

基于组合神经网络的钨极氩弧焊环境负荷预测

蒋伟琪^{1,2}, 黄海鸿^{1,2}, 刘赞^{1,2}, 李磊^{1,2}, 刘志峰^{1,2}

(1. 合肥工业大学, 机械工业绿色设计与制造重点实验室, 合肥, 230009; 2. 合肥工业大学, 合肥, 230009)

摘要: 以钨极氩弧焊为例, 搭建焊接环境负荷定量预测模型. 通过正交试验法确定 GTAW 环境负荷排放的关键影响因素为焊接电流、喷嘴高度和焊接时间; 建立基于 RBF-BP(Radial Basis Function-Back Propagation) 组合神经网络的 GTAW 环境负荷排放模型, 对不同焊接参数下的环境负荷进行预测. 结果表明, RBF-BP 组合神经网络模型的预测结果 (平均误差 6.63%) 与实际值拟合程度高; 焊接电流、喷嘴高度、焊接时间与各环境负荷产生量均呈正相关趋势. 建立的预测模型可为降低焊接环境负荷排放和制定合理焊接工艺路线提供数据支持.

创新点: 建立神经网络模型实现对关键焊接参数下 GTAW 环境负荷排放量的预测.

关键词: 钨极氩弧焊; 焊接排放; 正交试验; 神经网络; 预测模型

中图分类号: TG 457.1

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20211104002

0 序言

焊接在各个行业广泛应用, 我国焊接行业每年金属消耗量达到 420 万吨^[1]. 钨极氩弧焊 (gas tungsten arc welding, GTAW) 因其生产的焊缝质量高, 是目前制造业中广泛使用的金属连接技术之一^[2-4]. 焊接过程所产生的烟尘、废气等环境负荷会对环境和人体造成一定的危害^[5-7]. 焊接烟尘粒径非常小 ($< 0.1 \mu\text{m}$) 且成份复杂^[8-10], 包含元素多达 20 种以上^[11]; 焊接废气包括 CO_2 , NO_x , SO_2 和 O_3 等^[12]. 这些物质都易通过呼吸进入身体对人造成健康危害^[13], 严重可致癌^[14]. 因此, 有必要进一步采集焊接过程中所产生的环境负荷数据、分析焊接环境负荷特性, 减小焊接过程对环境、从业人员的危害.

目前, 由于焊接环境负荷的易扩散性导致难以采集或采集数据不精确, 无法完全采用实测手段, 需要进一步建立相关模型来表征焊接环境的产生量^[15]. Ioffe 等人^[16] 建立了焊接过程中烟尘产生的物理模型, 揭示了熔滴从球状模式向喷雾模式转变时烟气生成率降低的现象. Dennis 等人^[17] 建立了适用于弧焊和喷焊过渡模式 GMAW 烟尘排放模型,

预测的烟尘形成率和测量的烟尘形成率之间存在一定程度的关系. Deam 等人^[18] 建立 GMAW 的烟气形成半经验模型, 模型表明雾滴尺寸和送丝速度可以控制细烟的形成速率. 卜智翔等人^[19] 结合“质量—弹簧”理论, 建立基于熔滴过渡模型的 GMAW 焊接发尘率预测模型, 预测其熔滴中的 Fe 和 Mn 元素蒸发率. Vimal 等人^[20] 以建立了焊条电弧焊焊接工艺 BP 神经网络预测模型, 对熔渣、飞溅、功耗、烟气生成率和颗粒形成这五个指标进行预测. 这些模型有效阐述了相关因素与烟气形成速率之间的关系, 但是均不能直接反应相关负荷的产生量.

针对 GTAW 在密闭环境下所产生的 NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 等物质浓度, 文中根据收集、获取的环境负荷排放数据建立其焊接环境负荷排放模型, 分析基于关键工艺参数的排放特性, 以帮助减小焊接对环境、从业人员的危害, 也为焊接工艺环保标准体系进一步充实完善提供数据支撑.

1 试验方法

焊接工艺为 GTAW, 工艺设备为 SZ-GCS04 多功能精密铝焊机, 电源为单相 220V-50Hz; 电流范围为 80 ~ 200 A; 保护气体为 Ar; 使用 ER4043 型铝焊丝对厚度为 5 mm 的基材 6061 铝板进行焊接,

其化学成分如表 1 所示.试验在密闭焊接环境(0.12 m³)下进行焊接.焊接环境负荷排放采集系统由焊接工作台、检测仪器以及软件工具组成,如图 1 所示.利用各传感器(采集频率:每秒 1 次)来接收

焊接过程中的初始数据,实现数据采集和分析.为保证数据质量,试验在密闭手套箱内进行,母材放置于传动装置上,焊枪固定于空间桁架装置,从而实现自动焊接.

表 1 6061 铝合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of aluminum alloy

Si	Mg	Ti	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr	Al
0.4~0.8	0.8~1.2	0.15	0.7	0.15~0.4	0.15	0.25	0.04~0.35	余量

