

感应电流作用下海底电缆铜铠装层腐蚀规律研究

许志军¹, 周自强², 李特², 胡家元², 姜子涛¹, 杜艳霞¹, 张雷¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: **目的** 研究感应电流作用下的海底电缆铜铠装层在模拟海水环境中的腐蚀规律。**方法** 通过浸泡实验, 研究不同感应电流密度下铜铠装层随时间变化的腐蚀速率, 然后通过扫描电镜观察铜铠装腐蚀后表面的形貌, 通过 X-射线衍射分析铜铠装腐蚀后的产物, 最后通过交流阻抗法对腐蚀后铜铠装的表面双电层结构进行研究。**结果** 在模拟海水环境中, 感应电流的存在能够在一定程度上加速铜铠装的腐蚀。随着浸泡时间的延长, 腐蚀速率呈先上升、后下降的趋势, 并逐渐趋于稳定。在峰值情况下, 腐蚀速率提升 4~7 倍; 在稳定阶段, 腐蚀速率提升 3~5 倍。随着感应电流密度的增大, 铜铠装的腐蚀速率逐渐增加, 并与感应电流密度呈非线性关系, 经数据拟合, 腐蚀速率与感应电流密度的 0.5 次方成正比关系。经 X-射线衍射分析可知, 铜铠装在模拟海水中的腐蚀产物主要是 Cu_2O 。**结论** 感应电流引起的腐蚀速率约占其等效直流电流腐蚀速率的 0.16%~2.03%。流经铜铠装上的感应电流大部分通过界面双电层电容的充放电不发生实质的腐蚀反应, 小部分通过极化电阻发生腐蚀反应。

关键词: 海缆; 铜铠装; 感应电流; 交流腐蚀; 海水腐蚀

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)07-0280-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.035

Influence of Induction Current on Corrosion of Copper Armor Layer in Submarine Cable

XU Zhi-jun¹, ZHOU Zi-qiang², LI Te², HU Jia-yuan², JIANG Zi-tao¹, DU Yan-xia¹, ZHANG Lei¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the corrosion trend of copper armor layer of submarine cable under induced current in simulated seawater environment. The corrosion rate of copper armor layer varying with time under different induced current densities was studied by immersion experiments. The surface morphology of copper armor after corrosion was observed by scanning electron microscopy. The products of copper armor after corrosion were analyzed by X-ray diffraction. Finally, the surface double layer structure of copper armor after corrosion was studied by AC impedance method. It can be seen from

收稿日期: 2019-08-13; 修订日期: 2019-11-14

Received: 2019-08-13; Revised: 2019-11-14

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52110417000N)

Fund: State Grid Corporation of China Science and Technology Project (52110417000N)

作者简介: 许志军 (1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为海洋环境和金属腐蚀。

Biography: XU Zhi-jun (1994—), Male, Master, Research focus: marine corrosion and metal protection.

通讯作者: 张雷 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。邮箱: zhanglei@ustb.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Lei (1978—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: corrosion and protection of materials. E-mail: zhanglei@ustb.edu.cn

引文格式: 许志军, 周自强, 李特, 等. 感应电流作用下海底电缆铜铠装层腐蚀规律研究[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 280-286.

XU Zhi-jun, ZHOU Zi-qiang, LI Te, et al. Influence of induction current on corrosion of copper armor layer in submarine cable[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 280-286.

experiments that the existence of induced current could accelerate the corrosion of copper armor to a certain extent in simulated seawater environment. With the prolongation of immersion time, the corrosion rate increased first and then decreased, and gradually tended to be stable. In the peak case, the corrosion rate increased by 4~7 times; and in the stable stage, the corrosion rate increased by 3~5 times. With the increase of induction current density, the corrosion rate of copper armor increased gradually, and had a non-linear relationship with induction current density. By fitting the data, the corrosion rate was proportional to the 0.5 power of induction current density. X-ray diffraction analysis showed that the main corrosion product of copper armor in simulated seawater was Cu₂O. The corrosion rate caused by induction current is about 0.16%~2.03% of the equivalent DC current corrosion rate. The induced current flowing through the copper armor mostly passes through the charging and discharging of the interface electric double layer capacitor, and no substantial corrosion reaction occurs. A small part of the induced current leads to corrosion through polarization resistance.

KEY WORDS: submarine cable; copper armor; induced current; AC corrosion; seawater corrosion

