

杨天鸿 唐春安 著
徐 涛 芮勇勤



Seepage

Characteristic in Rock Failure

—Theory,
Model and Applications

岩石破裂过程的渗流特性

——理论、模型与应用



科学出版社
www.sciencep.com

岩石破裂过程的渗流特性

——理论、模型与应用

杨天鸿 唐春安 著
徐 涛 芮勇勤

国家自然科学基金重大项目

国家自然科学基金项目

中国科学院武汉岩土所开放基金资助项目

三峡大学防灾减灾实验室开放基金资助项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书建立了一种描述岩石介质渗流-应力-损伤耦合作用的力学模型,从应力及其诱发损伤引起渗透性演化规律、渗透性非线性分布对应力-应变及其峰值强度和破裂模式的影响、孔隙与裂隙结构分布对渗流-应力耦合机制的影响等几个关键问题入手进行分析讨论,研究岩石渗流-应力-损伤耦合机制的复杂性。结合地铁隧洞开挖引起围岩渗流破坏过程、承压水作用引起底板突水过程等实例介绍了渗流-应力耦合作用下工程岩体破坏、失稳机制。

本书不但可供地质、水利、交通、采矿、国防等部门从事岩土工程生产、科研、教学的人员参考,也可作为大专院校工程地质、水利工程、采矿工程、岩土工程等专业研究生的教学参考书。本书提供的 RFPA^{2D}-Flow 软件系统,也为进行岩石力学、水力学基本性质实验教学提供了一套数值实验工具,可以在高校和科研单位应用。

图书在版编目(CIP)数据

岩石破裂过程的渗流特性——理论、模型与应用/杨天鸿,唐春安,徐涛,芮勇勤著. —北京:科学出版社,2004
ISBN 7-03-013031-6

I. 岩… I. ①杨…②唐…③徐…④芮… II. 岩石破裂-裂缝渗流
N. TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 016070 号

责任编辑:刘剑波 吴伶伶 王国华 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:吕春珉 / 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

*

2004 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2004 年 10 月第一次印刷 印张:18 3/4

印数:1—1 500 字数:356 580

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

序

工程岩体在渗流与应力相互作用下的动态平衡体系中的变形、损伤破坏及稳定性是许多工程学科面临的共同问题,研究岩石(体)破坏过程中渗流-应力耦合作用机制是岩石力学领域的热点之一。岩石(体)渗流-应力-损伤耦合问题是涉及岩石力学、渗流力学等诸多学科的交叉学科。通常研究渗流-应力耦合问题的缺点是只着重于应力-应变“状态”分析,而对应力诱发岩体损伤破裂过程中渗流-应力耦合机制缺少深入研究,用通常的方法难以研究岩石介质在破裂过程中孔隙与裂隙相互作用及其贯通、扩展等符合工程实际情况的复杂机制。

我阅读了《岩石破裂过程的渗流特性——理论、模型与应用》这本书之后,书中的许多观点和方法使我深感兴趣。该书作者深入、系统地研讨了岩石破裂过程中渗流-损伤耦合力学机制,建立了一种描述岩石介质渗流-应力-损伤耦合作用的力学模型,提出了岩石破裂“过程”中渗流-应力耦合分析方法,具有创新性。该书在复杂的岩石破裂渗流-损伤耦合机制的成因、特征以及应用方面,都有一定的学术深度,为流固耦合作用下岩石破坏机制这一复杂问题的研究提供了新途径。与国内外同类书籍相比,该书在渗流-应力-损伤耦合作用的力学模型、破坏过程中的应力场和渗流场分析、应用领域、实验结果对比以及模拟结果的可视化和模拟系统的可操作性等方面,均具有独到之处,体现了作者的创新精神和新的研究成果。我为该书作者们充满活力的构思与创新精神所鼓舞。该书的出版可以弥补国内这方面研究的不足,并对于促进该研究领域的发展具有重要的意义。

该书内容丰富,是作者在自己创新架构基础上,参阅了国内外大量文献撰写而成的,作者用自己提出的理论模型和数值方法进行了岩石应力-应变-渗透率全过程分析、水压致裂及渗流引起的工程岩体破裂问题(突水、瓦斯突出、岩层移动、边坡破坏)等方面的模拟研究,取得了许多卓有成效的研究成果,该书是值得岩石工程行业科研、设计及现场工程技术人员参考的好书之一。对此,我由衷地感到高兴。相信该书的付梓,会引起同行们的广泛兴趣,并推动岩石力学和渗流力学领域的学术进步。我期待着该书的早日问世,并乐意为之序。