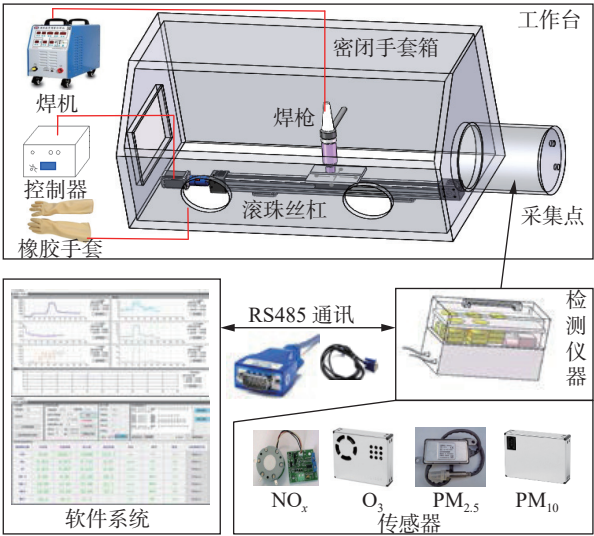


图 1 焊接环境负荷排放采集系统
Fig. 1 Welding environment load discharge acquisition system

2 试验设计

2.1 正交试验分析

试验所考虑的因素众多,包括焊接电流、喷嘴高度、保护气流速、焊接速度、焊接时间等.正交试验法能有效降低试验次数的一种设计方法^[21].根据 GTAW 工艺特点,选择喷嘴高度、焊接电流、焊接时间、保护气流速、坡口类型和焊接速度为试验因素,各因素均设 3 个水平,各水平均有代表性,覆盖大部分实际焊接参数调节范围.按照 L₂₇(3⁷)型设计

27 组试验,如表 2 所示.其试验结果如表 3 所示,并对结果进行方差分析,确定关键焊接排放影响因素.

为了保证试验结果的准确性,同参数下试验重复 3~5 次,若前 3 次测量结果误差超过 20%,则需要加测 2 次,以多次试验结果的平均值为表征数据.

2.2 方差分析

计算各因素的偏差平方和、误差平方和、误差自由度等计算量,最后计算出 F 值,进行显著性检验.其过程可表示为

$$S_{Si} = \sum_{i=1}^n \frac{T_i^2}{K_i} - \frac{T^2}{n}$$
 (1)

$$f_i = K_i - 1$$
 (2)

式中: S_{Si} 是各因素的偏差平方和, T_i 是各因素同水平数据总和, K_i 是各因素水平重复数, T 是数据总和, n 是数据总个数, f_i 是各因素的自由度.

$$S_T^2 = \sum A^2 - \frac{T^2}{n}$$
 (3)

$$f_T = n - 1$$
 (4)

$$S_e = S_T^2 - \sum S_{Si}$$
 (5)

$$f_e = f_T - \sum f_i$$
 (6)

式中: S_T² 是所有因素的偏差平方和, A² 是各试验的指标值, f_T 是所有因素的总自由度, S_e 是误差平方和, f_e 是误差自由度.

表 2 正交试验因素及水平
Table 2 Orthogonal factor test and level

水平	喷嘴高度 d/mm	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	保护气体流量 Q/(L·min ⁻¹)	坡口类型	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)
1	4	80	10	12	I形	1.7
2	8	140	20	16	V形	3.4
3	12	200	30	20	无坡口	5.1

表 3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal test results

编号	NO _x 浓度 C ₁ /(mg·m ⁻³)	O ₃ 浓度 C ₂ /(mg·m ⁻³)	PM _{2.5} 浓度 C ₃ /(mg·m ⁻³)	PM ₁₀ 浓度 C ₄ /(mg·m ⁻³)	编号	NO _x 浓度 C ₁ /(mg·m ⁻³)	O ₃ 浓度 C ₂ /(mg·m ⁻³)	PM _{2.5} 浓度 C ₃ /(mg·m ⁻³)	PM ₁₀ 浓度 C ₄ /(mg·m ⁻³)
1	4.220	2.020	0.066	0.078	15	8.620	2.770	0.216	0.222
2	4.020	1.880	0.054	0.071	16	28.110	7.410	0.705	0.739
3	4.040	1.660	0.049	0.060	17	27.840	7.930	0.650	0.684
4	10.650	3.730	0.350	0.359	18	27.370	7.530	0.539	0.574
5	10.700	3.610	0.330	0.371	19	15.900	6.060	0.119	0.125
6	9.960	3.400	0.273	0.309	20	16.260	3.770	0.198	0.210
7	24.110	6.620	0.653	0.725	21	15.080	4.650	0.119	0.125
8	25.530	7.370	0.643	0.691	22	38.620	14.390	0.957	1.061
9	25.680	6.170	0.613	0.688	23	36.750	8.640	0.651	0.758
10	17.140	5.050	0.162	0.181	24	36.580	10.940	0.679	0.812
11	15.740	4.200	0.119	0.133	25	27.310	9.090	0.811	0.949
12	15.320	3.420	0.121	0.130	26	28.700	7.160	0.781	0.935
13	8.620	2.350	0.216	0.222	27	27.320	7.710	0.725	0.860
14	8.220	1.830	0.164	0.174					

$$M_{Si} = \frac{S_{Si}}{f_i} \tag{7}$$

$$M_{Se} = \frac{S_e}{f_e} \tag{8}$$

$$F_i = \frac{M_{Si}}{M_{Se}} \tag{9}$$

$$F_{0.1}(2, 14) = 2.73 \tag{10}$$

式中: M_{Si} 是各因素平均偏差平方, M_{Se} 是误差的偏差平方, F_i 为检验统计量, $F_{0.1}(2,14)$ 为临界标准值.

F 值越大, 表明影响程度越大, 仅对各排放指标具有显著影响因素进行统计, 即 F 值大于 2.73. 根据表 4 和表 5 可知, 对 NO_x 排放影响的显著因素依次为焊接电流、喷嘴高度、焊接时间; 对 O₃ 排放影响的显著因素依次为喷嘴高度、焊接电流、焊接

表 4 NO_x 和 O₃ 方差分析结果
Table 4 Variance analysis of NO_x and O₃ results

指标	因素	F 值	排序
NO _x	喷嘴高度	28.47	2
	焊接电流	32.11	1
	焊接时间	23.88	3
O ₃	喷嘴高度	17.90	1
	焊接电流	14.24	2
	焊接时间	11.31	3

时间. 对 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 排放影响的显著因素依次为焊接电流、喷嘴高度、焊接时间. 综合试验结果, 确定对焊接排放影响最为显著的因素为焊接电流、喷嘴高度、焊接时间.

