

文章编号: 0258-7025(2008)10-1632-05

基于人工神经网络的铝合金激光熔覆层 特征与性能的预测

黄安国 李 刚 汪永阳 李 磊 李志远

(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 基于人工神经网络(ANN)技术,采用 MATLAB 作为开发平台,建立了激光熔覆参数与熔覆层特征及性能之间的关系模型。模型以激光功率、扫描速度、光斑直径、涂层成分配比作为输入参数,以熔覆层硬度、熔覆层宽度和高度作为输出参数,对熔覆层的特征与性能进行了预测。结果表明,该模型的平均误差较小,网络训练后检验精度较高,具有较好的预测能力。该模型能够用于预测铝合金表面激光熔覆层的特征与性能。

关键词 激光技术;激光熔覆;铝合金;人工神经网络;熔覆层

中图分类号 TG 156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1632

Prediction of Characteristic and Performance of Laser Cladding for Al Alloy Based on Artificial Neural Network

Huang Anguo Li Gang Wang Yongyang Li Lei Li Zhiyuan

(Department of Materials Science & Engineering,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on the artificial neural network (ANN), a model is established to describe the laser cladding parameters and the characteristic and performance of laser cladding layers. The characteristic and performance of laser cladding layers are predicted with the model in which the input parameters consist of laser power, scanning velocity, laser spot diameter, and coating proportion and the output parameters include the clad hardness, the clad width, and the clad height. The results show that the mean error is small, and the model has good verifying precision and excellent ability of predicting. The model can basically forecast the characteristic and performance of laser cladding layers.

Key words laser technique; laser cladding; aluminum alloy; artificial neural network; cladding layer

1 引 言

铝合金具有密度小、比强度大、耐腐蚀性和成型性好等一系列优点,在汽车、航天、航空、船舶等制造业中有着广泛的应用^[1]。但是,铝合金也存在诸多问题,如硬度低、耐磨性差,这在很大程度上限制了铝合金的应用。表面改性技术能提高铝合金的表面硬度,改善耐磨性能,扩大其应用范围。激光熔覆作为一种有效的表面改性技术^[2~6],能改善铝合金表面的组织与性能。

铝合金激光熔覆层的特征与性能主要受激光功率、扫描速度、光斑直径等因素的影响。由于激光熔

覆工艺参数的差异,使得材料的熔覆层的特征与性能数据呈现出极大的分散性,材料性能与影响因素之间通常是典型的非线性关系,难以用数学模型予以描述。神经网络不需预先指定函数形式,便能通过学习对强非线性数据进行拟合、建模和预报,在处理复杂的多元非线性问题时显示了良好的性能,在材料科学方面也有着广阔的应用前景^[7]。所以,人们开始借助神经网络技术来建立材料激光熔覆层性能与激光熔覆参数之间的关系模型,从而优化激光熔覆工艺。丁周华等^[8]建立了 Co 基硬质合金激光熔覆工艺优化的 BP 人工神经网络(ANN)模型,成

收稿日期:2007-09-21; 收到修改稿日期:2007-12-03

作者简介:黄安国(1975—),男,宁夏人,讲师,硕士生导师,目前主要从事材料激光加工和焊接的研究。

E-mail: huang-anguo@163.com

功地预测了熔覆工艺参数对其熔覆层显微硬度和气孔数的影响。王大承^[9]使用不同的激光工艺参数对材料进行激光强化处理,将所得材料表面归为 4 种类别,即未相变硬化、相变硬化、表面微熔及表面熔凝,并建立了激光工艺参数与材料表面强化类别之间关系的人工神经网络模型,并运用该模型方便、准确地选择激光工艺参数,控制材料表面强化类别及工作性能。徐大鹏等^[10]设计了基于进化神经网络的学习算法,建立了熔覆层稀释率随工艺参数变化的 BP 神经网络预测模型,并结合基因遗传算法(Genetic Algorithms, GA)的全局搜索能力和 BP 神经网络良好的局部性质,克服了单纯使用 BP 神经网络易陷入局部极小值等问题,进一步提高熔覆成形制件的精度,具有一定的实用价值。Toyserkani 等^[6]利用人工神经网络模型研究了送粉式激光熔覆的熔覆层高度和凝固速率。

