

湿热海洋环境下接插件带电腐蚀行为研究

吕旺燕¹, 黄建业², 阮红梅², 陈川², 陈天生¹

(1. 广东电网有限责任公司 电力科学研究院, 广州 510080;

2. 中国电器科学研究院有限公司 工业产品环境适应性国家重点实验室, 广州 510080)

摘要: **目的** 针对湿热海洋环境下接插件带电腐蚀行为进行研究, 为接插件材料的选材设计、维护和更换等提供科学依据。**方法** 采用温湿度记录仪以及无氧铜测试片等对三亚自然环境试验站的腐蚀环境进行监测, 分析环境条件的变化规律, 同时通过湿热海洋自然环境暴露试验对电路板贴片式和插针式接插件的带电和不带电的腐蚀行为进行研究, 分析接插件在两种工况下的腐蚀行为规律及差异。**结果** 三亚湿热海洋大气环境 1—3 月份呈干湿交替循环, 每天至少发生 1 次循环, 每天平均潮湿时间分别为 6.0, 7.4, 11.6 h。1—3 月份的环境腐蚀性均为 GX 级, 其中 3 月份腐蚀环境较 1 月 2 月更加严酷。贴片式数据通信接插件在带电和不带电工况下湿热海洋环境自然暴露 3 个月后, 腐蚀行为基本相似, 无明显差异, 接触电阻没有发生变化, 绝缘电阻均降为 $10^7 \Omega$, 金属元器件均未发生明显腐蚀。插针式接线端子在带电和不带电工况下湿热海洋环境自然暴露 3 个月后, 接触电阻未发生变化, 但腐蚀行为存在明显差异, 在不通电流工况下, 螺钉发生严重腐蚀, 绝缘电阻下降为 $10^6 \Omega$, 而在 3 A 电流通电工况下, 螺钉未发生腐蚀, 绝缘电阻均大于 $10^9 \Omega$ 。**结论** 湿热海洋环境下电流对不同接插件腐蚀行为影响存在差异, 对贴片式数据通信接插件腐蚀行为基本不影响, 对插针式接线端子腐蚀行为存在一定的保护作用。

关键词: 湿热海洋环境; 接插件; 无氧铜测试片; 腐蚀行为; 自然暴露试验

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.02.020

中图分类号: TG07; TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)02-0102-08

Corrosion Behavior of Charged Connectors in Wet and Heat Marine Environment

LYU Wang-yan¹, HUANG Jian-ye², RUAN Hong-mei², CHEN Chuan², CHEN Tian-sheng¹

(1. Electric Power Research Institute, Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd, Guangzhou 510080, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, China National Electric Apparatus Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

ABSTRACT: Objective To research corrosion behavior of charged connectors in wet and heat marine environment to provide scientific evidence for the material selection, maintenance and replacement of connectors. **Methods** Temperature and humidity recorder and anaerobic copper test films were applied to monitor the corrosion environment of Sanya natural environment test station to analyze the law of change of environmental conditions. At the same time, the corrosion behaviors of the electrically charged and uncharged PCB patch and pin connector were researched by exposing test in wet and hot Marine natural environment. The corrosion behavior rule and the difference of connectors between the two working conditions were analyzed. **Results** From January to march, the humid and hot ocean atmosphere in Sanya was alternately wet and dry. The cycle was at least one cycle per day. The average humidity time each day was 6.0 h, 7.4 h and 11.6 h respectively. From January to march, the envi-

收稿日期: 2017-09-30; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 中国南方电网有限责任公司重点科技项目 (GDKJQQ20152045)

作者简介: 吕旺燕 (1984—), 女, 湖北鄂州人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

ronmental causticity was GX level. In March, the corrosive environment was more severe than January and February. After three months of natural exposure in wet and heat marine environment, the corrosion behavior of the electrically charged and uncharged patch type data communication connector on the was basically similar, there is no obvious difference. The contact resistance did not change. The Insulation resistance was reduced to $10^7 \Omega$. There was no obvious corrosion occurred in metal components. After three months of natural exposure in wet and heat marine environment, the contact resistance of insert pin type terminal did not change. However, there were obvious differences in corrosion behavior. Under the uncharged conditions, the screws of insert pin type terminal were severely corroded. The insulation resistance of insert pin type terminal was reduced to $10^6 \Omega$ orders of magnitude. However, there was no corrosion of screws under the charged working condition. The insulation resistance was maintained in $10^9 \Omega$ orders of magnitude. **Conclusion** In the wet and hot ocean environment, there were differences in the effect of current on corrosion behavior of different connectors. For patch type data communication connectors, the corrosion behavior is almost not affected. However, it protects corrosion behavior of pin terminal to a certain extent.