表 5 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 方差分析结果
Table 5 Variance analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ results

指标	因素	F 值	排序
PM _{2.5}	喷嘴高度	13.79	2
	焊接电流	62.54	1
	焊接时间	6.46	3
PM ₁₀	喷嘴高度	17.46	2
	焊接电流	61.81	1
	焊接时间	6.78	3

3 预测模型建立

在数据分析领域, 神经网络有着极为广泛的应用, 尤其是在非线性数据预测建模方面^[22]. 焊接环境负荷的产生受众多工艺参数影响, 导致其产生量往往无明显规律. BP 神经网络、RBF 神经网络等方法在焊接力学性能^[23]、焊缝形态预测方面^[24]已取得较突出的应用效果. 例如, 朱师琦^[25]以焊接电

流、电压、速度以及保护气流速为输入, 建立基于 BP 神经网络建立 GMAW 发尘率预测模型, 对焊接发尘量进行预测且整体误差低于 10%。文中综合考虑焊接烟尘和废气, 采用 RBF-BP 组合神经网络来搭建 GTAW 焊接环境负荷数据排放预测模型。

以焊接电流, 喷嘴高度, 焊接时间这 3 个关键工艺参数作为输入量, 以 NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 浓度作为输出量, 获取 162 条样本数据, 基于 RBF-BP 复合神经网络, 构建 GTAW 焊接环境负荷排放预测模型。

3.1 样本数据处理

随机划分样本数据的 75% 作为训练集, 25% 作为测试集。由于输入输出层各参数的量纲不同, 数值上差距较大, 为避免数值计算时出现大数淹没小数的现象, 在模型训练前将各参数进行归一化处理。

$$x^* = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

式中: $x_{\max}$ 为样本数据的最大值, $x_{\min}$ 为样本数据的最小值。

3.2 建立 RBF-BP 组合神经网络模型

将 RBF 神经网络与 BP 神经网络进行组合构建组合神经网络模型, 其中 RBF 神经网络的输出层作为 BP 神经网络的输入层, 以多层 BP 神经网络作为连接层, 同时以 RBF 神经网络的输出层为组合神经网络模型的输出层, 如图 2 所示。

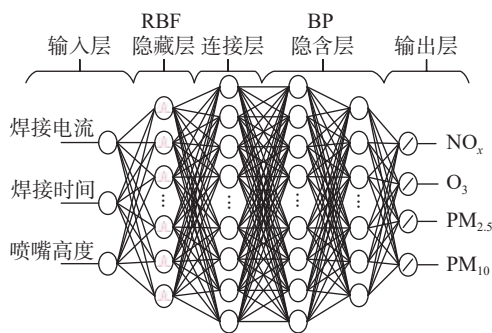


图 2 RBF-BP 组合神经网络模型

Fig. 2 RBF-BP combined neural network model

BP 神经网络与 RBF 神经网络的算法如下, 对于 BP 神经网络部分假设模型中的第 j 个神经元, 有 n 个输入参数, 分别用 x_1, x_2, x_n 表示, 各输入值对应的权值分别为 w_1, w_2, w_n , 则从输入层到下一层神经元的输入值为 z 可由式 (13) 得出:

$$z_k = \sum_{i=0}^n w_{i1} x_i + b_1 \quad (12)$$

$$a_j = \sigma_1(z_k) \quad (13)$$

式中: z_k 为第 k 个神经元的输入值 ($1 \leq k \leq J$), w_{i1} 为输入层到隐含层的神经元连接权重, b_1 为计算过程中的偏置, σ_1 为隐含层神经元的激活函数, a_j 为隐含层第 k 的神经元的输出。

由隐藏层到输出层的计算过程为

$$y = \sigma_2 \left(\sum_{i=0}^j w_{i2} a_i + b_2 \right) \quad (14)$$

式中: w_{i2} 为隐含层到输出层的神经元连接权重, σ_2 隐含层到输出层的激活函数, b_2 为计算过程中的偏置, y 为神经网络输出层的输出值。

RBF 神经网络的隐含层采用的是径向基激活函数, 高斯径向基函数的表达为:

$$K(x_p - c_i) = \exp \left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_p - c_i\|^2 \right) \quad (15)$$

式中: 其中 c_i 为核函数的中心, x_p 为输入值, σ 为函数的宽度参数, $\|x_p - c_i\|$ 表示为空间任意一点到高斯核函数中心的欧氏距离。

将选定的高斯径向基函数带入的计算过程即

$$q_k = \exp \left(-\left\| \frac{X - c_k}{D_k} \right\|^2 \right) \quad (16)$$

式中: q_k 为第 k 个神经元的函数输出值, X 为输入参数的向量表达, c_k 为隐含层第 k 个神经元对应的中心向量, D_k 为隐含层第 k 个神经元的宽度向量。

隐含层到输出层采用的是线性输出函数, 其输出过程表达式为

$$y = \sum_{i=0}^j w_k q_k \quad (17)$$

式中: j 为隐含层神经元的总数, w_k 为隐含层到输出层的神经元连接权重, y 为该神经网络的输出结果。

将 RBF 神经网络与 BP 神经网络进行组合构建组合神经网络模型, 其计算过程为

输入层到 RBF 隐藏层

$$Z_{k1} = \exp \left(-\left\| \frac{X - c_k}{D_k} \right\|^2 \right) \quad (18)$$

