

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

聚天冬氨酸与钨酸钠复配对白铜 B10 的缓蚀作用

朱律均^{1,2} 徐群杰^{2*} 曹为民¹ 万宗跃^{1,2} 周国定² 林昌健³¹上海大学化学系, 上海 200444; ²上海电力学院环境工程系, 上海 200090;³厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 应用光电化学的方法研究了两种环境友好型缓蚀剂聚天冬氨酸(PASP)和钨酸钠(Na_2WO_4)的单一配方及其复配对白铜 B10 在硼砂-硼酸缓冲溶液中的缓蚀作用. 研究表明, 在光电流循环伏安测试中, 单一的 PASP 与 Na_2WO_4 均能够使 B10 表面 Cu_2O 膜引起的 p 型光电流响应增大, 这说明缓蚀剂增大了 Cu_2O 膜的厚度, 使 B10 的腐蚀速率减小. 单一的 PASP 与 Na_2WO_4 的最佳添加浓度分别为 3 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 单一的 Na_2WO_4 比单一的 PASP 使 p 型光电流响应增大趋势更大. 若以总浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对两者进行复配, 当 PASP 与 Na_2WO_4 的质量浓度比为 1 1 和 1 3 时, 两者复配比单一使用时的 p 型电流光响应都更大, B10 的腐蚀更小, 即缓蚀剂的效果更好. 交流阻抗测试结果与光电化学测试相一致.

关键词: 光电化学; 聚天冬氨酸; 钨酸钠; 白铜 B10; 缓蚀剂

中图分类号: O646; TG17

Photoelectrochemical Study on the Complex of PASP and Tungstate as Inhibitors of Cupronickel B10 s Corrosion

ZHU L üJun^{1,2} XU Qun-Jie^{2*} CAO Wei-Min¹ WAN Zong-Yue^{1,2}
ZHOU Guo-Ding² LIN Chang-Jian³¹Department of Chemistry, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; ²Department of Environment Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, P. R. China; ³State Key Laboratory of Solid Surface Physical Chemistry, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, P. R. China)

Abstract: Photoelectrochemical and AC impedance measurements were conducted to study the effects of environment-friendly inhibitors poly-aspartate(PASP), Na_2WO_4 and their complex on the corrosion of cupronickel B10 in a borax-buffer solution. The photoelectrochemical measurement results indicated that PASP or Na_2WO_4 increased the p-type photocurrent which came from the Cu_2O layer on the B10 surface. It showed that the inhibitors increased the thickness of the Cu_2O layer and decreased the corrosion speed. The optimal concentrations of PASP and Na_2WO_4 was 3 and $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Na_2WO_4 increased photocurrent more than mono PASP did. Combined use of PASP and Na_2WO_4 in a total concentration of $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, when the mass ratio(PASP: Na_2WO_4) was 1 1 or 1 3, increased the photocurrent more than their individual use did. The bigger the photocurrent was, the better the inhibition efficiency was. When the mass ratio (PASP: Na_2WO_4) was 3 1, the combined use increased photocurrent less than their individual use did, the inhibition effect decreased. AC impedance measurement results were well agreed to the photoelectrochemical results.

Key Words: Photoelectrochemistry; PASP; Na_2WO_4 ; Cupronickel B10; Inhibitor铜及其合金是应用广泛的金属, 白铜 B10 常被应用于电厂的冷凝器管^[1]. 抑制金属腐蚀最有效的方

Received: December 5, 2007; Revised: February 1, 2008; Published on Web: March 27, 2008.

* Corresponding author. Email: xuqunjie@shiep.edu.cn; Tel: +8621-65430410-247.

