



分形多孔介质输运物理

郁伯铭 徐 鹏 著
邹明清 蔡建超 郑 仟



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

分形多孔介质运输物理

郁伯铭 徐 鹏 著
邹明清 蔡建超 郑 仟

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

天然形成的和部分人工制造的多孔介质的微结构具有分形特征,本书将此类多孔介质称为分形多孔介质。本书总结了著者及其课题组十余年来主要研究成果和心得,论述了著者建立的有关多孔介质分形理论和方法,然后介绍和论述将建立的理论和方法应用于分析和研究多孔介质运输的物理性质,如渗透率、类分形树状分叉网络传热与流动特性、流体流动阻力、启动压力梯度、渗吸、气体流动与扩散、等效热导率、纳米流体热运输、粗糙界面接触传导、沸腾换热、表面凝结、介电常数等运输物理特性的分形分析求解的理论和方法。

本书着重论述有关把分形理论和方法应用于多孔介质运输物理的理论和方法及其最新研究成果,但也简要总结了有关研究多孔介质运输物理性质的传统理论和方法。阅读本书的读者需要具备高等数学、概率论、大学物理、流体力学、传热与传质学、多孔介质流体动力学、分形几何基本理论和方法等专业基础知识。本书可供从事油气藏、地下水资源和地热开发与利用、地质与地球物理学、矿产资源开发与利用、化工、水利、能源与环境、材料科学与工程、生物学、医学、物理学及国防科学与技术应用等专业的高等学校师生、科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

分形多孔介质运输物理/郁伯铭等著. —北京: 科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-040051-2

I. ①分… II. ①郁… III. ①多孔介质-传输介质-介质物理学

IV. ①O357.3②TN81③TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 044894 号

责任编辑: 刘信力 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈敬

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 32

字数: 630 000

定价: 188.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前 言

分形几何自 1982 年美国数学家 B.B. Mandelbrot 创建以来,其理论已经渗透到许多领域,如油气藏、地热和地下水资源开发利用、地质与地球物理学、化工、水利、能源与环境、材料科学与工程、通信、地震、生物和医学等领域。这些领域都与多孔介质及其微结构有关。大量研究结果表明,天然形成的和部分人工制造的多孔介质微结构是分形的。因而,一旦分形几何理论被应用于上述诸领域时,分形几何理论与多孔介质就必然紧密地联系在一起。由于通常的多孔介质微结构非常复杂,其孔隙和毛细管大小、毛细管弯曲性、孔隙表面形貌等都具有随机性、不规则性和分形特征。所以,采用传统理论和方法研究多孔介质的输运性质往往会遇到巨大困难。然而,分形几何给人们研究和解决复杂科学问题和实际应用问题提供了强有力的新途径,受到了国内外学术界的极大重视,取得了巨大研究进展,因而激发了著者撰写本书的兴趣。

本书介绍的分形多孔介质主要针对两大类多孔介质。其一是精确自相似的分形多孔介质,如谢尔宾斯基地毯、谢尔宾斯基海绵等,这类介质在无限的尺度范围内显示出分形和自相似特征;其二是统计自相似的分形多孔介质,如天然形成的和部分人工制造的多孔介质如土壤、地下油气藏、地热藏、地层与地质、水泥、陶瓷、工程复合材料、纤维和服装、芯片、人和动物的组织与脏器、植物等,这类介质的微结构在某个或多个尺度范围内显示出其分形和自相似特征。本书介绍的输运物理主要指的是这两类分形多孔介质的流动、传热、扩散、电输运性质等。

本书是在总结著者及其课题组十余年来主要研究成果的基础上写成的。课题组在国家自然科学基金的资助下,在把分形几何理论应用于多孔介质输运性质的研究中,取得了一系列的研究成果。结合分形多孔介质输运物理性质的研究,发展和提出了有关统计自相似分形多孔介质的若干基本理论和方法。现在我们把研究成果和心得写成专著,以此作为我们对国家自然科学基金委员会以及国内学术界给予我们研究工作支持的回报。

