

表面失效及防护

基于人工神经网络预测 Ni-W 合金镀层的硬度和耐腐蚀性能

周琼宇^{1,2}, 谢蔚¹, 王小芬¹, 王操¹, 胡义锋¹

(1.江西理工大学 材料科学与工程学院, 江西 赣州 341000;

2.上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要:目的 预测 Ni-W 合金镀层的硬度和耐腐蚀性能, 优化 Ni-W 合金镀层的电沉积工艺。方法 在柠檬酸-硫酸盐溶液体系中直接沉积制备 Ni-W 合金镀层, 并将实验所得镀层数据作为学习样品, 利用 BP 神经网络对建立了 Ni-W 合金电沉积过程参数对镀层硬度和腐蚀电流密度之间的映射关系。结果 低碳钢表面所沉积的 Ni-W 合金镀层表面均匀致密, 与基体结合良好, 能够有效地对基体起到保护作用。第二隐层的加入使得 3-7-15-2 四层网络达到网络收敛的训练次数 (1 215 365 次) 远小于 3-7-2 三层网络的训练次数 (239 950 000 次)。四层网络预测所得镀层的硬度和腐蚀电流密度与实验值十分相近, 其相对误差 $\leq 5.03\%$ 。结论 BP 神经网络能够准确建立电沉积 Ni-W 合金镀层的工艺条件和目标性能之间的映射关系, 在本文所用的沉积体系和参数范围内, Ni-W 合金镀层的显微硬度在 296~982HV 之间, 其硬度最大时所对应的电沉积工艺条件为: pH=7.2, 电流密度 8 A/dm², WO₄²⁺浓度为 0.46 mol/L。Ni-W 合金镀层的腐蚀电流密度在 7.3~100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 范围内。镀层耐蚀性能最好时, 即镀层腐蚀电流密度最小时的电沉积工艺条件为: pH=6.4, 电流密度 0.36 A/dm², WO₄²⁺浓度为 0.34 mol/L。

关键词: Ni-W 合金; 镀层; 人工神经网络; BP 网络; 硬度; 耐蚀性

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)12-0140-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.12.023

Artificial Neural Network-based Prediction of Hardness and Corrosion Resistance of Ni-W Alloy Coating

ZHOU Qiong-yu^{1,2}, Xie Wei¹, WANG Xiao-fen¹, WANG Cao¹, HU Yi-feng¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

收稿日期: 2016-05-08; 修订日期: 2016-05-27

Received: 2016-05-08; Revised: 2016-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (51504104); 江西省自然科学基金 (20151BAB216012, 20161BAB206141); 江西理工大学博士启动基金 (3401223204)

Fund: Supported by the National Nature Science Foundation of China (51504104), Natural Science Foundation of Jiangxi province (20151BAB216012, 20161BAB206141), and Scientific Research Foundation of Jiangxi University of Science and Technology (3401223204)

作者简介: 周琼宇 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程、金属腐蚀与防护。

Biography: ZHOU Qiong-yu(1986—), Male, Doctor, Lecturer Research focus: surface engineering, metal corrosion and protection.

通讯作者: 王操 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程、金属陶瓷。

Corresponding author: WANG Cao(1980—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering, metaloceramics.

ABSTRACT: The work aims to predict hardness and corrosion resistance so as to optimize the deposition process of electro-deposited Ni-W alloy coating. Ni-W alloy coating was prepared by direct deposition in aqueous citrate-sulphate solution system. Coating statistics obtained by means of experiment shall be taken as samples to be studied. A neural network was used to establish electro-deposition process parameters of Ni-W alloy, so as to reflect mapping relation between coating hardness and corrosion current density. Ni-W alloy coating deposited on surface of low-carbon steel was uniform and compact, provided with good adhesion to the substrate. Hence it could protect the substrate effectively. With the addition of second hidden layer, 3-7-15-2 four-layer network reaches training times of net work convergence (1 215 365 times), far less than that of 3-7-2 three-layer network (239 950 000 times). The predicted values of hardness and corrosion current density (J_{corr}) were close to the values got by experiment, and the relative error was $\leq 5.03\%$. An accurate mapping relation between process conditions of electrodeposited Ni-W alloy coating and target properties can be built by BP neural network. The microhardness of Ni-W alloy coating was within 296~982HV. Electrodeposition process conditions corresponding to maximum hardness are as follows: pH value of 7.2, deposition current density of 8 A/dm^2 and WO_4^{2-} content of 0.46 mol/L . Corrosion current density of the Ni-W alloy coating is within $7.3\sim 100 \mu\text{A/cm}^2$. Electrodeposition process conditions corresponding to lowest corrosion current density, i.e., best corrosion resistance, are as follows: pH value of 6.4, deposition current density of 0.36 A/dm^2 and WO_4^{2-} content of 0.34 mol/L .

