基于遗传算法与神经网络微电阻点焊工艺参数优化

高星鹏[1]　陈　峰[1]　王宇盛[2]　黄　翔[1]　童国权[1]

（1　南京航空航天大学机电学院，南京市　210016）

（2　成都飞机工业（集团）有限责任公司，成都市　610000）

文　摘　微电阻点焊工艺参数的设置对焊点力学性能有着至关重要的作用，通过正交试验极差分析研究了工艺参数对 0.05 mm 厚 TC1 箔材焊点剪切力和剥离力的影响程度。通过赋予剪切力和剥离力相应的权值将双优化目标转化为单一的混合优化目标，结合神经网络与遗传算法，对工艺参数进行了优化，建立了基于 BP 神经网络的焊点力学性能预测模型。结果表明预测模型的误差小于 4%，预测模型具有较高的精度和预测能力，可以准确地预测焊点的力学性能。同时通过 gatool 工具箱对各项工艺参数进行了优化，获得焊接参数的最优组合：焊接电流 800 A、电极压力 8.89 N、爬坡时间 1.608 ms、焊接时间 8 ms，混合优化目标为 55.73 N。通过与正交试验优化结果对比，遗传算法寻优可以获得更好的综合力学性能。

关键词　微电阻点焊，TC1 箔材，正交试验，BP 神经网络，遗传算法，参数优化

中图分类号：TG406　　DOI：10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.007

Optimization of Micro Resistance Spot Welding Process Parameters Based on Genetic Algorithm and Neural Network

GAO Xingpeng[1]　CHEN Feng[1]　WANG Yusheng[2]　HUANG Xiang[1]　TONG Guoquan[1]

（1　College of Mechanical and Electronic Engineering，Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，Nanjing　210016）

（2　Chengdu Aircraft Industrial（Group）CO.，LTD.，Chengdu　610000）

Abstract　The setting of micro resistance spot welding parameters plays an important role in the shear force and peel force，through the range analysis of orthogonal test and the influence of process parameters on the shear force and peel force of thickness of 0.05 mm foil TC1 resistance spot welding was investigetal. By giving the corresponding values of shear force and peeling force，the bi-objective optimization is transformed into a single hybrid objective optimization，BP neural network and genetic algorithm are combined to optimize the process parameters. A prediction model of the mechanical properties of solder joints based on BP neural network is established.The prediction results show that the error is less than 4%，indicating that the network model has higher prediction accuracy and ability.It can predict the mechanical properties of solder joints accurately. At the same time，with the global optimization ability of genetic algorithm，the parameters of spot welding are optimized，and the optimum combination of welding parameters is obtained：welding current 800 A，electrode pressure 8.89 N，ramping time 1.608 ms，welding time 8 ms，hybrid target force value 55.73 N. By comparing the results of orthogonal test，genetic algorithm optimization can get better comprehensive mechanical performance.

Key words　Micro resistance spot welding，TC1，Orthogonal test，BP neural network，Genetic algorithm，Parameter optimization

0　引言

20 世纪 50 年代以来，钛合金在航空航天领域中的应用越来越广泛[1]。航空航天中的众多产品必须采用点焊方法来连接[2]，高超声速飞行器是航空航天领域重要的发展方向之一，其中应用于飞行器结构外部热防护系统（TPS）的金属蜂窝板的瓦楞板箔材

