



岩石力学与
工程研究著作丛书

裂隙岩体地下工程稳定性 分析理论与工程应用

陈卫忠 伍国军 杨建平 著
贾善坡 戴永浩



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
岩石力学与工程研究著作丛书

裂隙岩体地下工程稳定性 分析理论与工程应用

陈卫忠 伍国军 杨建平 著
贾善坡 戴永浩

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合我国水利水电、交通、矿山等地下工程建设中基础理论与工程技术的难点,用实验室试验、现场试验、现场监测、数值仿真与反馈分析等方法对裂隙岩体力学特性、本构模型、反演方法及锚固可靠性等方面进行论述,研究工程岩体宏观力学与渗透参数的取值方法、复杂本构模型以及多场耦合参数的有限元反演、流变岩体锚固机理及地下工程的支护可靠度;介绍了岩土介质在复杂温度-渗流-应力耦合条件下的试验技术及仪器设备。本书还介绍了研究成果在国内重大水利水电、交通、矿山等地下工程中的应用。

本书理论分析与工程应用紧密结合,所提出的理论研究成果在工程中得到了应用和验证,具有广泛的工程应用价值。本书研究领域为岩土及地下工程,可供水利、矿山、土木、交通等专业的科技人员和相关专业的高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体地下工程稳定性分析理论与工程应用/陈卫忠等著. — 北京:科学出版社,2012

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-034733-6

I. ①裂… II. ①陈… III. ①裂隙(岩石)-岩体-地下工程-稳定性-研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 121973 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 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>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 8 月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:610 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编: 孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编: 冯夏庭

副主编: 何满潮 黄润秋 周创兵

秘书长: 黄理兴 刘宝莉

编 委: (以姓氏汉语拼音字母顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉龙	刘汉东	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开:在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下洞室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击岩压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

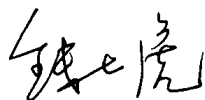
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计 and 施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很好很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任与重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

地下工程是水利水电、交通运输、城市建设、矿山建设、能源储存及核废料地质处置等工程中综合力学、地学与工程科学的交叉学科分支,应用结构力学、连续介质力学、材料试验、现场试验、现场监测、数值仿真等方法解决工程稳定性问题。

工程岩体的力学特性直接关系到地下工程设计、施工和运营期的稳定性,有关裂隙岩体的裂隙扩展机理、强度、变形、渗透性等特征一直是近年来岩土工程研究的重点和难点。本书围绕地下工程领域的关键科学问题,力图将地下工程围岩稳定性分析理论与工程实践紧密结合,在介绍作者研究团队成果的同时兼顾国内外研究进展。

本书共分十章。第一章为绪论,介绍裂隙岩体力学特性与渗流等方面的研究现状,以及地下工程围岩稳定性分析理论的研究思路、研究内容与研究方法等;第二章深入研究裂隙岩体的扩展机理;第三、四章探讨裂隙岩体宏观力学参数、渗透参数等的取值研究方法;第五章重点分析裂隙岩体损伤断裂机理、强度特性及模拟方法;第六、七章主要阐述裂隙岩体的流固耦合特性、非线性流变特性等方面的研究成果;第八、九章主要研究地下工程围岩力学参数反演分析理论、锚固机理及其时效性研究成果;第十章系统介绍地下工程稳定性研究方法在水利、矿山和交通等领域中的应用。本书的主要特色有:

1) 裂隙岩体损伤力学特性研究

(1) 多裂隙岩体相互作用影响因子计算方法、岩桥破坏模式和强度特性。应用岩石及其相似材料,通过单轴试验、三轴试验和 CT 试验,研究典型分布二维及三维裂纹的扩展机制及强度特性,研究岩桥初裂强度的计算方法和岩桥在张拉、剪切及拉剪复合型破坏条件下贯通强度的计算方法。研究复杂应力状态下考虑裂纹间相互作用后裂纹起裂、翼裂纹扩展长度计算方法。

(2) 考虑裂隙闭合和摩擦效应的岩体损伤力学模型。通过试验与理论研究,从能量的角度研究节理裂隙面传压和传剪系数影响的裂隙岩体刚度矩阵及其增量的计算方法,以及不同应力状态时裂隙面发生相对剪切滑动的临界角。研究蠕变作用下的裂隙分支裂纹蠕变扩展力学模型及其等效数值计算方法。