KEY WORDS: Ni-W alloy; coating; artificial neural network; BP network; hardness; corrosion resistance

铬镀层由于具有高硬度、高耐蚀等优良的性能,因而常作为金属表面保护镀层和装饰性镀层,被广泛应用于工程领域,在电镀工业中占有重要地位^[1]。但是,工业中通常采用六价镀铬工艺,所使用的镀液呈强酸性且具有极强的腐蚀性,极易对环境造成严重的污染破坏。同时,镀铬液中的 Cr^{6+} 还具有强致癌性,对人体健康也有极大的危害^[2]。近年来日益恶化的环境问题对新型环保材料的开发与应用提出了重大挑战,W、Mo、Cr 同为VIB族元素,具有相近的化学性质,电沉积制备 W、Mo 合金镀层用以代替传统的铬镀层是当前研究的热点之一^[3-5]。在众多 W、Mo 合金镀层中,Ni-W 合金镀层由于具有与铬镀层相媲美的力学、化学性能,同时制备 Ni-W 合金镀层所使用的镀液具有较低的生物毒性^[5],因此 Ni-W 合金镀层被认为是理想的代铬层材料。

已有的研究表明:镀层性能通常由镀层结构决定,不同形态的 Ni-W 合金镀层结构(如纳米镀层、非晶态镀层或 Ni_4W 等金属中间相)可以通过变化其电沉积工艺条件来获得,从而制备出具有不同的物理、化学、力学性能的 Ni-W 合金镀层^[6-8]。由于 W 合金只能通过 Fe 族元素(Fe、Co、Ni)诱导共沉积形成合金镀层,其电沉积过程十分复杂^[9]。在研究过程中需进行大量的实验来获取电沉积工艺参数与镀层性能之间的关系,这不利于工业生产中 Ni-W 合金镀层产品的开发

应用。人工神经网络具有良好的自学习功能和高速寻找优化解的能力,因而被广泛应用于模式识别、信号处理和优化组合等领域。利用神经网络对镀层的目标性能进行预测,得到最佳的电镀工艺是电镀行业实际生产中解决上述问题的新途径^[11-15]。现有研究包括利用神经网络预测 Ni-Mo 合金层的成分^[10]、金刚石-镍复合膜的金刚石颗粒的含量和复合膜的厚度^[11]、Ni-TiN 合金层^[12]及镀铬层^[13]的硬度、Zn-Ni-P 镀层^[14]和 Ni-SiC 合金层^[15]的耐腐蚀性能等。本文针对 Ni-W 镀层这一新型的代铬合金层展开研究,利用 BP 神经网络系统建立了工艺参数与 Ni-W 合金镀层的耐腐蚀性能和硬度之间的映射关系,最终实现对 Ni-W 合金镀层最优目标性能及其相对应的电沉积工艺参数的预测。

1 实验

1.1 Ni-W 合金镀层

电沉积 Ni-W 合金所用的镀液成分为: $0.1 \text{ mol/L NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Ni 源), 0.24 、 0.3 、 $0.5 \text{ mol/L Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (W 源), $0.5 \text{ mol/L Na}_3\text{Cit} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (络合剂), $0.5 \text{ mol/L NH}_4\text{Cl}$ (提高电流效率), 0.2 mol/L NaBr (增强导电性)。所有镀液均用化学纯试剂和二次去离子水配制。镀液的 pH 值使用硫酸和氨水