收稿日期：2017-08-07

基金项目：南京航空航天大学研究生创新基地（实验室）开放基金（kfjj20160501）

第一作者简介：高星鹏，1993 年出生，硕士研究生，主要从事高温合金蜂窝板的制备和性能研究工作。E-mail：2474958749@qq.com

通信作者：黄翔，教授。E-mail：xhuangnuaa@163.com

精密微连接技术是限制其进一步应用的关键技术。其中微电阻点焊由于其高效率、低能耗、易于实现自动化等优点,被认为是焊接金属箔材的最有效的方法。目前被广泛应用于精密电子、医疗器械、航空航天等领域。如图 1 所示为钛合金蜂窝板的结构示意图,该蜂窝板是由两块 0.8 mm 厚的 TC4 面板和单层壁厚为 0.05 mm 的 TC1 蜂窝芯体钎焊而成,应用于热防护系统的内侧,主要起着承压和隔热作用,其中微电阻点焊主要应用于瓦楞板之间的连接。电阻点焊是一个非常复杂的过程,很难建立准确的数学模型[3]。D. Afshari 等[4]人利用人工神经网络预测 AZ31 镁合金电阻点焊焊点的焊核直径,WAN Xiaodong 等[5]人利用 BP 和径向基神经网络建立了 0.4 mm 厚 TC2 板材微电阻点焊焊接接头质量的预测模型,均获得了良好的预测效果。

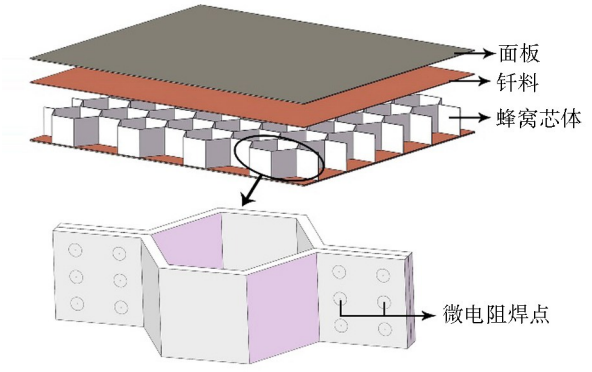


图 1　蜂窝板结构示意图

Fig.1　Sketch of honeycomb panel structure

通常只通过焊点的剪切力来评价焊点的力学性能,但在特定的载荷条件下,焊点会承受一定的剥离力[6],利用 BP 神经网络建立点焊工艺参数与焊点力学性能的复杂模型,充分发挥 BP 神经网络的非线性映射能力[7-8],准确地描述点焊工艺参数与焊点接头质量空间的映射关系[9-10],同时结合遗传算法的全局寻优能力,获得点焊工艺参数的最优搭配,保证焊接质量。通过剪切力和剥离力来评价焊点综合力学性能,涉及到工艺参数的多目标优化,但对于同一组参数,剪切力和剥离力一般不能同时达到最优值,因此可以根据实际应用环境或工程经验分别赋予剪切力和剥离力相应的权值,可以将双优化目标转化为单优化目标[11]。本文以蜂窝板平面压缩为应用背景,在之前对蜂窝板的平压模拟研究中发现,在平压过程中,面板主要承受水平方向的剪切力;蜂窝芯主要承受竖直方向的正压力,即主要承受焊点的剪切力,只有在压溃阶段会承受水平方向的剥离力,所以这里主要研究焊点剪切力的影响,而达到平压极限载荷时并不是所有焊点都发生了失效,每个焊点承受的剪切力和剥离力均不相同,所以每个焊点的权值分配也不相同,因此这里设定了一个典型权重 0.8 和 0.2。以用来验证多目标优化方法的可行性。

以 0.05 mm 厚 TC1 箔材为研究对象,通过正交试验结果的极差分析研究焊接参数分别对微电阻点焊焊点剪切力和剥离力的影响;之后通过 BP 神经网络建立了剪切力和剥离力混合目标预测模型;最后采用遗传算法对训练好的模型进行极值寻优,得出最优参数,并与正交优化结果进行对比,通过试验验证遗传算法优化的准确性。

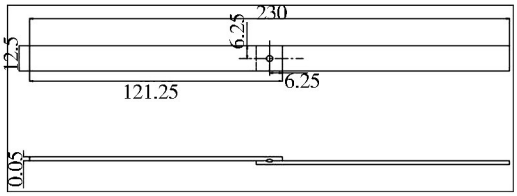
1　实验

采用 TC1 钛合金箔材,其化学成分如表 1 所示。根据 YB/T4334 标准[12],拉剪试件尺寸为 230 mm×12.5 mm×0.05 mm,如图 2(a)所示;剥离试样尺寸如图 2(b)所示。

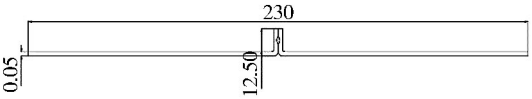
表 1　TC1 钛合金化学成分

Tab.1　Chemical composition of TC1　质量分数/%

Al	Mn	Fe	C	N	H	O	Ti
1.8	1.8	0.05	0.01	0.02	0.002	0.13	其余



(a)　拉剪试样



(b)　剥离试样

图 2　焊接试样示意图

Fig.2　Schematic diagram of weldment

采用直径为 5 mm 的 Cu-Cr-Zr 合金圆形电极来焊接箔材,焊前用丙酮溶液清洗后晾干,采用正交试验以优化试验方案,在试验过程中发现,在微电阻焊接中保压时间对拉伸-剪切力的影响较小,因此保压时间取默认值 1 000 ms;当电流在 500 A 以下时,会产生界面破坏;电流在 500~800 A 时,会发生撕裂破坏;电流在大于 800 A 时,会发生电极粘附现象。当电流略超过 800 A 时,由于焊核尺寸的进一步增大,剪切力会略有提高,但其离散性明显增大。同时电极粘附现象也随着电流的增大而愈加明显。为了得到焊接性能良好,可靠且利于加工的焊点,焊接电流的范围设定为 500~800 A。选取焊接电流、电极压力、爬坡时间、焊接时间为 4 种主要因素,每个因素选取三个水平,选用 L_{27} 正交试验表。微电阻点焊焊接工艺参数及正交试验结果如表 2 所示。在岛津(SHIMADZU)AG-IS 拉伸试验机上进行拉剪力和剥离力试验,每组实验重复 3 次,取其平均值。

表 2　焊接工艺参数及正交试验结果[1)]

Tab.2　Parameters of weld procedure and orthogonal test results

序号	I/A	F/N	T_r/ms	T_w/ms	X_s/N	X_{tsv}	X_{pv}/N	X_{pv}
1	500	8.89	1	4	52.96	5.16	4.28	0.3
2	500	8.89	3	6	54.56	2.3	6.54	0.25
3	500	8.89	5	8	51.67	3.17	6.67	0.17
4	500	17.6	1	6	52.37	2.84	5.47	0.28
5	500	17.6	3	8	51.4	1.44	6.47	0.27
6	500	17.6	5	4	51.33	1.43	4.52	0.14
7	500	35.2	1	8	49.92	1.45	6.54	0.07
8	500	35.2	3	4	46.33	2.46	6.82	0.08
9	500	35.2	5	6	42.5	0.72	6.89	0.15
10	650	8.89	1	6	58.05	3.25	5.84	0.41
11	650	8.89	3	8	57.57	2.34	8.81	0.33
12	650	8.89	5	4	54.45	2.33	9.12	0.44
13	650	17.6	1	8	56.94	0.95	7.09	0.2
14	650	17.6	3	4	54.78	1.02	8.56	0.17
15	650	17.6	5	6	55.01	0.42	5.7	0.27
16	650	35.2	1	4	51.98	3.21	7.64	0.12
17	650	35.2	3	6	51.96	2.11	8.54	0.11
18	650	35.2	5	8	51.97	0.5	9.48	0.05
19	800	8.89	1	8	66.06	2.4	13.52	0.47
20	800	8.89	3	4	64.57	2.27	19.66	0.42
21	800	8.89	5	6	61.98	3.72	19.01	0.52
22	800	17.6	1	4	63	3.17	12.14	0.26
23	800	17.6	3	6	62.93	1.77	17.41	0.2
24	800	17.6	5	8	64.24	0.99	16.02	0.23
25	800	35.2	1	6	59.32	2.14	19.42	0.17
26	800	35.2	3	8	62.02	1.69	19.01	0.12
27	800	35.2	5	4	60.67	1.8	17.78	0.03

注：1）I 为焊接电流、F 为电极压力、T_r 为爬坡时间、T_w 为焊接时间、X_s 为剪切力、X_p 为剥离力、X_{tsv} 为剪切力方差、X_{pv} 为剥离力方差。

2　焊接工艺参数对焊接性能影响

通过对表 2 正交试验结果进行极差分析，其分析结果如表 3 和表 4 所示。

表 3　剪切力正交试验分析

Tab.3　Orthogonal experimental analysis of shear force

分析[1)]	焊接电流 A/ms	电极压力 B/N	爬坡时间 C/ms	焊接时间 D/ms
K_{j1}	453.04	521.87	510.6	500.07
K_{j2}	492.71	512	506.12	498.68
K_{j3}	564.79	476.67	493.82	511.79
$\bar{K}_{j1}$	50.34	57.99	56.73	55.56
$\bar{K}_{j2}$	54.75	56.89	56.24	55.41
$\bar{K}_{j3}$	62.75	52.96	54.87	56.87
极差 R	12.41	5.03	1.86	1.46

注：1）K_{jm} 为第 j 列因素 m 水平对应的所有试验值之和，$\bar{K}_{jm}$ 为 K_{jm} 的平均值，通过对比 $\bar{K}_{jm}$ 的大小可以得出最优水平；R_j 为第 j 列因素 $\bar{K}_{jm}$ 的极差，R_j 越大，则第 j 列因素对试验值影响越大，根据 R_j 的大小，可以判断出各个因素影响的主次顺序。

表 4　剥离力正交试验分析

Tab.4　Orthogonal experimental analysis of peel force

分析	焊接电流 A/ms	电极压力 B/N	爬坡时间 C/ms	焊接时间 D/ms
K_{j1}	54.2	93.45	81.94	90.52
K_{j2}	70.78	83.38	101.82	94.82
K_{j3}	153.97	102.12	95.19	93.61
$\bar{K}_{j1}$	6.02	10.38	9.1	10.06
$\bar{K}_{j2}$	7.86	9.26	11.31	10.54
$\bar{K}_{j3}$	17.11	11.35	10.58	10.4
极差 R	11.09	2.09	2.21	0.48

2.1　对拉伸-剪切力的影响

由表 3 看出：焊接电流的极差值达到了 12.41，远大于其他三个因素，排序为 $A>B>C>D$，对焊点剪切力影响最大的是焊接电流，随后是电极压力、爬坡时间，焊接时间对剪切力的影响最小。可以发现在微电阻与常规电阻点焊中，工艺参数对焊点剪切力的影响不同。焊接电流和电极压力是影响焊点剪切力大小的重要因素，通过改变焊接电流和电极压力可以有效地对焊点剪切力进行控制；爬坡时间和焊接时间的影响较小。

2.2　对剥离力的影响

从表 4 看出，极差大小排序为 $A>C>B>D$，对焊点剥离力影响最大的是焊接电流，随后是爬坡时间、电极压力，焊接时间对剥离力的影响最小；焊接电流的极差较大，表明焊接电流是影响焊点剥离力的重要因素，通过改变焊接电流可以有效地对焊点剪切力进行控制；电极压力和爬坡时间的极差相近，表明两者对焊点剪切力的影响程度相近；焊接时间对焊点剪切力的影响最小。

3　BP 神经网络模型的建立

3.1　神经网络结构

将焊接电流、电极压力、爬坡时间、焊接时间作为 BP 神经网络模型的输入量，焊点剪切力和剥离力的混合目标值作为 BP 神经网络模型的输出量，通常任意的 n 维到 m 维的映射都可以通过一个 3 层的 BP 网络来完成[13]，增加网络的层数一方面可以降低误差、提高精度，但同时也使网络更加复杂，从而降低了训练效率[14]。因此建立了 3 层前向网络，一个输入层、一个隐层、一个输出层的 BP 网络。隐含层的节点数量可以根据经验参照以下公式进行确定：

$$l = \sqrt{(n+m)} + a \tag{1}$$

式中，l 为隐含层的节点数，为要求的值；n 为输入层的节点数，即输入的四个因素，取 4；m 为输出层的节点数，即要求的混合目标值，取 1；a 为 1～10 区间内的常数。可以看出，经过多次尝试，当隐含层的节点数为 4 时，预测值与测试值误差最小，故选 4。图 3

为建立好的 BP 模型。

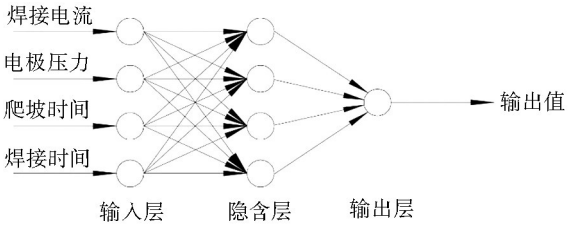


图 3　BP 网络模型

Fig.3　BP network model

3.2　BP 神经网络训练和预测

利用 Matlab 软件将正交试验的 27 组数据中的 18 组作为训练样本对 BP 神经网格进行训练[15]，由于四个输入参数具有不同的物理意义，数量级相差较大，为提高预测值的准确度，建模时对所有数据进行了归一化处理，网络输出时通过反归一化得到，并将这 27 组数据全部设为测试样本来检验网络的性能。设定目标误差为 1×10^{-9}，最大迭代次数为 1 000，训练函数采用 trainlm，输入层与隐层以及隐层与输出层的传递函数分别为 tansig 和 purelin。图 4 为网络训练过程，由图 4 可知，经 6 次训练网络可达到要求。测试结果如图 5 所示。由图可知，最大预测误差小于 4%，说明网络具有较高精度和预测能力。

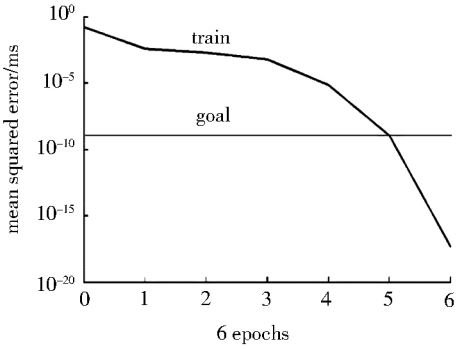
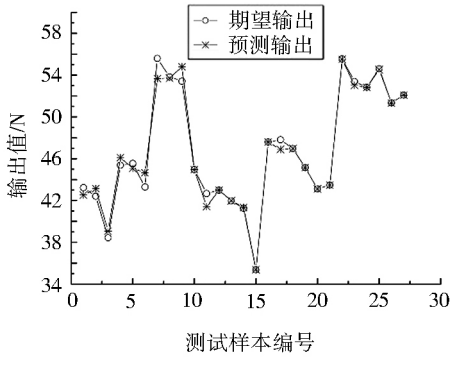
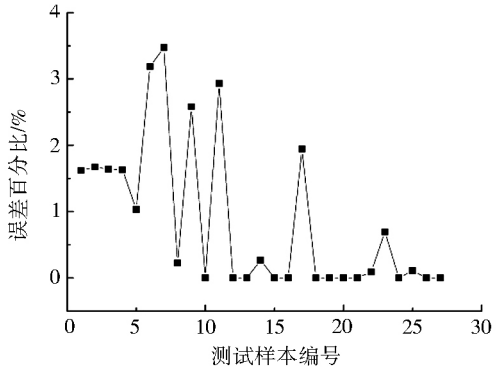


图 4　神经网络训练误差曲线

Fig.4　Error curve of BP model



(a)　试验值和预测值对比



(b)　试验值和预测值误差百分比

图 5　BP 神经网络测试结果

Fig.5　Results of BP neural network test

4　点焊工艺参数遗传算法优化

遗传算法(GA)是通过模拟自然进化的过程，按照适者生存和优胜劣汰的原理来进行全局优化的方法，从而获得最优解。

4.1　遗传算法优化

将混合目标值作为目标函数，结合 BP 神经网络及遗传算法，对混合目标值进行全局寻优，其流程图如图 6 所示。通过 MATLAB 软件自带的 gatool 工具箱，对混合目标值进行极值寻优，从而获得最优参数组合，设置种群大小为 50，变异概率为 0.2，交叉概率为 0.8，经运算后，获得最优个体。

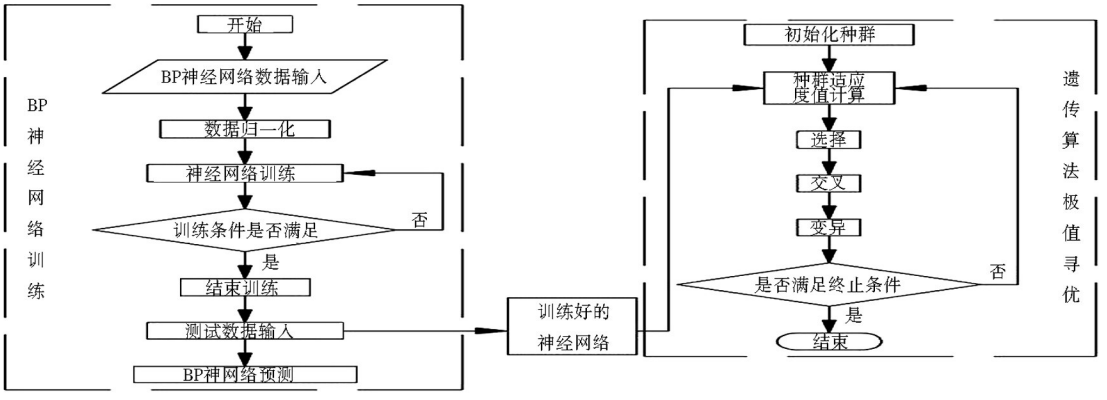


图 6　BP+遗传算法优化流程图

Fig.6　Flow chart of BP + genetic algorithm optimization

4.2 优化结果分析及验证

图 7 为优化过程中适应度值变化曲线,经过 137 次循环迭代之后,获得寻优结果为 55.73 N。此时最优点焊工艺参数组合为:焊接电流 800 A、电极压力 8.89 N、爬坡时间 1.608 ms、焊接时间 8 ms。

为验证遗传算法寻优结果的可靠性,对该工艺参数组合进行点焊试验,并进行拉剪力和剥离力试验,将其换算后与预测值进行比较,如表 5 第一组数据所示,预测模型的误差小于 4%,说明利用遗传算法寻优获得的结果是可靠的。

表 6 为混合目标正交分析表,可以得出混合目标的最优组合为 *A*3*B*1*C*2*D*3,对应参数分别为焊接电流 800 A,电极压力 8.89 N、爬坡时间 3 ms、焊接时间 8 ms,如表 5 第二组数据所示,在此参数下进行剪切力、剥离力试验,测量三次取平均值,计算出混合目标值为 55.68 N,小于遗传算法寻优得出的试验值,通过遗传算法可以更精确地获得最优参数。

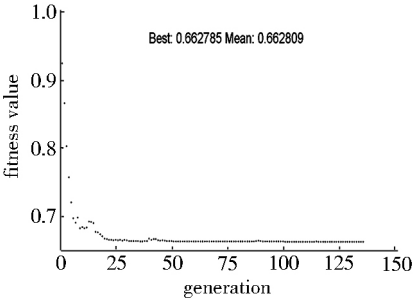


图 7 适应度变化曲线

Fig.7 Curve of the fitness

表 5 遗传算法寻优精度

Tab.5 Optimization accuracy of genetic algorithm

序号[1)]	拉剪力/N	剥离力/N	试验值/N	预测值/N	误差/%
1	67.24	14.48	56.69	55.73	1.69
2	65.29	17.21	55.68	55.09	1.06

注:1)焊接电流 800 A、电极压力 8.89 N、爬坡时间 1.608 ms、焊接时间 8 ms;2)焊接电流 800 A,电极压力 8.89 N、爬坡时间 3 ms、焊接时间 8 ms。

