

温度和包装内缓蚀气压对金属气相防锈的影响

姜昕蕙¹, 卢立新^{1,2}, 李伟哲³

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2.国家轻工业包装制品质量监督检测中心, 江苏 无锡 214122; 3.沈阳防锈包装材料有限公司, 沈阳 110033)

摘要: **目的** 通过电化学方法探究气相防锈包装过程中温度和包装内缓蚀气压对气相防锈效果的影响, 为实际工况中获得较长的气相防锈有效寿命期提供数据参考。**方法** 以10#钢和铸铁为金属试样作为工作电极, 通过交流阻抗谱和动极化曲线对不同温度和不同缓蚀气压下试样缓蚀过程进行研究, 并分析其电化学参数变化规律, 对缓蚀效果进行评价和比较。**结果** 交流阻抗谱结果表明, 温度升高和缓蚀气压下降时, 金属试样表面阻抗值减小, 且在高温低频区出现 Warburg 阻抗, 腐蚀机理发生改变。动极化曲线结果表明, 随着温度升高和缓蚀气压下降, 金属试样的腐蚀电流减小, 腐蚀电压负移。**结论** 温度升高及包装内的缓蚀气压下降均会造成金属气相防锈效果下降, 且升温后缓蚀剂对缓蚀气压的变化更敏感, 为延长气相防锈包装的有效寿命期应关注高温工况, 并确保气相防锈包装内缓蚀气压稳定。

关键词: 气相缓蚀; 交流阻抗; 动极化曲线

中图分类号: TB485.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)19-0255-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.19.030

Effect of Temperature and Corrosion Inhibition Air Pressure in Package on Metal Vapor Phase Rust Prevention

JIANG Xin-hui¹, LU Li-xin^{1,2}, LI Wei-zhe³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 2. China National Light Industry Package Quality Supervising & Testing Center, Jiangsu Wuxi 214122, China; 3. Shenyang Rustproof Packaging Material Co., Ltd., Shenyang 110033, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of temperature and corrosion inhibition pressure in the package on the vapor phase rust prevention effect by electrochemical method, to provide data reference for obtaining a long effective life of vapor phase rust prevention in actual working conditions. 10# steel and cast iron were used as working electrodes. The corrosion inhibition process of the specimens at different temperature and pressure was studied through AC impedance spectroscopy and dynamic polarization curves. The change rules of electrochemical parameters were analyzed, and the corrosion inhibition effects were evaluated and compared. The results of AC impedance spectrum showed that the surface impedance of metal specimens decreased with the increase of temperature and the decrease of corrosion inhibition air pressure, and Warburg impedance appeared in the region of high temperature and low frequency, and the corrosion mechanism changed. The results of dynamic polarization curve showed that the corrosion current decreased and the corrosion voltage decreased with the increase of temperature and the decrease of corrosion inhibition air pressure. It is concluded that both the increase of temperature and the decrease of corrosion inhibition air pressure in the package would cause de-

收稿日期: 2021-12-29

基金项目: 姜昕蕙(1997—), 女, 硕士生, 主要攻为包装技术工程。

作者简介: 卢立新(1966—), 男, 博士, 江南大学教授、博导, 主要研究方向为包装技术与安全, 包装系统及装备等。

crease of metal vapor phase rust prevention effect, and the corrosion inhibitor is more sensitive to the change of corrosion inhibition air pressure after heating up. To prolong the effective life of the vapor phase corrosion protection package, it is required to pay attention to the high temperature working condition and ensure the stability of corrosion inhibition air pressure in the vapor phase corrosion prevention package.

KEY WORDS: vapor phase corrosion inhibition; AC impedance; dynamic polarization curve

腐蚀是发生在金属表面的电化学反应过程, 不仅损害金属外观, 还会导致设备故障, 造成巨大的经济损失。气相防锈包装可利用气相缓蚀剂的挥发性, 在金属表面形成保护层, 阻隔环境中腐蚀介质与金属接触。与涂层等传统防锈方法相比, 金属在移除气相防锈包装后无需清洗可直接使用, 因此被广泛使用^[1-2]。开展气相防锈包装影响因素的研究对气相防锈包装设计及其工程应用具有一定意义。

电化学方法发展迅速, 可用于快速评价气相防锈包装的缓蚀作用和机理, Marcus 等^[3]通过交流阻抗谱识别由缓蚀剂分子吸附造成的金属表面腐蚀速率和电极电容的降低。Mccafferty 等^[4]通过动极化技术向工作电极施加电压, 进一步测量由缓蚀剂保护层减小的腐蚀电流。李洪阳等^[5]通过气相沉积法对金属试片进行预膜, 探究了缓蚀剂在金属表面的成膜机理。徐静等^[6]通过交流阻抗谱探究了温度对化学镀锡层耐腐蚀性的影响。目前多数研究主要通过电化学方法对缓蚀剂分子进行探究, 未对包装环境及缓蚀气压条件进行深入研究, 缺少对实际工况的指导。

