

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190225001

AZ91D 镁合金 Ni-W-P 多层化学镀层的摩擦磨损及耐腐蚀性能

刘 静¹, 张 涛², 张曰涛³, 邵亚薇³, 孟国哲³, 王福会²

(1. 武汉科技大学, 耐火材料与冶金国家重点实验室, 湖北省冶金工业过程系统科学重点实验室, 武汉 430081; 2. 东北大学沈阳材料科学国家实验室, 沈阳 110819; 3. 哈尔滨工程大学 超轻材料与表面技术教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 采用多层化学镀工艺在 AZ91D 镁合金表面成功制备了 Ni-W-P 多层化学镀层。通过 XRD、SEM、摩擦磨损实验以及电化学分析测试等方法, 对比研究了普通单层化学镀试样与多层化学镀试样的显微结构、摩擦磨损性能以及耐腐蚀性能。结果表明: 多层化学镀层的摩擦因数、维氏硬度及磨损速率与单层化学镀层大体相当, 分别为 0.33, 933 HV 和 1.46 mg/Km, 保留了单层化学镀层优异的耐磨损性能。此外, 多层化学镀层的孔隙率较单层化学镀层降低了 2 个数量级, 涂层更为致密。与普通单层化学镀层相比, 多层化学镀层的耐蚀性能显著提高, 其腐蚀电位和击破电位分别提高了 168 和 209 mV, 钝化电流密度由 $4.212 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 降低至 $1.306 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。因此, 多层化学镀层有望成为 AZ91D 镁合金更有前景的耐磨耐蚀防护涂层。

关键词: 多层化学镀; Ni-W-P 镀层; 摩擦磨损性能; 耐蚀性能

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)04-0053-10

Friction, Wear and Corrosion Resistance of Multi-layer Electroless Ni-W-P Coating on AZ91D Magnesium Alloy

LIU Jing¹, ZHANG Tao², ZHANG Yuetao³, SHAO Yawei³, MENG Guozhe³, WANG Fuhui²

(1. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Institute of advanced marine materials, Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The multi-layer Ni-W-P electroless coating was successfully prepared on surface of AZ91D magnesium alloy. Microstructure, friction, wear and corrosion resistance of both the normal as-plated and multi-layer coatings were investigated comparatively by XRD, SEM, friction and wear tests, and electrochemical experiments. Results show that the wear coefficient, Vickers hardness and wear rate of multi-layer coating are still keeping the same as those of as-plated coating, which are 0.33, 933 HV and 1.46 mg/Km, respectively. The multi-layer electroless coating completely retains the excellent mechanical properties of the as-plated coating. In addition, the porosity of multi-layer coating is two orders of magnitude lower than that of the ordinary as-plated coating, signifying a denser coating for multi-layer electroless coating. Comparing with the as-plated coating, the corrosion resistance of multilayer coating is improved significantly. The corrosion potential (E_{corr}) and breakdown potential (E_b) of multi-layer coating are increased by 168 mV and 209 mV respectively, and the passivation current density (i_{corr}) is reduced from 4.212 to $1.306 \mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. Therefore, multi-layer electroless coating is expected to be a more promising wear-resistant and corrosion-resistant coating for AZ91D magnesium alloys.

Keywords: multi-layer electroless; Ni-W-P coating; friction and wear resistance; corrosion resistance

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-07-12

通信作者: 张涛(1977—), 男(汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料腐蚀与防护; E-mail: zhangtao@mail.neu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51601137)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51601137)

引用格式: 刘静, 张涛, 张曰涛, 等. AZ91D 镁合金 Ni-W-P 多层化学镀层的摩擦磨损及耐腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(4): 53-62.

LIU J, ZHANG T, ZHANG Y T, et al. Friction, wear and corrosion resistance of multi-layer electroless Ni-W-P coating on AZ91D magnesium alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(4): 53-62.

0 引言

在众多轻合金中，镁合金具有高比刚度、良好的热传导性和生物相容性、以及容易回收再利用等优异的工程特性，因此在汽车和航天工业中具有较大的应用前景^[1-6]。然而，镁及其合金的耐腐蚀能力和耐磨损能力较差，使其在应用前需要先进行必要的表面处理。有效的表面防护技术主要包括：化学转化^[7]、阳极氧化^[8-9]、化学镀^[10-12]、PVD^[13]以及激光熔覆^[14]等等。而在众多的表面防护技术中，化学镀层具有优异的耐腐蚀性能、耐磨损性能、热传导性能和电磁屏蔽性能^[15-16]。

Ni-P 化学镀层较为均匀质量较好，且对基体是否具有传导性和几何尺寸没有特殊要求，已广泛应用于许多工业生产中。因此，在此二元镍基合金镀层基础上，科研工作者通过在镍盐溶液中加入第二种金属盐，制备出三元镍基合金镀层，例如 Ni-Cu-P^[17-20]、Ni-W-P^[21-27]、Ni-Mo-P^[28]、Ni-Fe-P^[29-30] 以及 Ni-Sn-P^[31] 镀层等，进一步提高了 Ni-P 镀层的耐腐蚀性能和耐磨损性能，以满足特殊需求。在众多合金元素中，W 元素因具有较高的硬度、优异的耐腐蚀性能和较高的熔点而发挥重要作用。

由于镁合金是电化学活性极强的金属，镍基合金镀层作为阴极性保护镀层，其仅能为镁合金基体提供物理性屏障阻碍镁基体的腐蚀。一旦腐蚀性溶液从镀层的孔隙处渗入进基体表面，在电偶腐蚀的作用下，镁合金将受到严重的腐蚀。因此，为了消除镍基化学镀层的孔隙，文中制备了包含三层结构的多层化学镀层，该设计思路如图 1 所示。

首先，将镁合金试样在 Ni-W-P 镀液中进行化学沉积，随后将试样进行热处理。热处理使得 Ni-W-P 化学镀层氧化，形成的氧化物将覆盖此镀层的活性位点使其失去活性。然后，再次将试样浸入溶液中进行化学镀，Ni-W-P 的核心将在金属表面的其他活性位点形核并长大，形成新的化学镀层表面。该新的表面某种程度上消除了之前化学镀层遗留的孔隙，如此往复循环，镀层的孔隙率将大幅降低，其耐腐蚀性能显著提高。

