

裂隙岩体应力渗流 耦合特性及锚固理论

王 刚 蒋宇静 李术才 著



科学出版社

国家自然科学基金面上项目(No. 51279097, No. 51379117, No. 51479108)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB723104)

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

裂隙岩体应力渗流耦合特性 及锚固理论

王 刚 蒋宇静 李术才 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

节理岩体应力渗流耦合机理及锚固理论是岩土工程及其相关领域的重要科学和技术问题。本书围绕这一关键问题开展系统研究:研制了新型数控剪切渗流耦合试验系统,可在恒定法向荷载和恒定法向刚度边界条件下进行裂隙面的应力渗流耦合试验;基于试验和数值模拟研究,系统分析粗糙裂隙面剪切破坏机理和溶质运移特性,建立了粗糙裂隙面的剪切强度模型和渗流计算模型;基于颗粒离散元法,系统分析裂隙面—浆体—锚杆耦合作用机理,揭示了裂隙面的锚固机理,提出了裂隙岩体锚固中“宏观耦合支护”的概念,建立了锚固裂隙岩体断裂损伤理论模型和计算方法;结合自洽理论和应变能等效原理等,建立了渗透压力作用下裂隙岩体应力渗流耦合模型;基于以上理论模型和计算方法,系统开展工程应用研究。

本书可供从事岩土工程、矿山工程、水利水电工程、隧道工程等研究领域的科技工作者、研究生、本科生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体应力渗流耦合特性及锚固理论/王刚,蒋宇静,李术才著. —北京:科学出版社,2014. 11

ISBN 978-7-03-042224-8

I. ①裂… II. ①王…②蒋…③李… III. ①岩石力学-渗流力学②岩石力学-流体动力学 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 244664 号

责任编辑:李 雪 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:309 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

进入 20 世纪 60 年代以后,随着科学技术发展和能源需求加大,越来越多的研究人员致力于深部地下空间开发和利用的研究,由于这些岩体工程规模巨大、建造成本高,如何保证这些岩体工程的稳定性和安全性就成为目前工程界和学术界最关心的问题。一般来说,地下工程结构的稳定性往往取决于对岩体介质力学特性的理解和把握。天然岩体在长期的地质作用下会生成各种不同类型的节理、裂隙、断层、软弱夹层等各种不连续面,形成节理岩体,其力学响应更多地依赖所包含的不连续面的力学特征,国内外无数次的岩体工程实践也表明,岩体工程的失稳破坏多数是在环境应力作用下,由原生及次生节理裂隙的产生、扩展、滑移贯通造成的。

在节理岩体中,渗流主要通过断裂节理网络实现,其中单个节理的力学和几何性质的描述是理解断裂岩体内的渗流变形性质的基础。研究节理渗透性的方法主要有数值分析法、解析法和试验研究法。单个断续节理的渗流性质是外部荷载、节理开度、表面粗糙度的函数。外力引起节理变形,改变了节理渗流速率,进而引起孔隙压力变化,孔隙压力变化又会影晌节理变形。根据作用力的大小和方向不同,节理的力学性质在一定范围内发生变化。依据节理表面几何性质、变形性质和岩石材料的强度,作用力将影响节理的张开、闭合,并产生新的接触点,甚至破坏节理岩石材料。

在地下工程开发与建设中,锚杆、锚索等杆状支护系统的应用日渐广泛。此类系统工作时,支护材料与被支护体共同作用,约束被支护体的变位,从而达到支护的目的。二者交界面上的剪切力能否有效传递对支护效果有直接的影响。本书基于以上背景展开相关内容的研究和讨论。

本书是在广泛参阅前人研究成果的基础上,根据作者在裂隙岩体方面的研究成果与工程实践完成的。本书系统地阐述裂隙岩体水力耦合作用的基本理论和方法,深入探讨裂隙岩体锚固机理及其计算理论,并开展理论模型在地下洞室群工程中的应用研究。本书主要分为两大部分:第一部分介绍裂隙岩体强度模型和渗流耦合理论(第 2~4 章);第二部分介绍裂隙岩体锚固机理和理论模型及应力渗流耦合作用下裂隙岩体损伤理论模型(第 5~7 章)。为了加深读者对裂隙岩体应力渗流耦合特性及锚固机理的认识,书中还介绍了部分工程应用实例。

本书的编写,参阅了大量的国内外有关工程地质、力学理论和数值模拟等方面的专业文献,谨向文献的作者表示感谢。衷心感谢黄娜、袁康和张学朋等在本书编辑和校核中的辛勤工作,也感谢其他老师和朋友的关心和指导。同时感谢山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室等单位的大力支持,使本书得以高质量及时出版。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