2004年4月15日

前 言

随着我国国民经济的飞速发展,隧道工程和土木工程的规模日益增大。工程岩体在渗流与应力相互作用下的动态平衡体系中的变形、损伤破坏及稳定性是许多工程学科面临的共同问题。据统计,90%以上的岩石边坡破坏与地下水渗透力有关,60%的矿井事故与地下水作用有关,30%~40%的水电工程大坝失事是由渗透作用引起的。此外,地下水抽放、油气开采、水库诱发地震、地表沉降、地下核废料存储等都涉及岩体地应力、地下水渗透力的相互作用及其耦合问题。可见,研究岩石(体)破坏过程中渗流-应力耦合作用机制是岩石力学领域的热点之一。

通常研究渗流-应力耦合问题的缺点是将岩石这种地质材料简化成均匀、等效连续介质(不能反映孔隙结构性质)或离散介质(预定裂隙网络),且只着重于应力-应变“状态”分析。岩石介质是典型的非均匀材料,在应力作用下,将诱发岩体损伤破裂,其渗流-应力耦合机制无疑更为复杂,原来的分析方法难以从破坏过程的角度研究流固耦合问题。本书提出了岩石破裂“过程”中渗流-应力耦合分析方法,深入揭示了该问题对于工程岩体失稳预测及其稳定性设计具有重大的理论价值和实际意义。

本书通过在孔隙水压力和载荷作用下对岩石在变形破裂过程中应力-应变和渗透性演化过程的物理与数值模拟实验,建立一种描述岩石介质渗流-应力-损伤耦合作用的细观力学模型,从应力及其诱发损伤引起渗透性演化规律、渗透性非线性分布对应力-应变及其峰值强度和破裂模式的影响、孔隙与裂隙结构分布对渗流-应力耦合机制的影响等几个关键问题入手进行分析讨论,研究岩石渗流-应力-损伤耦合机制的复杂性。

本书共有9章。第一章绪论,回顾渗流-应力-损伤耦合分析的国内外研究现状,对岩石渗流-损伤耦合机制力学模型的建模方法进行系统归纳和分类,分析以往研究的力学方法及有关数值模型的优缺点,提出了渗流-应力耦合作用下岩石破裂过程的本质和特点,强调研究破裂过程岩石渗流-应力耦合作用机制的理论价值和实际意义。

第二章讨论岩石渗流力学特性和基本方程,介绍了岩石应力-应变-渗透率试验研究的方法。

第三章提出了描述岩体破坏过程中渗透率演化规律的渗流-应力耦合方程,介绍了描述岩石破裂损伤过程的渗透-应力耦合模型和数值方法、模型的有限元方程、耦合迭代循环求解过程的编程思路。

第四章介绍了渗流-应力耦合数值模拟软件 RFPA^{2D}-Flow 系统的开发,通过实例验证,说明了软件的可靠性和相关参数的物理意义。

第五章对岩石破裂过程渗流-应力耦合机制进行了模拟分析。内容包括应力及其诱发损伤引起渗透性演化规律、渗透性非线性分布对应力-应变及其峰值强度和破裂模式的影响、非均匀性对渗流-应力耦合机制的影响。在岩石应力-应变-渗透率全过程方面,数值模拟结果与实验结果的比较贯穿其中,较为一致。本章初步分析了岩石渗流-应力-损伤耦合机制的复杂性。

第六章对水压致裂实验结果进行了模拟。数值模拟结果不仅从数值上再现了岩石试样水力破裂的整个过程,而且发现了一些实验所不易获取的信息(例如复杂的应力场、渗流场、声发射、渐进破裂过程等),表明本系统为研究该问题提供了一套有效的分析工具。

第七章介绍了瓦斯突出过程的渗流力学模型,模拟研究了瓦斯渗流动态过程以及气固耦合作用下瓦斯突出失稳全过程。

第八章应用开发的耦合分析程序分析地铁隧洞开挖引起的围岩渗流破坏过程、承压水作用引起的底板突水过程等工程岩体失稳破坏实例,显示出该系统良好的工程应用前景。

第九章对渗流-应力-损伤耦合的研究进行了总结,并做了展望。

关于岩土体渗流及其应用的书很多,渗流的基本概念及其基本方程在这些文献中有比较详细的论述。本书侧重于探讨岩石破裂过程中的渗透特性,所以书中只用很少的篇幅介绍渗流的基本原理,这些原理请参考相关论著。

