

引文格式: 权国政, 施瑞菊, 卢 顺, 等. 自动化平板堆焊的单层多道焊缝表面平整度研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (10): 203-211.  
QUAN Guozheng, SHI Ruiju, LU Shun, et al. Study on surface smoothness of single layer multi-pass weld in automatic plate surfacing [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (10): 203-211.

## 自动化平板堆焊的单层多道焊缝表面平整度研究

权国政<sup>1</sup>, 施瑞菊<sup>1</sup>, 卢 顺<sup>2</sup>, 张建生<sup>2</sup>, 董旭刚<sup>3</sup>, 周 杰<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆杰品科技股份有限公司, 重庆 400044;  
3. 重庆大江杰信锻造有限公司, 重庆 404100)

**摘 要:** 基于自主研发的大型电弧熔丝增材原型设备, 设计开展了 64 组 CN645ACW 型焊丝的单层单道熔丝增材实验, 构建了焊缝宽度和高度对应电压、送丝速度、焊接速度的 BP 神经网络模型。基于此模型, 反向锁定了特定焊缝宽度和高度对应的增材工艺参数。开展了 36 组不同焊缝高度、焊缝宽度和焊缝间距的单层多道电弧熔丝增材实验, 并建立了焊缝表面平整度的 BP 神经网络模型, 分析了焊缝形状和间距对焊缝表面平整度的影响。结果表明, 增大焊缝宽度、高度及间距, 表面平整度值呈现增大趋势。在小倍数焊缝间距情况下, 表面平整度值的增大趋势随着焊缝宽度和间距的增大而增大; 大倍数焊缝间距情况下, 增大趋势反而有所下降。相同焊缝间距下, 焊缝平整度值主要由熔丝增材的堆积效应决定, 焊缝宽度和高度越大, 堆积效应越明显, 表面平整度越差。

**关键词:** 熔丝增材; BP 神经网络; 焊缝形状; 焊缝间距; 表面平整度

**中图分类号:** TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2020) 10-0203-09

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-2012.2020.10.028

## Study on surface smoothness of single layer multi-pass weld in automatic plate surfacing

QUAN Guo-zheng<sup>1</sup>, SHI Rui-ju<sup>1</sup>, LU Shun<sup>2</sup>, ZHANG Jian-sheng<sup>2</sup>, DONG Xu-gang<sup>3</sup>, ZHOU Jie<sup>1</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Chongqing Jiepin Science and Technology Co., Ltd., Chongqing 400044, China;  
3. Chongqing Dajiang Jiexin Forging Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

**Abstract:** Based on the self-developed wire and arc additive large prototype equipment, 64 groups of CN645ACW single layer single-pass wire and arc additive experiments were completed, the BP neural network of weld height and width vs. voltage, weld feeding speed and welding speed was established. Based on the model, the additive parameters for special weld height and width were obtained. Following, the 36 groups of single layer multi-pass additive experiments with various weld weight, width and weld spacing were performed, and the BP neural network of welding surface smoothness was established. The influence of weld shape and weld spacing on weld surface smoothness was fully analyzed. The results show that the surface smoothness of multi-pass weld increases with the increase of width, height and spacing of weld. In the case of small multiple weld spacing, the increasing trend of surface smoothness increases with the increase of weld width and spacing, while in the case of large multiple weld spacing, the increasing trend decreases. At the same weld spacing, the weld surface smoothness is mainly determined by the stacking effect of wire and arc additive. The larger the weld width and height is, the more obvious the stacking effect is and the worse the surface smoothness is.

**Key words:** wire and arc additive; BP neural network; weld shape; weld spacing; surface smoothness

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2018YFB1106502); 国家工业强基工程 (TC180A3Y1/18); 重庆市技术创新与应用示范专项产业类重点研发项目 (cstc2018jszx-cyzdX0121); 重庆市技术创新与应用发展重点项目 (cstc2019jscx-mbdx0080)

**第一作者:** 权国政 (通信作者), 男, 1980 年生, 博士, 教授, 主要从事塑性变形机理及模具增材制造技术研究, E-mail: quangz3000@sina.com

**收稿日期:** 2020-03-30; **修订日期:** 2020-06-15

## 引言

电弧熔丝增材制造 (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) 起源于 20 世纪初西屋电器公司申请的一项以电弧为热源逐层堆焊制造金属件的专利<sup>[1-2]</sup>。21 世纪初, WAAM 相对于诸如激光粉末烧结增材的独特优势逐渐被研究人员认识, 如增材速度快、设备运行环境开放和原料成本低等, WAAM 技术逐渐被深入研发, 进而被广泛用于大尺寸、较复杂形状构件的低成本、高效快速成形<sup>[3-5]</sup>。但是 WAAM 载能束热输入高、热源半径大和金属熔体短程流动等特征决定了成形尺寸对工艺参数具有较弱的响应灵敏度, 而且温度越高越显著, 单层增材表面形貌将影响后续增材的稳定性和精度, 故一般需要在增材过程中进行间歇式二次表面加工<sup>[6-8]</sup>。为了实时控制增材表面形貌, 较多学者开展了 WAAM 过程监测与反馈控制研究<sup>[9-12]</sup>, 如张广军等<sup>[13-14]</sup>设计了一套用于焊缝特征尺寸控制的双被动视觉传感系统, 实现了熔敷层有效宽度和堆高等参数的在线准确检测, 并以熔敷层有效宽度为被控变量, 焊速为控制变量, 设计了单神经元自学习控制器, 通过模拟仿真和干扰试验验证了控制器性能。由此看出, 构建电弧熔丝增材工艺参数输入与增材形貌输出变量之间的关系模型, 并基于扩充数据开展参数全局优化, 是实现自适应智能增材的关键。

