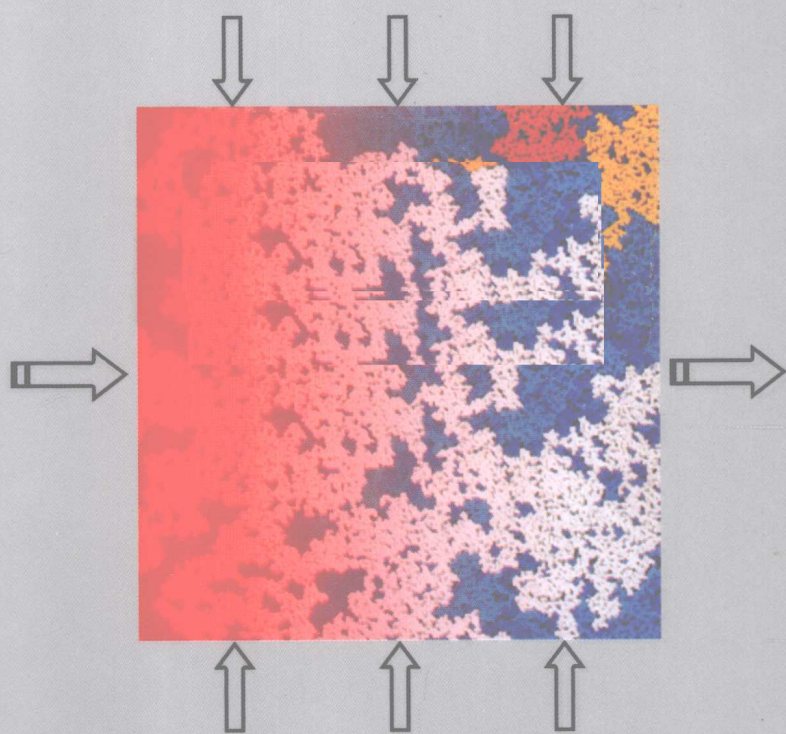


多孔介质多场耦合作用 及其工程响应

赵阳升/著



科学出版社
www.sciencep.com

多孔介质多场耦合作用 及其工程响应

赵阳升 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共22章,系统论述与介绍了多孔介质多场耦合作用这一新兴学科领域的理论、实验、工程技术的各个方面。本书先介绍了多孔介质固体、流体特性与普遍的守恒定律以及渗流力学、固体力学、传热传质学、热力学与反应动力学、逾渗理论、数值解法的核心内容,这些也是本书的基础理论。本书用12章的篇幅介绍了各种多孔介质多场耦合作用的实验方法、实验设备和新的物性规律,详细论述了其理论架构、各类耦合问题的理论、相关工艺与工程实例。书中内容囊括了作者及其学术团队二十多年的大量研究成果,也涵盖了国内外相关研究的最新进展。

本书可作为资源能源、土木、环境、地质、力学、物理学、化学等工程与科学领域的工程技术人员、研究者、本科生、硕士与博士研究生的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多孔介质多场耦合作用及其工程响应/赵阳升著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-027573-8

I. 多… II. 赵… III. 多孔介质-耦合-研究 IV. 0357.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第087748号

责任编辑:胡凯 刘凤娟/责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

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

*

2010年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年6月第一次印刷 印张:30 1/2

印数:1—2 000 字数:730 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

我*高兴地拜读了太原理工大学赵阳升教授撰写的学术专著《多孔介质多场耦合作用及其工程响应》,深感这是一本经过长期系统研究而精心完成的佳作,实在难能可贵、可喜可贺!