文中主要目的是通过制备 Ni-W-P 多层化学镀层，在保持其机械性能不变的情况下，显著提高 AZ91D 镁合金的耐腐蚀性能。

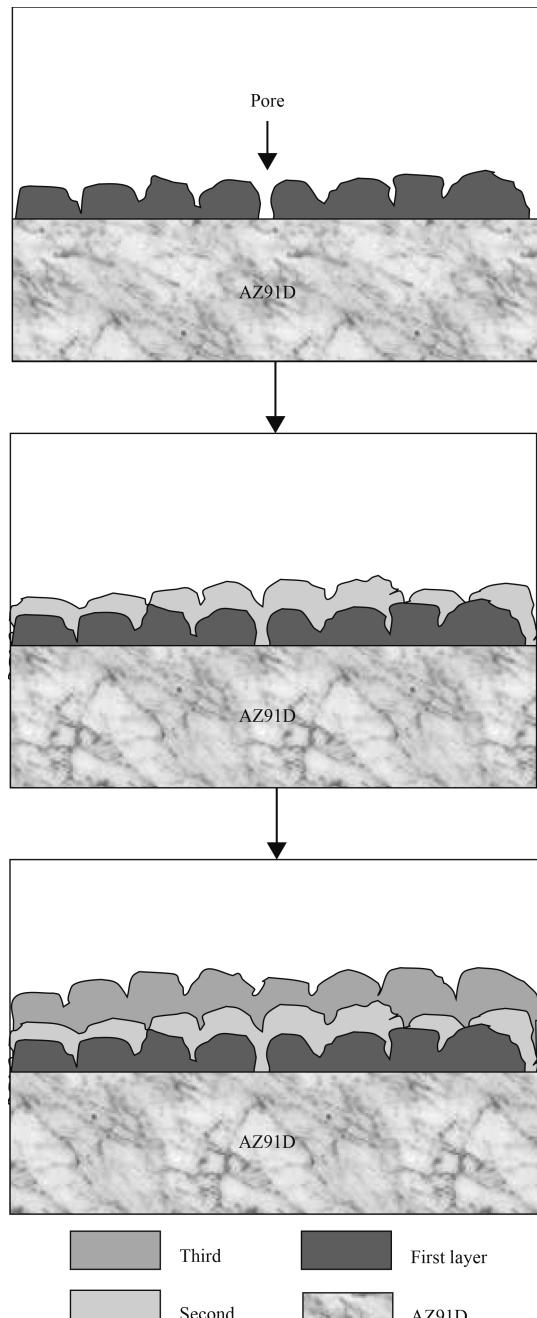


图 1 多层化学镀工艺耐蚀原理示意图

Fig.1 Schematic illustrations of the anti-corrosion mechanism for multi-layer electroless deposition

1 材料与方法

1.1 试样制备

所使用的试样是铸态 AZ91D 镁合金，尺寸为 10 mm×20 mm×3 mm。试验前，所有试样均经过 7.5 μm 砂纸打磨处理，并用酒精清洗、去离子水清洗干净，吹干备用。Ni-W-P 多层化学镀工艺流程简图如图 2 所示。

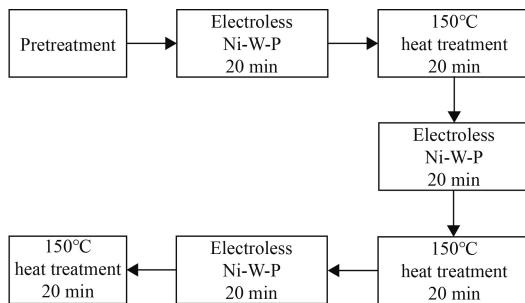


图 2 Ni-W-P 多层化学镀工艺流程简图

Fig.2 Process diagram of electroless for Ni-W-P multi-layer deposition

表 1 预处理和 Ni-W-P 化学镀工艺的操作条件及溶液成分

Table 1 Operating conditions and bath compositions of pretreatment and Ni-W-P electroless deposition process

Operation	Bath composition	Content	Condition
Degreasing	Acetone		Ultrasonic treatment, 5 min
Alkaline cleaning	NaOH Na ₃ PO ₄	60 g/L 20 g/L	60 °C, 10 min
Pretreatment	H ₃ PO ₄ NH ₄ HF ₂ H ₃ BO ₃	20 mL/L 60 g/L 30 g/L	Room temperature, 25 °C
Electroless Ni-W-P deposition	NiSO ₄ ·6H ₂ O NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O Na ₂ CO ₃ Na ₂ WO ₄ Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ ·H ₂ O NH ₄ HF ₂	20 g/L 40 g/L 50 g/L 7.6 g/L 30 g/L 6 g/L	pH=(9.085±2) Ultrasonic treatment, 1 h

1.2 显微结构表征

采用 XRD(X' Pert PRO, Holland) 技术分别表征 Ni-W-P 单层和多层化学镀试样的结构, 其中 Cu 靶 Ka 射线波长 $\lambda=1.54178 \text{ \AA}$ 。用配有能量色散谱仪 (EDS, INC250) 的扫描电子显微镜 (SEM, JEOL JSM-5310, Japan) 观察化学镀试样的表面和截面形貌, 并定性分析镀层的化学元素含量。采用 HXD-1000 微观硬度仪测量单层和多层化学镀层的维氏硬度, 取每种试样 5 个位置硬度的平均值并计算误差棒, 其中载荷 200 g, 持续时间 15 s。

1.3 摩擦磨损实验

摩擦磨损实验在室温下进行, 全程无添加润滑剂。摩擦磨损试验仪参数设置为转速 300 r/min、半径 2 mm、载荷 4 N, 其中滚球采用 GCr15 钢 (HV=800) 制作, 直径为 6.35 mm。每组试验持续 20 min, 累计摩擦磨损长度为 37.68 m。

