文章编号：1007 - 4252(2020) 02 - 0002 - 117

环境温湿度对高速 PCB 信号插入损耗的影响

杜红兵，秦典成*，纪成光，陈正清
(生益电子股份有限公司，广东 东莞 523127)

摘要： 基于三种不同高速材料制备而成具有相同介质厚度及图形设计的 PCB，借助恒温恒湿箱及 SPDR 夹具对上述三种 PCB 基材在不同温度及湿度下的介电常数 Dk 及介电损耗 Df 进行了测量。同时借助矢量网络分析仪在同一湿度但不同温度下对上述三种 PCB 上 85Ω 的差分线上的高速信号的插入损耗进行了测试与对比研究。结果表明，随着环境温度升高及湿度增加，三种高速材料的 Dk 及 Df 也随之变大；受材料在不同温湿度下 Dk 及 Df 变化的影响，当环境湿度恒定时，差分线上高速信号的插入损耗的绝对值随着环境温度升高而增大，且 Dk 对插入损耗的影响较之 Df 的要大。

关键词： 高速材料；PCB；恒温恒湿箱；SPDR 夹具；矢量网络分析仪；Dk；Df；插入损耗
中图分类号： TN604　　**文献标志码：** A

The Influence of Ambient Temperature and Humidity on Insertion Loss of High Speed PCB

DU Hong bing，QIN Dian cheng，JI Cheng guang，CHEN Zheng qing
(Shengyi Electronics CO.，LTO. Dongguan 523127，Guangdong，China)

Abstract: Three different types of high speed materials were respectively processed into PCBs which characterized with the same dielectric layer thicknesses and pattern designs. The dielectric constant Dk and dielectric loss Df of the aforementioned materials under the condition of different temperature humidity were investigated employing temperature humidity chamber and SPDR fixture. Additionally，a comparative study of the insertion loss of 85Ω differential impedance lines corresponding to PCBs based on the aforementioned materials was performed using Vector Network Analyzer. It was found that the Dk and Df of the three different high speed materials increased as the ambient temperature and humidity increased. When the ambient humidity was constant，the insertion loss modulus of 85Ω differential impedance lines increased as ambient temperature became higher，which could be attributed to variations of Dk and Df of high speed materials under different temperatures. And the insertion loss was affected more by Dk than Df.

Key Words: high speed material; PCB; temperature humidity chamber; SPDR fixture; vector Network An-

收稿日期： 2020-04-10；　　**修订日期：** 2020-05-08
基金项目： 国家重点研发计划(No. 2016YFB0400901) 。
作者简介： 杜红兵(1975-) ，男，本科，高级工程师，主要研究方向为高端印制电路板的开发(E-mail: Hongbing.Du@ sye.com.cn) 。
通信作者： 秦典成(1985-) ，男，硕士，工程师，主要研究方向为高端印制电路板的开发(E-mail: Diancheng.Qin@ sye.com.cn) 。

alyzer; Dk; Df; insertion loss

0 引言

随着第五代移动通信技术(Fifth Generation Mobile Networks,简称 5G)的迅速发展,信号频率越来越高,传输速率也越来越快[1]。根据微波理论可知,随着信号频率和速率的不断增加,信号在传输过程中发生损耗、串扰及遭受噪声干扰的概率也会大幅增加,从而造成传输质量的下降。因此,在整个高频高速信号网络传输系统架构中,从芯片封装、到印制电路板(Printed Circuit Board,PCB)的设计与制造工艺、再到铜缆和连接器等器件,都必须对信号完整性进行严格的分析和测试,以保证所设计系统的电气特性满足实际的工程应用要求[2,3]。

PCB 作为"电子产品之母",是 5G 移动通信设备中必不可少的"骨架"元件,是高频高速信号传输的重要载体。因为 PCB 基材的介电常数与介电损耗对信号的质量有着至关重要的影响,较高的介电常数和介电损耗都会导致信号的衰减,故在高频高速 PCB 的设计与制造过程中,如何对基材进行合理选择是一个不容忽视的问题[4,5]。目前,随着电子器件功率增加,以及 PCB 设计的高密度化和信号的高频化,将导致大量的热量在 PCB 内部聚集,温度急剧增加。同时,因基材本身具备一定的吸水性,故当环境湿度增大时,PCB 内部将聚集一定体积的水分。在温度和湿度的双重作用下,基材的介电性能和介电损耗将发生一定的变化,进而对信号的传输质量造成一定的影响。

