

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.03.002

自制PVA金属防锈液对纯铜缓蚀性能的影响

郝喜海, 郭俊, 彭笑

(湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在浓度为 1.0 mol/L 的 HCl 酸性介质中分别加入体积为 0, 100, 200, 300, 400, 500 mL 的自制 PVA 水溶性金属防锈液, 采用失重法、极化曲线法和扫描电子显微镜表面分析法, 测试纯铜在混合溶液中的缓释率。失重法测试结果表明, PVA 金属防锈液对纯铜具有较好的缓蚀作用, 且防锈液添加体积越大, 其失重越小, 缓蚀效果越好, 其缓蚀率可达 86.7%; 极化曲线法测试结果表明, PVA 金属防锈液对纯铜具有较好的缓蚀作用, 且防锈液添加体积越大, 体系的腐蚀电流密度越小, 缓蚀率越高, 其缓蚀率可达 85.9%; 扫描电子显微镜表面形貌分析结果表明, 随着防锈液添加体积的增大, 纯铜表面的孔洞数量减少, 孔洞面积也减小, 当加入 500 mL 防锈液时, 纯铜表面趋于平整, 这说明防锈液对纯铜具有较好的缓蚀效果。

关键词: PVA 金属防锈液; 失重法; 极化曲线法; 缓蚀性能

中图分类号: TG174.42

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)03-0008-06

Corrosion Inhibition of a Homemade PVA Antirust Liquid Applied to Pure Copper

HAO Xihai, GUO Jun, PENG Xiao

(Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The slow release rate of pure copper in the mixed solution was tested by putting a volume of 0, 100, 200, 300, 400, 500 mL homemade PVA metal antirust liquid into acid medium HCl with concentration of 1.0 mol/L based on weight-loss method, polarization curve method and surface analysis of scanning electron microscope (SEM). The weight loss method showed that PVA water-soluble metal antirust liquid exerted a better corrosion inhibition on pure copper. With the increase in the volume of antirust liquid, the weight loss decreased with a better corrosion inhibition effect as the corrosion rate was 86.7%; Polarization curve method suggested that PVA water-soluble metal antirust liquid demonstrated good corrosion inhibition on pure copper, and with the increase in the volume of antirust liquid, the corrosion current of the system decreased with the anti corrosion rate being 85.9%; Scanning electron microscope (SEM) surface topography analysis indicated that the increase of antirust liquid resulted in the decrease in the number of holes on the surface of pure copper with the reduced cavern area. With 500 mL antirust liquid added, pure copper surface tended to smooth, suggesting that antirust liquid of pure copper had good corrosion inhibition effect.

Key words: PVA antirust liquid; weight-loss method; polarization curve; corrosion inhibition

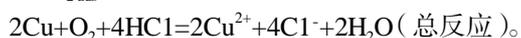
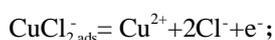
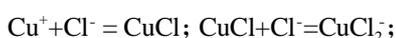
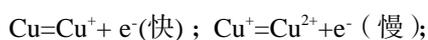
收稿日期: 2015-12-19

作者简介: 郝喜海(1962-), 男, 吉林长春人, 湖南工业大学教授, 博士生导师, 主要从事包装新材料及成型机械方面的教学与研究, E-mail: 562808345@qq.com

通信作者: 郭俊(1989-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为功能包装与印刷材料及技术, E-mail: 121634405@qq.com

1 研究背景

纯铜在日常生活中的运用较为广泛,如以铜为原材料制作的各种器具、插座板、电缆电线等,在古代,甚至炒菜用的锅子都是用铜做的。铜在空气中一般很难被腐蚀,因为铜的稳定性能很高。然而,当环境改变时,如由中性环境变成酸性环境时,尤其是在高温高浓度的盐酸HCl中,铜一般会被腐蚀。通常情况下,铜在HCl中的腐蚀主要与Cl⁻的浓度有关,Cl⁻的浓度越大,铜的腐蚀速率越快。一般而言,在HCl溶液中,Cl⁻的浓度只要达到1.0 mol/L,尤其在有氧条件下,铜就会被腐蚀^[1]。纯铜的腐蚀反应机理^[2]如下:



