

中国科学院大学研究生教材系列

岩石断裂力学

李世愚 和泰名 尹祥础 编著



科学出版社

中国科学院大学研究生教材系列

岩石断裂力学

李世愚 和泰名 尹祥础 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要论述岩石断裂力学的基础理论及其在地球科学中的应用。全书围绕三个核心问题。一、岩石断裂的物理要素,包括线弹性断裂力学、非线性断裂力学、断裂准则(包括力学条件和扩展途径)、断裂面的摩擦准则、流体(特别是超临界流体)的作用、裂纹系的破裂、三维裂纹的自然破裂、岩石的剪切破坏、库仑应力变化、力源位置与破裂的起始和破裂的停止等。二、模拟实验的相似性,引进了相似理论的三个定理,探讨了小尺度实验成果向野外大尺度推广的尺度不变性问题,并介绍了矿山中尺度地震试验场一些研究成果。三、地面物理测度,即地壳深部岩石破裂的孕育过程的物理效应在地面的可测问题,主要涉及形变、声发射活动、介质波速变化、波速各向异性、破裂前低频波辐射,探讨了与震源物理相关的问题,包括膨胀-扩容模式、地震破裂成核、地震破裂动力学等。

本书可供高等院校有关专业的研究生学习使用,也可供有关研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩石断裂力学/李世愚,和泰名,尹祥础编著. —北京:科学出版社,2015

中国科学院大学研究生教材系列

ISBN 978-7-03-044399-1

I. ①岩… II. ①李… ②和… ③尹… III. ①岩石力学—断裂力学—研究生—教材 IV. ①TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第110944号

责任编辑:钱俊 裴威 / 责任校对:彭涛

责任印制:徐晓晨 / 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>

北京京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2月第一版 开本:720×1000 B5

2016年2月第一次印刷 印张:35 1/4 彩插:1

字数:678 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国大约于 1970 年开展对断裂力学的研究,并将其理论应用于地震与断层问题.有关地震断层端部的应力集中问题的论述最早见于李四光(1973)的文献.1978 年,中国科学院和中国科学技术大学研究生院地学部开设了“固体力学”课,其中包含断裂力学的内容,由尹祥础讲授.1982 年 7 月 26~29 日,国家地震局在北京举办了“断裂力学及其在地球学中的应用”学习班,陈颙、尹祥础、陈培善、牛志仁、许忠淮、康仲远等授课.1982 年,阿特金森(Atkinson)曾来中国访问.他在《岩石断裂力学》(*Rock Fracture Mechanics*)一书的中译本序言中写道:“回顾往事,当西方国家的地球科学家对断裂力学这门学科及其可能发挥的作用还不甚领会的时候,一些中国的研究小组已经开始将断裂力学应用于地球断裂物理学了.也许由于受到不少工作在地球物理学界的中国科学家的影响,中国在这一领域内的研究方向是在阐明断裂理论的同时,通过对岩石主要断裂参数的实验室测定,将断裂力学应用于地球中的断裂现象;而在西方,我们还在积累岩石强度的数据,但是岩石强度是一个意义不大的而且与试验条件关系密切的概念.”

岩石断裂力学已经成为震源物理中的一门基础学科.它不仅被用来解释构造地震的成因和断层行为,而且被延拓到岩土工程的岩爆、矿山的冲击地压、煤岩体突出、水库诱发地震、山地滑坡等现象成因机理的研究,在突发事件的预测预警、减轻灾害方面起着重要作用.2000 年,中国科学院研究生院将“岩石断裂力学及其在地球学中的应用”单独列为一门课,2001 年改名为“岩石断裂力学”.本书是著者在多年授课讲义的基础上收集有关科研进展与应用成果而写成的,主要为了满足研究生和从事地球物理与岩土工程的科研与技术人员在了解学科前沿进展方面的需求.

本书是在 2009 年版《岩石断裂力学导论》的基础上改写而成,对章节作了许多调整和增删,纠正了一些错误,例如图 7.9(b)是对“导论”图 2.14(h)的修正,8.1.2 节和 8.2.9 节是对“导论”7.1.1 节和 7.1.2 节的修正和增补.第 12 章推倒重写.13.3.3 节和 13.3.4 节是对“导论”14.4.3 节和 14.4.4 节的修正.另外增加了一些新内容.

