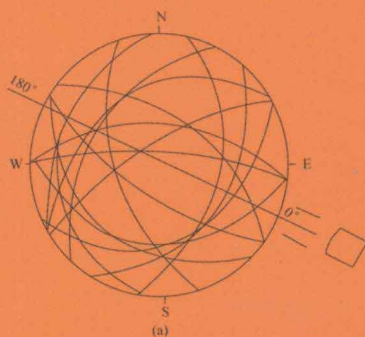




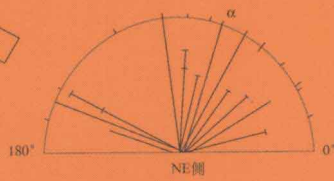
# 岩体力学原理

孙广忠 孙毅 著

## PRINCIPLE OF ROCK MASS MECHANICS

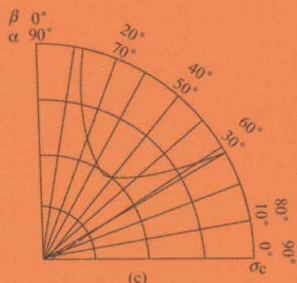


(a)

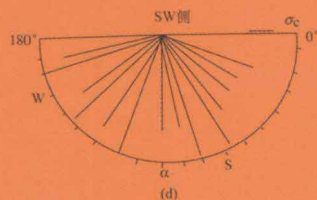


NE侧

(b)



(c)



(d)



科学出版社

# 岩体力学原理

PRINCIPLE OF ROCK MASS MECHANICS

孙广忠 孙毅 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书简述岩体力学的地质基础,以材料力学和结构力学的观点为指导阐述岩体力学的力学基础理论,以地质观点为指导简述岩体改造原理、技术和方法。

本书可作为土木工程、水利工程、铁道工程、公路工程、矿山工程、地质工程等专业的博士研究生教材及高级工程师的自学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

岩体力学原理/孙广忠,孙毅著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-029444-9

I. ①岩… II. ①孙…②孙… III. ①岩石力学 IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第215551号

---

责任编辑:韩 鹏 孙燕冬/责任校对:张怡君

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

装 订 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

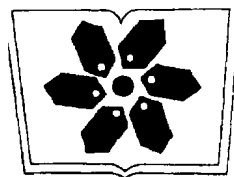
2011年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—2 000 字数:192 000

定价:49.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

## 前 言

笔者对岩体力学的认识是有一个过程的。做学生时学的岩石力学，是结构力学中的一章，毕业后在大连工学院（现大连理工大学）水利工程系土力学教研室担任助教（任彭阜南讲授的“工程地质”课程助教和教研室主任章守恭教授讲授的“岩石力学”课程助教），章守恭教授讲授的“岩石力学”教材用的是苏联崔托维奇教授著的《岩石力学》。1957年笔者调入中国科学院地质研究所工程地质研究室工作，1973年工程地质研究室主任谷德振教授分配笔者搞岩体力学研究，主持岩体力学研究组。谷德振教授、孙玉科教授在1959年提出了岩体结构观点。岩体结构是岩体的基本特征。笔者认为从事岩体力学研究就必须研究岩体结构力学效应，之后的研究工作加深了对岩体结构力学效应的认识。在职期间笔者承担了百余项科研、生产实践工作，开展了大量岩体（岩石）力学试验和岩体力学模拟实验研究，积累了大量的实践经验和实践资料，于1984年提出岩体结构控制论是岩体力学的基础理论，1987年写成《岩体结构力学》，1988年由科学出版社出版。该书出版已经二十多年了，近些年来笔者经过反复思考与研究，发现这一提法也不够全面，岩体是由岩石材料和岩体结构构成的，则岩体力学应该是由岩石材料力学和岩体结构力学构成的，也就是说岩体力学既包含材料力学成分也包含结构力学成分，这是由岩体的本质决定的。岩体力学与一般力学还有一个重要的不同，岩体是有其特殊岩体结构，并且赋存于一定的地质环境中的，这对岩体力学来说有重要影响，研究岩体力学必须考虑岩体的这两个特点。于是笔者想重新写一本岩体力学方面的书。岩体力学包括的内容非常广泛，有许多专业内容，如土木工程行业中的铁道、交通、水利水电和港口工程，矿山工程行业中的煤炭、冶金、石油、天然气和水资源开发等，不好选择，最好还是通用一些，叫“岩体力学原理”，讲述一些岩体力学的基本原理。

