

湿热盐雾大气环境印制电路板 防护棚下试验研究

钟文安, 王洪伦, 张东玖, 陈少将, 杨德刚, 蔡辉

(西昌卫星发射中心 航天发射场可靠性技术重点实验室, 海口 571126)

摘要: **目的** 试验研究不同防护工艺的印制电路板在湿热盐雾大气环境下的适应性。**方法** 结合无防护试件, 在严苛的濒海棚下环境开展 4 种印制电路板防护工艺的暴露试验, 通过观察电路板外观, 测量计算绝缘电阻、介质耐压、品质因数, 以及扫描电镜、能谱分析等技术手段评价印制电路板防护工艺的性能。**结果** 濒海棚下环境中, 无防护印制电路板腐蚀严重, 电气性能显著下降。改性硅、有机硅三防漆防护的印制电路板在整个试验周期内腐蚀程度轻微, 电气性能较好, 表面涂层仅存在轻微起泡现象。丙烯酸三防漆防护印制电路板防护性能不稳定, 印制电路板出现腐蚀现象, 品质因数总体低于改性硅、有机硅三防漆防护。聚氨酯三防漆防护印制电路板在电气测试性能中表现良好, 但涂层出现太多破损、起泡等缺陷, 铜导线出现异常生锈现象。在介质耐压测试中, 多周期呈现击穿状态。**结论** 在濒海区域棚下湿热盐雾环境中, 涂覆有机硅、改性硅三防漆的印制电路板防护状态最好, 可优先选择作为防护手段。

关键词: 湿热盐雾; 棚下环境; 印制电路板; 三防漆; 涂敷防护; 环境适应性

中图分类号: TG178; TN41

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)03-0145-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.03.019

Experimental Study on PCB Protection in Damp and Hot Salt Fog Atmospheric Environment

ZHONG Wenan, WANG Honglun, ZHANG Dongjiu, CHEN Shaojiang, YANG Degang, CAI Hui

(Key Laboratory of Space Launching Site Reliability Technology, XSLC, Haikou 571126, China)

ABSTRACT: The work aims to study the environmental adaptability of PCB with different protection processes in a damp and hot salt fog atmospheric environment. Combined with unprotected specimens, the exposure test of PCB with four kinds of protection technology was carried out in shed environment near the sea. The performance of the protection technology of PCB was evaluated by the appearance, insulation resistance, dielectric voltage resistance, quality factor, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis and other technical means. In the shed environment near the sea, the PCB without protective treatment was seriously corroded, and its electrical performance was also significantly reduced. The modified silicone and organosilicon PCB had mild corrosion and good electrical properties during the whole test period. The PCB protective performance of acrylic three-proofing paint protection was unstable, and the PCB was corroded. The quality factor of acrylic three-proofing paint was lower than that of modified silicon and organic silicon three-proofing paint. The electrical test performance of the PCB protected

收稿日期: 2023-11-25; 修订日期: 2024-01-27

Received: 2023-11-25; Revised: 2024-01-27

引文格式: 钟文安, 王洪伦, 张东玖, 等. 湿热盐雾大气环境印制电路板防护棚下试验研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(3): 145-153.

ZHONG Wenan, WANG Honglun, ZHANG Dongjiu, et al. Experimental Study on PCB Protection in Damp and Hot Salt Fog Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(3): 145-153.

by polyurethane three-proofing paint was good, but the coating had too much damage, foaming and other defects, the copper wire had abnormal rust phenomenon, and the dielectric voltage test had a breakdown state in multiple cycles. For the PCB in the damp and hot salt fog environment in the shed environment near the sea, it is recommended that silicone and modified silicon be coated with three-proofing paint as protection means.

KEY WORDS: damp and hot salt fog; shed environment; PCB; three-proofing paint; coating protection; environmental adaptability

高温、高湿、高盐雾的濒海环境下,大气腐蚀性很强,给电子电气设备的“三防”工作带来了许多挑战^[1-3]。印制电路板是电子设备的重要组成部分,几乎所有的电子设备,小到遥控玩具,大到计算机、通讯设备、工业控制设备、航天设备等,只要有集成电路等电子元器件,就要使用印制电路板,以达到对元器件的安装和电气互联的作用(多用“PCB”来表示),一旦发生腐蚀,可能会引发短路、断路以及串电等诸多问题,甚至可诱发电气故障和系统错误,从而影响设备使用或引发安全问题^[4-8]。潮湿、盐雾、霉菌是海洋环境电子电气设备印制电路板失效的重要影响因素,潮湿影响主要体现在物理、机械和电气3个方面的侵蚀作用:盐雾导致的电化学反应能迅速腐蚀金属器件,霉菌直接侵蚀的对象是非金属材料,而间接侵蚀对象是包含金属在内的所有材料^[9-11]。随着印制电路板向微电子化、高集成化和高密度装配方向发展,以及电子线路的高阻抗和放大特性,对印制电路板的环境适应性和可靠性提出了更高的要求^[12-14]。

