

热带雨林环境中典型霉菌对 PCB-HASL 腐蚀行为的影响

李雪鸣¹, 胡玉婷¹, 易盼¹, 白子恒¹, 肖葵¹,
董超芳¹, 卢琳¹, 李晓刚¹, 魏丹²

(1.北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;
2.中国科学技术协会学会服务中心, 北京 100081)

摘 要: **目的** 探究热带雨林环境中典型霉菌作用下 PCB-HASL 的腐蚀机制。**方法** 将 PCB-HASL 试样灭菌后放入机箱, 置于西双版纳户外进行 2 年的暴露试验, 经不同周期取回, 分析观察试样表面腐蚀情况。将筛选出的典型霉菌孢子液喷洒在无菌试样上, 置于湿热环境中, 通过激光共聚焦显微镜 (3D LSCM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 分析试样表面形貌和成分, 并观察霉菌的生长情况, 使用电化学工作站及扫描开尔文探针 (SKP) 对 PCB-HASL 表面不同周期霉菌作用下的腐蚀电位进行分析。**结果** 随着户外暴露周期的增加, PCB-HASL 表面腐蚀面积逐渐增加, 表面伏打电位先上升后下降。EDS 能谱分析结果表明, 腐蚀产物中主要含 Sn 58.88%, O 30.93%, 腐蚀产物主要为 Sn 的氧化物。木贼镰孢菌 (*Fusarium equiseti*) 和光轮层炭壳菌 (*Daldinia eschscholtzii*) 覆盖区域腐蚀程度严重, 腐皮镰刀菌 (*Fusarium solani*) 菌丝生长旺盛, 中期腐蚀电位明显降低, 由 -0.3 V 降至 -0.52 V 。**结论** 西双版纳热带雨林环境中对 PCB-HASL 腐蚀作用显著的典型霉菌为 *Fusarium equiseti*、*Daldinia eschscholtzii* 和 *Fusarium solani*, 在湿热环境下会造成 PCB-HASL 的腐蚀, 其腐蚀机制主要为薄液膜下的电化学腐蚀。

关键词: PCB-HASL; 霉菌; 腐蚀; 热带雨林; 电化学; 腐蚀机制

中图分类号: TG172.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0126-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.017

Effect of Typical Molds on PCB-HASL Corrosion Behaviors in Tropical Rainforest Environment

LI Xue-ming¹, HU Yu-ting¹, YI Pan¹, BAI Zi-heng¹, XIAO Kui¹, DONG Chao-fang¹,
LU Lin¹, LI Xiao-gang¹, WEI Dan²

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

2. Service Center for Societies, China Association for Science and Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the corrosion mechanisms of PCB-HASLs under typical molds in tropical rainforest. The PCB-HASL samples were sterilized and placed in a cabinet for outdoor exposure for 2 years in Xishuangbanna. The corro-

收稿日期: 2018-05-08; 修订日期: 2018-07-04

Received: 2018-05-08; Revised: 2018-07-04

基金项目: 国家自然科学基金面向项目 (51671027)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51671027)

作者简介: 李雪鸣 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Biography: LI Xue-ming (1994—), Female, Master, Research focus: corrosion and protection of materials.

通讯作者: 肖葵 (1969—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为材料腐蚀与防护。

Corresponding author: XIAO Kui (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of materials.

sion behaviors of samples taken back from different periods were observed. The selected typical molds spores were sprayed on sterile samples and placed in a hot and humid environment. Morphology, composition and growth of molds were observed and analyzed by laser scanning confocal microscope (3D LSCM), scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS). The surface potential of the PCB-HASL samples under different types of molds in different times were analyzed by electrochemical workstation and scanning kelvin probe (SKP). With the increase of exposure time in the outdoor, the corrosion area of the PCB-HASL gradually increased. The surface potential of the PCB-HASL increased at first and then decreased. The results of EDS showed that the corrosion product mainly contained 58.88% of Sn and 30.93% of O, and the corrosion product was mainly oxide of Sn. Corrosion beneath the coverage of *Fusarium equiseti* and *Daldinia eschscholtzii* was serious. *Fusarium solani* grew vigorously which caused a significant reduction of corrosion potential from -0.3 V to -0.52 V in the mid-term. The typical molds having significant effects on the corrosion processes of PCB-HASL in the rainforest of Xishuangbanna are *Fusarium equiseti*, *Daldinia eschscholtzii* and *Fusarium solani*, which can corrode the PCB-HASL in such a hot and humid environment. The corrosion mechanism is mainly the electrochemical corrosion under the thin liquid film.