本书的特点是抓住了渗流-应力耦合作用下岩石破裂过程的本质是“非均匀介质细观损伤引起渗透性演化及其力学响应诱发宏观破裂的非线性过程”,建立了渗流-应力-损伤耦合模型,并开发出相应的软件系统,这个系统能够对裂纹的萌生、扩展过程中渗透率演化规律及其渗流-应力耦合机制进行模拟分析。这样比过去只考虑应力状态下的渗流-应力耦合模型更为深入,得到了渗流-应力-损伤耦合作用机制及其参数物理意义的规律性认识,可以从细观力学的更高层次上解释宏观工程岩体渗流-应力耦合作用下的破坏、失稳行为。

本书的内容是第一作者杨天鸿博士在第二作者唐春安教授指导下完成的博士学位论文——国家自然科学基金项目“岩石破裂过程渗流-损伤耦合作用研究”(编号:50204003)的成果,这些研究成果都是唐春安教授领导的研究集体——东北大学岩石破裂与失稳研究中心(包括多名博士生和硕士生)共同完成的。其中研究中心成员朱万成博士、刘红元博士以及梁正召、李连崇等博士生都做出了相应的贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

在本书的完成过程中,得到了中国矿业大学周世宁院士,中南大学刘宝琛院士,香港大学 L. G. Tham 博士,中国矿业大学冯启言教授、缪协兴教授、赵阳升教授、韩宝平教授、李玉寿副教授、刘卫群副教授,煤炭科学研究总院朱则虎研究员、

刘秀娥高级工程师,东北大学徐小荷教授、郑雨天教授、王泳嘉教授、徐曾和教授、王述红副教授,清华大学王恩志教授,辽宁工程技术大学潘一山教授、梁冰教授等的悉心指导和无私帮助,在此向他们表示诚挚的感谢!

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业的大量文献,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

书中如有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

联系方式:

地址:东北大学 138 信箱 110004

东北大学岩石破裂与失稳研究中心

网址:<http://www.rfpa.cn>

电话:024-83687705

传真:024-83671626

Email:crisr@mail.neu.edu.cn

作者简介

杨天鸿 男,1968年11月生,辽宁大连人,东北大学采矿系副教授、博士后。中国岩石力学与工程学会东北分会理事、副秘书长,中国岩石力学与工程学会地面工程专业委员会成员。主要从事边坡岩体渗流稳定性、岩石渗流耦合机制研究。参加国家攻关项目、省部级重点科研项目、国家自然科学基金、973项目子课题、开放实验室基金等课题20余项,主持国家自然科学基金、省部级科学基金等课题5项。曾于2001、2002年赴香港大学进行科研合作研究。获省部级自然科学和科技进步一等奖1次、二等奖4次。在 *Key Engineering Materials*、*Rock Mech. & Rock Eng.*、《力学学报》、《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》等国内外学术期刊发表论文40余篇,其中被SCI收录2篇、EI收录11篇、ISTP收录3篇。

唐春安 男,1958年5月生,湖南黔阳人,东北大学长江学者特聘教授、博士生导师。中国岩石力学与工程学会副理事长,国际岩石力学学会中国国家小组成员,岩石力学与工程学会岩石破碎专业委员会主任, *Int. J. Rock Mechanics & Mining Sciences* 和《岩石力学与工程学报》编委。主要从事岩石破裂过程失稳的理论与实验研究。1991年以来,多次赴英国、加拿大、美国、瑞典和我国香港等地开展有关岩石破裂过程的合作研究与学术交流。近年来,先后主持国家自然科学基金及省部级基础研究课题10余项,并获得“跨世纪优秀人才计划”和“国家杰出青年科学基金”的资助,首批入选“国家百千万人才工程计划”。主持完成的“岩石破裂过程失稳的研究”等研究项目,获得省部级科技进步一等奖1次、二等奖1次,省部级自然科学二等奖2次。出版《岩石破裂过程中的灾变》、*Rock Failure Instability and Earthquake mechanisms*、《岩石破裂过程数值试验》等专著5部,在国内外期刊与会议上发表各类学术论文120余篇,其中被SCI收录30余篇、EI收录50余篇、ISTP收录20余篇。