国家自然科学基金(20406009)、上海市教委重点项目(06ZZ67)、上海市重大科技攻关计划(062312045)、厦门大学固体表面物理化学国家重点实验室开放课题(200512)及上海市重点学科(P1304)资助项目

法之一是使用缓蚀剂^[1-3]. 随着人类环保意识的增强, 缓蚀剂的开发与应用越来越重视对环境保护的要求. 聚天冬氨酸(PASP)是一种绿色水处理药剂^[4], 可应用于缓蚀剂、阻垢剂、清洗添加剂与分散剂等领域^[5]. 钨酸盐的毒性很低, 对环境、人体和作物几乎没有危害, 也不会引起微生物滋生, 属环境友好型缓蚀剂^[6,7]. 本工作组已经研究了复配PASP与 Na_2WO_4 对铜及铜合金的缓蚀性能^[8,9], 发现其具有良好的缓蚀效果.

金属的耐腐蚀性能与其表面膜的结构性质密切相关, 在化学反应与电化学反应中铜表面生成的氧化物、卤化物以及各种钝化膜通常都具有半导体性质, 它们在电极/电解质溶液界面上会产生光电效应, 可以通过光电化学方法对其进行研究. 光电化学是一种原位(in-situ)研究方法, 对于表征半导体膜的光学和电子性质, 分析金属表面层的组成与结构有良好的效果^[10,11], 本工作组将其应用于金属腐蚀与缓蚀机理的研究并得到一些一般表面分析与一般电化学方法所不能得到的信息^[12-17]. 本文采用光电化学方法研究复配聚天冬氨酸与钨酸钠复配对白铜 B10 的缓蚀作用.

1 实验部分

1.1 材料与试剂

白铜电极由白铜 B10(Cu 90%, Ni 10%)制得. PASP 为自制^[18], 分子量约为 5000. 实验试剂均为分析纯, 溶液由去离子水配制.

1.2 仪器

光电化学测试使用 PRAC M273 恒电位仪、PRAC 5208EC 锁定放大器、1000 W 氙灯(上海八一电影机械厂)、WDG-1A 强光单色仪(四平市光学仪器厂)、ND-4 斩光器(南京大学微弱信号检测技术开发中心)、LM20A-200 X-Y 记录仪(上海大华仪表厂). 光源功率为 1 kW, 单色光波长 420 nm, 强度经校定的硅光二极管测量不超过 $20 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 斩光频率 39 Hz. 交流阻抗测量使用 PRAC M398 系统.

1.3 实验方法

光电化学与电化学测量在三电极体系中进行. 工作电极为环氧树脂固封的白铜 B10, 面积约 0.25 cm^2 , 电极经 3[#]-6[#] 金相砂纸逐级抛光后用去离子水、无水乙醇和去离子水依次冲洗干净. 辅助电极和参比电极分别为 Pt 电极和饱和甘汞电极(SCE), 工作电极和饱和甘汞电极分置两室, 两室间用 0.1

$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KNO_3 -3%琼脂的盐桥联接. 基底溶液为硼砂-硼酸缓冲溶液 ($0.075 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 0.15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{BO}_3$, $\text{pH}=9.2$). 电极在 -1.1 V 下极化 5min 后进行光电化学测试, 扫描速率为 $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$. 交流阻抗测量频率范围为 $100000 - 0.1 \text{ Hz}$, 交流激励信号峰值为 5 mV . 本文所示电位均相对于 SCE.

2 结果与讨论

2.1 单一的 PASP 对 B10 的缓蚀作用

图 1 为 B10 在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 PASP 时的电流密度-电位(i - E)曲线. 电位在正扫过程中出现的氧化电流峰 A1 对应于 Cu 氧化为 Cu(I)(其中包括电极表面 Cu_2O 膜的生成以及 Cu 通过 Cu_2O 膜的阳极溶解), A2 对应 Cu(I)进一步氧化为 Cu(II); 负扫过程中出现的还原电流峰 C1 对应 Cu(II)还原为 Cu(I), C2 对应为 Cu(I)还原为 Cu^[12,13]. 随着 PASP 浓度从 0 增大到 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时(曲线 1-4), A1 峰和 A2 峰逐渐减弱, 表明 Cu 被氧化为 Cu(I)和 Cu(I)被氧化为 Cu(II)的反应均被减弱; 电位负扫过程中, C1 峰和 C2 峰变化不明显.

