

尘土颗粒的介电特性 对电路板电化学迁移的影响

周怡琳, 朱 蒙, 霍雨佳

(北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘 要: 随着印制电路板上相邻导线之间间距不断减小, 潮湿环境下的尘土颗粒改变了诱发电化学迁移失效的电场分布. 本文采用有限元法对尘土污染的带电电路板上平行导线间的电场分布进行仿真分析, 得出尘土介电常数和带电量对电场分布的作用机理, 预测电场分布的改变对电化学迁移晶枝生长路径的影响, 最后模拟实验验证晶枝生长的路径与电场分布的关系, 并讨论尘土对电化学迁移失效时间的影响.

关键词: 电化学迁移; 尘土; 有限元; 电场; 电路板

中图分类号: TM207 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)07-1758-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.028

The Influence of the Dielectric Properties of Dust Particles on Electrochemical Migration of Printed Circuit Board

ZHOU Yi-lin, ZHU Meng, HUO Yu-jia

(Automation School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The distance between adjacent circuits of high density printed circuit board (PCB) is reduced gradually. The particles of different components have different permittivity, which changes the electric field distribution that induces electrochemical migration (ECM) failure. In this paper, by the finite element method, the electric field distribution between the paralleled circuits with potential bias on PCB contaminated by dust is analyzed. The mechanism of the dielectric constant and the amount of charges of dust particles on the electric field distribution is studied. The effect of electric field distribution on dendrite growth path is predicted. Finally, by the electrochemical migration simulation experiments, the relation between the electric field distribution and dendrite growth path is verified. The time to failure of ECM caused by the change of electric field is also discussed.

Key words: electrochemical migration; dust; finite element; electric field; printed circuit board

1 引言

当今时代, 印制电路板向着高密度化、微小孔径化的方向发展, 从而使得电路板上导线之间、电路板连接器管脚之间的间距更小, 随之表现出的电化学迁移失效现象成为一个对可靠性产生极大影响的问题.

电化学迁移是一种电化学反应^[1]. 它是在一定的温湿环境条件下, 绝缘材料上的正极金属导体材料发生离子化并在电场作用下通过绝缘层向相邻负极金属导体迁移, 在附近获得电子后形成导电沉积物, 而导致相邻导体间绝缘性能下降的一种失效现象, 严重时导

致电极间短路. 环境因素中的湿度、温度和导体间的电场强度是引发印刷电路板电化学迁移故障的重要因素^[2,3].

表面污染物对电化学迁移具有一定的影响. 空气中的灰尘、残留的助焊剂、一致性涂层或者是空气中的腐蚀性气体溶于印制板表面所吸附的水分中而形成的电解液^[4,5]. 尘土颗粒在产生及运动过程中, 由于撞击、摩擦、放射线照射及电晕放电等作用的影响会产生电荷, 带电的尘土颗粒会在其周围形成微电场^[6]. 因此, 当尘土颗粒沉积在电路板上具有一定电势差的平行导线间时, 一方面作为带电体会改变导线间原有的电场

分布,另一方面尘土颗粒作为一种介质附着于电路板上,会改变导线间原有介质的介电常数,进一步改变了导线间的电场分布^[7].若电场的分布发生变化,电路板发生导体材料的电化学迁移时,金属离子所受的电场力的大小和方向会发生变化,从而影响离子运动的轨迹,最终使得晶枝的生长方向和路径发生改变,电化学迁移的失效时间也会相应变化.尘土沉积在线间距极小的导线、元件管脚之间,使线路间的局部电场强度和分布发生变化,从而间接导致电化学迁移机理和失效时间的改变.本课题是从电场方面着手来探究尘土颗粒对电路板电化学迁移的影响.

2 研究方法

通过有限元的电磁场分析模块,建立尘土颗粒与电路板上平行导线的模型,采用二维静电场分析方法,对电路板导线间的静电场进行求解^[8-10],得出尘土带电性及介电常数对平行导线间电场分布的影响,并根据电场强度线的形状来分析预测电化学迁移晶枝生长的路径.最后通过实验验证电场仿真结果及电化学迁移失效时间的变化.