RBF 隐藏层到连接层

$$Z_{k2} = \sigma_1(W_{i1} Z_{k1} + b_1) \quad (19)$$

连接层到 BP 隐藏层

$$Z_{k3} = \sigma_2(W_{i2} Z_{k2} + b_2) \quad (20)$$

$$Z_{k4} = \sigma_3(W_{i3} Z_{k3} + b_3) \quad (21)$$

BP 隐藏层到输出层

$$y = W_{i4} Z_{k4} + b_4 \quad (22)$$

式中: W_{i1} 为隐藏层到连接层的权重系数的矩阵表达, W_{i2} , W_{i3} 为连接层到 BP 隐藏层的权重系数的矩阵表达, W_{i4} 为 BP 隐藏层到输出层的权重系数的矩阵表达. σ_1 σ_2 σ_3 为相应的激活函数. Z_{k1} 为 RBF 隐藏层输出结果的矩阵表达, Z_{k2} 为连接层输出结果的矩阵表达, Z_{k3} , Z_{k4} 为 BP 隐藏层输出结果的矩阵表达, y 为最终的输出结果.

组合模型有 4 层隐藏层. 第一层为 RBF 神经网络隐含层, 神经元为 30 个, 以高斯径向基函数作为激活函数; 第二层为连接层, 用于连接两类神经网络、第三、四层为 BP 神经网络层隐含层, 神经元分

别为 45 个、30 个; 激活函数分别 sigmoid 函数、rule 函数; 且第四层 Dropout 设置为 0.1. 以 MSE 作为损失函数, 采用 Adam 优化算法, 随机权重初始值, 偏置初始值随机生成.

3.3 模型验证与比较

选取 15 组未在训练集和测试集中出现过的特征参数进行试验, 与神经网络的环境负荷排放产生量预测结果对比. 并与相应的 BP 神经网络与 RBF 神经网络预测模型进行对比分析, 遵循最小误差原则, 调试出各个模型的最优参数, 结果如图 3, 图 4 所示.

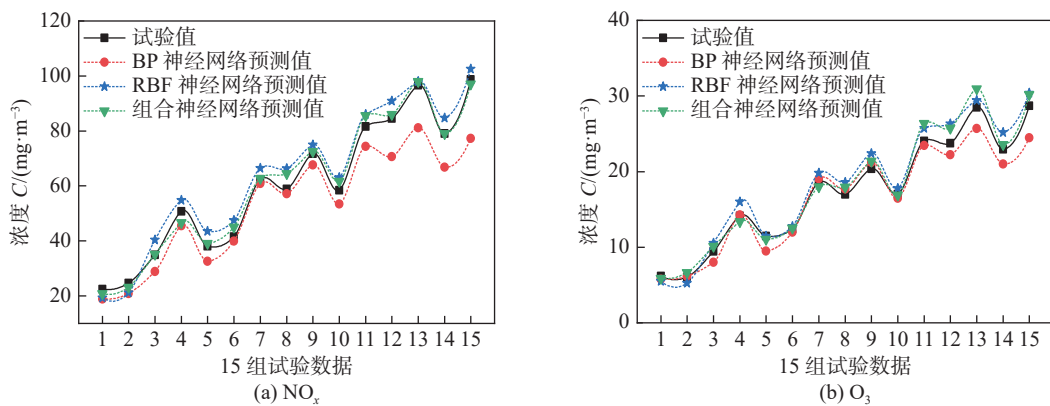


图 3 三种神经网络与真实值对比情况 (气体)

Fig. 3 Comparison between the three neural networks and the real value(gas). (a) NO_x ; (b) O_3

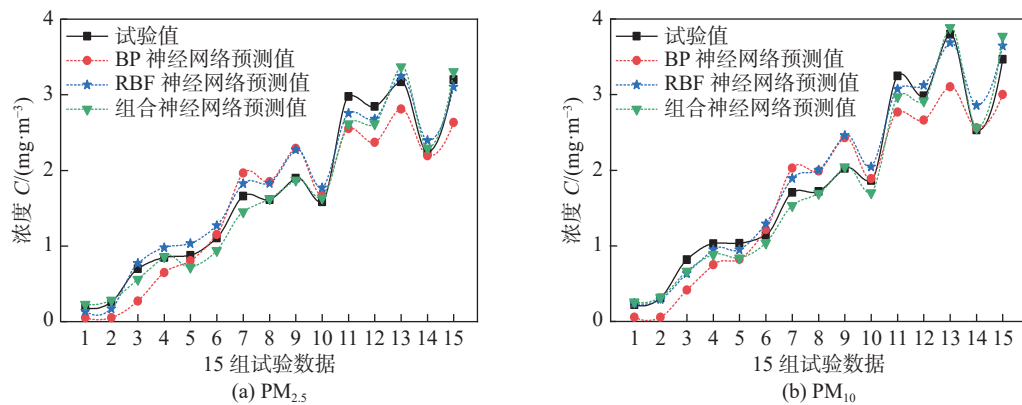


图 4 三种神经网络与真实值对比情况 (颗粒物)

Fig. 4 Comparison between the three neural networks and the real value(PM). (a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10}

BP 神经网络模型预测结果平均误差为 17.09% (如表 6 所示), 气体的产生量预测结果误差要低于颗粒物. 且颗粒物产生量预测结果中出现较大的波动, 预测误差最小值与最大值之间波动很大, 会出现个别数据点的预测值远远偏离真实值的情况, 该模型稳定性较差. RBF 神经网络模型预测结果平均误差为 10.02%, 气体的产生量预测结果误差要低

于颗粒物. 虽然颗粒物产生量预测结果仍有一定的波动, 但是预测效果要好于 BP 神经网络模型, 尤其是在颗粒物的预测性能上有着较大提升. 相比 BP 神经网络模型, RBF 神经网络模型更能接近真实数值. RBF-BP 组合神经网络模型预测结果平均误差为 6.63%, 气体的产生量预测结果误差要低于颗粒物. 相较于其他 2 种模型, RBF-BP 组合神经网络

络模型预测结果与实际值拟合程度高,且稳定性更好.

