

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

裂隙介质水动力学原理

*Theory on Dynamics of Fluids in
Fractured Medium*

周志芳 等著

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

裂隙介质水动力学原理

Theory on Dynamics of Fluids in
Fractured Medium

周志芳 等著

高等教育出版社

内容提要

本书总结了裂隙介质水动力学国内外最新研究成果,从培养高层次创新型人才知识结构需求出发,注重内容的理论性、系统性、前沿性和完整性。基于地质体的概念,论述了裂隙介质的特性,结构面、岩体及地质体的透水性,裂隙介质地下水运动的基本定律、井流问题、裂隙介质模型、溶质和热量运移、多场耦合问题等;结合工程实际介绍了裂隙介质水动力现场试验和参数确定方法以及裂隙介质地下水数值模拟方法等。

本书可作为地质、水利、矿山、土木、环境、交通、石油、人防、国防等学科专业研究生教学用书,也可作为相关专业科技人员和高等院校师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙介质水动力学原理/周志芳等著. —北京:高等教育出版社,2007. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 020526 - 8

I. 裂... II. 周... III. 裂隙介质 - 地下水动力学 - 研究生 - 教材 IV. P641. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 147433 号

策划编辑 沈 俐 责任编辑 南 峰 封面设计 李卫青
责任绘图 吴文信 版式设计 史新薇 责任校对 张 颖
责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landracom.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landrace.com.cn
印 刷	临沂银光印刷包装有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 960 1/16	版 次	2007 年 1 月第 1 版
印 张	25.25	印 次	2007 年 1 月第 1 次印刷
字 数	430 000	定 价	38.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20526 - 00

前 言

本书试图系统地介绍可用于多个学科和工程的裂隙介质水动力学理论。自1983年参加工作以来,本人就在河海大学(原华东水利学院)一直从事地下水动力学方面的教学和科研工作,尤其是在裂隙介质水动力学方面,结合水利水电工程完成了一些科研项目,最早(1983年)在浙江的石塘水电站,后来相继完成了三峡、拉西瓦、清江隔河岩、龙滩、溪洛渡、紫坪铺、锦屏一级、瀑布沟、白鹤滩、观音岩、糯扎渡等水电工程的水文地质及工程区的渗流场问题研究,同时对若干矿山工程、交通工程、抽水蓄能工程和已建的“病险”水电工程的水文地质及工程区的渗流场也开展了相关研究。基于大量的工程实践活动,使本人对裂隙介质地下水运动规律的研究产生了浓厚的兴趣,在解决复杂工程实际问题的同时,也积累了分析裂隙介质地下水运动规律的经验。近几年,在国家自然科学基金(编号:50179010和编号:50579012)、国家自然科学基金重点基金(编号:50239070)的资助下,我们开展了裂隙岩体的渗流与力学特性、多尺度随机裂隙介质中水流和溶质运移规律模拟研究,进一步提高了对裂隙介质水动力学原理的认识。我们总结了20年来的研究成果,在2004年由水利水电出版社出版了专著《裂隙介质水动力学》。这也是我们力图编写研究生教材《裂隙介质水动力学原理》的工作基础。

裂隙介质水动力学涉及水文地质学、流体力学、工程力学、水化学、热力学等多个学科领域,在水利水电工程、石油工程、土木工程、农业工程、地质工程、矿山工程、环境工程等许多工程科学中,裂隙介质水动力学的理论也具有重要的意义。为此,我们在研究生教学中开设了《裂隙介质地下水动力学原理》课程,但深感在这方面缺少一本合适的教材。与专著不同,作为一本理想的教材,在内容上应该有能反映本学科内涵的足够的知识点并注重知识点的衔接与转换;在体系上注重理论性、系统性和前瞻性;在结构上以知识点为主线,注重由浅入深,循序渐进。本书吸收了裂隙介质水动力学国内外最新研究成果,基于地质体的概念,论述了裂隙介质的特性,结构面、岩体及地质体的透水性,裂隙介质地下水运动的基本定律、井流问题、溶质和热量运移、多场耦合问题;并结合工程实际介绍了裂隙介质水动力参数确定方法和裂隙介质地下水数值模拟方法等。

