

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2016.06.003

基于响应面模型和灰色关联度的板料成形工艺参数优化

熊文韬¹, 刘泓滨¹, 火寿平²

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 云南开放大学机电工程学院, 云南 昆明 650223)

摘要:以非线性有限元分析软件 Dynaform 为平台, 基于二阶响应曲面法和灰色关联度, 对非标准盒制件冲压成形工艺参数寻优。首先, 利用正交试验法获取不同因素的不同组合下的减薄率数值; 再采用灰色关联度理论, 找到对该盒形件最大减薄率起主要影响的 2 个因素即等效拉延阻力和压边力; 基于响应曲面模型, 利用 Design Exper 软件, 结合中心复合设计法 (CCD) 建立优化目标和主要影响因素的二次回归模型; 据成形极限图 (FLD) 的曲线设置板料的目标函数, 可求得等效拉延阻力和压边力的最优解。通过对比优化前后的数值模拟结果可知, 优化后的冲压参数可以有效提高板料成形性能和质量。

关键词: 冲压成形; 最大减薄率; 灰色关联度; 响应曲面法; Design Exper 软件; 拉延筋

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2016)06-0010-05

Optimization of Anomaly Box-Shaped Product Forming Based on RSM and Gray Relational Analysis

XIONG Wentao¹, LIU Hongbin¹, HUO Shouping²

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;

2. College of Mechatronic Engineering, Yunnan Open University, Kunming 650223, China)

Abstract: Based on gray relational analysis and RSM model, simulate analysis on the stamping process of a certain type of anomaly box-shaped product was proposed by using the finite element analysis software of Dynaform. The orthogonal was used to design to get the combinations in different parameter. Based on the gray relation theory the data were obtained from last step to get the mainly factors influencing the ratio of thinning, which included the blank holder force and drawbead restraining force. According to the central composite design (CCD) and RSM, the optimization target and the two regression model of main influencing factors was established. Setting the objective function of sheet forming by the curves of FLD can, the optimal drawing resistance and blank holder force were acquired easily. The numerical simulation results show that the optimized parameters can effectively improve the formability and quality of sheet metal.

Key words: metal forming; maximum thinning rate; gray relational analysis; respond surface method (RSM); Design Exper software; drawbead

金属板料塑性成形是制造技术的一个非常主要的方法, 在制造领域中应用越来越广泛^[1]。一般来说, 增大压边力可以避免起皱, 但是会使零件被拉裂的几率增加, 影响板料成形质量; 如果压力过小, 虽然不会拉裂, 但是板料容易起皱, 同样会影响板料成形质量^[2]。在实验分析中, 加大等效拉延阻力和压边力可

以得到令人满意的拉延效果, 但同时也势必增大最大减薄率, 导致拉裂的几率增大; 减小等效拉延阻力和压边力可以保证较低的减薄率, 但是, 拉延效果较差。

基于此, 本文以非标准盒形制件的成形过程为研究对象, 试图求得最优的加工工艺参数以保证在最大减薄率允许范围内得到最好的拉延效果。

收稿日期: 2016-05-17; 修回日期: 2016-06-27

基金项目: 昆明理工大学学生课外学术科技创新基金(2015YB017)。

作者简介: 熊文韬(1991), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字化设计与制造。E-mail: 417180627@qq.com

首先,利用正交试验法确定在不同因素,不同水平组合下各个因素的最大减薄率值;再利用灰色关联度分析法确定出相对于板料减薄率的主要影响因素,即等效拉延阻力系数和压边力两个因素;利用试验设计 (design of experiment, DOE) 和响应面设计 (response surface methology, RSM) 两种方法,对本非标准盒形件拉延成形进行数值模拟仿真分析,以实现拉延工艺成形参数与减薄率之间的二阶响应面模型;最终实现成形工艺参数的优化。