鉴于以往人们较少关注温度和湿度的双重作用对高频高速信号完整性的影响,本文将从实际应用出发,以高频高速 PCB 为研究对象,重点研究环境温度和湿度改变时,基材介电性能和介电损耗的变化情况以及对应信号传输质量的变化情况,为高速基材的选用提供参考。

1 实验部分

1.1 原材料与仪器设备

原材料:以环氧改性基材 X 为原料制作的高速 PCB,编号为 A;以 PN 改性基材 Y 为原料制作的高速 PCB,编号为 B;以氰酸脂改性基材 Z 为原料制作的高速 PCB,编号为 C。A、B、C 三种 PCB 叠层完全一致(具体如图 1 所示),在 L10 层均设计有线宽为 4.5、间距为 7mil,阻抗为 85Ω 的差分阻抗线。

仪器设备:恒温恒湿箱(用于控制环境的温度及湿度)、安捷伦 E5071C 矢量网络分析仪(用于测试阻抗及插入损耗)、SMA 连接器(用于连接矢量网络分析仪与差分过孔)、SPDR 夹具(用于测试不同温湿度下基材的 Dk 和 Df 值)。

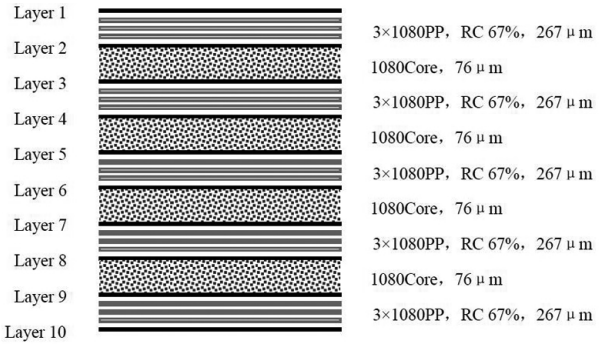

图 1 高速 PCB 的层叠设计

Fig 1. The stack-up design of high speed PCB

1.2 实验过程

1.2.1 插损测试

首先将恒温恒湿箱的温度及湿度分别设置为 0±1℃、50±1% RH 并保持 12 个小时,然后将 A、B、C 三种高频高速 PCB 放入恒温恒湿箱中放置 48 小时以上。待上述步骤结束后,将恒温恒湿箱的温度逐一设置为 0℃、20℃、40℃、60℃、80℃、100℃,每个温度点在温度达到稳定之后的第 30 分钟利用矢量网络分析仪测试 A、B、C 三者差分阻抗线在 4GHz、8GHz 及 12.9GHz 频率下的插入损耗。

1.2.2 基材 Dk 及 Df 测试

首先将恒温恒湿箱的湿度设置为 50% RH,起始温度设置为-40℃,并将用于制备 A、B、C 三种高频高速 PCB 的基材 X、Y 和 Z 各一块同时放入恒温恒湿箱内,然后将温度从-40℃逐渐升高至 100℃,每隔 20℃取测试点,在温度达到稳定之后的第 30 分钟利用 SPDR(Split Post Dielectric Resonator)法测试三种基材的介电常数 Dk 及介电损耗 Df。另取基材 X、Y 及 Z 各一块放入恒温恒湿箱,并分别设置恒温恒湿箱的温度及湿度为 80℃、50±1% RH,时间从 0 开始,每隔 2 天利用 SPDR(Split Post Dielectric Re-

sonator) 法测试三种基材的介电常数 Dk 及介电损耗 Df，实验周期设定为 12 天。

2　分析与讨论

2.1　环境温湿度对基材介电性能的影响

在 5G 高频高速应用中，基材的的介电性能对信号的传播速度和完整性有着重大影响。在微波场中，表征介质材料的介电特性的物理量主要有两个介电常数 Dk 及介电损耗 Df，其大小代表了介质吸收微波的能力[6,7]。其中，Dk 是衡量电介质极化程度的宏观物理量，用以表征介质对微波的吸收能力，即电介质储存电荷能力的大小。一般地，电介质的极化程度越大，所存储的电荷越多，其 Dk 就越大。而 Df 则是由介质电导和介质极化的滞后效应引起的能量损耗，代表了介质将其所吸收到的微波能转化成热量的能力[6,7]。根据 Df 的定义可知，Df 越高，信号损失就越严重。因高频高速基材主要由树脂和玻璃纤维布所组成，故影响基材 Dk 与 Df 的主要因素有树脂种类、玻璃纤维布类型、树脂含量、温度及湿度等。鉴于玻纤布的 Dk 与 Df 均较之树脂的要高出许多，为了实现较低的 Dk 与 Df 以获得较为理想的信号传播速度和信号完整性，必须选择较低 Dk 与 Df 的树脂。

