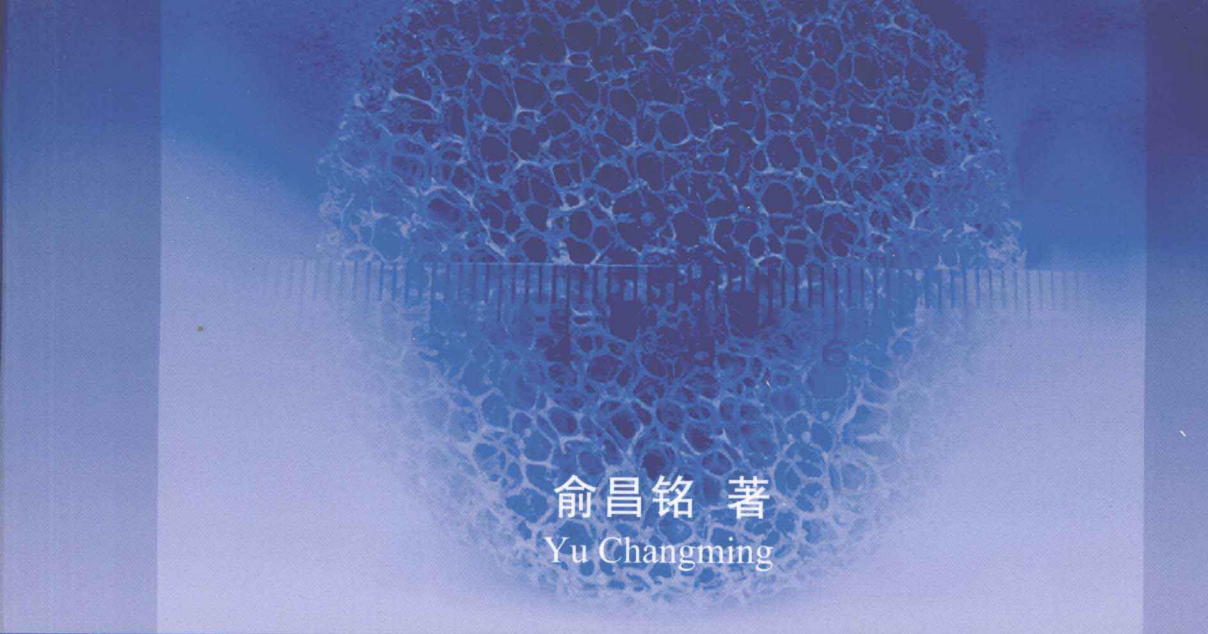




俞昌铭 著
Yu Changming

多孔材料传热传质 及其数值分析

**Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer for Porous Materials
(A Theory of Drying)**

清华大学出版社

俞昌铭 著

Yu Changming

多孔材料传热传质 及其数值分析

**Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer for Porous Materials
(A Theory of Drying)**

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书以木材、谷物、化工及建筑材料干燥原理为工程背景,将材料科学、工程热物理、计算机技术三者有机结合。全书共6章。第1章概述,介绍多孔材料分类,多孔材料传热传质数值分析的历史、研究内容与研究方法;第2章为固体材料加热;第3章静止水加热及表面蒸发。前3章是多孔材料在热环境中被加热与干燥的理论基础。第4章为固气多孔材料加热及渗流,结合闭孔材料介绍等效导热系数,以达西定律为基础介绍等温与非等温渗流;第5章为含水非吸湿性多孔材料加热及水分迁移,介绍液体表面性质及毛细管现象,液相水(自由水)在多孔材料内的渗流与扩散;第6章为含水吸湿性多孔材料加热及水分迁移,介绍固体表面吸附现象,环境湿空气相对湿度与材料平衡含水率的等温吸附线,以及木材干燥基本原理。全书每一章节都在分析讲解之后给出算例,显示算例结果,详尽解释结果的物理含义,以便帮助读者掌握求解同类问题的方法并用以解决实际问题。

本书适合高等院校的材料科学、能源动力、农业、建筑、机械、化工、环境保护及航空航天类专业高年级本科生及研究生教学用书,也可供科研单位与工矿企业科技人员自学和参考使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

多孔材料传热传质及其数值分析/俞昌铭著. --北京:清华大学出版社, 2011.6
ISBN 978-7-302-25666-3

I. ①多… II. ①俞… III. ①多孔性材料—传热传质学—研究 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 102847 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×240