本书共分七章,由三人合著,其中第一、二、四、七章由周志芳执笔,第三章由黄勇执笔,第五、六章由王锦国执笔。最终由周志芳统稿、定稿,王锦国编写了符号与量纲、中英文名词对照。

本书主要是为水利工程、土木工程、地质资源与地质工程、环境工程、石油工程、矿山工程、农业工程、交通工程等方面的工科研究生编写的,在这些学科或这些学科的某些研究方向上,裂隙介质地下水运动具有重要的意义。同时也为业已在这些领域里从事科学研究和工程应用的科技工作者提供有益的参考。

作为一本书,很难包罗与裂隙介质水动力学有关的全部内容,更何况裂隙介质水动力学中的许多理论和实际问题有待进一步研究和完善,相关的研究成果也层出不穷。因此,我们意识到本书中必然存在许多缺点和不足,我们怀着无比感激的心情接受所有读者的批评和建议。

周志芳于南京

2006.07.30

作者联系方式:周志芳:zhouzf@hhu.edu.cn

王锦国:wang_jinguo@hhu.edu.cn

黄 勇:h_yong38@163.com

目 录

第一章	绪论	1
第二章	裂隙介质水动力理论基础	13
2.1	岩体的裂隙性	13
2.2	结构面的几何特征与模拟	16
2.3	地质体的透水性	22
2.4	流体运动的描述方法	28
2.5	岩体渗透规律及渗透系数张量	32
2.6	裂隙介质渗透的多尺度特性	48
第三章	裂隙介质模型	54
3.1	概述	54
3.2	地下水流系统模型	56
3.3	岩体地下水动力模型	79
3.4	连续介质模型	91
3.5	网络裂隙介质模型	105
第四章	裂隙介质井流计算	124
4.1	概述	124
4.2	承压水平面井流计算	126
4.3	承压水三维井流计算	135
4.4	潜水三维井流的 Neuman 解	153
第五章	裂隙介质水动力学若干专门问题	159
5.1	概述	159
5.2	裂隙介质多相流	166
5.3	裂隙介质热量运移	181
5.4	裂隙介质水化学场	194
5.5	裂隙介质多场耦合	221
第六章	裂隙介质地下水运动数值模拟	239
6.1	概述	239
6.2	二维数值模拟	241
6.3	三维数值模拟	272
6.4	数值模拟中若干问题的处理	279
6.5	工程实例	293
第七章	裂隙介质中的水力和示踪试验	301

7.1 概述	301
7.2 裂隙介质中的单孔水力试验	304
7.3 裂隙介质中的群(多)孔水力试验	316
7.4 裂隙岩体中的示踪试验	325
7.5 裂隙介质地下水流数值试验	333
参考文献	354
附录一 中英文名词对照	374
附录二 符号与量纲	388

Contents

Chapter 1 Introduction	1
Chapter 2 Theory on dynamics of fluids in fractured medium	13
2.1 Fractured characteristic of rocks	13
2.2 Geometry characteristic and simulation of fractured discontinuous plane	16
2.3 Permeability of geological body	22
2.4 Description method of fluid movement	28
2.5 Percolation laws of rock mass and tensor of hydraulic conductivity	32
2.6 Multi - scale characteristic of permeability in fractured medium	48
Chapter 3 Models of fractured medium	54
3.1 Summarization	54
3.2 Model of groundwater flow system	56
3.3 Groundwater dynamical model in rocks	79
3.4 Continuum media model	91
3.5 Network fractured medium model	105
Chapter 4 Well flow calculation in fractured medium	124
4.1 Summarization	124
4.2 Well flow calculation of plane confined aquifer	126
4.3 Well flow calculation of 3D confined aquifer	135
4.4 Neuman solution of well flow in 3D phreatic aquifer	153
Chapter 5 Some specialization problems of fluid dynamics in fractured medium	159
5.1 Summarization	159
5.2 Multi - phase flow in fractured medium	166
5.3 Heat transport in fractured medium	181
5.4 Water chemistry field in fractured medium	194
5.5 Multi - fields coupling in fractured medium	221
Chapter 6 Numerical simulation of groundwater movement in fractured medium	239
6.1 Summarization	239
6.2 2D numerical simulation	241
6.3 3D numerical simulation	272
6.4 Treatment of some problems in numerical simulation	279