· 作 者

2014年8月

目 录

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 节理裂隙应力渗流耦合机理研究综述	2
1.2.1 岩石裂隙表面形貌描述方法研究	3
1.2.2 岩石裂隙渗流特性描述方法	6
1.2.3 正应力对岩石节理渗透性影响的试验研究	7
1.2.4 剪切变形对岩石节理渗透性影响的试验研究	8
1.2.5 岩石裂隙渗流应力耦合模型研究	9
1.2.6 岩石裂隙中溶质运移研究	9
1.3 裂隙岩体锚固研究综述	11
1.3.1 试验及理论分析方面	12
1.3.2 数值分析方面	13
1.4 本书主要内容	14
参考文献	15
第 2 章 粗糙节理面剪切破坏机理和强度模型	23
2.1 岩体节理剪切试验装置开发与试验研究	23
2.1.1 新型岩体剪切试验装置的开发背景	23
2.1.2 直剪试验装置的硬件和软件系统	25
2.1.3 岩石裂隙的剪切力学行为的试验研究	30
2.2 结构面剪切破坏细观机理数值模拟研究	40
2.2.1 岩石材料的颗粒流程序表达	40
2.2.2 岩石压缩破坏过程的细观模拟研究	44
2.2.3 岩石节理面剪切破坏细观机理研究	52
2.3 裂隙表面形态数学描述及特性研究	63
2.3.1 裂隙表面形态特征函数	63
2.3.2 裂隙表面形态特征理论研究	69
2.4 粗糙节理面随机强度模型	73
2.4.1 单个长方体凸起剪切破坏分析	74
2.4.2 随机强度模型建立	76

2.4.3	物模试验验证	78
2.4.4	随机模型中参数影响	82
2.5	地下洞室围岩裂隙开裂判断方法及其应用	84
2.5.1	工程研究背景	84
2.5.2	裂隙扩展判据	85
2.5.3	裂隙扩展判断方法与计算流程	87
2.5.4	工程应用概况	88
2.5.5	数值模拟计算与分析	91
2.5.6	分析和讨论	95
2.6	本章小结	96
	参考文献	97
第3章	粗糙节理面剪切渗流耦合试验及数值模拟研究	101
3.1	岩石节理水力耦合特性研究	101
3.1.1	节理裂隙水力学性质描述	102
3.1.2	自然岩石节理渗流性质研究	105
3.1.3	岩石节理水力耦合研究	108
3.1.4	岩石结构面渗流特性研究新进展	110
3.1.5	小结	111
3.2	剪切渗流耦合机理试验研究	112
3.2.1	试验装置概括	112
3.2.2	数控伺服系统的建立	113
3.2.3	岩石试件准备及表面数据测量	114
3.2.4	剪切渗流试验过程	117
3.2.5	试验结果分析	118
3.2.6	小结	121
3.3	节理裂隙剪切渗流耦合试验数值模拟研究	121
3.3.1	试验描述	121
3.3.2	试验过程中力学开度的应用方法	122
3.3.3	数值计算控制方程	124
3.3.4	边界条件和接触面积的处理方法	126
3.3.5	结果比较和分析	127
3.3.6	小结	130
3.4	本章小结	132
	参考文献	133

第 4 章 粗糙节理面渗流计算模型和溶质运移机理研究	137
4.1 考虑分形特征的节理面渗流计算模型研究	137
4.1.1 节理面渗流计算分形模型	137
4.1.2 节理面分形维数计算	140
4.1.3 节理渗流计算公式的验证	143
4.1.4 修正参数的分析与讨论	146
4.1.5 小结	146
4.2 溶质运移数值模拟	147
4.2.1 运移场控制与方程与边界条件	147
4.2.2 运移场模拟结果分析	148
4.2.3 考虑吸附作用的溶质运移	154
4.2.4 小结	156
4.3 本章小结	156
参考文献	157
第 5 章 裂隙岩体锚固机理和理论模型	158
5.1 裂隙岩体基本变形规律研究	159
5.1.1 裂隙岩体几何特性研究	159
5.1.2 节理变形特性研究	161
5.2 岩石节理面锚固作用机理	166
5.2.1 节理岩体锚杆局部应力和变形性质	166
5.2.2 数值计算公式	169
5.3 岩石节理面剪切试验颗粒流模拟	171
5.3.1 数值模型的建立及细观参数的确定	172
5.3.2 加锚节理面直剪试验数值模拟	175
5.3.3 小结	186
5.4 节理面有限元计算模型	188
5.4.1 二维线性节理单元刚度矩阵	188
5.4.2 初应力引起的结点荷载	190
5.4.3 锚杆对节理面“销钉”作用	191
5.5 加锚岩石节理有限元计算方法	192
5.5.1 节理面计算方法	192
5.5.2 锚杆对节理加固作用有限元计算过程	192
5.6 本章小结	193
参考文献	193

