

DOI: 10.11973/jxgccl202011014

钨极惰性气体保护焊电弧增材制造单焊道尺寸预测

赵 鹏¹, 吕彦明^{1,2}, 周文军², 潘 宇², 白少昀²

(江南大学 1. 机械工程学院, 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘 要: 利用钨极惰性气体(TIG)保护焊电弧增材制造平台对 GH4169 镍基高温合金进行正交试验, 研究了焊接电流、焊接速度、送丝速度对焊道熔宽和余高的影响; 建立了 BP 人工神经网络, 利用遗传算法对其进行优化, 得到了单焊道尺寸预测模型, 并基于 MATLAB 的图形用户界面模块(GUI)创建了预测人工交互界面。结果表明: 焊道熔宽随焊接电流增加而增大, 随焊接速度增加而降低, 随送丝速度增加则先增大后降低; 焊道余高与送丝速度呈线性正相关, 与焊接电流和焊接速度则呈负相关; 该焊道尺寸预测模型的相对误差在 6% 以内, 能够较为准确地预测单焊道的形状与尺寸。

关键词: 电弧增材制造; 焊道尺寸; BP 神经网络; 预测模型

中图分类号: TG441.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)11-0078-05

Prediction of Single Weld Bead Size of TIG Welding Arc Additive Manufacturing

ZHAO Peng¹, LÜ Yanming^{1,2}, ZHOU Wenjun², PAN Yu², BAI Shaoyun²

(1. School of Mechanical Engineering, 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Orthogonal test of GH4169 nickel-based superalloy was carried out with the tungsten inert gas (TIG) welding arc additive manufacturing platform. Effects of welding current, welding speed, and wire feeding speed on weld width and reinforcement were studied. BP artificial neural network was established and optimized by genetic algorithm, the single weld bead shape and size prediction model was obtained, and a human interactive interface for size prediction was created by the graphical user interface (GUI) module of MATLAB. The results show that the weld width increased with the welding current, decreased with increasing welding speed, and first increased and then decreased with increasing wire feeding speed. The weld bead reinforcement was linearly positively correlated with the wire feeding speed, and negatively correlated with welding current and welding speed. The prediction relative error of the weld bead size prediction model was within 6%, which could predict the shape and size of a single weld bead more accurately.

Key words: arc additive manufacturing; weld bead size; BP neural network; prediction model

0 引 言

随着我国航空航天、国防军工等产业的不断发展, 传统制造工艺已经很难满足其复杂零件的加工要求, 制造业迫切需要新的加工方法来提高制造效率, 降低成本, 同时保证产品的可靠性。近年来, 快速成形技术进入人们的视线并迅速得到重视与发展, 电弧

增材制造作为其重要分支亦成为研究热点之一。

电弧增材制造是一种以电弧为热源, 基于逐层熔覆原理, 利用弧焊工具和丝材直接堆焊生成零件的成形技术。电弧增材制造按引弧方式分为熔化极气体保护焊(Gas Metal Arc Welding, GMAW)、钨极惰性气体(Tungsten Inert Gas, TIG)保护焊、埋弧自动焊(Submerged Arc Welding, SAW)和等离子弧焊(Plasma Arc Welding, PAW)。其中, TIG 焊具有电弧稳定、热输入小等特点, 成为常用热源之一。焊道重叠是 WAAM 技术的本质。焊道横截面呈现光滑曲面形状, 因此常近似地用抛物线、圆弧、

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-09-28

作者简介: 赵鹏(1996—), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生

通信作者(导师): 吕彦明教授

余弦^[1-4]3种函数曲线来表示,以便进行仿真和理论研究。DING等^[1]通过曲线拟合建立单个焊道的模型,发现抛物线模型和余弦模型都可以准确拟合出单个焊缝。JUN等^[6]发现送丝速度与焊接速度之比对焊道截面形状有一定影响,当比值小于12.5时,抛物线模型更准确,当比值在12.5~30.0时,圆弧模型更加准确。在焊道形状和尺寸参数中,最重要的为熔宽和余高,只有明确其与焊接工艺参数之间的关系,才能对不同工艺参数下的焊道尺寸进行预测,从而规划整个熔覆层的成形过程。徐健宁^[6]采用二次通用旋转回归设计方法设计试验方案,通过对数据的统计检验,得出了置信度较高的以焊接电流、焊接速度和送丝速度为因子的焊缝几何尺寸回归方程。张金田^[7]发现熔宽、余高与送丝速度、焊接速度之间存在非线性关系,并采用回归分析方法预测了冷金属过渡(CMT)焊道的宽度和余高,揭示了单因素变量对焊道尺寸的影响。

