

差厚激光拼焊板前纵梁全工序成形回弹控制及优化

金 明¹, 杨 平²

(1. 重庆工业职业技术学院 车辆工程学院, 重庆 401120; 2. 重庆工商职业学院 智能制造与汽车学院, 重庆 401520)

摘要: 针对激光拼焊板冲压成形过程中变形复杂、易出现回弹和拉裂等缺陷的问题, 以某型汽车激光拼焊板前纵梁为研究对象, 提出了基于克里金预测模型和 NSGA-II 多目标遗传算法相结合的优化策略, 并对该前纵梁进行了优化验证。结果表明, 克里金模型能够精确地预测优化变量与优化指标之间的非线性关系, 并且对其趋势预测准确。此外, 采用 NSGA-II 多目标遗传算法得到了帕累托最优前沿解集, 从该解集中选出了满足不发生破裂的前提下回弹量最小的解, 并通过数值仿真和实验验证了最优解的回弹量相较于优化前降低了 50%, 且表面光滑、无破裂发生。优化效果表明, 所提出的优化策略能够显著降低回弹量, 并且能够保证冲压零件无破裂、起皱等缺陷。

关键词: 回弹控制; 冲压成形; 激光拼焊板; 克里金预测模型; 多目标遗传算法

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.015

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 10-0103-09

Springback control and optimization on full process forming of front longitudinal beam of differential thickness laser tailor welded blanks

Jin Ming¹, Yang Ping²

(1. School of Vehicle Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;

2. College of Intelligent Manufacturing and Automobile, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex deformation, easy to appear springback, cracking and other defects in the stamping process of laser tailor welded blanks, for the front longitudinal beam of an automobile laser tailor welded blanks, an optimization strategy based on Kriging prediction model and NSGA-II multi-objective genetic algorithm was proposed, and the front longitudinal beam was optimized and verified. The results show that Kriging model can accurately predict the nonlinear relationship between optimization variables and optimization indexes, and its trend prediction is accurate. In addition, the Pareto optimal frontier solution set is obtained by NSGA-II multi-objective genetic algorithm, and the solution with the minimum springback amount and without fracture is selected from the solution set. Numerical simulation and experiments show that the springback amount of the optimal solution is reduced by 50% compared with that before optimization, and the surface is smooth without fracture. The optimization results show that the optimization strategy can significantly reduce the springback amount and ensure that the stamping parts have no defects such as fracture and wrinkling.

Key words: springback control; stamping; laser tailor welded blanks; Kriging prediction model; multi-objective genetic algorithm

随着汽车轻量化设计的发展, 高强度激光拼焊板冲压成形技术逐渐成为车身零部件轻量化制造的核心技术之一。该技术可以将不同厚度的材料经过激光焊接后再通过冲压工序成形为汽车部件, 进而满足车身不同部位具有不同力学性能的要求^[1]。奔驰、宝马、丰田等车企在 20 世纪末就已开始大量应

用该技术制造底盘、侧围、A/B 柱等部件, 国内汽车企业如长安、东风、一汽等也在积极地研究、推广该技术的应用。尽管高强激光拼焊板冲压成形技术有许多优势, 但在冲压成形中仍存在许多问题, 如成形性能下降、焊缝偏移、板料破裂、起皱和回弹等。由于不同性能和厚度的板料的变形能力不同, 因此, 回弹问题是激光拼焊板冲压工艺需要重点解决的问题。

Chang S H^[2] 和 Seo D G^[3] 分析了不同板厚比和不同焊缝位置对回弹的影响, 其研究表明, 厚板侧的回弹与同厚度板料成形的回弹相近, 而薄板侧的回弹较小。Padmanabhan R 等^[4] 采用数值模拟

收稿日期: 2021-10-25; 修订日期: 2022-01-22

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202103209);
2019 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN201904001)

作者简介: 金 明 (1981-), 男, 学士, 副教授

E-mail: jinming@cqipc.edu.cn

的方法研究了深拉深拼焊板的应力状态及其对回弹行为的影响,其研究结果为拼焊板回弹的材料组合和焊接区域定位提供了理论依据:在相同的成形条件下,拼焊板料的回弹行为取决于材料组合和板料取向,还取决于截面几何形状和分裂区域在成形零件中的位置,增大截面模量可以显著降低坯料的回弹行为。刘晓晶等^[5-6]对具有不同焊缝位置的 U 形件的成形回弹进行了研究,得到了最佳的工艺参数,减少了回弹,提高了成形精度。龚志辉等^[7]采用拉丁超立方抽样方法构建样本,并通过多项式拟合构建近似模型,最后通过遗传算法优化了近似模型并得到了最佳焊缝线的分布。张永康等^[8]研究了差厚激光拼焊板焊缝的移动和回弹控制,其成果为拼焊板的回弹控制提供了新的理论和方法。王飞等^[9]基于正交实验设计和神经网络模型对激光拼焊板的回弹进行了预测,其结果表明神经网络能够比较精确地预测回弹。周杰等^[10]对 U 形激光拼焊板弯曲的回弹进行了研究,优化了焊缝位置和模具参数。官英平等^[11]研究了 V 型件的回弹规律及控制方法,为进一步开展拼焊板 V 型自由弯曲回弹控制的研究奠定了基础。朱元右^[12]研究了拼焊板自由弯曲仿真中的网格质量、单元类型、模具集合轮廓描述及处理技术对回弹的影响,为进一步提交仿真精度打下了基础。

