

裂隙介质水动力学

Dynamics of Fluids in Fractured Media

周志芳 王锦国 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

裂隙介质水动力学

Dynamics of Fluids in Fractured Media

周志芳 王锦国 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书从系统的观点出发研究了裂隙介质地下水的运动问题。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,裂隙介质井流问题,裂隙介质溶质和热量运移问题,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。结合工程实际给出了不同地质背景下岩体的水文地质结构模型、岩体地下水动力模型和水流系统模型及计算方法。

本书可供地质、水利、矿山、土木、环境、交通、人防、国防等系统的科技人员和高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙介质水动力学/周志芳,王锦国著. —北京:中国水利水电出版社, 2004

ISBN 7-5084-1823-9

I. 裂... II. ①周...②王... III. 裂隙介质—地下水动力学 IV. P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第103144号

书 名	裂隙介质水动力学
作 者	周志芳 王锦国 著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×960mm 16开本 20.25印张 331千字
版 次	2004年1月第1版 2004年1月第1次印刷
印 数	0001—3100册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



随着社会、经济的快速发展，人类的活动空间越来越大。与此同时，能源、环境、交通以及矿产资源开发等方面有关的工程规模也在不断地扩大，使得其开发所依托的岩土体及相关问题也越显突出。裂隙介质地下水运动规律就是其中的突出问题之一，许多水利、环境、交通、能源和矿山工程问题与之有着直接或间接的联系，诸如大型水利水电工程中的地下水问题，核废料的深部贮存、垃圾填埋污水下渗、海水入侵、输油管道老化渗漏造成的地下水污染问题等。为此，对裂隙介质水动力学理论研究就显得十分迫切和重要。

本书从系统的观点出发研究了地下水运动的问题，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，裂隙介质溶质和热量运移，水动力参数等。结合工程实际给出了不同地质背景下岩体的水文地质结构模型、岩体地下水动力模型和水流系统模型。

本书最大的特点在于理论上的系统性和方法上的实用性，具体体现在：

(1) 从地质实体到地下水运动模拟的数学解，系统地论述了水文地质原型、水文地质结构模型、岩体地下水动力模型、岩体地下水系统模型和岩体地下水数学模型及其数学模拟理论和方法；从个别、微观到整体、宏观上，系统地总结和探讨了岩体裂隙结构面网络特征、水动力特征和参数确定方法；遵循从实践到理论，从理论再回到实践的认识论规律，经总结、归

纳、推演上升为相关的理论,丰富和完善了裂隙介质水动力学理论和方法,解决了工程实际问题,产生了较大的社会效益和经济效益。

(2) 提出了任意各向异性含水层中地下水二维和三维井流问题的理论和计算公式。并提出了确定任意各向异性含水层渗透系数张量的半解析理论和方法。系统完善了地下水动力学的井流理论和计算方法。

(3) 创造性地提出了适合于不同水文地质背景条件下的确定裂隙结构面及岩体渗透参数的多种有效方法。其中包括结构面控制反演法,缓倾结构面渗透性参数现场试验法,岩体结构面及含水层各向异性参数的抽水试验法和任意各向异性岩体渗透系数张量的半解析算法。

(4) 对裂隙介质地下水污染问题,裂隙介质传热问题作了实验和理论研究,给出了一些探索性的成果。

中国工程院院士
河海大学学术委员会主任

吴中如

2003年10月15日

前 言

多孔介质中地下水运动问题涉及水文地质学、流体力学、水化学、热力学等多个学科领域，已成为多学科研究的重点。广义上讲，裂隙岩体也是一种多孔介质，裂隙介质中水流、传热、传质研究在许多应用领域中有非常重要的意义。例如，水利水电工程，矿山工程，地热开发，稠油热采，核废料在岩体深部的安全贮存，地下水污染物运移以及对污染物运移的控制等。因此，裂隙介质水动力学的理论和试验研究具有重要意义，也是诸多应用研究的基础。

本书从系统的观点出发研究裂隙介质地下水运动问题，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，裂隙介质井流问题，裂隙介质溶质和热量运移问题，水动力参数确定方法和裂隙介质地下水数值模拟方法等。结合工程实际给出了不同地质背景下岩体的水文地质结构模型、岩体地下水动力模型和水流系统模型及计算方法。

全书共八章。第一章绪论部分主要论述了裂隙介质水动力学在国内外研究的现状和重要意义，由周志芳、王锦国撰写。第二章从地质体的概念出发，总结和论述了裂隙介质的特性、裂隙结构面透水性 and 裂隙介质的透水性、裂隙水运动的基本定律、裂隙水运动的主要参数、裂隙介质渗透的多尺度特征等基本概念，由周志芳、王锦国撰写。第三章结合工程实例提出了岩体的水文地质结构模型、地下水动力模型和地下水流系统模型以及裂隙介质地下水流数学模型，由周志芳，黄勇撰写。第四章提出了任意各向异性含水层井流问题的理论和求解方法，

由周志芳撰写。第五章对裂隙介质溶质运移模型、试验以及求解方法等方面的成果作了介绍,由王锦国撰写。第六章以水电工程中的热量运移问题为例介绍了裂隙介质中热量运移模型及河流峡谷区地下水温度异常的机制,由王锦国,周志芳撰写。第七章提出了解复杂岩体平面地下水运动问题的有限分析法和混合网络有限元法,阐述了岩体地下水三维运动有限元数值模拟的原理,结合水利水电工程,对岩体地下水数值模拟中的若干问题作了探讨,由周志芳、王锦国撰写。第八章提出了不同地质条件下确定裂隙介质地下水动力参数的确定方法,每种方法都结合实际工程给出了具体做法,由周志芳撰写。

本书内容主要来自作者十余年来所完成的一系列科研项目成果。包括国家自然科学基金资助项目(编号 50179010)、国家自然科学基金重点基金资助项目(编号 50239070)和教育部青年骨干教师基金资助项目等。科研工作得到了国家电力公司成都勘测设计研究院、中南勘测设计研究院、昆明勘测设计研究院、华东勘测设计研究院和长江水利委员会三峡勘测设计研究院的大力支持,在此表示衷心的感谢!

中国工程院院士吴中如教授在百忙中热情为本书作序,谨向他表示诚挚的谢意!

另外,本书的出版,得到了河海大学“九五”、“十五”、“211 工程”项目的资助。

本书由周志芳统稿,王锦国编写了符号与量纲、中英文名词对照,王建平副教授、唐红侠博士、黄勇博士参加了相关的科研项目。由于裂隙介质地下水运动研究的许多方面还处于探索阶段,书中难免有缺点和疏漏,恳请读者批评指正。

周志芳 王锦国

2003 年 10 月

符号与量纲

量的符号	量的名称	量纲
A	面积	L^2
B	越流因素	L
b	裂隙宽度	L
C	浓度	ML^{-3}
C_f	裂隙中溶液的浓度	ML^{-3}
C_p	基质中溶液的浓度	ML^{-3}
C_0	溶液初始浓度	ML^{-3}
c	热容量	$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$
c_w	水的热容量	$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$
c_s	固体骨架的热容量	$ML^{-1}T^{-2}K^{-1}$
c_d	比热容	
c_m	摩尔热容	
D	水动力弥散系数 (弥散系数)	L^2T^{-1}
	分形维数	
D_L	纵向弥散系数	L^2T^{-1}
D_T	横向弥散系数	L^2T^{-1}
D^*	分子扩散系数	L^2T^{-1}
D'	有效扩散系数	L^2T^{-1}
d	含水层顶板到抽水井过滤器顶部距离	L
d'	含水层顶板到观测孔过滤器顶部距离	L
E	拟合时的目标函数	
e	等效裂隙宽度	L
$\operatorname{erf}(x)$	x 的误差函数	
$\operatorname{erfc}(x)$	x 的余误差函数	
g	重力加速度	LT^{-2}
H	总水头, 水头	L
	裂隙中水头	L
	淡水水头 (参考水头)	L
H_0	水头初值	L

