

THEORY AND APPLICATION OF HEAT AND MASS
TRANSFER IN BUILDINGS

建筑热质传递理论与应用

◎ 王莹莹 周晓骏 马 超 著

非
外
借

中国建筑工业出版社

建筑热质传递理论与应用

王莹莹 周晓骏 马 超 著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑热质传递理论与应用/王莹莹,周晓骏,马超
著. —北京:中国建筑工业出版社,2018. 10
ISBN 978-7-112-22438-8

I. ①建… II. ①王… ②周… ③马… III. ①建
筑物-围护结构-传热-研究 IV. ①TU111. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 153820 号

本书从实际需求中提炼建筑热质传递理论与应用中的问题,通过系统化的数理建模深入剖析问题的本质,展示了目前建筑热质传递领域的前沿成果。主要包括以下内容:(1)建材界面气固两相分配机理及内部气体扩散传质特性,室内热湿环境下挥发性有机化合物散发规律;(2)建材湿分与材料导热系数的定量关系,含湿多孔建筑材料导热系数修正计算方法;(3)建材内部和表面热湿耦合迁移机理,湿迁移对室内热环境及冷热负荷的影响关系。

本书可作为高等院校暖通空调、工程热物理、建筑技术等专业研究生教学参考用书,也可供从事建筑节能、建筑能源管理等科研及工程技术人员参考。

* * *

责任编辑:张文胜
责任校对:姜小莲

建筑热质传递理论与应用

王莹莹 周晓骏 马 超 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:11 $\frac{3}{4}$ 字数:284 千字

2018 年 9 月第一版 2018 年 9 月第一次印刷

定价:38.00 元

ISBN 978-7-112-22438-8

(32314)

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)

序

建筑室内热湿环境及空气质量与人体健康、舒适及工作效率息息相关，其控制过程中涉及大量的热质传递问题。高度围合密闭的建筑物，造成大量室内装饰形成的挥发性有机化合物等有害气体在室内空气中积聚，对室内人群的健康产生了极大的影响；同时，建筑材料含湿引起围护结构传热过程发生变化，其热湿迁移过程造成表面热湿状态变化，进而影响室内热湿环境与暖通空调负荷。虽有学者基于运输理论、分形理论对多孔介质传质问题进行著书，但是关于建筑领域热质传递理论及其应用问题鲜见系统阐述。

建筑室内热湿环境及空气质量调节控制的前提是对建筑热质传递理论及其应用进行详细分析。多孔建材中的相变传热与传质问题，涉及对多尺度孔隙的差异化分析方法，准确描述和揭示多孔建材中热量、质量和动量的传输机理和规律需进行大量深入系统的研究。建筑材料内部湿分含量、分布特征及传递特性是影响材料传热过程的重要因素，其不仅与材料孔隙结构特征有关，还受热湿环境影响，我国地域辽阔，热湿气候多样，且材料结构各异，揭示材料中湿分含量、湿传递对传热过程的影响程度，为进一步研究围护结构热湿迁移对室内热湿环境及建筑冷热负荷的影响奠定基础。

王莹莹博士从事建筑热质传递领域基础理论与工程应用研究工作已近 10 年，《建筑热质传递理论与应用》是其多年学术研究的积累。近年来，王博士作为负责人主持国家自然科学基金项目“十三五”国家重点研发计划合作单位课题、中国博士后科学基金项目、陕西省自然科学基金项目、陕西省博士后基金项目共 5 项，参与国家自然科学基金重大项目课题 1 项、面上项目 4 项、其他省部级项目 3 项，发表科研论文 30 余篇。所得成果主要体现在建材界面气固两相分配机理及内部气体扩散传质特性、含湿建材导热系数修正方法、围护结构热湿耦合迁移过程对室内热环境及冷热负荷的影响关系等诸多方面。作为反映作者长期研究成果的学术著作的问世，实乃对建筑热质传递领域的一大贡献。

作为西部绿色建筑国家重点实验室一项重要成果，值此《建筑热质传递理论与应用》专著出版之际，谨表祝贺，以为序。



2018 年 6 月 15 日，于西安

前 言

建筑室内热湿环境及空气质量控制中涉及大量的热质传递问题。近年来建筑节能快速发展,使得建筑物趋于高度围合密闭,造成大量室内装饰形成的挥发性有机化合物等有害气体在室内空气中积聚,对室内人群的健康产生了极大的影响。同时,建筑围护结构内部热湿迁移过程造成表面热湿状态变化,进而影响室内热湿环境与暖通空调负荷,改变人体热舒适状态。虽有学者基于运输理论、分形理论对多孔介质传质问题进行著书,但是关于建筑领域热质传递理论及其应用问题鲜见系统阐述。