由于焊接是一个高度非线性、多变量、强耦合,同时又具有大量随机不确定因素的复杂过程,因此单纯的回归方程可能难以准确预测工艺参数与焊道形状、尺寸间的复杂关系。张吉会^[8]对比了神经网络和回归方程模型在性能预测方面的差异,发现在预测与泛化这两种能力上,前者更具优势。针对复杂的焊接过程,王清^[9]采用人工神经网络对焊接接头的拉伸性能进行了预测。对于同样复杂的机床热误差,郑金勇^[10]采用遗传算法优化灰色神经网络的方法进行建模,探讨了温度与热误差之间的关系。基于上述研究,TIG电弧增材制造工艺参数与焊道尺寸之间的复杂映射关系亦可以利用神经网络进行拟合预测。为此,作者以GH4169镍基高温合金为研究对象,利用正交试验设计TIG电弧增材制造工艺,研究了焊接电流、焊接速度、送丝速度对焊道熔宽和余高的影响,借助MATLAB软件建立BP神经网络,并采用遗传算法对其进行优化,得到了单焊道尺寸的预测模型。

1 试验设备和方法

试验用TIG电弧增材制造平台由VMC600加工中心、YC-315TX TIG电焊机、WF-007A填丝机和LX-20冷却循环水箱组成,保护气体为纯度99.999%的氩气,设计如图1所示的夹具将焊枪集成到加工中心主轴上,将焊枪垂直固定,通过数控代码控制主轴上下移动、工作台前后左右移动来实现焊枪填充轨迹。为了自动控制引弧、息弧和送丝过

程,将电焊机、填丝机与加工中心进行通信,生成相应CNC代码。

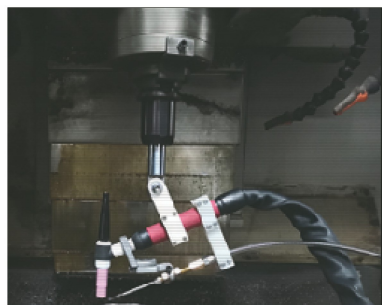


图1 焊枪集成情况

Fig. 1 Integration of welding torch

以尺寸为600 mm×400 mm×20 mm的45钢板作为大基板,将其与加工中心工作台做绝缘处理。为了方便试验进行,选用直径为1.6 mm的GH4169镍基高温合金焊丝作为熔覆材料在10 mm厚的小基板上进行沉积成形。

焊道成形质量与焊接电流、焊接速度、送丝速度、保护气体流量、弧长和钨极伸出量等参数有关,由于焊接电流、焊接速度、送丝速度是影响成型的主要因素且具有可控性,故试验只针对这3个工艺参数进行研究,每个参数选取4个水平,采用 $L_{16}(4^3)$ 正交表(表1)进行试验方案设计。保护气体流量为 $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,弧长为5 mm,钨极伸出量为6 mm,送丝角度约为 30° 。

表1 GH4169合金TIG电弧增材制造工艺参数
Table 1 TIG arc additive manufacturing process parameters of GH4169 alloy

编号	焊接电流/ A	焊接速度/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	送丝速度/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	160	120	60
2	160	140	70
3	160	160	80
4	160	180	90
5	170	120	70
6	170	140	60
7	170	160	90
8	170	180	80
9	180	120	80
10	180	140	90
11	180	160	60
12	180	180	70
13	190	120	90
14	190	140	80
15	190	160	70
16	190	180	60

2 试验结果与讨论

2.1 工艺参数对熔宽的影响

由图2可以看出,熔宽随着焊接电流的增加近似线性增大,随着焊接速度的增加近似线性降低,随着送丝速度的增加先增大后降低。究其原因,增材制造过程中随着焊接电流的增加,电弧的弧柱直径增大,其对基板的加热宽度亦增大,即熔池宽度变大,熔池凝固形成的焊道随之变宽,故熔宽增大;随着焊接速度的增加,单位长度内的熔覆量下降,故熔宽减小;随着送丝速度的增加,熔宽因熔覆量增加先增大,但在热输入一定、焊接电流和焊接速度不变的