图 2 为 B10 在硼砂-硼酸缓冲溶液中, 添加了不同浓度的 PASP 的光电流密度-电位(i_{ph} - E). 曲线. 可以看出, 各曲线的 i_{ph} 均呈 p 型(表现为光电流为负值), 光响应均由铜表面的 Cu_2O 膜产生, CuO 与 Ni_2O 、NiO 对光电流响应无贡献^[12,15]. 铜的耐腐蚀性能主要取决于铜表面的 Cu_2O 层, 缓蚀剂的有效性取决于缓蚀剂和 Cu_2O 层之间的结合力; 光电流越大, Cu_2O 层就越厚, 铜的耐腐蚀性能就越好^[12-17].

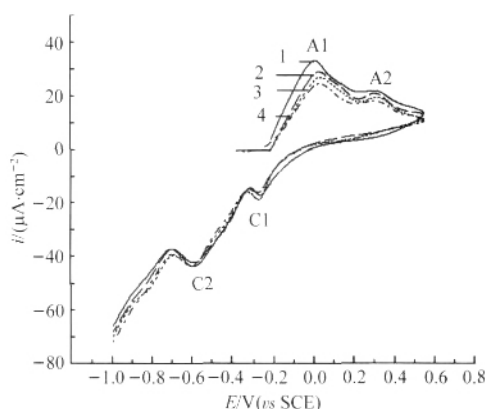


图 1 B10 在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 PASP 的电流密度-电位(i - E)曲线

Fig.1 (i - E) curves for B10 in a borax-buffer solution with different concentrations of PASP

$c(\text{PASP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$: (1) 0, (2) 0.5, (3) 1, (4) 3;

PASP: poly-aspartate; B10: cupronickel

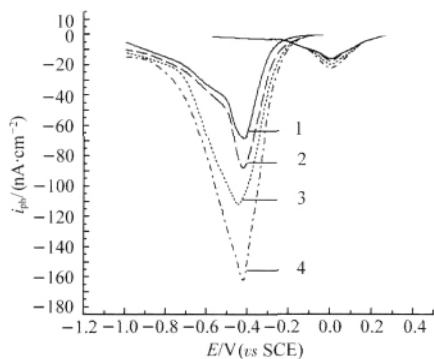


图2 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度PASP的光电流密度-电位(i_{ph} - E)曲线

Fig.2 (i_{ph} - E) curves for B10 in a borax-buffer solution with different concentrations of PASP

$c(\text{PASP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$: (1) 0, (2) 0.5, (3) 1, (4) 3

图2曲线(1)中, 电位从-0.60V正向扫描, 此时有很小的光电流(约为 $-2\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$)产生, 说明B10电极在极化后表面仍有少量的 Cu_2O 膜。正扫至-0.20V时, 由于B10电极表面开始生成 Cu_2O , 光电流开始增大, 随着 Cu_2O 量的增加, 光电流逐渐增大, 至电位正扫到0V左右时光电流明显增大, 约为 $-15\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$; 电位继续正扫时, Cu_2O 进一步被氧化为 CuO , 致使光电流随电位正移而减少, 正扫至电位约为0.28V时 Cu_2O 完全氧化为 CuO , 所以光电流减为 $0\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。电位负向扫描过程中, 当电位到0V左右时, CuO 被还原为 Cu_2O , 此时出现光电流, 光电流随电位负扫而增大, 电位至-0.44V, 光电流出现最大值(记为 $i_{ph,max}$), $i_{ph,max}$ 为 $-70\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 这说明了该电位下电极表面的 Cu_2O 沉积量最多, Cu_2O 膜最厚; 电位继续负扫时 Cu_2O 被还原为 Cu , 光电流开始下降,