1 响应曲面模型设计

作为非线性回归的试验设计方法的响应曲面法是将数学模型和统计学原理相结合,其本质在于建立相应模型并试图找出该模型中多个独立变量相对于一个响应指标影响程度的方法。响应曲面法利用经验回归模型去逼近模型中输入和输出之间的关系。在工程实际作业中,一般使用经验模型来描述这种现象的发展规律^[3]。

由于具有线性项、二次项和交叉项,二阶响应面模型应用最为广泛,相比人工神经网络等其他方法,其设计响应与变量的相关程度的体现上精确程度更高^[4-5]。

选择多项式 $1, x_i, x_i x_j, \dots, x_i^n$ 作为基数列,构建如式(1)所示的响应面模型:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \dots + \varepsilon \quad (1)$$

式中: β_0 为常数项, $\beta_i, \beta_j, \beta_{ij}, \beta_{ii} \dots$ 分别为模型回归系数; x_i, x_j 为模型试验因素; \hat{y} 为回归的预测值; ε 为模型随机误差,服从正态分布,记为 $N(0, \sigma)$ 。

2 模型选取与主要影响因素确定

2.1 模型选取

如图1所示为非标准盒形件的有限元模型,由于该零件为对称体,为减小运算时间取其中对称面。单元选择 BT (belytschko-tsay) 壳单元^[6]。板料厚度为 1.5 mm,材料相关性能参数如表1所示。

表1 所选材料力学性能

弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	各向异性系数		
			R_0	R_{45}	R_{90}
207	0.28	330	1.73	1.35	2.18

2.2 正交试验设计

在冲压成形过程中,起皱和侧壁拉裂是2个主要的缺陷。而减薄可以直观的反映出板料成形过程中是否拉裂。正交试验法获得在各因素不同水平值下的减

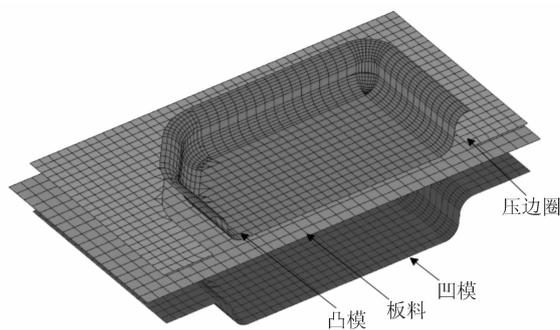


图1 非标准盒型件有限元模型

Figure 1 Finite element model of non-standard box thinning rate, which is used as the basis for determining the correlation degree of each factor to the maximum thinning rate.

薄率值,以其作为灰色关联度确定各因素对最大减薄率的关联度大小的数据基础。板料冲压成形主要的工艺参数有压边力、摩擦因数、冲压速度和等效拉延阻力等。这些工艺参数设置的主要目的是为了控制进料阻力,确保板料在冲压过程中金属流动均匀,从而减少起皱和局部破裂的发生^{[7] 46}。

压边力取值和压边圈单边间隙可通过参考文献[8]中压边力计算公式和单边间隙公式确定;摩擦因数的选择标准基于参考文献[9];冲压速度一般是参照实际需要确定,具体值如表2所示。根据经验公式可得等效拉延筋的等效拉延阻力为 437.5 N/mm,改变等效拉延筋的阻力系数可以控制拉延筋阻力值的大小。由参考文献[10],将拉延筋阻力系数的优化范围设定为 35% ~ 55%。

本文设定压边力、摩擦因数、冲压速度和等效拉延阻力为4个因素并分别设定5个水平。4因素5水平的正交试验表如表3所示。

表2 正交试验各因素及水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	压边力 A/kN	摩擦因数 B	冲压速度 C/ (mm · s ⁻¹)	等效拉延阻力系数 D/%
1	85	0.050	3 500	35
2	95	0.065	4 000	40
3	105	0.080	4 500	45
4	115	0.105	5 000	50
5	125	0.125	5 500	55

图2所示为拉延筋的布置方式。由于双重拉延筋的压筋力、夹持力明显大于单筋的2倍,在现有实验中也表明其拉延阻力也超过了单筋的2倍。又因为试验中发现在该零件的圆角处的起皱较为严重,所以在图2中I处设置双重拉延筋。

