

基于遗传神经网络的镍基高温合金激光熔覆层形貌质量预测

杨友文¹, 田宗军¹, 潘 浒¹, 王东生^{1,2}, 沈理达¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016; 2. 铜陵学院 机械工程系, 铜陵 244000)

摘 要: 采用反向传播(back propagation, BP)人工神经网络(artificial neural network, ANN)和遗传算法建立了激光熔覆层形貌质量(熔覆层高度、宽度及稀释率)与激光功率、送粉速率和扫描速率之间的遗传神经网络预测模型。设计正交试验得到预测模型训练样本数据,并在正交试验的基础上,用极差分析法分析了各加工参数对熔覆层形貌质量各个指标的影响规律。经过试验验证,遗传神经网络模型预测值与试验实测值误差不大于4.6%。结果表明,运用该模型可以为准确的选择镍基高温合金激光熔覆参数提供一定参考,从而有利于提高镍基高温合金激光熔覆层形貌质量。

关键词: 激光熔覆; 形貌质量; 人工神经网络; 遗传算法; 极差分析

中图分类号: TG 156.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2013)11-0078-05



杨友文

0 序 言

镍基高温合金具有工作温度高、组织稳定、有害相少及抗氧化腐蚀能力强等优点,现已广泛应用于航空发动机制造业^[1]。由于恶劣的工作环境,发动机零件容易出现磨损、裂纹、点蚀等缺陷^[2],而激光熔覆修复技术是解决上述问题的有效途径之一。激光熔覆修复过程中,熔覆层高度和宽度是恢复待修复工件的尺寸特征的关键,而稀释率的大小将直接影响基材与熔覆层之间的冶金结合^[3,4]。因此控制熔覆层高度、宽度及稀释率,即熔覆层形貌质量,对激光熔覆修复技术有重要意义。由于激光熔覆过程是一个多参数耦合的复杂非线性过程,存在很多不确定性,因此目前控制激光熔覆层形貌质量的常规方法是以大量的工艺试验数据为依据。正交试验法是其中常用的一种,然而正交试验只能在试验的基础上进行参数的优选,难以实现对熔覆层形貌质量的定量分析。

神经网络是一种模仿动物神经网络行为特征进行分布式并行信息处理的数学模型,具有高度的并行结构和并行实现能力、强大的非线性处理能力及

自学习能力等特点。近年来基于梯度下降的误差反向传播神经网络(BP-ANN)已经被国内的一些学者用于激光熔覆层形貌质量的预测分析^[5-7]。然而基于梯度下降的神经网络收敛速度慢,对初始权值和阈值有很强的依赖性,容易陷入局部最优解。遗传算法是采用自然选择和遗传规律的并行全局搜索算法,表现出很好的宏观搜索能力。将BP-ANN与遗传算法结合,利用遗传算法对BP-ANN的初始连接权值和阈值进行全局寻优,能够很好地解决BP-ANN对初始连接权值和阈值的依赖性,避免局部寻优。

文中将遗传神经网络与激光熔覆修复技术相结合,首先在正交试验基础上简要分析了激光参数对熔覆层形貌质量的影响规律,然后根据正交试验结果建立误差反向传播神经网络,并在网络训练前采用遗传算法进行网络初始连接权值和阈值的优化,建立熔覆层形貌质量与激光功率、送粉速率、扫描速率之间的遗传神经网络预测模型,将为镍基高温合金激光熔覆形貌质量分析提供一定参考。

1 遗传神经网络原理

1.1 BP神经网络

BP-ANN是一种采用反向传播学习算法的多层反馈网络,其结构如图1所示。一个神经元用一个

收稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205198); 中国博士后科学基金面上资助项目(2012M511266); 江苏省博士后科研计划资助项目(1102052C)

节点表示,网络由输入层、隐含层及输出层节点组成,隐含层可一层,也可多层,每层节点之间通过权值和阈值连接.每个神经元的前向计算是通过输入向量与权值相乘求和,然后与阈值相减得出差值,将差值通过传递函数换算得到输出.