2.1 有限元场的仿真分析

2.1.1 尘土选取

针对北京室内自然沉积的尘土进行统计分析,发现尘土是多种化学物质的集合体,直径大于 $25\mu\text{m}$ 的粗大颗粒中,石英和长石为主要成分;而小于 $10\mu\text{m}$ 的细颗粒中,则多为方解石及云母等粘土矿物^[11].进入电子产品内部沉积在电路板上的尘土,约 98% 为 $50\mu\text{m}$ 粒径以下的尘土^[12],并且带电量随着粒径的增大而增大.为了探究尘土介电常数对电路板导体之间平行电场的影响,选择尘土中含量较多且具有不同相对介电常数的石英、长石、云母和方解石进行仿真建模.各物质相对介电常数与对应的仿真模型设定值见表 1 所示.

表 1 不同尘土组分的介电常数

组分	相对介电常数	仿真模型设定值
石英	3~5	3
长石	4~10	5
云母	7~9	7
方解石	8.0	9

2.1.2 模型简化

本仿真模拟尘土存在时平行导线间电场分布,采用电化学迁移实验专用的 Y 形电路板样品,平行导线间距为 0.64mm .以带不同电性和电量的石英(相对介电常数为 3)为例,分析尘土对平行电场的影响.由于尘土中大部分颗粒的尺寸均在 $50\mu\text{m}$ 以下,故采用颗粒度为 400 目(颗粒直径 $38\mu\text{m}$)的尘土颗粒平铺成一个直径为 0.35mm

(与 Y 形电路板平行间距 0.64mm 同属一个量级)的单层大颗粒作为尘土模型,放置于导线间,便于更明显的看出电场分布的变化.导线间加载电压为 5V .采用 Ansys 静电场分析 *h* 方法.建立仿真模型如图 1 所示.

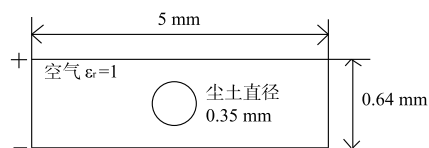


图1 平行电场中尘土颗粒仿真模型图

2.1.3 带电量计算

单个尘土颗粒带电量计算(以带正电荷为例):根据高锦春等人研究得出尘土带电量与颗粒直径关系的计算公式^[8],计算尘土所带电荷量如下:

颗粒带正电荷:

$$y = 5.25x^3 - 1.06 \times 10^{-5}x^2 + 3.72 \times 10^{-11}x - 1.34 \times 10^{-17} \quad (1)$$

在式(1)中, x 表示颗粒的半径(m), y 表示该颗粒所带正电荷量(C).令 $x = 19\mu\text{m}$ (400 目的颗粒半径),得出 $y = 3.3 \times 10^{-14}\text{C}$.

此单层尘土模型所含颗粒直径为 $38\mu\text{m}$ 的颗粒数:

$$n = \frac{\pi R^2}{\pi r^2} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{(350/2)^2}{(38/2)^2} = 85 \text{ 个} \quad (2)$$

单层尘土模型所带正电荷量:

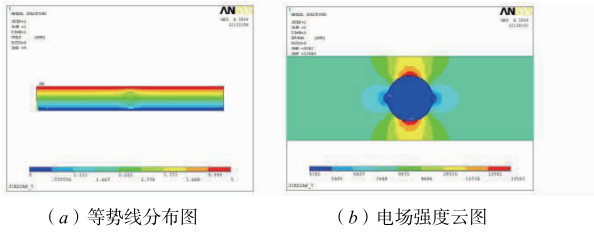
$$Q = ny = 85 \times 3.3 \times 10^{-14} = 2.8 \times 10^{-12}\text{C} \quad (3)$$

2.1.4 尘土介电特性、带电量以及晶枝生长预测仿真结果

(1) 尘土介电特性的影响

如图 2(a) 中所示,长方形区域模拟的是平行线间电场.红色区域为高电势区域,靠近正极,蓝色区域为低电势区域,靠近负极,由红色区域到蓝色区域电势递减.两区域之间圆形部分模拟 0.35mm 尘土区.

当尘土不带电荷时,只考虑尘土颗粒的介电特性的作用.尘土电介质在外平行电场的作用下发生极化,使得尘土的上下端聚集极化电荷,极化电荷产生的电场与原平行电场叠加后的电场分布如图 2(b) 所示.以介电常数为 3 的尘土颗粒为例.定义尘土区靠近正电压的一端为上端,反之为下端.由仿真结果可知,在尘土的上下端分别出现两个强电场区(图 2(b) 中红色部分, $E \approx 13000\text{V/m}$),尘土内部出现弱电场区(图 2(b) 中蓝色部分, $E \approx 5000\text{V/m}$),在远离尘土的方向上,电场分布越来越接近原平行电场分布.而尘土的介电常数越大,仅表现为强、弱电场区的场强极值变化越大,但电场分布情况保持一致.统计不同介电常数下对应的场强极值,拟合场强极值随着介电常数变化的曲线,如图 3 所示.可知场强极值与介电常数呈线性关系.