文中通过交流阻抗谱和动极化曲线, 分别探究不同温度和不同缓蚀气压下气相防锈包装对 10[#]钢及铸铁的缓蚀效果, 并通过电化学参数对缓蚀效果进行分析, 为延长实际工况中的气相防锈包装使用寿命提供一定的理论参考。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料: 加工 10[#]钢、铸铁金属试样, 试样规格为 10 mm×10 mm×3 mm。使用磨床和布轮抛光机依次对试样表面进行打磨、抛光, 再采用无水乙醇清洗, 丙酮去油, 氮气吹干后放入干燥皿中储存^[7]。

主要试剂: 无水乙醇 (C₂H₅OH), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 丙酮 (C₃H₆O), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 甘油 (C₃H₈O₃), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 氯化钠 (NaCl), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 硫酸钠 (Na₂SO₄), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 碳酸氢钠 (NaHCO₃), 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; D 型气相缓蚀剂, 沈阳缓蚀包装材料有限责任公司。

主要实验仪器见表 1。

表 1 实验仪器
Tab.1 Test equipment

仪器名称	型号	生产厂家
鼓风干燥箱	DHG-9036A	上海精宏试验设备有限公司
电热恒温水浴锅	DK-S22	上海精宏试验设备有限公司
电化学工作站	CHI660E	上海辰华仪器有限公司
优柯浦超纯水仪	AFX-1002-U	渝钦实业(上海)有限公司

1.2 电化学实验

电化学实验采用三电极体系, 工作电极为制备的 10[#]钢与铸铁电极, 辅助电极为铂电极, 参比电极为饱和甘汞电极^[8]。

1.2.1 实验条件的设置

1) 不同温度条件下的电化学试验, 通过将三电极体系放入设定温度的恒温水浴锅中进行。

2) 不同缓蚀气压条件下的工作电极, 通过气相沉积法由不同质量分数的气相缓蚀剂挥发后预膜得到。

1.2.2 电解质的配制

为贴近金属件在实际环境中的工况, 采用体积分数为 13% 的甘油水溶液作为电解质溶液, 以保持 90% 的相对湿度; 再将浸有模拟大气腐蚀水 [NaCl (100 mg/L)、Na₂SO₄ (100 mg/L) 和 NaHCO₃ (100 mg/L)] 的滤纸覆在电极表面^[9], 便于在电极表面形成一定厚度且均匀的水膜进行电化学反应。

1.2.3 工作电极的制备

文中采用气相沉积法对工作电极进行预膜, 在 100 mL 密封容器底部加入适量气相缓蚀剂, 将工作电极固定在容器顶部, 并使用高阻隔膜进行密封, 将整个装置放入 60 °C 鼓风干燥箱内, 预膜处理 5 d。为避免封装胶的挥发对实验的影响, 采用无味、无挥发性的有机硅密封胶对电极进行封装, 电极工作面积为 1 cm²。

1.2.4 交流阻抗曲线的测定

测量开路电位, 参数设定扫描范围为 -1.0~1.0 V, 扫描时间为 1 800 s, 记录开路电位。交流阻抗测试在开路电位下进行, 参数设定扫描频率为 0.05~10⁵ Hz,

振幅为 5 mV。

实验数据由 Zsimp Win 3.60 软件拟合, 等效电路^[10]见图 1, 其中 R_s 为溶液电阻, R_{p1} 和 R_{p2} 为极化电阻, Q_1 和 Q_2 为恒相元素。

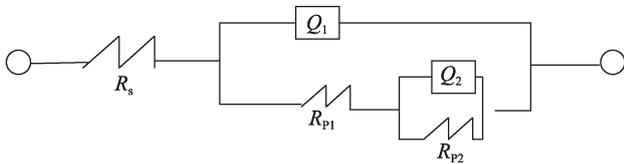


图 1 交流阻抗谱的等效电路
Fig.1 Equivalent circuit of AC impedance spectrum

1.2.5 动极化曲线的测定

采用动电位扫描, 参数设定: 扫描范围为 -1.0~2.0 V, 扫描速率为 0.1 mV/s。记录由极化曲线获得的电化学参数——腐蚀电位 E_{corr} 和腐蚀电流 I_{corr} 。

