

基于BP网络的不锈钢多元离子共渗优化设计

钟厉, 李国川, 王立文

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘要: **目的** 通过神经网络优化不锈钢多元渗氮设计工艺, 提高效率与质量。 **方法** 分析循环周期、乙醇+CS₂ 气体流量和氨气流量对奥氏体不锈钢 316Ti 共渗后耐磨、耐腐蚀性能的影响, 建立 BP 神经网络, 通过预测, 寻求不锈钢循环多元离子共渗处理工艺参数。 **结果** 对利用 BP 神经网络进行工艺优化设计的工艺参数进行实验验证, 理论数值与试验数值的偏差在±5% 以内。 **结论** 新方法脱离传统的经验法与试验法, 实现了循环多元离子共渗的优化设计。

关键词: 多元离子渗氮; BP 神经网络; 优化设计

中图分类号: TG174.445

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)02-0079-04

Multiple Ion Nitriding of Stainless Steel Optimization Design Based on BP Neural Network

ZHONG Li, LI Guo-chuan, WANG Li-wen

(College of Mechatronic and Automobile Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the efficiency and quality through the neural networks optimization of multiple ion nitriding process on stainless steel. **Methods** The influences of cycle, ethanol, CS₂ and ammonia flow on the wear resistance and corrosion resistance of austenitic stainless steel 316Ti in nitriding were analyzed. A BP neural network was established, and parameters for the stainless steel circular multiple ion nitriding process were sought through prediction. **Results** The process parameters error was optimized within ±5% by using BP neural network to validate the technical parameters of the process optimization. **Conclusion** Different from the traditional empirical method and test method, the new method realized the optimization design of multiple ion nitriding.

KEY WORDS: multiple ion nitriding; BP neural network; optimization design

不锈钢的特点是耐腐蚀, 但硬度不高且耐磨性差^[1]。传统离子渗氮可以提高不锈钢的表面硬度, 增强耐磨性, 但会降低耐腐蚀性。循环离子氮氧硫共渗能在提高不锈钢表面硬度的同时, 显著减少耐腐蚀性的降低程度^[2-3]。研究者们通过正交试验发现: 不锈钢渗氮过程中加入一定量的乙醇和 CS₂, 可促进氮扩

渗; 乙醇与 CS₂ 量少, 难体现共渗中各微量元素对渗层的影响; 乙醇与 CS₂ 过多, 微量元素会占据 N 向基体内部扩散的通道, 阻碍 N 的扩散, 使化合物层成分复杂, Fe₂₋₃N 减少, 硬度下降^[4-12]。渗层深度、表面硬度、耐腐蚀性与多元渗氮工艺参数之间的映射关系难用精确的函数关系式表达, 而数理统计方法亦难建

收稿日期: 2013-11-08; 修订日期: 2013-12-18

Received: 2013-11-08; Revised: 2013-12-18

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 2008BB6348); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ100424)

Fund: Supported by the Chongqing Natural Science Foundation Project (CSTC, 2008BB6348); the Chongqing Education Science and Technology Research Project (KJ100424)

作者简介: 钟厉 (1965—), 女, 重庆人, 博士, 教授, 主要从事材料表面工程的研究及教学工作。

Biography: ZHONG Li (1965—), Female, from Chongqing, Ph. D., Professor, Mainly engaged in research and teaching in material surface engineering.

立多工艺参数与综合性能的复杂关系,传统试验法则会耗费巨大人力物力,而且容易使结构复杂的机械零件报废。

BP 网络又称误差逆传播多层前馈网络,无需输入与输出的数学方程,也不用学习和存贮大量的输入-输出模式,通过反向传播来不断调整网络的权值和阈值,使网络的误差平方和最小,得到与输入相应的最优解,是目前应用最广泛的人工神经网络模型之一^[13-14]。针对上述问题,文中将 BP 神经网络应用于循环多元离子共渗,以寻求循环多元离子共渗工艺设计新方法。

1 渗氮工艺和样本数据

实验渗氮炉为 LDMC-50A 型脉冲等离子体氮化炉。在多元共渗的基础上,加入循环两段渗氮法,进行 1~4 个周期的短期两段渗氮。针对 316Ti,每个周期的第一阶段在 (420±10) °C 渗氮^[15],采用 15%~35% 的氨分解率,使表面氮含量提高。待气氛与表面逐渐达到氮吸收与扩散的亚平衡时,转入第二阶段,温度升至 (450±10) °C,并将氨分解率增至 50%~70%,强化氮的扩散。如此循环,能充分利用强渗与扩散的高效率阶段,使渗氮处理时间大为缩短。其余循环周期、混合气体(乙醇+CS₂) 流量、氨气流量为可调的关键参数。

