到最优的工艺

参数,用于指导优化灰斗车拉深件的生产。

## 1 成形工艺分析

灰斗车零件三维模型和实际加工过程中筒壁产生的开裂缺陷如图 1 所示。灰斗零件的结构简单对称,长度×宽度×高度=820 mm×480 mm×330 mm,入模口圆角半径  $R_1=40$  mm,底部及侧面圆角半径  $R_2=60$  mm,斜面角度为  $45^\circ$ ,入口处至底部圆角半径由  $R30\sim R60$  mm 过渡,材料为 Q235 普通碳素钢,材料厚度  $t=1.8$  mm。Q235 普通碳素钢具有良好的塑性、韧性和焊接性能,被广泛用于一般要求的零件和焊接结构<sup>[6]</sup>。由于零件的拉深深度大、成形困难,根据冲压理论计算及现场工艺,采用成形工艺为一次拉深+修边。

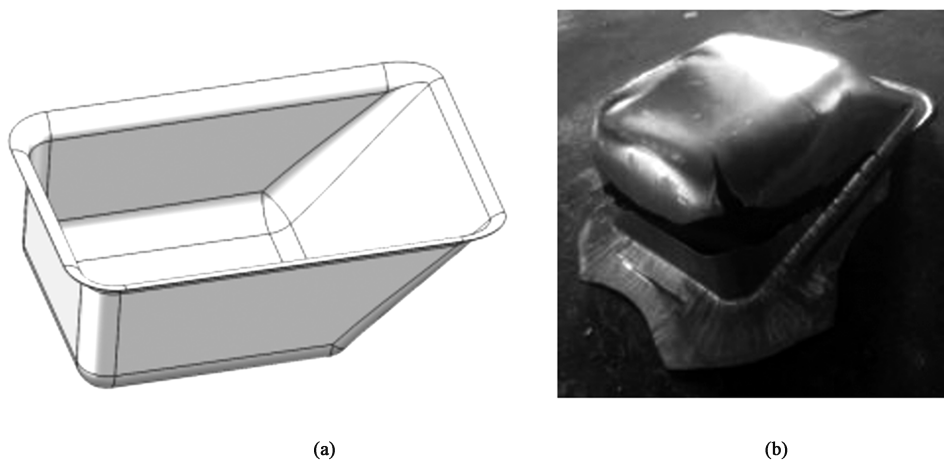


图 1 三维模型 (a) 和成形缺陷 (b)

Fig. 1 Three-dimensional model (a) and forming defect (b)

## 2 材料测试及模型

### 2.1 结合 DIC 的单向拉伸试验

采用数字图像相关 (DIC) 方法,代替传统引伸计,测试材料的位移场和应变场,基于国家标准 GB/T 228.1—2010<sup>[7]</sup>规定,沿轧制方向 (RD)、与轧制方向呈  $45^\circ$  方向 ( $45^\circ$ )、垂直轧制方向 (TD) 制备 3 组 3 个方向的拉伸试样,拉伸试样尺寸示意图如图 2 所示,拉裂后的试样如图 3 所示。

### 2.2 数字图像相关 (DIC) 测量

数字图像相关 (DIC) 测量技术是一种通过计算物体表面的图像灰度信息,应用计算机视觉技术测试力学性能的方法,采用非接触方式对不同材料进行应变、变形等进行测量<sup>[8]</sup>。试验使用两台 Point Grey 相机拍摄,两台相机构成一定的夹角架设,使

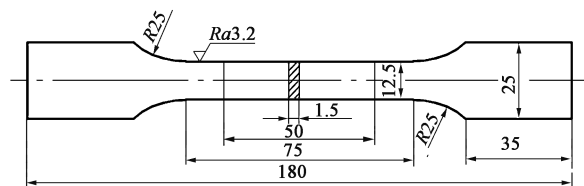


图 2 拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tensile specimen sizes

用 Vic-Snap 软件来控制拍摄样件加载的整个过程,并将拍摄的图片导入 VIC-3D 软件中来进行分析,提取位移、应变及应变率等信息<sup>[9-10]</sup>。根据国家标准 GB/T 228.1—2010<sup>[7]</sup>规定备样,拉伸试样尺寸示意图如图 2 所示,其中标距为 50 mm,对拉伸试样喷漆,涂覆散斑在试样表面形成均匀散斑图,调整 VIC-3D 设备,在微机控制的万能力学试验机上对 3