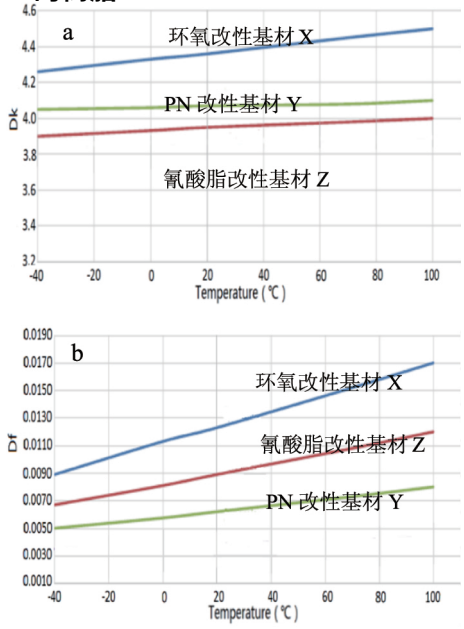

图 2　X、Y 及 Z 三种基材的 Dk 及 Df 随温度的变化情况

Fig 2. TheDk and Df of X, Y and Z base materials when ambient temperature changes

图 2(a) 和 2(b) 是当环境湿度固定为 50±1% RH 时，温度从-40℃增加至 100℃的过程中，环氧改性基材 X、PN 改性基材 Y 及氰酸脂改性基材 Z 三种基材的 Dk 及 Df 的变化情况。据图可知，三种基材的介电常数 Dk 及介电损耗 Df 均随着温度值的升高而增大，这是由于环境温度升高会对基材内部分子的极化过程产生一定的影响所致。因为介质的固有特性，带电粒子被固定在基材的分子内难以移动，此时分子的排列是杂乱无章的。当外加一个电场时，分子内部的正负载流子会沿着外加电场的方向产生位移和扭转，使分子趋于规则排列，这一过程称之为“极化”[9,10]。而当温度升高时，基材中环氧树脂的高分子链段活动性增强，正负载流子产生位移和扭转的阻力便会随之减少，基材内部分子极化程度增加，Dk 也就随之而增大[9-11]。同时，当温度在一定范围内升高时，松弛极化随温度升高而增加，离子间易发生移动，松弛时间常数减小[9,11]。由于介电损耗与松弛时间常数成反比[6]，故当温度在一定范围内升高时，Df 随着温度升高。

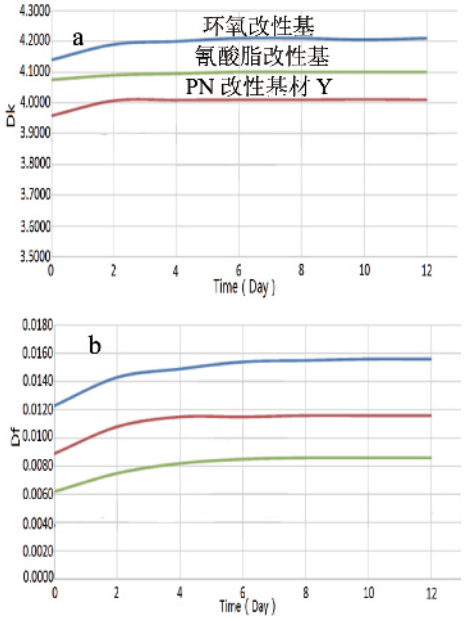

图 3　X、Y 及 Z 三种基材的 Dk 及 Df 随湿度的变化情况

Fig 3. TheDk and Df of X, Y and Z base materials when ambient humidity changes

图 3(a) 和 3(b) 是当环境温度为 80℃时，将三种高速材料在湿度为 50±1% RH 中放置 12 天后，其 Dk 和 Df 的随放置时间延长的变化情况。据图可知，三种高频高速基材 Dk 与 Df 随时间延长呈现出

相似的变化规律，即刚开始的 6 天时间里，Dk 与 Df 呈现出增长趋势，第 6 天以后到实验结束，Dk 与 Df 趋于平稳，随时间的延长增量可忽略不计。这是因为当把基材放置在湿度较大的环境中时，当基材含水量较低时，水在基材中主要以结合水的形式存在，离子运动性较差，影响 Dk 的主要因素是基材，此时 Dk 较小[12]。而随着基材中水含量增加，水在基材中主要以自由水的形式存在，离子的运动性增强，自由水的极化及布朗运动加剧，从而导致基材的 Dk 增加[13,14]。另外，基材在吸收水分之后，由于电导损耗及松弛极化损耗增加，会使得介电损耗增大[13,14]。

