复合材料学报 第26卷 第4期 8月 2009年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 26 No. 4 August 2009

文章编号：1000-3851(2009)04-0111-08

脉冲电沉积纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层腐蚀特性

钟远辉，戴品强*，周　翔
（福州大学 材料科学与工程学院，福州 350108）

摘　要： 采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)研究了脉冲电沉积法制备的纳米晶 Ni－Co 合金镀层及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的组织结构、表面形貌和成分。用浸泡法和电化学极化法对比测试了纳米晶 Ni－Co 合金镀层和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 和 5 wt%HCl 溶液中的腐蚀行为。研究结果表明：通过脉冲电沉积法制备的 Ni－Co 合金镀层和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层具有典型的纳米晶结构；随着纳米 SiC 颗粒的增加，复合镀层的晶粒尺寸减小，硬度增加。所制备的纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层颗粒分散均匀，其在 3.5 wt%NaCl 和 5 wt%HCl 溶液中的耐蚀性均优于纳米晶 Ni－Co 合金镀层。纳米晶 Ni－Co 合金镀层和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液中的腐蚀速率极低，表现出极好的耐腐蚀性能，而在 5 wt%HCl 溶液中的腐蚀形态则表现为点蚀。

关键词： 脉冲电沉积；SiC/Ni－Co；复合镀层；腐蚀
中图分类号： TG172.5　　**文献标志码：** A

Corrosion characteristic of pulsed electrodeposition nano SiC/Ni-Co composite coating

ZHONG Yuanhui, DAI Pinqiang*, ZHOU Xiang
(College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The microstructures, surface morphology and composition of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coating prepared by pulse electrodeposition were studied by XRD, SEM and EDS. The corrosion characteristics of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coating were comparatively tested by the soak method and the electrochemical polarization method, respectively. The experimental results indicate that typical nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings can be synthesized by pulse electrodeposition, and with the increasing of the nano SiC particles, the grain size of nano SiC/Ni－Co composite coating is diminished while the microhardness is increased. The nano SiC/Ni－Co composite coating has better dispersion and it exhibits better corrosion resistance in 3.5 wt%NaCl and 5 wt%HCl solution than the nanocrystalline Ni－Co alloy. The surface morphology of all samples after corrosion in 3.5 wt%NaCl solution shows good corrosion resistance, while the samples show spot corrosion in 5 wt%HCl solution.

Keywords: pulse electrodeposition; SiC/Ni－Co; composite coating; corrosion

在普通镀液中加入一定浓度的纳米颗粒，并使其在搅拌状态下与基体金属共沉积而得到的纳米复合镀层，存在大量具有独特物理及化学性能的纳米颗粒。因此与普通镀层相比，纳米复合镀层具有更优异的力学性能、耐摩擦性能、耐腐蚀性能和抗高温氧化性能，受到越来越多的研究者关注[1-3]。

脉冲电沉积纳米晶 Ni－Co 合金具有较好的力学性能、耐磨性和耐腐蚀性[4-6]，因此被广泛应用于航空航天、微机电系统(MEMS)、纳机电系统(NEMS)等领域，但纳米晶 Ni－Co 合金现有的性能还远远满足不了日益发展的现代工业需求。纳米 SiC 颗粒由于粒度小，具有高硬度、高强度和高耐磨性等特点，与金属基体共沉积制备的纳米复合镀层可明显提高镀层性能。王丽琴[7]等研究表明，纳米 Ni－SiC 复合镀层的耐磨性优于纳米 Ni－Al_2O_3 复合镀层及纯 Cr 镀层。Benea[8]等研究发现，在镀液中加入粒径约 20 nm 的 SiC 粒子后，形成的 Ni－SiC 复合镀层的腐蚀电位 E_{corr}＝－198 mV(vs Ag/

收稿日期： 2008-07-03；**收修改稿日期：** 2008-11-03
基金项目： 福建省科技计划重点项目(2006H0020)
通讯作者： 戴品强，教授，博士生导师，主要从事纳米金属材料及其表面工程研究　E-mail：pqdai@126.com

AgCl)比纯镍的腐蚀电位 E_{corr} = −260 mV(vs Ag/AgCl)正移了 62 mV。在化学镀 Ni－P 工艺基础上添加适量的 SiC 纳米粒子，镀速和镀层硬度都有显著的提高，镀速可达到 68.4 μm/h，镀层硬度可达到 HV1650[9]。但目前纳米 SiC 颗粒增强 Ni－Co 合金基体的研究报道还比较少。本文作者通过脉冲电沉积法制备纳米晶 Ni－Co 合金和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层，研究了 2 种镀层的组织结构、表面形貌，并通过浸泡法和电化学极化方法对比研究了 2 种镀层在 3.5 wt%NaCl 和 5 wt%HCl 溶液中的腐蚀特性，初步探索纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的腐蚀机制，旨在为镀层的实际应用提供理论依据。

