

建筑节能设计基础

李宝骏 董文章 编著

东北大学出版社

建筑节能设计基础

李宝强

江苏工业学院图书馆

藏书章

东北大学出版社

(辽)新登字第8号

图书在版编目(CIP)数据

建筑节能设计基础/李宝骏 董文章 编著. —沈阳:东北大学出版社, 1994. 11

ISBN 7-81006-948-9

I. 建… II. ①李… ②董… III. 建筑设计—建筑热工—传热—能量消耗 IV. TU2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 02943 号

© 东北大学出版社出版

(沈阳 南湖 110006)

沈阳建筑工程学院印刷厂印刷 东北大学出版社发行

1994 年 11 月第 1 版 1995 年 4 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.5

字数: 166 千字 印数: 3000

定价: 13.50 元

前 言

能源是人类社会的物质基础,能源的拥有量是一个国家物质文明程度的标志。

人类使用的能源有两种,一是地球本身储存的能源,如煤、石油、天然气等,称为非再生性能源(Non-renewable energy),也可称为耗竭能源,或常规能源;二是来自地球以外的连续能源,如太阳能、水能、风能、潮汐能等,称为再生性能源(Renewable energy),也可称为非耗竭性能源或新能源。

随着世界各国能耗的增长,常规能源日益短缺,人们越来越注意开发新能源和采取各种节能措施。作为建筑物采暖耗能,约占一个国家总耗量的 $1/4$ 左右。因此,搞好建筑节能是一件关系到未来社会的迫切任务。

本书首先介绍了建筑节能设计中应具备的传热学基本知识,然后介绍了墙体、屋面、地面、门、窗等建筑结构与构件的节能设计方法及要求。本书参阅了国内外有关资料,并融进历年研究论文,可作为节能建筑设计手册,供建筑设计、采暖通风、能源利用等专业人员参考。

由于编者的水平有限,书中错漏疏忽之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

一九九四年二月

目 录

第一章 传热学基础	(1)
第一节 导热过程	(1)
第二节 对流换热过程	(13)
第三节 辐射换热过程	(17)
第二章 板壁的稳定传热	(28)
第一节 建筑物外围护结构的典型形式	(28)
第二节 单层板壁的稳定传热	(29)
第三节 多层板壁的稳定传热	(30)
第四节 复合板壁的稳定传热	(32)
第五节 与外墙相连的内隔墙的稳定传热	(34)
第六节 外墙角处的稳定传热	(40)
第三章 板壁的不稳定传热	(46)
第一节 不稳定传热的基本概念	(46)
第二节 瞬态不稳定传热过程	(47)
第三节 周期性不稳定传热过程	(54)
第四节 有限差分法求解板壁不稳定传热	(56)
第四章 墙体的设计	(64)
第一节 采暖期度日数及室内计算温度	(64)
第二节 计算建筑物耗热量指标的基本量	(68)
第三节 建筑物耗热量指标 及采暖能耗的计算	(72)
第四节 墙体的热阻	(76)
第五节 围护结构热惰性指标	(100)
第六节 空气间层的传热	(102)
第七节 带有洞口的墙体的传热	(112)

第八节	墙体的保温	(115)
第九节	常用墙体的构造	(115)
第十节	热桥部位的处理	(125)
第五章	屋面的设计	(130)
第一节	屋面的热状况	(130)
第二节	绝热材料与防水层的位置	(134)
第三节	围护结构的防潮设计	(137)
第四节	常用屋面的构造	(141)
第六章	地面的设计	(144)
第一节	地面的热流	(144)
第二节	地面的吸热指标	(147)
第三节	地面的热工要求及构造形式	(149)
第七章	建筑物体型设计	(151)
第一节	建筑物的平面设计	(151)
第二节	建筑物的立面设计	(153)
第三节	建筑物围护结构吸收的太阳能	(154)
第四节	建筑物围护结构外表面的换热	(157)
第五节	室外综合温度	(162)
第八章	门与窗的设计	(164)
第一节	窗玻璃的传热特性	(164)
第二节	玻璃窗的太阳辐射得热量	(169)
第三节	窗墙面积比与热阻	(175)
第四节	门的设计	(179)
第九章	空气渗透	(182)
第一节	空气渗透	(182)
第二节	风压作用	(184)
第三节	通过孔洞的气流	(189)