2.2 环境温湿度对信号插入损耗的影响

表 1、表 2 与表 3 分别反映的是以 X、Y、Z 为基材的 PCB，在环境湿度为 50% RH 时，当频率从 4GHz 增加到 12.89GH 时，高速信号的插损与材料温湿度之间的关系。对于环氧改性基材 X 而言，当环境温度从 0℃升高至 100℃时，在 4GHz 频率下信号的插入损耗由 -0.55dB 变化至 -0.75dB，劣化 36.36%；在 8GHz 频率下信号的插入损耗由 -0.98dB 变化至 -1.45dB，劣化 47.96%；在 12.89GHz 频率下信号的插入损耗由 -1.49dB 变化至 -2.22dB，劣化 48.99%。对于 PN 改性基材基材 Y 而言，当环境温度从 0℃升高至 100℃时，在 4GHz 频率下信号的插入损耗由 -0.50dB 变化至 -0.60dB，劣化 20%；在 8GHz 频率下，信号的插入损耗由 -0.88dB 变化至 -1.09dB，劣化 23.86%；在 12.89GHz 频率下，信号的插入损耗由 -1.32dB 变化至 -1.67dB，劣化 26.51%。对于氰酸脂改性基材 Z 而言，当环境温度从 0℃升高至 100℃时，在 4GHz 频率下信号的插入损耗由 -0.47dB 变化至 -0.59dB，劣化 25.53%；在 8GHz 频率下，信号的插入损耗由 -0.83dB 变化至 -1.06dB，劣化 27.71%；在 12.89GHz 频率下信号的插入损耗由 -1.25dB 变化至 -1.63dB，劣化 30.4%。

表 1 不同温度及频率下以环氧改性基材 X 为原料的高速 PCB 信号的插损变化

Tab1. The insertion loss variation of high speed signal on epoxy modified materials(X) based PCB under different temperature and frequency

温度(℃) / 频率(GHz)	0	20	40	60	80	100
4	-0.55	-0.61	-0.66	-0.71	-0.75	-0.80
8	-0.98	-1.08	-1.17	-1.26	-1.35	-1.45
12.89	-1.49	-1.63	-1.78	-1.92	-2.07	-2.22

表 2 不同温度及频率下以 PN 改性基材 Y 为原料的高速 PCB 信号的插损变化

Tab2. The insertion loss variation of high speed signal on PN modified materials(Y) based PCB under different temperature and frequency

温度(℃) / 频率(GHz)	0	20	40	60	80	100
4	-0.50	-0.52	-0.54	-0.56	-0.58	-0.60
8	-0.88	-0.93	-0.97	-1.02	-1.05	-1.09
12.89	-1.32	-1.40	-1.48	-1.55	-1.61	-1.67

表 3 不同温度及频率下以氰酸脂改性基材 Z 为原料的高速 PCB 信号的插损变化

Tab3. The insertion loss variation of high speed signal on cyanate modified materials(Z) based PCB under different temperature and frequency

温度(℃) / 频率(GHz)	0	20	40	60	80	100
4	-0.47	-0.50	-0.52	-0.54	-0.57	-0.59
8	-0.83	-0.88	-0.92	-0.97	-1.01	-1.06
12.89	-1.25	-1.33	-1.40	-1.47	-1.54	-1.63

据上述分析可知，当环境湿度为 50% RH 时，PCB 差分线上高速信号的插入损耗的绝对值随着温度及信号频率的升高而加大。这说明环境温度或信号频率越高，信号的插入损耗越严重。研究表明，介质损耗(插入损耗、回波损耗等) 受介电常数、介电损耗及信号频率的影响较大，四者之间的关系可用公式(1) 来表示[15]：

$$\alpha_d = 90.9\sqrt{D_k}\times D_f \times f \qquad (1)$$

式中，α_d 表示介质损耗、D_k 表示介电常数、D_f 表示介电损耗、f 表示信号的频率。

据前面的实验结果及分析可知，当环境温度或环境湿度变化时，基材的介电常数 Dk 及介电损耗 Df 均随着环境温度的升高或环境湿度的加大而增加。此时，根据公式(1) 可知，三种基材及对应的高速 PCB 差分阻抗线上信号的插入损耗也就随之而增加。值得注意的是，从图 2(a) 及 2(b) 中 Dk 与 Df

