

文章编号: 1000-3851(2008)04-0106-07

钨酸钠和次磷酸钠浓度对脉冲电镀 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜组织及性能的影响

徐瑞东^{*1}, 王军丽², 郭忠诚¹, 王 华¹

(1. 昆明理工大学 材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2. 昆明理工大学 分析测试研究中心, 昆明 650093)

摘 要: 通过 Ni、W、P 与 CeO_2 和 SiO_2 纳米颗粒的脉冲共沉积, 在碳钢表面制备了 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜, 主要研究了电解液中钨酸钠和次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜组织及性能的影响, 采用化学组成、沉积速率、显微硬度和表面形貌进行表征。结果表明, 当钨酸钠和次磷酸钠浓度分别为 100 和 4 g/L 时, 纳米复合薄膜的沉积速率和显微硬度较高, 分别为 25.03 $\mu\text{m/h}$ 和 HV649。增加钨酸钠浓度, 纳米复合薄膜晶粒得到细化。当钨酸钠浓度提高到 160 g/L 时, 基质金属晶粒轮廓清晰, 细小而均匀, 呈规则的圆球型, CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒均匀弥散分布在 Ni-W-P 基质金属中。次磷酸钠浓度的增加对纳米复合薄膜的表面形貌影响较小, 但会明显降低显微硬度。

关键词: 纳米复合薄膜; 显微硬度; 表面形貌; 脉冲电镀; 性能

中图分类号: TQ153 **文献标志码:** A

Influence of Na_2WO_4 and NaH_2PO_2 concentrations on microstructures and properties of $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ nano-composite films prepared by pulse plating

XU Ruidong^{*1}, WANG Junli², GUO Zhongcheng¹, WANG Hua¹

(1. Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Research Center for Analysis and Measurement, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ nano-composite films were prepared on the carbon steel surface by pulse co-deposition of Ni, W, P, nano- CeO_2 and nano- SiO_2 particles, the influence of Na_2WO_4 and NaH_2PO_2 concentrations in electrolyte on microstructures and properties of the nano-composite films was researched, and the characteristics were assessed by chemical composition, deposition rate, microhardness and surface morphologies. The results show that when the Na_2WO_4 and NaH_2PO_2 concentrations in electrolyte are controlled at 100 and 4 g/L respectively, the deposition rate of 25.03 $\mu\text{m/h}$ and the microhardness of HV649 of the nano-composite films are obtained. The increase of the Na_2WO_4 concentration leads to refinement in the grain structure of the nano-composite films. When improved at 160 g/L, the nano-composite films possess a clear outline of the spherical matrix metal crystallite, fine crystal size, compact microstructure and uniform and dispersive distribution of nano- CeO_2 and nano- SiO_2 particles within the Ni-W-P matrix metal. The increase of the NaH_2PO_2 concentration in electrolyte has a little effect on the surface morphologies, but it results in a microhardness decrease of the nano-composite films.

Keywords: nano-composite films; microhardness; surface morphologies; pulse plating; properties

复合电沉积技术是一种获得复合薄膜材料最有效的表面强化新技术, 它能实现金属或合金与无机颗粒、有机颗粒或金属颗粒共沉积, 形成颗粒增强金属基复合薄膜材料^[1]。该复合薄膜材料由基质金属和第二相颗粒组成, 在基质金属中含有大量弥散分布的第二相颗粒, 这些颗粒本身具有很多独特的

物理及化学性能, 从而使复合薄膜材料同时具有基质金属和固体颗粒类物质的综合性能^[2-5]。与纯金属或合金相比, 颗粒增强金属基复合薄膜材料由于硬度高, 耐磨和耐腐蚀性好, 并且具有特殊的电接触、电催化等功能, 大大扩展了复合材料的应用范围, 延长了材料的使用寿命, 展示出广阔的工程应

收稿日期: 2007-08-22; 收修改稿日期: 2008-01-07

基金项目: 云南省应用基础研究计划(2007E187M); 昆明理工大学科学研究基金(2006-02); 分析测试重点基金(2007-22)

通讯作者: 徐瑞东, 副教授, 主要从事金属基复合材料的制备及性能研究 E-mail: rdxupaper@yahoo.com.cn

用前景^[6-10]。复合电沉积技术被认为是制备该类复合薄膜材料技术上可行和经济上合理的一项新技术^[11-14]。

近年来, 已有一些固体颗粒, 如 Al_2O_3 、 SiC 、 TiO_2 、 WC 、 B_4C 、 Cr_3C_2 、 SiO_2 、 CeO_2 与一些基质金属, 如 Ni 、 Cr 、 Co 等共沉积, 制备了性能较好的复合薄膜材料^[15-20]。 Ni-P 合金镀层均匀、致密、耐磨、耐腐蚀, 已有较多的研究报道。金属 W 是一种硬质元素, 熔点高, 化学性质稳定, 将 W 沉积到 Ni-P 合金薄膜中能够起到弥散强化与固溶强化的双重作用, 形成的 Ni-W-P 合金薄膜的显微硬度、耐磨性、耐蚀性和热稳定性还会进一步提高^[21-22]。 CeO_2 和 SiO_2 颗粒都能提高复合薄膜材料的耐腐蚀、耐磨损和抗氧化性^[23-28], 但目前还未见到关于该类多元纳米复合薄膜材料的报道。本研究就是通过脉冲电沉积, 使 CeO_2 和 SiO_2 纳米颗粒共沉积到 Ni-W-P 基质金属中, 以获得均匀稳定的功能性 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜。本文中重点研究了电解液中钨酸钠和次磷酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜的化学组成、沉积速率、显微硬度和表面形貌的影响。

