

基于正交试验-BP 神经网络的 GH4169 膜片微束 TIG 焊接工艺优化

余 果, 尹玉环, 高嘉爽, 郭立杰

(上海航天设备制造总厂有限公司, 上海 200245)

摘 要: 将正交试验与 BP 神经网络结合用于 0.2 mm 厚 GH4169 膜片微束 TIG 焊接工艺参数优化, 根据正交试验结果对神经网络模型进行训练, 建立了峰值电流、基值电流、焊接速度、脉冲频率与接头直径、高度、抗拉力的 BP 神经网络模型. 结果表明, 在 BP 神经网络模型预测的基础上, 结合小步长搜索法获得的最佳工艺参数范围为峰值电流 $11.6 \text{ A} \pm 0.2 \text{ A}$ 、基值电流 $4.3 \text{ A} \pm 0.1 \text{ A}$ 、焊接速度 $4.14 \text{ mm/s} \pm 0.1 \text{ mm/s}$ 、脉冲频率 $52 \text{ Hz} \pm 2 \text{ Hz}$. 通过试验验证, 4 组试样各指标试验值均处于模型预测值范围内, 抗拉力值均高于先期试验. 试验结果证明, 该模型预测精度高, 并且该工艺优化方法能有效提高实际工艺设计的效率.

关键词: 膜片; 正交试验; 神经网络; 工艺优化

中图分类号: TG 457.19

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2018390285

0 序 言

膜盒是一种通过精密焊接而成的管状元件, 与充压成形波纹管相比, 具有刚度更小, 疲劳性能更优, 灵敏度更高等特点, 是运载火箭动力装置增压输送系统的重要组成部分^[1].

国内新一代运载火箭膜盒膜片材料采用 GH4169 高温合金, 该沉淀强化高温合金中强化相包括 γ'' , γ' 相^[2-3], 以及 γ'' 的平衡相 δ 相^[4], 具有强度高、工作温度范围大、低温性能好等特点^[5-6]. 李延民^[7]采用微束等离子焊实现了 0.12 mm 厚 GH4169 膜片焊接, 李卓然等人^[8]采用真空扩散连接以及加中间层镍箔实现 GH4169 自身的连接. 而关于微束 TIG (tungsten inert gas, TIG) 焊方面开展的研究很少, 并且膜片端接接头易发生失效破坏, 是膜盒的薄弱环节, 结合微束 TIG 焊在焊接参数易控制、操作较为简单、成本较低、生产效率高等特点, 开展 GH4169 膜片微束 TIG 焊接工艺研究, 对膜盒端接接头力学性能的提高具有重要意义.

文中采用正交试验与人工神经网络相结合的方法, 结合人工神经网络适合处理多因素多条件、不精确和模糊的信息问题的特点^[9], 建立 BP(back

propagation, BP) 神经网络, 对微束 TIG 焊接工艺参数的选取进行较为全面的优化.

1 试验方法

1.1 试验设备和材料

试验采用 PLASCON PT-10 微束 TIG 焊机; 试验材料为厚 0.2 mm 的 GH4169 膜片, 焊前膜片进行酸洗; 接头尺寸通过蔡司金相显微镜结合配套软件测量; 接头力学性能通过 INSTRON-5967 电子万能材料试验机测试.

1.2 正交试验设计

文中采用的 GH4169 合金膜片厚度仅为 0.2 mm, 因此焊接工艺参数对接头的成形及力学性能有重要的影响. 试验选取焊接峰值电流 I_p 、基值电流 I_b 、焊接速度 v 和脉冲频率 f 四个工艺参数, 设计 $L_{16}(4^4)$ 正交表, 如表 1 所示. 端接接头直径、高度以及接头抗拉力测试试样的示意图如图 1 所示. 为消除偶然误差, 各指标均匀取样 6 组, 计算平均值.

1.3 正交试验-BP 神经网络工艺参数优化法

由于正交试验选取的是一系列离散的点, 因此在其试验所得极值附近也可能存在更优参数组合. 利用 BP 神经网络结合小步长搜索法进行参数优化, 具体步骤如下.