随着经济的发展和电力需求的不断增加,世界各国都在大力发展新能源产业,特别是海洋领域的新能源开发。如海上风机发电、海洋潮汐能、海洋天然气与石油开采等,海底电缆已成为海上与陆地能源联通的主要方式^[1-4]。随着海底电缆的快速发展,各类海缆失效案例日益增多。如美国长岛海缆采用了铝硅镁合金铠装,因铠装受到严重腐蚀而停役^[5]。鲍敏铎^[6]通过对舟山直流输电线铠装故障分析指出,在靠近接地极附近,铠装中存在大量感应电流流出,加快了海缆铠装的腐蚀。某海上风电的海缆铠装钢丝断裂,失效则由于内部 PE 填充层破坏严重所致^[7]。Fujii^[8]研究了电缆铠装发生腐蚀的原因,以及如何通过传感器对电缆上的腐蚀进行监测。相关文献曾研究海水中含有的盐类、溶解氧、海洋生物、腐败的有机物,及海水的温度、流速、pH 值等,对海缆腐蚀失效的影响^[9-12],但未考虑电缆芯芯产生的交变磁场可能引起铠装层产生电磁耦合,形成的感应电流也可能对铠装层产生交流腐蚀的影响^[13]。我国舟山海域某 500 kV 海底电缆采用无氧铜丝作为铠装^[14-17],在高压输电电缆中应用较少,可能产生较明显的感应电流效应,因此有必要明确其对铠装铜丝的腐蚀危害,以保障海缆的安全运行^[14-17]。本文基于舟山 500 kV 海底电缆铠装无氧铜丝的服役工况,通过模拟实验研究感应电流对铠装层腐蚀的影响规律,结合交流阻抗表征腐蚀产物膜的双电层结构,分析交流电流影响铜铠装层腐蚀的机理。

1 实验

实验用无氧铜材料直接取自舟山某实际海底电缆铜铠装层,其化学成分见表 1。

表 1 实验用铜的化学成分
Tab.1 Chemical constituents of copper for experiment

wt%									
Cu	Zn	Mn	Cr	Ni	Sn	Al	Fe	P	Pb
99.96	0.003	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.004	0.020	<0.002	0.002

模拟腐蚀实验试样为铜棒,其尺寸为 $\phi 6\text{ mm}\times 73\text{ mm}$ 。实验前,用水砂纸将试样表面逐级打磨至 1200#,丙酮超声波清洗 10 min,然后用蒸馏水和无水乙醇清洗,干燥后在电子天平上进行称量,备用。将棒状试样上端 20 mm 处表面缠绕上导线,外侧用绝缘胶带粘牢,最外侧用硅胶彻底密封,防止导线与溶液接触。将试样的另一个柱面也使用硅胶封住,最终暴露出的实验表面为圆棒试样的圆柱面,面积为 1000 mm²,然后放入舟山模拟海水溶液中。

实验所用模拟海水溶液根据舟山海水离子成分测试结果配制而成,成分见表 2。

表 2 海水模拟溶液成分
Tab.2 Composition of seawater simulated solution

g/L					
NaCl	KCl	MgCl ₂	CaCl ₂	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃
18.475	0.548	3.579	0.803	3.668	0.236

实验主要研究感应电流密度和持续时间对铜铠装腐蚀的影响规律。目前国内外尚无专门针对铜材料交流腐蚀的标准,本研究中,感应交流电流大小的选取参考 ISO 18086—2015 和 GB/T 50698—2011,选取交流电的频率为 50 Hz,波形为正弦波。考虑到安全因素,海缆铠装层上的感应电流现场实测难以实现,取 4 个典型电流密度:0、10、30、60 A/m²。浸泡实验周期分别为 3、7、14、23、30 d。实验温度为(25±3)℃,实验环境为含氧环境。

每组实验条件设置 3 个平行试样,利用失重法求取三组腐蚀速率的平均值。实验装置如图 1 所示。通过设计外部电路调节滑动变阻器改变电路的电阻,以实现对外部电流的调节;电容 C (1000 μF) 用来隔离辅助电极和工作电极,消除其电位差导致的电偶电流;定值电阻 R (10 Ω) 用来测量电路中的电流,即在实验过程中,用数据记录仪通过监测定值电阻两端电压来计算通过电路中的电流大小;保险丝 FU 起到过载保护作用;工作电极 WE 为海缆铠装层铜丝材试

样; 辅助电极 CE 为混合金属氧化物电极 (MMO)。

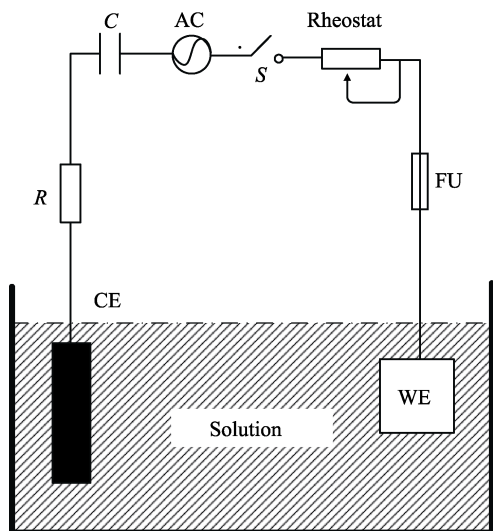


图1 感应电流对铜铠装腐蚀影响规律实验装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental device for the effect of induced current on corrosion of copper armor

