

基于神经网络的镁合金微弧氧化膜厚动态监测

田庆涛, 马跃洲, 贾金龙, 王蕊

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:选择三层结构的BP神经网络,建立镁合金微弧氧化膜厚的映射模型。基于采用带放电回路的脉冲电源进行的镁合金微弧氧化的实验结果,讨论了微弧氧化的几个主要参数对膜层生长的影响关系,从而确定了神经网络的输入参数。通过工艺试验构造了训练与测试样本集。训练得到的BP神经网络的测试结果表明,利用神经网络的方法来实现对膜厚的动态监测是可行的。

关键词:镁合金;微弧氧化;膜层厚度;神经网络

中图分类号: TG174 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2011)06-0845-04

Dynamic Monitoring of Film Thickness of Micro-arc Oxidation on Magnesium Alloys Based on Neural Network

TIAN Qing-tao, MA Yue-zhou, JIA Jin-long, WANG Rui

(State Key Lab. of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The mapping model of film thickness of micro-arc oxidation (MAO) on magnesium alloys is built on BP neural network with three layer structure. Based on experimental results of magnesium alloy MAO under the pulse power supply with discharge loop, the affecting relations between film thickness and several main parameters of MAO were put forward, thus causing the input parameters of neural network to be determined. Then the training and testing samples were constructed through technical experiment. Finally, the testing results of BP neural network which was got through training proved that the method of dynamic monitoring of film thickness of MAO based on neural network was feasible.

Key words: Magnesium alloys; Micro-arc oxidation; Film thickness; Neural network

微弧氧化(Micro-arc Oxidation, MAO)是一种在金属表面原位生长陶瓷层的表面处理技术,它利用微小区域电弧放电产生瞬间局部高温,使金属表面氧化为金属氧化物陶瓷,从而达到表面改性的目的。镁合金微弧氧化是一个在热化学、等离子体化学和电化学的共同作用下,生成陶瓷层的过程,氧化膜的形成涉及很多未知的反应过程。各参数对镁合金微弧氧化膜层质量的影响不明确。影响镁合金微弧氧化成膜过程及膜层性能的因素很多,如电源输出方式和参数、电解液配方和成分、工件材料、表面状态、处理温度等诸多因素^[1-5]。膜厚作为衡量微弧氧化膜层性能的一个重要指标,直接影响着微弧氧化膜层的硬度、耐磨、耐蚀

等方面性能的好坏。而微弧氧化膜层的质量只能通过优化各工艺参数和微弧氧化完成之后的检验来保证,针对微弧氧化质量控制中的这一问题,本文基于对微弧氧化过程中的各主要参数与膜厚进行的相关性分析,利用神经网络构建映射模型,实现对膜厚的动态监测。

1 实验方法

实验如图1所示, U_1 和 U_2 分别代表输出功率 200 kW 和 20 kW、输出电压 V_1 和 V_2 为 0~500 V 和 0~200 V、电流 I_1 和 I_2 为 0~400 A 和 0~100 A 的双可调电压直流电源。 U_1 、 U_2 、 Q_1 和 Q_2 构成脉冲输出回路, Q_1 和 Q_2 为 IGBT 构成的斩波器,通过单片机系统控制 U_1 和 U_2 的输出电压、电流以及 Q_1 和 Q_2 的通断时序,可实现多种脉冲电源输出波形,包括正反极性的直流、单极性脉冲和双极性脉冲等。实验中,使 U_2 的输出恒定为零,交替导通 Q_1 和 Q_2 , Q_1 导通期间

收稿日期:2011-01-11; 修订日期:2011-02-23

基金项目:甘肃省科技重大专项资助项目(0702GKDA024)

作者简介:田庆涛(1985-),山东梁山人,硕士生,研究方向:微弧氧化。

Email: tianqingtao@163.com

输出电压 V_1 , Q_2 导通期间使负载电压箝位到零。这样,就可在负载呈电容性时,仍能获得近似方波的负载电压波形。由于这种电源形式的特性,使得 Q_2 导通时容性负载上的电压短路并释放,故称之为带放电回路的脉冲电源。