多孔介质多场耦合作用问题是最近由固体力学、渗流力学、传热传质学、物理化学、反应理论等众多学科与多门工程科学相互交叉、融合而形成的一门新兴边缘学科。二十多年来,赵阳升教授及其学术团队在承担国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目和多项国家自然科学基金面上项目的基础上,研发了一系列新的实验设备,揭示出多个多孔介质多场耦合作用的表观现象及其演化规律,如经修正的土体有效应力规律、三维应力条件下岩体裂隙和裂缝中气、液及气液二相流体的渗流规律、溶解渗流与热解渗流规律等。结合资源、能源开发与岩土工程建设,书中提出了固气耦合、固液耦合、固流热耦合、固流热传质耦合的数学模型及其数值解法,并使之直接应用于溶浸采矿、煤层气和地热开采、岩土边坡稳定、矿山地面沉陷、煤矿水害防治等多处场合,提出了多项新工艺与新发明,均在该书中得到反映,进而给出了详尽的阐介与理论推演,这在国内外学术界均属罕见,具有相当的深度和新意。

该书是一本系统论述该学科领域,并将理论、实验与工程技术结合为一体的力作,全书体系与章节安排颇具匠心:先说明了多孔介质固体和流体的特性与普遍守恒定律,进而精练而简洁地阐介了渗流力学、固体力学、传热传质学、热力学与反应动力学、逾渗理论等的核心内容及其数值解法,并将其作为该书的理论基础,再后用大量篇幅详细论述了各种多孔介质多场耦合作用的实验方法、实验设备和新的物性规律;用单独一章细致演引了多孔介质多场耦合作用的力学机理与理论架构,最后更用12章的篇幅讨论了各类耦合问题的理论和工程响应规律,以及由作者提出的诸类相关工艺与工程实例的方方面面。该书引用了课题组成员的丰硕成果,也涵盖了国内外相关科技论文的部分最新进展。

赵阳升教授早年曾在同济大学我处攻读工学博士学位(1989~1992),主要从事多孔介质固气耦合作用方面的研究,他完成的“煤体瓦斯耦合理论及其应用”的博士学位论文得到了评审专家的高度赞扬,并于1994年完成了他在该学科领域的初作《矿山岩石流体力学》,它也得到了业界同行的广泛好评与大量引用。嗣后二十多年来,他潜心进取,团结带领一支不断壮大的学术团队,默默耕耘于这一新兴边缘学科的基础实验与理论创新,孜孜不倦地在科学理论的指导与推动下谋求采矿工程技术的进步,在这条艰难而又极富活力的道路上不断攀登,并据以发展了多项该领域的新工艺与新设备,获得了国家技术发明奖和多项省部级一等奖。这些工作凝结升华而成今日之巨篇,应视其为一部在相关学科与工程领域深富学术内涵、又有重要理论与工程实用价值的专著。

我衷心祝贺该书的付梓问世,深信它必将受到国内相关学科与工程领域广大科技工作者

* 孙钧先生,同济大学资深荣誉教授,中国科学院院士,前国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席,中国岩石力学与工程学会名誉理事长,中国土木工程学会顾问、名誉理事(前副理事长)。

的热烈欢迎，并从中深受教益。我期待着该书的早日出版，并乐意写述以上一点文字，是为序。

孙 钧

己丑年晚秋写于同济园

前 言

多孔介质多场耦合作用是固体力学、渗流力学、传热传质学、物理化学等学科与众多工程科学相互交叉而形成的新兴边缘学科。它是一门伴随着油气田开采、煤成气开采、煤地下气化、溶浸采矿、地热开采、水文地质、地下水动力学、环境科学、水利水电工程、水库诱发地震、海水入侵、岩体加固、地下水迁移引起的地基沉降变形、煤矿矿井突水与瓦斯突出、水上水下煤层开采、水力压裂等重要研究领域的发展而形成的一门综合性的、跨学科的边缘学科。它的研究对象是多孔介质和流体的变形、渗流、传热、传质、反应的相互作用;独特的研究方法是建立在多孔介质多场耦合相互作用之上的理论、实验与工程措施的基础上;固定的服务领域是资源与能源、土木、环境、地震等工程领域。

在研究这一大类工程问题方面,单纯的固体力学(岩体力学)、渗流力学、传热学、传质学、物理化学是在假设与估计其他相关物理场作用的基础上,给出对工程实际的描述,显然,这存在较大的误差,甚至错误。多孔介质多场耦合作用分支学科是通过考虑固体变形与流体渗流、热量传输、质量传输、化学反应与物质相变的相互作用,给出工程实际性态的刻画与描述的,可见远比单一场作用的研究方法广泛与深入。

