文章编号：1004-0609(2014)03-0678-11

镀锌钢/6016 铝合金激光焊的 BP 神经网络工艺优化及组织和性能

周惦武，乔小杰，张丽娟，李　升

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室，长沙 410082)

摘　要：为了抑制或减少镀锌钢/6016 铝合金在激光焊过程中生成 Fe/Al 脆性金属间化合物，采用光纤激光器，不添加任何钎料，对汽车车身用镀锌钢与 6016 铝合金平板试件进行激光搭接焊试验。利用 ANSYS 有限元分析软件，建立钢/铝激光焊热源模型。基于模拟计算与温度同步测量，获取不同工艺条件下焊接熔深，将其作为训练样本，利用 BP 神经网络，建立激光焊条件下焊接功率、焊接速度、离焦量与焊接熔深之间的非线性映射关系，优化焊接工艺参数。采用卧式金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、微机控制电子万能试验机等手段对优化工艺条件下焊接接头各区域的金相组织、断口形貌、界面元素分布、主要物相和接头力学性能进行研究。结果表明：模拟计算获得工件表面距焊缝中心不同位置温度与实验同步测量温度基本吻合，所建热源模型能反映激光焊实际过程特点；通过神经网络方法建立模型预测不同工艺参数下焊接熔池深度的相对误差控制在 10%以内；优化工艺条件下，焊缝横截面铝熔化，钢少量熔化，液态铝在钢表面润湿铺展良好，钢/铝界面层形成厚度约为 9 μm、由 FeAl 和 Fe_3Al 组成的金属间化合物层，焊接接头平均抗剪强度为 27.70 MPa，断裂形貌表现为准解理和韧性的混合型断裂特征。

关键词：6016 铝合金；镀锌钢；激光焊；模拟计算；BP 神经网络；组织；性能

中图分类号：TG113.26　　**文献标志码**：A

Parameters optimization of laser welding process of galvanized steel and 6016 aluminum alloy based on BP neural network and its microstructure and mechanical properties

ZHOU Dian-wu, QIAO Xiao-jie, ZHANG Li-juan, LI Sheng

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The laser lap welding test on the galvanized steel and the 6016 aluminum alloy with tie fiber laser and no brazing filler metal addition was carried out in order to inhibit or reduce the formation of Fe/Al brittle intermetallic compound. The laser welding heat source model of steel and aluminum was established by using ANSYS software. The penetration depths under different process parameters were given based on the simulation and experiment results, the nonlinear relationship between the process parameters, such as laser power, welding velocity and focal position and the penetration depth was established by the BP network, the welding parameters were also optimized. The microstructure, fracture morphology, element distribution, the main phase of the welded joint regional and mechanical properties of welded joints were studied by optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffractometry and microcomputer tensile testing machine. The results show that the simulation temperatures are consistent with the measured temperatures of different positions on the workpiece surface and the heat source model can be applied to the actual laser welding process, the relative error of the penetration depth under different process parameters can be

基金项目：国家高技术研究发展计划重点项目(2012AA111802)；湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题(71075003)
收稿日期：2013-04-08；**修订日期**：2013-10-08
通信作者：周惦武，教授，博士；电话：13017297124；E-mail：zdwe_mail@126.com

controlled within 10% according to the trained network forecast. Under the optimal process conditions, aluminum melting and steel melting with a little amount on the weld cross-section take place, the wetting and spreading of the liquid aluminum on the steel surface are seen to keep good conditions. The thickness of intermetallic compounds layer is about 9 μm, which are composed of FeAl and Fe_3Al. The average shear strength is 27.70 MPa, and the fracture morphology of welding joint is in a ductile and quasi-cleavage mixing mode.

Key words: 6016 aluminum alloy; galvanized steel; laser welding; simulation calculation; BP neural network; microstructure; mechanical properties

在现有钢质车身骨架结构上，用部分铝材替代钢材，通过合理的结构组合实现一体化承载，充分发挥铝合金板材在车身轻量化及强度、刚度等方面的优势，实现车身结构的整体优化已成为实现车身轻量化的主要方法[1]，由于钢/铝两种金属之间的固溶度低，晶体结构和物理化学性能差异明显，极易反应生成 Fe/Al 脆性金属间化合物，从而严重影响焊接接头的力学性能，因此较难实现钢/铝异种金属的优质高效连接[2−7]。为抑制或减少钢/铝激光焊过程中 Fe/Al 脆性金属间化合物的产生，近年来国内外学者在激光填丝焊方面开展了一些研究工作。MATHIEU 等[8]以 6016 铝合金和低碳钢为实验材料，利用 Nd:YAG 激光器，通过填丝(88%Al 和 12%Si，质量分数)，在激光功率为 2700 W、送丝速度为 2.0 m/min 和光斑直径为 2 mm 的工艺条件下，获得了较好的焊接接头，其中金属间化合物层的平均厚度约为 5 μm，但熔池底部厚度达到 20 μm，化合物主要由 $FeAl_3$、$Fe_3Al_3Si_2$ 和 $Fe_2Al_{7.4}Si$ 等组成。樊丁等[9]利用 CO_2 激光器，以 ER4043 作为填充焊丝，对 5A02 铝合金和 ST04Z 热镀锌钢板进行焊接试验，当激光功率为 1700 W、焊接速度为 200 mm/min 和离焦量为 1 mm 时，能实现钢/铝连接，焊缝金属和镀锌板界面区形成了由 FeAlSi、FeAl 和 $FeAl_3$ 等组成的金属间化合物。由于激光填丝焊存在粘丝、顶丝、对送丝精度要求极高等诸多限制，因此，实现钢/铝优质高效连接，很多工作仍迫切需要开展。

实现钢/铝优质高效连接，需抑制或减少 Fe/Al 脆性金属间化合物的生成，而优化激光焊接工艺，使铝熔化，钢母材不熔化或少量熔化是解决问题的关键，本文作者以此为目标，选择汽车车身用镀锌钢与 6016 铝合金为研究对象，在不添加任何钎料的条件下进行激光搭接焊试验；利用 ANSYS 有限元分析软件，建立钢/铝激光焊热源模型，基于模拟计算与温度同步测量，获取不同工艺条件下焊接熔深，将其作为训练样本，利用 BP 神经网络，建立激光焊条件下焊接功率、焊接速度、离焦量与熔深之间的非线性映射关系，优化焊接工艺参数。利用卧式金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪和微机控制电子万能试验机等手段对优化工艺条件下焊接接头各区域的金相组织、断口形貌、界面元素分布、主要物相与接头力学性能进行研究，期望为多材料车身结构激光焊的推广应用提供理论指导与技术支持。