本文针对电弧熔丝单层多道增材的表面不平整度这一重要目标进行研究, 涉及到电压、送丝速度、焊接速度和焊缝间距 4 项关键变量, 鉴于变量多且变化范围过大将导致实验方案过于复杂, 引入焊缝宽度和高度两项中间输出变量, 分两个层次来设计实验方案并获得模型训练数据。首先, 将单层单道增材时电压、送丝速度和焊接速度作为输入变量。将焊缝宽度和高度作为输出目标, 建立关系模型; 然后将焊缝宽度、焊缝高度和道次间距 3 项作为输入变量, 将表面不平整度作为输出目标进行研究。模型求解依据 BP 神经网络深度学习, 所得模型进而用于预测及数据扩充, 建立焊缝宽度、焊缝高度、焊缝间距与表面不平整度的综合响应曲面并开展目标全局优化, 从而获得表面最平整时的焊缝宽度、焊缝高度和焊缝间距, 进而依据 BP 神经网络反向求解获得优化的电压、送丝速度和焊接速度 3 项输入参数。

## 1 基于实验的工艺参数 - 焊缝不平整度映射关系构建

### 1.1 基于单层单道实验的工艺参数 - 焊缝形状映射关系构建

单层多道熔丝增材表面平整度与焊缝形状及焊缝间距关联性较高, 为了探究其具体的内在联系, 需要进行不同焊缝宽度、高度及焊缝间距的熔丝增材实验, 获取相应的单层多道熔丝增材表面平整度值。在熔丝增材过程中, 焊缝形状主要受熔丝增材工艺参数影响, 因此建立熔丝增材工艺参数 - 焊缝形状映射关系显得尤为重要。本文选取直径为  $\Phi 1.2$  mm 的 CN645ACW 型焊丝和 45 钢钢板, 利用自主研发的大型电弧熔丝增材原型设备, 设计了 3 因素 4 水平的 64 组单层单道熔丝增材实验, 熔丝增材电压范围: 24 ~ 30 V, 送丝速度范围: 7000 ~ 13000 mm · min<sup>-1</sup>, 焊接速度范围: 500 ~ 1100 mm · min<sup>-1</sup>。利用单层单道熔丝增材实验数据构建了以电压、送丝速度以及焊接速度为输入变量, 焊缝宽度和高度为输出变量的单层单道焊缝形状 BP 神经网络, 成功实现了熔丝增材工艺参数 - 焊缝形状的关系映射。图 1 和图 2 分别为 BP 神经网络对固定电压和焊接速度情况下, 以 500 mm · min<sup>-1</sup> 为间隔, 送丝速度为 7000 ~ 13000 mm · min<sup>-1</sup> 的焊缝宽度和高度的预测结果。由图 1 可知, 焊缝宽度随送丝速度的增大而增大, 但当增大到一定程度时, 出现了增大趋势变缓的现象, 而随送丝速度增大的焊缝宽度总体增幅随熔丝增材速度的增大而减小。这是因为电压和焊接速度一定时, 送丝速度作为影响焊缝形状主要因素, 其数值大小关系着单位时间的焊丝熔化量, 送丝速度越高, 焊丝熔化量越高, 最终形成的焊缝宽度越大。但相同条件下, 熔丝增材速度的增大使得焊缝单位长度焊丝熔化量相对减少, 在熔丝增材过程中, 焊缝高度随着送丝速度的增大而明显增大, 增大呈现先慢后快趋势 (图 2)。

### 1.2 基于单层多道实验的焊缝形状 - 焊缝不平整度映射关系构建

根据建立的单层单道熔丝增材 BP 神经网络可以精确实现特定焊缝宽度和高度与熔丝增材工艺参数之间的匹配, 因而在确定单层多道熔丝增材实验的目标焊缝宽度 (6 ~ 10 mm) 和高度 (2.5 ~ 3.5 mm) 值后, 将目标值输入单层单道熔丝增材