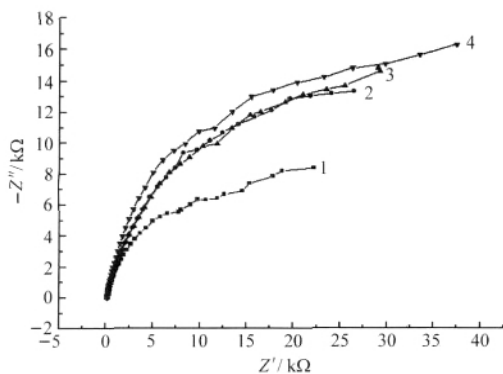


图3 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度PASP的Nyquist图

Fig.3 Nyquist plots for B10 electrodes in a borax-buffer solution with different concentrations of PASP

$c(\text{PASP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$: (1) 0 (2) 0.5, (3) 1, (4) 3

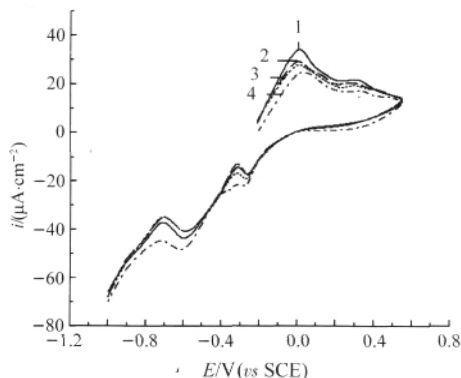


图4 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 Na_2WO_4 的 i - E 曲线

Fig.4 i - E curves for B10 in a borax-buffer solution with different concentrations of Na_2WO_4

$c(\text{Na}_2\text{WO}_4)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$: (1) 0, (2) 1, (3) 3, (4) 5

电位至-1.0V时, 光电流下降至约为 $-5\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 说明了此电位下电极表面存在的 Cu_2O 已经很少了。当添加PASP浓度为 $0.5, 1$ 和 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 电位正扫过程中, 光电流略有增大, 但变化不很明显。在电位负扫过程中, $i_{ph,max}$ 的电位出现负移现象; $i_{ph,max}$ 逐渐增大, 分别为 $-86, -112, -165\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$; p型光电流存在的电位也更宽, 电位负扫至-1.0V时的光电流也逐渐增大了。以上现象表明, 加入PASP后电极表面的 Cu_2O 膜厚度随聚PASP添加量的增大而增大。 Cu_2O 膜厚度增大的原因是, PASP可以通过极性基团 COO^- 在金属表面形成吸附而形成有机吸附膜^[19], 金属表面的有机吸附膜可以阻碍水分子、溶解氧及腐蚀离子向金属扩散, 抑制了由于水合作用或是腐蚀离子侵蚀而造成的 Cu_2O 进一步氧化, 从而使 Cu_2O 膜得到了更大程度地保留。所以在有缓蚀剂存在时, 铜电极表面的 Cu_2O 膜厚度更大, p型光电流响应也增大。若继续增加PASP的浓度, 光电流变化不明显(图略)。由于在B10氧化过程中出现了一个类似的钝化现象, 氧化反应的明显程度远不如还原反应, 所以光电流 i_{ph} 在电位负扫过程中的变化更加明显。

图3为B10电极在硼砂-硼酸缓冲溶液中, 添加PASP后的交流阻抗Nyquist图。可以看出, 各阻抗谱线均呈一弧形, 按 $|Z|=(Z^2+Z^{\prime 2})^{1/2}$, 可计算出该B10电极的阻抗模值 Z , Z 越大, 耐蚀效果越好^[20]。未添加PASP时 Z 最小, 为 $23.5\text{ k}\Omega$; 加入PASP浓度为 $0.5, 1$ 和 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Nyquist图中相应的弦长增大, Z 随PASP浓度的增大而增加, 分别为 $29.85, 32.21, 41.02\text{ k}\Omega$, B10电极的耐蚀性逐渐提高。交流阻抗测