1　实验方法

采用脉冲电沉积法制备纳米晶 Ni－Co 合金和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层，镀液的组成：$NiSO_4 \cdot 6H_2O$ 300 g/L，$CoSO_4 \cdot 7H_2O$ 25 g/L，$NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 30 g/L，H_3BO_3 30 g/L，糖精 5 g/L，十二烷基硫酸钠 0.1 g/L，SiC (0～8 g/L)，分散剂适量。镀液 pH 值约为 4。试验所用试剂均为分析纯，用蒸馏水配制。本实验选用合肥开尔纳米技术发展有限责任公司生产的纳米 SiC 粉体。平均粒度 40 nm。分别交替使用 DF－101(B)型磁力搅拌器与 KQ－200KDE 型超声波仪对纳米复合镀液机械搅拌分散 30 min。脉冲电源为 SMD－30 型数控双脉冲电镀电源，电流密度为 5 A/cm^2，沉积温度为 45℃，占空比为 40%，周期为 10 ms。阳极为纯度 99.99%的可溶性镍板，阴极为经表面处理过的不锈钢板，阴阳两极板间距为 4.5 cm。

X 射线衍射在 X'Pert MPD Pro 型多功能 X 射线多晶衍射仪上进行，合金及纳米复合镀层表面形貌分析采用 XL30 ESEM－TMP 型环境扫描电镜，并利用其能谱仪测定镀层 Ni、Co 及 Si 含量，根据 Si 的含量换算成 SiC 的含量。

在室温条件下，用浸泡法比较纳米晶 Ni－Co 合金和纳米(1.22 wt%、3.26 wt%、6.21 wt%) SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 和 5 wt% HCl 溶液中的耐蚀性。在 2 种溶液中的浸泡腐蚀时间均为 240 h，在 METTLER－AE260 型电子天秤(精度为 0.0001 g)上称其失重，并计算腐蚀速率。浸泡实验完成后，用 XL30 ESEM－TMP 型环境扫描电镜观察镀层腐蚀后的表面形貌。采用 CHI 660C 型电化学工作站分别测定纳米晶 Ni－Co 合金和纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 和 5 wt%HCl溶液中的极化曲线，电极系统为三电极体系，工作电极为待测镀层，参比电极为饱和甘汞电极(SCE)，辅助电极为铂电极，测量极化曲线的参数设定为：在 3.5 wt%NaCl 溶液中，起始电位 −1200 mV，终止电位 600 mV；在5 wt%HCl溶液中，起始电位 −1000 mV，终止电位 600 mV；在 2 种腐蚀溶液中的扫描速度均为 10 mV/s。

2　结果与讨论

2.1　纳米晶镀层的组织结构及表面形貌

纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的 XRD 图谱如图 1 所示。由图 1 可知，纳米晶 Ni－Co 合金 2θ 为 45°和 53°附近出现明显的衍射峰(111)和(200)，相对强度比 $I_{(200)}/I_{(111)}$ = 0.43，通过查阅纯 Ni 的 PDF 卡片可知，金属 Ni 粉末的 XRD 的衍射峰(200)和(111)的相对强度 $I_{(200)}/I_{(111)}$ = 0.49，表明纳米晶 Ni－Co 合金在(111)织构择优取向。当纳米晶 Ni－Co 合金中加入纳米 SiC 颗粒后，复合镀层(111)和(200)两衍射峰与纳米晶 Ni－Co 合金相比出现了较明显的宽化，说明纳米 SiC 颗粒的加入使合金晶粒产生细化，Vaezi[10]和 Shi[11]等认为这是由于纳米 SiC 颗粒提高了电沉积过程中晶体的形核率从而延缓了晶粒长大。纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层 XRD 的衍射峰(200)和(111)的相对强度 $I_{(200)}/I_{(111)}$ 相比于纳米晶 Ni－Co 合金开始变小。可见，纳米 SiC 颗粒的