情况下,当熔宽增大到一定程度,送丝量继续增大时,丝材就会吸收一部分热量,使基板热量降低,熔宽又会有所下降。

2.2 工艺参数对余高的影响

由图3可以看出,余高与送丝速度近似呈线性正相关,与焊接电流和焊接速度则呈负相关。结合上述分析可知,在其他因素不变的情况下,熔池宽度随着焊接电流的增加而增大,当熔覆量不变时,余高就会相应降低。而焊接速度的增加会使单位长度内的熔覆量和热输入都减小,在两者综合影响下余高降低。随着送丝速度的增加,熔覆量增大,但基板热量降低,两者叠加导致余高增加。

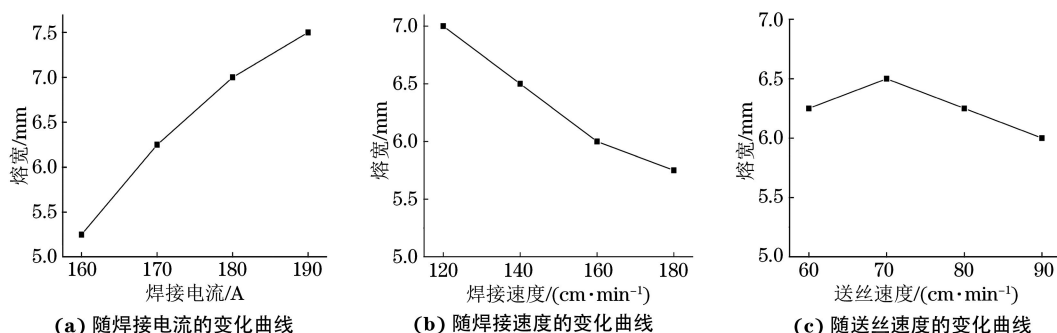


图2 熔宽随TIG电弧增材制造工艺参数的变化曲线

Fig.2 Variation curves of melt width with TIG arc additive manufacturing process parameters: (a) welding current; (b) welding speed and (c) wire feeding speed

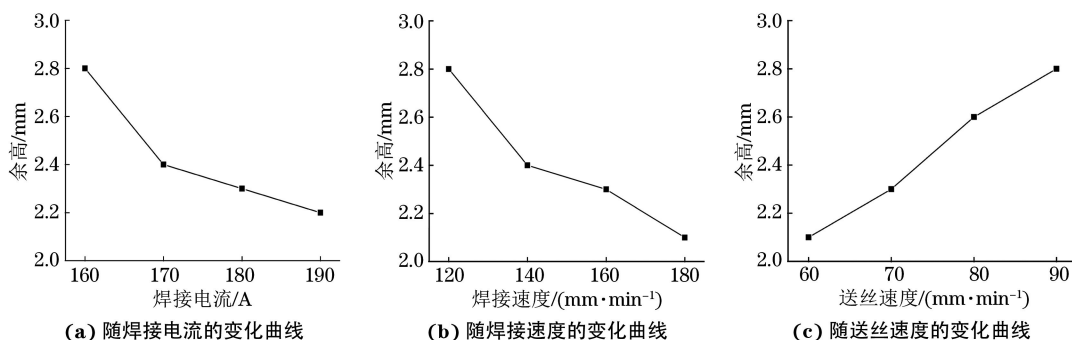


图3 余高随TIG电弧增材制造工艺参数的变化曲线

Fig.3 Variation curves of reinforcement with TIG arc additive manufacturing process parameters: (a) welding current; (b) welding speed and (c) wire feeding speed

3 焊道尺寸模型的建立

3.1 焊道尺寸BP神经网络的构建

BP神经网络具有多层结构,每层由多个神经元构成,试验选择3层(包括输入层、隐含层、输出层)BP神经网络分别创建熔宽预测模型和余高预测模型,其结构如图4所示,其中 X_i 为输入向量, ω_{in} 为突触权值, b_n 为隐含神经元向量, b 为输出向量, i 为输入样本数, n 为网络输出样本数。输入层和输