试验过程中, 电脑自动记录摩擦因数随时间

预处理和 Ni-W-P 化学镀工艺的操作条件及溶液成分如表 1 所示, 其中溶液所使用的试剂为分析纯级别。经过化学镀 Ni-W-P 工艺后, 镁合金试样进行热处理, 试样在马弗炉中经 150 °C 低温退火 1 h 后, 立即在空气中冷却至室温。

试验中, 将普通的单层 Ni-W-P 化学镀试样作为对比样, 其制备工艺与热处理工艺与图 2 中流程一致, 均需进行砂纸打磨处理、清洗、预处理等操作。单层化学镀的操作条件、溶液成分等与表 1 一致, 镀层厚度与多层镀层相近。

表 1 预处理和 Ni-W-P 化学镀工艺的操作条件及溶液成分

的变化。试验结束后, 超声清洗并称量试样的失重量 (精确至 0.01 mg) 以此计算耐磨损性能, 采用 SEM 观察化学镀层的磨损表面。每组实验平行 3 次取平均值。

1.4 腐蚀实验

腐蚀电化学实验在 Zahner IM6ex 电化学工作站上进行, 采用三电极体系, 其中铂片 (20 mm×20 mm) 作对电极、Ag/AgCl 电极作参比电极, 测试溶液为质量分数 3.5% NaCl 水溶液。极化曲线的扫描速度 0.333 mV/s。电化学阻抗谱 (EIS) 扫描的频率范围 100 kHz~10 mHz, 正弦扰动电压 5 mV, 商业软件 ZsimpWin 用于 EIS 数据分析。

2 结果与讨论

2.1 显微结构

AZ91D 镁合金基体的 XRD 衍射花斑如图 3(a)

所示, AZ91D 镁合金由 α -Mg 基体和 β -Mg₁₇Al₁₂ 相组成。图 3(b) 为在游离铬酸盐溶液中预处理后的镁合金试样的 XRD 衍射花斑。预处理后, MgF₂ 的峰显现出来, 同时, β 相的强度加强而 α 相的强度减弱, 这表明基体表面 β 相的含量增多, 这将有利于 Ni-W-P 合金在镁基体表面的沉积。镁合金试样经过单层和多层化学镀后, 其 XRD 衍射花斑差异不大。对于单层 Ni-W-P 化学镀层(图 3(c)), 镀层中含有一个强度最高的(111)晶面的宽化峰, 还有两个强度较低的 Ni(200) 和 (220) 晶面的峰。在 Ni-W-P 多层化学镀层中(图 3(d))也观察到了 Ni 元素的低强度峰, 这表明了结晶程度的降低^[32], 并且单层和多层镀层中均含有微晶结构。

单层和多层 Ni-W-P 化学镀层的表面形貌如

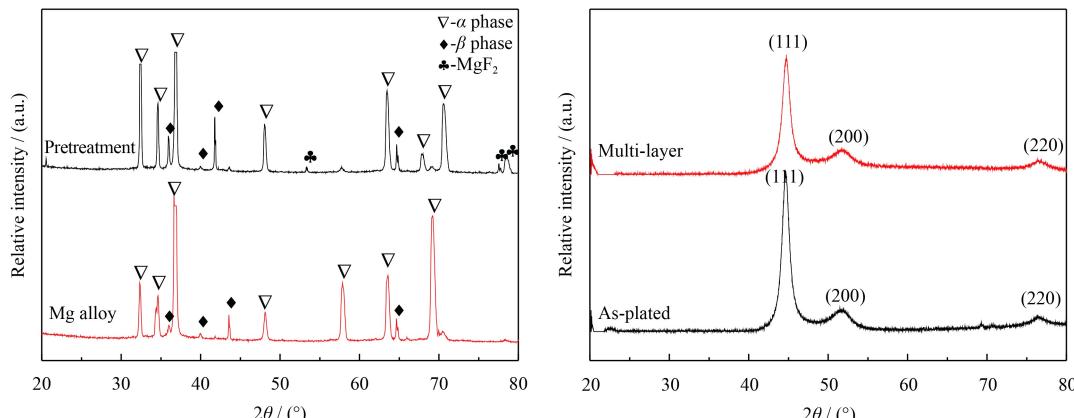


图 3 镁合金基体、预处理试样、普通单层及多层 Ni-W-P 化学镀试样的 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of Mg alloy matrix, pretreatment specimen, as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

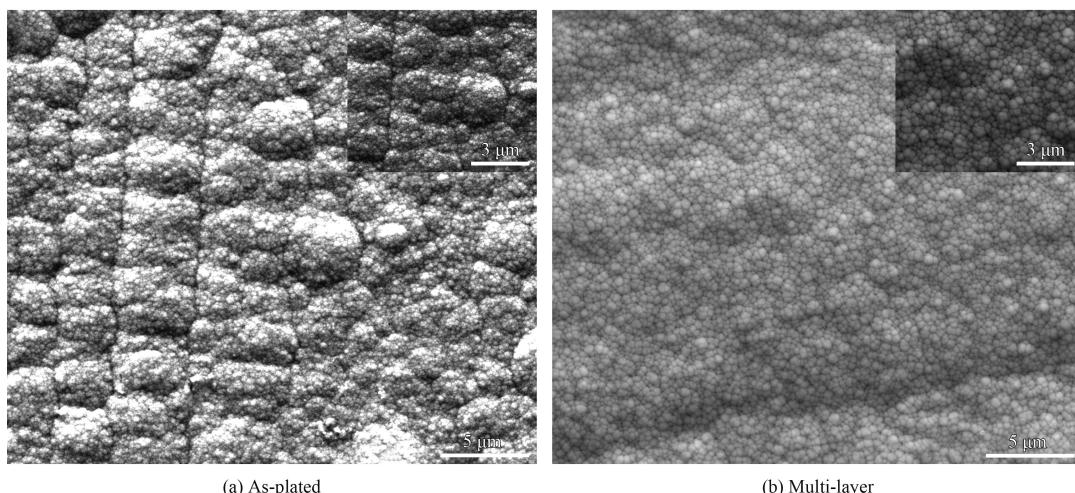


图 4 Ni-W-P 单层化学镀层和多层化学镀层的表面形貌

Fig.4 Surface morphologies of as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