6.5 Engineering example	293
Chapter 7 Hydraulic and tracer tests in fractured medium	301
7.1 Summarization	301
7.2 Hydraulic test of a single borehole in fractured medium	304
7.3 Hydraulic test of multiple boreholes in fractured medium	316
7.4 Tracer tests in fractured rocks	325
7.5 Numerical tests of groundwater flow in fractured medium	333
References	354
Appendix 1 Chinese-English terms	374
Appendix 2 symbol and dimension	388

第一章 绪 论

裂隙介质水动力学主要研究地下水在裂隙介质中运动规律,其研究的对象主要是岩体(地质实体)及其中地下水的运动规律与模拟方法。由于野外地质体千变万化,因此岩体中地下水及其他相溶或不相溶流体运移规律也错综复杂。这正是目前众多学者致力于该命题相关领域研究的主要原因之一。

研究岩体地下水运动规律,究其实质最终可归结为三个方面的问题:其一是介质,其二是水,其三是水与介质的相互关系。介质研究的核心是其透水性,包括岩体的透水性、结构面的透水性及其空间分布规律。水主要是指地下水,其核心是地下水的质、量和力。质指的是地下水的水质,涉及水相或非水相液体;量指的是地下水的渗流量,涉及自然或工程条件下渗流的途径、渗漏量及相应预防渗漏的处理方法;力指的是地下水的静水压力和渗透力,论证地下水通过介质作用于介质本身或各类工程建筑物的静水压力和渗透力的大小和方向,及其对这些力的控制方法和在这些力作用下建筑物的安全、稳定性评价。水与介质的相互关系则关系到岩体渗流场与应力场、温度场和化学场等多场的耦合问题。

裂隙介质水动力学研究进展是与工程建设的发展密不可分的。20世纪80年代以前,由于水利水电工程规模小,技术要求低,水工建筑物附近的地下水问题集中表现为渗漏问题,即水库渗漏、绕坝渗漏和坝基渗漏问题。研究处理的重点在于减少水库的渗漏量。20世纪80年代以后,随着水利水电工程规模的不断扩大,工程技术要求也愈来愈高,水工建筑物附近的地下水问题除了渗漏问题外,主要表现为地下水对水工建筑物的荷载作用问题,即作用于水工建筑物表面的扬压力和岩体内的渗透力问题。

近年来,裂隙岩体地下水受到了严重污染的威胁,诸如核废料的地质贮存、垃圾填埋造成污水下渗、海水入侵、输油管道老化而引起的渗漏等等。这些与人类生活密切相关的环境问题迫切要求我们对裂隙岩体地下水中污染物运移的机制进行研究,以便对其进行预报和控制。此外,随着地热开发、稠油热采以及一些大型水利水电工程中的地下水热量运移问题的提出,也为裂隙介质地下水传热研究开辟了一些具有重要应用背景的新研究领域。

岩体是受结构面纵横切割、具有一定结构的多裂隙体。研究岩体裂隙的成因不仅可以了解作为控制岩体地下水运动的裂隙结构面发育规律,而且可以推论岩体的透水性能,为研究岩体地下水运动提供非常重要的资料和结论。

