

应用技术

## BP 神经网络在微弧氧化膜层性能预测和能量参数优化中的应用

赵东山, 牛宗伟, 张宇, 刘洪福, 赵霞, 董海青

(山东理工大学 机械工程学院, 淄博 255049)

**[摘 要]** 评价微弧氧化膜层性能的参数主要有膜层厚度、表面粗糙度和硬度, 影响氧化膜层性能的主要因素有电流密度、脉冲频率和占空比。利用正交实验数据建立了 BP 神经网络, 对微弧氧化膜层性能进行了预测, 对能量参数进行了优化。结果表明: 所拟建的 BP 网络稳定, 网络预测当电流密度为  $10 \text{ A/dm}^2$ 、频率为  $500 \text{ Hz}$ 、占空比为  $15\%$  时, 膜层的厚度、硬度最大, 表面粗糙度最小, 且其值与实验结果吻合。

**[关键词]** 微弧氧化; 正交实验; BP 神经网络; 膜层性能

**[中图分类号]** TG174. 451; TP183

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)03-0073-04

## The Application of BP Neural Network in the MAO Performance Prediction and Energy Parameters Optimization

ZHAO Dong-shan, NIU Zong-wei, ZHANG Yu, LIU Hong-fu, ZHAO Xia, DONG Hai-qing

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**[Abstract]** The parameters evaluating MAO coating performance contain thickness, roughness and hardness of film. The parameters effecting film property contain current density, frequency and duty cycle. Based on the data of orthogonal experiment, the BP neural network was designed to predict the coating performance and optimize the energy parameters. The results show that BP network has good stabilization, the network predicts that current density is  $10 \text{ A/dm}^2$ , frequency is  $500 \text{ Hz}$  and duty cycle is  $15\%$ . The MAO coating has maximum thickness and hardness, minimum roughness, the predictive value is the same as experimental value.

**[Key words]** micro-arc oxidation; orthogonal experiment; BP neural network; coating performance

微弧氧化技术是在普通阳极氧化基础上兴起的一种轻质合金表面改性技术<sup>[1-3]</sup>, 它将普通阳极氧化的电压从法拉第区引入到高压区, 在化学氧化、电化学氧化、等离子体氧化的共同作用下, 于铝及其合金表面原位生长出一层致密的陶瓷膜层, 该膜层具有陶瓷材料所具有的各种优良性能, 大大提高了铝及其合金的应用范围<sup>[4]</sup>。该技术逐渐引起了研究者的关注, 成为了材料科学研究的热点之一。

人工神经网络, 又称神经网络, 是通过模拟生物神经网络对信息进行处理的一种数学模型。BP 神经网络作为人工神经网络中前馈网络的最核心部分, 得到

了广泛的应用。它是一种多层的前馈神经网络, 通过反向传播学习算法进行网络权值的调整, 实现从输入到输出的任意非线性映射<sup>[5-7]</sup>。

微弧氧化过程都是在非线性系统内发生的复杂变化过程, 工艺影响因素多, 且各因素间存在交叉影响, 难以用数学模型进行定量描述。借助人工神经网络进行工艺参数的优化, 可以有效降低问题的复杂程度, 提高模型的准确性和适用性。文中在正交实验数据的基础上, 建立一种 BP 神经网络模型, 该模型通过对有限个实验数据的学习和训练后, 可对陶瓷膜性能进行准确预测, 并对影响膜层性能的工艺参数进行优化。

**[收稿日期]** 2011-12-29; **[修回日期]** 2012-01-05

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目 (51005140); 国家自然科学基金面上项目 (50875195); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2010EQ037); 山东省科技发展计划项目 (2008 GG 10004003); 山东理工大学青年教师发展支持计划经费资助