第四节	缝隙法和换气次数法.....	(190)
第五节	热压作用.....	(192)
第十章	室内换热	(198)
第一节	室内换热过程.....	(198)
第二节	室内表面间的辐射换热.....	(199)
第三节	室内自然对流换热.....	(206)
第四节	围护结构水平表面上平面 射流的对流换热.....	(211)
第五节	室内空气的热平衡.....	(213)
第十一章	热工参数测量	(215)
第一节	风速的测量.....	(215)
第二节	温度的测量.....	(218)
第三节	湿度的测量.....	(226)
	参考文献.....	(231)

第一章 传热学基础

传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。整个传热过程包括导热、对流、辐射三种基本传热方式,本章对这三种基本传热方式作了简要说明,为后面各章的研究打下基础。

第一节 导热过程

一、导热

导热是指温度不同的物体各部分之间或温度不同的两物体之间直接接触而发生的热传递现象。从微观角度来看导热是依靠物质分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而进行的热量传递现象。

导热现象可以在固体、液体和气体中发生。在密实的固体中可以发生纯导热过程,而在液体和气体中,只有消除对流热传递的条件下,才能实现纯导热过程。

导热理论是从宏观角度来分析热传递过程的,它不研究物质的微观结构,而把物质看作是连续介质。在一般情况下,大多数的固体、液体和气体,都可以看作是连续介质。在某些特殊情况下,例如稀薄的气体,就不能认为是连续的介质。

导热理论的任务就是要确定在某一时刻物体中各处的温度。

二、温度场

温度场是指某一时刻空间所有各点的温度分布。在一般情况下,它是时间和空间的函数,可用下式来表示:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1-1)$$

式中 t ——温度； x, y, z ——空间坐标；
 τ ——时间。

当 x, y, z, τ 都变化时，称为三维不稳态温度场。当温度场不随时间变化，而仅随坐标变化时，即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ 时，则称为稳态温度场，其表达式为 $t = f(x, y, z)$ 。当温度场不随时间变化，而仅随一个或两个坐标变化时，则分别称为一维或二维稳态温度场，其表达式为 $t = f(x)$ 、 $t = f(x, y)$ 或 $t = f(x, z)$ 。具有稳态温度场的导热过程称为稳态导热；温度场随时间变化的导热过程为不稳态导热。

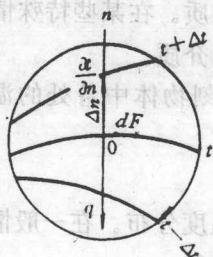
三、等温面和等温线

同一时刻温度场中所有温度相同的点所构成的面叫做等温面。不同的等温面与同一平面相交，其交线称为等温线。

由于在同一时刻、同一地点的温度只有一个，而不能有一个以上的不同值，所以两个不同温度的等温面或两条不同温度的等温线不会彼此相交。空间的温度场可以用等温面或等温线来表示。

四、温度梯度

两等温面之间的温度差 Δt 与其法线方向的距离 Δn 的比值的极限称为温度梯度，用 $\text{grad } t$ 来表示。如图 1-1 所示，从物体中取出一部分， $t, t + \Delta t$ 分别为三条温度依次升高的等温线，则



$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \vec{n} \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

式中 $\vec{n}$ ——法线方向上的单位向量；

图 1-1 温度梯度和热流

$\frac{\partial t}{\partial n}$ ——温度在 n 方向上的导数。

温度梯度在空间直角坐标系中的三个分量等于其相应的偏导数,即

$$\text{grad} t = \vec{i} \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (1-3)$$

式中 $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 三个坐标轴上的单位向量。

温度梯度的负值“ $-\text{grad} t$ ”叫做温度降度,它的数值与温度梯度相等而方向相反。

五、傅立叶定律

傅立叶(J·Fourier)在实验研究导热的基础上指出:单位时间内传梯的热量 Q 、与温度梯度及垂直于导热方向的表面积 F 成正比,即

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad} t \cdot F \quad (\text{W}) \quad (1-4)$$

我们把单位时间,通过单位面积所传递的热量称为热流量,可用下式表示

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \cdot \text{grad} t \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-5)$$

热流量是个向量,它和温度梯度位于等温面的同一法线上,但指向温度降低的方向。式中的负号就表示热传递的方向与温度梯度的方向相反,永远顺着温度降低的方向。 λ 称为导热系数,或称为导热率。式(1-5)即为导热过程的基本定律——傅立叶定律的数学表达式。

热流量在 x, y, z 轴的分量为

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \\ q_y &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \\ q_z &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