调节至 4.5、5.5、7.5 和 8.5。电沉积在低碳钢基体上进行, 阴极沉积面积为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$, 其余部分用环氧树脂涂封。电沉积前, 需对低碳钢基体进行预处理: 试样经砂纸打磨并抛光后, 用去离子水和丙酮依次超声清洗, 在电沉积前将试样浸入 10%(w/v)HCl 溶液中活化 60 s, 然后用去离子水冲洗, 吹干后直接进行合金镀层的电沉积制备, 电沉积时使用的电流密度为 0.5、2、4、6、8 A/dm^2 , 在沉积过程中通过调节电沉积时间来保持每个试样沉积消耗的总电量保持为 72 C。

Ni-W 合金镀层的表面形貌和截面情况用 JEOL JEM-6700 型扫描电镜 (SEM) 进行观察。Ni-W 合金镀层的显微硬度用显微硬度计 (MH-3 型, 北京美泰科仪检测仪器有限公司) 进行测量, 测试时使用的载荷为 50 g, 加载时间为 5 s, 每个样品测量 3 次后取其平均值即为镀层的显微硬度。Ni-W 合金镀层的耐蚀性用腐蚀电流密度表征, 腐蚀电流密度通过镀层在 3.5%NaCl 溶液所测试的极化曲线拟合获得。极化曲线使用电化学工作站 (CHI660C, 上海辰华仪器有限公司) 进行测试, 测试使用三电极体系, 工作电极为 Ni-W 合金镀层, 参比电极为饱和甘汞电极 (SCE), 辅助电极为铂电极。

1.2 人工神经网络模型和结构

本文使用目前应用最广泛的 BP (Back Propagation) 神经网络对 Ni-W 合金镀层的性能进行预测。BP 神经网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络, 该网络的拓扑结构由输入层、隐藏层、输出层组成。在 BP 神经网络任意的 L 层, 其输出值 y_i 的表达式为:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} + b\right) \quad (1)$$

式中: $f(\text{net})$ 为传递函数; w_{ij} 为 L 层中神经单元 i 和 $L-1$ 层中神经单元 j 之间的权值矩阵; n 为 $L-1$ 层的单元数量; b 为激活函数的阈值。

BP 神经网络的误差为:

$$E_{\text{error}} = \frac{1}{NT} \sum_{m=1}^T \sum_{n=1}^N [x_i(m) - y_i(m)]^2 \quad (2)$$

式中: N 为输出的数量; T 为训练次数; x_i 为期望的输出值; y_i 为输出值。

BP 神经网络可以通过反向逆传播来调整网络, 使得网络的全局误差不断下降, 最终趋向于

收敛阈值。从理论上讲, 只要训练次数足够, 一个三层网络可在任意精度上实现任意的连续函数^[11], 但是会影响其收敛速度, 导致训练时间冗长。本文在利用 BP 神经网络预测 Ni-W 合金镀层性能的研究中, BP 神经网络的三个输入项分别为: 镀液的 pH 值、镀液中 WO_4^{2-} 含量和沉积电流密度。BP 神经网络的输出项为镀层的显微硬度和腐蚀电流密度。BP 神经网络所使用的网络结构如图 1 所示, 其中图 1a 为只含有一个隐层的 3-7-2 三层网络结构, 图 1b 为包含两个隐层的 3-7-15-2 四层网络结构。