第 6 章 加锚裂隙岩体计算模型研究及应用	195
6.1 加锚节理面应力和变形研究	195
6.1.1 压剪应力状态下节理面变形特点与锚杆应力分析	195
6.1.2 拉剪应力状态下节理面变形特点与锚杆应力分析	197
6.2 加锚裂隙岩体本构关系	198
6.2.1 压剪应力状态下的本构关系	198
6.2.2 拉剪应力状态下的本构关系	202
6.3 损伤与弹塑性耦合有限元实现	203
6.3.1 损伤演化方程	203
6.3.2 损伤与弹塑性耦合实现的基本方法	205
6.3.3 材料非线性问题增量解法一般原理	208
6.3.4 增量变塑性刚度法的基本思想	208
6.3.5 迭代方法	209
6.3.6 程序功能	210
6.4 加锚裂隙岩体损伤模型在地下洞室群工程中的应用	213
6.4.1 工程算例一	213
6.4.2 工程算例二	219
6.5 结论	226
6.5.1 大岗山数值计算结论	226
6.5.2 琅琊山数值计算结论	227
6.5.3 综合结语	227
6.6 本章小结	228
参考文献.....	228
第 7 章 渗透压力作用下加锚裂隙岩体损伤模型研究	230
7.1 渗透压力作用下裂隙面上有效应力计算	230
7.2 渗透压力作用下加锚裂隙岩体损伤模型	231
7.2.1 压剪应力状态下本构关系	231
7.2.2 拉剪应力状态下本构关系	232
7.3 工程应用研究	232
7.3.1 工程概况	232
7.3.2 计算模型	233
7.3.3 计算参数	233
7.3.4 计算结果	234
7.3.5 结论	236
7.4 本章小结	237
参考文献.....	237

第 1 章 引 言

历史上的地质构造运动和风化卸荷作用,使得岩体结构中含有大量不同方向、规模、产状的非连续性结构面(节理、断层、裂隙),从而导致岩体在工程结构和力学性能上不同于其他工程材料,呈现非均质、非线性、非连续的各向异性;同时又成为岩体工程地下水流的主要通道,使得岩体渗透特性亦不同于一般孔隙介质,呈非均匀性和各向异性,形成节理岩体。节理岩体中的空隙有以下三类。

(1) 孔隙(pores)。若岩石中的空隙在各方向的尺寸属于同一量级,则称为孔隙。岩石中的孔隙分为水力连通孔隙和水力不连通孔隙两类。水力连通孔隙和土壤中的孔隙相类似,是完整岩石中的渗水通道。

(2) 裂隙(fractures)。若岩石中的空隙在某一方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸(达米级以上),则称为裂隙(岩石力学中称为结构面);若某一方向延伸很长,其他两个方向均相对较小,则称为溶洞(karst cave)或孔洞。若岩石中无裂隙存在,则称为完整岩石(intact rock);若岩石中有裂隙发育,则称为裂隙岩石(fractured rock)。从渗水性上可视完整岩石为微孔隙介质(porous media)。

这些空隙的存在增加了岩体物理力学性能的复杂性,另一方面也为地下水提供了储存和运移的场所,对其进行重点研究的必要性体现在许多应用学科进一步发展的需求和一些重大的急需解决的实际工程问题中,如水利水电工程、岩土工程、石油工程以及近年来在国际上成为研究热点的高放射性核废料地下储存等。

(3) 微裂隙(microfissures)。若岩石中的空隙在一个方向的尺寸远大于其他两个方向的尺寸,且最长的尺寸也是微小的,则称为微裂隙。多数岩石为脆性材料,在其形成过程中受到多种环境影响而出现微裂纹,被视为材料的缺陷。微裂纹分布既有完全随机的,也有大体定向的。微裂纹尖端产生的应力集中现象,对岩石的强度有重大影响。应力环境对微裂纹的宽度有影响,因而其渗透性和应力环境有明显的相关性。

