

基于热带海洋大气环境下机载 PCB 板的环境适应性对比研究

李茜, 胡涛, 刘溅洪, 郭赞洪, 王玲, 牟献良

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 通过机载 PCB 板 (Printed Circuit Board, PCB) 在热带海洋大气环境下的腐蚀老化特征和电气性能退化规律分析, 研究其在热带海洋大气环境下的环境适应性。**方法** 根据热带海洋大气环境中 PCB 板的实际使用环境大多为舱室内部封闭或半封闭的情况, 分别设计并开展海南万宁海洋平台棚下暴露场和某海域环境户外简易遮蔽玻璃框下 3 a 的自然环境试验。**结果** PCB 板的焊点、焊盘、印制导线以及引线头等部位在 2 种试验环境中均出现了不同程度的腐蚀破坏, 试验后期, 所有部位的腐蚀程度全部达到了 4 级, 导通电阻从几十毫欧增大至几十兆欧, 绝缘电阻从 10 GΩ 以上降低至几兆欧。**结论** 在万宁站试验 2 a 和某海域试验 3 a 后, PCB 板均不满足耐电压的技术要求 (500 V 交流电压 60 s), 万宁海洋平台棚下暴露场对 PCB 板的环境适应性更为严酷。

关键词: PCB 板; 热带海洋大气环境; 自然环境试验; 腐蚀行为; 电气性能; 环境适应性

中图分类号: TM207 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)02-0104-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.02.014

Environmental Adaptability of Airborne PCB Based on Tropical Marine Atmospheric Environment

LI Qian, HU Tao, LIU Jianhong, GUO Zanhong, WANG Ling, MU Xianliang

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to study the environmental adaptability of airborne PCB (Printed Circuit Board, PCB) in tropical marine atmospheric environments by analyzing its characteristics and electrical performance degradation patterns. According to the situation where the tropical marine atmospheric environment was mostly enclosed or semi enclosed inside the cabin, natural environmental tests were designed and carried out for 3 years on the exposed field under the canopy of the Wanning Marine Platform in Hainan and the outdoor simple shielding glass frame in a certain sea area of the Nansha environment. The solder joints, pads, printed wires and lead heads of the PCB had different degrees of corrosion damage in the two test environments, and the corrosion degrees of all parts in the later stage of the test reached level 4. The on-resistance increased from tens of mΩ to tens of MΩ, and the insulation resistance decreased from more than 10 GΩ to MΩ. Finally, the PCB after 2 years of testing at Wanning Station and 3 years of testing in a sea area cannot meet the requirement of technology (AC 500 V, 60 s). The environmental adaptability of the exposed field under the shed of Wanning Marine Platform to PCB is more severe.

收稿日期: 2023-11-04; 修订日期: 2023-12-22

Received: 2023-11-04; Revised: 2023-12-22

引文格式: 李茜, 胡涛, 刘溅洪, 等. 基于热带海洋大气环境下机载 PCB 板的环境适应性对比研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(2): 104-111.

LI Qian, HU Tao, LIU Jianhong, et al. Environmental Adaptability of Airborne PCB Based on Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 104-111.

KEY WORDS: PCB; tropical ocean atmosphere; natural environmental test; corrosion; electrical property; environmental adaptability

机载 PCB 板作为航空电子产品的关键部位, 其某个部位小小的腐蚀都可能导致整个设备出现故障, 甚至瘫痪^[1-5]。海洋大气环境尤其是热带海洋大气环境, 通常都具有高温、高湿、高盐雾和强太阳辐射的特点^[6-9]。湿热和盐雾等为引起 PCB 板腐蚀老化的主要环境因素, 因此 PCB 板的环境效应已成为电子产品设计、分析和改进关注焦点。

刘成臣等^[10-11]研究了 2 种印制电路板在某海洋环境棚下暴露 3 a 后的老化特点, 考核了 PCB 板工艺体系的环境适应性, 并为机载电路板的选用做出了推荐。同时, 以绝缘电阻和品质因数为基准, 研究了自然环境试验与实验室环境试验的相关性。袁敏等^[12-14]通过印制电路板在实验室环境和热带岛礁环境的暴露试验, 发现自然环境中盐雾和多种环境因素的共同作用会加剧 PCB 板的腐蚀损伤, 而盐雾是造成其腐蚀的主要因素。研究同时表明, 表现的腐蚀与 PCB 板的性能参数(绝缘电阻、介质耐电压及谐振等)指标紧密相关, 且某一项指标的劣化联动着其他各项指标。易盼等^[15]采用交流阻抗谱研究了 2 种电路板在中性盐雾环境中的电化学腐蚀情况。贾润川等^[16]、李敏伟等^[17]通过酸性盐雾和盐雾/SO₂ 环境试验, 针对航空电路板研究了其在盐雾环境中的腐蚀特征, 评价了航空电路板在模拟舰载平台下的腐蚀行为, 并建立了其随时间的演变规律。战贵盼等^[18-19]研究得出了实验室模拟海洋大气环境下印制电路板腐蚀损伤有 3 个阶段, 分别为表面镀层腐蚀、基底金属腐蚀发生与扩展、元器件芯腔内腐蚀失效。

