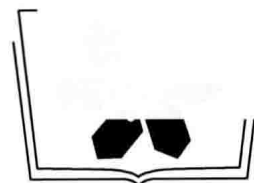


周辉 胡大伟 张凯 邵建富 赵阳 著

高渗透压下孔隙和裂隙岩石 流固耦合机理与理论初步



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

高渗透压下孔隙和裂隙岩石 流固耦合机理与理论初步

周 辉 胡大伟 张 凯 著
邵建富 赵 阳

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对两类典型岩石:多孔砂岩和致密大理岩,首先通过声波测试、力学试验、渗透性试验、有效应力系数测试和流固耦合试验,探讨了其力学特性、渗流特性和有效应力系数演化规律,深入分析了高水压作用下的流固耦合机理。在此基础上,分别从细观分析和宏观唯象角度出发,建立了两类模型:细观各向异性弹塑性损伤力学模型和流固耦合模型,宏观弹塑性耦合力学模型和流固耦合模型。最后,将所建立的宏观弹塑性耦合力学模型和流固耦合模型应用于锦屏二级水电站深埋隧洞开挖过程的模拟分析,研究了围岩变形、损伤区和应力的演化规律;并考虑了高渗透压下的非 Darcy 流效应,对锦屏二级水电站深埋隧洞的开挖过程进行了流固耦合分析。

本书主要读者对象是岩土工程相关专业的高年级本科生和研究生、岩石力学与渗流研究者、水利水电建设和矿山开采工作者,将为相关从业人员提供重要的理论指导和技术支持。

图书在版编目(CIP)数据

高渗透压下孔隙和裂隙岩石流固耦合机理与理论初步/周辉等著. —北京:科学出版社,2014.2

ISBN 978-7-03-039687-7

I. ①高… II. ①周… III. ①岩石力学—渗流力学 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 018576 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:彭 涛
责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 2 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:332 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着人类工程活动范围的扩展和规模的扩大,在水利水电、采矿、建筑基础等工程中,都存在着人类工程干扰力、岩体地应力、地下水孔隙压力之间相互影响、相互作用和耦合作用问题。近年来,随着岩体工程不断向深部发展,其所处的地质和应力环境变得更为复杂,高渗透压力条件下岩石流固耦合作用已成为研究热点问题。在高渗透压力作用下,岩石内部的黏聚力被削弱,宏观强度明显降低,岩石的塑性和流变性能发生显著变化,且岩体内节理裂隙宽度和裂隙长度将增大,加剧了工程岩体整体强度的弱化,岩石破坏和岩体失稳的机理和规律将变得更为复杂,因此,高渗透压已经成为岩石(体)和结构破坏的不可忽视的重要因素。同时,由于高渗透压和隧洞开挖扰动区裂隙及其联合作用所造成的高流速问题使得传统 Darcy 渗流理论不再成立,渗流问题成为一个非线性问题,不能再用 Darcy 定律进行理论分析与数值模拟。另外,其流固耦合机理也将变得非常复杂,不能再采用传统的岩石流固耦合理论进行研究。

高渗透压下岩石的流固耦合宏观现象受其内在细观机理所控制,因此需要从细观角度进行研究。为此,本书尝试通过系统试验研究,在试验的基础上,分析高渗透压下岩石流固耦合的内在细观机理,然后建立细观力学和流固耦合模型。此外,为了便于工程计算,本书还建立了岩石宏观弹塑性耦合力学模型、有效应力模型和 Darcy 流与非 Darcy 流统一渗流模型,从而在弹塑性力学框架内建立流固耦合模型,提出相应的数值模拟方法。

考虑到孔隙岩石和裂隙岩石的流固耦合细观机理的差异,本书选取了两类典型岩石:多孔砂岩和致密大理岩。分别对多孔砂岩和致密大理岩开展了一系列物性试验、三轴压缩试验、不同渗透压下的渗透率试验、不同孔隙水压下的有效应力系数试验等室内研究,比较分析了这两种岩石细观结构上的差异,以及由此导致的力学行为、渗透率演化规律、有效应力系数演化规律等特性的差异;在此基础上,分别从细观分析和宏观唯象性角度出发,建立了两类模型:①细观各向异性弹塑性损伤力学模型和流固耦合模型;②宏观弹塑性耦合力学模型和流固耦合模型;最后,将所建立的宏观弹塑性耦合力学模型和流固耦合模型用于锦屏二级水电站深埋隧洞开挖过程的模拟分析,研究围岩变形、损伤区和应力的演化规律;并考虑了高渗透压下的非 Darcy 流效应,对锦屏二级水电站深埋隧洞的开挖过程进行了流固耦合分析。本书是上述工作的系统总结,内容安排如下:

第 1 章,绪论。论述本书的研究依据与意义,对国内外的研究现状进行综述,

从岩石力学特性试验研究、岩石力学模型研究、岩石渗流特性与渗流模型研究以及岩石流固耦合特性和模型研究等几方面详细介绍了此领域内的相关研究基础和进展,并详细列出了本书的主要内容及其相互关系。

第2~5章为本书的第一部分,主要介绍试验研究方面的内容。通过一系列试验获得这两种岩石的物理特性、力学特性、渗流特性和有效应力系数演化规律,各章主要内容为:

第2章,物理特性试验研究。开展了两种岩石的物理特性试验,包括孔隙率、薄片鉴定、X射线衍射、电镜扫描和声波测试,并比较了这两种岩石孔隙率和细观结构等固有属性的差异。

第3章,力学试验研究。分别对这两种岩石开展了一系列力学试验,包括静水压力试验、偏应力单调加载试验和偏应力循环加卸载试验,对这两种岩石的弹性参数、塑性演化、损伤演化和强度等力学特性进行了分析和比较,获得基本的力学参数,为后续建立力学模型提供必要的试验数据。

第4章,渗流试验研究。为了研究应力场对岩石渗流特性的影响,分别对这两种岩石进行渗透率试验。考虑到砂岩的渗透率较大,而大理岩的渗透率较小,分别进行低渗透压下的砂岩渗流试验和高渗透压下裂隙大理岩的渗流试验,发现多孔砂岩在轴向应力加载过程中,孔隙压缩和裂纹扩展造成其轴向渗透率先减小后增加;而高渗透压下峰后大理岩的渗流表现为非 Darcy 流,不同围压条件下渗流速率与压力梯度、试样体积变形与压力梯度的关系曲线都可以分为稳定 Darcy 流、稳定非 Darcy 流和非稳定渗流失稳三个阶段。

第5章,有效应力系数测试研究。进行完整砂岩三轴压缩过程和大理岩塑性变形后期阶段的有效应力系数测试试验研究,对这两种岩石有效应力系数的各向异性及其演化规律进行比较分析,发现多孔砂岩在轴向加载过程中,轴向有效弹性模量开始增加随后减小,而侧向有效弹性模量则持续减小,轴向和侧向的有效应力系数也表现出同样的规律;大理岩塑性变形后期阶段的有效应力系数也表现为各向异性,但轴向和侧向有效应力系数均随着轴向应变的增加而增加。

第6~9章为本书的第二部分,主要介绍理论模型研究方面的内容。在第一部分试验结果的基础上,针对这两种岩石细观结构上的差异,以及由此导致的力学行为、渗透率演化规律、有效应力系数演化规律等特性的差异,分别从细观分析和宏观唯象角度出发,建立了细观各向异性弹塑性损伤力学模型和耦合模型以及宏观弹塑性耦合力学模型和流固模型,各章主要内容为:

第6章,细观力学模型。在多孔砂岩物性试验和力学试验的基础上,提出一个岩石细观力学模型,将岩石视为由固体基质和其中的细观裂纹构成的非均匀材料。微裂纹被近似为币形夹杂体,进而运用 Eshelby 夹杂问题解来构建新的岩石细观力学损伤摩擦模型。通过细观力学分析,引入热动力学框架,建立细观各向

异性弹塑性损伤力学模型,并对三轴压缩试验、侧向卸围压试验和比例加载试验进行模拟。

第7章,基于细观力学模型的流固耦合模型。在细观力学模型基础上,根据多孔砂岩的渗流试验和有效应力试验结果,建立孔隙塑性损伤力学的基本框架,分别对多孔砂岩三轴压缩试验中渗透系数和有效应力系数的演化进行模拟;然后,提出各向异性孔隙塑性损伤耦合模型中的塑性屈服函数、塑性势函数和损伤演化函数,对排水和不排水条件下的三轴压缩试验以及孔隙压力加载试验进行模拟。

第8章,脆性岩石宏观弹塑性力学模型。在第3章力学试验研究的基础上,详细介绍了如何根据试验结果建立岩石的宏观弹塑性力学模型。为了验证弹塑性耦合条件下的广义正交流动法则的正确性和适用范围,利用 T_{2y}^6 和 T_{2b} 大理岩的循环加卸载试验计算得到不可逆变形对应的剪胀角,通过与相应状态下的内摩擦角的对比表明:在峰前和峰后部分阶段,广义正交流动法则近似成立,而接近残余阶段时,剪胀逐渐减小。