建筑热质传递理论分析是建筑室内热湿环境及空气质量调节的前提。本书是在总结作者及其所在课题组十余年主要研究成果的基础上完成的,主要包含了本团队在这一方向上三个方面的研究积累:(1)建材界面气固两相分配机理及内部气体扩散传质特性,室内热湿环境下挥发性有机化合物散发规律;(2)建材湿分与材料导热系数的定量关系,含湿多孔建筑材料导热系数修正计算方法;(3)建材内部和表面热湿耦合迁移机理,湿迁移对室内热环境及冷热负荷的影响关系。希望上述内容对于建筑室内空气质量分析、建筑节能和暖通系统设计及运行能够提供一些借鉴。

本专著相关研究得到“十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700400)的资助,还受到国家自然科学基金重大项目“极端热湿气候区超低能耗建筑研究”(51590910)和国家自然科学基金项目(51508443、51678468)等支持。此外,本著作成果相关实验研究大多是在省部共建西部绿色建筑国家重点实验室中完成。在此对这些科研项目和实验机构致以最诚挚的感谢。

特别感谢刘加平院士为本书作序,是他引领作者进入建筑节能领域,在建筑热质传递方面多次给予点拨与鼓励,才使得作者真正领略到科学研究的乐趣和魅力。本专著大量的现场调研、实验测试及分析计算均是课题组历届研究生们的积极贡献、辛勤付出而成,他们是博士研究生宋聪、蒋婧、陈耀文、周勇,硕士研究生姜超、康文俊等,是他们与作者在建筑热质传递领域的多年共同努力与坚持,方才形成此部专著。最后,感谢课题组刘艳峰教授、王登甲教授对本专著撰写过程中提出的诸多宝贵意见。

由于著者学术和水平有限,书中不妥之处在所难免,肯请读者指正!

目 录

第 1 章 热质传递过程基础理论	1
1.1 建筑材料基本结构参数	1
1.1.1 孔隙率	1
1.1.2 比表面积	1
1.1.3 迂曲度	2
1.1.4 固体颗粒尺寸	2
1.1.5 孔隙尺寸	2
1.2 传热过程	2
1.2.1 过程描述	3
1.2.2 基本定律	5
1.2.3 物性参数	5
1.3 传质过程	9
1.3.1 过程描述	9
1.3.2 基本定律	12
1.3.3 物性参数	13
1.4 热质耦合传递过程	18
1.4.1 Philip 和 De Vries 理论	18
1.4.2 Luikov 热湿耦合控制方程	19
1.4.3 Whitaker 理论	20
本章参考文献	20
第 2 章 建材界面气固两相分配机理	22
2.1 概述	22
2.2 分离系数双尺度预测模型	22
2.2.1 多孔介质中气体分子吸附机理	22
2.2.2 微观孔分离系数预测模型	23
2.2.3 宏-介观孔分离系数预测模型	25
2.2.4 多孔介质传质模型的等效分离系数	25
2.3 初始可散发浓度差异化分布预测模型	25
2.3.1 孔隙表面吸附质分子脱附机理	25
2.3.2 多孔建材吸附势能的非均匀分布特性	26
2.3.3 初始可散发浓度差异化分布解析式	27
2.4 环境舱实验测定与结果分析	29

2.4.1	连续温升多气固比法原理	29
2.4.2	连续温升多气固比法实验结果	30
2.4.3	分离系数预测模型验证	34
2.4.4	初始可散发浓度预测模型验证	35
2.4.5	同系物间参数的推导预测	40
	本章参考文献	43
第3章	建材内部气体扩散传质特性	45
3.1	概述	45
3.2	建材孔隙结构剖析及扩散系数物理模型	45
3.2.1	建材孔隙结构及气体传质路径	45
3.2.2	多级串联宏观分形毛细管束模型	47
3.2.3	简化物理模型	49
3.3	扩散系数的分形分析与数学表征	49
3.3.1	预测有效扩散系数的 MSFC 模型	49
3.3.2	多孔介质传质解析模型	51
3.4	孔隙结构测定及模型预测精度分析	52
3.4.1	建材孔隙结构测定与分析	52
3.4.2	MSFC 模型验证与对比	56
3.5	建材内气体传质影响因素分析	58
3.5.1	散发关键参数敏感性分析	58
3.5.2	温度对传质的影响	62
3.5.3	孔隙结构对传质的影响	66
3.5.4	气体属性对传质的影响	68
	本章参考文献	70
第4章	静态湿分布对多孔建筑材料导热过程的影响	72
4.1	概述	72
4.2	多孔建筑材料孔隙结构及湿分形态	72
4.2.1	建筑材料孔径分布和孔隙率	72
4.2.2	建筑材料内部湿分形态	76
4.3	静态湿分布多孔建筑材料导热过程	77
4.3.1	材料内部液气空间替换导热物理模型	77
4.3.2	固液气共存多孔材料导热分形分析	78
4.4	静态湿分布建筑材料导热系数实验分析	81
4.4.1	实验方案	81
4.4.2	实验结果与分析	84
4.4.3	建筑材料导热系数计算模型验证	86
4.5	静态湿分布多孔材料导热系数影响因素分析	90
4.5.1	孔隙率和孔径分布	90
4.5.2	含湿量	92