1.1 研究背景

随着二氧化碳地下封存、高放射性核废料地下处置、垃圾填埋等特殊工程的兴建,围岩裂隙体稳定性问题、裂隙介质中地下水流动问题以及污染物随着水流的运移问题近几年越来越受到人们的关注。地下工程的开挖建设对周围裂隙岩体产生较大的扰动,改变其应力和位移场的分布情况,围岩裂隙中的渗流和溶质运移特征

也会因此发生改变,而这对污染物的地下封存与隔离效果有着至关重要的影响。岩体中存在的孔隙和裂隙等缺陷不但大大改变了岩体的力学性质(变形模量和强度参数降低、岩体呈各向异性),而且严重影响着岩体的渗透特性。裂隙岩体的渗流场受应力环境的影响,而渗流场的变化反过来又对应力场产生影响,这种相互影响称为应力渗流耦合。渗流场与应力场相互耦合是岩体力学中的一个重要特性。岩体渗流研究在各种地质工程应用中占有重要的地位,如采矿和石油工程、核废料储存工程。在当前日益增长的环境控制条件下,流入开挖区域水量的估计和污染矿水的排泄程序都是地下工程的发展和运营时期的重要影响因素;在核废料储存工程中,地下水的辐射污染也需要特别注意和预防。要发展一种适合裂隙岩体应力渗流耦合分析模型,充分理解岩石裂隙内水的流动机制是非常关键的。

岩体中节理裂隙的存在严重削弱了岩体强度,降低了岩体的弹性模量,而且,岩体中存在的结构面在外部荷载作用下往往更容易发生错动和离层等变形。为限制裂隙和岩石变形、提高岩体强度和工程结构稳定性,岩体工程需要采取适当的加固措施。作为岩体支护的主要手段之一,锚杆已广泛应用于隧道工程、地下工程、采矿工程、堤坝工程和水利水电等各种工程中。研究发现:在节理岩体中,节理面和锚杆相互作用,节理面对锚杆产生剪切作用,锚杆同时限制了节理面变形,致使锚杆在节理面附近发生明显弯折和变位,锚杆的变形往往远大于岩体的变形,但目前锚杆计算模型尚不能有效反映这一特性。本书对锚杆在节理面附近的局部变形和受力状态、节理-锚杆加固系统模型进行深入的分析 and 研究,并将研究成果应用于地下洞室群的稳定性分析中,取得了较好的效果。

1.2 节理裂隙应力渗流耦合机理研究综述

在水利水电、石油开采和核废料储存等工程中都存在许多岩石节理渗流问题。在岩体介质中,空隙的尺寸和连通程度一般都远小于岩体中节理裂隙,而且裂隙的水力传导系数远远大于完整岩石中孔隙的渗透系数,因此裂隙网络是岩体中水运动的主要通道。单裂隙面是构成岩体裂隙网络的基本元素,岩体的渗透性能和渗透方向不仅与裂隙网络的发育、切割特征有关,还与单个裂隙的几何特征(如裂隙的宽度、方向、粗糙性和充填性等)密切相关。因此,要研究岩石水力学和合理地预测工程岩体中复杂的渗流状态,必须从单裂隙面的渗流特性这一基础性课题入手,首先对单一裂隙的水力特性进行研究。

岩石裂隙水力耦合作用主导着裂隙中水流和溶质运移行为。人们很早就开始对裂隙的剪切渗流耦合机理以及介质中地下水溶质运移进行了探索研究,并且在试验研究、理论分析和计算方法等方面取得了一定成果。然而,由于岩体裂隙系统本身错综复杂,在各种作用力的影响下,其空间几何因素的复杂性、渗透系数的各

向异性和弥散系数不确定性加大,使得该研究变得非常困难。Wels 和 Smith^[1]指出裂隙网络中的溶质运移机理取决于单裂隙中溶质运移特点,因此研究扰动作用下裂隙网络中水流和溶质运移特性,应以研究单裂隙在剪切过程中地下水流动状态和溶质运移机理为基础,探索裂隙介质中渗透性、对流、弥散、吸附等特征。地下水流动和溶质运移特征受很多因素影响,如水的黏度、流速、裂隙的连通性、隙宽、裂隙面的粗糙度及一些参数的尺寸效应等^[2,3],而剪切作用使这些因素变得更加复杂。早期关于单裂隙介质中水流与溶质运移成果多数是基于光滑平行板裂隙的理想简化模型,而自然界中裂隙表面一般是粗糙不平的,此外 Isakov 等^[4]也认为裂隙水流与溶质运移研究进展缓慢的原因不仅是影响因素繁多,还有裂隙面的几何特征的描述比较困难。因此合理描述裂隙表面粗糙特征,开展剪切过程中单个粗糙裂隙中水流与溶质运移机理研究具有重要意义。粗糙裂隙在剪切作用下的渗流与溶质运移研究主要针对剪切作用影响下裂隙中水流与溶质运移规律以及模拟方法,研究内容可以归纳为以下几个方面:①剪切作用影响;②粗糙裂隙介质;③流体渗流;④溶质运移;⑤水流与溶质运移之间的相互关系。研究粗糙裂隙中溶质运移首先要以研究裂隙中水的渗透特性为基础,水的渗透性又直接受到裂隙表面的粗糙形貌影响,而剪切作用则直接改变节理裂隙的形貌特征。