本书第一著者的博(硕)士研究生和访问学者为围绕本书的科研工作做了大量和积极的贡献,他们是徐鹏、邹明清、蔡建超、郑仟、冯勇进、员美娟、梅茂飞、王世芳、罗良、赵明、马永亭、肖波齐、刘艳军、吴金随、徐洁、张斌、陈俊、楚化强、唐燕妮、李永华、徐倩、李艳、陈牧、邓柳杨、陈佳等。著者借此机会向他们再次一并致谢。

本书第一著者还要感谢美国俄亥俄州立大学高等聚合物和复合材料工程研究

中心主任 L. James Lee 教授,是他邀请著者在该研究中心做访问学者,三年多(1996年10月~1999年12月)的合作研究工作为本书奠定了基础;应香港科技大学机械系前主任郑平教授(现为中国科学院院士、上海交通大学特聘讲座教授)邀请做访问学者,并开展了多次合作研究,极大地丰富和充实了本书内容;应新加坡国立大学物理系前主任李保文教授邀请而进行的卓有成效的合作研究使本书得以锦上添花。本书第一著者还很想借此机会感谢华中科技大学物理系前主任姚凯伦教授(1986年)向我推荐的分形几何理论研究方向,使我在该研究方向上迈出了关键的第一步。尤其要感谢著者的研究生导师清华大学核能研究院马昌文教授和吴少融教授,衷心感谢他们把我带进了流体力学、传热与传质科学的殿堂。

本书的研究工作先后得到了国家自然科学基金多个面上和青年基金项目(资助号:10272052, 10572052, 10847128, 41102080)以及重点项目(资助号:10932010)的资助。围绕本书的研究工作还得到了西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室的资助。在此一并致以诚挚的感谢。特别是国家自然科学基金的支持和资助,激励和鞭策着我们在多孔介质流体力学、多孔介质传热与传质学、分形理论与方法,以及物理学的交叉领域里不断地探索和攀登,使我们能在该交叉学科领域做出一些创新性的研究成果。

由于著者学识和水平有限,本书不妥之处在所难免,恳请读者指正。

郁伯铭

2013年10月于武昌

主要符号表

英文符号

a	毛细管的横截面积	L_t	弯曲毛细管的实际长度
A	面积	L_0	特征长度
C	电容	m	级数; 阶数
d_k	第 k 级分叉管直径	M	面积; 质量
d_p	粒子直径	n	分叉数; 数目; 幂律指数
D	扩散系数	N	孔隙或颗粒或毛细管数目
D_d	分叉网络通道直径分形维数	p	局部压力
D_e	当量直径	P	压力; 电偶极矩
D_f	分形维数	P_C	毛细管压力
D_l	分叉网络通道长度分形维数	q	毛细管中的流体流量; 热通量
D_T	迂曲度分形维数	Q	总流量; 总热量
E	能量	r	半径
f	摩擦因子	R	热阻; 流阻; 半径
F	形状因子	S	饱和度; 比表面积
g	几何因子	t	时间
h_{fg}	潜热	T	温度
H	高度; 厚度	u	x 方向的速度分量
i	第 i 个(次)	v	y 方向的速度分量
j	第 j 个(次)	V	容积; 体积
J	扩散通量; 迭代次数; J 函数	V_p	孔隙体(容)积
k	相对渗透率; 热导率	V_t	总体(容)积
K	渗透率	w	z 方向的速度分量
Kn	努森数	W	功率
l_e	分叉网络等效长度	x	坐标
l_k	分叉网络第 k 级通道的长度	y	坐标
L	长度	z	坐标

希腊字母

α	凝结系数	Δ	直径指数
β	分叉网络的第 $k+1$ 级与第 k 级直径之比	σ	表面张力
γ	分叉网络的第 $k+1$ 级与第 k 级长度之比	θ	接触角
λ	毛细管直径; 热导率	ϕ	孔隙率
λ_e	等效热导率	τ	迂曲度
λ^+	无量纲等效热导率	ε	孔隙率; 介电常数
		μ	流体黏度
		ρ	密度