1 实验方法

制备 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜的电解液组成为: 70 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 120 g/L $\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 80~160 g/L $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 4~12 g/L $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 15 g/L SiO_2 (平均粒径: 30 nm), 8 g/L CeO_2 (平均粒径: 30 nm), 6 mg/L 阳离子表面活性剂。电解液温度控制在 $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, pH 值为 6.5, 电沉积时间为 1 h。双脉冲波形为方波, 正、反向占空比均为 10%, 正、反向平均电流密度为 6 A/dm^2 和 0.6 A/dm^2 。

制备 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜的实验装置如图 1 所示。工艺流程为: 普通碳钢(阴极材料)→机械抛光→冷水洗→碱性除油→冷水洗→酸洗活化(除锈)→冷水洗→电化学抛光→冷水洗→闪镀镍→冷水洗→脉冲电沉积纳米复合薄膜→冷水洗→热水洗→吹干→成品→性能检测。

为增强纳米复合薄膜与基体的结合力, 电沉积前需对碳钢表面电解抛光, 以消除内应力, 抛光工艺为: 75 g H_3PO_4 , 20 g CrO_3 , 5 g H_2O , 温度为 70°C , 电流密度为 50 A/dm^2 , 时间为 5 min, 阴极为铅板; 抛光后在碳钢表面闪镀一薄层镍, 闪镀镍

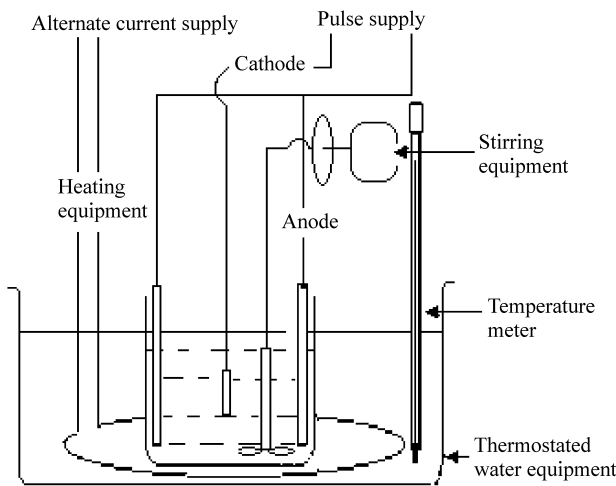


图 1 纳米复合薄膜脉冲电沉积制备的实验装置

Fig. 1 Experimental device of nano-composite films prepared by pulse electrodeposition

工艺为: 240 g/L NiCl_2 , 120 mL/L HCl , 电流密度为 6 A/dm^2 , 温度为室温, 时间为 3 min, 阳极为镍板。

为保证 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒在电解液及纳米复合薄膜中分散均匀, 在电沉积之前, 采用超声设备对电解液分散 30 min。在电沉积时, 采用机械搅拌维持电解液中纳米颗粒的分散均匀性, 机械搅拌速度为 750 r/min。阳极材料用 316L 不锈钢, 基体(阴极)材料用普通碳钢, 尺寸为 $30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。为减少实验误差, 每次实验均使用重新配制的电解液完成。

分析测试纳米复合薄膜的化学组成、沉积速率、显微硬度和表面形貌, 对纳米复合薄膜进行表征。采用 401MVA 数显维氏硬度计测试纳米复合薄膜的显微硬度, 载荷为 50 g; 采用 HX-1 显微硬度计测试纳米复合薄膜的沉积厚度, 沉积速率用单位时间内沉积出的厚度表示, 单位为 $\mu\text{m/h}$; 采用飞利浦 XL30 ESEM-TMP 扫描电子显微镜考察纳米复合薄膜的表面形貌; 纳米复合薄膜的化学组成用各物质的质量分数表示; 采用美国 EDAX 公司“Phoenix+OIM”能谱仪测试纳米复合薄膜中元素 Ni 、 W 、 P 、 Ce 、 Si 和 O 的质量分数, 测试三点取其平均值, 根据分子式再计算出 CeO_2 和 SiO_2 纳米颗粒在复合薄膜中的质量分数。

2 结果及讨论

2.1 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜组织及性能的影响

在 70 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 120 g/L $\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 6 g/L $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 15 g/L SiO_2 , 8 g/L CeO_2 , 6 mg/L 阳离子表面活性剂, 电解液温度为 $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, pH 值为 6.5, 电沉积时间为 1 h 的条件下, 研究了不同钨酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜化学组成、沉积速率、显微硬度和表面形貌的影响。