1.2.1 岩石裂隙表面形貌描述方法研究

自然中大多数裂隙面都是凹凸不平的,裂隙表面形态特征对节理面的剪切作用、流体流动的曲折性和溶质运移的弥散特性等都有重要的影响。定量地描述裂隙表面形态进而确定合理的表面形态参数对研究裂隙中流动特性以及建立形态特征参数与流动特性之间的定量关系具有重要的意义。描述裂隙表面形态特性方法因测量方式和实际应用而异。总的来说,人们对裂隙表面形态研究方法大致可以分为几何形状假设方法、统计学方法和分形几何方法三大类。

1. 几何形状假设方法

几何形状假设方法一般把裂隙表面形貌假设为由一系列不同几何形状的微小凸起组成,基于每个凸起之间的作用机理得到整个节理面的力学反应。常见的形貌假设主要有平行板假设、锯齿形表面凸起假设、球形凸起假设和长方形凸起假设等。

(1) 平行板假设。早期的研究一般把粗糙裂隙面简化为由两个相互平行的板面组成,这是最简单的假设方法,常用的立方定理就是基于该模型推导得出的。然而由于自然裂隙面一般是粗糙不平的,与理想的光滑平行板表面相差较远,所以该假设会使计算产生较大的偏差。

(2) 锯齿形表面凸起假设。该假设把起伏不平的裂隙表面形态简化为具有相

同角度的规则齿形和不同倾角的不规则齿形。Johnston 和 Lam^[5]、Seidel 和 Haberfield^[6]、Yang 等^[7]、Yang 和 Chiang^[8]都对锯齿形表面进行了大量的研究,分析了倾角、齿距等参数与裂隙面力学特性之间的定量关系。锯齿形表面凸起假设是最为常见的形貌假设方法。

(3) 球形凸起假设。1966 年 Greenwood 和 Williamson^[9]把裂隙表面简化为球形凸起,并推导出两个球体之间的接触作用。Brown 和 Scholz^[10]应用 Greenwood 和 Williamson 所得的理论结果,把裂隙上下表面均假设为由半径不同的球体组成,并且推导了裂隙面的闭合特性。由曲率不同的球形凸起组成的裂隙表面与自然裂隙形貌最接近,然而由于球体之间相互作用的理论解难以求出,导致该几何形貌假设下裂隙面之间相互作用的解析解难以得到。

(4) 长方形凸起假设。该假设一般由一系列尺寸不同的微小长方体概化组成粗糙节理表面。Kown 等^[11]依据该表面形状假设,推导得出了裂隙面的剪切强度模型。该形貌假设的优点是当长方形尺度选择合适时,能够较好地反映节理面形貌,并基于此可以推出节理面受力反应的最终状态,但是全面地考虑到具体作用过程存在一定的难度。

2. 统计学方法

统计学方法一般是通过分析裂隙的二维粗糙线得到裂隙表面形态描述参数。常用的统计学方法有粗糙度系数法、统计学参数法和地质统计参数法等。

1) 粗糙度系数法

粗糙度是衡量节理裂隙面相对于平面的波动起伏程度的指标,对裂隙中流体流动的曲折性有重要的意义。Barton^[12]从工程角度出发,研究具有不同表面形态的节理面力学行为,并在此基础上提出了节理粗糙度综合描述参数,其中节理面粗糙度系数 JRC 得到普遍的认可,至今该系数仍被广泛应用于各种工程实际中。1976 年 Barton 和 Choubey^[13]通过对 136 条节理面形貌进行统计分析,按其粗糙程度大小,将节理粗糙度系数划分为 10 级,相应的 JRC 取值为 0~20。在进行实际的粗糙度评价时,可将相同尺寸的被观测节理面表面形状与 10 条标准剖面线比较,并选取最接近的 JRC 作为其取值大小。然而,Kulatilake 等^[14]认为 JRC 仅可以用来表征平稳粗糙度,不能用来反映非平稳粗糙度;Maerz 等^[15]认为 JRC 并不具有严格的几何意义,它的确定方法包含主观因素,因而失去了科学上的唯一性和严谨性,可能引起预测的节理裂隙力学行为出现严重偏差。