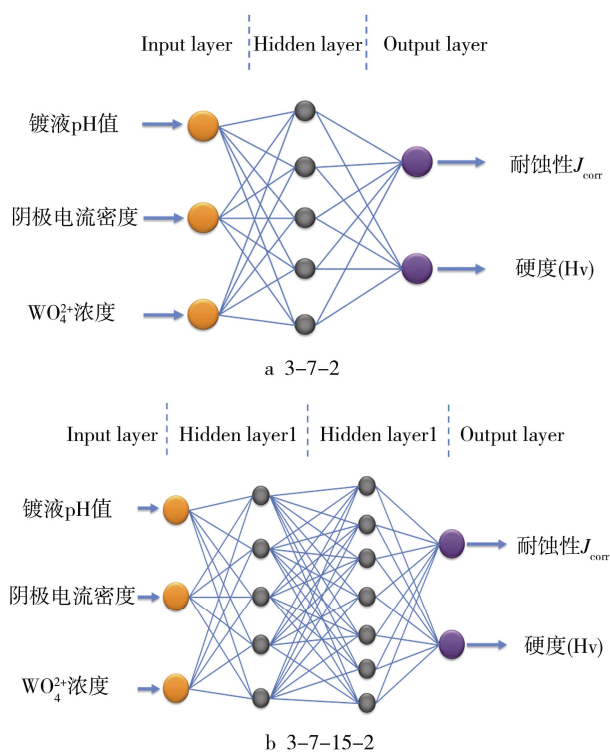


图 1 BP 神经网络的拓扑结构示意图
Fig.1 A schematic description of the BP mode

2 结果及分析

2.1 Ni-W 合金镀层

图 2 是镀液 pH 值为 5.5、 WO_4^{2-} 浓度为 0.3 mol/L、沉积电流密度为 4 A/dm^2 的沉积条件下制备的 Ni-W 合金镀层的表面和截面 SEM 照片。可知, 在硫酸盐-柠檬酸溶液中, 直流电沉积所得到的 Ni-W 合金镀层表面均匀致密, 无明显的孔隙、裂缝等缺陷存在。此外, 镀层与基体结合良好, 能够有效地隔绝基体与外界环境的接触, 从而起到保护基体的作用。

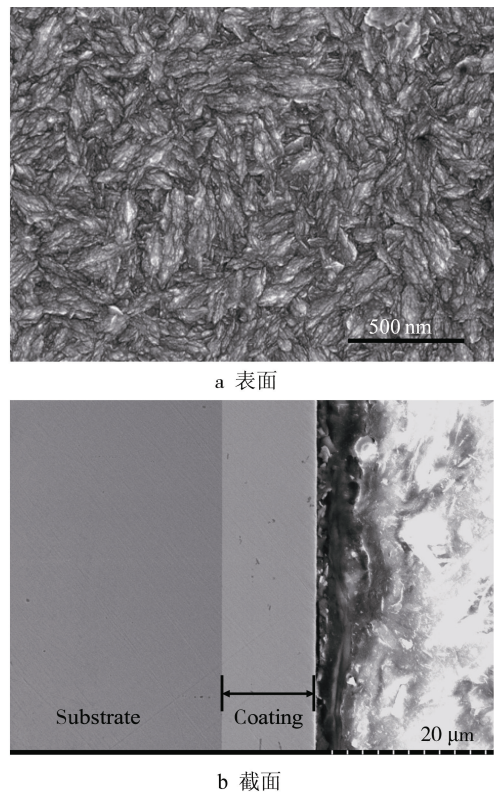


图 2 Ni-W 合金镀层的表面和截面的 SEM 图片
Fig.2 The SEM micrographs for the surface and cross-section of Ni-W alloy coatings

2.2 BP 网络结构的选择与学习

将各沉积条件下制备得到的 Ni-W 合金进行硬度和极化曲线测试。测试结果列于表 1，并将其作为 BP 神经网络的学习样本。在运行 BP 神经网络学习时，需要将所有样本的输入和输出值进行归一化处理，即数值范围在 0~1 之间。在学习过程中，两种网络的学习率设定为 0.1，相对误差的阈值设定为 1×10^{-6} 。在运行 BP 神经网络进行训练的过程中，相对误差随着训练次数的递增逐渐降低，误差达到控制参数范围内即停止训练。两种 BP 神经网络训练过程中相对误差随训练次数的变化如图 3 所示：在对 Ni-W 合金 BP 神经网络的预测过程中，第二隐层的加入使 3-7-15-2 四层网络达到网络收敛的训练次数（1 215 365 次）远小于 3-7-2 三层网络的训练次数（239 950 000 次）。网络的收敛速度是衡量 BP 神经网络的重要指标，收敛速度越快，所需要的训练时间越短，因此本文在对 Ni-W 合金进行硬度和耐腐蚀性能预测的过程中采用效率较优的四层网络。

