

板料成形

基于 Kriging 模型的钢铝异质板料无铆钉铆接结构 工艺参数优化

李奇涵¹, 孟楷博¹, 韩小亨¹, 高 嵩¹, 徐传伟¹, 谷东伟¹, 马风雷¹, 赵庆明²

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 长春施米特自动化技术有限公司, 吉林 长春 130000)

摘要: 针对钢铝异质板料无铆钉铆接成形接头力学性能差的问题, 对铆接过程的结构工艺参数优化开展研究。以提高接头的最大抗拉力和抗剪力为目标, 首先, 建立了无铆钉铆接成形过程数值仿真模型, 通过对比接头截面关键尺寸, 验证了数值模型的可靠性; 其次, 对主要结构工艺参数进行拉丁超立方抽样试验, 获取代表性样本点集及其数值仿真结果; 随后, 利用 Kriging 模型对接头的颈厚值和自锁值进行预测, 预测相对误差小于 10%, 验证了 Kriging 模型的预测能力; 最后, 将 Kriging 模型与遗传算法相结合, 进行结构工艺参数的多目标优化, 采用优化后的结构工艺参数进行试验, 无铆钉铆接接头的最大抗拉力提高了 9.4%, 最大抗剪力提高了 26.4%, 验证了优化结果的有效性。

关键词: 无铆钉铆接; 钢铝异质板料; Kriging 模型; 遗传算法; 多目标优化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.01.005

中图分类号: TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 01-0036-07

Optimization on structural process parameters in clinching for steel-aluminum heterogeneous sheets based on Kriging model

Li Qihan¹, Meng Kaibo¹, Han Xiaoheng¹, Gao Song¹, Xu Chuanwei¹, Gu Dongwei¹, Ma Fenglei¹, Zhao Qingming²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Changchun Schmidt Automation Technology Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor mechanical properties for joints formed by clinching steel-aluminum heterogeneous sheets, the optimization of structural process parameters in the clinching process was studied. To improve the maximum tensile and shear resistance forces of the joint, firstly, a numerical simulation model of the clinching process was established, and the reliability of the numerical model was verified by comparing the key dimensions of the joint section. Secondly, for the main structural process parameters, the Latin hypercube sampling test was conducted to obtain representative sample point set and its numerical simulation results. Then, the neck thickness value and self-locking value of the joint were predicted by Kriging approximate model, and the relative error of the prediction was less than 10% to verify the predictive ability of Kriging model. Finally, the multi-objective optimization of structural process parameters was performed by combining Kriging model with genetic algorithm. Furthermore, the test was conducted by the optimized structural process parameters, the maximum tensile resistance force of clinching joints was increased by 9.4%, and the maximum shear resistance force was increased by 26.4%, which verified the effectiveness of the optimization results.

Key words: clinching; steel-aluminum heterogeneous sheets; Kriging model; genetic algorithm; multi-objective optimization

铝合金和高强钢均被广泛应用于各大车企的车

身制造中, 钢铝混合车身也逐渐成为主流, 异质板料连接技术正在成为关注和研究的热点。目前的板料连接技术有电阻点焊、自冲铆接、粘接和无铆钉铆接等^[1]。电阻点焊技术是工业中使用最广泛的板料连接技术之一, 然而, 高温时铝合金易与铜电极发生合金化反应, 电阻点焊技术难以实现钢铝板料的可靠连接。自冲铆接和粘接分别使用特制铆钉和交联固化剂, 可实现钢铝权料的连接, 但由于工艺

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-02-19

基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20190302100GX);

国家自然科学基金资助项目 (51805045)

作者简介: 李奇涵 (1970-), 男, 硕士, 教授

E-mail: liqihan@ccut.edu.cn

通信作者: 高 嵩 (1987-), 男, 博士, 讲师

E-mail: gaosong@ccut.edu.cn

成本相对较高、工艺较为复杂等问题，未得到广泛的应用^[2-3]。无铆钉铆接（Clinching）是利用铆接模具使待铆接板料发生弹塑性变形，板料流动到凹模的凹槽内，构建出锁紧结构，进而形成有效连接的连接技术，这种连接方式具有无热输入、自动化程度高、工序简单等优点，可完美地解决异质金属板料的连接问题，因而得到越来越多的应用。然而，无铆钉铆接过程中，由于铝合金和高强钢流变特性的差异，导致成形后无铆钉铆接接头的力学性能不佳，甚至失效，因此，对钢铝异质板料无铆钉铆接工艺进行深入研究很有必要^[4]。