KEY WORDS: wet and heat marine environment; connectors; anaerobic copper test tablets; corrosion behavior; natural exposure test

湿热海洋环境最大的特点就是高温、高湿、高盐雾，电器设备长期处于这种恶劣大气环境当中，如果防护措施不到位就会造成电器设备内部元器件的快速污染、腐蚀，进而使这些元器件的品质快速下降，大大缩短其使用寿命，严重威胁到电器设施的安全运行^[1-4]。电路板接插件是电器设备中重要的元器件之一，分布于各个系统和部位，担负着电能传输、信号控制与传递任务^[5-6]。任何一个接插件故障都可能导致整个电路或某一控制设备无法正常工作或停役。因此非常有必要对接插件的腐蚀行为进行研究，进而提出有针对性的防护措施。

目前国内外对于接插件腐蚀行为的研究尚采用传统的大气腐蚀研究方法和思维模式^[7-9]，未考虑流通电流对于接插件腐蚀的影响。事实上，电流对接插件材料腐蚀的影响相对于其他因素复杂得多。因此，需结合空气温度、湿度等腐蚀环境因素有针对性地研究电流对接插件腐蚀行为的影响，揭示电流与腐蚀环境因素对接插件材料腐蚀行为影响的交互作用，才能真实反映出湿热海洋环境下接插件的腐蚀行为特征

及失效机制，正确评估接插件材料的腐蚀状态，从而有效指导接插件材料的设计、维护和更换。

文中将通过调查与采集电路板接插件在我国典型的湿热海洋大气环境中服役时的温度、湿度、海洋粒子沉降量等环境条件数据，分析服役环境的变化规律，并利用无氧铜标准测试片检测评价服役环境的腐蚀性。同时开展电路板接插件在湿热海洋大气环境下带电工况和不带电工况试验，通过检测外观、接触电阻、绝缘电阻，分析接插件在两种工况下的腐蚀行为规律及差异，并分析影响电路板接插件腐蚀的关键环境因素，从而为接插件材料的选材设计、维护和更换提供科学依据。

1 试验

1.1 试验样品

将插针式的接线端子和贴片式的数据通信接插件焊接在 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的电路板上，形成电路板接插件样品，如图 1 所示。贴片式数据通信接插件为铜

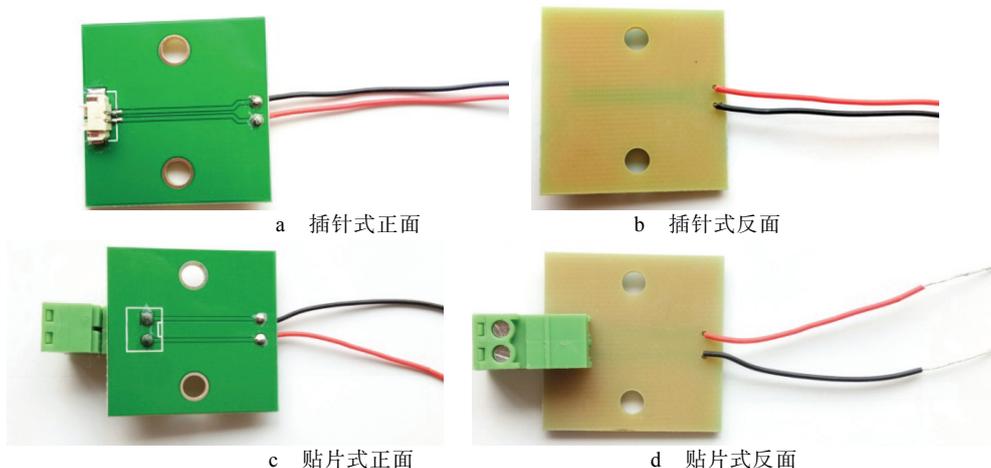


图 1 电路板接插件样品

镀锡材质,插针式接线端子的螺钉为钢,其他为铜镀锡材质。电路板采用FR-4环氧树脂,厚1.6 mm,单面印刷,采用无铅焊锡。

1.2 试验方法

1.2.1 海南三亚试验站自然环境条件监测

采用HMP155温度相对湿度传感器对海南三亚试验站温湿度条件进行连续收集,并统计平均值、最高值、最低值以及潮湿时间等。采用滤膜法采集海盐粒子沉降量,同时采用标准无氧铜测试片对海南三亚试验站1—3月大气腐蚀等级进行评价,将标准无氧