本书与目前高等院校采用的《岩石力学》或《岩体力学》不同之处在于现有教材中的岩石力学或岩体力学基本上都属于岩石材料力学范畴，从材料力学角度出发，从应力应变关系考虑岩体变形；从材料破坏角度出发，考虑岩体破坏问题，这是材料力学方面的内容。笔者在实践中觉察到，岩体的变形除由应力应变关系作用产生的以外，还有位移变形产生的大变形；岩体破坏除材料破坏外，还有结构失稳引起的破坏，这是结构力学范畴的内容。已有的岩体力学的书对于岩体结构的作用不够重视，岩体结构的力学效应是岩体力学非常重要和必须考虑的

因素，而本书着重考虑了这方面的因素，对以后从事岩体力学教学、科学研究或生产的工作者来说有重要的参考意义。

总的来说，笔者的岩体力学的观念是，岩体是地质体，岩体力学是地质体的工程力学，它有自身的规律；岩体力学是为岩体工程建筑服务的，对不能满足岩体工程建筑工程地质条件需要的部分，必须进行改造。由此考虑，笔者对岩体力学原理的总体设想是全书由三大部分构成：第一部分为岩体的地质基础，第二部分为岩体力学的力学基础，第三部分为岩体改造的理论、方法和技术。

岩体的地质基础包括岩体的组成及结构（岩体建造和改造、岩体组成成分、岩体结构）、岩体的赋存地质环境；岩体力学的力学基础包括岩体结构控制论、岩体变形、岩体破坏、岩体力学性质分析、岩体力学分析原理；岩体改造包括岩体改造原理、岩体材料改造、岩体结构改造和岩体赋存地质环境改造。最后还附带一部分内容，实际上是岩体结构改造，煤矿坚硬顶板放顶有控压裂理论和技术，这是笔者承担“六五”科技攻关期间完成的研究成果。

本书基本观点为，岩体是在地质作用过程中经过建造和改造形成的，由一定的岩石成分组成，具有一定的岩体结构，赋存于一定的地质环境中的地质体，当作为岩体工程问题进行岩体力学研究时称为岩体。

岩体与其他物体的差异在于它在断层、节理、劈理、层面等切割下形成不连续结构。岩体结构的基本单元为结构面和结构体，岩体结构基本单元在岩体内排列组合特征构成不同岩体结构。本书将岩体结构划分为块裂结构、板裂结构、碎裂结构、完整（断续）结构及散体结构五种类型。岩体在地质构造作用下已经产生过变形和破坏；它在岩体工程建筑时重新产生的变形和破坏是一种岩体“再”变形和岩体“再”破坏。这两个“再”字才是岩体力学特点，这两个“再”字受岩体结构控制。这样，岩体按其力学功能可分为：①岩体材料，其力学功能遵循材料力学法则；②岩体结构元件，其力学功能遵循结构力学法则。岩体力学不能仅用连续介质力学理论与方法来处理岩体力学问题，而宜用结构力学和超静定结构力学理论与方法处理岩体力学问题。岩体结构控制论是岩体力学的基础理论，岩体结构力学效应是岩体力学的力学基础。当岩体不能满足岩体工程建筑的工程地质条件要求时，可以对岩体和岩体赋存地质环境因素进行改造。

本书是一本岩体力学基础理论专著，更新了现行岩石力学的一些观念和概念，如已有的文献中讲地应力时一直认为地应力呈直线形分布规律，而本书提出三带分布规律，并给出了高、低地应力地区的地质标志，还给出了隧道施工突水预报理论公式；已有的文献中在考虑岩体变形时仅用胡克法则（杨氏模量）计算岩体变形，本书给出四种岩体结构变形机制元件（结构体弹性变形、结构体黏性变形、结构面闭合变形、结构面错动变形），强调了五种岩体结构元件位移变形（软弱结构面滑移变形、软弱夹层挤出变形、结构体滚动变形、板裂岩体溃屈变