傅立叶定律确定了热流量和温度梯度之间的关系。要确定热流量大小，就必须知道温度梯度，即要知道物体内的温度场。

六、导热系数

导热系数 λ 是物质的一个重要热物性参数，它可用下式来定义

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad } t} \quad (1-7)$$

导热系数的数值就是物体中温度降度为 $1^\circ\text{C}/\text{m}$ 时，单位时间内通过单位面积的导热热量，它表示物质导热能力的大小，其单位是 $\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 。

物质导热系数与物质的种类、温度、湿度、压力和密度等因素有关，特别是温度对导热系数的影响更为重要。许多工程材料在一定的温度范围内，其导热系数可以认为是温度的线性函数，即

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (1-8)$$

式中 λ_0 —— 0°C 时的导热系数；

b —— 由实验确定的常数。

下面我们来分析气体、液体和固体的导热系数。

1. 气体的导热系数

气体导热系数的数值约为 $0.006 \sim 0.6 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 的范围内。气体的导热是由于分子的热运动和相互碰撞时所产生的能量传递。在常温常压下,气体的导热系数可以表示为

$$\lambda = \frac{1}{3} \bar{\omega} \cdot \bar{l} \cdot \rho \cdot c_v \quad (1-9)$$

式中 $\bar{\omega}$ —— 气体分子运动的均方根速度, m/s ;

$\bar{l}$ —— 气体分子在两次碰撞间的平均自由行程, m ;

ρ —— 气体的密度, kg/m^3 ;

c_v —— 气体的定容比热, $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

当气体的压力升高时,气体的密度 ρ 增大。但平均自由行程却以同样的程度减小,因而可使 $\rho \cdot \bar{l}$ 保持不变。除压力低于 2664.8 Pa 和高于 $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 外,可以认为气体的导热系数与压力无关。

2. 液体的导热系数

液体导热系数的数值约在 $0.07 \sim 0.7 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 范围内。液体的导热主要是依靠晶格的振动来实现的。液体导热系数的经验公式为

$$\lambda = A \frac{c_p \cdot \rho^{4/3}}{M^{1/3}} \quad (1-10)$$

式中 c_p —— 液体的定压比热;

ρ —— 液体的密度;

M —— 分子量。

液体的导热系数随温度的升高而降低;随压力的升高而增大。

3. 固体的导热系数

固体的导热系数,由于金属与非导电固体的导热机理不完全一样,所以我们分别地加以说明。

(1) 金属的导热系数

金属的导热系数一般在 $2.2 \sim 420 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 的范围内变化。金属的导热是依靠自由电子的迁移和晶格的振动来实现的。当温度升高时,晶格的振动加强,干扰了自由电子的运动,使导热系数下降。

由于金属导热与导电的机理相同,所以金属的导热系数与导电率成正比。

如果在金属中掺入任何杂质,将破坏晶格的完整性而干扰自由电子的运动,致使导热系数减小。大部分合金的导热系数随温度的升高而增大。

(2) 非导电固体的导热系数

一般情况下,建筑材料和隔热保温材料都属于非导电固体。这类材料的导热系数大约在 $0.025 \sim 3.0 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 范围内,并且随温度的升高而增大。

在室温下导热系数的数值小于 $0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 的材料称为隔热保温材料,或称为热绝缘材料。这类材料大多是孔隙多、容重轻的材料,例如岩棉、泡沫塑料、膨胀珍珠岩、蛭石和硅藻土制品等。严格地说这类材料不应视为连续介质,在孔隙的大小和物体总几何尺寸比起来很小的情况,仍然可看成是连续介质。应注意的是当孔隙较大时,孔隙内的空气对流作用和孔隙壁间的辐射均可以增强,从而引起导热系数的升高。

多孔体材料的导热系数受湿度的影响很大。由于水份替代了空隙中一部分空气,水份将从高温区向低温区迁移而传递热

量,致使湿材料的导热系数比干材料的大。例如,干砖的 $\lambda = 0.35 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 而湿砖的 $\lambda = 1.0 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

在分析材料的导热性能时,如果物质在各个不同方向上导热系数相同,则称为各向同性体,反之为各向异性体。

七、热阻系数和热阻

热阻系数是导热系数的倒数,即 $\frac{1}{\lambda}$, 单位是 $\text{m} \cdot ^\circ\text{C/W}$ 。

热阻系数是构件厚度 δ 与其热阻系数 $\frac{1}{\lambda}$ 的乘积 $\frac{\delta}{\lambda}$, 用来衡量构件对热流阻力的大小,用 R 表示,单位为 $^\circ\text{C/W}$ 。