铜测试片挂于三亚试验站三楼,避免雨水和阳光照射。每个月取样并利用电解还原法测试分析环境的腐蚀等级。

1.2.2 接插件自然环境暴露试验

三亚试验站为典型的湿热海洋大气环境,将插针式和贴片式两种电路板接插件样品投放到三亚试验站进行棚下自然加速试验,避免雨水和阳光照射。其中一组样品通3 A电流,另一组样品不通电流,如图2所示。试验时间为2017年1—3月,样品每月月末取样一次,一次取样6片,并检查外观,测试接触电阻和绝缘电阻。

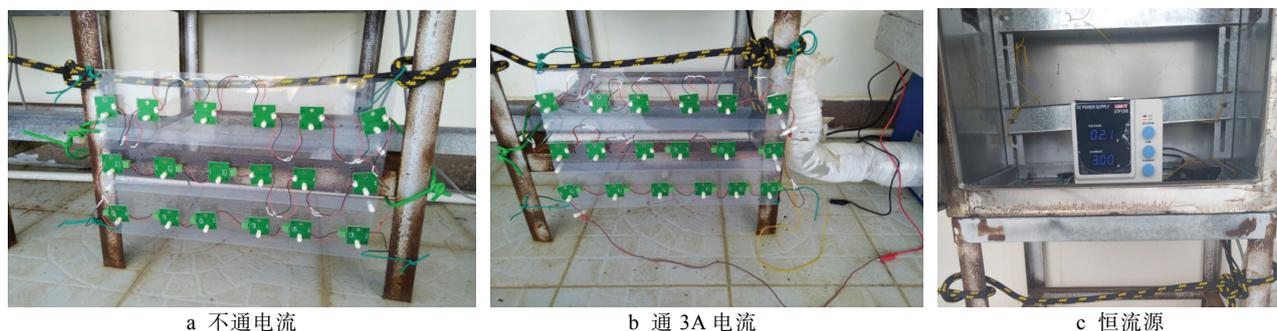


图2 三亚现场自然环境暴露试验

1.2.3 电路板接插件电性能测试

采用YD2512直流低电阻测试仪对电路板接插件的接触电阻进行测试,测试电流为直流50 mA,采用ZC-90A绝缘电阻测试仪对电路板接插件的绝缘电阻进行测试,测试电压为500 V,保持时间为1 min。电路板接插件进行接触电阻和绝缘电阻测试前,先将样品放在温度为 (35 ± 5) °C的空气循环烘箱中处理2 h。

1.2.4 铜电解还原测试方法

采用CS350电化学工作站电解还原法对铜测试片表面的腐蚀产物分析,具体方法参考ANSI/ISA-71.04 2013,其中铜测试片电解还原电解池如图3所示。



图3 铜测试片电解还原电解池

2 结果与讨论

2.1 湿热海洋大气自然环境条件分析

通过温湿度记录仪采集了三亚试验站2017年1—3月的温湿度数据,并统计了每天的潮湿时间(相对湿度 $>80\%$)。其中1月份的平均温度为23.80 °C、平均相对湿度为72.79%,平均潮湿时间为6.0 h;2月份的平均温度为22.86 °C、平均相对湿度为74.72%,平均潮湿时间为7.4 h;3月份的平均温度为25.25 °C、平均相对湿度为77.99%,平均潮湿时间为11.6 h。由此可以看出,1—3月的温度、相对湿度和潮湿时间呈上升趋势,其中3月的潮湿时间上升的幅度较大,约是1月的2倍。1—3月的最高温度均 >30 °C,最大相对湿度均 $>95\%$ 。

三亚试验站2017年1—3月的温湿度瞬时变化如图4—6所示,可以看出,温度和相对湿度均呈周期性变化。三亚试验站海洋大气环境呈干湿交替循环,每天干湿交替循环至少1次,平均潮湿时间约8 h,由此说明电路板接插件在海南三亚进行棚下自然暴露试验时,电路板每天面临干湿交替湿热海洋性环境气候,且湿热腐蚀环境每天长达8 h以上,也就意味着电路板接插件长期暴露于严酷的环境下,极易容易导致电路板接插件腐蚀失效,进而产生更大的影响^[5]。