形、板裂岩体倾倒变形)对岩体变形的贡献;已有的文献中在研究岩体破坏时仅用库仑莫尔破坏判据评价岩体稳定性,本书提出七种岩体破坏判据(①岩体材料张破裂;②岩体材料剪破裂;③岩体材料结构面转动破坏;④岩体结构元件结构面滑动破坏;⑤岩体结构元件板裂岩体溃屈破坏;⑥岩体结构元件板裂岩体倾倒变形破坏;⑦岩体结构元件板裂岩体弯折破坏)用于评价岩体稳定性;已有的文献中在考虑岩体力学性质时都是采用已有的工程和已有经验对比的方法进行折扣的办法处理,本书提出利用岩体力学结构效应三大法则(①爬坡角力学效应法则;②尺寸效应力学法则;③各向异性效应力学法则),结合工程现场地质背景条件综合分析的办法来解决;已有的文献中在岩体力学分析方面只讲连续介质岩体力学分析方法,本书提出四种岩体力学介质(①块裂介质;②板裂介质;③碎裂介质;④连续介质)和分析方法。本书还概括地论述了岩体改造原理,特别是岩体赋存地质环境、地应力改造原理和方法等。这些是本书的创新之处,这些都是笔者根据多年的实践经验和研究结果总结出来的,其中一些有一定的实践依据,但并不是都经过充分的实践检验的,其中很多还有待于继续研究完善本书提出来的岩体力学理论。

笔者写的《岩体力学原理》之所以能跳出材料力学的束缚,最重要的是笔者在东北工学院(现东北大学)土木工程系以及后来的大连工学院(现大连理工大学)水利工程系学习时戴宗贤教授讲授的“结构力学”、钱令希教授(院士)讲授的“超静定结构力学”等课程,使笔者在结构力学方面茅塞顿开,获益匪浅,非常感谢这些老师。

作此书时已是2010年,笔者已82岁,想对从事岩体力学研究近40年的工作做一个总结,给后人留下一点礼物,作一点贡献。这也是笔者对一生进行的岩体力学研究工作和所取得的结果画一个句号,现在基本上实现了预定设想和夙愿。

本书的撰写得到了中国科学院地质与地球物理研究所所长助理、中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室主任、岩石力学与工程学会秘书长伍法权研究员、教授的支持。2008年笔者委托岩石力学与工程学会秘书长伍法权教授帮助收集了部分高校的岩石力学、岩体力学教材,如周维垣主编、中国水利电力出版社于1990年出版的《高等岩石力学》,徐志英主编、中国水利水电出版社于1993年出版的《岩石力学》第三版,刘佑荣和唐辉明编著、中国地质大学出版社于1999年出版的《岩体力学》,蔡美峰主编、何满潮和刘东燕副主编、科学出版社于2002年出版的《岩石力学与工程》等。笔者翻阅了这些教材的主要内容,基本了解了目前高校的教学状况,与本书内容作了对比,最后定稿,在中国科学院地质与地球物理研究所地质工程博士生中进行了讲解,以听取意见,本书稿完成后祁生文副研究员帮笔者完成了幻灯片制

作，同时还承担了本书英文部分翻译和出版联系工作。科学出版社责任编辑韩鹏同志作了精心编辑，对本书内图件不清楚之处重新进行了清绘，使本书质量大为提高，在此表示衷心感谢。

限于笔者的身体条件，没有力量查阅更多资料，只能凭笔者的经验、记忆和过去发表的论文（载于《孙广忠地质工程文选》）和出版的专著《岩体力学基础》、《岩体结构力学》、《地质工程理论与实践》和《地质工程学原理》等手边的资料来撰写，本书内引用的公式没有注释来源的都是来自上述已出版的论文集及专著的参考文献。在撰写本书过程中，笔者的妻子刘淑琴高级教师给予了巨大帮助；明煌咨询公司总经理孙立刚在文字和图件扫描工作中给予了大量帮助，在此铭记。

本书共由八章构成，第一章由孙毅教授级、高级工程师编写，其余章节包括前言、绪论、第二至第八章由孙广忠编写，全篇最终由孙广忠定稿。在本书付印前祁生文副研究员对全书进行了核校，对书中主要公式进行了推导核对。第十二届国际岩石力学大会将于2011年在中国北京召开，笔者愿将这本书作为大会的献礼。

孙广忠

2010年8月中旬



## Preface

Rock mass is a geological body which is formed in the geological process after formation and reformation, with certain petrographic composition and rock mass structure, and occurs in certain geologic environment.