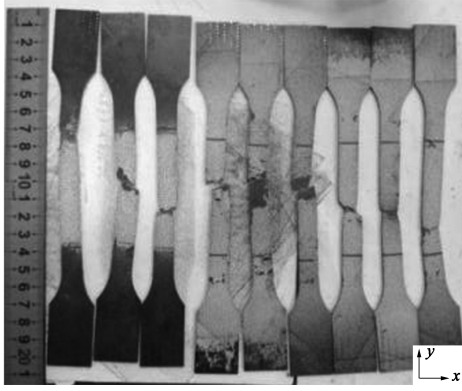


图 3 拉伸试样

Fig. 3 Tensile specimens

组试样 (RD、45°、TD) 进行单向拉伸试验。

以 DIC 测试分析获得的应变场、应变场以位移场为基础, 在计算点周围选择可同时计算位移场和应变场 (包含  $(2m+1) \times (2m+1)$  个离散点, 其中  $m$  为局部子集半径) 的窗口, 如图 4 所示, 其中  $d$  为位移, 当应变计算窗口足够小时, 位移分布可看作一个近似线性平面, 此时有:

$$\begin{aligned} u(i, j) &= a_0 + a_1x + a_2y \\ v(i, j) &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u(i, j)$ 、 $v(i, j)$  为计算得到的点沿  $x$ 、 $y$  轴方向的初始位移;  $i, j$  为应变计算窗口局部坐标,  $i, j \in [-m, m]$ ;  $x, y$  为  $x, y$  轴方向离散点坐标;  $a_0, a_1, a_2$  和  $b_0, b_1, b_2$  为待定的未知多项式系数, 矩阵形式为:

$$\begin{pmatrix} 1 & -m & -m \\ 1 & -m+1 & -m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & m-1 & m \\ 1 & m & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u(-m, m) \\ u(-m+1, -m) \\ \vdots \\ u(0, 0) \\ \vdots \\ u(m-1, m) \\ u(m, m) \end{pmatrix} \quad (2)$$

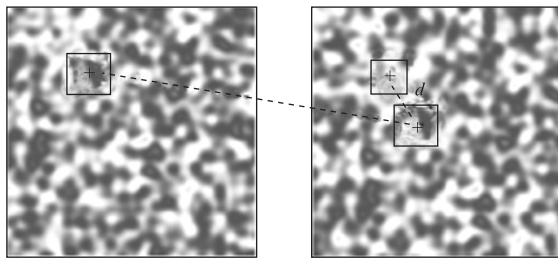


图 4 DIC 测试示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DIC test

采用最小二乘解获得待定未知多项式参数  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  和  $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ , 对于二维小变形, 运用应变与位移关系的几何方程确定应变场, 表达式为:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_x$  为  $x$  轴方向应变;  $\varepsilon_y$  为  $y$  轴方向应变;  $\varepsilon_{xy}$  为主应变。

获得 3 组试样 RD、45°、TD 的应变和位移云图, 如图 5 所示。

### 2.3 材料模型

利用板料的单向拉伸数据得到相关试验值, 根据拉伸试验后得到的数据对其进行拟合, 将所获得的工程应力-工程应变曲线转换为真实应力-真实应变曲线, 计算真实应力、真实应变的公式为:

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma(1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_T &= \ln(1 + \varepsilon) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_T$  为真实应力;  $\varepsilon_T$  为真实应变;  $\sigma$  为工程应力;  $\varepsilon$  为工程应变。

根据式 (4) 计算得到的真实应力-真实应变曲线, 并处理数据点拟合得到 3 条真实应力-真实应变曲线, 见图 6。

根据 RD 方向的真实应力-真实应变曲线, 选取平均真实应力-真实应变导入 Dynaform 进行材料属性定义, 本文模拟选用 36#材料模型, 该模型 Barlat '89 屈服准则能较好地描述材料的各向异性, 适用于任何薄板金属的成形分析, 其表达式为:

$$\begin{aligned} f &= a |K_1 - K_2|^{m'} + a |K_1 + K_2|^{m'} + \\ & c |2K_2|^{m'} = 2\bar{\sigma}^{m'} \\ K_1 &= \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2} \\ K_2 &= \sqrt{\left( \frac{\sigma_{11} + h\sigma_{22}}{2} \right)^2 + p^2 \sigma_{12}^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $a$ 、 $c$ 、 $h$ 、 $p$  为各向异性系数;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\sigma_{11}$ 、 $\sigma_{22}$ 、 $\sigma_{12}$  分别为主、次应力和剪应力;  $m'$  为非二次屈服函数指数, 对钢而言  $m'=6$ 。