(3) 考虑尺寸效应的工程岩体变形模量及强度计算方法。根据岩块和节理面室内试验的成果建立相应的本构模型,并根据节理裂隙的地质统计分布,应用蒙特卡罗方法生成裂隙网络。通过编制相应的数值仿真软件自适应生成全部的

岩石单元和裂隙单元,应用数值试验方法研究工程岩体变形模量及抗压强度的尺寸效应。

2) 裂隙岩体渗流场与应力场耦合的损伤本构模型及其数值仿真方法

研究软岩渗透系数、孔隙度等参数与围岩应力动态演化的渗流-应力动态全耦合特性;通过引入愈合应力和水化学愈合因子的概念,研究泥岩裂隙自愈合特性的渗透性自愈合模型;反映泥岩损伤愈合过程中渗透系数的演化特征。

3) 裂隙岩体蠕变损伤弹塑性力学模型及其数值仿真方法

(1) 岩体非线性流变力学模型。根据工程岩体现场三轴流变、室内三轴流变和现场围岩深部位移的监测结果,建立反映不同应力和时间的蠕变速率变化特征的非线性蠕变损伤本构模型,揭示深部软岩的时效变形破坏机制。

(2) 裂隙岩体弹塑性损伤耦合蠕变本构模型。基于应变等效原理,研究裂隙岩体蠕变过程累积塑性应变和黏性应变中岩体强度的影响规律,裂隙岩体黏弹塑性损伤率本构方程和渗流-应力-损伤耦合的非线性蠕变损伤本构模型。

(3) 基于锚杆荷载传递机理和围岩体流变力学模型。建立流变锚固微元体轴力的微分方程;提出锚固体法向软接触刚度呈指数分布形式、切向黏结滑移连续性的计算方法,建立锚固接触面非线性剪切流变本构模型,基于 MATLAB-ABAQUS 有限元实现锚杆(索)支护的可靠度计算和评价。

4) 地下工程 THM 多场耦合设备研制

(1) 研制岩石低渗透介质渗透仪。自主设计并研制了可以考虑温度、应力耦合的低渗透介质渗透仪,可测试渗透率在 $1 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 左右的介质渗透性。

(2) 研制软岩渗流应力耦合三轴流变仪。自主设计并研制了双联动渗流应力耦合的长时间三轴流变仪,可开展温度-渗流-应力耦合的三轴流变试验。

本书是第一作者陈卫忠及其带领的学术团队多年来研究成果的集中体现。近年来,作者主持和参与了国家自然科学基金重大国际合作项目“软弱岩体多场耦合与长期强度特性研究”(50720135906)、国家自然科学基金重点项目“大型地下洞室群稳定性和优化研究”(59939190)、国家自然科学基金西部重大研究计划“西部高地应力结构性流变岩体的破坏机理及锚固可靠性研究”(90510019)、国家自然科学基金重点项目“深部盐岩地下储油中的基础研究”(50434050)、国家自然科学基金“裂隙岩体非饱和渗流-应力-温度耦合试验及理论研究”(50539072)、雅砻江水电开发联合基金“深部岩体与结构面的变形与强度特性及其参数评估方法”(50579087),在裂隙岩体宏观力学参数取值、变形破坏机理、流变性、渗流-应力耦合机理、锚固时效性等方面开展了系统的理论与试验研究,并依托国内重大地下工程开展工程应用研究。历经十几年,完成了十多项研究课题。