**[作者简介]** 赵东山 (1988—), 男, 山东济南人, 硕士生, 主攻铝合金的表面处理技术。

**[通信作者]** 牛宗伟 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为特种加工、先进陶瓷材料制备及其成型加工、机电一体化。

## 1 实验及结果

采用日照润兴公司生产的微弧氧化交流脉冲电源,正、负电压可调,正电压为 500~600 V,负电压为 160~200 V。实验材料为 1060 纯铝,其化学成分(以质量分数计)如下:Si 不高于 0.25%,Cu 不高于 0.05%,Mg 不高于 0.03%,Zn 不高于 0.05%,Mn 不高于 0.03%,Ti 不高于 0.03%,V 不高于 0.05%,Fe 不高于 0.350%,余量为 Al。基材试样尺寸为 30 mm×30 mm×3 mm,表面经砂纸打磨至  $Ra=1.5\text{ }\mu\text{m}$  后进行微弧氧化。电解液选用以  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  为主成膜剂的电解液体系,并加入适量的 KOH 溶液,用以调节电解液的 pH 值和提高电解液的导电性。氧化时间为 30 min。

实验中采用  $L_9(3^3)$  正交水平实验,研究电流密度、脉冲频率、占空比对膜层厚度、硬度、表面粗糙度的影响。用北京时代公司生产的 TT260 涂层测厚仪测量膜层厚度,在试样前后表面各选取 5 个点进行测量,取 10 个点的平均值。用北京时代公司生产的手持粗糙度仪测量表面粗糙度,用 HX21 显微硬度计测量膜层硬度。实验的因素水平见表 1,正交实验结果见表 2。

## 2 BP 神经网络的建立

### 2.1 输入输出数据的处理

为了使具有不同物理量和量纲的数据标准化,需对输入数据进行尺度变换。文中将输入数据限制在  $[0,1]$  之间,采用公式(1)进行标准化。

$$\overline{x_i} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

式中: $x_i$  代表输入数据; $x_{\min}$  代表数据变化范围的最小值; $x_{\max}$  代表数据变化范围的最大值。经标准化的水平因素如表 3 所示。

### 2.2 BP 神经网络的结构设计

根据参数的因素个数和优化指标的个数设计网络结构。输入层由三维输入向量  $x$  组成,与电参数因素相对应,三维输出向量  $y$  与三个待优化指标(膜层厚度、表面粗糙度、表面硬度)相对应。有研究证明,一个具有单隐层的前馈型网络可以以任意精度逼近任何连续函数<sup>[5]</sup>。因此,文中为了提高收敛速度,选取一个隐含层网络,隐含层节点数通过试验确定为 6。该 BP 网络结构如图 1 所示。

### 2.3 Matlab 程序仿真

将正交实验数据的前 6 组实验作为训练样本,后

表 1 因素水平

Tab.1 The factors level

水平	电流密度(A)	脉冲频率(B)	占空比(C)
	$/(\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	/Hz	/%
1	5	500	8
2	10	600	12
3	15	700	15

表 2 正交实验结果及极差分析

Tab.2 The orthogonal experiment result and extremum difference analysis

序号	A	B	C	厚度	表面粗糙	硬度
				$/\mu\text{m}$	度 $/\mu\text{m}$	(HV)
1	1	1	1	5.57	0.57	720
2	1	2	2	4.86	0.62	675
3	1	3	3	4.02	0.75	647
4	2	1	2	9.38	1.39	1 175
5	2	2	3	9.13	1.17	1 141
6	2	3	1	8.75	1.29	1 090
7	3	1	3	12.02	1.51	1 350
8	3	2	1	11.75	1.42	1 215
9	3	3	2	10.15	1.37	1 180
厚度 $/\mu\text{m}$	$K_1$	14.45	26.97	26.07		
	$K_2$	27.26	25.74	24.39		
	$K_3$	33.92	22.92	25.17		
	$k_1$	4.81	8.99	8.69		
	$k_2$	9.09	8.58	8.13		
	$k_3$	11.31	7.64	8.39		
	极差 R	6.50	1.35	0.56		
表面 粗糙 度 $/\mu\text{m}$	$K_1$	1.94	3.47	3.28		
	$K_2$	3.85	3.21	3.38		
	$K_3$	4.30	3.41	3.43		
	$k_1$	0.65	1.16	1.09		
	$k_2$	1.28	1.07	1.13		
	$k_3$	1.43	1.14	1.14		
	极差 R	0.78	0.09	0.05		
硬度 (HV)	$K_1$	2 042	3 245	3 025		
	$K_2$	3 406	3 031	3 030		
	$K_3$	3 745	2 917	3 138		
	$k_1$	680.7	1 081.7	1 008.3		
	$k_2$	1 135.3	1 010.3	1 010.0		
	$k_3$	1 248.3	972.3	1 046.0		
	极差 R	567.6	109.4	37.7		