表 1 因素水平表
Table 1 Factors and levels

水平	因素			
	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	脉冲频率 f/Hz
1	6	1	1.63	30
2	8	2	2.72	50
3	10	3	3.81	70
4	12	4	4.90	90

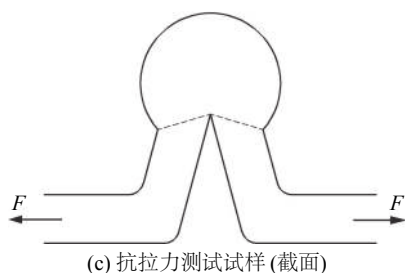
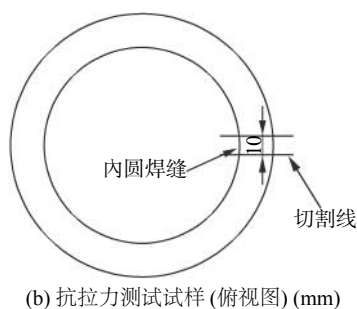
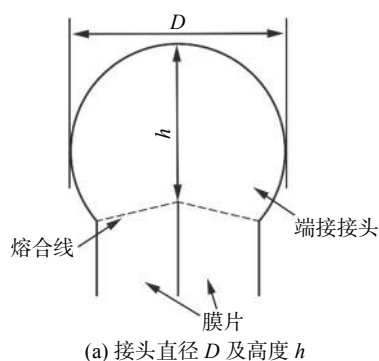


图 1 试样示意图

Fig. 1 Schematic of samples

(1) 在 L_{16} 正交表的 16 组试验中, 选取 13 组为 BP 神经网络的学习样本, 3 组为检验样本, 设置合理参数, 训练 BP 神经网络。

(2) 在 L_{16} 正交试验得到的较优组合附近采用小步长搜索的方法, 对每个因素改变微小步长 δ , 把所得参数组成新的 $L_9(4^3)$ 正交表。

(3) 通过 L_9 正交表安排网络输入, 采用训练好的 BP 神经网络进行预测, 得到一系列的相应评价指标预测值, 通过极差分析, 查找更优的参数组合。

(4) 重复小步长搜索法, 不断建立新的 L_9 正交表, 直到各指标预测值变动趋于稳定收敛, 综合分析从而获得最佳工艺参数组合。

2 BP 神经网络预测模型的建立

2.1 BP 神经网络结构设计

文中采用 BP 神经网络结合正交试验来描述峰值电流、基值电流、焊接速度和脉冲频率与端接接头直径、高度和抗拉力之间的相互关系。BP 神经网络是目前研究最多、应用最广的人工神经网络模型, 具有自组织、自学习和联想记忆等功能, 同时容错性也较好^[10]。目前研究已经证明, 在隐含层神经元数量足够的情况下, 一个三层 BP 神经网络可以实现任意 m 维输入层到 n 维输出层的映射^[11], 因此, 文中通过 MATLAB 数学软件建立三层 BP 神经网络模型, 其网络结构如图 2 所示。

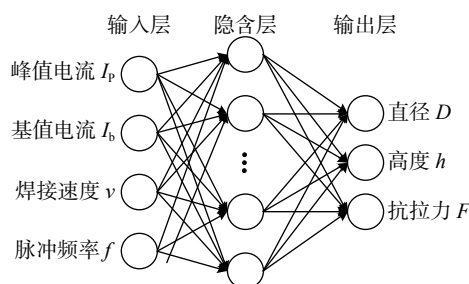


图 2 三层 BP 神经网络结构

Fig. 2 Structure of BP neural networks

隐含层中神经元数量的选择是 BP 神经网络的重要环节, 它对神经网络的性能有很大的影响, 目前理论上没有统一规范的方法确定隐含层神经元的数量, 一般采用经验公式并加以不断的尝试来确定, 文中采用的经验公式为

$$J = \sqrt{m+n+a} \quad (1)$$

式中: J 为隐含层神经元数; m 为输入层神经元数; n 为输出层神经元数; a 一般取 1~10。根据经验公式进行大量尝试, 最终选取 J 为 12。

2.2 BP 网络算法和参数设定

文中建立的 BP 模型输入层与隐含层之间采用双极 S 型函数, 同时考虑到输出为正值和运算的收敛性, 隐含层和输出层之间采用单极 S 型函数, 各函数定义分别如下。