1　实验

1.1　设备与材料

采用最大输出功率为 4000 W 的 YLR−4000 镱光纤激光器，焦距为 192 mm，聚焦光斑直径为 0.4 mm，以及 ABB 五轴联动激光焊接机器人；保护气体为 Ar，气体流量为 15 L/min；实验母材采用 6016 铝合金和 DC51D+ZF 镀锌钢，其化学成分如表 1 所列，试样尺寸分别为 80 mm×30 mm×1.2 mm 和 80 mm×30 mm×1.4 mm。为将测量值与模拟计算值进行对比，焊接过程中采用热电偶对熔池附近板材的温度进行同步测量，为保证测试温度的灵敏性，采用美国国家仪器(NI)公司生产的 4351 高精度温度采集卡，高清 K 型热电偶。温度同步测量所用试验系统如图 1 所示。

1.2　实验方法

在进行 6016 铝合金/镀锌钢激光搭接焊试验时，

表 1　DC51D+ZF 和 6016 铝合金的化学成分

Table 1　Chemical compositions of DC51D+ZF and 6016 aluminum alloy (mass fraction, %)

Material	C	Si	Cu	Mn	Mg
DC51D+ZF	＜0.01	−	−	＜0.5	−
6016 Al alloy	−	1−1.5	＜0.2	＜0.2	0.25−0.6

Material	S	P	Fe	Al
DC51D+ZF	＜0.035	＜0.035	Bal.	−
6016 Al alloy	−	−	＜0.5	Bal.

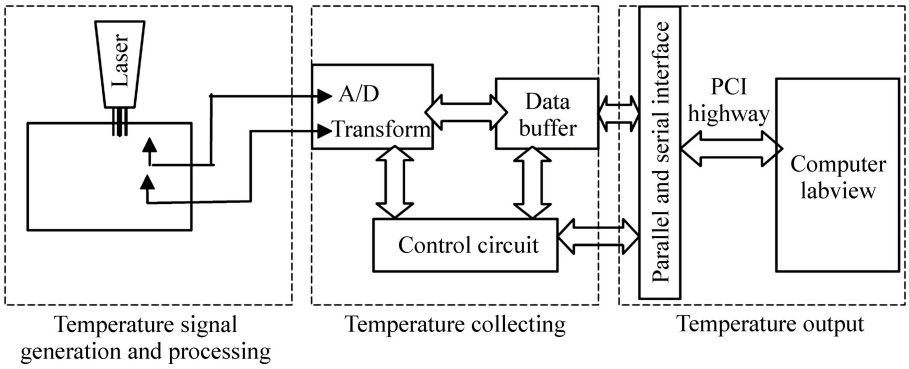

图 1 温度测量系统图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature measurement system

铝放在上面，钢放在下面，如图 2 所示。焊前用 240 号砂纸进行打磨，除去热作用区域氧化膜，同时增加表面粗糙度，以增加放在上层铝对激光能量的吸收率。用纯度为 99.5%丙酮清洗除去油污，晾干待焊。焊接过程中，激光头在进给平面内与垂直轴线之间的夹角为 20°~30°，见图 2 中 *A* 方向视图。焊后，用线切割将试样切割成标准剪切试样，如图 3 所示。将线切割后所得焊缝横截面进行打磨、抛光制成 6 mm×8 mm 的金相试样，用质量分数为 4%的 HNO_3 溶液腐蚀试件，利用卧式金相显微镜观察钢/铝焊缝/母材的显微组织；采用 FEI Quanta200 电子扫描电镜自带能谱 EDS 检测分析焊缝界面元素分布与化合物层主要成分；采用西门子 D500X 射线衍射仪分析焊缝区主要物相；

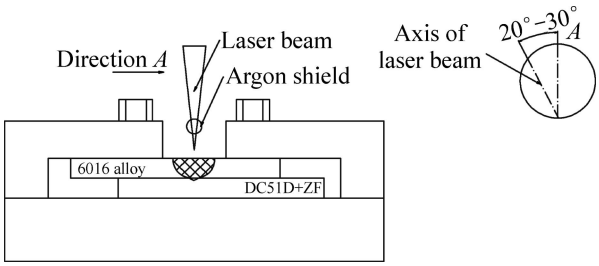

图 2 钢/铝激光熔钎焊实验过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram for laser welding-brazing of steel and aluminum

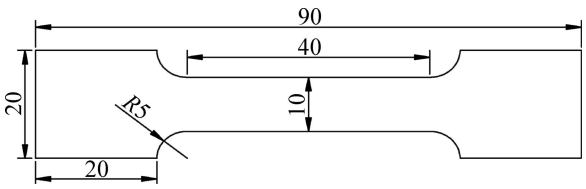

图 3 剪切试样尺寸

Fig. 3 Size of shear test sample

用微机控制电子万能试验机测试焊接试件的剪切强度；采用电子扫描电镜分析焊接试件的断口形貌。

2 热源模型和边界条件

激光焊过程是高度的非线性瞬态，材料热物理性能随着温度的变化而剧烈变化，其热传导微分方程[10]为

$$\frac{\partial}{\partial x}[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}]+\frac{\partial}{\partial y}[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}]+\frac{\partial}{\partial z}[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}]+Q(x,y,z,t)=\rho c(T)\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中：ρ、c 和 λ 分别为材料的密度、比热容和导热系数，均为温度的函数；T 为温度；t 为时间；Q 是内热源强度。

计算选用表面高斯热源，其由式(2)表示

$$q(x,y)=\frac{aP\alpha}{\pi R^2}\exp\left(-\frac{ar^2}{R^2}\right) \tag{2}$$

式中：q 为外部输入热流密度；a 为热流集中程度系数(当 a 值取 1、2 和 3 时，高斯热源的能量分布百分比分别为 63.2%、86.4%和 95.02%[11]，研究中 a 值取 3)；R 为热流分布的特征半径；P 为激光功率；α 为材料对激光的吸收率；r 为某点距激光加热光斑中心的距离。