Rock mass is characterized by discontinuous construction formed by faults, joints, cleavages, beddings, etc. Basic units of rock mass structure, including discontinuities and structural mass, are arranged and assembled in different forms in the rock mass. The arranging and assembling forms are described by rock mass structure which includes blocky, stratified, cataclastic, intact (or with intermittence joints) and granular (or loose) structure. Rock mass had deformed and failed under tectonism in the geologic history, thus the deformation and failure of rock mass is a kind of re-deformation and re-failure. Re-deformation and re-failure of rock mass, an important characteristic of rock mass mechanics, is controlled by rock mass structure, so it is not enough to solve problems of rock mass mechanics only by theory and method of continuum mechanics. Theory and method of structural mechanics and hyperstatic structural mechanics are suitable for rock mass mechanics problems. Rock mass structure cybernetics is a basic theory of rock mass mechanics, and mechanical effect of rock mass structure is mechanical foundation of rock mass mechanics. If rock mass does not satisfy the requirements of engineering construction on engineering geological conditions, we can reconstruct rock mass or (and) geologic environments of rock mass. For reasons given above, "Principle of Rock Mass Mechanics" includes three parts: geologic foundation of rock mass, mechanical foundation of rock mass mechanics and reconstruction principle and reconstruction technology of rock mass.

1) Geologic foundation of rock mass includes: composition and structure of rock mass (construction and reconstruction of rock mass, composition of rock mass, rock mass structure), and geological settings of rock mass-geostress, geothermy and groundwater.

2) Mechanical foundations of rock mass mechanics includes: rock mass structure cybernetics, mechanical performance law of rock masses (deforma-

tion, failure and mechanical properties of rock mass), comprehensive analysis, theorem of rock mass mechanics. Deformation mechanism and constitutive equations of two volume elements and five structural elements of rock mass are presented in the book, as well as failure mechanism and failure criteria of nine kinds of rock mass. Rock mass is divided into four kinds of mechanical material, i. e. continuous, cataclastic, blocky and stratified media, and mechanical analysis principle of the four kinds of material is presented.

3) Reconstruction principle and reconstruction technology of rock mass include: reconstruction principle of rock mass, reconstruction of rock mass material, reconstruction of surface structure and internal structure of rock mass, and reconstruction method and technology of geologic environment of rock mass. “Reconstruction theory and technology of rock mass structure for opening hard roof of Datong coal mine” — “Sixth five years” science and technology strategic achievement, presided by the first author, is presented in the book.

The book is a monographic work about basic theory of rock mass mechanics, which changes many existing concepts of rock mechanics. For example:

1) The book presents three-zone distribution regularities of geostress and the geologic attributes of high or low geostress, which modifies the linear distribution of geostress in available literatures; the book also presents theoretical equation for predicting water invasion in tunnels.

2) The book presents four types of deformation mechanism for rock mass structures, i. e. elastic deformation of structural mass, viscous deformation of structural mass, closing deformation of discontinuity and dislocation deformation of discontinuity; lays emphasis on displacement of five structural elements of rock mass, i. e. slip deformation of weak structural plane, extrusion deformation of soft interlayer, rolling deformation of structural mass, bending deformation of stratified rock mass and toppling deformation of stratified rock mass.

3) The book presents seven kinds of failure criteria of rock mass for analyzing stability of rock mass, i. e. tension fracture, shear fracture, rolling failure of discontinuity, slippage failure of discontinuity, bending failure of stratified rock mass, toppling failure of stratified rock mass, bending failure of stratified rock mass.

4) The book presents three types of structural effect of rock mass mechanics, i. e. rule of Patton angle effect, rule of scale effect and rule of anisotropic effect to get the mechanical properties of rock mass combined the comprehensive

---

analysis on field engineering geological conditions.

5) The book divides rock masses into four kinds of mechanical material, i. e. continuous material, cataclastic material, blocky material and stratified material, and presents corresponded analytical method for them.

6) The book also discusses reconstruction principles of rock mass systematically; especially reconstruction principles and methods for geologic environment of rock mass-geostress and groundwater.

All above innovations of the book are summarized according to authors' practical experiences and research results, and it should be noted that some of them have definite practical base, however, not all of them are proven by sufficient practices, and much further study is necessary to complete theory presented in the book.