第9章,基于宏观力学模型的流固耦合模型。首先给出连续介质条件下的流固耦合分析的基本方程,建立弹塑性条件下流固耦合分析的基本框架;回顾流固耦合的试验结果,特别是高渗透压下的非线性耦合试验。针对试验中揭示的高渗透压条件下的非线性流固耦合关系,该章建立了有效应力系数理论模型,并推导了 Darcy 流和非 Darcy 流统一渗流方程。

本书中的主要研究成果是在国家重点基础研究发展计划(973)项目:深部复合地层围岩与 TBM 的相互作用机理及安全控制——第2课题:TBM 掘进扰动下深部复合地层围岩力学行为响应规律(2014CB046902)、中国科学院知识创新工程青年人才类重要方向项目:深埋长隧洞围岩层裂机理与岩爆预测研究(KZCX2-EW-QN115)、中国科学院科技创新“交叉与合作团队”:深部工程动力灾害防治和防护的支护理论与技术研究(人教字[2012]119 号)以及国家自然科学基金项目(50579091、51009132、50204009、10772190、50979104、41172288、51104151)等项目的资助下完成的。在本书的撰写中得到有关专家的指导和帮助,引用了多位学者的文献资料,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者和有关专家批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 相关研究进展和基础	2
1.2.1 岩石力学特性试验研究	2
1.2.2 岩石力学模型研究	7
1.2.3 岩石渗流特性与模型研究	13
1.2.4 岩石流固耦合特性与模型研究	17
1.3 本书研究内容	24
参考文献	25

第一部分 试验研究

第 2 章 物理特性试验	41
2.1 多孔岩石:砂岩	41
2.1.1 孔隙率	41
2.1.2 细观结构	41
2.2 致密岩石:大理岩	43
2.2.1 基本物性	43
2.2.2 细观结构	45
2.3 两类岩石比较	46
参考文献	46
第 3 章 力学试验	47
3.1 砂岩力学试验	47
3.1.1 试验条件	47
3.1.2 三轴试验系统	49
3.1.3 试验结果	50
3.2 大理岩力学试验	55
3.2.1 试件制备	55
3.2.2 力学试验设计	55

3.2.3 循环加卸载试验方法	56
3.2.4 大理岩循环加卸载试验结果	61
3.2.5 试验结果分析	68
3.3 本章小结	80
参考文献	80
第4章 渗流试验	82
4.1 砂岩渗流试验	82
4.1.1 试验方法	82
4.1.2 试验结果	83
4.2 高渗透压下大理岩渗流试验	86
4.2.1 试验步骤	87
4.2.2 试验现象和结果	87
4.2.3 试验分析	89
4.3 本章小结	95
参考文献	96
第5章 有效应力系数测试	97
5.1 砂岩的有效应力系数测试试验	97
5.1.1 试验方法	97
5.1.2 试验结果	99
5.2 大理岩的有效应力测试试验	107
5.2.1 试验步骤	107
5.2.2 试验现象和结果	107
5.2.3 试验分析	111
5.3 本章小结	113
参考文献	114

第二部分 理论模型研究

第6章 细观力学模型	117
6.1 均匀化方法	117
6.1.1 稀疏方法	118
6.1.2 Mori-Tanaka 方法	119
6.1.3 自治方法	120
6.2 基本框架	121
6.3 模型的构建	123

6.3.1 塑性演化表述	127
6.3.2 损伤演化表述	129
6.4 模型验证和应用	131
6.4.1 参数确定	131
6.4.2 三轴压缩试验模拟	132
6.5 本章小结	138
参考文献	138
第7章 基于细观力学模型的流固耦合模型	141
7.1 孔隙塑性损伤力学模型的基本框架	141
7.2 渗透率模拟	143
7.3 有效应力系数模拟	147
7.3.1 有效应力系数表达式	147
7.3.2 有效应力系数模拟结果	149
7.4 流固耦合关系	150
7.4.1 塑性和损伤表达式	150
7.4.2 孔隙耦合系统的表达式	151
7.4.3 模型参数的确定	152
7.4.4 模拟结果	153
7.5 本章小结	163
参考文献	164
第8章 脆性岩石宏观弹塑性力学模型	165
8.1 岩石弹塑性力学模型的适用范围	165
8.2 岩石弹塑性耦合力学模型	166
8.2.1 弹塑性耦合规律	167
8.2.2 硬化软化规律	167
8.2.3 流动法则	172
8.3 数值计算方法	181
8.3.1 数值计算格式的推导	181
8.3.2 弹塑性耦合力学模型的数值实现	184
8.3.3 基于弹塑性耦合力学模型的围岩开挖扰动分区	185
8.4 力学模型及数值计算方法验证	186
8.4.1 室内常规三轴试验模拟	186
8.4.2 卸围压试验模拟	187
8.4.3 加拿大 Mine-by 试验洞破坏区模拟验证	190

8.5 工程应用	192
8.5.1 辅助洞 2# 试验洞概况	192
8.5.2 数值模型和计算条件	194
8.5.3 围岩力学参数的确定	195
8.5.4 辅助洞 2# 试验洞开挖过程模拟结果分析	200
8.6 本章小结	210
参考文献	211
第 9 章 基于宏观力学模型的流固耦合模型	214
9.1 连续介质流固耦合模型	214
9.2 岩石非线性流固耦合关系的试验结果概述	216
9.3 有效应力系数模型	219
9.3.1 有效应力系数普适模型的建立	220
9.3.2 弹性条件下有效应力系数的演化规律	223
9.3.3 塑性条件下有效应力系数的演化规律	231
9.4 高渗透压下的岩石非 Darcy 流特性研究	235
9.4.1 Darcy 流和非 Darcy 流统一渗流方程的推导	235
9.4.2 Darcy 流和非 Darcy 流判据	238
9.5 数值计算方法	239
9.6 流固耦合模型的工程应用	240
9.6.1 考虑高压作用的围岩稳定性分析	241
9.6.2 隧洞突、涌水对策研究	247
9.7 本章小结	249
参考文献	250

第1章 绪 论

本章首先介绍岩石流固耦合研究的背景和意义,然后从岩石力学特性试验研究、岩石力学模型研究、岩石渗流特性和渗流模型研究以及岩石流固耦合特性和模型研究等几方面介绍此领域内的相关研究进展和基础,最后给出本书的研究内容。

1.1 背景与意义

岩石经历了漫长的成岩和构造运动历史,其内部富含各种缺陷,如微裂纹、孔隙以及节理和裂隙等,它们的存在为地下水提供了储存和运移的场所。在地下工程中,地下水不仅在孔隙/裂隙系统内发生运移,而且还以孔隙压力的形式作用于岩体,影响岩体中有效应力场的分布;同时岩体有效应力场的改变往往使裂隙产生新的变形或者造成新裂纹的萌生,改变裂隙系统的密度和空间分布等特性,进而影响裂隙系统的渗透性和孔隙力学性质,所以岩石中的有效应力场与裂隙系统内的渗流场之间是相互影响的,这种相互影响称之为流固耦合。

1959年法国 Malpasset 拱坝溃坝并造成的重大灾难震惊了工程界,调查委员会的绝大多数专家认为坝基内过大的孔隙水压力是造成事故的主要原因,这一惨痛的教训使人们开始认识到从基础理论和工程应用两方面研究岩石流固耦合作用的重要性。

随着人类工程活动范围的扩展和规模的扩大,岩石流固耦合作用成为近年研究的热点问题。在核废料地质储存中,人们认识到,密封在金属罐中的放射性核素迁移到地质环境中的最可能途径是随地下水运移。地下水先将金属罐腐蚀,然后将固化体中的放射性核素溶解并浸出,最后随地下水的运移通过回填材料、围岩及地质环境,造成放射性核素的泄漏。在 CO_2 地中隔离工程中, CO_2 的注入将引起超孔隙压力,并改变有效应力场,受压状态的岩层骨架因有效应力的减小而产生膨胀变形,进而引起渗透性和孔隙率发生变化。过大的孔隙压力将会引起岩层产生裂纹,造成 CO_2 的泄漏;某些情况下,甚至还会引起地震。

总之,水利水电、采矿、建筑基础等工程中,都存在人类工程干扰力、岩体地应力、地下水孔隙压力之间相互影响、相互作用和耦合作用问题。据统计,90%以上的岩体边坡破坏和高地下水渗透力有关,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高渗透压作用引起的。此外,地下水抽放、油气开

采、水库诱发地震、地表沉降、核废料地下存储和 CO_2 地中隔离等都涉及岩体地应力和高地下水孔隙压力的相互作用及其耦合问题,可见,此领域的研究具有非常重要的现实意义。