撰写本书过程中,得到中国科学院武汉岩土力学研究所和岩土力学与工程国家重点实验室、山东大学等单位的大力支持,在此,特向上述单位表示衷心的感谢。

本书的出版得到国家科学技术学术著作出版基金的资助,特在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

陈卫忠

2012年2月

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

第一章 绪论	1
1.1 裂隙岩体地下工程稳定性分析研究现状	1
1.2 研究内容与研究方法	22
参考文献	26
第二章 工程岩体裂隙扩展机理研究	44
2.1 引言	44
2.2 非饱和岩石微裂隙扩展机制研究	44
2.3 三维预制裂纹岩石扩展机理研究	62
2.4 雁形裂纹扩展的断裂机制与模型试验	78
2.5 裂隙岩体岩桥扩展机制研究	85
2.6 裂纹动态扩展有限元模拟方法	91
2.7 本章小结	103
参考文献	103
第三章 工程岩体宏观力学特性及其参数取值研究	106
3.1 引言	106
3.2 岩石三轴试验与力学模型研究	107
3.3 结构面剪切试验与力学模型研究	118
3.4 各向异性弹性体的柔度张量形式及求解	130
3.5 工程岩体宏观力学参数的研究方法	135
3.6 岩体变形模量的尺寸效应和各向异性研究	138
3.7 岩体抗压强度尺寸效应和各向异性的研究	152
3.8 岩体力学强度参数研究	159
3.9 本章小结	162
参考文献	162
第四章 工程岩体宏观渗透参数取值研究	166
4.1 引言	166
4.2 低渗透介质温度-应力-渗流耦合试验仪简介	167

4.3	岩石渗透率的计算方法	170
4.4	结构面渗透率的计算方法	175
4.5	低渗透岩石渗透试验结果	176
4.6	岩石结构面气体渗透试验结果	186
4.7	各向异性连续介质的渗透系数张量形式及求解	190
4.8	岩体渗透特性尺寸效应及各向异性的研究方法	191
4.9	岩体渗透特性尺寸效应及各向异性的研究	193
4.10	本章小结	197
	参考文献	197
第五章	裂隙岩体损伤断裂机理及其强度特性	200
5.1	引言	200
5.2	多裂隙岩体相互作用机理研究	200
5.3	岩体裂隙蠕变断裂机制及其损伤演化方程研究	218
5.4	断续节理岩体强度特性研究	229
5.5	本章小结	235
	参考文献	235
第六章	裂隙岩体渗流应力耦合特性的研究	238
6.1	引言	238
6.2	裂隙岩体损伤渗流应力耦合力学特性研究	239
6.3	软岩与水相互作用机理研究	241
6.4	多孔介质渗流应力耦合理论研究	244
6.5	软岩渗流-损伤耦合模型的研究	250
6.6	泥岩微裂隙损伤自愈合模型研究	255
6.7	本章小结	256
	参考文献	257
第七章	岩体非线性流变特性试验和理论研究	261
7.1	引言	261
7.2	软岩应力-渗流耦合试验仪研制	265
7.3	软岩现场三轴流变试验	272
7.4	软岩渗流应力耦合流变力学模型研究	283
7.5	裂隙岩体黏弹塑性损伤耦合率本构方程	290
7.6	岩石能量耗散蠕变损伤模型	293
7.7	经验幂函数非线性蠕变损伤模型	302
7.8	本章小结	308
	参考文献	308

第八章 地下工程围岩力学参数反演分析理论	311
8.1 引言	311
8.2 基于侧压力系数的三维初始地应力场反演理论	313
8.3 地下工程围岩力学参数反演理论	318
8.4 岩土介质弹塑性损伤本构模型参数反演分析	324
8.5 基于损伤渗流耦合模型的工程岩体参数反演分析研究	331
8.6 本章小结	346
参考文献.....	346
第九章 地下工程锚固时效性及可靠性研究	350
9.1 引言	350
9.2 锚固微元体受力特征研究	351
9.3 黏弹塑性围岩体锚固体力学分布特性	355
9.4 流变岩体锚固界面试验研究	361
9.5 锚固界面的接触力学特性研究	367
9.6 锚固界面流变本构模型的建立	368
9.7 接触本构模型的数值仿真	376
9.8 地下工程锚固可靠性研究	385
9.9 本章小结	399
参考文献.....	399
第十章 地下工程稳定性分析理论在大型工程中的应用	401
10.1 锦屏二级水电站引水隧洞宏观力学参数研究.....	401
10.2 淮南刘庄煤矿深埋软岩巷道支护设计优化及稳定性研究.....	409
10.3 裂隙岩体蠕变损伤力学模型在龙滩急倾斜地下厂房中的应用.....	437
10.4 厦门翔安海底隧道应力渗流耦合反演及长期稳定性研究.....	451
10.5 大岗山地下厂房地应力反演及锚固时效性、可靠性研究	466
参考文献.....	484