目前, 相关研究主要聚焦于实验室模拟环境下 PCB 的腐蚀行为和主要环境因素的模拟环境试验研究, 其中以模拟盐雾环境试验(中性盐雾和酸性盐雾)突出, 得出了部分关于 PCB 板在盐雾环境中的腐蚀及性能变化规律。针对 PCB 板在自然环境中的环境效应以及性能退化规律对比研究的数据并不多, 尤其缺少在热带海洋大气环境和南沙海域环境中 PCB 板环境适应性的研究。为了进一步适应我国装备在多海

域的发展, 据此本文针对性地选择了 2 种热带海洋大气环境, 开展 PCB 板在热带海洋大气环境中的自然环境暴露试验, 对比研究 PCB 板在热带海洋大气环境下的环境适应性。以机载 PCB 板为研究对象, 在海南万宁海洋平台棚下暴露场和某海域环境户外简易遮蔽玻璃框内开展自然环境试验, 通过对比分析 PCB 板在 2 种环境中的腐蚀老化行为和电气性能变化, 对于提高其在热带海洋大气环境中的环境适应性提供了参考依据, 具有重要的意义。

1 试验

1.1 试样

试验试样采用 100 mm×50 mm×1.5 mm 的平板 PCB 板, 其表面浅埋了 2 组规定路线的电路, 包括多个串联的焊盘, 基板采用聚酰亚胺材料制成, 作为 PCB 板的主体部分。同时表面采用绿油漆处理, 以此充当 PCB 板的保护层, 如图 1 所示。

1.2 试验方案

根据热带海洋大气环境中 PCB 板的实际使用环境大多为仓室内部封闭或半封闭的情况^[20], 本试验中分别采用了海南万宁海洋平台棚下暴露场和某海域环境户外简易遮蔽玻璃框(临海, 倾斜角 45°), 如图 2 所示。同期模拟 PCB 板在载设备中的使用环境, 开展 PCB 板的自然环境试验, 试验周期为 3 a, 对比分析 PCB 板在不同模拟热带海洋大气环境中的环境适应性。

1.3 检测性能

针对不同试验环境不同试验周期试验后的 PCB 板, 采用 Stemi2000-C 蔡司体视显微镜、蔡司 SEM、EDS 电镜开展表面腐蚀形貌和能谱分析, 并借助 IS50 傅里叶红外光谱仪进行红外光谱分析, 分别使用 AT515 精密电阻仪以及 TH9320 绝缘耐压测试仪设备

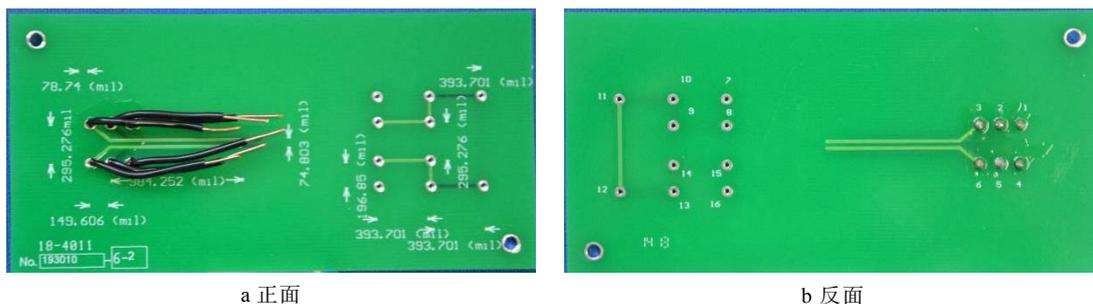


图 1 PCB 板
Fig.1 PCB: a) front; b) back

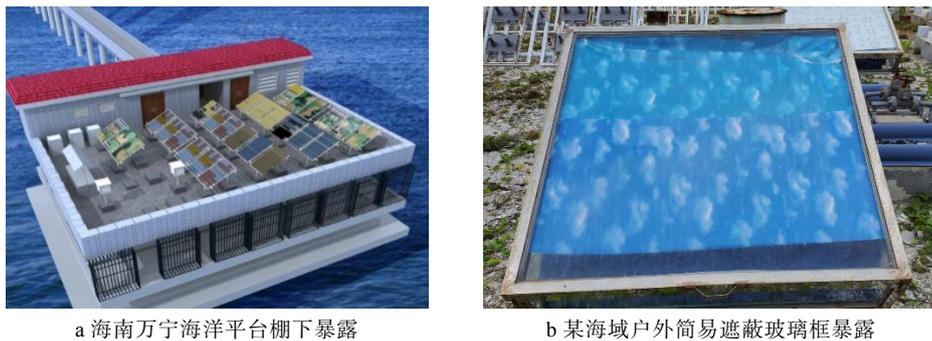


图2 PCB板的试验环境

Fig.2 Test environment of PCB: a) exposed under the shed of Hainan Wanning Marine Platform; b) exposure of simple outdoor shielding glass frame in a certain sea area of Nansha