章梦涛教授在 1990 年就在一篇文章中论述了变形与渗流相互影响的岩石力学发展战略问题,指出:研究内容应包括对岩体渗流规律的研究、流体流动对岩体物理力学性质和本构关系影响的研究。在研究方法上,应该沿着现场观测、模型试验和理论分析相结合的思路,进行综合研究、相互验证和相互补充,同时开展数值模拟试验工作。由作者撰写的《矿山岩石流体力学》较早地系统论述了这一新兴边缘学科的理论、本构规律和诸多工程应用领域。

实践推动了多孔介质多场耦合作用边缘学科的快速发展。

石油、天然气与煤成气开采,都提出了许多复杂的多孔介质多场耦合作用的理论与工程问题。例如,在研究油井的自喷时,就需要考虑岩体与石油相互作用而形成的储油层的超高孔隙压;为了提高油气田回采率而广泛进行水力压裂、油气层注水注热、注化学浆驱替,就需要研究合理的压裂工艺以及固体变形与水、气、石油、热的相互作用。国内外为这项研究已投入了几十、几百亿元的研究经费,也同步取得了较好的工程效果。

在环境科学中,特别需要研究的是核废料的处置、高污染化学废料的处置以及化学流体通过传质过程与地下水相溶,反馈危害到人类的生存环境问题。这一类问题的特点是,核废料及化学废料对其周围的岩土体有较强的热破裂作用与化学腐蚀作用,它一方面弱化了岩体的抗变形能力,另一方面增大了岩体的渗透能力。近几十年来,这些问题一直是世界各国关注和研究的重点。

在地震科学中,由于区域地质体在地应力场的作用下发生变形及破坏(发生地震),在其变形过程中(特别是岩体的剪胀变形阶段)显著地影响到区域地质体中地下水的迁移与动态变化。因此,地下水动态监测一直作为地震预报的主要手段之一。另外,国内外已有大量水库诱发地震的实例,这是由于水库蓄水后,改变了区域应力场的局部平衡态而导致的一种

结果。

在水利、水电工程中,广泛进行了坝基、坝体、边坡与渗流相互作用的研究。1959年法国马尔帕塞(Malpasset)拱坝在初次蓄水后即发生全坝溃决;1963年意大利瓦扬(Vajiont)拱坝上游左岸大滑坡;1963年我国梅山连拱坝右岸基岩出现大量漏水险情,都是在设计时缺乏这些考虑所致。

近几十年,国内外许多城市与矿区,对地下水的超采导致地基沉降,特别是沿海城市的海水入侵,迫使众多国家都进行着相关的研究与工程工作。

在我国煤田中,目前已发现大量的煤层位于富含水的奥陶纪灰岩之上,或位于河流与湖泊之下。为了开采这些煤层,世界上众多学者一直进行着相关的工作,主要通过研究煤、岩体系统对水的隔离性能以及水对煤、岩体的破坏作用,从而采取相应的封堵措施与突水的预测预报措施,以保证煤炭的安全开采。

煤矿瓦斯突出与爆炸,一直是煤炭开采中严重的隐患。在世界采矿史上,发生瓦斯突出与爆炸的事件已达几十万次,而瓦斯突出正是瓦斯气体与煤体系统失稳破坏发生的重大事件,而煤层瓦斯(或称煤层气)的开采,特别是低渗透煤层的煤层气的开采,正是建立在多孔介质多场耦合作用的研究之上。

地热作为绿色的、可再生的资源,被世界各国确定为维系社会可持续发展的新的绿色能源,它分为天然热水资源与高温岩体地热资源,其开采理论、工艺涉及岩体变形、破裂、多孔介质特征变化、地热流体的传输与相变等耦合作用。