图 4 所示。单层的化学镀层呈现出半球状颗粒形貌, 并含有尺度约为 100 nm 的常规的结节结构(图 4(a)(b))。然而, 多层化学镀层的表面含有较大的结节结构(图 4(c)(d)), 尺度约为 500 nm, 但总体来看, 其表面的粗糙度得到了很大的改善。

单层和多层 Ni-W-P 化学镀层的截面形貌如图 5 所示。单层和多层化学镀层的厚度分别约为 30 和 23 μm, 且都较为致密。从两种化学镀试样元素分布的线扫描结果中可以看出, W 元素在两种镀层中的分布较为均匀一致, 质量分数约为 1.5%; 单层镀层中 P 含量(质量分数, 下同)从镀层表面到基体由 6% 逐渐降低至 3%, 而多层镀层中 P 元素的含量较为均匀不随厚度改变, 保持 5% 不变。

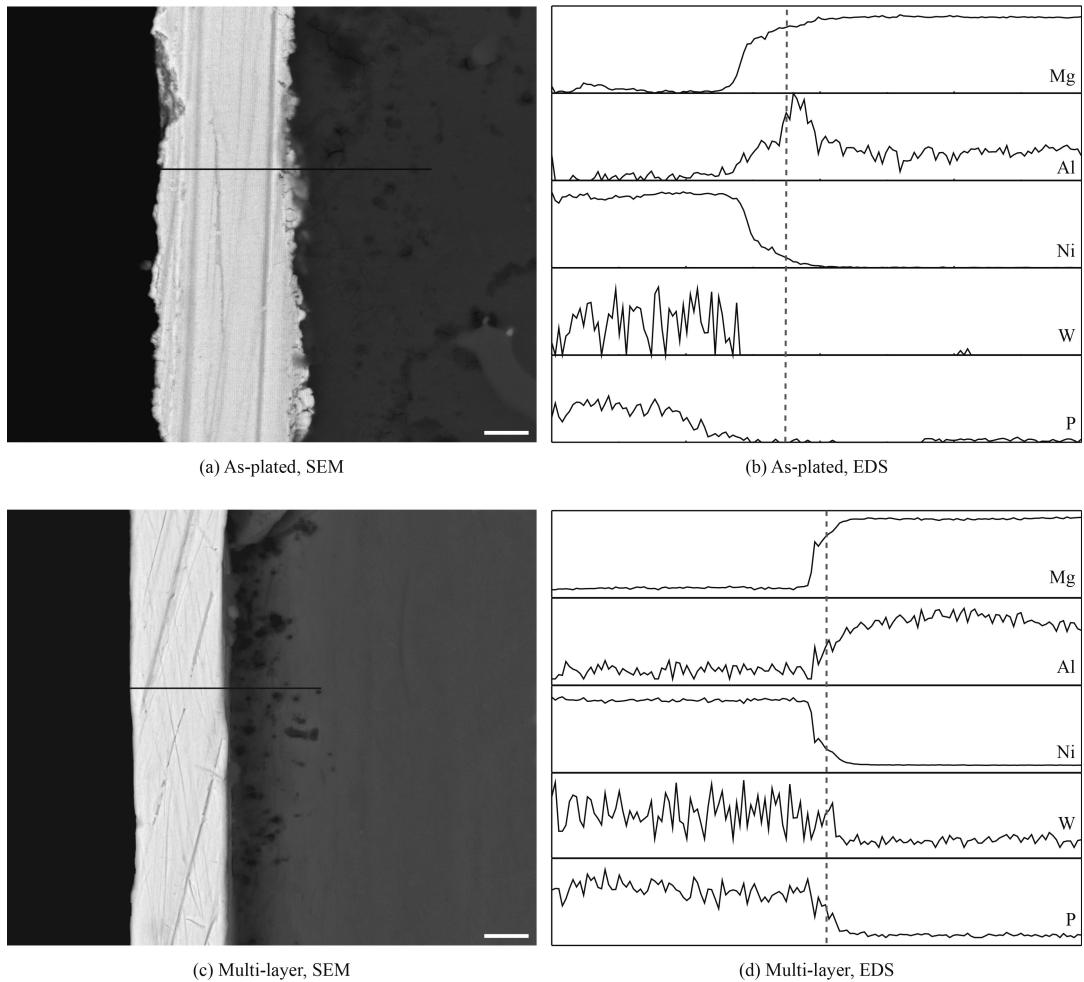


图 5 单层化学镀试样和多层化学镀试样的截面形貌及线扫描能谱

Fig.5 Cross-section morphologies and EDS results of as-plated and multi-layer coatings

2.2 摩擦磨损性能

图 6 为无润滑剂条件下单层和多层 Ni-W-P 化学镀层的摩擦因数。由图 6 可以将摩擦曲线分为两个阶段, 第一阶段为摩擦因数快速增长阶

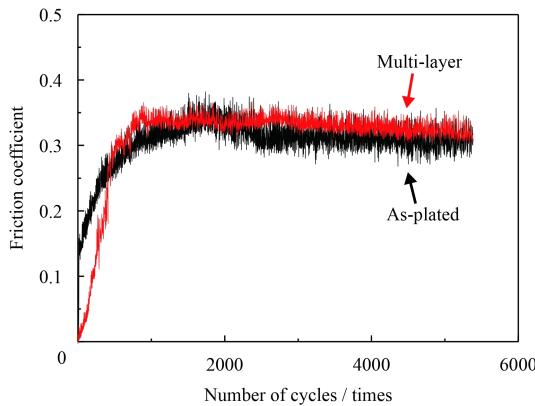


图 6 Ni-W-P 单层和多层化学镀层的摩擦因数

Fig.6 Friction coefficient of as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

段, 第二阶段为摩擦因数平稳波动阶段。对于单层化学镀层, 经过 1200 圈摩擦磨损之后, 摩擦因数稳定维持在 0.30~0.33。然而对于多层化学镀层, 由于有较低的表面粗糙度, 在第一阶段表现出较低的摩擦因数; 随着摩擦继续进行, 摩擦因数随后升至平稳阶段, 并维持在 0.33 左右, 大体与单层镀层相当。