KEY WORDS: PCB-HASL; mold; corrosion; rainforest; electrochemical; corrosion mechanism

近年来,随着电子产品不断向轻、薄、小、高性能、多功能方向发展,PCB 上电子元器件也趋于小型化、高集成、高密度^[1],这种发展趋势进一步增加了 PCB 的腐蚀风险。因此,实际使用中,需对 PCB 铜箔进行表面处理,以减少铜基底的氧化腐蚀,同时改善其导电性和焊接性能。众多表面处理工艺中,无铅热风整平喷锡(HASL)技术因可焊性良好,成本低廉而被广泛应用^[2]。

微生物无处不在,微生物腐蚀几乎覆盖所有现用材料。材料腐蚀中,微生物腐蚀约占 20%^[3]。目前对微生物腐蚀的研究主要集中于细菌造成的腐蚀,且多是微生物对金属及合金的腐蚀^[4-9]。K. M. Deen 等^[8]研究发现, *Bacillus megaterium bacteria* 使 Al-Cu 合金表面发生点蚀,其力学性能显著下降。M. A. Javed 等^[9]发现,亚铁离子促进硫酸盐还原菌中后期在碳钢表面的附着,并产生大量胞外聚合物。近几年关于 PCB 在霉菌作用下的腐蚀研究刚刚展开,Yi Pan 等^[10]发现霉菌在通有直流电的 PCB 上生长良好,并促进 PCB 上电化学迁移进程,加剧其短路故障。邹士文等^[11]发现霉菌的生长代谢作用能促进 PCB-HASL 局部腐蚀的发生,霉菌菌落区域作为阳极,优先发生腐蚀。霉菌生长要求环境温度及相对湿度较高,其生长繁殖过程中产生大量菌丝体,菌丝体在生长过程中吸湿产酸,极易对金属材料造成腐蚀。在西双版纳热带雨林气候下服役的 PCB 板极易滋生霉菌,霉菌在 PCB 上生长繁殖,造成电子设备性能劣化、元器件失效及部件失灵等严重后果。目前对 PCB 的腐蚀研究方向多集中在相对湿度、温度、环境污染物、尘土等方面^[12-18],而对霉菌作用下 PCB 的腐蚀行为研究较少,这一领域亟待深入研究。

文中采用激光共聚焦显微镜及扫描电镜观察 PCB-HASL 试样腐蚀形貌,采用电化学工作站分析其腐蚀微区电位及极化曲线。通过研究木贼镰孢菌(*Fusarium equiseti*)、光轮层炭壳菌(*Daldinia*

eschscholtzii)和腐皮镰刀菌(*Fusarium solani*)三种霉菌对 PCB 的腐蚀作用,揭示了湿热条件下西双版纳典型霉菌对 PCB-HASL 的腐蚀机理。

1 试验

1.1 试样准备

试验选择热风整平无铅喷锡 PCB 作为研究材料,PCB 板基本参数:基板为 FR-4,板厚 0.8 mm,铜厚 25~30 μm ,热风整平无铅喷锡保护层厚度为 0.1 μm 。试验前,试样用去离子水超声清洗 5 min,再用酒精超声清洗 5 min,置于无菌操作台上紫外线灭菌。部分试样密封送往西双版纳测试站,其余试样密封备用。

1.2 霉菌腐蚀试验

对西双版纳暴露试样上的霉菌进行筛选,吸取筛选后的几种霉菌孢子悬浊液各 100 μL ,分别涂布在 90 mm 大小的 PDA 培养皿中。然后在每个培养皿中放一个 PCB-HASL 试样,再用封口膜密封培养皿,放入 37 $^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱中培养 7 天后,观察试样腐蚀情况。将配制好的孢子悬液放置在温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ 、转速为 130 r/min 的摇床上培养 4 h 后备用。将经过灭菌的试样放置在培养皿中,用移液枪吸取 2 mL 培养好的孢子悬液,均匀喷洒到培养皿中的 PCB-HASL 试样上,最后用滤菌膜盖好,并放置在温度为 28 $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 90% 的湿热箱中。经过不同周期后取样进行电化学分析(周期分别为 3、7、11、16、23 天)。

1.3 性能分析

1) pH 值测试。配制液体 MEA 培养基(pH 值为 4.635),配方为:麦芽糖浸粉 20 g、胰蛋白胨 1 g、葡萄糖 20 g、蒸馏水 1000 mL。高压锅灭菌,用擦镜纸过滤 3 种霉菌的孢子悬液,将稀释到一定浓度(3.75×10^5 个/L)的孢子悬液放在摇床上培养 2 h。