国内外学者围绕着成形机理、成形规律、有限元仿真开展了大量研究。如沈永飞等^[5]研究了铝合金与静音钢特殊异种材料匹配的无铆钉铆接接头成形问题，探究出最佳模具尺寸。Oudjene M 等^[6]采用田口（Taguchi）试验设计以及 Abaqus 仿真模拟的方法，研究了工艺参数对接头尺寸的影响规律以及对接头最大分离力的影响。Abe Y 等^[7]针对低延展率的高强钢在成形过程中易产生裂纹的问题，通过优化模具形状来控制板材流动，消除了板材在凸模周围因变形集中而导致的接头缺陷。Long J Q 等^[8]将 BP 神经网络和遗传算法相结合，预测了接头的最大剪切力和拉伸力。庄蔚敏等^[9]研究了铆接温度对接头尺寸颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 的影响，得出 700 °C 为高强钢板料铆接的最佳初始温度。Lambiasi F^[10]用局部加热的方法，提高了板料的延展性，减小了板料发生断裂的风险。

目前的研究主要建立在大量的试验和仿真分析上，导致优化设计成本较大、周期较长、具有一定的偶然性，不利于在实际工程中的推广和应用。并且针对钢铝异质板料无铆钉铆接结构工艺参数优化的研究相对较少、优化变量单一。本文从 Kriging 模型出发，将 Kriging 模型与遗传算法相结合，对钢铝异质板料无铆钉铆接的结构工艺参数进行了优化^[11]。

1 异质板料的无铆钉铆接过程

1.1 主要的结构工艺参数

如图 1 所示，无铆钉铆接主要的结构工艺参数为：凸模半径 X_1 、凹模半径 X_2 、凹模深度 X_3 、凹槽宽度 X_4 、冲程 X_5 。接头的主要结构参数为：颈厚值 t_n 、自锁值 t_u 和底切量 d ，颈厚值和自锁值会影响无铆钉铆接接头的力学性能，在无铆钉铆接工艺

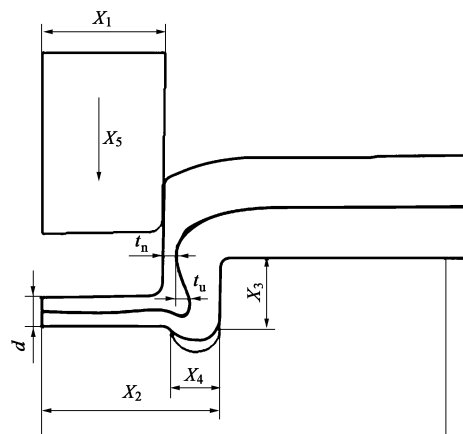


图 1 主要工艺参数和接头关键尺寸

Fig. 1 Main process parameters and key dimensions of joint

参数优化过程中，是代表接头性能的极为重要的两个指标，而底切量对接头性能没有影响^[12]，所以本文不对其展开研究。

1.2 成形试验

本文选取板料厚度均为 1.2 mm 的 6061 铝合金和 HC340/590DP 高强钢两种材料为研究对象，进行钢铝异质板料无铆钉铆接研究，采用上铝下钢的板料布置进行无铆钉铆接试验，选用设备为长春工业大学先进塑性成形课题组基于气液增压形式自主开发的 CEC08 型无铆钉铆接装备。

