

Hot Disk瞬态平面热源法在建筑节能材料测试中的应用

(北京中建建筑科学技术研究院 丰台区南苑新华路1号 100076)

摘要 本文介绍了Hot Disk瞬态平面热源法测试原理，以及采用Hot Disk瞬态平面热源法测试建筑材在不同含水率条件下导热系数的变化趋势。

关键词 导热系数 静态法 瞬态法 瞬态平面热源法 含水率

1 引言

导热系数是反应材料热工性能的参数，是鉴别材料保温性能优良的主要标志。近几年，随着我国建筑节能法规和标准的出台，建筑业对建筑节能越来越重视。因此，准确测得建筑材料在不同含水率条件下导热系数的变化趋势，对于工程合理选材及工程验收具有十分重要的意义。

然而伴随材料科学的飞速发展，对材料的测试方法提出了更高的要求，即不断拓宽应用范围、提高测试精度和测试速度。因此需要不断地改进传统测试方法，并采用全新的测量技术。

如今，很多新材料和材料在不同含水率条件下热工性能的变化等很难从资料中获得相关数据，因此对材料的实际检测变得十分必要。

2 国内外导热系数测定方法

2.1 静态方法

最早的测量使用静态方法，分为防护热板法和热流计法，它的普遍特点是操作人员在已知样品的壁厚上建立温度梯度，并控制从一边传递到另一边的热量，最常用的热流是一维的。在测量中最常用的变量是Guarded Hot Plate (GHP)，即防护热板法。GHP是指防止热量通过边界从系统散发出去的一种设置。该方法基于单向稳定导热原理，当试样上、下两面处于不同的稳定温度下，测量通过试样有效传热面积的热流（计量功率和面积）及试样两表面间温差和厚度，得出材料导热系数。GB/10294—1988《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》就是测试方法标准。该方法的测试的稳定期一般需要3-4小时，测试时间1-2小时，整个测试时间合计4-6小时（根据仪器性能而不同）。

另一种静态方法就是热流计法，热流计法是参照国标 GB10295—1988 建立起来的，属于建立在傅立叶定律一维稳定热流基础上的比较方法，需要由防护热板法测定过的标定试样或标准板进行热流计系数的标定。但由于热流计易漂移所以要定期标定以保证仪器的准确性。

2.2 瞬态法

目前瞬态法分为激光发射法、热线法和热带法。

激光发射法是测量热扩散系数最有名也是最常用的瞬态方法。它一般不能对聚合物等热扩散系数较小的材料进行测量，在此我们不做详细说明，只作简要的介绍。该方法适用于测量各向同性材料、固体材料，也可以对如金属这样的良导热体进行测量；测量可在高温下进行，而且测量迅速。由于该方法只能得出热扩散系数，因此要计算热导率，还必须从其它的测量中获得热容值。误差在两次测量中的传播会降低测量的精确度。

热线法是参照GB11205-89《橡胶热导率的测定 瞬态热丝法》建立起来的。热线法是应用比较多的方法，是在样品（通常为大的块状样品）中插入一根热线。测试时，在热线上施加一个恒定的加热功率，使其温度上升。测量热线本身或平行于热线的一定距离上的温度随时间上升变化的关系。由于被测材料的导热性能决定这一关系，由此可得到材料的导热系数。

热带法也是在瞬态法基础上开发出来，只是将金属线压成扁平的金属带，提高与样品表面的接触。由于带状物有一定的面积，因此可以用来同时测量热扩散系数和热导率。热带法与热线法的工作原理一样，都是将电流通过金属产生热量，样品的性质决定了热量传递到样品中的方式。金属带只能用于测量绝缘的样品。要得到较好的测量结果，样品表面的粗糙度应当非常小。许多商业测试方法都基于热带法和热带理论，也就是把金属带置于基体上，另一面与样品接触。最终的响应只有一半来自样品，另一半来自已知热导率的基体，从而降低了测量的灵敏度。

另外一种瞬态法是下面将要详细介绍的Hot Disk瞬态平面热源法。

3 Hot Disk瞬态平面热源法

3.1 简介

最近在热带法基础上开发出瞬态平面热源法（TPS法），该方法也被称为“Gustafsson”探头法或HOT DISK法。与热带方法相比，TPS探头可以看成由金

属带弯成的许多同心圆，在两面加抗腐蚀性和机械性能良好的聚合物保护层。实际应用时将这些同心圆制成双螺旋形，这样电流就可以从一端传到另一端。与热带法不同，Hot Disk法测量时将探头置于两块样品之间，这样升温过程就会同时受到两边样品的影响。

