

化学镀 Ni-W-P 薄膜的制备及其耐蚀性能的研究

卢洁琴, 张晓莉, 卫国英, 余云丹

(中国计量学院 材料科学与工程学院, 杭州 310018)

摘要: 目的 制备 Ni-W-P 合金薄膜并研究其耐蚀性。方法 在碱性镀液 (pH=11) 中, 以次亚磷酸钠为还原剂, 柠檬酸钠为络合剂, 以铜锌合金为基材, 采用化学镀制备 Ni-W-P 薄膜。通过 X 射线荧光仪、SEM、电化学极化曲线等方法, 研究还原剂次亚磷酸钠浓度、络合剂柠檬酸钠浓度以及反应时间对薄膜厚度、表面形貌和耐蚀性的影响。结果 固定其他参数不变的条件下, 在还原剂浓度为 0.2 mol/L 及络合剂浓度为 0.26 mol/L 时薄膜厚度最大, 分别为 0.2975、0.1978 μm 。随着次亚磷酸钠浓度的增大, Ni-W-P 薄膜表面致密度增加, 孔隙率减少。当次亚磷酸钠的浓度为 0.1 mol/L 时, 薄膜表面的颗粒较细小, 孔隙较多; 当次亚磷酸钠的浓度为 0.4 mol/L 时, 薄膜表面的孔隙明显减少, 表面更加均匀且致密度变好; 络合剂和还原剂的改变对薄膜腐蚀电位没有明显影响, 腐蚀电流密度在还原剂浓度为 0.4 mol/L、络合剂浓度为 0.28 mol/L 时达到最小, 分别为 2.38×10^{-6} 、 2.23×10^{-6} A/cm²; 随着络合剂和还原剂浓度的增大, 薄膜表面趋于致密; 随着反应时间的增加, 膜层厚度明显增大, 腐蚀电流密度随着时间的增加而减小, 化学镀 4 h 薄膜腐蚀电流密度最小, 为 1.679×10^{-6} A/cm²。Ni-W-P 薄膜厚度可达到 4.14 μm 。结论 还原剂浓度为 0.4 mol/L, 络合剂浓度为 0.28 mol/L 时, 薄膜的耐蚀性最好, 反应时间的延长有利于薄膜耐蚀性能的优化。

关键词: 铜锌合金基底; 化学镀; Ni-W-P 合金; 表面形貌; 耐蚀性; 极化曲线

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0083-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.014

Preparation and Corrosion Resistance of Electroless Plating Ni-W-P Alloy

LU Jie-qin, ZHANG Xiao-li, WEI Guo-ying, YU Yun-dan

(College of Material Science & Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: **Objective** Ni-W-P coatings were prepared on copper-zinc alloy substrates by electroless deposition to study the anti-corrosion performance. **Methods** Ni-W-P coatings were prepared by electroless deposition using hypophosphite as reducing agent

收稿日期: 2015-11-13; 修订日期: 2015-12-27

Received: 2015-11-13; Revised: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(51471156); 国际科技合作项目(2011DFA52400)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51471156) and International Science and Technology Cooperation Project (2011DFA52400)

作者简介: 卢洁琴(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面处理。

Biography: LU Jie-qin(1993—), Female, Master graduate student, Research focus: surface treatment of materials.

通讯作者: 卫国英(1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为磁性材料的电化学制备及防护、材料的表面处理、合金电沉积。

Corresponding author: WEI Guo-ying(1977—), Female, Ph. D., Professor, Research focus: electrochemical preparation and protection of magnetic materials; surface treatment of materials; alloy electrodeposition