印 张:23

字 数:432 千字

版 次:2011 年 6 月第 1 版

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.00 元

产品编号:041427-01

序

当前我们面临的是世界性能源短缺的时代。各种能源的利用约有 80% 需经历热量或质量的传递过程，而与多孔材料中传热传质过程密切相关的建材、干燥等行业则属于高耗能工业，因此，深入理解和优化多孔材料中传热传质过程对我国的节能减排有重要意义。

《多孔材料传热传质及其数值分析》是作者俞昌铭教授近 50 年来在国内外从事教学和科研实践的精心总结，它与现有的有关多孔介质中传热传质过程的书籍的最大不同之处是：后者的研究中更多关心的是孔隙中流体相的行为，重点是流体的流动与传热，而对固相本身的性质以及流体与固体骨架相互影响关注甚少；而在本书讲解的多孔材料（如木材、谷物、动物骨骼等）中，流体也存在于固相内。存在于固相骨架间孔隙内的水称自由水（free water），存在于固相骨架内的水称吸着水（bound water）。由于它们在存在形式与迁移行为方面都有很大区别，相应的数学描述和分析方法就有很大差异。因此，与多孔介质中的传热传质研究相比，多孔材料传热传质研究不仅在理论上更全面和更科学，更重要的是它具有更广泛的工程领域的应用。

本书内容的重要特点是：充分体现了学科的交叉性。多孔材料传热传质数值分析是以多孔材料为研究对象，以传热传质过程为研究内容，以数值分析为研究方法，所以它是材料学科（多孔材料的物理化学性质、孔隙的结构与分布）、工程热物理学科（热量传递与质量迁移规律）和计算机学科（计算方法与程序设计及其应用）三者的有机结合。多孔材料结构的多样性以及其中流体流动和传递现象的复杂性，要求研究复杂结构中传热传质同时存在时的传递规律，因此，这已不仅仅是一般意义上的学科交叉，而是通过学科交叉促进了工程热物理学科的发展。

本书便于读者自学和易于掌握。章节的安排不仅遵循由浅入深、循序渐进的认识规律，而且把多孔材料传热传质这种综合复杂现象以及相应数学求解中的难点进行了分解，并将其分散到各个章节中予以解决。本书没有大量引述文献以及介绍相关的各式各样数学模型，而是针对不同研究对象，从基本现象出发，

构建物理模型，建立数值求解数学模型，最后以实例显示结果来认识 and 解决问题。本书所讲解的过程是一个没有脱节和没有跳跃的完整过程。还需要强调的是，本书内容安排中还隐含着严密的逻辑性。例如，第2章（固体材料加热）和第3章（静止水加热及表面蒸发）不是一般基础知识介绍，它们是理解第6章（含水吸湿性多孔材料加热及水分迁移）综合现象所必须具备的知识内容，具有很好的针对性。又如第4章和第5章是第6章提炼出来的基本现象，这样的编排使全书成为各部分互相支撑又具有层次性的统一体。这样的写作风格继承和发展了王补宣先生1981年为俞昌铭教授的著作《热传导及其数值分析》一书作序中所述的“内容精练，注意思维逻辑，突出分析问题的基本思路”。

《多孔材料传热传质及其数值分析》为材料学科的高校师生与科研、企业科技人员提供了一本教学和科研参考用书。我相信，对于不同专业的读者会有不同方面的收获，粗读和细读会有不同程度的收获，读一遍和读多遍会有不同层次的收获，但是有一点相同，那就是：只要你读，就一定有收获。

过增元

2011年1月于清华大学

前

言

《多孔材料传热传质及其数值分析》(Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer for Porous Materials) 主要以如下三个学科作为基础,或者说,它植根于这三个学科的集合处。

第一,材料科学。多孔材料是固体材料大家庭中的重要成员。由于多孔材料中存在孔隙,使其与一般固体材料有重要区别。多孔材料中诸多因素,如固相骨架的化学组成及物理性质、孔隙的结构及孔隙率的分布、孔隙内流体相所处状态,以及这些因素在材料加工过程中的变化都直接影响材料的宏观性质及材料成为成品后的质量。本书将以泡沫塑料、砂土、木材(自然材料或集成复合)等作为典型多孔材(物)料进行分析。其中木材作为一种有机生物多孔材料,无论其固相骨架还是孔隙结构,以及水分存在形式都较为复杂,因此,对它的分析实际上涵盖了广泛的多孔材料。

