

高频脉冲电沉积改善 Ni 镀层的组织和性能

王子涵¹ 杨 滨^{1,2} 蒋春丽³ 王庆富³ 张鹏程³ 范爱萍¹

1 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 (100083)

2 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 (110016)

3 中国工程物理研究院表面物理与化学国家重点实验室, 绵阳 (621900)

E-mail: zihan-wang@163.com.cn

摘 要: 研究了高频脉冲频率对纳米 Ni 镀层组织、腐蚀性能和摩擦性能的作用机理。透射电镜(TEM)分析发现, 实验范围内 (30-100 kHz), 提高脉冲频率, 可使 Ni 镀层晶粒细化。室温下, 在 50 $\mu\text{g/g}$ Cl-氯化钾溶液中, 分别测试了 Ni 镀层的极化曲线和电化学阻抗谱(EIS), 结果表明, 电极过程的转移电阻从 30 kHz 沉积 Ni 镀层的 $2.61 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 100 kHz 沉积 Ni 镀层的 $6.56 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 自腐蚀电位从 -551.41 mV 正移到 -420.28 mV。表明选用较高的脉冲频率, 有利于 Ni 镀层获得较大的阻抗幅值, 提高自腐蚀电位, 增强耐腐蚀性。Ni 镀层的摩擦试验结果表明, 摩擦系数由 30 kHz 沉积 Ni 镀层的 0.39 降低到 100 kHz 沉积 Ni 镀层的 0.25。表明高频沉积的 Ni 镀层具有更好的耐磨性。镀层晶粒细化、较高的致密性和硬度是耐磨性提高的主要原因。

关键词: 脉冲电沉积; Ni 镀层; 耐蚀性; 摩擦系数

中图分类号: TG172.4

1. 引言

相对普通粗晶材料, 晶粒尺寸小于 100 nm 的纳米材料具有优异的机械、物理、化学和电化学性能, 因此吸引了材料科学工作者的关注^[1]。在现有的纳米材料制备方法(如溶胶凝胶法、化学气相沉积法、电沉积法和机械合金化法等^[2])中, 电沉积法是目前研究的一个热点, 研究的体系包括 Ni、Co、Cu、Ni-P、Fe-Ni 和 Ni-SiC 等^[3]。

电沉积纳米 Ni 的主要制备方法有直流法^[4]、脉冲法和喷射法等^[5]。脉冲法是近十多年来发展起来的一种新型电沉积技术, 依据的电化学原理是利用电流(或电压)脉冲的张弛增加阴极的活化极化和降低阴极的浓差极化, 以达到改善镀层物理化学性能的目的^[6]。以往脉冲电沉积的研究都局限在低频(10 kHz)以下范围内^[7-9], 更高频脉冲电沉积对镀层组织和性能的影响鲜有系统的研究报道^[10-13]。考虑到 Ni 镀层不仅仅用于装饰性镀层, 还广泛应用于耐腐蚀和耐磨镀层中。因此, 本文选择 30-100 kHz 的脉冲频率, 研究了高频脉冲电沉积 Ni 镀层的组织、耐腐蚀和耐磨性能, 探讨了高频脉冲细化 Ni 镀层组织、改善性能的机理。

2. 实验

阳极采用 Ni 板, 阴极采用钢板。电解液采用氨基磺酸镀液, 基本组成如下: 500 g/L 氨

¹ 本课题得到表面物理与化学国家重点实验室开放基金资助 (SPC200704)

