

# 基于 FEM 的汽车用护罩零件的变压边力冲压技术

王 亚<sup>1,2</sup>

(1. 濮阳职业技术学院 机电与汽车工程学院, 河南 濮阳 457000; 2. 河南大学 濮阳工学院, 河南 濮阳 457000)

**摘要:** 以某车用护罩零件为研究对象, 通过 Deform 有限元软件对定压边力与变压边力两种加载方式对冲压成形的影响进行了研究。综合考虑护罩质量和模具寿命两项指标, 结合灰色关联理论建立了优化目标函数, 同时采用正交试验法, 以上模在 5 个不同位置 (下压 0、10、20、30 和 40 mm) 的压边力大小作为试验变量, 进行了不同水平的试验研究, 并通过极差分析法获得了变压边力的最优加载方式。模拟结果表明: 与定压边力加载方式相比, 变压边力加载方式更利于板料的流动, 出现缺陷的概率更小, 冲压件的成形质量更好, 且相同条件下模具寿命更长, 具体表现为冲压件的最大减薄率降低为 22.85%、最大增厚率降低为 7.85%、成形载荷降低为 488 kN。经冲压试验证明, 护罩零件质量稳定, 可进行批量生产, 最大减薄率和最大增厚率分别为 23.00% 和 8.05%。

**关键词:** 压边力; 正交试验; 灰色关联理论; 最大减薄率; 最大增厚率; 成形载荷

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.007

**中图分类号:** TG386.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0041-06

## Variable blank holder force stamping technology for automotive shield part based on FEM

Wang Ya<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mechatronics and Automotive Engineering, Puyang Vocational and Technical College, Puyang 457000, China;

2. Puyang Institute of Technology, Henan University, Puyang 457000, China)

**Abstract:** For an automotive shield part, the influences of two kinds of loading modes for constant blank holder force and variable blank holder force on stamping were studied by Deform finite element software, and considering the two indexes of shield quality and die life, the optimization objective function was established by combing with grey correlation theory. Then, at the same time, the orthogonal test method was adopted, and the blank holder force of upper die at five different positions (press amount of 0, 10, 20, 30 and 40 mm) was taken as the test variables, the test research at different levels was carried out, and the optimal loading mode of variable blank holder force was obtained by range analysis method. The simulation results show that compared with the constant blank holder force loading mode, the variable blank holder force loading mode is more conducive to sheet metal flow, the probability of defects is smaller, the forming quality of stamping parts is better, and the die life is longer under the same conditions, namely, the maximum thinning rate of stamping parts is reduced to 22.85%, the maximum thickening rate is reduced to 7.85%, and the forming load is reduced to 488 kN. The stamping test shows that the quality of shield parts is stable and can be mass produced, and the maximum thinning rate and the maximum thickening rate are 23.00% and 8.05% respectively.

**Key words:** blank holder force; orthogonal test; grey correlation theory; maximum thinning rate; maximum thickening rate; forming load

汽车上 60% 的零件均是通过板料冲压获得的, 冲压工艺与其他塑性加工方法相比, 操作简便, 机械自动化程度高, 对各类产品的适用性强、生产快捷、冲压产品质量稳定、精度好, 同时材料利用率高, 能够达到近净成形的要求<sup>[1-3]</sup>。但由于板料在

冲压过程中受到弯曲、拉伸、压缩等交互作用, 造成板内应力状态复杂多变, 容易引起厚度失稳, 致使板料出现破裂和起皱<sup>[4-5]</sup>。因而在实际冲压时, 仅凭经验这种“试错”的方式来确定冲压工艺无法保证冲压件的成形质量, 会产生高额的经济浪费, 更可能导致压力设备破坏, 因此采用有限元法 (Finite Element Method, FEM)<sup>[6-7]</sup>这种计算机先进分析技术是非常有必要的, 能够实行对冲压过程的实时把控, 及时反馈问题, 具有一定的可预判性, 并取

收稿日期: 2021-09-08; 修订日期: 2021-12-06

基金项目: 河南省高校创新人才计划 (2021PYCXRC01)