固体矿物的流体化开采(或称原位溶浸采矿),是通过高温热解、化学溶解、萃取和生物等技术,使固体矿物变为流体。它是一种非常方便与经济的开采方法,已在铀矿、铜矿、盐类矿床开采中使用。近年来,煤的地下气化、油页岩原位热解开采也发展十分迅速,这类工程涉及固体的熔融、溶解、气化、热解、相变、生物作用等化学反应,是关于多孔介质变形与宏观结构变化、溶浸流体传输、传热与传质等更为复杂的物理与化学的耦合问题。

综上所述可见,多孔介质多场耦合作用的各个方面的确是目前科学研究的热门课题。

从研究方法角度分析,大致可以归结为以下几个方面:

① 研究描述各类问题的耦合数学模型,例如,岩体与水,岩体与黏性流体,岩体与气体,固、气、液体的耦合模型,变形与渗流,传热传质的耦合作用模型,并寻求其合适的求解方法(大多采用数值方法)。② 我们的研究发现,在评价与研究多孔介质材料性态时,物理科学的逾渗概念、理论与方法是如此深刻和有用,它可以回答孔隙率多少时,孔隙裂隙的数量和形式如何组合时,各类固体进入渗流的门槛值。研究流体(水、天然气、化学流体)与岩体等多孔介质材料的变形、渗流、传热传质等相互作用的本构规律,其中不乏新型试验设备的研制,例如,有效应力规律——岩体在化学流体、核废料作用下的岩体变形特性的改变、岩体渗流特性的改变、传热特性的改变、化学反应与相变及传质特性的改变等。③ 研究多孔介质多场耦合作用问题的新工艺与新方法,以达到预期的工程目的。

作者及其研究团队潜心于这一领域的研究二十余年,在一系列的国家自然科学基金项目(国家杰出青年科学基金(59625409),国家自然科学基金重点项目(50134040、50434020、50534030),国家自然科学基金面上项目(50174040、10102013、50304011、50434050、50404017、50506018、50706031、50804033、50874077、50874078))的资助下,涉猎了诸多科学与工程领域,较早或同步地与国内外同行进行着同样的理论和工程科学与技术问题的研究,积累了许

多相关的研究成果,尤以岩石力学和资源与能源工程领域见长。本书较系统地介绍这一分支学科的理论、规律与工程技术的方方面面,期望它能成为相关研究领域人员的一本好的参考书。本书凝结了研究团队成员多年来深入科学研究的心血,他们是胡耀青、杨栋、梁卫国、冯增朝、常宗旭、万志军、张渊、曲方、吕兆兴、康志勤、康健、赵建忠、石定贤、康建荣、孙可明、张昌锁、徐素国、邢茂、郜保平、张宁、冯子军、赵金昌、李义、王瑞凤、李志萍、文再明、康天合、宋选民、段康廉、靳钟铭、马光第、张文,在此对他们的付出表示衷心的感谢,也要感谢 2008 级硕士研究生李士勇同学为本书文字与图件整理所付出的大量劳动。感谢刘生玉博士撰写了第 8 章的初稿。本书引用了国内外许多学者的著作中的观点与图表,在此也表示衷心的感谢。

作 者

2010 年 01 月

目 录

序

前言

第 1 章 固体介质宏细观组构、结构与特性	1
1.1 岩石	1
1.1.1 岩石和矿物	1
1.1.2 岩石的分类	1
1.1.3 决定岩石物理性质的主要因素	2
1.2 岩石孔隙的基本性质	3
1.2.1 孔隙率与有效孔隙率	3
1.2.2 孔隙率、结构和排列	3
1.2.3 孔隙率的测定方法	4
1.2.4 比面	6
1.3 煤体孔隙的分布特征	8
1.3.1 煤体孔隙的成因分类	8
1.3.2 煤体孔隙的孔径分类	8
1.3.3 高精度显微 CT 试验系统	9
1.3.4 煤体孔隙的空间分布状态	10
1.4 几类砂岩的孔隙分布	11
1.4.1 砂岩孔隙的 CT 扫描分析	11
1.4.2 粗、中、细砂岩中最大孔隙团空间随机分布状态	13
1.4.3 孔隙率对连通团数量和孔隙团表面积的影响	15
1.5 岩体裂缝的描述与统计分析	16
1.5.1 分类和定义	16
1.5.2 裂缝的基本参数	17
1.5.3 裂缝的测量	22
1.6 岩体裂缝系统二维分形分布规律	24
1.6.1 岩体裂缝分布的分形方法	24
1.6.2 岩体裂缝走向不分组的分形规律与无标度区	27
1.6.3 岩体裂缝走向分组的分形规律	29
1.6.4 二维裂缝分布的分形仿真	31
1.6.5 岩层裂缝数量分形分布相关规律	33
1.7 岩体裂缝面的三维分形分布	35

