

导电纸热电模拟法

——用于研究围护结构的保温性能

国家建委建筑科学研究院建筑物理研究所

中国建筑工业出版社

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

主 要 符 号

Q ——热量或热流 (千卡; 千卡/米²; 千卡/米²·时)

t_n ——室内空气温度 (°C)

t_w ——室外空气温度 (°C)

τ ——热原件表面温度 (°C)

$\bar{\tau}_n$ ——热原件内表面平均温度 (°C)

λ ——热原件材料的导热系数 (千卡/米·时·°C)

α ——热交换系数 (千卡/米²·时·°C)

α_n ——感热系数 (千卡/米²·时·°C)

α_w ——放热系数 (千卡/米²·时·°C)

α_d ——当量感热系数 (千卡/米²·时·°C)

R_n ——感热阻 $\left[R_n = \frac{1}{\alpha_n} (\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C} / \text{千卡}) \right]$

R_w ——放热阻 $\left[R_w = \frac{1}{\alpha_w} (\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C} / \text{千卡}) \right]$

C ——导电纸的电导率 (欧姆⁻¹·厘米⁻¹)

ρ ——导电纸的电阻率 (欧姆·厘米)

R ——电阻 (欧姆)

I ——电流 (安培)

V ——电压 (伏特)

l ——当量宽度 (米)

目 录

主要符号

绪言	1
一、热电模拟的基本原理	3
1. 导热与导电微分方程式相似	3
2. 几何条件相似	3
3. 物理量相似	4
4. 边界条件相似	10
二、电模拟模型材料与试验仪器	15
1. 制造电模拟模型用的导电纸	15
2. 电器仪表	15
3. 其他材料与工具	16
三、模拟温度的测量方法	17
1. 内墙角温度分布的测量	18
2. 外墙角温度分布的测量	24
3. 保温屋面温度分布的测量	25
4. 地下烟道温度分布的测量	27
四、模拟热阻或导热系数的测量方法	31
1. 外墙热阻的测量	31
2. 壁板建筑接缝及墙角等局部热阻的测量	33
3. 粘土空心砖平均导热系数的测量	34
4. 混凝土空心砌块平均导热系数的测量	36
五、根据温度场分析外围护结构的保温性能	40
1. 外围护结构的保温要求	40

2. 外围护结构的保温性能分析.....	41
六、影响热电模拟精度的某些因素	42
1. 导电纸电阻分布不均匀.....	42
2. 导电纸上挖孔问题.....	43
3. 电极夹具的接触电阻.....	43
4. 环境温湿度的影响.....	44

附表

1. 不同的室内空气温度和相对湿度条件下的露点温度值.....	45
2. 围护结构常用建筑材料、制品与结构构件的热物理系数.....	46

绪 言

建筑围护结构的保温设计工作中，经常遇到一些不易解决的问题，象壁板的接缝、山墙墙角、保温屋面的冷桥等部位，如果设计不善，就会造成表面结露，内部产生凝结水，不仅会降低保温性能，甚至影响使用。

装配式壁板建筑，目前正在我国推广。这类建筑除了接缝防水存在一些问题外，其中不少建筑物在接缝与山墙墙角出现了冷凝水，有的相当严重，特别是在我国东北沈阳、长春、哈尔滨等地更为严重，影响大型壁板建筑在北方寒冷地区的推广。

在墙体改革中，利用工业废料制作混凝土空心砌块和采用竖孔粘土空心砖也是目前正在推广的新型墙体材料。它们除了满足结构上的强度要求外，都要合理选型，处理好隔热或保温问题，后者尤为重要。这就要求在设计时，预知它们的保温效果。

以上这些问题，从传热方面来分析，都属于二维或三维的传热问题，又因建筑构件几何形状比较复杂，材料多种多样，很难用数学方法确定其保温效果，采取实物试验，又需要不少人力、物力和时间。因此，在国内外，一般都利用热电模拟的方法对围护结构特殊部位进行热工分析。尤其是在进行设计方案比较时，利用热电模拟法可以很快获得最佳方案，预知研究对象的保温效果。