由以上反应式可以看出,Cu⁺与溶液中的Cl⁻发生反应比Cu²⁺与Cl⁻的反应要快,于是很快形成CuCl,但是由于CuCl在铜表面的附着力不是很强,容易从铜的表面脱落,不能形成较好的保护层,所以不能起到较好的保护作用;随后,CuCl继续转化为可以溶解的CuCl₂⁻,然而CuCl₂⁻离子不稳定,在溶液中会进一步分解,并生成Cu²⁺^[3],这种反应如果不受到抑制,铜就会在溶液中逐渐被溶解掉,从而产生腐蚀现象。

目前,学界对铜的腐蚀研究较多。张大全等人^[4]研究了盐酸介质中谷氨酸对铜的缓蚀作用,结果表明,谷氨酸的缓蚀效果随盐酸浓度的增大而增大,当其浓度为1 mol/L时,对铜的缓蚀率达73%。这是因为谷氨酸的加入会导致铜电极腐蚀电位负移,抑制铜电极的阴极电化学过程。同时,谷氨酸的缓蚀作用随溶液的pH值变化而变化,当pH值接近其等电点时,缓蚀作用最小。顾玮婧等人^[5]通过电化学方式研究了植酸在铜基表面的缓蚀性能,结果表明,植酸在较低浓度下进行组装,可提高纯铜与黄铜的缓蚀性能,尤其对合金如黄铜,其成效更显著。徐群杰等人^[6]研究了聚天冬氨酸和钨酸钠2种绿色水处理药剂的单一配方及其复配对白铜(B10)在质量分数为3%的NaCl溶液中的缓蚀性能,结果表明,单一钨酸钠和聚天冬氨酸对白铜(B10)均具有一定的缓蚀效果,其中,当钨酸钠的质量浓度为60 mg/L、聚天冬氨酸的质量浓度为40 mg/L时,其缓蚀效果最佳;当总质量浓度为40 mg/L时,两者的复配表现出明显的协同效果,且当聚天冬氨酸与钨酸钠的质量浓度

之比为3:1时,缓蚀效果最好。Xu Q. J.等人^[7]采用电化学法,研究了植酸自组装分子膜对黄铜(HSn70-1)电极的缓蚀行为,结果表明,植酸在黄铜表面形成了一层络合膜,其自组装分子膜改变了黄铜表面双电层电容结构,同时开路电位发生了正移。另外,植酸分子在黄铜表面形成络合膜属于典型的化学吸附,符合Langmuir吸附模型。

本课题组研究了一种自制的聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)水溶性金属防锈液对纯铜缓蚀性能的影响。该防锈液绿色环保,对人体无毒无害,能够在金属表面自发形成一层PVA薄膜,使得金属基体能够受到良好的保护,同时还可解决防锈液使用后难于清理的困扰,而且该防锈液可以重复利用,经济环保。

2 实验部分

2.1 主要试剂与仪器

1) 试剂

PVA, 1799, 分析纯, 上海紫一试剂厂生产;

聚乙二醇、乳化剂OP-10、丙三醇、柠檬酸, 均为分析纯, 吐温80, 化学纯, 均由天津科密欧化学试剂有限公司生产;

三乙醇胺、苯并三氮唑(1H-benzotriazole, BTA), 均为分析纯, 十二烷基硫酸钠, 化学纯, 均由湖南汇虹试剂有限公司生产;

纯净水, 自制;

纯铜, 市售;

盐酸, 分析纯, 株洲石英化玻有限公司生产。

2) 仪器

分析天平, JY-302, 上海浦春计量有限公司;

电化学工作站, CHI 660B, 北京市科学仪器公司;

扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM), HITACHI S-3000N, 复纳科学仪器(上海)有限公司;

恒温水浴锅, HH, 江苏金坛市大仪器厂。

2.2 PVA金属防锈液的制备

用烧杯量取一定量的去离子水, 取额定组分的十二烷基硫酸钠放于水中, 均匀摇晃, 使其充分溶解; 然后取一个烧杯, 往烧杯里加入一定量的PVA和去离子水, 将水浴锅温度调至95℃, 并将烧杯置于水浴锅中加热, 启动电子搅拌器搅拌, 等到PVA溶液呈透明状后, 再往烧杯里分别加入吐温80和甘油以及事先备好的十二烷基硫酸钠水溶液, 使其充分分散; 其后往烧杯中加入柠檬酸、三乙醇胺和苯