作者简介: 王 亚 (1981-), 男, 学士, 讲师

E-mail: wangya198102@163.com

得了不少的成功案例。如李骁等<sup>[8]</sup>通过对门内板实际试模缺陷及 FEM 分析的研究,制定了更合理的起皱判定规则,仿真与实践互为指导,既提高了模拟预测的准确性,又解决了起皱缺陷。尤彬波等<sup>[9]</sup>通过有限元技术对加强板拐角出现局部开裂、起皱的问题展开了研究,发现其根本原因是工艺补充和产品结构的不合理。蒋磊等<sup>[10]</sup>为改变侧围外板质量不稳定的现状,通过 AutoForm 详细地研究了压边力的加载方式,利用变压边力加载方式弥补了恒定压边力加载方式的不足,解决了开裂问题。吴艳云等<sup>[11]</sup>结合响应面理论和 FEM 分析,通过对板料最大减薄率和最大增厚率变化趋势的认识,基于二次多项式模型进行了合理优化,有效地降低了座椅撑板开裂和起皱的风险。本文通过总结、汲取上述成功经验,借助 FEM 技术,对某车用护罩零件的冲压成形过程进行研究,比较定压边力与变压边力加载方式对护罩成形性的影响,以提高其成形质量。

## 1 产品分析和有限元建模

### 1.1 产品介绍及工艺分析

图 1 为本文研究的车用护罩零件的三维模型图,板料材质为 316 不锈钢,板件厚度为 2 mm,护罩内

部深度为 40 mm,底部有 2 个梯形凸台和 1 个凹坑,通过简单计算可知,护罩的相对高度(护罩拉深后,成形凹坑深度与凹坑最大外形尺寸的比值)仅为 0.194,远小于极限值,确定只需经一次冲压即可成形。根据护罩体积可确认板料的尺寸为 320 mm×320 mm×2 mm,根据式(1)可计算压边力的大小。

$$F = S \cdot q \quad (1)$$

式中: $F$  为压边力, kN;  $S$  为压边面积, mm<sup>2</sup>;  $q$  为单位压边力, MPa。

因为  $q$  通常取值为 3.0~4.5 MPa,因此可确定压边力范围为 130~195 kN。

针对护罩的起皱和破裂问题,本文采用塑性成形软件 Deform 进行冲压仿真研究,虽然模拟结果无法显示起皱现象,并且无法直接获得板件的最大减薄率和最大增厚率的分布情况,但是,可以根据成形后板件厚度的分布情况来计算获得,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{T - T_{\min}}{T} \\ \lambda = \frac{T_{\max} - T}{T} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$  和  $\lambda$  分别为最大减薄率和最大增厚率; $T$ 、 $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别为板料厚度、板件最小厚度和板件最大厚度。

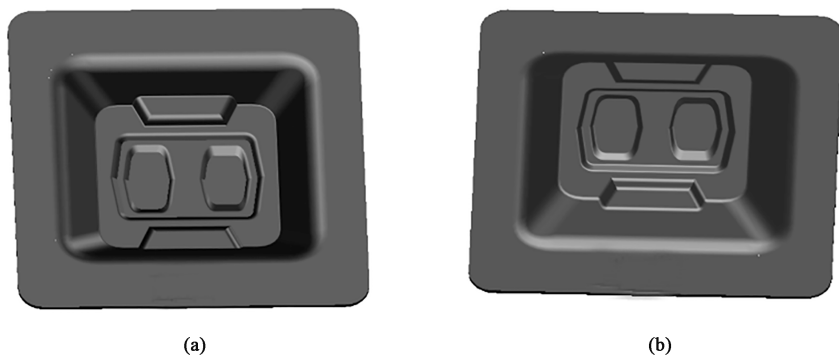


图 1 护罩零件三维模型

(a) 正面 (b) 背面

Fig. 1 3D model of shield part

(a) Front side (b) Back side

### 1.2 有限元建模

利用 UG 完成板料、压边圈、上下模的位置定位,上下模的间隙为 2.15 mm,利用零件的对称性,上模、下模、棒料、压边圈各取 1/4 模型导入至 Deform 软件中,并进行网格划分,上下模型腔局部细化,建模结果如图 2 所示。加载压边力大小按上述计算结果设置,分别以定压边力和变压边力两种加载方式进行模拟。上模为动模,冲压速度为 80 mm·s<sup>-1</sup>。