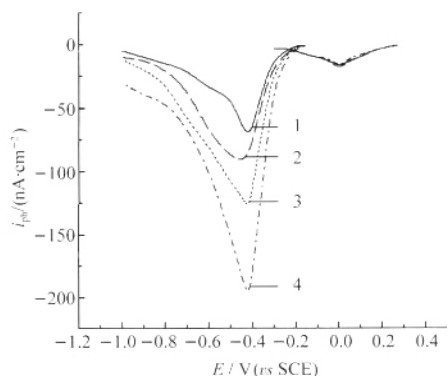


图5 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 Na_2WO_4 的 $i_{\text{ph}}-E$ 曲线

Fig.5 $i_{\text{ph}}-E$ curves for B10 in a borax-buffer solution with different concentrations of Na_2WO_4
 $c(\text{Na}_2\text{WO}_4)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$: (1) 0, (2) 1, (3) 3, (4) 5

试结果与光电化学测试结果相一致。

2.2 单一的钨酸钠对B10的缓蚀作用

图4和图5分别为B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 Na_2WO_4 时的 $i-E$ 和 $i_{\text{ph}}-E$ 曲线。可以看出,添加单一 Na_2WO_4 与添加单一PASP时的曲线变化趋势十分相似,氧化过程中电流 i 随着 Na_2WO_4 的加入而减小,说明Cu的氧化反应都被减弱了;光电流 i_{ph} 随着 Na_2WO_4 的加入而增大。当 Na_2WO_4 的浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $i_{\text{ph,max}}$ 增大为 $-195\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$,这比单一使用PASP时,p型光响应增大趋势更大。一般认为, Na_2WO_4 具有缓蚀作用的原因是其弱氧化性可以使金属表面容易形成钝化膜从而起到缓蚀作用^[21,22]。

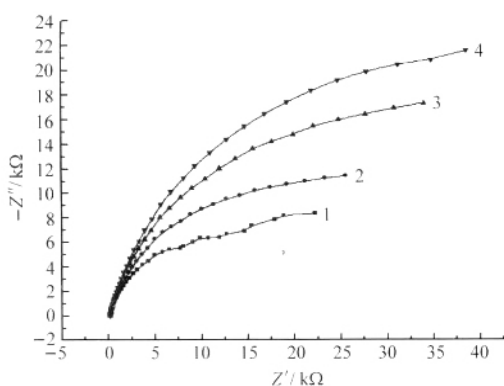


图6 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 Na_2WO_4 的Nyquist图

Fig.6 Nyquist plots for B10 electrodes in a borax-buffer solution with different concentrations of Na_2WO_4

$c(\text{Na}_2\text{WO}_4)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$: (1) 0, (2) 1, (3) 3, (4) 5

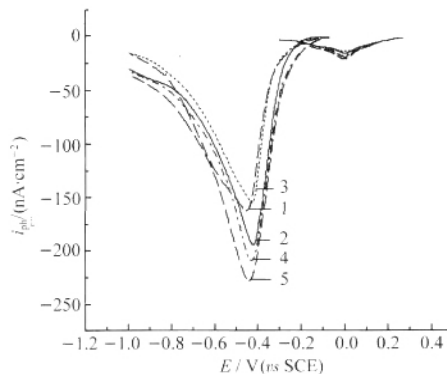


图7 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度PASP与 Na_2WO_4 的 $i_{\text{ph}}-E$ 曲线

Fig.7 $i_{\text{ph}}-E$ curves for B10 in a borax-buffer solution with different concentrations of PASP and Na_2WO_4
 (1) $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP, (2) $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (3) $3.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (4) $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (5) $1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $3.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4

图6为B10电极在硼酸硼砂缓冲液中,添加 Na_2WO_4 后的交流阻抗Nyquist图。可以看出,加入 Na_2WO_4 浓度为 $1, 3$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,阻抗 Z 分别为 $27.99, 38.37, 44.16\text{ k}\Omega$,B10电极的耐蚀性逐渐提高,这与光电化学测试结果相一致。