第二,工程热物理学。多孔材料无论其处于原始状态还是被加工或使用过程中,无论是其内部还是它与环境之间总是伴随着热量传递与质量(如水、水蒸气、空气等)迁移等综合现象。对这种综合现象的研究涉及工程热物理领域诸多分支学科。材料内部的热传导、孔隙间流体渗流的热对流、液相水蒸发与气相水蒸气凝结的相变传热等属于传热学范畴;材料内部及材料与环境之间的水、水蒸气以及空气质量扩散与对流属于流体力学与传质学范畴;材料内气体状态变化以及材料内含水率与环境空气相对湿度相平衡的关系属于工程热力学范畴。

第三,计算机科学。包括针对不同实际问题建立物理数学模型及相应差分方程、数值计算方法的选取、用 FORTRAN 等计算机语言进行源程序编写。

总之,《多孔材料传热传质及其数值分析》是一本以多孔材料为研究对象,以传热传质为研究内容,以数值分析为研究方法三者有机结合起来的教学用书,其内容构成了各类多孔材料热加工工艺的理论基础。

本书在内容安排及编写体例上,注重如下要点:

(1) 便于读者自学。把相当综合与复杂的多孔材料传热传质现象以及相应数学上的难点,进行分解,使学习上的疑难点分散到不同章节。

(2) 章节的安排遵循由浅入深, 由易及难, 循序渐进的认识规律。

(3) 全书侧重于对物理现象机制的分析及紧密相扣的数学描述以及数学问题的求解。叙述物理现象时力求表达成数学形式, 介绍数学公式时力求阐明其物理含义。

(4) 结合工程背景, 内容与体系可视为各类含湿多孔材料干燥工艺的理论基础, 也是多孔材料热压加工工艺理论基础。

(5) 侧重于上述三个学科的结合, 而对其中每一学科不作过于深入的探讨。

全书共设 6 章。

第 1 章, 概述。介绍“多孔材料传热传质数值分析”的历史与现状; 阐述其研究对象、内容与方法。

第 2 章~第 6 章, 从分散的单一现象到综合的多种现象, 从材料结构比较简单到复杂, 由简及繁进行介绍。

第 2 章讨论密实固体中单纯的热传导现象。介绍热传导规律, 建立相应的数学模型。模型只包含一个因变量(温度), 对应一个控制方程(导热微分方程)。介绍求解导热问题偏微分方程的数值方法。密实的固体材料可理解为多孔材料的一种极端情形, 孔隙率为 0, 没有流体相, 只有固相。

第 3 章讨论静止水加热与水表面蒸发。介绍湿空气状态, 液体表面传热传质现象, 建立反映液相水响应数学模型。模型包含 2 个因变量(水的温度与质量), 2 个控制方程。介绍了求解常微分方程组的数值方法。静止的水可理解为多孔材料的另一种极端情形, 固相占有率为 0, 没有固相, 只有流体相。

下面三章是上述两章两个极端情形之间的中间情形, 即固体与孔隙共存, 固相与流体相共存。

第 4 章讨论固-气共存多孔材料的加热。连续固相骨架间的孔隙中只存在某一气体(如干空气)。介绍气体的渗流规律, 气体等温与非等温渗流模型。模型包括 5 个因变量(材料温度与密度, 气体密度、压力及速度)及 5 个控制方程。介绍多个因变量相互耦合方程组的数值求解方法。其中以泡沫塑料、干木材为例, 介绍等效导热系数法等简化模型。

第 5 章讨论含水非吸湿性多孔材料的加热与水分迁移, 其中固相骨架不含水, 而液相的水由于毛细管力作用可自由地停留在材料内任意一个孔隙。在加热过程中多孔材料内部固-液(水)-气(水蒸气和空气)三相发生温度变化及水分迁移。这里涉及多孔材料内水的渗流与蒸发, 孔隙内水蒸气与空气相互扩散等现象。分别建立了零维、一维扩散及一维扩散-蒸发模型。以砂土干燥为例, 介绍了这类材料的传热传质行为。

第6章讨论吸湿性含水多孔材料的加热与水分迁移。自由水贮存在固相骨架的孔隙中,吸着水贮存于固相骨架内,孔隙内有液相水、气相水蒸气及空气。孔隙内的水蒸气密度与固相骨架内吸着水的含量及温度之间有确定关系(等温吸附线)。以木材干燥为例,介绍了这类材料的传热传质行为。同样的方法完全可以,而且应该移植到诸如谷物、棉籽、烟叶、食品及一些化工材料的干燥过程。