吸取一定体积的菌悬液到三角瓶中,将三角瓶放在摇床上培养 6 天,将菌丝抽滤掉,测试溶液的 pH 值。

2) 表面形貌分析。利用 Keyence VHX-2000 型体式显微镜和 FEI Quanta 250 型环境扫描电镜观察试样表面和截面腐蚀形貌,结合 Ametek Apollo-X 型 EDX 能谱分析仪对截面元素分布进行分析测试。

3) SKP 分析。采用 PAR M370 扫描电化学工作站对试样进行 SKP 测试,探针到试样表面距离为 $(100 \pm 2) \mu\text{m}$,振动频率为 80 Hz,振幅为 $30 \mu\text{m}$,扫描模式为 Step Scan 面扫,区域大小 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,实验室环境控制温度为 25°C ,相对湿度为 60%。

4) 电化学分析。利用 GAMARY 电化学工作站对试样进行极化曲线测定,采用三电极体系,PCB-HASL 试样为工作电极,Pt 片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极。

2 结果及分析

2.1 西双版纳霉菌鉴定结果

西双版纳环境中,暴露于 PCB-HASL 电路板上

霉菌的 DNA (ITS 序列法) 鉴定结果表明,西双版纳环境中霉菌种类繁多,主要为: *Fusarium equiseti* (木贼镰刀菌)、*Daldinia eschscholtzii* (碳轮菌属)、*Fusarium solani* (腐皮镰刀菌)、*Aspergillus fumigatus* (烟曲霉)、*Cladosporium cladosporioides* (枝孢霉)、*Fusarium verticillioides* (串珠镰刀菌)、*Sarocladium implicatum* (帚枝霉属) 等霉菌。

2.2 PCB-HASL 试样腐蚀形貌分析

图 1 为 PCB-HASL 试样在西双版纳户外暴露不同周期后的宏观形貌。由图 1 可知,电路板暴露 3 个月,PCB-HASL 试样表面腐蚀轻微,仅在局部有少数菌丝体附着。随着暴露周期的推移,PCB-HASL 试样上菌丝附着逐渐增多,出现了菌丝聚集和腐蚀现象。暴露 24 个月,PCB-HASL 试样某些区域菌丝成片状大面积附着,伴有黄褐色腐蚀产物,出现较严重的腐蚀现象。

图 2 为 PCB-HASL 试样在西双版纳户外暴露不同周期后的 SEM 微观形貌。可以看出,PCB-HASL 表面覆盖有较多的菌丝体与霉菌孢子。暴露 3 个月后

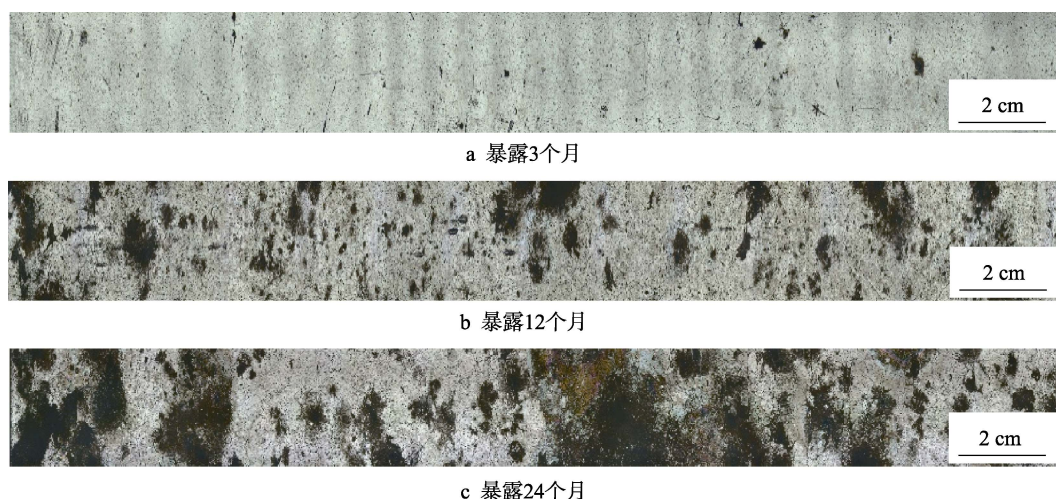


图 1 不同周期电路板的 3D 激光共聚焦图像

Fig.1 3D LSCM morphologies of circuit board samples for various periods of exposure: a) 3 months; b) 12 months; c) 24 months