2.3 复配PASP与 Na_2WO_4 对B10的缓蚀作用

在研究复配PASP与 Na_2WO_4 中发现,当总浓度为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PASP与 Na_2WO_4 的质量浓度比分别为 $1:1$ 和 $1:3$ 时,比两者单一使用时的p型光电流响应增大趋势都更明显, $i_{\text{ph,max}}$ 分别比使用单一 Na_2WO_4 时的 $-195\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 分别增大至 $-210\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 与 $-225\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$,并且在不同电位范围的光电

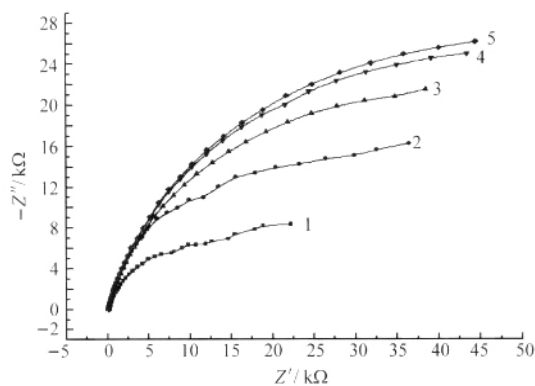


图8 B10在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度PASP与 Na_2WO_4 的Nyquist图

Fig.8 Nyquist plots for B10 electrodes in a borax-buffer solution with different concentrations of PASP and Na_2WO_4

(1) $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP, (2) $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (3) $3.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (4) $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 , (5) $1.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PASP+ $3.75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2WO_4

流都有增大. 然而, 当 PASP 与 Na_2WO_4 的质量浓度比为 3 1 时, 光电流为 $155 \text{ nA} \cdot \text{cm}^{-2}$, 比两者单一使用时反而减小(见图 7, 曲线(3)).

按 PASP 与 Na_2WO_4 的质量浓度比为 1 1 和 1 3 复配后, B10 电极的阻抗 Z 也进一步增大, 分别为 50.12 和 51.51 $\text{k}\Omega$, 比单一使用 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2WO_4 时的 44.16 $\text{k}\Omega$ 更大, 而以 3 1 复配时, 阻抗 Z 只有 39.85 $\text{k}\Omega$, 比单一使用 PASP 时的 41.02 $\text{k}\Omega$ 更小. B10 在硼砂-硼酸缓冲溶液中添加不同浓度 PASP 与 Na_2WO_4 的交流阻抗测试 Nyquist 图见图 8.

可见, 缓蚀剂 PASP 与 Na_2WO_4 在合适的浓度比例下的复配能够产生“协同作用”(synergistic effect), 使缓蚀效果比单一使用时更好. 而在有的浓度比例下复配则产生了“拮抗作用”(antagonistic effect), 使缓蚀效果降低. 一般有机吸附型缓蚀剂与无机氧化型缓蚀剂的复配能够产生较好的“协同作用”^[23], PASP 与 Na_2WO_4 的复配就属于这种情况.

3 结 论

1) 光电化学测试表明, 在硼砂-硼酸缓冲溶液中, 单一的 PASP 与 Na_2WO_4 都能够使 B10 表面 Cu_2O 膜引起的 p 型光电流响应增大, 这说明了缓蚀剂增大了 Cu_2O 膜的厚度使 B10 腐蚀速率减小. 单一的 PASP 与 Na_2WO_4 的使用最佳浓度分别为 3 与 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2) 在缓蚀剂总浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 当 PASP 与 Na_2WO_4 的质量浓度比为 1 1 和 1 3 复配使用时, B10 电极产生的光电流响应比单一使用时的大, 两者产生“协同作用”, 使缓蚀效率增大.