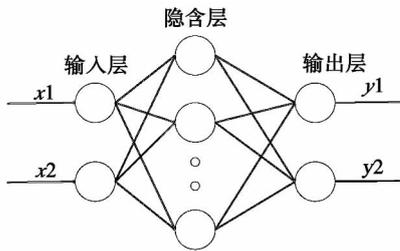


图 1 BP 神经网络结构

Fig. 1 Structure of BP neural network

网络训练过程中,采用基于梯度下降的误差反向传播算法进行学习,先前向计算输出值与期望值误差,然后逆向修正调节权值和阈值,如此反复以实现或逼近所希望的输入输出非线性映射关系.然而 BP 算法的收敛速度缓慢,容易导致网络学习的时间过长,尤其是在解决复杂问题时,往往需要反复的训练和试凑.另外神经网络的初始权值和阈值的选择缺乏依据,一旦随机出不合适的初始权值和阈值时,网络训练收敛速度缓慢甚至不收敛,因此 BP-ANN 存在明显的局限性.

1.2 BP-ANN 的遗传优化

遗传算法是模拟达尔文生物进化论中自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型^[8],通过模拟物种进化过程中适者生存原则和群体内部染色体的随机信息交换来搜索全局最优解,具有很好的全局寻优能力.

为了克服 BP-ANN 收敛速度缓慢及对初始连接权值和阈值依赖的缺点,将遗传算法引入到 BP-ANN 的初始连接权值和阈值的选择,构建一个基于遗传算法的 BP-ANN.网络的训练分为两步,首先利用遗传算法对网络的初始权值和阈值进行全局寻优,获得最优个体后赋给 BP-ANN,然后 BP-ANN 继续进行权值和阈值的细化训练,最终得出最佳的网络连接权值和阈值,建立精度较高的 BP-ANN 模型.

遗传算法在寻优时依靠适应度函数来评估个体的优劣,个体的适应度函数值越高,则越接近最优解.因此选择一个合适的适应度函数,常常成为实现遗传算法的关键.

寻优过程中,将网络权值和阈值编码成个体,遗传算法按照个体适应度函数值对个体进行选择、交

叉、变异,通过这些遗传操作来模拟物种进化过程,逐代进化,不断接近最优解.当获得适应度函数值最大的个体时,遗传算法结束,将获得的最优个体赋给 BP-ANN,进行网络训练,最终获得高精度的 BP-ANN 模型, BP-ANN 的遗传优化流程如图 2 所示.

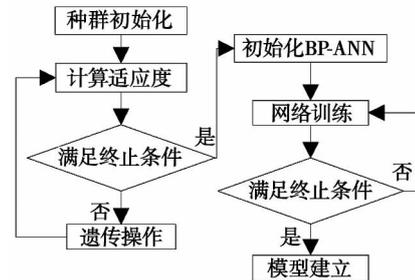


图 2 遗传神经网络流程图

Fig. 2 Flow chart of genetic neural network

2 试验及模型建立

2.1 试验系统

试验系统在文献 [9] 中已有详细报道,主要包括 CO₂ 激光器、负压式送粉器、三维精密激光加工机床. CO₂ 激光器(美国 PRC 公司)最小光斑直径为 0.3 mm,最高输出功率 2 kW.送粉器采用同轴送粉方式,送粉粒度为 20 ~ 150 μm,送粉量为 5 ~ 150 g/min,机床精度为 0.03 mm/1 000 mm.试验均在氩气保护的环境下进行.

2.2 样品制备

试验采用基材为镍基高温合金 GH4169,尺寸为 100 mm × 100 mm × 10 mm.粉末为 FGH95 镍基高温合金粉末,粉末粒度为 106 ~ 120 μm.基体材料和粉末化学成分可参见文献 [9].样品制备前对基体表面进行砂纸打磨,用酒精和丙酮进行除污处理,然后与粉末一起烘干.试验中调整激光功率、扫描速率和送粉速率这 3 个参数在基体上进行 12 组单道熔覆试验,其余参数固定,光斑直径为 1 mm,离焦量为 14 mm.为了分析各加工参数对熔覆层形貌质量的影响规律,前 9 组样品按照正交表 L₉(3⁴) 进行制备,正交参数见表 1.