出层用于数据的输入和输出,神经元个数分别与输入量、输出量一致,隐含层神经元个数会影响预测效果,根据经验公式可得其范围为4~13个,该经验公式表达式为

$$S_1 = \sqrt{R + S_2} + a \quad (1)$$

式中: S_1, R, S_2 分别为隐含层、输入层、输出层的神经元个数; a 为1~10的整数。

通过比较不同隐含层神经元数目下的网络性能(均方差性能函数返回值),得出熔宽预测模型最佳

的隐含层神经元个数为 10, 即该神经网络预测模型为 3-10-1 的结构; 余高预测模型最佳隐含层神经元个数为 6。

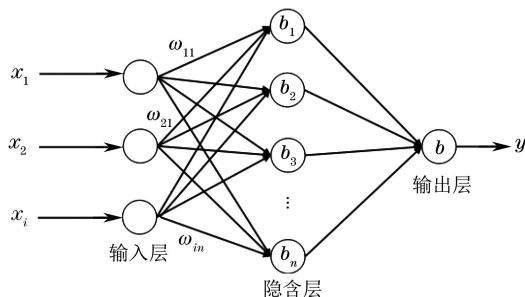


图 4 BP 神经网络结构

Fig. 4 BP neural network structure

神经网络每层之间存在连接权值, 且各层均具有阈值和激活函数, BP 神经网络能够进行学习训练就是通过先赋予其初始的连接权值和阈值, 利用激活函数正向传递输入值, 求得输出值, 然后利用输出值与预期值之间的误差经过反向传递算法对连接权值和阈值进行调整, 从而使其网络性能达到最优。BP 神经网络最常用的激活函数为线性函数、S 型对数或正切函数, 其中 S 型对数函数以及双曲正切 S 型函数均为非线性转移函数。试验输出层的激活函数均为线性 purelin 函数, 隐含层的激活函数均为正切 S 型 tansig 函数, 计算公式为

$$f(v) = \frac{1 - e^{-2v}}{1 + e^{-2v}} \quad (2)$$

式中: v 为该神经元的总输入。

3.2 基于遗传算法的神经网络

BP 神经网络的初始权值是随机设置的, 若设置不当, 极易得到局部最优解, 而遗传算法可以寻找全局最优解。现利用遗传算法提前优化得到初始连接权值和阈值, 以减少多余算法步骤, 防止出现局部极小化现象。试验遗传算法相关参数设置如下: 迭代次数为 10, 种群规模为 10, 交叉概率 (0~1) 选择 0.3, 变异概率 (0~1) 选择 0.1。

遗传算法求解最优初始权值和阈值的基本思想为种群初始化, 这需要对个体进行编码, 编码方法为实数编码, 即以实数串形式表示每个个体。该试验中需要求解的是神经网络阈值和权值, 因此每个个体的实数串就由阈值和权值组成, 实数串个体长度 S 为

$$S = R \times S_1 + S_1 \times S_2 + S_1 + S_2 \quad (3)$$

…… 每个个体均要计算适应度以便评判个体优劣, 由于其均为一组神经网络的初始权值和阈值, 因此要判断个体好坏需要结合 BP 神经网络进行计

算, 即将得到的初始权值和阈值带入神经网络中, 通过网络输出预测结果, 那么个体适应度 F 则为网络的预测输出与期望输出之间的绝对误差之和, 计算公式为

$$F = k \sum_{i=1}^n |y_i - p_i| \quad (4)$$

式中: k 为系数; p_i 为第 i 个样本的网络预测输出; y_i 为第 i 个样本的期望输出。

通过迭代求解得出最佳初始权值和阈值。根据设置的进化迭代次数, 每次种群都通过选择、交叉、变异操作产生新一代个体, 依据计算的个体适应度值找到该迭代次数下的最佳适应度和平均适应度, 若此时的最佳适应度小于之前记录的最佳适应度, 则将其取代。选择操作为以一定的概率将旧群体的个体选到新群体中, 这个概率与个体的适应度值成正比, 当适应度越小越好时, 其具体公式为

$$F(X_i) = \frac{k}{f(X_i)} \quad (5)$$

$$P_i = \frac{f(X_i)}{\sum_{i=1}^M f(X_i)} \quad (6)$$

式中: $F(X_i)$ 为个体 X_i 的适应度值; P_i 为个体 X_i 被选中的概率; $f(X_i)$ 为适应度值的倒数; M 为种群个体数目。

交叉操作为当两个个体被选中进行繁殖时, 其遗传信息存在一定概率 P_c 发生位置交换从而组合生成新的个体。当个体为实数编码时, 采用实数交叉法进行交叉操作, 第 l 个染色体 a_l 与第 k 个染色体 a_k 在第 j 个基因处发生实数交叉时的操作公式为

$$a_{kj} = a_{kj}(1 - b) + a_{lj}b \quad (7)$$

$$a_{lj} = a_{lj}(1 - b) + a_{kj}b \quad (8)$$

式中: b 为随机数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

变异操作为某处遗传物质发生变异, 该变异是小概率事件, 概率 P_m 通常在 $0.001 \sim 0.01$ 之间取值。第 i 个个体的第 j 个基因 a_{ij} 产生变异时的操作公式为

$$a_{ij} = \begin{cases} a_{ij} + (a_{ij} - a_{\max})f(g) & (r > 0.5) \\ a_{ij} + (a_{\min} - a_{ij})f(g) & (r \leq 0.5) \end{cases} \quad (9)$$

