

PCB 板电化学迁移现象分析

Analysis of the Electrochemical Migration Phenomena of the PCB Plates

张皓亮

Haoliang Zhang

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518124

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

摘要: 现如今,大量电气设备使用 PCB 板作为控制元件,保障 PCB 板的稳定运行对电气设备可靠运行有着重大意义。论文从理论层面介绍了 PCB 板发生电化学迁移的原理,说明了 PCB 发生电化学迁移导致 PCB 失效的机制,并结合实际案例,分析了工业现场存在的各促成因素对电化学迁移的影响。

Abstract: Nowadays, a large number of electrical equipment use PCB board as control components, to ensure the stable operation of PCB board is of great significance to the reliable operation of electrical equipment. The paper introduces the principle of electrochemical migration on PCB boards from a theoretical perspective, explains the mechanism of PCB failure caused by electrochemical migration, and analyzes the impact of various contributing factors on electrochemical migration in industrial sites through a practical case study.

关键词: PCB; 电化学迁移; 机制

Keywords: PCB; electrochemical migration; mechanism

DOI: 10.12346/etr.v5i11.8728

1 引言

PCB 意为印制线路板,行业内也简称为电路板、印制板、卡件等,是电力电子行业的重要元件。PCB 一般由底板、导线、电子元件和焊锡组成,可以免去繁杂的接线,将大量各式电子元器件连接在一起,实现各种功能。随着大规模集成电路技术的发展,越来越多的电气设备选择电路板作为控制器件,取代原有的机械式、电磁式器件。PCB 板在技术进步过程中,也不断向着多层化、集成化、高密度化、小型化发展。

当 PCB 板各导体间距离越来越小,其绝缘问题开始受到各方的关注。如何在如此微细的产品上,保证其在整个寿命周期内的绝缘性能,是业内所有 PCB 制造商所面临的问题,然而在工业生产中,PCB 的制造工艺将极大影响板材的绝缘能力,如绝缘层是否均匀覆盖,生产过程是否引入杂质沾污,焊锡和助焊剂的处理等,都可能将直接导致卡件失效。

PCB 经长期运行后,可能因为电化学迁移导致绝缘电阻

下降。首先被发现的是电话机内镀银端子的枝晶生长现象,认为是在潮湿环境下,发生的电化学反应。1976 年贝尔实验室报道了一种金属化合物沿着板材和绝缘层缝隙生长的现象。在之后发展历程中,随着 PCB 自身的微型化,使用量的剧增,应用环境的复杂化,电化学迁移逐渐成为板卡失效的一大原因,也受到了越来越多的关注。下面将对其进行理论介绍和实际案例分析。

2 电化学迁移概念

电化学迁移 (ECM) 的原理是基于离子在电场作用下受力移动的规律。在电场中,正电荷受力方向与电场方向一致,负电荷受力方向与电场方向相反,电荷具体受力大小与电场强度、电荷量成正比,与离子半径成反比。所以,离子在电场作用下发生电化学迁移的速率与电场强度、离子种类相关。

