

# 回归正交试验在冷冲拉深成形中的应用研究

陈刚, 胡勇

(四川理工学院机械过程与装配实验室, 四川 自贡 643000)

**摘要:**以圆筒形工件为冷冲拉深实验对象,运用回归正交试验与分析理论,设计冷冲拉深成形多试验因素回归试验方案;运用 Dynaform 软件对该冷冲拉深工件进行数值模拟仿真成形分析。采集多项仿真分析试验指标值,运用模糊数学中的综合评判法,对多项试验指标进行科学综合评价。运用多元线性回归的方法对实验结果进行分析,建立了各工艺因素与成形制品质量之间的回归模型,并通过方差、残差分析等对所建立的回归方程进行检验。试验最终得出凸凹模具间隙、压边力、凸缘半径对零件质量有显著影响。

**关键词:**回归正交试验;数据分析;冷冲成形;多元线性回归

**中图分类号:**TH162;TP391.7

**文献标志码:**A

## 引言

冷冲拉深成形是冷冲模具设计中一种重要的加工方法。但零件拉深成形因素具有多样性和复杂性,如模具结构参数、拉深成形工艺参数、冷冲制品材料性能参数等,所以通常改变其中任何一种因素,都将对零件的质量造成相应的影响。当前,对于拉深成形的研究,主要体现在拉深工艺<sup>[1]</sup>方案的选择上,而对影响拉深成形因素方面的研究还很少。虽然,也有应用拉深成形仿真分析软件<sup>[2]</sup>来进行辅助设计,但都显得手段比较单一,不能系统地分析各因素的影响程度。而回归正交试验分析则是现在优化设计中应用<sup>[3]</sup>较多的分析手段。如果能把各种影响因素拟合起来,综合运用回归正交试验与分析理论、Dynaform 仿真软件等试验分析技术为平台,建立影响拉深成形各工艺参数与成形制品质量间的数学模型,运用此模型对产品质量进行定量分析,找出最优冷冲成形工艺参数组合,从而有效控制产品质量的方式是非常有价值的。因此,综合影响零件成型的主要

因素进行回归试验分析,得出回归数学模型,找出主要影响因素,将对模具设计方面的研究非常有必要。

## 1 回归正交实验方法与软件介绍

### 1.1 回归正交设计与分析

回归正交设计,是把正交试验设计、回归数据处理和回归精度统一起来的回归设计与分析方法,是指在选取因素的试验范围内,以适当的试验点及较少试验建立回归方程,从而使试验问题得到优化处理的一种方法。而回归分析则是探究实验数据能否通过曲线表示。由试验分析,得出试验数据,研究出各试验因素与试验结果间的经验公式。即求:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  函数的具体表达式。

#### 1.1.1 一次回归正交

多元线性回归分析<sup>[4]</sup>指对因变量  $y$  与多个自变量  $x$  之间作线性关系模型分析的方法。而一次回归正交试验,就是通过二水平正交表设计实验,分析试验结果与各因素的联系,计算待定系数  $b_k$ ,从而建立回归数学模

收稿日期:2015-05-06

基金项目:四川理工学院创新基金项目(y2014036)

作者简介:陈刚(1989-),男,四川自贡人,硕士生,主要从事液压系统设计与仿真、模具 CAD/CAE 方面的研究,(E-mail)cg545689552@163.com;  
胡勇(1955-),男,四川自贡人,教授,主要从事液压系统设计与仿真、模具 CAD/CAE 方面的研究,(E-mail)1532496175@qq.com

型。即:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (1)$$

其中,  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$  为待定回归系数;  $x_1, x_2, \dots, x_k$  为  $k$  个自变量。

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \bar{y}$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n z_{ji}y_i}{m_c} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中:  $z_{ji}$  为上下水平编码,  $m_c$  为二水平试验次数。其中, 因素作用大小随相应回归系数的增大而表现为越明显; 而试验指标受因素影响的正负情况则由回归系数的正负表明。

