

多孔介质 传热传质理论与应用

刘伟 范爱武 黄晓明 著



科学出版社

www.sciencep.com

多孔介质传热传质理论与应用

刘 伟 范爱武 黄晓明 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

多孔介质中质量、动量及能量的传递现象遍及于自然现象和工农业生产许多领域,有着广泛的应用背景。本书内容包括饱和、非饱和多孔介质的理论分析和数学模型,裸露土壤及含植物土壤中热量与物质的迁移,土壤盐渍化的机理、预报和实验,多孔介质分形的研究进展,以及多孔介质理论在建筑节能、太阳温室、多孔填料、航天器热控制、CO₂ 吸附、对流干燥、生物传热、太阳能热气流发电等领域的应用。

本书体系完整、内容全面,可供能源、动力、化工、材料、物理、电子、农业等领域的科技人员参考,也可作为大专院校有关专业研究生的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

多孔介质传热传质理论与应用 / 刘伟, 范爱武, 黄晓明著. —北京: 科学出版社, 2006

ISBN 978-7-03-018319-4

I. 多… I. ①刘…②范…③黄… II. 多孔介质—传热传质学
IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 012458 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 刘彦妮

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2006 年 12 月第一次印刷 印张: 27 1/4

印数: 1—2 500 字数: 620 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(新欣))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BZ08)

前 言

自然现象、生命现象和诸多生产领域中涉及的多孔介质传热与流动问题十分复杂,尤其是多孔介质中的相变传热与流动问题,涉及工程热物理学科与其他多个学科的广泛交叉,因此精确描述和揭示多孔介质中能量、动量和质量的传输机理和规律十分困难。国内外研究以无相变的饱和多孔介质问题居多,对非饱和多孔介质中相变传热与流动的研究较少。迄今为止,国内尚缺少上述领域的研究专著,也没有较为合适的本科和研究生教材。

自20世纪80年代以来,本书的第一著者一直从事多孔介质传热传质的课题研究,并为博士和硕士研究生讲授“多孔介质传热与流动”课程,而且近年来,为了总结教学和研究工作,在不断完善课程讲义的基础上,一直在进行本书的撰写工作。尽管本书定稿已值2006年秋,但终于完成了系统介绍多孔介质传输理论和应用研究进展的夙愿。希望本书的出版能为推动国内多孔介质传热传质方向的教学和研究,尽一点绵薄之力。

关于多孔介质学科方向的课题研究,著者有几点基本的看法。第一,多孔介质自身只是多种物质状态的集合体,但由于其特殊的物理属性和特有的输运性质,以致在不同的应用场合,可以发挥全然不同的作用,因此理论研究要与实际应用相结合,并指导工程和科学实践,这是科学研究的意义所在。第二,多孔介质的应用领域很宽,一些新兴技术也在不断涌现,因此只有以多学科交叉的视角,不断在新的领域拓展新的研究方向,才能获得新的发展和突破,使该学科方向的研究始终充满生机与活力。第三,工程和生产实践中所遇到的多孔介质相变传热与流动的问题往往十分复杂,精确的理论建模和准确的实验模拟都比较困难,因此在研究方法上,要在对传输过程各种物理机制深刻分析的基础上,抓住矛盾的主要方面,忽略次要因素,将过程的主要规律及其内在联系抽象出来进行分析和研究,从而深入认识并揭示各种实际输运现象的物理本质。基于此,著者试图在本书中按照“理论与应用相结合”这一主线,将多年来在教学和研究工作中积累的心得和体会,进行较为系统的归纳和总结,使读者在研究对象、研究内容和研究方法上,对多孔介质传热传质理论及其应用领域,有一个相对完整、系统的认识和了解。