实验材料选择奥氏体不锈钢 316Ti,其成分(以质量分数计)为:C≤0.08%,P≤0.035%,S≤0.03%,Si≤1.0%,Cr 16%~19%,Mn≤2.0%,Ni 11%~14%,Mo 1.8%~2.5%,Ti≥5xC%。在 1150 °C 对材料进行固溶预处理,处理后的硬度为 300HV0.2。316Ti 试样经循环多元离子渗氮,渗氮参数及渗氮后的性能见表 1。

表 1 316Ti 多元共渗工艺参数和性能
Tab.1 Multiple ion nitriding processes and performance of stainless steel 316Ti

流量/(L·min ⁻¹)		循环周期	表面硬度 HV	渗层厚度 /mm	自腐蚀电位 /mV
氨气	混合气体				
2.0	0.1	3	1325	0.140	-746
2.0	0.2	3	1407	0.165	-727
1.5	0.3	3	1242	0.140	-736
1.8	0.1	2	1300	0.136	-768
2.0	0.2	2	1389	0.157	-753
1.5	0.3	1	1219	0.137	-771
1.5	0.1	3	1367	0.151	-717
1.5	0.2	2	1300	0.139	-732
2.0	0.3	2	1311	0.135	-742
1.0	0.3	3	1208	0.143	-758

2 BP 神经网络设计

2.1 BP 网络的基本结构

BP 神经网络模型拓扑结构包括输入层、隐层和输出层。构建了 3×10×3 的三层 BP 神经网络,如图 1 所示。性能预报神经网络模型输入层为 3 个目的渗层性能指标,输出层则为 3 个渗氮工艺参数。在循环多元离子渗氮工艺中,输入层有 3 个节点数,分别对应渗层深度、表面显微硬度、自然腐蚀电位 3 个渗层性能指标;输出层有 3 个节点数,分别对应氨气流量、混合气体流量、循环周期 3 个可调工艺参数。隐层节点数按经验公式(1)计算:

$$F = \sqrt{M^2 + N^2} + A \tag{1}$$

式中:F 为隐层节点数,N 为输入层节点数,M 为输出层节点数,A 取值为 [1,10] 的自然数。F 太大,将出现很多局部极小值,使得网络训练速度变缓,甚至振荡;F 太小,则会导致结果误差达不到实验精度要求,甚至出现网络不收敛。选择不同 F 值,即 6,8,10 和 12,进行网络试训,根据所得试训结果分析,确定 F 取值为 10。

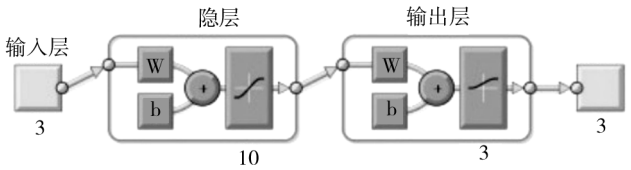


图 1 BP 网络基本结构
Fig.1 Basic structure of BP network

2.2 数据样本的归一化处理

归一化是一种简化计算的方式,即将有量纲的表达式转化为无量纲的表达式,成为纯量。因数据差异较大,为防止矩阵运算过程中大数吞小数,矩阵畸变,出现不收敛,故对于样本矩阵,按列采用线性归一化法对样本数据进行处理。其中 Min,Max 分别为列元素最小值与最大值,见公式(2):

$$Y = (X - \text{Min}) / (\text{Max} - \text{Min}) \tag{2}$$

2.3 BP 网络的学习与训练

对于网络的学习函数,输入层到隐含层使用 Tansig 函数,隐含层到输出层则使用 Logsig 函数。以表 1(316Ti 多元共渗工艺参数和性能)归一化后的数

据矩阵为训练样本矩阵,通过 BP 神经网络算法反复训练,使 BP 网络权值稳定,建立多元离子共渗工艺参数与 316Ti 渗层性能指标的映射关系,最终得到优化设计工艺参数的神经网络模型。模型的误差分析、状态分析和回归分析如图 2—4 所示。