1.7.1	岩体裂缝面数量分布的三维分形分析方法	35
1.7.2	强随机分布的裂缝面数量的三维分形分布规律	36
1.7.3	弱随机分布的裂缝面数量服从三维分形分布规律	37
1.7.4	强随机分布裂缝面数量二维与三维分形参数相关规律	38
第 2 章	流体的组构与特性	39
2.1	流体	39
2.1.1	流体的物理属性	39
2.1.2	流体质点的概念	39
2.1.3	流体的分类	40
2.2	流体的基本性质	40
2.2.1	流体的密度	41
2.2.2	流体的黏度	42
2.2.3	流体的压缩系数	44
2.3	地下水与含水层	45
2.3.1	垂直剖面上的地下水分布	45
2.3.2	含水层的分类	46
2.3.3	含水层的性态	47
2.4	石油、天然气与煤层气	48
2.4.1	石油与天然气	48
2.4.2	煤层气	56
2.5	超临界流体	57
第 3 章	连续介质理论与普遍的守恒定律	59
3.1	连续介质理论	59
3.1.1	多孔介质与连续介质	59
3.1.2	流体简化作连续介质的方法	60
3.1.3	多孔介质的连续介质理论与方法	60
3.2	岩体介质性态的分类	62
3.2.1	裂隙岩体的特征体积	62
3.2.2	岩石骨架介质类型	63
3.3	多孔介质中的流体输运速度	64
3.3.1	多组分流体的质量、体积平均速度	64
3.3.2	实质导数	66
3.4	普遍的守恒定律	66
3.5	流体连续介质的质量、动量和能量守恒方程	68
第 4 章	流体在多孔介质中的传输理论	72
4.1	不变形多孔介质中的质量守恒	72
4.1.1	基本连续性方程	72

4.1.2	不可压缩流体渗流的控制方程	73
4.1.3	可压缩流体渗流的控制方程	74
4.2	可压密介质中的质量守恒	74
4.2.1	固体骨架的可压缩性	74
4.2.2	只有垂向压密的问题	75
4.2.3	三相与三维的压密问题	76
4.3	承压含水层和越流含水层中的流动	79
4.3.1	承压含水层中的流动	79
4.3.2	越流含水层中的流动	80
4.4	流函数与势函数	81
4.5	初边值条件	84
4.5.1	解的适定性问题	84
4.5.2	给定势的边界	85
4.5.3	给定通量的边界	86
4.6	裂隙岩体的渗流模型	87
4.6.1	裂隙网络渗流模型	87
4.6.2	拟连续介质渗流模型	90
第 5 章	固体力学基础	92
5.1	应力分析及应力平衡方程	92
5.1.1	应力	92
5.1.2	应力平衡微分方程	93
5.1.3	斜面上的应力	94
5.1.4	主应力	95
5.2	应变分析及变形协调方程	96
5.2.1	应变	96
5.2.2	应变分量的坐标变换式	97
5.2.3	变形协调方程	98
5.3	应力与应变关系	98
5.4	弹性力学问题的数学模型及解法	101
5.4.1	数学模型	101
5.4.2	弹性力学问题的解法	102
5.4.3	圣维南原理与叠加原理	102
5.5	弹性力学的平面问题	103
5.5.1	平面应变问题	103
5.5.2	平面应力问题	103
第 6 章	传热学	105
6.1	热量传输概述	105