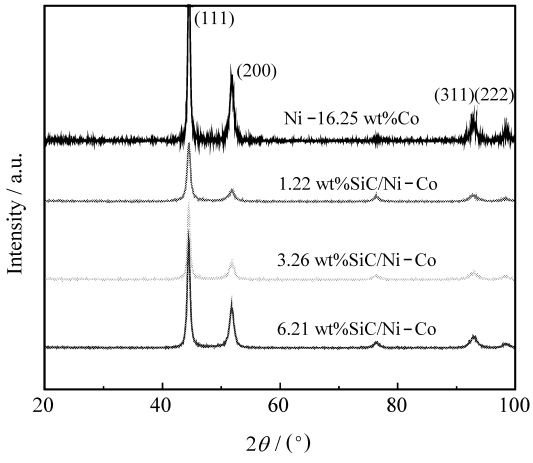


图 1　纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的 XRD 衍射图谱

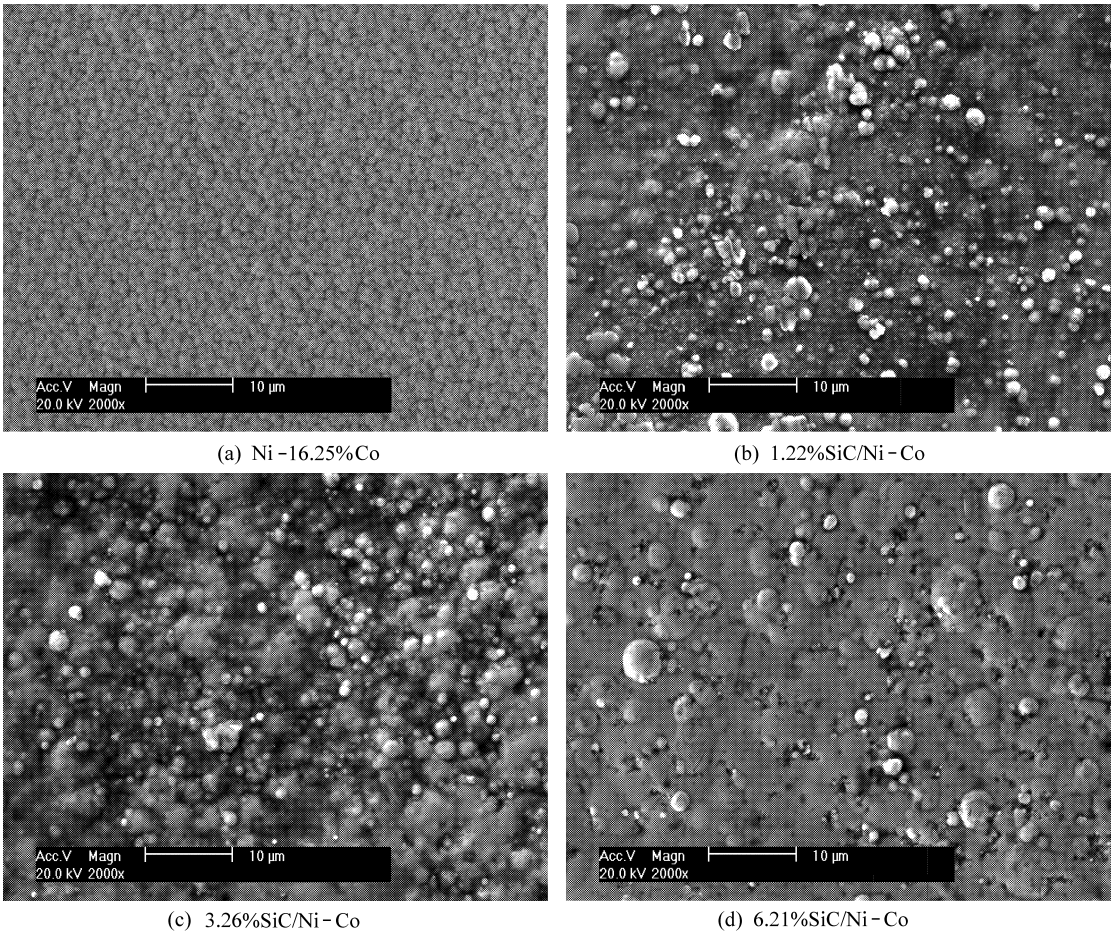
Fig. 1　X-ray diffraction patterns of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings

加入使得复合镀层(200)面织构消失，电沉积纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的过程中晶粒的生长呈无规则取向。

纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的表面形貌如图 2 所示。由图 2 可知，纳米 SiC 颗粒的存在使得复合镀层中 Ni－Co 颗粒明显得到细化，并且镀层的表面形貌出现细小的颗粒状。这是因为在金属沉积过程中 SiC 颗粒吸附在金属的活化位置，细化了金属基体从而形成了颗粒状的表面形貌。

图 2(b)、2(c)、2(d)复合镀层在镀液中的纳米 SiC 颗粒含量分别为 3、5 和 8 g/L，从图中可以看出，在镀液中 SiC 纳米颗粒含量较少时，复合镀层中的 SiC 纳米颗粒含量也较少，随着镀液中纳米颗粒含量增加，复合镀层中的纳米颗粒含量也随之增加，当镀液中纳米 SiC 颗粒含量为 5 g/L，即镀层中 SiC 颗粒含量为 3.26 wt%时，镀层中颗粒分布比较密集均匀(图 2(c))，之后镀液中纳米颗粒含量进一步增加，镀层中的颗粒含量反而有所减少，并且出现了团聚现象(图 2(d))。这是因为刚开始镀液中 SiC 颗粒含量增加时，相对镀液中的颗粒悬浮量也增加，在单位时间内通过搅拌作用输送到阴极表面的颗粒数量就越多，因而纳米颗粒进入镀层的机会变大，镀层中纳米 SiC 颗粒的复合量就越大。但镀液中 SiC 含量增加的同时，镀液的黏度系数也随之增大，对镀液中的电流分布产生了负面影响，反而阻碍了共沉积的进行。而且镀液中 SiC 纳米颗粒含量越高，在相同的分散条件下就越容易发生团聚。

纳米晶 Ni－Co 合金镀层及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的晶粒尺寸和显微硬度如图 3 所示，由图 3 可知，纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的硬度较 Ni－Co 合金镀层有较大幅度的提高。通过谢乐公式计算出镀层的晶粒尺寸，发现合金和复合镀层的晶粒



(a) Ni－16.25%Co (b) 1.22%SiC/Ni－Co

(c) 3.26%SiC/Ni－Co (d) 6.21%SiC/Ni－Co

图 2 纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的表面形貌

Fig. 2 Surface morphologies of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings

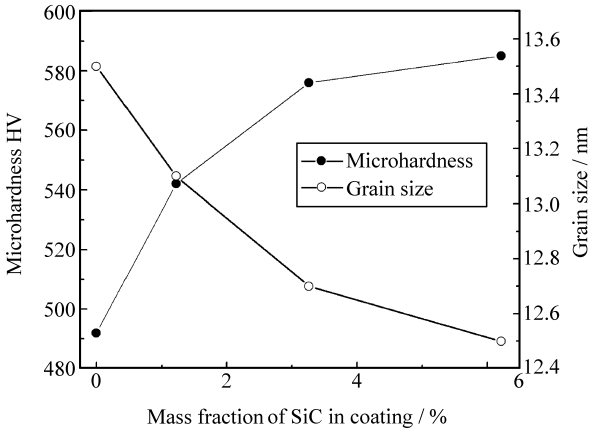


图 3　纳米晶 Ni－Co 合金镀层及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的晶粒尺寸和显微硬度

Fig. 3　Grain size and microhardness of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings

尺寸在 13 nm 左右，属于典型纳米晶范畴。与显微硬度变化趋势不同的是，纳米 SiC 颗粒的引入，复合镀层的晶粒尺寸具有减小趋势。其原因是在复合电沉积过程中，纳米颗粒的加入不仅能增大阴极极化，降低金属成核反应的过电位，有利于新晶核的生成，而且能抑制晶粒的聚集和长大，起到细化基质金属晶粒的作用，同时由于纳米颗粒的嵌入可以阻碍或延迟基质金属的位错滑移，从而抑制塑性变形，使复合镀层得以强化，加之纳米颗粒本身所具有的高强度、高硬度及其均匀分布在基质金属中所产生的弥散强化效应导致复合镀层显微硬度逐步提高[12-13]。

2.2　浸泡腐蚀性能

纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液的浸泡腐蚀速率见图 4(a)。由图 4(a)可知，4 种镀层在 NaCl 溶液中的浸泡腐蚀速率都非常低，说明 4 种镀层在 NaCl 溶液中的腐蚀性能都比较好。随着纳米 SiC 颗粒的加入并增加，复合镀层的浸泡腐蚀速率逐渐降低，4 种镀层中纳米晶 Ni－Co 合金镀层的浸泡腐蚀速率最高，6.21%纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的浸泡腐蚀速率最低。

与图 4(a)比较可以看出，4 种镀层在 5 wt% HCl 溶液中的浸泡腐蚀速率明显高于在 3.5 wt% NaCl 溶液中的腐蚀速率(图 4(b))。4 种镀层的浸泡腐蚀速率相差不大，浸泡腐蚀速率的规律与在 3.5 wt%NaCl 溶液中的腐蚀规律相似，即纳米 SiC