2.1 PCB 电化学迁移机制简介

随着电子技术的不断革新以及对电子设备多功能化和便

【作者简介】张皓亮 (1989-),男,中国河北石家庄人,本科,工程师,从事直流蓄电池及不间断电源研究。

携化的需求,电子元器件正向高度集成化、微型化等方向发展。这使得 PCB 上各引脚或焊盘间的距离越来越接近。虽然为了减少半导体开关损耗,PCB 供电电压往往比较低,但在如此之短的距离下,电场强度仍可达到极大的数量级^[1]。另外,在 PCB 的制作、锡焊和封装过程可能引入杂质,叠加温湿度、环境灰尘杂质堆积等原因,易导致阳极金属在板材表面覆盖的薄液膜中缓慢溶解,从而产生金属阳离子。离子在大电场作用下向阴极迁移,在此过程中,可能与阴离子结合形成难溶物析出(如铜离子与氢氧根的结合),大多数阳离子能够迁移到负极从而得到电子还原,沉积在负极。后续的阳离子可以接触沉积物得到电子,从而沉积物开始堆积生长,形成树枝状结晶,向着电源正极方向不断延伸,直到枝晶触及正极造成短接,PCB 短路失效。上述现象称为 PCB 的电化学迁移,在国际电子工业联接协会所提出的标准 IPC-9201 中,电化学迁移现象被描述为“当 PCB 长久运行在高温高湿的环境下,且相邻的导体间存在电压差,金属性离子逐渐发生迁移,并在板材表面出现树枝物质生长痕迹”。

电化学迁移被认为是电子元器件在电场与环境作用下发生的一种重要的失效形式。在 PCB 出现电化学迁移现象后,将大大破坏 PCB 绝缘层的绝缘能力,板材绝缘层将不能提供正常的保护。在枝晶造成电源微短路时,将导致电子元件过热,缩短其寿命;当发生严重短路时,可能直接烧毁整个电子元件,导致整个板卡失效。

从上文分析中可以得到以下结论:①枝晶生长在板材表面,有明显纹路,可以通过放大镜或显微镜观察到。②枝晶的主要成分一般是金属单质,因其截面积极小,载流能力较弱,造成严重短路时往往也会将枝晶熔断。③枝晶的生长方向是从电源负极向电源正极。

2.2 表面绝缘电阻测量法

在工业上,一般采用 SIR(表面绝缘电阻)来测试 PCB 对抗电化学迁移的能力,该方案由 IPC 提出,采用标准 IPC-TM-650。应用该法可以用来测试板材对抗电化学迁移的能力,从而推算现场设备发生电化学迁移的时间,进而确定板卡老化治理定期更换的周期。SIR 是 PCB 质量和稳定性的重要指标。下面介绍 SIR 的原理。

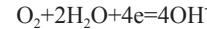
测量表面绝缘电阻的原理即欧姆定律,将绝缘电阻计或高阻计连接到 PCB 表面,并对板卡施加一定的偏压,从而通过表计测量板材绝缘电阻。因卡件往往是经过长期运行后出现枝晶生长的现象,花费数年时间进行表面绝缘电阻试验不现实,行业内一般将 PCB 置于试验箱,通过增加温湿度来加速生长进程,然后换算得出正常工况下板卡发生电化学迁移需要的时间。常用的加速老化测试模型是阿伦尼乌斯模型,可以综合温湿度因素影响,是应用最为广泛的加速模型。

2.3 薄液膜下的 PCB 电化学迁移

在工业现场,因环境中不可能完全排除水蒸气,当湿度足够高时就会在 PCB 表面形成肉眼不可见的极薄的水膜,现实中 PCB 的电化学迁移属于一种“湿腐蚀”。所以,研

究薄液膜下的 PCB 电化学迁移现象十分具有现实意义。特别是核电厂往往修建在海边,不仅环境湿度相对较大,还受到盐雾影响。所以,板卡表面的薄液膜实际是含盐(主要是氯化钠)的电解液。

在正常环境下,阴极经薄液膜覆盖后,氧气仍易扩散至阴极,发生的化学反应主要是氧的还原反应,具体为:



阳极发生的是金属的氧化反应(可能是焊锡中含有的锡,可能是引脚中的铜,银一般不参与),可能是多金属参与的过程。当液膜过薄时,阳极金属溶解后,不易扩散,导致腐蚀物堆积在阳极表面,影响了腐蚀速率。

薄液膜的厚度与电解质含量均能对枝晶生长速度产生影响。经研究^[2],PCB 电化学迁移早期反应中,锡的溶解随板卡液膜的减小而加速,反应后期,锡的溶解速率与液膜厚度呈现出先增加后减小的趋势,并且当液膜厚度为 200 μm 时,速率最高。这是因为当液膜过薄时,不利于金属离子的扩散;而当液膜过厚时,不利于阴极氧得电子的还原。同时,枝晶的生长需要较长的孕育期,一旦阴极的金属沉淀物开始堆积后,枝晶的生长速率将大增。