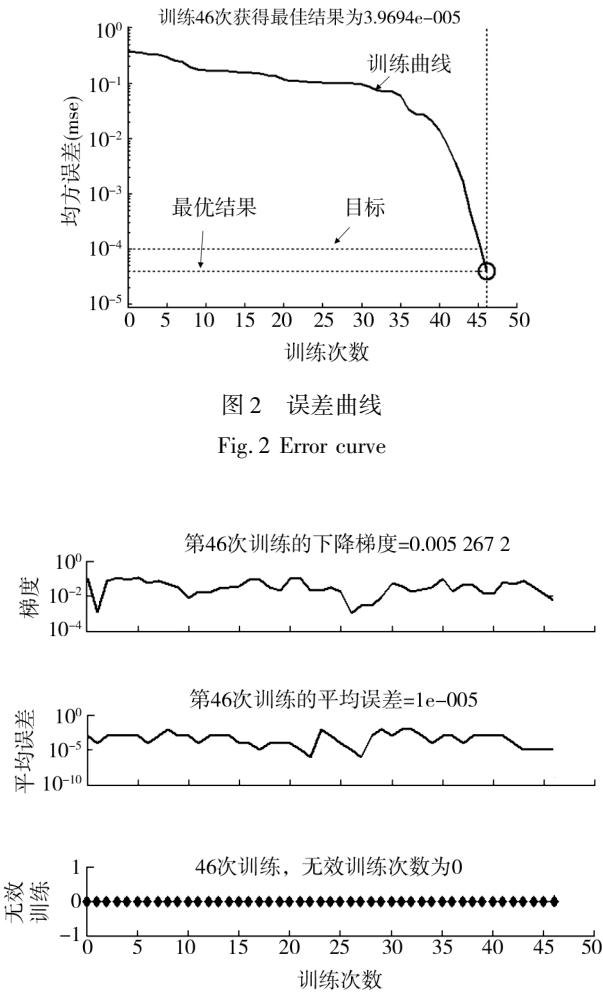


图 3 网络状态分析
Fig.3 The analysis of net state

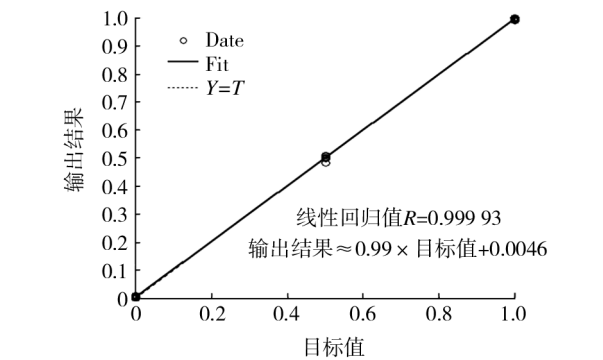


图 4 网络回归分析
Fig.4 The regression analysis of net

3 分析验证

为考察神经网络技术进行工艺优化设计的可行性与可靠性,安排验证试验。采用网络测试获得的工艺参数(循环周期、氨气流量、混合气体流量)进行多元离子共渗,并测定所获渗层的性能。根据本次实验样品性能需求,确定以渗层深度 0.150 mm,表面硬度 1400HV,自然腐蚀电位-720 mV 作为优化的目标值,将其输入已获得的工艺优化 BP 神经网络模型,获得的优化参数为:氨气流量 1.8 L/min,混合气体流量 0.2 L/min,循环周期 2.8(实验中取 3 周期)。按照该工艺参数安排试验,测定结果如图 5 和 6 所示,其渗层厚度为 0.156 mm,表面硬度为 1387HV,自然腐蚀电位为-705 mV。通过计算,本次获得的实测数据与目标性能数据偏差在±5% 以内,证明了依靠 BP 神经网络进行优化设计的可靠性与可行性。

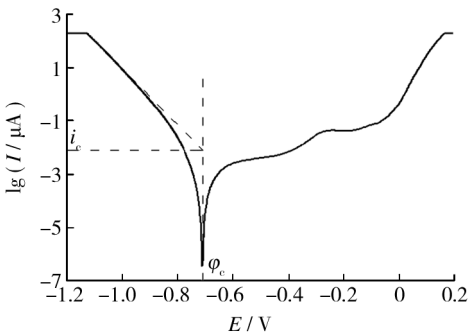


图 5 316Ti 多元共渗后的塔菲尔曲线
Fig.5 Tafel curve of 316Ti sample after muti-ion plasma nitriding

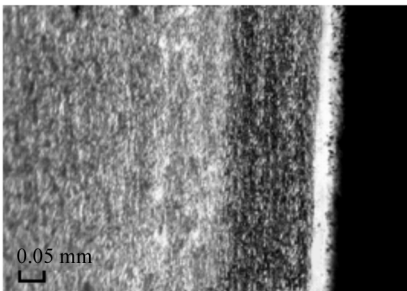


图 6 316Ti 多元共渗后的金相图
Fig.6 Phase diagram of 316Ti sample after muti-ion plasma nitriding

4 结语

通过 BP 神经网络获得了 316Ti 多元共渗工艺参

数与性能指标的映射关系,进行了循环多元离子共渗工艺参数的优化设计,通过实际实验验证了网络模型的可靠性与可行性。该新工艺设计方法比传统的经验法与试验法省心省力,具有高效性和经济性。