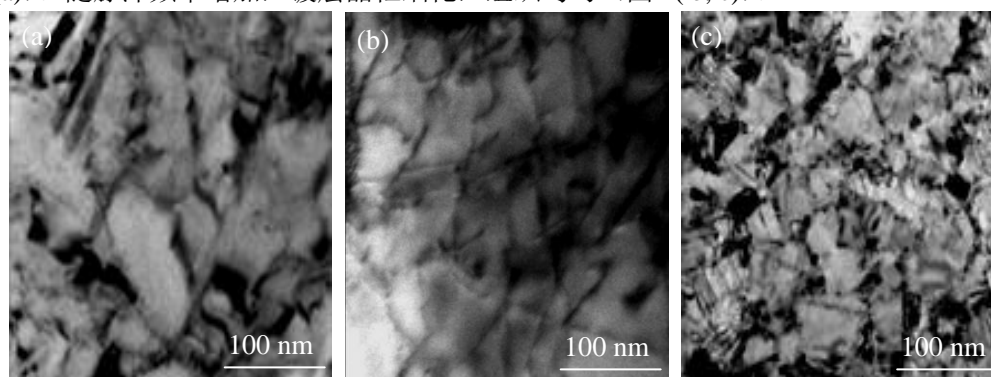
基磺酸镍、30 g/L 硼酸及 15 g/L 氯化钠（所用试剂均为分析纯）。配制镀液时，将各试剂用蒸馏水溶解后再混合，用 10% 氢氧化钠溶液调节 pH 值。电镀操作条件如下：温度 60 °C，pH 值 3~4，电流密度 1 A/dm²，占空比 45%，频率 30~100 kHz。电沉积时，由耐腐蚀磁力过滤泵进行搅拌。实验中固定上述工艺条件，仅改变脉冲频率，以研究其对 Ni 镀层组织和性能的影响。

电沉积后，将 Ni 镀层从钢板上剥离，用 502 胶水粘于光滑平整的铜块上，依次在不同粒度的砂纸上打磨，接着抛光，然后将粘在铜块上的 Ni 片用丙酮溶液浸泡，直至脱落，再将抛光面一侧粘于光滑的铜块上，重复上述操作，最后将 Ni 片冲成直径为 3 mm 的小圆片，采用 MTP-1 型电解双喷仪减薄。电解液为 20% 的高氯酸+80% 酒精溶液，温度 -25—30 °C，电流 100 mA。利用 Tecnai F20 场发射透射电镜 (TEM) 研究 Ni 镀层结构和形貌；SUPR5 ZEISS 场发射扫描电镜 (SEM) 观察 Ni 镀层磨痕形貌。PARSTAT 2263 DC+AC 电化学综合测试仪用于 Ni 镀层电化学阻抗谱 (EIS) 研究，腐蚀介质为含 50 μg/g Cl⁻ 的氯化钾溶液，温度为室温，阻抗频率范围为 0.1 Hz-10 kHz，阻抗信号幅值为 5 mV。动电位极化曲线测量使用 Perkin Elmer Model 273A 型恒电势仪，腐蚀介质为含 50 μg/g Cl⁻ 的氯化钾溶液，扫描速率 2 mV/s。Zview 软件用于极化曲线和电化学阻抗谱 (EIS) 分析。利用 HVS-1000 数字显微硬度仪测试镀层显微硬度，在镀层正表面分别测定 3 个以上的点，取平均值。MMW-1A 微机控制万能摩擦磨损试验机用于 Ni 镀层的摩擦磨损研究，选取低频 (30 kHz) 和高频 (100 kHz) 沉积的两个试样做对比，实验条件如下：摩擦副采用小止推环，载荷 100 N，时间 250 s，转速 200 r/min，温度 17 °C，湿度 48%。

3. 实验结果及讨论

3.1 Ni 镀层的微观组织

前期的工作中^[14]发现，脉冲频率从 30 kHz 增加到 100 kHz 时，Ni 镀层的 (200) 面衍射峰显著宽化，用 Scherrer 公式计算各强峰的晶粒尺寸，然后取平均值，结果表明晶粒尺寸逐渐减小。另对镀层的截面作 SEM 观察也发现，层间距减小。为进一步研究脉冲频率对 Ni 镀层微观组织形貌的影响，采用 TEM 对不同脉冲频率沉积下的 Ni 镀层进行了观察，结果如图 1 所示。30 kHz 沉积的镀层，晶粒较粗大（平均晶粒尺寸小于 100 nm），尺寸大小不均（图 1(a)）。随脉冲频率增加，镀层晶粒细化，组织均匀（图 1(b, c)）。



