

Study on Measuring Thermal Conductivity of Energy-Saving Materials by Transient Method

Xiang Zhang*, Zhenyu Huang, Li Xu, Quankun Xu, Kan Kan, Guoguang Wu

Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Geometric and Mechanical Metrology Technology,
Guangdong Provincial Institute of Metrology, Guangzhou Guangdong
Email: *zxiang2012@163.com

Received: Jul. 28th, 2017; accepted: Aug. 18th, 2017; published: Aug. 24th, 2017

Abstract

The thermal conductivity is an important parameter that characterizes the low thermal conductivity of energy-saving materials, and it is extremely important to measure it accurately. And the thermal conductivity with the energy-saving materials, composition, structure, phase and other changes, the measurement accuracy is the basis for the development of energy-saving materials. In this paper, the thermal conductivity of 12 kinds of energy-saving materials was measured and analyzed by means of transient tropical measurement device and transient plane heat source method. At the same time, the influence of each factor on the measurement results was analyzed. The method of transient measurement is used to verify the thermal conductivity of energy-saving materials.

Keywords

Thermal Conductivity, Transient Method, Measuring, Energy-Saving Material

瞬态法测量节能材料导热系数的研究

张 向*, 黄振宇, 徐 立, 徐全坤, 阚 侃, 吴国光

广东省计量科学研究院 广东省现代几何与力学计量技术重点实验室, 广东 广州
Email: *zxiang2012@163.com

收稿日期: 2017年7月28日; 录用日期: 2017年8月18日; 发布日期: 2017年8月24日

摘 要

导热系数是节能材料表征其低导热性能的重要参数, 准确对其测量显得极其重要。而导热系数又随着节
*通讯作者。

能材料的成分、结构、相态等的变化而变化,其测量精度是节能材料发展的基础。本文利用瞬态热带法测量装置和瞬态平面热源法测量装置对12种节能材料的导热系数进行了测量和分析,同时分析了各因素对瞬态法测量结果的影响,对比研究了多种导热系数瞬态测量方法,验证了瞬态法适用于节能材料的导热系数测量。

关键词

导热系数, 瞬态法, 测量, 节能材料

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

材料的导热系数与材料的种类、状态(气、液、固三种状态)和所处的条件(温度、压力、湿度等)有关;有时候也与材料的组成结构、密度、含水率等因素有关;对于特定种类的材料,其导热系数与材料的大小、形状无关;但对于薄膜类(厚度为微米或纳米级别)材料,其导热系数可能会急剧减小,与薄膜的厚度有关。随着科技的发展,人们开始研究更多种类的材料,使之能在满足特定行业内的特定性能需求的同时,又具有特别高的或者特别低的导热系数;不同的场合,需要材料的导热系数的大小不同:防止热量散失的场合,材料的导热系数越小越好,如保温材料、高效保温材料;加快热量散失的场合,材料的导热系数越大越好,以满足传热、导热、散热的需要,如导热胶、导热泥、导热脂等。

导热系数的应用十分广泛,建筑节能等工业领域的有关传热设计中是必不可少的。为了使工程设计合理,节省能源和原材料,提高产品的质量,都需要有准确且可靠的导热系数等热物理参数的资料。通常把导热系数较低的材料称为保温材料(我国国家标准规定,凡平均温度不高于 350°C 时导热系数不大于 $0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的材料称为保温材料),而把导热系数在 $0.05\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下的材料称为高效保温材料;导热系数高的物质有优良的导热性能,如导热胶、导热泥、导热脂等,需要有较高的导热系数,以满足传热、导热、散热的需要。

导热系数测试方法,分为稳态法和瞬态法(又称为非稳态法)两类,其中瞬态法主要有:脉冲加热瞬态法、热线法、探针法、热盘法、热带法、激光法等。各种导热系数测试方法,有其自身的适用范围。由于物质具有固、液、气三种状态,不同状态时,其导热系数会差异很大;而不同状态时导热系数的测量也会有很大的不同。瞬态法中应用最广的是热线法,适用于导热系数小于 $2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的各向同性均质材料导热系数的测定。

2. 测量原理

2.1. 脉冲加热瞬态法

脉冲加热瞬态法[1] [2] [3] [4],被测试样品本身加工成线(管)状,被放置在一个真空或充以惰性气体的箱中,两端加以脉冲电压,脉冲电流通过后线性温度发生变化,用扫描高速高温计测量温度的分布,从而得到导热系数。能量守恒方程见公式(1),由于在冷却过程中测量导热系数, $I = 0$, ε_h 、 c_p 为已知,由简化后的公式(2)及边界条件即可得到导热系数。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\rho I^2}{S^2} - \frac{\varepsilon_h \sigma P (T^4 - T_0^4)}{S} - \frac{\mu I}{S} \frac{\partial T}{\partial x} = \delta c_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\varepsilon_h \sigma P (T^4 - T_0^4)}{S} = \delta c_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