瞬态平面热源技术（Transient Plane Source Method, TPS）是由瑞典Chalmer 理工大学的Silas Gustafsson 教授在热线法的基础上发展起来的一项专利技术，在过去20年中，瞬态平面热源技术被越来越多地被研究人员应用于各种不同类型材料的热物性的测试。

3.2 原理

仪器使用了一个薄层圆盘形的温度依赖电阻作为样品探头（见图1），探头系由导电金属镍经刻蚀处理后形成的连续双螺旋结构的薄片，外层为双层Kapton 保护层。外层的Kapton 保护层的厚度只有0.025 mm，它令探头具有一定的机械强度，同时保持探头与样品之间的电绝缘性。与热线法（Hot Wire）和热带法(Hot Strip)一样，由于采用具有热阻性的材料同时作为热源和温度传感器，瞬态平面热源技术能够覆盖较大的热导率范围，因而可以同时适用于各种不同类型的材料。

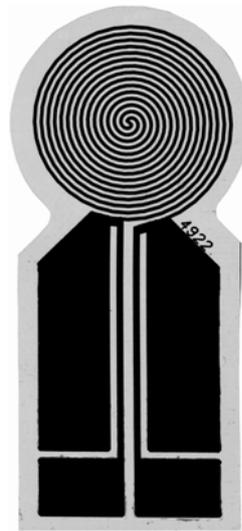


图1 连续双螺旋结构的圆盘型平面热源探头

测试时，探头被夹在两片样品中间，形成类似三明治的结构（见图2），在探头上通过恒定输出的直流电，由于温度的增加，探头的电阻发生变化，从而在探头两端产生电压下降，通过记录在一段时间内电压和电流的变化，可以较为精确地得到

探头和被测样品中的热流信息。

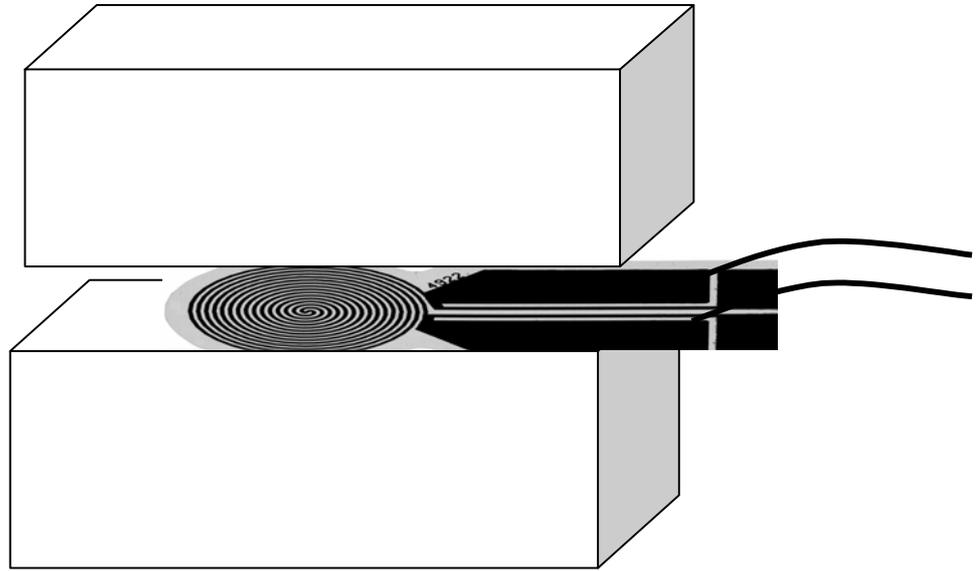


图2 平面热源探头放置于样品中间形成三明治结构

初始测试时，在绝缘性的Kapton 涂层上会产生很小的温度下降，经过很短的一个初始化过程，由于输出功率是恒定的，温度的下降将保持恒定。探头的电阻变化可以用下式表示：

$$R(t) = R_0 [1 + \alpha \Delta T_i + \alpha \overline{\Delta T(\tau)}] \quad (1)$$

R_0 是探头在瞬态记录前的电阻， α 是热阻系数（TCR）， $\overline{\Delta T(\tau)}$ 是假设探头和被测样品完全接触时的平均温度上升值。

$$\overline{\Delta T(\tau)} = P_0 D(\tau) / (\pi^{3/2} r k) \quad (2)$$

在方程式2 中， P_0 是探头释放的热， k 是被测样品的热导率， r 是探头的半径， τ 可以由下式得到：

$$\tau = \frac{\sqrt{at}}{r} = \sqrt{\frac{t}{\Theta}} \quad (3)$$

a 是被测样品的热扩散系数， t 是测试时间， Θ 是特征测量时间（ $\Theta = r^2/a$ ）。将2 式代入1 式，

并设 $R^* = R_0 [1 + \alpha \Delta T_i]$ 和 $C = (\alpha R_0 P_0) / (\pi^{3/2} r k)$ ，1式可以写成

$$R(t) = R^* + CD(\tau) \quad (4)$$

将测得的电阻 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 作图应当得到一条直线。通过反复变换 Θ 进行拟合，寻找正确的 Θ 数值，使 $R(t)$ 对 $D(\tau)$ 的直线相关性达到最大。热扩散系数可以由 $a=r^2/\Theta$ 得到，热导率由直线的斜率 C 计算得到。

当测试时间比特征测量时间 Θ ($\tau < 0.5$) 短得多时，只有当参数 $\sqrt{a}/k = \sqrt{k\rho C_p}$ 时上述计算成立，此时的数学模型接近于表面通过恒定热流的无限厚板的情况。当测试时间比特征测量时间 Θ ($\tau > 2$) 长得多时，只能得到热导率，此时的数学模型接近于一个无限大固体被一个点热源在内部加热的情况。因此，为了在瞬态测试时同时得到热扩散系数和热导率，必须选择合适的参数，测试时间不能过于偏离特征测试时间。

3.3 瞬态平面热源技术对挤塑聚苯板和水泥砂浆的测试

本文应用瞬态平面热源技术 (Transient Plane Source Method, TPS) 分别对挤塑聚苯板和水泥砂浆在不同含水率的情况下导热系数进行了测试。

实验方法为将试样分别烘干至恒重，然后将其浸泡入水中直至饱和，测试时擦干试样表面的水分后，测试质量和导热系数；让试样在自然状态下蒸发水分（或置于烘箱中），每隔一定时间对其进行上述测试，从而得出不同质量含水率条件下材料的导热系数。

