

“十一·五”国家科技支撑计划课题

中国建筑科学研究院建筑物理研究所 周辉 钱美丽 冯金秋 孙立新/编著

建筑材料 热物理性能与 数据手册

中国建筑工业出版社

建筑材料热物理性能与数据手册

中国建筑科学研究院建筑物理研究所 编著
周 辉 钱美丽 冯金秋 孙立新

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑材料热物理性能与数据手册/中国建筑科学研究院建筑物理研究所周辉等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 5

ISBN 978-7-112-12173-1

I. 建… II. ①中… III. 建筑材料-热物理性质-手册 IV. TU502-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 116048 号

本书由“十一五”国家科技支撑计划课题“新型建筑节能围护结构关键技术研究”(2006BAJ01A02-01)资助

建筑材料热物理性能与数据手册

中国建筑科学研究院建筑物理研究所

周 辉 钱美丽 冯金秋 孙立新

编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 7 $\frac{1}{2}$ 字数: 212 千字

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月第一次印刷

定价: 22.00 元

ISBN 978-7-112-12173-1

(19440)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

主要符号

- λ ——材料的导热系数 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;
 a ——材料的导温系数 (m^2/h) ;
 c ——材料的比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$;
 S ——材料的蓄热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;
 R ——热阻 $(\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W})$;
 K ——传热系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;
 A ——面积 (m^2) ;
 ρ ——材料的密度 (kg/m^3) ;
 ω_z ——材料的重量含水率 $(\%)$;
 ω_d ——材料的体积含水率 $(\%)$;
 δ_w ——重量含水率每增加 1% 时, 导热系数的增值 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;
 δ_t ——温度每升高 1°C 时, 导热系数的增值 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;
 δ_c ——重量含水率每增加 1% 时, 比热容的增值 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$;
 T ——热流波动周期 (h) ;
 q ——热流强度 (W/m^2) ;
 t ——温度 (K) ;
 d ——试件厚度 (m) ;
 τ ——时间 (h) ;
 F_o ——傅立叶准数。

本书是根据“十一五”科技支撑计划项目“建筑节能关键技术与示范”子课题二“新型建筑节能围护结构关键技术研究”的要求进行编写的。全书包括三部分，介绍了建筑材料的主要热物理参数的特性及影响因素，材料热物理系数的测试方法，常用建筑材料热物理系数。本书紧密联系建筑热工测试与研究的实际工作，在研究材料的热物理性能特点与影响因素的基础上，完成一套建筑材料热工性能的数据手册。全书具有较强的科学性与实用性，对深入推广建筑节能具有重要的指导性意义。

本书可供建筑节能科研、检测、设计与施工单位的相关工程技术人员参考使用。

* * *

责任编辑：王 梅

责任设计：张 虹

责任校对：姜小莲 陈晶晶

前 言

编写本书是根据国家“十一五”项目《建筑节能关键技术研究》(子课题二)“新型建筑节能围护结构关键技术研究”要求内容之一,其目的是为了建立一套比较完整的建筑材料热工性能参数的数据手册。

本书整理了近20年来新型墙体材料、绝热材料热工性能数据,同时沿用了20世纪80年代由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、谈庆华等四人编写的《建筑材料热物理性能》一书,并参考了一些国内外重要文献资料编写而成,对我国工业与民用建筑物节能有指导意义。

30年改革开放,我国发生了翻天覆地的变化,建筑业与其他行业一样蓬勃发展,规模之大,速度之快,新型建筑绝热材料之多在历史上前所未有,新材料层出不穷令人欣喜,在新形势下扩充与增加有用的内容是非常必要与及时的。适逢盛世之年,课题组成员尽微薄之力一起合作,收集现有墙体材料、绝热材料热工性能数据,进行分析鉴别和试验验证,对新型的墙体材料、绝热材料热工性能进行测试,试验研究墙体材料、绝热材料在不同使用条件下的性能特点,比较全面地完成一套建筑材料热工性能参数的数据手册。我们力图把近50年来的研究成果和试验结果以及国内外有价值的相关资料同读者共享,供广大同行应用。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、导温系数、比热容和蓄热系数的特性,简要地分析材料的分子结构、化学成分、密度、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。

第二章主要介绍材料热物理系数测定方法,包括稳态法和非稳态法。稳态条件下的传热性质测试方法主要有防护热板法、热流计法及标定和防护热箱法。这些方法都有各自的特点和适用条件。本章简要介绍了设备的适用范围、基本原理、构造、测试方法及计算等。非稳态法有热脉冲法和线热源法等方法。这些方法的基本原理都是建立在非稳态导热的基础上。其特点是装置简单,试验时间短,可以同时测出材料的导热系数、导温系数和比热容等特点。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。