(1)在第 11 章三维脆性破裂问题中,增加了对国外已有的 2 欧拉角搜索法的批评与修正,以及对第一主微分面集合法与修正后的 3 欧拉角的等效性证明.另外,补充了对 Roesler(1956)印痕接触破裂问题的理论分析.

(2)增加了相似性的三个定理内容以及在岩石断裂力学实验中的应用,用来论证岩石破裂实验怎样设计才能满足向大尺度外推的条件。

(3)在震源物理的应用中,增加了地震震中地面破裂出露与震源机制的关系,以及矿山开采诱发地震的内容。

岩石断裂力学以地球为研究和应用对象,因此又是一门以实验和野外观测为基础的学科。本书针对地学的需求,着重探讨以下三个特殊问题:

(1)现场岩体破裂的物理要素问题。它不仅包含应力条件,还包括流体的作用和裂纹面之间相互作用。

(2)小样品实验向大尺度现场的推广,即尺度不变性问题。这就是相似性的三个定理在岩石断裂力学实验中的应用。

(3)地壳深部岩石断裂的孕育与破裂过程在地面的观测,即地面物理测度。

这三个问题与震源物理和地震预测直接相关,尤其是第(3)项研究工作至今举步维艰,对岩石断裂力学构成严峻挑战。

岩石断裂力学本质上是物理学。物理学是一门以实验为基础的学科。这里谈一下数值模拟和实验的关系问题。在计算机技术和数值模拟技术极大发展的今天,如何认识数值模拟在岩石断裂力学中的地位,就显得十分重要。数值模拟工作应该加强是没有疑问的,但有一种说法,就是可以用计算机代替样品实验,甚至可以用计算机来做实验,这是一种误解。数值模拟不是实验,它是数学物理方法的一个分支(梁昆森,《数学物理方法》)。数值模拟是理论分析的重要环节,是弥补解析方法不足的重要工具。数值模拟所应用的物理模型、本构关系、物性参数、边界条件和初始条件都是从实验和观测中得到的。数值模拟在总结实验和观测资料的过程中能起到十分重要的作用,但不等于可以脱离实验和观测。离开实验和观测,数值模拟就成为调参数的游戏。实验研究成本较高,又费时费力,出成果周期较长,但不能因此回避实验。付承义教授曾指出,理论地球物理工作者有时会沉湎于复杂的计算,而忘记问题的实际意义,这是应当注意的。(傅承义等,1985,《地球物理学基础》)。据考察,MIT(麻省理工学院)地学部规定所有的研究生都必须先到岩石物理实验室实习,并将其作为必修的学位课,这是值得我们深思的。

本书可供高等院校和科研院所有关专业的教学与参考使用。书中凡有不正确的地方,希望能得到读者的批评与指正。

本书所收录的课题成果归属于中国地震局地球物理研究所(地震观测与地球物理成像重点实验室),在与本书相关内容的研究过程中,曾经得到国家自然科学基金(49774217、4987007、49674216、40474018),地震学联合基金重点项目(9507435),科技部社会公益项目(2001DIB20107),中国地震局重点课题(85-907-03-02-04 或 85-

06-03-02), 重点项目(85-11-07、95-04-03-02(科委号 96-913-03-02)、95-03-03-04), 中国地震局地震行业科研专项资助项目(8-54), 2013 年中国地震局地球物理研究所基本科研业务项目(DQJB13B06), 国家自然科学基金重大项目(41090292)和中国地震局老专家科研基金课题(201403)等的多次资助。没有这些资助, 是不可能完成这些研究工作和本书写作工作的。陈运泰院士、陈颙院士给予了指导和帮助。Kuksenko 教授等曾多次来华合作进行实验研究。邓大量教授、Maruyama 教授、范天佑教授、李钦组教授、谢洪森教授与本书作者进行了多次交流, 并给予作者重要支持和鼓励。耿乃光、姚孝新、许忠淮、张天中、滕春凯、高原、王健、卢振业、李红、刘万琴、蒋秀琴、潘科、宋绪友等参加了合作。蔡戴恩、刘晓红、郝晋升、张来凤、李纪汉等在实验工作中给予了很大帮助。许向红、钟放庆、王裕仓、叶剑红、刘建新、唐林波、刘绮亮以他们的学位论文为本书增添了丰富的内容。王宝善、宋莉莉等为本书的写作提供了他们在各自研究工作中所获得的前沿进展和各自的研究成果。抚顺老虎台煤矿和山东兖州矿业集团有限公司对矿山地震研究给予了充分配合, 在此深表感谢。