为了测量接头的最大抗剪切力和拉伸力，试验中的钢铝板料的无铆钉铆接形式分别为单向搭接和十字搭接，每种搭接形式分别进行 3 组试验，试验件如图 2 所示。

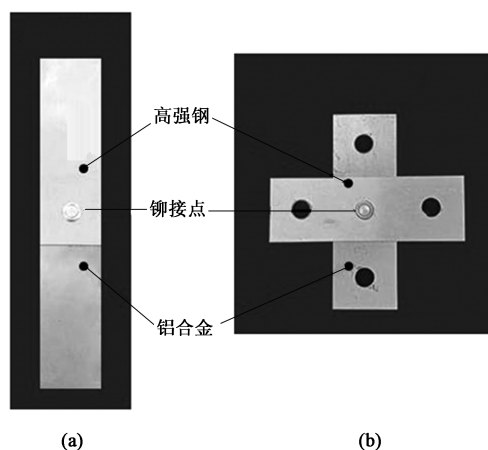


图 2 无铆钉铆接搭接形式

(a) 单向搭接 (b) 十字搭接

Fig. 2 Clinching overlapping forms

(a) Unidirectional overlapping (b) Cross-shaped overlapping

利用线切割均匀地切开铆接后的接头，并在金

相显微镜下测量颈厚值 t_n 和自锁值 t_u ，取 3 组的平均值，其中，无铆钉铆接过程的结构工艺参数及接头关键尺寸如表 1 所示。

表 1 结构工艺参数及接头关键尺寸 (mm)
Table 1 Structural process parameters and key dimensions of joint (mm)

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	t_n	t_u
数值	2.9	4.1	1.5	1.1	3.1	0.359	0.238

2 无铆钉铆接成形数值模拟

2.1 无铆钉铆接仿真模型

按照上述的钢铝异质板料无铆钉铆接工艺条件，对无铆钉铆接过程进行仿真模拟，在 Abaqus 中建立无铆钉铆接模型，凹模、凸模、压边圈设置为离散刚体，凸、凹模的尺寸如表 1 所示。上、下板料设置为可变形体。上板料为 6061 铝合金，下板料为 HC340/590DP 高强钢。通过单轴拉伸试验获得两种材料的真实应力-真实应变曲线。建立基于 Ludwik 的本构关系，表达式为：

$$\sigma = \sigma_s + G\varepsilon^L \quad (1)$$

式中： σ 为等效应力； σ_s 为屈服应力； G 为材料参数； ε 为等效塑性应变； L 为硬化因数。

本构模型中的参数值如表 2 所示，6061 铝合金和 HC340/590DP 高强钢的真实应力-真实应变曲线及 Ludwik 本构模型拟合曲线如图 3 所示。

表 2 本构模型参数

Table 2 Parameters of constitutive model

材料	σ_s /MPa	G /MPa	L
6061 铝合金	175	346.92	0.83
HC340/590DP 高强钢	360	1020	0.70

由于几何模型和接头均关于中心线对称，故采用二维的轴对称模型，仿真模型如图 4 所示。

2.2 模型验证

根据实际的试验情况设置仿真中的加载条件，板料间的摩擦因数设置为 0.3，板料与模具间的摩擦因数设置为 0.1，压边力为 20 kN，冲程为 3.1 mm，网格化分 10131 个。分为两个分析步：凸模下行分析步时长为 0.1 s；凸模上行分析步时长为 0.5 s。

试验与仿真接头的截面尺寸对比如图 5 所示，其中下角标 1 表示试验数据，下角标 2 表示仿真数据。从图 5 可以看出，仿真模型获得了与试验相一

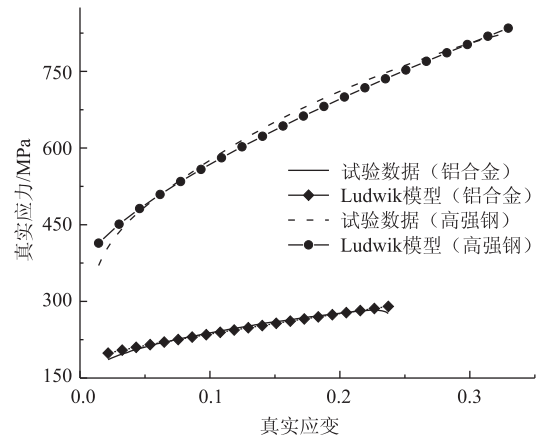


图 3 6061 铝合金和 HC340/590DP 高强钢的真实应力-真实应变曲线及 Ludwik 拟合曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves and Ludwik fitted curves for 6061 aluminium alloy and HC340/590DP high-strength steel

