

工艺参数对汽车铝合金封板成形质量的影响及模具寿命预测

黄 忠¹, 史召峰², 王理想³

- (1. 安徽粮食工程职业学院 机电工程系, 安徽 合肥 230011;
2. 安徽工业经济职业技术学院 机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230051;
3. 安徽威灵汽车部件有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要:以铝合金封板为研究对象, 对冲压过程中极易出现的冲裂缺陷进行了分析。以成形后封板的最大减薄率为评估对象, 应用有限元分析法, 开展了关于入模圆角、压边力以及凸凹模间隙的正交试验, 研究了各因素对最大减薄率的影响程度, 并基于信噪比, 通过田口试验法对冲压工艺参数进行了优化。另外, 基于 Archard 磨损模型, 对优化工艺下的冲压模具磨损情况进行了研究, 建立了冲压次数与冲压模具磨损之间的函数拟合公式, 比较了单次磨损预测寿命与平均值磨损预测寿命之间的误差大小, 合理地预测了冲压模具寿命。经实际冲压生产表明, 此研究具有一定的指导作用, 有效地降低了时间成本。

关键词: 冲压; 最大减薄率; 田口试验法; 模具磨损; 冲压次数

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.015

中图分类号: TG386.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 07-0107-06

Influence of process parameters on forming quality for automobile aluminum alloy sealing plate and prediction of die life

Huang Zhong¹, Shi Zhaofeng², Wang Lixiang³

- (1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Vocational College of Grain Engineering, Hefei 230011, China;
2. College of Mechanical and Automotive Engineering, Anhui Technical College of Industry and Economy, Hefei 230051, China;
3. Anhui Welling Auto Parts Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: For the aluminum alloy sealing plate, the crack defects which were easy to appear in the stamping process were analyzed. Then, taking the maximum thinning rate of the formed sealing plate as the evaluation object, the orthogonal experiments on the die fillet, blank holder force and clearance between punch and die were carried out by the finite element analysis method, and the influence degrees of various factors on the maximum thinning rate were studied. Based on the signal-to-noise ratio, the stamping process parameters were optimized by Taguchi algorithm. In addition, based on the Archard model, the wear conditions of stamping mold under the optimized process was studied, the function fitting formula between stamping times and stamping die wear was established, the error between the single wear prediction life and the average wear prediction life was compared, and the die life was reasonably predicted. The actual stamping production shows that the research has a certain guiding role and effectively reduces the time cost.

Key words: stamping; maximum thinning rate; Taguchi test method; die wear; stamping times

冲压工艺具有自动化程度高、生产效率高、材料利用率高、零件精度高等优势^[1-2], 因此板料冲压在汽车制造行业中的应用极其广泛, 经统计, 汽车上约 70% 的零件通过冲压加工获得^[3], 冲压成形中经常遇到两大问题, 即拉裂和起皱。

本文研究的汽车铝合金封板, 在冲压时, 零件底部过渡区域由于过分减薄极易冲破, 而绝大

部分原因均是工艺参数设计不当而造成的, 因此通过应用有限元技术, 建立虚拟冲压环境, 不断模拟、调整、优化, 但由于涉及因素较多, 反复试验的工作量仍然巨大, 故结合田口试验法^[4]进行研究。田口试验法在解决多因素优化问题方面已取得了很多成功经验^[5-7], 例如, 刘强等^[5]通过对 Dynaform 及田口试验法的综合应用, 优化了压缩机壳体的冲压工艺参数, 成功地减小了起皱和拉裂的风险; 蔡飞飞等^[6]采用田口试验法对叶轮的铣削参数进行了优化, 最终在不影响叶轮成形精度的前提下, 将铣削效率提高到了原来的 3 倍;

收稿日期: 2021-07-16; **修订日期:** 2021-10-19

基金项目: 安徽省高等学校自然科学研究项目 (KJ2021A1559)

作者简介: 黄 忠 (1981-), 男, 学士, 副教授

E-mail: huangz198110@163.com

姜雪松等^[8]基于田口试验法,对基体与涂层之间的结合力大小进行了研究,实现了膜基结合力的加强;许贤博等^[9]运用田口试验法,并结合灰色关联理论,优化了切削用量,经试验表明,零件的质量及加工效率均得到了大幅提升。因此本文针对封板冲破的问题,以成形后封板的最大减薄率为评估对象,联合 Deform 及田口试验法,对冲压工艺参数进行了优化,同时对优化后工艺下的冲压模具寿命进行了预测,建立了冲压次数与冲压模具磨损之间的数学模型。

1 建模及数值模拟

封板的三维截面图如图 1a 所示,产品由四周向中间凹入,带有 5 个凹槽,整体结构略微复杂,材料为 Al5056 铝合金,冲压深度为 20 mm,零件厚度为 2.5 mm,目前经实际冲压获得的封板如图 1b 所示,底部 5 个过渡区域由于过度减薄存在明显的冲破缺陷。为了避免资源浪费,优先在现工艺基础上进行优化,借助有限元软件 Deform-3D 进行辅助研究。

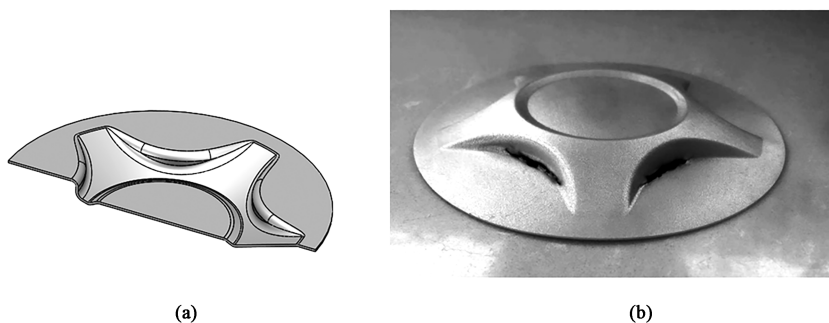


图 1 封板模型 (a) 及样件 (b)

Fig. 1 Sealing plate model (a) and sample (b)

首先通过 SW 软件进行三维造型,根据封板的对称性质,可建立 1/5 冲压模型来减小后续的计算量,如图 2a 所示,包括凸模、凹模、板料、压边圈等部件,随后整体导入 Deform 软件中,板料选择塑性体,模具选择刚性体,均采用四面体网格划分,全程忽略温度效应的影响,将凸模设置为主模,定

义速度的大小和方向,板料与模具间的摩擦因数为 0.12。初步仿真得到的封板零件如图 2b 所示,已冲破,与实际结果相同,依据经验可知,当最大减薄率 ($(\text{板料厚度}-\text{成形件最小厚度})/\text{板料厚度}$) 超过 30% 时,零件冲破的风险极高,因此必须将最大减薄率控制在 30% 以下,才能确保零件的合格率。

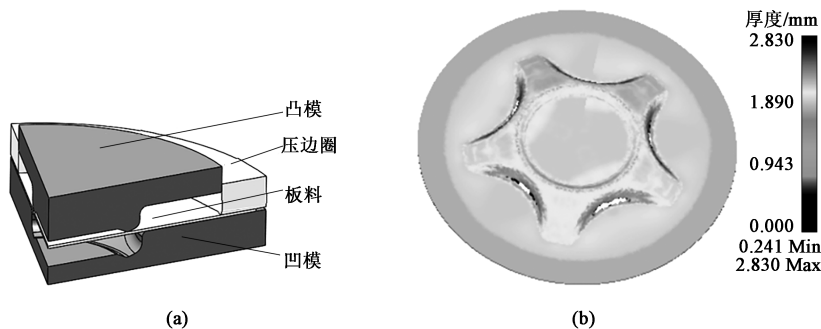


图 2 建模及仿真结果

(a) 冲压模型 (b) 封板成形效果及厚度分布情况

Fig. 2 Modeling and simulation result

(a) Stamping model (b) Forming effect and thickness distribution condition of sealing plate