本书中的许多阐述引用了范天佑教授、褚武杨教授、徐秉业教授、陈颙院士等著作的内容。作者从他们的著作中受益匪浅。

感谢中国地震局地球物理研究所多年来对作者从事科研的支持; 感谢中国科学院研究生院(现为中国科学院大学)多年来对作者从事本课程教学的支持; 感谢科学出版社对本书出版给予的大力支持。

作 者

2015 年 10 月于北京

主要符号表

A	功
B	板的厚度
C_0	单轴抗压强度
E	杨氏弹性模量
G	能量释放率
I_1, I_2, I_3	应力张量不变量
I'_1, I'_2, I'_3	应变张量不变量
J'_1, J'_2, J'_3	应变偏量不变量
K	体积弹性模量
K_I, K_{II}, K_{III}	I, II, III型裂纹的应力强度因子
T_i	应力矢量在坐标轴上的投影
S_1, S_2, S_3	应力偏量不变量
S	S判据中的应变能密度因子
T_0	介质宏观单轴抗拉强度
σ_c	介质微观抗拉强度
τ_c	介质的微观抗剪切强度
U_E	弹性应变能
W	弹性应变能密度
W_F	形状改变应变能密度
W_V	体积改变应变能密度
Z_I, Z_{II}, Z_{III}	威斯特嘎德应力函数
f_i	体积力在 x_i 轴上的投影
$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}$	极坐标中的应力分量
u_r, u_θ, u_z	位移矢量在柱坐标系中的分量
u_r, u_θ, u_φ	位移矢量在球坐标系中的分量
δ_{ij}	克罗内克尔符号
ϵ_{ij}	应变分量
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	主应变
κ	材料常数, $\kappa = 3 - 4\nu$ (平面应变), $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ (平面应力)
k_c	介质抗脆断能力, $k_c = \rho_{1c} \sqrt{\pi a}$
K_{Ic}	断裂韧性
λ	拉梅弹性常数

μ	剪切模量
f	摩擦系数
a	裂纹或椭圆切口长轴半长度
b	椭圆切口短轴半长度
β	裂纹角
θ_0	断裂角
ρ	介质密度
τ_{\max}	最大剪应力
σ_{N0}	八面体上的正应力
σ_0	应力球张量或平均应力 $\sigma_0 = \sigma_{ii}$
σ_{ij}	应力分量
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 或 σ_i	主应力
σ_N	正应力
φ, ψ	克罗索夫-穆斯海里什维里应力函数
ϕ	内摩擦角
σ_{ij}^c	裂纹扰动(附加)应力
τ_0	八面体上的剪应力或材料固有的抗剪切强度、内聚力
τ_e	有效剪应力
$\Delta\tau$	应力降
$\Delta\tau_e$	有效应力降
γ	无量纲应力降
p_0	孔隙压力
p_1, p_2, p_3	压力载荷
p	静水压或伪三轴实验围压