实验结束后, 试样表面用除锈液 (54 mL 浓硫酸加蒸馏水配制成的 1000 mL 溶液) [18] 在超声波中清洗, 去除表面腐蚀产物, 然后依次用蒸馏水、无水酒精清洗并烘干。用失重法计算腐蚀速率, 见式 (1):

$$CR_c = \frac{K \times \Delta w}{S \times t \times \rho} \quad (1)$$

式中: CR_c 为试样腐蚀速率, mm/a; $K=8.76 \times 10^4$; Δw 为试样腐蚀质量损失, g; S 为试样表面积, mm^2 ; t 为时间, h; ρ 为密度, 铜的密度为 8.94 g/cm^3 。

采用 Quanta250 型环境扫描电镜 (SEM 和 EDS) 对实验后的表面腐蚀形貌和腐蚀产物进行观察和分析。采用 D8Advance Bruker 型 X 射线衍射仪对实验后的腐蚀产物进行分析, 扫描范围为 $10^\circ \sim 90^\circ$ 。

为了获得腐蚀产物膜的电化学特性, 测试实验结束后试样的交流阻抗, 仪器为 Gamry1000 电化学工作站。Gamry1000 电化学工作站采用标准三电极体系, 辅助电极 (CE) 为铂 (Pt) 电极, 参比电极 (RE) 为 Ag/AgCl 电极 (SSC), 工作电极 (WE) 为海缆铜铠装。测试参数: 首先测量 30 min 的开路电位 (OCP), 待开路电位稳定后再进行交流阻抗测试, 扫描频率范围为 $100 \text{ kHz} \sim 10 \text{ mHz}$, 振幅为 5 mV。

2 结果与讨论

实验结果如图 2a 所示, 感应电流密度的增加显著增大了铜铠装腐蚀速率。腐蚀初期, 各平行样的腐蚀速率值呈现较大分散性, 表明腐蚀体系尚未达到稳

定状态。随着服役时间的延长, 在感应电流影响下, 铜铠装的腐蚀速率在 7 天时达到峰值, 随后下降, 并在 14 天后趋于稳定, 表明环境与铜丝之间的电化学状态已基本稳定, 腐蚀匀速发生。如图 2b 所示, 在峰值情况下, 感应电流使得铜铠装层在海水中的腐蚀速率增大 4~7 倍; 稳定后, 感应电流使铜铠装层腐蚀速率增大 3~5 倍。

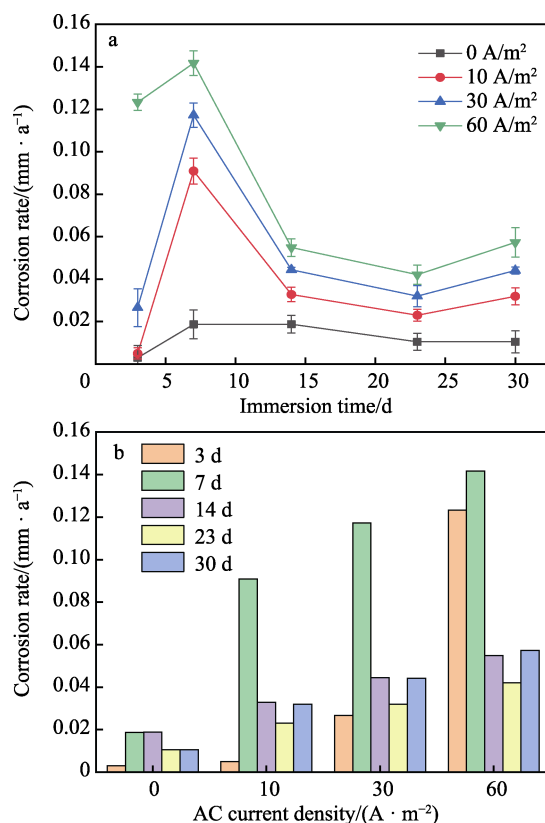


图2 不同感应电流密度下铜铠装腐蚀速率随时间的变化
Fig.2 Corrosion rate under different current densities and time

进一步研究感应电流密度与腐蚀速率的关系, 如图 3 所示。铜铠装层腐蚀随着感应电流密度的增大而增加, 并呈现近似抛物线的非线性规律。在腐蚀初期, 10 A/m^2 的电流可将腐蚀速率提高 4 倍, 但稳定后腐蚀速率提升效果有所下降。随着电流密度的升高, 腐蚀速率提升效果逐渐趋于下降。

可以采用幂函数 ($y = a + b \times x^c$) 对感应电流和腐蚀速率关系进行拟合, 拟合参数见表 3。由表 3 可见, 当实验天数大于 14 天时, 腐蚀速率公式参数差别不大。采用求平均值的方法获得各个参数, 得到腐蚀速率计算公式:

$$CR_c = 0.0133 + 0.005\sqrt{J_{ac}} \quad (2)$$

式中: J_{ac} 为感应电流密度, A/m^2 。

由式 (2) 可知, 感应电流下的铜铠装在模拟海水溶液中的腐蚀速率与感应电流密度的 0.5 次方成正比。

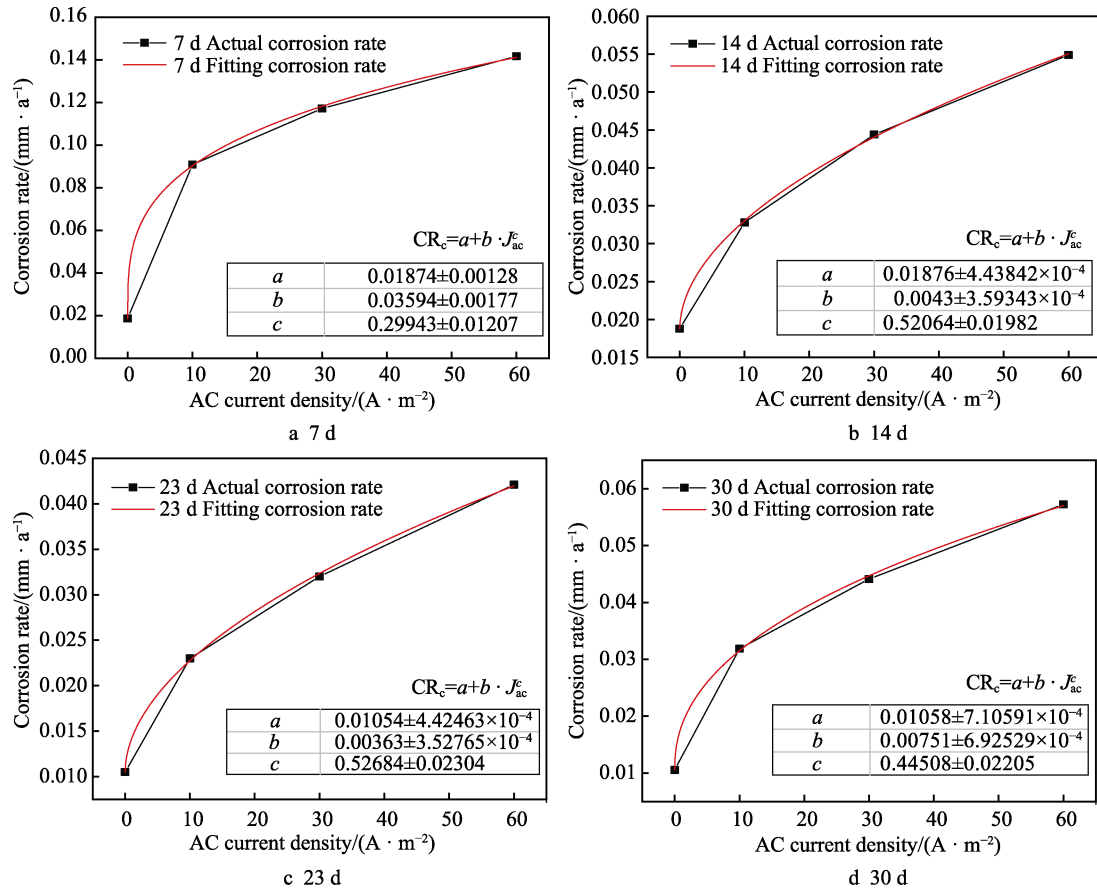


图 3 腐蚀前期与后期的腐蚀速率与电流密度关系

Fig.3 Relationship between corrosion rate and current density in the early and late stages of corrosion

表 3 腐蚀拟合公式参数

Tab.3 Parameters of corrosion fitting formula

Time/d	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
7	0.018 74	0.0359	0.30
14	0.018 76	0.0043	0.52
23	0.010 54	0.0036	0.53
30	0.010 58	0.0075	0.46

为了进一步研究腐蚀后的产物对腐蚀速率的影响,对腐蚀后的试样进行微观形貌观察。不同感应电流密度下,铜铠装在模拟海水中腐蚀后的微观腐蚀形貌如图 4 所示。可以看出,随着浸泡时间的延长,铜铠装的腐蚀产物逐渐增加。当感应电流密度逐渐增加时,腐蚀产物逐渐变得致密,且其腐蚀产物形状不规范,但均匀地密布在铜铠装的基体上。

在得到腐蚀产物表面微观形貌后,为了得知其产物成分,进行了腐蚀产物的 X-射线衍射 (XRD) 分析,其结果如图 5 所示。由图 5 可知,铜在模拟海水溶液中的腐蚀产物主要为 Cu₂O 和 Cu₂Cl(OH)₃。研究发现^[19-21],铜及其合金在海水中发生腐蚀时,由于海水含有氧,铜会发生吸氧腐蚀,在一定条件下,阳极反应生成 Cu₂O 和 Cu₂Cl(OH)₃。内层的 Cu₂O 在铜表面形成较为均匀的保护膜,外层的 Cu₂Cl(OH)₃ 易脱落,在铜表面不均匀分布^[22]。

如图 6 所示^[23-24],当试样两端电压在正半周达到+0.8 V 时,铜铠表面内层会生成 Cu₂O,外层生成 Cu₂Cl(OH)₃。当试样两端电压在负半周达到-0.3 V 时,一部分 Cu₂Cl(OH)₃ 会转化成 Cu₂O。