(a) 等势线分布图 (b) 电场强度云图

图2 尘土颗粒介电常数为3的仿真结果

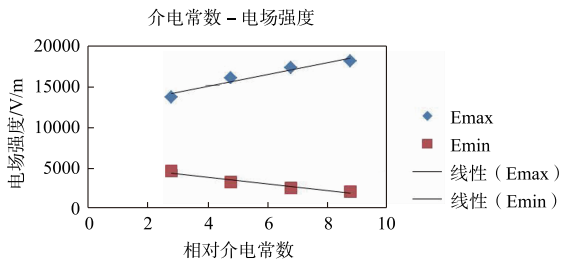


图3 场强极值与尘土相对介电常数关系的线性拟合图

由仿真结果可知,极大值随着介电常数的增加而线性增加,是因为介电常数越大,极化程度越大,极化电荷产生的电场就越强,与原均匀电场叠加后的电场强度也就越大.而电场强度极小值随着介电常数的增加而减小,是因为在尘土内部极化电荷产生的电场方向与均匀电场的方向相反,尘土介电常数越大,其极化程度也越大,极化电场与原均匀电场叠加后使得尘土内部的电场强度越小.

已知原电场强度 $E = U/d = 5/0.00064 = 7812.5V/m$.由图3可知,通过不同介电常数的尘土颗粒影响下的电场强度极值来计算得到不同介电常数的尘土对原均匀电场的影响百分比如表2所示.

表2 不同介电常数的尘土对原均匀电场的影响百分比

尘土相对介电常数	电场极大值 E_1 的影响 A (%)	电场极小值 E_2 的影响 B (%)
3	73.9%	43.9%
5	103.9%	61.0%
7	120.2%	70.1%
9	130.4%	75.7%

注: $A = (E_1 - E)/E$; $B = (E_2 - E)/E$

(2) 尘土带电量的影响

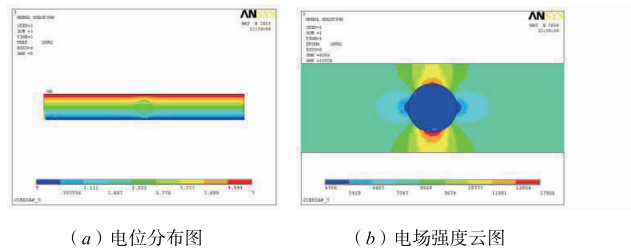
当尘土带电时,电场分布则是三部分电场的叠加,分别是原平行电场,尘土介质极化形成的附加电场,尘土自身所带电荷形成的电场,即最终的电场为三者的矢量和.

仿真模型选择尘土相对介电常数一定,而只改变尘土所带电荷量来分析尘土带电对电场的影响.当尘土颗粒的层数不同时,其所带电荷量也随之改变,因此设置尘土模型所带电荷量为 $2.8 \times 10^{-12}C$ 的1倍、2倍、

3倍和4倍进行仿真,即分别对应直径为0.35mm的大尘土颗粒所包含的400目石英颗粒进行不同带电量的四次仿真.以尘土介电常数为3带1倍正电荷为例,仿真结果如图4.

尘土带电时,得到的电场分布与不带电时基本一致,强弱电场区的位置没有变化,只是尘土上端和下端的电场强度有所不同,上端 $E \approx 12800V/m$,下端 $E \approx 13500V/m$,这是因为当尘土带电时,极化电荷与尘土自身电荷的叠加,使得尘土堆上端和下端聚集电荷量不同,从而使得上端和下端的电场强度有所不同.如当尘土带正电时,由于极化效应使得尘土上端产生极化负电荷,使得尘土上端的负电荷量变少,而尘土下端产生的极化正电荷与自身所带电荷叠加使得尘土下端的正电荷量增加,从而造成尘土下端的场强大于上端.

根据仿真结果,统计颗粒介电常数一定而带电量不同的场强极值,并拟合场强极值随带电量变化的关系曲线,如图5所示.可知电场强度与带电量呈线性关系.