1.2 相关研究进展和基础

国内外许多学者在岩石的力学特性和力学模型、岩石渗流特性与渗流模型、流固耦合机理和模型等方面开展了很多卓有成效的工作,本节将对这些方面的研究成果进行简要分类综述。

1.2.1 岩石力学特性试验研究

岩石力学是固体力学的一个分支,对岩石力学的研究要比金属等材料起步的晚,公认的岩石力学定义是美国岩石力学学会(The US National Committee on Rock Mechanics)在 1964 年提出的,因此岩石力学中很多理论框架都是从金属等材料的研究成果中借鉴过来的,如弹塑性理论、损伤理论等。然而,由于岩石材料结构的特殊性和复杂性,其力学响应与金属等材料存在很大区别^[1];另外,岩石材料所处的外界环境条件,即地应力、温度和水等对其力学性质也影响比较大。为了研究岩石的变形破坏特性,许多学者从不同角度、采用不同的试验方法和设备进行了各种各样的试验研究,这些研究成果为岩石力学模型的研究提供了基础数据,也是岩石力学学科发展的基础。限于篇幅,这里仅就静态室内试验的主要结果进行综述。

1. 常规三轴压缩试验

常规三轴压缩试验的研究成果最多,并涉及了大量不同岩性的岩石。常规三轴试验中,一般是将圆柱形岩样放置在液压腔中,利用自平衡装置通过油压对试件施加静水压力,然后进行轴向压缩。von Karman 于 1911 年发表的大理岩常规三轴试验曲线是这一领域标志性的工作,试验结果表明,岩石材料对围压非常敏感,不同围压下应力-应变曲线的形态有显著差异。

我们首先关注一组不同围压条件下 Wombeyan 大理岩三轴压缩试验的应力-应变曲线^[2]。图 1.1 给出了一组典型的围压条件下 Wombeyan 大理岩三轴压缩应力-应变曲线,由此可以发现脆性岩石力学行为的主要特性:

(1) 围压对大理岩力学行为的影响较大。在所有围压水平下,在一段或多或少的线性部分后,应力-应变曲线表现出非线性的力学行为。明显地,大理岩的强度或者说峰值应力随着围压的升高而增大。

(2) 随着围压的升高,其变形能力增强,应力-应变曲线逐渐上升并且坡度减

缓,应变硬化的程度增大。

(3) 随着围压的升高,岩石的破坏方式由脆性向延性过渡。在围压较低的情况下,应力-应变曲线在峰值后急剧下降,表现为脆性;而在围压较高的情况下,应变软化不再出现,表现为延性。

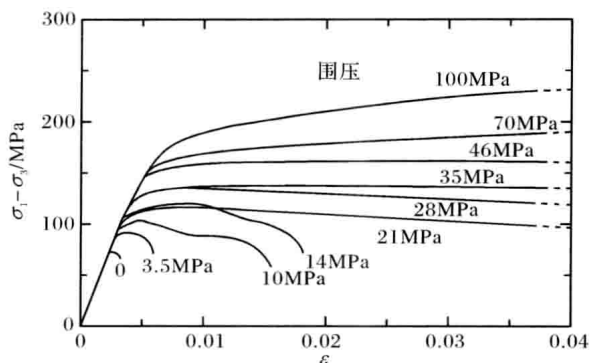


图 1.1 不同围压条件下 Wombeyan 大理岩三轴压缩应力-应变曲线^[2]

图 1.2 给出了不同围压条件下 Wombeyan 大理岩的四种不同类型的裂纹形态:①单轴压缩试验条件下沿轴向应力方向的劈裂裂纹;②围压范围为 3~5MPa 条件下的单个剪切裂纹;③围压在 35MPa 左右条件下的共轭剪切裂纹;④围压超过 70MPa 条件下的延性行为,试样中的微裂纹发育,但没有明显的宏观裂纹^[2]。

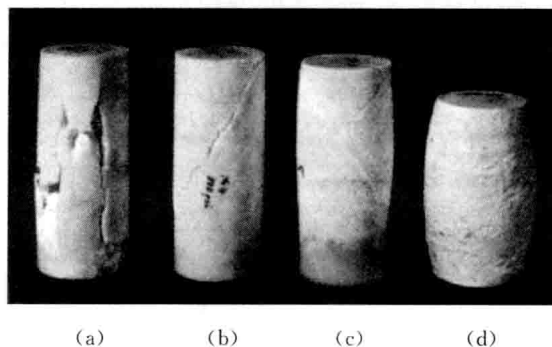


图 1.2 不同围压条件下 Wombeyan 大理岩三轴压缩裂纹形态^[2]