感应电流对于腐蚀的贡献并不简单符合法拉第定律,可由法拉第定律来计算不同感应电流密度下铠装铜丝在模拟海水环境中的等量直流电流腐蚀速率,见式 (3)。

$$CR_c = \frac{A \times J}{n \times F \times \rho} \times 87\ 600 \tag{3}$$

式中: A 为相对原子质量; J 为电流密度, A/cm²; n 为电化学反应转移电子数; F 为法拉第常数; ρ 为金属密度, g/cm³。

在试样表面通过的感应电流波形为正弦波,在这个波形图中,正半周起主要的腐蚀作用,负半周对基体金属腐蚀的影响较小,可以大致认为正半周电流全部导致金属腐蚀。根据公式 (3) 计算理论上正半周产生 (等量直流电流) 腐蚀速率时,应选取所给感应电流密度数值的 1/2 来进行计算。

铜铠装的等量直流电流腐蚀速率远远大于其实际腐蚀速率,实际腐蚀速率基本上都小于等量直流电流腐蚀速率的 2%,且伴随着电流密度的增加,感应电流腐蚀效率 (即实际腐蚀速率与等量直流电流腐蚀速率之比) 下降^[25-26],见表 4。

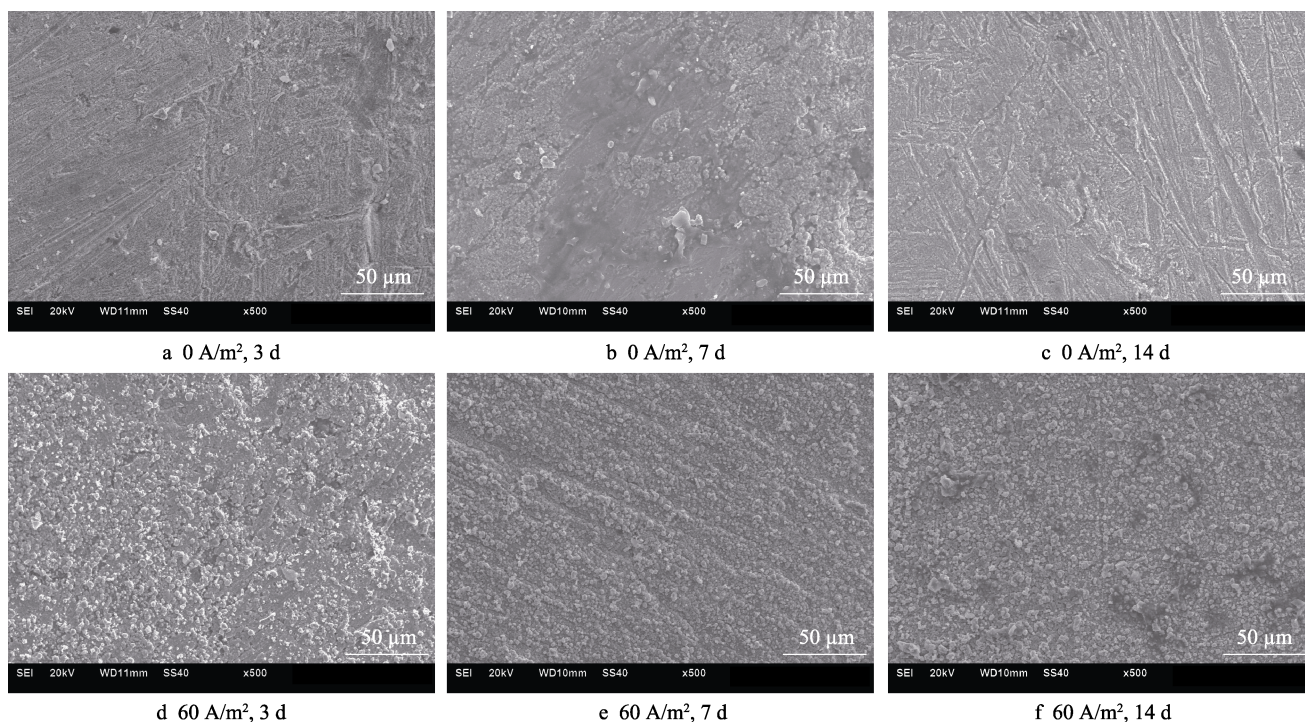


图4 不同感应电流密度和时间下铜铠装的微观腐蚀形貌

Fig.4 Microscopic corrosion morphology of copper armor under different induced current densities and time