的纵坐标来看，Dk 的取值远大于 Df，这就意味着 Dk 对介质损耗的影响远远大于 Df 对介质损耗的影响。因此，虽然就 Dk 而言，环氧改性基材 X>PN 改性基材 Y>氰酸脂改性基材 Z。就 Df 而言，环氧改性基材 X>氰酸脂改性基材 Z>PN 改性基材 Y。但根据最终的实验结果可知，就信号的插损绝对值而言，高速印制电路板 A(环氧改性基材 X) >高速印制电路板 B(PN 改性基材 Y) >高速印制电路板 C(氰酸脂改性基材 Z) 。

3　结论

(1) 温度升高会增强三种高速 PCB 基材中环氧树脂的高分子链段活动性，正负载流子产生位移和扭转的阻力便会随之减少，基材内部分子极化程度增加，Dk 也就随之而增大。同时，当温度在一定范围内升高时，松弛极化随温度升高而增加，离子间易发生移动，松弛时间常数减小。由于介电损耗与松弛时间常数成反比，三种高速 PCB 基材的 Df 随着温度升高而增大。

(2) 随着基材中水含量增加，水在基材中的存在形式由结合水向自由水发生转变，离子的运动性增强，自由水的极化及布朗运动加剧，从而导致基材的 Dk 增加。另外，基材在吸收水分之后，由于电导损耗及松弛极化损耗增加，会使得介电损耗 Df 增大。

(3) 因三种高速材料的 Dk 与 Df 均随环境温湿度的增加而增大，故在一定湿度的环境中，随着温度的升高或信号频率的增加，高速信号的插入损耗的绝对值会有所增加。但相对于 Dk 而言，Df 对插入损耗的影响要小得多。

参考文献:

[1] 高文斌，梁晓，张春年，等.基于高速数字电路中的信号完整性分析 [J] .电子技术与软件工程，2018，(24) : 74.

[2] 滕丽.一种高速互连通道的信号完整性仿真研究 [J] .电子与封装，2018，18(12) : 37-40.

[3] 武翔，马振军，张晨洋，等.反应温度对涂层复合吸波材料介电常数和电导率的影响 [J] .纺织科学与工程学报，2019，36(01) : 96-101.

[4] 赵辰阳，王立德，李召召.高速数字 PCB 板设计中的信号完整性研究 [J] .自动化与仪器仪表，2018，(09) : 1-4.

[5] Tzong-Lin Wu，Buesink，Frits，Canavero，et al. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress [J] . IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility，Aug. 2013，55(4) : 624-638

[6] 刘付德，凌志远，熊茂仁.固体介质中电偶极子介电常数温度特性与能级密度分布关系 [J] .物理学报，1995，08: 1302-1309.

[7] Shiue，Guang-Hwa，Kao，Yu-Han，et al. Common-Mode Noise Reduction Schemes for Weakly Coupled Differential Serpentine Delay Microstrip Lines [J] . IEEE Transactions on Components，Packaging and Manufacturing Technology，June 2013，3(6) : 1016-1027.

[8] 王红卫，闻荻江，项瑞阳.钛酸铅-环氧树脂压电复合材料的极化及压电性能研究 [J] .功能材料，1999，05: 545-546.

[9] 李豪，郑梦萍，董林玺.工艺误差对盘式耦合谐振滤波器的影响 [J] .传感技术学报，2018，31(03) : 334-341.

[10] 王涵，徐凌伟，廖建庆，等.多天线无线传感器移动通信网络的物理层安全性能 [J] .传感技术学报，2019，32(02) : 304-308.

[11] 吴宇，杨爱超，欧正宇，等.基于自偏置磁-机-电耦合效应的电流传感器研究 [J] .传感技术学报，2019，32(01) : 62-66.

[12] 李济同，李媛媛，卢文科.声表面波微力传感器信号处理电路的设计与仿真 [J] .传感技术学报，2018，31(07) : 1054-1060.

[13] 赵贵章，徐远志，乔翠平，等.介质含水量与介电常数模型影响因素分析 [J] .工程勘察，2018，46(07) : 55-61.

[14] 刘志壮，朱湘萍，张文昭，等.介电法小麦含水率检测试验研究 [J] .传感技术学报，2017，30(12) : 1857-1861.

[15] 徐小兰. 印制电路高速传输线路设计与制作的信号完整性研究 [D] .电子科技大学，2018.