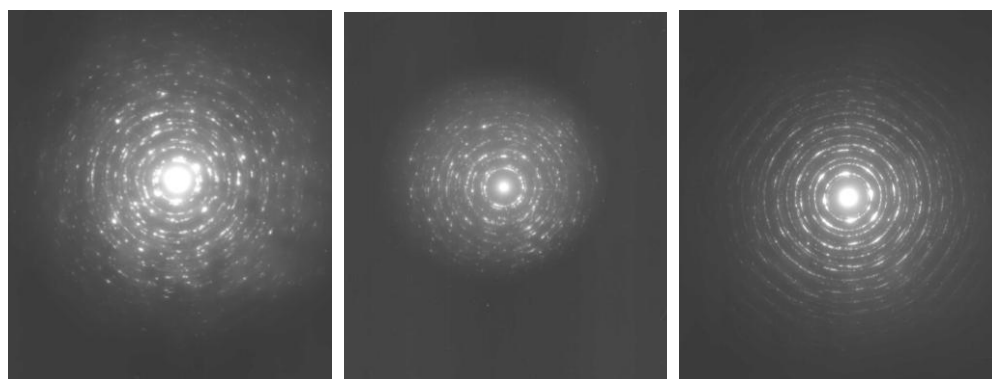


图 1 不同脉冲频率沉积的 Ni 镀层 TEM 像及对应的选区电子衍射图

Fig.1 TEM images and corresponding SAED patterns of Ni coating electrodeposited at 30 kHz (a, d), 60 kHz (b, e) and 100 kHz (c, f)

图 1(d, e, f) 中显示明显的 fcc 晶体多晶衍射环。对比发现, 随频率增加, 衍射环连续性更好, 表明选区内的微观组织更细小均匀。

由电化学基本定义^[15]可知, 脉冲平均电流密度 j_m 与频率 f 有如下关系式:

$$j_m = j_p v = j_p \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = j_p \frac{t_{on}}{\theta} = j_p \cdot t_{on} \cdot f \quad (1)$$

式中, j_m 为脉冲平均电流密度, j_p 为脉冲峰值电流密度, t_{on} 为导通时间, t_{off} 为关断时间。脉冲周期 $\theta = t_{on} + t_{off}$, 脉冲频率 $f = 1/\theta$, v 为脉冲导通时间与脉冲周期之比即占空比。

由式 (1) 可知, j_m 和 v 不变时, j_p 为恒定值。提高脉冲频率 f , t_{on} 必然减小。

脉冲沉积过程中, 液相扩散传质会限制脉冲条件的有效范围和最大沉积速度, 影响所得镀层的结构和性质, 同样也影响镀液的宏观能力和微观分散能力。N. Ib1 等人在直流电沉积的扩散理论基础上, 提出了脉冲电沉积的液相传质双扩散层模型。认为脉冲沉积过程中, 电极表面存在双扩散层, 在靠近阴极的内扩散层中, 金属离子浓度随频率变化而波动^[6]。由 Fick 第二定律, 可推导出电沉积过程扩散层厚度公式:

$$\delta_p = \sqrt{(2Dt_{on})/\pi} \quad (2)$$

式中, δ_p 为内扩散层厚度, D 为镀液的扩散常数。

式 (2) 表明, 随着 t_{on} 减小, 扩散层厚度 δ_p 随之减小。由电化学理论可知, 随着扩散层的减薄, 放电离子向电极表面的扩散的阻力将减小, 因而扩散速度加快, 导致阴极表面放电离子数量增多, 在瞬时脉冲峰值电流密度 j_p 相同的情况下, 更高的频率意味着更高的形核速率。另外, 提高脉冲频率, 导通时间 t_{on} 缩短, 当阴极表面附近金属离子浓度还未降到最低点时, 形核过程随即终止, 这样既可以避免浓差极化对电结晶过程的影响, 又能抑制已有晶核的进一步成长, 有助于获得晶粒细小且光滑致密的金属层。由此可见, 提高脉冲频率, 既加速了晶粒的形核过程, 又抑制了晶粒长大, 有利于细化 Ni 镀层晶粒。