上 标

k	分叉网络的级数; 阶数	n	谢尔宾斯基地毯的级数
$+$	无量纲		

下 标

a	面积	g	气体; 非湿润相
b	主流区	k	第 k 级
e	有效; 等效	s	固体
f	流体	t	总的

其 他

$\langle \rangle$ 平均量

目 录

主要符号表

绪论	1
第 1 章 多孔介质分形理论	5
1.1 分形多孔介质孔隙和颗粒的统计性质	5
1.2 弯曲毛细管迂曲度及其分形维度数	8
1.2.1 实验测量	8
1.2.2 数值模拟	10
1.2.3 传统分析	11
1.2.4 流体通过精确自相似多孔介质的流线迂曲度	12
1.2.5 分形分析	14
1.3 分形多孔介质的分形维度数	19
1.3.1 精确自相似分形多孔介质的分形维度数	19
1.3.2 统计自相似分形多孔介质的分形维度数	20
1.3.3 多相分形多孔介质的分形维度数	25
1.3.4 二维和三维分形多孔介质的分形维度数	31
1.4 统计自相似分形多孔介质的孔隙率	31
1.4.1 二维分形多孔介质的孔隙率	32
1.4.2 三维分形多孔介质的孔隙率	33
1.5 最小和最大孔隙模型	33
1.5.1 最小孔隙模型	34
1.5.2 最大孔隙模型	34
1.6 分形多孔介质的比表面积	43
1.6.1 二维多孔介质的比表面积	43
1.6.2 三维多孔介质的比表面积	43
参考文献	44
第 2 章 分形多孔介质的渗流特性	49
2.1 引言	49
2.2 传统理论与方法	50
2.2.1 实验测量	51
2.2.2 数值模拟	52

2.2.3	传统分析	53
2.3	分形多孔介质的渗透率	55
2.3.1	引言	55
2.3.2	分形分析解	57
2.3.3	多孔介质渗透率的分形-蒙特卡罗方法	60
2.3.4	非牛顿流体通过分形多孔介质的渗流特性	64
2.3.5	考虑毛细压差后分形多孔介质的渗透率	69
2.3.6	Kozeny-Carman 方程分形分析	70
2.3.7	多孔介质分形重构和渗透率预测	73
2.4	非饱和分形多孔介质的渗透率	79
2.4.1	引言	79
2.4.2	相对渗透率的分形分析解 -I	81
2.4.3	相对渗透率的分形分析解 -II	85
2.4.4	考虑毛细压差后分形多孔介质的相对渗透率	88
2.5	多孔介质里的流动阻力	90
2.5.1	传统模型	91
2.5.2	平均水力半径模型和毛细管孔-喉模型相结合的阻力模型	94
2.5.3	多孔介质里流动阻力的分形分析	101
2.6	多孔介质平面渗流	107
2.6.1	达西速度	107
2.6.2	多孔介质连续性方程	108
2.6.3	状态方程	108
2.6.4	分形多孔介质径向渗流	109
2.6.5	裂缝型分形多孔介质的平面径向渗流	113
2.6.6	多孔介质一维渗流	115
	参考文献	118
第 3 章	类分形树状分叉网络的输运特性	130
3.1	树状分叉网络	130
3.1.1	引言	130
3.1.2	Murray 定律及其推广	134
3.1.3	单分叉结构的优化	139
3.1.4	类分形树状分叉网络	146
3.2	类分形树状分叉网络的传热特性	151
3.2.1	类分形树状分叉网络导热特性及其应用	151
3.2.2	分叉微通道网络的对流换热特性及其应用	166