式中: r 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $a_{\max}$ 为基因 a_{ij} 的上限制; $a_{\min}$ 为基因的下限制。

$f(g)$ 计算公式为

$$f(g) = r_2 \left(1 - \frac{g}{G_{\max}}\right)^2 \quad (10)$$

式中: r_2 为一个随机数; g 为当前迭代次数; $G_{\max}$ 为最大进化次数。

3.3 训练结果

将正交试验得到的数据作为样本, 包括训练样本和验证样本。将所有样本数据进行归一化处理, 首先设置网络训练参数: 训练次数为 500, 学习率 (应设置较小值) 为 0.01, 训练目标为 0.01, 动量因子为 0.9 (默认值)。然后利用训练样本对上述神经网络进行训练, 最后用验证样本进行验证, 得到如图

5 所示的结果。计算熔宽和余高的绝对误差 δ 和相对误差 φ , 计算公式分别为

$$\delta = |y_i - o_i| \quad (11)$$

$$\varphi = \frac{|y_i - o_i|}{y_i} \times 100\% \quad (12)$$

式中: o_i 为第 i 个样本的实际输出。

由表 2 可以看出, 该预测模型的预测相对误差小于 6% 左右, 基本满足要求。将训练得到的网络进行保存。

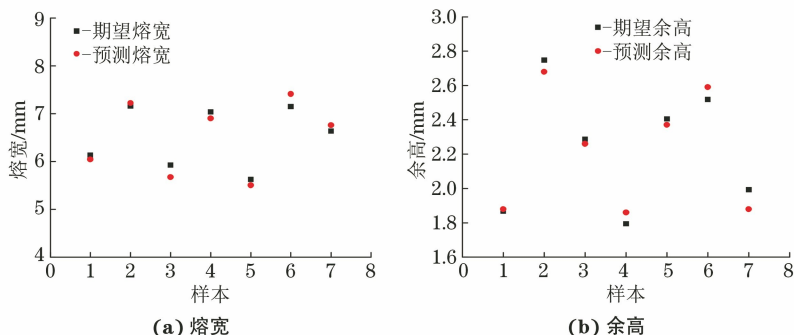


图 5 熔宽和余高的期望及预测结果

Fig. 5 Expectations and prediction results of weld width (a) and reinforcement (b)

表 2 验证样本的熔宽和余高误差

Table 2 Weld width and height errors of test samples

样本	熔宽		余高	
	绝对误差/mm	相对误差/%	绝对误差/mm	相对误差/%
1	0.090	1.47	0.013	0.69
2	0.066	0.92	0.067	2.44
3	0.252	4.25	0.027	1.18
4	0.137	1.95	0.066	3.68
5	0.121	2.15	0.035	1.45
6	0.263	3.68	0.072	2.86
7	0.128	1.93	0.112	5.62

4 创建图形界面

焊道尺寸预测模型建立后, 为了方便得到不同工艺参数下的焊道尺寸, 现利用 MATLAB 的图形用户界面模块 (GUI) 创建焊道尺寸求解交互界面。用户通过在该界面输入工艺参数, 可以直接得到单焊道的熔宽和余高, 界面功能主要包括工艺参数输入、尺寸预测以及结果输出 3 个部分, 总流程如图 6 所示。

设计一个好的界面, 应当遵循简单直观的理念, 力求直接、清晰地展现界面功能和结果。根据上述设计流程得到如图 7 所示的求解交互界面, 界面主要分为工艺参数、功能按钮以及结果输出 3 个模块。

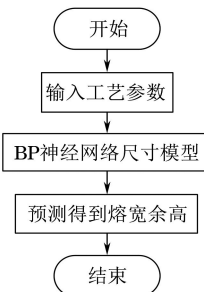


图 6 焊道尺寸求解界面设计流程

Fig. 6 Design process of interface for predicting weld size

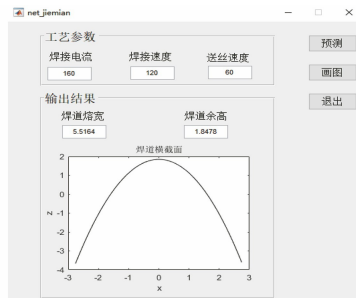


图 7 焊道尺寸求解界面

Fig. 7 Weld bead size interface

5 结论

(1) 在 GH4169 合金 TIG 电弧增材制造过程中, 熔宽随着焊接电流的增加近似线性增大, 随着焊接速度的增加近似线性降低, 随送丝速度增加则先增大后降低; 余高与送丝速度呈线性正相关, 与焊接