表 6 三种神经网络误差对比 (%)

Table 6 Error comparison of three kinds of neural networks

	误差	BPNN	RBFNN	RBF-BPNN
总体	最小	1.03	0.17	0.13
	最大	82.93	33.98	21.12
	均值	17.09	10.02	6.63
气体	最小	1.03	0.17	0.1
	最大	21.69	15.93	9.61
	均值	9.20	8.57	4.67
颗粒物	最小	1.14	2.42	0.78
	最大	82.93	33.98	21.12
	均值	24.98	11.82	8.60

从表 7 可以看出, RBF-BP 组合神经网络模型的 MSE 值 (0.00203) 最小且 R^2 值 (0.83091) 最大,对样本数据的拟合效果最好.而 RBF 神经网络模型在 2 个指标上的表现仅次于 RBF-BP 组合神经网络模型,也符合试验结果.

表 7 各模型性能评价指标

Table 7 Performance evaluation indexes of each model

模型	MSE值	R^2 值
BPBB	0.002 41	0.800 47
RBFNN	0.002 13	0.821 29
RBF-BPNN	0.002 03	0.830 91

其次,通过神经网络模型也说明焊接参数与焊接排放之间具有可预测性,通过对焊接关键参数与排放结果之间的关联分析,发现焊接电流、喷嘴高度、焊接时间与焊接环境负荷排放呈正相关趋势,从而可为合理制定焊接工艺提供技术参考.

图 5、图 6、图 7 分别为焊接时间、焊接电流、喷嘴高度对各环境负荷排放的影响规律.3 个焊接参数均对焊接过程中各环境负荷排放有显著影响.由图 5 可知,随着时间的增加, NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 产生量相应增大;由图 6 可知,随着电流的增大, NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 产生量也会增大,但颗粒物的产生量具有一定的波动性;由图 7 可知,随着喷嘴高度的增大, NO_x 、 O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 产生量相应增大.

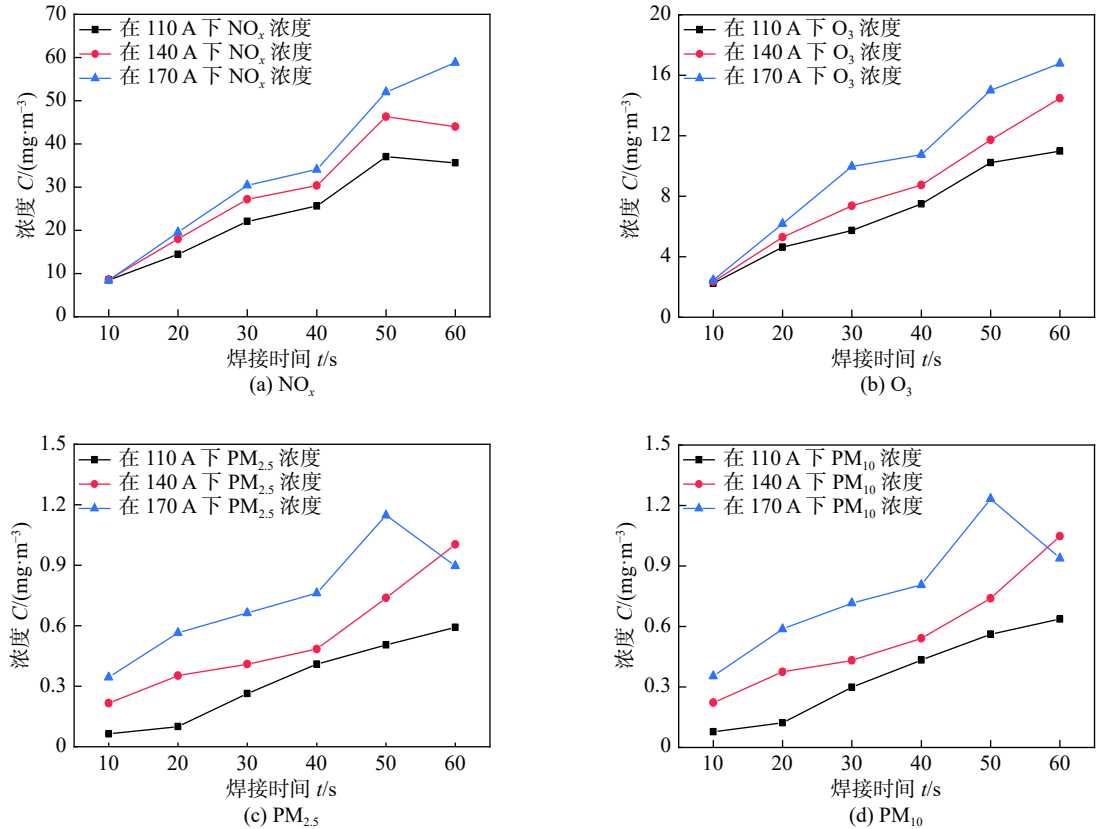


图 5 焊接时间对排放的影响

Fig. 5 Effect of welding time on emissions. (a) NO_x ; (b) O_3 ; (c) $\text{PM}_{2.5}$; (d) PM_{10}