and sodium citrate as complexing agent in the alkaline solution ($\text{pH}=11$). The investigation was focused on the effects of chemical agents and reaction time on the performance of Ni-W-P coatings. The thickness, surface morphology and corrosion behavior of the coatings were analyzed by X-ray fluorescence analyzer, scanning electron microscopy (SEM) and electrochemical workstation, respectively. **Results** With the increasing concentrations of reducing agent ($0.1 \sim 0.4 \text{ mol/L}$) and complexing agent ($0.18 \sim 0.28 \text{ mol/L}$), the thickness of the coatings reached the maximum. Especially, Ni-W-P coatings with thickness of $0.2975 \mu\text{m}$ and $0.1978 \mu\text{m}$ could be obtained respectively in the conditions of 0.2 mol/L reducing agent and 0.26 mol/L complexing agent. With the increasing concentration of reducing agent, the surface density increased while the porosity decreased. When the concentration of hypophosphite was 0.1 mol/L , coatings with smaller particles and porous surface could be obtained. However, dense and uniform coatings could be detected at the condition of 0.4 mol/L hypophosphite. Corrosion current density reached the minimum when the reducing agent concentration was 0.4 mol/L , and the complexing agent concentration was 0.28 mol/L , which corresponded to $2.38 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ and $2.23 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, respectively. With the increasing concentrations of reducing agent and complexing agent, more compact coatings could be prepared. Moreover, along with the increasing reaction time, coating thickness changed significantly and the corrosion current density decreased. The corrosion current density reached the minimum and Ni-W-P with a thickness of $4.14 \mu\text{m}$ could be prepared when the reaction time was 4 hours. **Conclusion** The coatings with the best corrosion resistance were obtained with 0.4 mol/L of reducing agent and 0.28 mol/L of complexing agent. In addition, longer reaction time helped to optimize the corrosion resistance of the coatings.

KEY WORDS: copper-zinc alloy substrates; electroless; Ni-W-P alloy; surface morphology; anti-corrosion; polarization curve

随着科技的发展,人们对设备、零部件各项性能的要求越来越高。为增强设备和零部件的耐蚀性、耐磨性以及表面的美观性等,材料表面处理技术越来越广泛地应用于机械、航天、化工、汽车、能源开采等行业^[1-2]。化学镀是一种材料化学表面处理的技术^[3],它是通过还原剂的作用,使溶液中的金属离子还原为相应金属沉积在基底上的过程。化学镀镍工艺在工业上一般选用次亚磷酸钠作为还原剂,在镍的盐溶液中反应析出镍^[4]。它最早起源于金属沉积工艺,在170多年前,Wurtz首次以次亚磷酸盐为还原剂从镍盐溶液中还原得到金属镍^[5]。化学镀镍工艺发展至今,其机理问题尚在研究之中,目前,化学镀镍的沉积机理主要有四种,分别为原子氢理论、电化学理论、氢负离子理论以及羟基-镍离子的配位理论。刘永健等^[6]研究次亚磷酸钠体系中化学镀镍的沉积机理,结果表明镀层的微观形貌及耐蚀性与镀层沉积表面及镀层峰线的镍离子的活度有关。曾建皇^[7]等人对碱性化学镀镍的阴、阳极过程进行了研究,发现以次磷酸钠为还原剂的化学镀镍的阴阳极反应之间存在强烈的影响,阴极过程产生了活化态的氢有利于镍的还原,阳极次磷酸盐的存在使阴极氢的析出更容易,从而加速了镍的沉积速度。在实际应用中,传统的化学镀镍工艺已无法满足工业上的要求,研究发现,优化化学镀工艺可以得到更优质的镀层。比如,钢基板上化学镀 Ni-P 镀层采用 3-APTS、硬脂酸以及 3-APTS/硬脂酸防腐蚀后处理工艺后,对其耐蚀性进行分析发现,3-APTS/硬脂酸的复合处理后镀层的耐蚀性优于

二者单一处理^[8];在 1060 铝材表面化学镀 Ni-W-P,通过在镀液中加入硝酸铜,可以提高镀层的耐蚀性,热处理后镀层的硬度提高而耐蚀性下降^[9];俞素芬^[10]等在低碳钢表面化学镀 Ni-W-P,在不同温度下晶化处理,发现随着晶化温度的提高,镀层的耐蚀性、耐磨性以及硬度得到提高;在单一的化学镀溶液中加入金刚石、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等复合离子可以得到相应的复合镀层,并且硬度高、耐腐蚀性能较好^[11]。H. Liu^[12]等人研究化学镀 Ni-W-P 在空气和氩气中进行激光处理后,发现不管在酸性条件下还是氯化物的环境中,空气中激光处理后镀层的耐蚀性优于在氩气中处理。

化学镀与电镀相比,镀层厚度非常均匀,结合力更优,不需要电源及辅助电极,工艺设备相对简单。本文工作以铜锌合金为基材,采用化学镀方法制备 Ni-W-P 合金薄膜,探讨不同反应参数(还原剂浓度、络合剂浓度及反应时间)对镀层表面形貌和耐腐蚀性的影响。

1 实验

1.1 化学镀 Ni-W-P 的制备

以铜锌合金为基底材料,在碱性镀液($\text{pH}=11$)的条件下,根据表 1 条件配制镀液,将配制好的镀液在 100°C 油浴锅内预热 10 min。采用 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 铜锌合金片为化学镀基底,将其放入预热好的镀液中,