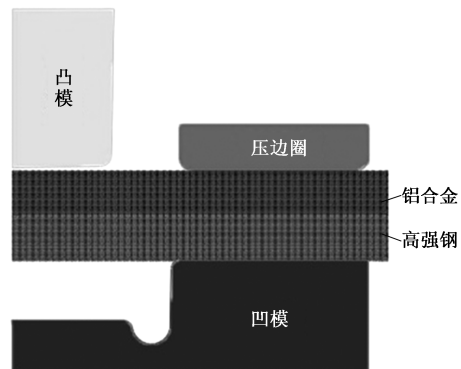


图 4 无铆钉铆接仿真模型

Fig. 4 Simulation model of clinching

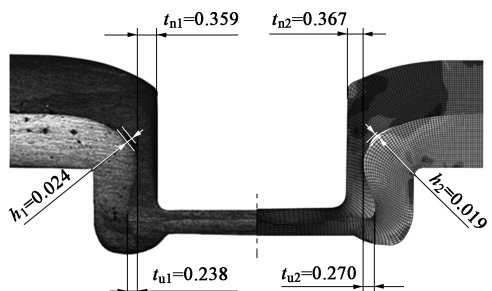


图 5 试验与仿真接头的截面尺寸对比

Fig. 5 Contrast of section sizes of joints between test and simulation

致的结构几何形状，两板间的最大缝隙均出现在互锁区上方位置。其中，预测颈厚值 t_n 的相对误差为 2.2%，自锁值 t_u 的相对误差为 13%，板料最大缝隙 h 的相对误差为 16%，造成误差的主要原因为忽略了铝合金的各向异性以及试验过程中噪声因素的影响。数值仿真模型有效地预测了接头的各成形位

置参数。

3 无铆钉铆接结构工艺参数优化

3.1 优化方案

选取凸模半径 X_1 、凹模半径 X_2 、凹模深度 X_3 、凹槽宽度 X_4 、冲程 X_5 这 5 个主要因素进行结构工艺参数的优化来提高接头的力学性能，将 Kriging 模型和遗传算法相结合，得到以颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 为目标函数的 Pareto 最优解，提高无铆钉接头的抗剪力和抗拉力，优化流程如图 6 所示。

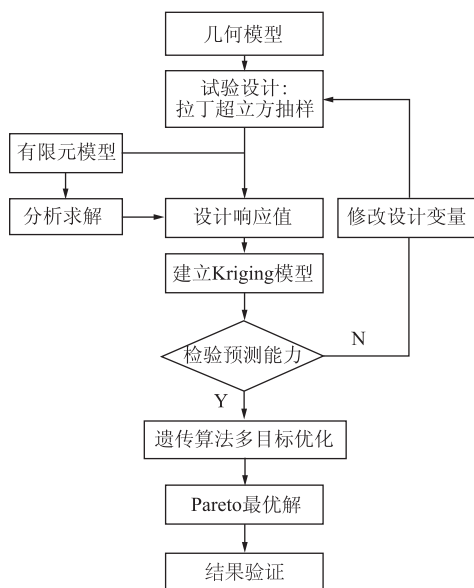


图6 优化流程

Fig. 6 Optimization flow

3.2 拉丁超立方抽样试验

为获取良好的抽样样本，采用可有效减少样本抽样数和数值仿真计算次数的拉丁超立方抽样方法 (LHS)^[13]，抽样范围如表 3 所示。抽样试验得到的样本点和仿真计算得到的响应颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 如表 4 所示。

表3 拉丁超立方抽样范围 (mm)

Table 3 Scope of Latin hypercube sampling (mm)

自变量	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
下限	2.7	4.1	1.5	1.0	3.2
上限	2.9	4.3	1.7	1.2	3.4

3.3 Kriging 模型的建立

Kriging 模型具有降低模拟计算耗时的优点，并在解决非线性程度较高的问题时更容易得到理想的

表4 拉丁超立方抽样试验结果 (mm)

Table 4 Test results of latin hypercube sampling (mm)

序号	自变量					响应值	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	t_n	t_u
1	2.713	4.237	1.617	1.006	3.303	0.3670	0.157
2	2.769	4.265	1.534	1.055	3.220	0.3957	0.150
3	2.879	4.162	1.582	1.200	3.296	0.3120	0.214
4	2.893	4.182	1.686	1.103	3.269	0.2890	0.171
5	2.720	4.127	1.603	1.165	3.337	0.3310	0.178
6	2.872	4.148	1.541	1.082	3.227	0.3170	0.238
7	2.734	4.120	1.548	1.048	3.255	0.3470	0.203
8	2.851	4.258	1.500	1.131	3.289	0.3760	0.251
9	2.755	4.155	1.589	1.041	3.400	0.3380	0.271
10	2.824	4.189	1.520	1.000	3.317	0.3320	0.313
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	2.831	4.231	1.672	1.020	3.358	0.3220	0.201
26	2.796	4.300	1.562	1.062	3.365	0.3900	0.231
27	2.803	4.100	1.637	1.137	3.234	0.2990	0.150
28	2.900	4.203	1.569	1.089	3.379	0.3240	0.274