作者衷心感谢天津大学赵镇南教授与北京科技大学张欣欣教授对书稿的审阅,两位教授的宝贵意见对提高本书的质量大有裨益。

本书的出版得到了“洛伊教育基金”、“赛迪教育基金”、“凤凰教育基金”、“威仕炉教育基金”和“思能教育基金”的大力支持,在此表示衷心的感谢。

存在于自然界与广泛工程领域的多孔材料传热传质现象是极其复杂的。对这一复杂现象的认识,其中很多方面在学术界尚有不同见解,或者说,学科的发展正处于不断成熟的阶段,加之作者水平所限,书中不妥或错误在所难免,欢迎读者不吝指正。

作者联系方式: yuchangming1937@yahoo.cn。

俞昌铭

2010年12月于北京

主要符号表

英文字母符号	符号含义与单位
a	热扩散率, m^2/s
A	面积, m^2
A_m	质量比表面积, m^2/g
A_v	体积比表面积, m^2/cm^3
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C	摩尔浓度, kmol/m^3
d	直径, m
D	质扩散率, m^2/s
D_f	分形数
F	力, N
h	对流传热表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 比焓, J/kg
h_m	对流传质表面传质系数, m/s
H	高度, 厚度, m
k	渗透系数; 节点编号
K	渗透率, m^2
L	长度, m
M	摩尔质量, kg/mol
m	质量, kg
$\dot{m}_s$	表面蒸发率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$\dot{m}_i$	界面蒸发率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$\dot{m}_v$	体积蒸发率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
N	节点(单元)数目
p	压力, Pa
q	热流密度, W/m^2
q_m	质量流密度, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
q_v	体积流量, m^3/s ; 体积释热强度, W/m^3
Q	热流率, 热量释放率, W ; 吸附量, cm^3/g , mol/g
r	半径, 柱、球坐标中矢径长, m
R	热阻, $^\circ\text{C}/\text{W}$; 面积热阻, $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}$; 摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
S_i	液相水饱和度
t	摄氏温度, $^\circ\text{C}$
T	热力学温度, K
u	速度(x 方向), m/s
U	电位, V

v	速度(y 方向), m/s ; 比体积, m^3/kg
V	体积, m^3
$\dot{V}_a$	吸附速率, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$\dot{V}_d$	解吸速率, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
w	速度(z 方向), m/s ;
W	宽度, m ; 含水率, kg/kg ; 功, J
W^*	相对含水率
W_e	平衡含水率
x	直角坐标
y	直角坐标
z	直角坐标

希腊字母符号

符号含义与单位

δ	厚度, m
γ	汽化潜热, J/kg
η	动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
ϕ	孔隙率
ϕ_a	面孔隙率
ϕ_v	体孔隙率
φ	相对湿度; 相对压力
λ	导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ν	运动粘度(动量扩散率), m^2/s
θ	无量纲过余温度; 接触角, rad
ρ	密度, kg/m^3 ; 容积密度, kg/m^3
σ	表面张力, N/m
τ	时间, s
τ_c	时间常数, s
τ_s	表面剪应力, Pa
ω	比湿度, kg/kg

相似特征数

特征数名称与表达式

Bi	毕渥数, hL/λ
Fo	傅里叶数, $a\tau/L^2$
Le	路易斯数, a/D
Nu	努塞尔数, hL/λ
Pr	普朗特数, ν/a
Re	雷诺数, uL/ν
Sc	斯密特数, ν/D
Sh	舍伍德数, $h_m L/D$

顶标	顶标含义
•	单位时间的
—	平均
上角标	上角标含义
n	前一时刻
$n+1$	当前时刻
* (或 * *)	有效的, 相当的, 无量纲
下角标	下角标含义
a	空气的; 面积的
ab	气体 a 对气体 b
as	空气对固体
c	临界的; 弯曲的
cond	导热的
conv	对流的
d	以直径为特征的; 干的; 露点
dry	干球的
e	环境的; 有效的, 相当的; 平衡的
fsp	纤维饱和点
g	气体
i	内部界面
l	液体; 液相水
m	质量; 平均
L	纵向的
p	平板; 平面; 粒子
re	表征
s	固体; 表面; 饱和; 固相
sa	固-气交界面; 固体与空气
sv	饱和水蒸气
T	横向的
v	水蒸气; 体积
va	水蒸气对空气
vs	水蒸气对固体
wet	湿球的
ϕ	孔隙的
0	初始的

