

汽车隔热罩成形工艺优化及实验

金洁

(安徽电气工程职业技术学院 动力工程系, 合肥 230001)

摘要: **目的** 建立隔热罩工艺参数与成形质量之间的精确关系。**方法** 对一款汽车底盘用隔热罩进行成形仿真, 以压边力、锁模力、摩擦因数、模具间隙为自变量进行四因素四水平的正交试验, 获得材料厚度的最大减薄率。**结果** 利用灰色系统理论, 计算出了成形工艺参数对目标函数的关联系数及关联度, 将优化获得的工艺参数进行了有限元模拟及实验验证。**结论** 成形后的隔热罩质量得到显著提高。

关键词: 隔热罩; 有限元仿真; 正交试验; 灰色系统理论

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.026

中图分类号: TG386 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0171-06

Optimization and Experiment on Forming Process of Automotive Thermal Insulation Part

JIN Jie

(Power Engineering Department of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College, Hefei 230001, China)

ABSTRACT: The paper aims to establish an exact relationship between process parameters and forming quality of thermal shroud. The forming of a thermal shroud was simulated to obtain the maximum thinning rate of material with a designed orthogonal test of four factors and four levels with blank holder force, clamping force, friction coefficient, die interval as independent variables during such simulation. Based on the grey system theory, the correlation coefficient and correlation degree of the forming process parameters to the objective function were calculated. Finite element simulation and experimental verification of the optimized process parameters were also carried out. The quality of thermal shroud is improved obviously after forming.

KEY WORDS: thermal shroud; finite element simulation; orthogonal test; gray system theory

汽车隔热罩是指安装在发动机周围和底盘排气系统上方的零部件, 能够有效隔绝热量传递, 降低发动机、底盘周围及驾驶室内的温度, 具有保护发动机及底盘附近电子元件正常工作, 提升驾乘舒适度的作用。由于隔热罩的设计安装需要配合排气系统与底盘形状结构, 隔热罩整体尺寸较大且自由曲面较多, 具有高度起伏变化明显的特征, 成形时局部容易出现起皱和拉延开裂等缺陷。采用有限元仿真技术, 可以有效预估隔热罩拉延成形过程可能出现的缺陷, 分析结果可用于指导模具的设计开发, 能够有效降低产品的开发费用, 缩短产品开发周期^[1-2]。

文中选取的零件为一款汽车底盘排气系统用隔

热罩, 实物见图1, 结合有限元软件对该隔热罩的拉延成形过程进行分析, 并依据正交试验和灰色系统理

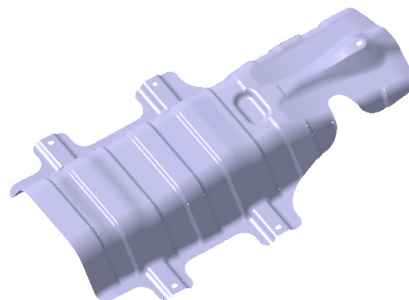


图1 隔热罩零件

Fig.1 Thermal insulation part

收稿日期: 2017-06-27

作者简介: 金洁(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为材料加工工程。

论对工艺参数进行优化^[3-6], 获得隔热罩成形质量较好的工艺参数优化组合, 为实际生产提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 几何模型

采用三维造型软件 Catia 对扫描得到的模型云图进行修整, 而后导入到 Dynaform 软件进行前处理相关设置。为了提高模型的计算精度, 划分网格时单元尺寸最大值为 3 mm, 最小值为 0.5 mm, 弦高为 0.15 mm, 并对划分后的网格进行了单元法向一致性检查、重叠单元与节点检查以及模型边界线完整性检查, 确保网格单元的有效性。通过偏置生成凸模和压边圈, 最终建立的隔热罩拉伸有限元仿真模型见图 2, 成形过程设置凸模、凹模、压边圈为刚性体, 板料设置为弹塑性体^[7-9]。