在加载过程中,体积变形的演化是另一个重要现象。三轴压缩的应力条件下,在静水压力和偏压 $\sigma_1 - \sigma_3$ 较小的加载阶段,通常可以观察到体积压缩(全部或部分初始裂纹和孔隙的闭合引起体积变形压缩);然而,随着轴向应力的增加,体积变形发展趋势逐渐由减小转化为增加,也就是说,破坏过程中体积变形经历了压缩—膨胀转化。在压缩机制下,这种体积膨胀主要由微裂纹的萌生和发展引起,这是岩石力学行为的一个重要特征。

微裂纹的扩展通常导致岩石的弹性模量逐步衰减。图 1.3 中为泥岩在三轴压缩循环加卸载条件下的应力-应变曲线^[3]。可以发现,在塑性屈服门槛后,曲线的轴向和侧向的斜率逐渐减小,即轴向和侧向的有效弹性模量逐渐减小;并且侧向有效弹性模量减小的趋势更为明显。从其物理机理上说,这种应力导致的各向异性行为是由于微裂纹的倾向性发展所导致的,且其倾向性扩展方向与轴向加载方向的夹角一般小于 45° 。

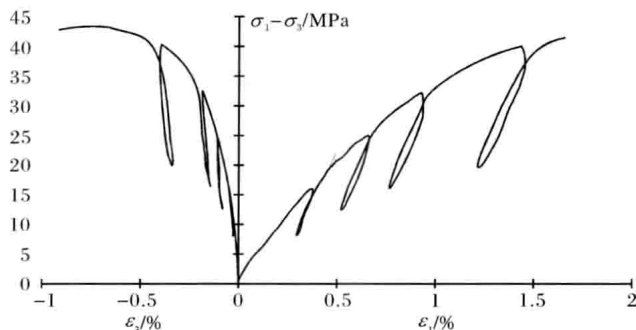
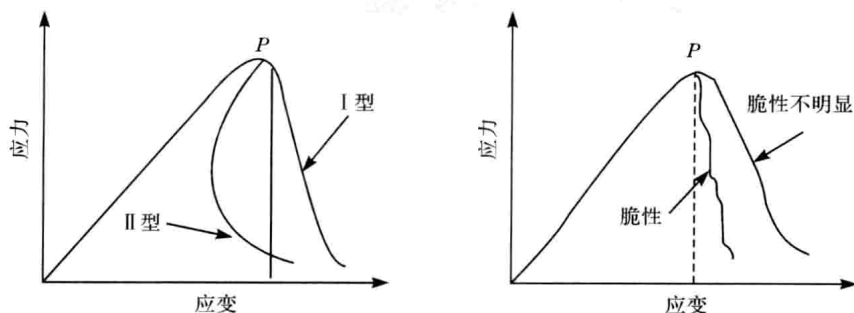


图 1.3 泥岩三轴压缩循环加卸载试验应力-应变曲线($P_c = 10\text{MPa}$)^[3]

2. 峰值后试验

在地下工程中,由于开挖扰动的作用,部分岩体会处于应力峰值后阶段,因此研究岩石的峰值后特性对理解现场岩体的变形和破坏具有重要意义。很多学者通过提高试验机刚度或采用伺服控制加载过程,得到了岩石单轴压缩的应力-应变全程曲线,代表性的成果是 Hudson 等^[4]于 1972 年发表的大理岩试样单轴压缩的应力-应变全程曲线。根据峰后曲线的形态,Wawersik 等^[5]将岩石应力-应变全过程曲线分为 I 型和 II 型,见图 1.4(a)。而葛修润等^[6]于 1992 年采用自行研制的 RMT150 型电液伺服自适应岩石力学试验机对花岗岩等 6 种岩石进行试验后,提出了岩石峰值后特性的新见解,见图 1.4(b)。



(a) Wawersik 等^[5]的划分

(b) 葛修润等^[6]的划分

图 1.4 岩石应力-应变全过程曲线的分类

3. 卸载试验

在工程扰动时,很多岩体是处于卸载状态的,如隧洞的表面岩体。为了模拟这种应力路径下岩石的变形和破坏特征,许多学者进行了卸围压试验。尽管这样的应力路径和现场的三维应力路径存在差别,但是,这有助于理解加载和卸载应力路径下岩样的变形和破坏形式的差异。陈颢等^[7]、许东俊等^[8]、哈秋龄^[9]、李天斌等^[10]、吴刚等^[11]、周小平等^[12]、陈卫忠等^[13]、张凯等^[14]、李宏哲等^[15]和尤明庆^[16]等学者在这方面开展了广泛的试验研究,试验结果表明,卸围压条件下,岩样破裂更剧烈,侧向膨胀变形更大;但是,至于卸围压试验是否对强度有影响,以及影响程度有多大和规律如何,目前还没有形成统一的认识。

