

## 表面失效及防护

## 某 LNG 码头灌注桩飞溅区用防蚀膏的性能

王在峰<sup>1,2</sup>, 宋积文<sup>1</sup>, 陈胜利<sup>1</sup>, 符耀庆<sup>1</sup>, 李言涛<sup>2</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 侯保荣<sup>2</sup>

(1. 中国海洋石油总公司, 北京 100027; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** **目的** 测试防蚀膏在某 LNG 码头钢管桩飞溅区的保护效果。**方法** 模拟飞溅区的干湿交替, 利用循环海水浸泡、自腐蚀电位测试、间歇盐雾实验、电化学阻抗测试、极化电阻测试、极化曲线测试, 对防蚀膏的防蚀效果进行测试, 并与钙基润滑脂、锂基润滑脂的防蚀效果进行对比。**结果** 涂抹三种油脂的钢试样的质量随海水浸泡时间的延长而趋于稳定。防蚀膏和钙基脂试样的自腐蚀电位较正。在盐雾实验中, 防蚀膏无红锈, 钙基脂和锂基脂试样出现了红锈。防蚀膏试样随实验时间的延长, 阻抗未降低, 而钙、锂基脂试样均随实验时间的延长出现阻抗降低。防蚀膏的极化电阻是钙、锂基脂的 1.5~9 倍, 钝化区的电流密度是钙、锂基脂的 1/100~1/10。**结论** 防蚀膏保护效果最好, 钙基脂次之, 锂基脂最差。

**关键词:** 浪花飞溅区; 包覆防腐; 防蚀膏; 盐雾实验; 电化学阻抗; 线性极化; 极化曲线

**中图分类号:** TG 174.42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0194-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.030

## Performance of Anticorrosion Greases Used for Splash Zone in Filling Piles of a LNG Wharf

WANG Zai-feng<sup>1,2</sup>, SONG Ji-wen<sup>1</sup>, CHEN Sheng-li<sup>1</sup>, FU Yao-qing<sup>1</sup>,  
LI Yan-tao<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, HOU Bao-rong<sup>2</sup>

(1. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100027, China;

2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The study aimed to test the protective effect of anticorrosion grease in the splash zone of the steel pipe piles in a LNG wharf. **Methods** Circulating seawater immersion test, self-corrosion potential test, intermittent salt spray test, linear polarization test, polarization curve test and electrochemical impedance test were used to test the effect of anticorrosion grease in the simulating environment of the marine splash zone. The protective effect was compared with the calcium-base grease and lithium-base grease. **Results** With the extension of soaking time, the weight of the samples covered with all three

收稿日期: 2016-02-22; 修订日期: 2016-03-29

Received: 2016-02-22; Revised: 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金 (41376003); 国家科技支撑计划 (2012BAB15B00)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (41376003) and the National Science and Technology Supporting Program (2012BAB15B00)

作者简介: 王在峰 (1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

**Biography:** WANG Zai-feng (1980—), Male, Master, Engineer, Research focus: corrosion and protection.

kinds of greases became stable. The potentials of samples covered with anticorrosion grease and calcium-base grease were more positive. In salt spray test, the samples covered with anticorrosion grease had no red rust, while those with calcium-base grease and lithium grease had red rust. With the extension of experimental time, the impedance of anticorrosion grease had no obvious change, while those of calcium-base grease and lithium-grease decreased rapidly. The polarization resistance of anticorrosion grease was 1.5~9 times as high as those of the calcium-base grease and lithium-base grease. The current density of anticorrosion grease in the passivation region was about 1/100~1/10 of those of calcium-base grease and lithium-base grease. **Conclusion** The protective effect of anticorrosion grease was the best, followed by calcium-base grease, and then lithium-base grease.

