

347

# 建筑材料热物理性能

中国建筑科学研究院建筑物理研究所  
沈韞元 白玉珍 陈玉梅 谈庆华

TU502

中国建筑工业出版社

# 建筑材料热物理性能

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

沈韞元 白玉珍 陈玉梅 谈庆华

中国建筑工业出版社

本书根据作者单位近二十年的科研成果及所积累的数据资料，分析建筑材料的分子结构和化学成分，容重、孔隙率和孔洞性质，以及温度、湿度等因素对材料导热系数的影响；介绍二种快速测定材料热物理参数的方法；提供主要是自行测定的16类231种共约700项材料的导热系数、导温系数、比热和蓄热系数值。

本书可供土建设计、施工、科研单位和建材生产单位的科技人员参考。

### **建筑材料热物理性能**

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

沈祖元 白玉珍 陈玉梅 谈庆华

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：37/8。字数：86千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷

印数：1—9,530册 定价：0.42元

统一书号：15040·4001

## 前 言

对工业与民用建筑外围护结构的最基本要求，在于充分利用材料的绝热能力和承重能力，以保证围护结构在大气侵袭（包括太阳辐射、风、雨、雪等）和室内温湿度作用下，不发生严重的受潮现象，防止材料变质和冻裂破坏，保持其耐久性；保证在正常状况下，室内不致产生过冷或过热现象，以创造一个舒适的工作、学习和休息的环境。特别是在社会主义现代化建设过程中，结合采暖和空调，如何降低能源消耗，更是设计外围护结构的一个愈来愈突出的研究课题。

针对围护结构的这些要求，必然要促使人们去研究建筑材料的热物理性能和影响这些性能的种种因素，以及研究材料热物理性能的测试方法。

本书主要是根据我们二十年来的研究成果和试验资料，以及参考一些国外重要文献资料所写成的，全书包括三部分：

第一章介绍材料的主要热物理参数——导热系数、导热系数、比热和蓄热系数的特性，简要地分析材料的分子结构、化学成分、容重、温度和湿度等因素对材料热物理性能的影响，提出了改善材料热物理性能的一些原则。

第二章主要介绍我们研制的两种测定材料热物理参数的快速方法——热脉冲法和线热源法，这两种方法的基本原理都是建立在非稳定导热的基础上。其中热脉冲法具有装置简单，试验时间短，精确度高，可以同时测出材料的导热系

数、导温系数和比热等特点，已在国内推广使用，并由天津建筑仪器厂正式定型生产，定名为 DRM-1 型导热系数测定仪。

在这一章里还介绍了试件的湿度培养方法，以保证潮湿材料在不同含湿状况下热物理参数试验的准确性。

第三章是建筑材料热物理系数表。多年来，我们承担了全国许多单位的委托测试任务，通过测定各种建筑材料和保温材料的热物理性能，积累了较丰富的数据，现把这些试验资料整理出来供设计、施工和生产单位参考使用。最近两年我们又完成了全国各种轻骨料混凝土热物理性能的试验研究，这次也都整理在表内。此外，表中还列入兄弟单位和国外所试验的一些较特殊的材料（如金属、冰、雪、水等）的数据。

限于我们的专业水平，书中不妥或错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

## 主 要 符 号

- $\lambda$  材料的导热系数,  $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $a$  材料的导温系数,  $\text{m}^2/\text{h}$ ;
- $c$  材料的比热,  $\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $s$  材料的蓄热系数,  $\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $\gamma$  材料的容重,  $\text{kg/m}^3$ ;
- $\omega_z$  材料的重量湿度, %;
- $\omega_d$  材料的体积湿度, %;
- $\delta_\omega$  重量湿度每增加1%时, 导热系数的增值,  $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $\delta_t$  温度每升高 $1^\circ\text{C}$ 时, 导热系数的增值,  $\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $\delta_c$  重量湿度每增加1%时, 比热的增值,  $\text{kcal/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ;
- $T$  热流波动周期,  $\text{h}$ ;
- $q$  热流强度,  $\text{kcal/m}^2\cdot\text{h}$ 或 $\text{kcal/m}\cdot\text{h}$ ;
- $t$  温度,  $^\circ\text{C}$ ;
- $d$  试件厚度,  $\text{m}$ ;
- $\tau$  时间,  $\text{h}$ ;
- $F_0$  傅立叶准数;
- $R$  电阻,  $\Omega$ ;
- $I$  电流,  $\text{A}$ ;
- $V$  电压,  $\text{V}$ ;
- $f$  加热器面积,  $\text{m}^2$ ;
- $\varphi$  加热丝直径,  $\text{m}$ ;
- $L$  加热丝长度,  $\text{m}$ 。

