

导热系数测试的试验方法研究

景莘慧 严晓辉

(东南大学机械工程学院 look@seu.edu.cn)

摘要: 本文立足于电子设备的热设计与电磁兼容性设计之间的冲突与协同的研究, 提出应对屏蔽材料及其他电磁兼容用特殊功能材料的电磁特性和热特性做出全面的评估。为了实现电子设备常用**电磁屏蔽材料的热性能测试**, 文章介绍了常用介质材料的导热系数测试的几种方法, **重点描述了稳态加热长条法的原理和实现过程**, 试验结果表明: 该方法应用于长条状固体电磁屏蔽材料的导热系数测试是可行的, 可为今后屏蔽材料的热性能测试提供参考。

关键词: 导热系数; 稳态加热长条法; 电磁兼容性设计; 热设计

1 选题背景

导热系数是表征材料导热性能的一个重要参数, 是热仿真建模时必须的参数, 如何准确地快速地获得工程材料的导热系数, 对数值模拟的关系甚大。

而在结构设计工程实践中, **电子产品的热设计与仿真分析**从来都不是孤立存在的, 它和其他领域的设计分析存在着密切的联系。集成电路封装领域的热应力分析就是一个很好的例证。此外, 对许多电子设备而言, 其**电磁兼容性能和散热性能**往往是互为矛盾的。

电子设备的热设计与电磁兼容性设计之间的冲突之一集中体现在设备的电磁屏蔽问题上。众所周知, 不断提升的时钟信号频率使得电子设备所面临的电磁环境日益恶劣, 屏蔽技术是解决电磁兼容问题的一个重要手段; 而另一方面信息设备的体积日趋小型化, 导致功率密度也在不断增加, 因此电子设备的热设计面临着愈来愈严峻的考验。**屏蔽体在阻隔电磁能量的同时, 也不可避免地成为阻碍冷却气流畅通的屏障。**因此, 很多时候满足电子设备电磁兼容的设计要求往往是以牺牲其热设计的指标为代价而实现的。

目前广泛应用于军用和民用的电磁屏蔽材料种类繁多, 它们的电磁屏蔽性能及其评价方法已受到越来越广泛的关注, 但对电磁屏蔽材料的热特性数据甚不了解。而实际工程中, 若要协调好产品的电磁兼容和散热之间的冲突, 有必要对此类材料的电磁特性和热特性做出全面的评估。

电子设备常用电磁屏蔽材料主要有以下几大类:

衬垫材料: 全金属丝网类、导电橡胶类、橡胶嵌定向金属丝类、簧片类、泡棉类等。

通风窗材料: 波导、丝网、屏蔽玻璃、屏蔽布、聚酯膜等。

这些材料的热特性有些是较为明确的, 如铝制或钢制波导通风窗、全金属丝网等, 但大多数的热特性与其成分和生产工艺密切相关, 往往需要通过试验进行测定。

本课题立足于电子设备的热设计与电磁兼容性设计之间的冲突与协同的研究, 应用一种经济、方便的**固体材料导热系数测定方法**, 对其可行性和精度进行试验验证, 以期在后续的电磁屏蔽材料的热特性测试中加以应用。

2 试验方法的选择与试验装置的准备

目前国内外关于导热系数的测量方法有很多^{[1]-[4]}，其中固体材料的导热系数的实验方法按其原理的不同，可分为稳态导热过程和非稳态导热过程两大类。后者是利用试件的非稳态导热过程测算热扩散系数 a ，在已知物体密度 ρ 和比热 C_p 的前提下，再利用 $\lambda = a / (\rho \cdot C_p)$ 计算出试件的导热系数 λ 。而前者是利用试件的稳态导热过程，直接测量导热系数，其原理简明，测试方法方便、直接。在这种方法中，按试件的形状不同，又可以分为无限大平板法，长圆柱法和球体法三种。前两种的优点是结构简单，易于建造；缺点是其热损不易控制，需要较多的辅助设施。后一种的优点是由于热量仅由内球向外沿径向传播，故其热损可以不予与考虑；其缺点是球体加工比较困难，而且其测量对象一般仅限于颗粒状材料。这对于常用的电磁屏蔽材料显然是不合适的。

考虑到测试的成本、复杂性、精度、测温范围及对电磁屏蔽材料的适用性，我们在实验室现有条件的基础上选择稳态加热长条法（long bar with steady heating）^[1]。该方法使用一个棒形或板形的试样，试样在一维中的长度要显著长于其他两维，在试样的两边要钻 10 个近似排成一条直线的孔，再用铜丝穿过这些孔，最后用环氧氧化铝粉填充这些孔。热电偶被放在沿着试样中心线钻的孔中。试样的上面和下面应放置隔热材料来阻止通过空气对流和辐射向周围环境损失的热量。整个测试装置放在一个近似真空的环境中。

为了初步验证系统的准确性及整个方案的可行性，采用了导热系数已知的紫铜片作为测试材料。

我们将导热硅胶在铜片上涂抹形成一个涂层，将电热丝埋入涂层中，再涂一层硅胶，确保电热丝与铜片绝缘，也使电热丝与铜片有较好的热接触。

实验采用交流稳压电源，测量期间功率波动不超过 5%，供给热线的功率至少为 30W，如果可能，最好采用恒定功率电源。

本次实验所需要的真空环境由 PVC-U 管道做一个密封容器来实现。管道直径为 $\phi 110\text{mm}$ ，接口方式为胶水粘接。在抽气方式的选择上，可以使用工业上用的真空发生器，或采用简单的手动注射器或者气泵，测试装置如图 1 所示。