**KEY WORDS:** splash zone; multilayer coating; anticorrosion grease; salt spray test; electrochemical impedance; linear polarization; polarization curve

LNG 码头的灌注钢桩按腐蚀程度的不同可分为 5 个区域<sup>[1]</sup>, 处于浪花飞溅区的灌注钢桩腐蚀最为严重<sup>[2-3]</sup>。某些类似灌注桩的钢结构采用重防腐涂料保护。涂料适合于新建钢桩, 但当涂料老化后再重新涂刷时, 现场有大量的波浪及水流冲击, 现场喷砂等很难达到车间的标准要求, 使得在役设施的涂刷修补难以达到较好的效果<sup>[4]</sup>。

最早起源于英国, 之后是美国、日本研究了一种复合式包裹的防腐方法。这是一种内部用防蚀油膏, 外部加以复合保护的方式<sup>[5-8]</sup>。鉴于国内石油平台导管架、码头桩腿在飞溅区的涂层效果比较差的现状, 国内部分科研人员在引进日本技术的基础上, 也开展了类似复层包覆相关方面的研究, 并申请了专利<sup>[9-13]</sup>。该种保护方法是将钢铁保护在缓蚀、疏水的环境中, 克服了现场涂装条件的限制, 显示出了较好的保护效果<sup>[14]</sup>。

某 LNG 码头的灌注桩为 Q235B 钢, 下水 3 年后经检验, 原飞溅区涂层已经出现破损, 拟采用复层包覆方法对飞溅区进行修补保护。在海洋构筑物浪花飞溅区的复层包覆研究中, 最核心的是内层的防蚀膏<sup>[15]</sup>。在国家科技支撑计划项目中, 刘建国、钱备、陈君等分别对防蚀膏进行了开发, 并进行了相关的研究和测试<sup>[16-20]</sup>。钱备在一定的耐温流动性下采用锥入度检测方法, 结合中性盐雾和电化学交流阻抗实验, 对防蚀膏进行了筛选。刘建国采用极化曲线实验、盐雾试验、阻抗实验对防蚀膏进行了筛选。以上两人的测试主要在盐水中进行, 与真实的海水环境具有一定差别, 并且测试用钢为 Q235A 钢, 虽同属低碳钢, 但不能完全反映 LNG 现场所用 Q235B 钢的效果。以上研究均在青岛进行, 而本研究拟采用的某型防蚀膏为第一次在东南沿海现场工程应用。本码头地处东南沿海, 气温较高,

干湿交替有其自身的规律。

文中针对内部的防蚀膏始终处在外部护套及防蚀带的保护之中, 其所处环境主要为海水长期循环浸泡和循环潮湿这样一个基本特征, 通过开展本 LNG 海洋环境下的海水循环浸泡实验、自腐蚀电位测试实验, 以及模拟 LNG 现场环境的间歇盐雾实验、电化学实验, 对防蚀膏和另外两种油脂的防蚀效果进行对比测试。

## 1 实验

### 1.1 材料

钢样为 LNG 码头灌注桩所用的 Q235B 钢, 将其加工成 20 mm×10 mm, 工作面打磨到  $\nabla_7$  的水平, 非工作面焊接导线并用环氧树脂密封。使用前用无水乙醇脱脂, 放在干燥容器中待用。

所用防蚀膏取自青岛某实验室, 是一种人造的淡褐色油性膏状缓蚀化合物, 密度为 0.9~1.2 g/cm<sup>3</sup>, 熔点为 69 °C, 燃点在 187 °C 以上, 蒸发量在 3.0% 以上。所用锂基润滑脂为某牌 3 号通用锂基润滑脂, 使用温度范围为 -20~120 °C, 产品标准 GB 7324—1994。所用钙基润滑脂为某牌钙基润滑脂, 使用温度范围为 -10~60 °C, 产品标准 GB 491—1987。

用刷子在 Q235B 钢试样上分别涂抹厚度为 1 mm 的防蚀膏、钙基润滑脂、锂基润滑脂膜层, 并用玻璃板铲平表面, 然后进行相关性能的对比测试。

### 1.2 性能测试

#### 1.2.1 循环海水浸泡实验

实验所用海水取自本 LNG 码头海域, 温度 26 °C, 盐度 33。将涂抹三种油脂的两组平行试样

固定在可分别拆卸的实验架上,在自制的海水循环浸泡桶中进行反复浸泡,每个循环浸泡期的浸水期、干水期均为 30 s。在固定时间取出带试样的实验架,称取试片质量,计算质量变化。