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 岩体的组成及结构	8
第一节 岩体的建造和改造	8
第二节 岩体的组成成分	9
第三节 岩体结构	13
第二章 岩体的赋存地质环境	17
第一节 地应力	17
第二节 地热	30
第三节 地下水	32
第三章 岩体力学的理论基础——岩体结构控制论	44
第一节 概述	44
第二节 岩体力学行为	46
第三节 岩体力学介质	49
第四节 岩体力学定理	50
第四章 岩体变形	51
第一节 岩体变形机制及本构方程	51
第二节 岩体材料变形机制元件	52
第三节 岩体材料变形	54
第四节 岩体结构元件变形基本规律	59
第五节 贵州省鲁布格地下厂房边墙收敛变形分析	62
第五章 岩体破坏	67
第一节 概述	67
第二节 岩体材料破坏现象及破坏机制	72
第三节 岩体材料破坏判据	82
第四节 岩体结构元件失稳破坏判据	92
第五节 碧口水电站左岸泄洪洞破坏原因分析	97

---

<b>第六章 岩体力学性质分析</b> .....	101
第一节 概述.....	101
第二节 岩体力学性质结构效应.....	102
第三节 岩体赋存地质环境因素的力学效应.....	105
第四节 工程岩体力学性质分析举例.....	106
<b>第七章 岩体力学分析原理</b> .....	112
第一节 岩体力学介质及岩体力学模型.....	112
第二节 各岩体力学介质力学分析原理.....	112
<b>第八章 岩体改造</b> .....	130
第一节 岩体改造原理.....	130
第二节 岩体改造方法和技术.....	135
第三节 岩体赋存地质环境条件改造.....	138
第四节 岩体改造实例——有控水力压裂理论和技术及其在煤矿坚硬顶板 管理中的应用.....	145
<b>主要参考文献</b> .....	152

# Contents

## Preface

<b>Introduction</b> .....	1
<b>1 Composition and structure of rock mass</b> .....	8
1.1 Formation and reformation of rock mass .....	8
1.2 Composition of rock mass .....	9
1.3 Structure of rock mass .....	13
<b>2 Geological settings of rock mass occurrence</b> .....	17
2.1 Geostress .....	17
2.2 Geothermy .....	30
2.3 Ground water .....	32
<b>3 Theoretical foundation of rock mass mechanics-Rock mass structure cybernetics</b> ...	44
3.1 General introduction .....	44
3.2 Performance of rock mass .....	46
3.3 Material of rock mass mechanics .....	49
3.4 Theorems of rock mass mechanics .....	50
<b>4 Deformation of rock mass</b> .....	51
4.1 Deformation mechanism and constitutive equation of rock mass ...	51
4.2 Component of volumetric deformation mechanism of rock mass ...	52
4.3 Material deformation of rock mass .....	54
4.4 Deformation fundamentals of structural component of rock mass .....	59
4.5 Analysis of deformation of the sidewall in Lubuge underground powerhouse, Gui Zhou province .....	62
<b>5 Failure of rock mass</b> .....	67
5.1 General introduction .....	67
5.2 Failure phenomena and failure mechanism of rock mass .....	72
5.3 Failure criteria of rock mass .....	82
5.4 Failure criteria of structural component of rock mass .....	92
5.5 Case study on failure of flood discharge tunnel in the left bank of	

---

	Bikou hydropower station .....	97
<b>6</b>	<b>Mechanical properties of rock mass</b> .....	101
6.1	General introduction .....	101
6.2	Structural effect of mechanical properties of rock mass .....	102
6.3	Mechanical effects of geological settings of rock mass occurrence .....	105
6.4	Case study on mechanical properties of engineering rock mass ...	106
<b>7</b>	<b>Principles of rock mass mechanics</b> .....	112
7.1	Mechanical materials and model of rock mass mechanics .....	112
7.2	Principles of each rock mass medium mechanics .....	112
<b>8</b>	<b>Reconstruction of rock mass</b> .....	130
8.1	Principles of reconstruction of rock mass .....	130
8.2	Measures and technologies of reconstruction of rock mass .....	135
8.3	Reconstruction of geologic environment of rock mass .....	138
8.4	Case study-technology of hydraulic controlled fracturing of rock mass and its application in management of hard roof of coal mine .....	145
	<b>References</b> .....	152