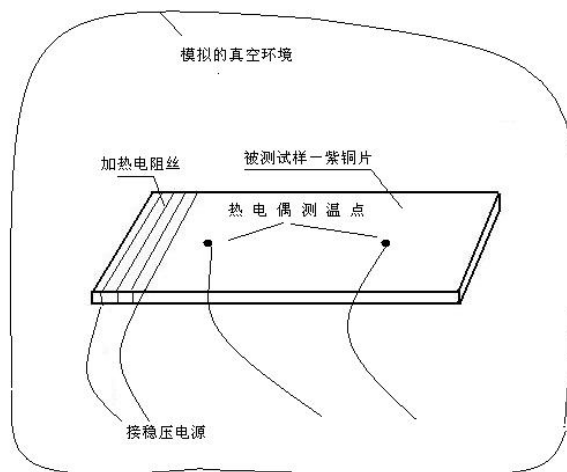


图 1 应用稳态加热长条法测试固体材料导热系数的原理示意图

3 试验步骤

(1) 埋设热电偶

在试样的长度方向上选取两个测量点埋设热电偶, 测量点的选取要能反映温度梯度的变化, 一般是选取在温度梯度变化的 20% 的点的位置和 80% 点的位置。而且这两点应该在沿着长度方向的直线上, 偏差不宜过大。埋设方法见文[5]。

(2) 接线及装样

将电热丝电源线和热电偶的线分别接到穿过容器盖子的线上, 然后分别连上电源和电位差计, 同时注意将两个热电偶的冷端接在一起, 并放在冰水混合物中进行零度补偿, 或放置在相对稳定的室内环境中。

(3) 预加热与抽真空

将埋好热电偶的试样装入真空容器中, 由于容器是用 PVC—U 管制作的, 因此在容器中放一些塑料泡沫来支撑试样, 然后将盖子盖好旋紧。同时打开加热电阻丝的电源开始加热。将真空泵通过气管接到单向阀, 开始抽气, 抽气时应该感觉到阻力越来越大, 表明真空已逐渐形成。

(4) 测试并记录数据

待容器内试样被加热 5-10 分钟左右达到热平衡, 可根据连接在电位差计上的光电检流计光标是否稳定在一个固定位置来判断。达到热平衡以后, 即可以通过电压表, 电流表和电位差计来测得所需要得数据。

4 测试结果及分析

在空气中测得的相关数据为: 电压 $U=6.7V$, 热线的电阻为 10 欧姆, 热电偶未知端的电压为 0.90mV 和 1.36mV, 由上述公式可算出两个测温点与环境间的温差为 35.85 摄氏度和 23.91 摄氏度, 两点间的温差为 11.9 摄氏度。则由计算公式得:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad } t} = \frac{R}{S} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta t}{l}} = \frac{6.7 \times 6.7 \times 25 \times 10^{-3}}{10 \times 50 \times 0.5 \times 10^{-6} \times 11.9} \\ = 377.22(\text{W/m}\cdot\text{K})$$

在真空容器中测得的相关数据为: 电压 $U=6.7V$, 未知端的电压为 1.17mV 和 1.71mV, 由上述公式可算出两个测温点与环境间的温差为 31.44 摄氏度和 45.88 摄氏度, 两点间的温差为 14.44 摄氏度。则由计算公式得:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad } t} = \frac{R}{S} \cdot \frac{1}{\frac{\Delta t}{l}} = \frac{6.7 \times 6.7 \times 25 \times 10^{-3}}{10 \times 50 \times 0.5 \times 10^{-6} \times 14.44} \\ = 310.87(\text{W/m}\cdot\text{K})$$

通过查阅相关资料得知,紫铜的导热系数在 300~320(W/m·K)之间, 可知测得的数据误差并不大, 而且在空气中测的数据和真空中测得的数据相比, 真空中的准确度要高一些。

5 结论

本文围绕常用介质材料的导热系数测试这一议题，描述了应用稳态加热长条法的原理和实现对紫铜试样的导热系数进行了测试，目的是为下一步对电磁屏蔽材料和其他电磁兼容领域的特殊功能材料开展热性能试验进行探索，为用户在建立热仿真模型时提供更加准确的材料热参数。试验结果表明，该方法用于长条状固体电磁屏蔽材料的导热系数测试将是可行的。

参 考 文 献

- [1] J.E. Graebner . Measuring thermal conductivity and diffusivity[M] . Thermal measurements in electronics cooling 1997
- [2] 刘顺华, 耿兆祥, 李长茂. 热线法的应用[J]. 计测技术, 2002
- [3] 张忠进, 郎敏. 断电热线法测试材料导热系数的研究[J]. 东北电力学院学报 , 1995
- [4] 李丽新, 刘圣春, 刘秋菊 .用综合测量方法设计固体导热系数测试试验台[J]. 实验室研究与探索, 2006 Apr Vol.25 No 4
- [5] 邱成梯, 赵惇爻, 蒋全兴编著, 电子设备结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.12