量的符号	量的名称	量纲
H_r	分枝裂隙水头	L
H_a	主干裂隙水头	L
I	由于热传导和机械弥散引起的热通量	MT^{-3}
I_p	由于热传导引起的热通量	MT^{-3}
i	斜率	
J	水力坡度	
J_d	扩散通量	$LM^{-2}T^{-1}$
K	渗透系数	LT^{-1}
K	渗透系数张量	LT^{-1}
K_d	分布系数	LT^{-1}
K_f	岩体结构面渗透系数	LT^{-1}
	分布系数	LT^{-1}
K'_f	紊流时岩体结构面渗透系数	LT^{-1}
K_r	水平径向渗透系数	LT^{-1}
K_z	垂向渗透系数	LT^{-1}
K_e	当量渗透系数	LT^{-1}
K^a	主干裂隙介质渗透系数	LT^{-1}
K^r	分枝裂隙介质渗透系数	LT^{-1}
k	渗透率	L^2
L	裂隙间距	L
l	距离、长度	L
	过滤器长度	L
l'	含水层顶板到过滤器底部的距离	L
M	含水层厚度	L
	(层状含水层) 总厚度	L
m	质量	M
m_s	线裂隙率	L^{-1}
m_a	面裂隙率	
m_v	体积裂隙率	
N_L	基函数	
n	孔隙度	
	外法线方向	
Pe	Peclet 数	
p	压强	$ML^{-1}T^{-2}$
Q	流量 (涌水量)	L^3T^{-1}

量的符号	量的名称	量纲
q	单宽流量	L^2T^{-1}
	单位体积含水层中源或汇的流量	T^{-1}
q_0	已知边界单宽流量	L^2T^{-1}
R	影响半径	L
	水力半径	L
Re	Reynolds 数	
Re_{kp}	临界 Reynolds 数	
R_d	阻滞系数	
r	径向距离	L
r_w	水井半径	L
s	水位降深或抬高	L
	单位长度裂隙表面积吸附的溶质质量	ML^{-2}
T	导水系数	L^2T^{-1}
	温度	K
T_w	地下水的温度	K
T_s	固体骨架的温度	K
T_0	温度初值	K
t	时间	T
$t_{1/2}$	半衰期	T
u	流速	LT^{-1}
	实际流速	LT^{-1}
	扬压力	L
	$u = \frac{r^2 \mu^*}{4 T t}$	
$\bar{u}$	实际平均流速	LT^{-1}
V	体积	L^3
V_v	空隙体积	L^3
v	渗流速度 (渗透速度)	LT^{-1}
v_j	水力梯度方向上的渗流速度	LT^{-1}
v_e	裂隙当量渗流速度	LT^{-1}
v_f	裂隙内平均流速	LT^{-1}
v_u	垂直水力梯度方向上的渗流速度	LT^{-1}
W	单位时间单位面积 (或体积) 上 垂向质量交换	$ML^{-2}T^{-1}$ (或 $ML^{-3}T^{-1}$)
x	坐标	L

量的符号	量的名称	量纲
y	坐标	L
z	坐标	L
	位置水头	L
	标高	L
α	弥散度	L
	基质块形状因子	
α_L	纵向弥散度	L
α_T	横向弥散度	L
β	液体体积压缩系数	$M^{-1}LT^2$
	结构面倾向	
Γ_1, Γ_2	第一、第二类边界	
γ	结构面倾角	
	重度	$ML^{-2}T^{-2}$
η	局部坐标	
θ	角度	
λ	热动力弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
	放射性衰变系数	
λ_w	水的热动力弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
λ_s	固体骨架的热动力弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
λ_e	介质热传导系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
λ_v	热机械弥散系数	$MLT^{-3}K^{-1}$
ν	运动粘滞系数	L^2T^{-1}
ν_w	水的运动粘滞系数	L^2T^{-1}
μ	动力粘滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$
μ_s	贮水率	L^{-1}
μ^*	贮水系数	
μ_s^a	主干裂隙介质贮水率	L^{-1}
μ_s^r	分枝裂隙介质贮水率	L^{-1}
ν_w	水的运动粘滞系数	L^2T^{-1}
ξ	局部坐标	
ζ	局部坐标	
π	圆周率 3. 1415926	
ρ	密度	ML^{-3}
	径向距离	L
ρ_b	固体骨架的密度	ML^{-3}

量的符号	量的名称	量纲
σ	总应力	$ML^{-1}T^{-2}$
σ_c	岩块单轴抗压强度	$ML^{-1}T^{-2}$
τ	时间	T
	弯曲度	
φ	势函数	L
	角度	
φ_0	已知函数	
ω	单位吸水量	LT^{-1}
	权函数	
	入渗或蒸发强度	LT^{-1}
Δ	绝对粗糙率	