目前电路板主要采用敷形涂覆技术进行防护,将“三防”漆涂敷在印制电路板上,能提高印制电路板在贮存和工作期间的三防能力。它能防止由于气温骤然变化产生“凝露”,使印制导线间漏电、短路甚至击穿。对于工作在高电压及低气压条件下的印制板,可改善其导线间的电晕、飞弧,提高工作可靠性。对于在沿海使用,处于非密封腔体内易被盐雾侵蚀和温度骤然变化产生“凝露”的情况下,“三防”漆的喷涂尤为重要。三防漆类型包括丙烯酸树脂类(AR)、改性环氧树脂类(ER)、有机硅树脂类(SR)、聚氨酯树脂类(UR)、对二甲苯(XY)以及纳米涂料等^[15-17]。易盼等^[18]通过盐雾试验研究了盐雾对喷锡和化金印制电路板腐蚀行为的影响。蒋海峰等^[19]通过加速试验对紫外光固化三防漆进行了研究。刘琦等^[20]研究了缓蚀剂对热带海洋大气环境下印制电路板的防护性能。Yi等^[21]开展了在吸附薄电解质层下PCB-ENIG大气腐蚀行为的原位研究。但是,关于三防漆防护工艺在海洋气候现场棚环境下的适应性研究^[22-23]还比较少。本文甄选了4种三防漆防护工艺,结合无防护状态的印制电路板,开展海洋气候下的棚下环境试验。采用形貌观察和光泽度、绝缘电阻、介质耐压、品质因数测试,以及扫描电镜、

能谱分析等方法综合评价印制电路板防护工艺的防护性能^[24-25]。

1 试验

1.1 试样制备

参考IPC-CC-830B《印制线路组件用电气绝缘化学物的鉴定及性能》所规定的标准测试载体制作印制电路板试件,如图1所示。印制电路板试件基板为环氧玻璃布(FR-4),选用改性硅三防漆(DCALV)、有机硅三防漆(DC1-2577)、丙烯酸三防漆(TFABF)、聚氨酯三防漆(URC)等4种涂料进行涂覆,涂覆时

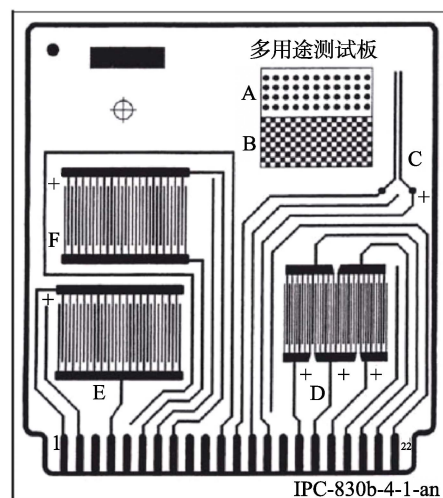


图1 印刷电路板试件图样及制备
Fig.1 Sample drawing and preparation of PCB

按照施工工艺在印制电路板表面进行喷涂施工。喷涂前, 确保试件表面干净, 采用喷枪对试件进行均匀喷涂, 漆膜干燥后厚度约 50 μm。

1.2 试验周期

结合无防护状态的印制电路板, 在海南东部濒海地区棚下环境开展 4 种防护工艺的试验。试验周期分别是 3、6、9、12 个月, 每周期平行样试件 3 个, 投

放前做好标识。

1.3 评价方法

印制电路板试验后的检测项目包括外观评级和绝缘电阻、介质耐压、品质因数(介电损耗因数的倒数)等测试, 以及微观观察、能谱分析等, 见表 1。通过检测数据综合评价印制电路板各种防护工艺在湿热盐雾环境的防护性能^[26-27]。

表 1 三防漆试件检测项目
Tab.1 Test items of three-proofing paint samples

序号	项目	检测仪器	型号	说明
1	外观评级	目视	—	开裂、脱落、玷污、生锈、起泡等外观综合评级
		放大镜	PEAK NO.1961	
		相机	SX740HS	
2	绝缘电阻	绝缘电阻测试仪	UT511	测量涂层材料的绝缘电阻
3	导通电阻	微欧计	UT620C	测量电路板的导通电阻
4	介质电压	耐压测试器	Zentech 9072A	测量涂层的耐电压性能
5	品质因数	介质损耗测试仪	FS3001	测量介电损耗因数
6	微观观察	扫描电镜	JSM-6510	观察印制电路板表面微观形貌
7	能谱分析	扫描电镜	JSM-6510	测量印制电路板表面成分组成