对电气性能（导通电阻和绝缘耐压）进行测试，根据PCB板各项性能变化展开对比分析。

2 结果与分析

2.1 试验条件对比分析

海南万宁和某海域均为热带海洋大气环境，具有热带海洋大气“三高一强”的特点，而温度和相对湿度又是引起电子产品失效的主要环境因素^[21-24]。因此，试验周期中监测了PCB板在2种环境中的温湿度变化情况，如图3所示。万宁站海洋平台棚下环境的月平均气温变化范围为20~29℃，月平均相对湿度变化范围为82%~90%，户外简易遮蔽玻璃框月平均气温变化范围为26~30℃，月平均相对湿度变化范围为76%~90%。通过图3的温湿度变化规律分析可以发现，2种试验环境温湿度的交替变化与四季更替密不可分，随时间均呈现负相关变化趋势，每年12月至来年的2月季节，其温度为全年最低，而此时的相对湿度几乎达到全年的最高值。其中，海洋平台棚下环境的相对湿度全年均高于80%，而简易遮蔽玻璃框的温度高于27℃的时间几乎长达11个月。

2.2 表观腐蚀形貌分析

PCB板在2种试验环境中试验后的整体外观腐

蚀形貌如图4~6所示。PCB板在热带海洋大气环境中外观腐蚀主要表现在焊点、焊盘、印制导线以及引线头部位（见图4a中虚线框）。随着试验时间的延长，这些部位的腐蚀情况会不断加剧，腐蚀范围进一步扩展。其中，以含金属的部位腐蚀最为突出，在温湿度和盐雾等海洋主要环境因素的共同作用下，金属部位作为较为敏感部位，会优先发生氧化腐蚀反应，并伴随腐蚀产物生成，大量的腐蚀产物堆积将附着在PCB板表面，印制导线受到破坏，引线头腐蚀氧化生成铜绿。有研究认为^[12-14]，PCB板不同部位的腐蚀现象与热带海洋大气的高湿度和高盐雾含量相关，空气中大量的盐雾颗粒更倾向附着在温度更低的金属部位，因此金属部位会优先发生腐蚀。而湿度和Cl⁻的强穿透力又会使得长时间作用下的金属基体将产生腐蚀产物，且当腐蚀程度足够大时，基体表面涂层也将受到破坏。此时涂层丧失保护作用，浅埋在其中的印制导线会受到进一步的腐蚀破坏。

为了进一步对比研究PCB板在2种热带海洋大气环境中的环境适应性，在试验周期中分区开展了其不同部位的半定量观察，PCB板的腐蚀程度采用0~4数值来表征，见表1。两地均属于相似的高温、高湿和高盐雾的环境特点，但长期环境作用过程中不同部位的腐蚀程度具有一定的差异。通过不同部位的腐蚀评价对比发现，PCB板在万宁海洋平台棚下暴露场试

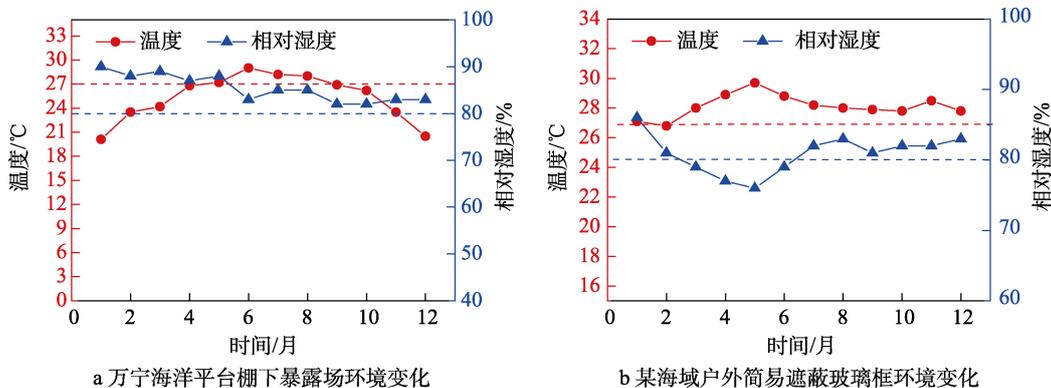


图3 不同试验环境的温湿度变化情况

Fig.3 Temperature and humidity changes in different test environments: a) environment in the shed of Hainan Wanning ocean platform; b) environment at outdoor shielding glass frame in a certain sea area of Nansha

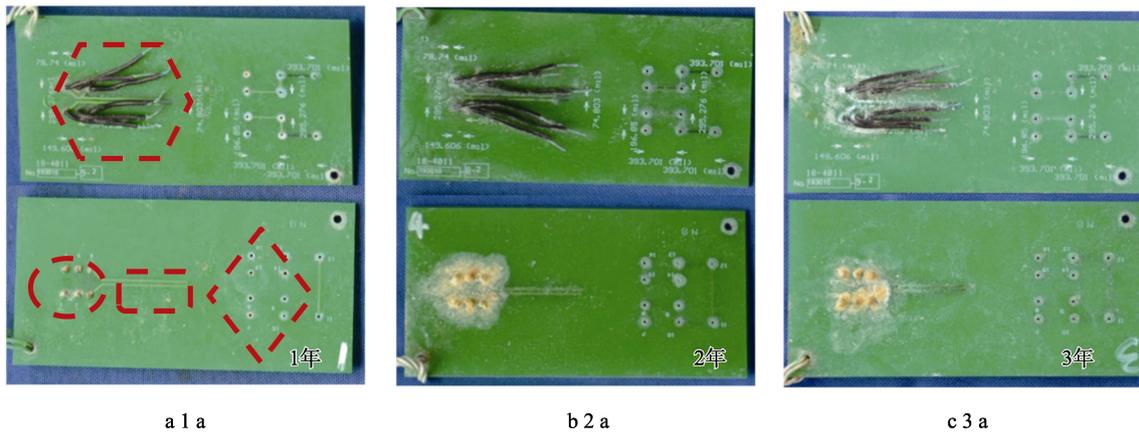


图 4 PCB 板在万宁海洋平台棚下暴露场试验不同时间的外观形貌
Fig.4 Morphology of PCB exposed in the shed of Hainan Wanning Marine Platform at different time