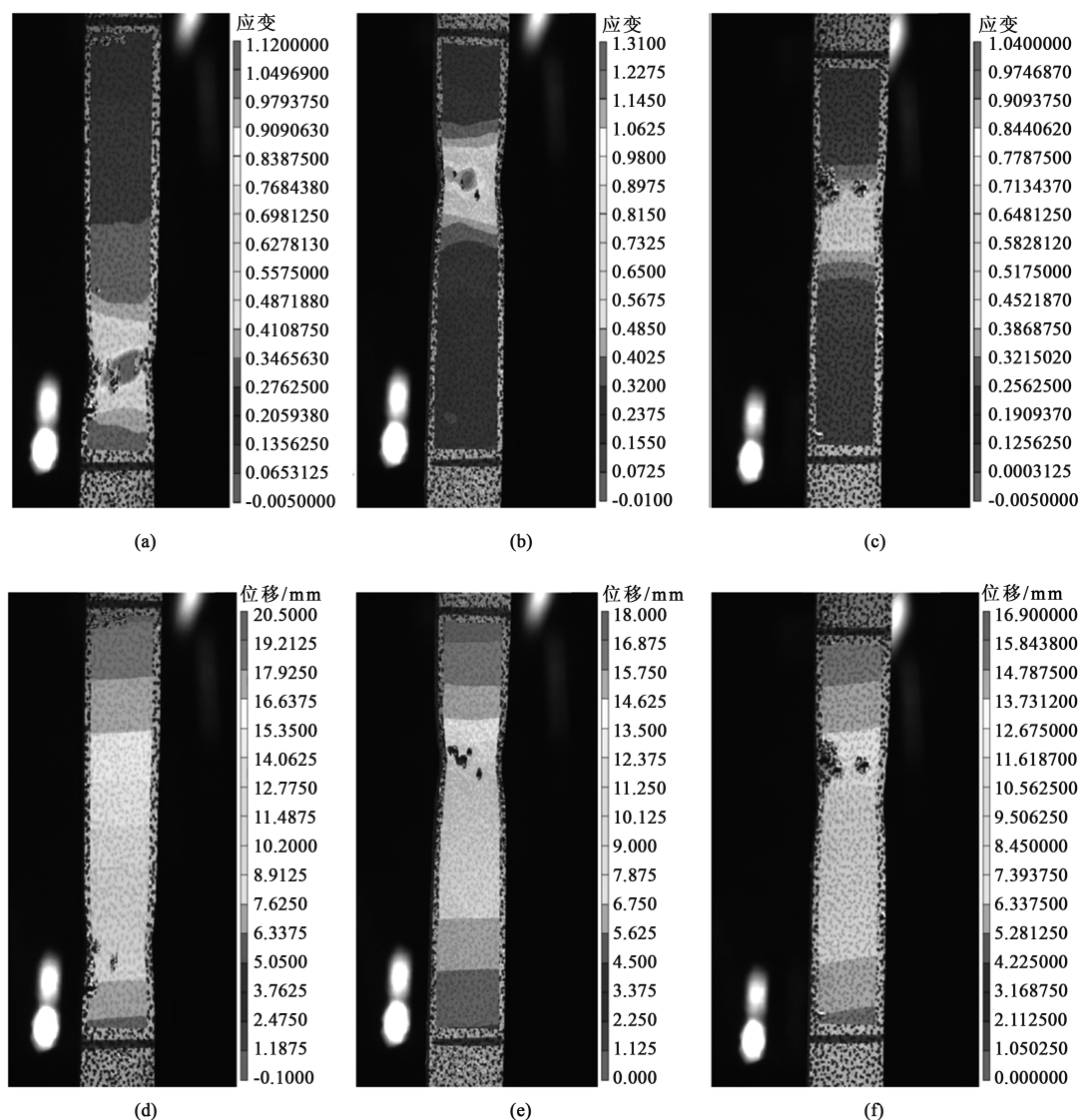


图 5 应变和位移的 DIC 云图

(a) 应变, RD (b) 应变, 45° (c) 应变, TD (d) 位移, RD (e) 位移, 45° (f) 位移, TD

Fig. 5 DIC cloud maps of strain and displacement

(a) Strain, RD (b) Strain, 45° (c) Strain, TD (d) Displacement, RD (e) Displacement, 45° (f) Displacement, TD

### 3 有限元模型

#### 3.1 理论分析

由冲压手册<sup>[11]</sup>可知, 相对高度  $\frac{H}{b}$  以及相对半径

$\frac{R}{b}$  ( $H$  为 Q235 钢的拉深高度,  $b$  为斗车拉深宽度,

$R$  为矩形件圆角半径), 经计算, 灰斗车拉深介于单工序拉深和多工序拉深之间。

#### 3.2 有限元模型

将 3D 模型导入 Dynaform 有限元软件中, 设置

双动拉延, 定义凸凹模、压边圈和板料, 并设置实际拉深筋, 采用壳单元进行网格划分, 最大的网格尺寸为 20 mm, 最小为 0.5 mm, 拉深筋设置 20% 的等效压延筋, 结合拉深工艺参数和实际模具, 建立有限元模型, 如图 7 所示。

### 4 响应面试验设计

#### 4.1 方案设计

拉深过程中主要的成形缺陷问题为筒壁开裂问题。采用响应面试验对成形进行优化, 以冲压速度  $A$ 、压边力  $B$  和摩擦因数  $C$  作为影响因素。其中冲