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

无防护以及改性硅三防漆、有机硅三防漆、丙烯酸三防漆、聚氨酯三防漆防护的印制电路板初始状态和 3、6、9、12 个月试验后的宏观形貌如图 2 所示。可以看出, 随着试验时间的增加, 无防护状态印制电路板上, Cu 电路逐渐由浅紫红色向深紫色转变, 并伴随有黑色腐蚀产物生成; 改性硅、有机硅三防漆防护印制电路板电路板表面无肉眼可见的腐蚀产物生成, 腐蚀程度较轻, 金属 Cu 颜色仍呈现紫红色, 无明显涂层破损; 丙烯酸三防漆防护印制电路板大部分金属 Cu 颜色仍呈现紫红色, 随着试验时间的增加, 印制电路板颜色逐渐变深, 但总体来说颜色变化不大, 电路板表面无明显腐蚀产物生成; 聚氨酯三防漆防护的印制电路板腐蚀程度逐渐加深, 金属完整性逐渐被破坏, 肉眼可见腐蚀产物的生成。总体来说, 采用三防漆防护的印制电路板无腐蚀或腐蚀很少, 而无防护状态印制电路板腐蚀严重, 腐蚀产物逐渐变成黑色, 说明 Cu 逐渐被氧化成 CuO, 随时间推移氧化产物越来越多。

2.2 局部形貌

无防护以及 4 种三防漆防护的印制电路板在棚下环境试验各个周期后, 局部形貌有很大不同, 如图 3 所示。无防护电路板试验 3 个月时, Cu 表面明显凹凸不平; 6 个月时, Cu 腐蚀程度加重, 表面几乎被赤

色腐蚀产物覆盖, 并伴随有腐蚀产物脱落; 9 个月时, 赤色腐蚀产物大量脱落, Cu 表面生成大面积黑褐色腐蚀产物; 12 个月后, 电路板 Cu 表面完全被腐蚀产物覆盖, 且腐蚀产物在表面呈较大的椭圆形, Cu 完全失去金属光泽。4 种三防漆防护的电路板试验期间, Cu 表面几乎没有腐蚀或腐蚀很少, 但是涂层出现了不同程度的破损, 其中聚氨酯三防漆破损最为严重。随着试验时间的增加, 涂层防护的印制电路板表面光泽逐渐降低, 表明涂层光泽度逐渐下降; 印制电路板 Cu 表面逐渐出现黑色点蚀, 随着试验时间延长, 数量逐渐增加, 面积逐渐增大, 表明涂层防护的 Cu 导线在恶劣的棚下环境中也会腐蚀。

2.3 微观形貌及腐蚀产物

无防护状态以及 4 种三防漆防护的印制电路板在棚下环境试验 12 个月后的微观形貌及腐蚀产物情况如图 4 所示。可以看出, 无防护试件的 Cu 导线测试点已发生腐蚀。能谱分析表明, 此处除了 Cu 和 Cu 的氧化物外, 还有 Cl 元素以及少量 Mg、Al 和 Si 元素存在, Cl 元素来自于濒海气候环境中的海盐粒子, Mg、Al 和 Si 元素可能来自在棚下环境印制电路板表面积累的灰尘等污染物质。三防漆防护的试件电路板表面覆盖有一层片状异物, 表面较为平整, 局部区域存在尺寸较小的异物。EDS 结果显示, 改性硅三防漆、有机硅三防漆、丙烯酸三防漆涂层防护无 Cu 元素的存在, 表明该处涂层完好, 不存在破损; 而聚氨酯三防漆涂层防护有 Cu 元素的存在, 表明该处涂层存在