## 2 优化目标函数的建立

### 2.1 优化因素的确定

对护罩的冲压工艺进行择优时,通常要考虑护罩质量和模具寿命两个方面,其中护罩质量由是否出现起皱和破裂决定,普遍认为当板件的最大减薄率接近 25%时,板件局部位置会由于过多减

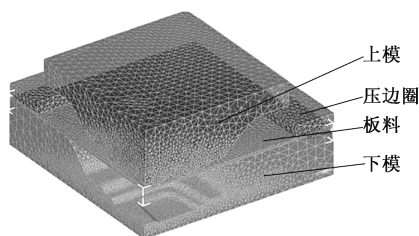


图2 数值建模结果

Fig. 2 Numerical modeling result

薄而出现破裂,当板件的最大增厚率接近 10%时,板件的个别区域会出现叠料而导致起皱<sup>[12]</sup>,因此必须对成形后护罩的最小厚度和最大厚度进行合理控制。而模具寿命与成形载荷通常是呈正相关的,成形载荷越大,模具的摩擦磨损越剧烈,寿命越低。

## 2.2 基于灰色关联理论的优化函数的建立

经上述分析知,本文选取了板件最小厚度  $T_{\min}$ 、最大厚度  $T_{\max}$  以及最大成形载荷  $Q_{\max}$  这 3 个优化对象,而灰色关联度法能较好地用于多对象优化的研究并得到充分证实<sup>[13-14]</sup>,其方法是通过函数模型将

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |x_i^*(k) - x_0^*(k)| + \varphi \max_k \max_i |x_i^*(k) - x_0^*(k)|}{|x_i^*(k) - x_0^*(k)| + \varphi \max_k \max_i |x_i^*(k) - x_0^*(k)|} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \xi_i(k) \quad (6)$$

式中:  $\xi_i(k)$  为优化对象  $i$  对应的灰色关联系数;  $x_0^*(k)$  为基准值,取值为 1;  $\min_k$  为当  $k$  取固定值时,  $|x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  取最小值;  $\min_i$  为当  $i$  取固定值时,  $\max_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  取最小值;  $\max_k$  为当  $k$  取固定值时,  $|x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  取最大值;  $\max_i$  为当  $i$  取固定值时,  $\max_k |x_i^*(k) - x_0^*(k)|$  取最大值;  $\varphi$  为偏差系数,本文取 0.5;  $\gamma$  为关联度;  $m$  取值为 3。

## 3 数值模拟与分析

### 3.1 定压边力加载方式模拟结果

在上述压边力取值范围内取 4 个水平,进行定

优化对象“三合一”,转为关联度的单一优化问题。对优化对象数据进行处理时,由于最小厚度越大越好,所以采用望大模型,如式(3)所示;而最大厚度和成形载荷越小越好,所以采用望小模型,如式(4)所示。

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3)$$

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (4)$$

式中:  $x_i^*(k)$  为优化对象  $i$  模型处理后的数据,  $i=1, 2, \dots, m$ ;  $m$  为优化对象的个数;  $x_i^0(k)$ 、 $\max x_i^0(k)$ 、 $\min x_i^0(k)$  分别为优化对象  $i$  有限元模拟获得的数据以及最大、最小数据;  $k$  为模拟试验方案序号,  $k=1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为模拟试验方案个数。

通过式(5)可以计算获得各优化对象对应的灰色关联系数(Gray Relational Coefficient, GRC),由于最小厚度、最大厚度、成形载荷对冲压工艺而言均非常重要,因此所占权重比相同,故取各优化对象灰色关联系数的平均值为关联度,具体如式(6)所示,关联度越大,表示越符合优化要求,工艺越好。