目

录

第 1 章 概述	1
1.1 多孔材料的定义与分类	1
1.1.1 多孔固体、多孔介质、多孔材料及复合材料	1
1.1.2 多孔材料分类及典型多孔材料	4
1.1.3 多孔材料中几个常用物理量	8
1.2 多孔材料传热传质研究的内容与范围	16
1.2.1 热传导	16
1.2.2 渗流、热对流与对流传热	17
1.2.3 质扩散与对流传质	18
1.2.4 材料内水蒸气凝结与液相水蒸发	19
1.2.5 毛细管现象与吸附现象	19
1.2.6 液相水与水蒸气的热力学平衡与非平衡	20
1.3 多孔材料传热传质问题的数值研究方法	23
1.3.1 实际问题模型化	23
1.3.2 物理模型基础上的数学模型	24
1.3.3 求解数学模型	25
1.3.4 求解结果显示	26
1.3.5 应用举例	27
习题	31
参考文献	33
第 2 章 固体材料加热	34
2.1 温度场与傅里叶定律	35
2.1.1 温度场与温度梯度	35
2.1.2 热流密度向量	38
2.1.3 傅里叶定律	40

2.1.4	导热系数与热扩散率	41
2.2	导热定解问题的建立与求解	42
2.2.1	导热方程推导	43
2.2.2	定解条件	49
2.2.3	求解导热问题的方法	52
2.3	一维非稳态导热问题精确分析解	54
2.3.1	第一类边界条件	55
2.3.2	第三类边界条件	61
2.3.3	第二类边界条件	63
2.3.4	算例	63
2.4	一维非稳态导热问题数值解	66
2.4.1	用差商代替微商建立差分方程	66
2.4.2	用控制单元建立差分方程	69
2.4.3	差分方程的求解	71
2.4.4	算例	76
2.5	平板加热三维导热问题	79
2.5.1	偏微分方程形式	80
2.5.2	差分方程形式	81
2.5.3	算例	87
习题		91
参考文献		92
第3章	静止水加热及表面蒸发	94
3.1	环境空气的湿度	95
3.1.1	湿空气	95
3.1.2	湿空气状态参数	97
3.1.3	干球温度、湿球温度及空气湿度	102
3.2	水面上的边界层及表面对流传热、传质系数	104
3.2.1	速度、温度及水蒸气密度边界层	105
3.2.2	空气流对水表面的表面传热系数	109
3.2.3	水表面对空气流的表面传质系数	113
3.3	物理数学模型	117
3.3.1	物理模型	117
3.3.2	数学模型 1——移动边界偏微分方程定解问题	120

3.3.3	数学模型 2——常微分方程组初值问题	123
3.3.4	数学模型 3——代数方程	125
3.4	数学模型的数值求解	125
3.4.1	数值求解移动边界偏微分方程定解问题	126
3.4.2	数值求解常微分方程组初值问题	131
3.4.3	数值求解代数方程	133
3.5	算例	134
3.5.1	已知条件	134
3.5.2	预测的主要结果	134
3.5.3	预测结果讨论	136
3.6	空气干球温度、湿球温度及流动速度的影响	138
3.6.1	空气干球温度、湿球温度及流动速度对其他定解条件 的影响	138
3.6.2	空气干球温度对水的热响应的影响	140
3.6.3	空气湿球温度对水的热响应的影响	143
3.6.4	空气流动速度对水的热响应的影响	147
3.6.5	算例汇总	149
	习题	150
	参考文献	151
第 4 章	固气多孔材料加热及渗流	153
4.1	达西定律与渗透率	154
4.1.1	达西定律	154
4.1.2	渗透率	157
4.2	守恒方程及其封闭性	159
4.2.1	质量守恒方程	160
4.2.2	能量守恒方程	162
4.2.3	动量方程与气体状态方程	164
4.2.4	方程组的封闭性	164
4.3	封闭孔隙多孔材料加热	165
4.3.1	等效导热系数与分形理论	166
4.3.2	一维封闭孔隙多孔材料平板加热	178
4.4	气体等温渗流	181
4.4.1	一维稳态等温渗流	181