### 1.1.2 回归正交表头设计及分析

回归正交表头设计, 首先应通过转换公式, 用  $Z_j$  表示  $x_j$  的各水平因素, 即将  $x_j$  变为隐函数变量, 该方法称为规范变量, 可以使  $x_j$  不受单位和大小的影响。  $x_j, Z_j$  的转换关系为:

$$z_j = \frac{x_j - x_{j0}}{\Delta_j} \quad (3)$$

式中,  $Z_j$  称为编码;  $x_j$  称为自然变量; 零水平  $x_{j0} = \frac{x_{j1} + x_{j2}}{2}$ , 变化间距  $\Delta_j = \frac{x_{j2} - x_{j1}}{2}$ ,  $x_{j1}$  为  $x_j$  的下水平,  $x_{j2}$  为  $x_j$  的上水平。其中, 编码是将试验结果  $y$  与因素  $Z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 的函数关系, 经转换公式变为试验结果  $y$  与编码值  $x_j$  之间的函数关系, 并以此来进一步研究该回归问题。

### 1.1.3 计算各回归系数

根据表 1, 建立回归正交实验表, 并用回归试验方法进行分析。结合实验结果及根据公式(2), 计算出式中的各回归系数  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ , 便可写出  $y$  与规范变量的回归方程。

表 1 多元线性回归的方差分析表

	平方和	自由度	均方和 (MS)	F 值	F 临界
回归	$SS_R$	$m$	$MS_R = SS_R/m$	$MS_R/MS_e$	查 F 分布表
残差	$SS_e$	$n-m-1$	$MS_e = SS_e/(n-m-1)$		
总和	$SS_T$	$n-1$			

### 1.1.4 多元线性回归方程的方差分析

通过方差分析<sup>[5]</sup>将正交试验得出的综合评分分解为不同的工艺参数自变量  $x$  的分量, 并研究各种工艺参数对零件综合评价的重要性, 最终得出各工艺参数的影响程度大小。方差分析也是检验回归模型是否成立的一种有效方法。针对多元的线性回归, 其方差分析见表 1。其中:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

$$SS_R = \sum s_j + \sum s_{ij} \quad (5)$$

$$SS_e = SS_T - SS_R \quad (6)$$

式中,  $SS_T$  为总平方和;  $SS_R$  为回归平方和, 其中  $S_j = m_c \cdot b_j^2$  为一次项偏回归平方和,  $S_{ij} = m_c \cdot b_{ij}^2$  为交互项偏回归平方和;  $SS_e$  是残差平方和; 另外,  $n$  为样本容量  $y$  的预测值,  $MS_R$  为回归均方和,  $MS_e$  为残差均方和。

### 1.1.5 F 检验及失拟性检验

本实验中, 利用  $F$  检验<sup>[6]</sup>所建立的一次回归方程中各拉深工艺参数  $x$  与综合评价值  $y$  之间是否存在线性关系。通过计算  $F$  值, 并与  $F$  分布表进行对比, 可以判别所建立的回归方程是否成立, 并可预测多元回归模型。  $F$  的计算公式见表 1。

通过失拟性检验<sup>[4]</sup>, 可以检验一次回归方程在所研究领域的内部是否拟合得很好, 从而弥补显著性检验全面性的不足。

## 2 回归正交试验设计与 Dynaform 仿真分析

### 2.1 试验对象、材料

工件形状如图 1 所示, 简单对称, 为轴对称拉深件, 为浅圆筒形件, 料厚  $t = 1 \text{ mm}$ 。工件底部圆角半径  $r = 7 \text{ mm} > t$ 。符合圆角半径在拉深工艺中的要求。

选用 08 钢作为零件材料。其为优质碳素结构钢, 具有良好的塑性和韧性, 强度、硬度低, 其压力加工性能和焊接性能优良, 特别适用于拉伸、弯曲等冷加工。其主要参数见表 2。