外国人名译名对照表

Aki K	安艺敬一	Mogi K	茂木清夫
Airy G B	艾里	Mohr K O	莫尔
Atkinson B K	阿特金森	Muskhelishvili N I	穆斯海里什维里
Barenblatt G I	巴仁布莱特	Palaniswamy K	帕兰尼斯威米
Beckner H F	贝克纳尔	Paries P C	帕里斯
Benioff H	本尼奥夫	Possion S D	泊松
Betti E	贝蒂	Reid H F	里德
Boussinesq J	波西涅斯克	Richter C F	里克特
Byerlee J D	拜尔利	Saint Venant	圣维南
Cauchy A L	柯西	Sih G C	薛昌明
Castigliano A	卡斯提杨诺	Stirling J	斯特林
Chebyshev P L	切比雪夫	Timoshenko S P	铁摩辛柯
Clapeyron E P E	克拉珀龙	Taylor G I	泰勒
Cook N G W	库克	Westergaard H M	威斯特嘎德
Coulomb C A	库仑	Williams J G	威廉斯
Dugdale D S	达格德尔	Колосов Г В	克罗索夫
Erdogan F	厄都根	Мухелишвили Н И	穆斯海里什维里
Gooder J N	古地尔	Щамина О Г	莎米娜
Griffith A A	格里菲斯	Жемочкин Б Н	热莫奇金
Gutenberg B	古登堡	Черепанов Г П	切列帕诺夫
Hooke R	胡克	Чебышёв П Л	切比雪夫
Hussein M I	侯赛因		
Irwin G R	欧文		
Jaeger J C	耶格		
Knauss W G	瑙斯		
Kolosoff M C	克罗索夫		
Kroneker L	克罗内克		
Lamé G	拉梅		
Laurant P M H	洛朗		
Lemaitre J	勒迈特		
Liouville J	刘维尔		
Love A E H	勒夫		
Maruyama T	丸山卓男		
Maxwell C	麦克斯韦		

目 录

前言

主要符号表

外国人名译名对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石断裂力学的内容和意义	1
1.2 岩石结构的不均匀性和力学特征	3
1.3 岩石的全应力-应变曲线	5
1.4 岩石破坏的类型	7
1.4.1 纵向破裂	7
1.4.2 剪切破坏	8
1.4.3 拉伸破裂	8
1.5 地壳中的断层	8
第 2 章 线弹性断裂力学	11
2.1 格里菲斯理论和断裂力学的发展	11
2.2 克罗索夫-穆斯海里什维里应力函数	14
2.2.1 裂纹的三种基本类型	14
2.2.2 克罗索夫-穆斯海里什维里函数	14
2.2.3 I 型裂纹的 K-M 应力函数	15
2.2.4 II 型裂纹的 K-M 应力函数	16
2.3 威斯特嘎德应力函数——I 型裂纹	17
2.3.1 威斯特嘎德应力函数	17
2.3.2 含 I 型裂纹无限大板的应力分布	17
2.3.3 I 型裂纹的威斯特嘎德函数与 K-M 应力函数的换算关系	18
2.3.4 含 I 型裂纹无限大板的位移场	19
2.3.5 I 型裂纹周围应力和位移的辐角式	19
2.3.6 I 型裂纹面上的位移	20
2.3.7 I 型裂纹周围应力分布的全场图	21
2.3.8 I 型裂纹端部的应力与位移	23
2.4 威斯特嘎德应力函数——II 型裂纹	25
2.4.1 无限大板含中心 II 型裂纹的威斯特嘎德应力函数	25