3.2 Ni 镀层抗腐蚀性能

图 2 是不同频率电沉积 Ni 镀层的动电位极化曲线。可以看出, 它们具有相似的形状。在腐蚀电位附近, 极化电流随极化过电位的增大而快速增加, 表明电极过程受电子转移的电化学活化控制。当阳极极化到弱极化区后, 极化电流随极化电位的升高而增大, 极化曲线的斜率愈来愈大, 即电极过程的阻力越来越大, Ni 镀层出现了“伪钝化”现象^[16], 电子在镀镍层与离子导体 (50 $\mu\text{g/g}$ Cl^- 水溶液) 之间的转移越来越困难。当极化电位进一步升高, 极化

曲线出现转折点。在转折点以上, 附近极化电流迅速增加, 表明 Ni 镀层出现了点蚀, 局部活性点构成了大阴极小阳极的腐蚀原电池, 从而加速了 Ni 镀层样品的腐蚀。

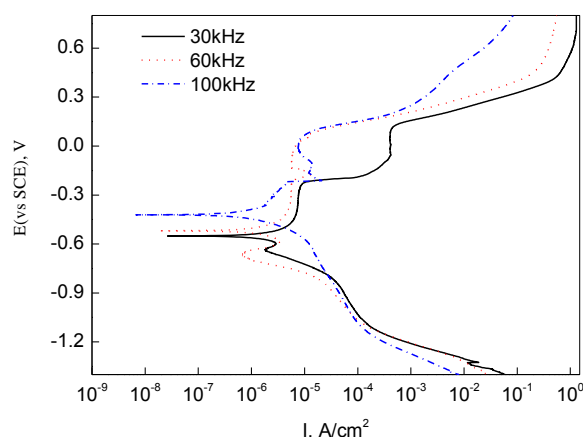


图 2 不同脉冲频率沉积的 Ni 镀层动电位极化曲线

Fig.2 Polarization curves of Ni coating electrodeposited at various pulse frequencies

对极化曲线进行拟合, 结果如表 1 所示。随着脉冲频率增加, 镀层的自腐蚀电位逐渐提高。根据腐蚀热力学理论可知^[17], 腐蚀电位越高, 镀层的耐腐蚀性能越好。从图 2 右上部分也可以明显观察到, 在相同极化电位下, 高频脉冲沉积的 Ni 镀层腐蚀电流较小。作者分析认为, 主要是由于高频脉冲沉积的 Ni 镀层具有更高的致密性。

表 1 Ni 镀层动电位极化曲线拟合结果

Table 1 The results of polarization curves fitting of Ni coating electrodeposited at various pulse frequency

Frequency	Corrosion potential	Corrosion current
kHz	mV	μ A
30	-551.41	2.287
60	-518.93	1.709
100	-420.28	0.894

图 3(a) 是其它实验条件不变, 仅改变脉冲频率沉积的 Ni 镀层的电化学阻抗谱图。从中看出, 脉冲频率为 30, 60 和 100 kHz 沉积的 Ni 镀层均呈现明显的容抗弧特性。这是由于在电极表面存在双电层电容和电极反应的电荷转移电阻, 它们以并联的方式对电极过程发生作用。从而在低频段, 容抗弧半径主要取决于镀层界面与孔隙内电解质溶液的电荷转移电阻。另外, 从图 3(a) 中可以看到, 随着脉冲沉积频率增加, 镀层交流阻抗的容抗弧呈扩张趋势, 表明高频沉积的 Ni 镀层在电极过程的电荷转移电阻以及电极反应的阻抗幅值加大。在 Nyquist 图的左端, 如图 3(b) 所示, 不同频率沉积的 Ni 镀层电化学阻抗谱非常接近, 表明在高频段这 3 种镀层的阻抗特性较为相似。这是由于高频段的电极过程主要取决于镀层界面和与电解质溶液的双电层电容^[17]。