目 录

序

前言

符号与量纲

第一章 绪论..... 1

第二章 裂隙介质水动力的理论基础 13

2.1 岩体的裂隙性 13

2.2 裂隙结构面的统计模拟 16

2.3 地质体的透水性 21

2.4 岩体渗透规律及渗透系数张量 27

2.5 裂隙介质渗流的多尺度特性 41

第三章 裂隙介质水动力的特征与模型 47

3.1 概述 47

3.2 岩体水文地质结构模型 48

3.3 岩体地下水流系统模型 53

3.4 岩体地下水动力模型 68

3.5 等效连续介质模型 73

3.6 双重介质模型 78

3.7 网络裂隙介质模型 88

第四章 裂隙介质地下水井流理论..... 115

4.1 概述 115

4.2 平面井流问题的解 121

4.3 三维井流问题的解 129

4.4 解的讨论及应用 135

第五章 裂隙介质溶质运移模拟..... 143

5.1 概述	143
5.2 地下水溶质运移的数学模型	155
5.3 溶质运移试验研究	162
5.4 考虑裂隙面分形特征的溶质运移模型	170
5.5 区域尺度溶质运移的黑箱模型	182
5.6 溶质运移的特征有限分析方法	190
第六章 裂隙介质热量运移模拟	199
6.1 概述	199
6.2 地下水热量运移数学模型	201
6.3 河流峡谷区地下水温度场的分析	207
6.4 区域尺度地下水热量运移数值模拟	213
第七章 地下水运动数值模拟	221
7.1 概述	221
7.2 二维地下水运动数值模拟	223
7.3 数值模拟中若干问题的处理	237
7.4 三维有限元数值模拟	242
7.5 工程实例	250
第八章 水动力参数的确定方法	258
8.1 概述	258
8.2 现场试验法	260
8.3 结构面控制反演法	265
8.4 抽水试验法	277
8.5 弥散参数的确定方法	280
参考文献	289
中英文名词对照	302

第一章

绪 论

裂隙介质水动力学主要是研究地下水在裂隙介质中的运动规律与模拟方法,其研究的重点对象是岩体(地质实体)和其中的地下水。由于野外地质体千变万化,因此岩体中地下水及其中的溶质、热量运移规律也错综复杂。这正是目前相关领域众多学者致力于该命题研究的主要原因之一。

研究裂隙介质地下水运动规律,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。水主要是指重力水,研究的核心是地下水的质、量和力三方面的问题。质指的是地下水的水质,量指的是地下水的流量(数量),力指的是地下水的静水压力和渗透力。水与介质的相互关系重点是研究裂隙介质渗流场、化学场、温度场和应力场之间的耦合问题。

与研究地下水运动密切相关的另一个重要内容是地下水中溶质、热量在裂隙介质中的运移规律。地下水中的溶质或贮存在地下的热量也随着水流的运动在空间上发生迁移,研究裂隙介质地下水热质迁移首先要以研究地下水运动规律为基础。溶质与热量在裂隙介质中的对流、弥散以及与固体骨架之间的物理化学反应,主要受裂隙介质的网络结构以及地下水的运动控制。

裂隙介质地下水运动问题的研究,往往与工程建设相联系。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。80年代以来,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,主要表现为地下水作为荷载对水工建筑物的作用问题,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、垃圾填埋造成的污水下渗、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介质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。

岩体与一般物体的重大差别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,较形象而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。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)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、渗透系数张量、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;Yu Xianbin和Vayssade B.(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,对采样步长极为敏感。为了减小由于采样步长而引起的误差,陈枫、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 Mandelbrot B.B. 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; Takayuki 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), Xu X. 等 (1991), 谢和平等 (1994), 周创兵、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。Xie H. P. 和 G. Pariseau W. (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。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, 真正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, 前苏联学者 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, 裂隙渗透出现沟槽流 (channeling) 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透规律。为了考虑裂隙粗糙度、张开度变化等因素对渗透的影响, 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。

Louis C. (1974) 指出, 把裂隙岩体是当作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