(a) 电位分布图 (b) 电场强度云图

图4 尘土介电常数为3带1倍正电荷仿真结果图

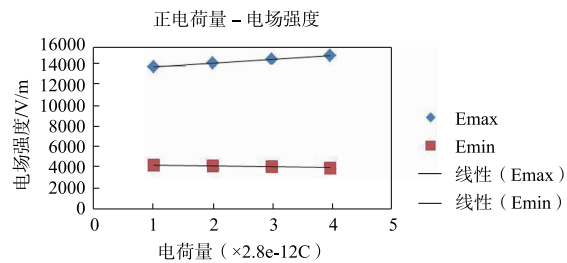


图5 场强极值与尘土带电量(1-4倍正电荷)关系的线性拟合图

由图5可知在带不同正电荷量的尘土颗粒影响下的电场强度极值.计算带不同正电荷量的尘土对均匀电场的影响百分比,见表3.

表3 带不同正电荷量的尘土对原均匀电场的影响百分比

电荷量(C)	电场极大值 E_1 的影响 A (%)	电场极小值 E_2 的影响 B (%)
不带电	73.9%	43.9%
$1 \times 2.8 \times 10^{-12}$	78.3%	44.2%
$2 \times 2.8 \times 10^{-12}$	82.8%	45.1%
$3 \times 2.8 \times 10^{-12}$	87.2%	46.3%
$4 \times 2.8 \times 10^{-12}$	91.5%	47.8%

注: $A = (E_1 - E)/E$; $B = (E_2 - E)/E$

经过有限元仿真分析得到了如下结论: 尘土带电荷量与介电常数相对对电场影响较小: 以介电常数为 3 的尘土为例, 当尘土不带电时, 对电场影响程度约为 73.9%, 带电时影响程度平均约为 80.9%, 而不考虑带电量时, 在介电常数的影响下, 尘土对原电场强度的影响平均约为 107.1%, 因此在研究尘土对均匀电场的影响时认为可忽略带电量的影响, 但带电量直接影响尘土静电吸附在电路板表面积聚的程度, 在尘土沉积量的研究中不可忽略。

(3) 晶枝生长路径预测仿真结果

根据图 2 尘土颗粒介电常数为 3 的仿真结果中的电场矢量图, 来分析并预测晶枝生长的路径. 将电场矢量线连成一条连续的曲线, 选取三种类型的电场线, 如图 6 所示. 其中 1 号线是对起点在尘土正上方的电场线的描绘, 2 号线是对起点在尘土斜上方的电场线的描绘, 由于理论上电化学迁移晶枝应该会沿着电势变化梯度最大的方向即电场线的方向生长, 因此 1、2 号线即为两种可能的晶枝生长路径. 而在远离尘土处电场分布还保持原平行电场的分布情况, 如 3 号线所示。

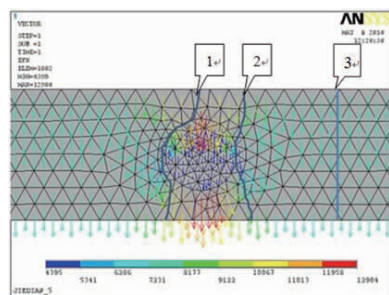


图6 尘土附近晶枝生长路径预测图

2.2 电化学迁移实验验证

通过电化学迁移加速实验, 验证尘土通过作用于电场而间接对电路板电化学迁移产生的影响。

2.2.1 实验方案

实验系统框图如图 7 所示. Y 形电路板平行导线的两极施加直流偏压, 实验时将水滴滴在 Y 形的平行导线之间, 并保证水滴横跨两个导线. 使用皮安计每隔 1 秒钟测量一次样品平行导线之间的表面绝缘电阻. 整个实验过程, 样品都放在光学显微镜下以便于实时观察实验现象^[13].