压边力加载方式模拟试验,获得板件的最小厚度  $T_{\min}$ 、最大厚度  $T_{\max}$  及最大成形载荷  $Q_{\max}$  等数据,并通过式(3)~式(6)进行数据处理获得关联度等信息,结果如表1所示。由表1可知,当压边力为 170 kN 时,对应的关联度最大,表示该方案最接近优化目标,为定压边力加载方式中的最优选择。将该组数据带入式(2)中可得,冲压件最大减薄率和最大增厚率分别为 25.7% 和 10.4%,均处于极限边缘,存在破裂和起皱的风险。

### 3.2 变压边力加载方式模拟结果

由于变压边力试验组合较多,因此结合正交试验方式进行研究。选取上模在 5 个不同位置(分别为下压 0、10、20、30 和 40 mm)的压边力大小作为试验

表1 定压边力数据

Table 1 Constant blank holder force data

压边力/kN	$T_{\min}/\text{mm}$	$T_{\max}/\text{mm}$	$Q_{\max}/\text{kN}$	$x_1^*(k)$	$x_2^*(k)$	$x_3^*(k)$	$\xi_1(k)$	$\xi_2(k)$	$\xi_3(k)$	$\gamma$
130	1.532	2.232	576	1.000	0.000	0.324	1.000	0.333	0.425	0.586
150	1.508	2.222	541	0.647	0.179	0.648	0.586	0.379	0.587	0.517
170	1.486	2.208	503	0.324	0.429	1.000	0.425	0.467	1.000	0.631
195	1.464	2.176	611	0.000	1.000	0.000	0.333	1.000	0.333	0.555

变量, 分别定义为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ , 各压边力大小与定压边力一致, 在取值范围内分别取 4 个水平, 建立正交表分别进行模拟试验, 模拟结果及关联度计

算结果如表 2 所示, 关联度最大为试验组 10, 最大减薄率、最大增厚率以及最大成形载荷分别为 23.6%、9.55% 和 498 kN, 各项数值均优于定压边力的最优方案。

表 2 变压边力数据  
Table 2 Variable blank holder force data

试验组	$F_1/\text{kN}$	$F_2/\text{kN}$	$F_3/\text{kN}$	$F_4/\text{kN}$	$F_5/\text{kN}$	$T_{\min}/\text{mm}$	$T_{\max}/\text{mm}$	$Q_{\max}/\text{kN}$	$\gamma$
1	130	130	130	130	130	1.532	2.232	576	0.607
2	130	150	150	150	150	1.518	2.223	544	0.582
3	130	170	170	170	170	1.493	2.210	510	0.602
4	130	195	195	195	195	1.473	2.178	594	0.558
5	150	130	150	170	195	1.524	2.245	608	0.514
6	150	150	130	195	170	1.522	2.203	581	0.592
7	150	170	195	130	150	1.476	2.169	501	0.775
8	150	195	170	150	130	1.487	2.174	602	0.595
9	170	130	170	195	150	1.537	2.204	529	0.765
10	170	150	195	170	130	1.528	2.191	498	0.807
11	170	170	130	150	195	1.534	2.189	558	0.737
12	170	195	150	130	170	1.536	2.194	587	0.706
13	195	130	195	150	170	1.501	2.201	591	0.518
14	195	150	170	130	195	1.487	2.187	710	0.469
15	195	170	150	195	130	1.471	2.182	642	0.501
16	195	195	130	170	150	1.489	2.170	600	0.631

