

# 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领域的许多领域,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、CO<sub>2</sub> 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 7-03-018319-3

I. 多… II. ①刘…②范…③黄… III. 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>

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 1/2

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〈科印〉)

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	$m^6$	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

$\alpha$	表面对太阳辐射的吸收系数	$\mu$	湍流黏性系数
$\beta$	气体的体积膨胀系数	$\nu$	流体的运动黏度;质量流因子

$\zeta$	速度边界层的起始段长度	$\Theta$	无量纲温度
$\varepsilon$	体积百分比含量;发射率;湍流黏性耗散能	$\rho$	密度
$\phi$	多孔介质的孔隙率	$\sigma$	斯特潘-玻尔兹曼常数;介质热容比;表面张力
$\gamma$	水的汽化潜能	$\tau$	时间;孔隙迂曲度
$\eta$	效率	$\omega$	相界面运动黏度
$\lambda$	导热系数	$\psi$	介质的水分势;流函数
$\mu$	流体的动力黏度		

### 上标

~ 无量纲量

### 下标

a	空气;不凝性气体	s	固体,溶质
g	气体	sky	天空
i	室内或各围护结构面	sun	太阳
l	液体*		蒸汽
m	表观平均,质量	w	液态水;墙面
o	室外	$\infty$	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	$Re$	雷诺数
$G$	液体重力因子	$Re_t$	湍流雷诺数
$Gr$	格拉晓夫数	$Pe$	贝克来数
$Ja$	雅各布数	$Pr$	普朗特数
$Le$	刘易斯数	$St$	斯坦顿数
$Nu$	努塞尔数	$Sc$	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
<b>第二章</b>	<b>多孔介质传热与流动的理论基础</b>	<b>28</b>
§ 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	非饱和多孔介质运输模型的发展过程	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	非饱和多孔介质运输机制	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
<b>第三章</b>	<b>土壤内的热量、湿分和溶质传输过程</b> .....	<b>59</b>
§ 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运输的影响 .....	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
<b>第四章</b>	<b>植物覆盖土壤中的热物理现象 .....</b>	<b>105</b>
§ 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
<b>第五章</b>	<b>多孔介质在建筑物节能及温室中的应用 .....</b>	<b>155</b>
§ 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
<b>第六章</b>	<b>封闭空腔中多孔介质的流动与传热特性</b> .....	<b>218</b>
§ 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
<b>第九章</b>	<b>多孔介质传热传质理论的其他应用 .....</b>	<b>362</b>
§ 9.1	CO <sub>2</sub> 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

9.3.5	小结 .....	382
§ 9.4	生物组织中的热质传输过程 .....	382
9.4.1	生物传热模型的发展 .....	383
9.4.2	人体发汗的热调节机理探索 .....	384
9.4.3	人体肢体隐性发汗及其降温效应 .....	385
9.4.3.1	物理模型 .....	385
9.4.3.2	传热传质数学模型 .....	386
9.4.3.3	汗液的成分组成和热物性参数 .....	389
9.4.3.4	数值求解及其模拟结果 .....	389
9.4.3.5	皮表温度的实验测量 .....	395
9.4.4	人体肢体在显性发汗条件下的降温效应 .....	397
9.4.4.1	显性发汗的传热传质数学模型 .....	397
9.4.4.2	数值计算 .....	398
9.4.5	小结 .....	400
§ 9.5	太阳能热气流发电系统的数值模拟 .....	401
9.5.1	无蓄热层系统的传热与流动特性分析 .....	402
9.5.1.1	物理模型 .....	402
9.5.1.2	集热棚和烟囱内传热与流动数学模型 .....	402
9.5.1.3	边界条件与求解 .....	403
9.5.1.4	计算结果与讨论 .....	403
9.5.2	有蓄热层系统的传热与流动特性分析 .....	405
9.5.2.1	蓄热介质内传热与流动数学模型 .....	405
9.5.2.2	边界条件与求解 .....	406
9.5.2.3	稳态计算结果与分析 .....	407
9.5.2.4	非稳态计算结果与分析 .....	411
9.5.3	具有风机系统的耦合数值模拟方法 .....	413
9.5.3.1	概述 .....	413
9.5.3.2	数学模型与模拟方法 .....	414
9.5.4	小结 .....	415
	参考文献 .....	415

# 第一章 引 论

## § 1.1 概 述

多孔介质中能量、动量和质量的传递现象遍及于工农业生产的各个领域,例如:油气田开采中的渗流问题;地热资源的开发与利用;埋地电缆和直流接地极的热耗散;地源热泵和地冷空调中换热器埋管;保温隔热材料的热物理过程;食品、药材和农产品的对流干燥;各种工业多孔填料中的液分蒸发及毛细抽吸现象;工业废热改良土壤性能及农作物的增产增收;农业生态系统中植物对能量、水分和养分的供求关系;生物技术等。正是由于这些广泛的应用背景,国内外许多学者投入了大量的精力来研究多孔介质中的传输现象,并建立了许多理论模型。从学科发展的前景来看,多孔介质传热传质学已经渗透到许多学科和技术领域,包括农业、能源、冶金、化工、材料、空间科学、环境科学、生命科学和医学,是形成交叉和边缘学科的一个潜在生长点。因此,多孔介质传热传质的理论和应用研究,是一个具有重要学术和应用价值、对学科发展和技术进步具有重大和深远影响的研究方向。

### 1.1.1 多孔介质传输现象的研究概况

对多孔介质传输现象的关注与研究由来已久,最初的研究领域是地下水勘探与预测。早在 1856 年,达西(H. Darcy)曾对法国 Dijon 城的地下水源进行了研究,提出了著名的适用于一定条件下多孔介质中流体流动的达西定律。因此,多孔介质学科是发展较早的科学技术领域之一。但是,在此后一个很长的历史时期内,一直停留在土壤与岩层中水体流动这一类问题上,直到 20 世纪 30 年代,由于石油开采和运输业的迅速崛起,才加速了多孔介质传递科学技术的发展。50 年代前后,许多学者对多孔物料干燥的原理与技术进行了较为全面、系统、深入的研究,使人们对多孔介质传热传质过程的认识与控制达到了一个新的高度。随着能源、化工、冶金、原子能、航空航天、制冷低温、食品加工、生物工程等领域中的技术发展,以及近代工农业生产的技术进步,又提出了大量更为复杂的多孔介质传递过程问题,从而更进一步促进了多孔介质传递科学技术的各种研究,使其成为当今科学技术中令人瞩目的研究热点之一。无论是科学的发展、技术的进步,还是现实的需求,多孔介质学科的形成和发展已成为了必然。

关于多孔介质传输现象的研究,具有如下特点:

(1) 多孔介质传输问题涉及诸如渗流原理、毛细理论、扩散理论、流体力学、传热传质学和热力学理论等,理论分析和计算求解过程还与数理方程、数值方法等紧密相联,因此其具有多学科交叉的性质。

(2) 经过近几十年的发展,多孔介质的学科理论和应用研究已经具备了相当的基础,但是,其研究成果多分散于不同的应用领域。就研究对象和研究内容而言,因应用场合不同,研究者对多孔介质传输过程的研究各有侧重。对于地下水文和石油开采,关心的是多

孔介质中的液相流动规律;对于多孔物料的干燥,重点研究水分的迁徙与蒸发;对于高温元器件的冷却,注重于过程中热量传递的速率;至于化工填充床的技术研究,不仅涉及到固、气、液相之间的热质传递,而且涉及到化学反应过程。

(3) 由于实际的多孔介质往往具有非均匀和各向异性的特点,构成了多孔介质中的传递现象和机理的复杂性,使得人们在研究一些具体问题时,不仅需要深入的理论研究,而且需要通过实验来揭示传递过程的规律性,并用于指导工程实践。

### 1.1.2 多孔介质的定义

#### 1.1.2.1 定义

所谓多孔介质,是指多孔固体骨架构成的孔隙空间中充满单相或多相介质。固体骨架(solid matrix)遍及多孔介质所占据的体积空间,孔隙空间相互连通,其内的介质可以是气相流体、液相流体或气液两相流体。多孔介质的主要物理特征是空隙尺寸极其微小,比表面积数值很大。多孔介质内的微小空隙可能是互相连通的,也可能是部分连通、部分不连通的。典型的多孔介质有土壤、沙、砂岩、金属泡沫、海绵、面包、人体肝脏等。

物质内部性质均匀一致的某种聚集体被称为相。在多孔介质的传热与流动分析和研究过程中,经常需要区别单相系统或多相系统。单相系统是指多孔介质的孔隙全部被一种单一流体(例如水或空气)或几种完全相容的流体所占据(例如淡水和盐水)。多相系统则是指两种或更多的互不相溶的流体占据多孔介质的孔隙空间。互不相溶的流体之间有明确的分界面(例如水和油)。通常多相系统的流体相中只能有一相为气体,因为气体与气体之间总是完全互溶的。多孔介质的固体骨架在形式上可以被看作不参与流动的固相。图 1.1 给出了两种多孔介质体系的示意图,左边是流体相为水的单相多孔介质,右边为流体相为水和油(或空气)混合物的两相系统。

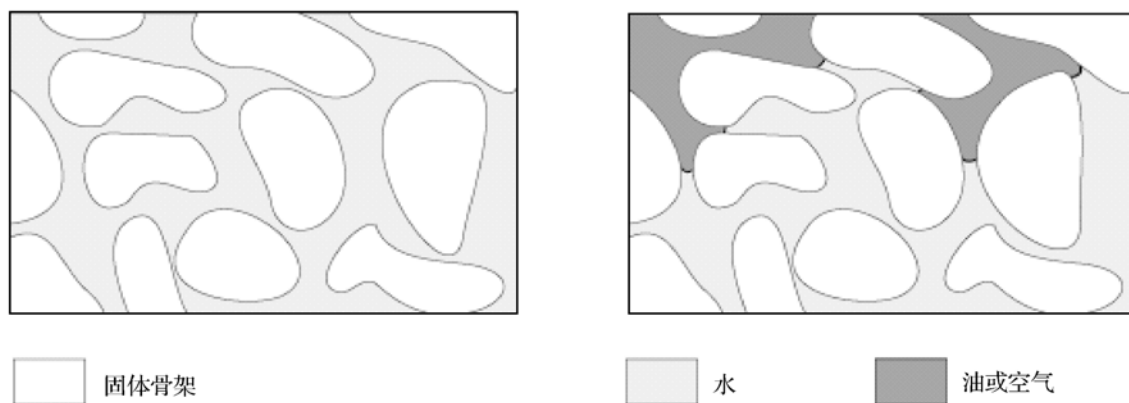


图 1.1 单相和两相多孔介质示意图(引自文献[16])

有时在对多孔介质体系进行描述时,还需要给出组分的数目。组分是指相中的化学成分相同的部分。例如淡水和盐水所组成的系统被称为单相双组分系统。

为了对多孔介质中的流体流动进行描述,必须对多孔介质的几何特性做如下限制<sup>[1]</sup>:

- (1) 多孔介质中的孔隙空间是相互连通的。
- (2) 孔隙的尺寸与流体分子平均自由程相比要大得多。
- (3) 孔隙的尺寸必须足够小,这样流体的流动才会受到流体和固体界面上的黏附力,

以及流体与流体界面上的黏着力(对多相系而言)的控制。

第一个限制的意义显而易见,因为没有流体能够在不联通的孔隙中流动;第二个限制允许我们用一个假想的连续体(表征体元)来表征孔隙中的流体分子;第三个限制则可将网络状管道从多孔介质的定义中排除。

### 1.1.2.2 异质及各向异性

如果多孔介质的参数在整个区域范围内所取宏观平均值均相同时,我们称该多孔介质为均质的。否则为异质多孔介质。如图 1.2(a)中所示的由粗砂和细砂组成的多孔介质,由于粗砂和细砂有不同的孔隙率,因此该多孔介质为异质的。

一些宏观张量的大小可能随方向变化,这种情况称为各向异性;反之称为各向同性。观察图 1.2(b)所示的多孔介质,流体在  $y$  方向上流动所受到的阻力明显要大于其在  $x$  方向上流动所受到的阻力,也就是说从渗透率的宏观值来说,该多孔介质是各向异性的。图 1.2(c)所示的多孔介质,其颗粒分布对流体流动所产生的影响与图 1.2(b)相同,因此也是各向异性。

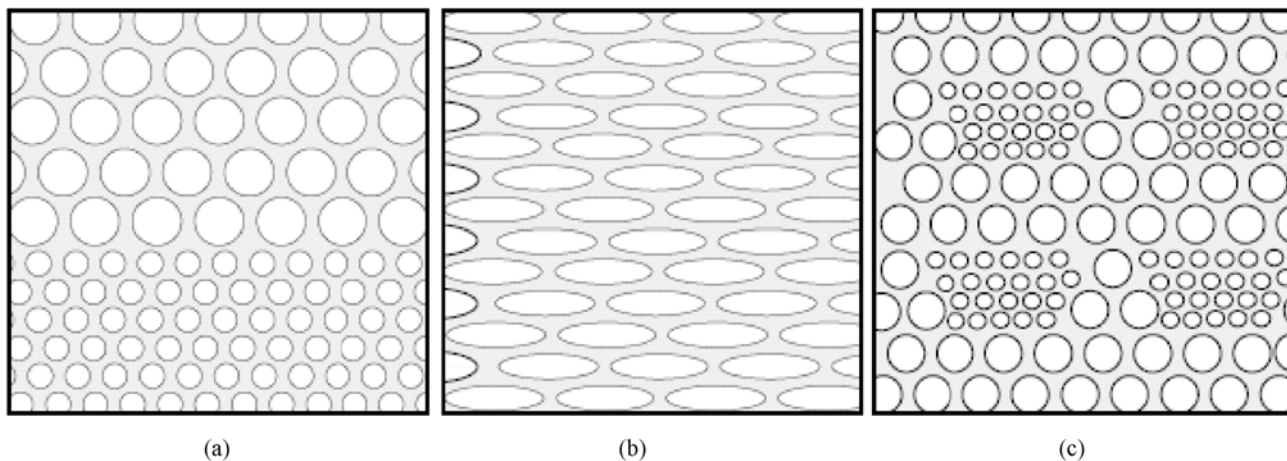


图 1.2 异质多孔介质及各向异性多孔介质(引自文献[16])

### 1.1.2.3 饱和多孔介质与非饱和多孔介质

当人们在研究多孔介质的输运现象时,经常是围绕着“湿分”来展开研究的,我们称其为含湿多孔介质。在这种情况下,通常是根据湿分的多少及形态,来把含湿多孔介质分成三类(图 1.3):

- (1) 孔隙空间充满液体的湿饱和多孔介质。
- (2) 湿分以液体和蒸汽形式存在于孔隙空间中的非饱和多孔介质。
- (3) 湿分以纯蒸汽的形式出现于孔隙空间的干饱和多孔介质。

显然,湿饱和与干饱和是多孔介质的两种特殊情况,可以把它们看作单相流体在多孔介质中的传递过程。

工程上最常见的是含湿非饱和多孔介质中的传输过程,如多孔隔热材料或蓄热系统中伴随相变的热质传递问题、热管中的液体蒸发与毛细抽吸现象、多孔介质中的沸腾和两相流动、非饱和土壤中的热湿迁移等。含湿非饱和多孔介质中的传输过程有两个十分显著

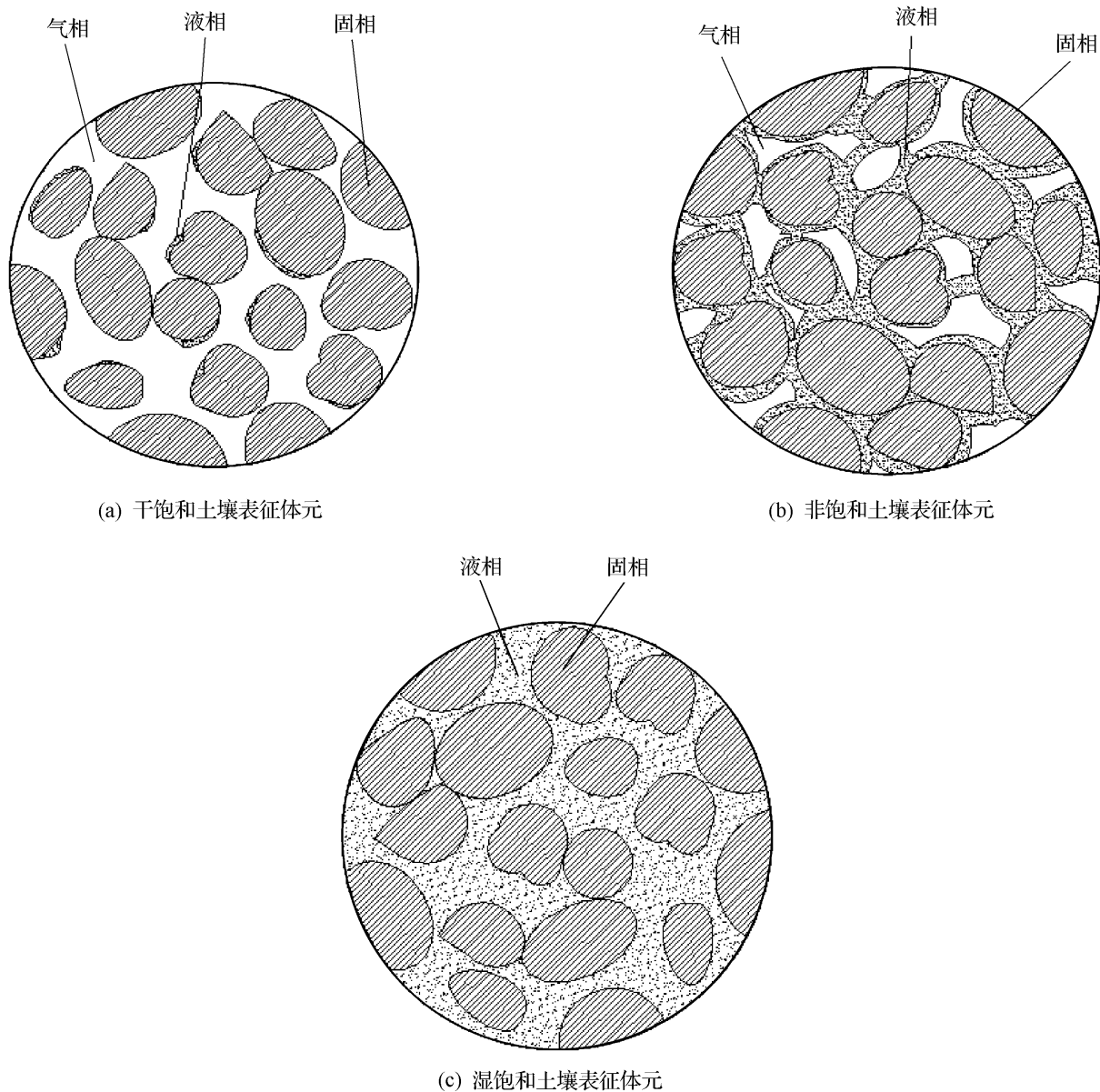


图 1.3 三种多孔介质的示意图

的特征:一是流体在微小的骨架孔隙空间连续流动,二是经常伴随流体的相变。这样,流动和传热比较复杂,很难用一种十分完善的理想模型去反映所有的运输机制。

目前,国内外对于含湿非饱和多孔介质的研究,概括起来可分为理论研究、实验研究和应用研究等三个方面。对于含湿非饱和多孔介质的应用研究,一般都采用理论分析的方法,即通过研究多孔介质的内部传输机理,建立数学模型,描述并数值模拟实际的物理过程。对于实验研究,由于含湿非饱和多孔介质内部的流动及各相含量的变化都难以在实验上测量,一般只是测量各物理过程的温度变化和水分含量的变化,可以验证理论模型的可靠性,或从可测量去预测不能测得的量,还可以通过实验来确定非饱和多孔介质的各物性参数与传输系数,如水力传导系数、湿扩散系数、毛细压力及表观导热系数等,这些实验数据是理论模型和数值模拟的基础。由此可见,含湿非饱和多孔介质内部热质传递机理及其数学模型的研究是含湿非饱和多孔介质研究的基础,而将数值模拟用于各种实际过程的分析是目前含湿非饱和多孔介质研究的主要方法。

这里还应指出的是,在实际多孔介质传递过程的研究中,由于着眼点和目标之不同,又可将多孔介质传递现象分为多孔介质外和多孔介质内的传递过程。诚然,多孔介质内、

外传递过程有着不可分割的联系,但二者显然是有区别的。在研究多孔介质内传递问题时,外部传递过程成为其边界条件;而在研究外部传递问题时,多孔介质内传递过程则是其重要影响因素。可是,无论对于何种实际问题,多孔介质内的传递过程是带根本性的环节,是该学科的核心内容。

### 1.1.3 多孔介质热质传输过程研究方法<sup>[17]</sup>

#### 1.1.3.1 基本研究方法

就多孔介质传输问题研究方法所涉及的研究对象及研究范围加以区分,可有分子水平、微观水平和宏观水平三类。

所谓分子水平,就是将多孔介质中流体的分子运动作为研究对象,根据经典力学与能量分析,获得分子运动与能量传递的变化规律。显然,从分子水平来观察研究,流体是由大量离散的分子构成的,故要建立大量数学方程,去描述多孔介质中流体的不同点、不同相的状态与传递过程。在建立这些数学表达式时,还要作出各种假定,而这些假定也不是非常符合实际的。因此,用这种方法所得到的分析结果,只能为工程应用提供某种参考。况且,一般说来,建立分子水平传递过程的数学表达式已十分困难,而求解则几乎是不可能的。

为了获得工程需要的定量描述,工程上常采用另外一种方法,即不去深究流体微观粒子的构成和运动,而将流体视为连续介质。对连续介质中所发生的现象,在某种范围与规则的限定下加以平均,进行较粗水平的处理。在这里,就是将多孔介质及其孔隙中的流体,视为被连续多孔介质固体所包围起来的流体连续介质。在连续介质中的每一质点处,是一个具有可容纳许多液体分子的集合体,质点集合体所占据的区域远远大于分子平均自由程,但与整个连续介质相比,它又是足够小的。这样一来,可从某种平均意义上确定该质点处的各种物理参数,然后再根据各种物理定律,得到多孔孔隙内流体性质与规律的定量描述。上述方法被称为微观水平,这意味着它不同于分子水平,但之所以称其为微观水平,是因为描述空隙中流体质点动量、能量、质量变化时,一定要将多孔体固体骨架的边界微细结构作为边界条件。显然,对后者的定量描述也是十分困难的。

鉴于上述方法的局限性,工程应用中则不得不采取更粗水平即宏观水平方法(简称宏观方法)。宏观方法也持连续介质的观点,但它使用一种假想的无固定结构的气液固连续介质去代替多相多孔介质,即设固体、流体 1 和流体 2 均为充满多孔介质的连续介质,它们在空间各点按时间连续分布,并具有其确定的参数值,而且它们之间还可发生相互作用。应当坦率地指出,利用这种宏观方法所得到的结果,是与客观的微观状态不同的,只能以增加一些系数的办法加以修正。

与传热传质学科的研究类似,在宏观方法中,首先要在被研究系统中选取控制体去分析传递过程。多孔介质传递问题宏观研究方法所选择的控制体为表征体元。这种方法具有如下特点:首先是着眼于宏观,不考虑微细结构;其次设其各参量是连续变化的(即为可微分变量),故可用一般的数学方法来描述和求解;另外,所选取的表征体元与参数测量仪器传感器的尺寸一致,使参数在宏观上具有可测性,因而这种方法得到了广泛应用。

本书中介绍的各种数学模型,多数采用的是宏观方法,即在表征体积元的基础上,获得参数平均值,然后代入标准传输方程中,以获得多孔介质宏观变量的传输规律。

必须指出,分子水平、微观水平和宏观水平的研究方法各有所长。尽管前两种方法的局限性较大,但是在进行机理探讨中亦有其独到之处。在研究与分析多孔介质传递过程中,应尽量将上述方法结合起来(图 1.4)。

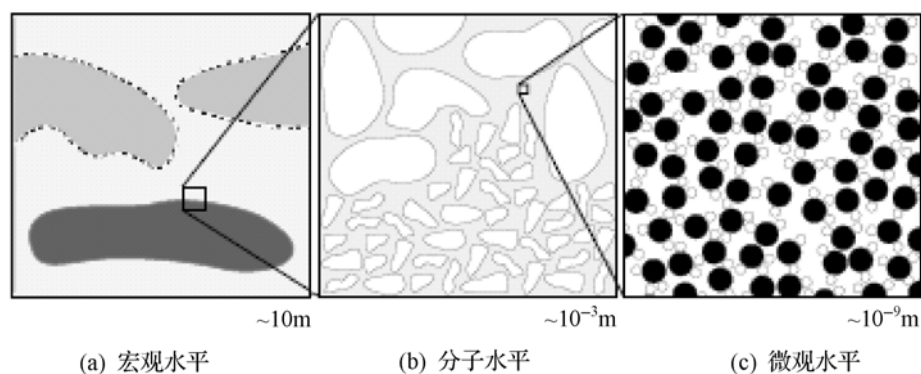


图 1.4 多孔介质研究方法的不同尺度(引自文献[16])

### 1.1.3.2 表征体元

在使用宏观方法时,为了构造基于连续介质理论的数学模型,需要在宏观水平上对围绕多孔体内某一点  $p$  的流体参数进行平均,用在一定范围内的平均值去代替局部真值。这种方法称为局部容积平均方法,所选取的平均范围称为表征体元(representative elementary volume),简称 REV。问题是如何选择参数的平均范围更为合理。图 1.5 给出了选取平均容积的尺寸与孔隙率的关系。可以发现,对于非均匀多孔介质,选取的容积尺度不同,所获得的容积平均值也不同。因此,如果选取的平均范围不合理,无法反映这一范围内参数的真值,则在 REV 基础上获得的数学模型也无法得到理想的解。

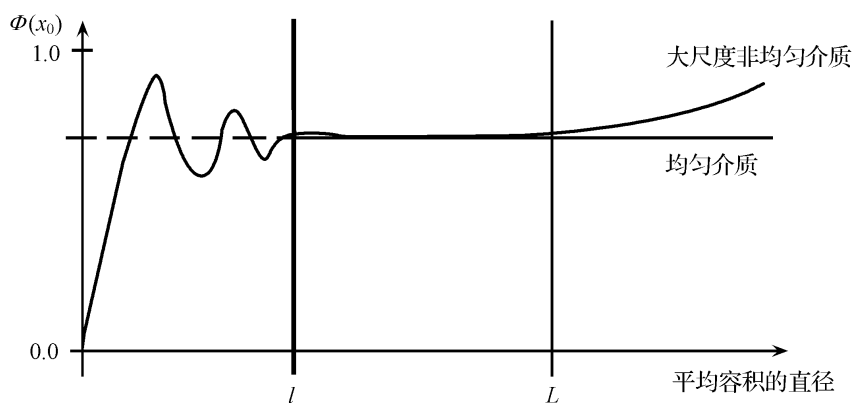


图 1.5 平均容积的尺寸与孔隙率的关系(引自文献[16])

早在 1934 年,文献[2]作者就提出了确定表征体元的方法,至今仍被沿用,其要点是:

- (1) 此 REV 应是绕  $p$  点的一个小范围,它远比整个流体区域尺寸小。
- (2) REV 应比单个空隙空间大得多,以致能包含足够多的孔隙。
- (3) 在 REV 中,其基本参数随空间坐标的变化幅度小,平均值逼近于真值。

上述条件中,第(3)点是确定 REV 的关键性原则。其中,又涉及选择何种参数作为基本参数的问题。一般说来,在同一区域内基本参数不仅为一种,各种基本参数的变化幅度又不可能完全相同。因此,在确定 REV 时如何处理这一问题,有着不同的看法与做法。文

献[6]指出,应对各不相同的基本参数选取不同的 REV。文献[2~ 4]则认为,应以多孔介质结构参数——孔隙率  $\phi = V_v/V_T$  (其中  $V_v$  和  $V_T$  分别为孔隙容积与总容积)为基本参数去选择 REV。

在处理各种实际问题中,如果遇到比较复杂的情形,不能根据测算参数的变化规律去确定 REV,或者对平均化要求不是很严格时,则可在更粗水平上进行参数平均,也就是说,在粗视水平上去选取控制元。一些文献把这种控制元称为粗宏观表征体元 RMV,含义是:在多孔介质内  $p$  点处存在一个区域,其特征长度  $d$  远小于整个区域特性尺寸  $L$ ,又远大于宏观参数不均匀度尺寸  $l$ ,如图 1.5 所示。当  $l \leq d \leq L$  时,即为所选取的表征体元。

## § 1.2 多孔介质的基本参数

在研究多孔介质传热传质问题中,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。

### 1.2.1 结构参数<sup>[7,17]</sup>

#### 1.2.1.1 孔隙率

孔隙率(porosity)是指多孔介质内的微小空隙的总体积与该多孔介质的总体积的比值,有些文献中亦称孔隙率,其表达式为

$$\phi = \frac{V_{\text{孔隙}}}{V_{\text{多孔}}} \times 100\% = \frac{V_p}{V_B} \times 100\% \quad (1.1)$$

孔隙率可分为两种:多孔介质内相互连通的微小空隙的总体积与该多孔介质的外表体积的比值称有效孔隙率,以  $\phi$  表示;多孔介质内相通的和不相通的所有微小空隙的总体积与该多孔介质的外表体积的比值称绝对孔隙率或总孔隙率,以  $\Phi$  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  $\phi$  表示。

孔隙率与多孔介质固体颗粒的形状、结构和排列有关。在常见的非生物多孔介质中,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。

孔隙率是影响多孔介质内流体传输性能的重要参数。

#### 1.2.1.2 比面

比面(specific surface) $\Omega$  定义为多孔介质总容积  $V$  与固体骨架总表面积  $A_s$  之比,即

$$\Omega = \frac{A_s}{V} \quad (1.2)$$

式中,  $\Omega$  为多孔体比面, ( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ) 或 ( $1/\text{cm}$ );  $A_s$  为多孔体面积或多孔体孔隙的总内表面积 ( $\text{cm}^2$ );  $V$  为多孔体外表体积(或视体积) ( $\text{cm}^3$ )。

多孔材料的比面定义也可以理解为多孔材料每单位总体积中的孔隙的隙间表面积。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,其比面应为

$\Omega = 8 \times 4\pi R^2 / (4R)^3 = \pi / 2R$ 。由此可知,  $R$  愈小  $\Omega$  愈大, 即固体颗粒愈小比面愈大。因此, 细颗粒物质的比面显然要比粗颗粒物质的比面大得多, 如砂岩(粒径为 1~ 0.25mm)的比面小于  $950 \text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ; 细砂岩(粒径为 0.25~ 0.1mm)比面为  $950 \sim 2300 \text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ; 泥砂岩(粒径为 0.1~ 0.01mm)的比面大于  $2300 \text{cm}^2 / \text{cm}^3$ 。很明显, 细粒构成的材料将显示出远较粗粒材料为大的比面积, 也就是说, 多孔体比面越大, 其骨架的分散程度越大, 颗粒越细。

比面  $\Omega$  无论对于多孔介质的吸湿、干燥还是传热过程, 都是十分重要的结构参数。它也是与多孔材料的流体传导性即渗透率有关的一个重要参数。这一点在讨论克泽尼(Kozeny)方程时, 再作较详细的讨论。

### 1.2.1.3 迂曲度

一般说来, 多孔介质空隙连通通道是弯曲的。显然, 其弯曲程度将对多孔介质中的传递过程产生影响。对多孔介质的这一结构性用迂曲度(tortuosity)  $\tau$  表示为

$$\tau = \left[ \frac{L}{L_e} \right]^2 \quad (1.3)$$

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,  $\tau$  必小于 1, 但也有文献将其定义为

$$\tau' = \left[ \frac{L_e}{L} \right]^2 \quad (1.4)$$

显然, 此时  $\tau'$  必大于 1。

上述结构参数均与多孔介质固体颗粒尺寸及其分布、空隙尺寸及其分布有关, 故也常把固体颗粒与空隙尺寸及其分布列为基本结构参数, 现简介如下。

### 1.2.1.4 固体颗粒尺寸

多孔介质固体颗粒尺寸(particle size)、形状、大小通常都是多种多样的, 因此准确地确定固体颗粒尺寸是相当困难的。在工程应用中, 往往要通过实际测量去确定。于是, 颗粒尺寸又取决于所采用的测量方法。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去确定, 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。

### 1.2.1.5 空隙尺寸

一般来说, 空隙尺寸(pore size)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去确定的。其中, 常用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

$$d_0 = 4\sigma \cos \theta / p_e \quad (1.5)$$

式中,  $\sigma$  为表面张力;  $\theta$  为接触角;  $p_e$  为使非润湿流体进入空隙所需压力。

## 1.2.2 基本特性参数

### 1.2.2.1 渗透率

渗透率(permeability)是由达西定律所定义的,它是多孔介质的一个重要特性参数,表述了在一定流动驱动力推动下,流体通过多孔材料的难易程度。可以说,它表达了多孔介质对流体的传输性能。渗透率值可由达西渗流定律来确定。

达西渗流定律是法国水文工程师达西在1856年为解决城市供水问题而进行的未胶结砂水流渗滤试验时所得出的,可以用下式来表达:

$$u = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.6)$$

式中,  $\frac{\partial P}{\partial x}$  为流动方向上的压力梯度;  $k$  为渗透率;  $\mu$  为流体的黏度;  $u$  为流体在孔隙中的流速。

由达西定律可以看出,渗透率与多孔介质的另一参数——孔隙率之间不存在固定的函数关系,而与孔隙大小及其分布等因素有直接关系。

物理系统的渗透率计量单位为  $\text{cm}^2$ , 而工程上常用 d(达西)和千分达西(即‰od)表示,  $1\text{d} = 1.02 \times 10^{-8} \text{cm}^2$ 。具有工业价值的砂岩油层的绝对渗透率值从几个 d 到 3000‰od, 大多数砂岩油层的渗透率为 200‰od~1000‰od; 砖的渗透率为 5‰od~220‰od; 土壤的渗透率一般为 0.29‰od~14‰od。

因渗透率具有面积的因次,其物理意义十分明显。我们可以将渗透率理解为它代表了多孔介质中孔隙通道面积的大小和孔隙弯曲程度。渗透率越高,多孔介质孔道面积越大,流动越容易,可渗性也越好。

在多孔介质传输问题的研究中,渗透率可分如下三类。

(1) 绝对渗透率。通常是以空气通过多孔介质测定的渗透率值,由实验确定。显然,孔隙大小及其分布对其具有决定性影响,因此,又称为固有渗透率。

(2) 相(有效)渗透率。所谓相渗透率是指多相流体共存和流动时,其中某一相流体在多孔介质中通过能力的大小,称为该相流体的相渗透率或有效渗透率。例如,当研究含湿非饱和多孔介质时,流体为气液两相,则分别对应两个相渗透率,即气相渗透率  $k_g$  和液相渗透率  $k_l$ 。

有效渗透率与绝对渗透率之间在概念上、数值大小上有什么区别呢?虽然达西定律是在单相流动情况下所得出的,但早已扩展到多相流动的情况。在多相流动时,可将其中某相流动视为它在固相及其他相组合成的介质中流动,故仍采用达西公式,但渗透率则以该相有效渗透率代替,于是便把多相流动中所产生的各种附加阻力,都归结到该相流体的有效渗透率数值的变化上。

研究发现,同一多孔体的有效渗透率的和,总是小于该多孔体的绝对渗透率。这一结论是带有普遍性的。因为共用同一孔隙通道的多相流体共同流动时会相互干扰,此时,不仅要克服粘滞阻力,而且还要克服毛细力、附着力,以及由于液阻现象增加的附加阻力等。因此,相渗透率这一概念不仅反映了多孔介质本身的属性,而且还反映了流体性质,气液相在多孔介质中的分布,以及它们三者之间的相互作用情况,这就是为什么说相渗透率是多孔介质与流体相互作用的动态特性的原因。

(3) 相对渗透率。在实际应用中,为了应用方便(将渗透率无因次化),也为了便于对

比出各相流动阻力的比例大小,引入了相对渗透率的概念,即相渗透率与绝对渗透率的比值。例如,液相相对渗透率可以下式表示为:

$$k_{rl} = \frac{k_l}{k} \quad \text{或} \quad k_l = k_{rl} \cdot k \quad (1.7)$$

显然,相对渗透率和有效渗透率一样,是与固体骨架、流体性质以及二者相互作用的动态特性有关的。但这一关系过于复杂,无法实际应用。Muskat 和 Meres 采用了一些简化手段,将相对渗透率值表示为仅与该相流体在空隙中所占的体积百分比,即该相的饱和度有关的函数。这一函数形式虽然被广泛采用,但在很多情况下被证实不一定恰当。

相对渗透率与饱和度之间的关系曲线称为多孔介质的相对渗透率曲线。

### 1.2.2.2 水力传导系数

水力传导系数(hydraulic conductivity) $K$  是多孔介质流体传输能力的另一个特性参数,它与绝对渗透率之间的关系可以用下式表达:

$$K = k\rho g/\mu \quad (1.8)$$

在多孔介质流体力学中,经常以  $K$  代替  $k$ ,因为这样一来,可以把达西定律表示成与导热方程类似的形式,即通量和驱动力的关系为

$$j_i = -K \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1.9)$$

式中,  $j_i$  表示单位面积流过多孔介质的容积流量 [ $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ];  $\frac{\partial \phi}{\partial x}$  为流动方向上的水力梯度,其中  $\phi$  为流体的流动势,  $\phi = p/\rho g + z$ ,  $\phi$  亦可取为  $p + \rho g z$ ,其中  $z$  为重力方向的高度。若  $\phi$  的表达式取得不同,则达西定律的表述也有所不同。

### 1.2.2.3 饱和度

多孔材料中的空隙,可以部分地为液体占有,另一部分则为空气或其他蒸汽占有,或者由两种以上互不相溶液体共同占有。这样一来,每种流体所占据空隙容积的多少,就成为多孔材料的一个重要特性参数。

在多孔材料中某特定流体所占据空隙容积之百分比,称之为饱和度(saturation) $s_w$ ,即

$$s_w = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (1.10)$$

式中,  $V_w$  为流体所占据的多孔材料空隙容积;  $V_v$  为多孔材料空隙总容积。

当多种流体共同占有多孔材料的空隙时,有

$$\sum_{i=1}^n s_{w,i} = 1 \quad (1.11)$$

在一些简单流动中,例如不涉及相变传热的情况下,流体饱和度可用各种实验方法,如体积平衡法、直接称量法、电阻法或 X 射线吸收法来确定<sup>[7]</sup>。

### 1.2.2.4 毛细压力

当两种互不相溶的流体 1、2 相互接触时,它们各自的内部压力在接触面上存在着不连续性,两压力之差称作毛细压力(capillary pressure) $p_c$ ,其大小取决于分界面的曲率,即

$$p_c = \sigma_{12} \left[ \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right] \quad (1.12)$$

式中,  $\sigma_{12}$  为互不相溶流体 1、2 之间的表面张力(又称表面张力系数),它是形成界面所需的比自由能; $r$ 、 $r'$  为界面的两个主曲率半径。式(1.12)即为著名的拉普拉斯方程。对于一个由固体表面所构成的毛细管(或更一般地说,是一个围起来的固体表面),其内部若有两种相互接触但互不相溶的流体 1 与 2,其接触界面切线与指向液体(流体 2)的固体表面切线的夹角称为接触角  $\theta$ ,由下式确定:

$$\cos \theta = (\sigma_{s1} - \sigma_{s2}) / \sigma_{12} \quad (1.13)$$

式中,  $\sigma_{s1}$ 、 $\sigma_{s2}$  分别为流体 1、2 与固体界面上的表面张力; $\sigma_{12}$  为 1、2 流体界面表面张力。若  $\theta < \frac{\pi}{2}$  (即  $\sigma_{s1} < \sigma_{s2}$ ),则定义流体 2 对固体润湿;若  $\theta > \frac{\pi}{2}$ ,则流体 2 对固体不润湿,如图 1.6 (a)、(b)所示。

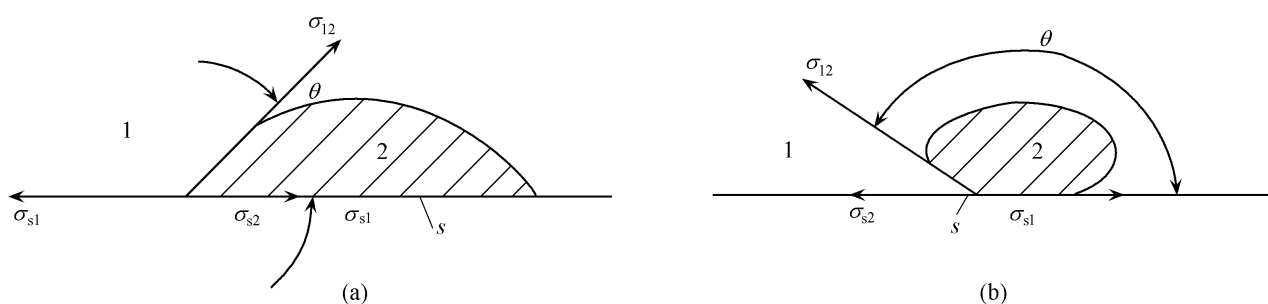


图 1.6 接触角  $\theta$  示意图

在流体互相驱替过程中,毛细管压力可以是驱动力,也可以是流动的阻力。浸润相在毛细管压力作用下,可以自发地驱替非浸润相,即渗汲作用。毛细管压力的存在影响多孔介质内的流体运动规律,因此,是多孔介质传热传质问题所必须考虑的,尤其是在含湿非饱和多孔介质中。毛细压力与流体饱和度有紧密联系为

$$p_{nw} - p_w = p_c(s_w) \quad (1.14)$$

式中,  $p_{nw}$ 、 $p_w$  分别为非润湿和润湿流体侧压力; $s_w$  为润湿流体饱和度。式(1.14)表明,毛细压力  $p_c$  是润湿流体饱和度的函数。

### 1.2.3 基本参数的测量

#### 1.2.3.1 孔隙率的测量

由孔隙率的定义可知,多孔材料样品的孔隙率可以通过测量下面三个量中的任两个来确定,即总体积、孔隙体积或固体体积。

##### 1. 直接法

最直接的操作过程是测量总体积,压碎样品,去掉所有的孔隙,然后测量剩下的固体的体积。此技术常用于砖和陶瓷。此方法可量得总孔隙率。

##### 2. 气体膨胀法

用得最广的测量有效孔隙率的方法大概是基于气体膨胀的方法。把已知其总体积的样品封入已知体积的容器中,其中充满着已知压力的空气(或气体),然后把它与一已知体积且抽真空的容器相连,孔隙体积可根据观察到的压力变化,应用波义耳-马略特气体定

律计算得到。这样

$$\text{孔隙体积} = V_B - V_a - V_b \frac{P_2}{P_2 - P_1} \quad (1.15)$$

式中,  $V_B$  为样品的总体积;  $V_a$  为样品室的体积;  $V_b$  为第二个(抽空的)室的体积;  $P_1$  为初始压力;  $P_2$  为最终压力。

利用这一基本原理,已发展了各种各样的多种不同形式的仪器。但值得指出的是,基于气体膨胀的方法不如其他技术那样精确。

(1) 压汞法。测量有效孔隙率的压汞法的原理为:由于水银的表面张力和非润湿性,在大气压力下,某一多孔样品可浸没在水银内而不会有水银进入此样品之中。于是,此样品的总体积可通过从一已知体积的样品室中驱替出来的水银体积来确定。

如果样品室是密封的,把此室中的水银的静压力增加到十分大的数值,水银将进入孔隙,把圈闭在孔隙中的空气压缩到可以忽略的体积。因此,压入的水银体积等于孔隙体积。

此方法的优点是总体积和孔隙体积二者都是直接确定的。由于为压缩空气所占的体积未经确定,此方法并不十分精确。另外,由于样品总是含有水银污染(甚至在大量清洗过后),因此不适于用作下一步的试验。

(2) 密度法。因为多孔材料的质量完全属于颗粒或骨架,因此有

$$M = \rho_s V_s = \rho_B V_B \quad (1.16)$$

式中,  $M$  为样品的质量;  $\rho_s$  为固体材料的密度;  $\rho_B$  为多孔材料样品的总密度。

考虑到方程(1.1),有

$$\phi = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_s} \quad (1.17)$$

对于样品的总密度  $\rho_B$ ,易于通过称量样品和用体积驱替方法测量其总体积而确定。可以应用水银沉没法,但最好是用防水包覆层和应用水浸润法。

对于固体材料的密度  $\rho_s$ ,可通过把此材料的一块样品捣碎,称其重量,然后应用驱替方法以确定其体积。此方法得出的是总孔隙率。

(3) 吸渗法。这种通过测量有效孔隙体积,从而得到有效孔隙率的十分直接的方法,广泛地应用于石油工业。因为大多数干净岩石是强水湿的,它们易于吸渗水。这样,如果一块在真空下的岩样浸没在水中,经过一个星期左右,其孔隙空间将完全为水所充满。于是,此饱和水的样品的质量为

$$M' = M + \rho_w V_P \quad (1.18)$$

式中,  $\rho_w$  是水的密度( $\approx 1$ );  $M$  是样片的干质量,因此

$$V_P = \frac{M' - M}{\rho_w} \quad (1.19)$$

式中,  $V_P$  为多孔介质的孔隙总体积。用此完全为水所饱和的样品,不用任何的包覆手段便可通过在水中的体积驱替测量,直接得出  $V_P$  的值,  $\phi$  即可算出。

除了为达到完全饱和需要很长的时间以外,这个方法或许是当前应用的测量孔隙率的最好的方法之一。

(4) 统计法。对于天然产生的多孔材料,因其孔隙结构具有在空间随机的性质,一个任意断面上的平面孔隙率一定和体积孔隙率一样。平面孔隙率定义为:洞或孔在平面断面

的面积中所占的分数。在这样一个截面上,一个随机点落在孔隙内的概率就是孔隙率  $\phi$ 。

这一原理已被查尔克莱(Chalkley)、康菲尔德(Cornfield)和帕克(Park)<sup>[19]</sup>用来测量孔隙率。在多孔材料的一个断面的放大显微镜相片上,用一根针随机地落下很多次,可以示明,随着针投掷次数的增加,到极限时,针落在孔隙中的次数与投掷总次数的比,趋近于值  $\phi$ 。但因为隔绝的孔隙和连通的孔隙二者都是暴露着的,这个方法得出的是总孔隙率。

### 1. 2. 3. 2 比面的测量

因为任何天然多孔材料的内部表面具有极端的复杂性,比面积  $\Omega$  只能用统计的或间接的方法确定。现将比面的三种测量方法作一简述。

#### 1. 统计法

由查尔克莱、康菲尔德和帕克<sup>[19]</sup>发展的确定孔隙率的统计方法,也被他们推广于确定比面。在他们的方法中,使用了多孔材料的一个断面的放大显微镜相片。

如果一长度为  $l$  的针落在此相片上很多次,计算端点落在孔隙内的次数以及此针与孔隙的周边相交的次数,然后用一个基于概率论的方程来计算比面积。

以  $h$  表示端点落在孔隙内部的次数, $c$  表示与周边相交的次数,则此方程为

$$\Omega = \frac{4\phi c}{lh} m \quad (1.20)$$

式中,  $m$  是此相片上的总放大率。

此方法是当前应用的确定比面的较普遍的方法。

#### 2. 吸附法

能吸附于某一表面的蒸汽的量取决于该表面的面积。根据这一原理,已有好几种理论被用来确定表面面积。但是,所有的确定比面的吸附法都遭到了相同的质疑。因为被吸附的气体或蒸汽的量正比于表面面积,这个表面面积中包括了此多孔材料中的微小分子间隙,而与流体流动有关的表面面积则不包括表面面积的这一部分。

#### 3. 基于流体流动的方法

克泽尼(Kozeny)方程或克泽尼-卡门(Kozeny-Carman)方程(这两者将在渗透率的测量部分进行详细介绍)把多孔介质的流体传导性或渗透率和比面联系起来。因此,根据这些方程,测量流体传导性的方法可以被广泛地用来计算比面。

但是正如下面即将指出的,克泽尼方程不是严格正确的,因此,沿用这样的方法而确定的比面的值通常也具有严重的不确定性。布罗克斯(Brooks)和珀塞尔(Purecell)<sup>[5]</sup>把用克泽尼方程确定比面的方法与其他的方法做了比较。

### 1. 2. 3. 3 渗透率的测量

#### 1. 依据达西定律

测量渗透率的主要依据是达西定律,可以使用达西定律的任一形式。

实验的思路是:先测出系统中的压力降与流量,再求出与此系统的几何形状和实验流体相应的达西定律的解,把计算出来的值与实验所得的结果进行比较,就可得出唯一的未知系数  $k$ 。一般来说,实验中经常采用平面线性渗滤系统,因为这种情况是最容易计算的,但径向渗滤系统也是常用的。