

岩石力学与  
工程研究著作

丛书

# 岩体裂隙网络各向异性 损伤力学效应研究

◎陈新 杨强 李德建 著



科学出版社

TU45  
96

岩石力学与工程研究著作丛书

# 岩体裂隙网络各向异性 损伤力学效应研究

陈 新 杨 强 李德建 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要介绍岩体裂隙网络各向异性损伤力学效应的试验、理论研究和工程应用。在试验研究方面,以裂隙岩体模拟试件的单轴压缩试验为基础,采用数字图像处理、筛分试验和有限元模拟分别对试件的表面裂纹演化特征、破碎特征和起裂机制进行分析,研究试件宏观各向异性、非线性力学响应与其裂隙网络几何参数的相关关系,揭示裂隙岩体的损伤机理。在理论研究方面,以微平面二元介质模型为出发点建立了岩体本构关系研究的新框架,讨论了标量和矢量的方向分布函数及其各阶组构张量、岩体的各向异性损伤强度准则和岩体的微平面损伤本构模型。在工程应用方面,考虑岩体各向异性对油井井壁的稳定性的弹性分析和弹塑性分析。

本书可作为土木、水利、采矿、地质等专业从事岩石力学、损伤力学研究的大专院校教师、研究生和科研院所研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩体裂隙网络各向异性损伤力学效应研究/陈新,杨强,李德建著. —北京:科学出版社,2016.3

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-047659-3

I. ①岩… II. ①陈…②杨…③李… III. ①岩体-裂缝(岩石)-岩石力学-研究 IV. ①TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 049605 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:左讯

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>

三河市骏志印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:23 3/4 彩插:2

字数:478 000

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	刘汉东	刘汉龙	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,大多以地下硐室(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地压显现剧烈,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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和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多很好的研究成果,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

天然岩体经过多次地壳构造运动,内部广泛存在着产状不同、性质各异的各种地质不连续面(又称为结构面)。近半个世纪以来,许多大型岩体工程的失稳事件已使岩石力学界普遍认识到结构面对岩体力学行为的控制性作用。而“岩体结构控制论”也已成为岩石力学的核心学说,其基本观点是:结构面是岩体中的薄弱部位,对岩体的力学行为有着极其重要的影响。

对绝大多数岩体工程项目,断层、剪切带、软弱夹层等大尺寸的结构面数量有限,其空间分布特征、地质力学性质可以逐一地单独考虑;而割理、层理和节理等中、小尺寸的结构面(可统称为“裂隙”)数目众多,需要考虑其统计平均力学效应。岩体损伤力学将反映裂隙网络空间分布特征的组构张量引入本构关系,来定量描述裂隙结构对岩体宏观力学行为的影响。近三十年来,岩体损伤力学的理论、试验和数值模拟技术蓬勃发展,推动了“岩体结构控制论”逐步由定性理论向定量分析深入发展。

总体而言,裂隙的存在使得岩体的强度降低、变形和渗透率增加,并呈现出显著的各向异性。裂隙岩体的宏观力学特性取决于如下三个方面:岩块的力学性质、裂隙面的力学性质和裂隙网络的空间分布特征。迄今为止,岩体力学领域对这三个方面独立地进行了较多的研究,发展了相对成熟的理论和方法,包括岩体内裂隙系统的地质勘测、描述、统计,岩石的本构描述和力学参数测定,贯通裂隙面的本构描述和力学参数测定。然而,由于裂隙网络空间分布的多样性和裂隙面力学响应的高度非线性,岩体力学行为与裂隙结构的相关性和岩体各向异性本构模型的建立成为一个十分复杂的试验和理论研究课题,至今尚未得到很好的解答。

本书系统地介绍了作者在岩体损伤力学方面近二十年的研究成果,全书共9章。第1章介绍了岩体损伤力学的研究现状;第2~5章介绍了裂隙网络几何参数对岩体宏观力学行为影响的试验研究,包括节理岩体模拟试件的单轴压缩试验及表面裂纹演化特征分析、破碎特征分析和起裂机制分析;第6~9章介绍了裂隙岩体的二元介质微平面本构理论及其工程应用,包括方向分布函数及其各阶组构张量、岩体的各向异性屈服或强度准则、岩体的各向异性损伤本构模型和考虑岩体各向异性的油井井筒稳定性分析。