人工神经网络经过学习以后，输入项与输出项

表 1 Ni-W 合金镀层的硬度和极化曲线测试结果
Tab.1 Hardness and J_{corr} of Ni-W alloy coatings

| 样本 | pH值 | 电流密度/ ($\text{A}\cdot\text{dm}^{-2}$) | $c(\text{WO}_4^{2-})$ / ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | 显微硬度 (HV) | $J_{\text{corr}}/$ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$) |
|----|-----|--|---|--------------|--|
| 1 | 4.5 | 4 | 0.3 | 645.3 | 37.84 |
| 2 | 5.5 | 4 | 0.3 | 753.2 | 11.57 |
| 3 | 7.5 | 4 | 0.3 | 687.4 | 13.95 |
| 4 | 8.5 | 4 | 0.3 | 463.6 | 27.09 |
| 5 | 5.5 | 0.5 | 0.3 | 387.2 | 85.63 |
| 6 | 5.5 | 2 | 0.3 | 528.7 | 17.49 |
| 7 | 5.5 | 6 | 0.3 | 794.0 | 48.38 |
| 8 | 5.5 | 8 | 0.3 | 764.3 | 61.34 |
| 9 | 7.5 | 0.5 | 0.3 | 512.6 | 35.18 |
| 10 | 7.5 | 2 | 0.3 | 585.6 | 18.63 |
| 11 | 7.5 | 6 | 0.3 | 659.1 | 23.74 |
| 12 | 7.5 | 8 | 0.3 | 624.8 | 26.93 |
| 13 | 5.5 | 4 | 0.24 | 572.7 | 16.87 |
| 14 | 5.5 | 4 | 0.5 | 834.1 | 42.04 |
| 15 | 7.5 | 4 | 0.24 | 538.4 | 21.04 |
| 16 | 7.5 | 4 | 0.5 | 814.3 | 10.34 |

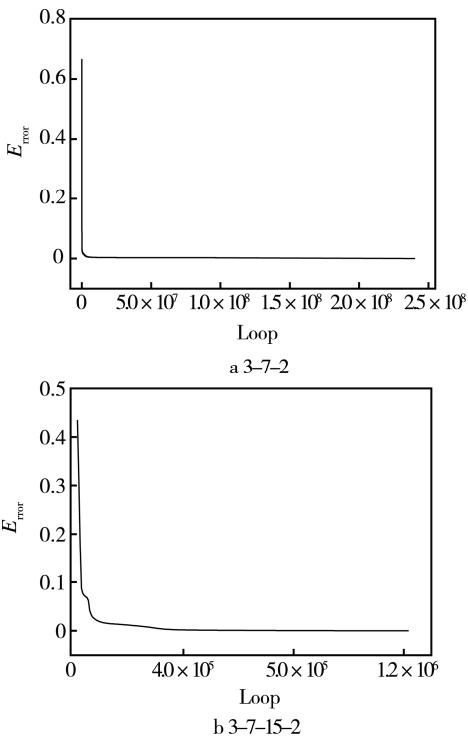


图 3 BP 神经网络训练过程中相对误差随训练次数的变化曲线

Fig. 3 Error value as a function of training loops during training process of BP artificial neural network

之间的映射关系已建立。在本文中研究的电沉积工艺条件范围内，抽选 36 组工艺条件进行作为输入项迭代到神经网络，即可得出的相应的输出项（镀

层的显微硬度、腐蚀电流密度 J_{corr})。将输出项与这 36 组样本的实验结果进行比较可分析其学习效果, BP 神经网络的输出值与实验值的比较结果如图 4 所见。由图可知, 本文中所用的 BP 神经网络预测输出值与实验结果十分接近。其中第 29 组样本的硬度输出值与实验结果相对误差最大的, 但是其相对误差值也仅为 5.03%, 其他预测值与实验结果直接的相对误差率均均在 5% 以下, 说明人工神经网络的学习效果十分理想。