4. 真三轴试验

岩石真三轴试验主要是为了研究岩石在三个主应力不相等条件下的岩石变形破坏特性。Mogi^[17]首先设计了对长方体试样进行三向不等压加载的真三轴试验机,试验结果表明,中间主应力对岩石的变形和破坏具有很大影响。因为真三轴试验可以更好地模拟实际岩土工程中的应力路径,许多学者各自设计了真三轴试验设备并进行了试验研究,并将所得的结果应用于岩爆等现象的分析以及强度准则的验证等。李小春和许东俊^[18]利用拉西瓦花岗岩进行了真三轴试验,验证了双剪应力强度理论;Chang 和 Haimson^[19,20]进行了真三轴试验,并利用试验结果研究了水平地应力的大小;陈景涛和冯夏庭^[21]利用拉西瓦花岗岩进行了真三轴试验,模拟了高地应力条件下地下工程开挖引起的复杂应力路径演化,同时试验中记录了岩石破裂过程中的声发射数据;何满潮等^[22]自行设计了深部岩爆过程试验系统,该试验系统可将岩样加载到三向不同应力状态,利用该系统对深部高地应力条件下的花岗岩岩爆过程进行了试验研究;杨继华等^[23]采用现场浇筑的水泥砂浆试件进行了真三轴试验,结果表明中间主应力不仅影响试样的强度,还会对其应力-应变曲线的形态产生影响。

5. 细观力学试验

为了研究岩石类材料的微细观破坏过程,人们发展了各种试验手段和技术,目前运用较多的有^[24]:X射线(X-Ray)技术、与X射线相结合的CT(computer tomography)技术、扫描电镜(scanning electron microscope)技术、声发射(acoustic emission)技术、纳米压痕试验。

X射线技术的飞速发展,使人们能够对岩石类材料的微细观结构进行深入观察。Otsuka等^[25]运用X射线技术,对拉伸载荷作用下含单边预制裂纹混凝土试样的断裂过程进行了试验研究,观察到微裂纹的形成、扩展、空洞萌生和晶体位错

等微细观损伤过程。

与 X 射线相结合的 CT 技术是以计算机为基础对测体断层中某种特性进行定量描述的专门技术,它首先被应用于医学诊断中,近年来受到岩土力学界的广泛关注。1986 年日本京都大学寺田孚^[26]首先研制成功了室内受压岩样的弹性波 CT 机,葛修润等^[27]对其获得的受压岩样内部微裂纹发展过程进行了介绍。杨更社等^[28,29]和 Kawakata 等^[30]利用 CT 扫描对岩石的初始细观损伤特性进行了试验研究。杨更社等^[31~33]对岩石的损伤扩展进行了 CT 定量分析。葛修润等^[34]进行了三轴和单轴载荷下煤岩破坏全过程的即时动态 CT 试验,并引入了初始损伤影响因子,定义了一个基于 CT 数的损伤变量。陈蕴生等^[35]利用 CT 图像灰度值均值和灰度分布随应力变化分析了细观损伤演化过程和机理。葛修润等^[36]进行了岩石疲劳损伤演化的 CT 细观试验,得到了岩石细观疲劳损伤扩展的初步规律。曹广祝等^[37]通过螺旋 CT 机以及与其配套的实时三轴加载和渗透压力设备对砂岩进行了各种应力状态下的变形损伤特性试验。

自从 Sprunt 和 Brace^[38]将扫描电镜(SEM)技术引入到研究岩石细观结构的领域以来,已有许多研究成果相继发表。凌建明等^[39,40]利用微加载装置进行了岩石材料在电镜下的即时加载观测。赵永红等^[41,42]对含有预制缺陷的大理岩平板进行了单轴压缩试验,观测并记录了试件表面微破裂的孕育过程,研究了微裂纹扩展与外载大小和方向之间的关系。孙钧等^[43]通过扫描电镜下的一系列加载试验,对三峡花岗岩的细观损伤特性进行了研究。吴立新等^[44]进行了中硬肥煤与坚硬无烟煤的即时压缩扫描电镜损伤扩展规律研究。尚嘉兰等^[45]对单轴压缩状态下香港白岗岩和大理岩试样的微裂纹萌生、扩展、贯通直至破坏进行了试验研究,分析了岩石的细观破坏机制和细观损伤与宏观力学行为之间的对应关系。肖洪天等^[46]研究了岩石微裂纹的闭合、滑移、扩展以及相互作用的过程,并给出了微裂纹扩展在各阶段引起的宏观变形。朱珍德等^[47]对高围压、高水压下大理岩破坏断裂断口进行了电镜扫描试验。