2) 统计学参数法

自然岩石裂隙表面一般是粗糙不平的不规则几何面,因此可以采用统计学参数或者函数来描述。常见的统计学参数通常包括节理凸台高度、倾角、形状和分布等^[15,16],可以把它们大致分为三类^[17]。

(1) 振幅参数。主要是用来反映粗糙表面凸台高度变化情况的参数,如中线均值 C 、凸台高度的均方值 M 、均方根 R 和绝对粗糙度 k 。

(2) 斜率参数。主要是反映裂隙面凸台形状的参数,如凸台高度的一阶导数即斜率 Z_2 、二阶导数即曲率 Z_3 、平均微角 i 和粗糙度指数 R_p 等。

(3) 混合参数。即同时涉及振幅变化和凸台斜率变化的参数,如自相关函数 A_c 、结构函数 S 和谱密度函数等。

统计学描述参数多达十几个,如此多的参数似乎足以用来描述粗糙裂隙的表面形态,然而实际情况却远非如此。Bahat^[18]引入 14 个不同参数来描述裂隙表面形态,这些参数涉及表面几何形貌的各个方面,但仍没有得到普遍的公认。由此可见,描述裂隙表面几何特征的参数并不是越多越好。当这些描述指标体系中的参数多到一定程度时,整体的描述精度反而会由于体系复杂性的增加而下降。

3) 地质统计参数法

在岩石裂隙表面形貌定量描述的进展中,另一值得注意的方法为地质统计学方法。该方法的基本函数一般为经验方差函数和半经验方差函数,定义为振幅变化的均方值^[17]。研究表明,地质统计学的相关参数,如基台值、变程等,可以用来描述裂隙表面形态。Ferrero 和 Gianì^[19]认为方差函数和 JRC 之间存在某种关系,Roko 等把方位角等参数引入方差函数中,得到了用极坐标来描述粗糙节理面各向异性的方法^[17]。

3. 分形几何方法

法国数学家 Mandelbrot 在 1973 年首次提出了分维的设想,并创造了“分形(fractal)”这个新术语。后来 Mandelbrot^[20]又提出了分形几何,用来描述自然界不规则以及杂乱无章的现象和行为。与欧氏几何有着本质不同的是,分形几何认为自然界中物体几何图形的维数可以不再是整数。对于欧氏空间中的一维、二维或三维不规则图形,其分形维数均可分为分数。

自然界的大多数复杂几何形状都具有分形特性,同样岩石节理表面形状也具有分形特性,可以用分形维数来描述岩石节理表面的粗糙性^[3],常见的分形维数计算方法有尺码法、覆盖法、谱密度分析法和变差分析法等。Lee 等^[21]应用分形几何的尺码方法测量了节理剖面的分形维数,Marerz 等^[15]、谢和平和 Pariseau^[22]分别根据经验建立了 JRC 值与分形维数之间的关系式,Murata^[23]研究了节理面分形参数对曲折效应的影响规律。

与统计学参数相比,分形参数深刻地揭示出粗糙表面的几何形态特性,然而在具体应用中也存有一些困难。Den Outer 等^[24]指出应用连续的分形理论估算离散测试数据集有可能会产生一些数学上的偏差。针对此观点,Carr^[25]仍充分肯定分形描述的作用,并认为分形维数和 JRC 曲线之间数学关系的建立是岩体裂隙表面

形态描述方法上的又一进展。Borodich^[26]认为在测量自然界中任何物体的分形时,其观测尺度均不能无限地减小,因而数学意义上的 Hausdorff 观测概念并不完全适用于自然界物体的实际描述中,需要严格区分物理分形和数学分形的概念。Borodich 的观点消除了分形理论应用中的诸多疑问,有助于应用该方法分析解决一些实际问题。