表1-1给出了一些建筑隔热保温材料的导热系数和它们的密度值,供读者参考。

八、导热微分方程式

假定所研究的物体是各向同性的连续介质,其导热系数 λ 、比热 c 和密度 ρ 均为已知;并假定物体内部具有内热源;用单位体积单位时间内发出的热量 q_v 表示内热源的强度。

从导热的物体中割出一个微元平行六面体 $dV = dx dy dz$, 如图1-2所示。

根据能量守恒定律,在 $d\tau$ 时间内导入和导出微元体的热量的净差额,加上内热源的发热量,应等于微元体内能的增加,下面我们进行具体的分析。

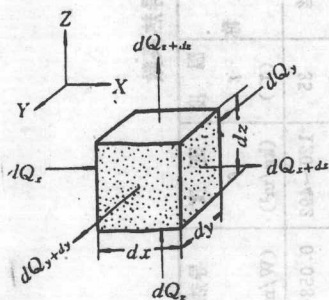


图1-2 微元体的导热

表 1-1 建筑隔热保温材料的密度与导热系数

材 料 名 称	温 度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密 度 ρ (kg/m^3)	导 热 系 数 λ ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	材 料 名 称	温 度 t ($^{\circ}\text{C}$)	密 度 ρ (kg/m^3)	导 热 系 数 λ ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$)
超细玻璃棉	36	33.4~50	0.030	玻 璃 丝	35	120~492	0.058~0.07
珍珠岩散料	20	44~288	0.042~0.078	软 木 板	20	105~437	0.044~0.079
水泥珍珠岩制品	25	235~435	0.07~0.113	木 丝 纤 维 板	25	245	0.048
蛭 石	20	395~467	0.105~0.128	甘 蔗 板	20	282	0.069~0.072
石 棉 毡	22	744~1400	0.099~0.188	锯 木 屑	20	179	0.083
石 棉 棉 毡	21	384	0.099	硬泡沫塑料	30	295~563	0.041~0.048
硅藻土石棉灰	20	280~380	0.085~0.114	软泡沫塑料	30	41~162	0.043~0.056
硅藻土砖	27	580~670	0.128~0.151	玉米梗板	22	252	0.065
软煤灰砖	30	458~589	0.116~0.22	青 砖	30	155~170	0.042~0.084
矿 渣 棉	30	207	0.058	红 砖	35	1560	0.49

1. 导入和导出微元体的净热量在 $d\tau$ 时间内, 沿 x 轴方向, 经 x 表面导入的热量为:

$$dQ_x = q_x dydzd\tau$$

经 $x + dx$ 表面导出的热量为:

$$dQ_{x+dx} = q_{x+dx} dydzd\tau$$

而

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$

因此, 设 x 轴方向导入和导出微元体的净热量为:

$$dQ_x - dQ_{x+dx} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dydzd\tau$$

同理, 在此时间内, 沿 y 轴方向和 z 轴方向, 导入和导出微元体的净热量为:

$$dQ_y - dQ_{y+dy} = -\frac{\partial q_y}{\partial y} dx dydzd\tau$$

$$dQ_z - dQ_{z+dz} = -\frac{\partial q_z}{\partial z} dx dydzd\tau$$

从 x, y, z 三个方向导入和导出微元体的净热量的总和为:

$$Q_1 = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) dx dydzd\tau$$

根据傅立叶定律可知

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}, q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z},$$

代入上式中可得:

$$Q_1 = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right)\right] dx dydzd\tau$$

2. 在 $d\tau$ 时间内微元体中内热源的发热量为:

$$Q_2 = q_v dx dydzd\tau$$

3. 在 dt 时间内微元体内能的增量为:

$$Q_3 = c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz d\tau$$

4. 导热微分方程式

对于固体和不同可压缩的流体, 定压比热 c_p 等于定容比热 c_v , 即 $c_p \approx c_v \approx c$ 。根据能量守恒定律可得:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3$$

即:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) + q_v \quad (1-11)$$

上式称为导热方程式, 它表达了物体的温度随空间和时间变化的关系。

(1) 当物体参数 λ 、 ρ 和 c 均为常数时, 式(1-11)可以简化为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1-12)$$

或写成

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c\rho} \quad (1-13)$$

式中 $\nabla^2 t$ —— 温度 t 的拉普拉斯算符;

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ —— 导温系数, 或称为扩散系数, 单位是 m^2/s 。

它说明了物体被加热或冷却时, 物体内部各部分温度趋向于均匀一致的能力。导温系数越大, 物体内部各处的温度差别越小。

(2) 当物性参数为常数且无热源时, 式(1-13)可写为: