



裂隙岩体流固耦合响应 与工程应用

赵延林/著

The Fluid-solid Coupling Response in
Fractured Rock Mass and Its Engineering Application



科学出版社

裂隙岩体流固耦合响应 与工程应用

The Fluid-solid Coupling Response in Fractured Rock
Mass and Its Engineering Application

赵延林 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细介绍了裂隙岩体的流固耦合响应和工程应用, 主要内容包括: 岩石裂隙渗流的基本规律, 循环加卸载下岩石裂隙渗流的流固耦合响应, 全应力-应变下岩石渗流的流固耦合响应, 大尺寸原煤试件渗透性流固耦合响应, 层状岩盐透气性的流固耦合响应, 裂隙岩体孔隙-裂隙双重介质流固耦合分析, 岩体裂隙的剪胀-渗流耦合分析, 裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析, 裂隙岩体渗流的气固耦合分析, 承压溶洞突水的流固耦合分析, 高压注水软化煤层的流固耦合分析和含夹层盐穴储气库渗漏的气固耦合分析。

本书可供从事岩土工程、采矿工程、水利水电、水文地质工程等与岩石力学、岩体渗流力学相关的高等学校教师及研究生、研究院所的研究人员和设计部门的设计人员使用, 也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

裂隙岩体流固耦合响应与工程应用 = The Fluid-solid Coupling Response in Fractured Rock Mass and Its Engineering Application/赵延林著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-046557-3

I. ①裂… II. ①赵… III. ①裂缝 (岩石)-岩体-研究 IV. ①TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 288698 号

责任编辑: 刘翠娜/责任校对: 桂伟利
责任印制: 张 伟/封面设计: 无极书装

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>

北京东华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2016年1月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 345 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

裂隙岩体流固耦合响应与工程应用一直是岩石力学领域研究的前沿方向和热点问题。本书围绕裂隙岩体流固耦合这一科学问题，从试验研究、理论分析和数值模拟的角度系统研究裂隙岩体流固耦合的试验基础、耦合效应的力学表征方法和数理分析手段。

本书系统地介绍了裂隙岩体渗流场-应力场之间的耦合作用，从试验研究的角度揭示了循环加、卸载下岩石裂隙渗流的流固耦合响应、全应力-应变下岩石渗流的流固耦合规律和损伤岩盐透气性的流固耦合特性；提出了一种酚醛树脂包裹原煤试件的渗透性测试方法，解决了破碎煤体难以取样或取样尺寸受限的技术难题。

本书从细、宏观的角度研究裂隙岩体的流固耦合机理，系统地开展裂隙岩体双重介质流固耦合分析、剪胀-渗流耦合分析、渗流-损伤-断裂耦合分析和气固耦合分析；构建多种裂隙岩体流固耦合力学模型，基于有限元、有限差分 and 离散元提出解决流固耦合问题的数值分析方法。

在工程应用方面，本书将裂隙岩体流固耦合理论应用于承压溶洞突水、高压注水软化煤层和盐穴储气库安全评价，从流固耦合的角度揭示承压溶洞突水突变、高压注水软化煤层的水力劈裂、盐穴储气库气体渗漏的力学机理。

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目：茅口灰岩隐伏承压溶洞围岩时效破断—滞后突水机理研究（51274097）；国家自然科学基金重点项目：深部大变形巷道围岩破坏与稳定性控制研究（51434006）；湖南省自然科学基金面上项目：渗流-应力耦合作用下采空区有效防水煤柱的服役时效性研究（2015JJ2067）；湖南省教育厅科学研究重点项目：采动应力-渗流耦合作用下防水煤柱时效失稳机理及留设厚度时间修正模型（13A020）和中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金：含水岩石节理三维表面形貌与剪切-剪胀特性关联性研究（13KF03）等科研项目的支持，在此表示感谢。

作 者

2015年9月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 裂隙岩体流固耦合研究的重要意义	1
第二节 研究现状与进展	2
第三节 工程应用前景	9
第二章 岩石裂隙渗流的基本规律	14
第一节 岩石单裂隙渗流的基本规律	14
第二节 岩体裂隙组渗流的基本规律	20
第三节 本章小结	22
第三章 循环加卸载下岩石裂隙渗流的流固耦合响应	23
第一节 试验设备和试件制备	23
第二节 试验原理与方法	26
第三节 试验结果分析	33
第四节 本章小结	46
第四章 全应力-应变下岩石渗流的流固耦合响应	47
第一节 全应力-应变下岩石渗流试验	47
第二节 全应力-应变下岩石的流固耦合特性	50
第三节 本章小结	64
第五章 大尺寸原煤试件渗透性流固耦合响应	66
第一节 酚醛树脂包裹原煤试件的制备	66
第二节 原煤透水性的流固耦合试验	74
第三节 本章小结	80
第六章 层状岩盐透气性的流固耦合响应	82
第一节 层状岩盐的蠕变试验	82
第二节 蠕变损伤层状岩盐气体渗透试验	88
第三节 本章小结	93
第七章 裂隙岩体孔隙-裂隙双重介质流固耦合分析	94
第一节 岩石孔隙的重构与细观渗流分析	94
第二节 岩体孔隙-裂隙双重介质流固耦合模型	105
第三节 本章小结	120
第八章 岩体裂隙的剪胀-渗流耦合分析	121