2 田口试验设计与分析

2.1 试验原理

田口试验的核心理论是通过建立最少试验来获

得最优参数组合,以正交试验为支撑,信噪比 (S/N) 为衡量指标,快速筛选达到优化的目的^[10-11]。根据优化初衷的不同,信噪比计算有 3 种模型。由于本文研究的评估指标为最大减薄率,希望其值越小越好,因此采用望小特性信噪比,其数学模型如

式 (1) 所示。

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \tag{1}$$

式中： y_i 为观察值； i 为试验次数， $i=1, \cdots, n$ ； n 为试验总次数。

2.2 试验方案设计

选取影响零件减薄较大的入模圆角半径、压边力以及凸凹模间隙作为优化参数，结合实际经验，通过 Minitab 软件建立如表 1 所示的 3 因素 3 水平正交表，需要通过 Deform-3D 进行 9 组冲压试验，试验结果及对应的信噪比计算结果见表 2。

表 1 因素水平表
Table 1 Factors and levels

| 水平 | 入模圆角半径/mm | 压边力/kN | 凸凹模间隙/mm |
|----|-----------|--------|----------|
| 1 | 4 | 575 | 2.65 |
| 2 | 6 | 625 | 2.70 |
| 3 | 8 | 675 | 2.75 |

表 2 正交试验方案及试验结果
Table 2 Orthogonal test schemes and test results

| 试验方案 | 入模圆角半径 | 压边力 | 凸凹模间隙 | 最大减薄率/% | S/N | 成形情况 |
|------|--------|-----|-------|---------|----------|------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 59.1 | -35.4317 | 冲破 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 92.3 | -39.3040 | 冲破 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 64.8 | -36.2315 | 冲破 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 34.6 | -30.7815 | 冲破 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 26.4 | -28.4321 | 未冲破 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 58.8 | -35.3875 | 冲破 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 29.7 | -29.4551 | 未冲破 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 67.2 | -36.5474 | 冲破 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 94.8 | -39.5362 | 冲破 |

2.3 结果分析与优化

通过 Minitab 软件对试验数据处理获得的各因素对最大减薄率的信噪比响应如表 3 所示，信噪比主效应图如图 3 所示。通过表 3 信噪比的极差结果可知，极差值相近，表明 3 个参数对零件最大减薄率的影响处于同等水平，其中入模圆角半径的影响最大。由文献 [12] 可知，信噪比越大，代表对应的水平越理想，因此综合表 3 及图 3 可得，当入模圆角半径处于水平 2、压边力处于水平 1、凸凹模间隙处于水平 3 时，对应的信噪比最大，此时零件的最大减薄率最小，即最优参数组合为入模圆角半径为 6 mm、压边力为 575 kN、凸凹模间隙为 2.75 mm。将最优参数再度经过有限元模拟验证，

表 3 各因素的信噪比响应
Table 3 S/N response of each factor

| 水平 | 入模圆角半径 | 压边力 | 凸凹模间隙 |
|----|--------|--------|--------|
| 1 | -36.99 | -31.89 | -35.79 |
| 2 | -31.53 | -34.76 | -36.54 |
| 3 | -35.18 | -37.05 | -31.37 |
| 极差 | 5.46 | 5.16 | 5.17 |