表 1 正交工艺参数设计
Table 1 Orthogonal design of parameters

水平	激光功率 P/W	扫描速率 $v_s / (mm \cdot min^{-1})$	送粉速率 $v_f / (g \cdot min^{-1})$
1	1 150	500	21.69
2	1 250	600	24.10
3	1 350	700	26.51

在基材上完成熔覆后,沿垂直于扫描方向切开熔覆层,经过抛光机抛光和金相砂纸研磨后,用稀王水腐蚀,在显微镜下观察熔覆层形貌。图3为典型激光熔覆镍基高温合金单道熔覆层横截面形貌。

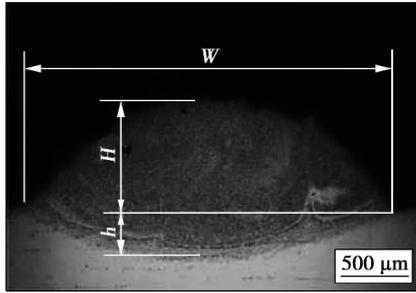


图3 单道熔覆层横截面形貌

Fig. 3 Single cladding cross section

横截面按组织特点由上到下分为熔覆区、熔合区和基体。测量熔覆区宽度 W 、高度 H 和熔合区深度 h , 计算稀释率 η 。稀释率 η 的计算公式为^[10]

$$\eta = \frac{h}{H+h} \quad (1)$$

各样品的横截面尺寸及稀释率如表2所示。

表2 横截面尺寸及稀释率参数

Table 2 Cross section size and dilution ratio

样品 编号	激光功率 P/W	扫描速率 $v_s / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	送粉速率 $v_f / (\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	宽度 W/mm	高度 H/mm	稀释率 η
1	1 150	500	21.69	2.091	0.742	0.451
2	1 150	600	24.10	1.846	0.696	0.438
3	1 150	700	26.51	2.063	0.655	0.406
4	1 250	500	26.51	1.880	0.715	0.423
5	1 250	600	21.69	2.186	0.656	0.505
6	1 250	700	24.10	1.752	0.694	0.450
7	1 350	500	24.10	2.229	0.647	0.480
8	1 350	600	26.51	2.130	0.707	0.441
9	1 350	700	21.69	2.163	0.516	0.541
10	1 350	600	24.10	2.132	0.702	0.499
11	1 250	600	24.10	2.008	0.764	0.458
12	1 250	500	24.10	2.016	0.826	0.455

2.3 正交试验分析

极差分析(range analysis)通过计算极差来分析因素的主次顺序,极差越大,则表明该因素对某一指标的影响越大。对正交试验进行极差分析,结果表明对熔覆层宽度的影响因素而言,激光功率是主要因素,送粉速率次之,最后是扫描速度;对于熔覆层的高度影响而言,扫描速度影响最大,激光功率次之,送粉速率影响最小;而对于稀释率,影响因素从

大到小依次为送粉速率、激光功率和扫描速度。

熔覆层宽度和高度为熔覆层横截面特征,根据文献[11],激光作用能量密度和作用时间是获得最佳熔覆层横截面特征的两个重要参数,而激光作用能量密度和作用时间由激光功率、光斑尺寸及激光扫描速度决定,它们直接反映激光和粉末、基体相互作用的有效强度。试验中光斑尺寸是固定的,因此熔覆层宽度和高度主要受激光功率和扫描速度影响,表3也表明,影响熔覆层宽度的最大因素是激光功率,而扫描速度是影响熔覆层高度的主要原因。

从极差分析结果看,送粉速率对熔覆层横截面特征的影响相对较小,据其原因,在激光熔覆过程中,由于激光能量密度不一定充足,部分粉末因未能吸收能量而无法参与到熔覆过程,因此粉末的有效利用率才是决定熔覆层横截面特征的重要因素。