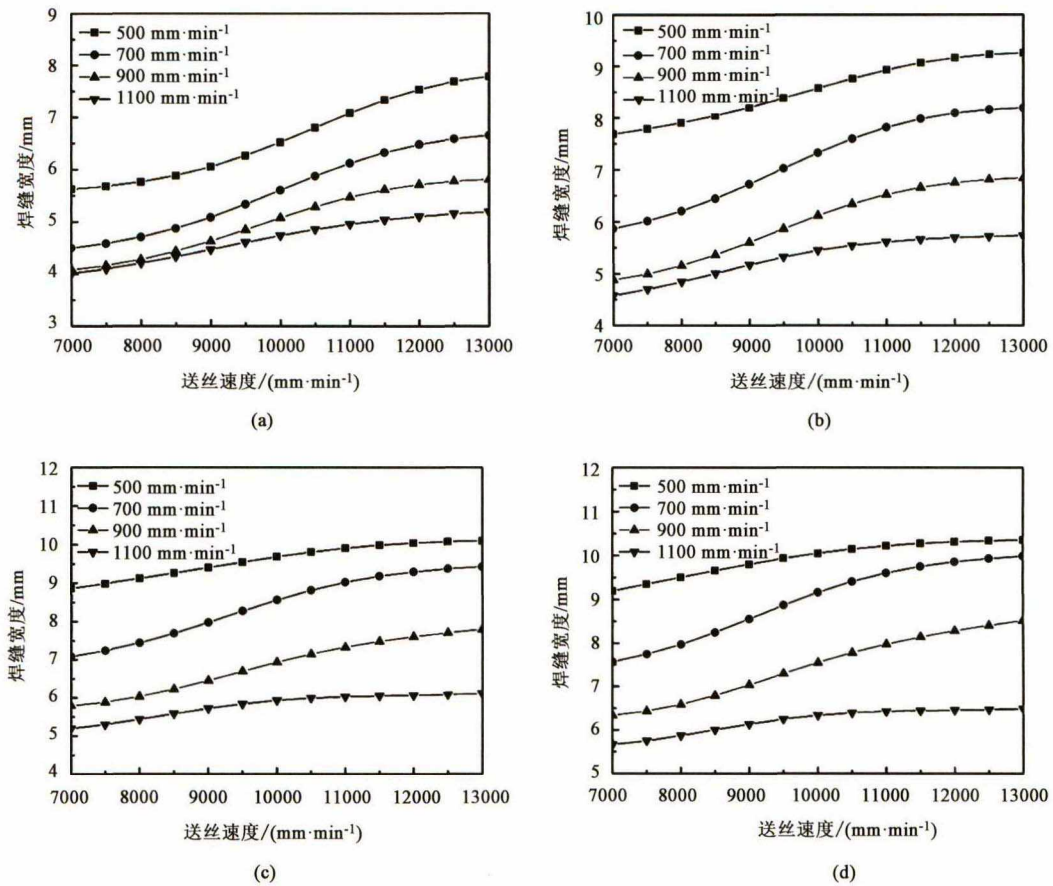


图 1 不同电压和焊接速度下送丝速度对焊缝宽度的影响

(a) 24 V (b) 26 V (c) 28 V (d) 30 V

Fig. 1 Effect of wire feeding speed on weld width at different voltages and welding speeds

BP 神经网络中，反向锁定目标值所对应的熔丝增材工艺参数。最终确定如表 1 所示的单层多道熔丝增材实验，同一焊缝宽度和高度下还需分别配 0.6、0.7、0.8 和 0.9 倍共 4 种不同的焊缝间距，设计共

表 1 应用于单层多道熔丝增材实验的焊缝形状及工艺参数  
Tab. 1 Weld shape and processing parameters applied to single layer multi-pass wire and arc additive experiments

序号	焊缝宽度/mm	焊缝高度/mm	熔丝增材电压/V	送丝速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	焊接速度/(mm·min <sup>-1</sup> )
1	6	2.5	26.1	12100	1040
2	8	2.5	29.1	11700	890
3	10	2.5	29.6	10900	580
4	6	3	24.4	11500	850
5	8	3	26.2	12100	740
6	10	3	29.3	13400	670
7	6	3.5	23.6	13500	800
8	8	3.5	25.6	13100	680
9	10	3.5	27.8	13300	530

计 36 组熔丝增材实验。熔丝增材过程中焊枪与平板保持垂直，流量为 12 ~ 15 L·min<sup>-1</sup> 的 CO<sub>2</sub> 和 Ar 混合气体保护焊，混合比例为 4:1。

熔丝增材实验结果如图 3 所示，图 3a ~ 图 3d 中从左至右每组焊缝分别对应 0.6、0.7、0.8 和 0.9 倍焊缝宽度 4 种不同焊缝间距的多道熔丝增材结果。将图片以焊缝宽度和高度的数值命名，以图 3a 为例，焊缝宽度为 6 mm，焊缝高度为 2.5 mm，命名方式即为 6-2.5，图 3b ~ 图 3d 的命名方式原则一致。从整体上看，0.6 倍焊缝宽度的情况下，焊缝表面较为平整，但随着焊缝间距的扩大，多条焊缝间的重合部分明显减少，表面平整度也随之增大；当焊缝间距达到 0.9 倍焊缝宽度时，多条焊缝的重合部分很少，每条焊缝几乎独立，焊缝表面平整度最差。同一焊缝宽度条件下，当焊缝间距较小时，焊缝高度是影响焊缝表面平整度的主要因素，焊缝高度的增加会导致材料的局部堆叠，从而降低焊缝的表面平整度。焊缝间距较大时，焊缝高度对表面平整度的影响程度有所下降。