徐涛 男,1975年5月生,湖北随州人,东北大学博士研究生,中国岩石力学与工程学会东北分会会员。主要从事岩石破裂过程失稳及其相关的固流耦合作用的数值模拟和实验研究工作。在学期间参加了多项国家自然科学基金、开放实验室基金、香港基金等科研项目,曾于2002年赴香港城市大学建筑工程系进行科研合作研究,在国内外有关学术刊物和国际会议上发表论文20余篇。

芮勇勤 男,1962年8月生,江苏常州人,长沙理工大学教授、所长,普通高等学校后备学科带头人。从事道路与铁道工程岩体稳定性分析、公路工程地质灾害评价与防灾减灾工程研究。主持和参加国家攻关项目、省部级重点科研项目、国家自

然科学基金等 40 余项,曾于 2001 年赴香港大学进行科研合作研究。获国家科技进步二等奖 1 次,省部级科技进步一等奖 1 次、二等奖 3 次、三等奖 3 次。在《工程地质学报》、《岩石力学与工程学报》等学术期刊发表论文 40 余篇。

目 录

序

前言

作者简介

第一章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 渗流-应力耦合研究现状	2
1.3 渗流-损伤耦合研究现状	5
1.4 渗流-应力-损伤耦合数学模型	8
1.5 岩石材料渗流-损伤耦合作用的基本特征	13
1.6 渗流-应力-损伤耦合作用机制的几个关键问题	14
1.7 渗流-损伤耦合模型的应用	17
1.8 本书的主要内容	17
参考文献	18
第二章 岩石(岩体)渗流力学特性和基本方程	26
2.1 岩石和岩体	26
2.2 岩石(岩体)的孔隙和裂隙结构特征	27
2.3 岩石(岩体)的渗流特性	31
2.4 水对岩石力学性质的影响	38
2.5 岩石孔隙水压力原理分析	39
2.6 水压力对岩石强度和破裂模式的影响	43
2.7 渗流-应力耦合作用的基本方程	47
2.8 岩石应力-应变全过程渗流耦合实验方法	51
2.9 岩石破裂过程渗透性演化基本规律	54
2.10 小结	60
参考文献	60
第三章 岩石破裂过程渗流-应力-损伤耦合模型及数值方法	62
3.1 数值模型的基本思路	62
3.2 岩石材料非均匀性的描述	63
3.3 岩石本构关系的细观统计损伤方程	65
3.4 渗流-应力耦合基本方程	67
3.5 渗流-损伤耦合方程	69
3.6 不同损伤状态下渗透性演化和孔隙水压力作用机制	70

3.7 渗流-应力-损伤耦合计算模型的程序设计	73
3.8 小结	76
参考文献	76
第四章 数值模拟软件系统及应用	78
4.1 开发环境	78
4.2 总体功能	78
4.3 弹性流体一维稳定渗流的迭代计算和误差分析	80
4.4 孔隙水压力作用下岩石拉伸断裂验证	83
4.5 数值模型的工程适用性和评价方法	86
4.6 露天矿边坡岩体渗透参数实例分析	89
4.7 小结	96
参考文献	96
第五章 孔隙水压力作用下岩石破裂过程的数值模拟	98
5.1 数值模型及其参数	98
5.2 孔隙水压力作用下岩石加载破裂过程	100
5.3 岩石应力-应变全过程中渗透系数演化规律	104
5.4 数值模拟结果和试验结果对比分析	105
5.5 孔隙水压力对岩石破裂过程的影响	109
5.6 试件非均匀性对岩石破裂及渗透性的影响	113
5.7 裂纹扩展过程渗透性演化	115
5.8 不同孔隙、裂隙结构岩芯渗系数分布规律初探	119
5.9 小结	128
参考文献	128
第六章 水压致裂过程的数值模拟	130
6.1 水压致裂的力学分析	130
6.2 研究现状	132
6.3 本文模型和其他模型的比较	134
6.4 含单孔围压作用下岩石水压致裂过程	135
6.5 含三孔非对称水压梯度作用下水压致裂机制	143
6.6 环形试件水压致裂过程的数值模拟	149
6.7 非均匀性对水压致裂失稳行为的影响	154
6.8 水压致裂引起裂纹扩展方向	157
6.9 内压膨胀作用下环形试件破坏过程模拟实验对比	159
6.10 水压驱动对裂纹扩展的影响	163
6.11 小结	166
参考文献	166