对于提高化学镀层的耐机械磨损性能而言, 一个重要的参数是硬度。图 7 为化学镀层的微观硬度和磨损速率, 从中可以看出, 单层和多层化学镀层的微观硬度分别为 960 和 933 HV。经过磨损实验后, 通过失重量评估了两种镀层的磨损速率, 分别为 1.33 mg/Km 和 1.46 mg/Km, 这与微观硬度的结果一致, Ni-W-P 多层化学镀层的磨损速率略高于单层镀层可能与其硬度略低有关。

图 8 为摩擦磨损实验后两种镀层的表面形貌, 从图 8(b) 和 8(d) 的高放大倍率图中可以看

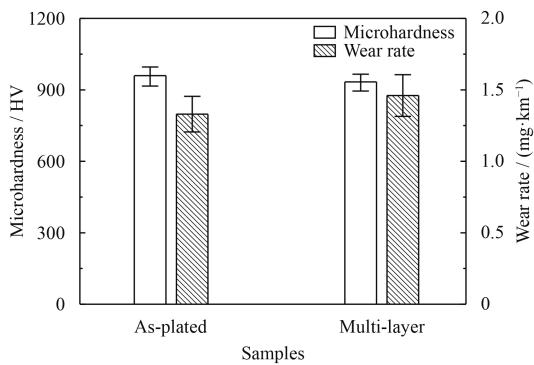


图 7 Ni-W-P 单层和多层化学镀层的微观硬度和磨损速率

Fig.7 Microhardness and wear rate of as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

出，两种镀层的磨损表面均是较为光滑平整的，仅略带有一些浅的沟壑和小颗粒，这是黏着磨损的典型形貌。黏着磨损的特征是材料从一种物体的表面转移至另一物体表面^[33]。对图 8(b) 中磨损

痕迹的 A 区域和图 8(d) 中磨损痕迹的 B 区域进行 EDS 分析，结果见图 9，从中可以看出单层镀层和多层镀层含有相似的成分，即 O、Ni 含量(原子数分数，下同)较高约为 45~46% 和 40~43%，而 Fe 含量较低约为 9~10%。

结合以上结果，可以得出如下摩擦磨损机理：首先，在滑动摩擦过程中，由于滚球和化学镀层的硬度差异，滚球和镀层都会脱落一些小碎屑，摩擦生热使得这些碎屑随即被氧化成氧化物；其次，在接触应力和摩擦加热的共同作用下，滚球的一部分接触面将被氧化，进一步的应力循环导致了氧化铁的破碎^[34]。由此，铁和镍的氧化物碎屑在滚球和镀层间堆积，形成了黏着磨损的形貌。值得一提的是，氧化物碎屑还可作为界面润滑剂，因此导致两种化学镀层的摩擦系数较低。

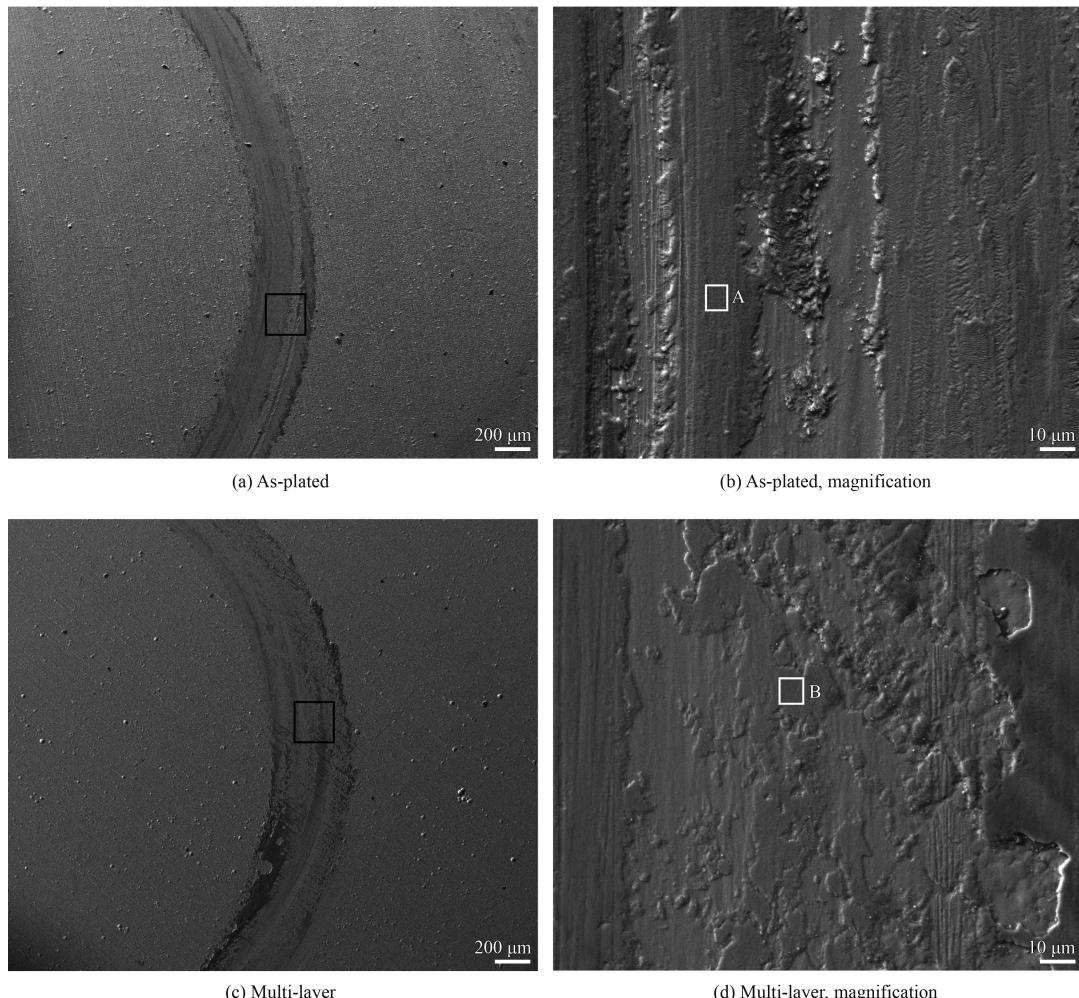


图 8 Ni-W-P 单层化学镀层和多层化学镀层的磨损表面形貌

Fig.8 Worn surface morphologies of as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