目前,大量的研究集中于揭示拼焊板冲压成形的回弹规律和机理,鲜有论述实际拼焊板冲压零部件的回弹控制和优化的报道,且缺少创新控制方法和实际应用的优化策略。基于此,本文从实际零部件出发,研究实际工业应用中对拼焊板冲压件回弹的控制和优化策略。

1 前纵梁拼焊板冲压成形仿真

1.1 仿真材料

控制回弹最重要的步骤是得到回弹量,建立高精度的数值仿真模型是精确计算回弹量的核心。汽车前纵梁常用的 B410LA 镀锌高强钢板的厚度为 1.0 和 1.5 mm,其化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。

表 1 B410LA 高强钢的化学成分(%,质量分数)

Table 1 Chemical compositions of B410LA high strength steel (% , mass fraction)

C	Mn	P	S	Nb	其他
≤0.20	≤2.00	≤0.03	≤0.03	≤0.09	≥0.02

表 2 B410LA 高强钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of B410LA high strength steel

参数	屈服强度/	抗拉强度/	伸长率/	硬化	弹性模量/	泊松比
	MPa	MPa	%	指数	MPa	
数值	410~570	≥590	≥17	0.18	210000	0.3

1.2 冲压成形有限元模型

由于所研究的激光拼焊板的焊缝极小并且强度较高,其塑性变形可忽略。因此,在构建有限元模型时,将焊缝考虑为刚性连接。在 Dynaform 软件中,将板料使用壳单元进行网格划分,网格尺寸设置为 4 mm,摩擦因数设置为 0.13,虚拟冲压速度设置为 $1800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,厚度方向上的积分点设置为 5。此外,根据经验压边应力取值为 4 MPa,通过计算得到压边力为 800 kN。主要工序的有限元模型如图 1 所示,其中左侧板厚为 1.5 mm、右侧板厚为 1.0 mm。

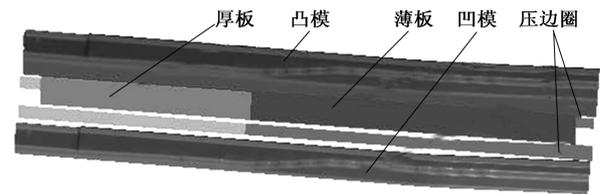


图 1 冲压成形有限元模型

Fig. 1 Finite element model of stamping

1.3 数值仿真结果

为了精确地得到成形后的回弹量,应当分析每个成形工步的回弹量。各个工步的回弹情况如图 2 所示。如图 2a 所示,回弹量最大区域在零件两侧边缘,特别是弯曲部分的内侧,并且台阶部分也有一定的回弹量。将这一工步成形卸载后的坯料作为下一工步的初始坯料进行冲孔和切边仿真。如图 2b 所示,由于冲孔后板料发生应力释放,因此,板料的回弹发生了较大的变化。冲孔后,除零件边缘产生了较大的回弹量外,零件两边顶部区域也产生了较大的回弹量,特别是薄板侧的回弹量较大。如图 2c 所示,冲孔分离后,零件的回弹又发生了较大的变化,薄板侧端头的回弹量最大,达到了 1.566 mm,并且零件中间区域的边缘的回弹量也得到了增加。

总而言之,薄板侧在冲孔切边、冲孔分离等工步的回弹量较大,其原因在于薄板侧在拉延工步时发生的塑性变形程度低于厚板侧,其残余应力较大,因此,经过冲孔、切边等工序后,应力得到释放,零件更容易变形。

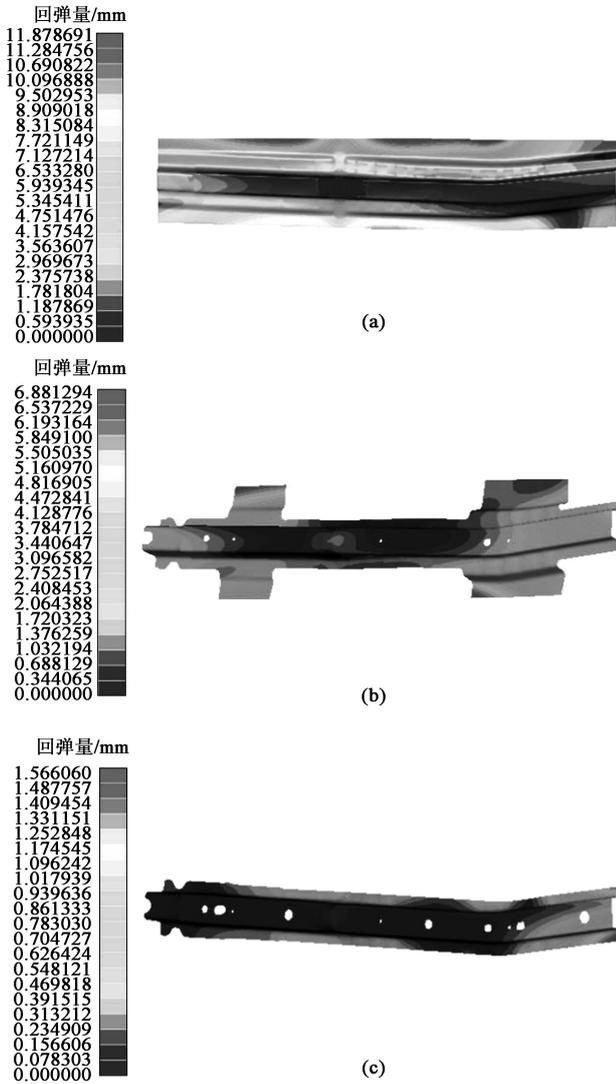


图 2 各工步卸载后的回弹量分析
(a) 拉延 (b) 冲孔切边 (c) 冲孔分离
Fig. 2 Analysis on springback amount of each process after unloading
(a) Drawing (b) Punching and trimming
(c) Punching separation