# 目 录

## 前言

## 主要符号

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第一章 建筑材料的热物理特性 .....  | 1   |
| 第一节 材料的导热性能 .....     | 1   |
| 第二节 材料的导温性能 .....     | 22  |
| 第三节 材料的比热 .....       | 27  |
| 第四节 材料的蓄热性能 .....     | 31  |
| 第二章 材料热物理系数测定方法 ..... | 33  |
| 第一节 热脉冲法 .....        | 34  |
| 第二节 线热源法 .....        | 46  |
| 第三节 湿度的培养 .....       | 54  |
| 第三章 建筑材料热物理系数表 .....  | 58  |
| 参考文献 .....            | 117 |

# 第一章 建筑材料的热物理特性

建筑材料种类很多。从材料形状来分，可分为密实块状材料，多孔块状材料，纤维状材料，颗粒状材料等；从分子结构来分，可分为晶体材料，微晶体材料和玻璃体材料；从化学成分来分，又可分为有机材料和无机材料。这些材料具有一系列的热物理特性，在进行围护结构热工计算时，往往涉及到材料的热物理特性。为了使计算准确可靠，就必须正确地选择材料的热物理指标，使其与材料实际使用情况相符合。否则，计算公式无论怎样准确，所得到的结果与实际情况仍然会有很大的差异。然而，材料的热物理指标往往受到许多因素的影响，除了材料本身的分子结构、化学成分、容重、孔隙率的影响外，还受到外界温度、湿度等影响。所以，要合理选择热物理指标，就必须了解材料的这些特性。

下面仅就建筑材料和保温材料的主要热物理特性以及影响这些性能的因素作一些介绍。

## 第一节 材料的导热性能

导热性能是材料的一个非常重要的热物理指标，它说明材料传递热量的一种能力。材料的导热能力用导热系数“ $\lambda$ ”来表示。

在工程计算中，导热系数的单位为  $\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$ ，它表示：在一块面积为  $1\text{m}^2$ ，厚度为  $1\text{m}$  的壁板上，板的两侧



表面温度差为 $1^{\circ}\text{C}$ ，在1小时内通过板面的热量。因此，导热系数 $\lambda$ 值愈小，则材料的绝热性能愈好。

各种建筑材料的导热系数差别很大，大致在 $0.03\sim 3.0\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$ 之间，如泡沫塑料 $\lambda=0.03$ ，而大理石 $\lambda=3.0$ 。

影响材料导热系数的主要因素有：

- (1) 材料的分子结构及其化学成分；
- (2) 容重(包括材料的孔隙率、孔洞的性质和大小等)；
- (3) 材料的湿度状况；
- (4) 材料的温度状况。

### 一、材料的分子结构和化学成分对导热系数的影响

人们常常认为，材料的容重是影响材料导热系数的唯一因素，其实不然，材料的分子结构和化学成分等比容重所起的作用大得多。

由于建筑材料的化学成分和分子结构的不同，一般可分为晶体构造(如建筑用钢、石英石等)、微晶体构造(如花岗石、普通混凝土等)和玻璃体构造(如普通玻璃，膨胀矿渣珠混凝土等)。这种不同的分子结构引起导热系数有很大的差别。玻璃体物质由于其结构没有规律，以致不能形成晶格，各向相同的平均自由程很小，因此，其导热系数值要比晶体物质低得多(见表1-1)。

对于化学成分相同的晶体和玻璃体，其导热系数差别仍然很大。例如矿物性建筑材料组成成分的母体化合物为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 和 $\text{CaO}$ ，其晶体的导热系数比玻璃体的导热系数要大好多倍(见表1-2)。