2.4.2	Ⅱ型裂纹的威斯特嘎德函数与 K-M 应力函数的关系	26
2.4.3	Ⅱ型裂纹周围应力和位移的辐角式	26
2.4.4	Ⅱ型裂纹面上的位移	26
2.4.5	Ⅱ型裂纹周围的应力全场分布图形	27
2.4.6	Ⅱ型裂纹端部的应力与位移	29
2.5	威斯特嘎德应力函数——Ⅲ型裂纹	30
2.5.1	无限大板含中心Ⅲ型裂纹的威斯特嘎德应力函数	30
2.5.2	Ⅲ型裂纹周围全场应力和位移的辐角式	32
2.5.3	Ⅲ型裂纹面上的位移	32
2.5.4	受远场剪切力Ⅲ型裂纹周围全场应力分布图形	32
2.5.5	Ⅲ型裂纹端部附近的应力和位移	34
2.6	破裂周围应力的近场式与全场式的关系	35
第3章	应力强度因子、断裂韧性和能量释放率	41
3.1	应力强度因子与断裂韧性	41
3.1.1	应力强度因子的基本概念	41
3.1.2	断裂韧性	42
3.1.3	应力强度因子的计算	42
3.2	无限大裂纹体中集中力及集中力偶作用时的应力强度因子	46
3.2.1	集中力	46
3.2.2	集中力及集中力偶作用时的应力强度因子	47
3.3	其他一些情况下求应力强度因子	49
3.3.1	集中力作用于裂纹上表面	49
3.3.2	相等的集中力作用于裂纹上下表面的对应点上	50
3.3.3	裂纹面上作用一对集中力的威斯特嘎德函数	51
3.3.4	裂纹面上作用对称于 x, y 轴的集中力	52
3.3.5	裂纹面上作用对称于 x, y 轴的分布载荷	53
3.3.6	裂纹面上受对称于 x 轴的任意分布载荷的作用	54
3.3.7	裂纹面上的载荷对于 x 对称,但对于 y 反轴对称分布	54
3.3.8	有限宽板中心裂纹受无限远分布载荷的作用	55
3.3.9	有限宽板中边缘裂纹受无限远分布载荷的作用	55
3.3.10	有限宽板中心裂纹受有限远对称于 x 轴点载荷的作用	55
3.3.11	应用叠加原理求 K 的例子	56
3.3.12	无限大弹性体中有一圆盘形裂纹,无限远处在垂直于裂纹面的方向上作用均匀拉应力	57

3.4 能量释放率及其与应力强度因子间的关系	57
3.4.1 基本概念	57
3.4.2 常位移的情形	59
3.4.3 常载荷的情况	60
3.4.4 更一般的情形	61
3.4.5 贝克纳尔公式	61
3.4.6 G 与 K 之间的关系	64
3.4.7 裂纹应变能	65
3.4.8 两种判据的等效条件	66
第4章 脆性断裂的判据与相似性定理	67
4.1 基本概念	67
4.1.1 破裂判据	67
4.1.2 受压裂纹问题的特殊性	67
4.2 最大环向应力理论	68
4.2.1 最大环向张应力准则	68
4.2.2 应力只保留奇异项的分析	69
4.2.3 裂纹开始扩展的应力条件	71
4.2.4 单轴拉伸条件下含斜裂纹材料的抗拉脆断能力	72
4.2.5 应力保留到零阶项修正	74
4.3 应变能密度因子理论	77
4.3.1 应变能密度因子的概念	77
4.3.2 应用	78
4.4 最大能量释放率理论	81
4.5 最大张应力理论	82
4.5.1 最大张应力判据	82
4.5.2 欧拉角极值搜索法	83
4.6 岩石发生破坏的条件	83
4.6.1 库仑-莫尔准则	83
4.6.2 拜尔利定律	87
4.7 岩石失稳破坏的条件	90
4.7.1 加载系统的刚度	90
4.7.2 失稳条件	91
4.8 相似理论和岩石断裂力学实验设计基础	93
4.8.1 量纲分析的基本概念	94

4.8.2	相似第一定理	95
4.8.3	用方程式分析结构相似	96
4.8.4	相似第二定理—— π 定理	99
4.8.5	弹性力学静力学的相似关系	103
4.8.6	需要说明的问题	105
4.8.7	相似第三定理	106
4.8.8	弹性结构中的相似性	107
4.8.9	量纲分析与相似定理在岩石断裂力学中的应用	110
第5章 非线性断裂力学		111
5.1	引言	111
5.2	岩石微裂纹的演化与成核	111
5.2.1	热缺陷与热激活	111
5.2.2	缺陷的塞积与微裂纹的成核	112
5.2.3	微裂纹的演化导致成核的实验观测	114
5.2.4	过程区	115
5.2.5	微破裂成核理论	115
5.2.6	岩石破裂成核的分形	117
5.3	损伤理论介绍	117
5.3.1	损伤变量	117
5.3.2	细观非均匀性的表征及其统计分布	119
5.3.3	统计细观损伤力学介绍	119
5.4	内聚力模型	120
5.4.1	自相似内聚带——I型裂纹	120
5.4.2	非自相似内聚带模型——II或III型裂纹	121
5.5	岩石的塑性	122
5.5.1	塑性理论的基本概念	122
5.5.2	Mises 屈服条件	125
5.5.3	Tresca 屈服条件	126
5.6	裂纹端部塑性区大小的估算	126
5.6.1	塑性区尺寸的一级估算	126
5.6.2	塑性区应力松弛的影响——塑性区尺寸的二级估算	128
5.6.3	Irwin 的等效裂纹修正	129
5.6.4	带状屈服模型	130
5.7	裂纹端部张开位移 δ	131