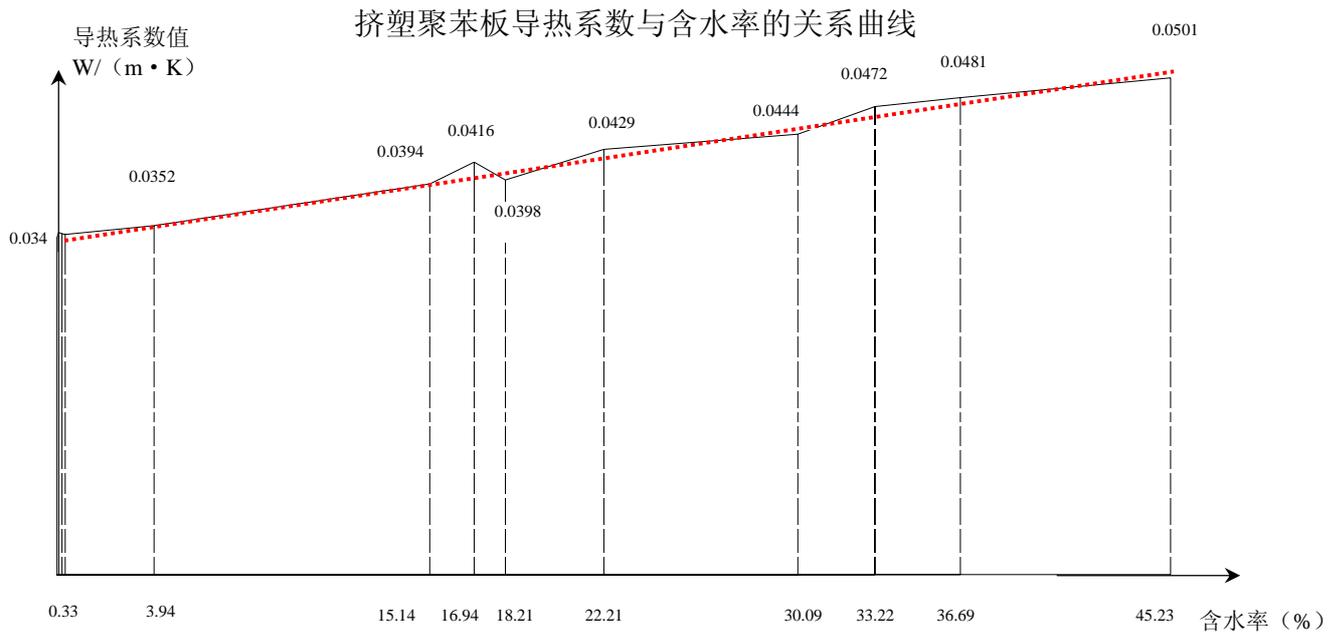
3.4 挤塑聚苯板测试结果及曲线分析

制作两块挤塑聚苯板样块分别编号为 a 和 b，a 样块尺寸为 99×100×19 mm，表观密度为 39.77kg/m³，烘干至恒重时质量为 7.48g，b 样块尺寸为 100×100×19 mm，表观密度为 39.53kg/m³，烘干至恒重时质量为 7.51g。导热系数与含水率的关系测试结果具体如下表：

次数	试块 a 质量 a'(g)	试块 b 质量 b'(g)	a 含水率 (%)	b 含水率 (%)	平均含水率 (%)	导热系数 W/(m·K)
1	7.48	7.51	0.00	0.00	0.00	0.0340
2	7.48	7.52	0.00	0.13	0.07	0.0345
3	7.49	7.53	0.13	0.27	0.20	0.0344
4	7.5	7.54	0.27	0.40	0.33	0.0343
5	7.74	7.84	3.48	4.39	3.94	0.0352
6	8.53	8.73	14.04	16.25	15.14	0.0394
7	8.65	8.88	15.64	18.24	16.94	0.0416

8	8.73	8.99	16.71	19.71	18.21	0.0398
9	9.02	9.30	20.59	23.83	22.21	0.0429
10	9.61	9.89	28.48	31.69	30.09	0.0444
11	9.83	10.14	31.42	35.02	33.22	0.0472
12	10.11	10.38	35.16	38.22	36.69	0.0481
13	10.77	11.00	43.98	46.47	45.23	0.0501