3.3	类分形树状分叉网络的渗流特性	174
3.3.1	类分形树状分叉网络的渗流特性	175
3.3.2	各向异性多孔介质的径向渗流特性	187
3.4	类分形树状分叉网络的传导性标度律	199
3.4.1	类分形树状分叉网络电导标度律	199
3.4.2	类分形树状分叉网络传热标度律	202
3.4.3	类分形树状分叉网络传质标度律	205
	参考文献	209
第 4 章	多孔介质启动压力梯度的分形分析	219
4.1	引言	219
4.2	分形多孔介质中宾厄姆流体流动的启动压力梯度	220
4.3	“点到线”类分形树状分叉网络中宾厄姆流体流动的启动压力梯度	224
4.4	嵌套类分形树状分叉网络的双孔隙率介质中宾厄姆流体的启动压力梯度	230
4.5	嵌套随机类分形树状分叉网络的双孔隙率介质中宾厄姆流体的启动压力梯度	236
	参考文献	243
第 5 章	自发渗吸的分形分析	247
5.1	自发渗吸现象概述	247
5.2	自发渗吸影响因素	248
5.2.1	初始含水饱和度	249
5.2.2	岩石物性	249
5.2.3	润湿性	249
5.2.4	边界条件	250
5.2.5	温度	251
5.3	自发渗吸的传统模型	251
5.3.1	单毛细管渗吸 LW 方程及其改进	251
5.3.2	Terzaghi 模型及其改进	253
5.3.3	Handy 模型及其改进	254
5.4	自发渗吸的标度模型	255
5.4.1	无因次时间	255
5.4.2	归一化采收率模型	256
5.5	自发渗吸的分形模型	258
5.5.1	多孔介质分形理论基础	258
5.5.2	多孔介质自发渗吸的分形模型	259

参考文献	268
第 6 章 分形多孔介质中气体流动与扩散的输运特性	277
6.1 引言	277
6.2 多孔介质分形表征	278
6.2.1 弯曲毛细管束模型的分形表征	279
6.2.2 类分形树状分叉网络的分形表征	281
6.3 分形多孔介质中气体流动输运特性	282
6.3.1 滑移流动区多孔介质中气体滑移因子的分形分析	282
6.3.2 双重多孔介质中气体渗透率的分形分析	288
6.3.3 非等温情况下接触面间多孔区域气体泄漏率的分形分析	293
6.4 分形多孔介质中气体扩散输运特性	299
6.4.1 毛细管束模型中气体扩散率的分形分析	300
6.4.2 多孔基质嵌入树状分叉网络后气体扩散系数的分形分析	304
参考文献	309
第 7 章 多孔介质热导率的分形分析	319
7.1 引言	319
7.2 多孔介质热导率的颗粒链分形模型	322
7.2.1 多孔介质热导率分形模型概述	322
7.2.2 颗粒链分形模型	323
7.3 多孔介质等效热导率的自相似分形几何模型	326
7.3.1 谢尔宾斯基地毯模型	326
7.3.2 谢尔宾斯基地毯类通用模型	331
7.4 非饱和多孔介质等效热导率的自相似分形几何模型	338
7.4.1 谢尔宾斯基地毯模型	338
7.4.2 谢尔宾斯基地毯类通用模型	346
7.5 多孔介质热弥散系数的分形分析	353
7.5.1 引言	353
7.5.2 热弥散系数研究进展	354
7.5.3 热弥散系数的分形模型	355
7.6 多孔介质壁面区域传导性分形分析	358
7.6.1 多孔介质输运性质基本分形模型	359
7.6.2 壁面附近输运特性的传统模型	360
7.6.3 壁面附近输运特性的分形分析	360
7.7 干热岩裂缝型双孔隙率介质的热输运	363
参考文献	369

第 8 章 纳米流体热导率分形分析	378
8.1 引言	378
8.2 纳米流体热导率研究进展	379
8.2.1 实验研究	378
8.2.2 纳米流体导热系数理论研究	381
8.2.3 纳米流体强化导热机理	382
8.3 固-液膜层和颗粒团聚对纳米流体热导率的影响	384
8.4 纳米流体有效热导率的分形分析	392
8.5 纳米流体有效热导率的分形-蒙特卡罗模拟	397
参考文献	400
第 9 章 粗糙界面接触传导的分形分析	405
9.1 引言	405
9.2 粗糙表面的分形-蒙特卡罗模拟	406
9.2.1 粗糙表面的传统研究方法	406
9.2.2 粗糙表面的数学描述	409
9.2.3 粗糙表面上微凸体大小和位置的确定	412
9.2.4 基于分形-蒙特卡罗方法的粗糙表面生成	413
9.3 粗糙表面接触热导的分形模型	418
9.3.1 概述	418
9.3.2 粗糙表面的接触模型和压强分布	420
9.3.3 粗糙表面的接触热导计算	423
9.3.4 附录	431
参考文献	432
第 10 章 沸腾换热分形理论与方法	439
10.1 引言	439
10.2 核态池沸腾换热分形分析	440
10.2.1 传统方法和模型	440
10.2.2 分形分析	442
10.3 过冷流动沸腾换热分形分析	447
10.3.1 传统方法和模型	447
10.3.2 分形分析	449
10.4 核态池沸腾临界热流密度的分形分析	452
10.4.1 现有模型和经验关系式	452
10.4.2 分形分析	455
参考文献	458