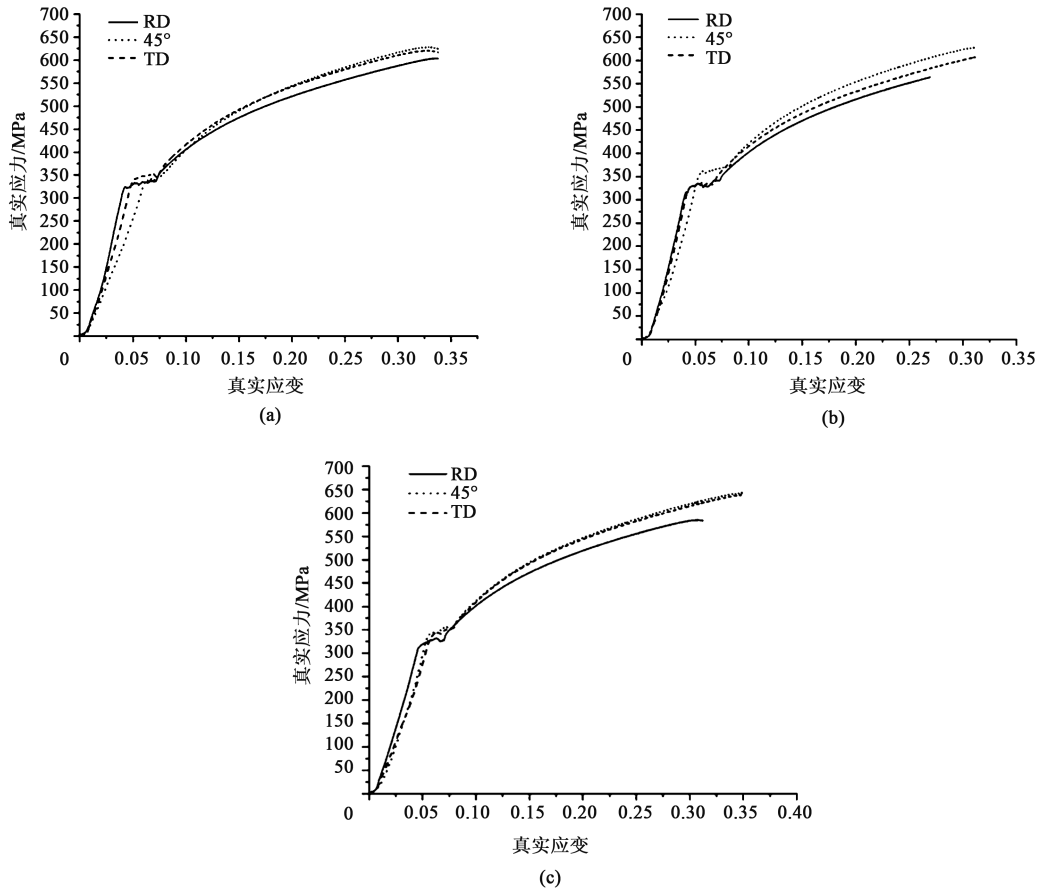


图 6 Q235 钢真实应力-真实应变曲线

(a) 第 1 组 (b) 第 2 组 (c) 第 3 组

Fig. 6 True stress-true strain curves of Q235 steel

(a) The first group (b) The second group (c) The third group

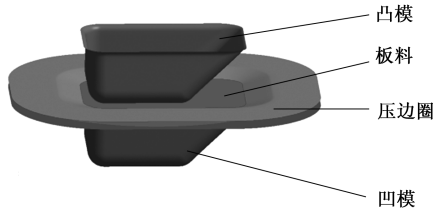


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

压速度是 Dynaform 中一个重要的控制参数, 约为真实冲压速度的 100 倍左右, 不同的冲压速度会影响板料的成形极限, 会影响模具和板料的摩擦状态<sup>[12-13]</sup>。摩擦因数和正向挤压力会影响摩擦力, 在实际生产过程中通过改变润滑条件可以改变摩擦因数<sup>[14]</sup>。板料面积为 824560 mm<sup>2</sup>, 单位压边力为 2.0~2.5 MPa<sup>[11]</sup>, 压边力为 1650.0~2061.4 kN, 摩擦因数为 0.120~0.150, 冲压速度为 500~1500 mm·s<sup>-1</sup>。模具间隙取 1.1t, t 为板料厚度。

响应面设计的水平因素变量范围和各影响因素

编码如表 1 所示, 以最大减薄率和最大增厚率为优化目标, 本文采用 Box-Behnken Design (BBD) 中心复合试验设计进行优化。按照 BBD 设计试验方案, 通过有限元模拟得到相应的响应值如表 2 所示。采用最小二乘法对模拟结果进行回归拟合, 最大减薄率和最大增厚率回归方程的方差分析如表 3 与表 4 所示, 拟合得出的最小减薄率  $y_1$  和最大增厚率  $y_2$  的二次响应目标函数为:

$$\begin{aligned}
 y_1 = & -10.09518 - 6.65853 \times 10^{-3}A + 0.010749B + \\
 & 164.59825C - 8.17073 \times 10^{-7}AB + 0.022500AC + \\
 & 0.033008BC + 1.99360 \times 10^{-6}A^2 - 2.18560 \times \\
 & 10^{-6}B^2 - 572.66667C^2 \\
 y_2 = & -1.26250 \times 10^5 + 82.36721A + 279.61492B - \\
 & 2.74563 \times 10^6C - 6.34146 \times 10^{-8}AB - 844.70007AC + \\
 & 0.20919BC + 0.012667A^2 - 0.075377B^2 + \\
 & 1.40779 \times 10^7C^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