2.1.1 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜化学组成的影响

电解液中钨酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜化学组成的影响如图 2 所示。图 2(a) 和 2(b) 分别为钨酸钠浓度对薄膜中 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒质量分数和元素 Ni、W 和 P 质量分数的影响。

根据 $\text{W-H}_2\text{O}$ 系的电位-pH 图, 不可能单独从 WO_4^{2-} 的水溶液中直接沉积出钨, 但却可以在有Ⅷ族元素存在的体系中通过诱导共沉积与 Fe、Co、Ni 等金属实现共沉积^[29]。图 2 表明, 增加电解液中的钨酸钠浓度, 纳米复合薄膜中 W 和 P 的质量分数增加, 而 Ni、 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的质量分数降低。由 Nernst 方程可知^[30], 电解液中钨酸钠浓度越高, 阴极反应的电极电位就越正, 越有利于 W 与 Ni 和 P 的共沉积。但由于在相同时间内, W 和 P 的沉积速率明显高于 Ni 的沉积速率, 所以纳米复合薄膜中 W 和 P 的质量分数随钨酸钠浓度的增加而增加, Ni 的质量分数降低。此外, 铁族元素在阴极表面沉积时具有较高的析氢过电位^[31], 增加钨酸钠浓度, 体系的沉积速率加快, 氢极易在阴极放

电析出, 使 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒很难稳定吸附在阴极表面, 导致其共沉积几率降低, 引起纳米复合薄膜中 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的质量分数降低。

2.1.2 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响

电解液中钨酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响如图 3 所示。从图 3 可知, 增加钨酸钠浓度, 纳米复合薄膜的沉积速率增加, 而显微硬度则是先增加后降低。当钨酸钠浓度为 100 g/L 时, 显微硬度最高 (HV642), 沉积速率为 $20.76 \mu\text{m/h}$ 。钨酸钠浓度增加到 160 g/L 时, 沉积速率提高到 $27.51 \mu\text{m/h}$, 但显微硬度却下降到 HV443。

一般来说, 纳米复合薄膜的显微硬度与组织结构和化学组成有密切关系, 朱诚意等^[25]研究了 CeO_2 颗粒对 Ni-W-B-SiC 复合薄膜组织结构及性能的影响, 得出了 CeO_2 能起到细化晶粒作用, 提高复合薄膜的显微硬度。Karthikeyan 等^[27]的研究表明, Ni-P- SiO_2 复合薄膜的显微硬度随化学镀液中 SiO_2 颗粒浓度的增加而提高。曹铁华等^[28]也报道了电解液中适宜的 SiO_2 纳米颗粒浓度能够提高 Ni-P- SiO_2 复合薄膜的显微硬度。金属 W 是一种硬质元素, 复合薄膜中较高的 W 含量也有助于提高其显微硬度^[32]。结合成分分析可知, 钨酸钠浓度为 100 g/L 时, 纳米复合薄膜中硬质元素 W、 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的质量分数均较高, 而 P 的质量分数又较低, 故显微硬度较高, 为 HV642。但当钨酸钠浓度提高到 160 g/L 时, 虽然纳米复合薄膜中硬质

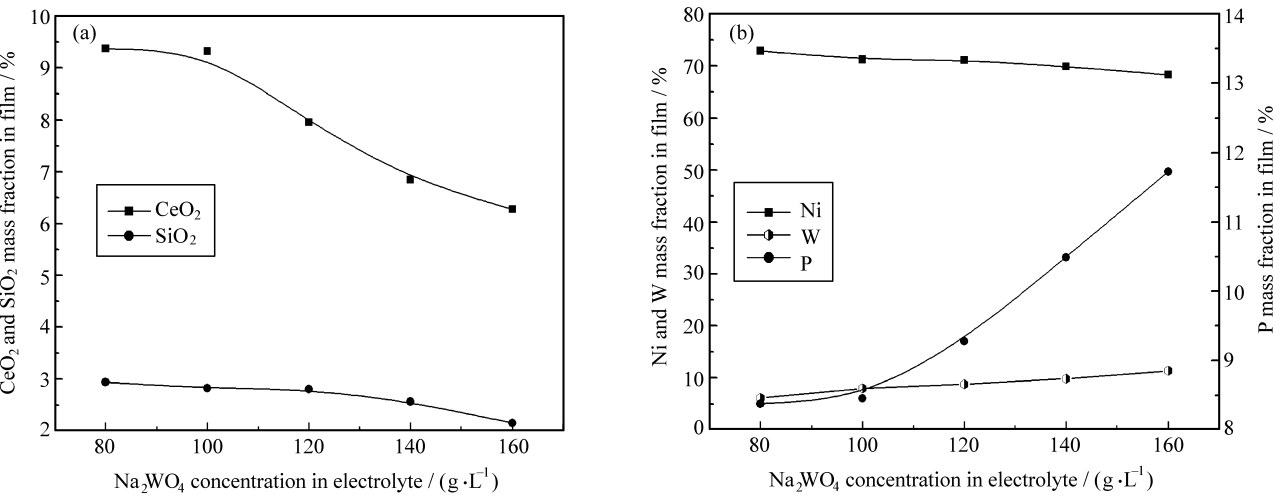


图 2 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜化学组成的影响

Fig. 2 Influence of Na_2WO_4 concentration in electrolyte on chemical composition of the nano-composite films