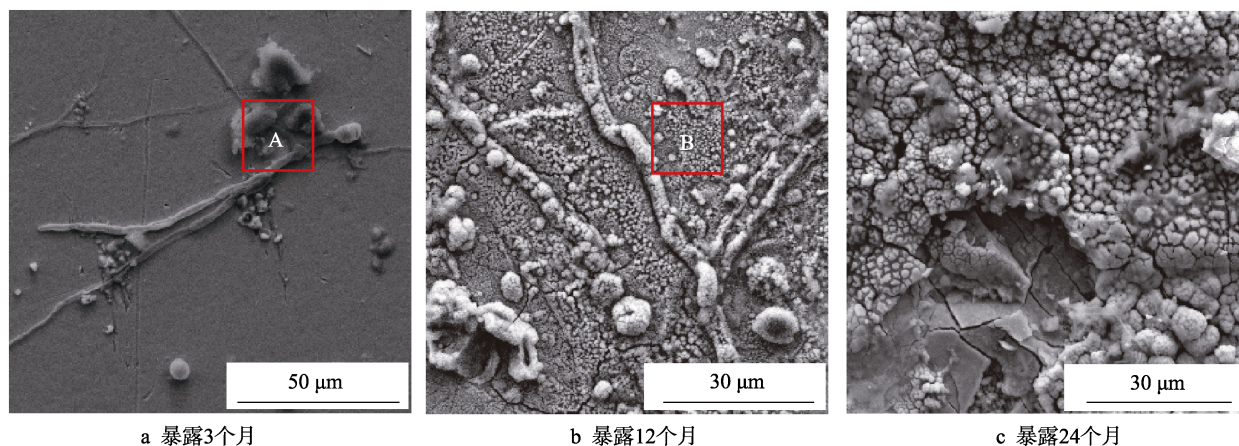


图 2 PCB-HASL 试样在户外暴露不同周期后的 SEM 微观形貌

Fig.2 SEM images of PCB-HASL samples for various periods of exposure outdoors: a) 3 months; b) 12 months; c) 24 months

(图 2a), PCB-HASL 表面即附着了少量的菌丝体。区域 A 的 EDS 分析显示(见表 1),其主要元素为 C、N 和 O,与霉菌生物组分一致。暴露 12 个月后(图 2b),菌丝体分化,生成大量成簇的霉菌孢子。区域 B 的 EDS 结果表明,腐蚀产物主要组分为 Sn 的氧化物/氢氧化物。暴露 24 个月后(图 2c),由于孢子在生长代谢过程中不断吸湿产酸,其附着区域优先腐蚀,Sn 层溶解生成的大量金属离子反过来对霉菌孢子产生一定的毒害作用,造成其大量死亡,并被腐蚀产物覆盖。

表 1 PCB-HASL 试样腐蚀产物 EDS 分析结果
Tab.1 EDS results of corrosion products for PCB-HASL samples at%

Elements	C	O	Sn	N	Na/Mg/Al/Si, etc.
A	25.17	41.51	18.36	12.65	2.32
B	10.19	30.93	58.88	—	—

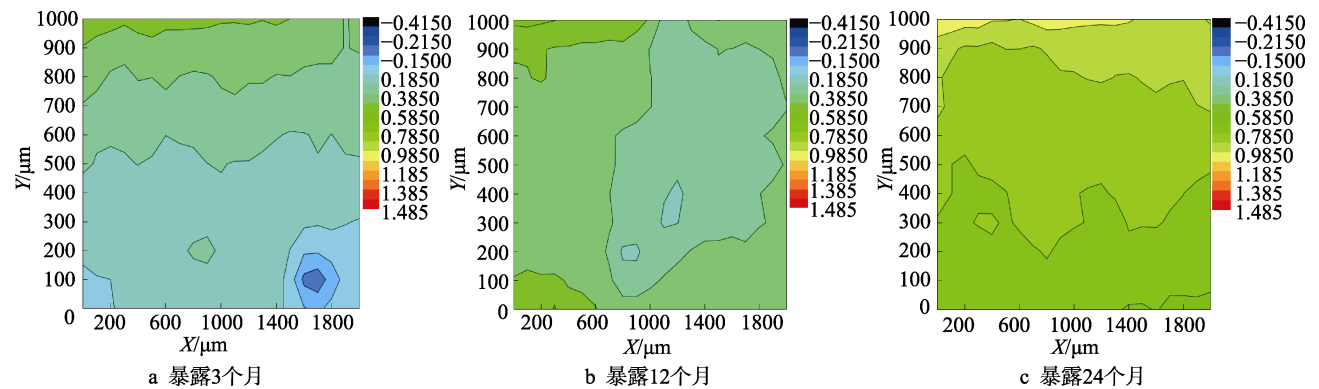


图 3 PCB-HASL 试样在户外暴露不同周期后表面伏打电位图
Fig.3 Surface Kelvin potential distribution of PCB-HASL samples for various periods of exposure outdoors: a) 3 months; b) 12 months; c) 24 months