4.5.3 分形结构参数.....	93
本章参考文献	95
第5章 动态湿迁移对多孔建筑材料导热过程的影响	97
5.1 概述.....	97
5.2 多孔材料热湿耦合传递数学模型.....	97
5.2.1 材料内部无湿相变.....	97
5.2.2 材料内部有湿相变	101
5.3 湿迁移和湿相变引起的附加导热	103
5.3.1 湿迁移引起的附加导热系数	103
5.3.2 湿相变引起的附加导热系数	104
5.4 动态湿迁移与湿相变的影响因素	104
5.4.1 热湿耦合传递相关参数分析	105
5.4.2 材料内部无湿相变	106
5.4.3 材料内部有湿相变	111
5.5 动静湿分对建材导热系数的综合影响	116
本章参考文献.....	118
第6章 整体建筑热湿耦合迁移过程分析.....	119
6.1 概述	119
6.2 建筑热湿耦合传递数学控制方程	119
6.2.1 墙体热湿耦合迁移数学模型	119
6.2.2 室内空气热湿平衡方程	125
6.3 墙体传湿对传热的影响分析	127
6.3.1 定常边界条件下传湿对内表面温度及热流的定量影响关系	127
6.3.2 周期性边界条件下传湿对内表面温度的定量影响关系	131
6.4 地表面热湿迁移过程的实验分析	134
6.4.1 实验介绍	134
6.4.2 不同影响因素下地表面温湿度变化	139
本章参考文献.....	145
第7章 围护结构传湿对室内热环境及空调负荷的影响.....	147
7.1 概述	147
7.2 新建建筑墙体含湿量衰减特性及因素分析	147
7.2.1 新建建筑墙体含湿量衰减特性	147
7.2.2 新建建筑墙体含湿量衰减因素分析	148
7.3 墙体传湿对内表面温度的影响	152
7.4 传湿对室内热环境的影响	155
7.4.1 墙体传湿对室内温湿度的影响	155
7.4.2 建筑室内热湿环境测试	158
7.5 湿迁移对湿热湿冷地区室内热环境及空调负荷的影响分析	163
7.5.1 湿迁移对湿热地区室内热环境及空调负荷的影响分析	163

7.5.2 湿迁移对湿冷地区室内热环境及空调负荷的定量影响分析	165
7.6 湿迁移对干热干冷地区室内热环境及空调负荷的定量影响分析	168
7.6.1 湿迁移对干热地区室内热环境及空调负荷的定量影响分析	168
7.6.2 湿迁移对干冷地区室内热环境及空调负荷的定量影响分析	169
7.7 考虑湿迁移时夜间通风换气次数对室内热环境及负荷的影响分析	172
附录	177
附录 1 二元系的扩散系数	177
附录 2 根据伦纳德-琼斯势函数确定 Ω_D 值	178
附录 3 由黏度数据确定的伦纳德-琼斯势参数 σ 和 ϵ/k	178

第 1 章 热质传递过程基础理论

1.1 建筑材料基本结构参数^[1-3]

在研究建筑材料传热传质问题中,经常涉及一些基本结构参数和基本性能参数,现分别阐述如下。

1.1.1 孔隙率

孔隙率是指块状材料中孔隙体积与材料在自然状态下总体积的百分比,也被称为空隙率,其表达式为:

$$\phi = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{材料}}} \times 100\% = \frac{V_p}{V_B} \times 100\% \quad (1-1)$$

孔隙率可分为两种:材料内相互连通的微小孔隙的总体积与该材料的外表体积的比值称有效孔隙率,以 ϕ_e 表示;材料内相通的和不相通的所有微小孔隙的总体积与该材料的外表体积的比值称绝对孔隙率或总孔隙率,以 ϕ_T 表示。所谓孔隙率,通常是指有效孔隙率,但为书写方便,一般直接以 ϕ 表示。