稀释率主要跟粉末与基体吸收能量比有关,对于一定质量的粉末,完成熔覆所需的能量是一定的,若实际吸收的能量少于所需能量,则无法完成激光熔覆,而实际吸收能量大于所需能量,则多余的能量将通过粉末传递给基体或直接照射在基体上,使基体表面形成熔池。极差分析得出送粉速率是影响稀释率的主要因素,可以理解为激光功率和扫描速率一定时(总能量不变),送粉速率大(总粉末量小),则粉末对激光能量的吸收占比较少,基体吸收能量增加,熔池变深,稀释率高,送粉速率小时反之。激光功率和扫描速率共同决定粉末与基体吸收的总能量,因此在只考虑其一时,对稀释率的影响相对较小。在实际的激光熔覆过程中,熔覆层形貌质量受干扰因素较多,情况也远比上述分析复杂。

2.4 预测模型的建立

基于试验系统制备的12个样品中取前9组作为BP-ANN的训练样品。为了实现数据的可比性,在网络训练前对样本数据进行归一化处理,将所有的样品数据转化为[0,1]之间,归一化函数为

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}} \quad (2)$$

式中: $x_{i\max}$ 、 $x_{i\min}$ 为样品数据 x_i 的最大值和最小值; x_i^* 为归一化的值。

采用3层BP-ANN模型,输入层3个神经元,输入激光功率、扫描速率和送粉速率,输出层3个神经元,输出熔覆层高度、宽度及稀释率。隐含层神经元数可按试值法先取10,网络训练好后,若网络测试误差很大,可修改隐含层节点数。整个BP-ANN结构为 $3 \times 10 \times 3$,网络各层之间的传递函数均为log函数,优化算法选用带动量因子的自适应学习率BP算法。在BP-ANN训练前,对网络初始连接权值和

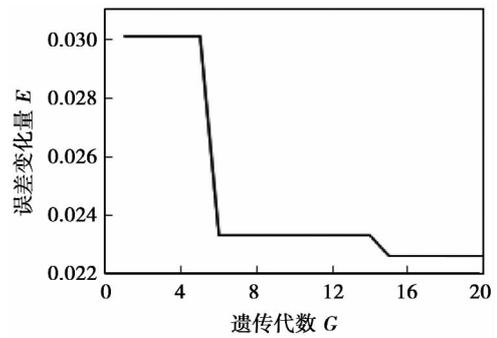
阈值进行遗传算法优化. 遗传算法中适应度函数取预测值与期望值之间误差矩阵的范数, 即

$$f = \left\{ \sum_{i=1}^3 [y(x) - y(x)']^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

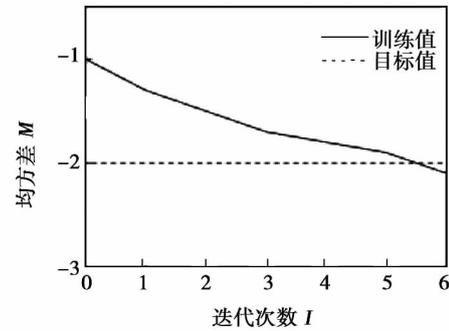
式中: $y(x)$ 为真实值; $y(x)'$ 为预测值, 初始种群大小取 40, 最大遗传代数取 20, 交叉概率取 0.7, 变异概率取 0.01, 代沟取 0.95, 得到优化后的个体. 将此优化后的个体赋值给 BP-ANN, 进行 BP 算法的训练学习. 网络训练最大次数设为 1 000, 训练目标为 0.01, 学习速率为 0.1, 网络训练结束后则完成熔覆层形貌质量预测模型的建立.

基于 Matlab 平台, 采用上述方法完成激光熔覆镍基合金熔覆层形貌质量预测模型的建立. 图 4 为训练过程中遗传误差进化图和 BP-ANN 的迭代图. 可以看出, 种群遗传到 16 代后, 均方差 (mean squared error) 数值达到 0.022 6. 把遗传算法得到的初始权值和阈值赋给 BP 神经网络, BP 神经网络进行训练, 当迭代到第 6 代后学习性能为 $8.779 1 \times 10^{-3}$, 达到训练目标.