本书的创新性贡献包括:①在试验研究方面,通过裂隙岩体模拟试件的单轴压缩试验,系统研究了裂隙网络几何参数组合变化对岩体强度、变形特性的影响,首次从试验中发现了无侧压时裂隙试件的脆性—延性变形转换特性;结合数字图像分析、筛分试验、有限元模拟等手段,建立了从不同角度研究多裂隙体细观损伤力学机制的方法;②在理论研究方面,首次提出矢量方向分布函数的概念并建立了它的各阶组构张量;通过在微平面模型中引入二元介质概念,建立了裂隙岩体本构理论新框架;分别从有效应力原理和强度参数各向异性分布两个角度,建立了岩体的各向异性损伤屈服准则和强度准则;分别从弹塑性理论和应力边界方程两个思路出发建立了岩体的各向异性损伤本构模型;③在工程应用研究方面,建立了考虑岩体各向异性的油井井壁稳定分析模型。通过理论分析,证明了对各向异性岩体沿最大地应力方向钻井并不一定最安全。

本书的岩体本构理论新框架的优点是:①在微平面水平上,以裂隙面基元所占比例为损伤变量,定义岩石基元和裂隙面基元的本构关系,从而将裂隙网络空间分布几何特征和裂隙面力学响应这两方面的损伤力学机制解耦,便于描述与裂隙演化和裂隙面张开、摩擦、滑移分别相关的不可逆行为,反映了岩体这类准脆性材料宏观非弹性、非线性力学特性(如低抗拉、软化、剪胀、蠕变、脆韧转换、尺寸效应等)的物理本质;②由各方向微平面的力学响应来推求岩体宏观各向异性力学响应,避免了直接基于应力和应变张量的传统损伤本构模型在描述各向异性行为时的数学困难和复杂性;③本构模型的力学参数有着明确的物理意义,岩石和裂隙面基元的弹性参数和强度参数可直接由岩石、贯通裂隙面的力学试验测定。该岩体本构理论新框架的困难在于微平面损伤变量与裂隙网络几何参数的相关关系和损伤演化方程,这方面仍需继续开展大量的研究工作。

书中的部分内容为第一作者博士学位论文(中国岩石力学与工程学会 2008 年度优秀博士学位论文、清华大学 2005 年度优秀博士论文)的主要研究成果。在研究期间,作者得到了国家自然科学基金(11572344、11102224、11572174、41572334)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0656)、清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sk1hse-2007-D-02)、中国矿业大学(北京)中央高校基本科研业务费专项资金(2009QL05)等项目的资助,同时受到美国西北大学 Zdeněk P. Bažant 院士和亚利桑那大学 Pinnaduwa H. S. W. Kulatilake 教授、清华大学周维垣教授、余寿文教授、冯西桥教授、杨若琼教授、刘耀儒副教授和张文翠老师、中国矿业大学(北京)何满潮院士、冯吉利教授和杜玉兰老师的大力支持、鼓励和指导,研究生廖志红、彭曦、王仕志、李东威、吕文涛、孙靖亚、王莉贤、张市飞、杨盼、麻润杰、翟惠明、刘力方等参与了试验研究工作,在此表示

衷心的感谢。

岩体损伤力学作为岩石力学和损伤力学的交叉学科,还很不成熟,处于发展阶段。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请各位同行、专家、读者批评指正。