2 回弹控制及多目标优化

2.1 优化模型

2.1.1 优化目标设计

板料冲压工艺中，坯料最容易出现的缺陷是起皱、破裂和回弹。对于本文研究的前纵梁拼焊板而言，回弹和破裂是重点需要考虑和优化的指标，尤其是回弹。因此，选取回弹最小和不发生破裂为工艺参数优化的目标。根据相关研究^[13-15]，可以用式 (1) 来描述发生破裂的程度：

$$f_1 = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_1^i - \varphi(\varepsilon_2^i))^2 & \varepsilon_1^i > \varphi(\varepsilon_2^i) \\ 0 & \varepsilon_1^i \leq \varphi(\varepsilon_2^i) \end{cases} \quad (1)$$

式中： f_1 为破裂指标，其值越小板料越不容易破裂； ε_1^i 为第 i 个单元的第一主应变， $i=1, \dots, n$ ； n 为节点的总个数； ε_2^i 为第 i 个单元的第二主应变； $\varphi(\varepsilon_2^i)$ 表示破裂临界时第二主应变对应的第一主应变值。

除破裂指标外，回弹量是另一个重要的指标。由于拼焊板的回弹特点与普通板料冲压的回弹特性不同，因此，采用冲压件的平均位置偏差来评价回弹量。可以用式 (2) 来表示：

$$f_2 = \sqrt{\left(\sum_j^m \Delta d_j^2\right) / m} \quad (2)$$

式中： f_2 为回弹指标，其值越小板料的回弹量越小； Δd_j 为采样点 j 在 3 道工序中的累积位移偏差， $j=1, \dots, m$ ； m 为采样点的个数。

2.1.2 优化变量设计

影响板料冲压成形质量的因素主要有：模具几何参数、压边力、拉延筋设计、坯料尺寸、材料性能及润滑条件等。在实际生产中，许多参数都有经验值，因此，选取压边力 x_1 、拉延筋高度 x_2 、拉延筋阻力系数 x_3 和模具圆角半径 x_4 这 4 个参数作为优化变量。根据之前的经验以及查阅相关文献，4 个变量的取值范围分别为： $x_1 \in [550 \text{ kN}, 1550 \text{ kN}]$ 、 $x_2 \in [3 \text{ mm}, 33 \text{ mm}]$ 、 $x_3 \in [15\%, 35\%]$ 、 $x_4 \in [8 \text{ mm}, 16 \text{ mm}]$ 。

2.2 试验设计及结果

由于优化变量与优化指标之间的非线性关系并且优化变量的个数较多，因此，为了得到优化变量与优化指标之间的映射关系，首先需要通过实验手段获取尽可能代表优化空间的实验样本。中心复合实验抽样方法能够在有限的实验次数内获取具有代表性的实验样本，该方法得到的样本点分布如图 3 所示。

从图 3 可以看出，样本点在采样空间中呈现出均匀分布的特点，这样的实验样本能够对采样空间进行比较充分的采样，进而使得后续的代理模型具有较高的逼近精度。表 3 为中心复合实验的样本数据。

2.3 实验数据代理模型

通常用于构建设计变量和设计指标之间响应关系的算法有多项式拟合、神经网络、支持向量机以及克里金模型。其中，多项式拟合的泛化能力弱，而神经网络需要大量数据才能精确近似。对于小样本数据逼近问题，克里金模型具有精度高、计算快等优点。因此，本文选用克里金模型来逼近设计变量和设计指标之间的高度非线性关系，如式 (3) 所示。