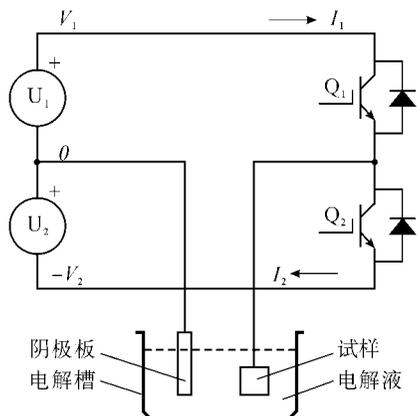


图 1 微弧氧化实验系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the MAO experimental system

试样材料采用 AZ91D 铸造镁合金,尺寸为 $\phi 30\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。实验前经 1 200 目砂纸打磨、清洗、风干。电解液配方:硅酸钠浓度为 13 g/L,氟化钾为 12 g/L,氢氧化钠为 4 g/L,采用化学级纯度,蒸馏水配制。阴极材料为厚度 1 mm 的 18-8 型不锈钢板。实验过程采用台阶式电压加载方式,每 20 V 为 1 个台阶,每 1 个台阶维持 2 min 的反应时间,并采集 1 个样本。膜层厚度的测量使用 TT260 数字式涂层测厚仪。

2 镁合金微弧氧化机理

2.1 微弧氧化过程的 3 阶段

通过实验发现,镁合金微弧氧化过程呈现 3 个阶段。

(1) 阳极氧化。实验电源电压在 160 V 以内,随电压升高镁合金试样和不锈钢阴极表面均有大量气泡逸出,表面的金属色逐渐消退,继而呈现灰白色。表明阳极氧化钝化膜的生长。

(2) 微弧氧化。电压 V_1 升至 160 V 附近,试样表面偶尔出现微小的亮白色弧斑,略微提高电压,会出现稳定的电弧放电火花斑点,阳极开始了镁合金的微弧氧化反应,即进入微弧氧化阶段。

(3) 大弧放电。随着电源电压的升高,弧斑亮度、尺寸和持续时间增加,而放电火花的数目有所减少。当电压超过一定数值后,会在一个或多个固定区域(多发于试样边缘或表面缺陷部位)形成持续的、明亮的、面积较大的电弧放电弧斑,称之为大弧。轻微的大弧会使试样表面出现白斑(疏松的氧化镁),严重时导致表面烧蚀。

2.2 微区电弧放电模型

本文认为,微弧氧化膜层是由一系列离散的微区电弧放电导致生成的金属氧化物堆积而形成。瞬间完成的微小区域内的电弧放电所产生的光热辐射,加之由其引发的剧烈的金属氧化反应所释放的热量,致使放电区域形成短时局部高温,使生成的氧化物熔融、并经历骤热骤冷式的微区热循环,同时伴随局部区域内膜层物质和基体金属的重熔和快速凝固,从而获得具有非平衡组织结构的金属氧化物膜层。

根据气体放电理论,结合镁合金微弧氧化的实验现象,提出了如图 2 所示的镁合金微弧氧化微区电弧放电模型,将单个微区放电划分为如下 4 个过程。

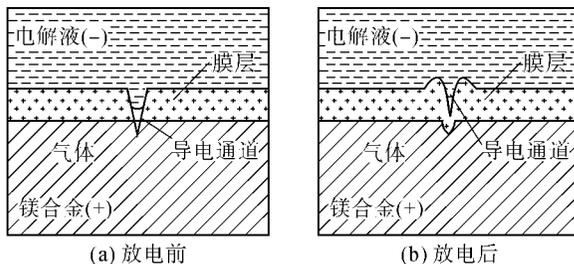


图 2 镁合金微弧氧化微区电弧放电模型

Fig.2 The separate arc discharge model of magnesium alloy micro-arc oxidation

(1) 电解。电解质水溶液的电解反应,使作为阳极的镁合金表面导电通道内析出气体。气体应为氧气为主成分的混合气体,可能包含少量由阳极氧化反应生成的氢气,并受电解液成分影响,实验条件下还可能存在氟气。金属表面无疑是由导电通道与溶液导电,通道的结构和形状尚不能精确描述,图 2a 中仅作示意。