破损, Cu 导线发生腐蚀。三防漆防护的试件电路板 EDS 结果显示, 除常见的 C、O 外, 还有 Cl、Ca、

Na、Si、S、Al 等元素, 推测来自于棚下环境中海盐粒子、灰尘等污染物。

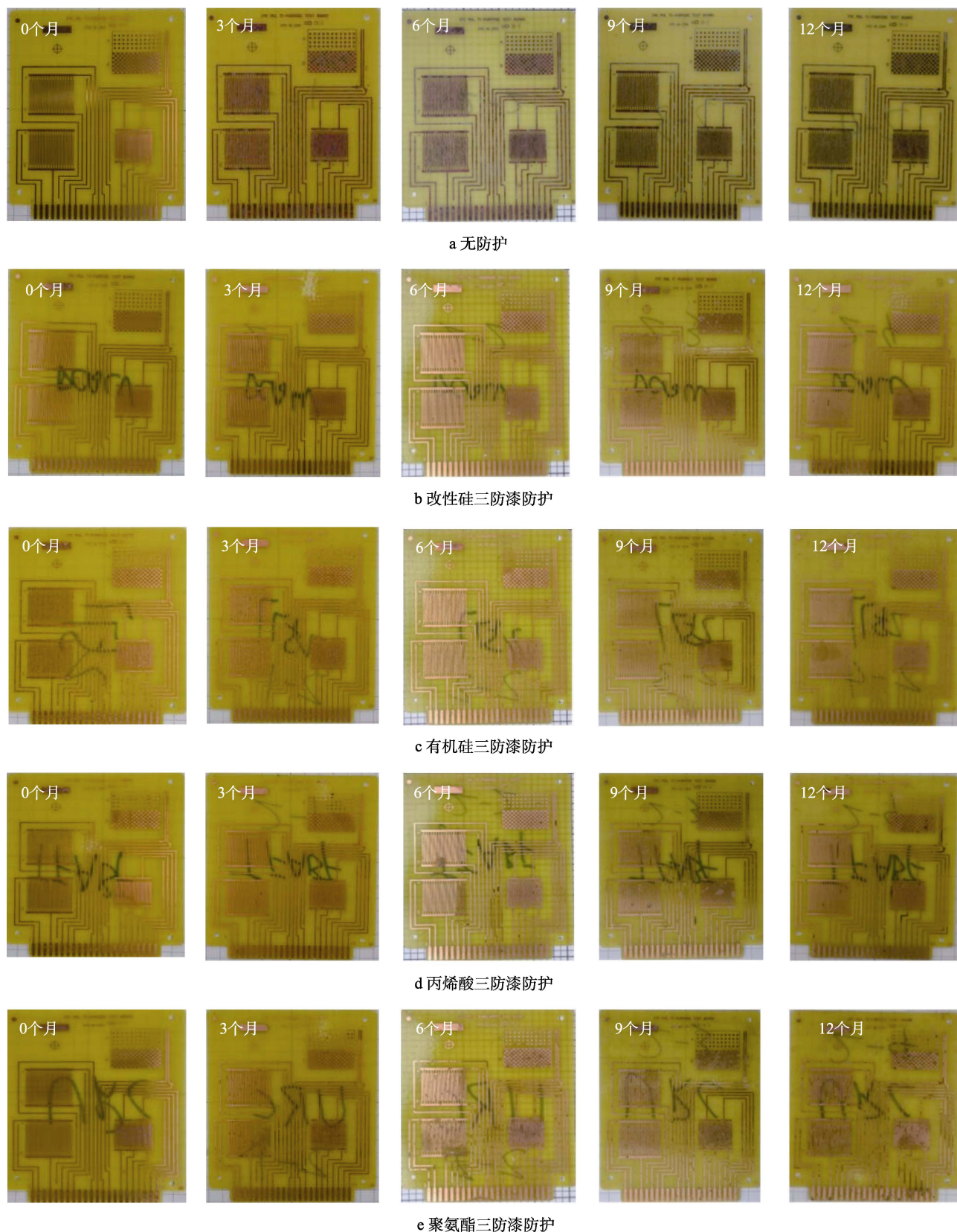


图2 印制电路板试件各周期宏观形貌

Fig.2 Macroscopical morphology of PCB samples in each cycle: a) no protection; b) modified silicone three-proofing paint protection; c) organic silicon three-proofing paint protection; d) acrylic three-proofing paint protection; e) polyurethane three-proofing paint protection