### 1.2.2 模拟包裹下自腐蚀电位实验

取涂抹三种油脂的一组试样,模拟实际包裹条件,在表面包裹克重 1000 g/m<sup>2</sup> 的无纺布 5 cm,在无纺布中埋设甘汞电极作为参比电极,并连接带存储功能的自制高阻抗数据采集表,在海水循环浸泡桶中测量试样处于海水循环环境中时自腐蚀电位随时间的变化情况。

### 1.2.3 间歇盐雾实验

实际飞溅区中,除有浪时的全浸泡干湿外,还有无浪时的盐雾干湿情况。根据飞溅区无浪时的干湿交替情况,设计间歇盐雾实验,尽量给出更接近实际的干湿交替及温度盐度环境。盐雾实验设备为 90 型盐雾腐蚀试验箱,实验条件为:采用 5% (质量分数) 的 NaCl 溶液介质, pH 值 7.0~8.2, 温度 (35±2) °C, 盐雾沉降量 1.8 mL/(80 cm<sup>2</sup> · h), 试样放置角度 30°, 喷雾时相对湿度大于 95%, 喷雾方式采用间歇喷雾, 每 30 min 喷雾一次。所用试样为 1.2.1 中经过了海水循环浸泡实验后的两组平行试样, 其中一组试样交叉划线。

### 1.2.4 电化学实验

试验采用三电极体系:工作电极为制备好的三种油脂干湿交替试样,辅助电极为 Pt 电极,参比电极体系由饱和甘汞电极和盐桥组成。实验介质为 LNG 现场海水。

EIS 和极化电阻、极化曲线的测量采用 AMETEX 公司的 PARSTAT2273 恒电位仪,交流阻抗测试的频率范围为 5 mHz~60 kHz,由高频至低频自动扫描,正弦交流电压振幅为 10 mV。极化电阻测试电位范围为相对于开路电位±20 mV,扫描速率 0.2 mV/s。极化曲线测试扫描速度为 0.5 mV/s,扫描范围为±500 mV (vs. OCP)。

试样为盐雾试验后的试样。由于划痕试样表面形貌变化很大,电化学测试中电流和电位变化不稳定,得出的曲线很不理想,因此电化学阻抗和极化曲线测试只针对未划痕试样。极化电阻的测量勉强拟合得到了划痕试样的数据。

## 2 结果和讨论

### 2.1 质量随时间的变化

如图 1a 所示,覆盖三种油脂的钢样在浸泡开始时质量均快速增加约 0.5 g,在 200 h 之内质量变动波动大,200 h 之后质量基本达到稳定。如图 1b 所示,0 h 和 200 h 对比,除 Ca1 试样外,所有试样质量变化均较明显;200、400、600、800 h 对比,除 Ca1 试样在 200 h 和 400 h 有 0.25 g 的差别外,其他所有试样在 4 个时间段质量基本不变。这证明从 200 h 开始,多数试样随着时间的延长,质量基本保持不变。由此可见,油脂刚开始时吸收部分水分,待达到饱和后,不但基本不再吸收水分,而且称量时表面的水分很少流失。随着浸泡时间的延长,三种油脂表面吸附的水分表现出一定的稳定性。这三种油脂有利于试样表面潮湿环境的稳定,适合在油脂中添加和保存其他缓蚀成分。