1.2.2 岩石裂隙渗流特性描述方法

1. 立方定理应用及演化

岩石中的裂隙受其生成环境(应力、温度、造岩矿物、卸荷、沉积、溶蚀、风化等)影响,其几何特性十分复杂。为了方便研究,必须将裂隙进行简化或者抽象。最早的研究是将裂隙简化为由两块光滑平行板构成的缝隙。苏联学者 Володько^[27]、Ромм^[28]和西方学者 Snow^[29]都对缝隙水力学进行过开创性的试验研究及理论研究,建立了通过裂隙的流量与隙宽的三次方成比例的经典公式,即著名的立方定理。由于实际的裂隙面远非光滑面,所以立方定理必须根据裂隙面粗糙度进行修正,在这方面做出贡献的有 Louis 和 Maini^[30,31]、Черныцёв^[32]、Neuzil 和 Tracy^[33]、Tsang 和 Witherspoon^[34,35]、Barton 等^[36]、Elsworth 和 Goodman^[37],他们从不同的角度考虑了裂隙面粗糙度对过流能力的影响。这些修正都是基于对裂隙面粗糙度的测量。Brown 和 Scholz^[38]使用测针式断面测量仪测量断面粗糙度,精度可达 $0.1\mu\text{m}$ 。近年来采用的用于测量金属加工面光洁度的激光技术,可以达到非常高的精度。由于裂隙面粗糙不平,裂隙隙宽测量困难。对于试验的单一裂隙,Hakami 和 Barton^[39]、Hakami 和 Larsson^[40]及 Detwiler 等^[41]采用复制的透明裂隙,用水滴法和光穿透技术测量隙宽的分布。但这类技术无法用于岩石中裂隙的测量,于是又提出了平均隙宽、机械隙宽和水力等效隙宽的概念。将实际裂隙进行实验室或现场试验,求得恒定的流量后,按立方定理反求隙宽,即水力等效隙宽。水力等效隙宽在更高的层次上反映了裂隙面粗糙度对其过流能力的影响。

在平行板裂隙水力特性试验成果的基础上,很自然地就进入实际粗糙裂隙的试验研究。通过裂隙的流量与其隙宽的三次方成正比,而隙宽又受裂隙应力环境的影响,因此,实际裂隙的水力传导系数试验必须引入应力环境因素,即裂隙法向应力、剪切应力与隙宽的函数关系,从而确立应力与裂隙水力传导系数的关系。

立方定理是否成立、在什么条件下成立一直是学术界讨论的热点。上述问题只能通过单一裂隙水力特性的试验研究来解决。在这方面进行研究的有 Snow^[29]、Louis 和 Maini^[30]、Rissler^[42]、Kranz 等^[43]、Detournay 和 Cheng^[44]、Gale^[45]、Raven 和 Gale^[46]、Teufel^[47]、Peters 和 Klavetter^[48]、Nolte 和 Pyrak-Nolte^[49]、Makurat 等^[50]、Esaki 等^[51]、Myer^[52]、刘继山^[53]、张有天^[54]、耿克勤和吴

永平^[55,56]、速宝玉等^[57,58]、周创兵等^[59]、赵阳升^[60]、胡运进等^[61]、刘才华等^[62]。

2. 粗糙度对裂隙渗透性的影响

断续节理特性(节理张开度、粗糙度、方位和充填材料)在很大程度上影响和决定着岩体的力学和水力学性质。由于节理粗糙度直接影响岩石的剪切强度和渗流特性,在过去的二三十年里,许多的研究者致力于表面粗糙度描述的研究(Barton^[63]、Barton 和 Choubey^[64]、Brown 和 Scholz^[38]、Xie 和 Pariseau^[65]、Kwasniewski 和 Wang^[66]、Barton 和 Quadros^[67])。节理面粗糙度定义为节理表面相对于参考平面的波度和波状起伏。节理几何粗糙度的量测常用节理粗糙度系数来表示,该系数仅是节理粗糙度的数标,并不代表节理粗糙度的有效摩擦角。岩石矿物性质和断裂节理开裂模式等控制节理粗糙度的大小,而且,节理粗糙度随节理开度、充填材料厚度、节理面的相对位移的变化而变化。同时,节理使粗糙节理的剪切强度减小,从而降低节理粗糙度。基于节理面的曲折起伏,ISRM 协会定量描述了节理粗糙度。

Barton 首先引入节理粗糙度系数(JRC)来描述节理粗糙度,其值一般为 0~20。JRC 描述了相匹配表面的峰值粗糙度,通过在节理岩体试件上进行适当的打击试验,或者推拉试验来测得,也可以通过待测节理面与标准粗糙程度剖面 JRC 排列的视觉对比测得^[68]。后一种测量方法受主观因素的影响,仅是一个近似的方法。节理粗糙度系数越大表示节理面越粗糙,理想平滑的节理面,其 JRC 可以为 0。由于节理间凸起的影响,对于同类型的岩石节理,粗糙的岩石节理比光滑的岩石节理拥有更高的节理摩擦角。与表面粗糙度相关的摩擦角称为有效粗糙角度,其值的大小依赖于表面轮廓(表面凸起的几何分布)、接触面积和凹入曲折形^[69]。许多表面粗糙度量测方法被研究者发明提出^[70,71]。为了研究节理粗糙度对节理的力学和渗流性质的影响,首先必须正确地绘制节理表面的几何轮廓。