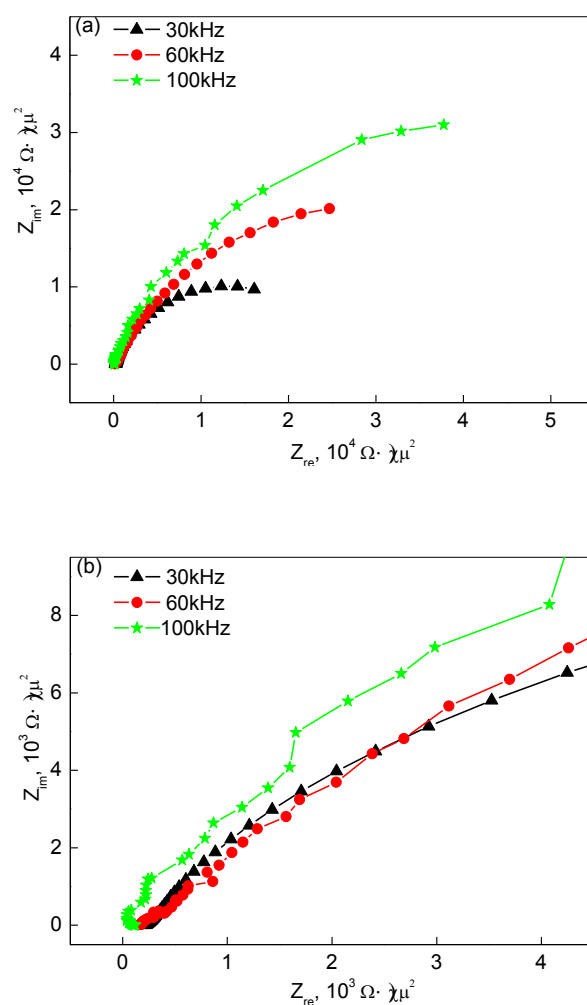


图3 不同脉冲频率沉积的Ni 镀层 Nyquist 阻抗谱

Fig.3 Entire (a) and local (b) Nyquist plots of Ni coating electrodeposited at various pulse frequencies

不同频率沉积的Ni 镀层, 虽然较致密, 但表面仍然存在少量孔隙。因此根据镀层表面缺陷和交流阻抗测试结果, 以及交流阻抗谱原理和电子理论知识^[17], 可以推测出在电解液中浸泡后的Ni 镀层交流阻抗等效电路图, 如图4所示。在EIS数据拟合过程中, 为了获得更精确的拟合结果, 用常相位角元件(Constant Phase Element)代替双电层电容(C)^[18, 19], 因此该等效电路图组成一个 $R_s(Q_1(R_1(Q_2R_{ct})))$ 复合元件。其中 R_s 为溶液电阻, Q_1 为表征镀层表面电容的常相位角元件(CPE), R_1 为镀层微孔内的溶液电阻, Q_2 为表征镀层微孔表面电容的常相位角元件(CPE), R_{ct} 为转移电阻。

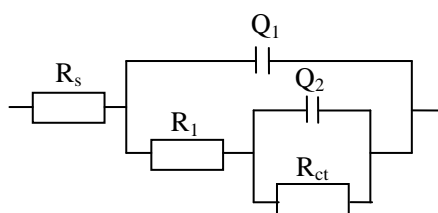


图4 Ni 镀层在电解液中的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of the Ni coating in electrolyte (R_s, R_1, R_{ct} - resistor, Q_1, Q_2 - CPE)

将图 3(a) 中的阻抗谱采用图 4 所示等效电路进行拟合, 结果如表 2 所示, 并计算出等效电路阻抗为:

$$Z=R_s+\frac{1}{Y_1+\frac{1}{R_1+\frac{1}{Y_2+\frac{1}{R_{ct}}}}} \quad (3)$$

式中, Y_1 和 Y_2 分别为常相位角元件 Q_1 和 Q_2 的导纳, 其值为:

$$Y_1=Q_1\omega^{n_1}\cos(\frac{n_1\pi}{2})+jQ_1\omega^{n_1}\sin(\frac{n_1\pi}{2}) \quad (4)$$

$$Y_2=Q_2\omega^{n_2}\cos(\frac{n_2\pi}{2})+jQ_2\omega^{n_2}\sin(\frac{n_2\pi}{2}) \quad (5)$$