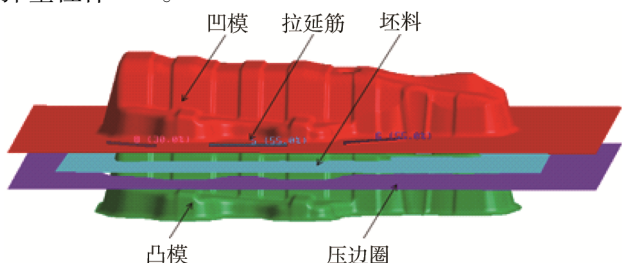


图2 隔热罩冲压有限元模型

Fig.2 The finite element model of stamping thermal insulation part

1.2 材料模型

AA1050 铝合金具有较高的可塑性、耐腐蚀性能, 容易承受各种压力加工和弯曲、拉伸等工艺过程, 能够成形拉伸深度大、结构复杂的金属板材零件, 文中所研究的汽车用隔热件是安装在汽车底盘和发动机周围的零部件, 主要起隔热作用, 而非承载载荷件, AA1050 铝合金能够满足使用要求。基于此, 拟选择 0.7 mm 厚的 AA1050 铝合金作为研究对象, 进行隔热罩的拉伸成形, 其弹性模量为 60 GPa, 密度为 2700 kg/m³, 泊松比为 0.33, 屈服强度为 89.3 MPa, 所选材料对应室温下的应力-应变曲线见图 3。

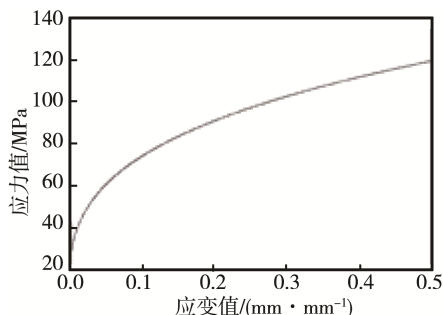


图3 铝合金 AA1050 应力-应变曲线

Fig.3 Aluminum alloy AA1050 stress-strain curve

2 工艺参数对成形质量的影响

2.1 压边力

冲压成形过程中, 压边力的大小是影响冲压件成形质量的主要因素之一。过大的压边力会造成坯料和模具之间的摩擦力过大, 从而造成冲压过程中的阻力过大, 使材料向凹模内流动困难, 导致隔热罩的拉伸开裂, 同时也会造成模具寿命的缩短甚至损坏; 过小的压边力则会使坯料与模具之间的摩擦力过小, 板料向凹模内流动较为容易, 局部区域会产生起皱, 实际生产过程控制合理的压边力大小, 有利于获得成形质量较好的隔热罩零件^[10-13]。不同压边力下的成形极限见图 4, 随着压边力的增加, 隔热罩表面的未变形区减少, 零件的成形质量得到提高。

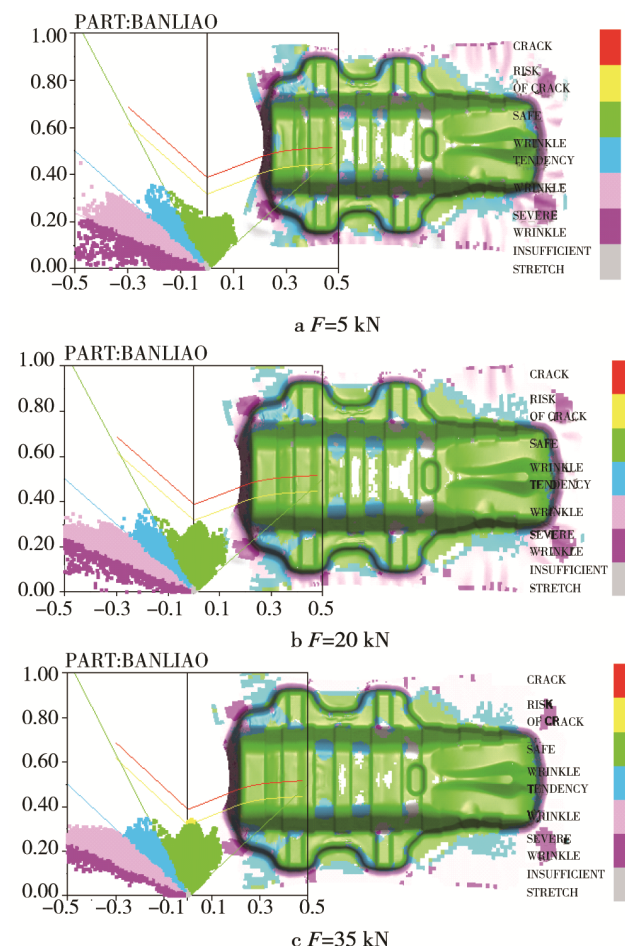


图4 不同压边力下的隔热罩成形极限

Fig.4 The thermal insulation part forming limit under different blank holder force