表 6 混合目标正交试验分析

Tab.6 Orthogonal experimental analysis of peel force

分析	焊接电流 *A*/ms	电极压力 *B*/N	爬坡时间 *C*/ms	焊接时间 *D*/ms
K_{j1}	373.27	436.19	424.86	418.16
K_{j2}	408.33	426.29	425.28	417.93
K_{j3}	482.64	401.76	414.1	428.15
$\bar{K}_{j1}$	41.47	48.47	47.21	46.46
$\bar{K}_{j2}$	45.37	47.37	47.25	46.44
$\bar{K}_{j3}$	53.63	44.64	46.01	47.57
优水平	*A*3	*B*1	*C*2	*D*3

5 结论

(1)对焊点剪切力影响最大的是焊接电流,其次是电极压力和爬坡时间,焊接时间的影响最小。

(2)对焊点剥离力影响最大的是焊接电流,其次是爬坡时间和电极压力,焊接时间的影响最小。

(3)基于点焊试验数据与 BP 神经网络,建立了 0.05 mm 厚 TC1 箔材精密微电阻点焊工艺参数与焊点质量之间的模型,预测误差小于 4%。

(4)利用遗传算法(gatool)对电阻点焊工艺参数与焊接质量模型进行优化,充分发挥遗传算法的全局寻优能力,可以获得最优点焊工艺参数组合。

(5)可以通过 BP 神经网络+遗传算法对多目标进行优化,并应用到工程实际中。

参考文献

[1]付艳艳,宋月清,惠松骁,等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J].稀有金属,2006, 30(6): 850-856.

[2] 严铿,方圆. 工艺参数对填充式搅拌摩擦无匙孔点焊性能的影响[J].焊接学报,2010,31(10): 93-96.

[3] 龙振华,程蓉.基于人工智能的薄板电阻点焊数值分析及工艺参数优化[J].组合机床与自动化加工技术,2013(6):139-141.

[4] AFSHARI D, TALEBI H. Prediction of nugget size for resistance spot weld of Mg alloys using artificial neural network [J]. Journal on Material Science, 2015, 3(1): 8.

[5] WAN X, WANG Y, ZHAO D, et al. A comparison of two types of neural network for weld quality prediction in small scale resistance spot welding[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 93: 634-644.

[6] PARK J M, KANG H T. Prediction of fatigue life for spot welds using back-propagation neural networks[J]. Materials & Design, 2007, 28(10):2577-2584.

[7] 钱和平.基于神经网络铝基复合材料焊接接头力学性能分析[J].电焊机,2014,44(11):103-105.

[8] ROLICH T, ŠAJATOVIĈ A H, PAVLINIĈ D Z. Application of artificial neural network (ANN) for prediction of fabrics' extensibility[J]. Fibers and Polymers, 2010, 11(6):917-923.

[9] 王宸煜, 黄金河. 基于人工神经网络的点焊工艺参数选择和质量预测[J]. 吉林大学学报(工), 1999(1):31-34.

[10] Ó MARTÍN, TIEDRA P D, LÓPEZ M. Artificial neural networks for pitting potential prediction of resistance spot welding joints of AISI 304 austenitic stainless steel[J]. Corrosion Science, 2010, 52(7):2397-2402.

[11] 孙丽. 基于遗传算法 BP 神经网络的多目标优化方法[J]. 激光杂志, 2016, 37(8):123-128.

[12] 金属箔材室温拉伸试验方法 [S]. 2013.

[13] 傅荟璇,赵红,等.Matlab 神经网络应用设计[M].北京:机械工业出版社,2010.

[14] 朱文志,胡德安,陈益平,等.基于遗传算法与神经网络的电阻点焊工艺参数优化的研究[C]//第十五次全国焊接学术会议论文集.青海: 中国机械工程学会,2010:232-236.

[15] PASHAZADEH H, GHEISARI Y, HAMEDI M. Statistical modeling and optimization of resistance spot welding process parameters using neural networks and multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(3):549-559.