第三章主要介绍建筑材料热物理系数表。第一节中常用绝热材料热物理性能散点图是根据近 10 年来检测的数据统计后得出密度与导热系数的关系,其规律基本上符合这些材料的特性。第二节中建筑材料热物理系数表是根据我们多年来承担了许多国内外研究课题及大量的委托测试任务,通过测定各种建筑构件和保温材料的热物理性能,积累了较丰富的数据而得出的。这些数据绝大多数来自建筑物理研究所热工室自行研制或与有关单位合作精心设计调试的检测设备,具有一定的参考价值。稳态法测试数据采用“DRF-1 型防护热板法导热系数测定仪”、“围护结构热工性能检测装置”、“JW-I 型墙体保温性能检测装置”、“JW-III 型热流计式导热系数测定仪”以及“JW-V 型防护热板法导热系数测定仪”。非稳态法数据来自“DRM-1 导热系数测定仪”。第三节中主要是根据多年来从课题研究和送检样品中选择出来并具有一定代表性的试样。包括各种空心砖、空心砌块、复合砌块、砌模块、复合板材等,均为实测数据。

数据手册尽可能地把有价值与可靠的涉及建筑围护结构有利于节能的绝热材料性能数据纳入其中,供设计、施工、科研和生产单位等参考使用。表中还列入兄弟单位和国外试验的一些较特殊的材料(如金属、冰、雪、水等)的数据。

本书由中国建筑科学研究院建筑物理研究所周辉、钱美丽、冯金秋、孙立新、杨玉忠、董宏、何晓燕、潘振等同志参与编

写，沈韞元、陈玉梅、魏铁群、黄福其、周景德、杨善勤、杜文英审稿。

本书在编写过程中得到了许多科研院所的大力支持和帮助，特别是上海市建筑科学研究院、中国建筑西南设计研究院、福建省建筑科学研究院、新星宇建设有限责任公司、安徽罗宅建筑节能材料有限公司、北京建筑工程学院等单位以及许多材料生产厂家，他们提供了大量的测试样品和材料，使我们的工作能顺利完成，在此向他们表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，时间较紧，不妥与疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

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	18
第三节 材料的比热容	23
第四节 材料的蓄热性能	26
第五节 绝热材料热物理性能工程应用若干问题	28
第二章 材料热物理系数测定方法	43
第一节 稳态测试方法概述	44
第二节 热脉冲法	51
第三节 线热源法	61
第四节 湿度的培养	65
第三章 建筑材料热物理系数表	68
第一节 常用建材热物理性能散点图	70
第二节 建筑材料热物理系数表	77
第三节 空心砖、砌块和复合板材	170
附录 高精度防护热板法导热仪的研制	211
参考文献	226

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，材料的热物理特性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、密度、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“ λ ”来表示。

在工程计算中，导热系数的单位为 $W/(m \cdot K)$ ，它表示：在一块面积为 $1m^2$ ，厚度为 $1m$ 的壁板上，板的两侧表面温度差为 $1K$ ，在 1 小时内通过板面的热量。因此，导热系数 λ 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 $0.020 \sim 3.5 W/(m \cdot K)$ 之间。

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) 密度(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，材料的密度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密度所起的作用大得多。

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(表 1-1)。

不同分子结构材料的导热系数

表 1-1

材 料 名 称	分子结构	密度 (kg/m^3)	导热系数 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
铝 钢	结晶体	2700	203.53
		7850	44.78
花岗石 普通混凝土	微晶体	2800	3.49
		2280	1.51
玻璃膨胀矿渣珠混凝土	玻璃体	2500	0.76
		1990	0.65

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 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 和 CaO ，其晶体的导热系数比玻璃体的导热系数要大好多倍(表 1-2)。

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 $[W/(m \cdot K)]$			
	0℃	300℃	500℃	700℃
在晶体状态下				
SiO ₂	8.97	4.97	4.28	3.86
MgO	41.87	20.08	13.39	9.62
Al ₂ O ₃	10.47	5.86	5.02	4.60
CaCO ₃	4.79	—	—	—
在玻璃体状态下				
SiO ₂	1.38	1.72	2.00	2.27
MgO	0.96	1.22	1.51	1.88
Al ₂ O ₃	0.67	—	—	—
CaO	0.48	—	—	—