作 者

2016年2月1日

# 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

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 岩体损伤力学机理的试验研究 .....	3
1.1.1 现场原位试验 .....	3
1.1.2 物理模拟试验 .....	4
1.1.3 数值模拟试验 .....	6
1.2 岩体的各向异性强度准则 .....	7
1.2.1 基于张量及不变量的各向异性强度理论 .....	7
1.2.2 基于材料参数修正的各向异性强度理论 .....	8
1.3 岩体的各向异性损伤本构模型 .....	9
1.3.1 基于传统方法的岩体各向异性损伤本构模型 .....	9
1.3.2 混凝土材料的微平面模型 .....	11
1.3.3 基于二元介质概念的岩体微平面损伤模型 .....	13
1.4 本章小结 .....	14
参考文献 .....	15
<b>第 2 章 节理岩体模拟试件的单轴压缩试验</b> .....	25
2.1 试验参数和方法 .....	25
2.1.1 试件尺寸和节理网络参数 .....	25
2.1.2 岩石模拟材料的选取 .....	27
2.1.3 材料配比及力学参数测定 .....	28
2.1.4 试件的制作方法 .....	28
2.1.5 试件的数量 .....	29
2.1.6 单轴压缩试验设备 .....	30
2.2 试件的应力-应变全曲线及其分类 .....	30
2.2.1 各组试件的应力-应变全曲线 .....	30
2.2.2 应力-应变全曲线的类型 .....	32
2.3 试件的峰值强度和弹性模量 .....	35
2.3.1 强度和弹性模量的变化规律 .....	35

2.3.2	强度和弹性模量随节理连通率变化的拟合函数	37
2.4	试件的延性指标	41
2.4.1	常用的延性或脆性指标	41
2.4.2	试件延性指标的变化规律	42
2.5	试件的开裂过程和破坏模式	44
2.5.1	起裂类型	44
2.5.2	裂纹汇合贯通类型	48
2.5.3	破坏模式	55
2.6	宏观力学行为的损伤力学机制分析	56
2.6.1	应力-应变全曲线类型的损伤力学机理	56
2.6.2	强度各向异性变化规律的损伤力学机理	59
2.7	本章小结	60
	参考文献	61
<b>第3章</b>	<b>单轴压缩试验中试件的表面裂纹演化特征分析</b>	<b>63</b>
3.1	二维数字图像处理技术及表面裂纹统计参量的计算方法	64
3.1.1	各试件代表性图像的选取	64
3.1.2	二维灰度图像的增强和二值化	66
3.1.3	单个裂纹的识别和参数统计	69
3.1.4	表面裂纹的总面积分数和分形维数	70
3.2	表面裂纹的总面积分数和分形维数随轴向应变的演化	71
3.2.1	各试件表面裂纹的总面积分数和分形维数随轴向应变的变化曲线	71
3.2.2	表面裂纹的总面积分数和分形维数演化随节理参数的变化特征	81
3.3	特征点的裂纹面积分数和分形维数随节理参数的变化规律	85
3.4	表面裂纹面积分数角度分布特征随节理参数的变化规律	88
3.4.1	各试件特征点处的表面裂纹二值化图像	88
3.4.2	各试件特征点处表面裂纹面积分数的角度分布	95
3.5	本章小结	112
	参考文献	113
<b>第4章</b>	<b>单轴压缩试验后试件的破碎特征分析</b>	<b>115</b>
4.1	筛分试验的方法和步骤	116
4.1.1	筛分试验方法	116
4.1.2	筛分试验步骤	117
4.2	筛分试验的结果	119
4.2.1	各试件筛分试验的粗粒和中粒照片	119
4.2.2	各试件破碎体的粒级-质量	129