本书第一著者的博士和硕士研究生为本书的完成做出了积极的贡献,他(她)们是范爱武、黄晓明、张浙、赵绪新、陈威、刘炳成、朱光明、杨昆、刘志春、明廷臻、万忠民、陈丽湘、张学伟、盖东兴、申盛、邓芳芳、韩延明、曾海波、金弋、王强等;杨金国老师在多孔介质的实验研究方面提供了大量的帮助和指导,没有他(她)们卓有成效的工作和全力支持,著者也不可能完成本书的撰写工作,在此一并致谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金(58906447;59976010;50376015)、教育部博士点专项基金(2000048731;20040487037)和国家重点基础研究发展计划——“973”计划(G2000026303)的项目资助,其中,关于多孔材料在节能中的应用研究还得到了“973”项目的连续资助(2007CB206901),在此致以诚挚的感谢。正是由于国家对应用基础研究

的支持和鼓励,才促使著者多年来在多孔介质传热传质理论及其应用的科学研究中,不断地追寻和探索,并努力做一些学科交叉、前沿和具有一定创新性的工作。

限于著者的学识和水平,本书难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

刘伟

2006年11月于武昌

主要符号表

英文符号

a	热扩散系数	k_{rl}	液相的相对渗透率
A	形状因子;面积	k_{rg}	汽相的相对渗透率
c	比热容;浓度	L	多孔填料床长度
C_s	土壤溶液的质量浓度	M	分子量
D	土壤水的扩散率	m	内部蒸发率
D_b	边界水导率	N	吸附质的扩散速率
D_l	液体扩散系数	p	压力
D_{lv}	由于含湿量梯度导致的扩散率	p_c	毛细压力
D_{Tv}	由于温度梯度导致的扩散率	Q	热流
D_s	盐分在土壤溶液中的扩散率	q	热流密度
D_v	水蒸气在空气中的扩散率	R	气体常数;各材料层热阻
D_{va}	蒸汽向空气的质扩散系数	RH	大气的相对湿度
D_w	盐分在自由水中的扩散率	R_s	瞬时太阳辐射强度
D^d	有效热弥散系数	s	饱和度
d	直径;混合气体中蒸汽的重量含量	S	材料蓄热系数;源项
g	重力加速度	T	温度
G	太阳辐射强度	t	时间;温度
H	厚度;焓	u	水平方向速度分量
h_m	对流传质系数	v	竖直方向速度分量
h_o	对流传热系数	V	速度矢量
J	有效辐射	$V_{v,d}$	蒸汽扩散的速度矢量
K	液体或气体的传导系数	W_b	血液灌注率
K_F	流体中的传质系数	x, y	水平与竖直坐标
X, Y	无量纲坐标	X	辐射角系数
k	渗透率;湍流脉动动能		