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(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。它的松散密度 $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$, 导热系数 $\lambda = 0.198 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。以它作为骨料的混凝土 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0.616 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。而普通混凝土 $\rho = 2280 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1.51 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。它们的密度相差不大, 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、材料导热系数与密度的关系

密度是指单位体积的材料重量，用“ ρ ”来表示，单位为 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。所以材料的密度取决于孔隙率。从图 1-1 可以看出，当材料的相对密度一定时，孔隙率愈大，则密度就愈小。

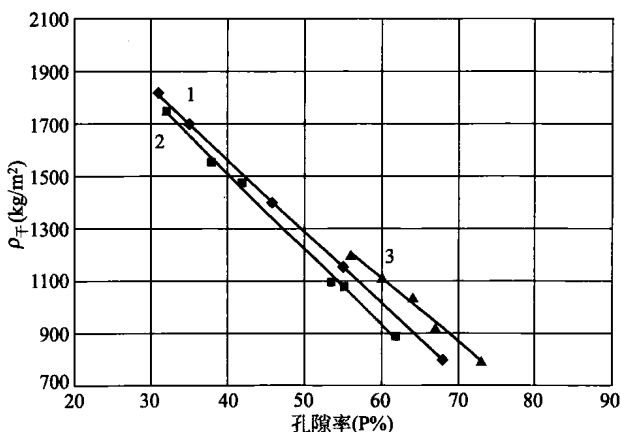


图 1-1 密度与孔隙率的关系

1— 焙烧黏土砖；2—轻骨料混凝土；3—泡沫混凝土

图 1-2 是各种轻混凝土和砖的导热系数与密度的关系。图 1-3 和图 1-4 是软木和刨花锯末板导热系数与密度的关系。这些图表明，材料的导热系数随着密度的增大而增大。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℃时的导热系数为 0.026W/(m·K)，与材料的固体骨架的导热系数相比差别悬殊(表 1-4)。因此，密度小的材料导热系数小，就是空气的导热系数在起着重要作用。