表3 正交试验方案结果
Table 3 Results of orthogonal tests

试验号	因素				减薄率/%
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	20.915
2	1	2	2	2	23.038
3	1	3	3	3	24.646
4	1	4	4	4	26.920
5	1	5	5	5	30.454
6	2	1	2	3	24.962
7	2	2	3	4	26.801
8	2	3	4	5	30.930
9	2	4	5	1	22.738
10	2	5	1	2	24.781
11	3	1	3	5	30.303
12	3	2	4	1	21.828
13	3	3	5	2	23.566
14	3	4	1	3	26.975
15	3	5	2	4	29.971
16	4	1	4	2	23.252
17	4	2	5	3	25.508
18	4	3	1	4	28.382
19	4	4	2	5	34.275
20	4	5	3	1	24.018
21	5	1	5	4	27.561
22	5	2	1	5	32.199
23	5	3	2	1	22.711
24	5	4	3	2	25.508
25	5	5	4	3	28.471

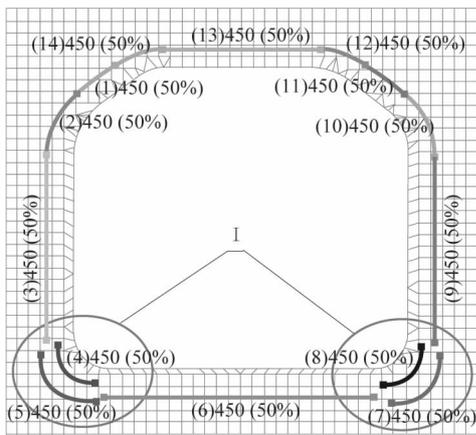


图2 拉延筋布置

Figure 2 Arrangement of drawhead

2.3 灰色关联度分析

在灰色系统中,关联度用来确定事件之间、因素之间在动态发展中态势的不确定关联。关联度越大,因素之间的相似程度就越大;关联度越小,则相似程度越

小^[12]。通过前人的研究可知,将灰色关联度分析运用到金属板料成形的稳健设计中,能够显明地提高板料的成形性能^{[7]45}。

设有序列

$$x = (x(1), x(2), \dots, x(n))。 \quad (2)$$

数据变换公式

$$f(x(k)) = \frac{x(k) - \min_k x(k)}{\max_k x(k) - \min_k x(k)} = y(k)。 \quad (3)$$

设经过数据变化公式(3)后有基准数列 $x_0 = \{ x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n \}$, 设有 m 个目标数列 $x_i = \{ x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n \}, i = 1, 2, \dots, m$, 则目标数列 x_i 对基准数列 x_0 在 k 时刻的关联系数为

$$\xi_i = \frac{\min_r \min_t |x_0(t) - x_r(t)| + \rho \max_r \max_t |x_0(t) - x_r(t)|}{|x_0(t) - x_i| + \rho \max_r \max_t |x_0(t) - x_r(t)|}。 \quad (4)$$

式中 ρ 为分辨系数,一般取值为 0.5。称式(4)中 $\min_r \min_t |x_0(t) - x_r(t)|, \max_r \max_t |x_0(t) - x_r(t)|$ 分别为 2 级最小差及 2 级最大差。

其中,式(4)定义的关联系数用于比较数列与参考数列在特定时刻关联程度的一种指标,由于不同的时刻都有一个关联数,导致信息过于分散,不利于比较,因此给出比较数列相对于参考数列系数的关联度

$$R_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)。 \quad (5)$$

R_i 越大,表示比较数列与参考数列越接近。同时,关联度大小也能说明比较数列对参考数列的相对影响程度。

由于摩擦因数、冲压速度、压边力以及拉延筋阻力对板料成形过程中的减薄率都有不同程度的影响,所以,利用灰色关联度来分析并确定摩擦因数、冲压速度、压边力以及拉延筋阻力对减薄率的影响程度。