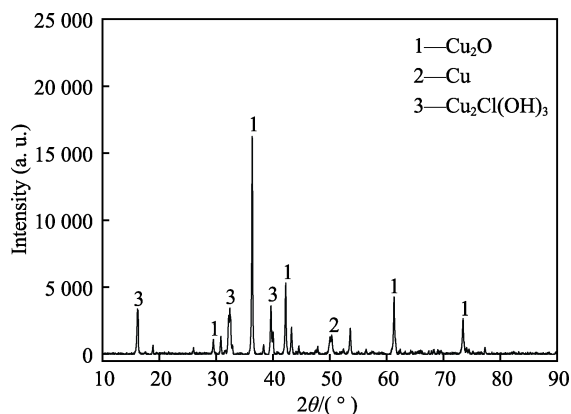


图5 铜铠装腐蚀产物的XRD分析结果

Fig.5 XRD analysis results of corrosion products of copper armor

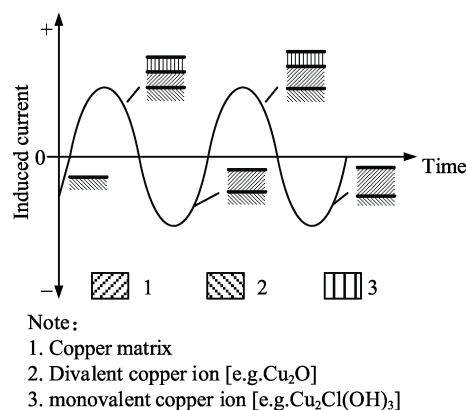


图6 感应电流下铜铠装腐蚀产物转化模式

Fig.6 Conversion mode of corrosion products in copper armor under induced current

表4 铜铠装在不同感应电流密度下的理论/实际腐蚀速率

Tab.4 Theoretical/actual corrosion rate of copper armor under different induced current densities

Induced current density/($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$)	Equivalent DC current corrosion rate/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	Actual corrosion rate/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	(Actual corrosion rate/Equivalent DC current corrosion rate)/%
10	4.49	0.023~0.091	0.51~2.03
30	13.46	0.027~0.12	0.20~0.87
60	21.92	0.042~0.14	0.16~0.53

进一步研究不同感应电流密度下铜铠装腐蚀后的交流阻抗,如图7所示。在3天时,10 A/m^2 的感应电流对腐蚀影响很小,30 A/m^2 以上感应电流的影响逐渐呈现,但铜表面并未形成稳定产物。7天时,

感应电流引起的容抗特征表明此时形成的腐蚀产物不具保护性,对应较大的腐蚀增速。14天以后的稳定期,感应电流作用减弱,形成了较为明显的韦伯阻抗,腐蚀产物趋于稳定。

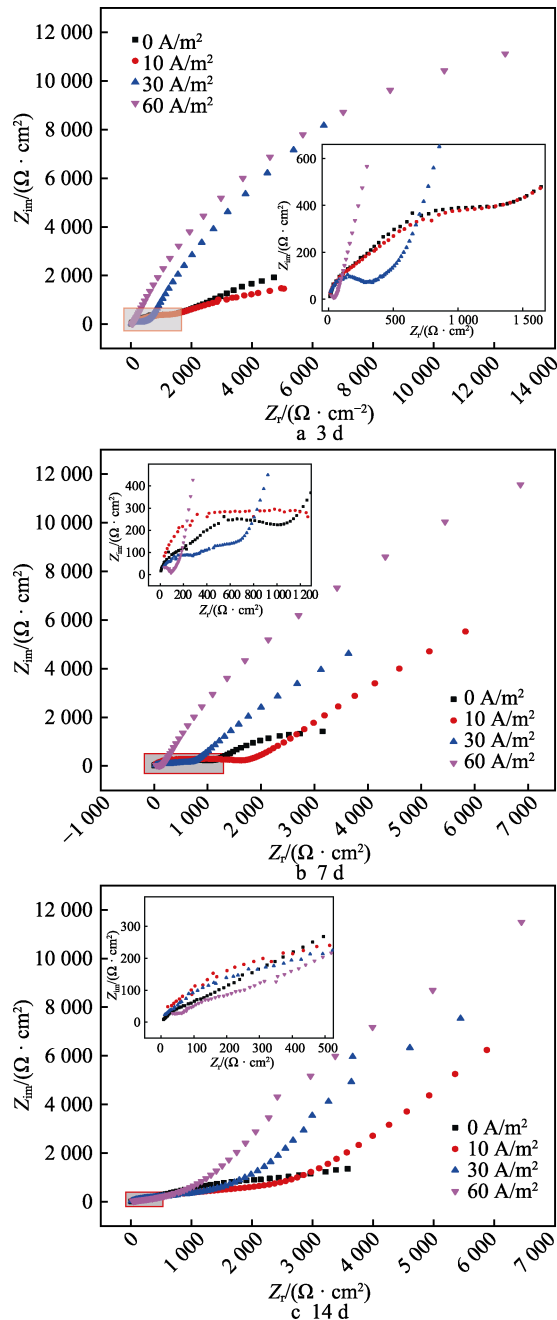


图 7 铜铠装不同时间的 Nyquist 图
Fig.7 Nyquist diagram of copper armor at different time

通过不同感应电流密度下铜铠装在模拟海水溶液中的腐蚀机理和 Nyquist 图，得到图 8 中的等效电路图。其中 3 d-0 A/m²、3 d-10 A/m²、7 d-0 A/m² 的 Nyquist 图的等效电路图如图 8a 所示。3 d-30 A/m²、3 d-60 A/m²、7 d-10 A/m²、7 d-30 A/m²、7 d-60 A/m²、14 d-0 A/m² 的 Nyquist 图的等效电路图如图 8b 所示，而 14 d-10 A/m²、14 d-30 A/m²、14 d-60 A/m² 的 Nyquist 图出现扩散阻抗，其等效电路图如图 8c 所示。其中， R_{ct} 为电荷传质电阻， R_f 为膜电阻， R_s 为溶液电阻， Q_f 和 Q_{dl} 代表常相位角原件（CPE）^[27]。