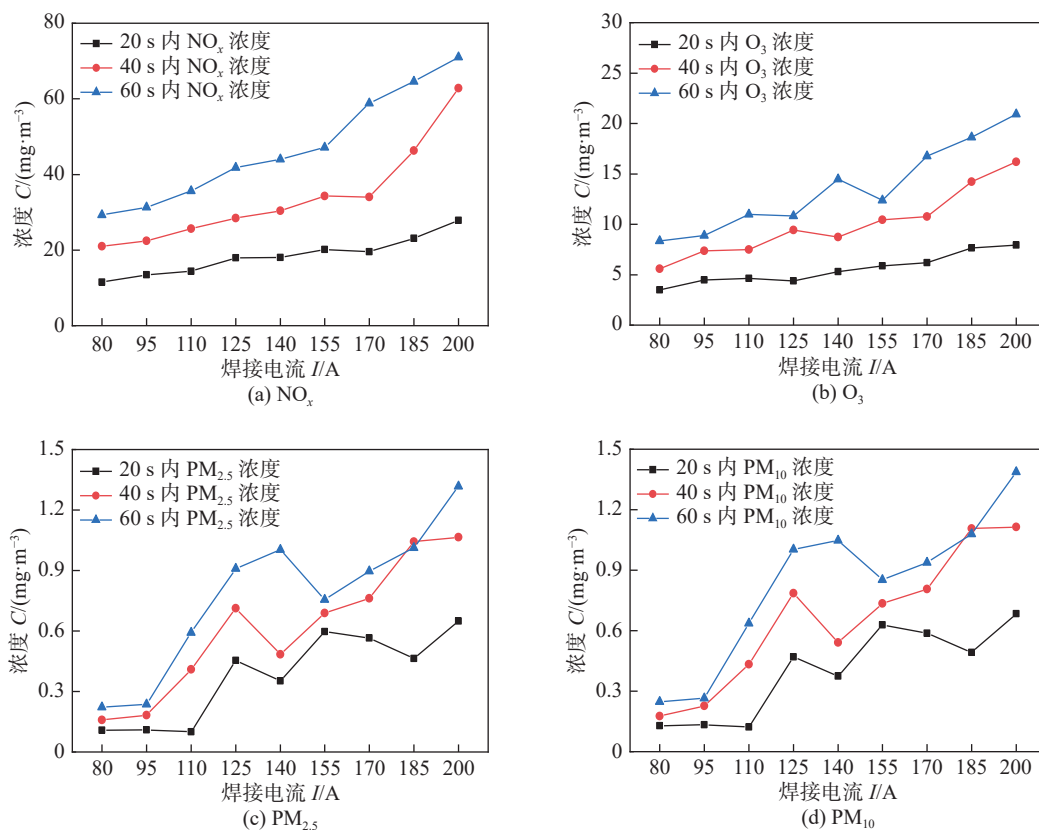


图 6 焊接电流对排放的影响

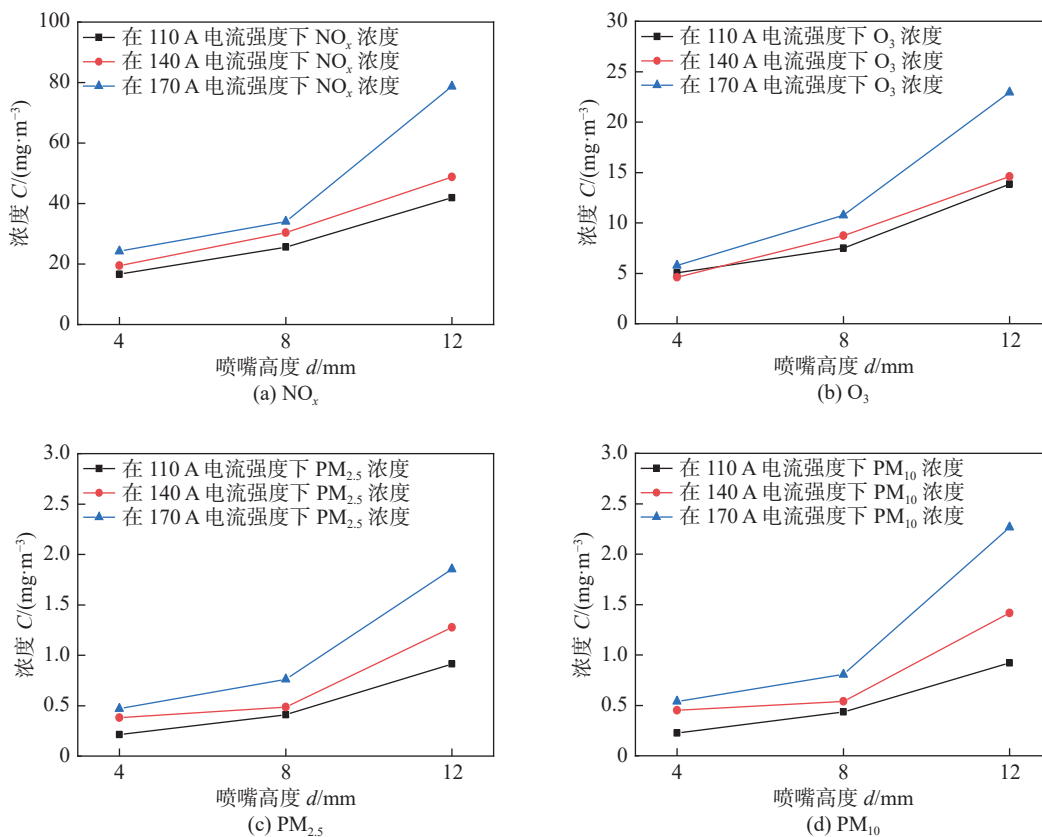
Fig. 6 Effect of welding current on emission. (a) NO_x; (b) O₃; (c) PM_{2.5}; (d) PM₁₀