第一节	单岩石节理的剪切-渗流耦合效应	121
第二节	裂隙岩体的节理剪胀-渗流耦合效应	132
第三节	本章小结	146
第九章	裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合分析	148
第一节	裂隙岩体渗流-断裂耦合模型	148
第二节	裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合模型	161
第三节	本章小结	184
第十章	渗流-应力耦合作用下岩石裂纹蠕变-断裂分析	185
第一节	类岩石裂纹压剪蠕变-断裂试验与力学模型	185
第二节	渗透压-应力耦合作用下岩石裂纹蠕变-断裂机理	203
第三节	渗流-应力耦合作用下岩石裂纹蠕变扩展的 Burgers 模型	210
第四节	本章小结	214
第十一章	裂隙岩体渗流的气固耦合分析	216
第一节	裂隙岩体渗流的气固耦合模型	216
第二节	裂隙岩体渗流的气固耦合模型数值求解策略	222
第三节	本章小结	223
第十二章	承压溶洞突水的流固耦合分析	224
第一节	承压溶洞突水的流固耦合机理	225
第二节	承压溶洞突水的强度折减法与流固耦合联动分析	228
第三节	七一煤矿溶洞突水的流固耦合模拟	230
第四节	本章小结	241
第十三章	高压注水软化煤层的流固耦合分析	242
第一节	工程概况	242
第二节	高压注水软化煤层的流固耦合数值分析	245
第三节	本章小结	251
第十四章	含夹层盐穴储气库渗漏的气固耦合分析	252
第一节	含夹层盐穴储气库渗漏的数值建模	253
第二节	耦合分析结果	256
第三节	本章小结	262
参考文献	263

第一章 绪 论

第一节 裂隙岩体流固耦合研究的重要意义

随着岩体工程技术的快速发展,岩体工程的规模和深度都在不断增长,现代岩体工程中多场耦合问题也越来越突出。岩体总要赋存于一定的地质环境中,即由地应力场、渗流场、地温场及化学场等构成的环境中,这些环境在自然、人类工程等干扰因素的作用下互相影响、相互制约,使岩体时刻处于由这些环境构成的动态平衡体系中。而岩体在这些环境下的动态变形、损伤破坏及其稳定性是许多工程学科面临的共同问题,流体在岩体中流动会改变岩体的原始应力状态,同时岩体应力状态的变化又会影响岩体中流体的流动特性。无论哪一个是主动者,都会使渗流场和应力场相互影响,产生渗流-应力耦合现象,即流固耦合现象。裂隙岩体流固耦合问题无疑是目前岩石力学研究最多的问题之一,也是成果最丰富的问题之一,同时也是岩体工程中最关心的问题之一。

裂隙岩体富含各种缺陷,包括微裂纹、孔隙及节理裂隙等宏观非连续面,它们的存在为地下水提供了贮存和运移的场所。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,渗流场随着裂隙渗透性的变化而重新分布,1959年,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-应力耦合作用造成的工程事故例子。从Malpasset拱坝溃坝事件开始,人们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十分重要且意义深远。岩体的渗透特性和水力耦合作用是近年研究的热点问题,随着人类工程活动范围的扩展和规模的扩大,对这一需求显得尤为紧迫。水电工程、采矿工程、建筑基础工程,都存在人类工程干扰力、岩体地应力、地下水渗透力之间相互影响、相互作用和耦合作用的问题。据统计,90%以上的岩体边坡破坏和地下水渗透力有关,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,可见裂隙岩体流固耦合研究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。

裂隙岩体流固耦合理论作为一个热门课题出现,本身就是基于社会生产发展的需要,因此该课题的应用前景相当广泛,主要体现在以下几个方面。

(1) 在采矿工程方面, 工作面和巷道突水问题发生频繁且后果严重, 尤其是水下开采和老窿空区积水对现行采区的影响等, 随着采矿工程向深部开展, 深部采动裂隙岩体的应力场、温度场、渗流场三场耦合问题也已经引起一些学者的注意。

(2) 在隧道及地下工程方面, 由于基岩裂隙水的存在, 需要考虑在地下水作用下工程的稳定性问题。例如, 近年来西部大开发中一些铁路、公路隧道受地下水作用影响非常明显, 隧道工程中的流固耦合问题也越来越突出。