热电模拟方法主要有三种，即导电固体模拟、导电液体

模拟及电阻网络模拟。以上三种方法各有特点。本书只介绍导电固体模拟中的一种方法——采用导电纸热电模拟分析外围结构的热工性能。近几年来，我们在研究竖孔粘土空心砖、壁板接缝、混凝土空心砌块的保温性能方面，应用这种方法取得了一些成绩，积累了一些经验。此法具有设备简单、费用低廉、模型制作简便、测点多等特点，用来分析一维和二维稳定传热状况下围护结构的热工性能是一种较好的方法。图1是本法的导电纸电模型与测量装置。

导电纸热电模拟法虽然具有许多优点，但在理论上有些问题还需要进一步探讨，在实际操作中如手工挖孔等还比较麻烦，希望读者与我们共同研究，逐步解决。

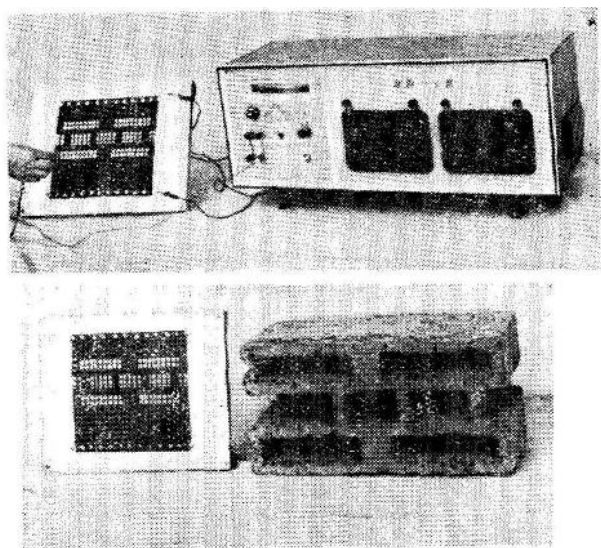


图 1 导电纸电模型与测量装置

a—正在模拟测量时的情形；*b*—三排孔页岩陶粒混凝土空心砌块及其导电纸电模型

一、热电模拟的基本原理

热电模拟方法是建立在热电物理现象彼此相似的理论基础上的。在稳定条件下，也就是说，在温度场中的温度与电场中的电位不随时间变化的条件下，固体的导热现象与直流电路中导体的导电现象都可以用同一个拉普拉斯微分方程式描述。根据相似理论，如果二种不同的物理现象都能用同一个微分方程式描述，并实现边界条件、几何条件与物理量相似，那么就可以在电模型上模拟热原件上的传热现象。

1. 导热与导电微分方程式相似

在稳定传热条件下，固体的导热微分方程式为：

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

在直流电路中，导体的导电微分方程式为：

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

式中 t —— 温度场中的温度；

V —— 电场中的电位。

比较 (1) 及 (2) 式可见：在稳定条件下，导热与导电现象均由拉普拉斯微分方程式描述；所以上述二种物理现象彼此相似。也就是说，电场中的电压、电阻、电流同温度场中的温差、热阻、热流彼此相似。

2. 几何条件相似

满足传热构件和电模拟模型几何条件相似，就是不仅要

使二者的外部轮廓成几何相似，而且要使电模型内部区分不同电导率材料的内部边界也与传热构件内部区分不同导热系数材料的内部边界成几何相似，即应遵守下列等式：

$$\frac{x_i}{x_i} = \frac{y_i}{y_i} = C_i \quad (3)$$

式中 x_i 、 x_i ——传热构件和电模型在 x 轴方向上的几何尺寸；

y_i 、 y_i ——传热构件和电模型在 y 轴方向上的几何尺寸；

C_i ——几何相似倍数。

理论上， C_i 可以取任意正数。在实践中，由于研究对象通常是由几种不同导热系数的材料组成的，如果在导电纸电模型上用挖孔的办法来实现物理量相似，则 C_i 选得太大，挖孔所引起的误差就大。根据我们的经验，一般 C_i 取 2 为宜。