第一章 绪 论

1.1 裂隙岩体地下工程稳定性分析研究现状

1.1.1 岩石裂隙扩展研究进展及现状

Griffith^[1,2]在1920年、1924年相继发表的两篇论文建立了脆性断裂力学理论的基本框架,之后,国内外学者在断裂理论和实验方面进行了广泛和深入的研究。

1966年,Brace等^[3]提出二维裂隙滑移开裂模型,认为滑动裂隙端部生成的弯折型张性裂纹是在压剪型荷载作用下新裂纹生成的主要机制,并根据该模型对岩石破坏前的扩容现象进行了微观解释。同时指出,在准静态方式下,裂隙的进一步扩展要求压力连续增长以维持这个过程,而次生裂纹最初是以突跃的方式出现的。相反,试件在受拉状态下,裂纹的增长是不稳定的。该模型对解释岩石中微裂纹的延性开裂机制是适宜的,但该模型没有考虑裂隙间的相互作用,因而也只适用于裂隙密度较小和裂隙扩展前期的情况。

朱维申、陈卫忠等^[4~6]通过相似材料模拟试验的方法研究了双轴压缩荷载作用下闭合雁形裂隙的起裂、扩展和岩桥的贯穿机理,得到在双轴压缩荷载的作用下,不同方位雁形裂隙的开裂角、起裂荷载、岩桥贯通荷载及临界失稳荷载等重要的断裂力学参数。

任伟中等^[7~9]通过直剪试验条件下的模型试验,研究了不同节理连通率、节理排列方式、正应力条件下同时包含闭合节理和岩桥的剪切面的变形和强度特性及其相应的变化规律,探讨了节理、岩桥变形和破坏机理,并建立起表征岩桥初裂强度和不同破坏模式下的贯通强度计算公式。

香港大学黄凯珠等在岩石裂纹扩展方面通过物理实验和数值模拟,研究双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置三裂纹的萌生、扩展和贯通机制,结果显示,裂纹贯通模式主要受加载条件与预置裂纹几何分布的影响,裂纹在双轴加载条件下有拉、剪、压和混合贯通等模式^[10~20]。研究认为,压裂纹是在侧压下产生的次生裂纹,其贯通受制于两非共线的重叠裂纹间的距离。

Ayatollahi等^[21]采用PMMA材料制成包含一个边裂纹的标准SCB试样,进行纯Ⅰ和纯Ⅱ型裂纹的断裂试验,试验发现,对采用NSCB试样的断裂试验来说,最大拉应力准则过高估计了断裂强度,而裂纹扩展路径则与试验结果基本一致。

Al-Shayea 在巴西圆盘试样上预制线型穿透裂纹,进行了 I + II 复合型加载条件下的裂纹扩展试验,对裂纹的起裂角和扩展路径进行了研究和分析^[22]。研究认为,当裂纹倾角不大时,最大拉应力理论可以预测裂纹起裂方向,但当裂纹倾角较大时,由于裂纹面闭合,裂纹扩展路径并不沿预制裂纹尖端方向,因此此时圆盘试样已经不再适于断裂韧度等方面的分析。

Nara 等^[23]采用花岗岩试样开展双剪试验,通过不同温度和蒸汽压力,得到次生裂纹的扩展能,进而可以得到不同温度、蒸汽压力和应力集中系数下裂纹的扩展速度。

Nara 等^[24]还采用安山岩和花岗岩试样开展双剪试验。结果表明,在保持相对湿度恒定的情况下,裂纹扩展速度随温度的升高而增加;在保持温度恒定时,裂纹扩展速度随相对湿度的升高而迅速增加,通常 3~4 倍的相对湿度变化将引起裂纹扩展速度 1~4 个数量级的变化。

Park 等^[25]开展了单轴压缩下预制裂纹石膏试样的裂纹扩展试验。试验发现,裂纹类端有翼裂纹、共线裂纹和剪切斜裂纹产生,并且闭合裂纹试样与开裂纹试样的试验结果是一致的。

李强等^[26]采用熟石膏模型试样研究发现,翼型裂纹从原裂纹的尖端出发,沿曲线路径扩展,并逐渐逼近过裂纹中点且平行于最大主应力方向的一条直线,据此提出双曲线形式的翼裂纹扩展模型。

在三维裂纹研究方面:

Sahouryeh 等^[27~30]在方形试样上预制人工三维裂纹,进行了砂岩、混凝土和树脂试样的双轴压缩试验。试验结果表明,双轴压缩荷载加载下裂纹的扩展与单轴压缩下是不同的。研究认为,单轴压缩下在裂纹边缘产生的包裹型翼裂纹是限制翼裂纹继续扩展的原因,而在双轴压缩下翼裂纹可以充分发展从而引起试样劈裂破坏。

Dyskin 等^[31~33]进行了大量二维、三维裂隙的扩展方面的试验和理论研究。Sahouryeh 等采用树脂、水泥砂浆材料,通过改变裂纹的形状和长度,研究单轴压缩下三维内置裂纹的扩展规律,发现三维裂纹扩展规律与二维扩展规律很不同,其裂纹尖端生成的包裹型裂纹会限制张拉型翼裂纹的发展。对于两共面裂纹,剪切裂纹只有当两裂纹间距达到某一临界值时才会产生。

Wong 等^[34]研究了含三维边裂纹 PMMA 试样和大理石岩样的裂纹扩展试验,通过改变预置裂纹深度和倾角,研究裂纹起裂模式和扩展路径。试验发现,预置裂纹尖端不仅有翼裂纹出现,而且产生了包裹型(Ⅲ型)裂纹;裂纹扩展长度取决于裂纹深度、倾角和试样材料性质。

Heyder 等^[35]采用 PMMA 材料,进行了三维裂纹的四点弯曲疲劳试验,并考虑了 I 型加载、II 型加载和 I + II 混合型加载模式。试验发现,在裂纹前缘,应力

分布总是趋向于使裂纹前缘应力场形成 $r^{-0.5}$ 奇异性,认为经典的应力集中系数判据可以用于三维裂纹稳态扩展的判据。

黄达等^[36]通过裂隙岩体物理模型试验,发现卸荷条件下裂隙试样的强度、变形破坏及裂隙扩展均受裂隙与卸荷方向夹角及裂隙间的组合关系影响,卸荷速率及初始应力场大小主要影响岩体卸荷强度及次生裂纹的数量;裂隙扩展是在卸荷差异回弹变形引起的拉应力和裂隙面剪切力增大而抗剪力减小的综合作用下的破坏。

近年来,随着高分辨率数码相机的不断涌现,数字图像测试技术得到了发展。数字图像相关技术是由 Sutton 等^[37,38]在 20 世纪 80 年代发展起来的一门无损测量技术,它利用数码相机记录物体不同状态下的图像,然后对两张图像内同一大面积的子空间进行像素相似度比较,从而找到物体初始位置对应的变形后的实际位置。根据物体初始空间位置到变形后的空间位置之间转换关系,利用不同方法(比如有限元、平均梯度法)确定全场应变分布。Yang 等^[39]在这一方面做出了新探索。

1.1.2 裂隙岩体断裂损伤实验研究进展及现状

在裂隙岩体断裂损伤实验研究方面,主要有模型试验、声发射技术、扫描电镜技术和 CT 技术等。

在模型试验方面,国内外学者进行了众多研究。自从 1967 年举行的第九届国际大坝会议及同年举行的国际岩石力学会议上提出用材料的块体组合来模拟多裂隙岩体介质的设想以后,国内外学者对裂隙岩体的力学性质做了许多研究。

Goldstein、Hayashi、Lama、Kawamoto、Muller、Einstein、Brown 等许多学者利用模型试验,对裂隙岩样进行了单压、单拉、纯剪的试验,同时也进行了二维及三维的压缩试验,对影响裂隙岩体强度特性、变形特性、破坏方式等因素做了分析研究。

周维垣等^[40,41]进行了众多水电站的地质力学模型试验。他们在处理裂隙岩体中数量众多的节理裂隙时,认为必须对其作适当的简化,但在各个方向节理裂隙出现的频度、原型与模型应保持相似,即原型岩体内各个方向单位长度内缝隙数之比应与模型相同;刘东燕等^[42]通过含中心裂纹砂浆试件的单轴压缩试验,测试并分析了裂纹扩展过程中的声发射特征和裂纹面的相对位移特性。试验证明,岩石类脆性材料的压剪断裂破坏机理与拉剪断裂有本质的区别,裂纹面相对位移变化与轴压荷载和声发射具有一定的同步性;黎立云等^[43]采用类岩石材料白水泥模拟多裂纹岩体进行了双向加压实验,对裂纹开裂角、初始开裂荷载的理论计算值和实验值进行了对比分析;黄凯珠等^[44]采用类砂岩模拟材料,研究双轴作用下不同几何分布和不同围压的断续预置三裂纹的萌生、扩展和贯通机制。结果表明,裂纹贯通机制主要受加载条件与预置裂纹的几何分布影响;郭少华^[45]进行了含中心裂纹