对关联度进行极差计算, 继续对变量组合进行寻优, 结果如表 3 所示, 从极差值可分析出对目标结果影响的排序为:  $F_1 > F_5 > F_3 > F_2 > F_4$ , 即上模下压 0 mm 时 (开始阶段) 的压边力大小最为关键, 而下压 30 mm 时的压边力大小对优化目标的影响最小。同时获得了各阶段压边力的最佳水平组合, 即  $F_1$  为 170 kN,  $F_2$  为 170 kN,  $F_3$  为 195 kN,  $F_4$  为 130 kN,  $F_5$  为 150 kN, 最终确定的变压边力的加载方式如图 3 所示。维持参数设置不变, 导入 Deform 中对护罩的成形过程进行分析, 最终得到的最优条件下的厚度分布图如图 4a 所示, 护罩内部 4 个底角部位的厚度最小, 为 1.543 mm, 最大厚度位于护罩底部拐角区域, 为 2.157 mm, 换算可得冲压件最大减薄率和最大增厚率分别为 22.85% 和 7.85%, 优于表 2 中的各组试验, 出现破裂和起皱的概率极小。其次, 图 4b 中显示出优化后冲压件最大成形载荷仅为 488 kN, 与表 2 中数据相比, 同样明显降低, 变压边力加载方式对模具寿命的提高有一定的帮助。由图 4c 可知, 变压边力加载方式的冲压件不存在应力集中现象, 整体分布均匀性良好,

表 3 关联度的极差计算结果 (kN)  
Table 3 Range calculation results of correlation degree (kN)

变压边力	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
均值 1	0.587	0.601	0.642	0.639	0.627
均值 2	0.619	0.612	0.576	0.608	0.688
均值 3	0.754	0.654	0.608	0.638	0.605
均值 4	0.530	0.623	0.665	0.604	0.570
极差值	0.224	0.053	0.089	0.035	0.118