2.2.2 实验样品

实验样品采用标准 Y 形电路板, 如图 8 所示, 平行导线间的间距为 0.64mm. 导线间加偏置电压为 10V, 尘土区直径为 0.35mm, 尘土组分选择颗粒度为 400 目的石英, 加尘土后在显微镜下放大 100 倍的样品照片如图 9 所示。

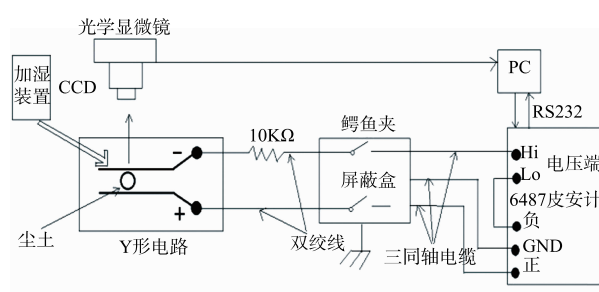


图7 电化学迁移实验系统框图

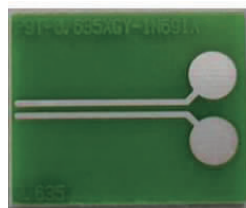


图8 Y形电路板

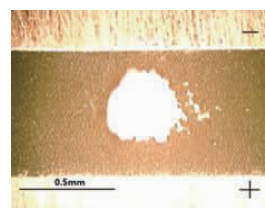


图9 加尘土后的Y形电路板

3 实验结果及分析

通过电化学迁移实验得到几种典型的实验结果, 如图 10 所示. 图 10(a) 中 2 号及 10(b) 中 1 号, 晶枝生长点在尘土斜下方和正下方, 晶枝生长都沿着电场强度梯度大的路径生长, 与图 6 中的 2 号和 1 号预测线一致. 图 10(b) 中 3 号线, 晶枝生长点远离尘土, 基本垂直于平行电极生长, 与图 6 中 3 号线一致. 从总体趋势来看, 晶枝生长路径与 Ansys 仿真分析所得的电场线分布路径一致。

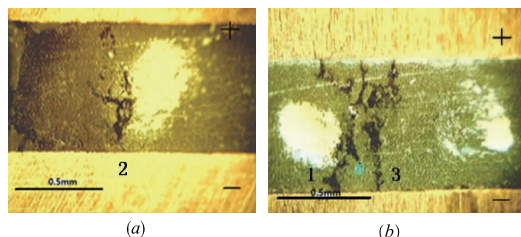


图10 晶枝形貌图

经过三次重复性实验后, 将三次失效时间进行威布尔拟合, 得到无尘土及有尘土样品的特征失效时间, 无尘土时失效时间为 380.7s, 有尘土时失效时间为 466.4s. 根据失效时间可知, 在仅考虑尘土对电场的影响时, 有尘土会使得失效时间变长, 这是因为电场分布的变化使得迁移路径变长, 从而延长了晶枝生长到阳极的时间, 使得失效时间变长。

4 讨论

4.1 介电常数作用机理

设原均匀电场为 \vec{E} , 尘土介质在外电场作用下发生

极化而产生极化电荷,所形成的附加电场为 \vec{E}_m ,尘土自身所带电荷形成的电场为 \vec{E}_n ,那么在三者叠加后形成了新的电场 \vec{E} ,其值为三者矢量和.通过有限元仿真,得出尘土作为带电荷的电介质或不带电荷的电介质时,都会使得原均匀电场分布发生变化.通过仿真分析可知尘土介电常数比带电性对电场的影响要大的多,且随着尘土介电常数的增加,对电场的改变程度也增加,使得电场强度的极值增加,但电场的整体分布趋势是一致的.

4.2 尘土介电特性对电化学迁移影响

尘土介电特性对电化学迁移产生的影响,一方面表现在其对枝晶生长的影响,一方面表现在其对失效时间的影响.

电路板表面在高湿条件下形成水膜,在电场作用下,金属材料形成从阴极向阳极生长的树枝状的结构.由于有尘土存在影响原均匀电场,通过有限元仿真结果图2(b)可知,尘土堆周围电势梯度大小不一.对晶枝的生长路径进行了预测,如图6所示.由此可以得出由于尘土的存在,使得晶枝沿着电势变化梯度最大的方向生长,故距离尘土近的晶枝表现出弯曲生长.最后晶枝完全生长到阳极,发生短路失效.

从实验数据来看,可知当尘土颗粒介电常数由3升至9时,对电场强度的影响由73.9%升至130.4%.在无尘土存在时,失效时间为380.7s,在有尘土存在时,失效时间为466.4s.由此证明了尘土介电特性对电化学迁移失效的影响是不可忽视的.

5 结论

本文采用有限元法对尘土污染的带电平行导线间的电场分布进行仿真分析,发现尘土介电常数和带电荷量均会改变导线间的电场分布,但尘土介电常数通过极化效应对电场的作用更显著,最终使得电场分布不再均匀.通过电场分布矢量图预测金属导电材料电化学迁移晶枝生长路径,最后通过实验验证,电场分布的变化使得电化学迁移的晶枝沿着电势变化梯度最大的方向生长,路径由直线变为曲线,尘土使得电路板电化学迁移失效时间延长.