并三氮唑,使其充分分散均匀;最后取出烧杯,放在室温下冷却静置脱泡。PVA金属防锈液的制备工艺流程如图1所示。

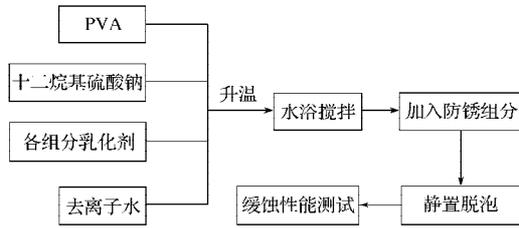


图1 PVA防锈液的制备工艺流程

Fig.1 Diagram of PVA antirust liquid preparation process

2.3 性能评价与表征

1) 失重分析

失重分析是一种简单、直接、有效的表征锈蚀的方法,其主要依照金属前后质量的变化来判断腐蚀的强度,质量变化越大,说明腐蚀越厉害,质量变化越小,说明腐蚀越小。

纯铜试样在浓度为1.0 mol/L的HCl溶液中的腐蚀失重率测量方法如下:分别在HCl溶液中加入体积为0, 100, 200, 300, 400, 500 mL的防锈液,测试纯铜在复合溶液中的失重率。首先,采用金相砂纸将纯铜试样(试样尺寸为10 cm × 10 cm)表面进行打磨处理;然后,先后以去离子水、无水乙醇对打磨光亮的纯铜试样进行清洗;清洗后,置于干燥箱内进行干燥处理,备用。实验前,向溶液中通入氮气30 min,以除去溶液中的氧气;然后,在(25 ± 1) °C条件下,将片状纯铜试样悬挂于腐蚀介质中浸泡72 h,取出后立即用硬橡皮擦除腐蚀产物,并先后经去离子水、丙酮及无水乙醇清洗,清洗后干燥至恒重,称重并记录相关数据。纯铜腐蚀速率的计算公式^[8]为

$$v = \Delta m / (S \times t)。$$

式中: v 为纯铜的腐蚀速率, mg/m²/h;

Δm 为每平方米纯铜试样在腐蚀介质中减少的质量, mg;

S 为纯铜试样的表面积, m²;

t 为纯铜试样在腐蚀介质中浸泡的时间, h。

再根据如下公式^[9]计算腐蚀剂的缓蚀率。为了减小误差,进行多次测量,取平均值为定值。

$$\eta_1 = \frac{v_0 - v}{v_0} \times 100\%。$$

式中: v_0 和 v 分别为纯铜试样在盐酸介质中未加和加入防锈液时的腐蚀速率, mg/m²/h。

2) 极化曲线分析

采用三电极体系,测试试样的腐蚀电流密度。三

电极体系包括辅助电极、参比电极和工作电极,本实验中,采用金属铂作为工作站的辅助电极,采用饱和甘汞电极作为参比电极,采用自制的纯铜电极作为工作电极。实验前,将工作电极用金相砂纸打磨干净,然后先后以去离子水、丙酮和无水乙醇清洗干净后放入烤箱内干燥。将三电极体系放置于溶液中浸泡30 min,使系统达到稳定状态。在开路电位(open circuit potential method, OCP)为-150~150 mV的范围内,进行动电位扫描测试,扫描频率为1.0 mV/s。每次测试至少重复3次,以保证实验数据的稳定性及可靠性。测试结束后,采用外推法计算电极的阴阳极腐蚀电流密度(如图2所示,图中 b_c , b_a 分别表示极化曲线上的阴极和阳极塔菲尔斜率),并依据如下公式^[10]计算纯铜的缓蚀率。

$$\eta_2 = \frac{J_0 - J}{J_0} \times 100\%。$$

式中: J_0 和 J 分别表示纯铜试样在未加和加入防锈液时的腐蚀电流密度, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

