



接快速成形中每1层的精度以及整个物体堆积过程的准确性，因此对于TIG熔敷堆焊的研究是焊接快速成形工艺的基础性研究。本文将对TIG熔敷堆焊的焊缝宽度进行神经网络建模。

### 1 TIG熔敷堆焊焊缝轨迹的特点

本试验采用的焊机为全数字焊机TransTig2200，送丝机为KD4010。图1为焊接试验系统图。所谓熔敷堆焊是相对于常见的对接焊而言的，是指在一块板件上实行多层多道送丝堆焊的焊接工艺。通常1层1道TIG熔敷堆焊的焊缝轨迹是由一个个熔滴所形成的熔池的不完全叠加所形成的金属长条，如图2所示。

从图中可见，焊缝轨迹并不是等宽的矩形条，并且焊缝表面具有凹凸不平的特征。在进行TIG熔敷堆焊时必须保证焊接方向和小车运动方向相反，否则会出现图3中焊缝轨迹被焊丝划破以及2道焊缝出现间隙的情况，这一点在焊接快速成形工艺的轨迹规划中要特别注意。

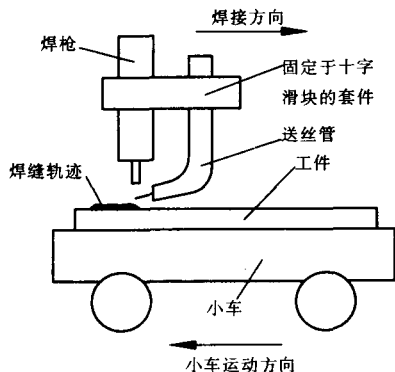


图1 TIG熔敷堆焊试验系统



图2 1层1道TIG熔敷堆焊焊缝

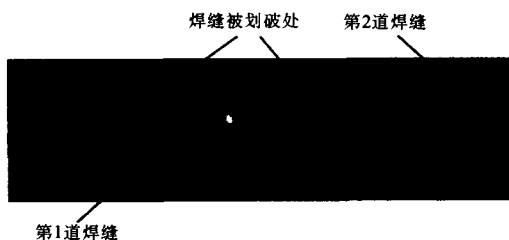


图3 1层多道堆焊焊缝对比

虽然在1层1道焊时焊缝表面会呈现鳞形纹路，但在多层焊时焊缝纹路会渐渐变得光滑，且在试验中每1层熔宽的变化不大，如图4中从第1层到第10层熔宽增加了约1.5 mm。



图4 0层1道堆焊焊缝

### 2 TIG熔敷堆焊焊缝宽度的数据分析

由TIG熔敷堆焊焊缝轨迹的特点可知，多层堆焊时熔宽的变化并不大，因此为了方便建模，在试验阶段，主要是以1层1道焊为基础，且选用的工件材料为低碳钢（A32），焊丝材料为H08。表1为部分试验的数据，从试验数据可以得出影响焊缝宽度的参数有：工件尺寸、焊丝直径、焊接速度、气体流量、焊接电流、送丝速度。

考虑试验的最终目的是为在焊接快速成形中对焊缝宽度进行预测提供模型，为了提高效率，就必须采用尽可能少的参量对这些焊缝指标进行控制，使TIG熔敷堆焊试验尽可能规范，为神经网络的训练提供较为有规律的训练样本。通过试验得出，焊接电流和送丝速度对焊缝的最终宽度的影响最大，因此这里选用的变量仅为焊接快速成形中需要改变的焊接电流和送丝速度，其他的参数恒定不变。

