

基于响应曲面法同/异种铝合金自冲铆接接头强度预测

雷乐^{1,2}, 赵伦¹, 高山凤², 李承旺¹, 卢杰豪¹, 刘高宇¹

(1. 深圳职业技术大学 智能制造技术研究院, 广东 深圳 518055;

2. 山西大学 自动化与软件学院, 山西 太原 030006)

摘要: 为寻找自冲铆接试验指标与接头强度的定量规律, 找出各因子水平的最佳组合并进行有效预测, 基于 Box-Behnken Design (BBD) 响应面法对 Al1060、Al5754、Al6061 这 3 种铝合金薄板进行自冲铆接试验。以搭接上板硬度、下板硬度、铆钉长度为自变量, 失效载荷和能量吸收为响应值, 建立自冲铆接接头强度预测多元非线性回归模型。试验结果表明, 接头强度预测值与试验值之间的误差小于 8%, 证明了回归模型的可靠性。对模型进行方差分析发现, 上下板硬度与接头失效载荷呈正相关性, 铆钉长度与接头失效载荷呈负相关性; 上板硬度与下板硬度的交互作用对接头失效载荷和能量吸收均有较大影响。

关键词: 铝合金; 自冲铆接; 响应面法; 回归模型; 强度预测; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.04.020

中图分类号: TH131.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 04-0146-07

Strength prediction on self-piercing riveting joint for similar/dissimilar aluminum alloys based on response surface method

Lei Le^{1,2}, Zhao Lun¹, Gao Shanfeng², Li Chengwang¹, Lu Jiehao¹, Liu Gaoyu¹

(1. Institute of Intelligent Manufacturing Technology, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China;

2. School of Automation and Software, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to find out the quantitative laws of self-piercing riveting test indexes and joint strength, and the optimal combination of each factor level to make effective prediction, the self-piercing riveting tests for Al1060, Al5754 and Al6061 aluminum alloy thin plates were conducted by Box-Behnken Design (BBD) response surface method. Then, taking the hardness of upper plate, hardness of lower plate and length of rivets as the independent variables, and the failure load and energy absorption value as the response values, a multivariate nonlinear regression model for the strength prediction of self-piercing riveting joint was established. The test results show that the error of joint strength between predicted and test values is within 8%, which proves the reliability of the regression model. The variance analysis of the model shows that the hardnesses of upper and lower plates gave a positive correlation with the failure load of joint, and the length of rivet has a negative correlation with the failure load of joint. The interaction between the hardness of upper plate and the hardness of lower plate has a greater effect on the failure load and energy absorption of joint.

Key words: aluminum alloy; self-piercing riveting; response surface method; regression model; strength prediction; mechanical properties

自冲铆接 (Self-piercing Rivet, SPR) 技术作为一种常用的连接技术, 已被广泛应用于航空航天、

汽车制造、电子通讯等领域^[1-2]。随着工业领域的发展, 对于连接件的要求也与日俱增。传统的铆接技术在某些方面存在一些限制, 如需要辅助设备、操作复杂、工艺不稳定等。为了解决这些问题, 自冲铆接技术应运而生, 成为一种更为便捷、高效、稳定的连接技术^[3-4]。

自冲铆接技术在实际应用中仍存在一些问题和挑战, 通过工艺试验获取响应数据的传统方法耗时大、试验量多, 因此, 亟需建立有效、可靠的自冲铆工艺及力学性能预测模型, 对推动其在工业的广泛应用至关重要^[5-6]。宋娇娇等^[7]以板材硬度、胶

收稿日期: 2023-08-14; **修订日期:** 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12104324); 高层次人才科研启动项目 (6022310046k); 深职院-新栋力超声波焊接技术研发中心项目 (602331009PQ); 深圳市优秀科技创新人才培养项目 (RCBS20210706092213010); 广东省普通高校特色创新项目 (504-6020210006T); 博士后基金启动项目 (6022331003K)