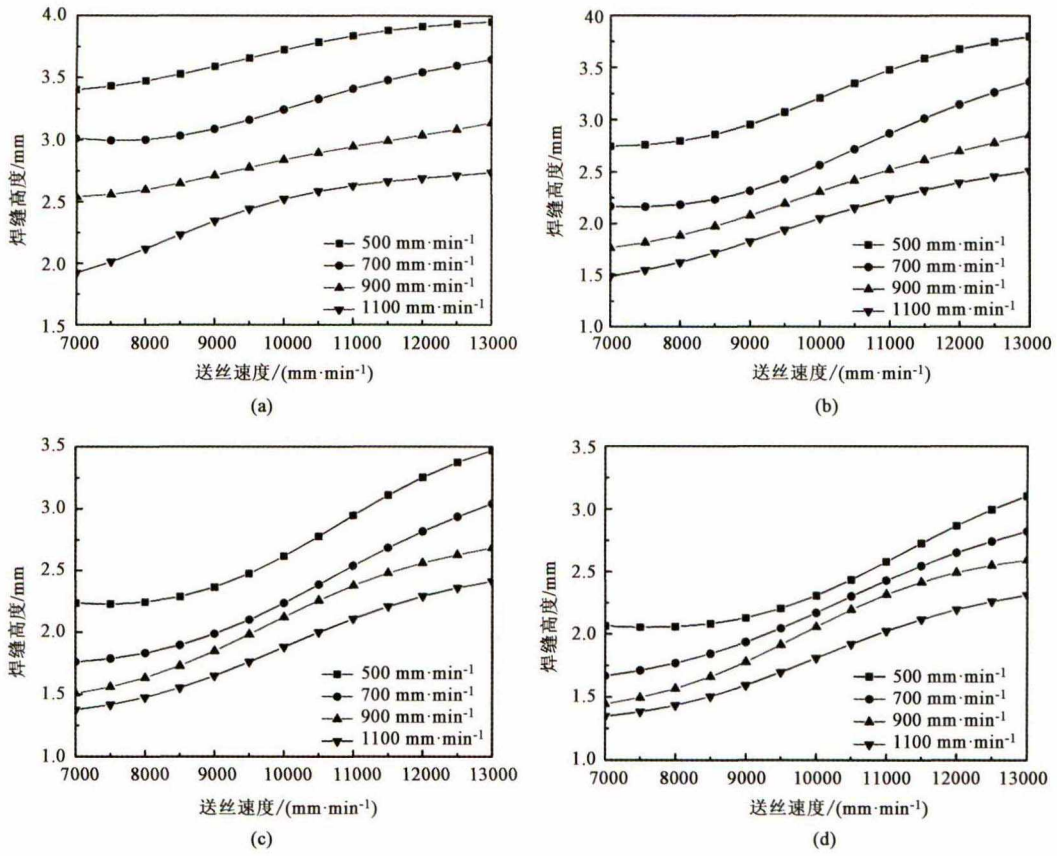


图 2 不同电压和焊接速度下送丝速度对焊缝高度的影响

(a) 24 V (b) 26 V (c) 28 V (d) 30 V

Fig. 2 Effect of wire feeding speed on weld height at different voltages and welding speeds

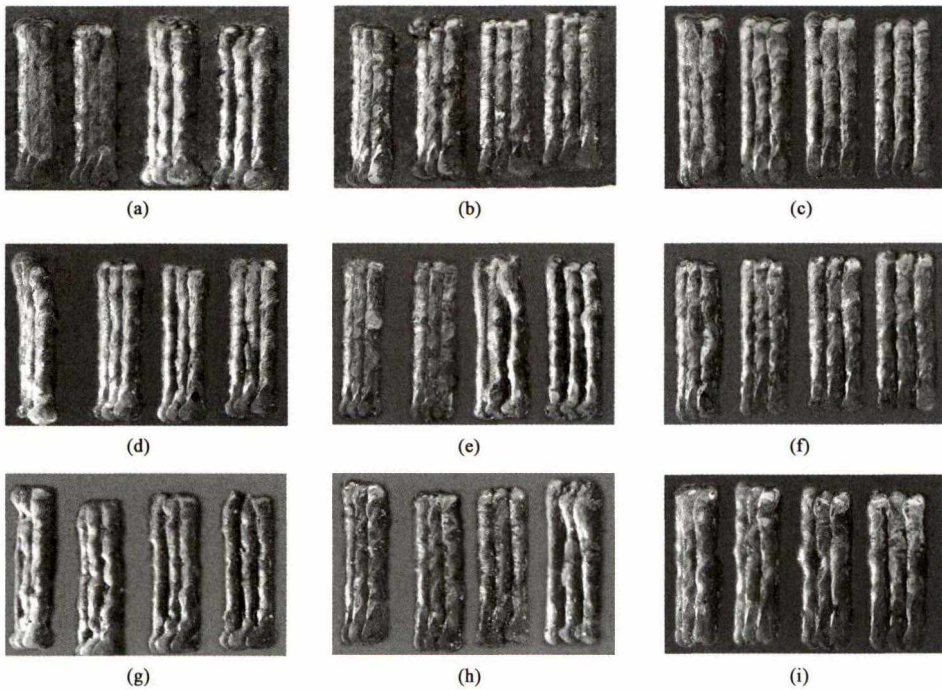


图 3 不同工艺参数下单层多道熔丝增材实验结果

(a) 6-2.5 (b) 8-2.5 (c) 10-2.5 (d) 6-3 (e) 8-3 (f) 10-3 (g) 6-3.5 (h) 8-3.5 (i) 10-3.5

Fig. 3 Experimental results of single layer multi-pass wire and arc additive at different process parameters

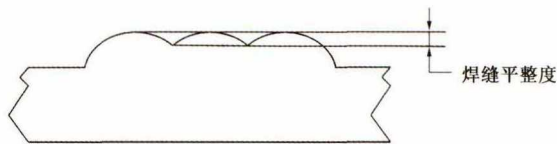
## 2 焊缝表面平整度 BP 神经网络模型构建

### 2.1 单层多道焊缝表面平整度数值统计

将熔丝增材平板进行线切割水磨后，利用体式显微镜对宽度方向 40、50 和 60 mm 处焊缝平整度进行统计。焊缝平整度以焊缝表面最高点和最低点落差为衡量标准，如图 4 所示，统计所得落差值越小代表焊缝的表面平整度越高。表 2 为不同焊缝形状和焊缝间距对应的焊缝表面平整度统计结果。实验条件用编号表示，第 1 个数字为焊缝宽度，第 2 个数字为焊缝高度，第 3 个数字为焊缝间距，如序号 1 的实验条件为：6 mm 焊缝宽度，2.5 mm 焊缝高度和 0.6 倍焊缝宽度的焊缝间距。



(a)



(b)

图 4 单层多道次焊缝表面平整度示意图

(a) 实物图 (b) 原理图

Fig. 4 Sketch of single layer multi-pass weld surface smoothness

(a) Physical picture (b) Schematic diagram

### 2.2 焊缝表面平整度 BP 神经网络模型

本文建立的单层多道次焊缝表面平整度 BP 神经网络以焊缝宽度、焊缝高度和焊缝间距为输入变量，以焊缝表面平整度为输出变量。选取序号为 13~16 和 33~36，共计 8 组数据作为测试样本，剩余 28 组数据作为训练样本。利用式 (1) 对数据进行归一化处理，隐含层和输出层的传递函数分别为 tansig、purelin 函数，训练和学习函数分别为 trainbr、learnngd 函数。当节点数为 9 时，MSE 函数值取到极小值，神经网络性能最优，因此确定隐含层为