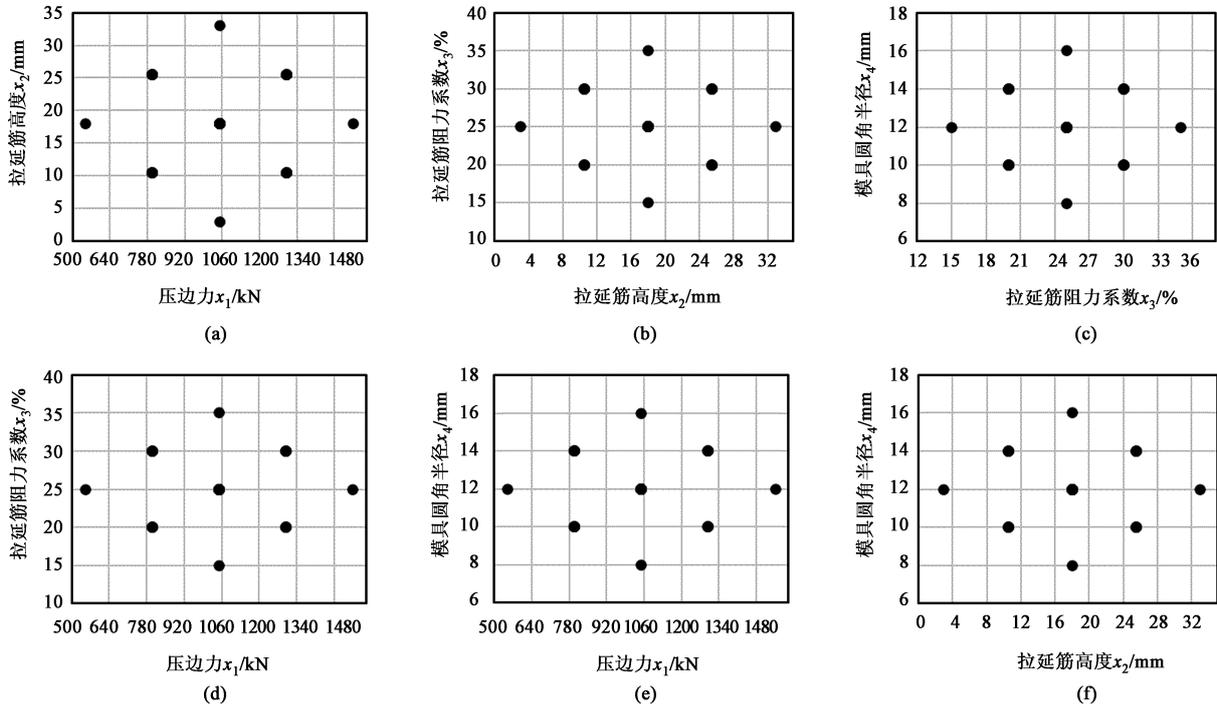


图 3 中心复合实验的样本点分布
(a) x_1-x_2 (b) x_2-x_3 (c) x_3-x_4 (d) x_1-x_3 (e) x_1-x_4 (f) x_2-x_4

Fig. 3 Distribution of sample points for central composite experiment

表 3 中心复合实验的样本数据

Table 3 Sample data of central composite experiment

编号	压边力 x_1/kN	拉延筋 高度 x_2/mm	拉延筋 阻力系 数 $x_3/\%$	模具圆角 半径 x_4/mm	破裂指标 f_1	回弹指标 f_2	编号	压边力 x_1/kN	拉延筋 高度 x_2/mm	拉延筋 阻力系 数 $x_3/\%$	模具圆角 半径 x_4/mm	破裂指标 f_1	回弹指标 f_2
1	800	10.5	30	10	0.402788	1.199779	14	1300	25.5	20	10	1.910718	0.459247
2	800	25.5	20	10	0.778205	1.113020	15	1300	25.5	20	14	1.557218	1.886579
3	1050	3.0	25	12	0.193920	1.535907	16	1050	18.0	15	12	0.541562	1.546714
4	800	10.5	30	14	0.043733	2.104739	17	800	10.5	20	14	0.000000	2.394306
5	1050	18.0	35	12	1.439654	1.451168	18	550	18.0	25	12	0.142208	1.563985
6	1050	18.0	25	12	0.039895	0.430866	19	800	25.5	30	10	0.820120	1.268257
7	800	25.5	20	14	0.414605	2.379964	20	800	25.5	30	14	0.477225	1.954350
8	1300	25.5	30	10	2.327141	0.967580	21	1300	10.5	30	10	1.039694	1.159682
9	1050	18.0	25	8	1.034139	0.935866	22	1300	10.5	30	14	0.683366	2.000406
10	1300	10.5	20	14	0.450662	2.324616	23	1050	33.0	25	12	1.719323	1.278559
11	1050	18.0	25	16	0.000000	3.460866	24	1300	25.5	30	14	1.978287	1.825575
12	800	10.5	20	10	0.361782	1.137260	25	1300	10.5	20	10	0.804162	1.131604
13	1550	18.0	25	12	2.127464	1.168570							

$$\hat{y} = \mathbf{g}(x)^T \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - F\hat{\beta}) \quad (3)$$

式中： \hat{y} 为指标估计值； $\mathbf{g}(x)$ 为基函数向量； $\hat{\beta}$ 为回归系数； \mathbf{R} 为关联矩阵； $\mathbf{r}^T(x)$ 为关系向量； \mathbf{Y} 为输出向量； F 为 F 分布临界值； x 为变量值。

将构建的克里金模型对实验设计数据进行逼近，得到了如图 4 所示的预测值和实验值对比图。从图 4 可以看出，预测结果和实验结果之间的误差极小，这说明克里金模型在已知实验样本之间的逼近精度

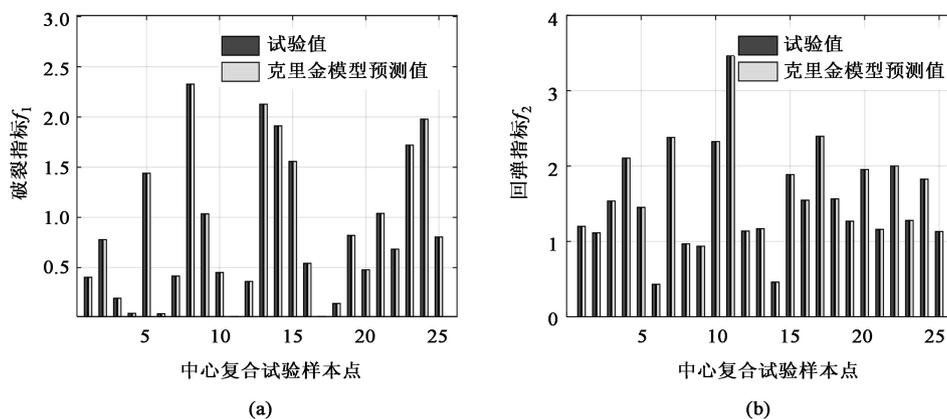


图 4 克里金模型预测值和实验值对比

(a) 破裂指标 (b) 回弹指标

Fig. 4 Comparison between prediction values by Kinging model and experiment values