$$\text{双极S函数: } f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

$$\text{单极S函数: } f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

通过前期调研及尝试,文中建立的 BP 神经网络训练函数采用 trainlm 函数,该函数算法简称 L-M 法 (Levenberg-Marquardt 算法)。该方法通过在 HESSLAN 矩阵上加一个正定矩阵来进行分析评估,比传统的 BP 算法迭代次数少,收敛快,精度高^[12],其连接权值的修正公式为

$$\Delta w = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T E \quad (4)$$

式中: Δw 为连接权值; J 为误差对权值微分的雅可比矩阵; I 为单位矩阵; μ 为标量; E 为误差向量。

$$\text{L-M法的迭代公式为: } x_{k+1} = x_k + \Delta w \quad (5)$$

为提高 BP 神经网络的学习效率和速度且防止出现“过拟合”现象,学习率选择范围在 0.05~0.15 之间,动量因子选择范围在 0.5~0.9 之间。

3 试验结果与分析

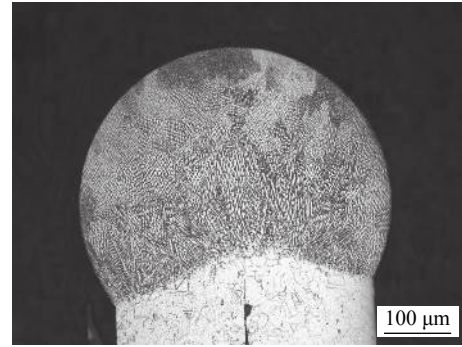
3.1 正交试验结果与分析

试验首先根据正交表进行 16 组焊接试验,具体见表 2。由于试验组较多,仅随机列出 2 组端接头微观组织形貌,如图 3 所示。

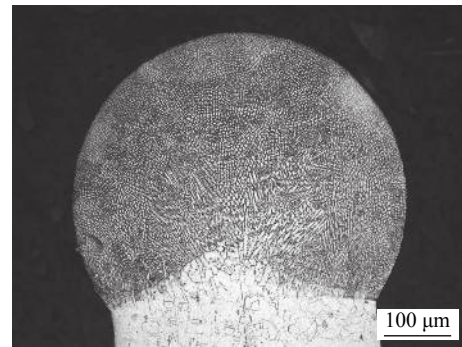
表 2 正交试验结果

Table 2 The results of orthogonal experiment

序号	工艺参数				直径 D/mm	高度 h/mm	抗拉力 F/N
	峰值电 流 I_p/A	基值电 流 I_b/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	脉冲频 率/Hz			
1	6	1	1.63	30	0.461	0.271	390.5
2	6	2	2.72	50	0.476	0.277	423.1
3	6	3	3.81	70	0.483	0.285	468.6
4	6	4	4.90	90	0.491	0.299	585.5
5	8	1	2.72	70	0.488	0.300	554.3
6	8	2	1.63	90	0.496	0.292	487.5
7	8	3	4.90	30	0.506	0.307	674.5
8	8	4	3.81	50	0.518	0.318	718.7
9	10	1	3.81	90	0.503	0.307	632.9
10	10	2	4.90	70	0.505	0.305	728.4
11	10	3	1.63	50	0.513	0.316	806.3
12	10	4	2.72	30	0.516	0.320	852.6
13	12	1	4.90	50	0.508	0.308	798.4
14	12	2	3.81	30	0.515	0.322	860.1
15	12	3	2.72	90	0.517	0.320	858.8
16	12	4	1.63	70	0.520	0.325	863.8



(a) 参数组合 1



(b) 参数组合 5

图 3 端接头微观组织形貌

Fig. 3 Microstructures of edge joint

取显著性水平 α 为 95%, 对表 2 正交试验结果进行方差分析, 各指标对应的 F 值与该显著性水平下 $F_{0.05}(3, 12)$ 的比较结果见表 3。由方差分析结果可知, 峰值、基值电流对各评价指标影响程度的显著性明显大于焊接速度和脉冲频率, 因此, 电流的变化是引起各评价指标变化的主导因素。