式中:

λ —— 导热系数, W/(m·K);

ρ —— 电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;

ε_h —— 全波长半球发射率;

μ —— 托马逊因子;

δ —— 密度, kg/m^3 ;

c_p —— 比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

S —— 横截面积, m^2 ;

P —— 周长, m ;

T —— 样品温度, K ;

T_0 —— 环境温度, K 。

2.2. 热线法

热线法, 将发热电导体(热线)插入到大块状样品中, 热线连接恒定加热功率的电源, 加热使其温度上升。测量热线本身温度(热阻法)或与热线相隔一定距离的平板温度(平行线法)随时间上升的关系。被测材料的导热性能决定了该关系, 利用它可测得导热系数。本方法缺点是测试过程中存在热线电阻随温度升高而变化, 温度对导热系数变化的影响难以确定, 被测粒度不能太大, 加热装置不稳定, 被测物氧化放热等影响温度的测试等问题。

2.3. 探针法

探针法, 与热线法类似, 将一根发热电导体探针插入松散的被测样品中, 施加一定加热功率, 测量探针温升规律, 根据探针温升与加热功率、探针自身热熔、被测样品热导率和比热的关系, 计算得到被测样品热导率。该方法主要适用于土壤、生物组织等松散材料的热导率测量。

2.4. 热带法

热带法[5], 也类似于热线法, 将一条很薄的金属带(即热带)夹持在待测材料中间, 从某时刻起以恒定电功率加热金属带, 测量并记录热带的温度响应曲线, 得到被测材料的导热系数和热扩散率两个热物性参数, 计算公式如式(3)~(6)。

$$R(t) = R[1 + \alpha \Delta T(t)] \quad (3)$$

$$R(\tau) = R_0 \left[1 + \left(\alpha P_0 / (4\pi^{1/2} h \lambda) \right) f(\tau) \right] \quad (4)$$

$$f(\tau) = \tau \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\tau} \right) - \frac{\tau^2}{2\sqrt{\pi} [1 - \exp(-\tau^{-2})]} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} [Ei(-\tau^{-2})] \quad (5)$$

$$\tau = (kt/d^2)^{1/2} \quad (6)$$

式中:

- R_0 ——瞬时记录开始前探头电阻值, Ω ;
- A ——探头电阻温度系数, ppm/K;
- $\Delta T(t)$ ——探头温度随时间变化的函数, K;
- P_0 ——电源总输出功率, W;
- λ ——样品导热系数, W/(m·K);
- $2h$ ——热带长度, m;
- $f(\tau)$ ——假定平面热源厚度, m;
- t ——从瞬态开始记录的时间, s;
- τ ——无量纲参数
- k ——样品的热扩散系数, m^2/s ;
- Ei ——指数幂积分函数;
- Erf ——相对误差函数。

2.5. 热盘法

热盘法, 一个圆盘探头放置在一个无限大(理想模型)的样品中, 通过加热圆盘型探头, 并记录探头电阻随温度的变化, 进而得到被测材料的导热系数。

2.6. 瞬态平面热源法(TPS)

瞬态平面热源法(TPS)是 Gustafsson 教授[6] [7] [8]首先提出的, 主要针对瞬态热线法测量时金属带易发生机械损坏、电路设计限制电阻值增大、条带与导线连接方式等问题提出的一种新方法, 将探头夹于两块样品之间或浸没在液体中, 通电使探头发热, 记录探头电阻值随温度变化。孟飞燕[9]研究了样品含水率、厚度、测试环境等对测试结果的影响。周子民[10]建立了二维瞬态传热数学模型并借助模拟软件进行了数值模拟与试验分析对比研究。TPS 法适用于测量(77~1000) K 范围的导热系数和热扩散系数等多个物性参数测量。瞬态平面热源法根据式(7)~(10)计算。

$$R(t) = R[1 + \alpha \Delta T(t)] \quad (7)$$

$$\Delta T(\tau) = P_0 (\pi^{3/2} \alpha \lambda)^{-1} D(\tau) \quad (8)$$

$$D(\tau) = [m(m+1)]^2 \int_0^r \sigma^{-2} \left[\sum_{l=1}^m l \sum_{k=1}^m k \exp\left(\frac{-(l^2 + k^2)}{4m^2 \sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2m^2 \sigma^2}\right) \right] d\sigma \quad (9)$$

$$\tau = (t/\theta)^{1/2} = (t/(\alpha^2/k))^{1/2} = (kt/\alpha^2)^{1/2} \quad (10)$$