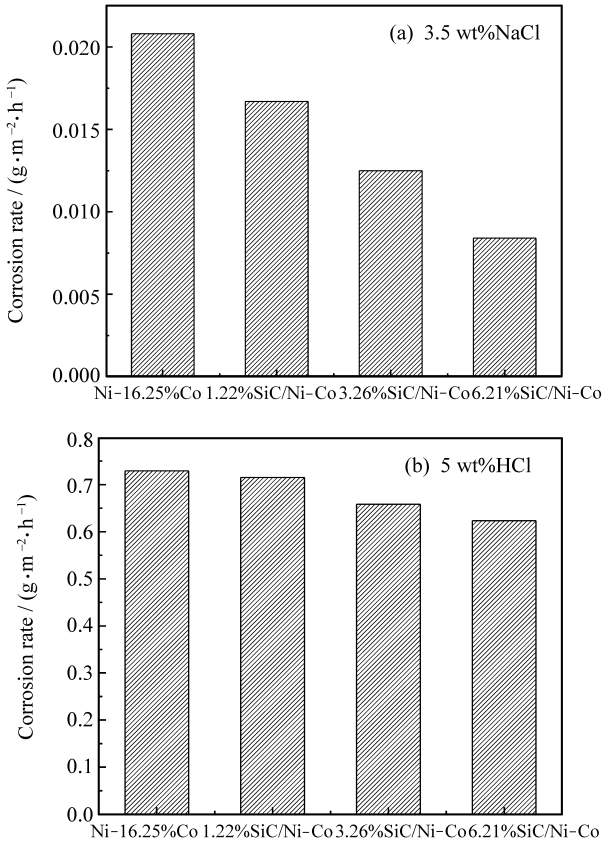


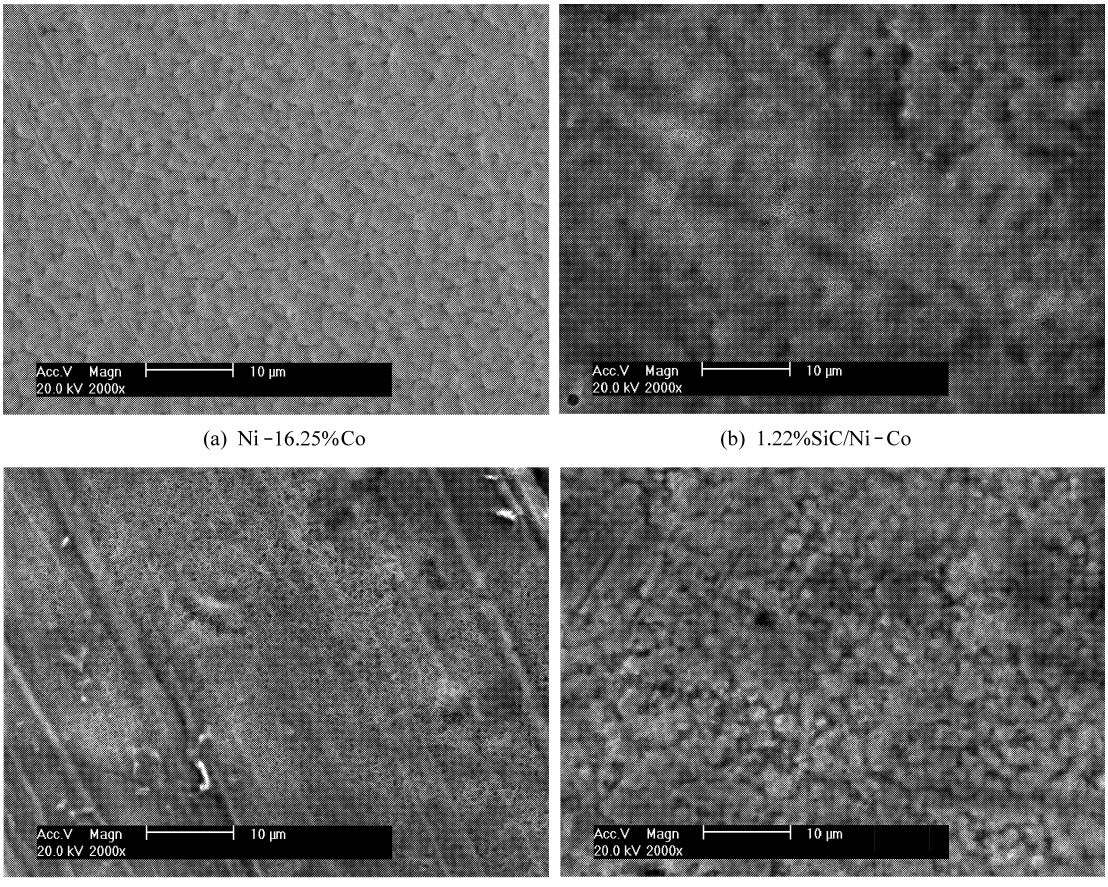
图 4　不同镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液(a)和 5 wt%HCl 溶液(b)中的腐蚀速率

Fig. 4　Corrosion rate of different coatings in 3.5 wt%NaCl solution (a) and 5 wt%HCl solution (b)

颗粒的加入能有效提高镀层的耐腐蚀性。

纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在3.5 wt%NaCl溶液中浸泡腐蚀后的表面形貌如图 5 所示。由图 5 可知，4 种镀层在 NaCl 溶液中表面受到的腐蚀均较轻微，表面仍留有腐蚀前研磨留下的磨痕。因此可以说明 4 种镀层在 3.5 wt%NaCl溶液中具有极强的耐腐蚀性能。

纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在5 wt%HCl溶液中浸泡腐蚀后的表面形貌如图 6 所示。可以看出，纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 5 wt%HCl 溶液中受到的腐蚀要明显比在 NaCl 溶液中受到的腐蚀严重，这与前面所列出的浸泡腐蚀速率结果一致。从图 6 还可以看出 4 种镀层在 5 wt%HCl 溶液中经过长时间腐蚀后仍然保持光亮平整的表面形貌，并且呈现点蚀腐蚀形态。纳米晶 Ni－Co 合金镀层表面的胞状组织除少量被腐蚀外，依然清晰可见，其形貌较腐蚀前后没有发生很大变化。而纳米 SiC/



(a) Ni－16.25%Co (b) 1.22%SiC/Ni－Co

(c) 3.26%SiC/Ni－Co (d) 6.21%SiC/Ni－Co

图 5 纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液中浸泡腐蚀后的表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings after corrosion in 3.5 wt%NaCl solution