第 11 章 滴状凝结换热分形分析	463
11.1 引言.....	463
11.2 液滴大小分布的模型.....	464
11.2.1 液滴成核密度.....	465
11.2.2 液滴大小的静态分布.....	466
11.3 滴状凝结换热的分形分析.....	470
11.3.1 单个液滴的凝结换热模型.....	470
11.3.2 表面凝结换热的分形分析.....	471
参考文献.....	475
第 12 章 多孔介质介电常数分形模拟	480
12.1 引言.....	480
12.2 电介质的介电常数.....	481
12.3 多孔电介质介电常数的传统模型.....	482
12.3.1 Lichtenecker 法则.....	483
12.3.2 模块系统法模型.....	483
12.3.3 Bruggeman 有效介质模型.....	484
12.4 多孔低 k 电介质的自相似分形模型.....	484
12.5 多孔低 k 电介质的介电常数的分形-蒙特卡罗模拟.....	488
参考文献.....	495
索引	498

绪 论

多孔介质(或叫多孔材料,本书一律称为多孔介质)是指内部含有孔(在材料科学与工程领域称为“缺陷”)的固体介质。也可以这样定义多孔介质,即把含有规则的或任意形状的、连通或不连通的孔洞或洞穴及其固体介质组成的介质或材料称为多孔介质。

多孔介质到处存在,例如,土壤、地壳、沙石、棉花、木材、骨头、钢铁、水泥、陶瓷、电脑和手机芯片、人体和动物组织与脏器、植物等。多孔介质大致可以分为四大类:天然多孔介质、物理化学多孔介质、工程多孔介质和生物多孔介质。所谓天然多孔介质是指天然形成的,如地下油气藏、地下水资源就是存储在地下天然形成的多孔介质中;土壤是我们每天看到的天然多孔介质;各种矿藏就埋藏在天然形成的多孔的地质和地层结构中;我们的地球实际上就是一个多孔的椭球体。所谓物理化学多孔介质就是通过采用物理和化学方法得到的材料,它们也是多孔介质,如实验室里制造得到的各种复合材料等。工程多孔介质通常指在工程上大规模生产和制造得到的材料,如纤维与服装、钢铁、水泥、陶瓷等,其中孔隙大小直接影响这些材料的力学强度、传热传质性能、声学 and 电学特性等。还有如电脑和手机芯片也是多孔介质,其孔隙大小直接影响电脑和手机的性能。所谓生物多孔介质同样广泛存在于自然界,如人体、动物、植物等都是多孔结构的。人体内的血液、水分和营养就是在人体这一多孔结构里循环的,人体与动物的器官如肝、肺、肿瘤和癌组织等都是多孔介质。

所谓多孔介质里的运输是指在其中的液体、气体、电、热、声、波等在多孔介质里的传递。如血液在人体多孔介质里的运输,其特性直接与人们的健康密切相关;气体在人和哺乳动物呼吸系统里的循环,其正常与否与呼吸系统的健康与否直接有关;体检用的核磁共振和 B 超就是利用了波在多孔介质中的传播;芯片里的孔隙大小和分布直接影响其电学性能和热学性能,有报道说理论上芯片可以做的更小,但其散热问题已成为制约芯片进一步发展的瓶颈;肿瘤和癌组织的冷-热治疗就是利用了生物多孔介质里的热运输,并由此引发了生物多孔介质运输理论的研究兴趣;要设计优良的隔音材料,就必须研究声波在多孔材料里的传输特性;土壤里的水分和肥料的运输特性与农作物的生长和丰收有关;世界各国都把石油、天然气和煤看成是战略物资,直接与国家的安全有关。我国长期以来投入了大量资金和人员来研究石油、天然气和煤层气、地质探矿等,设立了许多大、中课题,这些课题都与研究多孔介质里的复杂运输物理直接相关。