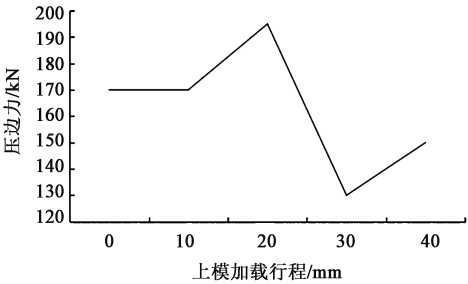


图 3 变压边力的加载方式  
Fig. 3 Loading mode of variable blank holder force

有助于护罩成形质量的提高。

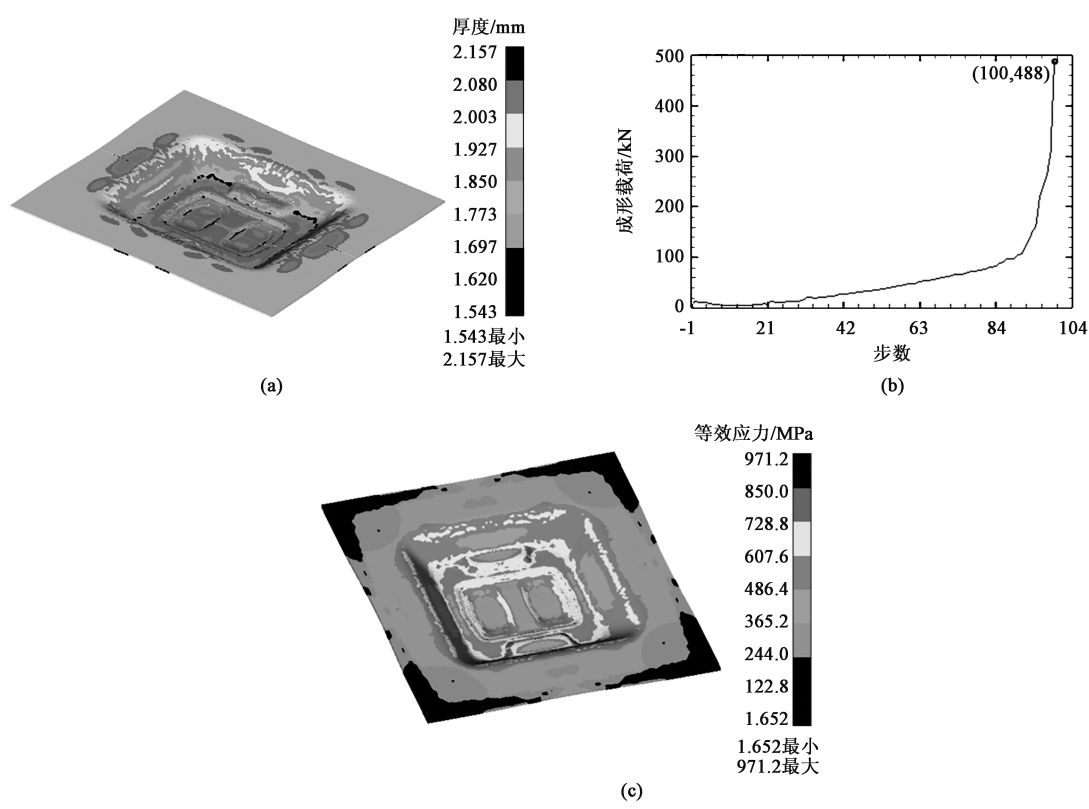


图 4 最优变压边力加载方式下的模拟结果

(a) 厚度分布图 (b) 成形载荷变化图 (c) 等效应力分布图

Fig. 4 Simulation results under optimal variable blank holder force loading mode

(a) Distribution diagram of thickness (b) Variation diagram of forming load (c) Distribution diagram of equivalent stress

4 实验验证

为了证明经 FEM 获得的变压边力加载方式的可靠性，采用 100 t 压力机进行护罩零件的多次冲压试验，变压边力的加载方式采用图 3 所示的加载方式，

切边整形后成形护罩如图 5 所示，所有护罩内部结构均成形充分、均匀，4 个底角部位未出现破裂，同时护罩表面光滑，不存在起皱缺陷。经检验，护罩的最小厚度为 1.540 mm，最大厚度为 2.161 mm，换算可得最大减薄率和最大增厚率分别为 23.00% 和 8.05%，测量结果与上述模拟结果极其接近，充

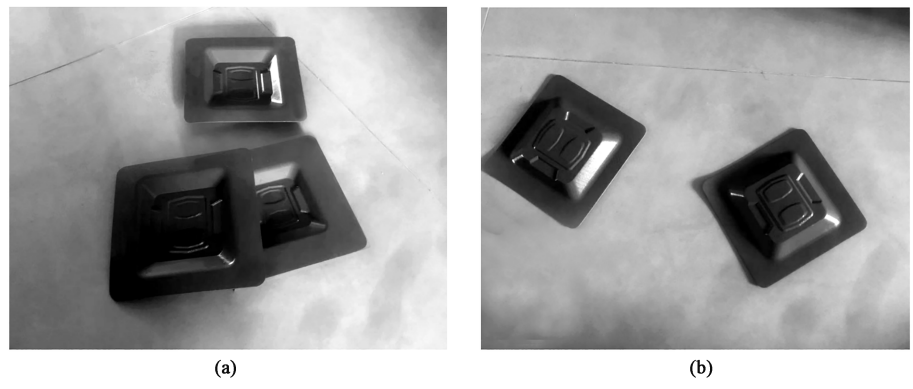


图 5 护罩冲压件

(a) 正面 (b) 背面

Fig. 5 Stamping parts of shield

(a) Front side (b) Back side



分证实了上述分析的正确性。其次,板件的最大减薄和最大增厚结果均在要求范围之内,表明采用变压边力加载方式,能够有效改善护罩的成形质量,减小破裂、起皱风险,目前该冲压工艺已有效应用于护罩板件的生产。

## 5 结论

(1) 以某车用护罩零件为研究对象,通过 Deform 有限元软件研究了定压边力与变压边力两种加载方式对冲压成形的影响,结果表明:变压边力加载方式更利于板料的流动,能够显著降低破裂和起皱的风险,改善护罩的成形质量,且相同条件下模具寿命更长。

(2) 采用灰色关联理论,建立了关于最小厚度、最大厚度、最大成形载荷的目标优化函数,并结合正交试验技术,获得变压边力的最优加载方式,5 个位置的压边力大小分别为 170、170、195、130 和 150 kN。