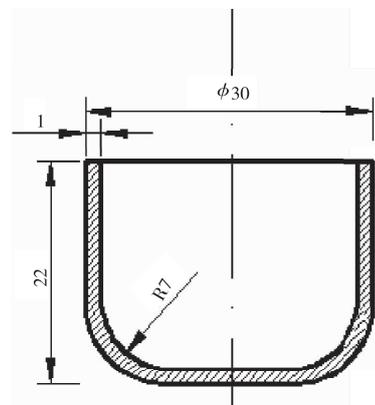


图 1 零件图

表 2 零件力学性能

伸长率 $\delta_5/\%$	屈服点 $\sigma_s/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	抗剪强度 $\tau/\text{MPa}$	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
35	$\geq 175$	$\geq 295$	280 ~ 420	7.85

通过计算,零件的拉深系数满足一次拉深的要求<sup>[7]</sup>。采用有压边圈拉深方式,最终将凸缘切除便得到所需工件。

## 2.2 回归正交试验

### 2.2.1 回归正交试验设计

本实验通过综合考虑零件成形过程中的各种工

艺影响因素。将模具结构因素凹模直径  $x_1$ 、凹模深度  $x_2$ 、凸缘处半径  $x_3$ 、凸模底部半径  $x_4$ 、凹凸模间隙  $x_7$ ;工艺参数因素拉深力  $x_5$ 、压边力  $x_6$  等作为本次拉深成形试验的试验参数,通过整理得到各因素水平编码见表3。

表3 因素水平编码表

	凹模直径 $x_1$ /mm	凹模深度 $x_2$ /mm	凸缘处半径 $x_3$ /mm	底部处半径 $x_4$ /mm	拉深力 $x_5$ /kN	压边力 $x_6$ /kN	凹凸模间隙 $x_7$ /mm
1	30.0	31.0	7.0	8.0	40.0	4.5	1.2
-1	29.5	30.0	6.0	7.0	37.0	4.0	1.1
0	29.75	30.5	6.5	7.5	38.5	4.25	1.15
$\Delta_j$	0.25	0.5	0.5	0.5	1.5	0.25	0.05

结合回归正交试验设计的特点,选择  $L_8(2^7)$  正交表进行回归正交试验表设计,并在此基础上增加三次零水平试验。

### 2.2.2 Dynaform 仿真分析

文献[8]介绍了 Dynaform 软件在冷冲拉深中的用法。它主要包括前处理和后处理两部分,方便于评估板料的成形性能,从而为板成形工艺及模具设计提供帮助。图2为 Dynaform 中的前处理定位图,从上到下依次为凹模、上压边圈、板料、下压边圈、凸模;图3、图4为后处理分析,其中图3为拉深试验中的板料成形极限图,从图中可以看出板料成形是否拉裂;图4为拉深试验中分析厚度变化的厚度图,从图的右边数据中可以直接读出该成形零件的厚度值,这里取减薄度(减薄度=板料厚度-最小厚度)及最大起皱度(最大厚度)为实验指标值。