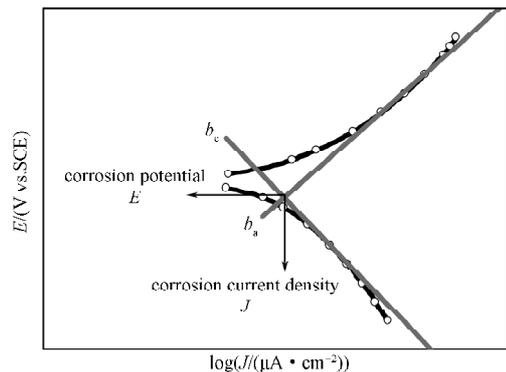


图2 外推法计算所得阴阳极塔菲尔斜率(b_c , b_a)、腐蚀电位(E)及腐蚀电流密度(J)

Fig.2 Extrapolation method applied for measuring Tafel slopes, corrosion potential and corrosion current density

3) SEM分析

采用扫描电子显微镜观察试样的表面形貌,方法如下:室温条件下,将纯铜试样浸泡在分别加入0, 100, 200, 300, 400, 500 mL防锈液、浓度为1.0 mol/L的HCl混合溶液中,72 h后取出;然后,先后经丙酮、无水乙醇及去离子水清洗后干燥,放置于扫描电镜下观察其表面形貌。

3 结果与讨论

3.1 失重法实验结果与分析

失重法测试所得纯铜在防锈液添加体积(V)分别为0, 100, 200, 300, 400, 500 mL的混合溶液中的缓蚀率如表1所示。

表 1 失重法测试所得纯铜在混合溶液中的缓蚀率
Table 1 Corrosion rate of pure copper in the mixed solution by weight loss method

V/mL	$\Delta m/\text{mg}$	$v/(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$\eta_i/\%$
0	6 750	93.8	-
100	4 256	59.1	36.9
200	3 142	43.6	53.4
300	2 161	30.0	70.0
400	1 056	14.6	84.3
500	895	12.4	86.7

分析表 1 可知, 当未加入防锈液时, 每平方米纯铜减少的质量为 6 750 mg, 而当加入 100 mL 防锈液时, 其减少的质量降低至 4 256 mg, 这充分说明了防锈液的加入降低了纯铜在 HCl 混合溶液中的腐蚀速率。随着防锈液添加体积的增加, 纯铜减少的质量变小, 当防锈液的添加体积为 500 mL 时, 每平方米纯铜减少的质量仅为 895 mg, 缓蚀率由 36.9% (防锈液添加体积为 100 mL 时的缓蚀率) 增加到 86.7%, 缓蚀率明显提高。其原因主要为: 1) 防锈液加入太少, 不能起到较好的缓蚀作用, 而随着防锈液体积的增加, 防锈液慢慢达到饱和状态, 其防锈性能得到较大幅度的提高。2) 防锈液中含有苯并三氮唑, 其使用的最佳 pH 值范围为中性或偏碱性介质^[11]。一般认为, 苯并三氮唑对纯铜的缓蚀机理为苯并三氮唑分子可以吸附在铜的表面, 与一价铜离子发生作用, 形成 $[\text{Cu}^+ \text{BTA}^-]$ 复合膜, 从而防止铜的腐蚀^[12]。然而, 在酸性介质中, BTA 主要以 BTAH^{2+} 配合物离子的形式存在, 此时金属的表面也是带正电的, BTAH^{2+} 的配合物离子在铜表面的吸附能力较弱, 从而导致其在酸性介质中缓蚀性能急剧下降^[13]。因此, 只有加入足量的防锈液, 才能中和其酸性, 使其防锈性能得以提高。

3.2 极化曲线法实验结果与分析

纯铜在混合溶液中的极化曲线如图 3 所示。

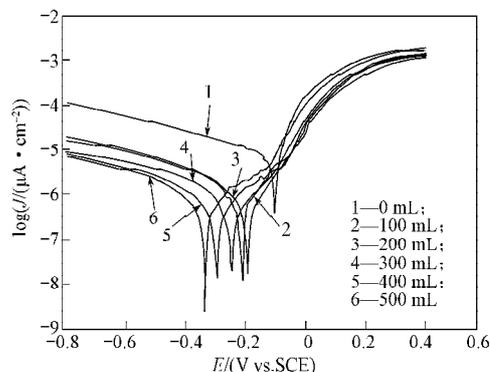


图 3 纯铜在混合溶液中的极化曲线
Fig. 3 Polarization curves of pure copper in the mixed solution