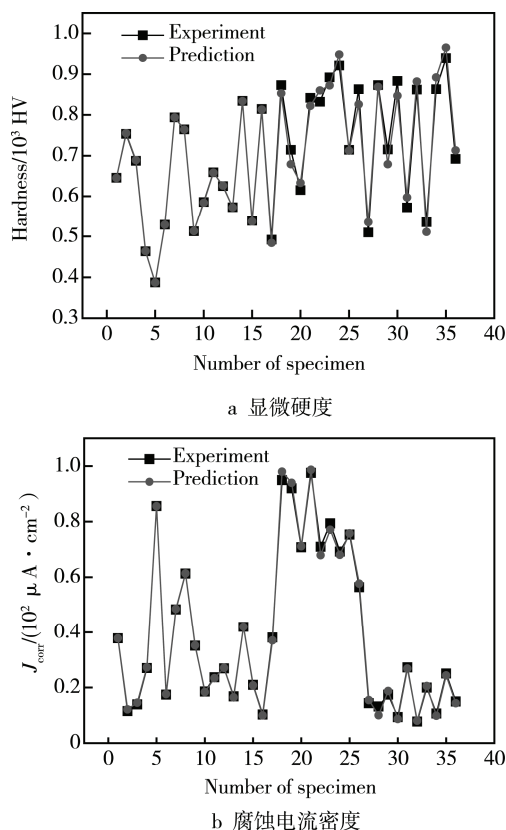


图 4 BP 神经网络预测值与实验值的比较

Fig. 4 The comparison between predicted values and experimental values

2.3 电沉积工艺神经网络模型预测

学习效果良好的神经网络, 可以将所建立的映射关系应用于 Ni-W 合金镀层目标性能的预测。输入项 (pH 值、沉积电流密度、 WO_4^{2+} 含量) 与输出项 (硬度、腐蚀电流密度) 之间的映射关系, 可以通过两个四维坐标系来进行表示 (如图 5a、图 6a 所示)。图 5a 为利用 BP 人工神经网络所建立的 Ni-W 合金镀层电沉积工艺条件与硬度之间的映射关系, 从图 5a 可以看出, 在给定的工艺条件参数范围内, 所沉积的 Ni-W 合金镀层的显微硬度在

296~982HV 之间。其中镀层硬度最大时所对应的电沉积工艺条件为: 镀液的 pH=7.2, 电流密度 8 A/dm^2 , WO_4^{2+} 浓度 0.46 mol/L 。此外, 从图 5a 还能得出各沉积条件对硬度的影响趋势: 镀液中 WO_4^{2+} 含量与 Ni-W 合金的显微硬度呈现正相关的关系, 而镀液 pH 值及沉积电流密度对镀层硬度的影响较复杂, 在具体的分析过程中可以先确定 WO_4^{2+} 含量, 通过减少影响因素来具体分析镀液 pH 值及沉积电流密度对镀层硬度的影响。图 5b 为镀液中 WO_4^{2+} 含量为 0.3 mol/L , 镀液 pH 值及沉积电流密度与镀层硬度之间的映射关系。从图 5b 可以看出, 当镀液 pH 值在 4~5 的范围内时, 镀层硬度随电流密度的增大呈现先增大后减小的趋势; 当镀液 pH 值在 5~8 的范围内时, 随着沉积电流密度的增大, 镀层硬度呈现逐渐增大的趋势; 当镀液 pH 值在 8~9 的范围内时, 镀层硬度呈现先减小后增大的趋势。

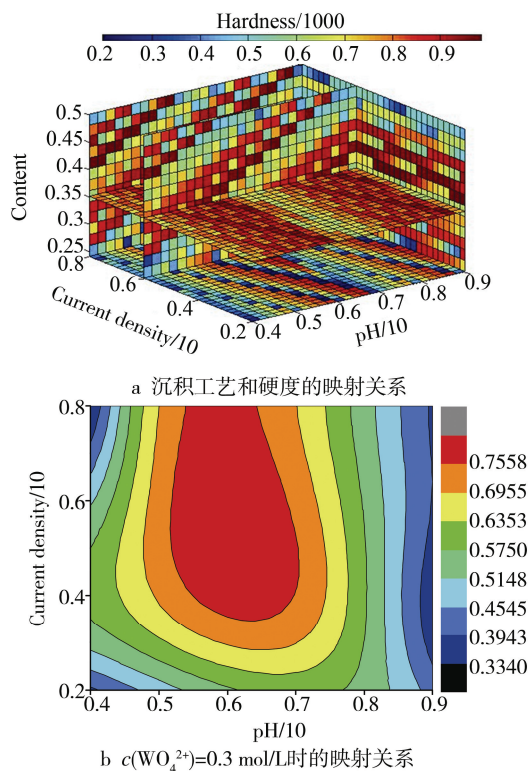


图 5 人工神经网络对 Ni-W 合金镀层硬度的预测结果

Fig. 5 Predicted outcomes of hardness by artificial neural network: a) mapping relation between the electrodeposition parameters and hardness; b) the condition of $0.3 \text{ mol/L } \text{WO}_4^{2+}$