表 1 因素水平表  
Table 1 Factors and levels

因素	水平		
	-1	0	1
冲压速度 $A/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	500	1000	1500
压边力 $B/\text{kN}$	1500	1700	1900
摩擦因数 $C$	0.120	0.135	0.150

表 2 中心复合试验响应值  
Table 2 Response values of center compound test

序号	冲压速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	压边力/ kN	摩擦因数	最大减薄 率/%	最大增厚 率/%
1	1500	1855	0.150	20.540	24.368
2	1000	1650	0.120	16.299	27.552
3	1500	1855	0.120	17.537	27.279
4	1500	1650	0.135	17.894	27.411
5	1000	2060	0.150	21.925	24.395
6	1000	1855	0.135	19.213	24.818
7	1000	1855	0.135	19.166	24.512
8	1000	2060	0.120	18.765	25.437
9	500	1855	0.150	21.327	25.363
10	1500	2060	0.135	20.207	24.945
11	500	1855	0.120	18.999	24.909
12	1000	1650	0.150	19.053	23.937
13	1000	1855	0.135	19.168	24.364
14	1000	1855	0.135	19.347	24.340
15	1000	1855	0.135	19.262	29.514
16	500	2060	0.135	21.549	21.936
17	500	1650	0.135	18.901	24.376

$F$  值和  $P$  值为方差分析中模型的显著性检测指标, 方程的显著性由  $F$  值判断,  $F$  值越大表示方程的拟合程度越好;  $P$  值检验显著程度的差异量。根据表 3 的方差分析, 可知, 最大减薄率  $y_1$  模型中的  $P$  值 $<0.0001$ , 表现为显著, 二次回归模型具有显著特征。由表 4 可知, 最大增厚率  $y_2$  模型中的  $P$  值为 0.1627, 表现为不显著。需要进一步对最大增厚率  $y_2$  回归模型采用手动优化。

4.2 回归模型的优化

交互项 ( $AB$ 、 $BC$ ) 对结果不显著 ( $P > 0.0500$ ), 采用手动优化的回归模型结果如表 5 所示。优化后的回归方程为:

$$y_2 = -1.26302 \times 10^5 + 82.36709A + 279.64310B - 2.74524 \times 10^6 C - 844.70007AC + 0.012667A^2 - 0.075377B^2 + 1.40779 \times 10^7 C^2 \quad (7)$$

由表 5 可知, 模型的  $P$  值小于 0.0500, 表明模

表 3 最大减薄率  $y_1$  方差分析结果  
Table 3 Variance analysis results of maximum thinning rate  $y_1$

来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	33.000	9	3.670	304.00	$<0.0001$ (显著)
$A$	2.640	1	2.640	219.09	0.0001
$B$	13.260	1	13.260	1099.17	$<0.0001$
$C$	15.810	1	15.810	1310.37	$<0.0001$
$AB$	0.028	1	0.028	2.33	0.1711
$AC$	0.110	1	0.110	9.44	0.0180
$BC$	0.041	1	0.041	3.42	0.1070
$A^2$	1.050	1	1.050	86.71	$<0.0001$
$B^2$	0.036	1	0.036	2.94	0.1299
$C^2$	0.070	1	0.070	5.80	0.0470
残差	0.084	7	0.012	—	—
总模型	33.090	16	—	—	—

表 4 最大增厚率  $y_2$  方差分析  
Table 4 Variance analysis results of maximum thickening rate  $y_2$

来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	$4.437 \times 10^8$	9	$4.930 \times 10^7$	2.150	0.1627 (不显著)
$A$	$8.020 \times 10^7$	1	$8.020 \times 10^7$	3.500	0.1037
$B$	5.380	1	5.380	$2.348 \times 10^{-7}$	0.9996
$C$	$8.020 \times 10^7$	1	$8.020 \times 10^7$	3.500	0.1037
$AB$	$1.689 \times 10^{-4}$	1	$1.689 \times 10^4$	$7.363 \times 10^{-12}$	1.0000
$AC$	$1.605 \times 10^8$	1	$1.605 \times 10^8$	7.000	0.0331
$BC$	1.660	1	1.660	$7.217 \times 10^8$	0.9998
$A^2$	$4.223 \times 10^7$	1	$4.223 \times 10^7$	1.840	0.2169
$B^2$	$4.225 \times 10^7$	1	$4.225 \times 10^7$	1.840	0.2169
$C^2$	$4.225 \times 10^7$	1	$4.225 \times 10^7$	1.840	0.2169
残差	$1.605 \times 10^8$	7	$2.293 \times 10^7$	—	—
总模型	$6.042 \times 10^8$	16	—	—	—

表 5 去掉  $AB$ 、 $BC$  后的优化结果  
Table 5 Optimization results after removing  $AB$  and  $BC$