式中, ω 为角频率, n_1 和 n_2 分别为 Q_1 和 Q_2 的弥散系数。

在低频段, $\omega \rightarrow 0$, 由式 (4) 和式 (5) 可知, $Y_1 \rightarrow 0$, $Y_2 \rightarrow 0$, 因此, 等效电路的总阻抗可近似表示为:

$$Z=R_s+R_1+R_{ct} \quad (6)$$

表 2 不同脉冲频率沉积的 Ni 镀层阻抗拟合结果

Table 2 The results of the impedance fitting of Ni coating electrodeposited at various pulse frequency

Frequency kHz	R_s $\Omega \cdot \text{cm}^2$	R_1 $\Omega \cdot \text{cm}^2$	Q_1 $10^{-5} \text{F}/\text{cm}^2$	n_1	Q_2 $10^{-4} \text{F}/\text{cm}^2$	n_2	R_{ct} $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$	Variance
30	213.6	136.2	2.54	0.8307	0.23	0.8390	2.61	0.0001
60	171.1	445.8	0.64	0.9104	0.28	0.7256	6.06	0.0046
100	107	766.3	0.78	0.8000	0.01	0.8010	6.56	0.0386

由表 2 易知, R_1 和 R_s 均远小于 R_{ct} 。因此, 在 Nyquist 阻抗图右端, 即低频段, 阻抗幅值约为 R_{ct} , 所以低频段的电路阻抗主要取决于镀层界面与孔隙内电解质溶液的电荷转移电阻。 n_1 和 n_2 均不为 1, 表明 Ni 镀层不再表现出“纯电容”的特征, 即表面已出现微孔。另由表 2 可见, 随频率增加, 微孔电阻也有所增加, 表明镀层的微孔率较低。同时发现电极反应的转移电阻呈明显增加趋势, 30 kHz 为 $2.61 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 100 kHz 则增加到 $6.56 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 所以低频段的阻抗幅值亦随之增加, 这与图 3(a) 中观察到的结果一致。由电化学理论可知^[17], 低频段的阻抗幅值可以表征镀层的耐腐蚀性能, 幅值越大, 镀层耐腐蚀性能越强。实验结果进一步表明, 在实验范围内, 提高脉冲频率, 有利于细化晶粒和形成更完整致密的 Ni 镀层, 减少孔隙率, 提高镀层的耐蚀性, 增强对基体的保护作用。

3.3 不同脉冲频率下 Ni 镀层的摩擦磨损性能

图 5 为 30 kHz 和 100 kHz 沉积的 Ni 镀层的摩擦磨损曲线, 由图可见, 2 个试样的摩擦系数均逐渐上升, 然后缓慢降低, 最后趋于稳定。

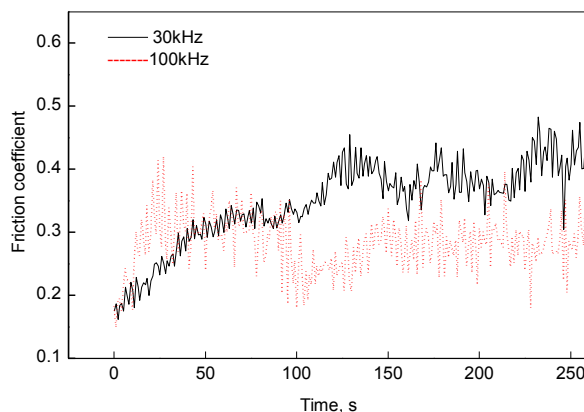


图 5 Ni 镀层摩擦磨损曲线

Fig.5 Friction curves of Ni coating electrodeposited at 30kHz (a) and 100kHz (b)