## 图 目 录

图 1.1	岩体结构单元划分框图 .....	15
图 2.1	地应力随深度变化规律示意图 .....	18
图 2.2	北京大灰厂浅层地应力测量结果 .....	20
图 2.3	前苏联托克托尔水电站坝段地应力分布图 .....	20
图 2.4	雅奢江二滩水电站坝址地应力的几种现象 .....	22
图 2.5	葛洲坝水电站二江电厂基坑地应力测量结果 .....	22
图 2.6	正长岩抗压强度与弹性模量关系 .....	23
图 2.7	二滩水电站坝址实测最大主应力与岩石弹性模量关系 .....	23
图 2.8	地应力值与岩性关系示意图 .....	24
图 2.9	不同地形单元地应力剖面分布示意图 .....	25
图 2.10	地应力在剖面上总体分布示意图 .....	26
图 2.11	安徽省罗河矿区地温实测曲线 .....	31
图 2.12	岩体中结构面渗透性与地应力关系 .....	42
图 3.1	岩体结构控制论框图 .....	45
图 3.2	岩体材料变形框图 .....	47
图 3.3	岩体力学性质分析原理框图 .....	48
图 4.1	岩体变形机制框图 .....	51
图 4.2	结构体弹性变形规律 .....	52
图 4.3	结构体黏性变形规律 .....	53
图 4.4	结构面闭合变形规律 .....	53
图 4.5	结构面错动变形规律 .....	54
图 4.6	均匀弹性完整结构岩体变形机制及变形特征 .....	55
图 4.7	水平层状黏弹性岩体变形机制及变形特征 .....	55
图 4.8	直立层状黏弹性岩体变形机制及变形特征 .....	56
图 4.9	均质弹性碎裂岩体变形机制及变形特征 .....	57
图 4.10	水平层状黏弹性碎裂岩体变形机制及其变形曲线特征 .....	58
图 4.11	直立层状黏弹性碎裂岩体 .....	59
图 4.12	软弱夹层压缩挤出变形力学模型 .....	60



图 4.13	块状结构体滚动变形力学模型 .....	60
图 4.14	板裂结构岩体结构变形 .....	61
图 4.15	板裂结构板柱弯曲变形及破坏机制 .....	62
图 4.16	鲁布格电站地下厂房母线边墙围岩开裂的 561.0 高程地质切面图 .....	63
图 4.17	板裂化地下洞室岩体力学模型——拱条模型 .....	63
图 4.18	洞壁围岩开裂深度计算结果 .....	66
图 5.1	碎裂岩体假塑性变形曲线 .....	68
图 5.2	脆性破坏的岩体变形特征 .....	69
图 5.3	试块破坏现象 .....	73
图 5.4	野外原位试验中破坏现象 .....	75
图 5.5	碎裂介质板岩原位单轴压缩试验图实例一 .....	76
图 5.6	碎裂介质板岩原位单轴压缩试验图实例二 .....	77
图 5.7	碎裂介质板岩原位抗剪试验图 .....	78
图 5.8	金川露天矿上盘区 I 区滑坡体运动机制 .....	79
图 5.9	金川露天矿 I 区滑坡体下面边坡结构变形示意图 .....	80
图 5.10	各种岩块抗压强度与加载速度关系 .....	82
图 5.11	各种岩石弹性模量与加载速度关系 .....	83
图 5.12	张破裂机制 .....	83
图 5.13	裂纹扩展模型 .....	84
图 5.14	椭圆孔末端应力分布 .....	85
图 5.15	作用于两度空间椭圆裂纹上的应力 .....	86
图 5.16	破裂面上的应力组合 .....	87
图 5.17	莫尔圆及包络线 .....	87
图 5.18	大理岩力学性质与围压关系 .....	89
图 5.19	大理岩在等围压下应力-应变曲线 .....	90
图 5.20	与图 5.19 的试验破坏机制与围压关系 .....	90
图 5.21	岩石脆性—延性转化 .....	91
图 5.22	块体沿结构面错动力学模型 .....	92
图 5.23	结构体转动破坏机理模型 .....	93
图 5.24	边坡倾倒破坏过程 .....	94
图 5.25	倾倒变形力学模型 .....	95
图 5.26	倾倒溃屈力学模型 .....	95
图 5.27	弯折破坏力学模型 .....	97