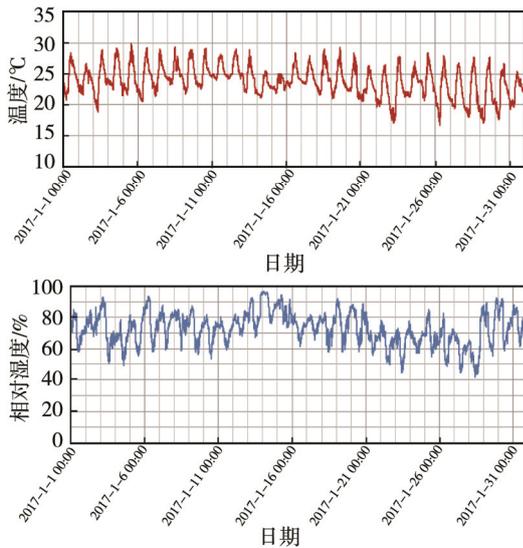


图 4 1 月份温度和湿度的瞬时变化

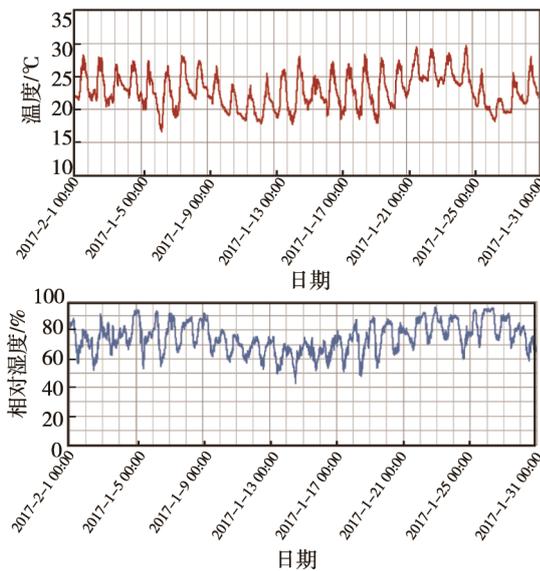


图 5 2 月份温度和湿度的瞬时变化

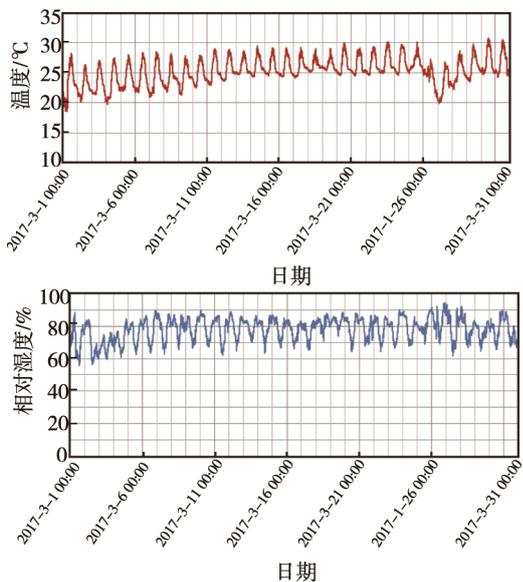


图 6 3 月份温度和湿度的瞬时变化

通过海盐粒子滤膜采集了海盐粒子沉降量数据，三亚试验站 2017 年 1—3 月的海盐粒子沉降量逐渐增大，分别为 0.995, 1.013, 1.118 mg/(100 cm²·d)。氯离子浓度越高，腐蚀性越强，因为氯离子半径小，穿透力强。当氯离子吸附在金属表面上时，会从金属表面薄弱部位进入钝化膜，使钝化膜发生局部破坏，然后对基体产生腐蚀^[10]。三亚地区氯离子浓度较高，对电路板接插件的腐蚀较为严重。

图 7 为无氧铜测试片在海南三亚自然暴露 1~3 个月时间的外观形貌，可以看到，1, 2 月份形成的腐蚀产物膜相近，均呈棕色，这可能是由于 1, 2 月份的环境条件相近。3 月份的温度、相对湿度和潮湿时间均高于 1, 2 月份，形成的腐蚀产物膜呈黑褐色。