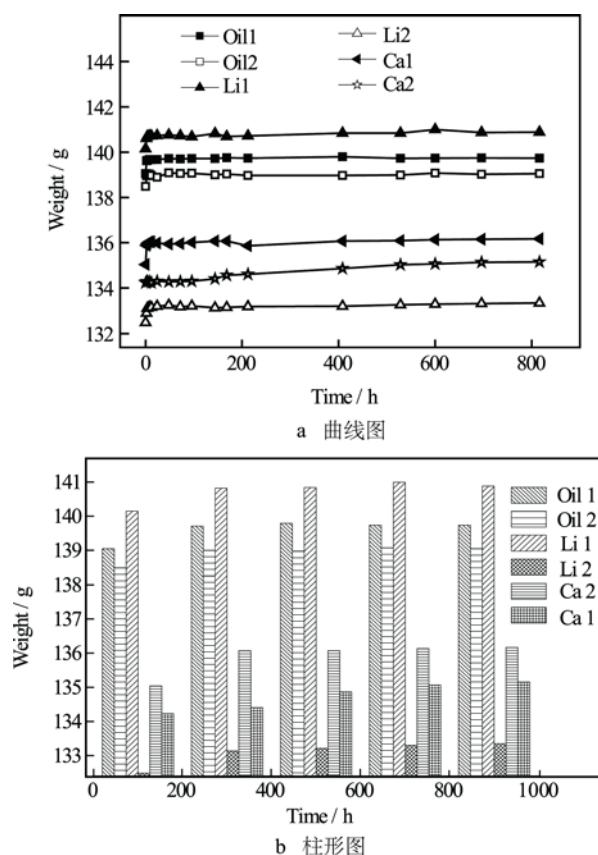


图 1 钢样质量随浸泡时间的变化

Fig.1 The change of weight of the steel samples with the soaking time

## 2.2 自腐蚀电位

如图 2 所示,随着浸泡时间的延长,涂覆防蚀膏覆盖层的钢样自腐蚀电位保持在 $-0.2\sim-0.25\text{ V}$ 之间,基体受到良好保护,测得的电位值是覆盖层的电位。涂覆钙基润滑脂覆盖层的钢样的自腐蚀电位在刚浸入海水中时为 $-0.33\text{ V}$ ,很快( $100\text{ h}$ )正移至 $-0.24\text{ V}$ 后,基本保持不变,基体受到良好保护,测得的电位值也是覆盖层的电位。涂覆锂基润滑脂

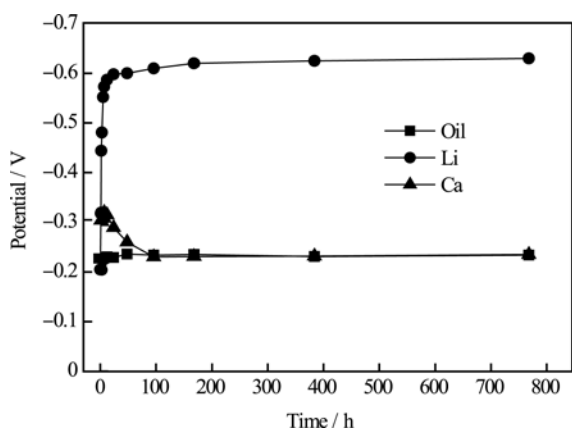


图 2 钢样自腐蚀电位随浸泡时间的变化

Fig.2 The change of self corrosion potential of the steel samples with the soaking time

覆盖层的钢样的自腐蚀电位在刚浸入海水中时为 $-0.23\text{ V}$ ,很快( $8\text{ h}$ )负移至 $-0.60\text{ V}$ 后,基本保持不变。 $-0.60\text{ V}$ 是钢铁基体在海水中的自腐蚀电位,这说明基体失去了覆盖层的保护。由此可见,防蚀膏和钙基润滑脂对于浸在海水中的钢铁具有良好的保护作用,而锂基润滑脂的保护作用不明显。该结果在后续盐雾实验、电化学阻抗实验、极化电阻实验和极化曲线实验中得到了佐证。

## 2.3 盐雾实验形貌

从图 3 的试样形貌变化可以看出,在盐雾腐蚀试验过程中,防蚀膏对钢铁基体具有优良的保护作用。对于交叉划线试样,由于盐雾试验箱内的温度在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而防蚀膏的滴点较低( $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),划线防蚀膏试样上的划线处因防蚀膏溶化流动而使露出的基体重新被防蚀膏覆盖,从而免受腐蚀。此外,防蚀膏还充分填塞了基体边缘和环氧树脂框的空隙,避免了盐雾喷洒过程中 $\text{NaCl}$ 溶液的渗入导致的基体腐蚀。即使有 $\text{NaCl}$ 溶液渗入到防蚀膏和钢铁基体界面,防蚀膏中的缓蚀剂也可抑制钢铁的腐蚀。所以在盐雾试验中,涂覆防蚀膏的钢铁试样没有出现任何腐蚀现象(红锈)。