当 t=0 时，工件具有均匀的初始温度，取周围环境温度，即 $T=T_0$=20 ℃；焊接过程中，激光作为外加热源，激光照射区域，满足第二类边界条件：

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=q \tag{3}$$

式中：n 为边界表面外法线方向。

对于外加激光热源，采用小步距跳跃式的移动热

源来模拟激光束的连续照射，激光光斑中心点沿扫描方向不断向前移动位移为Δs，其中Δs=timestep$v$(v 为焊接速度，timestep 为最小时间步长)，每次移动的光斑中心点的位置为圆心，通过 APDL 程序对位于光斑半径区域内的节点进行识别并取点，在这些节点上加载如式(3)所述的第二类边界条件，实现激光能量的加载。对称面上，考虑绝热边界条件：

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=0 \tag{4}$$

其余表面上产生对流换热，满足第三类边界条件：

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\beta(T-T_0) \tag{5}$$

式中：T_0 为外部环境温度；β 为总换热系数。图 4 所示为母材的热物性参数(导热系数 λ、定压比热容 c_p)与温度 T 的关系。

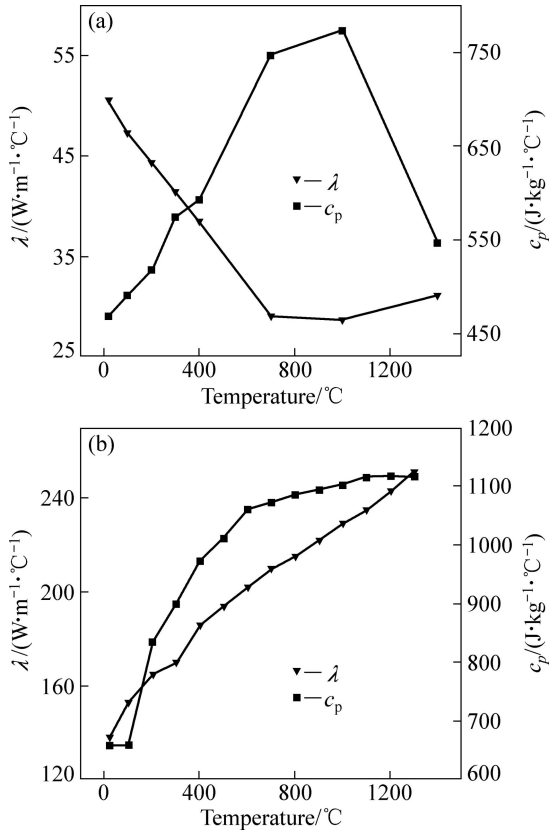

图 4　母材的热物性参数随温度的变化

Fig. 4　Variation of thermophysical properties of base material with temperature: (a) Thermophysical parameters of galvanized steel; (b) Thermophysical parameters of 6016 aluminum alloy

3　BP 神经网络

BP 神经网络在所有神经网络模型中最成熟、最具代表性，不仅有输入节点、输出节点，而且还有一层或者多层隐含节点，对于输入信息要先向前传播到隐层节点上，经过各单元的激活函数运算后，将隐层节点的输出信息传播到输出节点，最后输出结果，如果输出层结果得不到期望值，即实际输出与期望输出之间存在误差，就转入反向传播过程，将误差信号沿原来的链接通路返回，通过修改各层神经元的权值，逐次向输入层传播和进行计算，再经过正向传播，这样正向传播和反向传播的反复运用，使得误差信号最小。由于存在非线性逼近能力强、算法简单、自学性能优等特点[12−13]，本文作者采用 BP 神经网络，建立如图 5 所示的钢/铝激光焊工艺参数与熔池深度之间的 3 层网络拓扑结构的神经网络预测模型(图 5 中 P 为焊接功率，v 为焊接速度，A 为离焦量，D 为焊接熔深)。

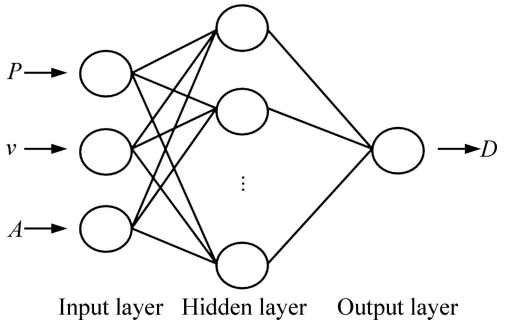

图 5　BP 神经网络结构

Fig. 5　Structure of BP ANN model

4　结果与讨论

4.1　温度场模拟计算与实验同步测量

焊接模拟过程中搭接长度取 20 mm，激光束沿中心位置，焊缝长度取 30 mm。图 6 所示为不同时刻下的温度场云图。其中，6(a)和(c)所示为激光光束在板材上表面扫描时间为 0.2 s 时上表面和纵截面的温度场分布情况；6(b)和(d)所示为扫描时间 0.5 s 时的情况。为获得不同工艺条件下焊接熔深，给出了如图 7 所示纵截面的温度分布等值线图，其中铝板在上侧，钢板在下侧，根据铝合金的熔点(660 ℃)和镀锌钢的熔点(1530 ℃)在等值线图上获取不同工艺条件下的熔深作为神经网络的训练样本。

为评价温度场模拟计算结果的准确性，需将同步测量温度结果来进行对比。由于靠近焊接接头熔化区域的温度难以测量，本研究中取距离焊缝中心一定距离的 D(2 , 15)、E(4 , 15)两点(位置如图 8 所示，Y 方向为焊缝方向，D、E 点分别为铝板上表面距焊缝不