Ni－Co 复合镀层除 Ni－Co 合金基体被少量腐蚀外，纳米 SiC 颗粒并未完全被腐蚀。

2.3 电化学腐蚀性能

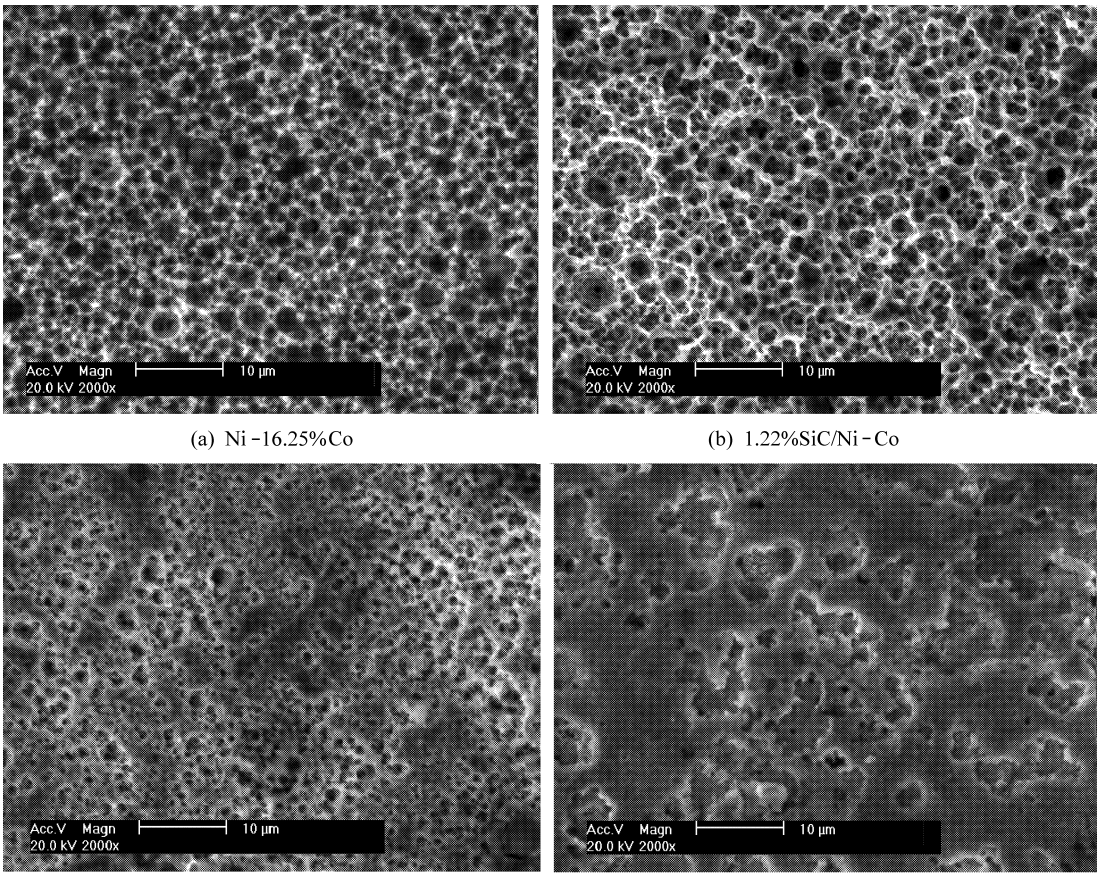
纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液和 5 wt%HCl 溶液中的极化曲线分别如图 7(a)和 7(b)所示。镀层在 2 种腐蚀介质中的腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(I_{corr})分别列于表 1。

由图 7(a)可知，纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液中的极化曲线大体相似，都具有比较宽的钝化区域。由表 1 可知，随着纳米 SiC 颗粒含量的增加，复合镀层自腐蚀电位不断正移，这表明纳米 SiC 颗粒的引入有助于提高合金镀层的耐腐蚀性。并且随着纳米 SiC 颗粒含量的增加，纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的耐腐蚀性逐渐增强。

表 1 纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在不同溶液中的自腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 I_{corr}

Table 1 Corrosion potential (E_{corr}) and corrosion current (I_{corr}) of different coatings measured in different solutions

Sample	3.5 wt%NaCl		5 wt%HCl	
	E_{corr}/V	I_{corr}/(A·cm^{-2})	E_{corr}/V	I_{corr}/(A·cm^{-2})
Ni－16.25%Co	－0.465	7.245×10^{-5}	－0.252	6.542×10^{-5}
1.22%SiC/Ni－Co	－0.442	5.962×10^{-5}	－0.236	5.638×10^{-5}
3.26%SiC/Ni－Co	－0.422	9.843×10^{-6}	－0.228	4.496×10^{-5}
6.21%SiC/Ni－Co	－0.405	7.812×10^{-6}	－0.203	3.829×10^{-5}



(a) Ni-16.25%Co　　(b) 1.22%SiC/Ni-Co

(c) 3.26%SiC/Ni-Co　　(d) 6.21%SiC/Ni-Co

图 6　纳米晶 Ni-Co 合金及其纳米 SiC/Ni-Co 复合镀层在 5 wt%HCl 溶液中的浸泡腐蚀形貌

Fig. 6　Surface morphologies of nanocrystalline Ni-Co alloy and nano SiC/Ni-Co composite coatings after corrosion in 5 wt%HCl solution

与图 7(a)比较可知，纳米晶 Ni-Co 合金及其纳米 SiC/Ni-Co 复合镀层在 5 wt%HCl 溶液中的极化曲线(图 7(b))不存在明显的钝化区域，表 1 的极化曲线数据表明，纳米晶 Ni-Co 合金及其纳米 SiC/Ni-Co 复合镀层在 5 wt%HCl 溶液中的耐腐蚀性与在 3.5wt%NaCl 溶液中的耐腐蚀性规律一致，即纳米 SiC 颗粒的引入有助于提高合金镀层的耐腐蚀性。