1，节点数为 9。其他参数设置如表 3 所示。

$$x_n = 0.05 + 0.25 \times \frac{x - 0.95x_{\min}}{1.05x_{\max} - 0.95x_{\min}} \quad (1)$$

式中： $x$  为初始值； $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  为变量的最小和最大值； $x_n$  为  $x$  经过归一化后的输出值。

表 2 单层多道次焊缝表面平整度统计结果 (mm)

Tab. 2 Statistical results of single layer multi-pass weld surface smoothness (mm)

序号	实验条件	表面平整度	序号	实验条件	表面平整度
1	6-2.5-0.6	0.29	19	8-3-0.8	1.49
2	6-2.5-0.7	0.35	20	8-3-0.9	1.94
3	6-2.5-0.8	0.49	21	10-3-0.6	0.71
4	6-2.5-0.9	0.77	22	10-3-0.7	0.83
5	8-2.5-0.6	0.39	23	10-3-0.8	1.60
6	8-2.5-0.7	0.60	24	10-3-0.9	2.25
7	8-2.5-0.8	0.90	25	6-3.5-0.6	0.52
8	8-2.5-0.9	1.25	26	6-3.5-0.7	0.77
9	10-2.5-0.6	0.60	27	6-3.5-0.8	1.18
10	10-2.5-0.7	0.85	28	6-3.5-0.9	1.98
11	10-2.5-0.8	1.30	29	8-3.5-0.6	0.65
12	10-2.5-0.9	1.84	30	8-3.5-0.7	0.85
13	6-3-0.6	0.35	31	8-3.5-0.8	1.60
14	6-3-0.7	0.52	32	8-3.5-0.9	2.52
15	6-3-0.8	0.95	33	10-3.5-0.6	0.87
16	6-3-0.9	1.05	34	10-3.5-0.7	1.25
17	8-3-0.6	0.56	35	10-3.5-0.8	1.82
18	8-3-0.7	0.70	36	10-3.5-0.9	2.75

表 3 BP 神经网络参数设置

Tab. 3 Parameters setting of BP neural network

参数名称	最大训练次数	最小梯度要求	学习效率	调整参数	训练要求精度
数值	1000	$1.00 \times 10^{-20}$	0.01	0.005	0.0001

为了验证单层多道次焊缝表面平整度 BP 神经网络的可靠性，需要对训练样本和测试样本进行对比分析，因而构建了如图 5 所示的 BP 神经网络性能评价图。通过将训练样本和测试样本进行线性拟合，发现两者的相关系数分别为 0.991 和 0.986，正相关关系明显。训练样本和测试样本的平均相对误差分别为 7.99% 和 8.32%，且数据点均在拟合线 ( $y=x$ ) 附近，说明所建 BP 神经网络预测精度和泛化能力良好，可有效预测不同实验参数条件下单层多道次焊缝的表面平整度。

## 3 基于 BP 神经网络的焊缝平整度智能模型及预测

### 3.1 焊缝宽度对焊缝平整度的影响

利用所建立的具有较高精度和优良泛化能力的

焊缝表面平整度 BP 神经网络模型，将熔丝增材 36 组实验数据扩充到 108 组。并将扩充后的数据进行图像化拟合为不同焊缝间距和焊缝高度下，焊缝表

面平整度随焊缝宽度变化的趋势图，如图 6 所示。由图 6 可知，焊缝表面平整度值的变化范围为 0.31 ~ 2.68 mm，且随焊缝宽度的增大而增大，说明随着

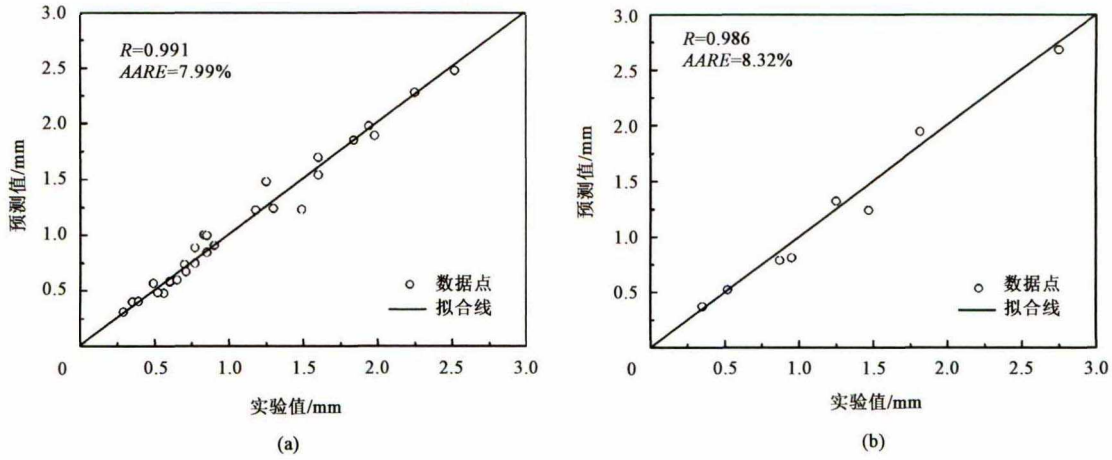


图 5 BP 神经网络模型预测值和实验值之间的相关关系  
(a) 训练样本 (b) 测试样本

Fig. 5 Correlation relationships between predicted values by BP neural network model and experimental values  
(a) Training samples (b) Test samples