近年来,人工神经网络在激光加工领域的研究倍受人们关注。人工神经网络具有强大的自适应、自学习及联想记忆能力等优点,能对复杂的非线性

问题高效、高精度地建立模型。本文采用 BP 人工神经网络方法,建立了激光熔覆的参数与铝合金表面熔覆层特征和性能的模型,来预测铝合金表面激光熔覆层的特征与性能。

2 人工神经网络模型的建立

2.1 网络训练样本的采集

试验中选取的基体材料为 2034 铝合金,试样尺寸为 60 mm×100 mm×2.75 mm,用 100 目粗砂纸对表面打磨去除杂质和氧化膜,并用丙酮清洗。涂层材料为 Al-Y-Ni 合金粉末,涂层厚度约 2 mm,涂敷方式为刷涂。激光熔覆过程中,合金元素的烧损是一个大的问题,为了有效地保护熔池,在激光加工过程中除采用氩气保护外,还选择一定成分的造渣剂和造气剂便于更好地保护激光熔池。

本文主要考虑 6 个可控制的因素:激光功率、扫描速度、光斑直径和铝、钇、镍的含量,而忽略其他不可测量或是变化不受人为控制的影响因素。表 1 为激光熔覆的试验数据。

表 1 激光熔覆试验的样本数据

Table 1 Sample data from the laser cladding test

No.	Laser power /W	Scan velocity /(mm/s)	Laser spot /mm	$w(\text{Al})$	$w(\text{Y})$	$w(\text{Ni})$	Hardness /HV	Clad height /mm	Clad width /mm
1	3000	8	5	0.83	0.10	0.07	105.42	0.91	3.84
2	3300	8	5	0.83	0.10	0.07	91.50	1.41	4.30
3	3500	5	5	0.83	0.10	0.07	95.56	1.51	5.01
4	3800	5	5	0.83	0.10	0.07	96.78	1.60	5.31
5	3800	5	5	0.80	0.10	0.10	97.62	1.54	5.34
6	3800	8	5	0.80	0.10	0.10	106.74	1.34	5.12
7	3800	10	5	0.80	0.10	0.10	97.78	1.26	4.88
8	3800	10	5	0.88	0.12	0.00	75.94	1.45	4.44
9	3800	12	5	0.88	0.12	0.00	73.62	1.44	4.33
10	3800	8	5	0.88	0.12	0.00	77.98	1.47	4.49
11	3800	10	5	0.85	0.15	0.00	96.38	1.15	4.56
12	3800	8	5	0.85	0.15	0.00	98.34	1.28	4.65
13	1600	2	4	0.70	0.20	0.10	99.06	0.87	4.07
14	1600	1.5	4	0.70	0.20	0.10	100.42	0.93	4.11

人工神经网络只能处理表示成熟的输入数据,所以经常需要将所采集的样本数据进行变换或编码。由于训练样本数据中各数据的物理量各不相同,数值差别也很大,为了保证样本数据的可比性,提高预测模型的收敛可靠性及收敛速度,在进行训练之前,必须对所有数据进行归一化处理,即使所有数据经过换算成为 $[0, 1]$ 区间之内的数据。归一化所采用的公式为

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}$$

式中 $x_{i\max}$, $x_{i\min}$ 为数据 x_i 的极大和极小值, x_i^* 为归一化后的值。

为了得到直观的输出结果,同时省去对输出结果的反归一化处理过程,数据处理时只对输入因素进行归一化,由于铝,钇,镍的含量在 $(0, 1)$ 范围内,所以不需归一化处理。