第七章 瓦斯突出和渗流过程的数值实验	169
7.1 瓦斯突出的渗流力学分析	169
7.2 瓦斯突出过程的数值实验	170
7.3 抽放作用下瓦斯渗流动态过程	173
7.4 抽放对瓦斯突出渗流力学机制的影响	176
7.5 开采引起被保护煤层渗透性演化及抽放效果分析	179
7.6 小结	196
参考文献	196
第八章 工程实例应用	199
8.1 承压水作用底板突水过程模拟	199
8.2 地铁隧洞开挖引起广州海珠广场地表塌陷过程模拟	221
8.3 基坑开挖引起围岩变形破坏过程模拟	226
8.4 开采引起围岩渗透性演化规律数值模拟	230
参考文献	241
第九章 结论和展望	244
9.1 基本结论	244
9.2 展望	246
附录 岩石破裂过程渗流-应力-损伤耦合分析系统(RFPA^{2D}-Flow)	
使用手册(中文版).....	248

第一章 绪 论

1.1 问题的提出

1.1.1 渗流-损伤耦合研究的重要意义

岩石经历了漫长的成岩和改造历史,其内部富含各种缺陷,包括微裂纹、孔隙以及节理裂隙等宏观非连续面,它们的存在为地下水提供了储存和运移的场所。地下水渗流还以渗透应力作用于岩体,影响岩体中应力场的分布,同时岩体应力场的改变往往使裂隙产生变形,影响裂隙的渗透性能,所以渗流场随着裂隙渗透性的变化而重新分布,这种相互影响称为渗流-应力耦合(coupling of seepage and stress)。

1959年12月2日,法国 Malpasset 拱坝在初次蓄水时即发生了全坝溃决,这是典型渗流-应力耦合作用所造成的工程事故例子。人们开始认识到从基础理论和工程应用两方面研究渗流和应力的耦合作用是十分重要和意义深远的。

岩体的渗透特性和水力耦合作用是近年研究的热点问题^[1],随着人类工程活动范围的扩展和规模的扩大,这一课题显得尤为紧迫。就我国而言,在各类陡高边坡工程中这一问题显得尤为突出^[2]。据估计^[3],一个大型高边坡总体坡角加陡,可节省剥岩费用千万元乃至上亿元人民币;经验表明,岩体渗流场的不利影响可使总体边坡角的设计值在 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 范围内变化。因此,通过深入研究裂隙岩体的渗流行为来挖掘边坡潜力或采取排水降压等措施确保边坡安全,显得越来越重要,在个别矿山已是当务之急,如抚顺西露天矿北帮西区边坡岩体需采取排水降压措施,才能确保边坡安全。

总之,无论水电工程、采矿工程,还是建筑基础工程,都存在人类工程干扰力、岩体地应力、地下水渗透力之间的相互影响、相互作用和耦合作用问题。据统计^[4],90%以上的岩体边坡破坏和地下水渗透力有关,60%矿井事故与地下水作用有关,30%~40%的水电工程大坝失事是由渗透作用引起的。此外,地下水抽放、油气开采、水库诱发地震、地表沉降、地下核废料存储等都涉及岩体作用力、岩体地应力、地下水渗透力的相互作用及其耦合问题。可见,该课题是一项具有理论研究价值和实际工程应用背景的重大课题。

岩体是由岩石块体和非连续节理(裂隙)组成的地质结构体。在地质环境和工程扰动作用下相邻节理(裂纹)扩展和相互贯通是工程岩体的主要破坏方式^[5],比如在隧道和地下洞室的开挖过程中应力场的重新分布将会诱发损伤,并演化成宏

观裂隙。这种损伤有可能导致岩体渗透性的剧烈变化,水会渗入到隧洞中^[6]。所以,随着对渗流耦合问题认识程度的加深,人们逐渐认识到损伤破坏、裂纹扩展对岩体渗流-应力耦合作用影响十分显著,主要表现为:

(1) 损伤对渗流过程的影响:即微裂纹萌生、连接、扩展和贯通过程中渗透率演化规律及其力学机制问题。由于扩展中的裂纹的渗流特性与原生节理的渗流特性有着明显的差异,我们必须同时考虑原生缺陷和损伤演化对岩石渗透系数数量值的突变^[7~11],它决定破坏过程中水对岩石中复杂(不规则的)渗流路径的选择^[12],所以影响渗流场空间变化。

(2) 水的弱化和渗透应力诱发损伤过程:水的缓慢渗流降低岩体的刚度和强度,在孔隙水压力作用下,将促使裂纹扩展贯通。水的损伤过程动态地改变岩体的破坏模式。

1.1.2 渗流-损伤耦合概念

这一问题就是岩石破裂过程中的渗流-损伤耦合(coupling of seepage and damage)问题。从广义的概念上讲,渗流-损伤耦合属于“渗流-应力(变)耦合”这一研究范畴内,目的是突出应力诱发损伤破坏过程中渗流-应力耦合作用机制问题,它是渗流-应力耦合问题研究进一步深化发展的必然阶段^[13~14]。从裂隙岩体的角度来讲,岩体孔隙、裂隙的发育对岩体力学性能的影响,称为初始损伤;应力状态下的岩体破裂与失稳,称为损伤演化。无论是初始损伤还是损伤演化,都改变岩体裂隙结构及其渗透特性^[15]。渗流对岩体的力学作用,就是水压力促使裂纹扩展和诱发岩体损伤演化。所以,渗流场和损伤场的内在联系是由于应力诱发损伤作用形成的,岩体的渗流-应力耦合问题就是渗流-损伤耦合问题。

渗流-应力耦合研究侧重于建立不同裂隙结构体系的耦合方法,描述它们的适用条件,而渗流-损伤耦合研究则结合上述模型和常用的数值计算软件,引入介质断裂、损伤判断准则,嵌入描述介质破坏膨胀区渗流-损伤耦合描述方程,研究工程岩体渗流-损伤耦合行为。

作为岩体渗流-应力耦合问题的重要内容,研究由孔隙、微裂隙等缺陷结构组成的低渗透岩石^[16]中裂纹萌生、扩展和岩体中非连续节理(裂纹)扩展和相互贯通过程中渗流-损伤耦合作用机制,已经引起人们的高度重视。需要建立相应的理论和数值模拟方法。认清渗流-损伤机制对于岩石工程稳定性分析、设计具有重要的科学意义,否则会忽略重要因素或使分析结果出现错误。

1.2 渗流-应力耦合研究现状

1.2.1 多孔介质的渗流-应力耦合

对渗流中流固耦合问题的研究,最早来源于土固结理论,当外载增加时,土体

逐渐压缩,同时部分水量从土体中排出,载荷也相应地从孔隙水(或气)上转移到土骨架上,导致土骨架应力增加,土体也进一步变形,直到土骨架应力、孔隙压力与外载平衡时为止。土的这一变形全过程称为固结。

1925年, Terzaghi(太沙基)提出了饱和土体的一维固结理论,按照这个理论,土的力学性质取决于有效应力。Terzaghi的一维固结理论,虽然考虑了渗流对土体固结的影响,但流体渗流不受土体变形的影响,因此未考虑渗流中流固耦合效应。Biot^[17]将孔隙流体压力 p 和水容量 m 的变化也增列为状态变量,此方程是七对状态变量之间的物理关系,是考虑渗流中流固耦合效应的第一个力学理论^[18]。该理论认为,在缓慢渗流的准静态情况下,孔隙水压力不能引起各向同性的多孔介质的剪切变形,但对各个方向的正应变的影响是相同的。同样,剪应力对水容量增量的变化无影响,而各个法向应力对水容量增量的影响是相同的。Biot建立的三维固结理论只考虑了介质变形对流体质量(孔隙变化量 Δn 引起的孔隙储水性变化)守恒的影响,但没有考虑其对渗透率(孔隙变化量 Δn 引起的流量的变化)的影响,因此只能反映流固之间的线性耦合作用。

Biot的耦合理论适合多孔介质,孔隙变化量和渗透率的关系方程、有效应力原理是这个理论的基本框架,孔隙变化量是影响渗透率和孔隙水压的关键指标,所以渗流-应力耦合问题确切地说是渗流-孔隙变化或介质应变耦合问题。考虑到多孔固体与孔隙流体之间的相互作用即使是在弹性状态下也十分复杂,所以渗流-应力耦合概念是这一相互作用机制物理描述的某种简化的提法。