上述实验结果表明：随着纳米 SiC 颗粒的引入及其颗粒含量的增加，纳米 SiC/Ni-Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl 溶液和 5 wt%HCl 溶液中的自腐蚀电位不断正移，腐蚀电流密度逐渐减小，说明纳米 SiC/Ni-Co 复合镀层的耐腐蚀性明显优于 Ni-Co 合金镀层，并且随着复合镀层中纳米 SiC 颗粒含量(质量分数)的增加，镀层耐腐蚀性不断提高。这是因为纳米 SiC 颗粒的加入，一方面抑制了镀层腐蚀过程的阳极反应。这是因为分散在 Ni-Co 合金基体中的 SiC 颗粒占据了优先腐蚀的位置，抑制了 NaCl 和 HCl 对镀层的腐蚀，提高了镀层的耐腐蚀性[14-15]。另一方面纳米 SiC 颗粒的加入细化了 Ni-Co 合金晶粒，使电沉积层的结构更为均匀、致密，极大降低了电沉积层的空隙率，从而增强了耐腐蚀性。

纳米晶 Ni-Co 合金基体在 NaCl 溶液和 HCl 溶液中的腐蚀，是由 H^+ 阴极还原和 Ni-Co 合金阳极溶解联合作用的结果。

阴极区域的主导反应是溶液中的氢离子得到电子被还原成氢气的析出反应，这时候的阳极溶解可以忽略，反应可以用下式表示：

$$2H^+ + 2e \rightarrow H_2\uparrow \quad (1)$$

在阳极区域的主导反应是工作电极纳米晶体 Ni 或纳米晶 Ni-Co 合金的溶解反应，可用下式表示：

$$Ni - 2e \rightarrow Ni^{2+} \quad (2)$$

$$Co - 2e \rightarrow Co^{2+} \quad (3)$$

这时析氢反应可以忽略。

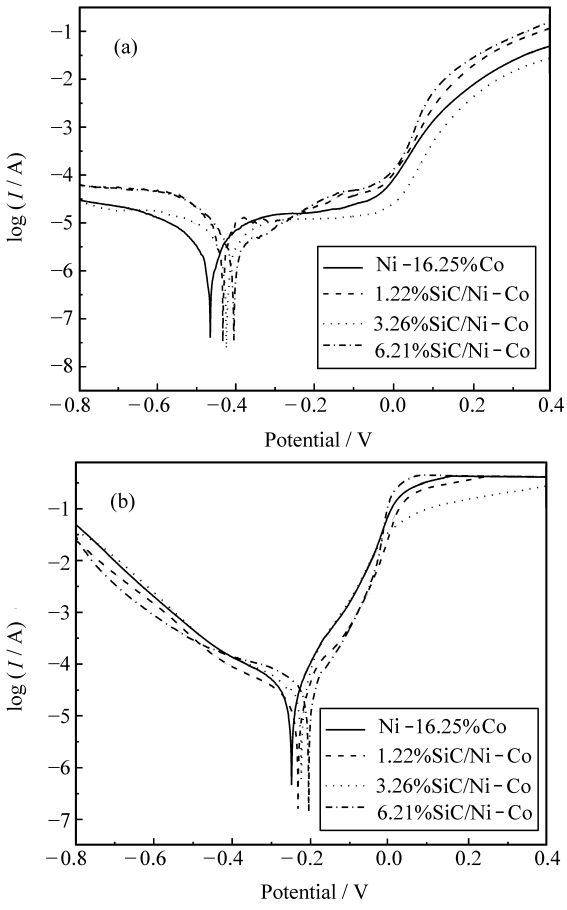


图 7　纳米晶 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt%NaCl (a) 和 5 wt%HCl (b) 溶液中的极化曲线

Fig. 7　Tafel extrapolation curves of nanocrystalline Ni－Co alloy and nano SiC/Ni－Co composite coatings in 3.5 wt%NaCl (a) and 5 wt%HCl (b) solution

从理论上讲，NaCl 溶液和 HC1 溶液中的 Cl^- 由于易变形，穿透能力强，因此在材料的腐蚀过程中，$C1^-$ 离子不仅对金属的阳极溶解具有活化作用，直接参与其阳极溶解，而且还具有破坏镀层表面钝化膜的作用，从而使试件表面发生点蚀。

纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层中，SiC 粒子呈惰性，非常不活泼，而金属 Ni、Co 相对而言较活泼，因此腐蚀介质中的活性离子 $C1^-$ 和镀层中的金属 Ni 或 Co 结合成可溶性氯化物，这样就局部破坏了镀层，在基质金属的特定点上生成小蚀孔，成为活化中心，基质金属表面处于活化溶解状态，电势较负，成为阳极。SiC 表面仍呈惰性，电势较正为阴极。于是蚀孔内外构成微电偶腐蚀电池，发生点腐蚀。镀层中 SiC 含量越多，在镀层表面基体金属 Ni、Co 所占的相对面积越小，即腐蚀微电池的阳极面积变小，而阴极面积变大，当腐蚀发生时，会有利于向纵深方向发展，形成较强烈的点腐蚀，因而随着镀层中粒子含量的增加，镀层抗点蚀能力下降。另外，镀层中粒子含量过高又易于使微粒产生团聚，沉积出结构松散的复合镀层，无助于提高耐蚀性，反而会降低耐蚀性。

3　结　论

（1）通过脉冲电沉积法制备的 Ni－Co 合金及其纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层具有典型的纳米晶结构，纳米 SiC 颗粒的引入起到了弥散强化和细化晶粒的作用，显著提高了镀层的显微硬度。

（2）纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt% NaCl 溶液的浸泡中腐蚀速率极低，而在 5 wt% HCl 溶液中的腐蚀形态则表现为点蚀腐蚀形态。

（3）纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层在 3.5 wt% NaCl 溶液和 5 wt%HCl 溶液中的耐蚀性均优于纳米晶 Ni－Co 合金镀层，随着纳米 SiC 颗粒含量的增加，纳米 SiC/Ni－Co 复合镀层的耐腐蚀性进一步提高。

参考文献：

[1] Musil J. Hard and superhard nanocomposite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 125(1/3): 322-330.