作者简介: 雷乐 (1999-), 男, 硕士研究生

E-mail: leile319777@163.com

通信作者: 赵伦 (1988-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: zhaolun@szpt.edu.cn

层厚度及刺穿压强为自变量，失效载荷值和能量吸收值为响应值进行粘铆复合试验，建立各因素与优化目标的响应面回归模型，并通过试验验证了模型的可靠性。贾颖莲等^[8]利用有限元分析与试验对比验证了钢铝自冲铆接接头的成形质量及静力学性能与铆钉长度之间的关系。胡晓雅等^[9]以 5754 铝板和 Aural2 铸铝为搭接组合的自冲铆接接头为研究对象，通过中断试验近似还原了接头剖面裂纹产生的位置和裂纹形貌，建立的仿真模型可以对接头剖面的几何形貌和裂纹位置进行准确预测。张兆元等^[10]基于有限元仿真技术，采用多目标优化的方法对铆钉和模具的多个参数进行优化，为 SPR 接头的优化提供方法。

综上所述，学者们的研究多针对同质薄板连接建立的响应回归模型进行预测，但实际应用中多为异质薄板连接。因此本文以上板硬度、下板硬度、铆钉长度为自变量，失效载荷和能量吸收为响应值，建立了响应回归模型，旨在预测同/异质自冲铆接接头的力学性能。

1 试件制备

1.1 试验材料

试验选用 Al1060、Al5754 和 Al6061^[11-12] 铝合金作为基板，板材的化学成分参数如表 1 所示。试样的几何尺寸为 110 mm×20 mm×1.5 mm，所有板材均沿轧制方向制备。测得 AA1060、AA5754 和 AA6061 铝合金的硬度分别为 28、52 和 93 HB。

表 1 材料的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of materials
（%，mass fraction）

材料	Fe	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Cu
Al1060 铝合金	0.35	0.03	0.03	0.25	0.05	0.03	0.05
材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
Al5754 铝合金	0.40	0.10	0.50	2.6	0.3	0.15	0.27
材料	Fe	Mn	Mg	Si	Cu		
Al6061 铝合金	1.2	0.15	1.2	0.8	0.25		

1.2 自冲铆接试验

自冲铆接是快速机械冷连接技术，适用于薄板的连接，连接过程简单且无需加热，不会产生有害烟雾。自冲铆接试样采用一浦莱斯精密技术（深

圳）有限公司生产的自冲铆接设备（EPRN-TF 型）制备，铆钉选用内径为 $\Phi 5.3$ mm、硬度为 H4 的半空心铆钉。铆接过程均通过载荷-行程曲线在线监控铆接质量，通过反复试验得到最优参数，并进行批量铆接。自冲铆接试件的几何尺寸如图 1 所示。

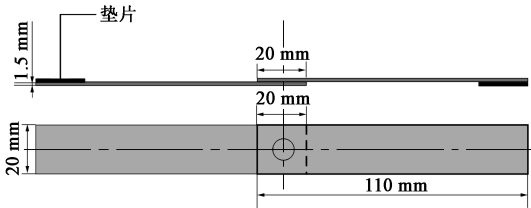


图 1 自冲铆接试件的几何尺寸
Fig. 1 Geometric sizes of self-piercing riveting specimen

2 试验设计

Box-Behnken Design（BBD）是一种评估指标和因素之间的非线性关系的试验设计方法，常被应用于需要考虑因素的非线性影响的试验中。采用 BBD 试验方法，以上板硬度、下板硬度和铆钉长度为自变量，失效载荷和能量吸收作为响应值，进行 3 因素 3 水平响应面试验，试验因素及水平如表 2 所示。为了避免在拉剪试验过程中产生扭矩，在铆接结束的试件两端的夹持部位放置了相同厚度的垫片，并对其进行了力学性能的测试，拉伸速率设置为 5 mm·min⁻¹。为保证试验的精度并排除人为因素引起的误差，每组制备 3 个试件进行拉伸-剪切试验，将得到的接头失效载荷均值计入表 3，利用 MATLAB 计算各接头的能量吸收均值。