(2) 放电。当析出的气体积累至填满导电通道后,气体会将导电通道与电解液隔绝,从而承受电源电压。电场强度随电压升高而增强,气体的电离度随之上升,当其达到某临界值时,引发气体放电。由于存在强烈的负阻效应,气体的电离度进一步提高,随电离度升高依次经历辉光、电弧、等离子放电等过程。

(3) 氧化。电弧放电在微小区域内瞬间释放的热量将导致局部高温,使通道内的金属镁剧烈氧化,氧化反应产生的热量进一步升高局部温度。温度升高使气体的电离能降低、电离度提高,这种自我强化作用使放电和氧化过程更加剧烈,瞬间完成,即所谓“雪崩”效应。最终将形成熔融态金属氧化物,同时使先前生成的氧化膜局部熔化,即产生重熔效应。由于熔融物的体积大于原通道容积,故将发生类似火山喷发的现象,将氧化物和少量基体金属喷至表面。氧化和放电实际

上是同时发生的。

(4) 冷却。当气体被氧化反应完全消耗后, 电弧放电和氧化反应戛然而止, 巨大的温差将使熔融态的金属氧化物急剧冷却, 体积收缩。由于沿导电通道向试样基体深入的方向通过镁合金传导散热, 其导热系数大, 具有强烈的冷却收缩作用, 故而留下类似火山口的向下延伸的表面孔洞, 如图 2b。

3 相关性分析

3.1 电压、电流与膜层生长的关系

根据微区电弧放电模型, 微弧氧化膜层是由一系列离散的微弧放电引起金属氧化反应生成的金属氧化物堆积而形成。电源电压的作用, 一方面是使水溶液电解(阳极氧化本质上是镁为阳极的水的电解反应), 在阳极表面的导电通道内产生气体; 另一方面是提供气体电离、击穿和电弧放电所需的电场强度。故电压是产生微弧氧化的必要条件, 是为微弧氧化“点火”。电源输出电流则是微弧氧化状态的反映, 有 3 方面的意义: ①代表水溶液电解反应的剧烈程度; ②反映单个微区电弧放电的剧烈程度; ③反映同时发生微弧放电的导电通道的数量多少。3 个方面都对膜层生长有作用, 电压与电流的比值即阻抗, 在一定程度上反映了膜厚的变化。图 3 为设定频率为 700 Hz、占空比为 20% 条件下进行微弧氧化实验, 所得到的拟合的负载平均阻抗、膜层厚度与微弧氧化处理时间的关系曲线。从图中可以看出, 随着膜厚的增加, 阻抗也不断增加。

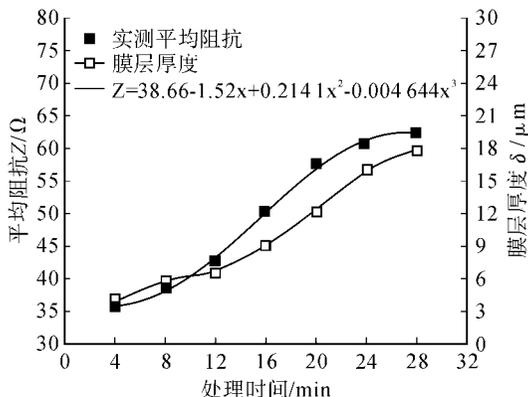


图 3 负载平均阻抗和膜层厚度与处理时间的关系

Fig. 3 Relationship of the average load impedance and coating thickness with the treating time