表 3 方差分析

Table 3 Variance analysis

指标	因素	偏差平方和	F值	$F_{0.05}(3, 12)$	显著性
直径D	峰值电流 I_p	3.223×10^{-3}	2 578	3.49	显著
	基值电流 I_b	9.965×10^{-4}	797.2	3.49	显著
	焊接速度 v	1.265×10^{-4}	101.2	3.49	显著
	脉冲频率 f	5.75×10^{-5}	46.00	3.49	显著
高度h	峰值电流 I_p	2.887×10^{-3}	83.97	3.49	显著
	基值电流 I_b	8.86×10^{-4}	25.77	3.49	显著
	焊接速度 v	9.85×10^{-5}	2.865	3.49	不显著
	脉冲频率 f	3.5×10^{-6}	0.102	3.49	不显著
抗拉力F	峰值电流 I_p	3.317×10^5	184.3	3.49	显著
	基值电流 I_b	6.437×10^4	35.77	3.49	显著
	焊接速度 v	7.203×10^3	4.002	3.49	较显著
	脉冲频率 f	7.848×10^3	4.361	3.49	较显著

对正交试验结果采用极差分析方法, 通过极差的大小直观确定正交试验中的较优参数范围, 结果见表 4。

表 4 极差分析
Table 4 Range analysis

评价指标	极差	工艺参数			
		峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	脉冲频率 f/Hz
直径	R_D	3.725×10^{-2}	2.125×10^{-2}	7.25×10^{-3}	4.75×10^{-3}
高度	R_h	3.575×10^{-2}	1.9×10^{-2}	7×10^{-3}	1.25×10^{-3}
抗拉力	R_F	378.322	161.131	59.674	53.224

正交试验中各评价指标的变化趋势如图 4 所示,当峰值电流从 8 A 增加至 12 A,接头直径、高度变化较小,大致维持在同一水平.这是由于当焊接热输入超过一定值后,焊接工装的限制作用使得用于形成端接接头的熔融金属量不再变化,加上散热效果良好,焊缝成形极快,所以在接头尺寸上变化较小.通过方差分析与极差分析可知,电流对抗拉力影响较大,结合图 4,当峰值电流相同且处于较低值时,抗拉力随着基值电流的增大而增大;当峰值电流处于较高值时,由于接头尺寸变化趋势的减小,抗拉力呈现小范围的波动.

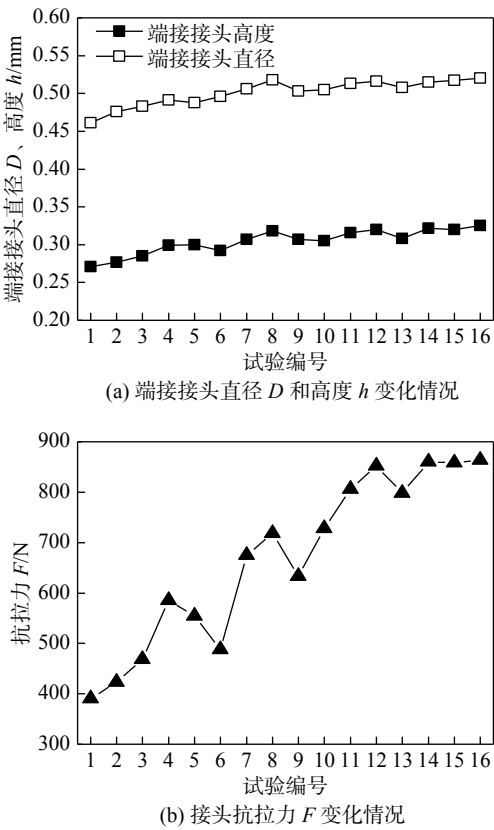


图 4 端接接头直径、高度和抗拉力变化情况
Fig. 4 Changing of diameter, height and tensile resistance of joint

3.2 模型预测与试验验证

根据表 2,选取编号为 3, 7, 11 的 3 组作为检

验样本,另外 13 组为学习样本,构造输入输出模式,初始化连接权值和阈值在 $[-1, 1]$ 随机产生,最大训练次数为 1 000 次,期望误差 10^{-6} .采用 trainlm 训练函数,经过 31 次学习即完成收敛,同时比较检验样本预测值与试验值之间的相对误差,得到如表 5~表 7 的结果,其中接头直径 D' 、高度 h' 和抗拉力 F' 分别为对应的预测值, $|e|$ 为相对误差绝对值.可见,直径和高度的相对误差在 3% 以内,抗拉力的相对误差在 5% 以内.因此文中建立的 BP 神经网络模型的预测精度很高,可以作为预测模型.