对已建立的遗传神经网络进行 9 组训练样品仿真, 仿真结果如表 3 所示. 可以看出, 神经网络模型



(a) 遗传误差进化图



(b) BP-ANN 迭代图

图 4 遗传神经网络训练结果

Fig. 4 Training results of genetic neural networks

表 3 试验值与仿真值对比

Table 3 Comparison between experiment data and simulated data

样品编号	宽度 W/mm			高度 H/mm			稀释率 η		
	试验值	预测值	误差(%)	试验值	预测值	误差(%)	试验值	预测值	误差(%)
1	2.091	2.095 0	0.19	0.742	0.732	1.35	0.451	0.454	0.71
2	1.846	1.854 3	0.45	0.696	0.701	0.72	0.438	0.435	0.64
3	2.063	2.006 0	2.76	0.655	0.649	0.92	0.406	0.423	4.23
4	1.880	1.875 9	0.22	0.715	0.723	1.12	0.423	0.427	0.84
5	2.186	2.200 6	0.67	0.656	0.649	1.07	0.505	0.510	0.85
6	1.752	1.835 5	4.77	0.694	0.685	1.30	0.450	0.454	0.93
7	2.229	2.280 6	2.31	0.647	0.641	0.93	0.480	0.482	0.46
8	2.130	2.086 1	2.06	0.707	0.697	1.41	0.441	0.448	1.54
9	2.163	2.211 4	2.24	0.516	0.528	2.33	0.541	0.534	1.20

仿真值与试验值误差较小, 相对误差均小于 4.77%, 在合理范围之内.

2.5 模型的仿真与验证

预测模型建立好后, 需对其可靠性进行测试

证, 测试数据应是没有参加训练的数据, 因此采用样品中剩余 3 组作为测试样品来验证模型的可靠性. 测试前同样对测试样品的数据进行归一处理, 测试结果如表 4 所示. 结果表明, 激光熔覆涂层的高度、

表 4 神经网络预测值与试验值对比

Table 4 Comparison between prediction data and experimental data

样品编号	宽度 W/mm			高度 H/mm			稀释率 η		
	试验值	预测值	误差(%)	试验值	预测值	误差(%)	试验值	预测值	误差(%)
10	2.132	2.091	1.92	0.702	0.708	0.85	0.499	0.498	0.13
11	2.008	2.102	4.60	0.764	0.747	2.22	0.458	0.461	0.71
12	2.016	2.014	0.10	0.826	0.831	0.06	0.455	0.468	2.86

宽度、稀释率的最大相对误差分别为 4.6% , 2.22% 2.86% , 鉴于训练样本数据只有 9 组 , 相对比较少 , 因此该误差值在可接受范围内 , 表明该神经网络结构比较合理 , 没有出现拟合现象 , 预测精度也较高 , 可以有效地对激光熔覆镍基高温合金熔覆层的形貌质量做出预测分析 , 也可用于指导熔覆工艺参数优选。

3 结 论

(1) 在其它参数固定的情况下 , 对激光熔覆镍基高温合金熔覆层宽度的影响因素而言 , 激光功率是第一因素 , 其次是送粉速率 , 最后是扫描速度 ; 对于熔覆层的高度影响而言 , 扫描速度影响最大 , 激光功率次之 , 送粉速率影响最小 ; 而对于稀释率 , 影响因素从大到小依次为送粉速率、激光功率和扫描速度。

(2) 建立了激光熔覆镍基高温合金熔覆层形貌质量与激光功率、送粉速率和扫描速率之间的遗传神经网络预测模型 , 确定了熔覆涂层质量与加工工艺参数之间的非线性关系。

(3) 模型预测精度的相对误差小于 4.6% , 达到了很高的精度 , 证明了模型的正确性和可靠性 , 其对激光熔覆工艺参数优选及熔覆形貌分析预测具有一定的理论与实践意义。

参考文献:

- [1] Kim M T , Chang S Y , Won J B. Effect of HIP process on the micro-structural evolution of a nickel-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering A* , 2006 , 441(1/2) : 126 - 134.
- [2] 宋兆泓. 航空发动机可靠性与故障抑制工程 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [3] Kim J D , Peng Y. Melt pool shape and dilution of laser cladding with wire feeding [J]. *Materials Processing Technology* , 2000 , 104(3) : 284 - 293.
- [4] Chryssolouris G , Zannis S , Tsirbas K , *et al.* An experimental investigation of laser cladding [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* , 2002 , 51(1) : 145 - 148.
- [5] 姜淑娟, 刘伟军, 南亮亮. 基于神经网络的激光熔覆高度预测 [J]. *机械工程学报*, 2009 , 45(3) : 269 - 274.
- Jiang Shujuan , Liu Weijun , Nan Liangliang. Laser cladding height prediction basic on neural network [J]. *Journal of Mechanical Engineering* , 2009 , 45(3) : 269 - 274.
- [6] 赵洪运, 杨贤群, 舒凤远, 等. 激光熔覆层形貌预测对比分析 [J]. *焊接学报*, 2009 , 30(1) : 51 - 54.
- Zhao Hongyun , Yang Xianqun , Shu Fengyuan , *et al.* Comparative analysis on predictions of the geometric form of laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution* , 2009 , 30(1) : 51 - 54.
- [7] 黄安国, 李 刚, 汪永阳, 等. 基于人工神经网络的铝合金激光熔覆层特征与性能的预测 [J]. *中国激光*, 2008 , 35(10) : 1632 - 1636.
- Huang Anguo , Li Gang , Wang Yongyang , *et al.* Prediction of characteristic and performance of laser cladding for Al alloy based on artificial neural network [J]. *Chinese Journal of Laser* , 2008 , 35(10) : 1632 - 1636.
- [8] Riccardo L. Genetic algorithms in chemistry [J]. *Journal of Chromatography A* , 2007 , 1158(1/2) : 226 - 233.
- [9] 潘 浒, 赵剑峰, 刘云雷, 等. 激光熔覆修复镍基高温合金稀释率的可控性研究 [J]. *中国激光*, 2013 , 40(4) : 0403007.
- Pan Hu , Zhao Jianfeng , Liu Yunlei , *et al.* Controllability research on dilution ratio of nickel-based superalloy by laser cladding repairment [J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2013 , 40(4) : 0403007.
- [10] 张庆茂, 钟敏霖, 杨 森, 等. 送粉式激光熔覆层质量与工艺参数之间的关系 [J]. *焊接学报*, 2001 , 22(4) : 51 - 54.
- Zhang Qingmao , Zhong Minlin , Yang Sen , *et al.* The relation between the processing parameters and the qualities of the coatings formed by powder feeding laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution* , 2001 , 22(4) : 51 - 54.
- [11] 张庆茂, 王忠东, 刘喜明, 等. 工艺参数对送粉激光熔覆层几何形貌的影响 [J]. *焊接学报*, 2000 , 21(2) : 43 - 46.
- Zhang Qingmao , Wang Zhongdong , Liu Ximing , *et al.* Influence of processing parameters on geometric features of powder feeding laser cladding [J]. *Transactions of the China Welding Institution* , 2000 , 21(2) : 43 - 46.

作者简介: 杨友文, 男, 1988 年出生, 硕士研究生. 主要从事激光加工技术. Email: yangyouwenvic@163.com

通讯作者: 田宗军, 男, 教授, 博士研究生导师. Email: tianzj@nu-aa.edu.cn

National Engineering Research Center for Commercial Aircraft Manufacturing ,Shanghai 200436 ,China; 2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining , Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001 , China; 3. National Key Laboratory of Metal Precision Hot Processing , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China) . pp 73 – 77

Abstract: The behavior characteristics of wire melting and fiber laser beam welding process of aluminum alloys with filler wire were carried out by using high-speed camera and experimental tests. The filler wire melting behavior and its main influencing factors were analyzed. The effect of wire feeding mode and wire feeding angle on weld formation and welding process stability were also studied. The results show that the melting behavior , which mainly depends on the distance between laser incident position and filler wire , can be divided into three types: the spreading transfer , the liquid bridge transfer and the globular transfer , and the liquid bridge transfer is the ideal type. The mode of pre-wire has higher efficiency and wider process window. The level of laser energy absorption by wire and the impact force of liquid wires on the liquid weld pool are affected by the wire feeding angle. The back weld width increases obviously with increase of wire feeding angle , while the weld penetration keeps essentially invariable.