(3) 在水利水电工程方面, 如南水北调、长江三峡等大型水利工程, 许多安全隐患计算必须考虑裂隙岩体渗流作用下的水压力问题。

(4) 在城市地下水的抽取方面, 可以应用它解决抽水量和地面沉降等相关环境问题。

(5) 在边坡工程方面, 滑坡灾害时有发生, 对于高陡边坡, 需要考虑地表水入侵和岩体裂隙渗流作用下的边坡稳定性问题。

(6) 在石油开采方面, 裂隙岩体渗流理论研究对裂缝性砂岩油藏的开采具有重要战略意义。

(7) 在地热能开发方面, 利用裂隙岩体流固耦合理论可探索高压致裂, 诱导高温岩体的裂隙发展, 让地下热能为人类利用。

(8) 在地下核废料存储方面, 利用裂隙岩体流固耦合理论研究核辐射通过裂隙扩散危害环境, 污染地下水的过程, 以确保地下核废料存储的安全。

由此可见, 裂隙岩体的渗流与应力耦合分析是目前一项非常具有理论研究价值及工程实际意义的重大研究课题。

第二节 研究现状与进展

渗流场与应力场耦合是广义多场耦合的重要内容, 在力学领域中渗流场与应力场的耦合作用被称为“流固耦合作用”, 而在地球科学领域中常被称为“水-岩(土)相互作用”。简单来说, 流固耦合研究的焦点在于研究固体介质和流体间的力学耦合基本规律。耦合现象和耦合问题越来越受到许多领域专家和学者的重视, 多场耦合理论从 20 世纪 50 年代因国外水库诱发地震分析而萌芽, 到 70 年代正式提出, 再到 80 年代以来 Noorisbad 的完善发展, 这期间主要是由 Barton 针对岩体的稳定性和冻土地区隧道涌水问题进行了地下水渗流场、应力场与温度场之间耦合作用的探讨性研究。进入 90 年代中期, 结合放射性废物处置问题的研究, 瑞典核能研究所学者 Jing 给出了相对系统的岩体地下水渗流场、应力场和温度场耦合作用的研究模型, 不过模型的简化实用性不是很好。

天然岩体中裂隙的大量分布, 导致岩体渗透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, 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, 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布西涅斯基(Boussinesq)利用Navier-Stochs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水能力与裂隙开度的立方成正比的关系, 所以该公式常被称为立方定律。

天然裂隙由于形状不规则、粗糙度和起伏度等结构复杂, 增加了对水流的阻力, 野外观察和试验研究表明: 裂隙水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很快降低。所以最初的耦合研究探讨的是裂隙渗透性与法向应力的关系。

Louis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(1966)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(1975)提出了碳酸盐岩石裂隙渗透系数的经验公式; Kranz(1979)提出Barre花岗岩的裂隙渗透系数和应力呈幂函数关系的经验公式; Gale(1982)通过对花岗岩、大理岩和玄武岩三种岩体裂隙的室内试验, 得出导水系数和应力的负指数关系方程; Tsang等(1987)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。

国内河海大学速宝玉和王媛提出, 对于贯通裂隙, 水力隙宽和应力呈负指数关系的公式; 仵彦卿(1995)通过某水电工程岩体渗流与应力关系试验, 得出岩体渗透系数与有效应力存在幂指数关系; 陈祖安等(1995)通过砂岩渗透率的静压力试验, 应用毛细管模型, 拟合了岩体渗透系数与压力的关系方程; Walsh(1979)、刘继山(1987)、Barton(1985)、周创兵和熊文林(1996b)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来建立渗透-应力的关系式; 田开铭等(2003)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规律递减, 但递减规律不同, 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, 且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, Tsang等(1987)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, 称为沟槽流模型。Gangs提出了钉床模型, 以钉状物的压缩来反映应力对渗流的影响; Walsh(1979; 1981)提出了洞穴模型; Witherspoon等(1987)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。赵阳升等(1999)、郑少河等(1999)、常宗旭等(2004)进行了三维应力条件的岩体裂隙渗流

试验,得到了三维应力条件下的单裂隙面渗流-力学耦合作用的方程。

件彦卿和柴军瑞(2000)建立了在裂隙壁施加法向渗透压力和切向拖曳力的两场耦合模型; Esaki (1992)就岩体的剪切渗流耦合进行过试验,并对参数取值进行了研究; 耿克勤等(1996)、夏才初等(2014)对剪切变形与渗流耦合进行了试验研究,解释了在不同压应力作用下裂隙面剪缩和剪胀的原因。