表 5 预测结果与误差(直径)
Table 5 Predicted values and errors(diameter)

直径实测值 D/mm	直径预测值 D'/mm	相对误差 $ e (\%)$
0.483	0.478	1.04
0.506	0.508	0.40
0.513	0.517	0.78

表 6 预测结果与误差(高度)
Table 6 Predicted values and errors(height)

高度实测值 h/mm	高度预测值 h'/mm	相对误差 $ e (\%)$
0.285	0.279	2.11
0.307	0.303	1.30
0.316	0.319	0.95

表 7 预测结果与误差(抗拉力)
Table 7 Predicted values and errors(tensile resistance)

抗拉力实测值 F/N	抗拉力预测值 F'/N	相对误差 $ e (\%)$
468.6	485.3	3.57
674.5	645.5	4.30
806.3	838.1	3.94

通过对正交试验结果的方差、极差的综合分析,较优参数为:峰值电流 10~12 A,基值电流 4 A,焊接速度 2.72~3.81 mm/s,频率 50 Hz.采用小步长搜索的方法寻找更优参数组合,构造 L_9 正交表,具体参数组合见表 8.

利用表 8 作为输入参数,通过已经训练好的网络进行预测,获得一系列预测值,如表 9 所示.

对表 9 数据进行极差分析,得到最优参数组合: $I_p=11$ A, $I_b=4$ A, $v=3.81$ mm/s, $f=40$ Hz.在该组最优参数附近重复小步长搜索法继续寻优,直到各预测值变动趋于稳定.由于文中采用的合金膜片厚度仅为 0.2 mm,工艺参数的变化对端接接头尺寸及

表 8 正交试验
Table 8 Orthogonal experiment

序号	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	焊接速度 $v/(mm\cdot s^{-1})$	脉冲频率 f/Hz
1	10	3.6	2.72	40
2	10	4	3.27	50
3	10	4.4	3.81	60
4	11	3.6	3.27	60
5	11	4	3.81	40
6	11	4.4	2.72	50
7	12	3.6	3.81	50
8	12	4	2.72	60
9	12	4.4	3.27	40

性能的波动影响较大,因此,当直径 D 、高度 h 和抗拉力 F 三个指标的神经网络模型预测值波动范围小于 5% 时,认为预测值趋于稳定,此时各工艺参数也在较小的范围内波动,最终得到最优工艺参数范围为 $I_p=11.6\text{ A}\pm0.2\text{ A}$, $I_b=4.3\text{ A}\pm0.1\text{ A}$, $v=4.14\text{ mm/s}\pm0.1\text{ mm/s}$, $f=52\text{ Hz}\pm2\text{ Hz}$, 各预测值分别收敛于 $D'=0.535\text{ mm}\pm0.010\text{ mm}$, $h'=0.330\text{ mm}\pm0.010\text{ mm}$, $F'=900\text{ N}\pm25\text{ N}$. 针对最优工艺参数范围内的中间值进行 4 组试验验证,结果见表 10.

表 9 模型预测结果
Table 9 Model predicted values

峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	焊接速度 $v/(mm\cdot s^{-1})$	脉冲频率 f/Hz	直径 D'/mm	高度 h'/mm	抗拉力 F'/N
10	3.6	2.72	40	0.513	0.314	833.6
10	4	3.27	50	0.517	0.320	843.5
10	4.4	3.81	60	0.517	0.317	840.6
11	3.6	3.27	60	0.516	0.327	851.8
11	4	3.81	40	0.529	0.328	874.8
11	4.4	2.72	50	0.527	0.324	862.9
12	3.6	3.81	50	0.531	0.314	861.7
12	4	2.72	60	0.525	0.325	867.4
12	4.4	3.27	40	0.531	0.315	859.4

表 10 工艺参数验证
Table 10 Process parameters verification

序号	直径 D/mm	高度 h/mm	抗拉力 F/N
1	0.540	0.340	902.9
2	0.531	0.327	879.5
3	0.533	0.334	884.2
4	0.536	0.330	881.2

由表 10 可见,试验值均处于模型预测值范围内,且抗拉力值均高于先期试验,证实通过该优化方法后能得到更优的工艺参数范围,同时获得更优的力学性能和与之匹配的端接头尺寸.