元素 W 的质量分数提高到了 11.34%，但 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的质量分数则下降到了 6.28% 和 2.16%，而 P 含量却提高到了 11.73%，所以显微硬度明显降低。

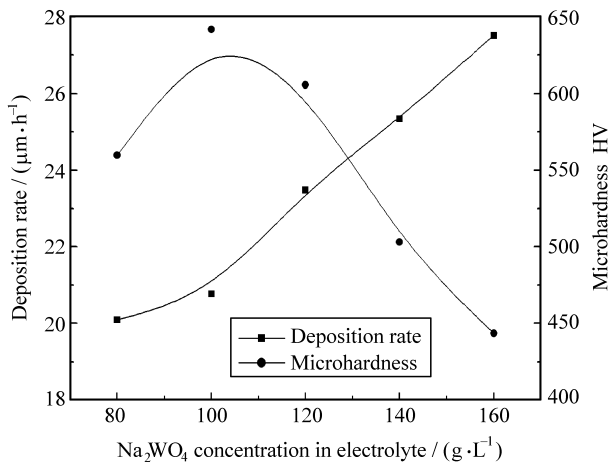


图 3 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响

Fig. 3 Influence of Na_2WO_4 concentration in electrolyte on deposition rate and microhardness of the nano-composite films

2.1.3 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜表面形貌的影响

电解液中钨酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜表面形貌的影响如图 4 所示。图 4(a)~4(c) 是钨酸钠浓度分别为 80、120 和 160 g/L 时，纳米复合薄膜 1000 倍下的表面形貌；图 4(d) 是钨酸钠浓度为 160 g/L 时，纳米复合薄膜 10000 倍下的表面形貌。

图 4 表明，增加电解液中的钨酸钠浓度，纳米复合薄膜晶粒得到细化，表面平整度提高。主要原因可能是钨酸钠浓度增加后，沉积速率加快，形核速率增加并大于晶核的生长速率，晶粒尺寸减小。当钨酸钠浓度提高到 160 g/L 时，纳米复合薄膜晶粒细小而均匀， Ni-W-P 基质金属晶粒轮廓清晰，呈规则的圆球型， CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒均匀地镶嵌在基质金属中。但电解液中过高的钨酸钠浓度会引起纳米复合薄膜显微硬度降低和内应力增加，导致脆性增加，与基体结合力下降。因此，电解液中钨酸钠的浓度控制在 100 g/L 左右为宜。