岩体由于受不同尺度各种不连续面影响,呈现出明显的不连续性、非均匀性和各向异性,力学特性,尤其是渗流特性相当复杂。岩体应力-渗流耦合分析的概念模型与岩体渗流的概念模型相似,可以分为拟连续介质耦合模型、离散裂隙网络耦合模型、双重介质耦合模型和渗流场-损伤场耦合模型。最初的岩体应力-渗流耦合研究主要借鉴土体固结的研究成果,采用多孔介质连续模型。随着实际工程对模拟精度要求的提高和地质统计方法的广泛应用,离散网络模型成为研究的热点,出现了一套比较完整的基于随机离散裂隙网络耦合模型和分析方法。近年来,随着 DECOVALEX(development of coupled models and their validation against experiments)等大型岩石工程的兴起,大尺度范围研究和确定性研究越来越受到重视,加之岩体应力-渗流耦合机理研究的深入,离散网络模型已经无法满足上述要求,因此更高层次的等效多孔连续介质模型的研究正成为概念模型研究的热点和前沿。

一、拟连续介质耦合模型

拟连续介质耦合模型是以 Pommrich 等(1958)、Pommé 等(1966)创立的渗透张量理论为基础,用连续介质方法描述岩体的渗流问题的模型。渗流张量是按裂隙格局统计平均参数建立的,可以表征裂隙介质及其水流的各向异性。根据统计原理,平均值在不存在系统变化的情况下才能可靠地描述岩体,所以只有在岩体的小体积范围,即在系统变化不明显的地方,才能应用渗透张量理论。拟连续介质模型认为,只要裂隙岩体的本构关系和相关的参数能够通过连续介质力学的基本理论重新建立,其宏观行为就能够用连续介质力学进行描述。与离散裂隙网络耦合模型相比,拟连续介质模型将不连续裂隙的各种作用(力学作用和渗流作用)包含在等效连续本构模型和相关参数中,可以直接利用连续介质力学中大量比较成熟的结论和方法,避免了求解非连续问题的困难,因此更适合描述大尺度裂隙岩体的总体力学和渗流行为。表征体元(representative elementary volume, REV)是等效连续介质模型中的一个重要概念: REV 是一个尺度,大于该尺度,则 REV 的等效连续性质(包括力学性质和水力学性质)的参数可视为常数。各种等效连续方法都必须在 REV 尺度上进行,这样才能保证方法的有效性。对于裂隙岩体的 REV,通常有以下两个问题:①给定的裂隙岩体,REV 是否存在;②REV 应该取多大。对于这两个问题,肖裕行等(1999)建立了半理论-半数值的

判别方法。Kulatilake 通过对一组不同尺度的随机裂隙网络模型进行数值分析比较,得到了一些初步的定性结论:裂隙密度越大,几何尺寸越大,节理间的交角越大,则 REV 越小,反之亦然。另外,在某些情况下,不存在 REV,即无论 REV 取多大,都不能得到等效连续的行为。Pointe 认为,裂隙岩体的 REV 是否存在主要取决于裂隙系统的几何形态、模型的尺度和单裂隙的性质。目前对 REV 存在的上述两个问题的研究仍在进行中,有学者提出,在使用等效连续介质模型时,对 REV 的选取应该相当小心,而且必须结合具体问题进行分析。早期的拟连续介质耦合模型,以 Oda 为代表,根据裂隙岩体中裂隙方向、大小和开度的概率密度分布,分别推导出裂隙岩体等效各向异性弹性矩阵和渗透系数张量,由 Barton-Bandis 公式,求出裂隙开度的变化。周创兵和熊文林(1996a)对 Oda 的统计公式做了推广,进行了渗透特性与裂隙变形的耦合分析;陶振宇和沈小莹(1988)对岩体渗流应力进行耦合分析以研究水库诱发地震,用迭代法求解使耦合的应力场达到稳定;常晓林(1987)基于渗透主轴与应力主轴保持重合的假定,得到弹性各向同性介质的耦合关系式;王媛等(1998)采用拟连续介质耦合模型提出了裂隙岩体渗流与应力耦合的“四自由度全耦合分析方法”,其基本思路如下:将裂隙岩体渗流场和应力场作为同一场进行分析,联立裂隙岩体满足的渗流方程和应力方程,建立起同时以节点位移和节点渗流水压力为未知量的耦合有限元方程组;赵阳升等(1992;2008)从土力学固结理论出发,根据煤层注水的大量工业试验和大尺度岩体的渗透试验,提出了固体与(不)可压缩流体相互作用的流固耦合数学模型,将耦合模型广泛应用于煤层注水、承压水上采煤突水分析和盐类矿床的开采。拟连续介质模型可采用经典的孔隙介质渗流分析方法,使用极为方便。对于岩体渗流,只要岩体渗流的 REV 存在且不是太大(小于研究域的 $1/50 \sim 1/20$),应尽量采用等效连续介质模型作渗流分析。

二、离散裂隙网络耦合模型

由裂隙(如节理、断层等)个体在空间上相互交叉形成的网络状空隙结构,这种含水介质称为裂隙网络介质。由相互贯通且裂隙中的水流为连续分布的裂隙构成的网络,称为连通裂隙网络;由互不连通或存在阻水裂隙且裂隙中的水流为断续分布的裂隙构成的网络,称为非连通裂隙网络。

岩体应力-渗流耦合的离散裂隙网络(discrete fracture network, DFN)耦合模型假定完整岩块的透水性远小于裂隙,近似认为岩体中的渗流只存在于裂隙之中。该模型有两个关键点:①裂隙系统的几何形态(包括位置、长度、方向、隙宽等);②单条裂隙的变形、渗流及耦合规律。离散裂隙网络耦合模型对裂隙系统的描述建立在裂隙各个参数(位置、长度、方向、隙宽等)服从某一概率分布的假设基础上。通过对现场岩体露头及观测平硐所得裂隙勘测数据的统计分析,确

定各个概率分布的参数；然后根据概率分布，在模型中随机生成裂隙网络进行计算。通常有如下假设：裂隙为圆盘形；圆盘中心点构成一个三维泊松过程；圆盘直径(迹长)是相互独立的，具有相同的分布，一般为正态分布或指数分布；圆盘产状是相互独立的，具有相同的分布，一般为 FISH(fluorescence in situ hybridization)分布或 Bingham 分布，直径和产状相互独立；裂隙开度也是相互独立的，具有相同的分布，一般为对数正态分布。宋晓晨等(2004)对随机裂隙网络的生成方法做了详细的介绍。目前，离散裂隙网络模型多用于裂隙岩体渗流计算，如 Dverstorp、王恩志等(2002)、张有天(1991)、王洪涛、杜广林等(2000)；而用于实际裂隙岩体应力-渗流耦合分析的研究相对较少，张有天根据离散裂隙网络模型，提出增量渗透荷载的裂隙岩体渗流-应力耦合分析方法。离散元方法或非连续变形分析(discontinuous deformation analysis, DDA)方法是数值模拟的主要手段，柴军瑞(2000)建立了岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型来研究大坝及其周围地质体的稳定性。张国新和武晓峰(2003)用 DDA 方法研究渗流变形耦合对岩石边坡的稳定的影响。离散裂隙网络模型的优势在于能够较为精确地表征小尺度的裂隙岩体耦合特征。但在大尺度研究中，离散裂隙网络模型需要大量的裂隙统计数据，而实际工程中，只能从有限的地表露头和观测洞中获得少量的资料，由此生成的随机模型具有很大的不确定性。此外，要把每一条裂隙的力学和渗流特性都进行详细模拟，其计算量相当庞大，以至于难以或无法实现。事实上，绝大部分大尺度研究并不需要详细了解每一条裂隙的应力-渗流耦合特征，只需要得到宏观结论即可。因此，随着一些大尺度研究项目的兴起，以及很多新的数学、力学研究方法的出现，等效连续介质模型焕发出新的生机和活力。

三、双重介质耦合模型

由裂隙(如节理、断层等)和其间的孔隙岩块构成的空隙结构，裂隙导水(渗流具有定向性)、岩块孔隙储水(渗流具有均质各向同性)，这种含水介质称为双重介质，即 Barenblatt 等(1960)提出的双重介质。根据裂隙系统的上述特点，将那些控制渗流总体分布且起主导渗透作用的大裂隙定义为裂隙岩体中的主干裂隙网络(domimant fractured networks)，而将主干裂隙网络间的岩块定义为裂隙岩块(fractured matrix)。由主干裂隙网络和其间的裂隙岩块构成的具有相对导水和贮水作用的水文地质体称为双重裂隙系统。根据岩体空隙的表现形式把岩体空隙结构划分为准孔隙结构、裂隙网络结构、孔隙-裂隙双重结构、孔洞-裂隙双重结构和溶隙-管道(或暗河)双重结构等。

双重介质模型是由苏联学者 Barenblatt 于 1960 年提出的，假定岩体是孔隙介质和裂隙介质相重叠的连续介质(即孔隙-裂隙二重性)，孔隙介质贮水，裂隙

介质导水。很多学者(Ualliappan et al., 1990)提出了各自的双重介质理论模型,不同之处在于对裂隙系统和孔隙系统以及两系统之间的水交替进行了不同的概化。黎水泉和徐秉业(2000)提出一种考虑介质参数随压力变化的双重孔隙介质非线性渗流模型,研究耦合过程中裂隙水压力和裂隙压力随时间的变化规律;杨栋等(2000)根据裂隙发育规模与工程尺度的关系,将裂隙岩体看做由离散介质和拟连续介质组成的广义双重介质岩体,提出了广义双重介质岩体水力学模型,并对其有限元解法进行了较为详细的研究;吉小明等(2003)基于孔隙-裂隙岩体的双重孔隙介质流固耦合计算的微分方程,利用伽辽金有限元法提出的相应有限元公式,并根据岩体分类指标(RQD^①、RMR^②)提出了与岩体应力状态相关的渗透系数计算公式,编制了相应的有限元程序;赵颖等(2004)通过对双重孔隙介质有效应力的研究,建立了各向异性双重孔隙介质线弹性变形的有效应力定律,并在此基础上分析了横向各向同性及结构各向异性、固体材料各向同性时的有效应力定律形式;刘晓丽等(2005)基于岩体渗流水力学和多相渗流力学理论,将工程地质体简化为孔隙-裂隙双重介质,建立了水气二相渗流与双重介质变形的流固耦合数学模型,编制出三维有限元计算程序;赵延林等(2008)将双重介质理论引入裂隙岩体热-水-力(thermo-hydro mechanical, THM)耦合的研究中,将裂隙岩体视为离散网络裂隙介质和拟连续介质的双重介质体系,建立起双重介质温度场-渗流场-应力场耦合模型及其数值解法。