(3) 通过冲压工艺试验,获得了成形充分、无破裂、起皱缺陷的护罩,证明了变压边力加载方式的可靠性和数值分析的有效辅助性。

### 参考文献:

- [1] 郑家贤. 冲压工艺与模具设计实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
Zheng J X. Practical Technology of Stamping Process and Die Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [2] 谢晖, 黄康, 陈建新, 等. 双层不锈钢消声器壳体冲压工艺 CAE 分析与优化 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (2): 1-8.  
Xie H, Huang K, Chen J X, et al. CAE simulation and optimization of double-layer stainless steel muffler shell stamping process [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (2): 1-8.
- [3] 韩善灵, 王化楠, 王志勇, 等. 压边圈随动无铆冲压连接工艺仿真分析及优化 [J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2021, 40 (2): 103-110.  
Han S L, Wang H N, Wang Z Y, et al. Simulation and optimization of movable blank holder clinching [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2021, 40 (2): 103-110.
- [4] 王军伟, 靳塞特, 蒋妍彦, 等. 436L 不锈钢冲压起皱和颈缩缺陷分析 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (4): 381-383.  
Wang J W, Jin S T, Jiang Y Y, et al. Analysis of stamping wrinkling and necking defects of 436L stainless steel [J]. Foundry Technology, 2020, 41 (4): 381-383.
- [5] 代丽, 朱勇. 汽车侧围外板表面缺陷分析及冲压工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (6): 91-98.  
Dai L, Zhu Y. Surface defect analysis and stamping process optimization on automobile side wall outer panel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (6): 91-98.
- [6] 何光春, 庄凯, 罗征志. 基于 FEM 的微型汽车顶盖冲压成形分析 [J]. 内燃机与配件, 2019, (14): 62-63.  
He G C, Zhuang K, Luo Z Z. The stamp analysis of miniature automobile top cover based on FEM [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019, (14): 62-63.
- [7] 韩艳艳. 基于 FEM 的 7075 铝合金轿车发动机油管接头挤压过程的温度场分析 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (9): 140-142, 146.  
Han Y Y. Analysis of temperature field of 7075 aluminum alloy oil line connector for car engine during extrusion process based on FEM [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (9): 140-142, 146.
- [8] 李骁, 郑松林, 张振华, 等. 汽车门内板冲压成形起皱研究 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (7): 154-158.  
Li X, Zheng S L, Zhang Z H, et al. Wrinkling research on auto inner door in sheet metal stamping forming [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (7): 154-158.
- [9] 尤彬波, 林楷, 谢育涛, 等. A 柱加强板热成形拐角开裂起皱优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 105-110.  
You B B, Lin K, Xie Y T, et al. Optimization on wrinkle and crack at corner of A-pillar reinforcement panel in thermoforming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 105-110.
- [10] 蒋磊, 张雄飞, 王龙, 等. 基于变压边力的侧围外板成形研究 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 157-163.  
Jiang L, Zhang X F, Wang L, et al. Forming of side outer panel based on variable blank holder force [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 157-163.
- [11] 吴艳云, 刘铭心, 张东民, 等. 基于响应面法座椅撑板拉伸成型工艺参数优化 [J]. 中国科技论文, 2017, 12 (22): 2526-2530.  
Wu Y Y, Liu M X, Zhang D M, et al. Optimization on drawing process parameters for seat support plate based on response surface method [J]. China Sciencepaper, 2017, 12 (22): 2526-2530.
- [12] 张宏伟. 基于响应面的车用连接板拉伸成形性能及优化 [J]. 中国科技论文, 2020, 15 (2): 240-243.  
Zhang H W. Drawing formability and optimization of vehicle connecting plate based on response surface method [J]. China Sciencepaper, 2020, 15 (2): 240-243.
- [13] 梁强, 张贤明, 贾艳艳. 基于灰色关联分析的直齿轮冷挤压成形工艺参数优化 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (1): 69-76.  
Liang Q, Zhang X M, Jia Y Y. Parameter optimization in cold extrusion process for spur gear based on grey relational analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (1): 69-76.
- [14] 席奇豪, 樊文欣, 吕伟, 等. 基于灰色关联度的强力旋压成形工艺参数优化 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (15): 129-132.  
Xi Q H, Fan W X, Lyu W, et al. Parameter optimization of power spinning forming process based on grey correlation degree [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (15): 129-132.