表1 在相同条件下不同板件的TIG熔敷堆焊焊缝宽度数据

工件尺寸 /mm	焊丝直径 /mm	焊接速度 / $(m \cdot min^{-1})$	气体流量 / $(L \cdot min^{-1})$	焊接电流 /A	送丝速度 / $(cm \cdot min^{-1})$	焊缝宽度 - /mm
400×73×4	1.0	1.2	15	80	100	4.26
400×73×4	1.0	1.2	15	80	100	4.68
400×73×4	1.0	1.2	15	90	100	4.74
400×73×4	1.0	1.2	15	100	100	5.32
400×73×4	1.0	1.2	15	110	100	5.76
400×73×4	1.0	1.2	15	100	110	5.88
400×73×4	1.0	1.2	15	100	120	6.12
400×73×4	1.0	1.2	15	100	130	6.28

表1中前2行数据为同一条焊缝不同位置的宽度数据，其误差仍约为0.5 mm。这是因为焊接时熔池由液态到固态变化时受到焊接磁场力作用、焊接工件表面粗糙度、工件张力变化、测量结果误差等因素的影响，从而导致焊缝宽度存在误差。

### 3 TIG熔敷堆焊焊缝宽度的BP神经网络建模

#### 3.1 BP神经网络原理<sup>[1]</sup>

利用BP神经网络建模是为了应用神经网络的函数逼近功能。图5为基于BP算法的神经网络结构图。

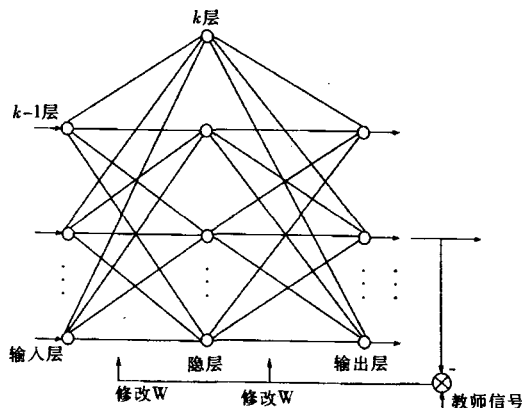


图5 基于BP算法的神经网络结构

假设网络有一个输出 $y$ ，给定 $N$ 个样本 $(x_k, y_k)$  ( $k=1,2,$

...,  $N$ ), 任一个节点 $i$ 的输出为 $O_i$ , 对某一个输入为 $x_k$ , 网络的输出为 $y_k$ , 节点 $i$ 的输出为 $O_{jk}$ , 在第 $l$ 层的第 $j$ 个节点, 当输入第 $k$ 个样本时, 节点 $j$ 的情况为:

$$\text{输入: } \quad \text{net}_{jk}^l = \sum_j w_{ij}^l O_j^{l-1}, \quad (1)$$

$$\text{输出: } \quad O_{jk}^l = f(\text{net}_{jk}^l), \quad (2)$$

$$\text{误差: } \quad E_k = \frac{1}{2} \sum_j (y_k - \bar{y}_{jk})^2. \quad (3)$$

定义 $\delta_{jk}^l = -\frac{\partial E_k}{\partial \text{net}_{jk}^l}$ ;  $f(\cdot)$ 为节点的特性函数;  $\mu$ 为步长。若节点 $j$ 为输出单元:

$$\delta_{jk}^l = -(y_k - \bar{y}_{jk}) f'(\text{net}_{jk}^l), \quad (4)$$

若节点 $j$ 不为输出单元:

$$\delta_{jk}^l = \sum_m \delta_{mk}^{l+1} w_{mj}^{l+1} f'(\text{net}_{jk}^l), \quad (5)$$

反向传播算法对权值的修正:

$$w_{ij} = w_{ij} - \mu \sum_{k=1}^N \frac{\partial E_k}{\partial w_{ij}}. \quad (6)$$

### 3.2 焊缝宽度的BP神经网络建模

由于3层BP神经网络具有对任意函数的逼近能力, 隐层层数选为1层。输入层节点的个数为输入的向量分组个数2。输出层节点的个数为要求的向量分组个数1。隐层节点的个数根据最佳隐层节点数公式:

$$\sum_{i=0}^n C_n^i > k, \text{ 如果 } i > n_i, C_n^i = 0; n_i = \sqrt{n+m} + a, \quad (7)$$