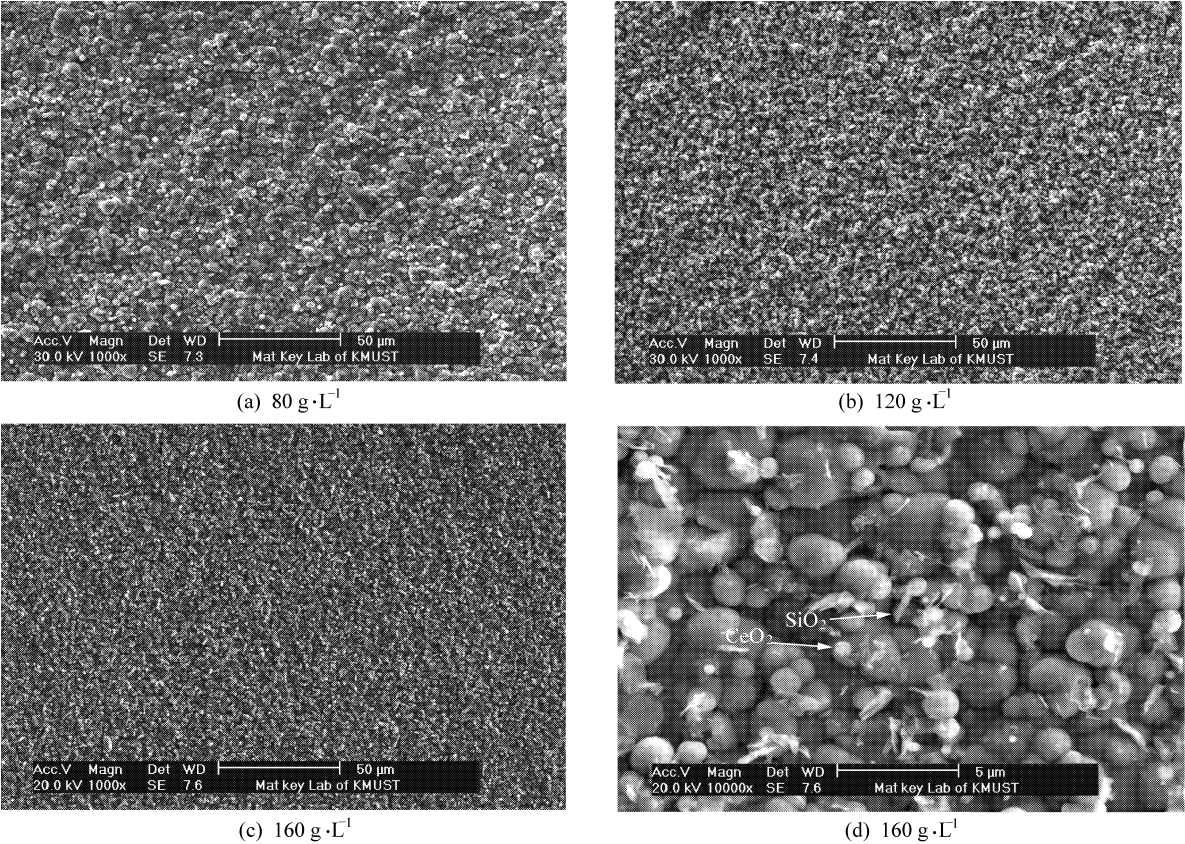


图 4 电解液中钨酸钠浓度对纳米复合薄膜表面形貌的影响

Fig. 4 Influence of Na_2WO_4 concentration in electrolyte on surface morphologies of the nano-composite films

2.2 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜组织及性能的影响

在 70 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 120 g/L $\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 100 g/L $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 15 g/L SiO_2 , 8 g/L CeO_2 , 6 mg/L 阳离子表面活性剂, 电解液温度为 $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, pH 值为 6.5, 电沉积时间为 1 h 的条件下, 研究了不同次磷酸钠浓度对 CeO_2 - SiO_2 /Ni-W-P 纳米复合薄膜化学组成、沉积速率、显微硬度和表面形貌的影响。

2.2.1 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜化学组成的影响

电解液中次磷酸钠浓度对 CeO_2 - SiO_2 /Ni-W-P 纳米复合薄膜化学组成的影响如图 5 所示。图 5(a) 和 5(b) 分别是次磷酸钠浓度对薄膜中 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒质量分数和元素 Ni、W 和 P 质量分数的

影响。从图 5 可以看出, 增加电解液中的次磷酸钠浓度, 纳米复合薄膜中 Ni 和 P 的质量分数增加, 而 W、 CeO_2 、 SiO_2 的质量分数降低。主要原因可能是次磷酸钠浓度增加后, 相同时间 Ni 和 P 的沉积速率加快, 纳米复合薄膜中 Ni 和 P 的质量分数增加。但同时造成 H^+ 在阴极上放电机机会增多, 阻碍 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒在阴极的析出, 使纳米颗粒的质量分数不断降低。

2.2.2 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响

电解液中次磷酸钠浓度对 CeO_2 - SiO_2 /Ni-W-P 纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响如图 6 所示。从图 6 可以看出, 沉积速率和显微硬度均随电解液中次磷酸钠浓度的增加而降低。增加次磷酸钠浓度, 虽然纳米复合薄膜中 P 的沉积速率增加, 但会造成 W、 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒沉积速率的降低, 导致体系总的沉积速率降低。当电解液中次磷酸钠浓度控制在 4 g/L 时, 沉积速率最快为 $25.03 \mu\text{m/h}$, 纳米复合薄膜中硬质元素 W、 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒质量分数均较高, 而 P 质量分数较低, 故显微硬度较高, 为 HV649。继续增加次磷酸钠浓度, 会引起纳米复合薄膜中 W 和 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的质量分数降低, 同时 P 质量分数又明显增加, 导致其显微硬度降低。例如, 当次磷酸钠浓度提高到 12 g/L 时, 纳米复合薄膜的显微硬度下降到了 HV394。

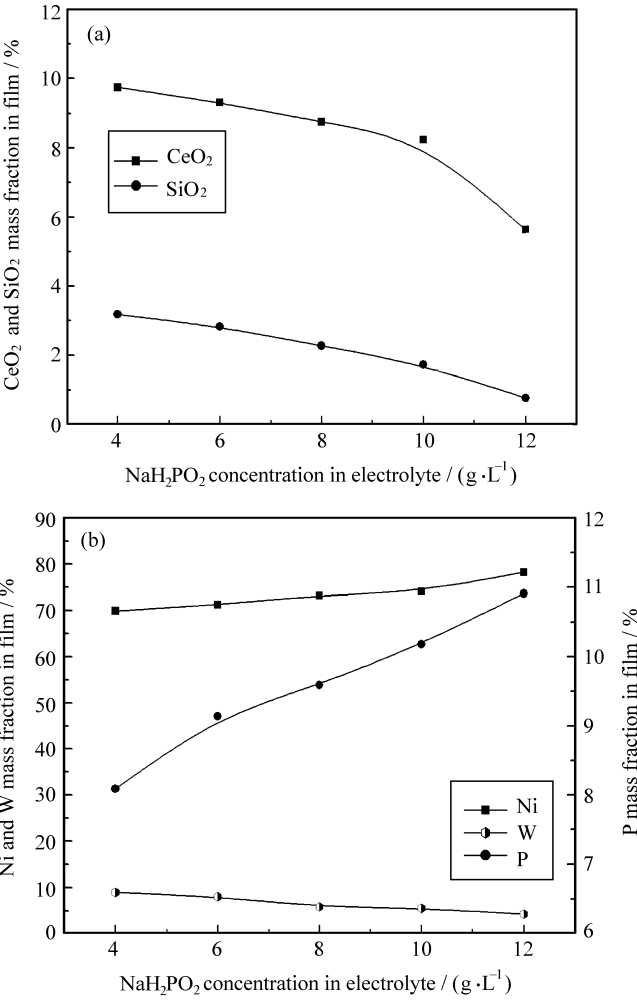


图 5 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜化学组成的影响
Fig. 5 Influence of NaH_2PO_2 concentration in electrolyte on chemical composition of the nano-composite films