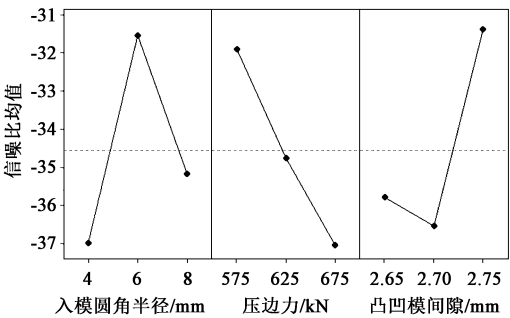


图 3 信噪比主效应图
Fig. 3 Main effect diagram of S/N

获得优化后的封板 de 成形效果如图 4 所示，最大减薄部位位于底部过渡区域，未出现冲破现象，根据图 4 可知封板的最小厚度为 1.97 mm，可以计算得到最大减薄率为 21.2%，与表 2 中各组方案相比，得到了明显改善。

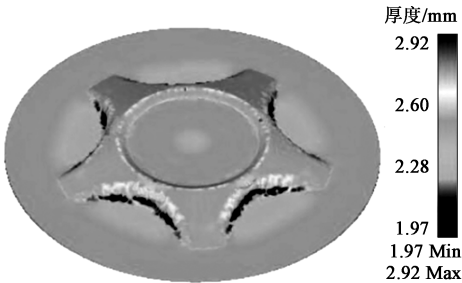


图 4 优化后封板成形效果及厚度分布情况
Fig. 4 Forming effect and thickness distribution condition of sealing plate after optimization

3 冲压模具寿命预测

结合 Archard 磨损模型，通过 Deform 分析，可以得到最优冲压工艺下封板冲压模具的磨损深度分布图，如图 5 所示，凸模中 P1 区域的最大磨损深度达到 1.19×10^{-5} mm，凹模中 P2 区域的最大磨损深度达到 1.02×10^{-5} mm，可知同等条件下凸模的寿命更短。由于在实际生产中，一套冲模通常整体更换，一是为了封板的成形质量，二是为了避免频繁换模

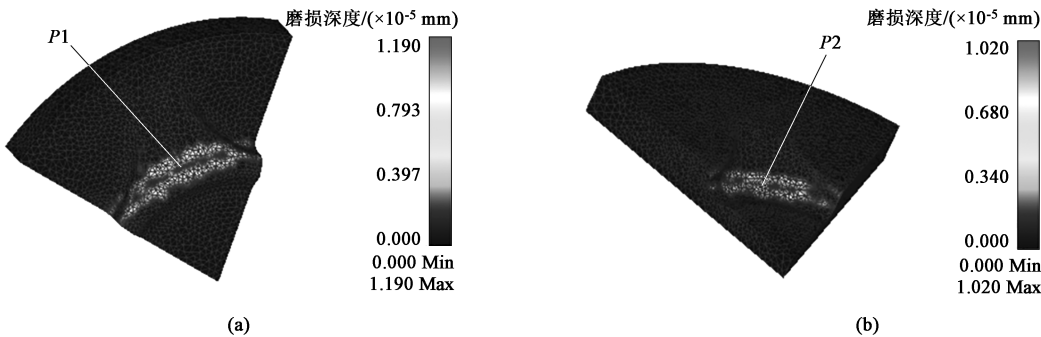


图 5 冲压模具磨损结果

(a) 凸模 (b) 凹模

Fig. 5 Results of stamping die wear

(a) Punch (b) Die

而影响装配精度及生产效率，因此整套冲模的寿命预测可以凸模寿命为准。目前，较多地采用单次磨损预测寿命法（总磨损深度/单次磨损深度）来预测模具寿命，例如本文要求封板冲压模具的总磨损深度不得超过 0.15 mm，则根据单次最大磨损深度可预测凸模的寿命为 12605 次，但该方法由于未考虑累计影响，其误差较大^[13]。因此，本文采用平均值磨损预测寿命法（总磨损深度/多次冲压试验的平均磨损深度）进行预测，将第 1 次冲压试验后的凸模保存后导入至第 2 次冲压试验，反复进行，直