式中:

- R_0 ——瞬时记录开始前探头电阻值, Ω ;
- A ——探头电阻温度系数, ppm/K;
- $\Delta T(t)$ ——探头温度随时间变化的函数, K;
- P_0 ——电源总输出功率, W;
- λ ——样品导热系数, W/(m·K);
- α ——传感器半径, m;
- I_0 ——瞬时起始电流值, A;

T ——从瞬态开始记录的时间, s;

θ ——特征时间, s;

τ ——无量纲参数;

k ——样品的热扩散系数, m^2/s 。

2.7. 双螺旋探针平面热源法(HotDisk)

HotDisk 法, 使用一种薄层圆盘形双螺旋结构探针同时作为平面热源和温度传感器, 放置于表面光洁平整的相同被测样品中间, 探头通电后温度上升, 探头热阻系数随温度变化而变化, 测量温升及响应时间, 得到热导率。

2.8. 激光法

激光法, 又称闪光法, 使用激光或氙灯脉冲均匀照射小圆盘状试样正面、记录背面温度响应, 得到热导率。其原理是根据导热系数及热扩散系数, 与比热容和体积密度之间的关系, 首先测出体积密度、再测出热扩散系数和比热容, 进而得到导热系数。

3. 测量装置与影响因素分析

3.1. 瞬态热带法测量装置

瞬态热带法测量装置如图 1 所示, 热带放置于两片相同的样品中间, 热带两端接通电源, 并以恒定电功率加热金属带, 测量并记录热带的温度响应曲线, 计算得到导热系数。将建筑用的硅橡胶、建筑玻璃、泡沫塑料、轻质保温砖、轻质耐火黏土砖、硅藻土砖、沙、保温砂浆、混泥土砌块、腻子粉、高密度硅酸铝砖、聚苯乙烯等材料样品作适当前处理加工, 将热带夹在两片样品中间进行测试。

3.2. 瞬态平面热源法测量装置

瞬态平面热源法测量装置如图 2 所示, 将热线制作为盘状, 夹在两片样品中间, 通电使探头发热, 记录探头电阻值随温度变化, 计算得到导热系数。将硅橡胶等 12 种建筑用的材料样品作适当前处理加工, 依次将盘状热线夹在各种材料样品中进行测试。