表 2 试验因素及水平
Table 2 Factors and levels of test

因素	水平		
	-1	0	1
上板硬度/HB	28	52	93
下板硬度/HB	28	52	93
铆钉长度/mm	5.0	5.5	6.0

3 回归模型的建立及验证

3.1 回归模型的建立

以失效载荷值 F_1 为响应值，采用最小二乘法对

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

表 3 响应面试验设计方案及结果

Table 3 Design schemes and results of response surface test

方案	上板硬度/ HB	下板硬度/ HB	铆钉长度/ mm	失效载荷 均值/N	能量吸收 均值/J
1	28	52	5.0	2664	6.15
2	52	28	6.0	2216	14.62
3	28	93	5.5	2580	12.09
4	93	52	6.0	4318	20.47
5	52	52	5.5	3298	16.10
6	28	52	6.0	2245	12.95
7	52	28	5.0	2092	9.08
8	52	93	5.0	4578	11.30
9	52	52	5.5	3396	14.05
10	52	52	5.5	3526	14.68
11	52	52	5.5	3448	16.02
12	93	52	5.0	4020	13.48
13	52	52	5.5	3502	15.78
14	52	93	6.0	3233	16.46
15	93	28	5.5	2382	9.996
16	28	28	5.5	1998	9.25
17	93	93	5.5	5440	18.41

自变量上板硬度 x_1 、下板硬度 x_2 和铆钉长度 x_3 进行回归拟合。将显著性水平设为 0.05, 当 P 值 < 0.01 时, 则认为该回归模型极显著; 若 P 值 > 0.05, 则认为回归模型不显著, P 值越小, 认为显著性越高^[6]。优化后得到的接头失效载荷响应面回归模型如式 (1) 所示:

$$F_1 = -11461.46 - 41.23x_1 + 193.06x_2 + 3680.6x_3 + 0.547x_1x_2 + 12.025x_1x_3 - 23.594x_2x_3 - 0.248x_1^2 - 0.5503x_2^2 - 305.94x_3^2 \quad (1)$$

失效载荷响应面回归模型的方差结果如表 4 所示, 该模型的 P 值 < 0.0001, 测量值方差 $R^2 > 0.9$, 失拟项不显著, 说明该回归方程能够很好地逼近真实曲面, 模型能够准确地预测接头的失效载荷。对比表 4 中各 F 值的大小来确定各因素对模型影响的显著程度, F 值越大, 对该模型的影响越显著。单因素对失效载荷影响的显著程度顺序为: 下板硬度 > 上板硬度 > 铆钉长度; 交互作用中, 上板硬度与下板硬度的影响程度最显著, 下板硬度与铆钉长度次之, 上板硬度与铆钉长度的影响程度最小。

表 4 失效载荷方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of failure load

参数	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值	显著性	R^2
失效载荷	1.485×10^7	9	1.650×10^6	64.91	<0.0001	显著	0.9882
x_1	6.415×10^6	1	6.415×10^6	252.44	<0.0001	—	—
x_2	7.270×10^6	1	7.270×10^6	286.09	<0.0001	—	—
x_3	2.770×10^5	1	2.770×10^5	10.90	0.0131	—	—
x_1x_2	1.427×10^6	1	1.427×10^6	56.16	0.0001	—	—
x_1x_3	1.578×10^5	1	1.578×10^5	6.21	0.0415	—	—
x_2x_3	6.075×10^5	1	6.075×10^5	23.90	0.0018	—	—
x_1^2	2.423×10^5	1	2.423×10^5	9.53	0.0176	—	—
x_2^2	1.192×10^6	1	1.192×10^6	46.90	0.0002	—	—
x_3^2	24603.10	1	24603.10	0.97	0.3579	—	—
失拟项	1.447×10^5	3	48221.34	5.81	0.0612	不显著	—