双重介质耦合模型,除包含裂隙网络外,还将岩块视为渗透系数较小的渗透拟连续介质,研究岩块孔隙与岩体裂隙之间的水交换,这种模型更接近实际,但数值分析工作量比较大。

四、渗流场-损伤场耦合模型

岩体水岩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翼形裂隙,这些变化会对渗流过程产生显著影响。所以涉及岩体损伤破裂过程时新裂纹的萌生、扩展和贯通过程中渗透张量的演化及其与应力的耦合作用模型越来越得到人们的重视。

郑少河等(2001)在渗流场与损伤应力场的耦合理论和数值模拟方面进行了探索和研究,建立了数值模型并将耦合模型用于三峡工程永久船闸高边坡裂隙岩体

① RQD是岩石质量指标,是rock quality designation的缩写。

② RMR是能量代谢率,是relative metabolic rate的缩写。

中；唐春安等(1997)、杨天鸿等(2001)研制的 RFPA-FLOW 软件从细观力学的层次解释宏观工程岩体渗流-应力耦合作用下的破坏、失稳行为；江涛基于细观力学的基本理论和方法，推导出基于细观力学的脆性岩石损伤本构模型和损伤-渗流本构模型，但对损伤-渗流耦合模型在大尺度实际工程中的应用问题没有做深入研究；庄宁(2006)以颗粒流理论为基础，运用 PFC 软件从细观力学角度研究了渗流耦合过程中裂隙岩体中裂纹的扩展、萌生规律，并以此为基础运用宏观断裂力学等理论推导了渗流耦合过程中裂纹的扩展、萌生公式，然后将裂纹的扩展公式代入渗透系数表达式，作为渗流场和应力场之间耦合的桥梁，建立裂隙岩体的渗流-应力耦合数学计算模型。

渗流场-损伤场之间的耦合旨在根据断裂力学、几何损伤力学和岩石流体力学的相关知识探讨裂隙在开挖应力、地应力及渗透压力共同作用下裂隙的张开度、扩展和贯通规律。裂隙岩体渗流场-损伤场耦合效应较真实地反映了在渗流场和应力场共同作用下裂隙岩体工程的损伤演化、失稳破坏情况。

裂隙岩体流固耦合模式主要有两类：①直接耦合法，其将渗流场与应力场直接耦合。该方法无须进行渗流场及应力场反复迭代，只要按时间过程连续求解即可得全部结果，概念清楚且每一时步不存在收敛问题。但是这一方法也有缺点：总体刚度矩阵是非对称的，对角线元素绝对值常相差若干个数量级；需要较大的存储容量，总体刚度矩阵接近奇异，可能影响解题精度。王媛的一系列论文完成了 4 自由度(3 个位移分量加水头)全耦合分析，该方法考虑了渗流自由面，又认为渗透张量是应力张量的函数，将渗流与弹塑性问题在同一迭代中完成，给直接耦合法带来了新的活力，有望得到推广应用。②间接耦合法，这是大多数流固耦合模型采用的耦合模式。给定相应于初始应力场的初始渗透张量，求解渗流体积力荷载进行应力场分析，再根据求得的应力张量修改渗透张量，重复上述过程，直到渗透张量不再改变。由于两场分开计算，求解应力及水头矩阵是对称的，节省存量和时间，也不会因刚度矩阵奇异而影响精度，对于许多问题，用间接耦合法要方便得多。

随着商业软件的发展与成熟，越来越多的商业软件具有流固耦合的模块，但是各软件的耦合原理却是不相同的，美国 ITASCA 公司提供的 FLAC^{3D} 作为岩土工程中成熟的计算软件，采用快速拉格朗日元法可以模拟流体通过可渗透固体的流动，如模拟地下水在土体中流动时固体的力学响应、有效应力的减小可能产生塑性屈服。另外，区域内的流体也会通过改变裂隙水压力来响应力学体积的变化。FLAC^{3D} 的流动建模可以由其本身完成，也可以同力学建模并行完成，以便获得流固耦合作用的效果。更重要的是，FLAC^{3D} 作为开放性计算软件具有强大的编程功能，能自定义本构模型，能通过编写 FISH 程序来扩展 FLAC^{3D} 的计算功能。美国 ITASCA 公司提供的离散单元法商业软件有二维平面分析软件