由图 3 可知, 随着防锈液的加入, 其对应的阴、阳极 (主要是阴极) 腐蚀电流密度明显减小, 腐蚀电位也随着防锈液的加入发生明显负移。实验结果表明, 防锈液能抑制 HCl 介质中纯铜腐蚀的发生, 且从图中可判定这种防锈液是以阴极为主的混合型防锈液。另外, 当腐蚀电位为 $-0.8 \sim -0.6$ (V vs. SCE) 时, 所有阴极的塔菲尔斜率基本相同, 切线呈平行状态, 这说明防锈液的加入并没有影响阴极的析氢反应历程^[14-16]; 但阳极极化曲线的形状变化较大, 这表明防锈液的加入改变了纯铜的阳极腐蚀过程, 其原因是该防锈液在纯铜表面能发生吸附反应, 生成金属络合物或螯合物, 从而使阳极的腐蚀受到抑制^[17]。

表 2 所示为极化曲线测试所得纯铜在混合溶液中的缓蚀率。

表 2 极化曲线测试所得纯铜在混合溶液中的缓蚀率
Table 2 Corrosion rate of pure copper in the mixed solution by polarization curve testing

V/mL	$E/(\text{V vs. SCE})$	$J/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$b_a/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$-b_c/(\text{mV}\cdot\text{dec}^{-1})$	$\eta_i/\%$
0	-0.040	3.190	44	174	-
100	-0.151	2.010	39	173	37.0
200	-0.200	1.432	35	171	55.1
300	-0.754	0.925	27	172	71.0
400	-0.284	0.558	22	173	82.5
500	-0.310	0.450	15	175	85.9

分析表 2 可知, 随着防锈液的加入, 电化学体系的腐蚀电流密度发生明显变化, 当没有加入防锈液时, 体系的腐蚀电流密度为 $3.190 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 当加入 100 mL 防锈液时, 体系的腐蚀电流密度为 $2.010 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 减少了 $1.180 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。随着防锈液添加体积的增加, 虽然体系的腐蚀电流密度继续降低, 但其降低的幅度慢慢趋缓, 这是因为: 随着防锈液体积的不断增大, 防锈液的含量在体系中慢慢趋于饱和, 影响纯铜缓蚀性能的主要因素不再是防锈液的加入量, 因此体系的缓蚀电流密度降低的幅度慢慢趋缓。由表 2 得知, 纯铜在混合溶液中的缓蚀率最大达 85.9%, 即防锈液添加体积为 500 mL 时纯铜的缓蚀率。

将失重法与极化曲线法测试缓蚀率所得结果进行对比, 其相关数据见表 3。

表 3 失重法与极化曲线法测试缓蚀率结果对比
Table 3 Comparison of corrosion inhibition rate of weight-loss method and polarization curve test %

测试方法	防锈液添加体积 / mL				
	100	200	300	400	500
失重法	36.9	53.4	70.0	84.3	86.7
极化曲线法	37.0	55.1	71.0	82.5	85.9

由表3可知,失重法和极化曲线法所测试的缓蚀率结果基本一致,差别很小。失重法测试结果的最小值为36.9%,最大值为86.7%;而极化曲线法测试结果的最小值为37.0%,最大值为85.9%。2种方法测试所得数据无论从函数的走向还是数值的趋近上看,都相当吻合。因此,依据2组结果可判断,防锈液在酸性介质中对纯铜具有优良的缓蚀性能。