不同感应电流密度下铜铠装的阻抗拟合参数见表 5。从表 5 中数据可以看出，随着感应电流密度的

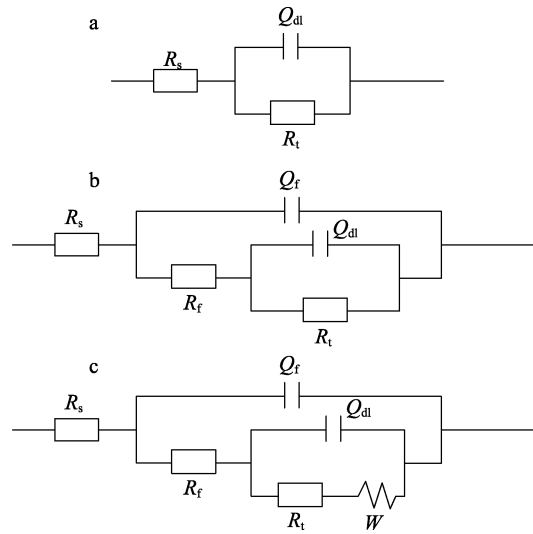


图 8 铜铠装的等效电路
Fig.8 Equivalent circuit of copper armor

表 5 不同感应电流密度下铜铠装的阻抗拟合参数
Tab.5 Impedance fitting parameters of copper armor under different induced current densities

Time/d	$J/(A \cdot m^{-2})$	$R_{ct}/(\Omega \cdot cm^2)$	Q_{dl}	
			$Y/(\times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot s^n)$	n
3	0	1871	0.8088	0.4623
	10	6556	3.950	0.4499
	30	10 920	21.50	0.8815
	60	23 670	4.820	0.8483
7	0	835.9	0.4654	0.5995
	10	589.6	0.306	0.7938
	30	788.6	53.24	1.0000
	60	12 710	2.923	0.6602
14	0	611	4.552	0.3811
	10	1303	0.4223	0.5766
	30	1905	50.31	0.9991
	60	27 040	19.36	1.0000

提高，电荷传质电阻 R_{ct} 基本上呈现一个上升趋势，膜层上得失电子能力逐渐减弱，大量的电子通过界面双电层电容的充放电不发生实质的腐蚀反应，只有小部分通过极化电阻发生腐蚀反应。

3 结论

- 1) 感应电流的存在会有效提高铜铠装在模拟海水溶液中的腐蚀速率，在峰值，较无感应电流状态提高 4~7 倍，在稳定期，较无感应电流状态提高 3~5 倍。感应电流下，铜铠装在模拟海水溶液中的腐蚀产物主要是 Cu₂O。
- 2) 感应电流下，铜铠装在模拟海水溶液中的腐蚀速率会随着感应电流密度的增大而加快，铜铠装的腐蚀速率与感应电流密度的 0.5 次方成正比。

3) 感应电流引起的铜铠装的腐蚀速率增值仅占其等量直流电流腐蚀速率的 0.16%~2.03%。这些电流大部分通过界面双电层电容的充放电不发生实质的腐蚀反应, 小部分通过极化电阻发生腐蚀反应。

参考文献:

- [1] 苑光辉. 高压海底电缆金属护套和铠装层损耗的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
YUAN Guang-hui. The research on loss of metallic sheath and armored layer in high voltage submarine cable[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [2] 王春江. 电线电缆手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WANG Chun-jiang. Wire and cable manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [3] 张效龙, 徐家声. 海缆安全影响因素评述[J]. 海岸工程, 2003(2): 1-7.
ZHANG Xiao-long, XU Jia-sheng. A survey of the factors affecting submarine cable safety[J]. Coastal engineering, 2003(2): 1-7.
- [4] 杜伯学, 马宗乐, 霍振星, 等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 100-104.
DU Bo-xue, MA Zong-le, HUO Zhen-xing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High voltage apparatus, 2010, 46(7): 100-104.
- [5] 龚永超, 何旭涛, 孙建生, 等. 高压海底电力电缆铠装的设计和选型[J]. 电线电缆, 2011(5): 19-22.
GONG Yong-chao, HE Xu-tao, SUN Jian-sheng, et al. The design and selection of high-voltage submarine power cable armor[J]. Electric wire cable, 2011(5): 19-22.
- [6] 鲍敏铎. 舟山直流输电海缆铠装电腐蚀故障分析[J]. 浙江电力, 1997(3): 1-4.
BAO Min-ze. Fault analysis of armoured electric corrosion of Zhoushan HVDC submarine cable[J]. Zhejiang electric power, 1997(3): 1-4.
- [7] 李越, 汪永俭. 一起 220 kV 海缆敷设故障抢修案例分析[J]. 科技视界, 2018, 249(27): 48-50.
LI Yue, WANG Yong-jian. Case analysis on rush maintenance for a fault caused by installation of 220 kV submarine cable[J]. Science and technology vision, 2018, 249(27): 48-50.
- [8] FUJII M, UEMATSU T, NAGANO I, et al. Steel armor corrosion of submarine cable[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1980(2): 597-604.
- [9] 鞠虹, 王君, 唐晓, 等. 油气集输管道在海洋环境中的腐蚀与防护[J]. 石油化工设备, 2010, 39(5): 41-48.
JU Hong, WANG Jun, TANG Xiao, et al. Corrosion and preventive measures research of oil and gas gathering and transportation pipelines in ocean environment[J]. Petrochemical equipment, 2010, 39(5): 41-48.
- [10] FERREIRA J P, RODRIGUES J A, FONSECA I T E. Copper corrosion in buffered and non-buffered synthetic seawater: a comparative study[J]. Journal of solid state electrochemistry, 2004, 8(4): 260-271.
- [11] REDA M R, AL-HAJJI J N. Effect of trace organic compounds on the corrosion of copper/nickel alloys in sulfide polluted seawater[J]. Industrial & engineering chemistry research, 1993, 32(5): 960-965.
- [12] CHERN C, TUDOR W. OTEC submarine cable environmental characteristics and hazards analysis[C]// IEEE Oceans 82. Washington, DC: IEEE, 1982.
- [13] BAE J H, HA T H, LEE H G, et al. A study on the effects of AC corrosion on underground gas pipeline running parallel with high power cables (case II)[J]. Transaction of the Korean Institute of electrical engineers C, 2002, 51c: 74-79.
- [14] ALLAN P G. Selecting appropriate cable burial depths-A methodology[C]// Conference Proceedings of IBC Submarine Communication 1999. Cannes: Submarine cable Improvement Group, 1999.
- [15] 侯伟芬, 俞成根, 陈小庆. 舟山渔场的水温分布特征分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2013(3): 31-34.
HOU Wei-fen, YU Cheng-gen, CHEN Xiao-qing. Temperature distribution in Zhoushan fishing ground[J]. Journal of Ningbo University (NSEE), 2013(3): 31-34.
- [16] ALLAN P G, COMRIE R J. The selecting of appropriate burial tools and burial depths[C]// Suboptic 2001. Kyoto: Submarine Cable Improvement Group, 2001: 1-8.
- [17] 赵月红, 林乐耘, 崔大为. 铜及铜合金在我国实海海域暴露 16 年局部腐蚀规律[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(5): 266-271.
ZHAO Yue-hong, LIN Le-yun, CUI Da-wei. Localized corrosion of copper and its alloys in seawater at four test sites along China coast for 16 years[J]. Corrosion science and protection technology, 2003, 15(5): 266-271.
- [18] GB/T 16545—2015, 金属和合金的腐蚀-腐蚀试样上腐蚀产物的清除[S].
GB/T 16545—2015, Corrosion of metals and alloys removal of corrosion products from corrosion test specimens[S].
- [19] 赵楠, 罗兵辉, 柏振海. 铜合金在海水中的腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2003, 36(3): 21-23.
ZHAO Nan, LUO Bing-hui, BAI Zhen-hai. Corrosion behavior of copper alloy in seawater[J]. Materials protection, 2003, 36(3): 21-23.
- [20] 张燕涛, 房本岭, 丁德, 等. 含水量与直流干扰电流密度对紫铜在宝鸡土壤中初期腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 131-137.
ZHANG Yan-tao, FANG Ben-ling, DING De, et al. Effects of soil water content and DC current density on initial corrosion behavior of Cu in Baoji soil[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 131-137.
- [21] 王竹, 祝郅伟, 张娣, 等. 细菌对海底电缆铜铠装层腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2019, 52(9): 100-105.
WANG Zhu, ZHU Li-wei, ZHANG Di, et al. Influences of bacterium on the corrosion behaviors of submarine cable with armored copper clad layer in seawater/sea mud[J]. Materials protection, 2019, 52(9): 100-105.
- [22] MILOŠEV I. Breakdown of passive film on copper in bicarbonate solutions containing sulfate ions[J]. Journal of the electrochemical society, 1992, 139(9): 2409-2418.
- [23] ISO 18086—2015, Corrosion of metals and alloys—determination of AC corrosion—Protection criteria[S].
- [24] PHILIPPE M, FLORIAN M. Analytical methods in corrosion science and engineering[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [25] GOIDANICH S, LAZZARI L, ORMELLESE M. AC corrosion part 1: Effects on overpotentials of anodic and cathodic processes[J]. Corrosion science, 2010, 52(2): 491-497.
- [26] GOIDANICH S, LAZZARI L, ORMELLESE M. AC corrosion part 2: Parameters influencing corrosion rate[J]. Corrosion science, 2010, 52(3): 916-922.
- [27] 郑思思. 紫铜腐蚀机理和盐酸溶液中多潘立酮对紫铜缓蚀性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHENG Si-si. Study on mechanism of copper corrosion and inhibition effect of domperidone on copper in hydrochloric acid[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.