2 个试样的磨痕形貌如图 6 所示, 可见 2 种镀层的磨痕均有犁沟。进一步比较发现, 100 kHz 沉积的 Ni 镀层磨痕深度较浅, 表明高频沉积的 Ni 镀层耐磨能力更强。

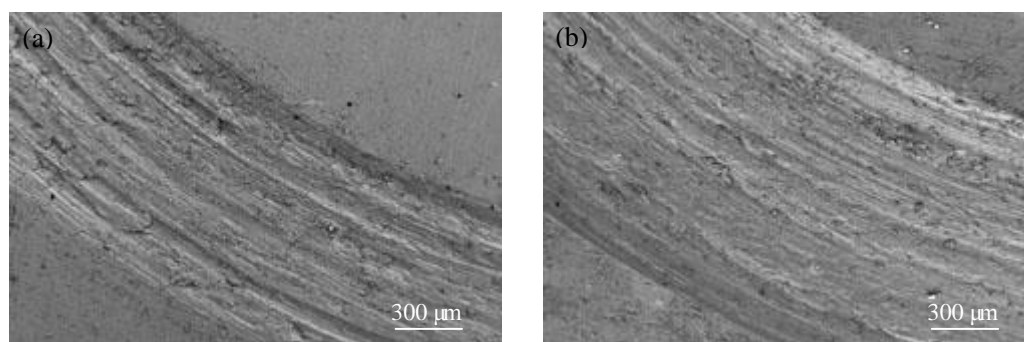


图 6 30 和 100 kHz 脉冲频率沉积的 Ni 镀层磨痕的 SEM 像

Fig. 6 SEM imagines of the worn surfaces of Ni coating electrodeposited at 30 kHz (a) and 100 kHz (b)

摩擦副与 Ni 镀层开始滑动时, 其表面较为粗糙, 镀层表面发生磨损变形, 使摩擦副与镀层接触面积加大, 增大了摩擦力, 最终使摩擦系数逐渐上升。随着摩擦进一步进行, 试样表面逐渐趋于光滑, 摩擦系数因此下降, 磨损也将趋于稳定。对比图 5 中 30 和 100 kHz 沉积的 2 个样品的摩擦系数, 可以看到, 30 kHz 沉积的 Ni 镀层摩擦系数约为 0.39, 而 100 kHz 的约为 0.25, 表明更高频率沉积的 Ni 镀层摩擦系数较低。100 kHz 沉积的 Ni 镀层较 30 kHz 沉积的 Ni 镀层磨痕较浅, 是由于前者的致密性较后者更好, 显微硬度 450 MPa 也高于后者的 285 MPa, 致密化的效果和较高的硬度导致更高频率沉积的 Ni 镀层耐磨性更好。

4. 结论

- (1) 在 30-100 kHz 频率范围内, 提高脉冲频率, 可以细化 Ni 镀层晶粒和提高显微硬度。
- (2) 电化学腐蚀测量结果显示, 电极反应的电荷转移电阻由 30 kHz 沉积 Ni 镀层的 $2.61 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 100 kHz 沉积 Ni 镀层的 $6.56 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 自腐蚀电位也由 -551.41 mV

正移至-420.28 mV, 表明 Ni 镀层的耐腐蚀性随频率增加而提高。

(3) 摩擦试验结果显示, Ni 镀层的摩擦系数从低频(30 kHz)的 0.39 降低到高频(100 kHz)的 0.25, 表明高频脉冲电沉积可以改善 Ni 镀层的耐磨性。