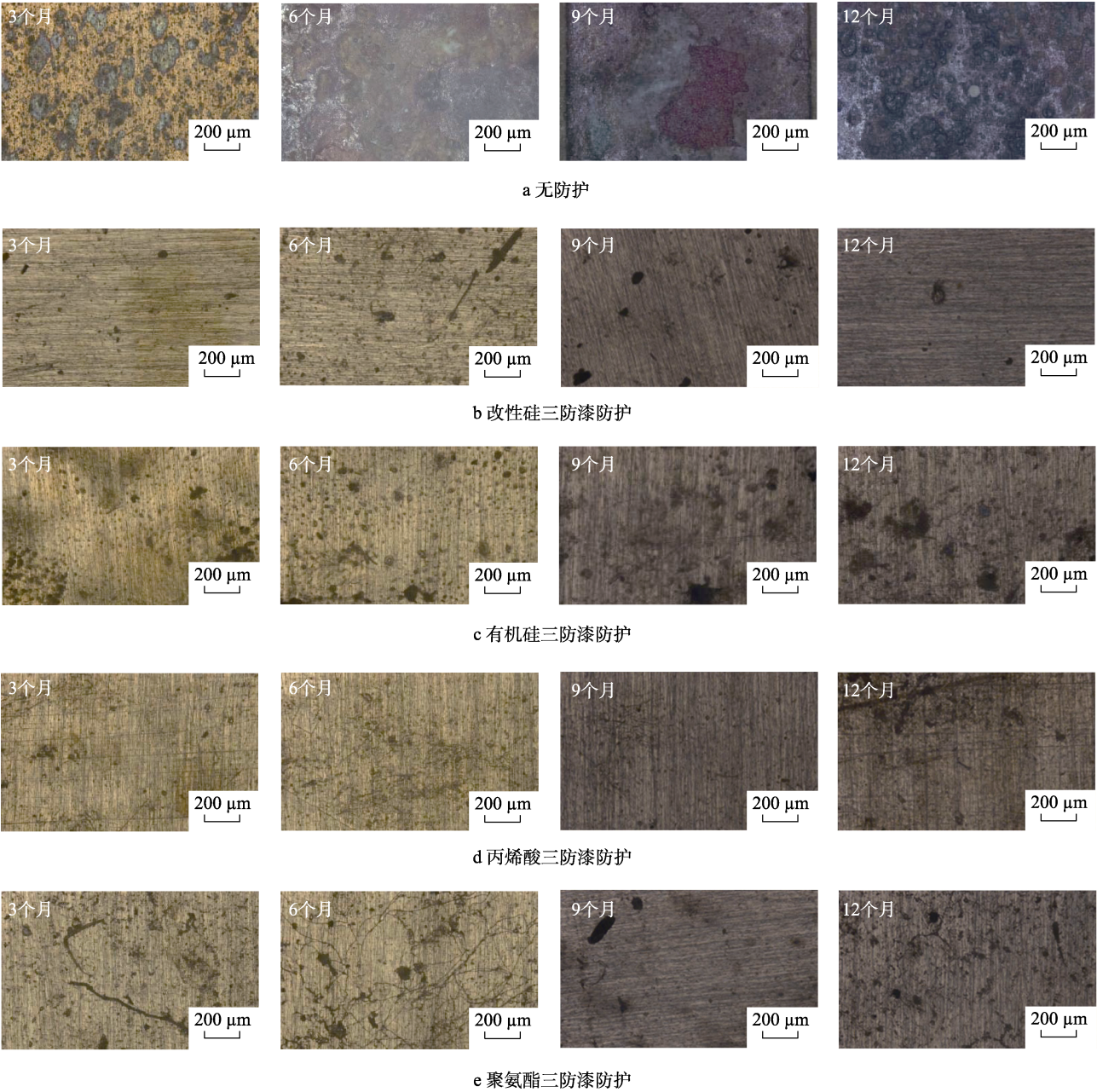


图 3 印制电路板试件各周期局部形貌

Fig.3 Local morphology of PCB samples in each cycle: a) no protection; b) modified silicone three-proofing paint protection; c) organic silicon three-proofing paint protection; d) acrylic three-proofing paint protection; e) polyurethane three-proofing paint protection

2.4 外观评级

棚下环境试验 12 个月后，印制电路板三防漆防护试件漆膜外观的评级见表 2。可以看出，印制电路板漆膜的主要失效模式为起泡和生锈，改性硅三防漆、有机硅三防漆的综合评级分别为 2 级和 1 级，丙烯酸三防漆、聚氨酯三防漆的综合评级为 3 级。棚下环境各周期试验后，印制电路板表面涂层光泽度变化如图 5 所示。可以看出，随着试验时间的增加，光泽度总体呈下降的趋势。试验表明，棚下环境丙烯酸三防漆、聚氨酯三防漆漆膜的耐老化性能较差，有机硅

三防漆漆膜最好，聚氨酯三防漆漆膜光泽度下降最大，下降率在 40%以上。

2.5 绝缘电阻与导通电阻

经测试，随腐蚀周期增大，无防护印制电路板及有机硅三防漆、改性硅三防漆、丙烯酸三防漆、聚氨酯三防漆防护印制电路板绝缘电阻的波动程度较小，均 > 10 GΩ，表明绝缘性能良好。不同试验周期下，印制电路板导通电阻的变化如图 6 所示。从整体上看，随试验周期增大，有机硅三防漆（2577）、改性硅三防漆（DCALV）、聚氨酯三防漆（URC）、丙烯

