

# 基于 Elman 网络算法的 Inconel625 合金堆焊稀释率的控制

何 帅<sup>1,2</sup>, 王立君<sup>1,2</sup>, 葛可可<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学 材料科学与工程学院 天津 300072; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 文中建立了 5-8-3 结构的反馈 Elman 神经网络模型, 以电弧长度、焊接电流、焊接速度、送丝速度和保护气流量为输入量, 堆焊焊缝的熔宽、熔高和稀释率为输出量进行堆焊仿真计算分析. 计算结果表明, Elman 模型的预测结果比 BP 和 GRNN 神经网络更精确. 建立了以电弧长度( $X$ )、堆焊电流( $Y$ )和送丝速度( $Z$ )为空间坐标, 堆焊稀释率  $\delta$  等于  $f(X, Y, Z)$  为目标函数的四维图像来确定  $\delta \leq 5\%$  的堆焊工艺窗口. 分别进行 Elman 模型仿真计算和堆焊工艺试验, 得到的稀释率  $\delta$  分别为 2.55% 和 3.32%, 仿真计算的稀释率的相对误差约 0.8%, 证实了 Elman 模型预测的 Inconel625 合金堆焊工艺窗口的可行性与可靠性.

**关键词:** Elman 网络; Inconel625 镍合金; 堆焊; 稀释率

**中图分类号:** TG 455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)11-0124-05

## 0 序 言

高含硫油气介质会对油气管道产生相当严重的腐蚀, 通常的耐蚀方法是在管道内表面堆焊一层或多层镍基合金, 例如在 X65 钢表面堆焊 Inconel625 镍基合金. 为了使堆焊的 Inconel625 保持良好的耐点蚀和耐应力腐蚀能力, 需要严格控制 Inconel625 合金堆焊层的稀释率<sup>[1]</sup>.

镍基合金堆焊是一个多变量耦合的复杂过程, 仅依靠有限的工艺经验与反复试验不能获得清晰的堆焊工艺窗口. 而基于有限的工艺试验, 采用有效的数学建模算法可以预测出适宜的工艺窗口, 例如彭金宁等人<sup>[2]</sup>采用 BP(back propagation)神经网络进行焊接工艺参数设计. 为了有效控制 Inconel625 合金的堆焊稀释率, 文中采用反馈神经网络 Elman 进行堆焊工艺分析, 并通过与不同神经网络模型对比来验证本算法的优越性, 最后以稀释率函数  $\delta = f$  (电弧长度, 焊接电流, 送丝速度)  $\leq 5\%$  为目标, 用 Elman 模型的仿真结果建立了堆焊工艺参数 ~ 稀释率的四维函数图像, 得出了满足工程要求 ( $\delta \leq 5\%$ ) 的工艺窗口. 在该窗口内, 仿真预测的稀释率为 2.55%, 与堆焊实测结果 (3.32%) 的相对误差约 0.8%, 达到了控制 Inconel625 合金堆焊稀释率的要求.

## 1 Elman 神经网络

Elman 神经网络是 J. L. Elman 于 1990 年针对语音处理问题提出的具有局部记忆单元和反馈连接的前向神经网络, 结构如图 1 所示. 与 BP 网络不同的是, 它有一个特别的承接层从隐含层接受反馈信号, 承接层的作用相当于状态反馈.

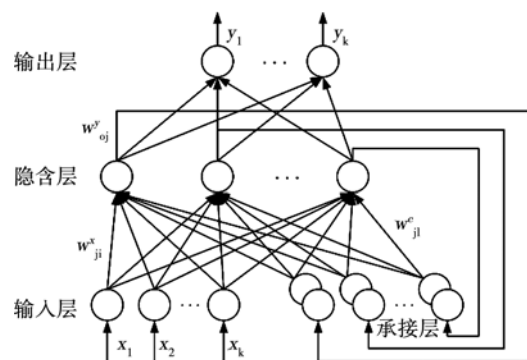


图 1 Elman 神经网络的结构

Fig. 1 Structure of Elman neural network

Elman 神经网络的学习采用 BP 算法, 判断算法是否结束的误差函数为

$$E = \sum_{k=1}^n [y(k) - d(k)]^2 \quad (1)$$

式中:  $y(k)$  为网络实际输出;  $d(k)$  为期望输出;  $k$  为输出层因子的个数.

## 2 Inconel625 的堆焊试验与模型预测

### 2.1 Inconel625 堆焊试验

采用 Dynasty<sup>®</sup> 700 直流焊机进行 TIG 堆焊试验,钨极直径为 3 mm,基板为 11.4 mm 厚的 X65 钢板,Inconel625 焊丝直径为 1.2 mm,保护气为工业纯氩气. 以堆焊稀释率  $\delta$  作为评价堆焊质量的表征量,其定义为<sup>[3]</sup>

$$\delta = \frac{V}{U + V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $U$  和  $V$  分别代表以基板表面为分界,堆焊焊缝上半部和下半部的面积(图 2). 图 2 中, $H$  和  $B$  分别代表堆焊焊缝的熔高和熔宽.

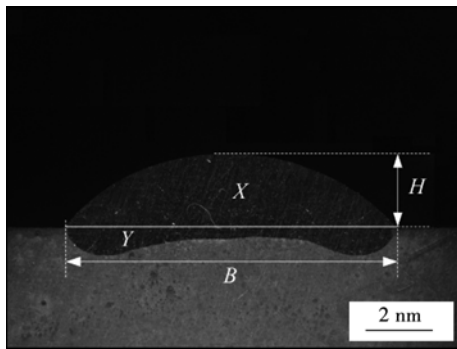


图 2 Inconel625 堆焊焊缝的宏观金相图

Fig. 2 Macro metallographic of surfacing weld

影响 Inconel625 合金堆焊质量的因素很多. 基于大量工艺试验,在保证堆焊工艺过程稳定的前提下,确定电弧长度、焊接电流、焊接速度、送丝速度和保护气流量五个参数为工艺输入量,堆焊焊缝的稀释率  $\delta$ 、熔高  $H$  和熔宽  $B$  作为目标输出量,选用五因

子四水平的 L16 正交表设计堆焊试验,试验工艺方案及其堆焊焊缝的实测数据如表 1 所示.

由表 1 可见,对于拟定的堆焊工艺方案,稀释率  $\delta$  在 5.36% ~ 42.14% 之间变化,其中只有试验编号为 9 的堆焊工艺对应的  $\delta$  较为接近工程的实际要求  $\delta \leq 5\%$ . 为了实现堆焊稀释率控制目标,需要以表 1 中编号为 1 ~ 16 的试验数据为基础,进行以稀释率  $\delta$  为控制目标的 Elman 神经网络模型分析和预测.

### 2.2 Elman 神经网络模型参数

用 MATLAB R2014a 神经网络工具箱建立 Elman 神经网络模型,以 Bayes 规范化算法 trainbr 函数为训练函数,隐藏层和输出层的传输函数分别选择 tansig 和 purelin,训练误差设置为 0,由 tic 和 toc 函数对 Elman 算法进行计时. 该网络输入层(堆焊工艺)有 5 个神经元,输出层(堆焊焊缝数据)有 3 个神经元. 对中间层网络结构进行 10 次试算,以网络预测误差最小为原则确定中间层神经元的数目,得出数目为 8 时,预测误差最小.

### 2.3 Elman 模型预测的结果验证

为了验证该 Elman 模型预测堆焊焊缝数据的准确性,另外进行四组堆焊工艺试验,并将实测数据与仿真计算的结果进行比对,仿真预测结果与实测结果的比较见表 2.

为了考核模型的相对仿真误差,分别用前馈 BP 模型和 GRNN (general regression neural network) 模型也对表 1 和表 2 的方案进行仿真,得出三种算法的相对误差  $|\varepsilon|$ ,由表 3 可见,BP 算法在样本数据范围变化较小时计算精度较高,如对焊缝熔宽和熔高的仿真计算. GRNN 算法的预测误差较大,不适合求解高精度问题. 比较而言,Elman 算法的预测精度是最高的.

表 1 正交试验方案和堆焊试验结果

Table 1 Orthogonal experimental scheme and surfacing results

试验编号	焊接工艺方案					堆焊焊缝数据		
	电弧长度 $L/\text{mm}$	焊接电流 $I/\text{A}$	焊接速度 $v_H/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_K/(\text{cm} \cdot \text{min}^{-1})$	保护气流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	熔宽 $B/\text{mm}$	熔高 $H/\text{mm}$	稀释率 $\delta(\%)$
1	3.8	190	9	60	14.0	9.973	2.413	23.07
2	3.8	205	11	70	15.0	9.708	2.333	17.58
3	3.8	230	13	80	16.0	9.360	2.280	22.44
4	3.8	255	15	90	17.0	10.216	2.094	27.48
5	4.9	190	11	80	17.0	8.568	2.793	12.25
6	4.9	205	9	90	16.0	10.192	3.267	14.80
7	4.9	230	15	60	15.0	8.667	1.720	32.60
8	4.9	255	13	70	14.0	10.339	1.901	40.59
9	6.0	190	13	90	15.0	6.961	3.127	5.36
10	6.0	205	15	80	14.0	7.361	2.440	12.08
11	6.0	230	9	70	17.0	11.149	2.549	20.94
12	6.0	255	11	60	16.0	11.225	1.960	42.14
13	7.1	190	15	70	16.0	5.563	2.500	6.54
14	7.1	205	13	60	17.0	7.391	2.123	12.98
15	7.1	230	11	90	14.0	9.629	2.733	14.56
16	7.1	255	9	80	15.0	12.193	2.423	30.65

表 2 堆焊焊缝实测数据与 Elman 模型仿真结果的比较

Table 2 Comparison between simulation prediction results and measured results

试验编号	堆焊工艺方案					堆焊焊缝数据对比					
	电弧长度	焊接电流	焊接速度	送丝速度	保护气流量	熔宽 $B/\text{mm}$		熔高 $H/\text{mm}$		稀释率 $\delta(\%)$	
	$L/\text{mm}$	$I/\text{A}$	$v_h/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_k/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$	$Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	实测	仿真	实测	仿真	实测	仿真
17	4.0	195	10.2	66	14.5	9.766	9.689	2.254	2.387	17.55	17.21
18	5.0	210	11.4	74	15.3	9.067	9.263	2.487	2.515	14.21	14.92
19	6.0	232	12.6	82	16.2	9.643	9.455	2.419	2.509	20.06	19.95
20	7.0	245	13.8	90	17.0	9.146	9.133	2.260	2.499	22.40	22.60

表 3 三种仿真算法预测数据的相对误差

Table 3 Relative error of three kinds of simulation algorithm

试验编号	熔宽的相对误差 $ \varepsilon_B /\text{mm}$			熔高的相对误差 $ \varepsilon_H /\text{mm}$			稀释率的相对误差 $ \varepsilon_\delta (\%)$		
	BP	GRNN	Elman	BP	GRNN	Elman	BP	GRNN	Elman
17	0.120	0.127	0.077	0.153	0.165	0.133	1.75	0.94	0.34
18	0.205	0.530	0.196	0.035	0.210	0.028	1.95	0.80	0.71
19	0.528	0.930	0.188	0.185	0.352	0.090	1.42	1.20	0.11
20	0.083	0.185	0.013	0.416	0.224	0.239	3.54	1.82	0.20
平均误差	0.234	0.443	0.119	0.197	0.238	0.123	2.17	1.19	0.34

### 3 堆焊工艺分析

为了最有效发挥 Inconel625 合金堆焊层的耐腐蚀性能,在满足工程要求  $\delta \leq 5\%$  的前提下,希望  $\delta$  尽可能低,同时堆焊焊道要具有良好的形状<sup>[4]</sup>. 基于表 1 的堆焊试验数据,通过 Elman 神经网络模型计算稀释率  $\delta$ ,然后分析各堆焊工艺参数对  $\delta$  的影响规律,可达到优化其堆焊层性能参数的目的.

#### 3.1 弧长的影响

将电弧长度作为单一变量,从 3.8 mm 依次增大到 7.1 mm,用 Elman 模型计算四组工艺参数组合的堆焊稀释率,结果如图 3 所示,其中每组工艺条件下的第一个数据可与表 1 的试验数据比对,验证算法的准确性.

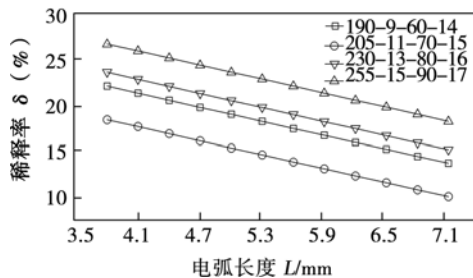


图 3 电弧长度变化对稀释率的影响

Fig. 3 Influence of arc length for dilution rate

由图 3 的计算可知,电弧长度增加可使堆焊稀释率降低. 但即使弧长增至 7.1 mm 时,图 3 中的最小稀释率为 10.09%,仍达不到工程规范的质量要求( $\delta \leq 5\%$ ). 电弧长度可增加的上限是保证堆焊合金层受到良好保护,不会被氧化.

#### 3.2 堆焊速度和保护气流量的影响

将堆焊速度和保护气流量分别作为单一变量计算堆焊稀释率的变化,由图 4 可知,在表 1 的工艺参数范围内,堆焊速度变化引起的稀释率波动未超过 2%,可见其影响很小. 基于提高堆焊效率的考虑,可采用表 1 中的最大焊接速度 15 cm/min 进行堆焊.

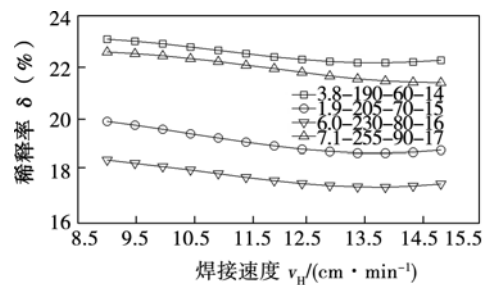


图 4 堆焊速度对稀释率的影响

Fig. 4 Influence of welding speed for dilution rate

图 5 的计算显示,保护气体流量的变化基本不影响稀释率. 镍基合金堆焊的保护气为纯 Ar<sup>[5]</sup>,价

格比较昂贵,在为堆焊过程提供稳定保护的前提下,保护气流量可取表 1 中的较大值 16.0 L/min.

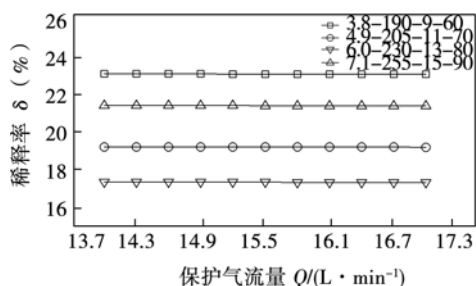


图 5 保护气流量对稀释率的影响

Fig. 5 Influence of shielding gas flow for dilution rate

### 3.3 堆焊电流和送丝速度的影响

综合图 3 ~ 图 5 的仿真分析结果可知,在弧长为 7.1 mm、焊接速度为 15 cm/min、保护气流量为 16.0 L/min 的条件下,分析堆焊电流和送丝速度对稀释率的影响是合理的. 当送丝速度一定时,稀释率随着堆焊电流的增大而增加(图 6).

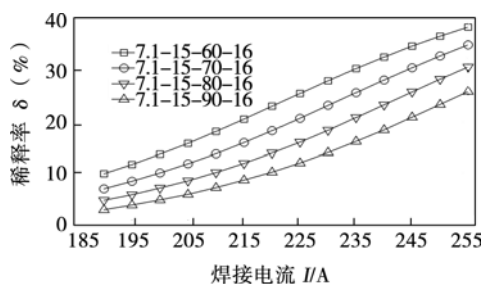


图 6 堆焊电流和送丝速度对稀释率的影响

Fig. 6 Influence of welding current and wire feeding speed for dilution rate

当堆焊电流一定时,稀释率随送丝速度的增加而下降. 因此,在保证送丝稳定的前提下,应尽可能选择较小的电流进行堆焊,以求能得到低的稀释率及“窄高型”的堆焊焊缝.

### 3.4 堆焊工艺的优化与验证

表 1 中堆焊试验(试验编号 9)得到的最小稀释率为 5.63%,还未达到  $\delta \leq 5\%$  的工程要求,为此要根据 Elman 模型分析的工艺参数影响规律,来预测出满足这一工程要求的堆焊工艺窗口.

基于图 3 ~ 图 6 的仿真分析,在焊接速度为 15 cm/min,保护气流量为 16.0 L/min 的情况下,以电弧长度( $X$ )、焊接电流( $Y$ )和送丝速度( $Z$ )为坐标的三维工艺空间内,以稀释率  $\delta = f(X, Y, Z)$  作图来确定满足工程要求的 Inconel625 合金堆焊工艺窗口,

如图 7 所示,当电弧长度、焊接电流和送丝速度范围分别为 6.4 ~ 7.1 mm、190 ~ 203 A 和 80 ~ 90 cm/min 时,不论这三个参数如何匹配,均可满足  $\delta \leq 5\%$  的工程要求.

为了验证图 7 预测出的工艺窗口的正确性,以电弧长度 7 mm、送丝速度 90 cm/min 和堆焊电流 190 A 进行仿真计算,计算的堆焊焊缝熔宽为 5.852 mm,熔高为 3.0 mm,稀释率为 2.55%. 再以该组工艺参数进行实际堆焊试验,得到的堆焊焊缝宏观金相照片如图 8 所示. 图 8 中堆焊焊缝的实测数据为熔宽 6.134 mm,熔高 2.996 mm,稀释率 3.32%. 与实际堆焊焊缝数据相比,仿真预测的堆焊稀释率相对误差约 0.8%,熔高相对误差 0.13%,由此证实了 Elman 数学建模方法及图 7 预测的 Inconel625 合金堆焊工艺窗口的可行性和可靠性.

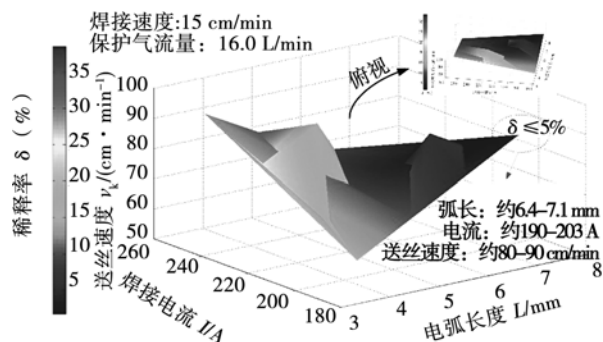


图 7 稀释率随堆焊工艺参数变化的四维图

Fig. 7 Four-dimensional diagram of dilution rate with change of welding process parameters