多孔介质到处存在。可以毫不夸张地说,没有多孔介质,就没有动物,就没有植物,就没有我们人类,就没有我们的世界。研究多孔介质里的输运与人类和动植物的健康生存、国家的安全、现代文明社会的发展息息相关。

多孔介质的研究历史已经有一百多年了。多孔介质的输运特性和输运机理长期以来吸引了人们的持久的研究兴趣。多孔介质的宏观输运性质如热导率、电介质常数和水力传导系数等与孔隙表面形状、孔隙大小、毛细管弯曲特性、孔隙和颗粒尺度、流体性质、雷诺数、流动-热的耦合等因数密切相关。迄今,人们对于这些问题还没有完全认识清楚,从而使多孔介质的输运特性和输运机理成为经久不衰的重要研究方向。

对于多孔介质的输运特性和输运机理的研究通常采用实验测量研究、数值模拟计算和解析分析三大途径。最早实验研究多孔介质流动性质的是法国工程师 H. Darcy(达西, 1856 年), 为了法国第戎市 (Dijon) 的水源问题, Darcy 研究了水在直立均质砂柱中的流动问题, 总结出了流量 (或流动速度) 与砂柱两端水的压力差之间的关系式, 这一关系式后来被称为达西定律。这一著名的定律一直被沿用到今天。之后, 围绕着实验研究, 人们提出了各种实验方法和测试手段。随着计算机和图像处理等高科技的发展, 给多孔介质输运性质的实验研究又注入了新的活力, 如计算机实时测量、可视化测量技术、核磁共振测量技术、电镜测量以及同步辐射测量技术等。

数值模拟研究多孔介质的输运性质也是研究多孔介质输运性质的一个重要手段。人们通常选用一个单元结构, 其中包含有固体颗粒或固体骨架以及孔隙空间, 然后采用适当的数值方法如有限差分方法、有限元方法、边界元方法、蒙特卡罗方法等。最近, 随着高速计算机和计算技术的发展, 格子玻尔兹曼方法常被用来模拟多孔介质的输运性质。理论上, 该方法对于模拟复杂的实际多孔介质里孔隙尺度的流动和传热问题特别有效。采用同步辐射光可以测取多孔介质微结构数据, 再利用图形学处理技术识别固体骨架及孔隙数据, 重建三维多孔介质数字结构, 然后采用适当的数值模拟方法模拟多孔介质中的流动。在微尺度情况下, 分子动力学方法也被用来模拟多孔介质中的流动、扩散和热输运。

实验直接测量和数值模拟多孔介质里的输运问题时, 其测量或模拟结果通常用曲线图或表格形式给出, 或综合成经验关联式, 这些经验关联式通常含有一个或多个物理意义不清楚的经验常数, 如 1.33, 5.08 等。对于这些经验常数所隐藏的物理机理吸引了人们的探索兴趣。

为了弄清楚多孔介质宏观输运性质与微观机理的关系, 人们往往选择解析分析研究。可是, 这只能对于简单几何结构才能分析求解, 如正方形结构、等边三角形结构、柱形结构等。对于孔隙或颗粒大小和形状随机分布和孔隙或颗粒在空间随机分布的情况, 传统分析求解显得无能为力。幸运的是, 已有大量研究表明, 天然

形成的多孔介质和部分人工制造的多孔介质是分形结构的,即孔隙大小分布或孔隙和固体微结构结构是分形结构的,或两者近似为分形的,从而为多孔介质宏观输运性质与微观机理相联系的研究提供了新的基础和途径。