3.2 频率与占空比对膜厚的影响

脉冲占空比反映电源通电与断电的比例关系, 脉冲频率某种意义上表示通、断电的“节奏”。微弧氧化需要在适当的占空比和脉冲频率下进行。如果不考虑频率和占空比对微弧氧化大弧倾向的影响, 那么在一定范围内, 频率和占空比的大小反映了绝对处理时间

的长短和工作效率的高低, 从而影响膜层的成长。如图 4 所示, 在 20% 占空比的条件下, 频率为 800 Hz 比频率为 600 Hz 进行的微弧氧化的成膜效率要高。同样的, 在相同频率不同占空比条件下进行的微弧氧化实验, 膜厚与处理时间的关系呈现类似的趋势。

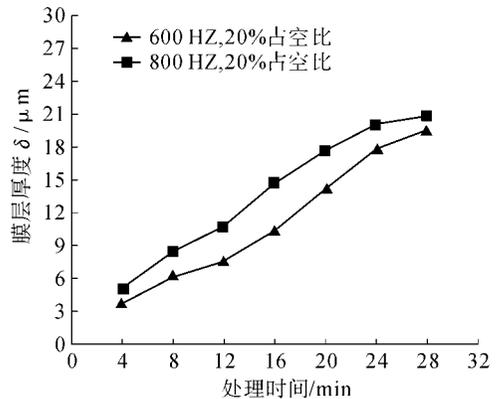


图 4 不同频率下膜层厚度与处理时间的关系比较

Fig. 4 Comparison on thickness change of the coatings with treating time under different frequencies

3.3 处理时间与膜厚的关系

从图 3 和图 4 可以看出, 随着处理时间的延长, 膜层由新生成的金属氧化物堆积而不断增厚。但是从图中也可以看出, 膜层厚度并不是随着时间的延长而线性增加的。在微弧氧化早期, 由于膜层较薄、通道浅, 故单个放电不剧烈, 很少有熔融物喷出, 因而膜层生长速率相对较低。随着膜层增厚, 浅层导电通道逐渐封闭, 满足微弧放电的通道数量减少, 深度和尺寸增加, 放电弧斑变的越来越大而且变得稀疏, 随着大量熔融物喷出, 成膜效率有所增加, 该时期膜层生长速度最快。到微弧氧化后期将以深层导电通道放电为主, 放电弧斑更大更少, 并伴随较大比例的重熔, 导致成膜效率开始降低。

3.4 其它因素

除电参数和处理时间外, 电解液体系是影响微弧氧化过程的最重要因素。实验是在电解液配方和浓度一定的情况下进行的, 因此电解液的温度成为一个影响膜厚变化的重要因素。电解液温度的高低直接影响着溶液的活性, 从而影响微弧氧化膜层形成的过程^[6]。

由此, 认为电压、电流、频率、占空比、处理时间和电解液温度是影响膜厚变化的几个主要因素, 从而确定为神经网络的输入参数。

4 神经网络建模

多层前向神经网络是最常用、最流行的神经网络模型, 其逼近能力和训练算法是其应用的关键。误差

反传算法(BP)是最著名的多层前向网络训练算法,尽管存在收敛速度慢、存在局部极值和泛化能力有限等缺点,但因其简单、计算量小和并行性强等特点,目前仍是多层前向神经网络训练的首选算法^[7]。网络的建模、训练和测试在 MATLAB 软件平台上进行。

4.1 模型结构

选择 3 层结构的 BP 神经网络建模。输入层为 7 个神经元,分别对应微弧氧化的频率、占空比、电压、正电流、负电流、温度以及时间等参数;输出层为 1 个神经元,即为膜厚;隐层节点数根据仿真训练和测试结果确定为 20 个。

4.2 训练与测试样本集

选取频率为 600 Hz、占空比为 20%,频率为 600 Hz、占空比为 40%以及频率为 800 Hz、占空比为 20%条件下获得的样本作为训练样本集;选取频率为 667 Hz、占空比为 20%条件下获得的样本作为测试样本集。