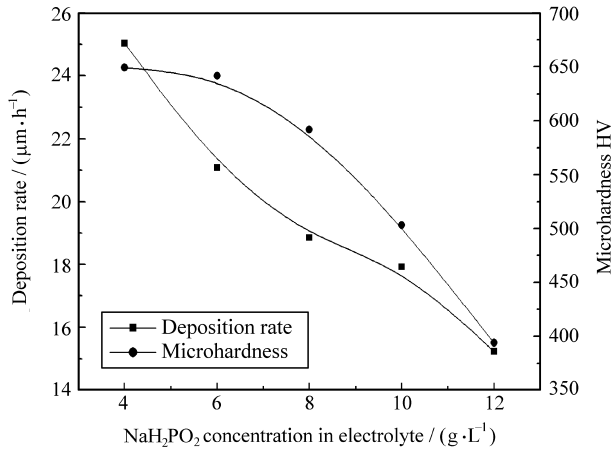


图 6 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜沉积速率和显微硬度的影响
Fig. 6 Influence of NaH_2PO_2 concentration in electrolyte on deposition rate and microhardness of the nano-composite films

2.2.3 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜表面形貌的影响

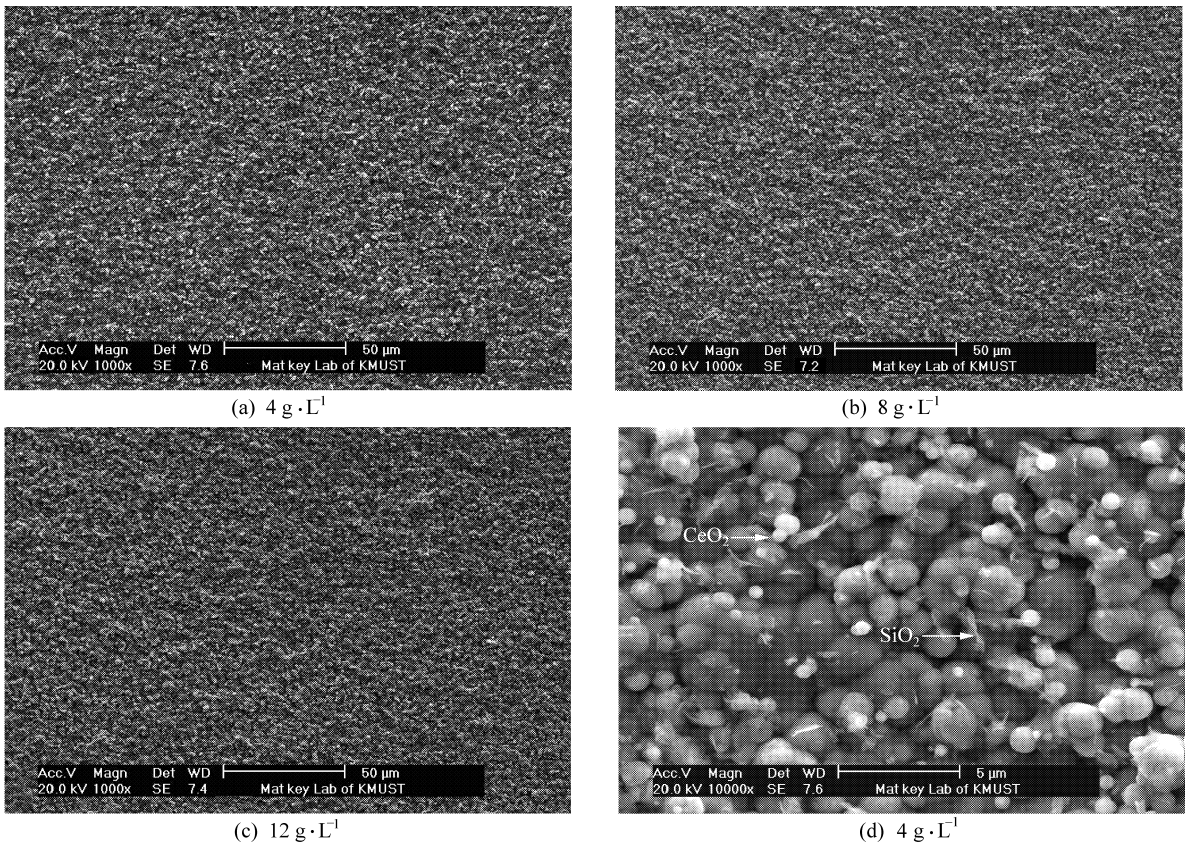


图 7 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜表面形貌的影响

Fig. 7 Influence of NaH_2PO_4 concentration in electrolyte on surface morphologies of the nano-composite films