为了有助于对分形理论有更深刻的理解,这里有必要简单回顾一下几何学的发展历程。

自人类在地球上诞生以来,人类对于自然界和几何的认识经历了漫长的年代,那时人类仅能区分物体的形状如圆、三角形、球形、正方形、规则和不规则物体,在长达数万年甚至几十万年的时间跨度里,人类不知道如何定量计算圆形、三角形、正方形、球形等物体的周长、面积或体积等。所以那时人类对于自然界和几何的认识停留在描述性的 (descriptive) 水平上。直到公元前 3 世纪,古希腊人欧几里得总结了古希腊人积累的大量几何知识,写了一本叫做《几何原本》的书,书中整理和总结了古希腊人大量的几何学发现和成果。欧几里得这一著作标志着人类认识自然和几何的第一次飞跃,标志着人类对于自然和几何的认识由描述性上升到了理论,即从此人类可以用几何理论来进行有关的计算和预测 (predictive)。欧几里得几何从数学上来看是关于平面和三维空间中常见的几何。后来人们又逐渐总结得到了点、线和面分别为零维、一维和二维的,即欧几里得几何的维数是整数的,即零维、一维、二维和三维。其后,欧氏几何学又经历了 2000 多年的发展。在 20 世纪 60 年代人们发现地球上的岛屿、海岸线、天空的云彩等物体的维数不是整数的,而是连续的,即可以是分数的。由此导致了分形几何理论的建立。与发展了 2000 多年的欧氏几何学相比,分形几何理论的发展还处在“婴幼儿”时期,因而分形几何理论有着巨大的发展空间和旺盛的生命力。

1967 年美国数学家 B.B. Mandelbrot 在其论文《英国的海岸线有多长?统计自相似与分维维数》中首次创造性地提出了分形几何的概念。1982 年 Mandelbrot 利用拉丁文“fractus”创造了“fractal”这个英文、法文、德文共用的词,中文被译成为“分形”,其意思是“不规则的”“分数的”“支离破碎”的物体。B.B. Mandelbrot 提出了“体或几何图形的维数可以是连续的”这一独特的论断,这就是说分形物体的维数可以是分数。这是人类认识自然和几何的第二次飞跃。自 20 世纪 80 年代以来,在数学、计算机图形学和应用科学的推动下,分形几何的基础理论在多种其他学科也得到了迅速发展。现在,分形几何理论已在物理学、化学、地质与地球物理学、计算机图形学、生物科学、医学、材料科学与工程、通信、能源与环境等学科及工程领域里的应用取得了很大的成功。

分形几何理论始创立于 20 世纪 70 年代中期,该理论诞生一开始就引起了人们的极大兴趣,与耗散结构、混沌并称 70 年代科学史上的三大新理论和新发现。现在分形几何理论作为一门独立的学科,已有 30 多年的研究与发展历史。在分形几何理论创建至今的短短 30 多年中,其发展大致可以归纳为三个阶段。

第一个阶段是从 1967~1982 年,这一阶段主要是 B.B. Mandelbrot 的两本著作的发表:《分形:形状、机遇与维数》(*Fractals: Form, Chance and Dimension*)(1977 年)和《自然界中的分形几何》(*The Fractal Geometry of Nature*)(1982 年)。从而标志着分形几何理论的诞生,B.B. Mandelbrot 因此被科学界誉为“分形之父”。

从 1982 年到 20 世纪 80 年代末,这近十年期间可称为分形发展的第二阶段,也是它的黄金和青年时代。那时大批的数学、物理、化学、生物、材料科学、地质与地球物理学等学科的科学家和工程师都进入了分形几何的研究领域。从而使分形几何在 80 年代空前活跃,国际上有关分形几何理论与应用的学术会议几乎每年召开 1~2 次。我们国内有关分形几何理论与应用方面的学术会议大约为每年就有至少一次。而把分形及其相关的方向作为国内外许多学术会议的一个专题是常见的。这些说明了分形几何理论逐步向深度与广度方向发展。

进入 20 世纪 90 年代后至今,分形几何理论的研究进入了第三个发展阶段。这是一个深入发展与开拓应用的阶段。在这十多年里,分形几何理论结合各个学科特点,又有了新的发展,包括理论与应用方面。其中分形几何理论与多孔介质输运理论相结合形成了若干新理论、新方法和新技术。发展分形几何理论和多孔介质输运理论是我们科学工作者所追求的目标。本书旨在总结我们课题组十余年来在多孔介质分形理论与多孔介质输运理论方面的研究成果,并旨在提供一套研究多孔介质输运物理的理论和方法,衷心希望本书的出版能有助于推动该学科方向研究工作的进一步深入和发展。