References

- Xu, Q. J.; Wan, Z. Y.; Yin, R. H.; Cao, W. M.; Zhou, G. D.; Lin, C. J. *Acta Chimica Sinica*, 2007, 65(18): 1981 [徐群杰, 万宗跃, 印仁和, 曹为民, 周国定, 林昌健. *化学学报*, 2007, 65(18): 1981]
- Goncalves, R. S.; Azambuja, D. S.; Lucho, A. M. *S. Corros. Sci.*, 2005, 44: 467
- Wang, X. Q.; Liu, R. Q.; Zhu, L. Q.; Gong, J. W. *Acta Phys. -Chim.*

- Sin.*, 2007, 23(1): 21 [王献群, 刘瑞泉, 朱丽琴, 龚建伟. *物理化学学报*, 2007, 23(1): 21]
- Robert, J. R.; Kim, C. *Mater. Perform.*, 1997, 36: 53
- Low, K. C.; Kosman, L. P. *J. Polym. Mater. Sci. Eng.*, 1993, 69: 253
- Abd-Al-Kader, J. M.; El-Warraky, A. A.; Abd-Al-Aziz, A. M. *Br. Corros. J.*, 1998, 33(2): 139
- Ststry, V. S.; Tjan, C.; Roberger, T. R. *Br Corros. J.*, 1991, 26(4): 251
- Xu, Q. J.; Zhou, G. D.; Wang, H. F. *J. Electrochemistry*, 2006, 12(1): 65 [徐群杰, 周国定, 王会峰. *电化学*, 2006, 12(1): 65]
- Xu, Q. J.; Zhou, G. D.; Wang, H. F.; Cai, W. B. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2006, 53(4): 207
- Li, J.; Peter, L. M. *J. Electronanal. Chem.*, 1985, 193, 27
- Li, J.; Peter, L. M. *J. Electronanal. Chem.*, 1986, 199, 1
- Zhou, G. D.; Kamkin, A. N.; Liao, Q. Q. *Acta Phys. -Chim. Sin.*, 2001, 17(7): 614 [周国定, Kamkin, A. N., 廖强强. *物理化学学报*, 2001, 17(7): 614]
- Xu, Q. J.; Zhou, G. D. *Transaction of Nonferrous Society of China*, 2003, 13(5): 1226
- Xu, Q. J.; Lu, Z.; Zhou, G. D. *Acta Chimica Sinica*, 2001, 59(6): 950 [徐群杰, 陆柱, 周国定. *化学学报*, 2001, 59(6): 950]
- Kamkin, A. N.; Davydov, A. D.; Zhou, G. D. *J. Electrochem.*, 1999, 35(5): 531
- Modestov, A. D.; Zhou, G. D.; Ge, H. H. *J. Electroanal. Chem.*, 1994, 375: 293
- Liu, X. Y.; Zhou, G. D.; Yang, M. Z. *J. Electroanal. Chem.*, 1993, 361: 265
- Huo, Y. N.; Liu, S.; Lu, Z. *Fine Chemicals*, 2000, 17(10): 581 [霍宇凝, 刘珊, 陆柱. *精细化工*, 2000, 17(10): 581]
- Zhu, Z. L.; Yuan, L. L.; Gao, J. Y. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2004, 21(9): 6 [朱志良, 袁莉莉, 郜俊影. *应用化学*, 2004, 21(9): 6]
- Wang, J.; Cao, C. N. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 1996, 16(1): 15 [王佳, 曹楚南. *中国腐蚀与防护学报*, 1996, 16(1): 15]
- Sastri, V. S.; Packwood, R. H.; Brown, J. R. *Br. Corros. J.*, 1989, 24(1): 30
- Abd-Al-Kader, J. M.; El-Warraky, A. A.; Abd-Al-Aziz, A. M. *Br. Corros. J.*, 1998, 33(2): 145
- Nnthan, C. C. *Corrosion inhibitors. Houston (Texas): NACE*, 1973: 179