3. 物理量相似

满足传热构件和电模型物理量相似要求，就是要保证电模型材料的电导率和传热构件材料的导热系数成比例，即应遵守下列等式：

$$\frac{C}{\lambda} = r \quad (4)$$

式中 C ——电模型的电导率；

λ ——传热构件的导热系数；

r ——比例系数。

当传热构件是由不同的导热系数材料组成时，电模拟的电模型将是非均质的。这时电模型应由不同的电导率材料所构成，并满足物理量相似条件的要求。

为了实现物理量相似，可采用两种办法：

(1) 用电导率不同的导电纸粘贴在一起，模拟不同的导热系数。这种方法需要生产许多种电导率不同的导电纸，且粘贴也较困难，故难于付诸实现。

(2) 用同一种导电纸，在导电纸上挖大小不同的孔洞，改变各部分纸的电导率。凡是模拟传热构件中导热系数最大的材料就不挖孔，模拟传热构件中导热系数较小的材料时，导电纸上应挖大小不同的孔洞。这种方法虽然挖孔比较麻烦，但只需采用一种电导率的导电纸，就能模拟不同的导热系数，所以比较容易实现。我们采用的就是挖孔法。

采用挖孔法时，在导电纸上挖多大的孔洞才能实现物理量相似，以模拟传热构件材料的不同导热系数，这是本法的关键所在。下面将较为详细地加以说明。

在导电纸上所挖孔洞的大小要根据物理量彼此相似的要求来确定，即应遵守下列等式：

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{C_0}{C} = \frac{R}{R_0} = K \quad (5)$$

式中 λ_0 、 λ ——传热构件不同部位材料的导热系数；

C_0 、 C ——与传热构件相应部位的电模型导电纸的电导率；

R_0 、 R ——与传热构件相应部位的电模型导电纸的电阻；

K ——常数。

根据(5)式，当 $R_0 = \frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot R$ 时，也就是说：当电模型导电纸上的挖孔部分纸的电阻 R_0 等于未挖孔导电纸电阻 R 的 $\frac{1}{K}$ 时，电模型导电纸挖孔部分的电导率就模拟了导热系

数为 λ_0 的传热构件材料。

在实践中，用（5）式来计算挖孔的大小是很麻烦的。为方便起见，我们首先在米格纸上画出传热构件的几何形状及挖孔的部位与孔洞大小，所挖的孔洞都是在1厘米见方范围内的，然后，把米格纸与导电纸重迭在一起进行挖孔。因米格纸上有许多同样大小的小方格，很便于计数，据此，提出了挖孔率的概念。所谓挖孔率就是在导电纸上所挖掉的表面积占总面积的百分数。如果我们找到了导电纸的挖孔率 p 与 λ_0/λ 之间的关系，也就实现了（5）式所要求的物理量相似的条件，这样也就可以根据传热构件材料导热系数 λ_0/λ 的比值确定导电纸上应挖多少孔洞了。以下将讨论如何建立上述关系。

在一维传热条件下，为了进行热电模拟，应满足一维传热方向的物理量相似条件，如图2所示。

图2中的 a 为二种材料构成的传热构件示意图，设其左侧材料的导热系数为 λ_0 ，右侧材料的导热系数为 λ ，且 $\lambda > \lambda_0$ ；图2中的 b 即为其导电纸电模型，它的左侧是挖孔的，模拟材料导热系数为 λ 的右侧部分是不挖孔的。

根据（5）式物理量相似条件的要求和电阻的定义可得以下关系式：

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_0}{\lambda} &= \frac{R}{R_0} = \frac{\rho \cdot \frac{l}{S}}{\rho \cdot \frac{l}{S_0}} = \frac{l \cdot S_0}{l \cdot S} \\ &= \frac{l \cdot \sum b_0 \cdot d}{l \cdot b \cdot d} = \frac{\sum b_0}{b} = \frac{A_0}{A} \end{aligned}$$

则 $A_0 = A \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}$ 或 $\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\sum b_0}{b}$ (6)