岩体裂隙结构面的空间展布及自然特性可由其几何特征来表征。结构面的几何特征是指结构面的方位、形态、规模、间距或密度、隙宽、粗糙度、壁面强度和充填性等。对于结构面几何参数的统计研究。20世纪80年代以前的工作主要是沿用构造地质学中的一些方法,通过结构面产状要素的野外量测编制裂隙玫瑰图、裂隙极点图和裂隙等密度图,较形象、准确地反映断裂系的几何各向异性,对裂隙进行分组以及确定裂隙的优势产状。20世纪80年代开始,随着计算机技术的飞速发展,Hudson等(1983)、Priest等(1983)、Priest和Hudson(1981)、潘别桐(1984,1985,1987,1989)均采用了结构面的网络模拟技术研究裂隙结构面参数的概率分布。基于Monte Carlo模拟得到等效的结构面网络,给出直观形象的裂隙体系图像,并可以近似地求得结构面密度、RQD、渗透系数、裂隙连通性等参数。传统的统计方法和结构面网络模拟技术,从宏观上较形象、完整地描述了岩体中裂隙结构面的空间展布规律,并定量地给出了岩体有关渗透性的参数,但这种定量仅仅是一种近似。因为岩体的透水性参数,不仅与结构面宏观展布几何参数有关,而且与结构面细观几何尺寸(结构面的粗糙度、开度、充填情况等)密切相关。裂隙结构面表面是粗糙起伏凹凸不平的,其粗糙起伏特征千变万化,难以用简单数学关系准确表达。为此Turk和Dearman(1985)、Tes和Cruden(1979)采用数值方法研究结构面粗糙度;X. B. Yu和B. Vayssade(1991)研究发现,数值方法虽可以得出高精度,但极易引入极大误差,与采样步长极为敏感。为了减小由于采样步长而引起的误差,陈枫和孙宗颀(1998)提出了岩体不连续间距数学模型的一个修正系数公式。自20世纪80年代末,90年代初开始人们应用B. B. Mandelbrot创立的分形几何学这一新理论及其思维方法,对岩体结构面的几何特征,包括规模、隙宽、密度和粗糙度进行分形分析。分形几何在地质上最早用于断裂系分形的研究(Barton等,1985;T. Hirata,1987;刘松玉,1992;李清明,1992)。目前国内外研究大体上归纳为:Cantor点集法、条带法和概率分布法三种。从物理学观点看,不论是微观展度还是宏观展度的岩体破裂过程,均具有分形结构,裂隙结构面粗糙度是一种自然分形现象。近几年来,Carr等(1987)、Lee等(1990)、王建锋(1991)、X. Xu等(1991)、谢和平等(1994)、周创兵和熊文林(1996)运用分形几何研究结构面粗糙度特征,得到了结构面粗糙度与分维D的关系

式。但各学者所得的分维 D 都不尽相同,究其原因,是与所取尺码大小有关。事实上,只有当所取尺码小于某一临界尺码,分维值才趋于真值。H. P. Xie 和 G. Pariseau(1992)则克服了上述不足,从统计平均角度发现,岩体结构面粗糙度与 Koch 雪花曲线类似,基于 Koch 雪花曲线,回归分析得出了结构面粗糙度与分维关系式。吴继敏等(1997)以巴顿提出的十条典型粗糙剖面模型为基础,从立体学和形态数学的角度,讨论了巴顿模型的线粗糙度和面粗糙度特征及其分数维特征。王旭等(2005,2006)应用网络模拟技术分析岩体边坡稳定性等具体工程问题。总体上说对岩体裂隙结构面的统计模拟研究,尚处于理论探索阶段,用于工程实践尚有很大距离,许多问题有待进一步探讨。

在岩体地下水运动规律方面:苏联学者 Ломизе 早在 1951 年就开始了单个裂隙水流运动的试验研究,得到了单个裂隙水流运动的立方定律。Tsang(1987)认为由于张开度的变化及岩桥的存在,裂隙渗流出现沟槽流(Channelling)现象,立方定律不成立。Gentir(1993)在试验的基础上发现裂隙面仅有一小部分是导水的,特别是在荷载作用下,出现沟槽流现象更趋明显。Engelder 和 Scholz、Raven 和 Gale 等的试验也表明,立方定律仅近似地描述两侧壁光滑平直,张开度较大且无充填物的渗流规律。为了考虑裂隙粗糙度、张开度变化等因素对渗流的影响,一些学者引用等效水力传导开度的概念,对立方定律进行了修正,周创兵和熊文林(1996)提出了广义的立方定律。C. Louis(1974)指出,把裂隙岩体当作是连续介质还是不连续介质应小心地进行分析。Wilsor 和 Withespoon(1970)把裂隙岩体分别当作连续介质和不连续介质进行计算比较后指出,最大裂隙间距与建筑物最小边界尺寸之比大于 $1/50$ 时,应按不连续介质考虑。Maini(1972)指出,应把上述的最大裂隙间距改为平均裂隙间距,其相应的比值大于 $1/20$ 时,应按不连续介质考虑。尺寸问题就其实质是个“典型单元体”(REV)体积问题,Withespoon 认为三维裂隙网络连通性好,其 REV 值比二维的小。周志芳(1991)认为 REV 的绝对大小与岩体中裂隙发育程度、分布规律有关;相对大小则与研究问题流场的区域范围有关,当研究的流场区域体积远大于 REV 体积时,就可以把研究区域近似成连续的渗流场处理。向文飞和周创兵(2005)对 REV 做了概括性的总结研究,通过对 REV 定义的讨论,分析了 REV 的一般力学意义,认为 REV 是蕴含着“离散与连续”、“微观与宏观”、“随机性与确定性”辩证关系的基本力学概念。阐述了裂隙岩体 REV 与岩体力学模型的选取、力学参数取值的密切关系,指出了裂隙岩体 REV 是选择岩体力学模型的定量标准,集中反映岩体力学性质的尺寸效应。

从系统的观点分析和研究地下水问题是水文地质研究的一个重要方法和发展趋势。水文地质系统通常包括水文地质结构系统和地下水流系统两大部分。水文地质结构系统系指不同等级、不同形态、不同成因(建造)、经受不同改造作用、具有不同结构和水力学性质的水文地质综合体的空间组合,它构成了地下水的赋存空间,控制着地下水的贮存和运移,是研究地下水流系统的基础。也是水文地质模型合理概化为物理模型,进而正确建立地下水流数学模型的前提。1940年 Hubbert 首次给出了均质、各向同性情况下无压含水层中的区域地下水流模型。1962、1963年 Toth 用解 Laplace 方程的边值问题,把一个地下水盆地的地下水流划分为局部流系统、中间流系统和区域流系统。区域流系统是从盆地边缘的最高的补给区至盆地中最低的排水基准面的流动系统。因为补给区域流的补给量和区域流的贮水量相比是很小的,故水交替缓慢,循环的深度大,在岩石中的停留时间长。一般区域流排出的水具有较高的矿化度和温度。局部流系统是从补给区排至相邻河谷的水流系统,一般流动速度快、循环深度浅,因而水温接近年平均气温,矿化度也较低。中间流系统介于两者之间,它至少跨越一个以上的局部流。

在岩体地下水运动模型的概化上,目前大多采用非均质各向异性的等效连续介质模型,如杜延龄和许国安(1991)、周志芳和钱孝星(1992, 1993)等。这样有利于用数值法直接求解地下水运动的偏微分方程。对于介质性质不满足连续介质假定要求的裂隙岩体,毛昶熙(1991)提出了基于水量平衡原理求解裂隙网络的非连续介质模型及其求解方法。王恩志(1993)按非连续介质方法建立了裂隙网络渗流离散模型,采用全区域不变网络分析法,化非线性分析为线性分析,成功地解决了岩体剖面上有自由面裂隙网络渗流计算问题。在国外,Smith 和 Schwartz(1980)、Long(1983)、Schwartz 等(1983)、Robinson(1983)、Anderson 和 Dverstorp(1987)、Long 和 Billaux(1987)、Dershowitz 和 Einstein(1988)致力于离散裂隙网络试验和相应网络研究。Lin 和 Faihurst(1991)以此为基础采用拓扑理论描述裂隙岩体的网络特征。莫海鸿和林德璋(1997)则提出两个基于代数拓扑理论的裂隙网络中流体分布的离散性模型及其相应解法。张幼宽(1984)、薛禹群和张幼宽(1984)提出了裂隙-岩溶双重介质渗流模型及其有限元求解方法,成功地进行了裂隙岩溶介质中矿坑涌水量的预报。周志芳等(1996)考虑到实际岩体裂隙结构面分级性,提出了混合网络有限单元法。陈崇希(1995)、成建梅和陈崇希(1998)从水动力学角度分析各种岩溶含水介质中的水流特征,将其归纳为储水介质、导水介质和控水介质,并根据折算渗透系数的概念,建立了耦合 Darcy 流和非