来源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值
模型	$4.437 \times 10^8$	7	$6.338 \times 10^7$	3.550	0.0405 (显著)
$A$	$8.020 \times 10^7$	1	$8.020 \times 10^7$	4.500	0.0630
$B$	5.380	1	5.380	$3.018 \times 10^{-7}$	0.9996
$C$	$8020 \times 10^7$	1	$8020 \times 10^7$	4.500	0.0630
$AC$	$1.605 \times 10^8$	1	$1.605 \times 10^8$	9.000	0.0150
$A^2$	$4.223 \times 10^7$	1	$4.223 \times 10^7$	2.370	0.1583
$B^2$	$4.223 \times 10^7$	1	$4.223 \times 10^7$	2.370	0.1583
$C^2$	$4.223 \times 10^7$	1	$4.223 \times 10^7$	2.370	0.1583
残差	$1.605 \times 10^8$	9	$1.784 \times 10^7$	—	—
总模型	$6.042 \times 10^8$	16	—	—	—

型是显著的,通过优化后该模型拟合效果良好,可以利用该模型对最大增厚率进行分析和预测。在所选择的因素水平范围内,各因素对最大减薄率的影响排序为:摩擦因数>压边力>冲压速度。各因素对最大增厚率的影响排序为:冲压速度>摩擦因数>压边力。

#### 4.3 响应曲面分析

根据模型方差分析中  $F$  值可知,对目标函数  $y_1$  影响最显著的交互因素为  $A$  和  $C$ ,对目标函数  $y_2$  影响最显著的交互因素为  $A$  和  $C$ 。分析两个响应面模型中交互作用显著的因素。当压边力为  $B=1855$  kN 时,响应目标函数  $y_1$  关于设计变量  $A$ 、 $C$  的三维响应面图和等

值线图如图 8 所示。响应面目标函数  $y_2$  关于设计变量  $A$ 、 $C$  的三维响应面图和等值线图如图 9 所示。由图 8 和图 9 可知,在冲压速度和摩擦因数的相互作用下,同时增大某一个变量,响应变量最大减薄率也因单变量的增大而增大,冲压速度的增大,使得灰斗变形速率增大,不同变形速率得到不同的成形极限,冲压速度的加快导致板料流动反应不及时,引起局部分布不均匀,从而出现过度减薄现象,表现为过大的减薄率。而摩擦因数涉及到摩擦阻力, $C$  值越小,最大增厚率也相对减小,这是因为摩擦因数小,摩擦阻力较低,从而引起零件成形后出现堆积现象,容易导致起皱。

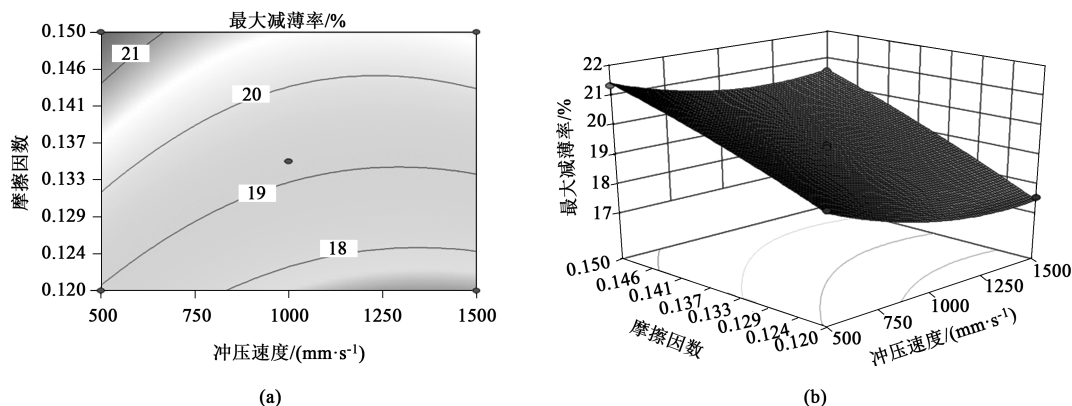


图 8 压边力为 1855 kN 时冲压速度和摩擦因数对最大减薄率的交互作用

(a) 等值线图 (b) 三维响应面图

Fig. 8 Interaction between stamping speed and friction factor on maximum thinning rate under blank holder force of 1855 kN