2.2 网络结构与算法的设计

影响铝合金激光熔覆的工艺参数主要包括:激光功率、扫描速度、光斑直径等。改变这些工艺参数以及熔覆材料中铝、钇、镍的含量,以这些样本数据

(激光功率、扫描速度、光斑直径、涂层配比)为基础进行熔覆层性能(熔覆层硬度、熔覆层高度以及熔覆层宽度)预测。

考虑到样本数量的有限性以及问题的复杂程度,选择只含有一个隐层的三层 BP 网络。BP 网络的输入和输出层的神经元数目,是由输入和输出向量的维数确定的。根据所描述的问题,选取激光功率、扫描速度、光斑直径、涂层配比(铝、钇、镍的百分含量)等六个因素,所以网络的输入层的神经元个数为 6。熔覆层的特征与性能主要通过熔覆层硬度、高度、宽度来体现,因此,输出层的神经元个数为 3,输出层神经元传递函数选用 purelin。根据科尔莫戈罗夫(Kolmogorov)定理,设定网络的隐含层神经元个数为 13。按照一般的设计原则,隐含层神经元传递函数为 S 型正切函数 $\text{tansig}^{[11]}$ 。

网络结构确定后,需要利用样本数据通过一定的学习规则进行训练,提高网络的适应能力。学习速率是训练过程的重要因子,它决定每一次循环中的权值变化量。在一般情况下,倾向于选择较小的学习速率保证学习的稳定性,这里取学习速率为 0.05。图 1 为整个网络结构学习过程的流程图。