UDEC 和三维分析软件 3DEC, 它们可以模拟地下水在岩体裂隙中流动, 并能实现流固耦合数值计算。研究者改进了 UDEC 程序, 在它的基础上耦合了考虑孔隙渗流和裂隙渗流规律的双重介质模型, 模拟分析高水压力和偏应力作用下岩石渗透的各向异性。ANSYS 中的热传导分析与渗流场分析方程具有相似性, 可以进行渗流场三维动态分析, 通过编写渗透体积力的程序也能实现流固耦合数值计算。

第三节 工程应用前景

裂隙岩体流固耦合理论作为多相介质多场耦合研究领域的一个重要分支, 它的研究成果远比热-水-力耦合的成果要成熟。裂隙岩体流固耦合理论在采矿工程、水利水电工程、边坡工程、隧道工程及一些新兴的岩体工程如深埋油气储库、地下核废料处置库、高温地热开发等领域有广泛的应用前景。

(一) 采矿工程中的流固耦合问题

(1) 煤和瓦斯突出。其是由于在煤岩变形与瓦斯流体耦合作用下, 煤岩体发生突然失稳破坏造成的, 其突出的机理与煤岩体的破裂及瓦斯流动以及二者的耦合作用有关。煤和瓦斯突出发生前, 煤岩体在瓦斯和地应力的作用下的变形过程可以视为一个准静态的平衡, 在外界扰动下可能发生失稳破坏过程, 即发生煤和瓦斯突出。在这方面, 赵阳升做了系统而深入的研究, 建立了一个完整的煤与瓦斯流固耦合的数学模型和煤与瓦斯突出统一失稳机制。其耦合数学模型为

$$\begin{cases} (TP^2_{,j})_i = \left[\frac{n}{p} + \frac{ab}{p(1+bp)^2} \right] \frac{\partial p^2}{\partial t} + 2p \frac{u_{i,i}}{\partial t} \\ \lambda_{(c)} + \mu_{(c)} u_{j,ji} + \mu_{(c)} u_{j,jj} + F_i + (\alpha p)_{,j} = 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

该流固耦合模型和煤与瓦斯突出判据结合可对煤与瓦斯突出做出预测。

(2) 承压水作用底板突水过程。采矿活动必然造成地下岩体应力的重新分布和岩体的破裂损伤, 这种损伤极大地改变了围岩的渗透性, 从而导致顶板或底板突水并造成安全事故。据统计, 65%的矿井事故与地下水作用有关, 其中, 华北型煤矿区石炭-二叠纪煤层的开采受到底板奥陶系强岩溶含水层的威胁, 是矿井生产的五大灾害之一, 随着煤炭开采深度的增加, 水压不断增大, 深部开采的水害问题日益严重, 有些矿井因为底板水的威胁而不能开采。因此, 采用裂隙岩体流固耦合理论研究采动条件下突水机制对于底板突水预测、采煤方法的改进、安全度的评价具有重大理论意义。杨天鸿(2001)采用 RFPA2D 软件对兖煤集团杨村煤矿底板突水的损伤-渗流机制进行了数值模拟研究, 直观地得到了采动条件下岩层裂隙扩展、贯通以及整个底板发生突水的过程, 对底板的易发生突水部位进行了预测。刘志军等(2007)建立了承压水上采煤的固流耦合数学模型, 并分析

了在各断层要素影响下采场的应力分布规律及突水机理，得出了断层倾角、断层厚度和断层断距与突水的关系。

(3) 煤层注水。煤层高压预注水致裂软化煤层是实现中硬煤放顶煤开采的一种好的方法。其是指在高压水作用下注水孔壁及其周边岩体受内压开裂，加上岩石与水的物理、化学作用使其力学性能显著下降，从而使厚硬关键层承载能力大幅减弱，易于冒落。顶板注水期间，一部分注入的水会渗进开采煤层，从而使采煤时粉尘大幅减少。采用流固耦合的方法研究煤层的润湿过程和煤层水力破裂损伤演化可取得合理注水参数，减少注水工程的盲目性。李宗翔等(2005)对木城涧矿煤层高压注水进行了数值模拟分析。申晋等(1997)建立了低渗透煤岩体煤层注水致裂的固液耦合作用的数学模型，并推导了该模型的数值解法。