表 3 标准化因素水平表

Tab.3 The standardization factors level

水平	电流密度(A)	脉冲频率(B)	占空比(C)
	$/(\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	/Hz	/%
1	0	0	0
2	0.5	0.5	4/7
3	1	1	1

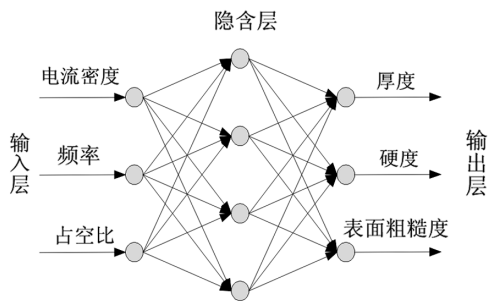


图 1 BP 神经网络结构图

Fig. 1 The structure of BP neural network

3 组为测试样本。选取 trainlm 为测试函数,最大测试次数为 1 000 次,测试精度为 0.01。编写程序后,在 Matlab 中进行仿真。

3 结果与分析

3.1 BP 神经网络的训练误差曲线

BP 神经网络的学习算法决定其训练过程分为正负向传播过程。输入信号通过输入层传播到隐含层的节点上,经隐含层的传递函数计算后,输出到输出层节点上,并计算出实际输出值与期望输出值的差;再将误差信号经原连接回路返回,通过修改各层神经元的权值,逐次向输入层传播并计算。然后又经过正向传播,两个过程反复进行,直到网络的误差信号达到期望值,网络训练结束<sup>[6]</sup>。图 2 所示为 BP 神经网络的训练误差曲线,从中可以看出,训练 45 次即可达到精度要求,说明该网络具有较好的收敛性。

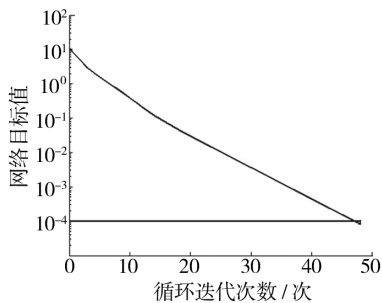


图 2 BP 神经网络的训练误差曲线

Fig. 2 The training error curve of BP neural network

3.2 BP 神经网络预测值与实际值对比分析

将陶瓷膜厚度、表面粗糙度、硬度的实验测得值与 BP 网络预测值进行对比分析,结果见图 3。可以看出,实验值曲线和预测值曲线基本吻合,说明该网络性能稳定,预测精确。图 3 中发现有极个别点差别较大,这是由于 BP 网络是一个全局优化的过程,存在个别偏差较大的点属于正常现象。