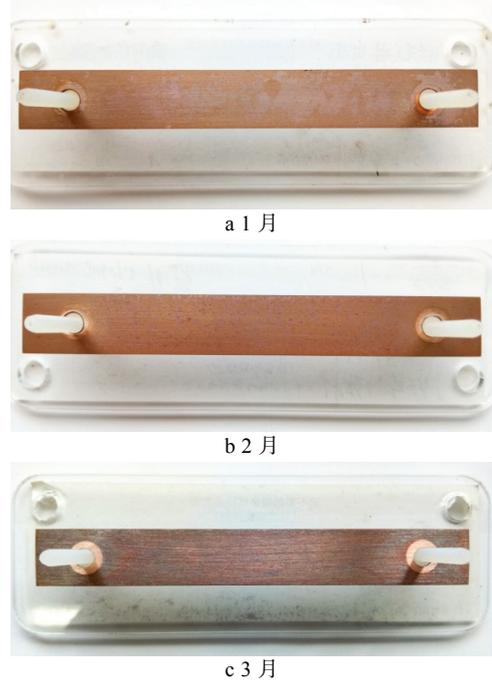


图 7 1—3 月份无氧铜测试片外观形貌

图 8 给出了 1—3 月份铜测试片的电解还原曲线，参考 ANSI/ISA-71.04 2013 对其进行分析，并依据该标准对海南三亚 1—3 月的环境腐蚀等级进行评定。测试结果显示，1 月份的腐蚀产物只有 CuO，而 2, 3 月份的腐蚀产物为 Cu₂O 和 CuO^[11]，各种腐蚀产物的

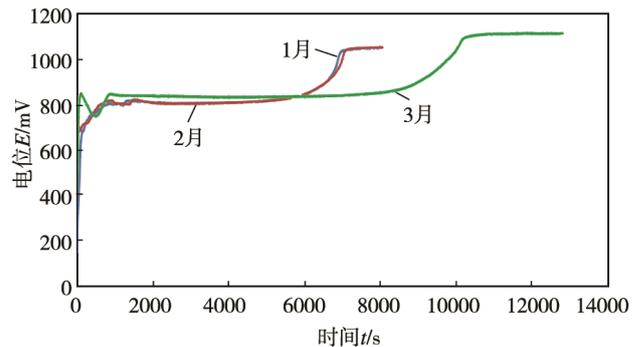


图 8 1—3 月份无氧铜测试片还原曲线

厚度列于表 1。1, 2 月份的腐蚀程度分别为 0.2190, 0.2372 $\mu\text{m}/\text{月}$, 而 3 月份的腐蚀程度为 0.3451 $\mu\text{m}/\text{月}$ 。三亚 1—3 月海洋大气环境的腐蚀等级均为 GX, 但 3 月份比 1, 2 月份要更严酷。

综合温度、相对湿度、潮湿时间、海盐粒子沉降量和腐蚀程度测试分析数据, 列于表 2。1—3 月份的温度、平均相对湿度、海盐粒子沉降量相差不大。当

潮湿时间相近时, 如 1, 2 月份, 环境的腐蚀性也相近。当潮湿时间显著增大时, 如 3 月份约是 1 月份的 2 倍, 环境腐蚀性显著增大。这可能是因为潮湿环境下, 海盐粒子将在材料表面形成带一定浓度盐溶液的薄液膜, 该薄液膜将与材料发生反应, 使得材料发生腐蚀失效^[7]。

表 1 1—3 月份的环境腐蚀等级

月份	Cu_2O		CuO		腐蚀程度/ ($\mu\text{m}\cdot\text{月}^{-1}$)	环境等级
	还原时间/s	厚度/ μm	还原时间/s	厚度/ μm		
1	—	—	6800	0.2190	0.2190	GX
2	400	0.0247	6600	0.2125	0.2372	GX
3	780	0.0482	9220	0.2969	0.3451	GX

表 2 腐蚀程度与环境因素的关系

月份	潮湿时间			平均温度 / $^{\circ}\text{C}$	平均湿度 /%	海盐粒子沉降量/ ($\text{mg}\cdot 100\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	腐蚀程度/ ($10^{-10}\text{m}\cdot\text{月}^{-1}$)
	总时间/h	平均时间/h	百分比/%				
1	185.8	6.0	25.0	23.80	72.79	0.995	2190
2	207.2	7.4	30.8	22.86	74.72	1.013	2372
3	360.8	11.6	48.3	25.25	77.99	1.118	3451

2.2 湿热海洋环境下接插件腐蚀行为分析

两组接插件样品开展棚下自然暴露试验 1~3 个月后外观形貌如图 9 所示, 贴片式数据通信接插件在通 3 A 电流和不通电流两种工况下试验 1 个月后, 外观无明显变化; 试验 2 个月后, 焊接位置附近出现白膜, 白膜可能是焊锡膏老化形成的^[12-13], 金属没有明显腐蚀; 试验 3 个月后, 焊接位置附近仍然有白膜, 金属仍没有明显腐蚀。贴片式数据通信接插件暴露于严酷的湿热海洋环境下长达 3 个月之久, 金属部件没有发生腐蚀, 可能是影响较小, 从表观形貌上无法分辨, 也可能是因为该类贴片式数据通信接插件本身材料的耐腐蚀性能较为优异^[14]。