参考文献

- [1] STEPPAN J J, ROTH J A, HALL L C, JEANNOTTE D A, CARBONE S P. A review of corrosion failure mechanisms during accelerated test [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1987, 134(1): 175-90.
- [2] 贾京,冯士维,邓兵,等.基于热阻测量的PCB散热特性[J].电工技术学报,2014,29(9):239-244.
JIA Jing, FENG Shi-wei, DENG Bing, et al. Transfer heat performance of PCB based on thermal resistance measurement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 239-244. (in Chinese)
- [3] 杨盼.银覆盖层电化学迁移特性研究[D].北京:北京邮电大学,2012.
- [4] 周怡琳,韦霞霞.尘土污染对电路板表面湿度的影响[J].电工技术学报,2015,30(23):163-168.
ZHOU Yi-lin, WEI Xia-xia. Effects of dust contamination on surface relative humidity of printed circuit board [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 163-168. (in Chinese)
- [5] 周怡琳,王鹏,葛世超,李方.长期贮存航天电连接器尘土污染的研究[J].电工技术学报,2014,29(7):269-276.
ZHOU Yi-lin, WANG Peng, GE Shi-chao, LI Fang. Investigation on dust contamination of aerospace electrical connector after long-term storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 269-276. (in Chinese)
- [6] 王卫国.接触区污染物影响因素的研究与实验室模拟[D].北京:北京邮电大学,2004.
- [7] 高锦春,孟青山,章继高.尘土颗粒带电特征的研究[J].中国粉体技术,2004,10(3):1-5.
GAO Jin-chun, MENG Qing-shan, ZHANG Ji-gao. Characteristics of electric charges carried by dust particles [J]. China Powder Science and Technology, 2004, 10(3): 1-5. (in Chinese)
- [8] 高锦春.尘土颗粒的带电特征及其对电接触故障的影响[D].北京:北京邮电大学,2003.
- [9] 卞强,张民,柳懿,周方俊.一种基于ANSYS的舰船静电场分析方法[J].海军工程大学学报,2010,22(6):1-6.
BIAN Qiang, ZHANG Min, LIU Yi, ZHOU Fang-jun. An analytic method of ship static electric field [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(6): 1-6. (in Chinese)
- [10] 范其丽,甄亚,冯艳平. ANSYS 在二维静电场分析中的应用研究[J].中国科技信息,2012,14(1):1-2.
FAN Qi-li, ZHEN Ya, FENG Yan-ping. ANSYS analysis of two-dimensional electrostatic field [J]. China Science and Technology Information, 2012, 14(1): 1-2. (in Chinese)
- [11] LIANG Y N, ZHANG J G, LIU J J. Identification of inorganic compounds in dust collected in Beijing and their effects on electric contacts [A]. 43rd IEEE Holm Conference on Electric Contacts [C]. Philadelphia: IEEE, 1997. 315-327.
- [12] 吕文超,周怡琳.手机内部尘土分布特性研究[J].机电元件,2008,28(4):19-23.
LV Wen-chao, ZHOU Yi-lin. A study on dust distributed characteristic inside a mobile phone [J]. Electromechanical Components, 2008, 28(4): 19-23. (in Chinese)

- [13] 周怡琳, Michael Pecht. 浸银电路板蔓延腐蚀评估方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 44-50.
ZHOU Yi-lin, PECHT M. Evaluation methods of creep

corrosion on immersion silver finished printed circuit boards[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 44-50. (in Chinese)

作者简介



周怡琳 女. 1972年4月出生, 上海人. 1999年毕业于北京邮电大学自动化学院, 获电路与系统专业工学博士学位, 其后一直在北京邮电大学自动化学院任教. 现任测控技术与仪器中心副主任, 教授. 从事电接触理论与电连接可靠性方面的研究工作.
E-mail: ylzhou@bupt.edu.cn



朱蒙 女. 1992年1月出生, 吉林人. 2014年毕业于中国农业大学电气工程及其自动化专业, 其后进入北京邮电大学自动化学院, 硕士在读, 专业为控制科学与工程, 研究方向为可靠性检测技术.
E-mail: 395129574@qq.com