(a) Contour diagram (b) 3D response surface diagram

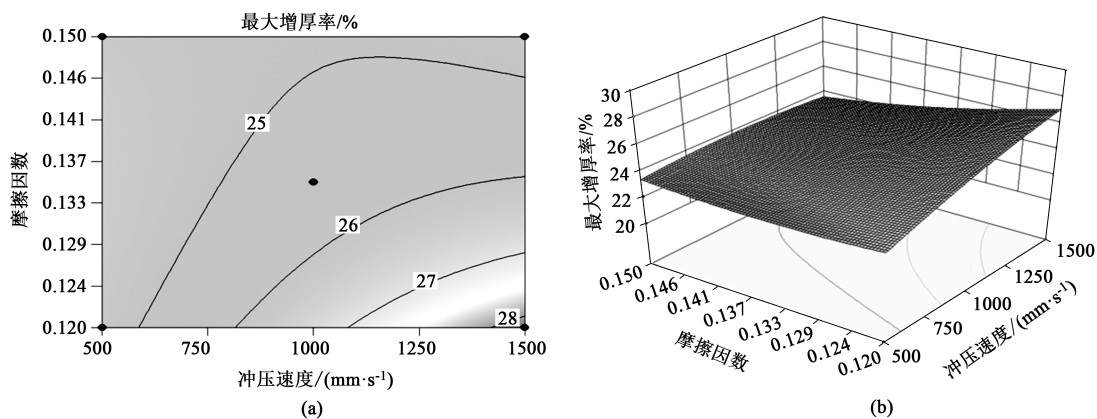


图 9 压边力为 1855 kN 时冲压速度和摩擦因数对最大增厚率的交互作用

(a) 等值线图 (b) 三维响应面图

Fig. 9 Interaction between stamping speed and friction factor on maximum thickening rate under blank holder force of 1855 kN

(a) Contour diagram (b) 3D response surface diagram

## 5 最大增厚率和最小减薄率的预测和验证

通过 Design-Expert 8.0 对回归方程求解,在试

验的因素水平范围内预测最大减薄率和最大增厚率最小的最佳条件为:冲压速度为  $652.46 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压边力为 1906.03 kN、摩擦因数为 0.120。在此条件下,最大减薄率为 18.758%、最大增厚率为

25.904%。对该条件下进行有限元模拟，模拟结果成形极限图如图 10 所示，减薄率云图如图 11 所示，得到最大减薄率为 18.555%，误差为 0.203%。最

大增厚率为 26.101%，误差为 0.2%。说明优化后的回归方程对最大减薄率和最大增厚率的分析 and 预测比较可靠。

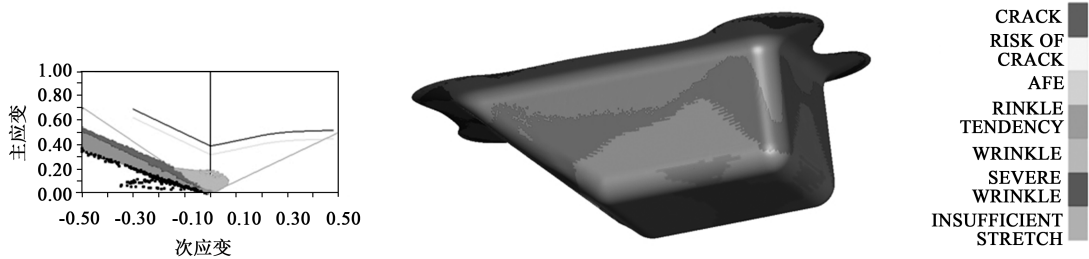


图 10 优化后成形极限图  
Fig. 10 Forming limit diagram after optimization

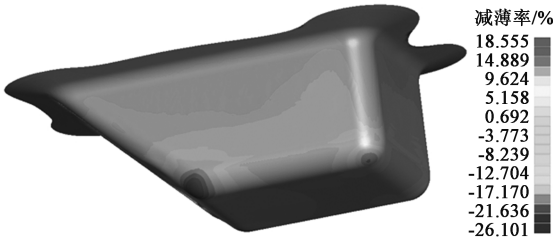


图 11 优化后减薄率云图  
Fig. 11 Cloud map of thinning rate after optimization

根据试验优化结果，在实际拉深成形中进行试验验证，将多目标优化后得到的工艺参数组合在实际生产中进行调试，通过改变实际生产工艺，添加润滑剂调试摩擦因数至 0.120，真实冲压速度为  $6.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，压边力为 1905 kN。通过手持式的超声波测厚仪对实际生产的灰斗厚度进行测量，得到实际成形件的最大减薄率和最大增厚率。实际生产和数值模拟的对比结果如表 6 所示。由表 6 可以看出，实际生产灰斗的最大增厚率和数值模拟的最大增厚率的误差为 0.562%，实际生产灰斗最大减薄率和数值模拟的最大减薄率的误差为 0.244%，误差较小，说明数值模拟最佳工艺参数可用于实际工业生产。实际生产成形零件如图 12 所示，图 12 所示的灰斗拉深深度为 350 mm 时，成形灰斗零件开裂缺陷已



图 12 灰斗拉深优化后成形零件图  
Fig. 12 Diagram of forming parts for gray hopper deep drawing after optimization

得到消除，无破裂、起皱、叠料缺陷问题，优化后可用于大批量生产。

6 结论

- (1) 通过 DIC 拉伸试验，经过数据处理，获得真实应力-真实应变曲线及材料参数，并将真实应力-真实应变和材料参数导入至 Dynaform 中进行材料定义。
- (2) 基于响应面优化分析，以最大减薄率和最大增厚率为优化目标，建立回归方程。并对最大增厚率回归模型进行手动优化。获得最佳工艺参数为冲压速度为  $652.46\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ，压边力为 1906.03 kN，摩擦因数为 0.120。预测最大减薄率为 18.758%和最大增厚率为 25.904%。通过有限元模拟获得最大减薄率为 18.555%，最大增厚率为 26.101%，误差较小。最后将最优组合模拟工艺参数用于实际生产，获得质量较好的灰斗车零件。