2.4 电化学迁移的相关影响因素

PCB 发生电化学迁移的过程受到诸多因素影响,论文进行介绍。

①环境湿度。PCB 的电化学迁移主要是一种气相腐蚀,但湿度是影响 PCB 发生电化学迁移的主要因素之一。当环境湿度低于 50%,金属表面液膜过薄,金属腐蚀不易发生;当湿度达到 60%~70%,金属表面覆盖液膜达到充足的厚度,腐蚀行为开始出现,但若空气污染导致有硫、氮、氯的化合物参与电化学反应,发生金属腐蚀的临界湿度将大大降低。

②盐雾。核电厂选址往往临海,必须考虑盐雾对 PCB 发生电化学迁移的影响。盐雾意为空气中含盐微小液滴形成的弥散系统,其形成主要与海水的波动,海浪冲击和海风等产生的大量泡沫有关,当泡沫破碎,就会有小液滴形成进入空气,并随气流运动^[3]。由于液滴具有一定质量,受重力影响逐渐沉积,所以往往是临海区域受盐雾影响。盐雾的主要成分是氯化钠和氯化镁,当盐雾进入 PCB 薄液膜后,电解出的氯离子将参与电化学迁移并加快速度。③大气污染。大气中的污染气体中的二氧化硫、硫化氢、二氧化氮等在接触 PCB 表面液膜后将部分溶解进入液体中,形成酸性电解质,参与到电化学迁移。这些气体不仅导致液膜电导率大增,也使得液膜中氢离子数量剧增,氢离子将参与到阴极反应,与氧气反应生成水,从而大大加速电化学迁移的速率。④灰尘。工业现场的常见情况是 PCB 经长期运行表面积灰。论文中灰尘主要指的是未经污染空气中存在的二氧化硅、炭黑等物质形成的中性小颗粒。当板卡堆积少量灰尘时,灰尘在毛细管作用力下吸附一定的水分,促进了薄液膜的形成,从而加速了电化学迁移。当板卡覆盖大量灰尘时,因灰尘过厚隔绝了水汽,阻碍了液膜的形成,同时也使得离子迁移路径变得更

加复杂。正常情况下枝晶会沿着电场强度最大的方向生长，而灰尘的存在不仅略微扭曲了电场线，并对枝晶生长有一定阻挡，枝晶表现出不同程度的弯曲，这样就延迟了枝晶生长的路径，从而延长了枝晶生长导致 PCB 短路失效的时间。

⑤温度。电化学迁移作为一种电化学反应，温度无疑是影响其速率的一大因素。当温度升高，分子平均动能增加，分子热运动加剧，导致反应速率加快。根据范霍夫近似规律，温度每升高 10 开尔文，反应速率增加 2~4 倍。PCB 运行过程中功率器件，电容和电感均会发热，故综合考虑设备发热情况，采取合适的散热措施很有必要。

⑥污染物。在板卡生产加工焊接过程中，使用了助焊剂和清洗剂。传统非水溶性助焊剂一般为松香、树脂、含卤化物的活性剂等混合而成，清洗剂一般为含卤族元素的有机溶剂。这些助焊剂和清洗剂无法彻底清洁干净，残留物中的卤族元素将进入 PCB 表面液膜参与电化学迁移。