插针式接线端子在通 3 A 电流的工况下试验 1 个月后, 外观无明显变化; 试验 2 个月后, 焊接位置附近出现白膜, 金属没有明显腐蚀; 试验 3 个月后, 金属仍没有明显腐蚀, 可能是影响较小, 从表观形貌上无法分辨。在不通电流工况下试验 1 个月后, 外观无明显变化; 试验 2 个月后, 焊接位置附近出现白膜, 金属螺钉发生轻微腐蚀; 试验 3 个月后, 金属螺钉严重腐蚀, 这可能是电流对插针式接线端子螺钉等起到一定的保护作用, 反而抑制了腐蚀的发生。

表 3 列出了贴片式试验前后的接触电阻和绝缘

电阻。贴片式接插件在通 3 A 电流和不通电流两种工况下的接触电阻试验前后基本没有明显变化, 贴片式接插件的绝缘电阻在两种工况下试验 1 个月后, 均下降到 $10^7\Omega$ 数量级, 试验 2 个月和 3 个月后, 绝缘电阻仍然维持为 $10^7\Omega$ 数量级。贴片式数据通信接插件在通 3 A 电流和不通电流两种工况下的腐蚀行为基本没有差异, 试验 1~3 个月后, 铜镀锡金属没有明显腐蚀, 带电和不带电两种工况下腐蚀行为基本一致, 带电对贴片式接插件腐蚀行为没有多大影响。

表 4 列出了插针式接插件试验前后的接触电阻和绝缘电阻。插针式接插件在通 3 A 电流和不通电流两种工况下的接触电阻试验前后基本没有明显变化。插针式接插件在通 3 A 电流的工况下试验 1~3 个月, 绝缘电阻均保持在 $10^{11}\Omega$ 数量级; 在不通电流工况下试验 1~3 个月, 绝缘电阻逐渐下降, 分别为 10^{11} , 10^9 , $10^6\Omega$ 数量级。插针式接线端子在通 3 A 电流和不通电流两种工况下的腐蚀行为存在明显差异, 在通 3 A 电流工况下试验 1~3 个月后, 接线端子没有明显腐蚀。在不通电流工况下试验 1 个月后, 接线端子没有明显腐蚀; 试验 2 个月后, 螺钉发生轻微腐蚀; 试验 3 个月后, 螺钉发生严重腐蚀。由此可见, 对于插针式接线端子来说, 通 3 A 电流能起到一定的防护作用, 而对于贴片式数据通信接插件, 通 3 A 电流并没有产生明显的影响^[15]。