注:上述含水率以此计算: a含水率= $(a'-a)/a * 100\%$ b含水率= $(b'-b)/b * 100\%$



通过曲线分析:质量含水率每增加 10%挤塑板导热系数增加 0.0035481 W/(m·K)。

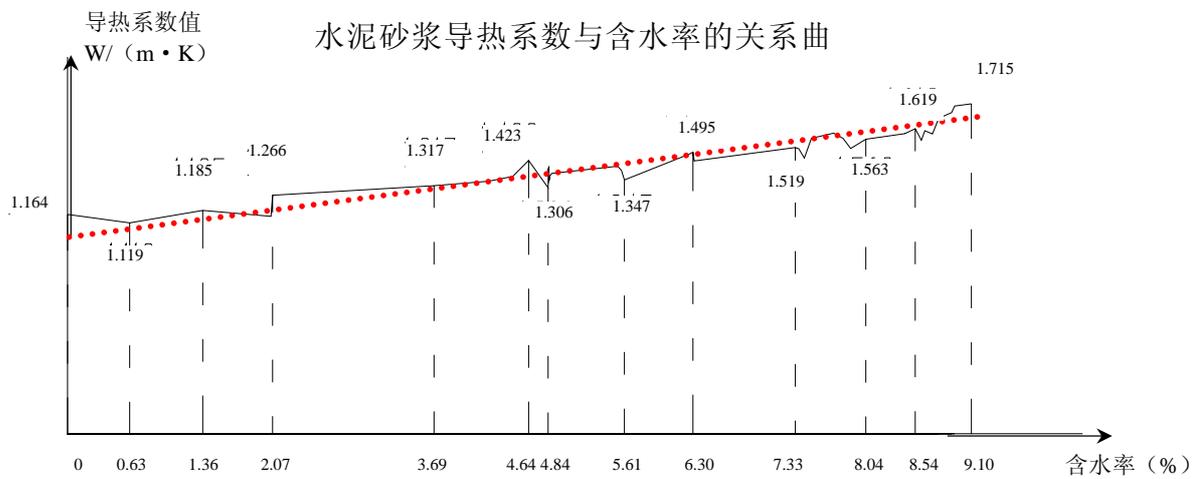
3.5 水泥砂浆测试结果及曲线分析

制作两块水泥砂浆样块分别编号为 a 和 b, a 样块尺寸为 70×70×20 mm, 绝干时质量为 202.68g 密度为 $2.068 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, b 样块尺寸为 70×69×19.5 mm, 绝干时质量为 190.48g 密度为 $2.022 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。导热系数与含水率的关系测试结果具体如下表:

次数	试块 a 质量 a'(g)	试块 b 质量 b'(g)	a 含水率 (%)	b 含水率 (%)	平均含水率 (%)	导热系数 W/(m·K)
1	202.68	190.48	0	0	0	1.164
2	203.88	191.75	0.59	0.66	0.63	1.119
3	205.65	192.95	1.44	1.28	1.36	1.185
4	207.17	194.25	2.17	1.94	2.05	1.154
5	207.21	194.26	2.19	1.95	2.07	1.266
6	210.75	197.5	3.83	3.55	3.69	1.317

7	211.99	198.6	4.39	4.09	4.24	1.34
8	212.53	199.11	4.63	4.33	4.48	1.366
9	212.85	199.48	4.78	4.51	4.64	1.423
10	213.35	199.91	5.00	4.72	4.86	1.368
11	213.34	199.85	5.00	4.69	4.84	1.402
12	213.33	199.85	4.99	4.69	4.84	1.306
13	213.35	199.86	5.00	4.69	4.85	1.389
14	213.37	199.85	5.01	4.69	4.85	1.419
15	213.36	199.87	5.01	4.70	4.85	1.347
16	213.35	199.85	5.00	4.69	4.84	1.41
17	213.36	199.89	5.01	4.71	4.86	1.36
18	213.41	199.93	5.03	4.73	4.88	1.382
19	214.86	201.38	5.67	5.41	5.54	1.42
20	214.94	201.47	5.70	5.45	5.58	1.397
21	215.01	201.53	5.73	5.48	5.61	1.347
22	216.52	202.91	6.39	6.13	6.26	1.483
23	216.6	203.01	6.43	6.17	6.30	1.495
24	216.63	203.04	6.44	6.19	6.31	1.448
25	218.95	205.33	7.43	7.23	7.33	1.519
26	219.02	205.41	7.46	7.27	7.36	1.513
27	219.14	205.55	7.51	7.33	7.42	1.463
28	219.3	205.72	7.58	7.41	7.49	1.568
29	219.81	206.24	7.79	7.64	7.72	1.595
30	220.02	206.46	7.88	7.74	7.81	1.568
31	220.21	206.63	7.96	7.82	7.89	1.514
32	220.57	206.98	8.11	7.97	8.04	1.563
33	221.42	207.69	8.46	8.29	8.38	1.583
34	221.5	207.88	8.50	8.37	8.43	1.593
35	221.72	208.15	8.59	8.49	8.54	1.619
36	221.87	208.29	8.65	8.55	8.60	1.558
37	221.9	208.43	8.66	8.61	8.64	1.608
38	222	208.54	8.70	8.66	8.68	1.598
39	222.04	208.64	8.72	8.70	8.71	1.591
40	222.16	208.82	8.77	8.78	8.78	1.674
41	222.33	209.25	8.84	8.97	8.90	1.704
42	222.35	209.38	8.85	9.03	8.94	1.739
43	222.81	209.72	9.03	9.17	9.10	1.751

注:上述含水率以此计算: a 含水率= $(a'-a)/a * 100\%$ b 含水率= $(b'-b)/b * 100\%$



通过曲线分析:质量含水率每增加 1%水泥砂浆导热系数增加 $0.06192108 W/(m \cdot K)$ 。

4 结语

通过上述的测试,瞬态平面热源法(TPS法)测试速度快,重复性好,通过曲线看出材料的导热系数与含水率基本成线形关系。

参考文献

T. Log and S. E. Gustafsson, Transient Plane Source (TPS) Technique for Measuring Thermal Transport Properties of Building Materials, 1995

赵文海:北京中建建筑科学技术研究院院长,教授级高级工程师