电解液中次磷酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜表面形貌的影响如图 7 所示。图 7(a)~7(c)是次磷酸钠浓度分别为 4、8 和 12 g/L 时, 纳米复合薄膜 1000 倍下的表面形貌; 图 7(d)是次磷酸钠浓度为 4 g/L 时, 纳米复合薄膜 10000 倍下的表面形貌。图 7 表明, 电解液中次磷酸钠浓度对纳米复合薄膜的表面形貌影响较小, 增加次磷酸钠浓度, 纳米复合薄膜的表面形貌没有明显变化。当次磷酸钠浓度为 4 g/L 时, 不仅纳米复合薄膜的显微硬度较高, 而且 Ni-W-P 基质金属的晶粒轮廓也较清晰, 晶粒细小而均匀, CeO_2 和 SiO_2 纳米颗粒在基质金属中分散性也较好。因此, 电解液中的次磷酸钠浓度控制在 4 g/L 左右为宜。

3 结 论

(1) 通过 Ni 、 W 、 P 和 CeO_2 、 SiO_2 纳米颗粒的脉冲共沉积, 在碳钢表面制备了功能性 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜。当电解液中钨酸钠和次磷酸钠浓度分别控制在 100 和 4 g/L 时, 纳米

复合薄膜综合性能较好, 沉积速率为 $25.03 \mu\text{m/h}$, 显微硬度为 $\text{HV}649$ 。

(2) 增加电解液中的钨酸钠浓度, $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜晶粒得到细化。当钨酸钠浓度为 160 g/L 时, 纳米复合薄膜晶粒细小而均匀, 基质金属晶粒轮廓清晰, 呈规则的圆球型, 纳米颗粒在基质金属中镶嵌均匀, 但显微硬度较低。

(3) 电解液中的次磷酸钠浓度对 $\text{CeO}_2\text{-SiO}_2/\text{Ni-W-P}$ 纳米复合薄膜的表面形貌影响较小, 但会明显降低显微硬度。

参考文献:

[1] Xu R D, Guo Z C, Wang J L. Study on structure and properties of electrodeposited $\text{RE-Ni-W-B-B}_4\text{C-PTFE}$ composite coating [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(3): 425-429.
[2] 蒋 斌, 徐滨士, 董世运, 等. 纳米复合镀层的研究现状 [J]. 材料保护, 2002, 35(6): 1-3.
Jiang Bin, Xu Binshi, Dong Shiyun, et al. Nano-power composite coatings [J]. Materials Protection, 2002, 35(6): 1-3.
[3] 王 为, 郭鹤桐. 纳米复合镀技术 [J]. 化学通报, 2003, 3(3): 178-181.