5.7.1	COD 判据	131
5.7.2	帕里斯位移公式	132
5.7.3	无限远处均匀应力产生的张开位移	134
5.7.4	点力对引起的张开位移	135
5.7.5	分布力引起的张开位移	136
5.7.6	D-M 模型的裂纹顶端张开位移	136
5.8	裂纹扩展阻力 R 和亚临界扩展	137
5.8.1	微裂纹的亚临界扩展	137
5.8.2	塑性条件下的断裂准则	139
5.9	J 积分	141
5.9.1	J 积分的定义	141
5.9.2	J 积分的守恒性	142
5.9.3	J 积分与 K 及 G 的关系	143
第 6 章	扁椭圆裂纹模式	147
6.1	保角变换—曲线坐标中的复势、应力和位移	147
6.2	无限大平板中椭圆孔受均布作用力的问题	148
6.2.1	椭圆坐标系	148
6.2.2	无限大平板中椭圆孔受单向拉伸问题	149
6.2.3	椭圆变成一条直裂纹的情形	151
6.2.4	含椭圆孔的无限平板受双向拉伸的问题	152
6.2.5	含椭圆孔的无限平板受纯剪应力的问题	152
6.2.6	含椭圆孔的无限平板在椭圆孔内部周边上受均布压力的问题	152
6.3	受压情况下的扁椭圆裂纹模型	153
6.3.1	压力下孔边最大张应力	153
6.3.2	使孔边最大张应力为最大的 β 值	156
6.3.3	扁椭圆孔受压闭合的条件	158
6.4	扁椭圆裂纹模式的格里菲斯破坏准则	159
6.4.1	二维扁椭圆裂纹模式的格里菲斯破坏准则	159
6.4.2	裂纹表面间的摩擦效应与修正的格里菲斯破坏准则	160
6.4.3	格里菲斯准则的默雷尔推广	162
6.5	用向圆保角变换方法解扁椭圆孔问题	164
6.5.1	向圆保角变换方法的基本步骤	164
6.5.2	平面问题的克罗索夫公式及边界条件的坐标变换	165
6.5.3	孔口问题	167

6.5.4 用向圆保角变换方法求解椭圆孔问题	169
第7章 受压裂纹周围的应力场	174
7.1 扰动应力、背景应力与绝对应力	174
7.1.1 叠加原理的应用	174
7.1.2 自由裂纹面的扰动应力函数	175
7.1.3 非自由裂纹面的扰动应力	176
7.2 含孔隙压力的 I 型裂纹	176
7.2.1 含孔隙压力的受压 I 型裂纹	176
7.2.2 裂纹扰动应力场	177
7.2.3 裂纹扰动位移场	179
7.2.4 有孔隙压力 I 型裂纹的总应力	180
7.3 受单轴压的斜裂纹	181
7.3.1 边界条件	181
7.3.2 受单轴压(斜) II 型裂纹的扰动位移场	185
7.3.3 受单轴压 II 型裂纹周围的总(绝对)应力	186
7.4 叠加单轴压的 III 型裂纹	188
7.4.1 边界条件	188
7.4.2 III 型裂纹的扰动应力场	189
7.4.3 受压 III 型裂纹的扰动位移场	191
7.4.4 受压 III 型裂纹周围的总应力场	191
第8章 受压裂纹扩展的实验研究	193
8.1 单轴压力下裂纹扩展实验原理	193
8.1.1 实验条件	193
8.1.2 裂纹扩展的条件	195
8.2 单轴压力下裂纹或切口扩展实验研究	196
8.2.1 实验的设计	196
8.2.2 裂纹的预制	197
8.2.3 受压闭合裂纹的扩展特征	198
8.2.4 受压切口的扩展	199
8.2.5 初始破裂的监测	199
8.2.6 破裂过程的稳定性	200
8.2.7 裂纹面相互作用的不均匀性	200
8.2.8 摩擦系数 f 对抗脆断能力的影响	201
8.2.9 裂纹扩展起始的应力条件	202