孔隙率与材料固体颗粒的形状、结构和排列有关。在常见的非生物材料中,鞍形填料和玻璃纤维等的孔隙率最大,达 83%~93%;煤、混凝土、石灰石和白云石等的孔隙率最小,可低至 2%~4%,地下砂岩的孔隙率大多为 12%~30%,土壤的孔隙率为 43%~54%,砖的孔隙率为 12%~34%,皮革的孔隙率为 56%~59%,均属中等数值;动物的肾、肺、肝等脏器的血管系统的孔隙率亦为中等数值。

孔隙率是影响材料内流体传输性能的重要参数。

1.1.2 比表面积

比表面积定义为固体骨架总表面积 A_s 与材料总容积 V 之比,即

$$\Omega = \frac{A_s}{V} \quad (1-2)$$

式中 Ω ——多孔体比面, cm^2/cm^3 或 $1/\text{cm}$;

A_s ——多孔体面积或多孔体孔隙的总内表面积, cm^2 ;

V ——多孔体外表体积(或视体积), cm^3 。

材料的比表面积定义也可以理解为材料单位总体积中孔隙的隙间表面积。举例来说,由半径为 R 的等圆球按立方体排列所组成的多孔介质,其比表面积应为 $\Omega = 8 \times 4\pi R^2 / (4R)^3 = \pi/2R$ 。由此可知, R 越小, Ω 越大,即固体颗粒越小,比表面积越大。因此,细颗粒物质的比表面积显然要比粗粒物质的比表面积大得多,如砂岩(粒径为 1~0.25mm)的比表面积小于 $950\text{cm}^2/\text{cm}^3$;细砂岩(粒径为 0.25~0.1mm)的比表面积为 $950 \sim 2300\text{cm}^2/\text{cm}^3$;泥砂岩(粒径为 0.1~0.01mm)的比表面积大于 $2300\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 。很明显,

细粒构成的材料的比表面积远大于粗粒材料，也就是说，多孔比表面积越大，其骨架的分散程度越大，颗粒越细。

比表面积无论对于多孔介质的传热还是传质过程，都是十分重要的结构参数。它也是与材料的流体传导性（即渗透率）有关的一个重要参数。

1.1.3 迂曲度

一般来说，材料内部空隙连通通道是弯曲的。显然，其弯曲程度将对材料的热质传递过程产生影响。对材料的这一结构用迂曲度 τ 表示为：

$$\tau = \left(\frac{L}{L_e}\right)^2 \tag{1-3}$$

式中 L_e 、 L ——分别为弯曲通道真实长度与连接弯曲通道两端的直线长度。

按此定义， τ 必小于 1，但也有文献将其定义为：

$$\tau' = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2 \tag{1-4}$$

显然，此时 τ' 必大于 1。

上述结构参数均与多孔固体颗粒尺寸及其分布、孔隙尺寸及其分布有关，故也常把固体颗粒与孔隙尺寸及其分布列为基本结构参数，现简介如下：

1.1.4 固体颗粒尺寸

多孔介质固体颗粒尺寸、形状、大小通常是多种多样的，因此准确地确定固体颗粒尺寸是相当困难的。在工程应用上，往往要通过实际测量来确定。于是，颗粒尺寸又取决于采用的测量方法。目前主要有两种计量方法：其一是比重计分析法：也就是将与颗粒在水中的下降速度相同的同种材料圆球尺寸加以测量来确定，这种方法适用于较小颗粒的测量；其二是筛选法，即利用不同尺寸方形孔网筛子过筛，其所测量的是能够通过筛网的一批颗粒（这种方法只能大致上确定颗粒尺寸的一个范围），最后以网眼尺寸为当量直径去表述颗粒尺寸。总之，无论采用何种测量方法，都是将颗粒折算成圆球的当量直径 d_p 来表示的。

1.1.5 孔隙尺寸

一般来说，孔隙尺寸是需要进行统计说明的，而其孔径尺寸与分布则往往是通过实测来确定的。其中，常见的一种方法是根据多孔体的剖面切片进行统计，也可用非润湿流体注入多孔体的实测方法确定，即

$$d_0 = 4\sigma \cos\theta / p_c \tag{1-5}$$

式中 σ ——表面张力，N；

θ ——接触角，°；

p_c ——使非润湿流体进入孔隙所需压力，Pa。

1.2 传热过程

对建筑材料的传热过程分析可知，其传热过程包括固体骨架（颗粒）之间互相接触及空隙中流体的导热过程；空隙中流体的对流换热（可为强迫对流，也可为自然对流，还可以是两者并存的混合对流，同时包括液体沸腾、蒸发及蒸汽凝结等相变换热）；固体骨架