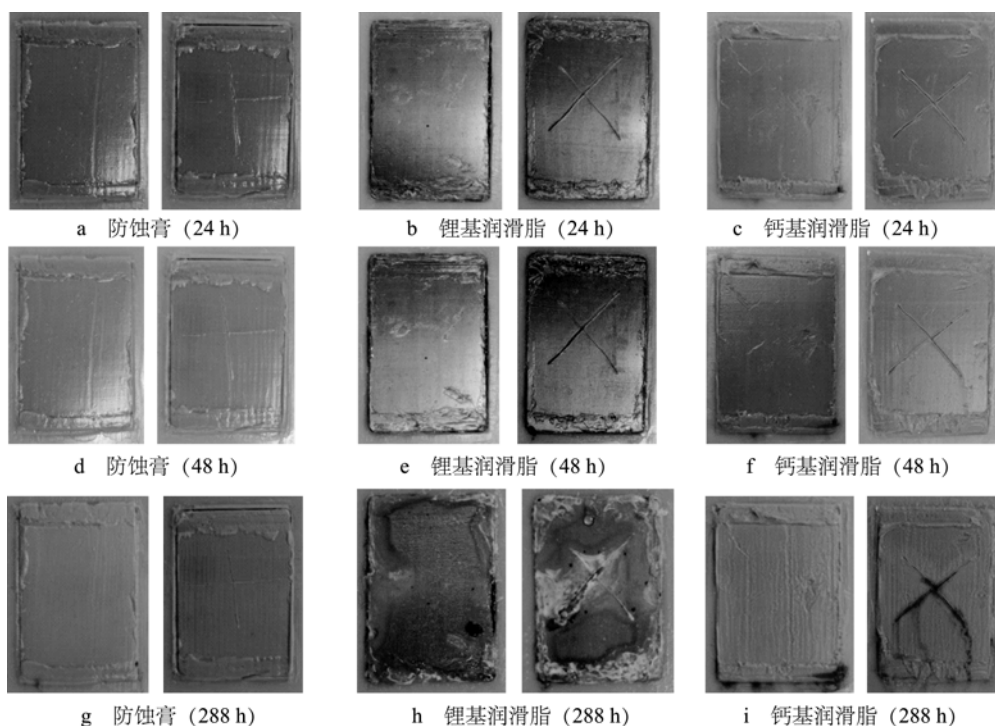


图 3 盐雾腐蚀试验后的形貌

Fig.3 The shapes and appearances of the steel samples: a) Anticorrosion (24 h), b) Lithium (24 h), c) Calcium (24 h), d) Anticorrosion (48 h), e) Lithium (48 h), f) Calcium (48 h), g) Anticorrosion (288 h), h) Lithium (288 h), i) Calcium (288 h)

锂基润滑脂的滴点很高,不低于 180 ℃,在盐雾试验箱内 35 ℃ 的温度下,锂基润滑脂不可能流动,所以划线处的钢铁基体直接暴露在 NaCl 溶液形成的盐雾环境下。盐雾试验 24 h 后,划线锂基润滑脂试样的划线处出现了红锈。盐雾试验 288 h 后,划线处的腐蚀扩大。NaCl 溶液从划线处和试样的四周渗入到覆盖层和钢铁基体界面处,锂基润滑脂变白且失去保护作用。

钙基润滑脂的滴点也较高,不低于 80 ℃,同样划线处的钢铁基体也直接暴露在盐雾环境下。盐雾试验 48 h 后,划线钙基润滑脂试样的划线处出现红锈。盐雾试验 288 h 后,基体腐蚀只在划线处扩大,没有扩大到划线处以外。NaCl 溶液没有从划线处和试样的四周渗入到覆盖层和钢铁基体界面处,钙基润滑脂对基体仍有良好的保护作用。

由此可知,在测试时间段内,涂覆防蚀膏和钙基润滑脂可以对海洋环境下的钢铁结构提供良好的腐蚀防护。假如在钙基润滑脂中添加一些钢铁缓蚀剂,可明显改善钙基润滑脂的防腐性能。由盐雾实验结果可知三种油脂的效果由好到差依次为防蚀膏、钙基润滑脂、锂基润滑脂,与前文的自腐蚀

电位测试结果一致。

## 2.4 电化学阻抗

三种试样的 Bode 图见图 4,在高频区均是 4 条阻抗曲线紧密靠在一起,阻抗数据非常接近。

锂基润滑脂试样和钙基润滑脂试样的 Bode 图低频区部分,随着浸泡时间的延长,分别在第 10 天和第 26 天开始阻抗明显变低,钢铁腐蚀速率增大,说明锂基润滑脂和钙基润滑脂分别在 10、26 天开始起不到保护作用。与锂基润滑脂相比,钙剂润滑脂的保护时间较长,保护效果较好。

防蚀膏试样的 Bode 图低频区部分,在从第 1 天到 32 天的整个浸泡实验过程中,阻抗均保持很高的数值,说明在该时间段内,油脂中的缓蚀剂有效抑制了渗入溶液对钢铁基体的腐蚀。

阻抗谱反映出的阻抗变化时间数据虽然与自腐蚀电位和盐雾实验的时间数据不完全对应,但反映出的三种油脂防护效果的优劣与盐雾实验结果和自腐蚀电位测试结果均一致,即防蚀膏优于钙基脂,钙基脂优于锂基脂。

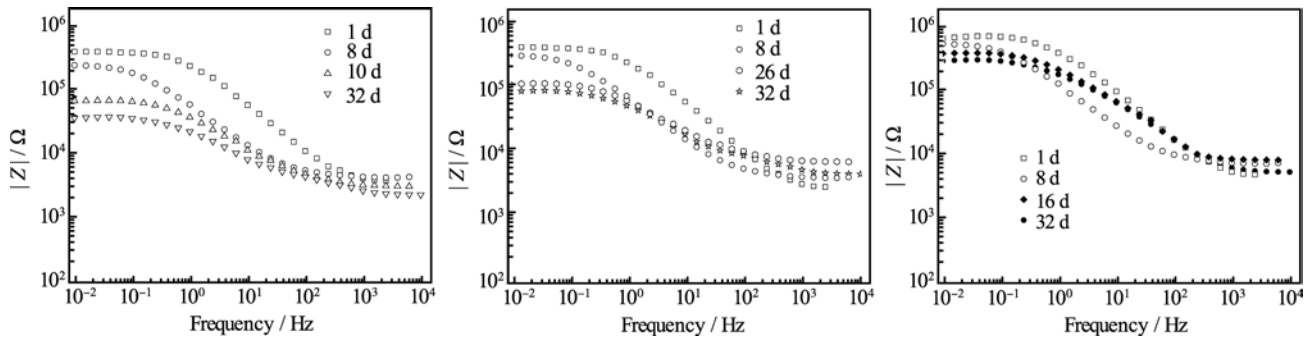


图 4 钢样在三种油脂覆盖下的 Bode 图

Fig.4 Bode curves of the steel samples covered by the three different kinds of grease: a) Lithium-base grease, b) Calcium-base grease, c) Anticorrosion grease

## 2.5 极化电阻

阻抗实验结束后,分别对划线和未划线的油脂样品进行极化电阻测试,结果见表 1。对于同种油脂保护的样品,未划线试样的极化电阻均大于划线试样。这是因为划线以后,钢样裸露,油脂在盐雾实验中破坏较大,保护效果较差。防蚀膏保护样的极化电阻约是钙基脂的 1.5 倍,是锂基脂的 4~9 倍。无论是划线试样,还是未划线试样,三种油脂的极化电阻由大到小均依次是防蚀膏、钙基润滑脂、锂

表 1 涂抹三种油脂实验后的极化电阻

Tab.1 Polarization resistance of steel samples covered with three kinds of grease