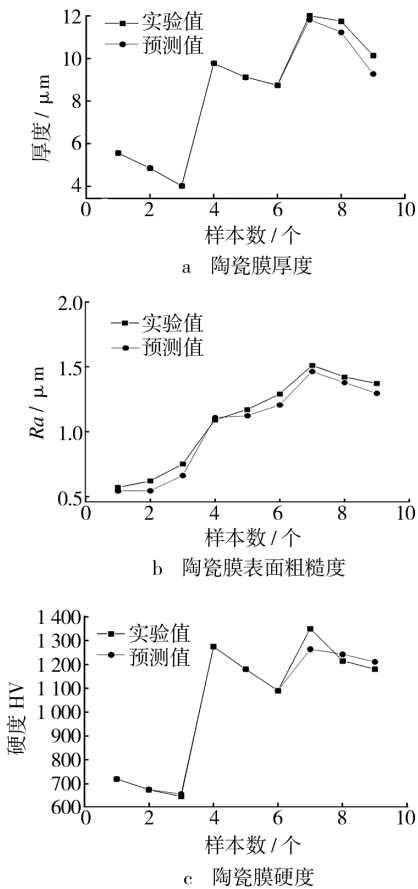


图 3 实验值与预测值对比

Fig. 3 Comparison between experimental value and predictive value

表 4 为预测与实验误差对照表。从表 4 可见,厚度的平均误差为 0.048 7 μm,表面粗糙度平均误差为 0.073 0 μm,硬度平均误差为 0.038 0HV,误差值均在误差允许范围之内。

表 4 预测与实验误差对照表

Tab. 4 The comparison of experimental value and predictive value

厚度/μm			表面粗糙度/μm			硬度(HV)		
实验值	预测值	误差	实验值	预测值	误差	实验值	预测值	误差
12.02	11.823	0.016	1.51	1.362	0.098	1 350	1 264	0.064
11.75	11.232	0.044	1.42	1.337	0.058	1 215	1 243	0.023
...	...	...	...	...	...	...	...	...
10.15	9.280	0.086	1.37	1.295	0.055	1 180	1 211	0.027
平均误差		0.048 7	平均误差		0.070 3	平均误差		0.038

### 3.3 BP 神经网络优化结果分析

实验中固定微弧氧化其它能量参数,改变某一个能量参数,观察该参数对陶瓷膜厚度、表面粗糙度、硬度的影响,当各性能参数达到最优时,该能量参数即为最佳参数。同理改变另一参数,以此类推,最终确定最佳能量参数。

采用以上建立的 BP 神经网络优化微弧氧化能量参数(电流密度、频率、占空比),结果见表 5—7。

表 5 性能参数与电流密度的关系

Tab.5 The relationship between preference parameters and current density

电流密度 /(A·dm <sup>-2</sup> )	脉冲频率/Hz	占空比 /%	厚度 /μm	表面粗糙度/μm	硬度 (HV)
5	500	8	5.569 9	0.570 0	719.99
10	500	8	9.341 6	1.406 1	1 126.01
15	500	8	9.371 0	1.528 2	1 162.49

表 6 性能参数与频率的关系

Tab.6 The relationship between preference parameters and pulse frequency

电流密度 /(A·dm <sup>-2</sup> )	脉冲频率/Hz	占空比 /%	厚度 /μm	表面粗糙度/μm	硬度 (HV)
10	500	8	9.341 6	1.406 1	1 126.01
10	600	8	9.125 0	1.392 7	1 166.02
10	700	8	8.750 0	1.289 9	1 089.97

表 7 性能参数与占空比的关系

Tab.7 The relationship between preference parameters and duty cycle

电流密度 /(A·dm <sup>-2</sup> )	脉冲频率/Hz	占空比 /%	厚度 /μm	表面粗糙度/μm	硬度 (HV)
10	500	8	9.341 6	1.406 1	1 126.01
10	500	12	9.382 4	1.392 1	1 175.32
10	500	15	9.409 0	1.279 2	1 079.74

从表 5 中发现,随着电流密度的增大,膜层的厚度、厚度、表面粗糙度均增大。电流密度为 15 A/dm<sup>2</sup> 时,膜层的厚度、硬度均达到最大,但粗糙度也很大;电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup> 时,膜层的厚度、硬度与 15 A/dm<sup>2</sup> 时的相差不大,但粗糙度明显下降。所以,最佳电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>。

从表 6 中得出,随着电源脉冲频率的增大,膜层的厚度减小,表面粗糙度降低,硬度略有增加后开始下降。综合考虑,最佳频率为 500 Hz。

从表 7 中可以看出,随着占空比的增大,膜层厚度增加,但趋势不明显,硬度、表面粗糙度都降低,降低的趋势较小,说明占空比对陶瓷膜生长动力学影响不大,最佳占空比为 15%。