覆盖保鲜膜,反应 30 min。反应结束后,用镊子将铜锌合金片从镀液中取出,首先去掉高温胶带,再用去离子水洗涤,然后用无水乙醇洗涤,常温干燥。

表 1 化学镀 Ni-W-P 合金薄膜的镀液配方及化学镀条件
Tab.1 Electrolyte formula and conditions of electroless for Ni-W-P alloy coatings

Reagents and process parameters	Concentration/ (mol · L ⁻¹)	Mass concentration / (g · L ⁻¹)
NiSO ₄ · 7H ₂ O	0.05	14.05
NaH ₂ PO ₂ · H ₂ O	0.1 ~ 0.4	16.96
Na ₃ C ₆ H ₅ O ₇ · 2H ₂ O	0.18 ~ 0.28	58.82
Na ₂ WO ₄ · 2H ₂ O	0.1	32.99

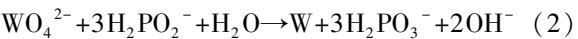
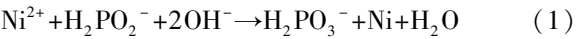
1.2 膜层性能测试

采用日本 HITACHI 公司生产的 SU8010 FE-SEM 冷场发射扫描电子显微镜测试薄膜表面形貌,采用 EDX 1800B X 射线荧光仪测试薄膜厚度,采用上海辰华 CHI660E 电化学工作站测试薄膜的极化曲线。

2 结果与讨论

2.1 还原剂(次亚磷酸钠)浓度对薄膜性能的影响

在化学镀 Ni-W-P 主要发生的化学反应是:



由式(1)和式(2)可以看出,次亚磷酸钠浓度的增大有利于反应的正向进行,即薄膜沉积速度增大。但是在碱性镀液中,pH 如果高于 11,次亚磷酸钠浓度的增高,会导致镀液混浊甚至发生分解,镀层表面致密性下降,耐腐蚀性能下降。

研究还原剂浓度对镀层耐腐蚀性的影响发现,对耐腐蚀性能表征的重要参数之一是腐蚀电流密度的大小,其值越小表示镀层耐腐蚀性越好^[13]。本实验的耐蚀性测试采用上海辰华 CHI660E 电化学工作站,使用三电极体系,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,铂电极为辅助电极,试样为工作电极,实验温度为 25 ℃,腐蚀介质为质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,扫描速度为 0.05 V/s。图 1 为不同次亚磷酸钠还原剂浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的极化曲线,其对应的腐蚀电位与腐蚀电流密度见表 2。可以看出,随着次亚磷酸钠浓度的变化,腐蚀电位的变化不是很明显,腐

蚀电流密度先增大后减小,在次亚磷酸钠浓度为 0.4 mol/L 时最小,为 2.38×10^{-6} A/cm²,表明在次亚磷酸钠的浓度为 0.4 mol/L 时镀层的耐蚀性能最好。

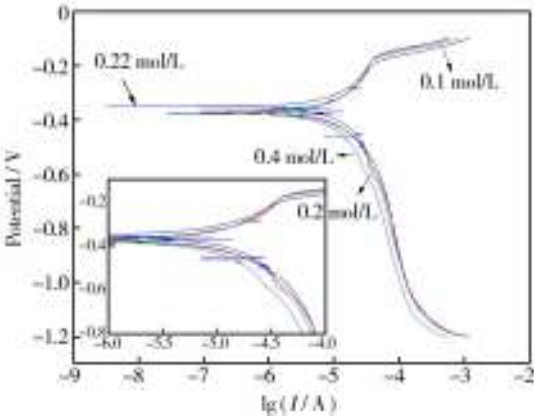


图 1 不同次亚磷酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的极化曲线
Fig.1 Polarization curves of electroless Ni-W-P coatings with different concentration of hypophosphite

表 2 不同次亚磷酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的腐蚀电位与腐蚀电流密度

Tab.2 Corrosion potential and corrosion current density of electroless Ni-W-P coatings with different concentrations of hypophosphite

Concentration of hypophosphite /(mol · L ⁻¹)	Corrosion potential /V	Corrosion current density/ (×10 ⁻⁶ A · cm ⁻²)
0.1	-0.374	2.66
0.2	-0.369	2.78
0.22	-0.351	2.83
0.4	-0.377	2.38