2.4 典型霉菌对 PCB-HASL 试样的腐蚀机理分析

2.4.1 腐蚀形貌分析

如图 4 所示, *Fusarium equiseti* 菌丝覆盖区域, Sn 发生了较严重的腐蚀现象。*Daldinia eschscholtzii* 菌丝在电路板上生长旺盛,且菌丝聚集中心出现了腐蚀产物凸起。附着在电路板上的 *Fusarium solani* 菌丝较多,证明该霉菌在 PCB-HASL 试样上生长旺盛。菌丝附着区域周围腐蚀较严重,会导致镀层出现开裂现象,使基底金属裸露在腐蚀介质中,表面镀层对基底的保护作用降低,从而加速了基底金属的腐蚀。

2.4.2 极化曲线分析

如图 5a 所示,在 *Fusarium equiseti* 作用下,随着时间的延长,PCB-HASL 试样的腐蚀电位呈现降低趋势。3~16 天,试样腐蚀电位有一定波动降低缓慢;16 天后,试样腐蚀电位急剧降低。对比图 5d 无菌作用下的试样的腐蚀电位发现,试验后期,有菌作用的

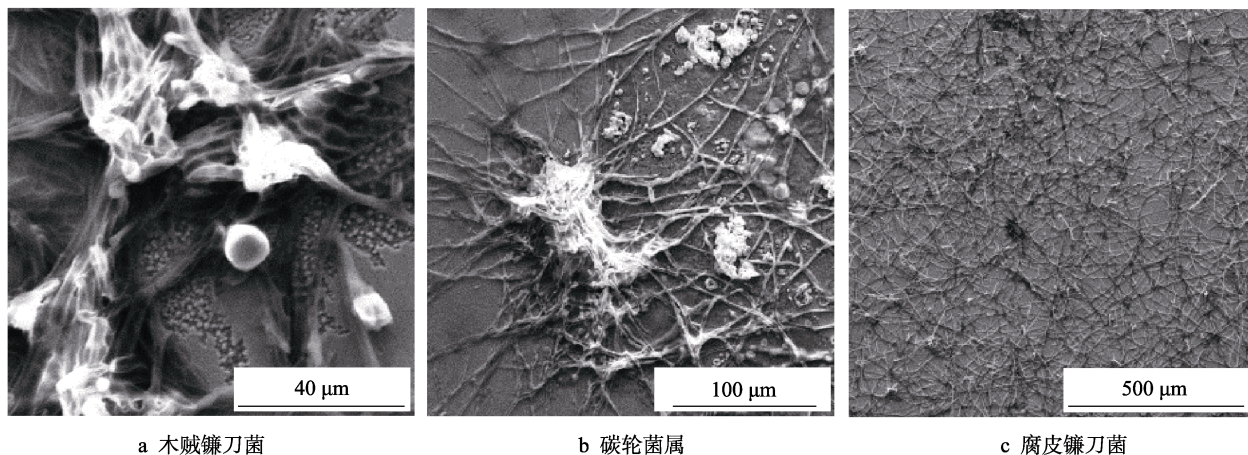
2.3 PCB-HASL 的腐蚀 SKP 分析

对西双版纳户外暴露不同周期后 PCB-HASL 试样表面的 Kelvin 电位分布进行了测定,如图 3 所示(冷色调表示伏打电位值较低,暖色调则表示伏打电位值较高)。由图 3 可知,试样的表面伏打电位图整体偏向暖色调,表面 SKP 电位分布均呈现区域性。户外暴露 12 个月后,PCB-HASL 试样伏打电位值呈现上升现象。户外暴露 24 个月后,试样表面伏打电位值整体进一步升高,且局部腐蚀面积逐渐扩大。因此,随着暴露周期的推移,西双版纳地区 PCB-HASL 试样表面电位整体上呈不断增大趋势。这可能是由于暴露初期吸附的菌丝体或霉菌孢子的代谢活动加速了试样腐蚀,而霉菌及腐蚀产物在试样表面生长堆积,抑制电子逸出过程,从而使得表面电位升高。表面电位分布不均,主要是微生物菌丝或孢子在局部区域吸湿产酸等引发局部腐蚀所致。