(颗粒) 或者气体间的辐射换热。大量实验研究和理论分析结果表明, 对颗粒直径不超过 4~6mm 的材料, 在 $Gr \cdot Pr < 10^3$ 时, 其空隙中流体的对流换热可忽略不计, 在固体颗粒之间温差较大, 空隙为真空或者由气体占据时, 辐射换热才比较明显。针对建筑材料的传热过程, 主要讨论导热过程的影响。

1.2.1 过程描述

1. 导热过程

从导热物体中任意取出一个微元平行六面体来做该微元体能量平衡分析 (见图 1-1)。设物体中有内热源, 其值为 $\dot{\Phi}$, 它代表单位时间内单位体积中产生或消耗的热能 (产生取正号, 消耗为负号), 单位是 W/m^3 。假定导热物体的热物理性质是温度的函数。

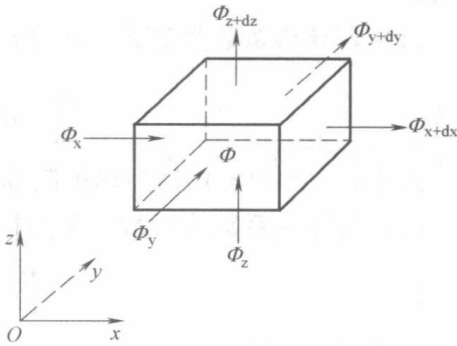


图 1-1 微元体的导热热平衡分析

与空间任一点的热流密度矢量可以分解为三个坐标方向的分量一样, 任一方向的热流量也可以分解成 x 、 y 、 z 坐标轴方向的分热流量, 如图 1-1 中 Φ_x 、 Φ_y 、及 Φ_z 所示。通过 $x=x$ 、 $y=y$ 、 $z=z$ 三个微元表面导入微元体的热流量可根据傅里叶定律写出

$$\begin{cases} (\Phi_x)_x = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_x dydz \\ (\Phi_y)_y = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_y dx dz \\ (\Phi_z)_z = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z dx dy \end{cases} \quad (a)$$

式中, $(\Phi_x)_x$ 表示热流量在 x 方向的分量 Φ_x 在 x 点的值, 其余类推。通过 $x=x+dx$ 、 $y=y+dy$ 、 $z=z+dz$ 三个表面导出微元体的热流量, 亦可按傅里叶定律写出

$$\begin{cases} (\Phi_x)_{x+dx} = (\Phi_x)_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx = (\Phi_x)_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_x dydz \right] dx \\ (\Phi_y)_{y+dy} = (\Phi_y)_y + \frac{\partial \Phi_y}{\partial y} dy = (\Phi_y)_y + \frac{\partial}{\partial y} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_y dx dz \right] dy \\ (\Phi_z)_{z+dz} = (\Phi_z)_z + \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} dz = (\Phi_z)_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z dx dy \right] dz \end{cases} \quad (b)$$

对于微元体, 按照能量守恒定律, 在任一时间间隔内有以下平衡关系:

$$\begin{aligned} \text{导入微元体的总热流量} + \text{微元体内热源的生成热} = & \text{导出微元体的总热流量} + \\ & \text{微元体热力能(即内能)的增量} \end{aligned} \quad (c)$$

其中, 其他两项的表达式为

$$\text{微源体热力学的增量} = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz \quad (d)$$

$$\text{微源体内热源的生成热} = \dot{\Phi} dx dy dz \quad (e)$$

式中, ρ 、 c 、 Φ 及 τ 分别为微元体的密度、比热容、单位时间内单位体积中内热源的生成热及时间。

将式 (a)、(b)、(d) 及 (e) 代入 (c) 中, 经整理得

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1-6)$$

这是笛卡儿坐标系 (Cartesian coordinates) 中三维非稳态导热方程的一般形式, 其中 ρ 、 c 、 λ 及 Φ 均可以是变量。现在针对一系列具体情形来导出式 (1-6) 的相应简化形式。

(1) 若导热系数为常数, 此时式 (1-6) 化为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c} \quad (1-7)$$

式中, $a = \lambda / (\rho c)$ 称为热扩散率或热扩散系数。

(2) 若导热系数为常数、无内热源, 此时式 (1-7) 可改写为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1-8)$$