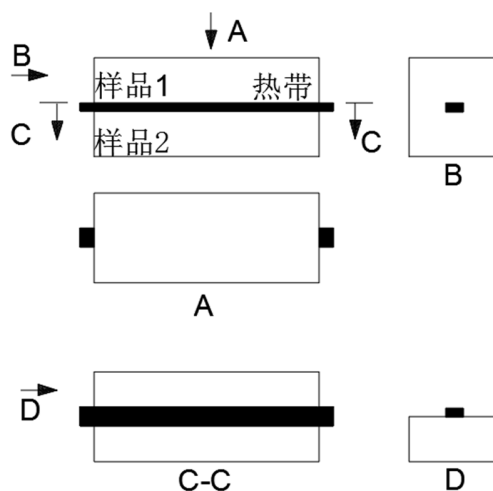


Figure 1. Measuring equipment of transient tropical method

图 1. 瞬态热带法测量装置

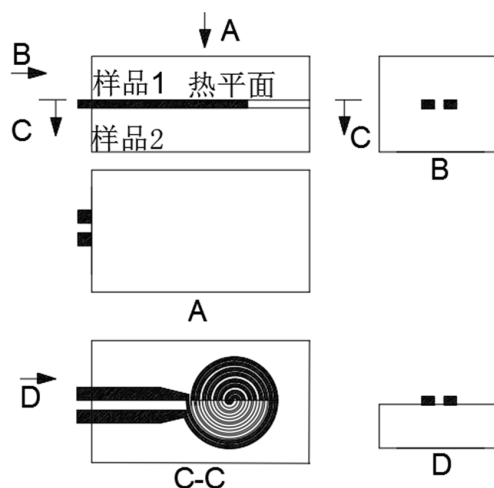


Figure 2. Measuring equipment of transient plane heat source method

图 2. 瞬态平面热源法测量装置

Table 1. Measurement data of thermal conductivity of energy-saving materials

表 1. 节能材料导热系数测量结果数据

材料名称	标准值	瞬态热带法			瞬态平面热源法		
		导热系数	重复性	偏差	导热系数	重复性	偏差
硅橡胶	0.20	0.2094	3.8%	4.7%	0.2063	4.3%	3.2%
建筑玻璃		0.9791	4.1%		0.9826	4.0%	
泡沫塑料		0.0411	3.7%		0.0398	3.8%	
轻质保温砖		0.1732	3.4%		0.1757	3.7%	
轻质耐火黏土砖		0.4157	2.3%		0.4024	2.8%	
硅藻土砖		0.2128	2.8%		0.2165	2.9%	
沙		0.2274	4.0%		0.2331	3.6%	
保温砂浆		0.0501	3.7%		0.0497	3.4%	
混泥土砌块		0.2016	4.2%		0.2073	4.5%	
腻子粉		0.2935	3.6%		0.3024	3.9%	
高密度硅酸铝砖		0.0312	3.8%		0.0307	3.5%	
聚苯乙烯		0.0283	3.4%		0.0279	3.1%	

注：导热系数，W/(m·K)。

3.3. 影响因素

探头热容对热导率测量精度的影响会随探头半径、测量时间及加热功率等测量参数的不同而发生变化[11]；由于孔隙中空气流通过程中存在对流传热，孔隙及间隙率对热导率测量精度的影响；含湿量对导热系数测量精度的影响；电功率波动影响温度波动进而影响导热系数测量精度。因此，探头半径、测量时间、加热功率，被测样品的厚度偏差、密度取值范围、缝隙率、含湿量，设备仪器的热阻稳定性、电功率稳定性、温度测量精度等是影响导热系数的主要因素[12]。

4. 实验结果与讨论

在室温条件下，利用多个测量装置对多种材料进行了测量，结果如表 1 所示。由测试结果可知，测

量具有较好的重复性较好,均在 5%以内。由硅橡胶导热系数参比板测量值与标准值的偏差不超过 5%。测量误差的主要原因包括:测量条件与理论模型的差别、各参数的测量存在误差、加热功率波动等。

5. 结论

本文利用瞬态热带法测量装置和瞬态平面热源法测量装置对 12 种节能材料的导热系数进行了测量,通过对测量结果的分析,瞬态法测量材料导热系数准确性较好。同时分析了各因素对瞬态法测量结果的影响,对比研究了多种导热系数瞬态测量方法,瞬态法方便快捷、重复性和准确性都相对较好,可作为一种导热系数测量非稳态标准方法,可广泛应用于节能材料的导热系数的科研测量和工业应用中。

基金项目

广东省质量技术监督局科技计划项目(2014ZPJ01)。

参考文献 (References)

- [1] Cezairliyan, A. (1979) Advance in Measurements of the Thermos-Physical Properties by Dynamic Techniques. *High Pressure, High Temperature*, **11**, 9-27.
- [2] Righini, F., et al. (2000) Pulse Calorimetry at High Temperatures. *Thermochimica Acta*, **347**, 93-102.
- [3] Cezairliyan, A., et al. (1990) Issues and Future Directions in Subsecond Thermophysics Research. *International Journal of Thermophysics*, **11**, 819-833.
- [4] 戴景民, 范毅, 褚载祥. 脉冲加热测量材料热物性技术的综述与分析[J]. 计量学报, 2001, 22(4): 249-253.
- [5] 于帆, 张欣欣. 热带法测量材料导热系数的实验研究[J]. 计量学报, 2005, 26(1): 27-29.
- [6] Gustafsson, S.E. (1979) Transient Hot-Strip Method for Simultaneously Measuring Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Solids and Fluids. *Journal of Applied Physiology*, **12**, 1411-1422.
- [7] Gustafsson, S.E. (1991) Transient Plane Source Techniques for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity Measurements of Solid Materials. *The Review of Scientific Instruments*, **62**, 797-804.
- [8] Gustafsson, S.E., Karawacki, E. and Chohan, M.A. (1986) Thermal Transport Studies of Electrically Conducting Materials Using the Transient Hot-Strip Technique. *Journal of Applied Physics*, **19**, 727-735.
- [9] 孟飞燕, 张玫, 马亿珠, 等. 瞬态平面热源法测试材料导热系数的影响因素分析[J]. 河南科技, 2013(4): 59-60.
- [10] 周子民, 向锡炎, 陈晓玲, 张忠霞. 保温材料热物性测试的实验及数值研究[J]. 热科学与技术, 2007, 6(4): 368-372.
- [11] 王强, 戴景民, 何小瓦. Hotdisk 探头热容对热导率测量的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(1): 164-168.
- [12] 周平. 保温板导热系数检测数据影响因素、偏差分析[J]. 建筑工程, 2013(10): 78.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aepe@hanspub.org