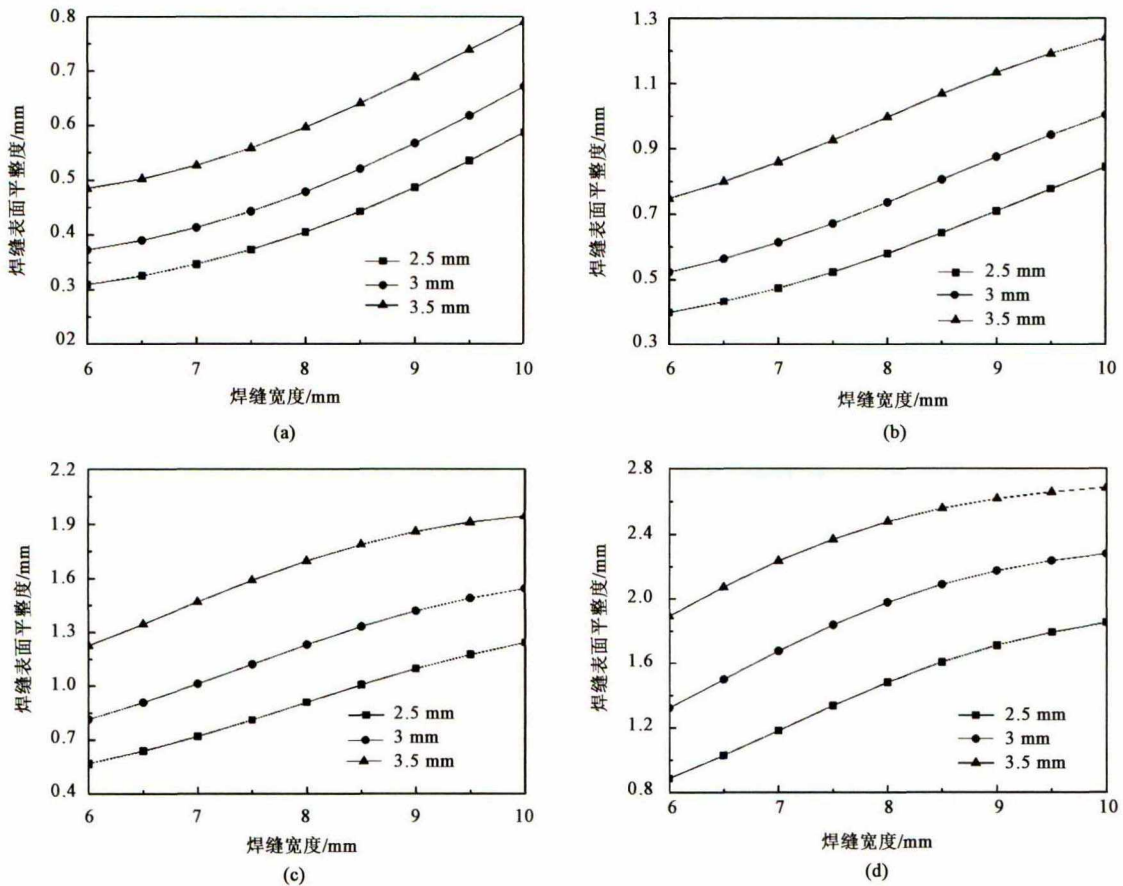


图 6 不同焊缝间距和焊缝高度下焊缝宽度对焊缝表面平整度的影响

(a) 0.6 倍焊缝宽度 (b) 0.7 倍焊缝宽度 (c) 0.8 倍焊缝宽度 (d) 0.9 倍焊缝宽度

Fig. 6 Effect of weld width on weld surface smoothness at different weld spacings and weld heights

(a) 0.6 times of weld width (b) 0.7 times of weld width (c) 0.8 times of weld width (d) 0.9 times of weld width

焊缝宽度的增加，焊缝表面平整度变差。相同焊缝宽度和焊缝间距的条件下，焊缝表面平整度值取决于单道焊缝的焊缝高度，焊缝高度越大，焊缝表面平整度值越大，表面质量越差。但随着焊缝间距倍数的增大，焊缝表面平整度值的增大趋势有所变缓。

### 3.2 焊缝高度对焊缝表面平整度的影响

利用表面平整度 BP 神经网络模型预测了间距为 0.125 mm，焊缝高度范围为 2.5 ~ 3.5 mm，不同焊缝宽度下的多道焊缝表面平整度值。并将扩充后的数据拟合为不同焊缝间距和焊缝宽度下，焊缝表

面平整度随焊缝高度变化的趋势图，如图 7 所示。在焊缝宽度和焊缝间距相同的条件下，焊缝表面平整度值随着焊缝高度的增大而增大，焊缝表面平整度变差。这是由于相同焊缝间距条件下，焊缝高度较高时，熔丝的堆积效应愈发明显，因而焊缝表面平整度值越大焊缝表面平整度值上升加快。同时焊缝的宽度增加有助于熔丝材料的堆积效应，因而焊缝越宽焊缝表面平整度值越大，以 0.6 倍焊缝宽度的焊缝间距条件为例，焊缝宽度由 6 mm 增加到 10 mm 时，表面平整度增幅约为 0.28 mm，增长约 1 倍。