以上结论都与文献[8]和[9]所述相同。从以上分析中得出:当电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>,频率 500 Hz,占

空比 15%时,膜层最厚,硬度最高,表面粗糙度最小。以该参数为指导进行实验,厚度、硬度和表面粗糙度的实验值分别为 9.42 μm,1.31 μm,1 105.25HV,与预测值基本相同。

### 3.4 正交水平实验优化结果分析

如表 2 所示,通过比较各个指标的极差大小,可以看出膜层厚度、表面粗糙度、硬度的影响因素主次顺序均为 ABC。根据各指标不同水平平均值确定各因素的优化水平组合,得出:厚度为 A3B1C1,表面粗糙度为 A1B2C1,硬度为 A3B1C3。以上三个指标单独分析的优化组合并不一致,因此,根据因素主次顺序综合考虑,最终确定能量参数优化组合为 A3B1C1。以该组合为工艺参数进行微弧氧化实验,厚度、硬度和表面粗糙度的实验值分别为 10.42 μm,1.51 μm,1 185HV。

### 3.5 两种优化方法对比分析

对比 3.3 小节和 3.4 小节的分析结果,可以看出虽然两种方法所得的最优参数并不相同,但是采用这两组优化结果进行试验,所得膜层的性能结果相差较小。但正交实验最优组合中的电流密度很大,显然大大提高了氧化过程中的能量损耗,并且该结果依赖于大量的实验。而采用 BP 神经网络只需对有限个样本进行学习,就可得出最优的能量参数,节约了实验材料,且所得结果的能量损耗更小。

## 4 结论

1) 利用正交水平实验数据建立了 BP 神经网络,该网络性能稳定,收敛速度较快,预测值与实际值误差在允许范围之内。

2) 利用拟建的 BP 网络对微弧氧化电参数进行优化,得出:电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>,频率为 500 Hz,占空比为 15%时,膜层性能达到最优,厚度、表面粗糙度、硬度分别为 9.409 0 μm、1.279 2 μm、1 079.74HV,与实际结果相吻合。

3) BP 神经网络很好地完成了微弧氧化能量参数的优化和性能的预测,网络运行稳定。该网络避免了正交实验中大量的实验次数,这为微弧氧化技术的工业应用提供了理论指导。

### [参 考 文 献]

- [1] MALAYOGLU U, TEKIN K C, MALAYOGLU U, et al. An Investigation into the Mechanical and Tribological Properties of Plasma Electrolytic Oxidation and Hard-anodized Coatings on 6082 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 7451—7460.

(下转第 83 页)

度为 8 g/L 时,乙酸铅点滴时间为 46.22 s;加入三价铈,且其质量浓度为 15 g/L 时,乙酸铅点滴时间为 55.73 s;而当加入四价铈,且其质量浓度为 5.0 g/L 时,乙酸铅点滴时间达到 157.56 s。

3) 所得到的三价铬彩色钝化最佳工艺规范如下:  
 $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  15~25 g/L,  $\text{NaNO}_3$  20~25 g/L,  $\text{ZnCl}_2$  2.0~5.0 g/L, 添加剂 10~15 g/L, pH 值 2.0, 钝化温度 40 ℃, 浸渍时间 180 s。采用该工艺得到的钝化膜呈光亮的彩虹色,膜层均匀,耐蚀性能优良。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴育忠,黄美玲,李伟善,等.不同镀锌工艺三价铬钝化耐腐蚀性研究[J].电镀与涂饰,2009,28(7):39-41.
- [2] 叶金堆.新型三价铬钝化技术[J].电镀与涂饰,2006,25(7):45-48.
- [3] ZHANG X, VAN DEN BOS C, SLOOF W G, et al. Com-

parison of the Morphology and Corrosion Performance of Cr(VI)- and Cr(III)-based Conversion Coatings on Zinc [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 199: 92-104.