6.1.1	热量传输方式	105
6.1.2	传热过程与传热系数	105
6.2	热传导定律与理论	106
6.2.1	导热基本定律	106
6.2.2	导热控制方程	107
6.3	对流传热定律与理论	109
6.3.1	对流换热概述	109
6.3.2	对流换热的控制方程	109
6.3.3	对流换热的边界层微分方程	110
6.4	热辐射基本定律	112
第 7 章	传质理论	114
7.1	传质的基本方式与传递定律	114
7.1.1	传质理论的早期发展	114
7.1.2	扩散传质	115
7.1.3	扩散传质的速度与通量	115
7.1.4	对流传质	119
7.2	传质微分方程	120
7.2.1	传质的质量守恒方程	120
7.2.2	传质微分方程的特例	123
7.2.3	传质问题的初边界条件	124
7.3	气体、液体与固体中的扩散系数	125
7.3.1	气体中的扩散系数	125
7.3.2	液体与固体中的扩散系数	126
第 8 章	热力学与反应动力学	128
8.1	热力学基础	128
8.1.1	热力学状态和状态函数	128
8.1.2	热力学定律	129
8.1.3	热力学基本方程	131
8.1.4	偏摩尔量和化学势	132
8.2	化学平衡和相平衡	132
8.2.1	化学平衡	132
8.2.2	相平衡	134
8.3	化学反应动力学	137
8.3.1	反应速率方程	137
8.3.2	典型复杂反应	138
8.3.3	温度对反应速率的影响	140

第 9 章 逾渗理论	142
9.1 逾渗现象	142
9.2 单纯孔隙介质的逾渗	143
9.2.1 定义与方法	143
9.2.2 二维孔隙介质逾渗规律	144
9.2.3 三维孔隙介质逾渗规律	145
9.3 孔隙裂隙双重介质的逾渗	146
9.3.1 孔隙裂隙双重介质的逾渗研究方法	146
9.3.2 二维单一裂隙多孔介质的逾渗规律	147
9.3.3 二维孔隙裂隙双重介质的逾渗规律	148
9.3.4 三维孔隙裂隙双重介质逾渗模型	150
9.3.5 三维孔隙裂隙双重介质逾渗规律模拟研究	151
9.4 煤体瓦斯逾渗机理	153
9.4.1 二维孔隙介质连通团分布规律与渗流机理	154
9.4.2 二维孔隙裂隙双重介质连通团分布规律与逾渗机理	155
9.5 油页岩热解的逾渗研究	156
9.5.1 油页岩孔隙结构随温度的变化规律	156
9.5.2 不同热解温度下油页岩孔隙结构的三维逾渗规律	158
第 10 章 连续介质理论的离散分析方法	165
10.1 离散分析的发展	165
10.2 有限差分法	166
10.3 有限元法	168
第 11 章 多孔介质多场耦合作用的本构规律	171
11.1 岩石的基本力学特性	171
11.1.1 岩石的全程应力应变曲线	171
11.1.2 三轴应力下岩石的特性	173
11.1.3 岩石的破坏机制与强度准则	174
11.1.4 不连续面的性状	176
11.2 岩体渗流的物性方程	177
11.2.1 线性渗流的物性方程	177
11.2.2 裂隙介质中的流动定律	181
11.3 流固耦合作用下渗流规律	183
11.3.1 应力与孔隙压作用的渗流特征	183
11.3.2 体积应力与孔隙压共同作用下的渗流规律	183
11.3.3 体积应力、剪应力与孔隙压对煤体渗透性的影响	185
11.3.4 三维应力下侧向应力对裂缝渗透系数影响的实验与理论分析	188
11.3.5 蠕变、破裂等不可恢复变形下的渗透性变化研究	191