2 结果与分析

2.1 温度对气相防锈包装缓蚀效果的影响

首先在温度为 25、55、80 °C 的条件下对金属试样预膜电极分别进行电化学试验, 对比分析了不同温度下气相防锈包装的缓蚀效果。

2.1.1 交流阻抗谱

交流阻抗谱中的圆弧曲线反映的是阻抗, 圆弧直径越大, 电阻的阻碍作用越大, 电子得失不易发生, 即气相防锈包装效果越好^[11]。

10[#]钢和铸铁在不同温度下的交流阻抗谱见图 2。在 25 °C 时 2 种金属试样容抗弧直径增大, 阻抗分别

由 143 199.60、55 630.96 Ω 增大至 447 436.08、109 913.39 Ω。随着温度的升高, 在 55 °C 时电极的容抗弧直径大于未预膜电极的, 且小于在 25 °C 下预膜电极的, 阻抗分别为 202 640.44、58 432.92 Ω; 在 80 °C 时电极的容抗弧直径小于未预膜金属电极, 阻抗分别下降至 120 962.32、52 599.92 Ω。综上, 在实验选取的温度范围内, 随着温度的升高, 2 种金属试样的容抗弧直径均逐渐减小, 电荷转移过程受到的阻碍减小, 即气相防锈包装效果下降, 且在 80 °C 时开始失效。

此外, 在 25 °C 的温度条件下 2 种金属的交流阻抗谱都呈现出简单的容抗弧特征, 即缓蚀机理为电荷转移过程控制。10[#]钢的低频区在 55 °C 和 80 °C 时出现一条“扩散尾”, 铸铁在 80 °C 时也出现该现象, 表明吸附在电极表面的缓蚀剂受高温影响而解吸, 铁离子从缓蚀剂膜内侧向膜外侧扩散引起 Warburg 阻抗的出现, 此时缓蚀机理为电荷转移和扩散混合控制^[12-13]。

2.1.2 动极化曲线

动极化曲线可反映金属的腐蚀电位和腐蚀电流, 腐蚀电位的高低表征了腐蚀的难易程度, 腐蚀电位越高, 越难发生腐蚀; 腐蚀电流的大小表征了腐蚀的快慢程度, 腐蚀电流越小, 腐蚀越慢。

10[#]钢和铸铁在不同温度下的动极化曲线见图 3, 对曲线拟合得到不同温度下的电化学参数, 见表 2。在 25 °C 时 10[#]钢的阳极电流密度减小, 即该气相缓蚀剂对于 10[#]钢为阳极型缓蚀剂^[14], 腐蚀电流由 -0.401 A 降至 -0.501 0 A, 腐蚀电位由 -7.117 V 升至 -5.899 V; 而铸铁在 25 °C 时, 阳极和阴极电流密度均减小, 即该气相缓蚀剂对于铸铁为混合型缓蚀剂, 腐蚀电流由 -0.538 A 降至 -0.692 A, 腐蚀电位由 -5.548 V 升至 -5.502 V。随着温度的升高, 10[#]钢和铸铁在 55 °C 时