(a) Fracture index (b) Springback index

较高。为了观察克里金模型在样本点之外的预测情况，绘制了如图 5 和图 6 所示的响应面图。图 5 和图 6 中的圆点表示实验样本点，这些实验样本点均精确地位于曲面上，此外曲面的趋势和样本点的趋势一致，这说明克里金模型能够精确地预测实验样本数据的趋势。

如图 5、图 6 所示，破裂、回弹指标与 4 个优化变量之间的响应关系比较复杂，具有高度的非线性关系。这种非线性关系采用多项式拟合存在精度较差的问题；此外，使用神经网络模型又存在实验数据量太少而导致精度较差的问题。

3 优化策略及结果验证

3.1 优化策略

从克里金响应面图（图 5、图 6）中可以观察到优化指标与优化变量之间的一定关系，然而两个设计指标之间存在矛盾关系，即存在一个指标减小、另一个指标将增大的关系。图 7 为优化策略流程图，为了获得最优情况下两个指标之间的组合关系，使用 MATLAB 优化工具箱中的 NSGA-II 多目标遗传算法用于优化该克里金模型，并获得帕累托前沿解集。设置遗传算法的种群规模为 2000、交叉率为 0.8、变异率分别为 0.02、最大进化代数为 500。

图 8 为两个目标优化的帕累托前沿最优解集，可见破裂指标和回弹指标之间不可能同时最小化，其中一个指标减小会导致另一个指标增大。实际生产中零件不能发生破裂，因此，破裂指标应当取值为 0，此时回弹指标约为 0.69，优化变量圆整后的取值

为： $x_1 = 780 \text{ kN}$ 、 $x_2 = 8 \text{ mm}$ 、 $x_3 = 18\%$ 、 $x_4 = 8 \text{ mm}$ 。

3.2 优化验证

对比图 9 和图 2 结果可知，优化前的最大回弹量为 1.566 mm，优化后的最大回弹量约为 1.042 mm，优化后的最大回弹量降低了约 50%。此外，平均回弹量也得到了显著减少，并且回弹区域也发生了明显的改变。

图 10 为优化后的仿真冲压零件和实际冲压零件。采用优化后的参数进行仿真，得到的冲压件未发生破裂，最终生产试制得到的零件无破裂、表面质量良好，能够达到工业应用要求。

4 结语

使用克里金预测模型进行近似、使用 NSGA-II 多目标遗传算法进行全局寻优的优化策略的优化效果显著，得到了最优前沿解集。优化后的工艺参数可以在保证板料无破裂的前提下降低回弹量大约 50%。使用优化后的工艺参数进行数值模拟，模拟结果表明成形质量良好，这说明克里金预测模型的近似精度较高，而且 NSGA-II 遗传算法具有较强的全局寻优能力。此外，使用最优工艺参数生产的前纵梁零件表面光滑、无开裂等缺陷，最终生产试制得到的零件的成形质量良好，满足工业应用的要求。

参考文献：

- [1] 吴文凯, 朱明清, 李喜东. 铝合金拼焊板冲压成形工艺研究进展及应用现状 [J]. 自动化技术与应用, 2021, 40 (5): 142-144, 146.