- [4] BELLEZZE T, ROVENTI G, FRATESI R. Electrochemical Study on the Corrosion Resistance of Cr III-based Conversion Layers on Zinc Coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 155: 221-230.
- [5] 陈春成.镀锌层三价铬钝化工艺[J].电镀与精饰,2006,28(2):26-29.
- [6] 毕四富,李宁,屠振密,等.镀锌层三价铬黑色钝化工艺与性能研究[J].电镀与涂饰,2007,26(8):17-20.
- [7] 安成强,郝建军,牟世辉.镀锌层三价铬彩色钝化工艺研究[J].表面技术,2003,32(1):31-32.
- [8] 胡立新,兰林,朱中兵,等.镀锌层三价铬高耐蚀蓝白钝化工艺研究[J].材料保护,2005,38(7):25-28.
- [9] 冯立明,王玥.电镀工艺学[M].北京:化学工业出版社,2010:107.
- [10] GB 9791-88, 锌和镉上铬酸盐转化膜实验方法[S].

(上接第 76 页)

- [2] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, et al. Plasma Electrolysis for Surface Engineering [J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 122: 73-93.
- [3] BUTYAGIN P I, KHOKHRYAKOV Y V, MAMAEV A I. Micro Plasma Systems for Creating Coatings on Aluminum Alloys [J]. Materials Letters, 2003, 57: 1748-1751.
- [4] NIE X, LEYLAND A, SONG H W, et al. Thickness Effects on the Mechanical Properties of Micro-arc Discharge Oxide Coatings on Aluminum Alloys [J]. Surface & Coatings Technology, 1999, 116/117/118/119: 1055-1060.
- [5] 朱凯,王正林.精通 MATLAB 神经网络[M].北京:电子工业出版社,2010:193-224.

- [6] 阎平凡,张长水.人工神经网络与模拟进化计算[M].北京:清华大学出版社,2001:115-168.
- [7] 初红艳,秦合营,蔡力钢,等.基于 BP 神经网络的印刷色彩质量综合评价[J].包装工程,2009,30(10):97-100.
- [8] YEROKHIN A L, NIE X, LEYLAND A, et al. Characterisation of Oxide Films Produced by Plasma Electrolytic Oxidation of a Ti-6Al-4V Alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2000, 130: 195-206.
- [9] KHAN R H, YEROKHIN A L, LI X, et al. Surface Characterization of DC Plasma Electrolytic Oxidation Treated 6082 Aluminium Alloy: Effect of Current Density and Electrolyte Concentration [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205: 1679-1688.

(上接第 79 页)

- [2] 马李洋,丁毅,马立群,等.316L 不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J].表面技术,2007,36(2):39-41.
- [3] 周学杰,郑鹏华,余静.黑色金属材料在长江淡水中的腐蚀行为[J].装备环境工程,2010(2):1-4.
- [4] 陈天玉.不锈钢表面处理技术[M].北京:化学工业出版社,2004:198-237.
- [5] 诸震鸣.谈谈不锈钢硝酸钝化法[J].电镀与精饰,1997,19(4):37-38.
- [6] 唐亚陆,汪文兵.不锈钢柠檬酸钝化工艺研究[J].表面技术,2008,37(5):68-70.
- [7] 李谋成,曾潮流,林海潮,等. $\text{F}^-$ 对酸性介质中 316 不锈钢钝化性能的影响[J].金属学报,2001,37(10):1083-

1086.

- [8] 许嗣坤,黄卫岚,宋永杰. NaF 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的腐蚀研究[J].化学清洗,1999,15(6):6-9.
- [9] 耿鸿明,吴晓春,汪宏斌,等.铜、硫元素对 4Cr13 不锈钢切削性能及耐腐蚀性能的影响[J].钢铁研究学报,2008,20(8):42-45.
- [10] 马艳红,黄元伟.硅含量对不锈钢耐蚀性能的影响[J].上海金属,1999,21(3):52-56.
- [11] 汪轩义,吴荫顺,张琳,等.不锈钢钝化膜研究进展[J].材料导报,1999,13(3):13-15.
- [12] 方景礼.金属材料抛光技术[M].北京:国防工业出版社,2007:190-191.