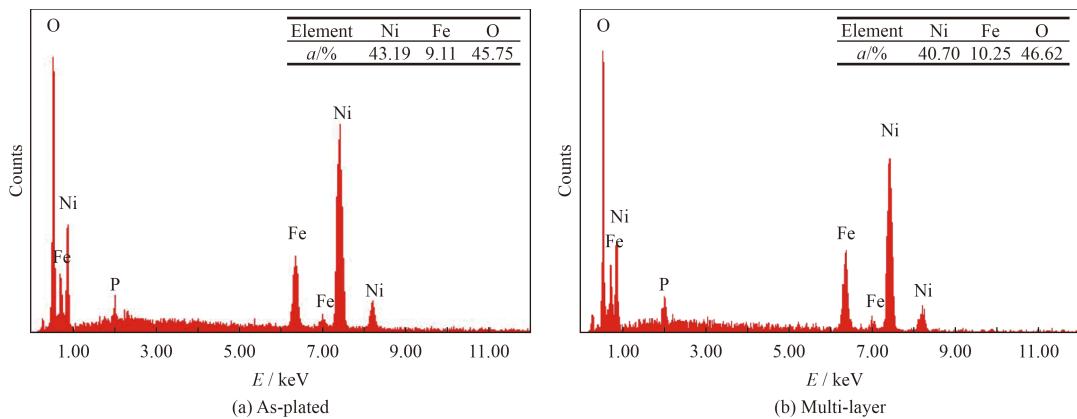


图 9 Ni-W-P 单层化学镀层和多层化学镀层磨损表面的 EDS 结果

Fig.9 EDS results of worn surfaces for as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

上述结果表明, Ni-W-P 多层化学镀层的微观硬度和耐磨性能较单层化学镀层仅有略微降低, 完全保留了单层化学镀层优异的机械性能。

2.3 耐腐蚀性能

AZ91D 镁合金基体及其单层、多层化学镀试样的动电位极化曲线如图 10 所示。可以看出三者的阳极曲线表现出不同的特性, 单层、多层化学镀试样的阳极曲线呈现出自钝化的特征, 然而 AZ91D 镁合金基体的阳极区表现出活性溶解的状态。极化曲线的拟合结果如表 2 所示, 可以看出: ①单层、多层化学镀试样的腐蚀电位 (E_{corr}) 远高于镁合金基体, 这表明化学镀层完好地覆盖了基体表面并显著提高了 AZ91D 镁合金的耐腐蚀性; ②多层化学镀试样的腐蚀电位 (E_{corr})、击破电位 (E_b) 高于单层化学镀试样, 且钝化电流密度 (i_{pass}) 进一步降低, 这表明 Ni-W-P 多层化学镀

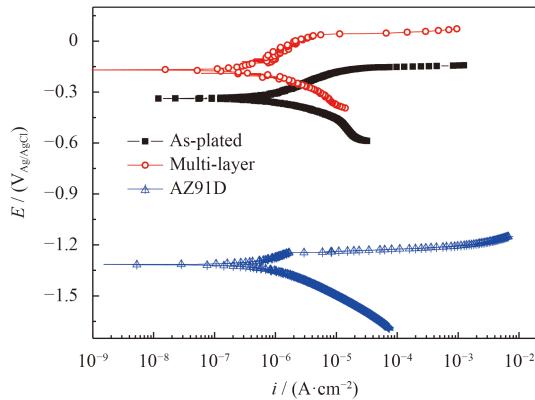


图 10 AZ91D 镁合金基体及其单层、多层化学镀试样的动电位极化曲线

Fig.10 Potentiodynamic polarization curves of AZ91D Mg matrix, as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

表 2 动电位极化曲线的电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of the potentiodynamic polarization curves

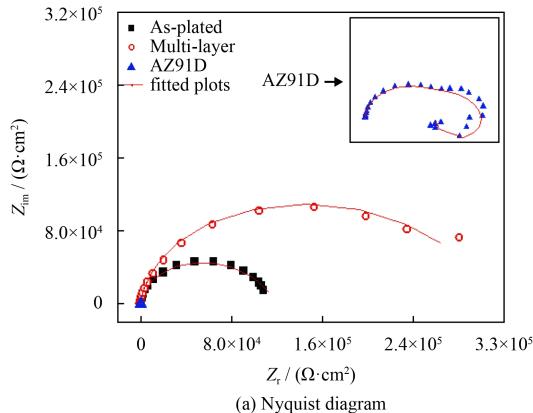
Specimens	AZ91D	As-plated	Multi-layer
Corrosion potential E_{corr} (V _{Ag/AgCl})	-1.364	-0.338	-0.17
Breakdown potential E_b (V _{Ag/AgCl})		-0.173	0.036
Passive current density i_{pass} (μA·cm ⁻²)		4.212	1.306
Andoic Tafel slope b_a (V·dec ⁻¹)	0.11		

试样较普通的单层化学镀试样具有更高的耐腐蚀性。

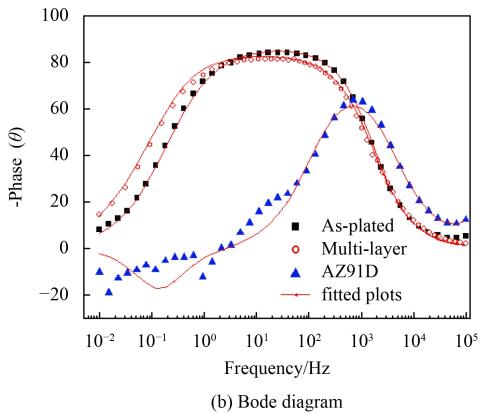
AZ91D 镁合金基体及其单层、多层化学镀试样的 EIS 测量结果如图 11 所示。AZ91D 镁合金基体呈现出两个高频的容抗弧和一个低频的感抗弧特征, 而其单层、多层化学镀试样则表现出一个高频的容抗弧和一个低频的容抗弧特征。通常情况下, 阻抗弧的膜值大小常被用来评价材料的耐腐蚀性能。