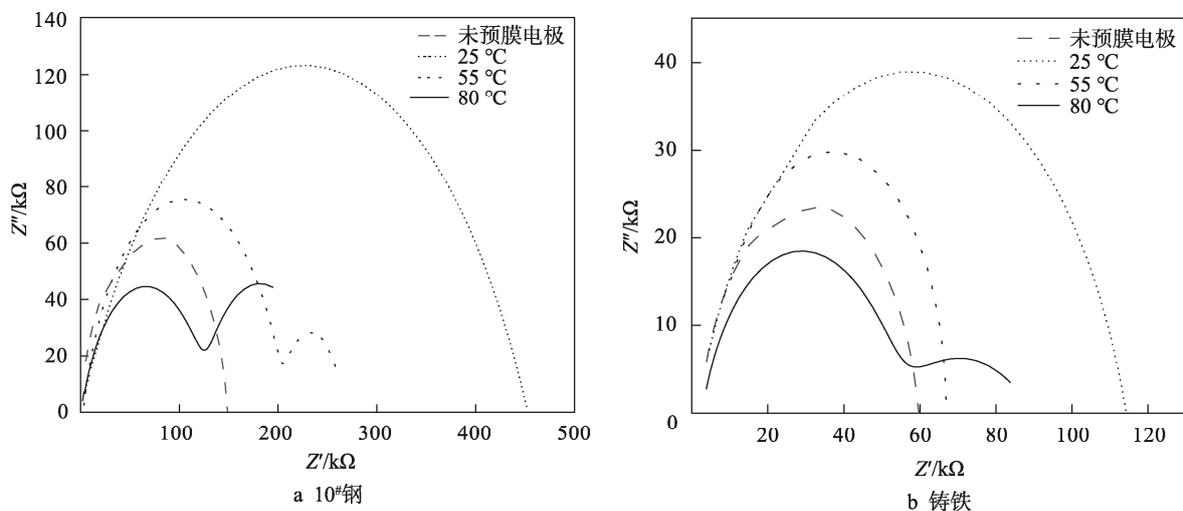


图 2 不同温度下的 EIS 曲线
Fig.2 EIS curves at different temperature

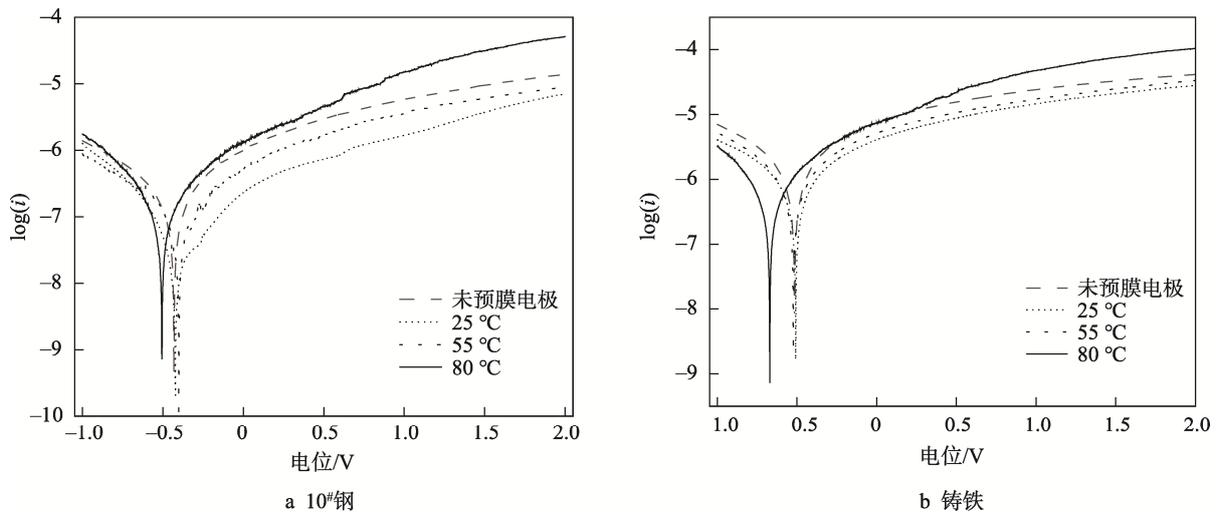


图3 不同温度下的极化曲线
Fig.3 Polarization curves at different temperature

电流密度稍有上升,但仍低于未预膜金属电极,在80 °C时10#钢和铸铁电流密度显著升高,腐蚀电流分别升至-0.370 A和-0.504 A,腐蚀电位分别负移至-7.121 V和-6.392 V。在实验选取的温度范围内,随着温度的升高,2种金属均得到了更低的腐蚀电位和更高的腐蚀电流,即降低了气相防锈包装效果,证实了上述阻抗分析的正确性。

表2 不同温度条件下极化曲线拟合的电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters of polarization curve fitting at different temperature

金属电极	温度/°C	E_{corr}/V	I_{corr}/A
10#钢	未预膜	-7.117	-0.401
	25	-5.899	-0.501
	55	-6.490	-0.434
	80	-7.121	-0.370
铸铁	未预膜	-5.548	-0.538
	25	-5.502	-0.692
	55	-5.569	-0.557
	80	-6.392	-0.504

不同温度条件下多的气相防锈包装效果不同,随着温度的升高,阻抗和腐蚀电位减弱,腐蚀电流增大,即金属易被腐蚀,气相防锈包装效果下降。通过金属在高温低频区出现的 Warburg 阻抗可知,高温使缓蚀剂分子从金属表面逐渐解吸,失去缓蚀的能力,腐蚀机理由电荷转移控制变为电荷转移和扩散混合控制^[15],因此在实际防锈包装中需关注高温工况,预防高温引起的缓蚀剂失效。

2.2 气相防锈包装内缓蚀气压对缓蚀效果的影响

分别以25 °C和55 °C为测试温度,进一步探究气相防锈包装内缓蚀气压对缓蚀效果的影响。当预膜电极的容器体积相同时,定义1.00为气相缓蚀剂挥发时的饱和气压;0.75为质量分数为75%的气相缓蚀剂挥发时的饱和气压;0.50为质量分数为50%的气相缓蚀剂挥发时的饱和气压;0.00为无缓蚀剂条件。

2.2.1 交流阻抗谱

在25 °C时,10#钢和铸铁在不同缓蚀气压下的电化学阻抗谱见图4。10#钢在缓蚀气压分别为1.0、0.75和0.50时的阻抗对应为447 436.08、22 583.52、157 670.53 Ω;铸铁在缓蚀气压分别为1.0、0.75和0.50时的阻抗对应为109 913.39、71 662.94、52 637.72 Ω。结果表明,随着缓蚀气压的下降,容抗弧直径逐渐减小,缓蚀效果逐渐下降,但2种金属试样在0.50的缓蚀气压条件下的阻抗均高于未预膜的金属电极,即仍有一定的缓蚀效果。