Darcy 流于一体的岩溶管道 - 裂隙 - 孔隙三重介质地下水模型。数值计算表明三重介质地下水模型较全面地刻画了岩溶水动态的特征,反映了相对均匀裂隙流与控制性管道流并存,线性流和非线性流相互转变的复杂地下水运动特点。柴军瑞和仵彦卿(2000)将岩体中的各种裂隙和孔隙按规模和渗透性分为 4 级处理,即一级真实裂隙网络、二级随机裂隙网络、三级等效连续介质体系和四级连续介质体系。各级裂隙(孔隙)都形成各自的裂隙网络,并以水量平衡原理为基础建立各级裂隙网络之间的联系,组合形成岩体多重裂隙网络渗流模型,从而较全面地反映了地下水在岩体中的运动规律,并进行了工程实例分析。另外,基于水工建筑物地区岩体渗流场的分析,最终都是用于岩体及建筑物基础稳定性分析。由于建筑物的修建,改变了原有岩体中应力场的分布。应力场分布的变化必然引起岩体中裂隙几何参数的改变,从而导致岩体裂隙透水性发生相应变化。与此同时,由于水库的蓄水,改变了岩体原有的水文地质环境,岩体中的裂隙水头由于边界条件变化,而发生相应的变化,导致岩体应力场也发生相应的变化。为此,许多学者都致力于渗流场与应力场耦合模型的研究计算。杨延毅和周维垣(1991)提出了一种渗流 - 损伤耦合分析模型,阐述了渗流对裂隙岩体的力学作用和岩体的应力状态对裂隙渗透性的影响,根据不同应力状态下的损伤断裂扩散方程建立起渗透张量的演化方程。王媛等(1998)给出了等效连续裂隙岩体渗流与应力全耦合分析计算方法。柴军瑞等(2003)考虑到岩体中裂隙水流对裂隙壁同时具有法向的渗透静水压力作用和切向的拖曳力(渗透动水压力)作用,提出在单一光滑平直裂隙、充填裂隙、水流和充填物一起流动三种情况下裂隙壁所受的渗透静水压力和拖曳力公式,并采用算例定量分析裂隙水流对裂隙壁的这种双重力学效应。结果表明,裂隙水流的渗透静水压力和切向拖曳力作用都会使岩体各应力分量增大,并指出计算岩体应力时应考虑裂隙水流的双重力学效应。

在裂隙介质井流研究方面,早在 1935 年 C. V. Theis 就提出了地下水向承压含水层完整水井的非稳定井流公式,即著名 Theis 公式。Theis 公式只适合于均质各向同性的含水层。Hantush(1964)考虑到沿着岩层层理方向的渗透系数和垂直于层理方向的渗透系数明显不同,以及非完整井流具有三维流的特点,探讨了非完整井中降深与观测井和抽水井过滤器进水部分的长度、位置以及水平方向渗透系数(K_r)和竖直方向渗透系数(K_v)之比值的的关系。Hantush 计算发现,水平渗透系数比垂直方向渗透系数大好几倍的含水层,其中的非完整井的涌水量要比各向同性的砂层中同样的井明显要小。在假设岩层均质的、抽水井井径无限小以及非