这就是常物性、无内热源的三维非稳态导热微分方程。

(3) 若常物性、稳态, 此时式 (1-8) 可改写为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\dot{\Phi}}{\lambda} = 0 \quad (1-9)$$

数学上, 式 (1-9) 称为泊松 (Poisson) 方程, 是常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程式。

(4) 若常物性、无内热源、稳态, 这时式 (1-6) 简化成为拉普拉斯 (Laplace) 方程:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1-10)$$

2. 对流换热过程

流体与固体壁面直接接触时所发生的热量传递过程, 称为对流换热, 它的基本计算公式为牛顿冷却公式:

$$q = h(t_w - t_f) \quad (1-11)$$

对流换热可为强迫对流, 又可为自然对流, 还可以是二者并存的混合对流, 同时包括液体沸腾、蒸发及蒸汽凝结等相变换热。

对流换热微分方程式: 设壁面 x 处的局部表面传热系数为 h_x , 则

$$q_x = h_x(t_w - t_f)_x = h_x g \Delta t_x \quad (1-12)$$

式 (1-12) 称为对流换热过程微分方程式。根据不同的换热边界条件确定流体的温度场、温度梯度 $\left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{w,x}$ 即为分析求解和数值求解的目的。对流换热问题的边界条件有两类: 第一类为壁面边界条件, 即壁温已知, 待求的是壁面法向流体的温度梯度 $\left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_w$;

第二类为热流边界条件, 即已知壁面热流密度 q 。但无论任何边界条件, 都必须求出流体内温度分布, 即温度场。

自然对流运动微分方程式:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \alpha \Delta t \quad (1-13)$$

3. 辐射换热过程

热辐射依靠物理表面对外发射可见和不可见的射线（电磁波，或者说光子）传递热量。物体表面单位时间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力，用 E 表示，它的单位通常是 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 或 W/m^2 ，其大小与物体表面性质及温度有关。对于黑体，理论和实践证实，它的辐射力 E_b 符合斯蒂芬—玻尔茨曼定律。

1.2.2 基本定律

1. 傅里叶定律

傅里叶定律是导热过程中一个重要的唯象定律，该定律描述通过物体的热流密度 q 与物体内部温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 之间的关系，即

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1-14)$$

式中 λ ——导热系数；

$\frac{\partial T}{\partial x}$ ——沿最大热流密度传递方向 x 的温度梯度；

负号——热量传递的方向，指向温度降低的方向。

当物体的温度是三个坐标的函数时，三个坐标方向上的单位矢量与该方向上热流密度分量的乘积合成一个热流密度矢量，记为 q 。傅里叶定律的一般形式的数学表达式是对热流密度矢量写出的，其形式为

$$q = -\lambda \text{grad}t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (1-15)$$

式中 $\text{grad}t$ ——空间某点的温度梯度；

n ——通过该点的等温线上的法向单位矢量，指向温度升高的方向；

q ——该处的热流密度矢量。

2. 斯蒂芬——玻尔茨曼定律

$$E_b = \sigma_b T^4 = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-16)$$

式中， $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，称为黑体辐射常数； $C_b = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，称为黑体辐射系数。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下黑体辐射力，后者等于

$$E = \epsilon \sigma T^4 = \epsilon C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W}/\text{m}^2 \quad (1-17)$$

式中， ϵ 为实际物体表面的发射率，也称黑度，其值在 $0 \sim 1$ 之间。

1.2.3 物性参数

1. 导热系数

定义为在单位温度降度单位时间内通过单位面积的导热量。

$$\lambda = \frac{QL}{A\Delta T} \quad (1-18)$$

式中 Q ——热流， W/m^2 ；

L ——样本厚度， m ；

ΔT ——温差， K 。

物质的导热系数不但因物质的种类而异，还与物质的温度、压力等因素有关。导热是在温度不同的物体各部分之间进行，所以温度的影响尤为重要。许多工程材料在一定温度范围内，导热系数可以认为是温度的线性函数，即