将表3中所得的25组最大减薄率作为参考数列,25组试验对应的水平值作为比较数列,代入式(3)~(5),利用MATLAB软件求解可得表4所示的各因子相对于最大减薄率的关联程度。由表4可知等效拉延阻力和压边力为影响该零件减薄率最为显著的2个因素,其次分别为摩擦因数和冲压速度。

表4 各个因子对减薄率的关联度

Table 4 Correlation degree of each factor to thinning rate

因素	关联度	因素	关联度
A	0.620 2	C	0.602 7
B	0.607 2	D	0.764 9

3 基于二阶响应面的成形参数优化

3.1 目标函数建立

在实际冲压成形过程中,拉裂,起皱,回弹为3大难题^[13-14]。本文主要考虑与板料成形相关的拉裂和起皱两大成形缺陷。

在有限元分析中,成形极限图(forming limit diagram, FLD)常用于判断板料成形的破裂和起皱缺陷,据此,在FLD中定义的拉裂和安全起皱曲线:

$$\varphi(\varepsilon_2) = \Phi(\varepsilon_2) - s;$$

$$\psi(\varepsilon_2) = -\tan(45^\circ + \theta)\varepsilon_2。$$

式中: s, θ 分别为拉裂安全裕度和起皱安全裕度, ε_2 为次应变,一般情况下取 $s=0.1$ 。图3中, $\omega(\varepsilon_2)$ 为起皱曲线。当 $i=e$ 时,即主应变为 ε_1^e ,次应变为 ε_2^e 时,所对应拉裂曲线值分别为 $\varphi(\varepsilon_2^e), \Phi(\varepsilon_2^e)$,而 s 值保持不变。

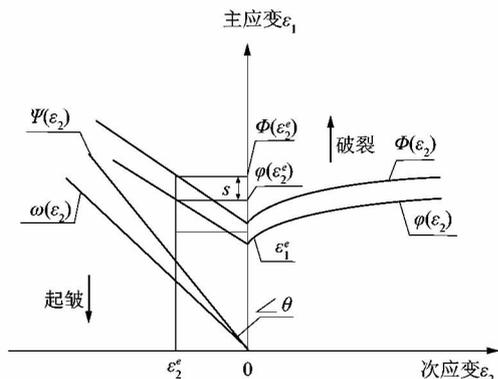


图3 FLD成形极限曲线图

Figure 3 Limit curve diagram of FLD forming

如图3所示,基于FLD成形极限曲线可定义板料成形目标函数如下:

$$\min(\varepsilon) = (\beta_1 \sum_{i=1}^M d_c + \beta_2 \sum_{i=1}^M d_w)^{1/2};$$

$$d_c = \begin{cases} (\varepsilon_1^i - \varphi(\varepsilon_2^i))^2 & \varepsilon_1^i > \varphi(\varepsilon_2^i), \\ 0 & \varepsilon_1^i \leq \varphi(\varepsilon_2^i); \end{cases}$$

$$d_w = \begin{cases} (\psi(\varepsilon_2^i) - \varepsilon_1^i)^2 & \varepsilon_1^i < \omega(\varepsilon_2^i), \\ 0 & \varepsilon_1^i \geq \omega(\varepsilon_2^i). \end{cases}$$

式中: ε_1 为主应变; ε_2 为次应变; M 为板料的有限元单元总数; d_c 为拉裂指标; d_w 为起皱指标; β_1, β_2 为权值,要求 $\beta_1 + \beta_2 = 1$ 。由于板料的破裂和起皱问题同等重要, β_1, β_2 分别取值为0.5。

3.2 基于响应曲面的参数优化与验证

中心复合设计(central composite design, CCD)能够在方向上为试验提供一致的精确度估算,且恰当的中心复合设计点能够提供精度一致或正交的设计,从