稳定流的基础上, Hantush 提出了分析时间与降深关系的公式。但 Hantush 未曾涉及这个公式在现场试验中的应用,也未提到过从几何平均渗透系数(K_x)中分解出主要和次要的水平渗透系数(K_x 、 K_y)。Papadopulos (1965)假定含水层水平无限延伸、均质各向异性、无越流,推得地下水向非完整井运动的井流公式,并提出了现场试验中确定水平方向各向异性参数(K_x 、 K_y)的方法。Papadopulos 发现要解决水平方向的各向异性问题,至少需要三口相对于抽水井不同位置的观测井。并给出一些设想的例子来说明他的方法,但是没有人做现场工作来进一步证实这种方法。在后来的研究中, Ramey (1975)用 Papadopulos 的方法,以石油工程师常用的标准分析了实际注水井的数据。但 Ramey 的分析仅局限于三口观测井。Hantush 于 1966 年第一次提出的确定均质各向异性含水层中水平方向各向异性参数的方法与 Papadopulos 的方法是一致的。Hantush 也发现要确定水平方向的渗透系数,如果渗透系数的主要方向未知的话,至少要三口位于抽水井不同方向的观测井;如果渗透系数的主渗方向已知,至少也需要两口观测井。Hantush (1966)还提出了另外一种用于解决均质各向异性无越流含水层中水平方向渗透系数(K_x 、 K_y)的方法,这种方法要求具备足够的观测井,这些观测井可用来描述抽水时或水位恢复时井周围降深椭圆形的等水位线。抽水井在理想条件下,渗透系数的主渗方向和椭圆的长轴方向一致,并且渗透系数的主次方向比等于椭圆的长短轴比值的平方。自从 Papadopulos 和 Hantush 作了上述研究之后,有关均质各向异性无越流含水层中水平方向各向异性参数的计算成为可能。Weeks 于 1969 年在现场试验的基础上提出了确定水平方向和垂直方向渗透系数之比的方法。他利用 Hantush 的方法来研究不完整井与一般井的降深差别。发现如果抽水井切穿含水层的一部分,从观测井的垂直方向可看出,其降落漏斗就会被改变,观测井中的实际水位降深就和完整井的水位降深理论值不同。如果垂直方向的渗透系数比水平方向小,由于井的不完整性引起的水位降深差异就会扩大。Weeks 仍然没有提到确定水平面方向各向异性参数(K_x 、 K_y)的方法。之后,Way (1982)基于 Hantush 和 Papadopulos 的研究成果提出了通过现场抽水试验确定径向各向异性渗透系数主值(K_x 、 K_x 和 K_x 、 K_y)的计算方法,并在现场含水层中作非完整井抽水试验,获得非完整抽水井及其附近非完整观测井中的水位降深数据;进而通过计算机将现场实测水位降深与标准曲线来匹配,分析确定含水层三维渗透系数。

在地下水溶质、热量运移研究方面,人们对多孔介质地下水溶质、热量运移的探索工作始于 20 世纪 60 年代。并在试验研究、理论研究和计

算方法等方面都取得了一定的进展。然而,由于裂隙介质中溶质和热量运移具有高度的复杂性,岩体的裂隙空间几何因素、渗透参数、弥散系数等有显著的不确定性,使得裂隙岩体中溶质和热量运移研究具有极大的难度。最初由 Grisak(1980)建立了只考虑基质扩散的单裂隙溶质运移模型。Novakowski 和 Lapcevic(1994)进行的现场单裂隙系统溶质运移试验,结果表明溶质运移过程中基质扩散有着很重要的影响,而且这种影响随着对流扩散尺度的增大而减弱。程诚等(2003)总结了单裂隙介质中溶质运移的基本特点和实验研究的成果,得出影响单裂隙介质中溶质运移的几个重要因素,如骨架扩散、弥散、表面吸附等,介绍了几个具有代表性的数学模型,同时对模型的有效性和局限性进行了初步讨论。王锦国和周志芳(2002)介绍了裂隙岩体地下水溶质运移的多尺度概念模型及其物理和数学模拟方法,并探讨了模拟尺度与观测尺度、预测尺度、裂隙介质尺度之间的关系及尺度效应的分形特征。王锦国和周志芳(2004)基于单裂隙的分形理论,采用特征有限元法模拟了粗糙裂隙中的水流和溶质运移。黄勇和周志芳(2005)总结了单裂隙尺度和网络裂隙尺度中溶质运移的基本特点、试验研究成果、裂隙交叉处的混合模式、数学模型以及模拟方法等,分析了裂隙介质中溶质运移试验研究的局限性,评价了各种数学模拟方法在实际应用中存在的问题。应用方面,吴吉春等(2001)建立了用于描述柳林泉域地下水中氯离子运移行为的局部区域二维可混溶溶质运移模型;吴蓉和周志芳(2004)利用 L. Smith 自回归过程随机模拟开度的方法,从流量、纵向弥散系数及滞留时间三方面研究了裂隙开度对水流和溶质运移的影响;黄勇等(2004)、王锦国和周志芳(2005)对裂隙介质和裂隙溶隙介质中溶质运移分别进行了试验研究和数值模拟研究。