Key words: laser technique; melting dynamics; high-speed camera; aluminum alloys; wire parameters

Geometry quality prediction of Ni-based superalloy coating by laser cladding based on neural network and genetic algorithm YANG Youwen¹ , TIAN Zongjun¹ , PAN Hu¹ , WANG Dongsheng^{1,2} , SHEN Lida¹ (1. College of Mechanical and Electrical Engineering , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China; 2. Department of Mechanical Engineering , Tongling College , Tongling 244000 , China) . pp 78 – 82

Abstract: Combination of back-propagation (BP) artificial neural network (ANN) and genetic algorithm was used to set up genetic neural network model to predict the quality of laser cladding layer according to the laser power , powder feed rate and scan rate. An orthogonal test was designed to obtain the training data of prediction model , and then the influence of different process parameters on the cladding layer geometry quality was analyzed by the method of range analysis. The validation results show that the relative error between predicted values and experimental data is less than 4.6% , which indicated that the use of the model can accurately select cladding parameters to improve the geometry quality of the laser cladding layer of nickel-based superalloy.

Key words: laser cladding; geometry quality; artificial neural networks; genetic algorithms; range analysis

Pulsed MIG welding of aluminum alloy sheet based on fuzzy self-tuning PID control ZHANG Xiaoli^{1,2} , LI Yuzhen¹ , LONG Peng¹ , XUE Jiayang¹ (1. School of Mechanical and Automotive Engineering , South China University of Technology , Guangzhou 510640 , China; 2. School of Mechanical and Elec-

trical Engineering , Jiangxi University of Science & Technology , Ganzhou 341000 , China) . pp 83 – 87

Abstract: A fuzzy self-tuning PID control method was proposed for pulsed MIG welding of aluminum alloy sheet. The principle and design ideas were introduced. Fuzzy self-tuning PID parameter was implemented by introducing the fuzzy logic controller into the established Simulink model of PID controller. Then input adaptability experiment contrast and anti-interference test were conducted and analyzed. It shows that fuzzy self-tuning controller in input adaptability and anti-interference is better and the arc welding power performance can be further improved. Finally the contrast of welding experiments on 1 mm thickness aluminum alloy between traditional PID control and fuzzy self-tuning parameter PID control were carried out. The experiments result shows that high welding quality and stable welding process with good weld seam , less welding spatter , relatively smooth welding process are achieved by the proposed method.

Key words: aluminum alloy sheet; PID control; fuzzy self-tuning; MIG welding

Microscopic feature of TC4 linear friction welded joints

ZHU Jianqiao¹ , ZHANG Yanhua¹ , ZHANG Tiancang² , SUN Chengbin² (1. Teaching and Research Section 702 , Beihang University , Beijing 100191 , China; 2. Research Section 102 , Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute , Beijing 100024 , China) . pp 88 – 92

Abstract: Microscopic features of TC4 linear friction welded joints were analyzed and the variation of the characteristic parameters with welding time was studied. The results indicated that the joint interface includes the welded zone , the transition zone and the incomplete bonding zone. Fine dynamic recrystallization grains appeared in the welded zone where the joint interface fused completely. Micro pores formed in the transition zone where the joint interface fused partly. In the incomplete bonding zone , metals on both sides of the joint interface were not contacted and grains were out of distortion. Moreover , metal fragments developed in the joint interface. Three-branch structure forms in the joint interface due to the separation of the vibration direction flash and the vertical vibration direction flash. Friction pressure and upsetting pressure are inclined to close the branches , while friction shear force attributes for expanding the branches.

Key words: linear friction welding; microscopic feature; micro pore; three-branch structure

Computational method for deformation of T joint welded by double beam laser

WANG Xuedong , HE Enguang , QIAN Hongli (Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology , Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute , Beijing 100024 , China) . pp 93 – 96

Abstract: The computational method of deformation of T joint of aluminum-Li alloy with thickness of 2.5 mm welded by double beam laser was studied. By taking account of the change of mechanical characteristics of the weld metal in heating , melting , cooling and solidifying process , and the forming process of the T joint , a method of calculating the deformation of T joint