至第 15 次冲压试验结束。经统计，凸模的单次最大磨损深度及累积磨损深度如表 4 所示，最终经整理获得的冲压次数与凸模磨损深度变化曲线如图 6 所示，通过 Origin 软件拟合后获得图 6 中虚线所示多项式曲线，具体的拟合数学式如式（2）所示。

$$W(x) = -1.7 \times 10^{-6}x^7 + 9.6 \times 10^{-5}x^6 - 2.2 \times 10^{-3}x^5 + 2.5 \times 10^{-2}x^4 - 0.16x^3 + 0.52x^2 - 0.79x + 1.58 \quad (2)$$

式中： $W(x)$ 为第 x 次冲压的凸模磨损深度； x 为冲压次数。

表 4 15 次冲压试验凸模磨损深度统计数据

Table 4 Statistical data of punch wear depth in fifteen stamping tests

| 冲压次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 单次最大磨损深度/($\times 10^{-5}$ mm) | 1.19 | 1.13 | 1.29 | 1.21 | 1.24 | 1.28 | 1.17 | 1.31 | 1.34 | 1.22 | 1.27 | 1.21 | 1.31 | 1.25 | 1.30 |
| 累积磨损深度/($\times 10^{-5}$ mm) | 1.19 | 2.32 | 3.61 | 4.82 | 6.06 | 7.34 | 8.51 | 9.82 | 11.16 | 12.38 | 13.65 | 14.86 | 16.17 | 17.42 | 18.72 |

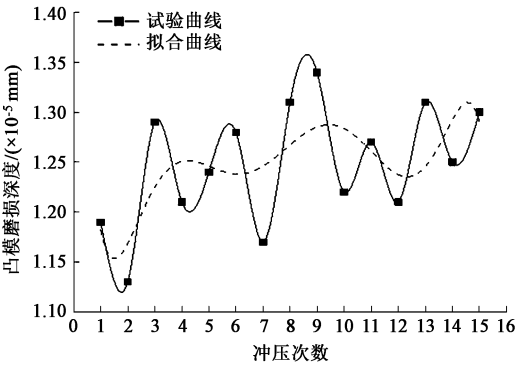


图 6 冲压次数与凸模磨损深度变化曲线

Fig. 6 Changing curves of stamping times and punch wear depth

根据式（2）可建立关于总磨损深度的数学模型，如式（3）所示。

$$W_{\text{Total}} = \frac{1}{15}x \sum_{x=1}^{15} W(x) \quad (3)$$

式中： W_{Total} 为凸模经过 x 次冲压后的总磨损深度。
综上，凸模的寿命问题可转化为 $W_{\text{Total}} \leq 0.15$ mm 的简单数学问题，最终计算可得 $x \leq 12019$ ，即凸模的寿命为 12019 次，较单次磨损预测寿命法短。

4 实际冲压试验

根据上述研究获得的相关冲压参数，对入模圆角进行改进，调整凸凹模间隙及压边力大小，通过厂家现有液压设备进行封板冲压试验，封板成形效果如图 7a 所示，与数值模拟所得结果的吻合度较高，封板底部过渡区域减薄情况较好，多次试验均未出现图 2b 所示的冲破缺陷，表面无刮伤，质量较好，工艺参数优化合理。封板冲压模具如图 7b 所示，实际冲压中凸模比凹模优先达到失效状态，与