有时候，我们为了要取得导热系数较低的矿物建筑材料，办法之一就是改变材料的分子结构。例如，将熔融的高炉

不同分子结构材料的导热系数

表 1-1

| 材 料 名 称        | 分子结构  | 容 重<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 导 热 系 数<br>(kcal/m·h·°C) |
|----------------|-------|-----------------------------|--------------------------|
| 铝<br>钢         | 结 晶 体 | 2700                        | 175                      |
|                |       | 7850                        | 38.5                     |
| 花 岗 岩<br>普通混凝土 | 微 晶 体 | 2800                        | 3.0                      |
|                |       | 2280                        | 1.3                      |
| 玻璃膨胀矿渣珠混凝土     | 玻 璃 体 | 2500                        | 0.65                     |
|                |       | 1990                        | 0.56                     |

某些化合物的导热系数

表 1-2

| 化 合 物 名 称                      | 在下列温度下的导热系数(kcal/m·h·°C) |       |       |       |
|--------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
|                                | 0°C                      | 300°C | 500°C | 700°C |
| 在晶体状态下                         |                          |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 7.71                     | 4.28  | 3.68  | 3.32  |
| MgO                            | 36.00                    | 17.28 | 11.52 | 8.28  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.00                     | 5.04  | 4.32  | 3.96  |
| CaCO <sub>3</sub>              | 4.12                     | —     | —     | —     |
| 在玻璃体状态下                        |                          |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.19                     | 1.48  | 1.72  | 1.95  |
| MgO                            | 0.83                     | 1.05  | 1.30  | 1.62  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.58                     | —     | —     | —     |
| CaO                            | 0.41                     | —     | —     | —     |

矿渣通过不同的冷却工艺就可产生分子结构不同的建筑材料（见表 1-3）。其中通过骤然冷却的工艺过程所生产的高炉膨胀矿渣珠就是一种玻璃体的建筑材料。它的松散容重  $\gamma = 1300 \text{ kg/m}^3$ ，导热系数  $\lambda = 0.17 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$ 。以它作为骨料的混凝土  $\gamma = 2000$ ， $\lambda = 0.53$ 。而普通混凝土  $\gamma = 2280$ ， $\lambda = 1.30$ 。它们的容重相差不大，导热系数却相差一倍多。

冷却工艺不同，产生分子结构不同的材料 表 1-3

| 冷 却 工 艺  | 材 料 名 称 | 分 子 结 构     |
|----------|---------|-------------|
| 骤然冷却     | 膨胀矿渣珠   | 玻 璃 体       |
| 边膨胀边缓慢冷却 | 膨胀矿渣    | 玻璃体-微晶体多孔材料 |
| 边结晶边缓慢冷却 | 矿渣碎石    | 结 晶 体       |
| 迅速冷却连续抽丝 | 矿 渣 棉   | 玻 璃 体       |

然而，对于多孔保温材料来说，无论固体成分的性质是玻璃体或是结晶体，对导热系数的影响不大。因为这些材料孔隙率很高，颗粒或纤维之间充满着空气，因此，气体的导热系数就起着主要作用，而固体部分的影响就减小了。

## 二、材料导热系数与容重的关系

容重是指单位体积的材料重量，用“ $\gamma$ ”来表示，单位为 $\text{kg/m}^3$ ，它是影响材料导热系数的重要因素之一。

对于大多数材料来说，都是由固相质点和其间的气孔所组成。例如轻骨料混凝土总孔隙率大约为30~60%，而70~40%是由固体部分所组成；泡沫混凝土总孔隙率大约为56~88%，而44~12%是由固体部分所组成。所以材料的容重取决于孔隙率。从图 1-1 可以看出，当材料的比重一定时，孔隙率愈大，则容重就愈小。

图 1-2 是各种轻混凝土和砖的导热系数与容重的关系。图1-3和图1-4是软木和刨花锯末板导热系数与容重的关系。这些图表明，材料的导热系数随着容重的增大而增大。这是因为材料的导热系数乃是材料的固体骨架的导热系数和材料气孔中空气的导热系数的平均值。由于空气的导热系数很低，当其在静态状况下， $0^\circ\text{C}$ 时的导热系数为 $0.022\text{kcal/m}\cdot$