Samples	$R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	
	Scratched	No scratched
Lithium base grease	1020	2331
Calcium base grease	6037	7817
Anticorrosion grease	9056	11203

基润滑脂。这说明防蚀膏的成膜效果优于钙基润滑脂和锂基润滑脂。极化电阻实验结果与电化学阻抗

实验结果一致。

## 2.6 极化曲线

从阳极极化曲线(图5)可看出,三种未划痕油脂试样均快速进入了钝化区,证明三种油脂在盐雾实验后均具有一定的保护作用。防蚀膏试样的自腐蚀电位最正,极化电流最小。防蚀膏保护样在钝化区的电流密度约是锂基脂保护样的1/100,是钙基脂保护样的1/10。此外,防蚀膏的阳极极化曲线更容易进入钝化范围,其次为钙基润滑脂和锂基润滑脂。该结果与阻抗及极化电阻的数据相一致。

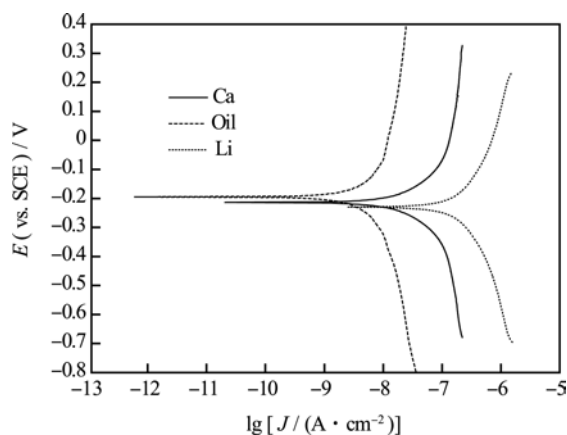


图5 钢样的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of the steel samples

## 3 结论

1) 三种油脂均具有稳定的吸水和疏水特性,但自腐蚀电位的稳定性、阻抗随时间的降低程度、极化电阻、钝化区电流密度、盐雾下的形貌变化则有一定的差别。防蚀膏保护效果最好,钙基润滑脂次之,锂基润滑脂最差。

2) 经过800 h循环浸泡、288 h间歇盐雾后,防蚀膏仍可起到一定的保护作用。这为其在东南沿海实际工程中的应用提供了部分基础数据。

3) 为进一步完善研究,需到现场长期挂片并在现场干湿条件下进行实际实验,以获得更科学的数据。

## 参考文献

[1] 王在峰, 侯保荣, 孙虎元, 等. 护堤钢板阴极保护电场的有限元仿真[J]. 船海工程, 2015, 44(4): 130—134.

WANG Zai-feng, HOU Bao-rong, SUN Hu-yuan, et al. Finite Element Simulation for Cathodic Protection System of Steel Plates Used to Protect Wharfs[J]. Ship & Ocean Engineering, 2015, 44(4): 130—134.

[2] JEFFREY R, MELCHERS R E. Corrosion of Vertical Mild Steel Strips in Seawater[J]. Corrosion Science, 2009, 51(10): 2291—2297.

[3] WANG Xiu-tong, DUAN Ji-zhou, ZHANG Jie, et al. Alloy Elements' Effect on Anti-corrosion Performance of Low Alloy Steels in Different Sea Zones[J]. Materials Letters, 2008, 62(8/9): 1291—1293.

[4] 杨小刚, 贾淑香, 田边弘往, 等. 无溶剂超厚膜环氧涂层海洋腐蚀模拟试验研究[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 76—80.

YANG Xiao-gang, JIA Shu-xiang, TANABE Hiroyuki, et al. Experimental Study on Epoxy Solvent-free Coating in Simulated Marine Corrosion Environment[J]. China Harbour Engineering, 2012(2): 76—80.

[5] 戴永寿. 海洋钢结构物浪溅区和潮差区的腐蚀与防护[J]. 材料保护, 1981(2): 2—14.

DAI Yong-shou. Corrosion and Protection of Marine Steel Structure in Splash and Tidal Zone[J]. Materials Protection, 1981(2): 2—14.

[6] 王焕焕, 杜敏. 海洋飞溅区钢结构的防腐蚀技术[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(5): 483—491.