试样腐蚀电位比无菌作用试样低。出现这种现象的原因是菌体的附着和新陈代谢产生的酸性物质导致试样表面腐蚀活性增大,腐蚀电位降低,腐蚀倾向增大。

如图 5b 所示, *Daldinia eschscholtzii* 作用下的 PCB-HASL 试样在初期腐蚀电位较高,随着时间的延长,腐蚀电位出现降低现象,特别是最后一个周期,腐蚀电位急剧降低。这可能是由于 *Daldinia eschscholtzii* 的新陈代谢作用产生的胞外聚合物中含有酸性物质,从而增大了试样的腐蚀活性,使腐蚀电位急剧降低。对比图 5d 发现,相同周期下, *Daldinia eschscholtzii* 作用下的试样表面腐蚀电位比无菌作用试样低,特别是最后一个周期,两种条件下试样的腐蚀电位差值较大。这表明腐蚀电位的降低可能是由于菌体的附着以及生命代谢活动导致的,菌种附着在表面上改变了试样表面金属活性,腐蚀电位降低,腐蚀倾向增大。

如图 5c 所示,在 *Fusarium solani* 的作用下,试样的腐蚀电位呈现先急剧降低后升高的趋势。初期由



a 木贼镰刀菌

b 碳轮菌属

c 腐皮镰刀菌

图4 对PCB-HASL具有腐蚀作用的菌种作用后试样的电镜图

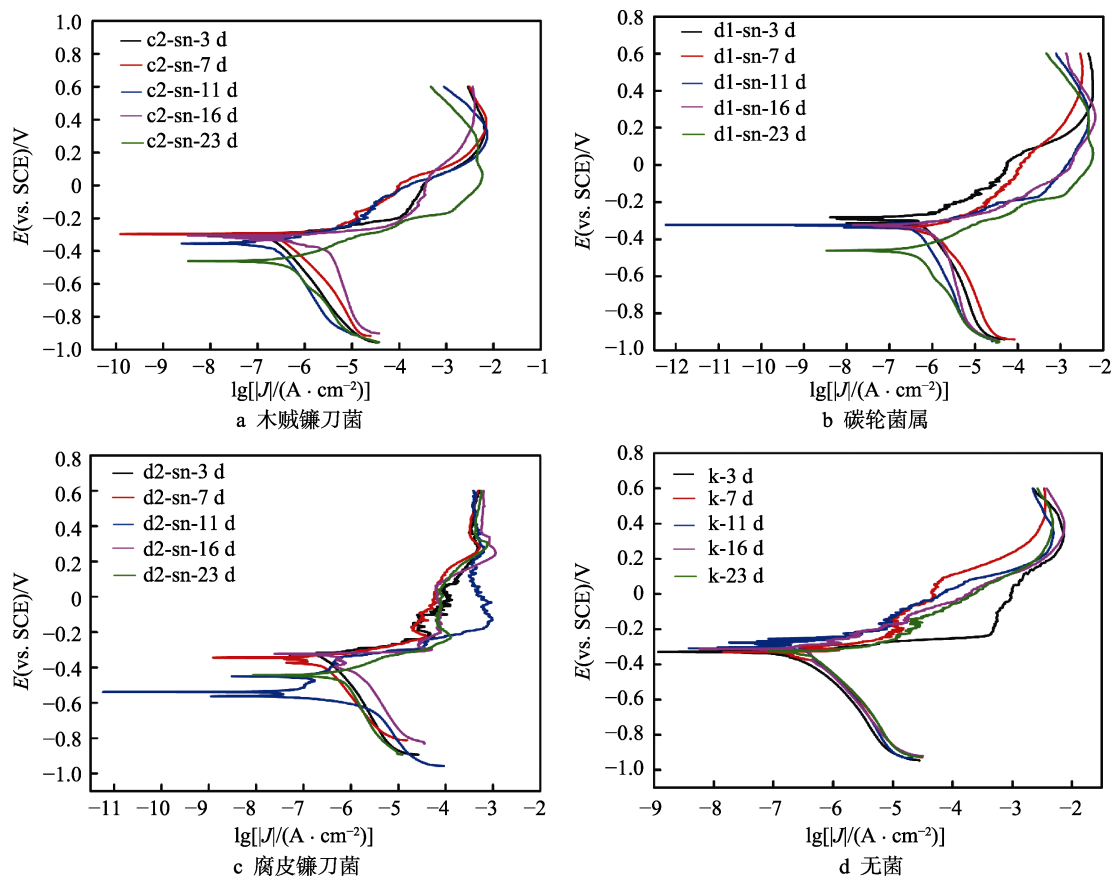
Fig.4 SEM images of samples corroding PCB-HASL under mold: a) *fusarium equiseti*; b) *daldinia eschscholtzii*; c) *fusarium solani*