11.3.6	岩石细观渗流规律的研究	192
11.3.7	吸附性气体的渗流规律	194
11.3.8	三维应力作用下裂缝中气体渗流规律	196
11.3.9	气液二相流体渗流规律	198
11.4	有效应力规律	199
11.5	流体作用下的岩体特性	202
11.5.1	水对岩体性态的影响	202
11.5.2	孔隙瓦斯对煤体特性的影响	207
11.6	THMC 耦合作用特性试验机研制	208
11.7	热力 (TM) 耦合作用特性	211
11.7.1	高温下岩石的力学特性	211
11.7.2	岩石的热学特性	217
11.8	THM 耦合作用下岩石渗透特征	220
11.9	THMC 耦合作用的本构规律	222
11.9.1	气煤热解的 THMC 耦合作用本构规律	222
11.9.2	钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性	227
第 12 章	多孔介质多场耦合作用的理论架构	231
12.1	理论架构	231
12.2	多孔介质多场耦合作用的机理分析	232
12.2.1	其他物理场对固体介质性态的影响	232
12.2.2	其他物理场对渗流的影响	233
12.2.3	其他物理场对热量传输特性的影响	233
12.2.4	其他物理场对传质特性的影响	234
12.3	多孔介质多场耦合作用的耦合数学模型	234
12.4	解耦策略与方法	235
第 13 章	固体变形与液体渗流耦合作用及其应用	237
13.1	连续介质固体变形与水渗流耦合作用模型及解法	237
13.1.1	数学模型	237
13.1.2	连续介质岩体水力学模型的有限元解法	238
13.2	拟连续介质岩体水力学模型	239
13.3	裂隙介质岩体水力学模型	240
13.4	煤层注水工程	241
13.4.1	煤体渗透特性分类	241
13.4.2	煤层注水防治冲击地压工程	243
13.4.3	煤层注水防治煤尘	244
13.4.4	煤层注水软化中硬煤试验放顶煤开采	245
13.5	承压水上采煤的裂隙介质固流耦合理论	247

13.5.1	带压开采三维裂隙介质固流耦合数学模型	247
13.5.2	带压开采数值模拟	248
13.5.3	顶板围岩应力的分布规律	249
13.5.4	底板围岩应力分布规律	250
13.5.5	底板围岩位移分布规律	252
13.5.6	太原组含水层水位随工作面开采的变化规律	253
13.6	固流耦合相似模拟理论与技术	254
13.6.1	固流耦合相似理论	255
13.6.2	固流耦合相似材料配制	256
13.6.3	三维固流耦合模拟试验设备	256
13.6.4	带压开采固流耦合模拟试验研究	259
13.7	边坡稳定性分析	265
13.8	水库诱发地震	267
13.9	开采地下水引起的地面沉降	269
第 14 章	岩体变形与气体渗流耦合作用与应用	271
14.1	煤层瓦斯渗流研究进展	271
14.2	拟连续介质煤体-瓦斯耦合作用数学模型	272
14.2.1	煤体瓦斯耦合理论的物理基础	272
14.2.2	瓦斯渗流方程	273
14.2.3	可变形多孔介质的运动方程	274
14.2.4	固气耦合数学模型	274
14.3	固体变形与气体渗流耦合数学模型的数值解法	275
14.3.1	瓦斯渗流方程的线性近似	276
14.3.2	瓦斯渗流方程的泛函及离散	277
14.3.3	固体变形方程的泛函及离散	278
14.4	煤矿钻孔抽放瓦斯的数值分析	280
14.4.1	试验区概况及模型简化	280
14.4.2	钻孔抽放瓦斯的数值实验	283
14.5	裂隙介质岩体变形与气体渗流的耦合数学模型	284
14.5.1	物理基础	284
14.5.2	气体渗流方程	285
14.5.3	数值解法	287
14.5.4	瓦斯抽放的数值模拟	289
14.6	水力割缝改造低渗透煤层的理论与应用	292
14.6.1	强化低渗透煤层瓦斯抽放的技术原理	292
14.6.2	水力割缝抽放瓦斯的技术原理	293
14.6.3	水力割缝抽放瓦斯的数值分析	294