能量吸收值可以体现接头的缓冲吸震能力。以能量吸收值 E 为响应值, 采用最小二乘法对自变量上板硬度 x_1 、下板硬度 x_2 和铆钉长度 x_3 进行回归拟合。优化后得到接头能量吸收响应面回归模型, 如式 (2) 所示:

$$E = -125.47 + 0.164x_1 + 0.302x_2 + 39.039x_3 + 0.00118x_1x_2 + 0.0184x_1x_3 - 0.0095x_2x_3 - 0.002x_1^2 - 0.002x_2^2 - 3.055x_3^2 \quad (2)$$

能量吸收响应面回归模型的方差结果如表 5 所示, 该模型的 P 值为 0.0004, 测量值方差 $R^2 > 0.9$, 失拟项不显著, 说明该回归方程能够很好地逼近真实曲面, 模型能够准确地预测接头能量吸收。单因素对能量吸收影响的显著程度顺序为: 上板硬度 > 铆钉长度 > 下板硬度; 交互作用中, 上板硬度与下板硬度的影响程度最显著, 上板硬度与铆钉长度次之, 下板硬度与铆钉长度的影响程度最小。

表 5 能量吸收方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of energy absorption

参数	平方和	自由度	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性	<i>R</i> ²
能量吸收	192.54	9	21.39	19.35	0.0004	显著	0.9614
<i>x</i> ₁	77.04	1	77.04	69.70	<0.0001	—	—
<i>x</i> ₂	23.27	1	23.27	21.05	0.0025	—	—
<i>x</i> ₃	66.67	1	66.67	60.31	0.0001	—	—
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₂	6.71	1	6.71	6.07	0.0433	—	—
<i>x</i> ₁ <i>x</i> ₃	0.37	1	0.37	0.34	0.5797	—	—
<i>x</i> ₂ <i>x</i> ₃	0.10	1	0.10	0.09	0.7727	—	—
<i>x</i> ₁ ²	15.55	1	15.55	14.07	0.0072	—	—
<i>x</i> ₂ ²	19.22	1	19.22	17.39	0.0042	—	—
<i>x</i> ₃ ²	2.45	1	2.45	2.22	0.1798	—	—
失拟项	5.56	3	1.85	3.41	0.1337	不显著	—

3.2 试验验证

为验证所得数学模型的准确性，对回归预测模型进行试验验证。选取 AA6061 铝合金（硬度为 93 HB）和 AA2A12 铝合金（硬度为 85 HB）薄板进行自冲铆接试验，图 2 为 AA6061-AA2A12 接头的拉伸结果。表 6 为验证试验结果均值、模型预测值以及误差率。

AA6061-AA2A12 接头的失效载荷和能量吸收预测值别为 5636.12 N 和 16.37 J，试验所得 Al5052-Al5052 接头的失效载荷和能量吸收为 5822 N 和 15.4 J，试验值与预测值的误差分别为 3.19% 和 6.3%，试验值和预测值的误差均在合理范围内，说明所建立的回归预测模型可有效地预测自冲铆接接头的力学性能。