图 7 喷嘴高度对排放的影响

Fig. 7 Effect of nozzle height on emissions. (a) NO_x; (b) O₃; (c) PM_{2.5}; (d) PM₁₀

4 结论

(1) RBF-BP 组合神经网络分析表明对焊接环境负荷的产生量预测平均误差 6.63%。其中, 气体预测结果平均误差为 4.67%, 颗粒物预测结果平均误差为 8.60%。采用组合模型预测 GTAW 的焊接环境负荷排放数据, 可为减少焊接工艺环境负荷排放量提供指导。

(2) 对所建立的 BP 神经网络模型、RBF 神经网络模型、RBF-BP 复合神经网络模型进行性能对比分析。RBF-BPNN 具有最小的 MSE(0.002 03)、和最大的 R^2 (0.830 91), 理论上该模型的性能最好, 与试验结果相符合。

(3) 焊接排放最为显著的影响因素为焊接电流、喷嘴高度、焊接时间且与焊接环境负荷排放是呈正相关趋势; 而焊接速度、保护气体流速、坡口类型这 3 个因素对焊接环境负荷排放的影响不显著。

参考文献

- [1] 中国产业信息网数据中心. 2020-2026 年中国焊接材料行业市场营销战略及未来发展潜力报告 [EB/OL]. <https://www.chyxx.com/research/202006/877599.html>. 2020.
Data Center of China Industrial Information Network. Report on marketing strategy and future development potential of China welding materials industry (2020-2026) [EB/OL]. <https://www.chyxx.com/research/202006/877599.html>. 2020.
- [2] Aravind S, Das A D. An examination on GTAW samples of 7-series aluminium alloy using response surface methodology[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 614 – 620.
- [3] Vinothkumar H, Balakrishnan M, Gulanthaivel K, *et al.* Investigation on effects of flux assisted GTAW welding process on mechanical, metallurgical characteristics of dissimilar metals SS 304 and SS 316 L[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 33: 3191 – 3196.
- [4] 郭泉, 徐锴, 吕晓春, 等. 钨极氩弧焊热输入与面积稀释率关系的探讨 [J]. 压力容器, 2021, 38(6): 10 – 14.
GUO Xiao, XU Kai, Lü Xiaochun, *et al.* Investigation on relations between heat input and dilution ratio for GTAW[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(6): 10 – 14.
- [5] D'oliveira A, Paredes R S C, Santos R L C. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(2): 167 – 174.
- [6] 吴仲伟, 夏金兵, 时惜今. 等离子体焊接除尘装置设计与数值模拟 [J]. 中国机械工程, 2020, 30(23): 2862 – 2869.
- [7] Wu Zhongwei, Xia Jinbing, Shi Xijin. Design and numerical simulation of plasma welding fume removal devices[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 30(23): 2862 – 2869.
- [7] 黎雪花, 吴春霞, 胡毅, 等. 三种焊接作业职业危害因素对比分析 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2022, 40(4): 288 – 291.
- Li Xuehua, Wu Chunxia, Hu Yi, *et al.* Comparative analysis on occupational hazards of three welding operations[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2022, 40(4): 288 – 291.
- [8] 闪顺章, 王从陆. 焊接烟尘扩散数学模型研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(6): 177 – 181.
- Shan Shunzhang, Wang Conglu. Study on numerical model for diffusion of welding fume[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(6): 177 – 181.
- [9] 张恒铭, 石玟, 李春凯, 等. 工艺参数对自保护药芯焊丝焊接烟尘的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(11): 31 – 37.
- ZHANG Hengming, SHI Yu, LI Chunkai, *et al.* Effect of process parameters on welding fume of selfshielded flux cored wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(11): 31 – 37.
- [10] 鲍升凯, 卜智翔, 王若玺, 等. 焊接材料对形成焊接烟尘影响的研究进展 [J]. 焊接, 2018(10): 20 – 25.
- Bao Shengkai, Bu Zhixiang, Wang Ruoxi, *et al.* Research progress on influence of welding consumables on formation of welding fume[J]. Welding & Joining, 2018(10): 20 – 25.
- [11] 张艳君. 焊接烟尘的治理措施分析 [J]. 环境科学与管理, 2007(4): 105 – 107.
- Zhang Yanjun. Manage measures analysis of welding dust[J]. Environment Science and Management, 2007(4): 105 – 107.
- [12] Amza G, Cicic D T, Rontescu C, *et al.* Theoretical and experimental research on the environmental impact of certain welding processes[C]// Proceedings of the 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy & environment, 2009.
- [13] Pires I, Quintino L, Amaral V, *et al.* Reduction of fume and gas emissions using innovative gas metal arc welding variants[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(5): 557 – 567.
- [14] Guha N, Loomis D, Guyton K Z, *et al.* Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide[J]. The Lancet Oncology, 2017, 18(5): 581 – 582.
- [15] 卜智翔, 鲍升凯, 王立世, 等. 熔化极气体保护焊发尘率研究进展 [J]. 焊接, 2016(7): 17 – 21.
- Bu Zhixiang, Bao Shengkai, Wang Lishi, *et al.* A review of fume formation rate in gas metal arc welding[J]. Welding & Joining, 2016(7): 17 – 21.
- [16] Ioffe I, Maclean D, Perelman N, *et al.* Fume formation rate at globular to spray mode transition during welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(12): 2473 – 2477.