4.4.2	一维非稳态等温渗流	182
4.4.3	二维非稳态等温渗流	188
4.5	固气多孔材料热板加热	193
4.5.1	控制方程及定解条件	194
4.5.2	差分方程	195
4.5.3	算例及计算结果讨论	204
4.6	固气多孔材料空气流加热	215
4.6.1	控制方程及定解条件	216
4.6.2	差分方程	217
4.6.3	算例及计算结果讨论	219
	习题	222
	参考文献	224
第5章	含水非吸湿性多孔材料加热及水分迁移	226
5.1	液相水的表面性质	227
5.1.1	表面张力与表面能	227
5.1.2	液相水其他表面现象	229
5.1.3	多孔材料内毛细管力分布及水的迁移	235
5.2	质(量)扩散及质(量)扩散方程	237
5.2.1	质扩散与费克定律	237
5.2.2	质量守恒与质扩散方程	240
5.2.3	多孔材料中质扩散	240
5.3	集总参数模型及数值分析	245
5.3.1	物理模型	245
5.3.2	数学模型	247
5.3.3	差分方程	253
5.3.4	算例及计算结果讨论	255
5.4	一维扩散模型及数值分析	258
5.4.1	物理模型	258
5.4.2	数学模型	259
5.4.3	差分方程	263
5.4.4	算例及计算结果讨论	265
5.5	一维扩散-蒸发模型及数值分析	268
5.5.1	物理模型	268

5.5.2 数学模型.....	269
5.5.3 差分方程.....	275
5.5.4 算例及计算结果讨论.....	280
5.6 三种模型小结	288
习题.....	291
参考文献.....	292
第 6 章 含水吸湿性多孔材料加热及水分迁移.....	294
6.1 固体表面性质及等温吸附线	295
6.1.1 等温吸附线.....	295
6.1.2 等温吸附线机理解释.....	298
6.1.3 等温吸附线数学描述.....	304
6.2 吸着水迁移机理及数学描述	309
6.2.1 吸着水迁移的物理解释.....	309
6.2.2 吸着水迁移的数学描述.....	312
6.3 吸湿性多孔材料干燥原理及数值分析	315
6.3.1 物理模型.....	316
6.3.2 数学模型.....	318
6.3.3 差分方程.....	325
6.3.4 算例及计算结果讨论.....	331
习题.....	342
参考文献.....	343
后记 1	345
后记 2	347

第 1 章

Chapter

概 述

众所周知,在大千固态物质世界中,多孔性固体可谓无所不在。大到自然界的土壤、岩石、树木,小到人们日常生活中的食品、衣服、纸张、家具。工程材料中更是比比皆是。以传统建筑结构材料为例,钢结构、木结构及混凝土结构是人们熟知的三大建筑结构。21 世纪初,全球每年钢的产量约 10 亿 t,木材的产量与之相当,混凝土(水泥)产量约 30 余亿 t。木材与混凝土均属多孔材料。这样,在强度结构材料中,多孔性材料占 70% 以上。此外,作为建筑材料的砖、瓦等也是多孔性材料。在其他领域诸多新型工程材料中,如用于消音隔热的泡沫塑料、作为化工材料的催化剂、用于环保的吸附剂、航空航天器件中众多复合材料等都属于多孔材料。总之,多孔性材料广泛存在于自然界、工程界及人们日常生活之中。因此,对它们在不同条件下的行为,包括传热传质行为,进行了解、认识与研究越来越受到人们的关注。从 20 世纪 60 年代起,就有不少关于多孔性固体传热传质的专著相继问世,其中 Liukov 与 Whitaker 的工作最具代表性^[1-4]。在我国,近 20 年来,相关内容已反映在供研究生使用的传热传质教学用书中^[5],专业著作^[6,7]也陆续出版。

本章将概述“多孔材料传热传质及其数值分析”的研究对象、研究内容及研究方法。

1.1 多孔材料的定义与分类

1.1.1 多孔固体、多孔介质、多孔材料及复合材料

含有大量孔隙的固体为多孔固体。在多孔固体的孔隙中大都存在流体(液体与(或)气体),因此,多孔固体实际上是固体与流体的多相混合物,或者说,是固体骨架与流体的多相混合物。在不同应用场合,多孔固体又被称为多孔物体、多孔物料、多孔材料或多孔介质。

为了说明上述这些学术名称在含义上的相同处与某些差异以及它们的由来,需以追溯这一研究领域的历史作为切入点。