2.2 锁模力

拉伸筋的设置一方面可以改变板料在凹模部分的拉伸阻力分布, 提高材料的变形程度, 减小板料起皱倾向, 另一方面可以降低冲压过程中对压边力的要求, 进而扩大了压力的调节范围, 提高了冲压的稳定

性^[14—15]。不同锁模力下的隔热罩成形极限见图 5，拉伸筋锁模力较小时，零件中存在着较大面积的未充分变形区域和起皱区，成形质量较差。随着拉伸筋锁模力的增大，隔热罩的成形效果得到很大程度地改善，表面未充分变形区明显减少，起皱区得到消除。

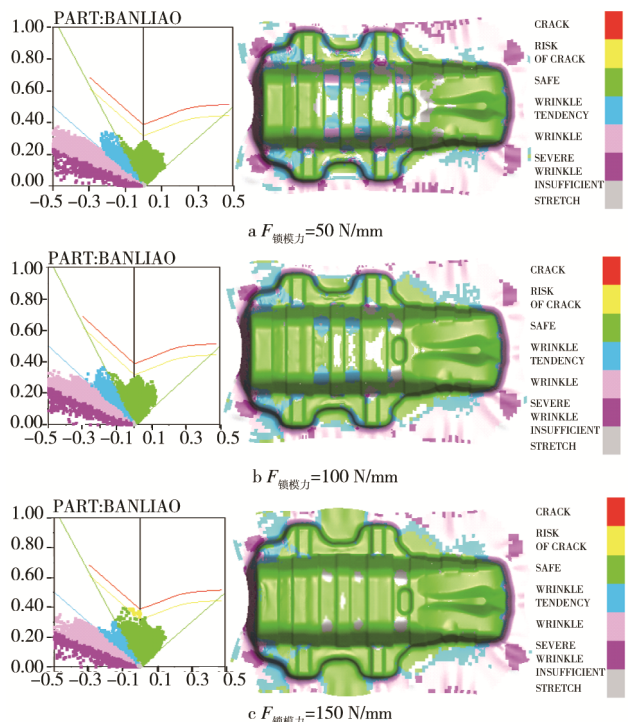


图 5 不同锁模力下的隔热罩成形极限
Fig.5 The thermal insulation part forming limit under different clamping force

3 优化设计

3.1 正交试验设计

正交试验能够以较少的试验次数、较短的试验周期和较低的试验费用得到满意的结果，是一种高效便捷的工艺参数优化方法^[16]。在隔热罩有限元模拟过程中，设计正交试验时以拉伸筋锁模力、压边力、摩擦因数、模具间隙为因素，以板材厚度的最大减薄率为定量指标，破裂情况和未变形区域的多少为定性指标，得到四因素四水平的 16 组正交试验。正交试验的因素及水平见表 2，其中 t 为板材厚度，各组实验结果见表 3。

通过极差分析可知， R 值从大到小的顺序为： $F_{\text{锁模力}} > F_{\text{压边力}} > \text{摩擦因数 } \mu > \text{模具间隙}$ 。拉伸筋锁模力对应的极值 R 最大为 28.074，为主要影响因素，表明该参数对隔热罩成形质量的影响程度最大。依据判断隔热罩成形质量好坏的试验指标，选出 2 组优选组

合，可知隔热罩表面的未变形区及起皱区较少，隔热罩成形质量得到优化，对应的隔热罩成形极限见图 6。

A 组： $F_{\text{锁模力}}=100\text{ N/mm}$ 、 $F_{\text{压边力}}=15\text{ kN}$ 、摩擦因数 $\mu=0.10$ 、模具间隙为 0.805 mm ，最大减薄率为 20.763% 。

B 组： $F_{\text{锁模力}}=100\text{ N/mm}$ 、 $F_{\text{压边力}}=20\text{ kN}$ 、摩擦因数 $\mu=0.08$ 、模具间隙为 0.84 mm ，最大减薄率为 20.932% 。

3.2 灰色系统理论

基于灰色系统理论的目标优化计算，关键是需要求出目标与工艺参数之间的关联系数，以及考虑权重的目标函数关联度。关联度最大值对应的工艺参数即为最优值。设基准矢量序列 $X_0=\{x_0(k), k=1,2,\dots,n\}$ ，目标矢量序列为 $X_i=\{x_i(k), k=1,2,\dots,n\}$ ， $i=1,2,\dots,m$ ， m 为目标矢量的个数， ρ 为分辨系数，一般取 0.5 。

$$\xi(x_i(k), x_0(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_i(k) - x_0(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|}{|x_i(k) - x_0(k)| + \rho \max_i \max_k |x_i(k) - x_0(k)|} \quad (1)$$

目标矢量序列 X_i 对于基准序列 X_0 的关联度见式 (2)。

$$\gamma(X_i, X_0) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \lambda_k \xi(x_i(k), x_0(k)) \quad (2)$$

式中： λ_k 为权重。经过计算可得到隔热罩冲压成形的工艺参数优化组合，获得成形质量较优的隔热罩零件。

由灰色系统理论可知，关联度越大，其对应的目标序列越接近最优值。计算得到各成形参数的平均关联度见表 5。分析可知，对灰色关联度影响最大的参数是压边力为 25 kN ，锁模力为 100 N/mm ，摩擦因数为 0.08 ，模具最终闭合间隙为 0.735 mm ，为一组最优化工艺参数组合。

采用优化成形工艺参数进行数值模拟，优化后隔热罩的成形极限见图 7。相比较于优化前，隔热罩整体成形质量较好，零件上表面未变形区面积明显减少，边缘处少量的起皱区域通过后续切边可以得到消除，不影响零件使用。

表 2 正交试验因素与水平				
Tab.2 The factors and level of sortogonal test				
水平	$F_{\text{锁模力}} / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$F_{\text{压边力}} / \text{kN}$	摩擦因数 μ	模具间隙/mm
1	80	15	0.08	$1.05t$
2	100	20	0.10	$1.10t$
3	120	25	0.12	$1.15t$
4	140	30	0.14	$1.20t$

表 3 正交试验数值模拟结果
Tab.3 The numerical simulation results of orthogonal test

$L_{16}(4^4)$	$F_{\text{锁模力}}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$F_{\text{压边力}}/\text{kN}$	摩擦因数 μ	模具间隙/mm	破裂情况	最大减薄率/%	未变形区域
1	80	15	0.08	0.735	无	17.093	很多
2	80	20	0.10	0.77	无	19.796	很多
3	80	25	0.12	0.805	无	19.734	很多
4	80	30	0.14	0.84	左侧(微量)	24.224	很多
5	100	15	0.10	0.805	无	20.763	较少
6	100	20	0.08	0.84	无	21.932	较少
7	100	25	0.14	0.735	左侧(微量)	21.587	很少
8	100	30	0.12	0.77	无	22.550	很少
9	120	15	0.12	0.84	侧壁(微量) (拉伸筋处裂)	35.843	无
10	120	20	0.14	0.805	侧壁(微量) (拉伸筋处裂)	36.340	无
11	120	25	0.08	0.77	无(拉伸筋处裂)	31.568	很少
12	120	30	0.10	0.735	侧壁(微量)(拉伸筋处裂)	36.328	无
13	140	15	0.14	0.77	侧壁(较多)(拉伸筋处裂)	42.638	无
14	140	20	0.12	0.735	侧壁(微量)(拉伸筋处裂)	53.617	无
15	140	25	0.10	0.84	无(拉伸筋处裂)	49.997	无
16	140	30	0.08	0.805	无(拉伸筋处裂)	46.892	无
K_1	20.212	29.804	29.371	32.156			
K_2	21.708	32.921	31.721	29.138			
K_3	35.020	30.721	32.936	30.932			
K_4	48.286	32.498	31.197	32.999			
极差	28.074	3.837	3.565	2.385			

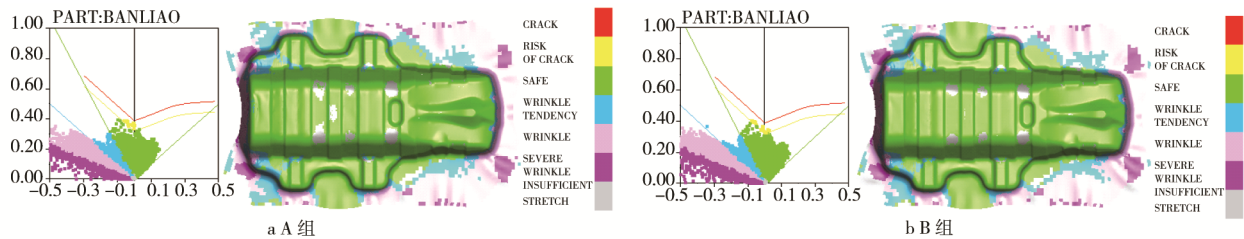


图 6 正交试验优选组合条件下的成形极限
Fig.6 The forming limit under the condition of optimal combination of orthogonal test

表 4 灰色关联度
Tab.4 Gray correlation

实验序号	相关系数 1	相关系数 2	灰色关联度	实验序号	相关系数 1	相关系数 2	灰色关联度
1	1.000	0.858	0.465	9	0.493	0.382	0.219
2	0.871	0.633	0.376	10	0.487	0.361	0.212
3	0.874	0.564	0.360	11	0.558	0.631	0.297
4	0.719	0.398	0.279	12	0.487	0.414	0.225
5	0.833	0.699	0.383	13	0.417	0.333	0.188
6	0.791	1.000	0.448	14	0.333	0.356	0.172
7	0.803	0.706	0.377	15	0.357	0.596	0.238
8	0.770	0.548	0.330	16	0.380	0.460	0.210

表 5 自变量对目标函数的平均关联度
Tab.5 Average correlation between independent variables and objective function

$F_{\text{压边力/kN}}$	平均关联度	$F_{\text{锁模力/(N}\cdot\text{mm}^{-1})}$	平均关联度	摩擦因数 μ	平均关联度	模具间隙/mm	平均关联度
15	0.313	80	0.370	0.08	0.355	0.735	0.310
20	0.302	100	0.384	0.10	0.306	0.770	0.298
25	0.318	120	0.238	0.12	0.270	0.805	0.291
30	0.261	140	0.202	0.14	0.264	0.840	0.296

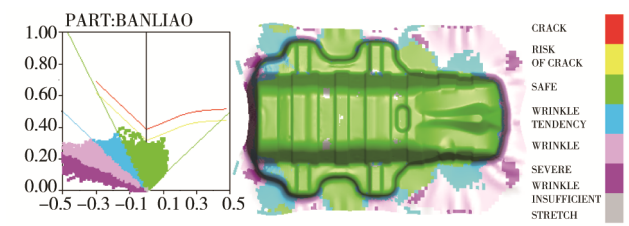


图 7 优化后的成形极限
Fig.7 Optimized forming limit

4 实验验证

以模拟分析结果为指导，结合实际的生产条件，制作相应的模具，在 315 t 压机上进行隔热罩的拉伸成形实验。完成的隔热罩零件见图 8，隔热罩成形质量较好，无明显的起皱和开裂现象，验证了工艺参数优化设计满足实际生产要求。



图 8 315 t 液压机和成形后的隔热罩零件
Fig.8 315 t hydraulic press and thermal insulation part after-forming

5 结论

1) 建立隔热罩成形仿真有限元模型，通过计算可知压边圈和拉伸筋的设置可以明显减少隔热罩表

面未变形区和起皱区域，改善隔热罩成形质量。
2) 正交试验结果表明，拉伸筋锁模力对隔热罩厚度最大减薄率的影响最为显著，控制合理的拉伸筋锁模力有利于获得成形质量较好的隔热罩零件。
3) 基于灰色系统理论，通过对目标函数关联系数和关联度的计算，获得各成形工艺参数的平均关联度，得到隔热罩成形工艺参数的最优组合为：压边力为 25 kN，锁模力为 100 N/mm，摩擦因数为 0.08，模具最终闭合间隙为 0.735 mm。
4) 数值仿真和隔热罩成形实验表明，运用优化的成形工艺参数组合对隔热罩的成形过程进行控制，可得到成形质量较优的隔热罩零件，该方法在薄板材的成形设计中具有实际应用价值。

参考文献：

[1] 邵燃. 基于正交试验的高强度板料回弹影响因素分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(7): 142—143.
SHAO Ran. Analysis of Factors Affecting Springback of High Strength Based on Orthogonal Experiment[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(7): 142—143.
[2] 朱晶, 杜坤, 贾维平, 等. 5052 铝合金板材室温冲压成形性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(19): 1—4.
ZHU Jing, DU Kun, JIA Wei-ping, et al. The Study of Forming Performance of 5052 Aluminum Alloy Stamping Sheet at Room Temperature[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(19): 1—4.
[3] 孔炎, 薛克敏, 李萍, 等. 基于正交试验和灰色系统理论的高强钢厚板折弯优化成形模拟及实验[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 11—14.
KONG Yan, XUE Ke-min, LI Ping, et al. Orthogonal Test and Gray System Theory of High Strength Steel Plate Bending Forming Simulation and Optimization Based on Experiment[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(5): 11—14.
[4] 谢延敏, 于沪平, 陈军, 等. 基于灰色系统理论的方盒件拉伸稳健设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(3): 54—59.
XIE Yan-min, YU Hu-ping, CHEN Jun, et al. Robust Design of Grey System Theory Based on Square Box Drawing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 54—59.
[5] 赵茂俞, 薛克敏, 李萍. 多目标质量的覆盖件成形工艺