3.3 扫描电镜实验结果与分析

纯铜在防锈液添加体积为0, 100, 200, 300, 400, 500 mL的混合溶液中浸泡72 h后的扫描电子显微镜形貌如图3所示。

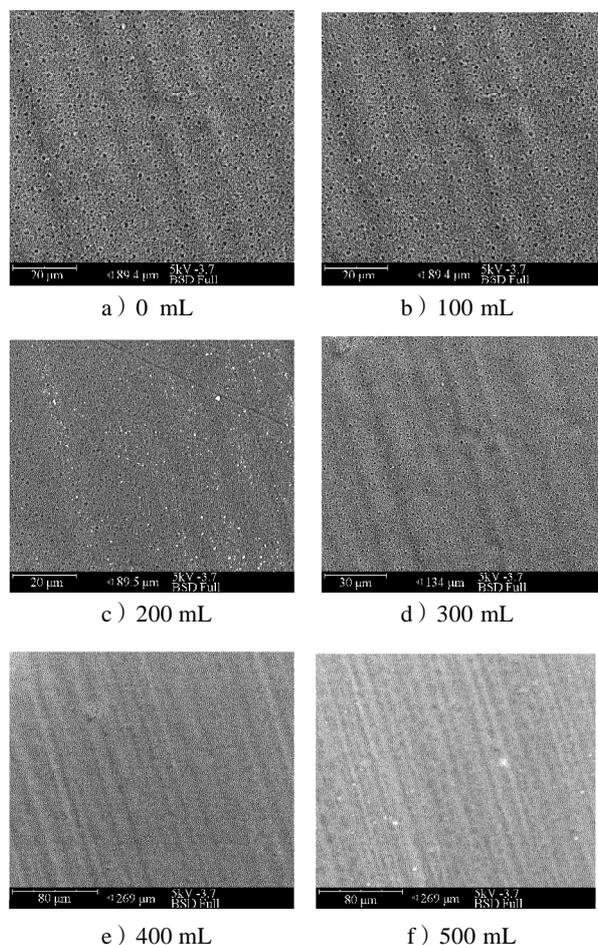


图3 纯铜在混合溶液中浸泡72 h后的扫描电镜形貌
Fig. 3 The SEM morphology of pure copper in mixed solution for 72 h

由图3可以得知,随着防锈液的加入,纯铜表面的孔洞大小明显变小,而且数量也有所减少。尤其当防锈液的体积增加到500 mL时,与未加入防锈液相比,纯铜表面的孔洞数量明显减少,且其孔洞大小也明显变小,纯铜表面趋于平整。这说明了防锈液的加入能够在较大程度上抑制纯铜腐蚀的发生,这一结果与上述失重法和极化曲线法实验结果相吻合。

4 结论

在浓度为1.0 mol/L的HCl酸性介质中分别加入体积为0, 100, 200, 300, 400, 500 mL的自制PVA金属防锈液,采用失重法、极化曲线法和扫描电子显微镜表面分析法,测试纯铜在混合溶液中的缓蚀率。实验结果表明,3种方法均能得到该防锈液对纯铜具有良好缓蚀性能的结论。

1) 失重法测试结果表明,PVA水溶性金属防锈液对纯铜具有非常好的缓蚀作用,且防锈液添加体积越大,其失重越小,缓蚀效果越好,其缓蚀率可达86.7%;

2) 极化曲线法测试结果表明,PVA水溶性金属防锈液对纯铜具有非常好的缓蚀作用,且防锈液添加体积越大,体系的腐蚀电流密度越小,缓蚀率越高,其缓蚀率可达85.9%,这一结果与失重法的实验结果相符合;

3) 扫描电子显微镜表面形貌分析结果表明,随着防锈液添加体积的增大,纯铜表面的孔洞数量减少,孔洞面积也减小,尤其当加入500 mL防锈液时,纯铜表面趋于平整,这说明防锈液对纯铜具有很好的缓蚀效果。

参考文献:

- 秦婷婷. 自组装膜对铜在盐酸介质中缓蚀作用的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011: 2-3.
QIN Tingting. Study on the Inhibition Effect of Self-Assembled Films for Copper Corrosion in 0.5 M HCl Solutions[D]. Chongqing: Southwest University, 2011: 2-3.
- 罗伟. 纳米晶铜块体材料的制备和腐蚀行为研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 1-5.
LUO Wei. The Synthesis and Corrosion Behavior of Bulk Nanocrystalline Copper[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 1-5.
- MORETTI G, GUIDI F. Tryptophan as Copper Corrosion Inhibitor in 0.5 M Aerated Sulfuric Acid[J]. Corrosion Science, 2002, 44: 1955-2011.
- 张大全, 李瑾, 郑红艾. 盐酸介质中谷氨酸对铜的缓蚀作用[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(1): 1-4.
ZHANG Daquan, LI Jin, ZHENG Hong'ai. Inhibition Effect of Glutamic Acid on Copper Corrosion in 0.5 mol/L HCl Solution[J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(1): 1-4.
- 顾玮婧, 王莉燕, 王馨迪, 等. 植酸在铜基表面缓蚀性能电化学研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2009, 38(5): 501-505.