图5 PCB-HASL 试样试验不同周期后的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of PCB-HASL samples after test for various periods:

a) *fusarium equiseti*; b) *daldinia eschscholtzii*; c) *fusarium solani*; d) sterile

于霉菌的附着,导致试样表面腐蚀活性增大,腐蚀倾向增大,腐蚀电位降低,腐蚀产物增多。到了后期,腐蚀产物对基底起到一定的保护作用,所以腐蚀电位又出现升高现象。对比图5d发现,整体上,有 *Fusarium solani* 作用的试样的腐蚀电位要比无菌条件下的试样低。这也表示,在 *Fusarium solani* 的作用下,试样表面腐蚀活性增大,会加重表面镀层的破坏,从而降低表面镀层对基底的保护作用。

2.4.3 腐蚀机制

PCB-HASL 暴露在有利于霉菌生长的热带雨林环境中时,霉菌孢子附着在 PCB-HASL 表面大量繁殖并迅速生长产生氨基酸、不饱和脂肪酸以及核苷酸等酸性产物。代谢过程中,菌丝分泌胞外酶,降解不被吸收的多聚物为简单化合物,被菌体吸收。这些产物称为胞外聚合物 (EPS)^[10-11], EPS 会与 PCB 上的

金属发生电化学和化学腐蚀反应。PCB-HASL 在热带雨林环境中的腐蚀机制主要是薄液膜下的电化学腐蚀，电极反应如下：

阴极发生氧去极化反应 $1/2\text{O}_2+2\text{H}^++2\text{e}^-\rightarrow\text{H}_2\text{O}$

阳极可能发生的反应 $\text{Sn}\rightarrow\text{Sn}^{2+}+2\text{e}^-$ ， $\text{Cu}\rightarrow\text{Cu}^{2+}+2\text{e}^-$

PCB-HASL 表面的 Sn 镀层很薄且存在微孔，易于孢子附着和生长，并且霉菌菌丝分泌的胞外物质具有较强的粘附性，使其牢牢吸附在 PCB-HASL 表面。菌丝的吸湿作用使金属表面形成薄液膜，EPS 溶入液膜内，形成腐蚀介质。电位偏低的镀层 Sn 作为阳极，而 Cu 基底作为阴极，发生电化学反应，促进表面 Sn 镀层的腐蚀。当反应进行到一定程度时，PCB-HASL 表面该区域的 Cu 基底裸露出来，与酸性腐蚀介质接触，发生化学腐蚀。

测试三种霉菌的体外代谢产物 pH 值，结果见表 2。其中 pH₀ 为灭菌以后 MEA 原液的 pH 值，pH₁ 为添加光轮层炭壳菌（*Daldinia eschscholtzii*）并培养 6 天后溶液的 pH 值，pH₂ 为添加腐皮镰刀菌（*Fusarium solani*）并培养 6 天后溶液的 pH 值，pH₃ 为添加木贼镰孢菌（*Fusarium equiseti*）菌并培养 6 天后的溶液 pH 值。

表 2 三种霉菌的体外代谢产物 pH 值
Tab.2 pH of metabolites of extracorporeal
metabolite from three molds

pH ₀	pH ₁	pH ₂	pH ₃
4.635	3.266	3.444	3.593

从表 2 可以看出，培养 6 天后，溶液的 pH 值均变小，这也间接证明了三种霉菌的代谢产物均呈酸性，使菌液的 pH 值降低。如果在试样上附着有这三种霉菌，菌的代谢产物则会使试样上的腐蚀环境酸化，最终增强活性，使试样耐蚀性降低。在菌落附着区域周围，由于菌种的新陈代谢作用以及菌落附着所造成的氧浓差电池引起 PCB-HASL 表面发生了较严重的腐蚀。

3 结论

1）西双版纳地区的热带雨林气候适于微生物生长繁殖，在暴露过程中，PCB-HASL 试样表面有微生物附着，发生了明显的微生物腐蚀。随试验周期的增加，暴露在热带雨林环境下的 PCB-HASL 表面菌丝附着增多，腐蚀程度逐渐加重。

2）在西双版纳地区湿热环境下生长的众多霉菌中，*Fusarium equiseti*、*Daldinia eschscholtzii* 和 *Fusarium solani* 等典型霉菌的附着导致 PCB-HASL 试样的腐蚀电位降低，耐蚀性能变差。

3）湿热环境及霉菌作用会造成 PCB-HASL 的腐蚀，腐蚀机制主要为薄液膜下的电化学腐蚀。

参考文献：

[1] 田民波. 印制电路板技术的最新发展动向[J]. 印制电路信息, 2015, 23(10): 10-15.
TIAN Min-bo. Recent development trend of PCB technologies[J]. Printed circuit information, 2015, 23(10): 10-15.