而能够得到试验的最优点。本文采用CCD设计来建立回归模型从而使模型的检验有了可靠依据^[15-18]。

由2.3小节可知,本例中拉延筋阻力和压边力为影响减薄率大小以及板料起皱程度的2个主要因素。结合CCD法令等效拉延阻力和压边力为响应面的2个输入值,输出值为成形评价结果。由式(1)可知,通过实验设计,设计变量的压边力和拉延筋阻力建立的响应模型如下:

$$y = 101.845360 - 0.361850x_1 - 3.526320x_2 + 0.012006x_1x_2 - 2.6146 \times 10^4 x_1^2 + 0.033499x_2^2。$$

式中: x_1, x_2 分别代表压边力和等效拉延阻力。

如图4所示,残差正态分布基本上呈现直线状态,表明本模型拟合的准确性较高。

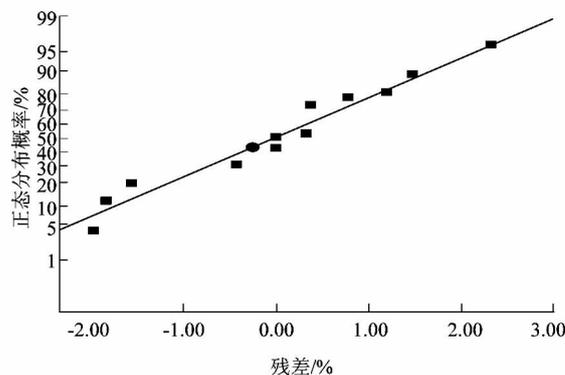


图4 残差正态分布图

Figure 4 Normal plot of residuals

通过该方法,可以求得等效拉延阻力系数为39.34%和压边力为109.75 kN时目标函数最优。

在保证其他工艺参数不变,将最优解(压边力109.75 kN和等效拉延阻力39.34%)输入Dynaform中进行仿真校验。可得到该零件的成形极限FLD图和厚度分布云图,见图5。

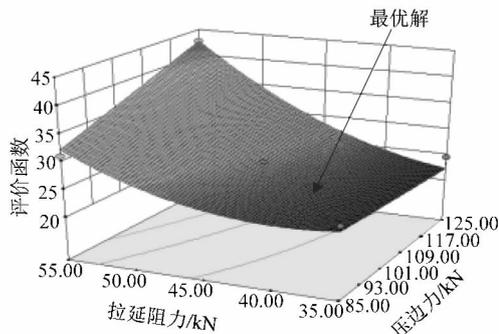


图5 目标函数响应曲面

Figure 5 Response surface of objective function

如表 5 所示,一般认为成型部分最大减薄率不超过 30%,都是可以接受的^[19]。采用该法优化后,优化后的最大减薄率从 43.310% 下降至 28.664%,最大减薄率实现了较大程度上的减小,并且达到了小于 30% 的要求。由图 6 所示的优化前成形图可知在 I 处出现了拉裂,在 II 处有明显的起皱趋势;图 7 所示为优化后的成形图,相对于优化前的拉裂和起皱两大缺陷有了较大改善。

表 5 优化前后最大减薄率对比

Table 5 Comparison of maximum thinning rate before and after optimization

名称	最大减薄率/%
优化前	43.310
优化后	28.664

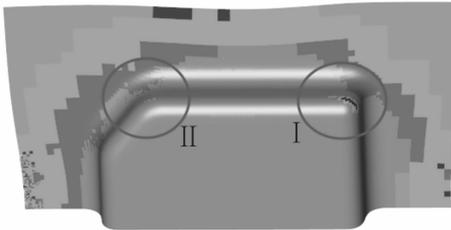


图 6 优化前厚度分布云图

Figure 6 Distribution nephogram of thickness before optimization

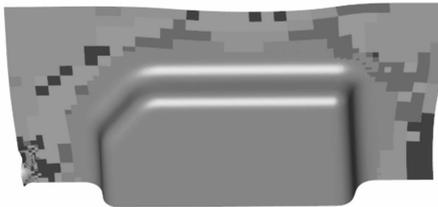


图 7 优化后厚度分布云图

Figure 7 Distribution nephogram of thickness after optimization

4 结语

在金属拉延成形过程中,很有可能出现拉裂、起皱和回弹等缺陷。本文以非标准盒形件为例,以最大减薄率为评定目标,对该零件成形工艺参数进行了优化:

1) 利用正交试验法中的正交表并结合非线性有限元软件 Dynaform,可以较方便地得到在不同因素的不同组合下所对应的减薄率数值,为下一步提供必要的数据基础。

2) 拉延过程中影响板料成形质量的因素较多,为有效获取影响特定零件成形质量的最重要参数,可以结合已获得的数据并利用灰色关联度分析方法准确地

找到影响冲压件在成形过程中最大减薄率的若干主要因素。本文发现等效拉延阻力和压边力是影响非标准盒形件的 2 个主要因素。

3) 合理应用中心复合设计(CCD),可以建立优化目标和主要影响因素的二阶响应面模型。本文得出等效拉延阻力、压边力为参数,最大减薄率作为优化目标的二阶响应面模型。

4) 响应曲面模型可求得多维输入和输出之间的最优解。将此算法和灰色关联度分析法相结合可为解决拉深过程各参数最优化与参数反求问题提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] 钟志华,李光耀.薄板冲压成型过程的计算机仿真与应用[M].北京:北京理工大学出版社,1998:1-5.

[2] 陈康,彭成允.基于工艺参数的球底圆筒形拉深件数值模拟分析[J].热加工工艺,2010,39(19):124-129.

[3] 何桢,潘越,刘子先,等.因子试验、RSM 与田口方法的比较研究[J].机械设计,1999,16(11):1-4.

[4] 王海亮,林忠钦,金先龙.基于响应面模型的薄壁构件耐撞性优化设计[J].应用力学学报,2003,20(3):61-66.

[5] 陈立周.稳健设计[M].北京:机械工业出版社,2000.

[6] BELYTSCHKOT T, LIN J I, CHEN-SHYH T. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells [J]. Compute methods in applied mechanics and engineering, 1984, 42(2): 225-251.

[7] 谢延敏,王新宝,王智,等.基于灰色理论和 GA-BP 的拉延筋参数反求[J].机械工程学报,2013,49(4):46.

[8] 王孝培.冲压手册[M].北京:机械工业出版社,1988:305-310.

[9] 陈炎嗣,郭景仪.冲压模具设计与制造技术[M].北京:北京出版社,1991.

[10] 张剑,陈文亮,鲍益东.基于响应曲面近似模型的拉延筋优化[J].南京航空航天大学学报,2012,44(增刊):97-100.

[11] 金森,吴生富,郭宝锋,等.双重拉深筋力能特性的实验研究[J].中国机械工程,2004,15(4):349-351.

[12] 谢延敏,于沪平,陈军,等.基于灰色系统理论的方盒件拉深稳健设计[J].机械工程学报,2007,43(3):55-58.

[13] 曹爱霞,逯振国,钟佩思,等.基于 Dynaform 的汽车引擎盖外板拉延成形仿真[J].锻压技术,2014,39(12):19-21.

[14] 孙永光,李光耀,郑刚,等.拉延成形多目标序列响应面法优化设计方法[J].力学学报,2010,42(2):249-251.

[15] BOX G E P, DRAPER N R. A basis for the selection of a response surface design [J]. Journal of the American statistical association, 1959, 54(287): 622-654.

[16] MYERS R H. Response surface methodology-current status and future directions [J]. Journal of quality technology, 1999, 31(1): 30-44.

[17] BORKOWSKI J J. A comparison of prediction variance criteria for response surface designs [J]. Journal of quality technology, 2003, 35(1): 70-77.

[18] MYERS R H, MONTGOMERY D C, VINING G G, et al. Response surface methodology: a retrospective and literature survey [J]. Journal of quality technology, 2004, 36(1): 53-77.

[19] 韩玉强,李飞舟.基于 Dynaform 的轿车引擎盖板冲压成形仿真的研究[J].热加工工艺,2010,39(15):96-98.