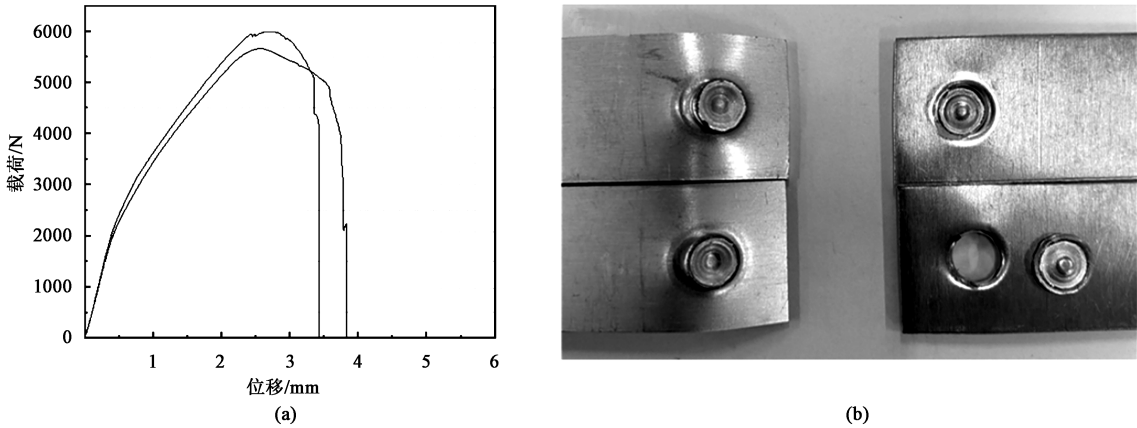


图 2 AA6061-AA2A12 接头的拉伸结果

(a) 载荷-位移曲线 (b) 失效形式

Fig. 2 Tensile results of AA6061-AA2A12 joints

(a) Load-displacement curves (b) Failure modes

表 6 验证试验结果和模型预测值对比

Table 6 Comparison between verification test results and predicted values of model

参数	上板硬度/ HB	下板硬度/ HB	铆钉长度/ mm	失效载荷预测 均值/N	失效载荷试验 均值/N	误差/%	能量吸收预测 均值/J	能量吸收试验 均值/J	误差/%
数值	93	85	5	5636.12	5822	3.19	16.37	15.4	6.3

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出

4 结果分析

4.1 单因素分析

分别将其中两因素值取中间水平探究单因素对接头力学性能的影响,如图3所示。图3a为接

头失效载荷单因素图,接头失效载荷随着上板硬度和下板硬度的增加而增加,随着铆钉长度的增加呈现线性递减。图3b为接头能量吸收单因素影响图,接头能量吸收随着上板硬度和铆钉长度的增大而增大;能量吸收随着下板硬度的增加呈现先增大后减小的变化趋势。

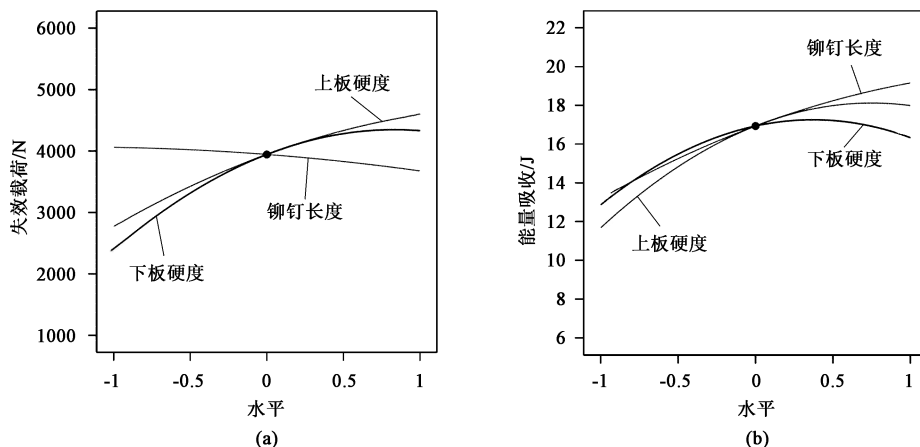


图3 单因素对接头力学性能的影响

(a) 失效载荷 (b) 能量吸收

Fig. 3 Effects of single factor on mechanical properties of joint

(a) Failure load (b) Energy absorption

4.2 多因素分析

失效载荷交互作用方差分析中, $P(x_1x_2) < P(x_2x_3) < P(x_1x_3)$, 因此, 对 x_1x_2 和 x_2x_3 进行分析。铆钉长度为 5.5 mm 时, 上板硬度与下板硬度的交互作用对失效载荷的影响规律如图4所示。结合图4a与图4b分析可知, 当上、下板硬度均为 93 HB 时, 接头的最大失效载荷为 5440 N; 等高线随着上