拟合效果^[14-15]。Kriging 模型作为一种半参数化的插值技术，包含了回归部分和非参数部分，如式 (2) 所示：

$$y(x) = f^T(x)\beta + z(x) \quad (2)$$

式中： $y(x)$ 为响应函数； x 为各优化变量； $f^T(x)\beta$ 为确定性部分，提供全局性近似模拟； $z(x)$ 为随机部分，提供局偏差近似的模拟。

$z(x)$ 具有以下统计特性：

$$E[z(x)] = 0 \quad (3)$$

$$Var[z(x)] = 0 \quad (4)$$

$$Cov[z(x_i), z(x_j)] = \sigma^2 R[R(x_i, x_j)] \quad (5)$$

式中： $E[\]$ 为有关 $y(x)$ 均值的不确定性的随机项； Var 为随机项 $z(x)$ 的方差； Cov 为随机项 $z(x)$ 的协方差； σ^2 为方差； x_i 和 x_j 是训练样本中的任意两个点，对于本文有 28 个训练样本点，如表 4 所示； R 为相关函数； $R(x_i, x_j)$ 为用户指定的相关函数，表征训练样本点之间的空间相关性。

大多数情况下，相关函数一般采用高斯函数，其形式如下：

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^{n_d} \theta_k |x_{ik} - x_{jk}|^2\right) \quad (6)$$

式中： n_d 为设计变量的数目，本文中 $n_d=5$ ，即设计变量为凸模半径、凹模半径、凹模深度、凹槽宽度、冲程； θ_k 为第 k 个设计变量对应相关函数中的参数， $k=$

1, 2, ..., n_d ; x_{ik} 和 x_{jk} 为 x_i 和 x_j 的第 k 个分量。

模型的参数 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 的求解方式为:

$$\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} y \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} (y - F\hat{\beta})^T R^{-1} (y - F\hat{\beta}) \quad (8)$$

式中: F 为关于样本点和 $f(x)$ 的系数矩阵; y 为长度为 n_s 的列向量, 包含预测的响应值, 即无铆钉铆接接头的颈厚值和自锁值; $\hat{\sigma}^2$ 与 $\hat{\beta}$ 均与相关函数中的 θ_k 有关; n 为结构工艺参数组合总数。

由于 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 的值取决于相关函数中的参数 θ_k , 利用极大似然估计求解 Kriging 模型的相关参数 θ_k 。

$$MLE = \max_{\theta_k > 0} \left\{ -\frac{1}{2} [n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |R|] \right\} \quad (9)$$

式中: MLE 为极大似然估计。

在一个新的试验点, 颈厚值和自锁值的线性无偏预测 \hat{y} 可以表示为:

$$\hat{y}(x_0) = f^T(x_0) \hat{\beta} + r^T(x_0) R^{-1} (y - F\hat{\beta}) \quad (10)$$

式中: r^T 为长度为 n_s 的未试验的样本点和已经试验样本点间的关系向量, $r^T(x) = [R(x, x_1), R(x, x_2), \dots, R(x, x_{n_s})]^T$; x_0 为新试验点的工艺参数向量。

3.4 Kriging 模型预测验证

采用上板铝合金、下板高强钢的板料放置形式进行无铆钉铆接试验和仿真, 检验 Kriging 模型的预测精度, 输入的工艺参数为: $X_1 = 2.8$ mm, $X_2 = 4.2$ mm, $X_3 = 1.5$ mm, $X_4 = 1.1$ mm, $X_5 = 3.3$ mm。检验过程的响应值如表 5 所示。

表 5 响应值 (mm)
Table 5 Response values (mm)

响应值	t_n	t_u
Kriging 模型	0.381	0.274
Abaqus 仿真	0.365	0.281
试验	0.371	0.250

从表 5 中数据可以看出 Kriging 模型的预测精度: 与 Abaqus 仿真结果相比, t_n 的预测相对误差为 4.3%, t_u 的预测相对误差为 2.4%; 与铆接试验相比, t_n 的预测相对误差为 2.6%, t_u 的预测相对误差为 9.6%。数据结果表明, Kriging 模型具有良好的预测能力。