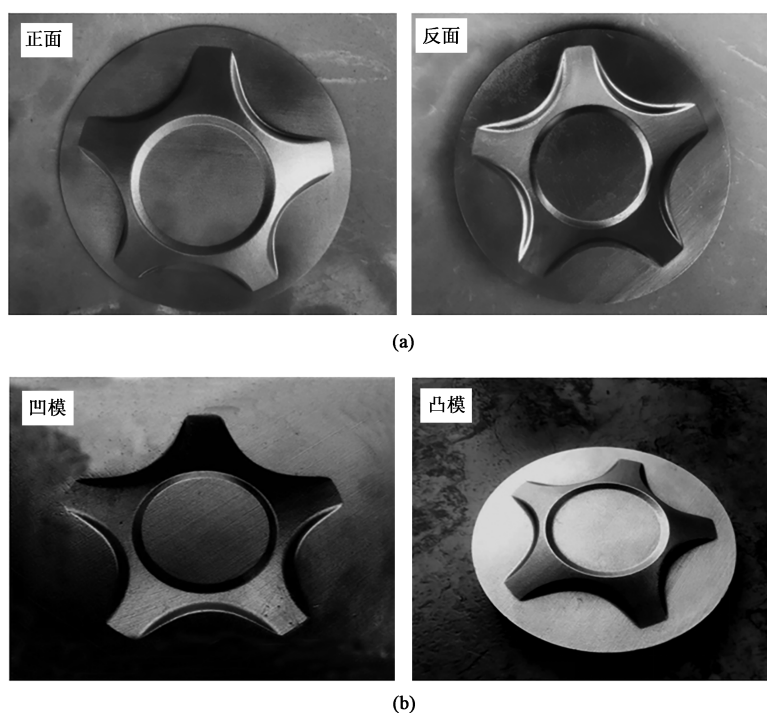


图7 冲压试验
(a) 封板成形效果 (b) 冲压模具

Fig. 7 Stamping test
(a) Forming effect of sealing plate (b) Stamping die

图5模拟结论相同,最终冲压次数为12208次。其寿命较平均值磨损预测寿命法长,但较单次磨损预测寿命法短。若采用单次磨损预测寿命法,会造成封板的废品率急剧上升,同时可能会对设备造成损坏,增加成本,同时平均值磨损预测法也更为精确,能够起到预测的作用。

5 结论

(1) 应用 Deform-3D 软件,对铝合金封板的冲压过程进行了分析,为了解决封板底部过渡区域过度减薄而造成的冲破问题,通过田口试验法,以成形后封板的最大减薄率为评估对象进行了优化,最终获得的最佳冲压工艺参数组合为:入模圆角半径为6 mm、压边力为575 kN、凸凹模间隙为2.75 mm。

(2) 基于 Archard 磨损模型,对优化后工艺下的冲压模具寿命进行了预测,比较了单次磨损预测寿命法与平均值磨损预测寿命法,结果显示平均值磨损预测法更为准确,能够起到预测的作用,并给出了冲压模具寿命预测的数学模型。

(3) 对优化后的工艺进行了实际冲压试验,验证了参数的可靠性及冲压模具预测寿命模型的准确

性,并获得了满足要求的铝合金封板件。

参考文献:

- [1] 谈顺强,向荣. 基于响应面法的铝制发罩的冲压工艺参数优化[J]. 锻压技术, 2020, 45 (11): 73-81.
Tan S Q, Xiang R. Optimization on stamping process parameters for aluminum hood based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (11): 73-81.
- [2] 郝智聪,徐杰,单德彬,等. SUS304 不锈钢封装板微冲压工艺研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23 (3): 12-17.
Hao Z C, Xu J, Shan D B, et al. Research on micro-stamping process of SUS304 stainless steel package substrate [J]. Materials Science and Technology, 2015, 23 (3): 12-17.
- [3] 李骊洋,张海波. 基于正交试验的汽车后轮罩冲压成形模拟分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23): 121-123, 129.
Li S Y, Zhang H B. Simulation analysis of stamping forming of automobile rear wheel hood based on orthogonal experiment [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (23): 121-123, 129.
- [4] 高正凯,李大为. 基于田口法的 AZ61A 镁合金热挤压圆管成型工艺参数优化[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2019, 37 (3): 435-436, 477.
Gao Z K, Li D W. Process parameters optimization of AZ61A magnesium alloy hot extrusion pipe based on taguchi method [J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition, 2019, 37 (3): 435-436, 477.

(下转第121页)