图 6a 为利用 BP 人工神经网络所建立的 Ni-W 合金镀层电沉积工艺条件与腐蚀电流密度 J_{corr} 之间的映射关系。从图 6a 可以看出, Ni-W 合金镀层的腐蚀电流密度在 $7.3 \sim 100 \mu\text{A/cm}^2$ 范围内, 腐蚀电流密度最小时所对应的电沉积参数为: pH=6.4, 电

流密度 0.36 A/dm^2 , WO_4^{2+} 浓度 0.34 mol/L 。图 6b 为 WO_4^{2+} 浓度为 0.3 mol/L 时, 镀液 pH 值和沉积电流密度与 Ni-W 合金镀层的腐蚀电流密度的映射关系。由图 6b 可见, 镀液 pH 值较小 ($\text{pH} < 5$) 或电流密度较大 ($> 6 \text{ A/dm}^2$) 时, Ni-W 合金镀层的腐蚀电流密度均较大, 镀层的腐蚀性能较差; 镀液的 pH 值在 $5 \sim 7.5$ 范围内时, 沉积电流密度为 $0.2 \sim 0.45 \text{ A/dm}^2$ 时所沉积得到的镀层腐蚀电流密度相对较小, 镀层的耐蚀性能较好。

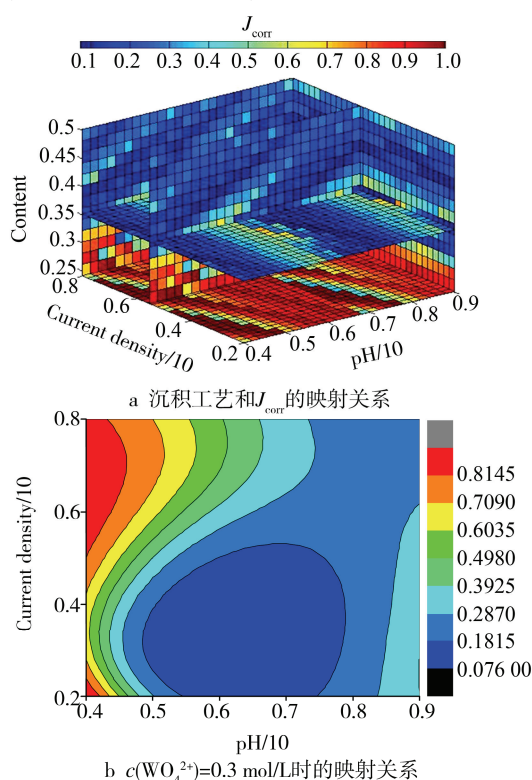


图 6 人工神经网络对 Ni-W 合金镀层 J_{corr} 的预测结果
Fig.6 Predicted outcomes of J_{corr} by artificial neural network:
a) mapping relation between the electrodeposition parameters and J_{corr} ; b) the condition of $0.3 \text{ mol/L } \text{WO}_4^{2+}$

3 结语

1) 在柠檬酸-硫酸盐溶液体系中所沉积的 Ni-W 合金镀层表面均匀致密, 与基体结合良好, 能够有效地保护基体。2) 四层结构的 BP 神经网络比三层结构的 BP 神经网络的收敛速度更快, 所需要的训练次数更少。利用 3-7-15-2 四层网络结构的学习精度高, 学习后 BP 神经网络输出所得镀层显微硬度和腐蚀电流密度预测值与实际实验的结果接近, 相对误差均小于 5.03% 。3) 在本文所用的电沉积体系和给定的参数范围内, Ni-W 合金镀层的显微

硬度在 $296 \sim 982 \text{ HV}$ 之间, 其硬度最大时所对应的电沉积工艺条件为: $\text{pH}=7.2$, 电流密度 8 A/dm^2 , WO_4^{2+} 浓度 0.46 mol/L 。4) 在本文所用的电沉积体系和给定的参数范围内, Ni-W 合金镀层的腐蚀电流密度为 $7.3 \sim 100 \mu\text{A/cm}^2$ 。镀层的耐蚀性能最好时, 即镀层腐蚀电流密度最小时的电沉积工艺条件为: $\text{pH}=6.4$, 电流密度 0.36 A/dm^2 , WO_4^{2+} 浓度 0.34 mol/L 。