8.2.10	有机玻璃板中心裂纹在单轴压力下的破裂	203
8.3	用非自相似内聚带理论拟合翼状破裂扩展途径	204
8.3.1	计算方法	204
8.3.2	计算结果	206
8.4	单轴压力下的断裂角实验结果分析	207
8.5	受单轴压切口破裂实验结果的分析	210
8.6	高围压下的断裂实验	211
8.6.1	实验原理	211
8.6.2	实验技术与方法	213
8.6.3	实验结果	216
8.7	差应力下岩石的体积膨胀	217
8.8	含切口岩石的破裂过程可见光透视观察	219
8.8.1	大理石薄板可见光透视方法	219
8.8.2	单一的中心穿透切口	220
8.9	岩石破裂透视实验结果的理论分析	222
8.10	利用巴西圆盘试验测定岩石的抗拉强度	223
8.10.1	引言	223
8.10.2	巴西圆盘内各点应力解析解	224
8.10.3	巴西圆盘内部的应力状态分布	227
第9章	共线裂纹系的理论与实验研究	229
9.1	基本概念	229
9.2	受拉共线斜裂纹问题的理论解	229
9.2.1	基本解	229
9.2.2	应力强度因子	232
9.2.3	裂纹内间距对裂纹之间相互关系的影响	233
9.3	受压共线斜裂纹问题的理论解	234
9.3.1	基本解	234
9.3.2	应力强度因子	243
9.4	受单轴压共线斜裂纹扩展的实验研究	244
9.4.1	实验原理	244
9.4.2	单轴压力下的实验结果	244
9.5	用非直线内聚带理论模拟受压共线斜裂纹破裂扩展途径	246
9.5.1	受压共线斜裂纹破裂扩展途径的计算	246
9.5.2	内端部翼状破裂的止裂	247

第 10 章 裂纹系的数值模拟与实验研究	248
10.1 引言	248
10.2 加权残值法理论介绍	248
10.3 边界元方法	250
10.3.1 边界积分方程的基本解	250
10.3.2 断裂力学中的边界元方法	252
10.3.3 裂纹端部应力奇异性问题	254
10.4 全裂纹面 COD 方法求解应力强度因子	254
10.4.1 算法的引入	254
10.4.2 全裂纹面 COD 求应力强度因子的算法及误差分析	256
10.4.3 计算结果与算法验证	258
10.5 用全裂纹面 COD 方法进行二维双裂纹的数值模拟和实验结果	260
10.5.1 试函数的建立	260
10.5.2 双平面平行剪切裂纹的几何参数	261
10.5.3 共线剪切裂纹	261
10.5.4 顺向(张性)雁列式裂纹系	262
10.5.5 逆向(压性)雁列式裂纹系	266
10.5.6 等号裂纹系	268
10.5.7 对称的共轭(八字形)裂纹系	270
10.5.8 含障碍裂纹	271
10.6 有限元方法	273
10.7 离散元模型介绍	275
第 11 章 三维脆性破裂	278
11.1 引言	278
11.2 研究史的回顾	278
11.2.1 若干三维破裂实验	278
11.2.2 初始破裂曲面的弥合	281
11.3 受压表面裂纹的三维破裂实验	282
11.3.1 实验设计	282
11.3.2 实验原理	282
11.3.3 玻璃样品的实验现象	284
11.3.4 实验结果分析	285
11.3.5 大理岩板非穿透(表面)切口的三维破裂	286
11.4 三维初始破裂的理论拟合——第一主微分面合成法	287