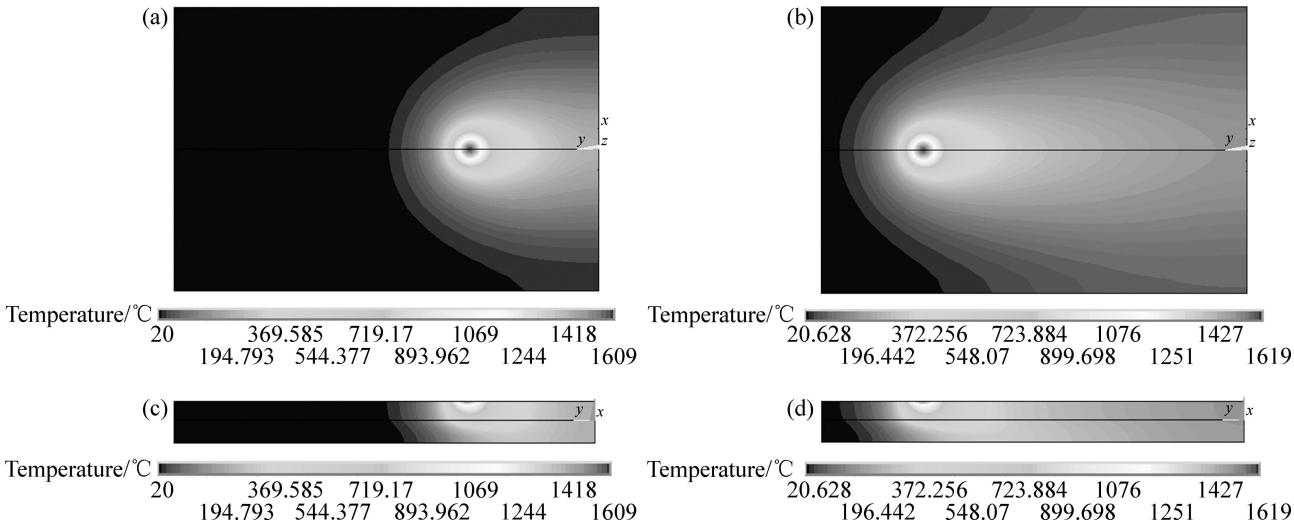

图 6 连续移动激光束作用不同时刻的温度场云图

Fig. 6 Temperature field nephograms under laser beam at different times: (a) Surface temperature nephogram at 0.2 s; (b) Surface temperature nephogram at 0.5 s; (c) Longitudinal section temperature nephogram at 0.2 s; (d) Longitudinal section temperature nephogram at 0.5 s

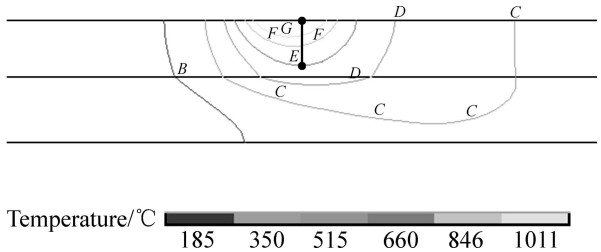

图 7 纵截面温度分布等值线图

Fig. 7 Temperature contour map of longitudinal section

同距离的点)，采用热电偶测量其在焊接过程中的温度变化，分别绘制热循环曲线，并将试验结果与模拟得到的热循环曲线进行对比[14]，所得结果如图 9 所示。可以看出，实验同步测量 D 和 E 点的升温速度和峰值温度与模拟计算结果均比较吻合，但与冷却过程存在一定差距，主要原因是模拟计算时简化了激光加热过程，未考虑熔池内部流动所带来的热量传递影响以及

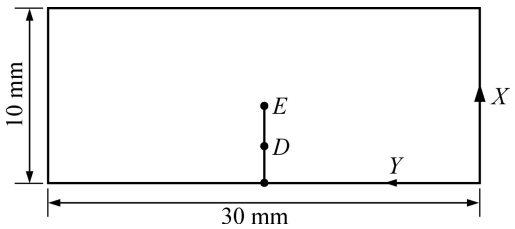

图 8 板材上定点位置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of position of dot in plate

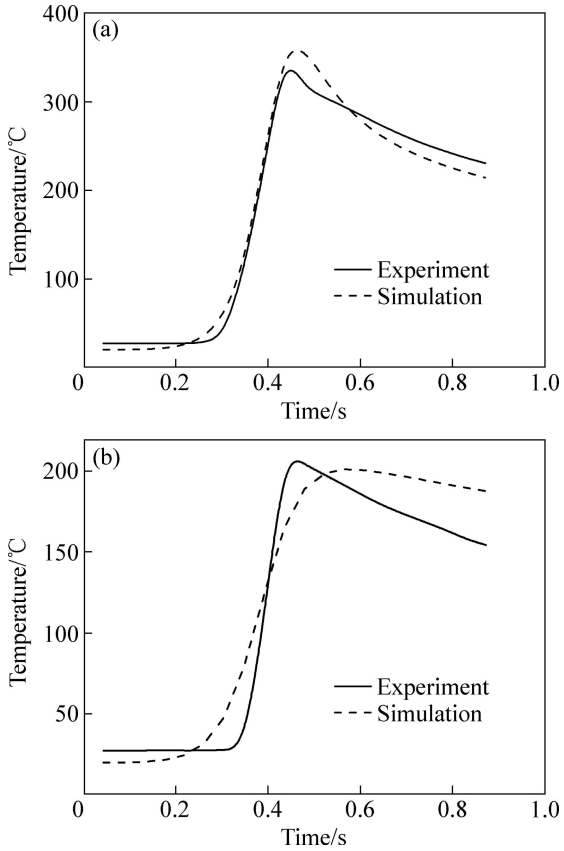

图 9 实验测量温度值与模拟计算值的对比

Fig. 9 Comparison of measured temperature values and simulation temperature values: (a) Temperature cycling curve of point D; (b) Temperature cycling curve of point E

保护气体流动对焊缝的冷却作用。

4.2　工艺参数优化

根据 4.1 节所述，纵截面温度场等值线图中测得不同工艺条件下的焊接熔深见表 2。从表 2 中随机抽取 20 组数据作为神经网络的训练样本，剩余 5 组用来检测网络的准确性和泛化性。在采用 BP 神经网络优化与预测激光焊接工艺参数前，需对网络模型进行学习训练，训练开始前对 BP 神经网络进行初始化，主要包括：初始化输入层、隐含层、输出层矩阵变量；定义隐含层、输出层神经元类型和传递函数类型；初始化各层神经元阈值及各神经元间的权值。隐含层传递函数选用 logsig 函数，输出层传递函数选用 purelin 函数，网络训练函数选用动量梯度下降函数 traingdm。对 BP 神经网络进行学习训练时，设定网络均方差目标为 0.003，预设迭代次数为 5000 次，当均方差达到目标要求时自动停止，发现 BP 神经网络在预定迭代次数内达到了误差目标要求，共迭代 3155 次，收敛过程比较平稳。

表 2　虚拟正交实验

Table 2　Orthogonal simulation experiment

Experiment No.	P/W	v/(mm·s^{-1})	A/mm	D/mm
1	1800	35	+4	0.9313
2	1800	40	+3	0.9318
3	1800	45	+2	0.9223
4	1800	50	+1	0.8926
5	1800	55	0	1.0783
6	2000	35	+3	1.2221
7	2000	40	+2	1.1962
8	2000	45	+1	1.1244
9	2000	50	0	1.2518
10	2000	55	+4	0.8143
11	2200	35	+2	1.3132
12	2200	40	+1	1.2783
13	2200	45	0	1.3347
14	2200	50	+4	1.0372
15	2200	55	+3	0.9686
16	2400	35	+1	1.3686
17	2400	40	0	1.4030
18	2400	45	+4	1.2531
19	2400	50	+3	1.2356
20	2400	55	+2	1.2058
21	2600	35	0	1.5279
22	2600	40	+4	1.3254
23	2600	45	+3	1.3020
24	2600	50	+2	1.2870
25	2600	55	+1	1.2673

BP 神经网络模型经过学习训练结束后，网络已经成型，各神经元、各层权值和阈值均已确定。为验证模型的准确性和泛化性，用剩下的 5 组数据对模型进行测试。表 3 所列为测试结果，发现训练样本值和预测值之间差别不大，最大相对误差为 9.30%，最小相对误差为 2.09%，精度控制在 10%以内，表明网络学习训练成功，网络精确度高，网络模型能反映训练样本中输入值和输出值之间的非线性映射关系[15]。

表 3　BP 神经网络测试样本值和训练样本值的比较

Table 3　Comparison of testing data and training data of BP ANN

Experiment No.	P/W	v/(mm·s^{-1})	A/mm	$D_{testing}$/mm	$D_{training}$/mm	Relative error/%
1	1800	50	+1	0.8926	0.9691	8.57
2	2000	45	+1	1.1244	1.2290	9.30
3	2200	35	+2	1.3132	1.3505	2.84
4	2400	40	0	1.4030	1.4546	3.68
5	2600	50	+2	1.2870	1.3139	2.09

基于建立钢/铝激光焊工艺参数与熔池深度之间的 BP 神经网络模型具有良好的精确性和泛化性，利用训练好的 BP 神经网络模型，根据铝熔化，钢母材不熔化或少量熔化的要求，为了抑制或减少钢/铝激光焊过程中生成 Fe/Al 脆性金属间化合物，优化与预测了钢/铝激光焊接工艺参数，获得最优参数组合如下：功率 P=2500 W、焊接速度 v=45 mm/s、焊接离焦量 A=0。

4.3　焊接试样显微组织

BP 神经网络优化的钢/铝激光焊工艺条件下，焊缝横截面形貌如图 10 所示，发现在激光热源的作用下，铝熔化，钢母材少量熔化，液态铝在钢表面润湿铺展良好，焊缝熔深和熔宽大约分别为 1.375 和 2.525 mm，焊缝深宽比为 0.545(见图 10(a))。焊缝热影响区较窄(见图 10(b))，液态铝与钢板结合部位有一个台阶状区域(见图 10(c))，该区域钢/铝存在明显界限(见图 10(d))。台阶区域的形成是因为此区域位于熔池的底部中心，热输入量高，铝与钢会发生相互作用，形成热扩散区；而钢/铝界面存在界限，表明在优化工艺条件下，钢/铝界面结合主要依靠液态铝在钢母材表面上的润湿、填充和铺展等作用。

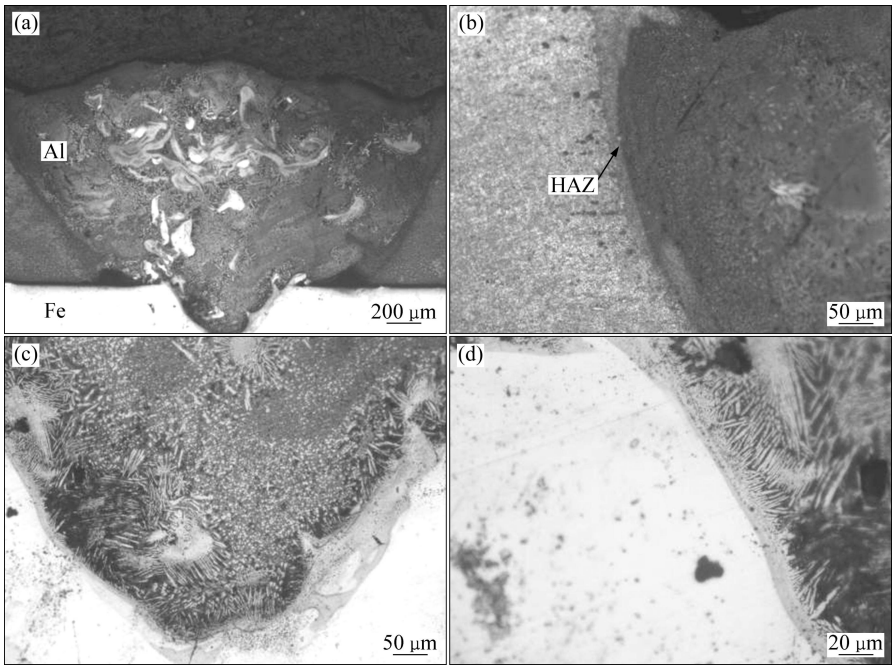

图 10 钢/铝激光焊接工艺参数优化条件下接头横截面形貌

Fig. 10 Cross-section morphologies of laser welding of steel and aluminum joint after optimization: (a) Cross-section; (b) Heat affect zone; (c) Platform area; (d) Interface of steel and aluminum

4.4 焊接接头力学性能

图 11(a)所示为钢/铝焊接接头的剪切强度，发现焊接接头平均抗剪强度为 27.70 MPa；图 11(b)所示为对应最低抗剪强度(23.95 MPa)、最高抗剪强度(32.28 MPa)、中间抗剪强度(26.86 MPa)的断裂试样。从图 11(b)可见，试样均在焊缝处剥离。图 12 所示为剪切断口处的 SEM 像。断口不同部位其形貌均不同，从图 12(c)可看出，存在较短、不连续、汇合特征不明显的河流状花样和短而弯的撕裂棱，而从图 12(d)可看出，断口表面存在一些浅和小的韧窝，焊缝区断裂形貌表现为准解理和韧性的混合型断裂特征。