参考文献

- [1] 徐滨士. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
XU Bin-shi. The Theory and Methods of Surface Engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] 王兆华,张鹏,林修洲,等. 材料表面工程[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
WANG Zhao-hua, ZHANG Peng, LIN Xiu-zhou, et al. Material Surface Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [3] BELL T, LI X Y, SUN Y, et al. 对于提高奥氏体不锈钢离子氮化表面腐蚀性能的措施[J]. 中国表面工程, 1998 (4): 40—49.
BELL T, LI X Y, SUN Y, et al. The Measures to Improve the Corrosion Resistance of Austenitic Stainless Steel Ion Nitriding Surface [J]. China Surface Engineering, 1998 (4): 40—49.
- [4] YU L D, AUKKARAVITTAYAPUN S, BOONYAWAN D, et al. Recent Development in Surface Modification of Industrial Materials by Ion Beams and Plasma at Chiang Mai University [J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 2771—2775.
- [5] 钟厉,戴仲谋,邵丽. 循环 N/C/O/S 离子共渗对 316Ti 钢组织及耐腐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2012, 41 (3): 67—70.
ZHONG Li, DAI Zhong-mou, SHAO Li. Cyclic N/C/O/S Ions Nitriding on Microstructure and Corrosion Resistance of 316Ti Steel [J]. Surface Technology, 2012, 41 (3): 67—70.
- [6] 钟厉,邵丽,陆亚. 2Cr13 钢氮碳氧硫变温离子共渗工艺及性能研究[J]. 热加工工艺, 2012 (10): 149—152.
ZHONG Li, SHAO Li, LU Ya. Research on Process and Properties of 2Cr13 Steel with C/N/O/S Nitriding [J]. Hot Working Technology, 2012 (10): 149—152.
- [7] 刘林飞,周上祺,黄玉堂,等. 乙醇在空气/乙醇离子氮碳氧多元共渗中的作用[J]. 热处理技术与装备, 2008, 29 (4): 19—21.
LIU Lin-fei, ZHOU Shang-qi, HUANG Yu-tang, et al. Effect of Ethanol on the Air/Ethanol Ion N-C-O Multi-Element Penetration [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2008, 29 (4): 19—21.
- [8] ZHOU H, CHEN F, YAO B, et al. Research on the Properties of Inside Surface of Subsurface Pump Barrel by N-C-O Multi-elements Penetrating [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (9/10/11): 5165—5167.
- [9] 李新,马世宁,刘吉延. CrMoCu 合金铸铁离子渗硫层的摩擦学性能研究[J]. 材料热处理学报, 2008, 29 (3): 156—158.
LI Xin, MA Shi-ning, LIU Ji-yan. Study on Tribological Properties of Sulphurized Layer on CrMoCu Alloy Cast Iron [J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2008, 29 (3): 156—158.
- [10] 王铁. 空气-甲烷氮碳氧多元共渗工艺的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
WANG Tie. Study on Air-methane Ion Nitriding Process [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [11] 魏莉. 降低奥氏体不锈钢离子氮化工程中铬的沉积 [D]. 成都:西华大学, 2009.
WEI Li. To Reduce the Deposition of Austenitic Stainless Steel Ion Nitriding of Chromium [D]. Chengdu: Xihua University, 2009.
- [12] 奚运涛,刘道新,韩栋,等. 离子渗氮 AISI 420 马氏体不锈钢耐腐蚀性行为研究[J]. 材料热处理学报, 2007, 28 (5): 109—114.
XI Yun-tao, LIU Dao-xin, HAN Dong, et al. Investigation on Corrosion Behavior of Plasma Nitrided AISI 420 Martensitic Stainless Steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28 (5): 109—114.
- [13] 周利辉,成艾国,陈涛,等. 基于 BP 神经网络的侧碰多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23 (17): 48—51.
ZHOU Li-hui, CHENG Ai-guo, CHEN Tao, et al. Optimization Design of Side Collision Multi-objective Based on BP Neural Network [J]. China Mechanic Engineering, 2012, 23 (17): 48—51.
- [14] 周开利,康耀红. 神经网络模型及其 MATLAB 仿真程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
ZHOU Kai-li, KANG Yao-hong. Neural Network Model and MATLAB Simulation Programming [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 程东,高原,唐光辉. 渗氮温度对 3Cr13 不锈钢表面离子渗氮层组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33 (7): 19—21, 25.
CHENG Dong, GAO Yuan, TANG Guang-hui. Effect of Nitriding Temperature on the Surface of 3Cr13 Stainless Steel Ion Nitriding Layer Structure and Properties [J]. Mechanical Engineering Materials, 2009, 33 (7): 19—21, 25.