- Wang Wei, Guo Hetong. Development of nano-composite plating technology [J]. Chemistry, 2003, 3(3): 178-181.
- [4] 彭元芳, 曾振欧, 赵国鹏, 等. 电沉积纳米复合镀层的研究现状 [J]. 电镀与涂饰, 2002, 21(6): 17-20.
- Peng Yuanfang, Zeng Zhen'ou, Zhao Guopeng, et al. Current study of electrodeposited composite coatings with nano particles [J]. Electroplating and Finishing, 2002, 21(6): 17-20.
- [5] 赵晓兵, 陈志刚. 纳米复合材料及其制备技术综述 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(4): 52-56.
- Zhao Xiaobing, Chen Zhigang. The summary of nanocomposite and its preparation technology [J]. Journal of Jiangsu University: Nature Science Edition, 2002, 23(4): 52-56.
- [6] Li J, Wu Y Y, Wang D L. Microstructure and wear resistance characteristics of electroformed nickel and partially stabilized zirconia composite coatings [J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(7): 1751-1758.
- [7] 郭忠诚, 朱晓云, 杨显万. 电沉积法制备多功能复合材料研究动态与发展趋势 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(4): 86-94.
- Guo Zhongcheng, Zhu Xiaoyun, Yang Xianwan. Research and development trends of electrodeposited multifunctional composite materials [J]. Engineering Science, 2004, 6(4): 86-94.
- [8] 吴惠箐, 丁桂甫, 王裕超, 等. 锌基碳纳米管复合材料的界面特性及增强机理 [J]. 复合材料学报, 2007, 24(4): 88-94.
- Wei Huijing, Ding Guipu, Wang Yuchao, et al. Interfacial characteristic and reinforcement mechanism of the carbon nanotube/zinc composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 88-94.
- [9] 李建康, 姚 熹. $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ 成分梯度铁电膜的结构及性能 [J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 49-53.
- Li Jiankang, Yao Xi. [J]. Structure and properties of compositionally graded $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ ferroelectric thin films [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 49-53.
- [10] 李爱侠, 孙大明, 孙兆奇, 等. 基底温度对 Ag-MgF_2 金属陶瓷膜内应力的影响 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 22-26.
- Li Aixia, Sun Daming, Sun Zhaoqi, et al. Effect of substrate temperature on residual stress in Ag-MgF_2 cermet films [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 22-26.
- [11] El-Sherik A M, Erb U. Adhesion and corrosion performance of nanocrystalline Ni coatings [J]. Plating and Surface Finishing, 1995, 82(9): 85-89.
- [12] Zhitomirsky I. Electrochemical processing and characterization of nickel hydroxide polyelectrolyte films [J]. Materials Letters, 2004, 58(3/4): 420-424.
- [13] Wang Z, Shemilt J, Xiao P. Novel fabrication technique for the production of ceramic/ceramic and metal/ceramic composite coatings [J]. Scripta Materialia, 2000, 42 (7): 653-659.
- [14] Marco M. Electrodeposition of composites: An expanding subject in electrochemical materials science [J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(20): 3397-3402.
- [15] Surender M, Balasubramaniam R, Basu B. Electrochemical behavior of electrodeposited Ni-WC composite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 187(1): 93-97.
- [16] Kim S K, Yoo H J. Formation of bilayer Ni-SiC composite coatings by electrodeposition [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108/109(1/3): 564-569.
- [17] Bogdan S, Malgorzata K. Composite Ni/ Al_2O_3 coatings and their corrosion resistance [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50 (20): 4188-4195.
- [18] Xu B S, Wang H D, Dong S Y. Electrodepositing nickel silica nano-composites coatings [J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7(6): 572-575.
- [19] Shrestha N K, Sakurada K, Masuko M, et al. Composite coatings of nickel and ceramic particles prepared in two steps [J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 140(5): 175-181.
- [20] Wang L P, Gao Y, Xue Q J. Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 390 (1/2): 313-318.
- [21] 刘继光, 钟 良, 文代明. 化学镀 Ni-W-P 合金对 65Mn 钢热处理的表面防护 [J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(9): 469-471.
- Liu Jiguang, Zhong Liang, Wen Daiming. Protecting effect of electroless Ni-W-P alloy platings on 65Mn steel in heat treatment process [J]. Corrosion and Protection, 2006, 27 (9): 469-471.
- [22] 张 欢, 郭忠诚, 薛方勤. 脉冲电沉积 Ni-W-P 合金工艺的研究 [J]. 材料保护, 2004, 37(1): 36-37.
- Zhang Huan, Guo Zhongcheng, Xue Fangqin. Pulse electrodeposition Ni-W-P alloy technology [J]. Journal of Materials Protection, 2004, 37(1): 36-37.
- [23] Guo Z C, Zhu X Y. Studies on properties and structure of electrodeposited RE-Ni-W-B-SiC composite coating [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 363(1/2): 325-329.
- [24] Ma K Y, Guo Z C, Zhu X Y. Characteristics of electrodeposited RE-Ni-W-B- B_4C - MoS_2 composite coating [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(5): 1220-1225.
- [25] 朱诚意, 郭忠诚. 稀土对电沉积 Ni-W-B-SiC 复合镀层组织结构及性能的影响 [J]. 化工冶金, 1999, 20(3): 225-228.
- Zhu Chenyi, Guo Zhongcheng. Effects of addition of RE on properties and structure of Ni-W-B-SiC composite coatings [J]. Engineering Chemistry and Metallurgy, 1999, 20 (3): 225-228.
- [26] Guo Z C, Zhu X Y, Yang X W. Corrosion resistance of electrodeposited RE-Ni-W-P-SiC composite coating [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2001, 11 (3): 413-415.
- [27] Karthikeyan S, Srinivasan K N, Vasudevan T, et al. 化学镀 Ni-P- Cr_2O_3 和 Ni-P- SiO_2 复合镀层的研究 [J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(1): 1-6.
- Karthikeyan S, Srinivasan K N, Vasudevan T, et al. Studies on electroless Ni-P- Cr_2O_3 and Ni-P- SiO_2 composite coatings [J]. Electroplating and Finishing, 2007, 26(1): 1-6.
- [28] 曹铁华, 成旦红, 桑付明, 等. 脉冲复合电镀 (Ni-P)-纳米微粒 SiO_2 工艺 [J]. 电镀与精饰, 2004, 24(6): 27-30.
- Cao Tiehua, Cheng Danhong, Sang Fuming, et al. A study of the technology of (Ni-P)-nanometer SiO_2 composite pulse electroplating [J]. Plating and Finishing, 2004, 24(6): 27-30.
- [29] 郭忠诚, 杨显万. 电沉积多功能复合材料的理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 19-21.
- Guo Zhongcheng, Yang Xianwan. Theory and practice of electrodeposition multi-functional composite materials [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002: 19-21.
- [30] 杨显万, 邱定蕃. 湿法冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 22-25.
- Yang Xianwan, Qiu Dingfan. Hydrometallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998: 22-25.
- [31] 屠振密. 电镀合金原理与工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 342-350.
- Tu Zhenmi. Principle and process of plating alloy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993: 342-350.
- [32] 黄 令, 董俊修. 镍-钨合金电沉积层结构与显微硬度的研究 [J]. 材料保护, 1999, 32(10): 18-19.
- Huang Ling, Dong Junxiu. Structure and microhardness of electrodeposited Ni-W alloys [J]. Materials Protection, 1999, 32(10): 18-19.