3 电化学迁移实例

论文介绍某电站充电器 PCB 发生电化学迁移导致失效的实例，因相关保密需要已隐去不必要的信息和图纸。

3.1 充电器停机经过

某大修期间，主控室出现某交流配电盘故障报警、某充电器故障报警、某蓄电池放电报警。现场人员检查发现该充电器上游电源开关跳闸，充电器出线开关跳闸，充电器已停机。重新启动充电器后空载运行 4h，故障未复现，遂彻底更换充电器控制卡件，中间继电器，充电器出线开关。后续充电器处于均衡充电模式拷机未见异常。怀疑可能原因为充电器内部故障导致跳机，或充电器出线开关过流跳闸，后经检查排除充电器出现开关过流导致充电器停机。对换下的继电器、PCB 进行检查和拷机，故障未复现。

3.2 卡件异常分析

联系具备资质的实验室，将换下的旧卡件送测。检测人员对 PCB 及安装在卡上的继电器进行了外观检查，发现电位器封装体边缘存在异常物质，板卡上芯片部分相邻引脚有异物，呈枝晶状。

经实验室使用电子显微镜观察，发现异物呈现枝晶状，详见图 1。进一步采用 X 射线能谱仪检测发现枝晶成分含锡。这表明了 PCB 表面出现了焊料的电化学迁移现象。

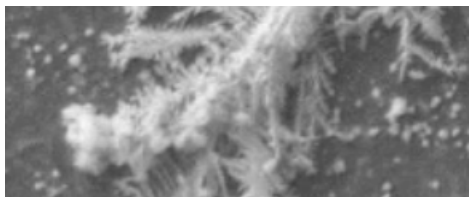


图 1 引脚处枝晶

为进一步明确卡件的失效模式，实验室对板卡进行了上电试验。首先在室温环境下，对板卡电源端子施加正常工作电压，检查发现板卡上继电器的接点正常断开，未触发高压报警。升高电源电压，继电器接点闭合，触发充电器高压报警。降低电源电压，正常触发充电器低电压报警。以上现象均无异常。

而后试验人员将板卡置于温度为 40℃，湿度为 90%RH 的试验箱中共 12h，再将板卡取出上电，发现施加正常工作电压时，继电器励磁，接点导通，触发充电器高压报警，故障复现。经试验人员测量，发现湿热试验后，芯片部分引脚对地电压明显降低，部分引脚阻抗明显下降。

再次对控制卡进行高温烘烤去除潮气，板卡功能恢复正常。

综合上述现象，可以确认在湿热环境下，板卡发生了电化学迁移导致失效。正常情况下，电位器通过调节分到 A 运算放大器正极脚的电压来调节高压报警定值。当 A 运算放大器正极脚电压低于负极脚，运放输出低电平至 B 运算放大器的正极脚，这又使得 B 运算放大器的正极脚电压低于负极脚，则 B 运算放大器输出低电平。B 运算放大器输出端连接至三极管 C 的基极，该三极管为 PNP 型，当基极电位低时导通，所以继电器线圈得电励磁，接点闭合，充电器发出高压报警。

最终确定该 PCB 在现场使用多年，发生了电化学迁移现象，导致 B 运放的正极引脚因漏电导致电压低于负极引脚，B 运放输出低电平，三极管 C 导通使继电器励磁，接点闭合，充电器触发高压关机，并连跳充电器上下游开关。

4 结语

论文对 PCB 发生电化学迁移的原因、现象和及各种促成因素进行了分析介绍。PCB 在工业现场的运行，无法完全避免一些负面因素的影响。当现场的温湿度较高，又受到其他促成因素影响，长期运行后可能发生电化学迁移现象，并随着枝晶生长短路电源正负极，导致 PCB 失效。作为从业人员，应根据现场的实际情况和设备发生的不良反馈，制定合理的老化治理板卡更换计划，防止 PCB 因电化学迁移导致失效，造成设备停运损失。

参考文献

- [1] 黄华良.薄层液膜下PCB-Cu的腐蚀行为及机理研究[D].武汉:华中科技大学,2011
- [2] 钟显康.薄液膜下锡的腐蚀和电化学迁移行为及机理[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [3] 陈久海.沿海发电厂盐雾危害及电气设备防盐雾措施[J].科技尚品,2016(12):1.