- [17] Dennis J H, Hewitt P J, Redding C, *et al.* A model for prediction of fume formation rate in gas metal arc welding (GMAW), globular and spray modes, DC electrode positive[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2001, 45(2): 105 – 113.
- [18] Deam R T, Simpson S W, Haidar J. A semi-empirical model of the fume formation from gas metal arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(11): 1393 – 1402.
- [19] 卜智翔, 鲍升凯, 王立世, 等. 基于熔滴过渡模型的 GMAW 焊接发尘率计算 [J]. 焊接学报, 2018, 39(2): 97 – 100.
- Bu Zhixiang, Bao Shengkai, Wang Lishi, *et al.* Calculation of fume formation rate in GMAW process based on metal transfer model[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(2): 97 – 100.
- [20] Vimal K E K, Vinodh S, Raja A. Optimization of process parameters of SMAW process using NN-FGRA from the sustainability view point[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(6): 1459 – 1480.
- [21] Wang B, Lin R, Liu D, *et al.* Investigation of the effect of humidity at both electrode on the performance of PEMFC using orthogonal test method[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(26): 13737 – 13743.
- [22] 王万良, 张兆娟, 高楠, 等. 基于人工智能技术的大数据分析方法研究进展 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 5 – 23.
- Wang Wanliang, Zhang Zhaojuan, Gao Nan, *et al.* Progress of big data analytics methods based on artificial intelligence technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(3): 5 – 23.
- [23] 唐正魁, 董俊慧, 张永志, 等. 混合聚类 RBF 神经网络焊接接头力学性能预测 [J]. 焊接学报, 2014, 35(12): 105 – 108.
- Tang Zhengkui, Dong Junhui, Zhang Yongzhi, *et al.* Prediction of mechanical properties of welding joints by hybrid cluster fuzzy rbf neural network[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12): 105 – 108.
- [24] Tomaz I V, Colaço F H G, Sarfraz S, *et al.* Investigations on quality characteristics in gas tungsten arc welding process using artificial neural network integrated with genetic algorithm[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(11): 3569 – 3583.
- [25] 朱师琦. GMAW 焊接烟尘形成速率的工艺因素影响及预测研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- Zhu Shiqi. Studies on technological factors impact and prediction of fume emission rate in gas metal arc welding[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020.

第一作者: 蒋伟琪, 硕士; 主要研究方向为绿色设计制造.
Email: 15215512344@163.com.

通信作者: 黄海鸿, 博士, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为绿色制造、再制造与回收再资源化; Email: huanghaihong@hfut.edu.cn.

(编辑: 张基隆)

of robot end welding gun was adjusted to improve the surface performance of PDC bit after repair. The feasibility of the proposed method is verified, which provides a reference for laser cladding remanufacturing technology to repair complex surfaces.

Highlights: (1) The method of data extraction and reverse modeling of complex curved surface of workpiece is put forward. The PDC bit defect is obtained by Boolean operation, and the path planning of curved workpiece is completed by using the intersection of equidistant plane family Γ and bit repair part.

(2) The kinematics model of 6-DOF robot is established, and the attitude matrix of multi-layer trajectory cladding welding gun is determined.

(3) By simulating the process of repairing PDC bit by laser cladding of robot, the posture of welding gun at the end of robot is adjusted, and the machining trajectory of robot is optimized.

Key words: PDC bit; robot; laser cladding remanufacturing; welding torch pose

Prediction for emission of environmental burden in GTAW based on combined neural network

JIANG Weiqi^{1,2}, HUANG Haihong^{1,2}, LIU Yun^{1,2}, LI Lei^{1,2}, LIU Zhifeng^{1,2}

(1. Hefei University of Technology, Key Laboratory of Green Design and Manufacturing of Mechanical Industry, Hefei, 230009; 2. Hefei University of Technology, Hefei 230009). pp 77-85

Abstract: The model is established for quantitative predicting the generation of environmental burdens in welding. The key factors for influencing the emissions in GTAW are determined using Taguchi method, including welding current, nozzle height, and welding time. Moreover, the emission model based on RBF-BP neural network was established. It can be predicting the emissions of environmental burden in GTAW when different welding parameters are adapted. The results show that the average error is 6.63% for predicting emissions of environmental burden using RBF-BP combination neural network model. The welding current, nozzle height and welding time are positively correlated with the generation of environmental

burdens. That can provide support for reducing the emission of welding environmental burden and formulating reasonable welding process route.

Highlights: A neural network model was established to predict GTAW environmental load emission under key welding parameters.

Key words: GTAW; welding emissions; orthogonal test; neural network; prediction model

Damage evolution model and numerical simulation of X70 pipeline steel of in-service welding

GU Shiwei¹, XU Liang¹, YANG Haifeng¹, ZHANG Hongjie², HAN Tao²(1. HWI-NICHST Welding & Engineering Innovation Center (Qingdao) Co., LTD, Qingdao, 266111; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, 266580). pp 86-92,100

Abstract: In this paper, X70 pipeline steel was taken as the research object. High temperature tensile tests were carried out at different temperatures and strain rates. Damage model parameters such as the threshold strain, critical damage strain and critical damage were obtained, and damage evolution equations based on BONARO model was established. The damage evolution process of in-service welding was simulated and compared with the experimental results of in-service welding. The influence rules of medium pressure and wall thickness on the damage evolution behavior of in-service welding were studied. It was found that: during the in-service welding process, molten pool below the maximum damage value of the inner wall is located in the largest fusion deep behind the 1 mm to 2 mm area, damage value in thickness direction decreases from the fusion line to the inner wall; decreasing inner medium pressure and increasing the wall thickness can reduce the damage at the bottom of molten pool, thus reduce the risk of burn through.

Highlights: (1) The damage evolution model of X70 pipeline steel at high temperature was established.

(2) The BONARO damage model was applied to the numerical simulation of in-service welding, the burn-through behavior of in-service welding was studied by damage.

Key words: in-service welding; burn through; damage