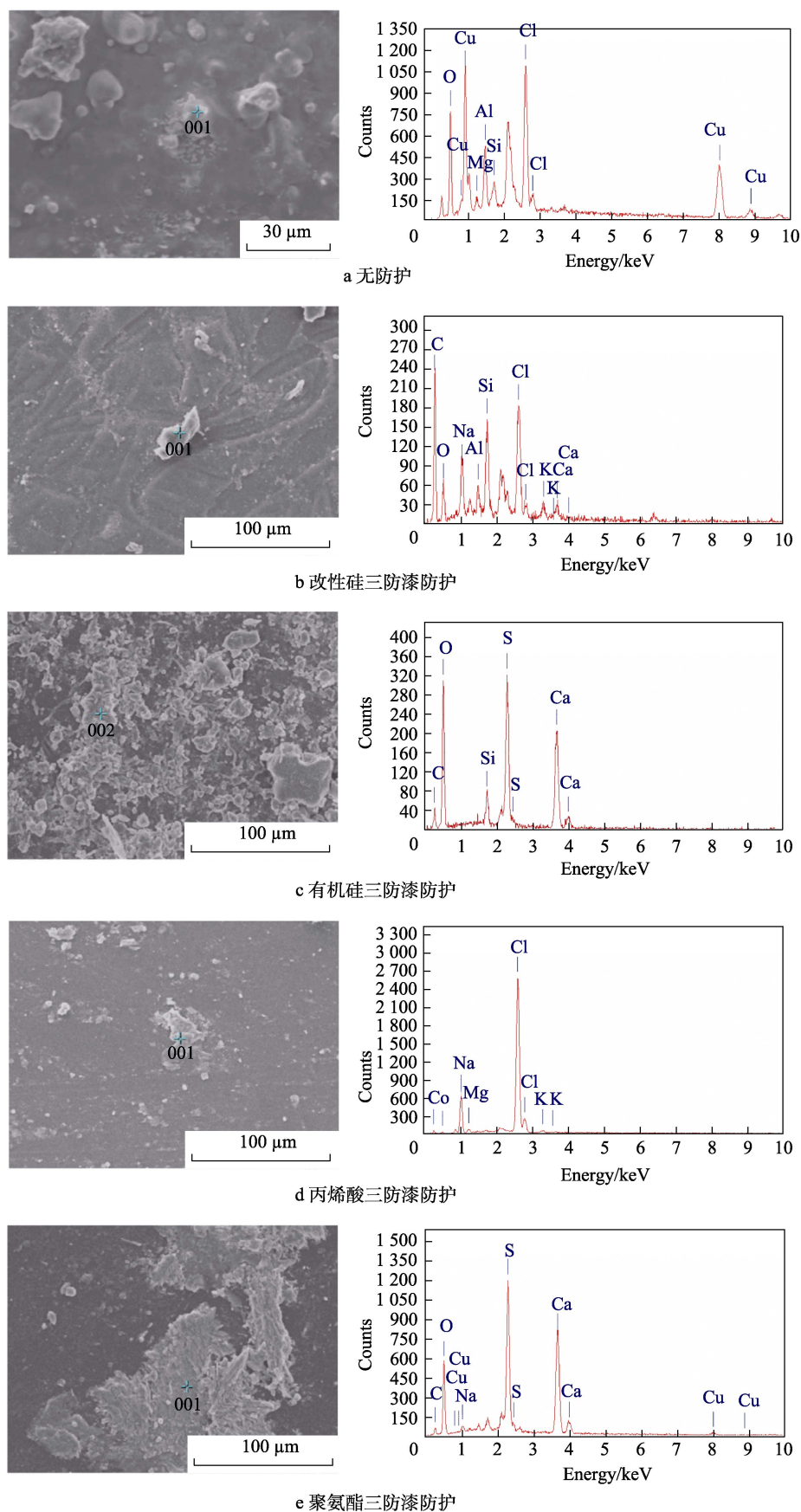


图4 试验12个月后印制电路板试件微观形貌及能谱分析

Fig.4 Micro-morphology and energy spectrum analysis of PCB samples after 12 months of experiment: a) no protection; b) modified silicone three-proofing paint protection; c) organic silicon three-proofing paint protection; d) acrylic three-proofing paint protection; e) polyurethane three-proofing paint protection

表 2 棚下环境不同防护印制电路板外观评级
Tab.2 Rating of appearance of different PCB in shed environment

防护类型	单项等级							综合评级
	变色	粉化	开裂	起泡	生锈	剥落	长霉	
改性硅三防漆	1	0	S0	2	1	S0	0	2
有机硅三防漆	1	0	S0	1	1	S0	0	1
丙烯酸三防漆	1	0	S0	2	2	S0	0	3
聚氨酯三防漆	1	0	S0	4	2	S0	0	3

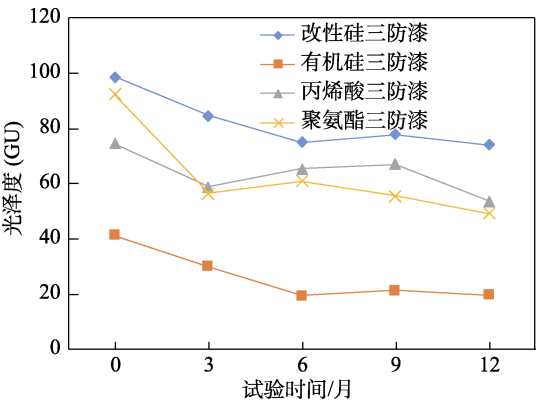


图 5 棚下环境三防漆各周期光泽度的变化趋势
Fig.5 Change trend of gloss of three-proof paint in different periods in shed environment

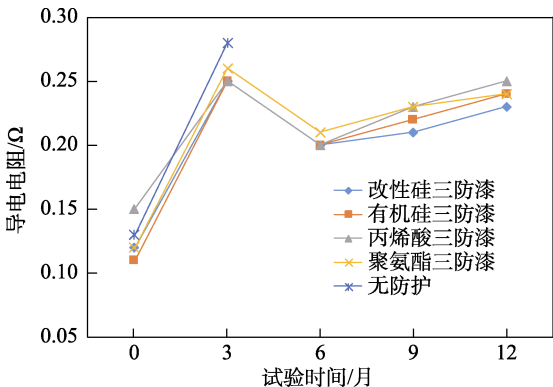


图 6 棚下环境各试件不同周期导电电阻的变化
Fig.6 Change diagram of on-resistance of each sample in different period in shed environment