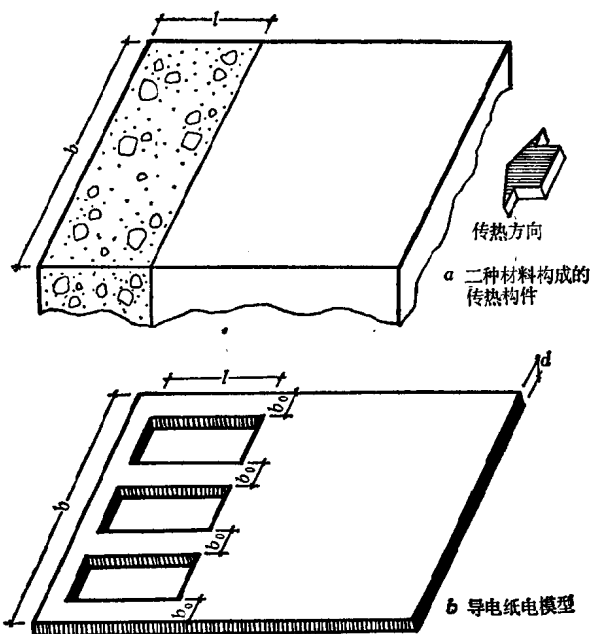


图 2 用导电纸电模型模拟传热构件的示意图

$$\text{令 } p = \left(1 - \frac{A_0}{A}\right) \times 100\% \quad (7)$$

- 式中
- R_0 ——导电纸挖孔后，剩余纸面积的电阻；
 - R ——导电纸未挖孔时的电阻；
 - S ——导电纸未挖孔时的截面积($S = b \times d$)；
 - S_0 ——导电纸挖孔后剩余纸的截面积($S_0 = \sum b_0 \times d$)；
 - $\sum b_0$ ——导电纸挖孔后，剩余纸的总宽度；
 - d ——导电纸的厚度；
 - l ——模拟传热构件材料导热系数为 λ_0 的导电纸长度；

A ——导电纸未挖孔时的表面积；

A_0 ——导电纸挖孔后，剩余纸的面积；

p ——导电纸的挖孔率。

有了(6)、(7)二式就很容易在米格纸上建立 p 与 λ_0/λ 之间的关系。图3a是适用于一维传热情况下，挖长条形孔或方形孔时查挖孔率 p 值用的；图3b是适用于二维传热情况下，挖方形孔或矩形孔（根据我们的经验，矩形孔的二边之差以不大于1毫米为宜）时查挖孔率 p 值用的。图中纵座标为 p ，横座标为 λ_0/λ 。其关系曲线可按并联电阻计算原