采用如图 12 所示的等效电路对 EIS 结果进行拟合。对于化学镀试样而言, 其 EIS 的等效电路由两个 $R-Q$ 组件与溶液电阻 R_s 串联组成, 其中 R_{film} 是化学镀层的膜层电阻与镀层电容 Q_{film} 并联, 电荷转移电阻 R_t 与双电层电容 Q_{dl} 并联。AZ91D 镁合金基体的等效电路图如图 12(a) 所示, 在化学镀试样的等效电路基础上添加了电感 L 和电阻 R_L 。

表 3 总结了极化电阻 R_p 的拟合结果, 极化电阻按如下降序排列: 多层化学镀试样 ($R_p=2.8\times 10^5$)>单层化学镀试样 ($R_p=1.1\times 10^5$)>>镁合金基体



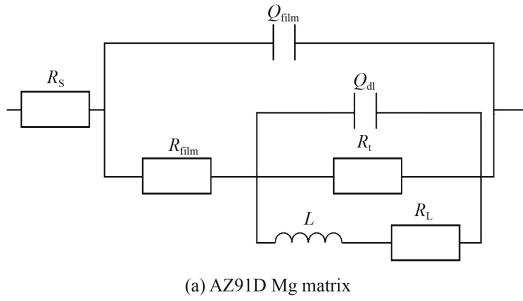
(a) Nyquist diagram



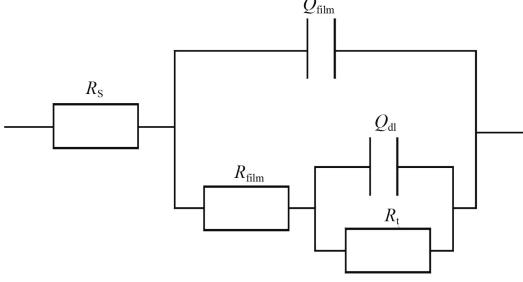
(b) Bode diagram

图 11 AZ91D 镁合金基体及其单层、多层化学镀试样的电化学阻抗谱

Fig.11 EIS of AZ91D Mg matrix, as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings



(a) AZ91D Mg matrix



(b) As-plated and multi-layer

图 12 AZ91D 镁合金基体和多层化学镀试样电化学阻抗谱的等效拟合电路

Fig.12 Equivalent fitting circuits of AZ91D Mg matrix and as-plated, multi-layer electroless Ni-W-P coatings

表 3 电化学阻抗谱极化电阻 R_p 拟合结果

Table 3 Fitting values of the polarization resistance (R_p) in EIS

Samples	AZ91D	As-plated	Multi-layer
$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	700	1.1×10^5	2.8×10^5

($R_p=700$)。此结果与动电位极化曲线结果一致, 这表明, 化学镀层能显著提高镁合金的耐腐蚀性能且多层化学镀层的耐蚀性更优异。

镀层孔隙率的高低也是衡量其耐蚀性的一个重要参数, 孔隙率可以由如下公式计算得出^[33]:

$$P = \left(\frac{R_p, \text{AZ91D}}{R_p} \right) \times 10^{-\frac{|\Delta E_{\text{corr}}|}{b_a}} \quad (1)$$

其中, P 代表孔隙率, R_p 是化学镀试样的极化电阻, $R_p, \text{AZ91D}$ 和 b_a 分别为 AZ91D 镁合金基体的极化电阻和塔菲尔斜率(可从极化曲线中获得此参数), ΔE_{corr} 为 AZ91D 镁合金化学镀试样和基体试样的腐蚀电位差。根据公式(1), 普通单层化学镀层和多层化学镀层的孔隙率的计算结果如表 4 所示。

表 4 普通单层化学镀层和多层化学镀层的孔隙率

Table 4 Porosity of as-plated and multi-layer electroless Ni-W-P coatings

Coatings	As-plated	Multi-layer
Porosity/%	4.06×10^{-9}	5.14×10^{-11}

可以看出, 多层化学镀层的孔隙率低于单层化学镀层 2 个数量级, 通常情况下在多层化学镀层中不会出现贯穿的孔隙, 腐蚀性溶液渗透浸入镁合金基体表面更难进行或需更长时间, 因此 Ni-W-P 多层化学镀层能够显著提高 AZ91D 镁合金的耐蚀性。

3 结 论

在 AZ91D 镁合金基体上成功制备出含有微晶结构的 Ni-W-P 多层化学镀层。

(1)Ni-W-P 多层化学镀层的微观硬度和磨损速率分别为 933 HV 和 1.46 mg/Km, 多层化学镀层保留了单层化学镀层优良的机械性能。

(2)与单层化学镀试样相比, 多层化学镀涂层的孔隙率降低了 2 个数量级, 其腐蚀电位由原来的 $-0.338 \text{ V}_{\text{vs. Ag/AgCl}}$ 提高到 $-0.170 \text{ V}_{\text{vs. Ag/AgCl}}$, 击破电位由 $-0.173 \text{ V}_{\text{vs. Ag/AgCl}}$ 提高到 $0.036 \text{ V}_{\text{vs. Ag/AgCl}}$,

并且钝化电流密度由 $4.212 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降低至 $1.306 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 这表明多层化学镀层具有更高的耐蚀性, 是一种更有前景的 AZ91D 镁合金耐蚀镀层。