(下转第 91 页)

- keypad with stretchable artificial skin [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China; IEEE, 2011: 1103-1107.
- [13] LU N S, LU C, YANG S X, et al. Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(19): 4044-4050.
- [14] KIM K, LEE K R, LEE D S, et al. A silicon-based flexible tactile sensor for ubiquitous robot companion applications[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, 34: 399-403.
- [15] PAN L J, CHORTOS A, YU G H, et al. An ultra-sensitive resistive pressure sensor based on hollow-sphere microstructure induced elasticity in conducting polymer film [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3002.
- [16] RAHAMAN M, CHAKI T K, KHASTGIR D. Polyaniline, ethylene vinyl acetate semi-conductive composites as pressure sensitive sensor [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128(1): 161-168.
- [17] CHOONG C L, SHIM M B, LEE B S, et al. Highly stretchable resistive pressure sensors using a conductive elastomeric composite on a micropillar array[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3451-3458.
- [18] CHOI S, LEE H, GHAFARI R, et al. Recent advances in flexible and stretchable bio-electronic devices integrated with nanomaterials[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4203-4218.
- [19] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin (E-skin): A brief history, design considerations, and recent progress[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(42): 5997-6038.
- [20] KEN R Y, YEO J C, LIM C T. Emerging flexible and wearable physical sensing platforms for healthcare and biomedical applications [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2016, 2: 16043.
- [21] 任秦博, 王景平, 杨立, 等. 用于电阻式柔性应变传感器的导电聚合物复合材料研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(1): 80-94.
- [22] CHEN L, CHEN G, LU L. Piezoresistive behavior study on finger-sensing silicone rubber/graphite nanosheet nanocomposites[J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(6): 898-904.
- [23] CHENG M Y, TSAO C M, LAI Y Z, et al. The development of a highly twistable tactile sensing array with stretchable helical electrodes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 166(2): 226-233.
- [24] KUMAR S, SUN L L, CACERES S, et al. Dynamic synergy of graphitic nanoplatelets and multi-walled carbon nanotubes in polyetherimide nanocomposites[J]. *Nanotechnology*, 2010, 21(10): 105702.

(上接第 82 页)

电流和焊接速度则呈负相关。

(2) 结合 GH4169 合金电弧增材制造试验数据, 利用 MATLAB 软件基于 BP 神经网络和遗传算法, 建立了焊道熔宽和余高预测模型, 该模型的预测相对误差在 6% 以内, 能够较为准确地预测单焊道的尺寸。

(3) 针对焊道尺寸预测模型, 基于 MATLAB 的图形用户界面模块(GUI)开发了人工交互界面, 通过输入工艺参数即可得到该参数下的焊道尺寸。

参考文献:

- [1] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, 31: 101-110.
- [2] SURYAKUMAR S, KARUNAKARAN K P, BERNARD A, et al. Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing [J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(4): 331-344.
- [3] LIBERINI M, ASTARITA A, CAMPATELLI G, et al. Selection of optimal process parameters for wire arc additive manufacturing [J]. *Procedia CIRP*, 2017, 62: 470-474.
- [4] CAO Y, ZHU S, LIANG X B, et al. Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2011, 27(3): 641-645.
- [5] XIONG J, ZHANG G J, GAO H M, et al. Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2013, 29(2): 417-423.
- [6] 徐健宁. 智能金属结构熔焊成型技术研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- [7] 张金田, 王任甫, 王杏华. 船用钢电弧增材制造的焊道尺寸预测 [J]. *材料开发与应用*, 2018, 33(2): 17-22.
- [8] 张吉会. 基于人工神经网络的电弧增材制造焊道成型尺寸预测 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2016.
- [9] 王清, 那月, 孙东立, 等. GH99 合金 TIG 焊接接头拉伸性能的人工神经网络预测 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(3): 77-80.
- [10] 郑金勇, 刘保国, 冯伟. 基于遗传算法优化灰色神经网络的机床主轴热误差建模研究 [J]. *机电工程*, 2019, 36(6): 602-607.