参考文献

- [1] Wakabayashi H, Sato N, Sone M, et al. Nano-grain structure of nickel films prepared by emulsion plating using dense carbon dioxide[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 190: 200-205.
- [2] Inguanta R, Piazza S, Sunseri C. Influence of electrodeposition techniques on Ni nanostructures[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53: 5766-5773.
- [3] Kang J X, Zhao W Z, Zhang J F. Influence of electrodeposition parameters on the deposition rate and microhardness of nanocrystalline Ni coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2009, 203: 1815-1818.
- [4] Sansoz F, Stevenson K D, Govinhasamy R, et al. Making the surface of nanocrystalline Ni on an Si substrate ultrasmooth by direct electrodeposition[J]. Scripta Materialia 2008, 59: 103-106.
- [5] 徐剑刚, 余新泉. 电沉积纳米晶镍的研究现状及展望[J]. 材料导报, 2006, 20 (4): 30-33.
- [6] 安茂忠. 电镀理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 241.
- [7] 赵阳培. 电沉积纳米晶材料的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(1): 126-129.
- [8] 陈艳容, 龙晋明, 裴和中, 等. 脉冲电沉积镍及其合金的研究现状与展望[J], 2009, 31(2): 16-21.
- [9] 解西峰, 朱 荻. 高频脉冲电铸的试验研究[J]. 航空精密制造技术, 2003, 39(2): 10-13, 33.
- [10] 杨玉国, 刘为霞, 许韵华, 等. 高频脉冲电镀 Ni-SiC 纳米复合镀层影响因素的研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(7): 4-7.
- [11] 宫晓静, 许韵华, 杨玉国, 等. 高频脉冲电镀镍钴合金耐蚀性的研究[J]. 表面技术, 2007, 36(6): 4-6.
- [12] 宫晓静, 许韵华, 杨玉国, 等. 高频脉冲电镀镍钴合金拉伸强度的研究[J]. 材料开发与应用, 2007, 22(6): 28-30.
- [13] 曹克宁, 许韵华, 杨玉国, 等. 高频脉冲镀 Ni-Co 合金的形貌、微观结构及耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2007, 26(12): 1-3.
- [14] 王子涵, 杨 滨, 铁 军, 等. 脉冲频率对 Ni 镀层组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(S3): 620-622.
- [15] 陈亚. 现代实用电镀技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 270-271.
- [16] Tait W S. An Introduction to Electrochemical Corrosion Testing for Practicing Engineers and Scientists [M]. Wisconsin: Pair O Docs Publications, 1994: 72.
- [17] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 103.
- [18] 王庆富. 脉冲电沉积镍的组织结构和性能研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- [19] 张金涛, 胡吉明, 张鉴清. 环氧涂层金属体系的串联双槽电化学阻抗谱分析[J]. 金属学报, 2006, 42(8): 857-860.

Improvement of microstructure and properties of Ni coating prepared by high frequency pulsed-electrodeposition

Wang Zihan¹, Yang Bin^{1, 2}, Jiang Chunli³, Wang Qingfu³, Zhang Pengcheng³, Fan Aiping¹

1 State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology

Beijing, Beijing 100083, China

2 International Centre for Materials Physics, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3 National Key Laboratory for Surface Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

ABSTRACT

The effects of pulse frequency on the microstructure, corrosion and wear resistance of a nanocrystalline Ni coating produced by high frequency pulsed-electrodeposition technique are studied. Transmission electron microscope (TEM) results show that the grain size of the Ni coating is refined with the increase of pulse frequency from 30 kHz to 100 kHz. The corrosion behavior of the Ni deposits is also evaluated by polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) in potassium chloride aqueous with a Cl^- concentration of 50 $\mu\text{g/g}$ at room temperature. The results show that the charge transfer resistance and self-corrosion potential of the coating are increased from $2.61 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ to $6.56 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and from -551.41 mV to -420.28 mV respectively with increasing frequency from 30 kHz to 100 kHz, showing that the corrosion resistance of the Ni coating is improved owing to its higher impedance amplitude and self-corrosion potentials. The tribological tests show that the friction coefficient of the Ni coating is decreased from 0.39 to 0.25 with increasing frequency from 30 kHz to 100 kHz. Why the wear resistance of the Ni coating is improved with the increase of pulse frequency is due to its grain-refinement, higher compactness and microhardness.

Key words: *pulsed-electrodeposition; Ni coating; corrosion resistance; friction coefficient*