Wu W K, Zhu M Q, Li X D. Research progress and application

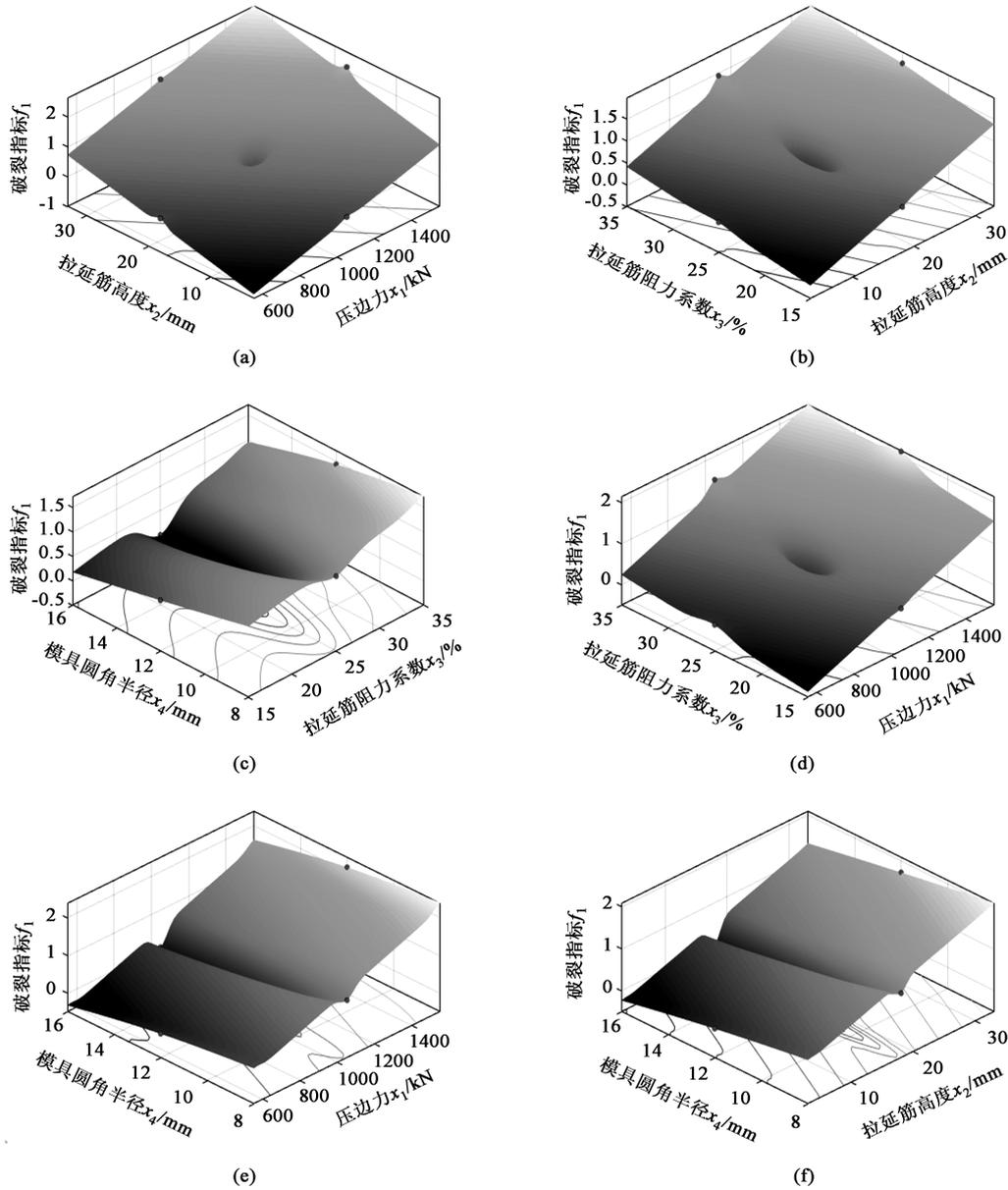


图 5 破裂指标在优化变量上的克里金响应面和实验样本点

- (a) f_1 在 x_1-x_2 上的分布 ($x_4 = 12 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (b) f_1 在 x_2-x_3 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (c) f_1 在 x_3-x_4 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_2 = 18 \text{ mm}$)
- (d) f_1 在 x_1-x_3 上的分布 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (e) f_1 在 x_1-x_4 上的分布 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (f) f_1 在 x_2-x_4 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_3 = 25\%$)

Fig. 5 Kriging response surfaces and experiment sample points of fracture index on optimized variables

- (a) Distribution of f_1 on x_1-x_2 ($x_4 = 12 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (b) Distribution of f_1 on x_2-x_3 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (c) Distribution of f_1 on x_3-x_4 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_2 = 18 \text{ mm}$)
- (d) Distribution of f_1 on x_1-x_3 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (e) Distribution of f_1 on x_1-x_4 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (f) Distribution of f_1 on x_2-x_4 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_3 = 25\%$)

status of stamping process for tailor welded blanks of aluminum alloy [J]. Techniques of Automation and Applications, 2021, 40 (5): 142-144, 146.

[2] Chang S H. Spring back characteristics of the tailor-welded strips in U-bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 13 (3): 14-19.
 [3] Seo D G. Spring back characteristics of tailor-welded strips in U-

draw bending [J]. Metals and Materials International, 2003, 9 (6): 571-576.

[4] Padmanabhan R, Oliveira M C, Laurent H, et al. Study on springback in deep drawn tailor welded blanks [J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2 (s1): 829-832.
 [5] 刘晓晶, 周文浩, 刘博, 等. 拼焊板 U 形件弯曲成形回弹补偿和焊缝移动规律研究 [J]. 材料科学与工艺, 2015, 23 (6):