4.2.3 各试件破碎体的粒级-频数 .....	131
4.3 破碎体的块度分布特征 .....	132
4.3.1 质量百分比 .....	132
4.3.2 各粒级的频数 .....	135
4.3.3 比表面积 .....	137
4.3.4 分形维数 .....	142
4.4 本章小结和讨论 .....	144
参考文献 .....	146
<b>第5章 裂隙岩体起裂机制分析</b> .....	147
5.1 远场压力下单个椭圆裂隙弹性应力场的解析解 .....	148
5.1.1 平面问题弹性应力的复变函数解及保角变换 .....	148
5.1.2 Muskhelishvili 的极坐标解析解 .....	149
5.1.3 Stevenson 的椭圆坐标解析解 .....	151
5.1.4 椭圆孔周围的应力场分布及应力集中系数 .....	152
5.2 基于两种破裂机制的破裂判据、破裂函数及临界荷载 .....	161
5.2.1 拉破裂的判据、破裂函数和开裂临界荷载 .....	161
5.2.2 剪破裂的判据、破裂函数和开裂临界荷载 .....	165
5.3 多裂隙岩体开裂机制的有限元模拟分析 .....	170
5.3.1 几何模型 .....	171
5.3.2 有限元计算网格 .....	173
5.3.3 应力计算结果 .....	177
5.3.4 开裂机制分析 .....	187
5.4 与裂隙岩体起裂的试验结果对比 .....	189
5.5 本章小结 .....	191
参考文献 .....	191
<b>第6章 方向分布函数及其组构张量</b> .....	193
6.1 方向分布标量函数及其组构张量 .....	193
6.1.1 单位方向矢量各阶并矢及其方向平均 .....	194
6.1.2 两个张量并积关于指标完全对称化的记法 .....	199
6.1.3 方向分布标量函数的第一类组构张量 .....	200
6.1.4 方向分布标量函数的第二类组构张量 .....	203
6.1.5 方向分布标量函数的第三类组构张量 .....	206
6.2 方向分布矢量函数及其组构张量 .....	212
6.2.1 单位张量和任意矢量与单位方向矢量并失组成的两个特殊张量 .....	212
6.2.2 方向分布矢量函数法向分量(标量)的第一类组构张量 .....	217



6.2.3	方向分布矢量函数的第一类组构张量	219
6.2.4	方向分布矢量函数的第二类组构张量	222
6.2.5	方向分布矢量函数的第三类组构张量	225
6.3	本章小结	227
	参考文献	229
<b>第7章</b>	<b>基于组构张量的岩体各向异性屈服或强度准则</b>	<b>230</b>
7.1	微平面模型的宏细观联系框架	230
7.1.1	代表性体积单元的宏观物理量和微平面上的细观物理量	230
7.1.2	微平面物理量和宏观物理量间的联系	232
7.2	基于微平面有效应力的岩体各向异性损伤屈服准则	237
7.2.1	宏观应力张量不变量的微平面表达式	238
7.2.2	各向同性强度准则及其微平面表述	240
7.2.3	微平面有效应力矢量、宏观有效应力张量及其不变量	242
7.2.4	材料主轴坐标系内的岩体各向异性屈服准则	248
7.3	考虑材料参数方向分布的岩体各向异性强度准则	251
7.3.1	岩体强度参数的各向异性分布	251
7.3.2	各向异性岩体的拉、剪破坏条件	252
7.3.3	岩体的各向异性抗拉强度准则	253
7.3.4	岩体的各向异性抗剪强度准则	254
7.3.5	主应力空间内的岩体各向异性强度准则破坏面	259
7.4	本章小结	266
	参考文献	268
<b>第8章</b>	<b>岩体的各向异性损伤本构模型</b>	<b>269</b>
8.1	岩体微平面二元介质模型的宏细观联系框架	269
8.1.1	岩体微平面二元介质模型的基本假设	269
8.1.2	微平面法向和切向都不分解形式的宏细观联系框架	271
8.1.3	微平面法向分解、切向不分解形式的宏细观联系框架	273
8.1.4	微平面法向不分解、切向分解形式的宏细观联系框架	275
8.1.5	微平面模型建立宏观本构方程的步骤及单位球面数值积分	277
8.2	各向同性材料的微平面弹性本构关系及弹性常数	283
8.2.1	法向和切向都不分解形式的微平面弹性本构关系及弹性常数	283
8.2.2	法向分解、切向不分解形式的微平面弹性本构关系及弹性常数	285
8.2.3	法向不分解、切向分解形式的微平面弹性本构关系及弹性常数	287
8.3	岩体的塑性损伤耦合微平面模型	288
8.3.1	微平面损伤变量的组构张量	288