由于镀层的耐蚀性与其表面组织和致密性密切相关,所以进一步对其表面形貌进行表征,如图 2。由图 2 可以看出,铜锌合金上的化学镀 Ni-W-P 薄膜为典型的颗粒膜,总的来说,随着次亚磷酸钠浓度的增大,镀层表面致密度增加,孔隙率减少。当次亚磷酸钠的浓度为 0.1 mol/L 时,薄膜表面的颗粒较细小,排布较疏松,孔隙较多(如图 2a 所示);当次亚磷酸钠的浓度为 0.4 mol/L 时,薄膜表面的孔隙明显减少,表面更加均匀且致密度变好,薄膜耐蚀性最好(如图 2d 所示)。

进一步对膜厚进行测量,次亚磷酸钠浓度为 0.1、0.2、0.22、0.4 mol/L 时,其所对应的厚度分别为 0.1608、0.2975、0.2470、0.2435 μm。可知当次亚磷酸钠浓度在 0.1 ~ 0.4 mol/L 范围内,随着次亚磷酸

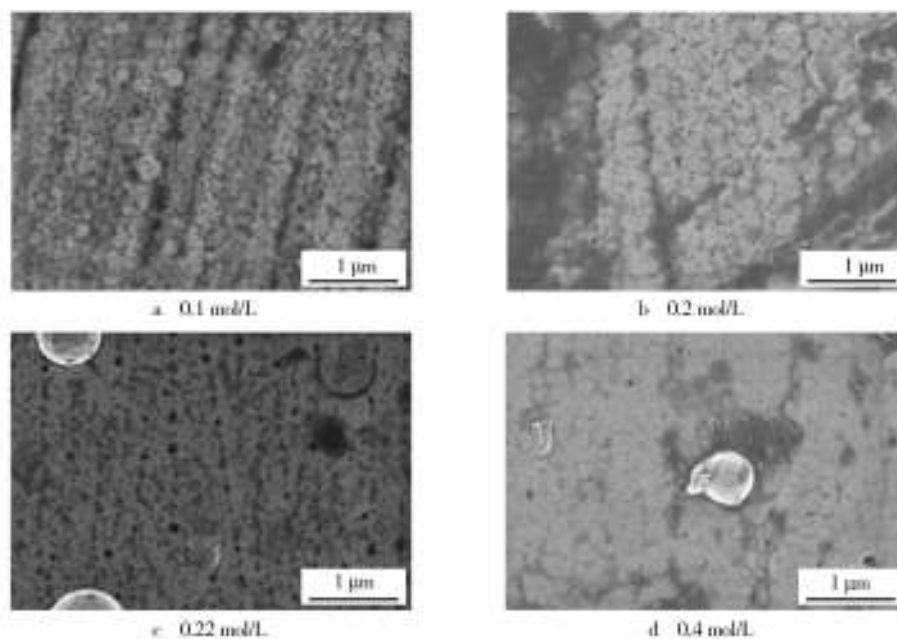


图2 不同次亚磷酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜的表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of electroless Ni-W-P coatings with different concentrations of hypophosphite

钠浓度的增大,膜厚有所增加,但增加浓度并不能使膜层一直加厚。当次亚磷酸钠浓度为 0.2 mol/L 时,膜层厚度最大,为 0.2975 μm ,继续增加次亚磷酸钠浓度,膜厚将减少。

2.2 络合剂(柠檬酸钠)浓度对薄膜性能的影响

络合剂是化学镀镍过程中的主要添加剂,其在镀液中起着至关重要的作用,对镀速以及镀层的表面均有一定的影响^[14]。络合剂在化学镀镍中络合镍离子,避免产生亚磷酸镍沉淀^[15]。络合剂用量不够容易使镀液沉淀,尤其在碱性镀液中,为了抑制沉淀的析出,需要使用更多的络合剂或者络合能力强的络合剂,但是高浓度的络合剂会使镍络合物的稳定性增强,从而导致沉积速度下降。

络合剂的浓度同样会影响薄膜的耐蚀性能。图3 是不同柠檬酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的极化曲线,对应的腐蚀电位和腐蚀电流密度见表3。可以看出随着柠檬酸钠浓度的增大,腐蚀电位的变化不大,腐蚀电流密度减小,当其浓度为 0.28 mol/L 时,腐蚀电流密度最小,为 $2.23 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$,耐蚀性最好。由此说明在一定的浓度范围内,柠檬酸钠浓度的增加可以改善 Ni-W-P 薄膜的耐腐蚀性能。