Brace^[20]首先研究了在高围压和孔压下花岗岩的渗透率变化规律,开创了结合应力状态研究岩石渗透率的先例。研究对象是以孔隙为主的岩块,Brace认为,花岗岩的渗透性随着有效围压的增大而减小,而孔隙压力对渗透性的影响与围压不同。Patsouls和Gripps^[21]根据英国约克郡的白垩灰岩的渗透性也得出类似的结论。Gangi^[22]得出完整岩石和多孔渗水岩石的渗透性随围压的变化关系:完整岩石标准化的渗透率 k/k_0 的值随着围压比值 p/p_0 的增大而减小。Walsh^[23]研究了孔隙压力和围压对岩体渗透性的影响,得到渗流系数 K 的立方根与有效压力的对数存在比例关系的结论。这些结果表明,岩体的渗透率分别随着有效压力的增大而减小。Ghaboussi和Dikmen^[24]、Kranz^[25]、Jones^[25]、Keighin^[27]、Zoback^[28]、Senseny^[29]等学者在这方面做了大量的工作。

1.2.2 裂隙系统的渗流-应力耦合研究

天然岩体中大量裂隙的分布,导致岩体渗透性的非均匀性和各向异性。毋庸置疑,裂隙介质的渗流-应力耦合问题要比孔隙介质复杂得多^[1~4],岩体的渗流耦合理论借用了多孔介质耦合理论的原理,侧重对裂隙网络几何形态的描述,同样需要建立渗透率-应力-应变耦合方程以及裂隙渗流有效应力方程。

裂隙水力耦合模型发展最早的是平行板窄缝模型^[19],它把裂隙概化为两光滑

平行板之间的缝隙。1868年,俄国著名流体学家 Boussinesq (布西涅斯基)利用 Navier-Stokes 方程导出了液体在平行板隙中运动的理论公式,由于这一公式体现了裂隙的过流能力与裂隙开度的立方成正比的关系,所以常被称为立方定律。

天然裂隙的形状不规则,粗糙度和起伏度等复杂,因而提高了对水流的阻力。野外观察和实验研究表明:孔隙压力变化会引起有效应力的变化,明显地改变裂隙张开度和液体压力在裂隙中的分布,裂隙水通量随裂隙正应力增加而迅速降低。所以最初的耦合研究探讨裂隙渗透性与法向应力的关系。

Louis^[30]根据一些钻孔压水试验成果给出岩体渗透系数与法向应力呈负指数关系的经验公式;Snow^[31]提出了多组平行裂隙渗透系数随法向应力分布的计算公式;Jones^[25]提出了碳酸盐岩石裂隙渗透系数的经验公式;Kranz^[25]提出 Barre 花岗岩的裂隙渗透系数和应力呈幂函数的经验公式;Gale^[34]通过对花岗岩、大理岩和玄武岩三种岩体裂隙的室内实验,得出导水系数和应力的负指数关系方程;1987年 Tsang^[33]认为由于张开度的变化和岩桥的存在,裂隙渗流出现偏流现象。

国内河海大学王媛^[35]等提出贯通裂隙、水力隙宽和应力呈负指数的公式;作彦卿^[36]通过某水电工程岩体渗流与应力关系实验,得出岩体渗透系数与有效应力存在幂指数关系;陈祖安等^[37]通过砂岩渗透率的静压力实验,应用毛素管模型,拟合岩体渗透系数与压力的关系方程;刘继山^[38]、Barton^[39]、周创兵^[40]等通过大量的研究工作,根据已有的平行板窄缝法向变形经验公式,再利用等效水力隙宽与力学隙宽之间的关系建立渗透-应力的关系式。

1989年,田开铭等通过不同深度处渗透系数与法向应力的回归分析认为,岩体各渗透主值均随深度呈负指数率递减,但递减率不同,垂直方向渗透主值递减的速率大于水平方向渗透主值的递减速率,提出了应力对渗透张量的影响。