在55 °C时,10#钢和铸铁在不同缓蚀气压下的电化学阻抗谱见图5。10#钢在缓蚀气压分别为1.0、0.75和0.50时的阻抗对应为202 640.44、145 279.20、118 025.70 Ω,当气压下降至0.75时,阻抗值与未预膜电极的值相近,气压继续下降至0.50时,容抗弧直径小于未预膜的金属电极,金属开始腐蚀;铸铁在缓蚀气压分别为1.0和0.75时的阻抗分别为58 432.92、47 576.13 Ω,当缓蚀气压下降至0.75时,铸铁表面阻抗值小于未预膜的铸铁试样,气相防锈包装失效。

综上, 在 25 °C 时, 在实验选取的缓蚀气压范围内, 随着气压的下降, 2 种金属试样容抗弧半径均逐渐减小, 气相防锈包装效果下降, 但仍能对金属起一定的缓蚀作用; 而在 55 °C 时, 当包装内缓蚀气压降至 0.75 和 0.50 时, 铸铁和 10[#]钢的缓蚀效果对应失效, 据此可推测升温后, 气相防锈效果受气压影响更明显。此外, 交流阻抗谱低频区形状没有随着缓蚀气压的变化而改变, 即缓蚀气压没有改变腐蚀机理, 该过程由电荷转移过程控制。

2.2.2 动极化曲线

在 25 °C 和 55 °C 时, 10[#]钢和铸铁在不同缓蚀气压下的动极化曲线见图 6 和图 7, 对曲线拟合得到不同缓蚀气压下的电化学参数, 见表 3。随着缓蚀气压的下降, 在 25 °C 时 10[#]钢阳极电流密度逐渐增大, 腐蚀电流由 -0.434 A 升至 -0.372 A, 腐蚀电位由 -5.899 V 负

移至 -7.116 V; 铸铁的阴极和阳极电流密度均逐渐增大, 腐蚀电流由 -0.557 A 升至 -0.544 A, 腐蚀电位由 -5.502 V 负移至 -5.544 V, 2 种金属试样的缓蚀效果仍优于未预膜金属。

由表 3 可知, 同一缓蚀气压条件下, 10[#]钢和铸铁 2 种金属在 55 °C 时的腐蚀电位减小量和腐蚀电流增加量均大于 25 °C 的变化量, 且在 55 °C 时 10[#]钢和铸铁的腐蚀电流分别在 0.50 和 0.75 的气压条件下大于未预膜电极, 即气相防锈包装失效。

综上, 在实验选取的缓蚀气压范围内, 随着气压的下降, 2 种金属均得到了更低的腐蚀电位和更高的腐蚀电流, 即降低了气相防锈包装效果; 在同一气压条件下, 高温对腐蚀电位和腐蚀电流的影响更明显, 证实了上述阻抗分析的正确性。

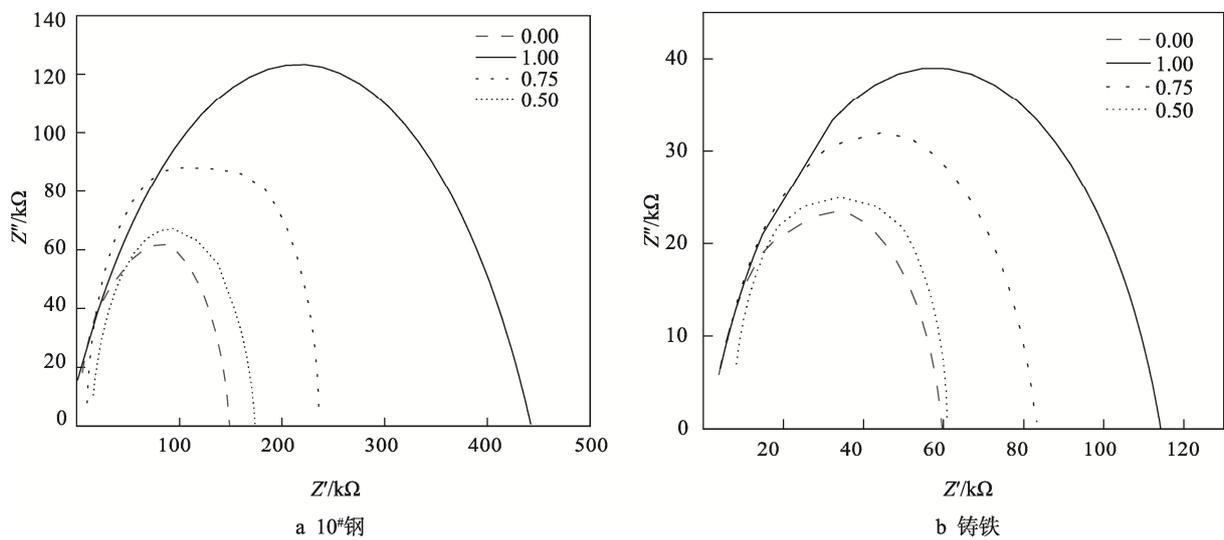


图 4 不同气压下的 EIS 曲线 (25 °C)
Fig.4 EIS curves at different air pressure (25 °C)