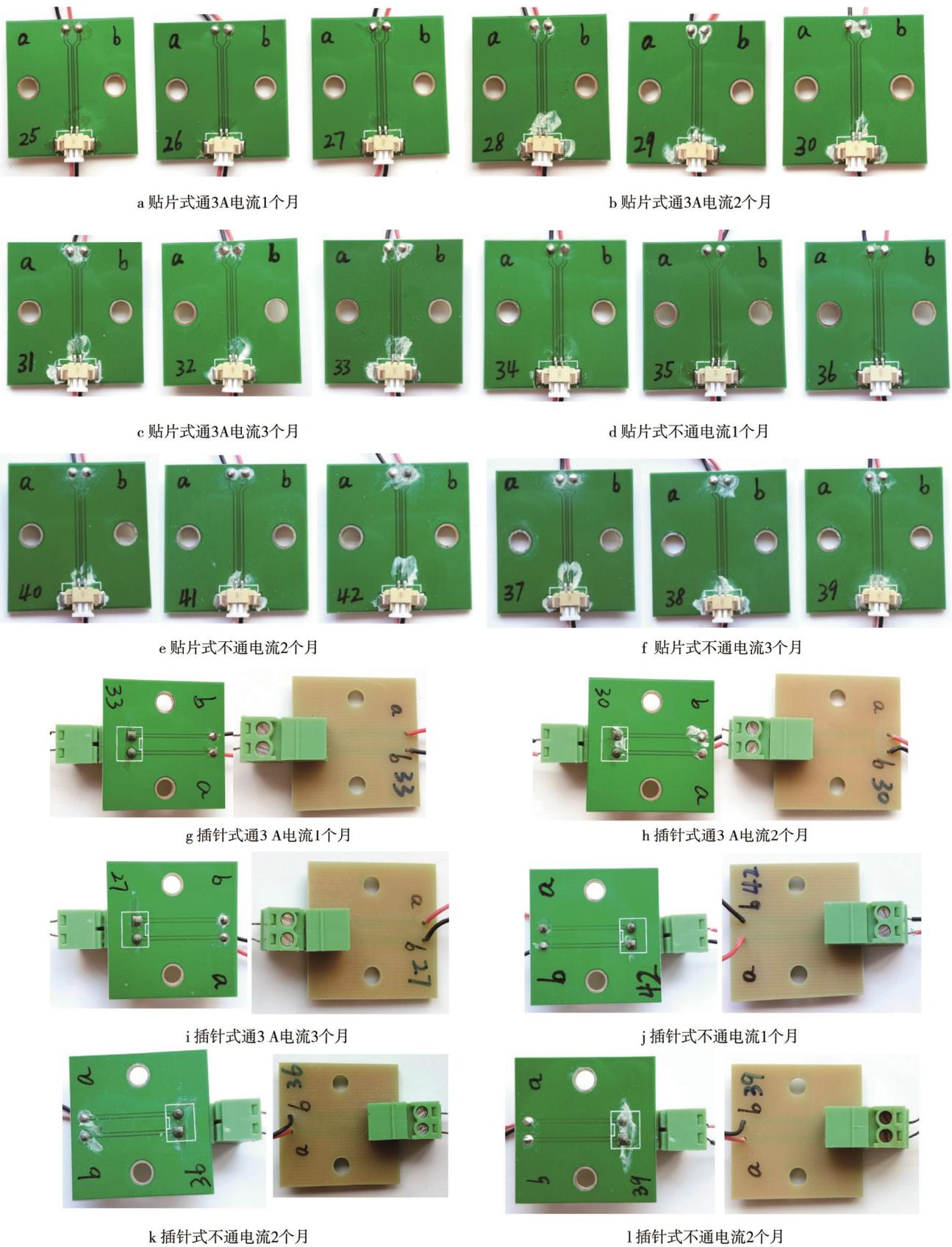


图 9 三亚自然环境暴露试验后接插件的外观

表3 三亚自然环境暴露试验前后贴片式接插件的接触电阻和绝缘电阻

工况	试验时间/月	编号	接触电阻/mΩ				绝缘电阻/Ω	
			试验前		试验后		试验前	试验后
			线路 a	线路 b	线路 a	线路 b		
通 3 A 电流	1	25	76.9	74.0	73.2	71.1	1.00E+11	3.71E+07
		26	67.9	68.2	70.5	66.7	3.69E+11	3.65E+07
		27	66.9	70.8	95.3	65.8	4.34E+11	3.19E+07
	2	28	72.0	68.1	105.7	73.2	4.28E+11	2.85E+07
		29	65.6	66.2	77.8	68.1	3.80E+11	2.11E+07
		30	72.3	68.9	70.2	80.7	4.48E+11	3.55E+07
	3	31	70.0	68.3	68.2	70.5	3.61E+11	1.03E+07
		32	67.9	65.4	75.8	68.3	4.51E+11	2.88E+07
		33	61.8	65.0	60.7	63.8	5.45E+11	1.75E+07
不通电流	1	34	67.5	65.0	66.3	67.2	1.60E+11	3.44E+07
		35	74.9	74.0	77.2	72.3	4.62E+11	2.74E+07
		36	75.2	71.8	79.0	73.2	1.24E+11	2.88E+07
	2	40	76.6	74.4	70.1	78.2	3.79E+11	3.08E+07
		41	70.9	69.8	68.1	71.3	5.36E+11	2.11E+07
		42	59.0	50.4	61.2	51.0	5.09E+11	5.72E+07
	3	37	65.8	66.3	67.3	65.3	4.47E+11	1.58E+07
		38	75.6	73.2	73.2	77.8	7.30E+10	4.73E+07
		39	70.4	70.2	71.5	75.6	5.07E+11	2.96E+07