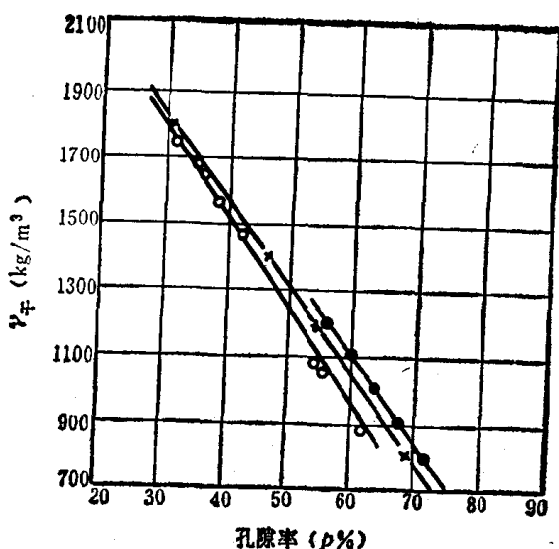


图 1-1 容重与孔隙率的关系

×—焙烧粘土砖；○—轻骨料混凝土；·—泡沫混凝土

$h \cdot ^\circ\text{C}$ ，与材料的固体骨架的导热系数相比差别悬殊（见表 1-4）。因此，容重轻的材料导热系数小，就是空气的导热系数在起着重要作用。

由于材料中有气孔的存在，因此，材料中的传热方式不单纯是导热，同时还存在着孔隙中气体的对流传热和孔壁之间的辐射传热。所以严格地说，多孔材料的导热系数应当是“当量导热系数”。材料随着其气孔尺寸的增大，孔内气体对流和孔壁之间的辐射换热就会增加。材料的当量导热系数也就明显地增大。图 1-5 表明多孔无机材料在干燥状况下，不同的孔隙直径对导热系数的影响。因此，在生产加气混凝土、泡沫玻璃等容重轻、孔隙多的材料时，从工艺上保证孔隙率大、气孔尺寸小，是改善材料热物理性能的重要途径。

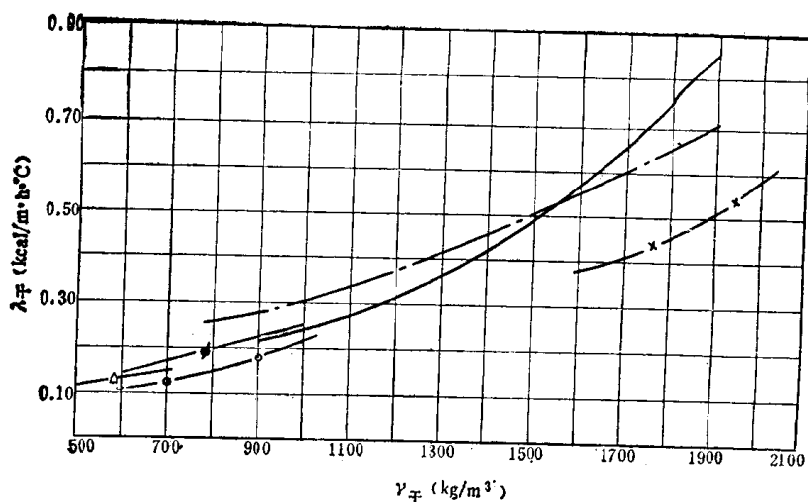


图 1-2 轻混凝土和砖的导热系数与容重的关系

- 粉煤灰泡沫混凝土      —·—普通粘土砖  
 —轻骨料混凝土          —△—加气混凝土  
 —Φ—水泥珍珠岩制品      —×—膨珠混凝土

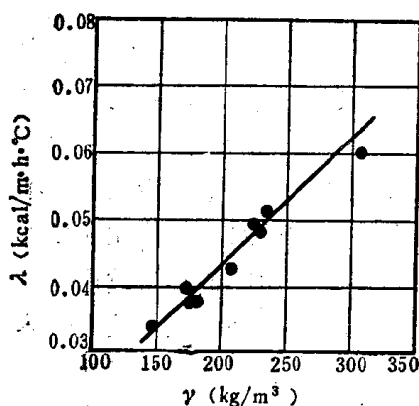


图 1-3 软木导热系数与容重的关系

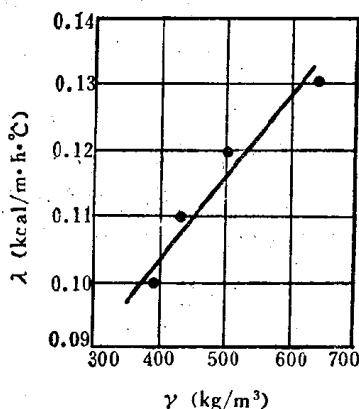


图 1-4 无规物刨花板和锯末板●导热系数与容重的关系

- ① 无规物是生产聚丙烯的废料，可作为粘结剂渗入刨花或锯末中压成保温板。

建筑材料固体部分的导热系数

表 1-4

| 材 料 名 称 | 导热系数(kcal/m·h·°C) |
|---------|-------------------|
| 有机材料    | 0.25~0.35         |
| 无机材料    | 2.8               |
| 玻璃体材料   | 0.6~1.0           |
| 结晶体材料   | 4.0~6.0           |

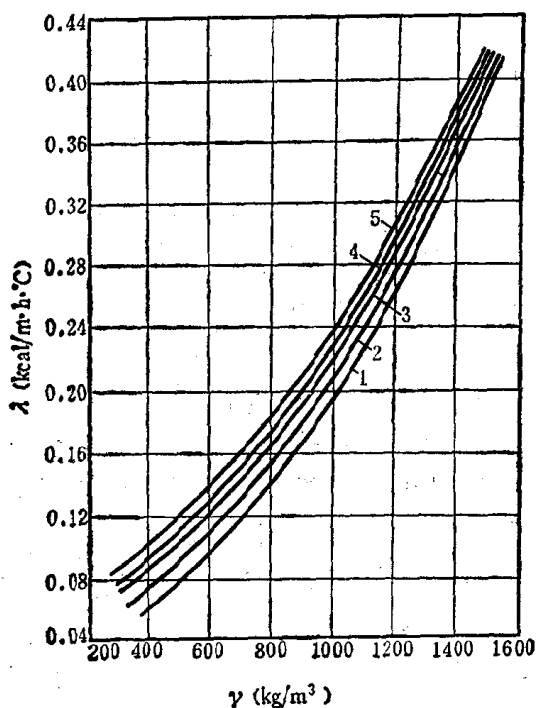


图 1-5 多孔无机材料在干燥状况下孔隙直径与容重对导热系数的影响

1—微孔材料曲线；2—孔隙直径  $d=0.5\text{mm}$  的材料；3—同上  $d=1.0\text{mm}$ ；4—同上  $d=1.5\text{mm}$ ；5—同上  $d=2.0\text{mm}$

此外，材料的气孔形状对导热系数也有一定影响。一般来说，封闭形气孔的导热系数要比敞开形气孔的导热系数小。由于敞开形气孔的毛细管吸湿能力很强，这对保温材料来说是很不利的。

松散状的纤维材料，其容重变化的幅度较大，容重大，导热系数相应地增大；然而容重小到一定程度，材料内产生空气循环对流换热，同样也会增加导热系数。因此，松散状的纤维材料存在着一个导热系数最小的最佳容重（见图 1-6）。

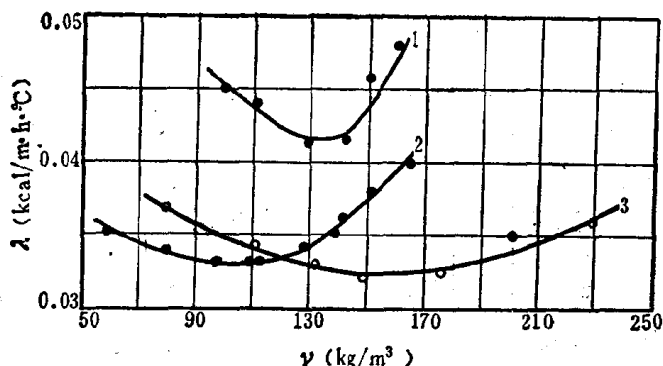


图 1-6 纤维材料导热系数与容重的关系

1—沥青矿棉；2—树脂玻璃棉板；3—沥青玻璃棉毡

对我国生产的各种轻骨料混凝土（包括各种陶粒混凝土、火山渣混凝土、浮石混凝土、大颗粒珍珠岩混凝土、煤矸石混凝土等），膨胀混凝土，加气混凝土以及水泥珍珠岩等材料，我们进行了大量的试验工作，经过数理统计得出这些材料的容重与导热系数的关系的经验公式。

#### 1. 对于轻骨料混凝土

$$\lambda_{\text{干}} = 0.0725e^{0.00128\gamma_{\text{干}}} \quad (1-1)$$

#### 2. 对于膨胀混凝土

$$\lambda_{\mp}=1.575-1.72 \times 10^{-3} \gamma_{\mp}+6.1 \times 10^{-7} \gamma_{\mp}^2 \quad (1-2)$$

### 3. 对于加气混凝土

$$\lambda_{\mp}=0.0278+1.58 \times 10^{-4} \gamma_{\mp} \quad (1-3)$$

### 4. 对于水泥珍珠岩制品

$$\lambda_{\mp}=0.0324 e^{0.002198 \gamma_{\mp}} \quad (1-4)$$

式中  $\lambda_{\mp}$ ——常温条件下，干燥材料的导热系数；

$\gamma_{\mp}$ ——干燥条件下混凝土的容重。

根据这些经验公式绘出的曲线与实验数据是很接近的（见图1-7）。

## 三、材料导热系数与湿度的关系

由于气候、施工水分和使用的影响，都将引起建筑材料含有一定的湿度。湿度对导热系数有着极其重要的影响。材料受潮后，在材料的孔隙中就有了水分（包括水蒸汽和液态水）。而水的导热系数 $\lambda=0.5$ ，比静态空气的导热系数 $\lambda=0.022$ 大20多倍。这样，就必然使材料的导热系数增大。如果孔隙中的水分冻结成冰，冰的导热系数 $\lambda=2.0$ ，又是水的4倍，材料的导热系数将更大。所以在进行围护结构热工计算时，应选取一定湿度下的导热系数，并且还必须采取一切必要的措施，来控制材料的湿度，以保证围护结构的保温性能。

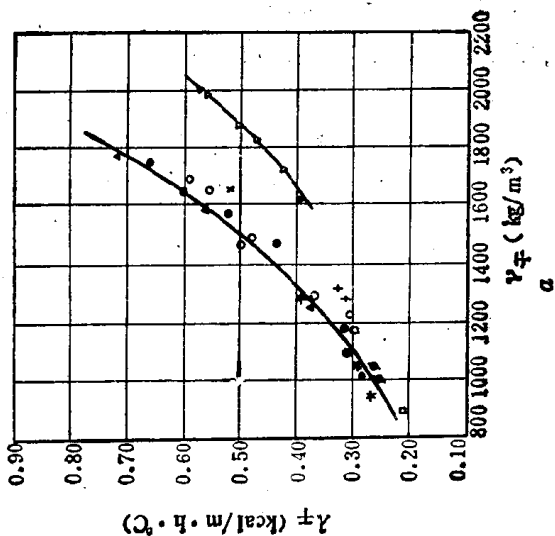
湿度是说明材料中含游离水分多少的一个指标。湿度可以用重量湿度“ $\omega_z$ ”或用体积湿度“ $\omega_v$ ”来表示。

重量湿度是指材料试样中所含水分重量与试样在干燥状况下的重量之比，即

$$\omega_z = \frac{g_1 - g_2}{g_2} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $g_1$ ——湿材料试样的重量；

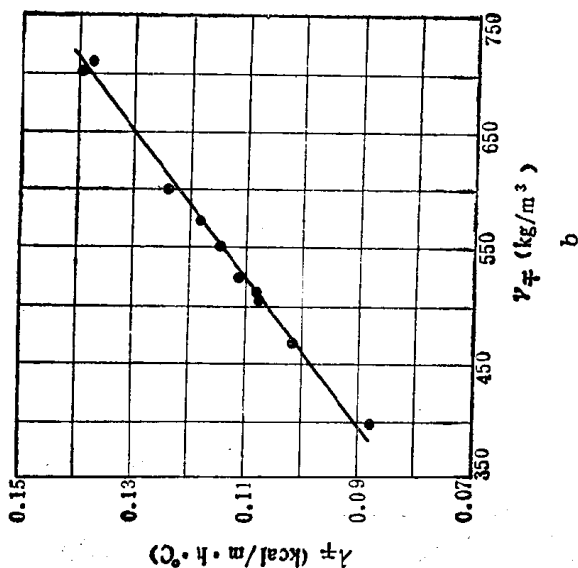




- ▲ 自然煤矸石混凝土
- 粉煤灰陶粒混凝土
- 粘土陶粒混凝土

- × 火山渣混凝土
- + 浮石混凝土
- ◇ 珍珠岩陶粒混凝土

图 1-7 在干燥条件下导热系数与容重的关系  
(a) 轻骨料混凝土, (b) 加气混凝土



- \* 页岩陶粒混凝土
- 大颗粒珍珠岩混凝土
- ▽ 膨珠混凝土