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \tag{1-19}$$

式中 λ_0 ——某个参考温度的导热系数；

b ——由实验确定的常数。

不同物质导热系数的差异是由于物质构造上的差别以及导热的机理不同所致。为了更全面地了解各种因素，下面分别对气体、液体和固体的导热系数分情况分析讨论。

(1) 气体的导热系数

气体的导热系数的数值在 $0.006 \sim 0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 范围内。气体的导热是由于分子的热运动和相互碰撞时所发生的能量传递。根据气体分子运动理论，在常温常压下，气体的导热系数可以表示为：

$$\lambda = \frac{1}{3} \bar{u} l \rho c_v \tag{1-20}$$

式中 $\bar{u}$ ——气体分子运动的平均速度；

l ——气体分子在两次碰撞间的平均自由行程；

ρ ——气体的密度；

c_v ——气体的定容比热容。

当气体的压力升高时，气体的密度也增大，自由行程 l 则减少，而乘积 ρl 保持常数。因而，除非压力很低（小于 $2.67 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ ）或压力很高（大于 $2.67 \times 10^{-3} \text{ MPa}$ ），可以认为气体的导热系数不随压力发生变化。

图 1-2 给出了几种气体的导热系数随温度变化的实测数据。由图可知，气体的导热系数随温度的升高而增大，这是因为气体分子运动的平均速度和定容比热容均随温度的升高而增大所致。气体中氢和氦的导热系数远高于其他气体，大 4~9 倍，参见图 1-3，这一点可以从它们的分子质量很小，因而有较高的平均速度得到解释。在常温下，空气的导热系数约为 $0.025 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，房屋双层玻璃窗中的空气夹层，就是利用空气的低导热性能起到减小散热的作用。

混合气体的导热系数不能像比热容那样简单地用部分求和的方法来确定，科学家们提出了若干种计算方案，但归根结底，必须用实验方法确定。

(2) 液体的导热系数

液体的导热系数的数值在 $0.77 \sim$

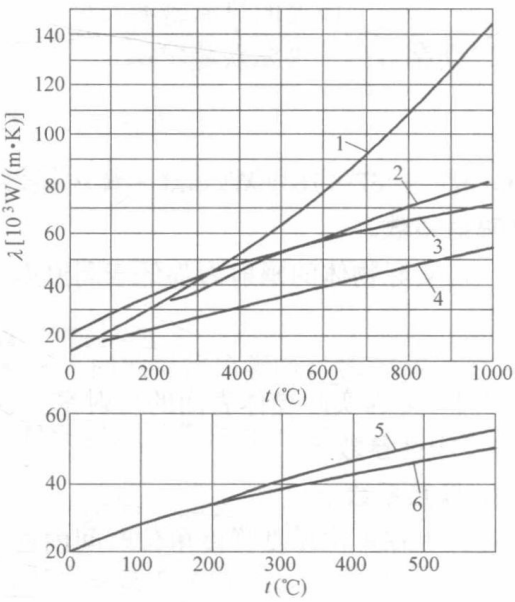


图 1-2 气体的导热系数
1—水蒸气；2—二氧化碳；3—空气；
4—氩；5—氧；6—氮

0.7W/(m·K) 范围内。液体的导热主要是依靠晶格的振动来实现。应用这一概念来解释不同液体的实验数据，其中大多数都得到了很好的证实，据此得到液体的导热系数的经验公式：

$$\lambda = A \frac{c_p \rho^{\frac{4}{3}}}{M^{\frac{1}{3}}} \tag{1-21}$$

式中 c_p ——液体的定压比热容；
 ρ ——液体的密度；
 M ——液体的分子量。

系数 A 与晶格振动在液体中传播速度成正比，它与液体的性质无关，但与温度有关。

一般情况下可认为 $A c_p \approx \text{const}$ 。对于非缔合液体或弱缔合液体，其分子量是不变的，由式 (1-21) 可以看出，当温度升高时，由于液体密度的减小，导热系数是下降的。对于强缔合液体，例如水和甘油等，它们的分子量是变化的，而且随温度而变化。因此，在不同的温度时，它们的导热系数随温度变化的规律是不一样的。图 1-4 给出了一些液体导热系数随温度的变化。

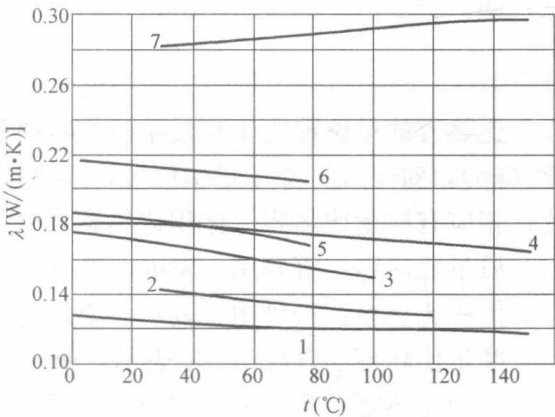
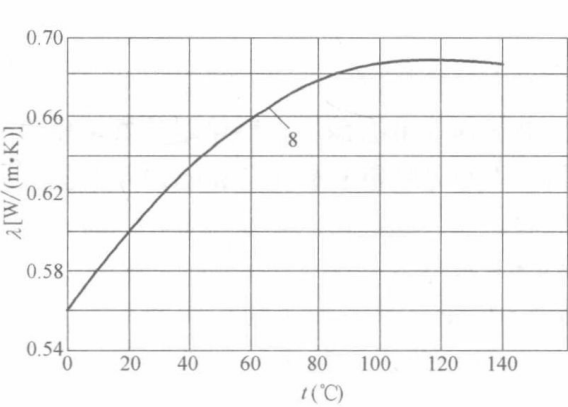