4.5 焊缝界面元素分布

图 13~15 所示分别为钢/铝焊缝界面附近位于熔池中层 *B* 线、上层 *A* 线与下层 *C* 线的元素线扫描结果。可看出，Si 和 Zn 两种元素含量较低，在界面均匀分布，而 Mg、Al 和 Fe 3 种元素在界面处均有一个渐变过程。分析发现，*A* 处线扫描元素的混合区域要比 *B* 和 *C* 处的宽，*A* 处出现稳定的平台区域，*B* 和 *C* 两处却为渐变过程，推测上层 *A* 处生成的 Fe/Al 化合物层比 *B* 和 *C* 处宽，主要原因是上层 *A* 处靠近激光束照射区，加热集中，温度高，原子扩散能力增强，导致 Al 和 Fe 快速结合，容易形成金属间化合物。

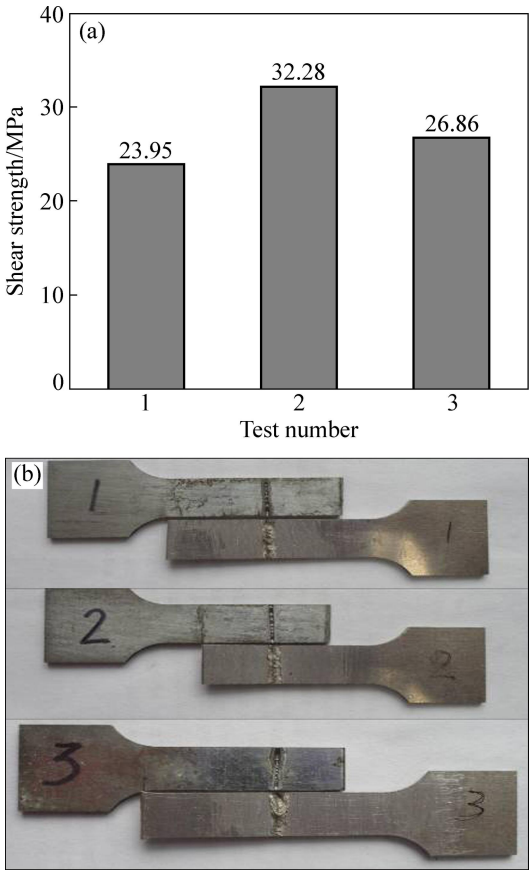

图 11 接头抗剪强度和断裂试样

Fig. 11 Shear strength of joint and specimen after stretching: (a) Shear strength of joint; (b) Specimen after stretching

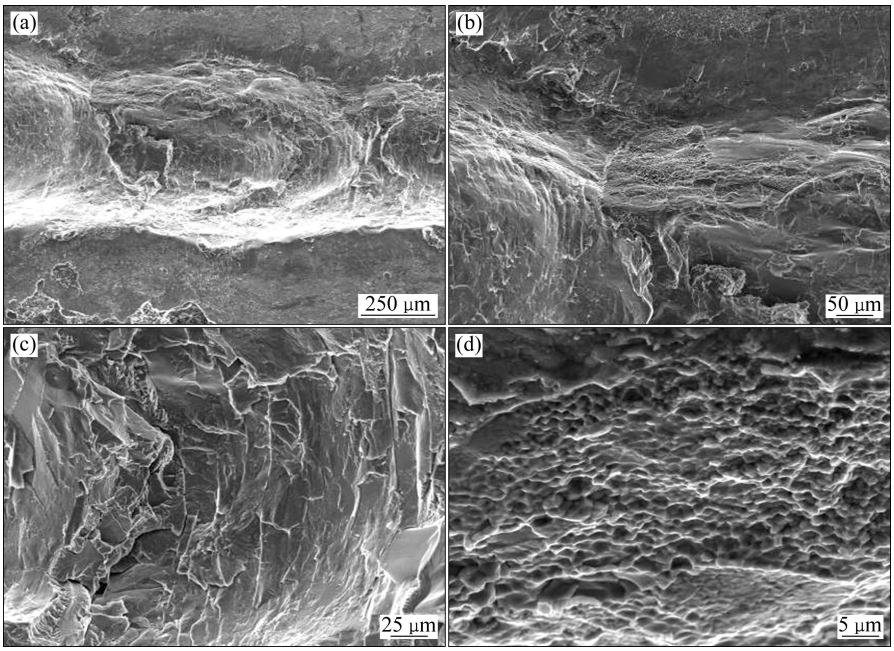

图 12　试样断口处的 SEM 像

Fig. 12　SEM images of shear fracture of specimen: (a), (b), (c) River pattern; (d) Shallow and small dimple

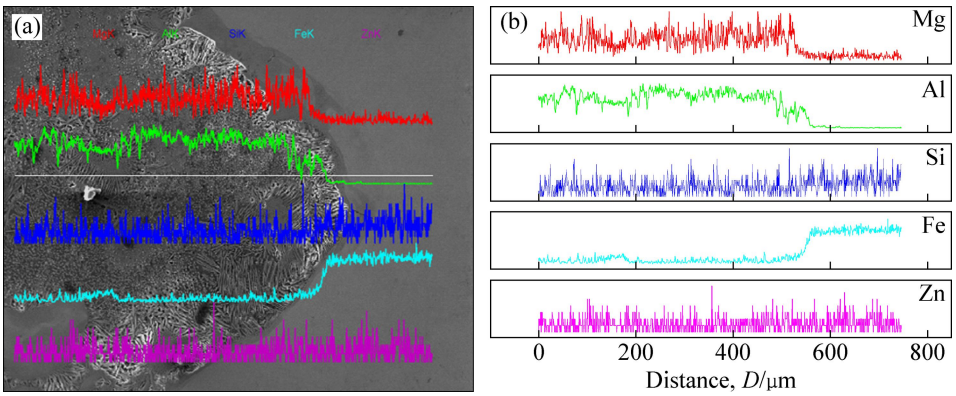

图 13　钢/铝焊缝中层 *B* 线的元素线扫描分析图

Fig. 13　Element line scanning of line *B* in steel and aluminum welded joint: (a) Line scan test position; (b) Element distribution of joint