4 结 论

(1) 通过正交试验和 BP 神经网络,建立 GH-4169 膜片微束 TIG 焊接过程中接头尺寸和抗拉力与焊接工艺参数的网络模型,从而确定了接头尺寸和力学性能与焊接工艺参数之间的多变量非线性关系.

(2) 通过对正交试验的分析得到峰值、基值电流是影响接头尺寸和力学性能的主要因素;利用正交试验,可有效地减少样本数量,提高了样本的质量;通过合理选用模型参数,有效地提高了模型收敛速度和预测精度.

(3) 通过小步长搜索法和 BP 网络的预测得到最优工艺参数范围为峰值电流 $11.6\text{ A}\pm0.2\text{ A}$ 、基值电流 $4.3\text{ A}\pm0.1\text{ A}$ 、焊接速度 $4.14\text{ mm/s}\pm0.1\text{ mm/s}$ 、脉冲频率 $52\text{ Hz}\pm2\text{ Hz}$. 通过试验,4 组试验值均在预测值范围内,抗拉力值均高于先期试验,证明了采用这种工艺优化方法能获得更高的接头力学性能,同时预测模型精度高,具有较高的实际应用价值.

参考文献:

[1] 刘锦凡, 孙 丹, 陈雪巍, 等. 蓄压器膜盒机械刚度对液体火箭 POGO 振动影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(19): 168 – 171.
Liu Jinfan, Sun Dan, Chen Xuewei, *et al.* Influences of mechanical stiffness of accumulator on POGO vibration of liquid rockets[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(19): 168 – 171.

[2] Chen Y, Zhang K, Huang J, *et al.* Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. Materials & Design, 2016, 90: 586 – 594.

[3] Mei Y P, Liu Y C, Liu C X, *et al.* Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718[J]. Materials & Design, 2016, 89: 964 – 977.

[4] Azadian S, Wei L Y, Warren R. Delta phase precipitation in Inconel 718[J]. Materials Characterization, 2004, 53: 7 – 16.

[5] Chen G Q, Zhang B G, Lü T M, *et al.* Causes and control of welding cracks in electron-beam-welded superalloy GH4169 joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 1971 – 1976.

(2) 局部干法水下焊接的电弧预热工艺不仅有效降低了焊后的冷却速度, 而且烘干了排水罩内的残留水汽, 营造了更好的干式环境, 有利于避免焊缝金属产生气孔和降低热影响区的硬度。

(3) 局部干法水下焊接增加电弧预热后, 可以显著提高焊缝和熔合线区的冲击韧性, 改善了水下焊接接头的韧性。

参考文献:

- [1] 续 明, 陈 勇, 刘 丰, 等. 水下焊接技术在海洋工程中的应用和发展[J]. 中国造船, 2013(A01): 190 – 194.
Xu Ming, Chen Yong, Liu Feng, *et al.* Research and application of underwater welding technology in offshore engineering[J]. Shipbuilding of China, 2013(A01): 190 – 194.
- [2] 朱加雷, 焦向东, 蒋力培, 等. 局部干法自动水下焊接试验研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2008, 16(2): 38 – 42.
Zhu Jialei, Jiao Xiangdong, Jiang Lipai, *et al.* Study on local dry automatic underwater welding[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2008, 16(2): 38 – 42.
- [3] 常 林. 电焊工艺学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] Hu L H, Huang J, Li Z G, *et al.* Effects of preheating temperature on cold cracks, microstructures and properties of high power laser hybrid welded 10Ni3CrMoV steel[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 1931 – 1939.
- [5] Salem A A, Glavicic M G, Semiatin S L. The effect of preheat temperature and inter-pass reheating on microstructure and texture evolution during hot rolling of Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 496(1): 169 – 176.
- [6] 赵 博, 武传松, 贾传宝, 等. 水深和流速对水下湿法焊接热过程影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2013, 34(8): 55 – 58.
Zhao Bo, Wu Chuansong, Jia Chuanbao *et al.* Numerical simulation of influence of water depth and flowing speed on thermal process of underwater wet welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(8): 55 – 58.
- [7] Muthupandi V, Srinivasan P B, Seshadri S K, *et al.* Effect of weld metal chemistry and heat input on the structure and properties of duplex stainless steel welds[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 358(1): 9 – 16.
- [8] 方 坤. 随焊电磁感应加热控制焊接冷裂纹研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 胡乐亮. 外加中频热场辅助水下湿法焊接工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [10] 段 宇, 陈晓强, 唐 耀. 新型水下局部干法焊接应用研究[J]. 金属加工: 热加工, 2013(12): 46 – 48.
Duan Yu, Chen Xiaoqiang, Tang Yao. Research on application of new type local dry underwater welding[J]. MW Metal Forming, 2013(12): 46 – 48.
- [11] AWS D1 Committee. AWS D1.1/D1.1M-2008, Structural Welding Code-steel[S]. America: America Welding Society, 2008.
- [12] AWS D3 Committee. AWS D3.6 M-2010, M-2010, Underwater Weld Code[s]. America: America Welding Society, 2010.
-
- 作者简介:** 邵珠晶, 男, 1992 年出生, 硕士研究生. 主要从事水下焊接方面研究, 发表论文 1 篇. Email: shaozhujing@tju.edu.cn
- 通讯作者:** 程方杰, 男, 教授. Email: chfj@tju.edu.cn
-
- [上接第 123 页]
- [6] Chen Yuhua, Liu Dongya, Xie Jilin, *et al.* Development of the active flux in superalloy laser welding and the effect on the weld formation[J]. China Welding, 2017, 26(1): 44 – 48.
- [7] 李延民. 超薄壁 GH4169 膜盒微束等离子焊接工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [8] 李卓然, 冯广杰, 徐 慨, 等. 高温合金 GH4169 真空扩散连接工艺[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 21 – 24.
Li Zhuoran, Feng Guangjie, Xu Kai, *et al.* Vacuum diffusion bonding of GH4169 superalloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(6): 21 – 24.
- [9] Shojaeefard M H, Behnagh R A, Akbari M, *et al.* Modeling and pareto optimization of mechanical properties of friction stir welded AA7075/AA5083 butt joints using neural network and particle swarm algorithm[J]. Materials & Design, 2013, 44(2): 190 – 198.
- [10] 夏卫生, 张海鸥, 王桂兰, 等. 基于多层 ANN 的机器人等离子熔射智能化模型[J]. 焊接学报, 2009, 30(7): 41 – 44.
Xia Weisheng, Zhang Haiou, Wang Guilan, *et al.* Intelligent process modeling of robotic plasma spraying based on multi-layer artificial neural network[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(7): 41 – 44.
- [11] 王东生, 杨 斌, 田宗军. 基于遗传神经网络的等离子喷涂纳米 ZrO_2 -7% Y_2O_3 涂层工艺参数优化[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 10 – 14.
Wang Dongsheng, Yang Bin, Tian Zongjun, *et al.* Process parameters optimization of nanostructured ZrO_2 -7% Y_2O_3 coating deposited by plasma spraying based on genetic algorithms and neural networks[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 10 – 14.
- [12] 滕 凯. 基于正交试验和 BP 神经网络的 Ti-6Al-4V 合金电火花线切割工艺参数优化[J]. 制造业自动化, 2015, 37(10): 24 – 27.
Teng Kai. Parameter optimization of Ti-6Al-4V alloy wire cutting process based on orthogonal test and BP neural network[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(10): 24 – 27.
-
- 作者简介:** 余 果, 男, 1993 年出生, 硕士研究生. 主要从事镍基高温合金焊接冶金、焊接性及焊接工艺技术等方面的研究. 发表论文 1 篇. Email: ygcasc2015@sina.com