4.3 训练过程

BP 网络的训练函数取 trainlm,即 Levenberg-Marquardt 反向传播算法,trainlm 函数依据 Levenberg-Marquardt 优化理论对网络的权值和阈值进行调整。收敛均方误差(MSE)设为 10^{-6} ,最大训练步数设为 10^4 。当训练步数大于 net.trainParam.epochs 或训练误差小于 net.trainParam.goal 时,训练将自动终止,并返回训练后的神经网络对象。训练时的性能变化曲线如图 5 所示。

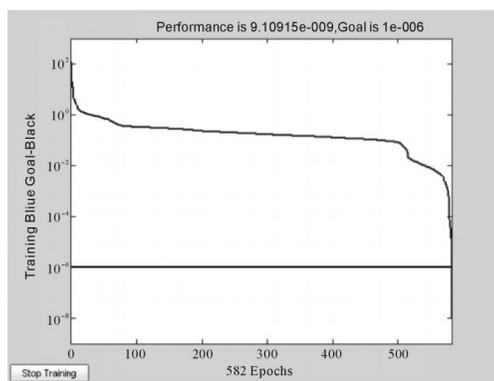


图 5 训练过程的性能变化曲线

Fig. 5 Performance curve of training process

4.4 测试结果

用测试样本集对 MSE 取 10^{-6} 时训练的网络模型的一组测试结果见表 1。表中数据显示,网络预测的膜厚与实测值误差的最大值为 13.03%,最小值为

1.22%,平均值为 7.5%,在 $\pm 10\%$ 以内的样本约占 75%,而所有样本的误差均在 $\pm 20\%$ 以内。

表 1 BP 神经网络预测模型的测试结果

Tab. 1 The test results of BP neural network predictive model

样本编号	1	2	3	4	5	6	7	8
测量膜厚/ μm	5.90	7.50	8.00	9.10	10.50	11.60	13.10	15.80
预测膜厚/ μm	6.32	8.01	8.10	10.12	11.86	12.45	14.21	16.55
误差(%)	7.00	6.86	1.22	11.27	13.03	7.40	8.53	4.76

5 结论

(1) 镁合金微弧氧化过程随着电压的升高呈现明显的 3 个阶段:阳极氧化、微弧氧化和大弧放电。微弧氧化膜层是由一系列离散的微区电弧放电生成的金属氧化物累积形成。单个微区放电可划分为电解、放电、氧化、冷却 4 个过程。

(2) BP 神经网络模型的测试结果表明,电压、电流、频率、占空比、温度和处理时间这几个参数与膜厚的变化是密切相关的。

(3) 利用膜厚的几个主要影响因素构造向量,训练的 BP 神经网络能够在一定程度上映射镁合金微弧氧化膜厚的大小,并具有较好的泛化能力。利用神经网络的方法来实现对膜厚的动态监测是可行的。

参考文献

- [1] Curran J A, Clyne T W. Thermo-physical properties of plasma electrolytic oxide coatings on aluminium [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 199: 168-176.
- [2] Xue W B, Wang C, Tian H. Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201: 8 695-8 701.
- [3] 蒋百灵,张淑芬,吴国建,等. 镁合金微弧氧化陶瓷层纤维缺陷与相组成及耐蚀性[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12 (3): 454-457.
- [4] 郝建民,陈宏,张荣军,等. 镁合金微弧氧化陶瓷层的耐蚀性[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 988-991.
- [5] 李卫平,朱立群. 镁及其合金表面防护涂层国外研究进展 [J], 材料保护, 2005, 38(2): 18-19.
- [6] 马跃洲,马凤杰,陈明,等. 电解液温度对镁合金微弧氧化成膜过程的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(3): 25-28.
- [7] 王学武,谭得健. 神经网络的应用与发展趋势[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(3): 98-100.