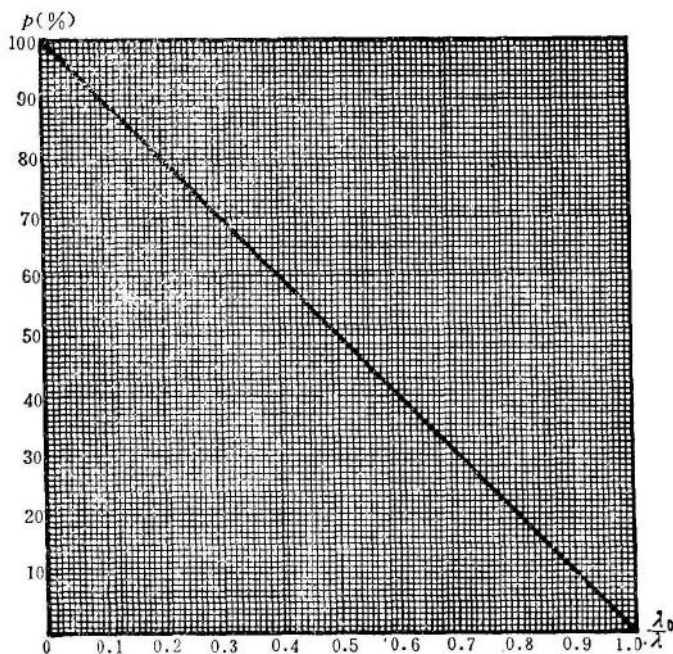


图 3a 一维传热情况下，挖长条形孔或方形孔时，挖孔率 p 与 λ_0/λ 之间的关系

理求得，或用实验方法获得。为了便于理解，也可以根据（6）式很直观地加以阐明。

因为在一维的传热情况下，应该满足一维传热方向的物理量相似条件，使 $\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{\sum b_0}{b}$ 。今假定 $\frac{\lambda_0}{\lambda} = 0.1$ ，则我们可取 $\frac{\sum b_0}{b} = \frac{1}{10} = 0.1$ ，这里 b 是 10×10 毫米（在米格纸上恰好有100个1毫米²的小方格）小方格的边长等于10毫米； b_0 是 10×10 毫米方格的导电纸挖孔后所剩余下的纸的宽度，等

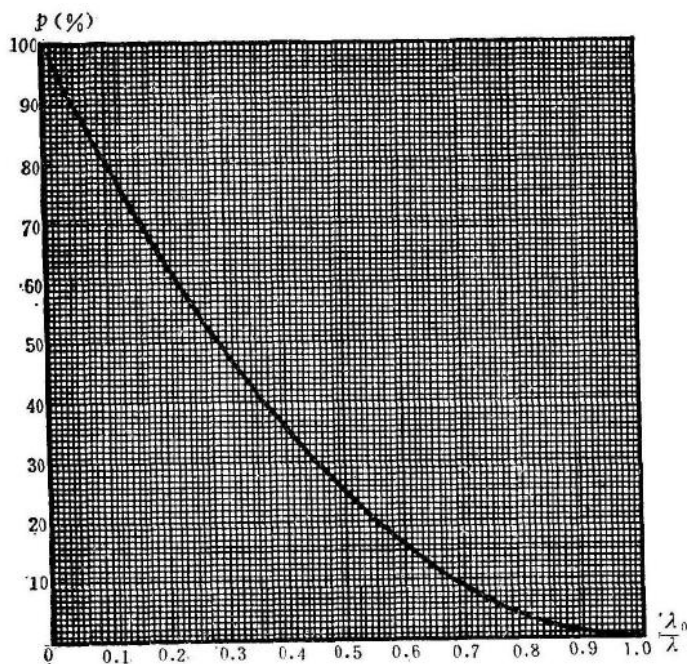


图 3b 二维传热情况下，挖方形孔或矩形孔时，挖孔率 p 与 λ_0/λ 之间的关系

于 1 毫米。因此，挖孔率 $p = (1 - 0.1) \times 100\% = 90\%$ ，这就是说当 $\lambda_0/\lambda = 0.1$ 时，在 10×10 毫米的方格中应挖掉 90 个小方格。很显然，当 $\lambda_0/\lambda = 0$ 时， $p = 100\%$ ；当 $\lambda_0/\lambda = 1$ 时， $p = 0$ 。通过此两点即得图 3a 中的 p 与 λ_0/λ 之间的关系曲线。

类似地，在二维的传热情况下，应满足二个传热方向的物理量相似条件，必须使二个方向的物理量 $\lambda_0/\lambda = \sum b_0/b$ 。今假定 $\lambda_0/\lambda = 0.1$ ，则我们可取在 x 方向 $\sum b_0/b = 1/10 = 0.1$ ，在 y 方向上也取 $\sum b_0/b = 1/10 = 0.1$ 。因此，挖孔率 $p = (1 - 0.1)^2 \times 100\% = 81\%$ ，这就是说，在二维的传热情况下，当 $\frac{\lambda_0}{\lambda} = 0.1$ 时，在米格纸 10×10 毫米的方格中应挖掉 81 个小方格。再取 $\frac{\lambda_0}{\lambda} = 0.2, 0.3, 0.4, \dots$ 即得相应的 p 值，据此就能画出图 3b 中的 p 与 λ_0/λ 之间的关系曲线。

总之，为了符合传热状况，在一维的传热情况下，可挖长条形孔或方形孔，但长条形孔误差较小，在二维的传热情况下，必须挖方形孔或矩形孔。孔形对测量精度有一定影响。另外，孔洞分布越均匀，孔洞数目越多，孔洞越小，所得结果越好。所以在实践中，我们通常在每 1 厘米见方范围内，按 p 值挖孔。因为这样计算比较方便，孔洞分布比较均匀，同时也能满足精度要求。