进一步对不同柠檬酸钠浓度下的薄膜的表面形貌进行表征,如图4所示。研究发现不同柠檬酸钠浓度下的薄膜为典型的颗粒膜,随着柠檬酸钠浓度的增

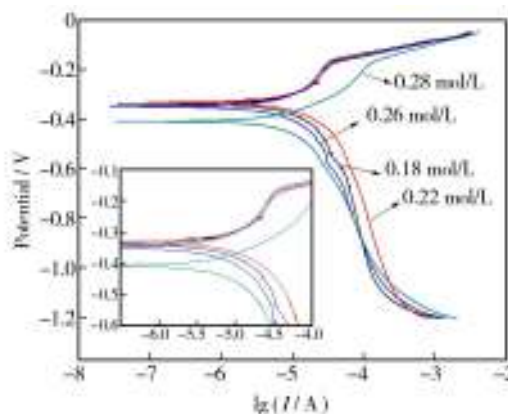


图3 不同柠檬酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of electroless Ni-W-P coatings with different concentrations of sodium citrate

表3 不同柠檬酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜对应的腐蚀电位与腐蚀电流密度

Tab. 3 Corrosion potential and corrosion current density of electroless Ni-W-P coatings with different concentrations of sodium citrate

Concentration of sodium citrate / (mol · L ⁻¹)	Corrosion potential /V	Corrosion current density/($\times 10^{-6}$ A · cm ⁻²)
0.18	-0.339	3.76
0.22	-0.333	3.78
0.26	-0.351	2.45
0.28	-0.409	2.23

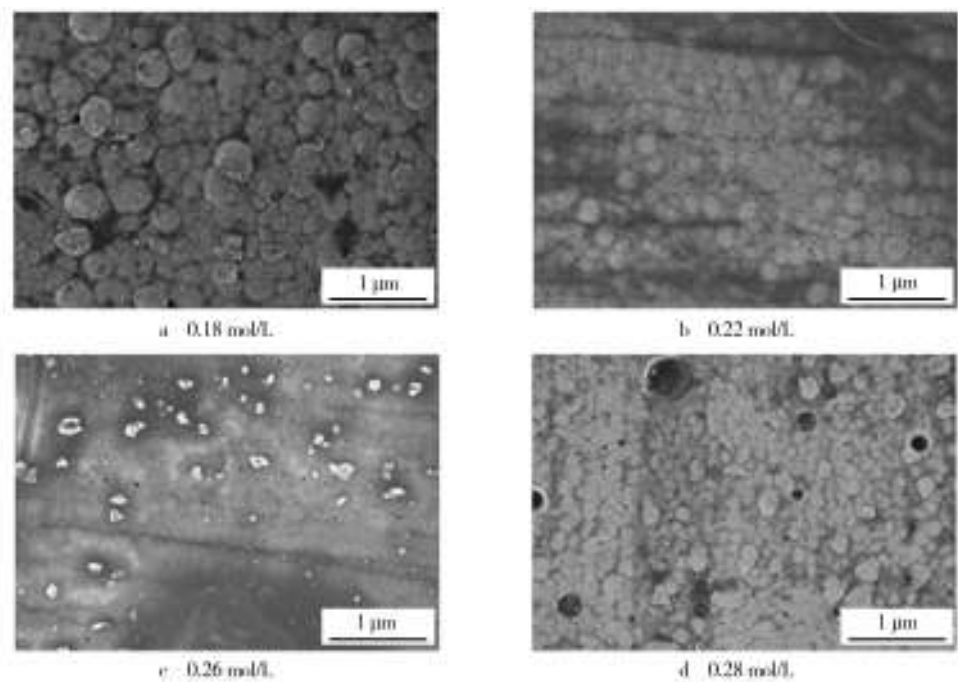


图 4 不同柠檬酸钠浓度下 Ni-W-P 薄膜的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of electroless Ni-W-P coatings with different concentrations of sodium citrate

加,薄膜表面的致密性及均匀性变好。当柠檬酸钠浓度为 0.18 mol/L 时,薄膜表面颗粒较大,组织排布不够致密,呈现较疏松的状态;当次亚磷酸钠浓度为 0.28 mol/L 时,颗粒变小且排布较致密,孔隙变少。与上面耐蚀性规律大致相符。