酸三防漆 (TFABF) 防护的印制电路板的导电电阻也逐渐增大, 并且相差不大, 但仍小于无防护的印制电路板。表明施加的涂层有一定的保护作用, 试验期间未对导电电阻有较大影响。无防护处理的印制电路板在试验进行 1 周期后, 导电电阻变得超过量程, 推测是因为棚下环境恶劣, 无涂层保护的电路板很快因为 Cu 导线的腐蚀而失效。

2.6 介质耐压

棚下环境不同周期印制电路板的介质耐压测试情况见表 3。可以看出, 丙烯酸三防漆、有机硅三防漆、改性硅三防漆防护的印制电路板试验前后介质耐压性能未发生变化, 表明这 3 种漆的防腐性能较

好, 在整个试验周期内均能使电路板的电气性能保持稳定。聚氨酯三防漆防护的印制电路板多周期测试结果为“击穿”, 表明该种防护在岛礁气候棚下环境服役易被破坏。无防护处理的电路板介质耐电压值试验前和 1 周期为“击穿”, 2、3、4 周期为“通过”。主要因为棚下环境中, 无防护电路板表面 Cu 导线受高温高湿及高盐雾影响, 快速形成腐蚀产物膜, 腐蚀产物膜导电性差, 能耐受更高的电压, 所以在介质耐压检测中显示出“通过”的结果。

表 3 棚下试验不同周期各试件介质耐压
Tab.3 Pressure resistance of each sample in different period in shed environment

防护类型	试验周期				
	试验前	1	2	3	4
无防护	击穿	击穿	通过	通过	通过
改性硅三防漆	通过	通过	通过	通过	通过
有机硅三防漆	通过	通过	通过	通过	通过
丙烯酸三防漆	通过	通过	通过	通过	通过
聚氨酯三防漆	通过	击穿	击穿	击穿	击穿

2.7 品质因素

品质因素是绝缘材料介电损耗因数的倒数, 介电损耗越小, 介质的绝缘性能越好。棚下环境不同周期印制电路板防护层品质因素的变化如图 7 所示。可以看出, 棚下试验中, 涂覆防护的 4 种印制电路板试样各周期的品质因数数值总体上呈现下降的趋势。推测其主要原因是, 印制电路板涂覆的三防漆随时间的推移出现了起泡、破损等劣化特征。

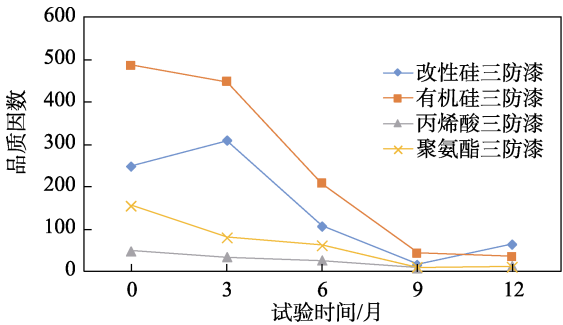


图 7 棚下环境各试件不同周期品质因数变化
Fig.7 Change of quality factor of each sample in different period in shed environment

3 结论

通过对印制电路板三防防护后在濒海棚下环境的腐蚀行为、腐蚀机理及防护性能研究,可得到以下主要结论。

1) 无防护处理印制电路板在恶劣的棚下环境腐蚀严重,很快出现了明显的腐蚀痕迹与腐蚀产物,电气性能也显著下降。

2) 改性硅三防漆、有机硅三防漆防护的印制电路板,在整个试验周期内,腐蚀程度轻微,电气性能随腐蚀时间的增加产生一定波动,但仍在正常范围内,电路板表面涂层也仅发生轻微老化。

3) 在棚下环境试验过程中,丙烯酸三防漆防护的印制电路板防护性能不稳定,导致印制电路板出现腐蚀现象,品质因数总体低于改性硅三防漆、有机硅三防漆防护电路板,表明该种涂层在棚下环境中的防护力度不够。

4) 聚氨酯三防漆防护的印制电路板虽然电气测试性能表现良好,但在试验过程中涂层出现太多破损、起泡等缺陷,铜导线出现异常生锈现象,介质耐压测试多周期呈现击穿状态。

由此可知,濒海或岛礁区域高温、高湿、高盐雾恶劣腐蚀环境中的印制电路板,可优先选择涂覆有机硅三防漆、改性硅三防漆作为防护手段。

参考文献:

- [1] 电子科学研究院. 电子设备三防技术手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
Institute of Electronic Sciences. Technical Manual for Electronic Equipment[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2000.
- [2] 王洪伦, 张东玖, 王俊, 等. 湿热盐雾大气环境典型局部环境监测与防腐对策[J]. 装备环境工程, 2021, 18(2): 95-102.
WANG H L, ZHANG D J, WANG J, et al. Typical Local Environmental Monitoring and Anti-Corrosion Countermeasures in Damp and Hot Salt Spray Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(2): 95-102.
- [3] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU S, LI J N, WANG L. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59-63.
- [4] 黄爱珍, 陆玉凤. PCB短路失效分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(S1): 58-62.
HUANG A Z, LU Y F. Analysis of PCB Short Circuit Failure[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(S1): 58-62.
- [5] YI P, XIAO K, DING K K, et al. Surface Failure Mechanism of PCB-ENIG in Typical Outdoor Atmospheric Environments[J]. Materials Research Bulletin, 2017, 91: 179-188.
- [6] 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.
- [7] 谭晓明, 战贵盼, 张丹峰, 等. 加速腐蚀试验下 PCB-ENIG 的腐蚀电化学行为[J]. 表面技术, 2021, 50(10): 345-352.
TAN X M, ZHAN G P, ZHANG D F, et al. Corrosion Electrochemical Behaviour of PCB-ENIG in Accelerated Test Environment[J]. Surface Technology, 2021, 50(10): 345-352.
- [8] 马静, 章文捷. 军用电子设备印制电路板的防护[J]. 电子工艺技术, 2004, 25(3): 109-111.
MA J, ZHANG W J. Defending of Printed Circuit in Military Electrons Equipments[J]. Electronics Process Technology, 2004, 25(3): 109-111.
- [9] 胡长明. 电子设备防腐蚀设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
HU C M. Anti-Corrosion Design of Electronic Equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [10] 庄绪法, 李培培, 唐冉, 等. 海环境下风机防护措施研究[J]. 环境技术, 2021, 39(2): 35-40.
ZHUANG X F, LI P P, TANG R, et al. Study on Protective Measures of Fans in Marine Environment[J]. Environmental Technology, 2021, 39(2): 35-40.
- [11] 范民, 周广宴. 军用电子设备整机三防技术研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(4): 72-75.
FAN M, ZHOU G Y. Research on Three-Proof Technology of Whole Set Military Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(4): 72-75.
- [12] 王春辉. 电子装备防护涂层体系环境试验技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
WANG C H. Environmental Test Technology of Protective Coating System for Electronic Equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2021.
- [13] 杨唐绍, 钟付先, 张红兵. 军用电子 PCBA 三防涂层耐湿热性能的影响因素[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(1): 29-31.
YANG T S, ZHONG F X, ZHANG H B. Influence Factors on Wet-Heat Resistant Property of Three Proofing Coating of Military Electronic PCBA[J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(1): 29-31.
- [14] 曲利新. 军用电路板的一种防护方法[J]. 现代电子技术, 2009, 32(19): 184-186.
QU L X. Defending Method of Printed Circuit Board for Military Use[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 32(19): 184-186.
- [15] 陆勇. PCB 组件表面三防涂覆材料性能研究[J]. 电子机

- 械工程, 2000, 16(5): 59-61.
- LU Y. A Performance Test on PCB Surface's Coating[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2000, 16(5): 59-61.
- [16] 王军军, 王贤明, 吴连锋, 等. 印制电路板用三防涂层材料的研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2021, 24(7): 17-20.
- WANG J J, WANG X M, WU L F, et al. Research Progress of Conformal Coating Material for Printed-Circuit Board[J]. Modern Paint & Finishing, 2021, 24(7): 17-20.
- [17] 朱旺. 海洋性气候条件下的三防工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2010, 31(1): 54-57.
- ZHU W. Study of Three Proofings Technology under Maritime Climate Condition[J]. Electronics Process Technology, 2010, 31(1): 54-57.
- [18] 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.
- [19] 蒋海峰, 沈艳, 包晓云, 等. 紫外光固化三防漆在航天电子产品中的应用[J]. 制导与引信, 2017, 38(4): 53-58.
- JIANG H F, SHEN Y, BAO X Y, et al. The Application of UV Curable Coatings on Aerospace Electronic Products[J]. Guidance & Fuze, 2017, 38(4): 53-58.
- [20] 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. Protective Performance of Corrosion Inhibitors on PCB in Tropical Marine Atmosphere Environment[J]. Journal of Naval Aviation University, 2022, 37(6): 495-500.
- [21] YI P, XIAO K, DING K K, et al. In Situ Investigation of Atmospheric Corrosion Behavior of PCB-ENIG under Adsorbed Thin Electrolyte Layer[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 1146-1154.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 张勇, 陈跃良, 樊伟杰, 等. ×飞机半封闭部位局部环境谱当量加速关系研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(1): 24-29.
- ZHANG Y, CHEN Y L, FAN W J, et al. Equivalent Accelerated Relationship of Local Environment Spectrum of Semi-Closed Parts of a Plane[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(1): 24-29.
- [25] 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.
- [26] 郑会保. 有机涂层环境适应性及表征技术研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2014, 43(6): 51-56.
- ZHENG H B. Environmental Adaptability and Evaluation Technology of Organic Coatings[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2014, 43(6): 51-56.
- [27] 黄萍, 张静. 印制电路组件三防涂覆工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2007, 28(6): 324-326.
- HUANG P, ZHANG J. Technical Research Work on the Three-Defended Coating Applied on Printed-Circuit-Module[J]. Electronics Process Technology, 2007, 28(6): 324-326.