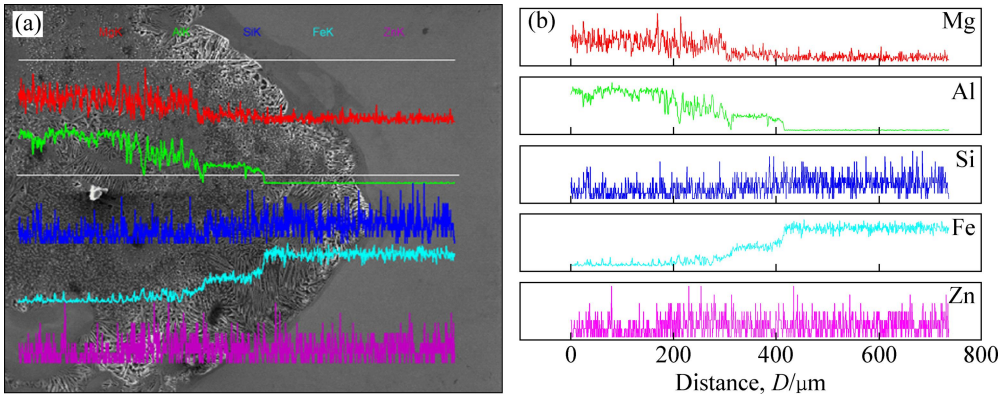

图 14　钢/铝焊缝上层 *A* 线的元素线扫描分析图

Fig. 14　Element line scanning of line *A* in steel and aluminum welded joint: (a) Line scan test position; (b) Element distribution of joint

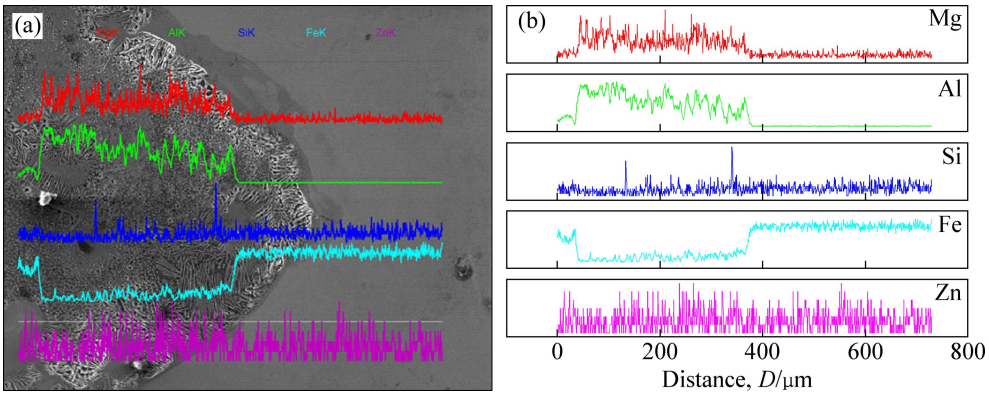

图 15 钢/铝焊缝下层 *C* 线的元素线扫描分析图

Fig. 15 Element line scanning of line *C* in steel and aluminum welded joint: (a) Line scan test position; (b) Element distribution of joint

4.6 焊缝界面层结构形态及主要物相

图 16 所示为钢/铝界面层微观结构形态。由图 16(a)可看出，钢/铝界面不同部位金属间化合物层的厚度不同。由图 16(b)可看出，*A* 区界面处靠近铝母材的化合物呈针状或片状，并向熔池方向生长，往下分为 3 层，中间层厚度最大，向两边逐渐减薄，将从靠近钢母材到熔池的 3 层依次命名为 IMC-I、IMC-II 和 IMC-III，发现化合物的平均厚度分别约为 2、5 和 2 μm，各层化合物间呈细小的锯齿状。

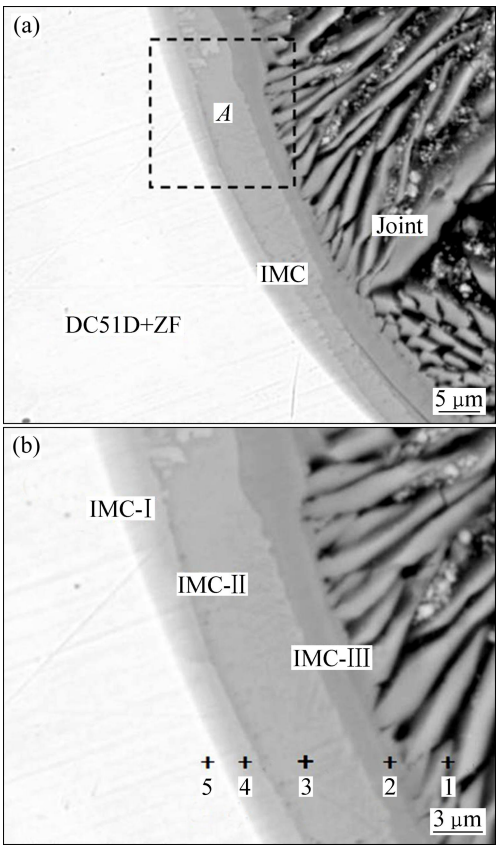

图 16 钢/铝界面的 SEM 像

Fig. 16 SEM images of laser welding-brazing of steel and aluminum interface: (a) Interface between steel and joint; (b) Enlarged view of zone *A*

由于除厚度、形态分布之外，金属间化合物层的类别对接头性能起重要作用，本文作者进一步对图 16 中不同化合物层进行了 EDS 分析，结果见表 4。发现 IMC-III(2 区)中 Al、Fe 原子个数比接近 3:1，IMC-II(3 区)中 Al、Fe 原子个数比接近 5:2，IMC-I(4 区)中 Al、Fe 原子个数比接近 1:1，在 5 区中 Al、Fe 原子个数比接近 1:3。推测 IMC-I 为 FeAl，IMC-II 为 Fe_2Al_5，IMC-III 为 $FeAl_3$，其中区域 1 为从 IMC-III 层中长出富铝的 $FeAl_3$，区域 5 为 Fe_3Al，为化合物层向钢基体过渡的过渡层。

表 4 图 16(b)中界面化合物层 EDS 分析结果

Table 4 EDS analysis results of interface compound layer shown in Fig. 16(b)

Element	Mass fraction/%				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Fe	19.56	26.21	35.97	42.65	70.61
Al	80.44	73.79	64.03	57.35	29.39

图 17 所示为焊接接头的 XRD 谱。检测发现含有 FeAl 和 Fe_3Al 两种金属间化合物，由于 EDS 分析结果显示的是钢/铝界面层不同位置的相结构，不同焊缝层面对应的相结构不同，因此 EDS 分析结果与 XRD 分析结果存在一定差异。