4 遗传算法多目标优化

4.1 多目标优化过程

为了获得满足多个优化目标的无铆钉铆接工艺

参数, 考虑到遗传算法可以有效地避免优化求解陷入局部最优的问题^[16], 所以, 使用遗传算法对无铆钉铆接接头的尺寸模型进行优化计算。

颈厚值和自锁值影响着无铆钉铆接接头的力学性能, 所以, 将接头尺寸的颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 作为优化目标, 以凸模半径 X_1 、凹模半径 X_2 、凹模深度 X_3 、凹槽宽度 X_4 、冲程 X_5 作为优化设计的变量, 使用上文建立的 Kriging 模型为适应度函数, 以表 3 确定的各变量的取值范围为约束区间, 构建无铆钉铆接接头尺寸的多目标优化模型:

$$\begin{cases} \text{find: } t_n, t_u \\ \text{max: } t_n(x) = f(x)^T \hat{\beta}_{t_n} + r_{t_n}^T(x) R^{-1} (y - F\hat{\beta}_{t_n}) \\ \text{max: } t_u(x) = f(x)^T \hat{\beta}_{t_u} + r_{t_u}^T(x) R^{-1} (y - F\hat{\beta}_{t_u}) \\ \text{s. t. } 2.7 \text{ mm} \leq X_1 \leq 2.9 \text{ mm} \\ 4.1 \text{ mm} \leq X_2 \leq 4.3 \text{ mm} \\ 1.5 \text{ mm} \leq X_3 \leq 1.7 \text{ mm} \\ 1.0 \text{ mm} \leq X_4 \leq 1.2 \text{ mm} \\ 3.2 \text{ mm} \leq X_5 \leq 3.4 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $t_n(x)$ 和 $t_u(x)$ 为待优化的颈厚值和自锁值目标函数; x 为待优化的变量; $\hat{\beta}_{t_n}$ 、 $\hat{\beta}_{t_u}$ 为 Kriging 模型中关于颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 的适应度函数中的参数; $r_{t_n}^T$ 、 $r_{t_u}^T$ 为关于颈厚值 t_n 和自锁值 t_u 在各待优化目标中的相关向量。

通过 Kriging 模型的结果, 发现式 (11) 中两个目标函数是相互矛盾的, 即某一个目标函数值的提高需要以另一个目标函数值的降低为代价, 称这样的解为非劣解, 或者说是 Pareto 最优解。多目标优化算法的目的就是寻找到这些 Pareto 最优解, 优化后得到的 Pareto 最优解集如图 7 所示。

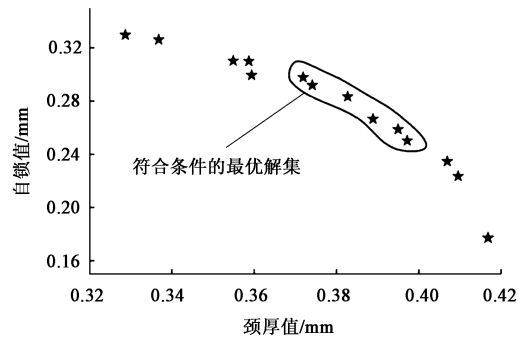


图 7 Pareto 解集

Fig. 7 Pareto solution set

4.2 多目标优化结果验证

为了验证优化结果的准确性, 从 Pareto 解集中选取符合条件的最优解, 即颈厚值大于 0.359 mm、同时自锁值大于 0.238 mm 的解。根据

实际情况及模具制造精度,选取一组结构工艺参数作为输入参数,如表6所示,进行钢铝异质板料无铆钉铆接试验,优化后的接头剖面如图8所示,测量优化后无铆钉铆接接头的尺寸及最大抗剪力和抗拉力。

表6 优化后的结构工艺参数及接头关键尺寸 (mm)

Table 6 Structural process parameters and key dimensions of joint after optimization (mm)

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	t_n	t_u
数值	2.85	4.25	1.50	1.10	3.35	0.38	0.27