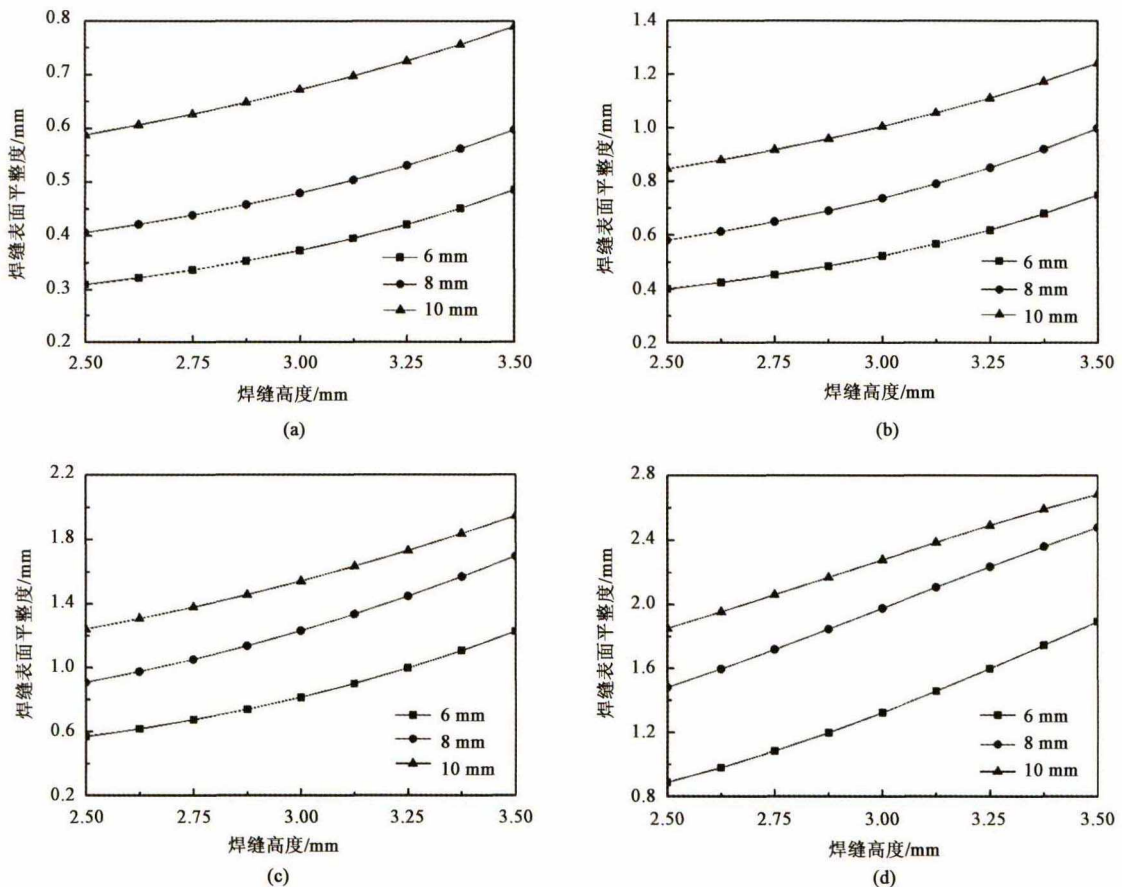


图 7 不同焊缝间距和焊缝宽度下焊缝高度对焊缝表面平整度的影响  
 (a) 0.6 倍焊缝宽度 (b) 0.7 倍焊缝宽度 (c) 0.8 倍焊缝宽度 (d) 0.9 倍焊缝宽度

Fig. 7 Effect of weld height on weld surface smoothness at different weld spacings and weld widths

(a) 0.6 times of weld width (b) 0.7 times of weld width (c) 0.8 times of weld width (d) 0.9 times of weld width

### 3.3 焊缝间距对焊缝平整度的影响

图 8 为焊缝间距对焊缝表面平整度的影响趋势图。焊缝宽度和高度一定时，焊缝间距越小，相邻焊缝重叠部分越大，焊材在相邻焊缝相交处堆积的也就越多，焊缝整体越趋于平整。随着焊缝间距增大，焊缝表面平整度值的增大趋势越来越明显，相邻焊缝相交处焊材的堆积对焊缝表面落差的降低效果远不如由焊缝间距增大造成的落差