8.3.2	岩体的损伤弹性本构方程 .....	290
8.3.3	岩体微平面的损伤弹塑性本构关系 .....	295
8.3.4	岩体的宏观弹塑性本构方程 .....	300
8.3.5	岩体的塑性损伤耦合微平面模型计算流程 .....	301
8.3.6	算例 .....	303
8.4	基于应力边界的岩体各向异性损伤微平面模型 .....	306
8.4.1	微平面上岩体和两个力学基元的应变增量 .....	306
8.4.2	微平面上两个力学基元的弹性试应力 .....	307
8.4.3	微平面上两个力学基元的应力-应变边界方程 .....	308
8.4.4	微平面上的岩体应力矢量和岩体宏观应力张量 .....	312
8.4.5	微平面的损伤演化方程 .....	312
8.4.6	基于应力边界的岩体各向异性损伤微平面模型计算流程 .....	314
8.4.7	算例 .....	315
8.5	本章小结 .....	327
	参考文献 .....	328
<b>第9章</b>	<b>考虑岩体各向异性的油井井筒稳定性分析 .....</b>	<b>330</b>
9.1	考虑岩体各向异性的井壁稳定弹性分析 .....	330
9.1.1	地应力主轴、岩体材料主轴和井筒的坐标系 .....	331
9.1.2	井筒周围岩体的弹性应力场 .....	335
9.1.3	考虑岩体各向异性的井壁稳定弹性分析模型及软件 .....	345
9.1.4	算例 .....	349
9.2	考虑岩体各向异性的井壁稳定弹塑性分析 .....	353
9.2.1	分析方法及计算参数 .....	353
9.2.2	分析结果 .....	355
9.3	本章小结 .....	358
	参考文献 .....	359

彩图

# 第 1 章 绪 论

在水电、交通、采矿、石油、国防、新能源等众多的工程领域中,都涉及岩体工程系统的设计和建设,如水电或交通隧道、大坝的基础、天然和人造边坡、采矿硐室、石油和天然气储存硐室、隔离危险废物硐室等。为达到对这些岩体工程系统进行安全、经济的设计,正确认识和描述岩体在工程力作用下的力学特性(变形、强度、渗透性等)是至关重要的。

随着我国工程建设的加速发展,岩体工程的数量和规模不断扩大、复杂程度日益提高。例如,三峡工程永久船闸约 176m 高边坡的稳定性问题;西南地区约 300m 的高拱坝(四川锦屏和溪洛渡水电站、云南小湾水电站)在复杂岩基下的稳定性问题。随着我国煤炭资源的长期开采造成浅部资源日益枯竭,迫使多数矿井转入深部开采,全国煤矿 2010 年的平均开采深度为 700m,预计 2020 年的平均开采深度将达到 1200m<sup>[1]</sup>。在深部煤炭资源开采中,由于岩体破碎程度高和所处的高地应力、高岩溶水压、高温的“三高”地质环境,巷道开挖后的大变形、大地压和难支护等现象不可避免,顶板冒落、底臃大变形、瓦斯突出、底板突水等灾害频发,简单的一次支护不能实现工程稳定,必须采用二次支护或多次支护等措施来控制围岩的大变形和破坏,给巷道的维护带来极大的困难,严重威胁着我国煤炭深部资源的安全高效开采,已成为国内外采矿及岩石力学界研究的热点。此外,地层热能资源的开发利用、页岩气开采、核废料地下埋置、二氧化碳地下封存等岩体工程中都涉及多相多场耦合环境下的岩体工程稳定性问题。这些都为岩体力学的发展带来了机遇和挑战,推动了新的理论、试验方法和计算技术的不断提出。

天然岩体是自然界的产物,在漫长的历史形成过程中,经受了各种复杂的地质作用,内部广泛存在着规模不等、产状不同、性质各异各类结构面,统称为不连续面,如断层、层理面、剪切带、岩脉、节理、片理和割理等。这些不连续面是岩体中的薄弱部位,对岩体的稳定性起着控制作用。许多大型工程实践中的岩体失稳事件,如边坡、坝基的滑移失稳以及地下硐室的坍塌、冒顶、底臃、瓦斯突出等事故都与这些不连续面的存在及演化过程密切相关,使得国内外的岩体力学工作者逐渐认识到不连续面对岩体稳定性所起的重要作用<sup>[2,3]</sup>。