1.2.3 正应力对岩石节理渗透性影响的试验研究

关于应力状态对裂隙渗透性的影响,多数的研究都集中在正应力对节理渗流的影响。已经有许多的研究者进行了法向荷载对岩石断裂节理渗流影响的实验室研究^[46,72-80],其研究成果已经比较成熟。研究发现,加载初始由于裂纹的闭合渗透性降低,随着加载的继续增加,渗透性开始升高;渗透性的升高是由于新生裂隙的形成。随着法向荷载增加,一般渗透系数的变化呈现如下三阶段性质:①渗透系数不变;②渗透系数降低;③渗透系数升高。

一些试件在加载过程中经历所有三个变化阶段,然而也有部分岩石试件仅展现出其中的两个阶段变化。当岩石试件的节理面方位与法向加载方向一致时,在法向加载的开始阶段,岩石试件的渗透性几乎保持常数不变;而渗透系数值则依

赖试件围压的大小。在加载过程中,渗透系数的降低往往与法向应力的升高引起节理面的闭合相关;继续增加的法向荷载引起新宏观裂隙的产生和已存在裂隙的膨胀,在试件内形成新的连通节理网络,从而引起试件渗透系数升高,直至最后破坏。

已有的试验结果充分表明,透过节理岩体试件的渗透性是围压和节理面相对方位的函数,随围压的升高而降低^[46,77,80,81]。试验结果显示,当围压从 0 增加到 8MPa 时,平均渗透系数减少了 90% 多;然而再继续增加围压,渗透系数不再减小。这是由于节理开度达到残余值,不再受围压变化影响。残余节理开度是节理面应力状态、岩石节理初始表面形状、材料性质和几何性质的函数。在给定围压下,节理面越粗糙,渗透系数的减小越少,即相对于粗糙节理面,平滑节理面的渗透系数随围压增加而降低越显著。Kranz 等^[81]的试验结果也证明了这一结论。

1.2.4 剪切变形对岩石节理渗透性影响的试验研究

关于水力学耦合的研究大多集中于法向加卸载对节理裂隙传导性的影响作用。近年来,考虑法向荷载和剪切应力对断裂节理渗流的影响,即所谓剪切渗流耦合试验引起广泛的研究兴趣^[72-92]。剪切变形对节理渗流的影响作用并不是一个简单的函数关系,剪切应力对断裂节理渗透性的影响依靠剪切位移大小、节理表面形状和粗糙面剪切破坏。

在室内试验环境条件下,Makurat^[68]在挪威岩土工程研究所(Norwegian Geotechnical Institute,NGI)进行了有大于自重的法向应力作用下的节理剪切渗流耦合试验。试验在片麻岩节理裂隙上进行,在 2.8m 的恒定水压和 0.82MPa 的有效法向荷载条件下,当剪切位移达到大约 1mm 时,节理渗透性升高了 2~3 倍。Hardin 等^[92]进行了现场的剪切渗流试验研究,试验在 2m×2m×2m 的石英二长片麻岩块体内的斜节理上进行,试验结果表明节理的渗透性有相对较小的升高;但是,试验节理是非常粗糙的而且块体连接在基岩上。

Barton 等^[36,93]提出了一个新的本构模型来描述水力开度(e)与真实力学开度(E)、节理粗糙度(JRC)间的关系,该模型可以用来分析在加卸载状态下力学开度和水力开度的变化关系,以及岩石节理的剪切行为。

虽然大多数的研究都着眼于法向荷载对断裂节理面渗透性影响的研究,剪切变形对断裂节理面渗透性的影响还没有得到应有的重视,但剪切变形对渗透性依然有着重要的影响。法向变形的增加在多数情况下引起渗透系数减小,但是剪切变形对渗透性的影响有着较复杂的变化关系。剪切应力引起断裂节理渗透性的变化完全依赖于剪切位移的大小、节理表面形状和节理表面凸起的剪切破坏。由于重力的作用,事实上,岩石节理面上都有法向荷载的作用。因此,在给定的外部荷载和边界条件下,常常难以孤立地考查剪切应力对渗透性的影响。Makurat 等^[50]