- GU Weijing, WANG Liyan, WANG Xindi, et al. The Corrosion Inhibition Study of Phytic Acid on Different Copper Surface by Electrochemistry[J]. Journal of Shanghai Normal University(Natural Sciences), 2009, 38(5): 501-505.
- [6] 徐群杰,周国定,王会峰,等.聚天冬氨酸和钨酸钠复配对3% NaCl溶液中白铜B10的缓蚀作用[J].电化学, 2006, 12(1): 65-68.
- XU Qunjie, ZHOU Guoding, WANG Huifeng, et al. The Complex of PASP and Tungstate as Inhibitors of Cupronickel B10's Corrosion in 3% NaCl Solution[J]. Electrochemistry, 2006, 12(1): 65-68.
- [7] XU Q J, WANG G Y, ZHOU G D, et al. Electrochemical and Photoclectrochemical Study of Self-Assemble Monolayer of Phytic Acid on Brass[J]. Chinese Journal of Chemistry, 2008, 26(9): 1579-1584.
- [8] BOBINA M, KELLENBERGER A, MILLET J P, et al. Corrosion Resistance of Carbon Steel in Weak Acid Solutions in the Presence of L-Histidine as Corrosion Inhibitor[J]. Corrosion Science, 2013, 69: 389-395.
- [9] TAVAKOLI H, SHAHRABIAND T, HOSSEINI M G. Synergistic Effect on Corrosion Inhibition of Copper by Sodium Dodecylbenzenesulphonate(SDBS) and 2-Mercapto benzoxazole[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 109(2/3): 281-286.
- [10] CHEN Zhenyu, LI Lingjie, ZHANG Guo'an, et al. Inhibition Effect of Propargyl Alcohol on the Stress Corrosion Cracking of Super 13Cr Steel in a Completion Fluid[J]. Corrosion Science, 2013, 69: 205-210.
- [11] 张大全,高立新,周国定,等.苯并三唑和8-羟基喹啉对铜的缓蚀协同作用[J].物理化学学报, 2002, 18(1): 74-78.
- ZHANG Daquan, GAO Lixin, ZHOU Guoding, et al. Synergistic Effects of Benzotriazole and 8-Hydroxyquinoline Combined Inhibitors on Copper Corrosion[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2002, 18(1): 74-78.
- [12] BRUSIC V, FRISCH M A, ELDRIDGE B, et al. Copper Corrosion With and Without Inhibitors[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1991, 138(8): 2253-2259.
- [13] ALLARA D L, WU Y C, ZHANG P, et al. Effect of KI on Improving Copper Corrosion Inhibition Efficiency of Benzotriazole in Sulfuric Acid Electrolytes[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(10): 2791-2800.
- [14] FARAG A A, HEGAZY M A. Synergistic Inhibition Effect of Potassium Iodide and Novel Schiff Bases on X65 Steel Corrosion in 0.5 M H₂SO₄[J]. Corrosion Science, 2013, 74: 168-177.
- [15] QIAN Bei, WANG Jing, ZHANG Meng, et al. Synergistic Effect of Polyaspartic Acid and Iodide Ion on Corrosion Inhibition of Mild Steel in H₂SO₄[J]. Corrosion Science, 2013, 75: 184-192.
- [16] HU Junying, ZENG Dezhi, ZHANG Zhi, et al. 2-Hydroxy-4-Methoxy-Acetophenone as an Environment-Friendly Corrosion Inhibitor for AZ91D Magnesium Alloy [J]. Corrosion Science, 2013, 74: 35-43.
- [17] HE Xinkuai, JIANG Yumei, LI Chen, et al. Inhibition Properties and Adsorption Behaviour of Imidazole and 2-Phenyl-2-Imidazoline on AA5052 in 1.0 M HCl Solution [J]. Corrosion Science, 2014, 83: 124-136.

(责任编辑:徐海燕)