一般地,可将岩体工程中的不连续面分为两大类:①主要不连续面,如大的软弱夹层、断层和连续节理等较大尺寸的地质构造;②次要不连续面,如节理、片理、割理等小尺寸的地质构造,可统称为“裂隙”。对绝大多数岩体工程项目,在最高等级水平上只包含少数几个主要不连续面,其几何分布特征和地质力学性质可以

逐一地单独确定。而对小到几十厘米、大至几米的次要不连续面,由于其数量庞大和在工程研究尺度范围内常不完全贯通的特点,无法逐一单独加以考虑,需要考察裂隙系统的统计平均力学效应,将裂隙岩体等效为连续介质。

近半个世纪以来,“岩体结构控制论”这一岩体力学的核心学说,已逐步由定性分析为主向定量分析深入发展。弹塑性理论经过长期发展,针对不同材料,提出了各种唯象模型,对材料的非线性、非弹性行为能进行较好的总体把握,其不足之处是无法考虑材料的内部结构,解释材料破坏的机理。而损伤力学或连续体损伤力学(continuum damage mechanics, CDM)由 Kachanov<sup>[4]</sup>于 1958 年创立,能考虑微缺陷的存在和发展对材料宏观力学性能的影响。日本学者 Kawamoto 等<sup>[5]</sup>在 20 世纪 80 年代率先将损伤力学引入岩体的本构描述,采用一个二阶损伤张量来反映岩体结构,引起了国内外岩石力学工作者的广泛关注。此后,新的理论、试验和数值方法的不断出现,推动了岩体损伤力学这一岩体力学和损伤力学交叉学科的蓬勃发展。岩体损伤力学致力于探究岩体宏观力学特性与裂隙系统损伤力学效应之间的相关关系,将反映岩体组构特征的损伤变量引入到岩体的本构描述中,来定量地刻画裂隙网络结构对岩体宏观力学行为的影响。

裂隙岩体由岩块和其内部的众多裂隙在空间内呈一定组合而构成。野外工程地质调查发现,岩体中的裂隙大多成组出现,每组裂隙具有相同或相近的方位和地质力学特性,是由同一地质构造或改造作用形成。岩体中的裂隙组并非在各方向均匀分布,而是集中分布在某些优势方位上,具有明显的各向同性分布特征。为了对裂隙进行定量描述,国际岩石力学学会规定了 10 项指标。这些指标可以分为两大类:①反映裂隙网络空间分布特征的几何参数,包括裂隙的组数和岩块大小,以及每组裂隙的产状、间距(或密度)、延续性共五个指标;②反映裂隙面地质力学性质的参数,包括裂隙面的粗糙程度、起伏度、侧壁抗压强度、充填情况、渗流共五个指标。

在工程力(地应力状态、开挖卸荷条件、温度-水-化学环境等)作用下,裂隙岩体的力学响应取决于三个因素:①完整岩块的力学响应;②裂隙面的力学响应;③裂隙网络的损伤力学效应。

完整岩块即岩石,属于准脆性材料,宏观上呈现出低抗拉、软化、剪胀、蠕变、脆韧转换、尺寸效应等复杂的力学特性。岩石的上述宏观力学响应与其内部结构有关,包括它的矿物成分、胶结特征、孔隙结构和微裂纹等。与混凝土等准脆性材料相似,岩石的上述宏观不可逆力学响应也受控于微裂纹的损伤力学机制,包括微裂纹的张开、摩擦、滑移和微裂纹的形成、汇合、贯通等。岩体中的裂隙面在法向拉力、法向压力、剪力作用下将发生张开、闭合和滑移等高度非线性的力学响应,其力学行为与裂隙面的地质力学性质有关<sup>[6]</sup>。相对于岩块和裂隙面的力学响应而言,裂隙网络的损伤力学效应,由于其空间分布的多样性、各向异性及其与不