声发射(AE)技术可以追踪材料内部裂纹的产生和扩展,能够反映岩石试件内部每一个损伤(微裂纹)发生的时间、地点和强度,因此在岩石类材料细观破坏研究领域得到了应用。Lockner 等^[48]根据花岗岩试件和砂岩试件加载过程中的声发射空间分布特征,考察了岩石试件中微破裂面的成核和扩展过程。Suaris 等^[49]运用声发射技术对试样的破裂过程进行了声发射试验研究,并采用力矩张量分析方法对材料的破裂模式进行了分类。吴刚等^[50]对岩石在加载、卸载应力状态下的声发射规律进行了研究。谢强等^[51]、尹贤刚等^[52]利用声发射技术,对岩石破坏过程的声发射规律进行了研究。张晖辉等^[53]系统地分析了岩石试件破坏前能量释放及加卸载响应比的演化情况。

压痕试验方法是在传统的布氏和维氏硬度试验方法的基础上发展起来的新

兴的力学性能试验方法,它通过连续控制和记录加卸载时的载荷和位移数据,可以得到材料压痕硬度、杨氏模量、压痕蠕变、压痕松弛和断裂韧性等力学性能指标。该技术在薄膜材料力学应用较为广泛^[54],法国里尔力学实验室将此技术应用于岩土类材料^[55]。微观压痕试验可以根据岩石中主要矿物颗粒粒径,采用相应尺寸的压头(纳米或者微米量级)进行压痕试验,测量主要矿物成分的力学行为。细观压痕试验可以根据岩石中特征单元体的尺寸,采用相应尺寸的压头(毫米量级)进行压痕试验,测量岩石的力学行为。

1.2.2 岩石力学模型研究

为了描述岩石的力学行为,在分析试验结果的基础上,人们提出了许多力学模型。宏观唯象模型从材料破坏过程中的宏观现象出发,对材料宏观力学行为进行研究。在经典的岩土弹塑性本构模型^[56]的基础上,引入损伤内变量,与描述塑性流动的屈服面概念相似,提出描述损伤演化需要的损伤面^[57];并通过在本构关系中引入损伤变量反映损伤对材料弹性行为的影响,同时,在塑性流动中引入损伤变量描述塑性和损伤耦合行为。这类模型的优点在于:能够直接采用不可逆热动力学框架,且便于获得宏观的本构方程,因此,这类模型能够很方便地在工程实际中应用。但是,这类模型也有很明显的缺点:模型中的一些概念和参数及其物理机理较模糊;这类模型很难描述一些复杂的现象,如单边效应、不同簇裂纹间的相互作用以及各向异性状态下的水-力耦合等。另一方面,从考虑岩石材料变形的物理机理出发,人们建立了细观损伤力学模型^[58~61]。在这类模型中,采用由细观到宏观的多尺度分析方法获得宏观的有效变量。然而,这些多尺度方法大多在线性均质化原理的框架内,很难扩展到塑性和损伤耦合的情况。本节将对以往的力学模型进行分类简单的回顾。

1. 弹塑性模型

不考虑时间和温度效应,英国科学家 Hooke 最早发现了材料的变形与引起变形的的外力成正比,称之为 Hooke 定律,基于此定律提出的材料应力-应变关系即线弹性力学模型。在应力水平不高时,岩石会表现出弹性响应,此时 Hooke 定律是适用的。

孙广忠^[62]和 Hoek 等^[63]的研究认为,在低应力条件下的完整岩体和高应力条件下的完整和裂隙发育完全的岩体可以用连续介质力学的方法来处理。而连续介质方法在金属等材料的研究中已经较为成熟,可将其自然和高效地延伸到岩石力学。研究表明,在各类工程计算中,岩石类材料可以合理地用连续介质力学中的弹塑性模型进行描述^[64]。然而,岩石类材料的变形机制和金属材料有很大差别,直接应用传统的弹塑性理论中的力学模型是不够的,需要根据岩石类材料的