- 参数优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 276—282.
- ZHAO Mao-yu, XUE Ke-min, LI Ping. Multi Objective Quality Panel Forming Process Parameters Optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 276—282.
- [6] 谢艳敏, 王智, 胡静, 等. 基于数值仿真和灰色关联分析法的高强钢弯曲回弹影响因素分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 51—55.
- XIE Yan-min, WANG Zhi, HU Jing, et al. Analysis of Factors Influencing Bending Springback of High Strength Steel by Numerical Simulation and Analysis Based on Grey Correlation[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2012, 26(3): 51—55.
- [7] MURALI G, GOPAL M, RAJADURAI A. Effect of Circular and Rectangular Drawbeads in Hemispherical Cup Forming: Finite Element Analysis and Experimental Validation[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2012, 37(6): 1701—1709.
- [8] 夏木建, 章跃, 周广宏, 等. 基于Dynaform的浅锥面拉伸数值模拟[J]. 热加工工艺, 2011, 40(1): 102—104.
- XIA Mu-jian, ZHANG Yue, ZHOU Guang-hong, et al. Numerical Simulation of Shallow Cone Tension Based on Dynaform[J]. Hotworking Technology, 2011, 40(1): 102—104.
- [9] 童德茂, 张华. 基于Dynaform的大厚差板材零件的冷冲锻造成形工艺研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(3): 163—166.
- TONG De-mao, ZHANG Hua. Large Thickness Difference of Dynaform Sheet Cold Stamping Forging Process Based on Dynaform[J]. Hotworking Technology, 2016, 45(3): 163—166.
- [10] 曹爱霞, 逯振国, 钟佩思, 等. 基于Dynaform的汽车引擎盖外板拉伸成形仿真[J]. 锻压技术, 2014, 39(12): 19—21.
- CAO Ai-xiang, LU Zhen-guo, ZHONG Pei-si, et al. Simulation of Drawing Process of Automobile Engine Hood Outer Panel Based on Dynaform[J]. Forging and Stamping Technology, 2014, 39(12): 19—21.
- [11] 徐雅冬, 郭津津. 板材成形数值模拟的过程研究[J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(1): 32—34.
- XU Ya-dong, GUO Jin-jin. Process Study on Numerical Simulation of Sheet Metal Forming[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2008, 24(1): 32—34.
- [12] PADMANABHAN R, OLIVEIRA M C, ALVES J L, et al. Influence of Process Parameters on the Deep Drawing of Stainless Steel[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43: 1062—1067.
- [13] CANDRA S, BATAN I M L, BERATA W, et al. Analytical Study and FEM Simulation of the Maximum Varying Blank Holder Force to Prevent Cracking on Cylindrical Cup Deep Drawing[J]. Procedia Cirp, 2015, 26(5): 548—553.
- [14] 刘普襄, 李湘生, 程松, 等. 基于Dynaform对拉伸筋在板材拉伸中的应用研究[J]. 机械工程师, 2010(6): 51—53.
- LIU Pu-xiang, LI Xiang-sheng, CHENG Song, et al. Study on Application of Drawbead in Sheet Tension Based on Dynaform[J]. Mechanical Engineer, 2010(6): 51—53.
- [15] 徐迎强, 薛克敏, 周结魁, 等. 基于智能优化的汽车内板件回弹控制[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5): 64—69.
- XU Ying-qiang, XUE Ke-min, ZHOU Jie-kui, et al. Intelligent Optimization Car Plate Springback Control Based on Intelligent Optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(5): 64—69.
- [16] 陈龙, 黄璞, 王炯, 等. 基于正交试验和灰色系统理论的拼焊板前纵梁成形优化[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 1—5.
- CHEN Long, HUANG Pu, WANG Jiong, et al. Optimization of Forming of Front Plate of Tailor Welded Blank Based on Orthogonal Test and Grey System Theory[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(4): 1—5.