下板硬度的增加均匀变化, 接头失效载荷随着上板硬度与下板硬度的增加而增加。高硬度的板材通常具有更好的强度和刚度, 可以抵抗外部载荷的变形; 且高硬度的板材在接触铆钉时通常会产生更高的接触压力, 这有助于增加接头的摩擦和嵌合效果, 从而将外部载荷分散到更大的接触面积上, 提高了接头的失效载荷。

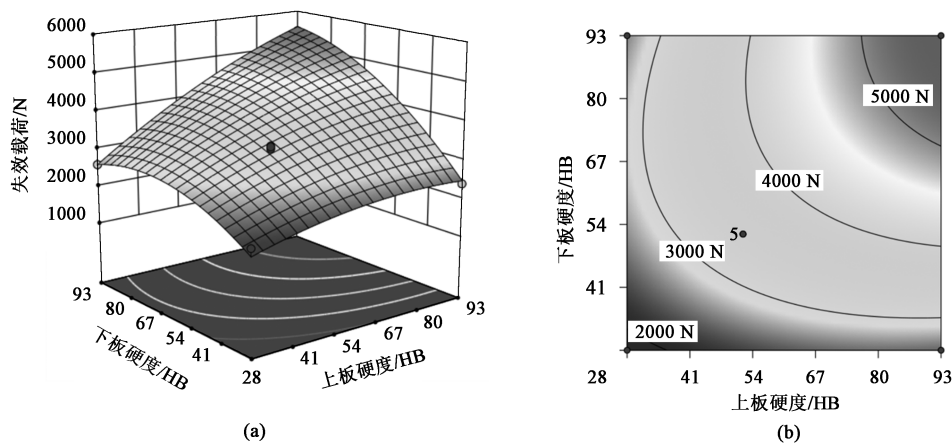


图4 上板硬度与下板硬度的交互作用对失效载荷的影响

(a) 响应面三维图 (b) 等高线图

Fig. 4 Effect of interaction between upper and lower plate hardnesses on failure load

(a) 3D diagram of response surface (b) Contour plot

上板硬度为 60.5 HB 时, 下板硬度与铆钉长度的交互作用对失效载荷的影响规律如图 5 所示, 可以观察到, 响应面峰值位于右上方, 失效载荷随着铆钉长度的增大而减小。图 5b 左侧等高线较为密集, 说明下板硬度小于 60 HB 时, 失效载荷在 2500~4000 N 范围内变化较快。铆钉长度增加,

钉身部分的面积增加, 使得整个接头的受力分布发生变化。通常情况下, 自冲铆接接头的失效是由于钉身部分的破裂或塑性变形引起的。因此, 随着铆钉长度的增加, 钉身部分的强度分布会变得不均匀, 局部应力集中的可能性增加, 从而使得接头的失效载荷减小。