希腊字母

α_s	表面对太阳辐射的吸收系数	μ_t	湍流黏性系数
β	气体的体积膨胀系数	ν	流体的运动黏度;质量流因子

ζ	速度边界层的起始段长度
ε	体积百分比含量;发射率;湍流黏性耗散能
ϕ	多孔介质的孔隙率
γ	水的汽化潜能
η	效率
λ	导热系数
μ	流体的动力黏度

Θ	无量纲温度
ρ	密度
σ	斯特潘-玻尔兹曼常数;介质热容比;表面张力
τ	时间;孔隙迂曲度
ω	相界面运动黏度
ψ	介质的水分势;流函数

上标

~ 无量纲量

下标

a	空气;不凝性气体
g	气体
i	室内或各围护结构面
l	液体*
m	表观平均,质量
o	室外

s	固体,溶质
sky	天空
sun	太阳
	蒸汽
w	液态水;墙面
∞	大气;环境

其他

$\langle \rangle$ 相平均量

$\langle \rangle^a$ 固有相平均量

无量纲准则数

Da	达西数
G	液体重力因子
Gr	格拉晓夫数
Ja	雅各布数
Le	刘易斯数
Nu	努塞尔数

Re	雷诺数
Re_t	湍流雷诺数
Pe	贝克来数
Pr	普朗特数
St	斯坦顿数
Sc	施密特数

* 为与数字1区别,全书下标*l*均为斜体。

目 录

前言

主要符号

第一章 引论	1
§ 1.1 概述	1
1.1.1 多孔介质传输现象的研究概况	1
1.1.2 多孔介质的定义	2
1.1.2.1 定义	2
1.1.2.2 异质及各向异性	3
1.1.2.3 饱和多孔介质与非饱和多孔介质	3
1.1.3 多孔介质热质传输过程研究方法	5
1.1.3.1 基本研究方法	5
1.1.3.2 表征体元	6
§ 1.2 多孔介质的基本参数	7
1.2.1 结构参数	7
1.2.1.1 孔隙率	7
1.2.1.2 比面	7
1.2.1.3 迂曲度	8
1.2.1.4 固体颗粒尺寸	8
1.2.1.5 空隙尺寸	8
1.2.2 基本特性参数	9
1.2.2.1 渗透率	9
1.2.2.2 水力传导系数	10
1.2.2.3 饱和度	10
1.2.2.4 毛细压力	10
1.2.3 基本参数的测量	11
1.2.3.1 孔隙率的测量	11
1.2.3.2 比面的测量	13
1.2.3.3 渗透率的测量	13
1.2.4 孔隙率、渗透率和比面的典型值	14
§ 1.3 多孔介质传热传质过程的表述	15
1.3.1 多孔介质中的传热过程	15
1.3.2 多孔介质中的传质过程	15
§ 1.4 理论建模及求解	16

1.4.1	理论建模的基本过程	17
1.4.2	唯象定律	17
1.4.2.1	基本定律	17
1.4.2.2	唯象律的适用性	19
1.4.2.3	多孔介质各种传递过程的耦合	19
1.4.3	体积平均方法	21
1.4.4	初始条件与边界条件	23
1.4.5	数学模型的简化	23
1.4.5.1	确定无因次量	24
1.4.5.2	方程无因次化	24
1.4.5.3	求解方法	26
	参考文献	27
第二章	多孔介质传热与流动的理论基础	28
§ 2.1	饱和多孔介质传热与流动的控制方程	28
2.1.1	连续方程	28
2.1.2	运动方程	28
2.1.2.1	达西定律	28
2.1.2.2	滑动流动	30
2.1.2.3	达西定律的修正	30
2.1.3	能量方程	32
2.1.3.1	简单流动	32
2.1.3.2	较复杂流动的扩展	32
§ 2.2	非饱和多孔介质传热与流动的控制方程	33
2.2.1	非饱和多孔介质输运模型的发展过程	34
2.2.1.1	梯度驱动模型	34
2.2.1.2	连续介质模型	36
2.2.1.3	混合模型	37
2.2.2	非饱和多孔介质输运机制	38
2.2.2.1	质量传输机制	39
2.2.2.2	热量传输机制	44
2.2.3	非饱和多孔介质传热与流动的数学模型	45
2.2.3.1	连续性方程	46
2.2.3.2	动量方程	47
2.2.3.3	能量方程	49
2.2.4	非饱和多孔介质的物性参数	52
2.2.4.1	平均比热容	52
2.2.4.2	有效渗透率	52
2.2.4.3	水力传导系数和气体传导系数	53

2.2.4.4	有效导热系数	53
2.2.4.5	有效热弥散系数	53
2.2.4.6	温度对物性的影响	54
2.2.5	小结	55
	参考文献	55
第三章	土壤内的热量、湿分和溶质传输过程	59
§ 3.1	土壤水热传输机制	59
3.1.1	土壤内水气运动机制	59
3.1.1.1	水分运动机制	59
3.1.1.2	蒸汽扩散机制	60
3.1.1.3	土壤内气相运动机制	61
3.1.2	土壤内热迁移机制	61
3.1.3	土壤内热、湿迁移的理论模型	61
§ 3.2	土壤内热、湿传递过程的数值计算	63
3.2.1	物理模型	63
3.2.2	边界条件	63
3.2.3	计算结果与分析	64
3.2.3.1	夏天和冬天土壤温度响应的比较	65
3.2.3.2	环境因素对土壤内热湿迁移的动态影响	67
3.2.3.3	小结	71
§ 3.3	湿分分层土壤内的热湿传递过程	71
3.3.1	数学模型	71
3.3.2	计算结果与分析	72
3.3.2.1	湿分分层时土壤床热湿传输的非稳态数值模拟	72
3.3.2.2	湿分分层时土壤床热湿传输的非稳态数值模拟	75
3.3.2.3	土壤床内部水分含量和温度的动态变化	75
3.3.2.4	环境因素对土壤热、湿迁移的动态影响	76
3.3.3	自然条件下土壤热湿迁移及水分蒸发的分层实验	78
3.3.3.1	实验过程	78
3.3.3.2	实验结果与分析	78
3.3.3.3	小结	81
§ 3.4	温度效应对土壤热、湿运动的影响	81
3.4.1	温度效应对土壤湿分及其物性的影响	81
3.4.2	考虑温度效应的土壤热、湿耦合运移的改进模型	82
3.4.3	温度效应影响的计算比较	83
3.4.4	小结	85
§ 3.5	土壤次生盐渍化的机理研究	85
3.5.1	土壤中热量、水分和溶质的耦合运移模型	86

3.5.1.1	土壤中盐分运移的机理	86
3.5.1.2	土壤水、热和溶质耦合运移模型	86
3.5.2	土壤次生盐渍化水盐运动规律的实验研究和数值分析	87
3.5.2.1	地下水埋深和矿化度与土壤积盐的关系	87
3.5.2.2	土壤次生盐渍化之水盐运动规律的实验研究	87
3.5.2.3	土壤次生盐渍化过程中水分和盐分运移的数值模拟	92
3.5.2.4	小结	93
3.5.3	热效应对土壤中盐分输运的影响	94
3.5.3.1	热效应对土壤盐分物性的影响	94
3.5.3.2	考虑温度效应的土壤热量、湿分和盐分耦合运移模型	94
3.5.3.3	土壤盐分运移温度效应的数值分析	94
3.5.3.4	小结	98
3.5.4	地下水水位及矿化度对土壤盐分运移的影响	98
3.5.4.1	数值模拟	98
3.5.4.2	实验模拟	102
3.5.4.3	小结	102
	参考文献	102
第四章	植物覆盖土壤中的热物理现象	105
§ 4.1	REPS 系统中的传输问题	105
4.1.1	土温对植物生长发育的影响	105
4.1.2	土壤水分迁移模型	107
4.1.3	土壤空气状况	107
4.1.4	小结	109
§ 4.2	植物土壤内传热传质过程	109
4.2.1	根系吸水模型	109
4.2.2	作物冠层对土壤表面热通量	112
4.2.3	植物覆盖土壤的热湿耦合迁移模型及数值模拟	114
4.2.3.1	基本假设	114
4.2.3.2	数学模型	114
4.2.3.3	数值计算结果及分析	115
4.2.4	小结	119
§ 4.3	作物生长土壤中热量、湿分和氧气的耦合迁移	119
4.3.1	土壤空气的迁移转化	120
4.3.1.1	土壤空气的融化过程	120
4.3.1.2	土壤空气的更新过程	120
4.3.2	氧气输运方程	121
4.3.3	作物生长土壤中热量、湿分和氧气的耦合迁移模型	122
4.3.4	土壤氧气浓度场的数值模拟	123

4.3.5	小结	124
§ 4.4	植物根系体积占位对土壤热湿迁移的影响	124
4.4.1	根系占位土壤的数学模型	125
4.4.1.1	根系体积百分含量计算公式	125
4.4.1.2	边界条件	125
4.4.2	计算结果与分析	125
4.4.2.1	根系占位和不占位的植物覆盖土壤床内部各场量分布比较	125
4.4.2.2	太阳辐射对含根系土壤床内水分含量场分布的影响	129
4.4.3	小结	130
§ 4.5	基于根系结构的土壤热湿迁移模拟	131
4.5.1	根系动态生长的计算机模拟	131
4.5.2	土壤根系构型模拟软件	132
4.5.2.1	根系生长与分布的数学描述	132
4.5.2.2	根系构型模拟软件	132
4.5.2.3	根系构型模拟软件绘制机理	135
4.5.2.4	根系构型模拟软件框图	136
4.5.2.5	模拟结果	136
4.5.3	基于根系结构的土壤热湿迁移数学模型	140
4.5.4	小结	141
§ 4.6	植物覆盖土壤床实验	141
4.6.1	实验条件和方法	142
4.6.2	实验结果分析	143
4.6.3	小结	147
§ 4.7	植被条件下的土壤盐渍化问题	147
4.7.1	植物生长对土壤盐渍化影响	147
4.7.2	土壤次生盐渍化的防治措施	149
	参考文献	151
第五章	多孔介质在建筑物节能及温室中的应用	155
§ 5.1	多孔介质自由蒸发冷却分析	155
5.1.1	水平多孔填料床的热湿迁移特性	156
5.1.1.1	多孔床结构及数学模型	156
5.1.1.2	计算结果分析	157
5.1.1.3	小结	159
5.1.2	竖置多孔填料床的热湿迁移特性	160
5.1.2.1	数学模型	160
5.1.2.2	计算结果分析	161
5.1.3	多孔床填料性能实验	163
5.1.3.1	风洞实验台设计及系统结构	163

5.1.3.2	实验过程	165
5.1.3.3	实验结果分析	167
5.1.4	小结	172
§ 5.2	一种建筑采暖系统的传热与流动分析	172
5.2.1	基于工质相变循环的太阳能采暖系统	172
5.2.2	简化数学模型	173
5.2.3	计算结果及分析	176
5.2.3.1	流动特性分析	176
5.2.3.2	传热特性分析	178
5.2.4	小结	179
§ 5.3	太阳能温室及其蓄热层中的传热与流动	180
5.3.1	物理模型	180
5.3.2	数学模型	180
5.3.2.1	温室气体的湍流模型	181
5.3.2.2	蓄热层气相饱和和多孔介质模型	184
5.3.2.3	边界条件及初始条件	185
5.3.3	数值计算与结果分析	186
5.3.3.1	温室北墙内表面特性对温室气温和气流分布的影响	186
5.3.3.2	温室顶部倾角变化对温室气温和气流分布的影响	187
5.3.3.3	具有多孔岩床蓄热层温室的顶部倾角变化的影响	187
5.3.4	实验研究	189
5.3.5	小结	191
§ 5.4	被动式太阳能温室-采暖房中对流传热的数值分析	191
5.4.1	数学模型	192
5.4.1.1	太阳能温室-采暖房的热平衡	192
5.4.1.2	太阳能温室-采暖系统数学模型	192
5.4.1.3	多孔蓄热层数学模型	193
5.4.1.4	边界条件及初始条件	194
5.4.2	数值计算与结果分析	194
5.4.2.1	受采暖房北墙影响的计算结果	194
5.4.2.2	受岩床蓄热层影响的计算结果	195
5.4.2.3	实验研究	196
5.4.3	小结	200
§ 5.5	多孔介质复合 Trombe 墙的传热与流动特性	200
5.5.1	Trombe 墙及其改进	200
5.5.2	多孔介质复合 Trombe 墙	201
5.5.2.1	复合 Trombe 墙的热平衡分析	202
5.5.2.2	复合 Trombe 墙的数学模型	204

5.5.3	复合 Trombe 墙的数值计算	206
5.5.3.1	数值计算方法	206
5.5.3.2	结果分析与讨论	207
5.5.4	小结	209
§ 5.6	太阳能多孔集热墙内传热与流动的数值模拟	210
5.6.1	物理模型	210
5.6.2	数学模型	211
5.6.3	数值计算与结果分析	212
5.6.3.1	气体流动速度对温度分布的影响	212
5.6.3.2	多孔材料有效导热系数对温度的影响	213
5.6.3.3	气体和固体骨架间的体积对流换热系数对温度分布的影响	213
5.6.3.4	多孔集热墙厚度对温度分布的影响	214
5.6.4	结论	214
	参考文献	215
第六章	封闭空腔中多孔介质的流动与传热特性	218
§ 6.1	封闭腔含湿多孔介质水分的静态分布特性	218
§ 6.2	高 Da 数下封闭填料床内热湿迁移特性	220
6.2.1	简化模型	221
6.2.2	控制方程	221
6.2.3	计算结果及分析	223
6.2.3.1	非饱和和流动特性分析	223
6.2.3.2	传热特性分析	225
6.2.3.3	壁温及形状比对传热的影响	226
6.2.4	小结	227
§ 6.3	低 Da 数下封闭填料床内热湿迁移特性	227
6.3.1	模型简化	227
6.3.2	无量纲数学模型	228
6.3.3	计算结果与分析	230
6.3.4	小结	232
§ 6.4	封闭腔内非饱和多孔介质稳态自然对流的近似分析解	232
6.4.1	模型简化及推导	233
6.4.2	计算结果比较	237
6.4.3	小结	238
§ 6.5	倾斜矩形腔内非饱和多孔介质热质传输特性研究	238
6.5.1	物理模型及数学描述	239
6.5.2	数值分析及讨论	240
6.5.2.1	对流模式	240
6.5.2.2	传热特征	244

6.5.3 小结	245
§ 6.6 多孔介质中的场协同分析	245
6.6.1 场协同原理	246
6.6.1.1 将对流换热比拟为有内热源的导热问题	246
6.6.1.2 速度场与热流场的配合和协同	246
6.6.1.3 场协同原理的表述	247
6.6.2 多孔介质自然对流的场协同分析	247
6.6.2.1 理论推导	247
6.6.2.2 多孔介质自然对流传热的场协同计算	249
6.6.2.3 小结	250
参考文献	251
第七章 多孔介质理论在航天器热控制技术中的应用	253
§ 7.1 CPL 和 LHP 的研究概况	253
§ 7.2 CPL 蒸发器毛细芯的传热与流动特性	255
7.2.1 蒸发器毛细芯两区-饱和模型	256
7.2.1.1 模型描述	256
7.2.1.2 数值模拟	257
7.2.2 蒸发器毛细芯三区-非饱和模型	260
7.2.2.1 单相区(蒸汽或液体)	260
7.2.2.2 两相区(蒸汽+液体)	261
7.2.2.3 数值模拟	262
7.2.3 场协同原理在蒸发器毛细芯传热强化中的应用	264
7.2.3.1 基于两区-饱和模型的场协同计算	265
7.2.3.2 基于三区-非饱和模型的场协同计算	268
7.2.4 小结	271
§ 7.3 冷凝器毛细芯的传热与流动特性	272
7.3.1 EOF 和 VOF 界面追踪方法	272
7.3.1.1 流体体积函数(VOF)模型	272
7.3.1.2 流体内能函数 EOF 模型	274
7.3.2 冷凝器物理模型	275
7.3.3 VOF 模型用于多孔芯冷凝器换热的数值模拟	276
7.3.3.1 控制方程	276
7.3.3.2 数值计算及结果分析	277
7.3.4 EOF 模型用于多孔芯冷凝器换热的数值模拟	279
7.3.4.1 EOF 模型控制方程	279
7.3.4.2 数值计算及结果分析	281
7.3.5 小结	282
§ 7.4 平面式 CPL 和 LHP 蒸发器的数值模拟	283

7.4.1	蒸发器的物理模型	283
7.4.2	控制方程	283
7.4.3	蒸发器材料对 CPL 传热特性的影响	285
7.4.4	小结	287
§ 7.5	小型平板 CPL 蒸发器预热驱动过程	287
7.5.1	小型平板 CPL 预热启动过程的数学模型	287
7.5.2	计算结果分析	288
7.5.3	小结	292
§ 7.6	CPL 系统的动态仿真	292
7.6.1	系统稳定运行的热力过程分析	292
7.6.2	系统内工质的压力损失	295
7.6.3	单位时间内工质的蒸发量与冷凝量	297
7.6.4	系统热平衡分析	298
7.6.5	CPL 系统仿真模块	299
7.6.5.1	Matlab/Simulink 介绍	299
7.6.5.2	仿真模块构成	299
7.6.5.3	计算步骤与程序流程	311
7.6.6	仿真与实验结果的比较	314
7.6.6.1	热负荷不变运行的仿真结果与实验数据比较	314
7.6.6.2	热负荷变化下运行的仿真结果与实验数据比较	314
7.6.6.3	系统运行极限的仿真预测	316
7.6.7	小结	318
§ 7.7	LHP 系统的动态仿真	319
7.7.1	LHP 系统建模	319
7.7.2	LHP 系统仿真	320
7.7.3	计算步骤与程序流程	321
7.7.4	仿真结果及分析	323
7.7.5	小结	324
	参考文献	326
第八章	分形理论在多孔介质研究中的应用	331
§ 8.1	分形理论中的一些基本概念	332
8.1.1	分形几何的产生	332
8.1.2	分形的定义	333
8.1.3	分维的形式	333
§ 8.2	多孔介质分形模型有关的基本概念	335
8.2.1	表征多孔介质结构的分形参数	335
8.2.2	分形布朗运动	336
8.2.3	逾渗理论和分形结构中的反常扩散	337

8.2.4 分形理论中动力学传输模型	338
§ 8.3 多孔介质物理结构的分形描述	339
8.3.1 Menger 海绵	340
8.3.2 多孔介质孔隙率的分形描述	340
8.3.3 多孔介质比表面积的分形描述	340
§ 8.4 多孔介质渗透率和导热系数的分形研究进展	341
8.4.1 多孔介质导热分形模型	341
8.4.2 多孔介质物质传输分形模型	344
§ 8.5 分形几何在植物根系研究中的应用	355
8.5.1 根系分枝的分形特性	355
8.5.2 土壤剖面上根系参数分布的分形特性	356
8.5.3 根系分形研究的前景展望	358
参考文献	359
第九章 多孔介质传热传质理论的其他应用	362
§ 9.1 CO ₂ 吸附过程的热量和物质传递	362
9.1.1 吸附操作的基本原理	362
9.1.2 吸附过程的质量和热量传递过程	363
9.1.2.1 质量传递过程	363
9.1.2.2 热量传递过程	364
9.1.3 数学模型与数值求解	365
9.1.3.1 计算区域的设置和物理模型	365
9.1.3.2 数学模型	365
9.1.3.3 计算方法与结果	366
9.1.4 小结	368
§ 9.2 利用多孔介质实现管内强化传热	369
9.2.1 管内强化换热	370
9.2.2 管内流动充分发展段热边界层的构造	370
9.2.3 数值计算及结果分析	370
9.2.3.1 理论模型	370
9.2.3.2 数值计算方法	372
9.2.3.3 结果及讨论	372
9.2.4 场协同分析	375
9.2.5 小结	376
§ 9.3 多孔介质对流干燥过程的热质传输	376
9.3.1 多孔介质对流干燥机理描述	376
9.3.2 对流干燥的数学模型	378
9.3.3 计算方法	380
9.3.4 计算结果及讨论	381