由于新能源和新技术的发展,自 20 世纪 80 年代以来,国际上在裂隙介质传热领域内相继开辟了不少具有重要应用背景的新研究领域,如对地热开发、稠油热采和核反应堆正常工作具有重要意义的多相流动、核传热研究,反应堆安全性分析和核废料地下安全贮存中相交换热研究。在大型水利水电工程所处的河流峡谷区,同样也存在着地下水温度异常的问题,查清这些问题对水利水电工程安全建设具有重要的意义。由于裂隙介质本身的复杂性,裂隙介质中的地下水运动理论也并不完善,而热量运移理论是以地下水运动理论为基础的,裂隙介质中的热量运移研究难度也就可想而知了。目前裂隙介质热量运移的研究还处于起步阶段,建立的模型也多为等效连续介质模型,沿用多孔介质理论来描述。最初的模型多考虑热量运移中的个别因素,如 Buscheck 等(1983)在含水层的二

维模型中考虑了自然热对流; Molson 等(1992)也在潜水含水层模型中考虑了自然热对流,同时给出了密度随温度变化的水流方程;薛禹群和谢春红等(1996)较严密地推导了能够描述含水层热量运移中自然对流作用的水流方程和热量运移方程,并建立了三维非线性模型; Houpeurt 等曾在实验室测定了不同粒径介质条件下的热交换平衡时间;刘亚晨(2000)分析了核废料贮存裂隙岩体水热耦合运移特征,并建立了水热与应力耦合模型。张志辉和吴吉春等(1997)考虑了地下水热量运移中同时存在自然对流和水-岩热交换作用,得到了较为满意的结果。应用方面, L. Rybach 和 M. Pfister(1994)对阿尔卑斯山区的圣哥达隧道岩体温度进行了计算和预报;黄涛和杨立中(1999)建立了隧道裂隙岩体温度-渗流耦合数学模型,并应用于秦岭隧道工程;谢强等(2002)也采用有限单元法模拟了隧道区域地温场,分析了隧道地温场特征,对隧道围岩岩温进行预测;周志芳和王锦国(2003)分析了高山峡谷区地下水温度异常的原因;王锦国和周志芳(2001)采用边界单元和有限分析法耦合方法模拟了峡谷区地下水温度场。

裂隙介质中的多相流研究开展较晚,研究较多的领域为油气开发、煤气开发以及油类污染地下水等方面。国外在 20 世纪 70 年代开始了地下水油类物质污染的机理研究,80 年代末开始研究污染的治理。在我国,20 世纪 70 年代开始开展了重金属和硝酸盐对地下水污染问题的研究;对地下水油类污染的研究,由于分析测试水平落后,到 80 年代末才引起重视,现在仍然处于初步研究阶段。油气运移是个复杂的物理学过程,由于发生在地质历史时期,且现今很难直接观察到,因此物理模拟实验成为了解和认识二次运移过程及其机理的重要手段(Catalan *et al.*, 1992; Tokunaga *et al.*, 2000)。张发强等(2003)、Luo *et al.* (2004)、侯平等(2004)从运移动力学机制和过程角度对油气运移所展开的实验和分析,为定量描述运移特征、确定其影响因素起到了重要的推动作用。周波等(2006)利用表面粗糙的玻璃板制作平行板狭窄裂隙进行运移实验,分析不同密度差和注入速率条件下油的运移过程和特征,探讨了裂隙中油气运移的动力学特征。Hooper(1991)研究了盆地尺度上断裂构造中油气垂向运移规律;Knott(1993)、赵密福等(2001)讨论了封闭性断层中油气运移情况;Marle(1972)、康永尚等(2002)将断裂系统近似看作孔隙介质,用多相 Darcy 定律描述油气在其中的流动特征。刘新华等(1996)根据多相流的残留饱和度理论,分析了含油污水在微裂隙发育黏土层中的迁移特征;姚约东(2004)通过对岩芯渗流实验数据的研究与分析,建立了描述石油渗流规律的指数式非 Darcy 运动方程;薛强等(2005)在综合考虑有石油污