[2] 顾曹阳, 钱海峰, 雷卫宁. PCB 板镀层技术研究进展[J]. 电子世界, 2017(17): 13-14.
GU Cao-yang, QIAN Hai-feng, LEI Wei-ning. Reviewed of PCB plating technology[J]. Electronics world, 2017 (17): 13-14.

[3] 黄烨, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699-1713.
HUANG Ye, LIU Shuang-jiang, JIANG Cheng-ying. Microbiologically influenced corrosion and mechanisms[J]. Microbiology China, 2017, 44(7): 1699-1713.

[4] XU D K, LI Y C, SONG F M, et al. Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing bacterium bacillus licheniformis[J]. Corrosion science, 2013, 77: 385-390.

[5] 宋博强, 陈旭, 马贵阳, 等. SRB 对 X70 管线钢在近中性 pH 溶液中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2016, 36(3): 212-218.
SONG Bo-qiang, CHEN Xu, MA Gui-yang, et al. Effect of SRB on corrosion behavior of X70 pipeline steel in near-neutral pH solution[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2016, 36(3): 212-218.

[6] 梅朦, 郑红艾, 高阳, 等. 循环冷却水含铁细菌对 20 碳钢管壁腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(1): 26-29.
MEI Meng, ZHENG Hong-ai, GAO Yang, et al. Effect of iron bacteria on corrosion behavior of 20 carbon steel in circulation cooling system[J]. Materials protection, 2017, 50(1): 26-29.

[7] 姚蓉, 张秋利, 秦芳玲, 等. 铁细菌对 J55 钢腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(3): 206-209.
YAO Rong, ZHANG Qiu-li, QIN Fang-ling, et al. Effect of iron bacteria on corrosion behavior of J55 steel[J]. Corrosion & protection, 2016, 37(3): 206-209.

[8] DEEN K M, YOUSAF M, AFZAL N, et al. Microbiological influenced corrosion attack by bacillus megaterium bacteria on Al-Cu alloy[J]. Materials technology, 2014, 29(5): 269-274.

[9] JAVED M A, STODDART P R, WADE S A. Corrosion of carbon steel by sulphate reducing bacteria: Initial attachment and the role of ferrous ions[J]. Corrosion science, 2015, 93: 48-57.

[10] XIAO K, YI P, DONG C F, et al. Role of mold in electrochemical migration of copper-clad laminate and electroless nickel/immersion gold printed circuit boards[J]. Materials letters, 2018, 210: 283-286.

[11] 邹士文, 肖葵, 董超芳, 等. 霉菌对化学浸银处理印制电路板腐蚀行为影响[J]. 科技导报, 2012, 30(11): 21-26.

- ZOU Shi-wen, XIAO Kui, DONG Chao-fang, et al. Effect of mold on corrosion behavior of immersion silver finished printed circuit board[J]. Science & technology review, 2012, 30(11): 21-26.
- [12] 丁康康, 肖葵, 邹士文, 等. PCB-HASL 电路板在 $\text{NaHSO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_3$ 溶液中的腐蚀电化学行为[J]. 金属学报, 2014, 50(10): 1269-1278.
- DING Kang-kang, XIAO Kui, ZOU Shi-wen, et al. Electrochemical corrosion behavior of PCB-HASL in $\text{NaHSO}_3/\text{Na}_2\text{SO}_3$ solution[J]. Acta metallurgica sinica, 2014, 50(10): 1269-1278.
- [13] XIAO K, GAO X, YAN L D, et al. Atmospheric corrosion factors of printed circuit boards in a dry-heat desert environment: Salty dust and diurnal temperature difference[J]. Chemical engineering journal, 2018, 336: 92-101.
- [14] 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.
- [15] YI P, XIAO K, DING K K, et al. Initial corrosion behavior of a copper-clad plate in typical outdoor atmospheric environments[J]. Electronic materials letters, 2016, 12(1): 163-170.
- [16] XIAO K, YI P, YAN L D, et al. Corrosion behavior of silver-plated circuit boards in a simulated marine environment with industrial pollution[J]. Materials, 2017, 10(7): 762.
- [17] 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 Pan, DING Kang-kang, SONG Wei-feng, et al. Effect of salt spray environment on corrosion behavior of PCB-HASL and PCB-ENIG[J]. Chinese journal of engineering, 2015, 37(12): 1601-1609.
- [18] DING K K, LI X G, XIAO K, et al. Electrochemical migration behavior and mechanism of PCB-ImAg and PCB-HASL under adsorbed thin liquid films[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2015, 25(7): 2446-2457.