表 6 实际生产和模拟结果对比 (%)  
Table 6 Comparison between actual production and simulation results (%)

最大增厚率			最大减薄率		
实际	模拟	误差	实际	模拟	误差
18.555	17.993	0.562	26.101	25.857	0.244



## 参考文献:

- [1] 么大锁. 汽车引擎盖外板拉延成形工艺参数优化研究 [J]. 机电工程, 2020, 37 (7): 795-800.  
Yao D S. Research on optimization of drawing process parameters for automobile hood outer panel [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2020, 37 (7): 795-800.
- [2] Feng Y, Lu R, Gao Y, et al. Multi-objective optimization of VB-HF in sheet metal deep-drawing using Kriging, MOABC, and set pair analysis [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (9): 3127-3138.
- [3] Chen D Y, Xu Y, Zhang S H, et al. Evaluation of numerical and experimental investigations on the hybrid sheet hydroforming process to produce a novel high-capacity engine oil pan [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97 (9): 3625-363.
- [4] 王排岗, 王晓强, 刘志飞, 等. 基于灰色关联分析方法的超声滚挤压工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (3): 36-43.  
Wang P G, Wang X Q, Liu Z F, et al. Optimization of ultrasonic rolling extrusion process parameters based on grey relational analysis method [J]. Journal of Plastic Engineering, 2022, 29 (3): 36-43.
- [5] Zafar R, Lang L H, Zhang R J. Analysis of hydro-mechanical deep drawing and the effects of cavity pressure on quality of simultaneously formed three-layer Al alloy parts [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80 (9): 2117-2128.
- [6] 才鸿年, 赵宝荣. 金属材料手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.  
Cai H N, Zhao B R. Handbook of Metallic Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [7] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].  
GB/T 228.1—2010, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [8] 白晓虹. 数字图像相关 (DIC) 测量方法在材料变形研究中的应用 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
Bai X H. Application of Digital Image Correlation Method in Study of Material Deformation [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [9] 邹宇明. 数字图像相关 (DIC) 方法在钢铁材料力学性能测试中的应用研究 [D]. 北京: 钢铁研究总院, 2017.  
Zou Y M. Research of the Application of Digital Image Correlation Method in Mechanical Properties Measurement of Steel Materials [D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2017.
- [10] Barlat F, Lian K. Plastic behavior and stretchability of sheet metals, Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5 (1): 51-66.
- [11] 王孝培. 冲压手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
Wang X P. Stamping Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [12] 范泽. 冲压速度对板料成形性能的影响研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.  
Fan Z. Study of the Effect of Punch Speed on Sheet Metal Forming [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [13] 王瑜, 何镇罡, 郑燕萍. 基于Dynaform的冲压成形工艺因素影响分析 [J]. 轻型汽车技术, 2012, (9): 11-14.  
Wang Y, He Z G, Zheng Y P. The influence analysis of stamping process factors based on Dynaform [J]. Light Vehicle Technology, 2012, (9): 11-14.
- [14] Yadav R R, Dewang Y, Raghuwanshi J, et al. Finite element analysis of extrusion process using aluminum alloy [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 500-509.
- [15] 王瑜. 软件导刊, 2021, 20 (3): 115-118.
- [16] Gao K T. Hybrid assembly line workshop scheduling simulation based on Plant Simulation [J]. Software Guide, 2021, 20 (3): 115-118.
- [17] 滕继东, 朴永灿, 黄大巍, 等. 基于 Plant Simulation 的冲压车间数字化仿真平台研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (2): 92-97.
- [18] Teng J D, Pu Y C, Huang D W, et al. Research on stamping workshop digital simulation platform based on plant simulation [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43 (2): 92-97.
- [19] 王森森. 基于 Plant-Simulation 的卡车生产系统仿真建模及优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [20] Wang S S. Research on Simulation Modeling and Optimization of Truck Production System Based on Plant-Simulation [D]. Jinan: Shandong University, 2020.

## (上接第 58 页)

- Fang Z M. A literature review of discrete production system simulation based on Plant Simulation [J]. Logistics Engineering and Management, 2018, 40 (11): 76-79.
- [9] 方赫, 陆振东, 宿彪, 等. 基于 Plant Simulation 的冲压车间仿真优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 85-89.  
Fang H, Lu Z D, Su B, et al. Simulation optimization on stamping workshop based on Plant Simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 85-89.
- [10] 郭华, 刘婷婷, 汪园, 等. 基于 plant simulation 仿真平台的车间作业排序优化设计 [J]. 现代制造工程, 2016, (2): 108-112.  
Guo H, Liu T T, Wang Y, et al. Optimization & design for job shop scheduling based on Plant Simulation [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016, (2): 108-112.
- [11] 高珂婷. 基于 Plant Simulation 的混合流水线车间调度仿真