图 1-4 液体的导热系数

1—凡士林油；2—苯；3—丙酮；4—蓖麻油；5—乙醇；6—甲醛；7—甘油；8—水

(3) 固体多孔材料导热系数

在多孔材料中，填充孔隙的气体，例如空气，具有低的导热系数，所以良好的保温材料都是孔隙多，相应体积质量（习惯上简称“密度”）轻的材料。根据这一特点，除了利用天然材料，例如石棉等外，还可以人为地增加材料的孔隙，以提高保温能力，例如微孔硅酸钙、泡沫塑料和加气混凝土等。但是，密度低到一定程度后，小的孔隙连成沟道或者孔隙较大，这时引起孔隙内的空气对流作用加强，反而会使表观导热系数升高。

多孔材料的导热系数受湿度的影响很大。由于水分的渗入，替代了相当一部分空气，而且更主要的是水分将从高温区向低温区迁移进而传递能量。因此，湿材料的导热系数比干材料和水都要大。例如，干砖的导热系数为 0.35W/(m·K)，水的导热系数 0.6W/(m·K)，而湿砖的导热系数可高达 1.0W/(m·K) 左右。所以对建筑的围护结

构，特别是冷、热设备的保温层，都应采取防潮措施。

前已述及，分析材料的导热性能时，还应区分各向同性材料和各向异性材料。例如木材，沿不同方向的导热系数是不同的，木材沿纤维方向导热系数的数值可比垂直纤维方向的数值高一倍，这种材料称为各向异性材料。用纤维、树脂等增强、粘合的复合材料也是各向异性材料。本书在以后的分析讨论中，都只限于各向同性材料。

导热系数不但因物质的种类而异，还和温度、湿度等有关。建筑材料的导热系数随温度的升高而增加，随含湿量的升高而降低。温度对建筑材料的导热系数影响较小，可忽略该影响；而含湿量对导热系数的影响则很明显。建筑材料的导热系数与含湿量之间的关系为：

$$\lambda(w) = \lambda_w + (\lambda_d - \lambda_w) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}} \quad (1-22)$$

式中 λ_w ——湿材料的导热系数，W/(m·K)；

λ_d ——干材料的导热系数，W/(m·K)；

w_{sat} ——材料的饱和含湿量，kg/m³；

w ——材料含湿量，kg/m³。

2. 比热容

比热容的定义为：单位物质的物量，温度升高或降低 1K (1℃) 所吸收或放出的热量，即

$$c = \frac{\delta q}{\delta T} \quad (1-23)$$

比热容的单位取决于热量单位和物体单位。对固体、液态而言，物量单位常用质量单位 (kg)，对于气体除质量单位外，还常用标准体积 (m³) 和千摩尔 (kmol) 作单位。因此，相应应有质量比热容、体积比热容和摩尔比热容。

质量比热容：符号用 c 表示，单位为 kJ/(kg·K)；

体积比热容：符号用 c' 表示，单位为 kJ/(m³·K)；

摩尔比热容：符号用 Mc 表示，单位为 kJ/(kmol·K)。

三种比热容的换算关系如下：

$$c' = \frac{Mc}{22.4} = c\rho_0 \quad (1-24)$$

式中 ρ_0 ——气体在标准状态下的密度，kg/m³；

M ——气体的 kmol 质量 (数量等于分子量)，kJ/kmol。

比热容是重要的物性参数，它不仅取决于物质的性质，还与气体的热力过程及所处状态有关。

3. 热扩散率

热扩散率的定义：

$$\alpha = \lambda / (\rho c) \quad (1-25)$$

在物体受热升温的非稳态导热过程中，进入物体的热量沿途不断地被吸收而使当地温度升高，此过程持续到物体内部各点温度全部扯平为止。以物体受热升温的情况为例来分析，可知：

(1) 分子 λ 是物体的导热系数， λ 越大，在相同的温度梯度下可以传导更多的热量。