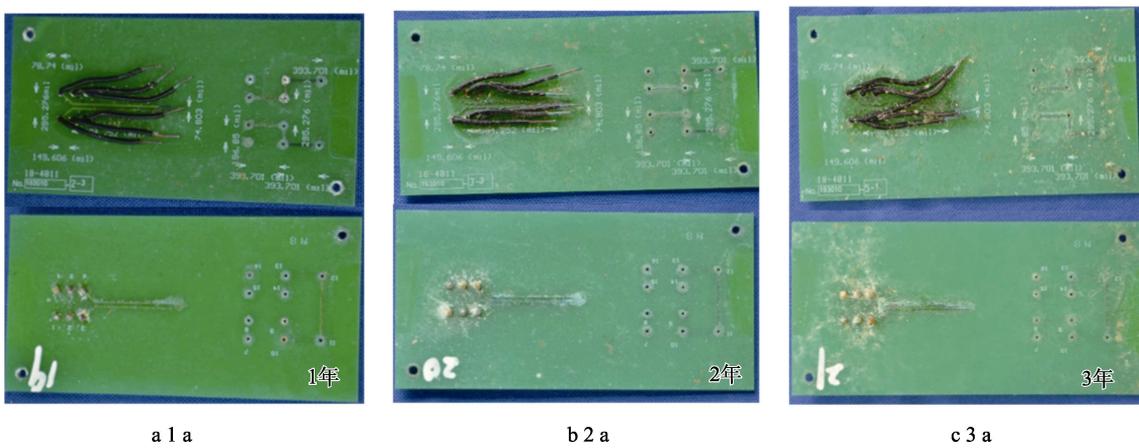


图 5 PCB 板在某海域户外简易遮蔽玻璃框试验不同时间的外观形貌
Fig.5 Morphology of PCB exposed in outdoor shielding glass frame in a certain sea area at different time

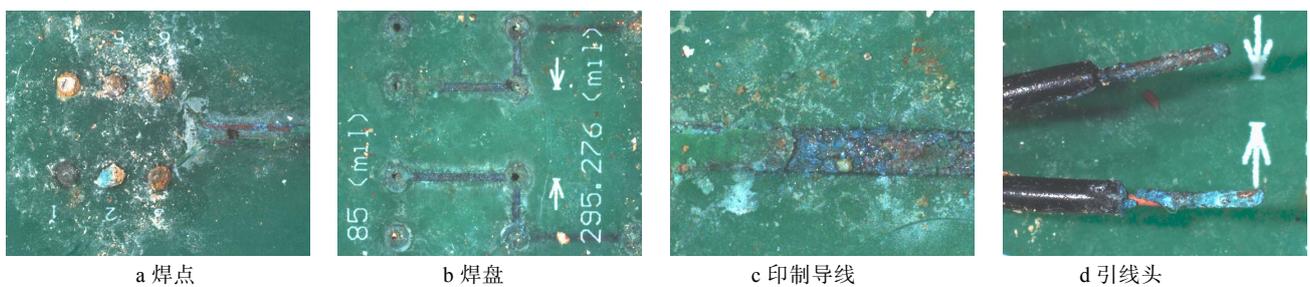


图 6 PCB 板在某海域试验 3 a 后不同部位的外观
Fig.6 Appearance of different parts of PCB tested in a certain sea area for 3 years:
a) solder joint; b) pad; c) printed wire; d) lead head

表 1 2 种试验环境中的 PCB 板不同部位腐蚀评价
Tab.1 Corrosion evaluation of different parts of PCB in two experimental environments

试验时间/月	焊盘		焊点		印制导线		引线头	
	万宁	某海域	万宁	某海域	万宁	某海域	万宁	某海域
1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	0	1	0
6	2	1	2	1	1	1	1	1
12	3	3	3	2	2	2	2	2
24	4	3	4	3	4	3	4	4
36	4	4	4	4	4	4	4	4

注: 0——无变化; 1——轻微; 2——明显; 3——显著; 4——严重。

验 2 a 的腐蚀程度和某海域户外简易遮蔽玻璃框试验 3 a 的腐蚀程度相当,且各个部位的腐蚀情况均表现为严重腐蚀。对比图 4 和图 5 中 PCB 板的整体外观腐蚀形貌也可得出,万宁海洋平台棚下暴露场对 PCB 板的环境适应性更为严酷,这可能与机载电路板对于湿度这一环境因素的敏感性有关,高的湿度更容易引起线路的氧化腐蚀。

试验过程中,针对 PCB 板主要部位,进一步展开了其腐蚀特征分析。PCB 板面漆的典型腐蚀特征为表面涂层的开裂,初始表面会萌生“蠕虫状”的裂纹(见图 7 箭头①)。在试验过程中,裂纹沿着试样的表面呈“枝丫状”向四周不断生长扩展,逐渐布满整个 PCB 板试样,最终连接成“网状”(见图 7 箭头②)。另外,PCB 板的焊盘在腐蚀初期会出现明显的流挂现象,随着焊盘上的镀 Sn 和 Pb 等金属被腐蚀氧化,焊

盘的腐蚀范围将由焊盘中心不断向周围延伸。到试验后期,大量的腐蚀产物生成并堆积在焊盘处,最终将空心焊盘的空洞全部堵塞,而焊盘的腐蚀这一现象也将影响 PCB 板的电气性能,如图 8 所示。

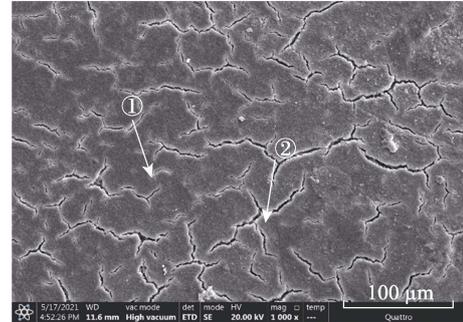


图 7 试验 3 a 后的面漆裂纹
Fig.7 Crack in the finish after 3 years of experiment

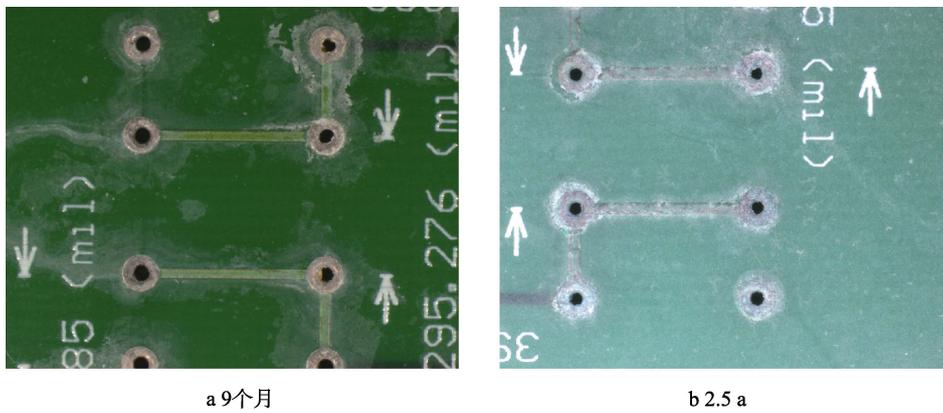


图 8 焊盘流挂
Fig.8 Sagging on pad: a) 9 month; b) 2.5 a

针对影响电气性能最为关键的印制导线部位,随着试验时间轴的推动,借助体视显微镜详细观察了其各个阶段的腐蚀演变情况,如图 9 所示。通过演变过程可清楚地观察到 PCB 板印制导线的腐蚀破坏形式主要有 4 种发展历程,即鼓泡、破裂、剥落、腐蚀氧化发黑。其发生腐蚀破坏的薄弱部位集中在印制导线的边缘和棱角处。到试验后期,整个印制导线表面的涂层完全剥落,内部 Cu 制导线完全裸露在空气中,被逐渐氧化腐蚀,氧化颜色由初始的砖红色逐渐向黑

色过渡,最终将全部氧化腐蚀为黑色,同时印制导线表面还附着了部分的腐蚀产物。通常常温铜的腐蚀氧化主要生成铜绿,即为绿色,但热带海洋大气环境通常具有高温的特点。据不完全统计,某海域全年约 91%的时间可达到 27 °C 以上(见图 3b),而部分铜在热氧化反应后生成的氧化铜,即为黑色。

通过 EDS 能谱分析(如图 10 所示)可以发现,表面腐蚀产物含有的主要元素有 Cu、O、Na、Ca、Si、C、Cl。这也初步说明了受海洋盐雾环境因素尤

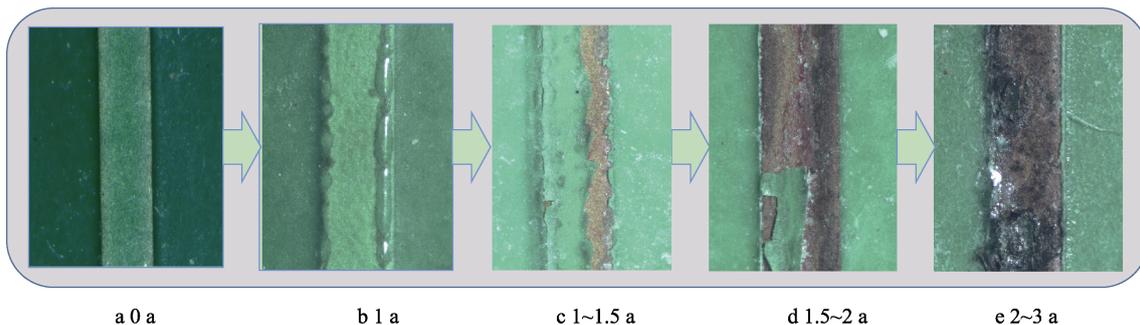


图 9 PCB 板的腐蚀演变过程
Fig.9 Corrosion evolution process of PCB

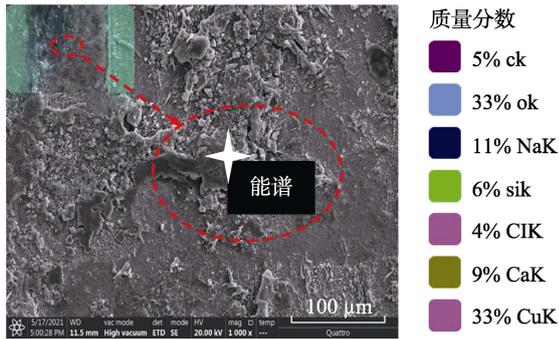


图 10 PCB 板印制导线腐蚀部位能谱分析
Fig.10 Spectrum of printed wire corrosion on PCB

其是含有的高 NaCl、Ca 和 Si 的影响, 印制导线表面涂层发生破坏, 并在 Cl⁻ 的强穿透力作用下, 腐蚀得到进一步的扩展, 最终使得基材的 Cu 导线与空气中的水汽和介质发生氧化腐蚀, 生成了大量含 Na、Ca、Si、Cl 元素的腐蚀产物。

2.3 红外光谱分析

PCB 板面漆的红外光谱图如图 11 所示。试验过程中, PCB 板面漆出现了明显的腐蚀裂纹破坏, 但针对原始、某海域和海南万宁试验后的面漆开展红外光谱分析发现, 试验后面漆主要特征吸收峰 (如 293.56、1 727.87、1 457.15、1 065.12、605.69 cm⁻¹ 等) 的峰强、峰置、峰形均未出现明显变化, 也没有出现新的特征吸收峰。整体来说, 涂层中的成膜物质仍然具有良好的耐蚀性^[25-26], 即腐蚀后面漆的腐蚀机理暂未改变。

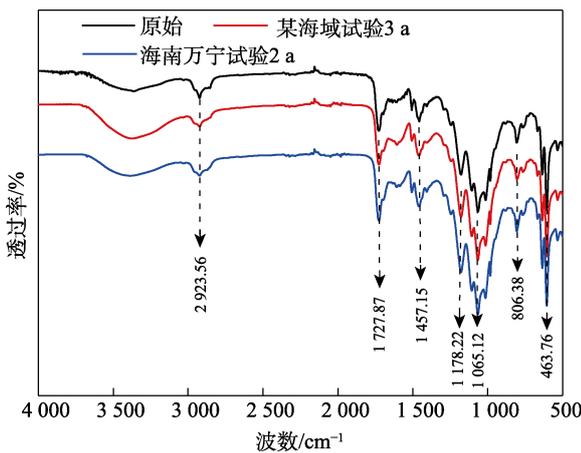


图 11 PCB 板面漆红外光谱分析
Fig.11 Infrared spectrum of PCB finish

2.4 电气性能检测分析

试验后检测了 PCB 板的导通性和绝缘耐压情况, PCB 板 1 a 内的导通电阻变化情况如图 12 所示。2 种试验环境下的 PCB 板导通电阻变化情况相似, 主要可分为 2 个阶段, 第一阶段为试验初期, PCB 板的

导通电阻未出现明显的升高或降低, 导通电阻数值一直在几十毫欧波动。随着试验时间的延长, 进入第二阶段, 其导通电阻出现了明显的突增现象, 试验 2~3 a 后的 PCB 板导通电阻最终在几十兆欧波动。PCB 板中的印制导线腐蚀直接或间接导致了其导通性的下降, 部分印制导线因表面的镀层腐蚀剥落, 出现了直接暴露在 PCB 板表面的现象。这使得印制导线直接与海洋大气接触, 并与海洋大气中的腐蚀介质发生了明显了腐蚀反应, 从而导致导线被腐蚀, 使得接触电阻出现增大现象。

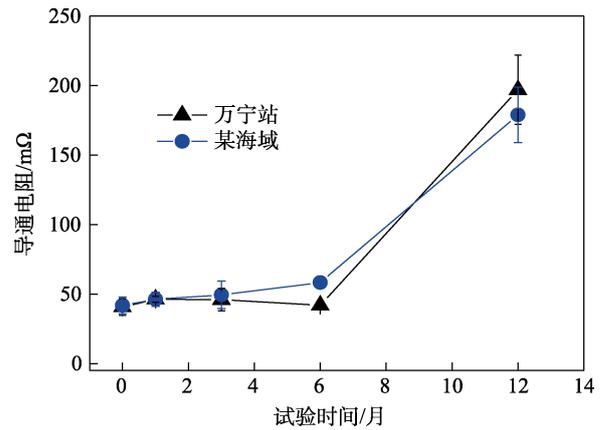


图 12 PCB 导通电阻变化情况
Fig.12 Change of on-resistance of PCB

同样受 PCB 板中印制导线和焊点等部位腐蚀的影响, 其绝缘耐压性能也出现了不同程度的退化, 如图 13 所示。2 种试验环境下的 PCB 板在 3 a 试验期内, PCB 板同层之间、异层之间的绝缘电阻阻值也出现了明显的减小, 部分绝缘电阻阻值从 10 GΩ 降低至几兆欧。施加 500 V 交流 60 s, 陆续出现了漏电流, 但 PCB 板的不同部位腐蚀程度陆续达到 3~4 级时, PCB 板出现了击穿现象。其中, 万宁站试验的 PCB 板在 2 a 后不满足该 PCB 板耐电压的技术要求, 某海域试验 3 a 后的 PCB 板不满足耐电压的技术要求。

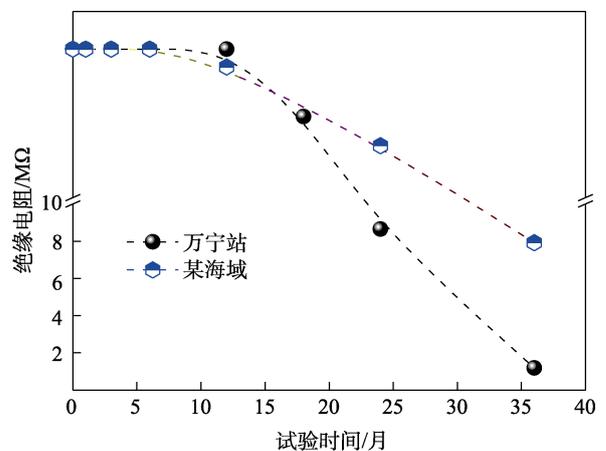


图 13 PCB 板的绝缘电阻变化情况
Fig.13 Change of PCB insulation resistance

3 结论

1) PCB板在2种热带海洋大气环境下腐蚀特征相似,焊点、焊盘、印制导线以及引线头部位会出现明显的腐蚀破坏。通过红外光谱分析可知,PCB板面漆试验前后的腐蚀机理暂未改变。其中,印制导线鼓泡、破裂、剥落、腐蚀氧化发黑的演变过程,直接或间接导致了电气性能的降低。

2) 试验后期(2~3 a),2种试验环境的PCB板电气性能均明显降低,接触电阻和绝缘电阻呈负相关增减,其中接触电阻最终增大至几十兆欧,而绝缘电阻减小至几兆欧。

3) 受万宁海洋平台棚下暴露场和某海域环境户外简易遮蔽玻璃框暴露2种环境的环境因素(温度和相对湿度)的差异影响,万宁海洋平台棚下暴露场对PCB板的环境适应性更为严酷,试验2 a后已不满足耐电压的技术要求。

参考文献:

- [1] 邹士文,肖葵,董超芳,等.霉菌环境下喷锡处理印制电路板的腐蚀行为[J].中国有色金属学报,2013,23(3):809-815.
ZOU S W, XIAO K, DONG C F, et al. Corrosion Behavior of Hot Air Solder Level Finished Printed Circuit Board in Mold Environment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(3): 809-815.
- [2] 曲利新.增强军用电路板组件环境适应性的一种方法[J].现代电子技术,2010,33(21):41-42.
QU L X. Method to Enhance Environmental Adaptability of Military Printed Circuit Board Assemblies[J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(21): 41-42.
- [3] 孙海龙,王晓慧.舰载电子设备三防密封设计技术综述[J].装备环境工程,2008,5(5):49-52.
SUN H L, WANG X H. Overview of Sealing Design of Shipborne Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(5): 49-52.
- [4] 杜迎,朱卫良.盐雾对集成电路性能的影响[J].半导体技术,2004,29(5):56-58.
DU Y, ZHU W L. The Infection of Saltfog for IC's Performance[J]. Semiconductor Technology, 2004, 29(5): 56-58.
- [5] 刘琦,郁大照,乔松然,等.缓蚀剂对热带海洋大气环境下印制电路板的防护性能[J].海军航空大学学报,2022,37(6):495-500.
LIU Q, YU D Z, QIAO S R, et al. Evaluation of Corrosion Inhibitors for Airborne Electrical and Electronic Equipment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 495-500.
- [6] 李亮,曹京宜,李旭,等.海洋环境设备涂层老化和失效的影响因素研究[J].装备环境工程,2020,17(2):97-103.
LI L, CAO J Y, LI X, et al. Influencing Factors of Aging and Failure of Ocean Equipment Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 97-103.
- [7] 韩德盛,李获.LY12铝合金在海洋大气环境下加速腐蚀试验和外场暴露试验的相关性[J].腐蚀与防护,2008,29(3):119-120.
HAN D S, LI D. Correlation Study of Accelerated Corrosion Testing and Outfield Testing of Aluminum Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2008, 29(3): 119-120.
- [8] 李茜,陈星昊,胡涛,等.某机载印制电路板在模拟海洋大气环境中腐蚀行为[J].海军航空大学学报,2022,37(6):486-494.
LI Q, CHEN X H, HU T, et al. Corrosion Behavior of an Airborne PCB in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 486-494.
- [9] 李茜,李景育,陈星昊,等.电连接器的概述和研究现状分析[J].环境技术,2021,39(6):115-119.
LI Q, LI J Y, CHEN X H, et al. The Overview and Research Status Analysis of Electrical Connectors[J]. Environmental Technology, 2021, 39(6): 115-119.
- [10] 刘成臣,张洪彬,赵连红,等.机载电子设备印制电路板环境适应性研究[J].装备环境工程,2017,14(7):65-69.
LIU C C, ZHANG H B, ZHAO L H, et al. Environmental Adaptability of Printed Circuit Board for Airborne Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(7): 65-69.
- [11] 刘成臣,张洪彬,赵连红,等.印制电路板海洋环境试验与实验室环境试验相关性研究[J].装备环境工程,2018,15(2):74-78.
LIU C C, ZHANG H B, ZHAO L H, et al. Correlation between Marine Environmental Test and Laboratory Environmental Test of Printed Circuit Board[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 74-78.
- [12] 袁敏.印制电路板防护工艺热带海洋环境适应性研究[D].广州:华南理工大学,2015.
YUAN M. Research on Tropical Ocean Environmental Worthiness of Printed Circuit Board Protection Technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [13] 袁敏,邹凡,王忠.热带海洋环境条件对印制电路板性能参数的影响分析[J].环境技术,2014,32(3):21-23.
YUAN M, ZOU F, WANG Z. Analysis on Tropical Ocean Environment Effects to Performance Parameters of Printed Circuit Board[J]. Environmental Technology, 2014, 32(3): 21-23.
- [14] 袁敏,张铮,关学刚,等.海洋环境下印制电路板涂层的性能表现[J].电子产品可靠性与环境试验,2020,38(2):1-6.
YUAN M, ZHANG Z, GUAN X G, et al. Performance of Printed Circuit Board Coating in Marine Environment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020, 38(2): 1-6.

- [15] 易盼, 丁康康, 宋维锋, 等. 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.
YI P, DING K K, SONG W F, et al. Effect of Salt Spray Environment on the Corrosion Behavior of PCB-HASL and PCB-ENIG[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(12): 1601-1609.
- [16] 贾润川, 李明, 朱蒙, 等. 两种实验室方法模拟舰载平台环境下航空电路板的腐蚀行为[J]. 海军航空大学学报, 2022, 37(6): 469-478.
JIA R C, LI M, ZHU M, et al. Two Laboratory Methods Simulate the Corrosive Behavior of Aviation Circuit Boards in the Shipboard Platform Environment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 469-478.
- [17] 李敏伟, 傅耘, 李明, 等. 典型航空印刷电路板盐雾环境腐蚀损伤规律研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 29-35.
LI M W, FU Y, LI M, et al. Research on Salt Fog Corrosion Damage Law of Typical Aircraft Printed Circuit Board[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 29-35.
- [18] 战贵盼, 谭晓明, 彭志刚, 等. 实验室模拟海洋环境下印制电路板腐蚀损伤行为[J]. 装备环境工程, 2021, 18(12): 65-72.
ZHAN G P, TAN X M, PENG Z G, et al. Corrosion Damage Behavior of Printed Circuit Board in Simulated Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(12): 65-72.
- [19] 战贵盼, 韩永恒, 谭晓明, 等. 模拟海洋大气环境下 PCB-HASL 的腐蚀行为与机理[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 245-253.
ZHAN G P, HAN Y H, TAN X M, et al. Corrosion Behavior and Mechanism of PCB-HASL in Simulated Marine Atmospheric Environment[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 245-253.
- [20] GJB 2218A—2018, 军用装备自然环境试验方法 第 3 部分: 棚下大气自然环境试验[S].
GJB 2218A—2018, Natural Environmental Test Methods for Military Material: Part 3 : Under Shelter Atmospheric Weathering Test[S].
- [21] 杨森, 李曙林. 环境对军用飞机的影响及适应性对策[J]. 装备制造技术, 2008(2): 49-50.
YANG S, LI S L. Influence of Environment on Military Aircraft and Adaptability Strategy[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2008(2): 49-50.
- [22] ISO 9223—2012, Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres-Classification, Determination and Estimation[S].
- [23] 李茜, 胡涛, 孙茂钧, 等. 海洋大气环境多因素组合/综合试验及方法现状分析[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 84-90.
LI Q, HU T, SUN M J, et al. Analysis of Multi-Factor Combined/Comprehensive Test and Method in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 84-90.
- [24] 邱森宝, 闫杰. 几种电缆外护套的南海海洋大气环境适应性研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2014, 32(3): 38-42.
QIU S B, YAN J. Aging Behaviors of Cable Sheaths in Marine Atmospheric Environment[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2014, 32(3): 38-42.
- [25] 王海荣, 张海信. 有机涂层在模拟海洋环境中的防腐性能研究[J]. 中国涂料, 2018, 33(9): 25-30.
WANG H R, ZHANG H X. Study on the Corrosion Resistance of Organic Coatings in Simulated Marine Environment[J]. China Coatings, 2018, 33(9): 25-30.
- [26] 李茜, 李景育, 孙茂钧, 等. 三种涂层在模拟热带海洋大气环境中的性能退化研究[J]. 环境技术, 2023, 41(3): 11-16.
LI Q, LI J Y, SUN M J, et al. Performance Degradation of Three Coatings in Simulated Tropical Marine Atmospheric Environment[J]. Environmental Technology, 2023, 41(3): 11-16.