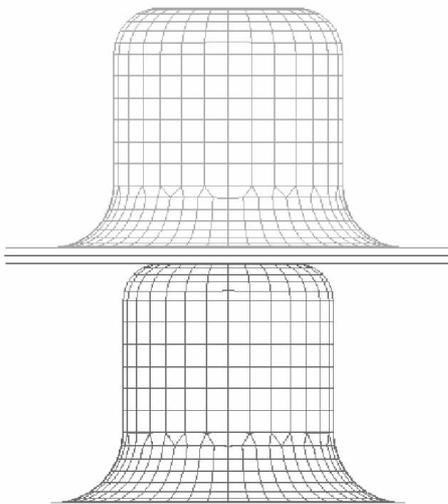


图2 前处理

## 2.3 试验数据的综合评价

通过 Dynaform 分析,分别得出各次拉深件的减薄度

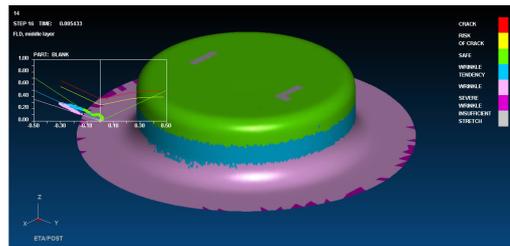


图3 成形极限图

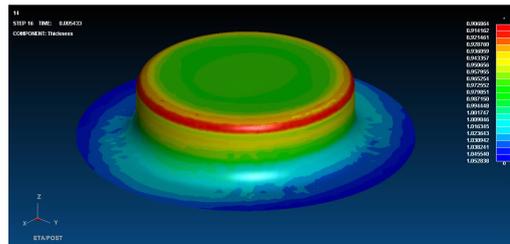


图4 厚度图

和最大起皱度。但由于模拟试验中,减薄度和最大的起皱度对零件的影响各不相同,不能直接相加进行评价。所以需通过模糊数学的映射函数<sup>[9]</sup>公式(7),将影响程度不同的减薄度和最大的起皱度进行综合评价<sup>[10]</sup>,其评分标准为百分制的形式。

$$Y_{ji} = \begin{cases} 1 & x_{ji} < c \\ 1 - 2\left(\frac{x_{ji} - c}{a - c}\right)^2 & c \leq x_{ji} < b \\ 2\left(\frac{x_{ji} - a}{a - c}\right)^2 & b \leq x_{ji} < a \\ 0 & x_{ji} \geq a \end{cases} \quad (7)$$

式中的参数  $a, b, c$  取值见表4。

综合评价计算公式:

$$Y_j = b_1 Y_{j1} + b_2 Y_{j2} = \sum_{i=1}^2 b_i Y_{ji} \quad (8)$$

式中: $b_1$  为最小厚度加权值; $b_2$  为最大起皱度加权值; $Y_{ji}$  为考查指标; $j, i$  分别为第  $j$  考查指标和第  $i$  试验号。

根据对零件的设计指标的影响程度不同,分别取式(8)中的  $b_1 = 60, b_2 = 40$ 。评分结果见表 5。

表 4 函数的各参数取值

参 数	指 数		
	$a$	$b$	$c$
最小厚度/mm	0.82	0.63	0.44
最大起皱高度/mm	1.60	1.30	1.00

表 5 七元一次回归正交试验分析结果与综合评分表

试验号	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	减薄度/ (0.1 mm)	起皱度	综合评分
1	1(30.0)	1(31.0)	1(7.0)	1(8.0)	1(40.0)	1(4.5)	1(1.2)	0.65	1.370	35.77
2	1	1	1	-1(7.0)	-1(37)	-1(4)	-1(1.1)	0.80	1.270	24.13
3	1	-1(30)	-1(6.0)	1	1	-1	-1	0.59	1.355	54.64
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0.49	1.258	83.13
5	-1(29.9)	1	-1	1	-1	1	-1	0.64	1.367	38.99
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0.45	1.285	81.87
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0.49	1.388	67.91
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0.76	1.331	19.07
9	0(29.75)	0(30.5)	0(6.5)	0(7.5)	0(38.5)	0(4.25)	0(1.15)	0.64	1.352	40.59
10	0	0	0	0	0	0	0	0.61	1.293	56.91
11	0	0	0	0	0	0	0	0.61	1.293	56.91

2.4 建立回归方程

根据回归系数的计算公式,回归正交试验的有关计算过程见表 6。

2.4.1 回归系数的计算

根据回归系数的计算公式,回归正交试验的有关计算过程见表 6。

表 6 回归正交试验设计计算表

试验号	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$	$z_6$	$z_7$	$y$	$y^2$	$yz_1$	$yz_2$	$yz_3$	$yz_4$	$yz_5$	$yz_6$	$yz_7$
1	1	1	1	1	1	1	1	35.77	1279.4929	35.77	35.77	35.77	35.77	35.77	35.77	35.77
2	1	1	1	-1	-1	-1	-1	24.13	582.2569	24.13	24.13	24.13	-24.13	-24.13	-24.13	-24.13
3	1	-1	-1	1	1	-1	-1	54.64	2985.5296	54.64	-54.64	-54.64	54.64	54.64	-54.64	-54.64
4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	83.13	6910.5969	83.13	-83.13	-83.13	-83.13	-83.13	83.13	83.13
5	-1	1	-1	1	-1	1	-1	38.99	1520.2201	-38.99	38.99	-38.99	38.99	-38.99	38.99	-38.99
6	-1	1	-1	-1	1	-1	1	81.87	6702.6969	-81.87	81.87	-81.87	-81.87	81.87	-81.87	81.87
7	-1	-1	1	1	-1	-1	1	67.91	4611.7681	-67.91	-67.91	67.91	67.91	-67.91	-67.91	67.91
8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	19.07	363.6649	-19.07	-19.07	19.07	-19.07	19.07	19.07	-19.07
9	0	0	0	0	0	0	0	40.59	1647.5481	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	56.91	3238.7481	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	56.91	3238.7481	0	0	0	0	0	0	0
综合								559.92	33081.2706	-10.17	-43.99	-111.75	-10.89	-22.81	-51.59	131.85