(二) 水利水电工程的流固耦合问题

进行大坝及其周围地质体中渗流场与应力场耦合分析，是解决评价和预测大坝、坝基、坝肩及库岸边坡稳定性等问题的关键。

1. 坝体坝基和坝肩的稳定性问题

关于裂隙岩体渗流场与应力场耦合模型在大坝工程中的应用方面，陶振宇等(1991)用有限元法分析了水库诱发地震有利断层组合，并对某水库诱发地震的震级进行了拟合分析。杨延毅等(1991)、陈平和张有天(1994)都对重力坝坝基进行了裂隙岩体渗流应力二维耦合分析。耿克勤等(1997)对龙羊峡水电站重力拱坝坝基和坝肩岩体进行了三维有限元耦合分析。顾冲时等(1999)研究了渗流影响下坝体和坝基应力场。他们认为耦合作用对渗流场的影响远大于对应力场的影响，即考虑耦合作用的影响，坝底扬压力将增加，不利于大坝等建筑物的稳定。张有天等(1997)指出：进行岩基上水工建筑物设计时，应当进行耦合分析以确保工程安全。王媛等(1998)对裂隙岩体边坡和重力坝岩基进行了渗流应力全耦合分析，认为若不考虑耦合作用的影响，则计算结果可能会夸大排水孔的作用。从以上的研究工作中也可以看出，对大坝坝基、坝肩岩体进行裂隙渗流与应力耦合分析是完全有必要的。

2. 水库蓄水后大坝、库岸边坡稳定性研究

水库蓄水后大坝、库岸及河岸因受力状态的改变而产生位移和变形，甚至可能引发溃坝、滑坡等灾害。历史上几个重大事故都是发生在水库蓄水之后。判断水库蓄水后工程状态是否正常时，必须正确掌握大坝、库岸及河岸在水库蓄水后的位移，将其和实测相对比，这是工程安全监测的重要判据。采用裂隙岩体流固耦合方法对水库蓄水后大坝、库岸边坡的稳定性进行耦合分析是很必要的。张有

天等(1990)采用增量荷载的流固耦合分析方法对龙滩水电站蓄水后的拱坝和库岸边坡的稳定性进行了分析。王兰生等(2007)采用流固耦合的方法对湖南江垭水库蓄水后大坝和两岸山体的非正常抬升机制进行研究,认为水库蓄水后含水层排泄水位随水库水位变动,使坝下承压含水层的水头随水库水位波动,即改变了含水层中的孔隙水压力。孔隙水压力的增高在含水层中可造成两方面的变化:其一,减轻了上覆盖层的压力;其二,降低了含水岩层中的有效应力。后者引起含水岩层卸荷回弹扩容。

3. 压力隧道水力劈裂问题

水力劈裂(hydraulic fracturing)是指由于水压力的抬高,岩体或土体中引起裂缝萌生与扩展的一种物理现象,是在高水头压力作用下,岩体断续裂隙(或空隙)萌生扩展,并相互贯通后再进一步张开所致。水力劈裂是裂隙岩体流固耦合研究中一个难度较大的基础理论课题。深埋引水压力隧洞、水电站地下洞室围岩等都可能因发生水力劈裂而引发工程事故。在地下岩体工程建设中将会遇到更多前所未有的恶劣水文地质条件(如高水头、大埋深),水力劈裂问题将更加引起岩石力学的关注。已有许多学者引入断裂力学、损伤理论来研究水力劈裂问题。杨天鸿对非均匀岩体建立了渗流、应力、损伤耦合作用的数学模型,从细观角度分析水压引起裂纹扩展机制。Weijers利用Biot理论讨论了水力压裂的起裂、扩展和闭合全过程,对深埋水工高压隧洞的水力劈裂分析也做了一些工作。黄润秋等(2000)针对深埋隧道的涌水问题,从断裂力学角度分析了在高压水头作用下裂隙的扩展机理。笔者认为,从本质上说压力隧道水力劈裂的原因在于高渗透压封闭在岩体断续裂纹内而诱发岩体裂纹滑移劈裂或拉剪劈裂。岩体是否水力劈裂、其水力劈裂扩展区域的大小更大程度上取决于岩体断续裂隙几何特性、力学特性和岩石的断裂韧度。只有采用渗流-断裂耦合分析方法才能接近压力隧道水力劈裂的本质。

(三) 边坡工程的流固耦合问题

岩体边坡渗流分析中,应力场和渗流场的耦合问题十分重要。Sartori等用“毁灭性的岩体滑坡伴随高压水渗透水的喷射”来形容发生在1991年的瑞士Randa大滑坡($22 \times 10^6 \text{ m}^3$);Cappa等发现季节性降雨入渗和La Clapière滑坡($60 \times 10^6 \text{ m}^3$)的加速有明显的相关性。从地下水渗流角度研究对边坡的影响,忽略了岩体变形对水渗流作用和渗流对岩体变形的影响,仅从水导致岩体强度弱化角度来研究水对岩体边坡的影响(这也是许多计算软件常采用的方法),这显然有不足之处。笔者认为由渗流场和应力场的变化导致的滑坡,具体体现在以下三个方面:①水体入侵边坡。由于雨季连续降雨,雨水沿岩体的孔(裂)隙入渗岩体之