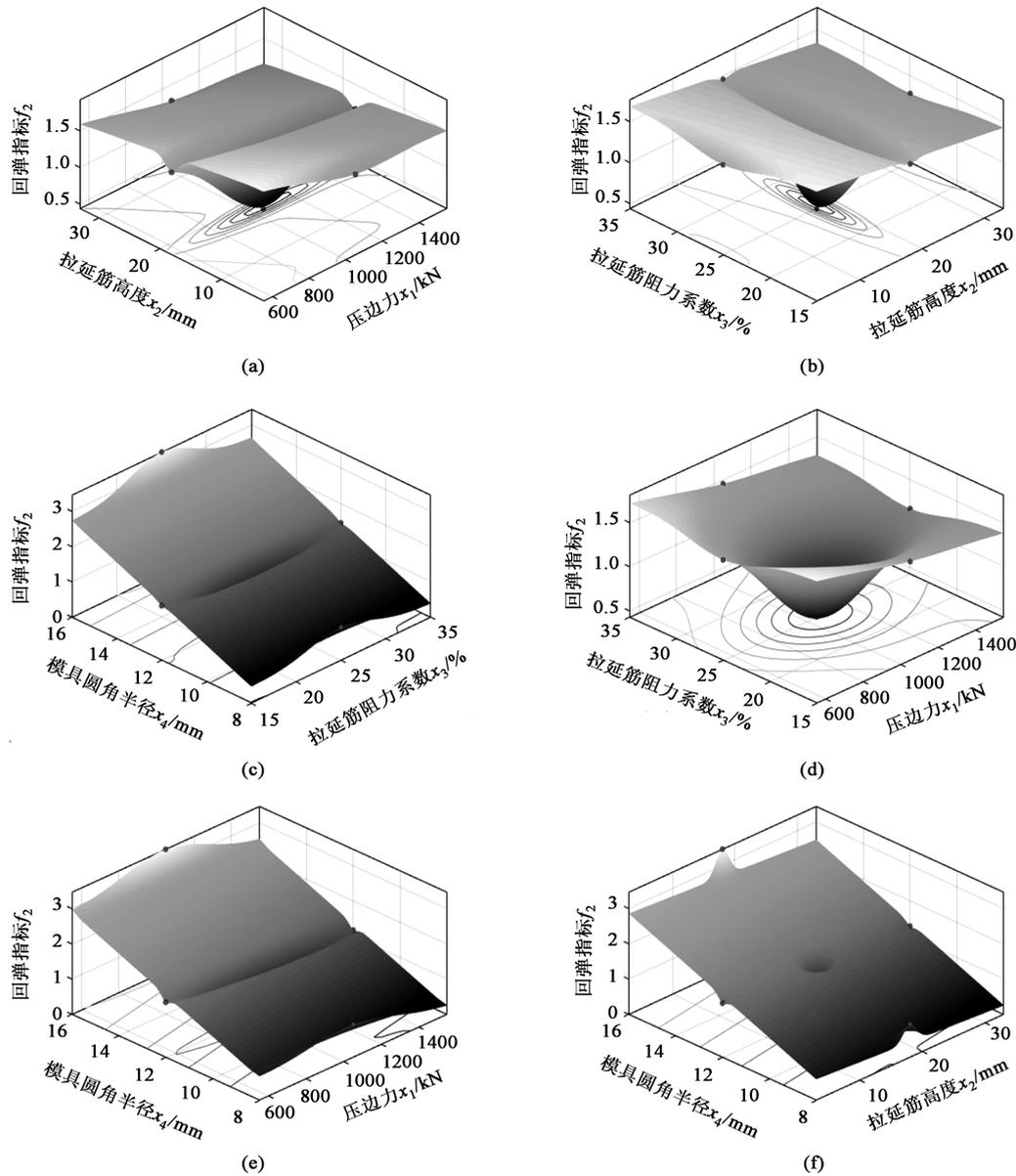


图 6 回弹指标在优化变量上的克里金响应面和实验样本点

- (a) f_2 在 x_1-x_2 上的分布 ($x_4 = 12 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (b) f_2 在 x_2-x_3 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (c) f_2 在 x_3-x_4 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_2 = 18 \text{ mm}$)
- (d) f_2 在 x_1-x_3 上的分布 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (e) f_2 在 x_1-x_4 上的分布 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (f) f_2 在 x_2-x_4 上的分布 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_3 = 25\%$)

Fig. 6 Kriging response surfaces and experiment sample points of springback index on optimized variables

- (a) Distribution of f_2 on x_1-x_2 ($x_4 = 12 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (b) Distribution of f_2 on x_2-x_3 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (c) Distribution of f_2 on x_3-x_4 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_2 = 18 \text{ mm}$)
- (d) Distribution of f_2 on x_1-x_3 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_4 = 12 \text{ mm}$)
- (e) Distribution of f_2 on x_1-x_4 ($x_2 = 18 \text{ mm}, x_3 = 25\%$)
- (f) Distribution of f_2 on x_2-x_4 ($x_1 = 105 \text{ kN}, x_3 = 25\%$)

114-119.

Liu X J, Zhou W H, Liu B, et al. U-shaped pieces of TWB bend forming and springback compensation and the law of weld movement [J]. Materials Science and Technology, 2015, 23 (6): 114-119.

[6] 刘晓晶, 王雅为, 王聪, 等. 激光拼焊板车门内板的回弹模拟 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22 (5): 103-109.

Liu X J, Wang Y W, Wang C, et al. Springback simulation of the inner door panel of the laser tailor-welded blanks [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22 (5): 103-109.

[7] 龚志辉, 赵树武, 钟剑, 等. 差厚拼焊板焊缝线偏移的控制研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (3): 121-124, 128.