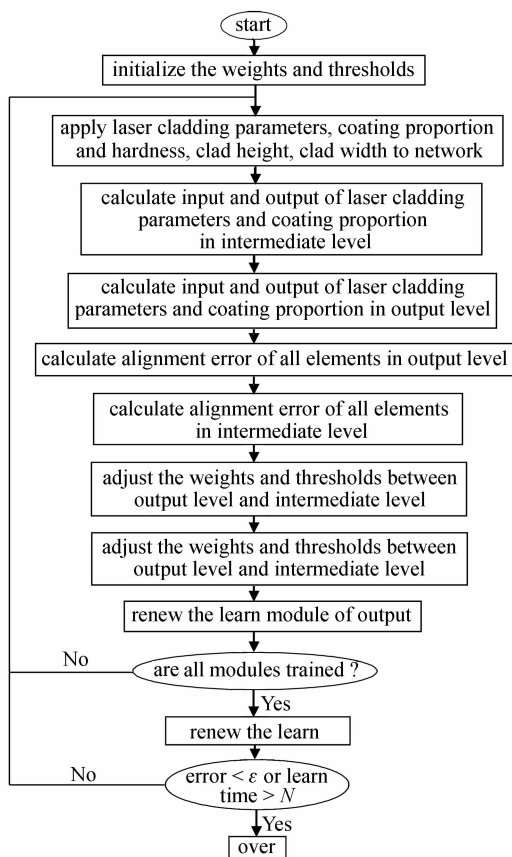


图 1 BP 网络学习过程图

Fig. 1 Chart of network learn process

3 神经网络的训练与检验

3.1 网络训练

神经网络只有经过训练后才能用于熔覆层性能预测的实际应用。训练的参数设定如表 2 所示。

表 2 网络训练的参数设定

Table 2 Parameter setting of network training

Training time /Time	Training goal	Speed of learn
500	0.01	0.1

选取其中的 11 组数据作为训练样本,在 MATLAB 上进行网络的训练。经过 44 次训练后,网络误差达到网络训练目标,其结果如图 2 所示。

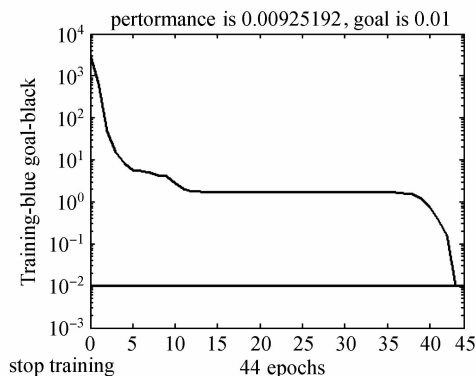


图 2 训练后网络误差示意图

Fig. 2 Schematic drawing of network error after training

在网络训练完成后,以训练样本应用 $\text{sim}()$ 函数通过编译程序对模型进行仿真分析,当经过 44 次的学习之后,网络误差精度达到要求(网络误差示意图与图 2 相同)。对训练的样本进行仿真分析,能够对模型的稳定性进行分析,并能为后续的有效验证奠定基础。表 3 为网络输出结果和实验所测数据的对比。从表 3 可以看出,网络输出结果和实验所测数据也基本一致,进一步说明网络的训练效果良好。

3.2 BP 网络预测及效果检验

针对已训练好的网络模型,用余下的未通过网络训练的 3 组样本数据作为检验样本,在 MATLAB 上运行编译的程序,可得到网络的输出结果如表 4 所示。对网络的预测结果进行分析,并绘制了网络的预测相对误差曲线如图 3 所示。从表 4 和图 3 可以看出,熔覆层硬度、高度和宽度与实测值很接近,相对误差的最大值为 12.5%,而它表征熔覆层的硬度网络输出结果与实测结果并没有过大的差异,另外,其他数据的相对误差均较小,表明用 BP 神经网络预测激光熔覆的硬度、高度和宽度是可行的。考虑到样本容量虽然比较小,但误差也较小,

其结果可以接受。

表 3 网络输出结果和实验数据对比

Table 3 Contrast of the network output results with the experimental data

No.	Network output results			Data from experiment			Error		
	Hardness /HV	Height /mm	Width /mm	Hardness /HV	Height /mm	Width /mm	Hardness /HV	Height /mm	Width /mm
1	105.42	0.83	3.90	105.42	0.91	3.84	0.00	0.07	-0.06
2	91.49	1.36	4.63	91.50	1.41	4.30	0.01	0.05	-0.33
3	95.56	1.52	5.17	95.56	1.51	5.01	0.00	-0.01	-0.16
4	96.79	1.51	5.18	96.78	1.60	5.31	-0.01	0.09	0.13
5	97.61	1.57	5.37	97.62	1.54	5.34	0.01	-0.03	-0.03
6	106.73	1.27	4.91	106.74	1.34	5.12	0.01	0.07	0.21
7	97.79	1.32	4.74	97.78	1.26	4.88	0.01	-0.06	0.14
8	75.91	1.42	4.34	75.94	1.45	4.44	0.03	0.03	0.10
9	73.65	1.43	4.29	73.62	1.44	4.33	-0.03	0.01	0.04
11	96.38	1.32	4.72	96.38	1.15	4.56	0.00	-0.17	-0.16
13	99.08	0.95	4.02	99.06	0.87	4.06	-0.02	0.08	0.04

表 4 检验样本数据的网络的预测输出与实验测量结果的比较

Table 4 Contrast of the network output results with the experimental data of the prediction sample

No.	Network output results			Data from experiment			Relative error /%		
	Hardness /HV	Height /mm	Width /mm	Hardness /HV	Height /mm	Width /mm	Hardness	Height	Width
10	79.28	1.45	4.49	77.98	1.47	4.49	1.67	1.36	0.0
12	92.26	1.44	4.89	98.34	1.28	4.65	6.18	12.5	5.16
14	99.58	0.92	3.86	100.42	0.93	4.11	0.84	1.08	6.08