WANG Huan-huan, DUMin. Corrosion Protection Technology of Steel Structure in Marine Splash Zone[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 483—491.

[7] SMITH M, BOWLEY C, WILLIAMS L. In situ Protection of Splash Zones—30 Years on[J]. Materials Performance, 2002, 41(10): 30—33.

[8] 钢管桩防腐蚀方法研究组. 海洋钢构筑物的防蚀技术[M]. 侯保荣, 译. 北京: 科学出版社, 2010: 218—226.

Anti-corrosion Methods Study Group of Steel Pipe Pile. Anticorrosion Technology for Marine Steel Construction[M]. HOU Bao-rong, Translation. Beijing: Science Press, 2010: 218—226.

[9] 侯保荣. 钢铁设施在海洋浪花飞溅区的腐蚀行为及其新型包覆防护技术[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(4): 174—175.

HOU Bao-rong. Corrosion Behavior and a New Protection Technology of Steel Structures in Splash Zone[J]. Corrosion and Protection, 2007, 28(4): 174—175.

[10] 侯保荣. 海洋钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术[J]. 中国材料进展, 2014, 33(1): 26—31.

HOU Bao-rong. Anti-corrosion Technology to Steel Structure in Splash Zone[J]. Materials China, 2014, 33(1): 26—31.

[11] 大野泰彦, 侯保荣. 钢材的包覆防蚀方法: 中国, 200610084137. 5[P]. 2009-07-31.



- ONO Yasuhiko, HOU Bao-rong. The Method of Coating and Corrosion Protection for Steel: China, ZL200610084137.5[P]. 2009-07-31.
- [12] 大野泰彦, 侯保荣. 一种钢铁设施防腐蚀用保护罩: 中国, z1200620116421. 1[P]. 2007-03-02.
- ONO Yasuhiko, HOU Bao-rong. A Protective Cover for Corrosion Protection of Steel Structures: China, z1200620116421. 1[P]. 2007-03-02.
- [13] 王在峰. 一种海洋平台复杂节点处的防蚀包覆方法: 中国, 201110350174. 7[P]. 2011-11-08.
- WANG Zai-feng. A Corrosion Protection Coating Method for Complex Joints of Offshore Platform: China, 201110350174. 7[P]. 2011-11-08.
- [14] 侯保荣, 杨小刚, 贾淑香. 海洋浪溅区钢结构腐蚀与多层包覆防护实践[J]. 中国港湾建设, 2012(2): 70—72.
- HOU Bao-rong, YANG Xiao-gang, JIA Shu-xiang. Practice of Corrosion Protection and Multi-layer Covering Technology for Steel Structure in Splash Zone[J]. China Harbour Engineering, 2012(2): 70—72.
- [15] POPOV E A. Modified Anticorrosion Composition Based on Gun Grease[J]. Journal of Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2002, 38(4): 257—259.
- [16] 刘建国, 李言涛, 侯保荣. 防锈油脂概述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(5): 372—376.
- LIU Jian-guo, LI Yan-tao, HOU Bao-rong. Summarization of Anti-corrosion Grease[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(5): 372—376.
- [17] QIAN Bei, HOU Bao-rong, ZHENG Meng. The Inhibition Effect of Tannic Acid on Mild Steel Corrosion in Seawater Wet/Dry Cyclic Conditions[J]. Corrosion Science, 2013, 72(7): 1—9.
- [18] 钱备. 钢结构浪溅区腐蚀防护技术及缓蚀剂在干湿交替下的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- QIAN Bei. Corrosion Protection Technology and Corrosion Inhibitor in the Splash Zone of Steel Structures[M]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [19] 刘建国. 海洋浪花飞溅区钢铁腐蚀过程和修复技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- LIU Jian-guo. Study on Corrosion Processes and Repair Technology of Steel in Splash Zone[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [20] 陈君. 低碳钢浪花飞溅区腐蚀和防腐带保护技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- CHEN Jun. Study on Corrosion and Corrosion Protection Technology of Low Carbon Steel Spray Splash Zone[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012.