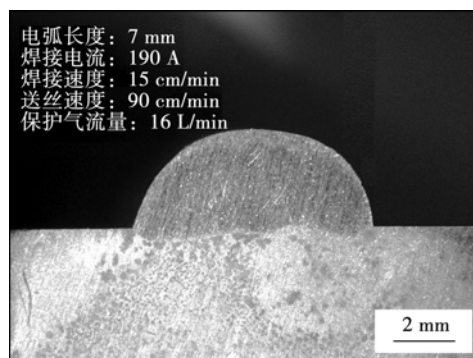


图 8 预测参数堆焊的 Inconel625 合金焊缝的宏观照片

Fig. 8 Macro photo of Inconel625 alloy weld with prediction parameters

## 4 结 论

(1) 相比于 BP 和 GRNN 神经网络,Elman 网络模型算法对堆焊焊缝数据的仿真误差更小,计算结

果更接近实测数据。

(2) Elman 模型分析计算表明,堆焊速度和保护气流量的变化对 Inconel625 合金稀释率的影响很小,文中分别取定值 15 cm/min 和 16.0 L/min,以稀释率  $\delta = f(\text{电弧长度,焊接电流,送丝速度}) \leq 5\%$  为目标,建立起堆焊工艺参数~稀释率的四维函数图,预测出满足工程要求  $\delta \leq 5\%$  的堆焊工艺窗口。

(3) 在 Elman 模型预测的堆焊工艺窗口内,分别进行仿真计算和堆焊试验,得到的稀释率  $\delta$  相对误差约 0.8%,证实了该 Elman 神经网络模型分析 Inconel625 合金堆焊工艺的可行性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 徐玉强,徐晓明,许可望,等. TIP TIG 焊接技术在双金属复合管海底管道铺设中的应用[J]. 焊接与切割, 2013(6): 18-19.
- Xu Yuqiang, Xu Xiaoming, Xu Kewang, et al. TIP TIG welding technology in the application of the double metal composite tube submarine pipeline laying[J]. Welding and Cutting, 2013(6): 18-19.
- [2] 彭金宁,陈丙森,朱平. 焊接工艺参数的神经网络智能设计[J]. 焊接学报, 1998, 19(1): 19-24.
- Peng Jinning, Chen Bingsen, Zhu Ping. Neural network intelligent design of welding process parameters[J]. Journal of Welding, 1998, 19(1): 19-24.
- [3] Madadi F, Ashrafizadeh F, Shamanian M. Optimization of pulsed TIG cladding process of satellite alloy on carbon steel using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71-77.
- [4] Nouri M, Abdollah A, Malek F. J. Effect of welding parameters on dilution and weld bead geometry in cladding[J]. Mater. Sci. Technol, 2007, 23(6): 817-822.
- [5] Chun-Ming Lin. Relationships between microstructures and properties of buffer layer with Inconel 52M clad on AISI 316L stainless steel by GTAW processing[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 228(15): 234-241.

**作者简介:** 何帅,男,1989 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为焊接过程中数值仿真与智能控制的研究. 发表论文 4 篇. Email: heshuai0125@tju.edu.cn

**通讯作者:** 王立君,男,教授,博士研究生导师. Email: wanglijun@tju.edu.cn

## 书 讯



书号: 978-7-111-53831-8  
作者: 史耀武 主编  
定价: 139.00 元

### ◇卓越焊接工程师

### ◇案头必备工具书

## 《焊接制造工程基础》

本书是机械工业出版社组织编写的卓越工程师教育系列丛书之一。本书以焊接制造工程为导向,以卓越焊接工程师的职业需求为目标。书中收集了大量典型工程案例,全面反映了企业从焊接工程招投标到焊接结构制造工程全过程所需的材料、工艺、装备、信息化及技术管理的资料和方法,推动基于问题和基于项目的学习方法,提高学生的焊接工程概念和意识,培养分析和解决焊接制造工程实际问题的能力,为指导学生迅速适应企业的生产技术管理、技术创新和开发工作提供路径。本书是未来焊接工程师在校学习理论和进入企业工作的桥梁,本书也是企业培养卓越焊接工程师的指导教师及企业焊接工程技术人员的必备参考工具书。