增大效果。

## 4 结论

(1) 多道次焊缝表面平整度值随着焊缝宽度、高度及间距的增大而增大。

(2) 在小倍数焊缝间距情况下，表面平整度值的增大趋势随着焊缝宽度和间距的增大而增大；大

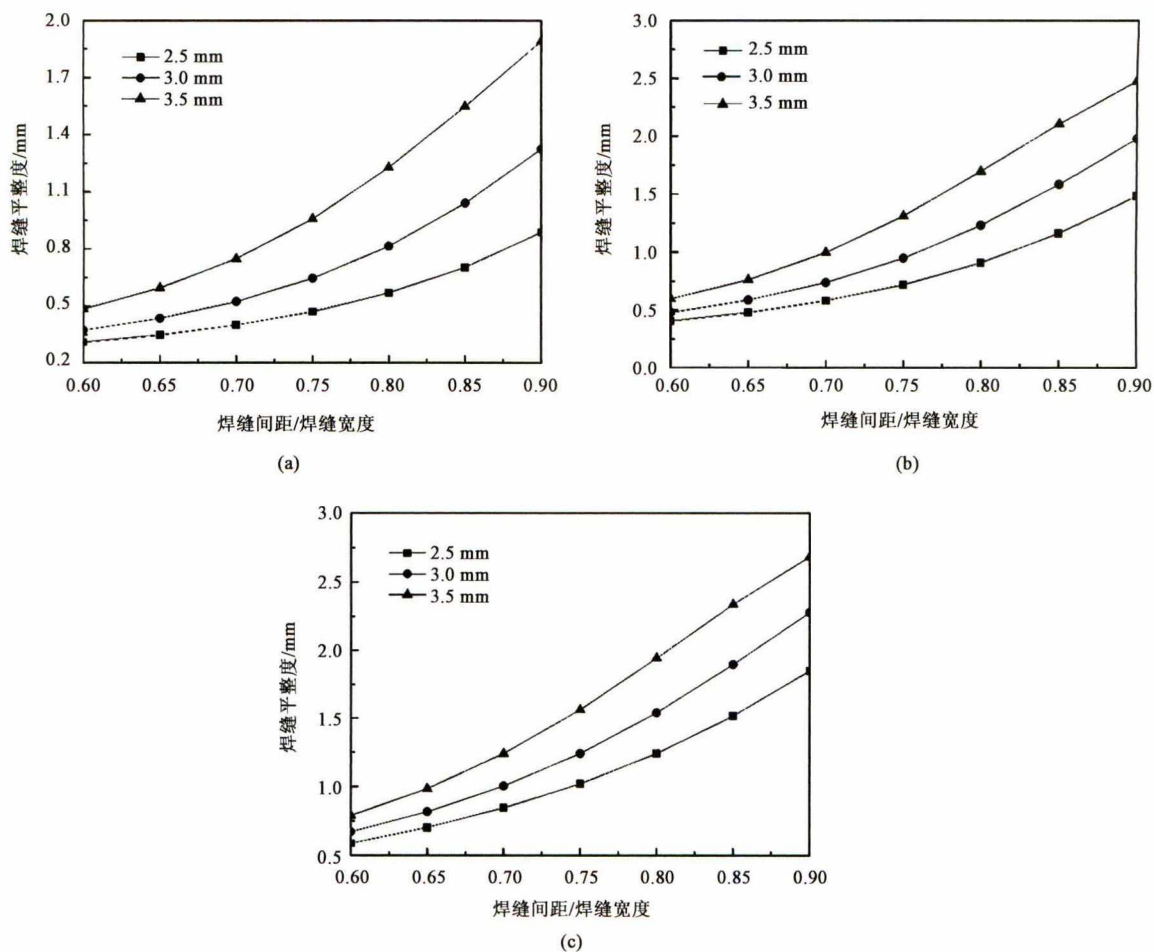


图 8 不同焊缝宽度下焊缝间距对焊缝表面平整度的影响

(a) 6 mm (b) 8 mm (c) 10 mm

Fig. 8 Effect of weld spacing on weld surface smoothness at different weld widths

倍数焊缝间距情况下, 表面平整度值的增大趋势有所减缓。

(3) 相同焊缝间距条件下, 焊缝表面平整度值主要由熔丝增材的堆积效应决定, 焊缝宽度和高度越大, 堆积效应越明显, 表面平整度越差。

#### 参考文献:

- [1] 樊文欣, 李志伟, 李凤刚, 等. 利用 RBF 神经网络预测反挤压连杆衬套过程中的挤压力 [J]. 锻压技术, 2019, 44 (5): 180-184.  
FAN Wenxin, LI Zhiwei, LI Fenggang, et al. Prediction of extrusion force in backward extruding connecting rod bushing process by RBF neural network [J]. Forging & Stamping Technology, 2019, 44 (5): 180-184.
- [2] BAKER R. Method of making decorative articals; United States, US1533300 [P]. 1925-04-14.
- [3] KAZANAS P, DEHERKAR P, ALMEIDA P, et al. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B.

Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226 (6): 1042-1051.

- [4] MARTINA F, MEHNEN J, WILLIAMS S W, et al. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212 (6): 1377-1386.
- [5] 何仲赞, 洪军, 卢秉恒, 等. 金属电弧喷涂成型快速制模关键技术与应用 [J]. 塑性工程学报, 2008, 15 (2): 71-75.  
HE Zhongyun, HONG Jun, LU Binghen, et al. Key technologies and application of metal arc spray tooling [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15 (2): 71-75.
- [6] 徐振杰. 铝合金电弧增材制造过程中电弧特征与气孔的在线光谱诊断 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
XU Zhenjie. On-line spectral diagnosis of arc features and porosities in aluminum wire and arc additive manufacturing [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [7] 李冉. 电弧增材制造分层算法与路径规划方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
LI Ran. Research on slicing algorithm and path planning method of wire and arc additive manufacturing [D]. Harbin: Harbin Institute

- of Technology, 2018.
- [8] 杨笑宇, 李言, 赵鹏康, 等. 电弧增材制造技术在材料制备中的研究现状及挑战 [J]. 焊接, 2018, (8): 20 - 26, 72.  
YANG Xiaoyu, LI Yan, ZHAO Pengkang, et al. Research status and challenges of wire and arc additive manufacturing in material preparation [J]. Welding & Joining, 2018, (8): 20 - 26, 72.
- [9] CHANG W S, NA S J. Prediction of laser-spot-weld shape by numerical analysis and neural network [J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2001, 32 (4): 723 - 731.
- [10] KIM I S, SON J S, PARK C E, et al. A study on prediction of bead height in robotic arc welding using a neural network [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130 (2): 229 - 234.
- [11] FUERSCHBACH P W, KNOROVSKY G A. A CO<sub>2</sub> laser weld shape-predicting neural network [C] //17th International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, Orlando, 1998: 1 - 12.
- [12] TARNG Y S, TSAI H L, YEH S S. Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39 (9): 1427 - 1438.
- [13] 张广军, 陈善本, 刘晓东. 脉冲 GTAW 焊接区视觉图像传感系统 [J]. 焊接, 2001, (7): 23 - 25, 27.  
ZHANG Guangjun, CHEN Shanben, LIU Xiaodong. Vision image sensing system of pulsed GTAW welding area [J]. Welding & Joining, 2001, (7): 23 - 25, 27.
- [14] 张华军, 张广军, 蔡春波, 等. 机器人多层多道焊缝激光视觉焊缝的识别 [J]. 焊接学报, 2009, 30 (4): 108 - 111, 121.  
ZHANG Huajun, ZHANG Guangjun, CAI Chunbo, et al. Laser-based visual recognition of multi-pass seam in robot arc welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30 (4): 108 - 111, 121.