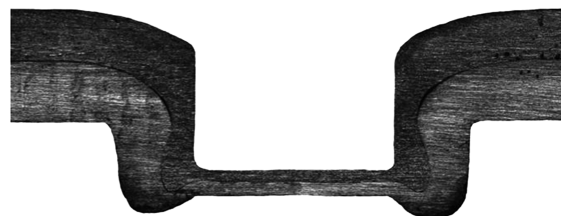
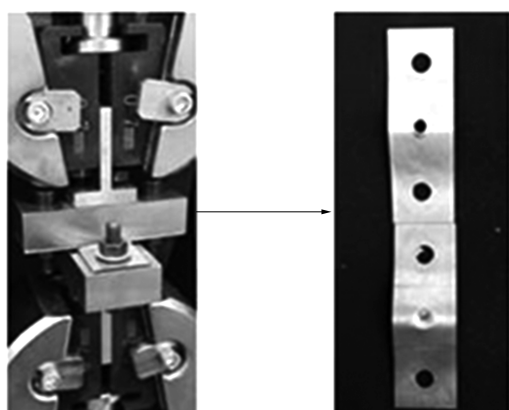


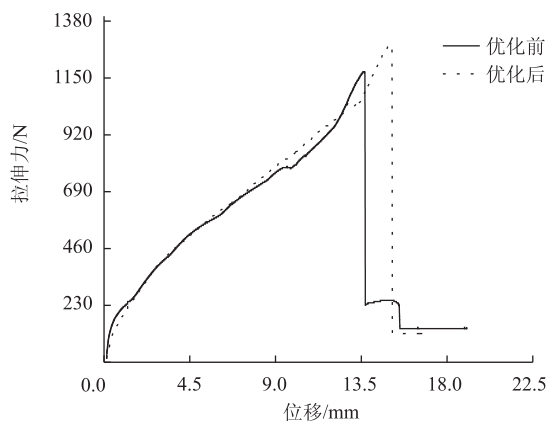
图8 优化后的接头剖面

Fig. 8 Optimized joint profile

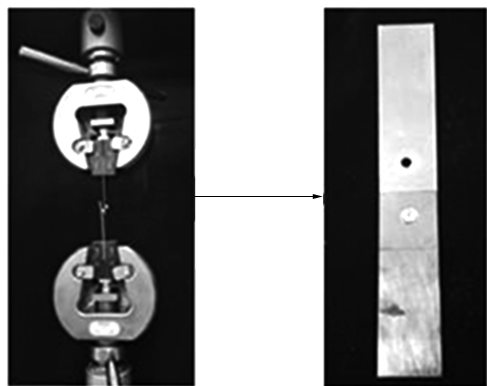
相比优化前的接头,颈厚值 t_n 相对提高了 5.8%,自锁值 t_u 相对提高了 13.4%,接头性能试验结果如图9所示。



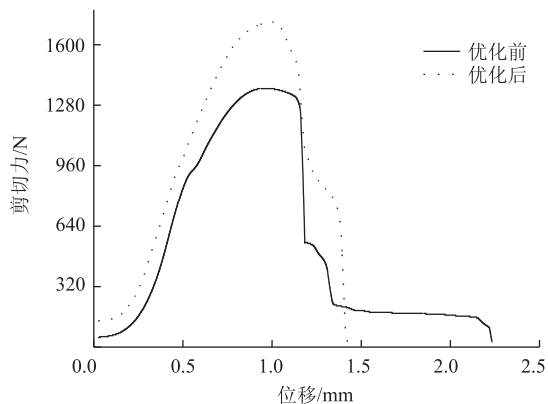
(a)



(b)



(c)



(d)

图9 优化后的接头性能试验

(a) 拉伸破坏 (b) 拉伸力-位移曲线 (c) 剪切破坏 (d) 剪切力-位移曲线

Fig. 9 Joint performance tests after optimization

(a) Tensile failure (b) Tensile force-displacement curves (c) Shear failure (d) shearing force-displacement curves

优化后得到更加合理的结构工艺参数,使得板料发生塑性变形后更好地充盈于整个凹槽之内,形成良好的锁紧机构。从图9中的拉伸力和剪切力-位移曲线上可以看出,优化后的无铆钉铆接接头在轴向拉伸

力的作用下,可以承受的最大拉伸力为 1275 N,相比优化前的最大拉伸力 1165 N,提高了 9.4%;在径向剪切力的作用下,可以承受最大剪切力为 1723 N,相比优化前的最大剪切力 1378 N,提高了 26.4%。

5 结论

(1) 建立了钢铝异质板料的无铆钉铆接有限元模型, 仿直接头与试验接头的几何形状一致, 预测颈厚值、自锁值、板料最大间隙的相对误差分别为 2.2%、13% 和 16%, 验证了模型的有效性。

(2) 选取 Kriging 模型作为近似模型, 进行了预测精度的检验, 预测的颈厚值和自锁值与数值仿真、试验结果的相对误差分别为 4.3%、2.4% 和 2.6%、9.6%, 验证了 Kriging 模型的准确性。