参考文献:

- [1] NEWBY K R. Functional Chromium Plating[J]. Metal Finishing, 1999, 97(1): 223—247.
- [2] 杜登学, 隋永红, 周磊, 等. 三价铬电镀的研究现状和发展[J]. 材料保护, 2010, 43(4): 29—31.
DU Deng-xue, SUI Yong-hong, ZHOU Lei, et al. Research Status and Development of Trivalent Chromium Electroplating, Material Protection[J]. Materials Protection, 2010, 43(4): 29—31.
- [3] WANG Y, ZHOU Q, LI K, et al. Preparation of Ni-W-SiO₂ Nanocomposite Coating and Evaluation of Its Hardness and Corrosion Resistance[J]. Ceramics International, 2015, 41(1): 79—84.
- [4] 刘其宗, 张迎春, 刘艳红, 等. 电沉积钨及钨合金涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(1): 142—146.
LIU Qi-zong, ZHANG Ying-chun, LIU Yan-hong, et al. Research Development of Electrodeposited Tungsten and Tungsten Alloys Coating[J]. Materials Review, 2012, 26(1): 142—146.
- [5] KUMAR U P, KENNADY C J, ZHOU Q. Effect of Salicylaldehyde on Microstructure and Corrosion Resistance of Electrodeposited Nanocrystalline Ni-W Alloy Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 283: 148—155.
- [6] SLAVCHEVA E, MOKWA W, SCHNAKENBERG U. Electrodeposition and Properties of NiW Films for MEMS Application[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(28): 5573—5580.
- [7] SRIDHAR T M, ELIAZ N, GILEADI E. Electroplating of Ni₄W[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2005, 8(3): C58—C61.
- [8] SULITANU N D. Electrochemical Deposition of Novel Nanostructured Magnetic Thin Films for Advanced Applications[J]. Materials Science and Engineering: B, 2002, 95(3): 230—235.
- [9] DAVIS G L, GENTRY C H R. The Electrodeposition of Tungsten[J]. Metallurgia, 1956, 53(1): 3—17.
- [10] ALLAHYARZADEH M H, ASHRAFI A, SHAHRABI T, et al. Application of Artificial Neural Networks to Predict

- Chemical Composition of Electrodeposited Nanocrystalline Ni-Mo Thin Films[J]. ECS Transactions, 2013, 50 (52): 63—71.
- [11] 方莉俐, 张兵临, 禹建丽, 等. 用人工神经网络预测电铸自支撑金刚石-镍复合膜沉积结果[J]. 稀有金属材料与工程, 2006 (4): 638—641.
- FANG Li-li, ZHANG Bing-lin, YU Jian-li, et al. Prediction Result of Free-Standing Diamond Grains-Nickel Composite Film by Electrotyping Using an Artificial Neural Network[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006 (4): 638—641.
- [12] JIANG M, MA C, XIA F, et al. Application of Artificial Neural Networks to Predict the Hardness of Ni-TiN Nanocoatings Fabricated by Pulse Electrodeposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 286: 191—196.
- [13] 钟庆阳, 李振华, 周琼宇, 等. 基于正交试验设计与人工神经网络优化镀铬工艺[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(1): 78—82.
- ZHONG Qing-yang; LI Zhen-hua; ZHOU Qiong-yu, et al. Based on Orthogonal Test Design and Artificial Neural Network Optimized Chrome-Plating Craft[J]. Corrosion And Protection, 2014, 35 (1) : 78—82.
- [14] 舒服华. 用神经网络和遗传算法优化电镀锌镍磷工艺参数[J]. 材料保护, 2007, 40(9): 31—33.
- SHU Fu-hua. Optimized of Zn-Ni-P Alloy Electroplating Technological Parameter Based on ANN an GA[J]. Material Protection, 2007, 40(9): 31—33.
- [15] XU Y, ZHU Y, XIAO G, et al. Application of Artificial Neural Networks to Predict Corrosion Behavior of Ni-SiC Composite Coatings Deposited by Ultrasonic Electrodeposition[J]. Ceramics International, 2014, 40(4): 5425—5430.