对膜厚进行测量,柠檬酸钠浓度为 0.18、0.22、0.26、0.28 mol/L 时,其对应的膜层厚度分别为 0.1770、0.1797、0.1978、0.0763 μm 。可知膜厚随柠檬酸钠浓度的增大先增大后减小。当柠檬酸钠浓度为 0.26 mol/L 时,膜厚达到最大,为 0.1978 μm ;当浓度为 0.28 mol/L 时,膜厚最小,为 0.0763 μm ,与 0.1978 μm 相比,膜厚下降了 0.1215 μm 。这可能是由于络合剂浓度增大,镍络合物趋于稳定,从而使镍沉积速率下降。

2.3 反应时间对薄膜性能的影响

反应时间不同会影响反应的进度,必然对镀层的表面形貌及耐腐蚀性有一定的影响。图 5 表示的是不同反应时间下 Ni-W-P 镀层的极化曲线,表 4 表示相应的腐蚀电流密度以及腐蚀电压。可以看出,腐蚀电压的变化不大,腐蚀电流密度随着时间的增加而减小,到 4 h 时,腐蚀电流密度最小,为 $1.679\times10^{-6}\text{ A/cm}^2$,说明化学镀 4 h 时镀层的耐蚀性最好。

图 6 是按照表 1 的化学镀配方,改变反应时间得

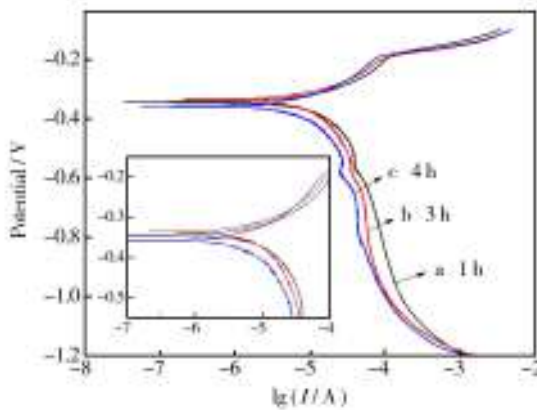


图 5 不同反应时间下 Ni-W-P 薄膜对应的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of electroless Ni-W-P coatings with different reaction time

表 4 不同反应时间下 Ni-W-P 镀层的腐蚀电流密度以及腐蚀电压

Tab. 4 Corrosion potential and corrosion current density of electroless Ni-W-P coatings with different reaction time

Time /h	Corrosion potential /V	Corrosion current density /($\times10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
1	-0.335	2.228
3	-0.325	1.702
4	-0.351	1.679

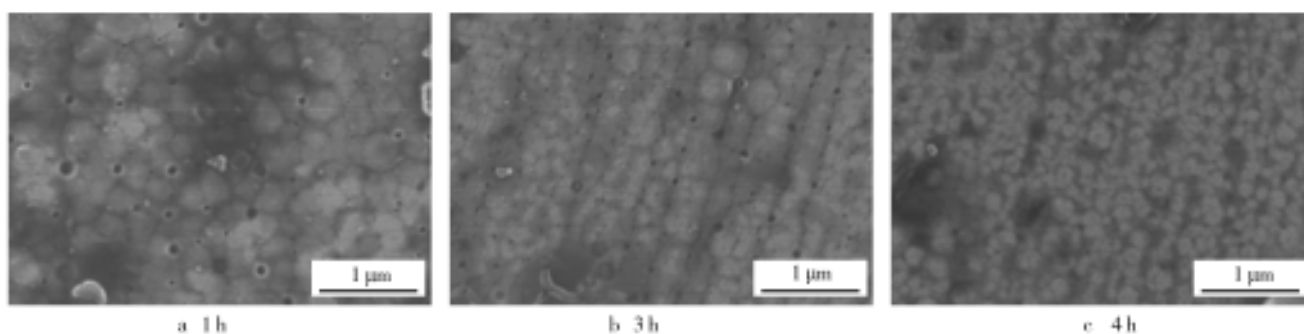


图6 不同化学镀时间制备的 Ni-W-P 薄膜表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of electroless Ni-W-P coatings with different reaction time

到的 Ni-W-P 薄膜表面形貌。可以看出,随着反应时间的增加,薄膜表面孔隙减少,且均匀性变好。当反应时间为 1 h 时,薄膜表面由大小大致均匀的包状物组成,且表面有一定的析氢孔隙;当反应时间为 4 h 时,薄膜表面的颗粒细小,孔隙较少且较均匀,导致其表面分散的腐蚀电流较少,从而提高耐蚀性。与上面耐蚀性的规律大致相符。