14.6.4	水力割缝成套装备的研制	297
14.6.5	水力割缝强化本煤层瓦斯抽放的工业试验	297
第 15 章	气液二相流体渗流与固体变形耦合作用与应用	300
15.1	概述	300
15.2	裂缝中气液二相流体渗流的混沌现象与混合介质渗流模型	300
15.2.1	气液二相流体的混合渗流数学模型	301
15.2.2	裂缝中气液二相流体渗流的数值模拟	303
15.2.3	裂缝中气液二相流体渗流模拟实验	305
15.3	拟连续介质气液二相流体渗流与固体变形的耦合数学模型	307
15.4	气液二相流体固流耦合作用的工程响应	308
第 16 章	固热耦合作用与应用	311
16.1	固热耦合数学模型与工程应用分析	311
16.1.1	数学模型	311
16.1.2	冻结法凿井的固热耦合分析	312
16.1.3	耦合分析方法	313
16.1.4	固热耦合分析实例	314
16.2	岩石的热破裂分析	316
16.2.1	热破裂机理分析	316
16.2.2	花岗岩颗粒尺寸分析	317
16.2.3	500°C 下花岗岩的高温热破裂特征分析	317
16.2.4	加热过程中花岗岩的热破裂演化	319
16.2.5	花岗岩热破裂特征	320
16.3	岩石热破裂门槛值的数值实验	320
16.3.1	平面随机非均质热弹塑性力学模型	320
16.3.2	数值实验方法	321
16.3.3	岩石热破裂门槛值的数值实验研究	322
16.4	随机介质固热耦合数学模型与应用分析	323
16.4.1	基本假设	323
16.4.2	随机介质固热耦合数学模型	323
16.4.3	数值实验模型	324
16.4.4	韦伯分布下岩石热破裂	325
16.4.5	指数分布下岩石热破裂	327
第 17 章	固流热耦合作用与地热开采和核废料处置	330
17.1	裂隙介质固流热耦合数学模型与求解	330
17.1.1	物理基础	330
17.1.2	裂隙介质固流热耦合数学模型	331
17.1.3	求解策略与计算程序设计	335

17.2	高温岩体地热开采的数值实验	336
17.2.1	数值试验的模型简化	336
17.2.2	地热开采过程中热能迁移规律	338
17.2.3	地热开采过程中裂缝水压及宽度变化规律	340
17.2.4	裂缝面温度、应力随开采时间的变化规律	342
17.2.5	裂缝宽度随开采时间的变化规律	346
17.2.6	出力与寿命的研究	346
17.3	核废料处置的固流热耦合分析	348
17.3.1	FEBEX 原位试验 THM 耦合数值模拟	348
17.3.2	DECOVALEX 计划的 BMT1 模型的 THM 耦合数值模拟	349
第 18 章	岩体控制压裂	351
18.1	经典水力压裂法及其地应力测量	351
18.1.1	压裂方法	351
18.1.2	理论分析	352
18.1.3	试验资料	354
18.1.4	经典水力压裂裂缝的扩展规律	356
18.1.5	水力压裂的剪切破裂机理	358
18.2	地面钻孔控制压裂的应用	359
18.2.1	煤层气开采	360
18.2.2	水压致裂法地下处置核废料	361
18.2.3	高温岩体地热开采的巨型水力压裂	365
18.3	盐类矿床压裂-溶解理论与应用	366
18.3.1	盐类矿床压裂-溶解理论	366
18.3.2	水压致裂形成水平裂缝的机理	369
18.3.3	芒硝矿开采的群井致裂工业实施	369
第 19 章	极不完全热解反应的热流固化学耦合作用及油页岩油气开采	373
19.1	引言	373
19.2	油页岩原位开采技术	374
19.3	油页岩原位注蒸汽开采的热流固耦合数学模型	375
19.3.1	基本假设	375
19.3.2	气液两相混合物渗流方程	376
19.3.3	热量传输方程	378
19.3.4	岩体变形方程	379
19.3.5	油页岩原位注蒸汽开采的热流固耦合数学模型	379
19.4	油页岩原位注蒸汽开采的热流固耦合数学模型的数值解法	380
19.5	油页岩原位注蒸汽开采油气的数值模拟	381
19.5.1	水蒸气、水及油页岩物理参数	381