表4 三亚自然环境暴露试验前后插针式接插件接触电阻和绝缘电阻

工况	试验时间/月	编号	接触电阻/mΩ				绝缘电阻/Ω	
			试验前		试验后		试验前	试验后
			线路 a	线路 b	线路 a	线路 b		
通 3 A 电流	1	31	51.6	48.1	52.8	46.7	4.91E+12	1.56E+11
		32	49.3	49.6	44.2	41.8	3.81E+12	2.86E+11
		33	47.0	46.8	49.3	52.1	3.36E+12	1.80E+11
	2	28	47.8	47.6	46.3	40.2	1.90E+12	5.18E+11
		29	46.7	45.5	44.3	48.7	3.98E+12	1.13E+11
		30	47.0	46.8	41.3	44.8	6.72E+12	4.27E+11
	3	25	47.2	53.8	43.2	50.2	3.20E+12	3.21E+11
		26	46.2	45.3	44.8	46.5	4.78E+12	2.58E+11
		27	47.0	48.1	50.2	47.2	1.07E+12	4.88E+11
不通 电流	1	40	45.0	43.7	48.6	40.9	1.32E+12	1.77E+11
		41	48.0	49.0	42.8	53.4	1.47E+12	2.20E+11
		42	50.2	43.5	45.6	49.8	2.08E+12	1.71E+11
	2	34	47.7	48.2	50	46.8	3.87E+12	5.32E+09
		35	49.4	52.0	48.3	55	5.79E+12	3.49E+08
		36	47.3	65.0	46.8	55.1	4.40E+12	5.11E+09
	3	37	74.6	77.0	73.1	70.6	1.90E+12	6.84E+07
		38	46.1	49.1	48.5	50.6	3.58E+11	2.17E+06
		39	48.0	49.5	43.6	51.8	3.70E+11	4.73E+07

3 结论

1) 三亚湿热海洋大气环境 1—3 月份呈干湿交替循环, 每天至少发生 1 次循环, 平均潮湿时间分别为 6.0, 7.4, 11.6 h。1—3 月份的环境腐蚀性均为 GX 级, 其中环境腐蚀性主要受潮湿时间影响, 潮湿时间越长, 环境腐蚀性越大, 3 月份腐蚀环境较 1 月 2 月更加严酷。

2) 贴片式数据通信接插件在带电和不带电工况下湿热海洋环境自然暴露 3 个月后, 腐蚀行为基本相似, 无明显差异, 接触电阻没有发生变化, 绝缘电阻均降为 $10^7 \Omega$ 数量级, 金属元器件均未发生明显的腐蚀现象。

3) 插针式接线端子在带电和不带电工况下湿热海洋环境自然暴露 3 个月后, 接触电阻没有发生变化, 但腐蚀行为存在明显差异, 在不通电流工况下, 螺钉发生严重腐蚀, 绝缘电阻降为 $10^6 \Omega$ 。在 3 A 电流通电工况下, 螺钉没有发生腐蚀, 绝缘电阻均维持在 $10^{11} \Omega$ 数量级, 电流对插针式接线端子螺钉等起到一定的保护作用, 反而抑制了腐蚀的发生。

参考文献:

- [1] 卓惠荣. 电器产品的防霉、防锈技术[J]. 电工电气, 1995(2): 7-10.
- [2] 陆锦铭. 电气防腐[J]. 中国井矿盐, 1980(2): 34-35.
- [3] 邱志斌, 阮江军, 黄道春, 等. 高压隔离开关机械故障分析及诊断技术综述[J]. 高压电器, 2015(8): 33-36.
- [4] 吴学明. 户内外防腐蚀电工产品防护技术综述[J]. 环境技术, 1992(1): 40-44.
- [5] 易盼, 丁康康, 宋维锋. 盐雾对喷锡和化金印制电路板腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37(12): 1601-1609.
- [6] 宁文涛, 冯皓, 赵钺. 印刷线路板在复合环境下的腐蚀[J]. 环境技术, 2010(6): 30-32.
- [7] 梁彩凤, 侯文泰. 大气腐蚀与环境[J]. 装备环境工程, 2004, 1(2): 49-52.
- [8] 杨大宁, 汪川, 王振尧, 等. 变电站常用金属的大气腐蚀行为及其防护[J]. 装备环境工程, 2016, 13(1): 126-129.
- [9] 易盼, 肖葵, 丁康康. 原位研究 PCB-ENIG 在吸附薄膜下的大气腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2016(4): 1146-1154.
- [10] 朱红, 郑弃非, 谢水生. 万宁地区铝及铝合金不同距海点的大气腐蚀研究[J]. 稀有金属, 2002, 26(6): 456-460.
- [11] 齐东梅, 成若义, 杜小青. Cu 及其合金的大气腐蚀研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(5): 389-398.
- [12] 杨万均, 肖敏, 张燕, 等. 舰面电子设备机柜防护失效分析与对策研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 83-87.
- [13] 阮红梅, 吴坤培, 王俊, 等. 气相防锈技术在电器设备防腐中的应用[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 32-37.
- [14] 朱立群, 杜岩滨, 李卫平. 手机 PCB 镀金接插件腐蚀失效实例分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2006(4): 4-8.
- [15] 薛旭, 陈捷俊. 海洋性大气环境中户外电器设备的防护新思路[J]. 科技资讯, 2013(16): 106-109.