式中:  $k$ 为样本数,  $n_i$ 为隐层节点数,  $n$ 为输入层节点数,  $m$ 为输出层节点数,  $a$ 为[1, 10]之间的常数。隐层神经元上的传递函数为双正切S型函数, 输出层神经元上的传递函数为线性传递函数, 网络训练函数为LM训练函数。

学习样本的选取, 可采取2种方案: ①在其他条件不变的情况下, 保持送丝速度为100 cm/min, 焊接电流变化范围为60~140 A, 间隔为10 A; ②保持焊接电流为100 A, 送丝速度变化范围为40~130 cm/min, 间隔10 cm/min。按上述2种方案, 分别堆焊长约30 cm的焊缝, 每条焊缝选择8个相对应的点求平均值。这样就得到了19组样本数据, 其中有2个相同条件数据取了平均值, 即样本数为18组。

## 4 网络的训练及结果

### 4.1 网络的训练

根据最佳隐层节点数公式, 选取的隐层节点数分别为10, 11, 12。对网络进行训练, 图6为训练的结果, 表2为隐层节点数训练结束的训练步次及所达到的均方误差。从表2中可得出虽然节点数为11, 12的均方误差都基本上接近0, 但从训练的步次来看隐层节点数选择12时网络收敛比较快。

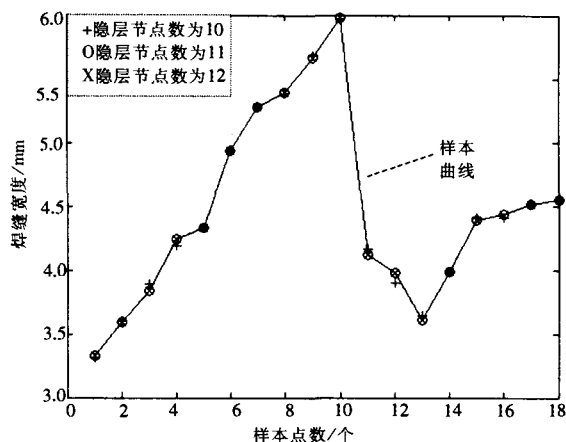


图6 不同隐层节点数的训练结果

表2 训练步次及所达到的均方误差

隐层节点数	训练步次	训练达到的均方误差
10	1 000	0.001 073
11	482	0.000 001
12	356	0.000 001

### 4.2 网络验证结果

表3是网络正确性验证的部分结果, 试验中的同一焊缝的焊缝宽度误差仍约为0.5 mm, 同一条件下的不同焊缝宽度均值误差约为0.15 mm。

表3 网络验证结果

焊接电流 /A	送丝速度 / (cm·min <sup>-1</sup> )	预测焊缝宽度 /mm	实际焊缝宽度 /mm
105	55	4.65	4.54
95	55	4.08	4.02
95	50	3.92	3.88

## 5 结论

由TIG熔敷堆焊焊缝宽度的BP神经网络建模结果来看, 该神经网络的预测焊缝宽度基本符合实际焊缝宽度。只有对焊缝宽度有较为准确的预测, 才可以在快速成形制造过程中较为精确地确定每一分层需要多少道焊缝, 较好地规划出每个分层的堆积轨迹, 从而在快速成形制造过程中较好地运用TIG熔敷堆焊工艺。

### 参考文献:

- [1] 耿昌松, 林泳, 王威, 等. 应用MATLAB建立焊接参数人工神经网络模型的方法[J]. 焊接, 2001, 45(5):14-16.
- [2] I S Kim, J S Son and C E Park. An investigation into an intelligent system for predicting bead geometry in GMA welding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(10):113-118.
- [3] 孙志强, 邱忠, 刘瑛, 等. 神经网络理论与MATLAB7实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

作者简介: 罗勇 (1981—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究领域为神经网络建模。