在不考虑各因素交互性作用的情况下,根据式(2)求出回归方程(1)中的各系数  $b_0, b_1, \dots, b_7$ 。并依题意

有:  $m_0 = 3, n = 11, m_c = 8$ , 得:  
 $b_0 = 50.90182, b_1 = -1.27125$

$$b_2 = -5.49875, b_3 = -13.96875$$

$$b_4 = -1.36125, b_5 = -2.85125$$

$$b_6 = -6.44875, b_7 = 16.48125$$

则  $y$  与规范变量  $z_j$  的回归方程为:

$$y = 50.90182 - 1.27125z_1 - 5.49875z_2 - 13.96875z_3 - 1.36125z_4 - 2.85125z_5 - 6.44875z_6 + 16.48125z_7 \quad (9)$$

#### 2.4.2 方差分析

再利用方差分析式(9)中各试验因素,并列各因素的显著性情况。其详细内容见表7。

$$F_{0.1}(1,3) = 5.54 \quad F_{0.05}(1,3) = 10.13$$

$$F_{0.01}(1,3) = 34.12 \quad F_{0.1}(7,3) = 5.27$$

$$F_{0.05}(7,3) = 8.89 \quad F_{0.01}(7,3) = 27.67$$

表7 方差分析表

差异源	SS	df	Ms	F	显著性
$z_1$	12.928	1.00	12.928	0.217	不显著
$z_2$	241.890	1.00	241.890	4.056	不显著
$z_3$	1561.008	1.00	1561.008	26.178	**
$z_4$	14.824	1.00	14.824	0.248	不显著
$z_5$	65.037	1.00	65.037	1.091	不显著
$z_6$	332.691	1.00	332.691	5.579	*
$z_7$	2173.053	1.00	2173.053	36.442	***
回归	4401.431	7.00	628.776	10.544	**
残差	178.893	3.00	59.631		
总和	4580.324	10.00			

由表7可以得出,  $z_1, z_2, z_4, z_5$  均小于临界值  $F_{0.1}$ , 所以不显著, 即对拉深成形结果影响不大; 因素  $z_3 = 26.177750 > F_{0.05}(1,3)$ , 对试验指标较为显著;  $z_6 = 5.579153 > F_{0.1}(1,3)$ , 对试验指标有一定影响; 而  $z_7 = 36.441607 > F_{0.01}(1,3)$ , 对试验指标非常显著, 为主要影响因素。

#### 2.4.3 失拟性检验

为检验一次回归在所研究区域内部的拟合情况, 对试验进行失拟性检验。零水平试验次数  $m_0 = 3$ 。

重复试验误差:

$$SS_{el} = \sum_{i=1}^{m_0} y_{0i}^2 - \frac{1}{m_0} \left( \sum_{i=1}^{m_0} y_{0i} \right)^2 = (1647.5481 + 3238.7481 + 3238.7481) - \frac{1}{3} (40.59 + 56.91 + 56.91)^2 = 177.5616$$

试验误差自由度:

$$df_{el} = m_0 - 1 = 3 - 1 = 2$$

失拟平方和:

$$SS_{lf} = SS_e - SS_{el} = 178.893276 - 177.5616 = 1.3316$$

失拟性平方和自由度:

$$df_{lf} = df_e - df_{el} = 3 - 2 = 1$$

则有

$$F_{lf} = \frac{SS_{lf}/df_{lf}}{SS_{el}/df_{el}} = 0.015 \text{ 小于 } F_{0.1}(1,2) = 8.53。$$