为了解释应力作用对裂隙面渗透的影响机理,1987年 Tsang 等发现由于裂隙面在外力下压紧、咬合,通过单一裂隙的水流只集中于几条弯曲的沟槽之中,称之为沟槽流模型;Gangi^[22]提出钉床模型,以钉状物的压缩来反映应力对渗流的影响;Walsh^[41,42]提出洞穴模型;Tsang 和 Witherspoon^[43]提出了洞穴-凸起模型,该模型很好地解释了单裂隙面渗流、力学及其耦合特征;Esaki^[44]就岩体的剪切渗流耦合进行过实验,并对参数取值进行了研究;国内耿克勤^[32]对剪切变形与渗流耦合进行了实验研究,解释了在不同压应力作用下裂隙面剪缩和剪胀的原因。

岩体耦合作用的研究主要集中在预制裂隙渗透系数与应力(应变)间的相互关系上,认为岩体的渗透系数是裂隙面法向应力(应变)函数;在裂隙渗流应力耦合数值模拟方面,目前普遍把裂隙的变形考虑成弹性变形。实际上当拉应力和剪应力较高时,裂隙尖端会产生开裂,裂隙面附近的岩块内可能产生新的裂隙,这些变化会对渗流过程产生显著影响^[15]。所以涉及岩体损伤破裂过程中新裂纹的萌生、扩展和贯通过程中渗透率的演化及其与应力的耦合作用模型越来越受到人们的重视。

近30年来,考虑岩体损伤、破坏对渗流的影响越来越引起水力学专家的重视。

DECOVALEX 的国际合作项目代表了渗流-应力耦合研究领域的最高水平,初步建立了研究 THM 耦合作用机制的理论框架^[45~49]。但是,也提出了关键性的难题:

- ①流体运移和热对流变化对局部裂纹扩展过程较敏感,缺乏合理、细致的解释;
- ②受缺陷和裂纹扩展影响,THM 耦合模型存在不确定性。

1.3 渗流-损伤耦合研究现状

1.3.1 渗流-损伤实验研究

渗流-损伤耦合问题主要研究裂隙扩展、岩石损伤破坏过程中渗流的演化规律。近 30 年来,随着先进的实验设备和方法的不断研制开发,能够测定出特定条件下岩石变形、渐进破裂过程中孔隙结构变化引起的渗透性演化规律及其对宏观力学行为的响应。许多学者进行了大量关于岩石应力-应变-渗透率方面的实验研究工作,认识到岩石材料的破坏及其渗透性质是一个与细观损伤演化和宏观裂纹产生密切相关的过程。目前,先进的实验设备能够测出特定条件下岩石的应力峰值(强度)和渐进破裂及其渗透率演化过程,开始通过实验研究把流固耦合问题的研究从应力状态分析深入到破坏过程分析之中。

最初的研究是通过三轴压缩和剪切实验研究岩石峰值前后的渗透率变化规律,Zhang^[50]在 Carrara 大理石和方解石等岩样上做的渗透实验表明,随着应变的增大,渗透率增加得更加明显。Mordecai 和 Morris^[51]在 Darley Dale 砂岩的断裂实验中测得渗透率增加了 20%,Peach 和 Spiers^[52]、Stormont 和 Daemen^[53]对岩盐的实验也得到类似的结论。

国内李世平^[7,54]最早开展岩石应力-应变-渗透率全过程实验研究。李世平在研究砂岩的全应力-应变渗透性时,发现渗透率是轴向应力-应变的函数。通过曲线拟合法,李世平得出:在不同应力-应变区间,渗透率和应变满足多项式关系方程;发现孔隙压力和围压的比值在峰值后的应变软化阶段对渗透性的影响最大,并且仅在渗透率最大的区间有着重要作用;渗透率在峰值强度前开始增大,最大值滞后于应力峰值。韩宝平等^[9]的研究结果表明,细砂岩、粉砂岩等低渗透率岩石其渗透率都有一个突跳增大的现象,由于岩石结构的不同,突跳点在曲线的峰值前后附近。张金才等^[8]通过实验认为,脆性岩石峰值后渗透率明显产生突跳增大,和体应变变化具有一致性,李树刚等^[10]、姜振泉等^[11]也得到类似的结论。

深入研究这些实验现象可知,在孔隙率低的岩石中,不论岩石是脆性断裂破坏,还是密集裂隙带的滑移,都可以看到岩石膨胀性(dilatancy)的变化^[59]。观察微观结构可以看到:岩石的膨胀主要是由应力增大而导致的微破裂所引起的,同时孔隙裂缝变宽,水流的导通性提高,使得渗透率增大。

随着对岩石破裂机制问题研究的深入,一些学者对峰值后试件剪切带随应变