随着反应时间的推移,化学镀反应不断进行,镀层的厚度会增加,同时反应的溶质会逐渐减少,沉积速度会减慢甚至停止。反应时间为 1、3、4 h 时,对应的膜厚分别为 1.42、2.98、4.14 μm 。可知随着反应时间的增加,镀层的厚度增加比较明显,由 1.42 μm 增加到了 4.14 μm ,说明反应时间的延长有利于化学镀 Ni-W-P 薄膜膜厚的增加。

3 结论

本文研究了还原剂、络合剂及化学镀时间对 Ni-W-P 表面形貌及耐蚀性的影响。随着还原剂浓度的增大,化学镀 Ni-W-P 膜层厚度先增大后变小,而膜层表面致密性增加,当其浓度为 0.4 mol/L 时,耐蚀性最好。随着络合剂浓度的增大,化学镀 Ni-W-P 膜层厚度的变化规律与还原剂相似,膜层表面的致密性变好,当其浓度为 0.28 mol/L 时,耐蚀性最优。随着反应时间的增加,化学镀 Ni-W-P 膜层的厚度明显增大,最大为 4.14 μm ,反应时间为 4 h 时,耐蚀性最优。

参考文献

- [1] 王丹丹,李均明,蔡辉,等. Ni-P 多元合金及复合化学镀层的研究进展[J]. 材料导报 A, 2013, 27(10): 90—92.
WANG Dan-dan, LI Jun-ming, CAI Hui, et al. Research

Progress in Electroless Ni-P Multi-component Alloy and Composites Coatings [J]. Materials Review A, 2013, 27(10): 90—92.

- [2] 耿冰霜. 化学镀 Ni-W-P 三元合金工艺、组织结构及性能研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2008.
GENG Bing-shuang. Investigation on Processes, Microstructures and Properties of Electroless Ni-W-P [D]. Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [3] 姚轩. 浅谈化学材料的表面处理[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014(5): 26.
YAO Xuan. Discussion on the Surface Processing Chemicals [J]. China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 2014(5): 26.
- [4] 唐娟,程凯,张韧,等. 化学镀镍-磷的研究与应用[J]. 电镀与涂饰, 2011, 30(8): 24—27.
TANG Juan, CHENG Kai, ZHANG Ren, et al. Review on the Study and Application of Electroless Nickel-phosphorus Plating [J]. Plating and Finishing, 2011, 30(8): 24—27.
- [5] 黎黎. 化学复合镀工艺的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
LI Li. Research of Electroless Composite Plating Processing [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [6] 刘永健,王印培. 次亚磷酸钠体系化学镀镍沉积机理的探讨[J]. 华东理工大学学报, 2001, 27(3): 301—306.
LIU Yong-jian, WANG Yin-pei. The Mechanism of Electroless Nickel Deposition in Sodium Hypophosphite Bath [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2001, 27(3): 301—306.
- [7] 曾健皇,陈范才,周小平,等. 化学镀镍磷合金机理初探[J]. 电镀与环保, 2002, 22(5): 19—22.
ZENG Jian-huang, CHEN Fan-cai, ZHOU Xiao-ping, et al. A Study of the Mechanism of Electroless Nickel Plating [J]. Electroplating & Pollution Control, 2002, 22(5): 19—22.
- [8] 刘光明,刘斌. 化学镀 Ni-P 防腐蚀后处理工艺的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(3): 265—270.

(下转第 104 页)