参考文献

- [1] YU X W, JIANG B, HE J J, et al. Oxidation resistance of Mg-Y alloys at elevated temperatures and the protection performance of the oxide films[J]. *Journal of Alloys and Compound*, 2018, 749: 1054-1062.
- [2] ZENG R C, SUN L, ZHENG Y F, et al. Corrosion and characterization of dual phase Mg-Li-Ca alloy in Hank's solution: The influence of microstructural features[J]. *Corrosion Science*, 2014, 79: 69-82.
- [3] CAO F R, ZHOU B J, DING X, et al. Mechanical properties and microstructural evolution in a superlight Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y alloy fabricated by rolling[J]. *Journal of Alloys and Compound*, 2018, 745: 436-445.
- [4] PAN F S, YANG M B, CHEN X H. A Review on casting magnesium alloys: Modification of commercial alloys and development of new alloys[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(12): 1211-1221.
- [5] XU J, GUAN B, YU H H, et al. Effect of twin boundary-dislocation-solute interaction on detwinning in a Mg-3Al-1Zn alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2016, 32(12): 1239-1244.
- [6] SRINIVASAN A, BLAWERT C, HUANG Y, et al. Corrosion behavior of Mg-Gd-Zn based alloys in aqueous NaCl solution[J]. *Journal of Magnesium Alloys*, 2014, 2(3): 245-256.
- [7] ZHAO M, WU S S, AN P, et al. Growth of multi-elements complex coating on AZ91D magnesium alloy through conversion treatment[J]. *Journal of Alloys and Compound*, 2007, 427(1-2): 310-315.
- [8] CHEN M A, CHENG N, OU Y C, et al. Corrosion performance of electroless Ni-P on polymer coating of MAO coated AZ31 magnesium alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 232: 726-733.
- [9] CHEN F, ZHOU H, YAO B, et al. Corrosion resistance property of the ceramic coating obtained through microarc oxidation on the AZ31 magnesium alloy surfaces[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 201(9-11): 4905-4908.
- [10] LEI X P, YU G, GAO X L, et al. A study of chromium-free pickling process before electroless Ni-P plating on magnesium alloys[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(16): 4058-4063.
- [11] WANG H L, LIU L Y, DOU Y, et al. Preparation and corrosion resistance of electroless Ni-P/SiC functionally gradient coatings on AZ91D magnesium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 286: 319-327.
- [12] LIAN J S, LI G Y, NIU L Y, et al. Electroless Ni-P deposition plus zinc phosphate coating on AZ91D magnesium alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(20-21): 5956-5962.
- [13] YAMAUCHI N, UEDA N, OKAMOTO A, et al. DLC coating on Mg-Li alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(9-11): 4913-4918.
- [14] GAO Y, WANG C S, PANG H J, et al. Broad-beam laser cladding of Al-Cu alloy coating on AZ91HP magnesium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(11): 4917-4922.
- [15] GU C D, LIAN J S, LI G Y, et al. Electroless Ni-P plating on AZ91D magnesium alloy from a sulfate solution[J]. *Journal of Alloys and Compound*, 2005, 391(1-2): 104-109.
- [16] AMBAT R, ZHOU W. Electroless nickel-plating on AZ91D magnesium alloy: effect of substrate microstructure and plating parameters[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 179(2-3): 124-134.
- [17] YU H S, LUO S F, WANG Y R. A comparative study on the crystallization behavior of electroless Ni-P and Ni-Cu-P deposits[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 148(2-3): 143-148.
- [18] LIN K L, CHANG Y L, HUANG C C, et al. Microstructure evolution of electroless Ni-P and Ni-Cu-P deposits on Cu in the presence of additives[J]. *Applied Surface Science*, 2001, 181(1-2): 166-172.
- [19] LIU Y, ZHAO Q. Study of electroless Ni-Cu-P coatings and their anti-corrosion properties[J]. *Applied Surface Science*, 2004, 228(1-4): 57-62.
- [20] BALARAJU J N, RAJAM K S. Electroless deposition of Ni-Cu-P, Ni-W-P and Ni-W-Cu-P alloys[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 195(2-3): 154-161.
- [21] ZHANG W X, HUANG N, HE J G, et al. Electroless deposition of Ni-W-P coating on AZ91D magnesium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(11): 5116-5121.
- [22] PALANIAPPA M, SESHADRI S K. Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings[J]. *Wear*, 2008, 265(5-6): 735-740.
- [23] TIEN S K, DUH J G, CHEN Y I. Structure, thermal stability and mechanical properties of electroless Ni-P-W alloy coatings during cycle test[J]. *Surface and Coatings Technology*,

- 2004, 177-178: 532-536.
- [24] TIEN S K, DUH J G, CHEN Y I. The influence of thermal treatment on the microstructure and hardness in electroless Ni-P-W deposit[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 469-470: 333-338.
- [25] TIEN S K, DUH J G. Thermal reliability of electroless Ni-P-W coating during the aging treatment[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 469-470: 268-273.
- [26] HU Y J, WANG T X, MENG J L, et al. Structure and phase transformation behaviour of electroless Ni-W-P on aluminium alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(3-4): 988-992.
- [27] HU Y J, XIONG L, MENG J L. Electron microscopic study on interfacial characterization of electroless Ni-W-P plating on aluminium alloy[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(11): 5029-5034.
- [28] LU G J, ZANGARI G. Corrosion resistance of ternary Ni-P based alloys in sulfuric acid solutions[J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47(18): 2969-2979.
- [29] WANG L L, ZHAO L H, HUANG G F, et al. Composition, structure and corrosion characteristics of Ni-Fe-P and Ni-Fe-P-B alloy deposits prepared by electroless plating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 126(2-3): 272-278.
- [30] WANG S L. Studies of electroless plating of Ni-Fe-P alloys and the influences of some deposition parameters on the properties of the deposits[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 186(3): 372-376.
- [31] ZHANG B W, XIE H W. Effect of alloying elements on the amorphous formation and corrosion resistance of electroless Ni-P based alloys[J]. *Materials Sciences and Engineering: A*, 2000, 281(1-2): 286-291.
- [32] GOULD A J. Electorless nickel-A wear resistant coating[J]. *Transactions of Institute of Metal Finishing*, 1988, 66: 58-62.
- [33] LIU C, BI Q, LEYLAND A, et al. An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part II.: EIS interpretation of corrosion behavior[J]. *Corrosion Science*, 2003, 45(6): 1257-1273.
- [34] DONG H, BELL T. Tribological behaviour of alumina sliding against Ti6Al4V in unlubricated contact[J]. *Wear*, 1999, 225-229: 874-884.