Gong Z H, Zhao S W, Zhong J, et al. Research on control of weld

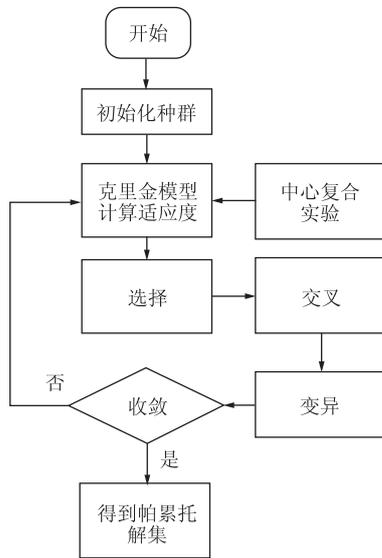


图 7 优化策略流程图

Fig. 7 Flow chart of optimization strategy

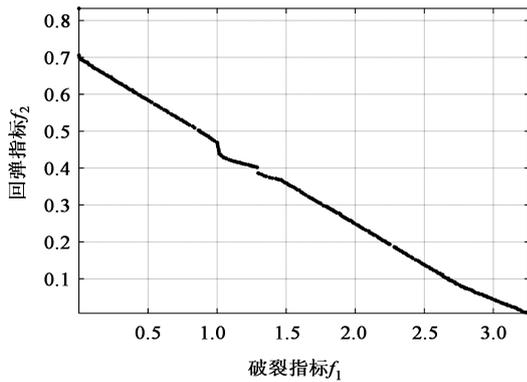


图 8 帕累托前沿解集

Fig. 8 Pareto frontier solution set

line deviation of tailor-welded blank with different thicknesses [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (3): 121-124, 128.

[8] 张永康, 朱元右, 李路娜, 等. 差厚激光拼焊板焊缝移动与回弹控制 [J]. 焊接学报, 2008, 29 (1): 31-34, 39, 114.
Zhang Y K, Zhu Y Y, Li L N, et al. Investigation of springback control and movement of welding seam of tailor-welded blanks in forming with blank holder force [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29 (1): 31-34, 39, 114.

[9] 王飞, 李新城, 来彦玲, 等. 基于正交试验和神经网络的激光拼焊板回弹预测 [J]. 塑性工程学报, 2009, 16 (3): 40-44.
Wang F, Li X C, Lai Y L, et al. Study on the springback prediction in laser TWBs forming based on orthogonal experiment and neural network [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16 (3): 40-44.

[10] 周杰, 霍春梅, 杨明. 差厚拼焊板 U 形件的回弹规律及控制的研究 [J]. 热加工工艺, 2009, 38 (7): 17-20.
Zhou J, Huo C M, Yang M. Research on springback rules and control of U-shaped bending of tailor-welded blanks [J]. Hot Working Technology, 2009, 38 (7): 17-20.

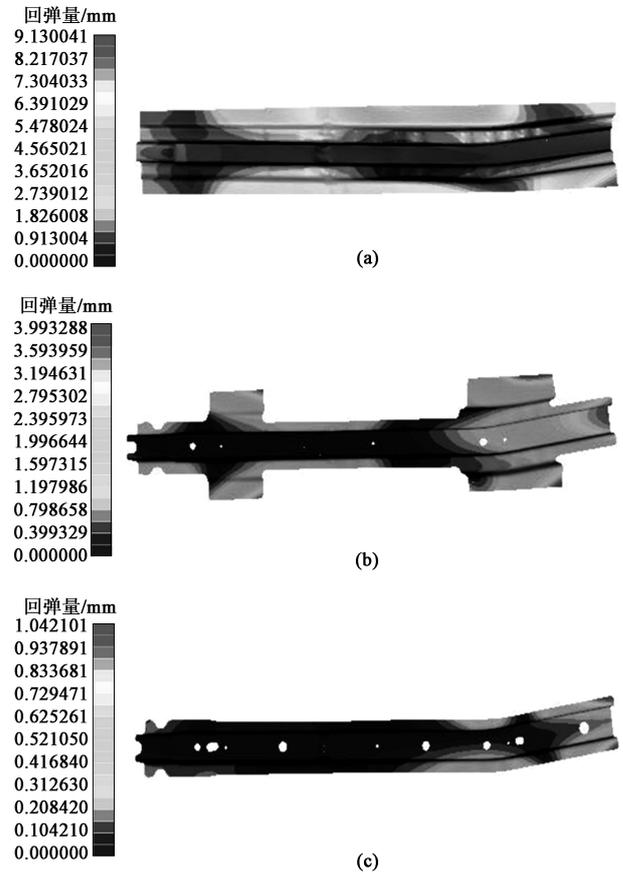


图 9 优化后各工步卸载后的回弹分析
(a) 拉延 (b) 冲孔切边 (c) 冲孔分离

Fig. 9 Analysis on springback of each optimized process after unloading
(a) Drawing (b) Punching and trimming (c) Punching separation

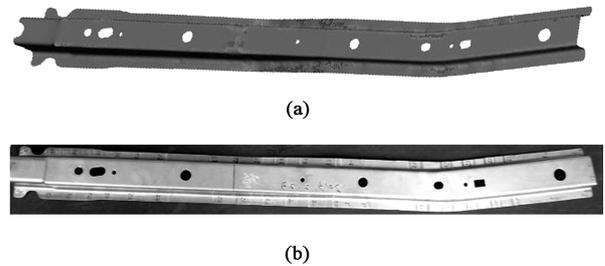


图 10 仿真冲压件 (a) 和实际冲压件 (b)

Fig. 10 Simulated stamping part (a) and actual stamping part (b)

[11] 官英平, 王立君, 吕安松, 等. 拼焊板 V 形自由弯曲成形及回弹过程 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17 (6): 28-32.
Guan Y P, Wang L J, Lyu A S, et al. Research on the forming and springback in V-shape free bending of tailor-welded blanks [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17 (6): 28-32.

[12] 朱元右. 拼焊板自由弯曲中的动能与回弹预测精度分析 [J]. 锻压装备与制造技术, 2007, 42 (5): 76-79.
Zhu Y Y. Several problems of numerical simulation in bending springback of tailor-welded blanks [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2007, 42 (5): 76-79.