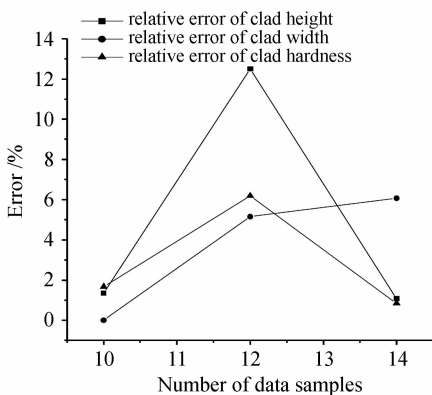


图 3 网络的预测相对误差曲线

Fig. 3 Relative error curve of network forecast

4 结 论

以神经网络为研究方法,建立了 BP 网络预测模型,分析了铝合金表面激光熔覆中工艺参数与熔覆层特征与性能之间的关系。结果表明,将神经网络方法用于预测激光熔覆层的特征与性能,其预测结果和实测结果能较好地吻合,误差值最大为 12.5%,表明 BP 神经网络应用在激光熔覆的特征

与性能的预测上是可行的;通过人工神经网络的预测,可为激光熔覆工艺参数的确定提供参考,还可对已经获得的数据进行分析处理。由于实验样本数据的有限性,要获得一个更优良的神经网络模型需要增加更多的训练样本数量,积累更多的实验数据,并通过更多的样本数量对网络模型进行检验。

参 考 文 献

- Zuo Tiechuan. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
左铁钊. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2002
- Huang Kaijin, Lin Xin, Chen Chi *et al.*. Microstructure and wear behaviour of laser-clad Zr-Cu-Ni-Al/ TiC composites on AZ91D magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 449~554
黄开金,林鑫,陈池等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Zr-Cu-Ni-Al/TiC 复合粉末的组织与磨损[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 449~554
- Liu Hongbin, Wang Cunshan, Gao Yali *et al.*. Laser cladding amorphous composite coating of Cu-Zr-Al on magnesium alloy surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 709~713
刘红宾,王存山,高亚丽等. 镁合金表面激光熔覆 Cu-Zr-Al 非晶复合涂层[J]. 中国激光, 2006, **33**(5): 709~713
- Niu Xin, Chao Mingju, Wang Wenli *et al.*. In situ synthesized

- NbC particulate reinforced Ni-based composite coatings by laser cladding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):987~992
牛 薪, 晁明举, 王文丽等. 原位生成 NbC 颗粒增强镍基激光熔覆层[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):987~992
- 5 Liu Rongxiang, Ji Zesheng. Microscopic morphology and microstructure of phases between dilution zone and clad zone in laser remelting NiCrBSi/ TiN layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9):1292~1296
刘荣祥, 吉泽升. 激光重熔层稀释区与熔覆区界面区域的组织结构[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9):1292~1296
- 6 E. Toyserkani, A. Khajepour, S. Corbin. Laser Cladding [M]. Boca Raton, London, New York, Washington, D. C. : CRC press, 2005
- 7 Li Jingxian, Yan Cheng, Wu Jiqu. Prospect of ANN in materials science and engineering[J]. *China Ceramic Industry*, 2003, **10**(4):36~38
李竟先, 鄢 程, 吴基球. 材料科学与工程中应用 ANN 的前景[J]. *中国陶瓷工业*, 2003, **10**(4):36~38
- 8 Ding Zhouhua, Zheng Qiguang, Tong Xinglin *et al.*. Optimizing of laser cladding parameters of Co-based hard alloy coating based on artificial neural networks [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(3):353~355
丁周华, 郑启光, 童杏林等. 基于神经网络的 Co 基硬质合金激光熔覆工艺优化[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(3):353~355
- 9 Wang Dacheng. Controlling laser surface strengthening artificial neural network [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):317~320
王大承. 神经网络在激光表面强化控制上的应用[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4):317~320
- 10 Xu Dapeng, Zhou Jianzhong, Guo Huafeng. Application for laser cladding forming using evolutionary neural networks [J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(5):303~306
徐大鹏, 周建忠, 郭华锋. 进化神经网络在激光熔覆成形中的应用研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**(5):303~306
- 11 Theory of Neural Network and Realization of MATLAB 7 [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 99~108
神经网络理论与 MATLAB 7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006. 99~108