4. 边界条件相似

传热方面三种类型的边界条件在电模型上都是可以模拟的。在建筑热工方面，常见的是第一类边界条件和第三类边界条件。

第一类边界条件是给定传热构件的表面温度。反映在电模型上，就是在边界电极上给以一定的电压。

第三类边界条件是给出介质温度和物体表面与介质之间的换热规律。反映在电模型上,就是在电模型的边界处再附加一个当量宽度,此当量宽度是根据相似理论导出的。图4即为模拟第三类边界条件,导出电模型附加边界层当量宽度的示意图。

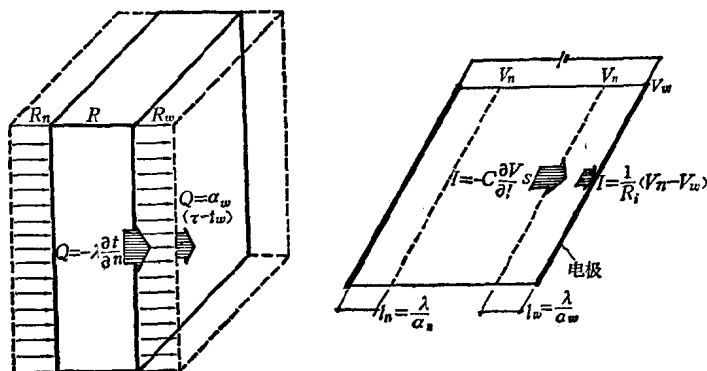


图4 模拟第三类边界条件导出边界层当量宽度的示意图

图4a表示一传热构件的热阻为 R ,其材料导热系数为 λ ,感热阻为 R_n ,放热阻为 R_w ,放热系数为 α_w ,传热构件的表面温度为 τ ,周围的介质温度为 t_w ,从传热构件往外传出的热量为 $Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}$,由传热构件表面向周围介质散失的热量为 $Q = \alpha_w (\tau - t_w)$ 。

图4b表示上述传热构件的导电纸电模型, l_n 为模拟感热阻应附加的当量宽度, l_w 为模拟放热阻应附加的当量宽度, V_n 为电模型模拟传热构件表面温度的电压, V_w 为电模型模拟传热构件周围介质温度的电压, R_i 为电模型模拟传热构件感热阻或放热阻的当量宽度的导电纸电阻, S 为电模型模拟传

热构件边界处导电纸的截面积, C 为导电纸的电导率, 从导体往外传出的电流 $I = \frac{1}{R_i} (V_n - V_w)$ 。

因为从物体往外传出的热量就等于从物体表面向介质散失的热量, 即

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_w (\tau - t_w)$$

或
$$\frac{\partial t}{\partial n} = -\frac{\tau - t_w}{\lambda / \alpha_w} \quad (8)$$

类似地, 从导体往外传出的电流就等于从导体表面向导电介质传出的电流, 即

$$-C \frac{\partial V}{\partial l} S = \frac{1}{R_i} (V_n - V_w) = \frac{V_n - V_w}{\frac{l}{\rho \cdot S}}$$

或
$$\frac{\partial V}{\partial l} = -\frac{V_n - V_w}{l} \quad (9)$$

比较 (8) 式和 (9) 式可以看出: 温度梯度和电位梯度相似, 温差与电位差相似。因此, 在电模型上附加一个

$l_w = \frac{\lambda}{\alpha_w}$ 的当量宽度, 也就模拟了传热构件的第三类边界条件, 即当量宽度 $l_w = \frac{\lambda}{\alpha_w}$ 模拟了传热构件的放热阻 R_w , 而

$l_n = \frac{\lambda}{\alpha_n}$ 则模拟了传热构件的感热阻 R_n 。在满足几何相似

的条件下, 电模型上的当量宽度按下式计算:

$$l = \frac{1}{C_i} \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \quad (10)$$

应该特别指出: 在具体计算 l 值时, 此处 “ λ ” 指的是传热构件表面层材料的导热系数。“ α ” 是热交换系数, 可