[2] Zhou Y, Zhang H, Qian B. Friction and wear properties of the co-deposited Ni－SiC nanocomposite coating [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(20): 8335-8339.

[3] Srivastava M, William Grips V K, Jain A, et al. Influence of SiC particle size on the structure and tribological properties of Ni－Co composites [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 202(2): 310-318.

[4] Gu Changdong, Lian Jianshe, Jiang Zhonghao. High strength nanocrystalline Ni－Co alloy with enhanced tensile ductility [J]. Advanced Engineering Materials, 2006, 8(4): 252-255.

[5] Wang Liping, Gao Yan, Xue Qunji, et al. Microstructure and tribological properties of electrodeposited Ni－Co alloy deposits [J]. Applied Surface Science, 2005, 242(3/4): 326-332.

[6] Srivastava M, Ezhil Selvi V, William Grips V K, et al. Corrosion resistance and microstructure of electrodeposited nickel－cobalt alloy coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(6): 3051-3060.

[7] 王丽琴，吴　化，铁　军，等. Ni－SiC 纳米复合镀工艺及性能研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术，2005，17(4)：230-233.
Wang Liqin, Wu Hua, Tie Jun, et al. Preparation technology and properties of electrodeposited Ni/nano SiC composite coatings [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(4): 230-233.

[8] Benea L, Bonora P L. Composite electrodeposition to obtain nanostructured coatings [J]. J Electrochem Soc, 2001, 148(7): 461-465.

[9] 蔡莲淑，程　秀，揭晓华，等. Ni-P-SiC(纳米)化学复合镀工艺的研究[J]. 表面技术，2003，32(5)：38-40.
Cai Lianshu, Cheng Xiu, Jie Xiaohua, et al. Study on technology of electroless Ni-P-SiC (nanometer) composite coating [J]. Surface Technology, 2003, 32(5): 38-40.

[10] Vaezi M R, Sadrnezhaad S K, Nikzad L. Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics [J]. Colloids and Surfaces A, 2008, 315(1/3): 176-182.

[11] Shi L, Sun C F, Gao P, et al. Mechanical properties and wear and corrosion resistance of electrodeposited Ni-Co/SiC nanocomposite coating [J]. Applied Surface Science, 2005, 252(10): 3591-3599.

[12] Feng Q Y, Li T J, Zhang Z T, et al. Preparation of nanostructured Ni/Al_2O_3 composite coatings in high magnetic field [J]. Surface and Coatings Technology, 2007, 201(14): 6247-6252.

[13] Yao Yingwu, Yao Suwei, Zhang Lu, et al. Electrodeposition and mechanical and corrosion resistance properties of Ni-W/SiC nanocomposite coatings [J]. Materials Letters, 2007, 61(1): 67-70.

[14] Li J, Sun Y, Sun X. et al. Mechanical and corrosion-resistance performance of electrodeposited titania-nickel nanocomposite coatings [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 192(2/3): 331-335.

[15] Benea L, Bonora P L, Borello A, et al. Effect of SiC size dimensions on the corrosion wear resistance of the electrodeposite composite coating [J]. Materials and Corrosion, 2002, 53(1): 23-29.

KEYWORDS FOR COMPOSITES

A: MATERIAL

aramid fibre
carbon fibre
carbon-carbon composites
ceramic fibre
ceramic-matrix composites
discontinuous reinforcement
fabrics/textiles
fibres
foams
glass fibres
glasses
honeycomb
hybrid
intermetallics
lamina/ply
laminates
layered structures
metal-matrix composites
moulding compounds
nano-structures
particle-reinforcement
plates
polymer(textile)fibre
polymer-matrix composites (PMCs)
preform
prepreg
recycling
resins
smart materials
strand
tape
thermoplastic resin
thermosetting resin
thin films
tow
3-dimensional reinforcement
wood
yarn

B: PROPERTY

adhesion
anisotropy
buckling
chemical properties
corrosion
creep
cure behaviour
damage tolerance
debonding
defects
delamination
directional orientation
elasticity
electrical properties
embrittlement
environmental degradation
fatigue
fibre/matrix bond
fracture
fracture toughness
fragmentation
hardness
high-temperature properties
impact behaviour
interface/interphase
internal friction/damping
magnetic properties
mechanical properties
microstructure
optical properties/techniques
physical properties
plastic deformation
porosity
residual/internal stress
rheological properties
strength
stress concentrations
stress relaxation
stress transfer
surface properties
thermal properties
thermomechanical
transverse cracking
vibration
wear
wettability

C: ANALYSIS

analytical modelling

(下转 196 页)