检验结果表明, 失拟不显著, 回归模型在所研究范围与实际情况拟合得很好。

#### 2.4.4 一次线性回归方程

由以上计算可得新的回归方程为:

$$y = 50.90182 - 13.96875z_3 - 6.44875z_6 + 16.48125z_7$$

由于  $z_3 = (x_3 - 6.5)/0.5$ ,  $z_6 = (x_6 - 4.25)/0.25$ ,  $z_7 = (x_7 - 1.15)/0.05$ , 将  $y$  与  $z_7$  的关系经式(3)转换, 整理可得:

$$y = 50.90182 - 13.96875 \times (x_3 - 6.5)/0.5 - 6.44875(x_6 - 4.25)/0.25 + 16.48125(x_7 - 1.15)/0.05 = -27.9375x_3 - 25.795x_6 + 329.625x_7 - 36.94443 \quad (10)$$

由式(10)可知, 凸缘半径、压边力、凸凹模具间隙对零件起皱度和厚度都有影响。而且凸凹模具间隙影响最为显著, 压边力次之。所以, 在该模具设计时, 应充分考虑这三因素的影响程度来进行模具设计参数的选定。

### 3 结束语

通过对零件主要因素的一次回归正交试验分析, 采用严谨的分析方法及准确的试验分析数据, 最终得出了一次回归的线性回归方程。通过对线性方程的方差分析, 得出了凸凹模具间隙、压边力、凸缘半径为零件质量的主要影响因素。并由失拟性检验得出与实际情况拟合得较好。相比于当前单一的仿真分析而言, 通过建立拉深件的回归数学模型<sup>[11]</sup>, 可以探索某类拉深件的主要工艺参数的影响程度, 有助于建立该模型的系统数据库函数, 方便以后直接调用以及为参数化设计, 从而对从事相关领域的技术人员提供一定的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 王广林. 矩形件拉深成型工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2013(8):94-95.

- [2] 王增强,赵金龙.DynaForm 在汽车顶盖重力变形评估中的应用[J].计算机辅助工程,2014,23(2):82-84.
- [3] 张青云,胡亚辉,何志祥,等.基于回归正交试验的皮质骨钻削力试验研究[J].机床与液压,2014,45(5):8-10.
- [4] 田胜元,萧曰嵘.实验设计与数据处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [5] 何少华,文竹青,娄涛.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [6] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [7] 刘建超,张宝忠.冲压模具设计与制造[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [8] 苏春建,于涛.金属板材成形 CAE 分析及应用[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [9] 彭祖赠,孙韞玉.模糊(Fuzzy)数学及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002.
- [10] 卫炜,胡泽豪.正交试验设计的注塑成型工艺参数多目标优化设计[J].现代制造工程,2009(2):95-97.
- [11] 甘伟,刘学敏,孙静.回归正交评价指标智能筛选法用于色谱分离条件的快速优化[J].色谱,2015(2):140-145.

## Research on Regression Orthogonal Tests Applied in Cold Punching Deep Drawing

CHEN Gang, HU Yong

(Mechanical Process and Assembly Laboratory, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** With the cold strong tensile experiment object of cylindrical workpiece, the test plan of cold punching stretch forming mult-factor regression is designed with the theory of regression orthogonal experiment and analysis; Dynaform software is used for numerical simulation analysis of the cold drawing workpiece forming. A number of simulation analysis test indicators are gathered, and the comprehensive evaluation method in fuzzy mathematics is applied for scientific comprehensive evaluation of these indicators. The experimental results are analyzed with the method of multiple linear regression, and the regression model between the various process factors and the quality of products is established. Then the obtained regression equation is tested by variance and residual analysis. The experiments show that the concave-convex mold clearance, blank holder force and flange radius have significant impacts on the quality of parts.

**Key words:** regression orthogonal experiment; data analysis; cold punching forming; multiple linear regression