(3) 采用多目标优化的方法, 将 Kriging 模型与遗传算法相结合, 得到颈厚值和自锁值的最优解集, 以优化后的结构工艺参数: $X_1 = 2.85 \text{ mm}$, $X_2 = 4.25 \text{ mm}$, $X_3 = 1.50 \text{ mm}$, $X_4 = 1.10 \text{ mm}$, $X_5 = 3.35 \text{ mm}$ 进行试验。试验结果表明, 接头的最大抗拉力、最大抗剪切力分别提高了 9.4% 和 26.4%, 验证了优化方法的有效性。

参考文献:

- [1] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (24): 1-23.
Li Y B, Ma Y W, Lou M, et al. Advances in welding and joining processes of multi-material lightweight car body [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (24): 1-23.
- [2] 刘学成. 车身无铆钉接头静力学性能研究及优化 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Liu X C. Research and Optimization on the Mechanical Performance of Mechanical Clinched Joint of the Auto Body Structures [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [3] 李兵. 车身先进高强度钢零件无铆钉铆接连接及工艺参数研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Li B. Investigation on the Mechanical Clinch and Technological Parameter of the Advanced High Strength Steels in Autobody [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [4] Mucha J, Witkowski W. The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 55-66.
- [5] 沈永飞, 何冠中, 楼铭, 等. 铝合金与静音钢异种材料匹配无铆钉铆接成形特性 [J]. 机械设计与研究, 2018, 34 (1): 103-106, 112.
Shen Y F, He G Z, Lou M, et al. Research on the deformation behaviors of the clinch joining of aluminum alloy and quiet steel sheets [J]. Machine Design and Research, 2018, 34 (1): 103-106, 112.
- [6] Oudjene M, Ben-Ayed L. On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method [J]. Engineering Structures, 2007, 30 (6): 1782-1788.
- [7] Abe Y, Mori K, Kato T. Joining of high strength steel and aluminium alloy sheets by mechanical clinching with dies for control of metal flow [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2011, 212 (4): 884-889.
- [8] Long J Q, Lan F C, Chen J Q, et al. Mechanical properties prediction of the mechanical clinching joints based on genetic algorithm and BP neural network [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22 (1): 36-41.
- [9] 庄蔚敏, 赵文增, 解东旋, 等. 22MnB5 高强度/7075 铝合金热铆接冷模具淬火无铆钉铆接研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (20): 106-112.
Zhang W M, Zhao W Z, Xie D X, et al. Research on hot riveting quenching clinching of the high strength steel 22MnB5 and aluminium alloy 7075 [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (20): 106-112.
- [10] Lambiasi F. Joining aluminium alloys with reduced ductility by mechanical clinching [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77 (5-8): 1295-1304.
- [11] 韩小亭. 钢铝异质板料无铆钉铆接技术及结构工艺参数优化研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
Han X H. Research on Clinching Technology and Optimization of Structural Parameters of Steel and Aluminum Heterogeneous Sheets [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [12] Lee C J, Kim J Y, Lee S K. Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets [J]. Materials & Design, 2010, 31 (4): 1854-1861.
- [13] 刘鹏. 基于改进拉丁超立方重要抽样方法的结构可靠性分析 [D]. 广州: 暨南大学, 2016.
Liu P. Structural Reliability Analysis (SPA) Based on Improved Latin Hypercube Important Sampling [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [14] 谢延敏. 基于 Kriging 模型和灰色关联分析的板料成形工艺稳健优化设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Xie Y M. Research on Robust Optimization of Sheet Metal Forming Based on Kriging and Grey Relational Analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.
- [15] 邢伟鑫, 唐炳涛, 刘纪源, 等. 基于 Kriging 模型的 S 梁性能梯度热冲压工艺优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 57-63.
Xing W X, Tang B T, Liu J Y, et al. S-beam performance gradient hot stamping process optimization based on Kriging model [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 57-63.
- [16] 屈小章, 韩旭, 毕仁贵, 等. 基于 Kriging 近似模型的轨道主冷叶轮多目标遗传优化 [J]. 中国机械工程, 2015, 26 (14): 1938-1943.
Qu X Z, Han X, Bi R G, et al. Multi-objective genetic optimization of impeller of rail axial fan based on Kriging model [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 26 (14): 1938-1943.