的矩形石膏试件单轴、双轴压缩条件下的破坏试验,对裂纹起裂位置、起裂角、应力集中、断开模式进行了研究。模型试验结果直观,建立在一定的物理背景之上,具有较强的说服力,因而成为进行岩石力学研究一种不可或缺的重要手段。

近年来,随着声发射技术的发展、高倍扫描电子显微镜以及 CT 试验机的出现,裂隙岩体断裂损伤的实验研究得到较快发展。刘东燕等^[46]用水泥砂浆模拟含裂隙岩石试样,在刚性压力机上进行单轴压缩试验,通过声发射测试技术,分析含裂隙岩石在受压过程中新裂纹的萌生→扩展→断裂破坏全过程,并对含中心斜裂纹试样受压破坏的声发射特征进行研究,根据声发射过程线特征段上的转折点区分裂纹扩展的阶段性的。研究表明,试件受压破坏过程中的声发射事件主要来源于裂纹尖端新生裂纹发展时的能量释放。Tsuyoshi^[47]对 4 种不同粒度花岗岩试样进行了水压致裂声发射测试,研究了粒度和不同黏度液体作用下试样的破坏机制。研究表明,当粒度较大时,以剪切破坏机制占主导,当粒度较小时,以张拉破坏机制占主导;当裂隙中注入高压水后,以剪切破坏机制占主导,当注入黏度较高的油时,以张拉破坏机制占主导。李银平等^[48,49]采用含预制裂隙大理岩试件,对压剪应力场中试件破坏过程声发射特征进行研究,根据试样的不同声发射特征,分析材料损伤断裂过程的不同机制。Lei 等^[50]选用含裂隙面花岗岩和泥岩试样,采用 32 通道高速声波测试仪,对试样的破裂过程进行声发射的时空记录,并将裂纹的损伤演化过程分为三个阶段。Changa^[51]采用声发射技术研究了 Hwangdeung 花岗岩和 Yeosan 大理岩试样的微裂纹汇合问题,分析其断裂损伤的微观机理。研究表明,三轴压缩荷载下岩石的破坏机制以剪切破坏为主导,并且随着围压的增加,剪切破坏的主导性增强。另外,Zinina 等^[52]、Tang 等^[53]、Rudajev 等^[54]、Chang^[55]、Xu 等^[56]、Zietlow 等^[57]都曾采用声发射技术进行了岩石破坏特征的研究。

在扫描电镜试验方面,周维垣等^[58]采用黑色大理石试样,进行了岩石材料切片的扫描电镜(SEM)下的断裂试验及宏观试件的三点弯曲断裂试验,研究试样微观破坏的机理及宏观断裂破坏形成的过程,并采用局部化理论和分数维重正化理论相结合的近似方法,即用细观网格代替局部的不均一性,建立了岩石、混凝土材料细观开裂网格模型;肖洪天等^[59]采用扫描电镜,即时记录了裂纹尖端的微裂纹发育和演化过程,并应用双扭试件,对三峡船闸花岗岩进行了亚临界裂纹扩展试验,得到花岗岩的断裂力学参数;朱珍德等^[60]选取三峡船闸高边坡花岗岩和山西万家寨水电站灰岩进行不同应力状态的全应力-应变过程渗透性对比试验,然后将其岩石破坏断裂断口进行微观扫描电镜试验,分析了脆性岩石的微观断裂形式,认为脆性岩石的断裂机理有两种,即剪切破坏和翼裂纹扩展破坏;赵永红等^[61]对房山大理岩进行了单轴压缩条件下大理岩填充割缝周围微裂纹生长的扫描电镜实时观测研究,微裂纹首先呈剪切破裂带状发育,随外载的增加而连通形成断裂带,割