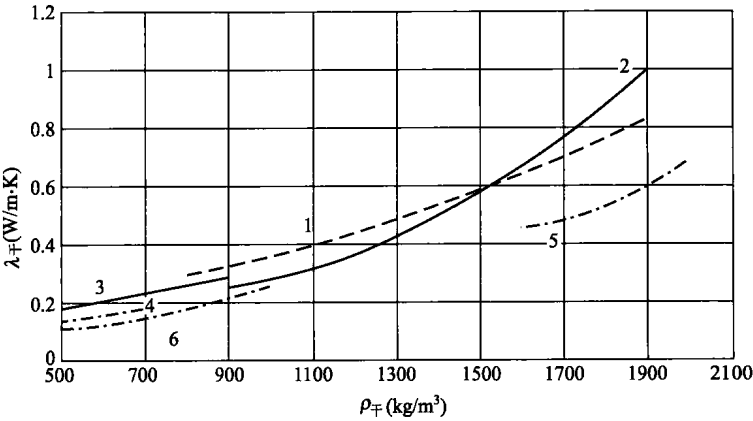


图 1-2 轻混凝土和砖的导热系数与密度的关系

- 1—普通黏土砖；2—轻骨料混凝土；3—水泥珍珠岩制品；
4—加气混凝土；5—膨珠混凝土；6—粉煤灰泡沫混凝土

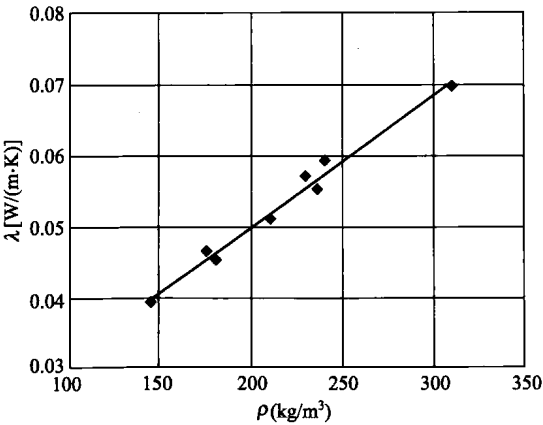


图 1-3 软木导热系数与密度的关系

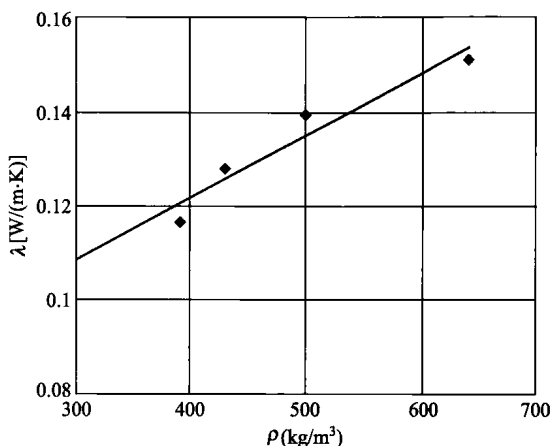


图 1-4 无规物刨花板和锯末板^❶导热系数与密度的关系

建筑材料固体部分的导热系数

表 1-4

材 料 名 称	导热系数 [W/(m·K)]
有机材料	0.29~0.41
无机材料	3.26
玻璃体材料	0.7~1.16
结晶体材料	4.65~6.97

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、泡沫玻璃等密度小、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。

❶ 无规物是生产聚丙烯的废料，可作为胶粘剂渗入刨花或锯末中压成保温板。

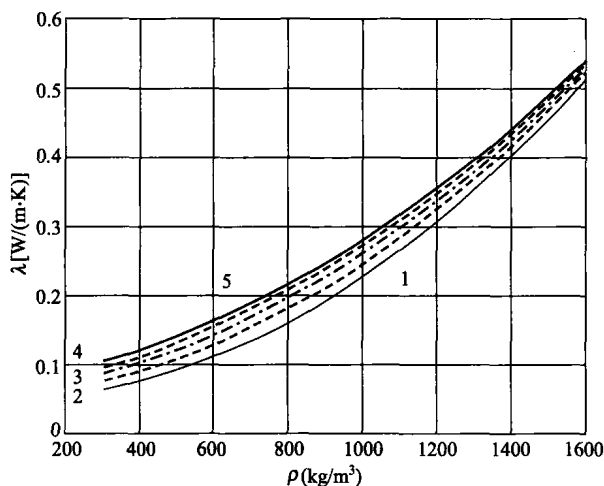


图 1-5 多孔无机材料在干燥状况下孔隙直径与密度对导热系数的影响

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

此外，材料的气孔封闭与开敞状态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，其密度变化的幅度较大，密度大，导热系数相应的增大；然而密度小到一定程度，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密度(图 1-6)。

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)、膨珠混凝土、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密度与导热系数的关系的经验公式。

1. 对于轻骨料混凝土

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

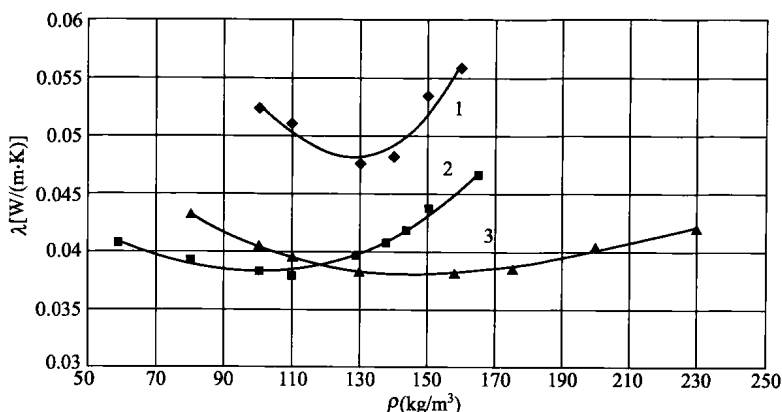


图 1-6 纤维材料导热系数与密度的关系

1—沥青矿棉；2—树脂玻璃棉板；3—沥青玻璃棉毡

2. 对于膨珠混凝土

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

3. 对于加气混凝土

$$\lambda_{\text{干}} = 0.0278 + 1.58 \times 10^{-4} \rho_{\text{干}} \quad (1-3)$$

4. 对于水泥珍珠岩制品

$$\lambda_{\text{干}} = 0.0324e^{0.002198\rho_{\text{干}}} \quad (1-4)$$

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

$\rho_{\text{干}}$ ——干燥条件下混凝土的密度。

根据这些经验公式绘出的曲线与实验数据是很接近的(图 1-7)。

三、材料导热系数与湿度的关系

由于气候、施工水分和使用条件的影响，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(包括水蒸气和液态水)。而水的导热系数 $\lambda = 0.581 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，比静态空气的导热系数 $\lambda = 0.0256 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 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 $\lambda = 2.326 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，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