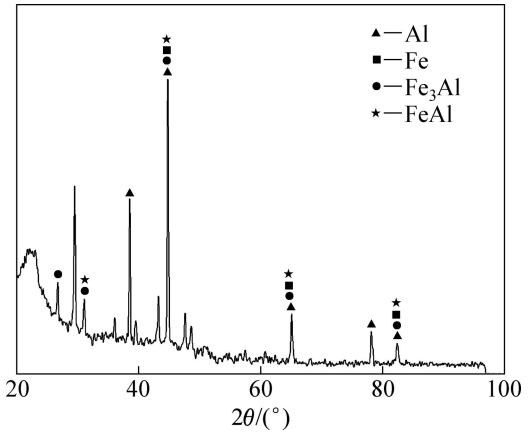

图 17　钢/铝焊接接头相结构的 XRD 谱

Fig. 17　XRD patterns of phase structure in steel and aluminum welded joint

5　结论

1) 模拟计算获得的工件表面距焊缝中心不同位置温度与实验同步测量温度基本吻合，所建热源模型能反映激光焊实际过程特点。

2) 通过神经网络方法建立模型预测不同工艺参数下焊接熔池深度的相对误差控制在 10%以内，根据铝熔化，钢母材不熔化或少量熔化的要求，为了抑制或减少钢/铝激光焊过程中生成 Fe/Al 脆性金属间化合物，优化与预测的钢/铝激光焊最优工艺参数组合如下：焊接功率为 2500 W，焊接速度为 45 mm/s，焊接离焦量为 0。

3) 优化工艺条件下，钢/铝焊缝横截面铝熔化，钢少量熔化，液态铝在钢表面润湿铺展良好，钢/铝界面层形成厚度约为 9 μm、呈细小锯齿状、由 FeAl 和 Fe_3Al 组成的金属间化合物层，焊接接头平均抗剪强度为 27.70 MPa，断裂形貌呈准解理和韧性的混合型断裂特征。

REFERENCES

[1] 龙江启, 兰凤崇, 陈吉清. 车身轻量化与钢铝一体化结构新技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 27−35.
LONG Jiang-qi, LAN Feng-chong, CHEN Ji-qing. New technology of lightweight and steel-aluminum hybrid structure car body[J]. Chinese Journal Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 27−35.

[2] 虞　钢, 赵树森, 张永杰. 异种金属激光焊接关键问题研究[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 261−268.
YU Gang, ZHAO Shu-sen, ZHANG Yong-jie. Research on key issues of laser welding of dissimilar metal[J]. Chinese Journal of Laser, 2009, 36(2): 261−268.

[3] 张明军, 陈根余, 李时春. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603010.
ZHANG Ming-jun, CHEN Gen-yu, LI Shi-chun. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel[J]. Chinese Journal of Laser, 2011, 39(4): 0603010.

[4] ZHANG H T, FENG J C, HE P, HACKL H. Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminium zinc coated steel joints made by a modified metal inert gas welding-brazing process[J]. Materials Characterization, 2007, 58(7): 588−592.

[5] 雷　振, 王旭友, 王伟波. 铝/镀锌钢复合热源熔−钎接头中的 Al-Fe 金属间化合物层分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(11): 65−68.
LEI Zhen, WANG Xu-you, WANG Wei-bo. Analysis for Al-Fe intermetallic compounds layer of fusion-brazed joints between aluminium and zinc-coated steel by hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(11): 65−68.

[6] 周惦武, 吴　平, 彭　利, 张　屹, 陈根余. 镀 Zn 钢-6016 铝合金异种金属的激光熔钎焊及数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6):1738−1746.
ZHOU Dian-wu, WU Ping, PENG Li, ZHANG Yi, CHEN Gen-yu. Laser welding-brazing and numerical simulation of zinc-coated steel and 6016 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1738−1746.

[7] 彭　利, 周惦武, 徐少华, 彭　平, 刘金水. 镀 Zn 钢-6016 铝合金激光焊接组织性能与第一原理计算[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 230−238.
PENG Li, ZHOU Dian-wu, XU Shao-hua, PENG Ping, LIU Jin-shui. Laser lap welding structural properties and first-principle computation of zinc-coated steel and 6016 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 230−238.

[8] MATHIEU A, PONTEVICCI S, VIALA J, CICALA E, MATTEI S, GREVERY D. Laser brazing of a steel/aluminium assembly with hot filler wire (88% Al, 12% Si)[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435/436(1/2): 19−28.

[9] 樊　丁, 张诗正, 余淑荣. 5A02 铝合金与镀锌钢 CO_2 激光熔−钎焊接工艺[J]. 金属铸锻焊技术, 2012, 41(11): 140−142.
FAN Ding, ZHANG Shi-zheng, YU Shu-rong. Fusion-brazing welding for dissimilar metals between 5A02 aluminum alloy and zinc-coated steel by CO_2 laser[J]. Casting Forging Welding, 2012, 41(11): 140−142.

[10] 褚庆臣, 何秀丽, 虞　钢. 不锈钢激光搭接焊接头温度场数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3180−3186.
CHU Qing-chen, HE Xiu-li ,YU Gang. Numerical simulation and analysis on temperature field for laser welded stainless steel

lap joint[J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(12): 3180−3186.

[11] 曾祥呈, 黄健文, 张庆茂. 激光焊接过程温度场的模拟[J]. 应用激光, 2008, 28(3): 190−195.
ZENG Xiang-chen, HUANG Jian-wen, ZHANG Qing-mao. Thermal field simulation in laser welding process[J]. Applied Laser, 2008, 28(3): 190−195.

[12] 刘黎明, 梁国俐, 刘玉君. 基于人工神经网络的船舶高强钢焊接变形分析预测[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 27−33.
LIU Li-ming, LIANG Guo-li, LIU Yu-jun. Analysis and prediction of the welding deformation of high-strength steel in boat based on artificial neural network[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 27−33.

[13] GHOSAL S, CHAKI S. Estimation and optimization of depth of penetration in hybrid CO_2-laser-mig welding using ANN-optimization hybrid model[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2010, 47(9/12): 1149−1157.

[14] 薛忠明, 顾 兰, 张彦华. 激光焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2003, 24(2): 79−82.
XUE Zhong-ming, GU Lan, ZHANG Yan-hua. Numerical simulation on temperature field in laser welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 79−82.

[15] SATHIYA P, PANNEERSELVAM K, ABDUL J M Y. Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm[J]. Materials and Design, 2012, 36(1): 490−498.

(编辑 陈卫萍)