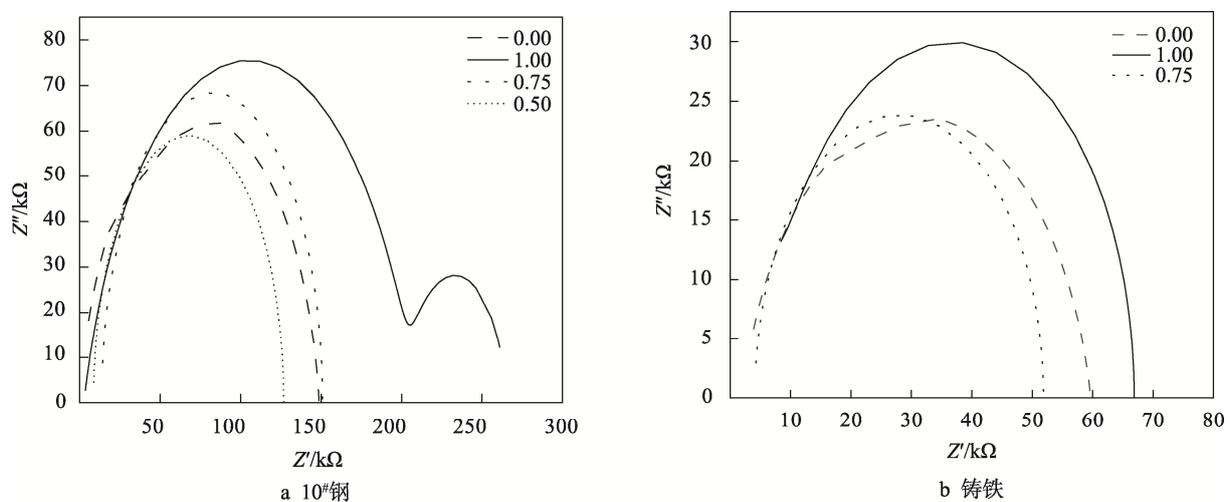


图 5 不同气压下的 EIS 曲线 (55 °C)
Fig.5 EIS curves at different air pressure (55 °C)

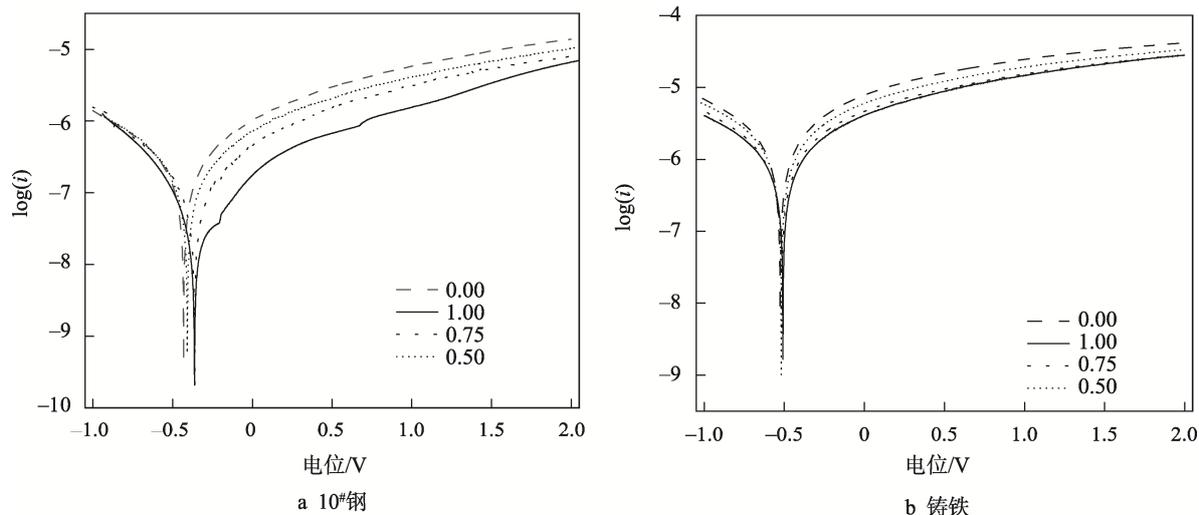


图6 不同气压下的极化曲线 (25 °C)
Fig.6 Polarization curves at different air pressure (25 °C)

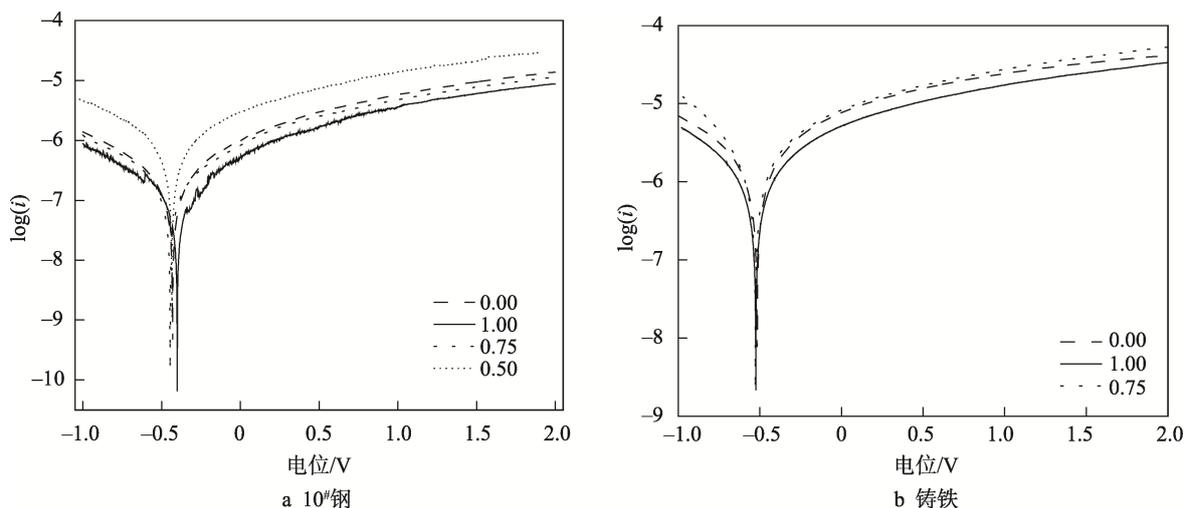


图7 不同气压下的极化曲线 (55 °C)
Fig.7 Polarization curves at different air pressure (55 °C)

表3 不同缓蚀气压条件下极化曲线拟合的电化学参数
Tab.3 Electrochemical parameters of polarization curve fitting at different air pressure of corrosion inhibition

金属电极	缓蚀气压	25 °C		55 °C	
		E_{corr}/V	I_{corr}/A	E_{corr}/V	I_{corr}/A
10#钢	0.00	-7.117	-0.370	-7.117	-0.430
	1.00	-5.899	-0.434	-6.490	-0.458
	0.75	-7.090	-0.410	-6.690	-0.434
	0.50	-7.116	-0.372	-7.137	-0.401
铸铁	0.00	-5.548	-0.504	-5.548	-0.557
	1.00	-5.502	-0.557	-5.569	-0.563
	0.75	-5.528	-0.555	-5.636	-0.538
	0.50	-5.544	-0.544	—	—

包装内缓蚀气压不同则气相防锈包装效果不同，随着气压的下降，阻抗和腐蚀电位减弱，腐蚀电流增大，即气相防锈包装效果下降，但包装内缓蚀气压的改变没有改变腐蚀机理^[1]。将温度为25 °C与55 °C下的结果进行对比，可发现气相缓蚀剂在受热后对缓蚀气压的变化更敏感，因此在实际防锈包装中需关注气相防锈包装的密封性及组分含量的设计，若金属件在实际工况中会经历高温，应保证气相防锈包装内可维持较高的缓蚀气压，以延长气相防锈包装的有效寿命期。

3 结语

文中采用气相沉积法对10#钢和铸铁电极进行预膜，进一步通过交流阻抗谱和动极化曲线探究了温度

和包装内缓蚀气压对气相防锈的影响。随着温度的升高, 阻抗和腐蚀电位减弱, 腐蚀电流增大, 气相防锈包装效果下降; 在高温条件下, 交流阻抗谱低频区出现 Warburg 阻抗, 气相防锈包装开始失效, 即在实际工况中应重点关注高温。在 25 °C 的温度条件下, 在 0.50~1.00 的缓蚀气压范围内, 随着气压的下降, 缓蚀剂的缓蚀效果逐渐下降, 但对金属仍有一定的缓蚀作用; 以 55 °C 为实验温度, 10[#]钢和铸铁电极分别在 0.50 和 0.75 的气压条件下失效, 说明气相缓蚀剂在受热后对缓蚀气压的变化更敏感, 因此在实际工况中若想获得较长的防护寿命期, 可通过组分设计及包装密封性来确保包装内的缓蚀气压, 并避免高温工况。

参考文献:

- [1] GANGOPADHYAY S, MAHANWAR P A. Recent Developments in the Volatile Corrosion Inhibitor (VCI) Coatings for Metal: A Review[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2018, 15(4): 789-807.
- [2] ANDREEV N N, KUZNETSOV Y I. Physicochemical Aspects of the Action of Volatile Metal Corrosion Inhibitors[J]. *Russian Chemical Reviews*, 2007, 74(8): 755-767.
- [3] MARCUS P, MANSFELD F. Analytical Methods In Corrosion Science and Engineering[J]. *Corrosion Technology*, 2005, 74(1): 495-504.
- [4] MCCAFFERTY E. Introduction to Corrosion Science[M]. New York: Springer, 2010: 13-14.
- [5] 李洪阳, 卢立新, 李伟哲, 等. 45 钢表面羧酸类气相缓蚀剂的成膜机理[J]. *电镀与涂饰*, 2020, 39(15): 1004-1009.
LI Hong-yang, LU Li-xin, LI Wei-zhe, et al. Film Formation Mechanism of Carboxylic Acid-Based Volatile Corrosion Inhibitors on 45 Steel Surface[J]. *Electroplating & Finishing*, 2020, 39(15): 1004-1009.
- [6] 徐静, 闫军, 李波. 温度对化学镀锡层形貌和耐蚀性的影响[J]. *电镀与环保*, 2020, 40(2): 19-21.
XU Jing, YAN Jun, LI Bo. Influence of Temperature on Morphology and Corrosion Resistance of Electroless Tin Coatings[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2020, 40(2): 19-21.
- [7] 冯礼奎, 于志勇, 钱洲亥, 等. 碳钢用盐型气相缓蚀剂的缓蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(1): 28-32.
FENG Li-kui, YU Zhi-yong, QIAN Zhou-hai, et al. Corrosion Inhibition Behavior of Salt-Type Vapor Phase Corrosion Inhibitor for Carbon Steel[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(1): 28-32.
- [8] 梁爽, 宋海燕, 王立军. 碳钢用绿色复配气相缓蚀剂的制备[J]. *包装工程*, 2021, 42(17): 132-141.
LIANG Shuang, SONG Hai-yan, WANG Li-jun. Preparation and Research of Green Compound Gas Phase Corrosion Inhibitor for Carbon Steel[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(17): 132-141.
- [9] 安仲勋, 潘庆谊, 张大全, 等. 新型吗啉类气相缓蚀剂的电化学阻抗研究[J]. *材料保护*, 2003, 36(5): 14-16.
N Zhong-xun, PAN Qing-yi, ZHANG Da-quan, et al. Electrochemical Behavior of Morpholine Derivative Volatile Corrosion Inhibitor[J]. *Materials Protection*, 2003, 36(5): 14-16.
- [10] FATEH A, ALIOFKHAZRAEI M, REZVANIAN A. Review of Corrosive Environments for Copper and Its Corrosion Inhibitors[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(1): 481-544.
- [11] RODRIGURZ J A, THANGARASU, et al. Development of a Predictive Model for Corrosion Inhibition of Carbon Steel by Imidazole and Benzimidazole Derivatives[J]. *Corrosion Science: The Journal on Environmental Degradation of Materials and its Control*, 2016, 108(1): 23-25.
- [12] 刘建平, 苗永霞, 周晓湘. 复配咪唑啉类酸洗缓蚀剂的缓蚀性能研究[J]. *材料保护*, 2005, 38(8): 21-23.
LIU Jian-ping, MIAO Yong-xia, ZHOU Xiao-xiang. Inhibition Performance of Composite Imidazoline Pickling Inhibitor[J]. *Materials Protection*, 2005, 38(8): 21-23.
- [13] KIM JK, KEE SH, YEE JJ, et al. Electrochemical Impedance Properties of Corroded Reinforcing Steel in Concrete Dominated by Diffusion of Corrosive Products[J]. *Journal of the Korean Society for Railway*, 2020, 23(12): 1206-1218.
- [14] 王东卫. 新型噻二唑酰胺类缓蚀剂的合成及其对不锈钢的缓蚀性能[J]. *精细石油化工*, 2021, 38(1): 33-37.
WANG Dong-wei. Synthesis of a New Type of Thiaziazole Amide Corrosion Inhibitor and Its Performance on Stainless Steel[J]. *Specialty Petrochemicals*, 2021, 38(1): 33-37.
- [15] 胡慧慧, 陈长风. 温度影响席夫碱缓蚀剂吸附的机理研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2021, 41(6): 786-794.
HU Hui-hui, CHEN Chang-feng. Mechanism of Temperature Influence on Adsorption of Schiff Base[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2021, 41(6): 786-794.