- 186—190.
- [14] 袁涛,屈铁,史萌,等. 汽轮机超音速火焰喷涂 NiCr-Cr₃C₂ 涂层[J]. 表面技术,2013,42(6):63—65.
YUAN Tao, QU Yi, SHI Meng, et al. Steam Turbine Supersonic Flame Spraying NiCr-Cr₃C₂ Coating [J]. Surface Technology, 2013, 42(6):63—65.
- [15] DEMIRSKYI D, AGRAWAL D, RAGULYA A. Tough Ceramics by Microwave Sintering of Nanocrystalline Titanium Diboride Ceramics [J]. Ceramics International, 2014, 40(1):1303—1310.
- [16] HANISAH M, SURIYANA M A, AHMAD Z A A. Effects of TiO₂ Addition on the Phase, Mechanical Properties, And Microstructure of Zirconia-toughened Alumina Ceramic composite [J]. Ceramics International, 2015, 41(3):3961—3967.
- [17] ABDULLAH A, MALAKI M, ESKANDARI A. Strength Enhancement of the Welded Structures by Ultrasonic Peening [J]. Mater Des, 2012, 38:7-18.
- [18] 沈婕,国俊丰,魏伟,等. 超音速喷涂 Cr₃C₂-25NiCr 复合涂层的组织及电化学特性研究[J]. 热喷涂技术, 2009, 1(2):48—52.
SHEN Jie, GUO Jun-feng, WEI Wei, et al. Microstructure and Electrochemical Properties of Cr₃C₂-25NiCr Composite Coating by Supersonic Spraying [J]. Thermal Spray Technology, 2009, 1(2):48—52.
- [19] 李美艳,韩彬,王勇,等. B₄C 和 Ti 含量对激光熔覆 Fe-Cr-Ni-Si 系合金涂层结构及性能影响[J]. 中国激光, 2013, 40(12):1203008-1—1203008-5.
LI Mei-yan, HAN Bin, WANG Yong, et al. Effect of B₄C and Ti Content on the Structure and Properties of Laser Clad Fe-Cr-Ni-Si Alloy Coatings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(12):1203008-1—1203008-5.
- [20] 肖正伟,曾振欧,赵国鹏,等. 304 不锈钢上纳米 TiO₂ 涂层的制备与防腐性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(7):35—38.
XIAO Zheng-wei, ZENG Zhen-ou, ZHAO Guo-peng, et al. Nano-TiO₂ Coating on 304 Stainless Steel of Preparation and Anti-corrosion Performance [J]. Electroplating and Surface Finishing, 2007, 26(7):35—38.
- [21] 陈文怡,周建,胡明,等. 超细晶不锈钢/TiC 复合材料的电化学腐蚀行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10):2068—2072.
CHEN Wen-yi, ZHOU Jian, HU Ming, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Ultrafine Grained Stainless Steel/TiC Composite [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(10):2068—2072.

(上接第 88 页)

- LIU Guang-ming, LIU Bin. Post-treatment Processes for Corrosion Resistance on Electroless Ni-P Coating [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2014, 34(3):265—270.
- [9] 余祖孝,郝世雄,李兰,等. 铝材化学镀 Ni-W-P 溶液中硝酸镧含量对镀层性能的影响[J]. 材料保护, 2015, 48(5):24—26.
YU Zu-xiao, HAO Shi-xiong, LI Lan, et al. Influence of La(NO₃)₃ Content on Corrosion Resistance of Electroless Ni-W-P Alloy Coating on Aluminum Substrate [J]. Journal of Materials Protection, 2015, 48(5):24—26.
- [10] 俞素芬,孟繁晶,范伟光,等. 化学镀 Ni-W-P 合金的耐蚀耐磨性[J]. 汽车工艺与材料, 2002(1):14—17.
YU Su-fen, MENG Fan-jing, FAN Wei-guang, et al. Corrosion Resistance and Wear Resistance of Electroless Plated Ni-W-P Alloy [J]. Automobile Technology & Material, 2002(1):14—17.
- [11] 武慧慧,郝利峰,韩生. 化学镀镍的研究进展[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(3):18—21.
WU Hui-hui, HAO Li-feng, HAN Sheng. Research Advances of Electroless Plating Nickel-phosphorus Alloy [J]. Plating and Finishing, 2014, 36(3):18—21.
- [12] LIU H, GUO R X, LIU Y, et al. The Effect of Processing Gas on Corrosion Performance of Electroless Ni-W-P Coatings Treated by Laser [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(15):3350—3359.
- [13] LUO H H, CAI Q Z, HE J, et al. Preparation and Properties of Composite Ceramic Coating Containing Al₂O₃-ZrO₂-Y₂O₃ on AZ91D Magnesium Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation [J]. Current Applied Physics, 2009, 9(6):1341—1346.
- [14] 朱焱,江茜,张印,等. 化学镀镍磷合金复合配位剂的研究[J]. 电镀与涂饰, 2012, 32(3):25.
ZHU Yan, JIANG Qian, ZHANG Yin, et al. Research on Complexing Agent of Electroless Plating Nickel-phosphorus Alloy [J]. Plating and Finishing, 2012, 32(3):25.
- [15] 谢洪波,江冰,陈华三,等. 化学镀镍规律及机理探讨[J]. 电镀与精饰, 2012, 34(2):26—30.
XIE Hong-bo, JIANG Bing, CHEN Hua-san, et al. Discussion on the Mechanism of Electroless Nickel Plating [J]. Plating and Finishing, 2012, 34(2):26—30.