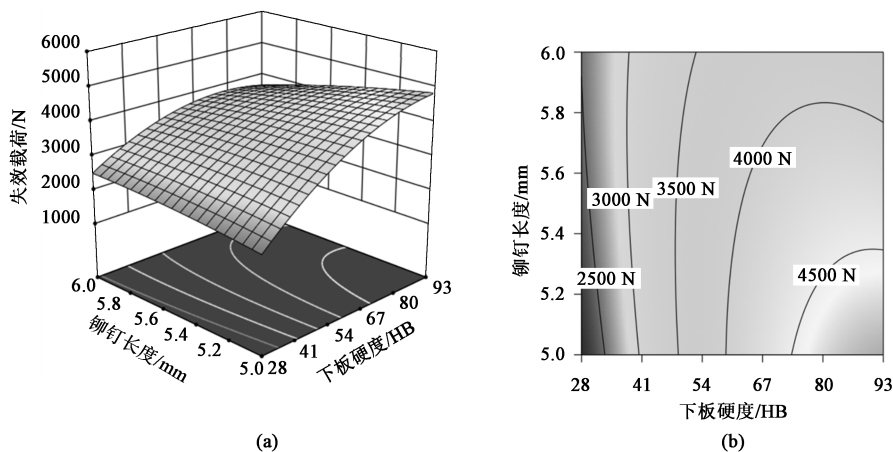


图 5 铆钉长度与下板硬度交互作用对失效载荷的影响

(a) 响应面三维图 (b) 等高线图

Fig. 5 Effect of interaction between rivet length and lower plate hardness on failure load

(a) 3D diagram of response surface (b) Contour plot

3.1 节中能量吸收交互作用方差分析结果表明, 上板硬度与下板硬度的交互作用对能量吸收的影响程度最大且 P 值小于 0.05, 因此, 对该交互作用进行分析。铆钉长度为 5.5 mm 时, 上板硬度与下板硬度的交互作用对能量吸收的影响规律如图 6 所示。观察图 6a 与图 6b 可以发现, 接头能量吸收值随着

板材硬度的增加而增加, 这是因为高硬度的板材具有较高的韧性和抗冲击能力, 可以更好地承受外部冲击或挤压力。在遭受冲击或挤压力时, 板材的变形程度相对较小, 能量将通过接头吸收和释放, 而非通过板材的塑性变形消耗, 从而提高了接头能量吸收能力。

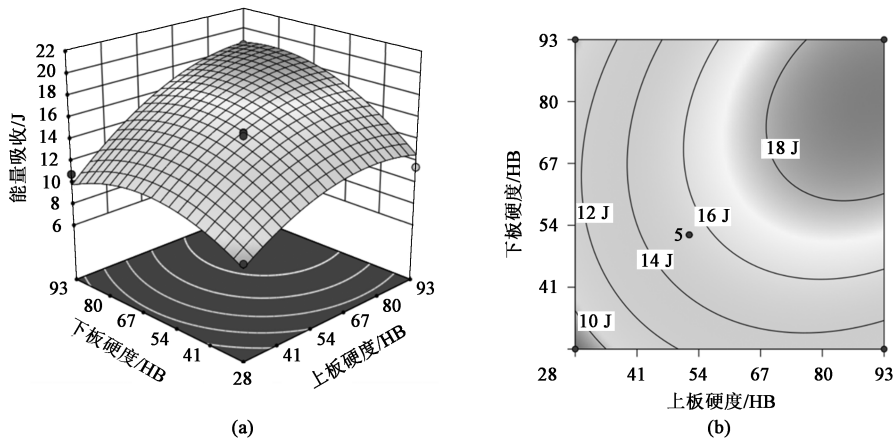


图 6 上板硬度与下板硬度交互作用对能量吸收的影响

(a) 响应面三维图 (b) 等高线图

Fig. 6 Effect of interaction between upper and lower plate hardnesses on energy absorption

(a) 3D diagram of response surface (b) Contour plot

5 结论

(1) 基于 BBD 响应面法, 以搭接上板硬度、下板硬度、铆钉长度为自变量, 失效载荷和能量吸收为响应值, 建立自冲铆接接头强度预测多元非线性回归模型, 经试验验证, 该模型预测值与试验值结果的误差均小于 8%, 说明此模型可预测同/异质自冲铆接接头的力学性能。

(2) 回归模型单因素分析表明: 接头失效载荷随着上板硬度和下板硬度的增加而增加, 随着铆钉长度的增加呈现线性递减; 接头能量吸收随着上板硬度和铆钉长度的增大而增大, 随着下板硬度的增加呈现先增大后减小的变化趋势。

(3) 回归模型多因素分析表明: 上板硬度与下板硬度的交互作用对接头失效载荷和能量吸收均有较大影响, 且接头失效载荷和能量吸收随着上下板硬度的增大而增大。

参考文献:

- [1] 温中令, 雷鸣, 潘华. 不同铆接速度下板材搭接顺序对钢/铝异种金属铆接接头性能的影响 [J]. 有色金属材料与工程, 2023, 44 (3): 9-17.
Wen Z L, Lei M, Pan H. Effect of plate lapping sequence on the performances of steel/aluminum dissimilar metal riveted joints under different riveting speeds [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2023, 44 (3): 9-17.
- [2] 张越, 蒋家传, 彭锐涛, 等. 自冲铆连接工艺数值模拟及优化研究进展 [J]. 航空制造技术, 2023, 66 (8): 47-58.
Zhang Y, Jiang J C, Peng R T, et al. Research progress on numerical simulation and optimization of self-piercing riveting joining process [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66 (8): 47-58.
- [3] 雷乐, 赵伦, 高山凤, 等. 铝钛异种薄板冷连接工艺及力学性能研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 100-106.
Lei L, Zhao L, Gao S F, et al. Cold joining process and mechanical property study for Al-Ti dissimilar plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 100-106.
- [4] 杨进, 邢保英, 何晓聪, 等. 粘接剂对腐蚀环境中异质自冲铆接头静力学性能的影响 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 119-124.
Yang J, Xing B Y, He X C, et al. Effect of adhesive on static mechanical properties of heterogeneous self-piercing riveting joints in corrosive environment [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 119-124.
- [5] Haque R. Quality of self-piercing riveting (SPR) joints from cross-sectional perspective: A review [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18 (1): 83-93.
- [6] 陈贵坤, 曾凯, 邢保英, 等. 铝合金自冲铆工艺参数的多元非线性回归模型 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (22): 227-234.
Chen G K, Zeng K, Xing B Y, et al. Multiple nonlinear regression model of process parameters for aluminum alloy self-piercing riveting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (22): 227-234.
- [7] 宋娇娇, 邢保英, 何晓聪, 等. 基于响应面法的自冲铆-粘接复合接头强度预测 [J]. 材料科学与工艺, 2023, 31 (6): 37-43.
Song J J, Xing B Y, He X C, et al. Strength prediction of self-piercing riveting bonded composite joints based on response surface method [J]. Materials Science and Technology, 2023, 31 (6): 37-43.
- [8] 贾颖莲, 何世松, 李晓炀. DP590 钢和 AA6061 铝合金自冲铆接接头的成形质量及静力学性能 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 119-129.
Jia Y L, He S S, Li X Y. Forming quality and static mechanical properties for self-piercing riveted joints of DP590 steel and AA6061 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 119-129.
- [9] 胡晓雅, 黄理, 陈秋任, 等. 铸铝自冲铆接接头裂纹扩展行为研究及仿真预测 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (9): 113-118, 141.
Hu X Y, Huang L, Chen Q R, et al. Research and simulation prediction on crack propagation behavior for cast aluminum self-piercing riveting joints [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (9): 113-118, 141.
- [10] 张兆元, 石柏军, 钟佳彬. 铝合金汽车车身半空心自冲铆接接头参数匹配优化研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48 (3): 64-68.
Zhang Z Y, Shi B J, Zhong J B. The parameter matching optimization of self-pierce riveted joints for aluminum alloy automobile body [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48 (3): 64-68.
- [11] 付博文, 李冰, 陈星合, 等. 连续流变挤压与热处理对 6061 合金线材组织性能的影响 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (8): 1070-1078.
Fu B W, Li B, Chen X H, et al. Mechanical properties and microstructure evolution in 6061 alloy wire with continuous rheo-extrusion and heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (8): 1070-1078.
- [12] 赵倩, 闫丽珍, 李锡武, 等. 退火热处理对 5056 铝合金线材微观组织与力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2023, 47 (10): 1359-1368.
Zhao Q, Yan L Z, Li X W, et al. Microstructure and properties of 5056 alloys with different annealing heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2023, 47 (10): 1359-1368.