

许 江 程立朝 著
彭守建 刘义鑫

煤岩剪切细观开裂演化及其 特征量化研究



科学出版社

煤岩剪切细观开裂演化及其 特征量化研究

许 江 程立朝 彭守建 刘义鑫 著

国家重大科技专项项目(2011ZX05034-004)

国家自然科学基金资助项目(51474040、51304255)

国家自然科学基金重点项目(51434003)

重庆市基础与前沿研究计划重点项目(CSCT,cstc2013jjB90001)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍煤岩剪切破断机理,并以断裂力学理论为基础分析煤岩体表面裂纹的扩展规律。全书共6章。第1章总结和评述煤岩剪切破断机理相关领域的研究进展;第2章详细介绍煤岩剪切细观试验装置;第3章分析砂岩剪切细观裂纹开裂演化规律的影响因素以及剪切形式对砂岩剪切破断机理的影响;第4章分析型煤和原煤细观裂纹开裂演化的影响因素及其贯通机理;第5章提出煤岩剪切细观开裂演化特征量化参数;第6章建立煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型,利用该模型对不同试验条件下的煤岩剪切细观开裂分叉贯通类型进行统计分析。

本书可供采矿工程、安全技术及工程、岩土工程等相关领域的科研人员使用,也可作为高等院校相关专业研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

煤岩剪切细观开裂演化及其特征量化研究/许江等著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048928-9

I. ①煤… II. ①许… III. 煤岩-剪切-开裂-研究 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 138383 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:360 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自 20 世纪 50 年代以来,开展工程岩体与地下空间的稳定性研究已越来越受到重视。尤其在煤矿开采过程中,随着煤矿井下开采不断向深部延伸,地应力与煤层瓦斯压力不断增大,煤矿开采矿井呈低透气性、高瓦斯趋势,安全高效开采任重道远。因此,对煤岩体破断机理进行研究十分重要。在煤矿开采过程中,剪切过程与地应力、瓦斯压力的耦合作用致灾机理及控制措施研究更是近几年研究的重点,而煤矿动力灾害与煤岩自身力学性质和剪切破坏过程密切相关。开展岩石剪切变形破坏机理研究,对完善地质灾害预测及防治理论,指导实际工程开挖和矿山灾害控制具有重要意义。

为深入探究煤岩剪切破断机制,进一步揭示煤矿动力灾害发生机理,本书以砂岩和煤(包括型煤和原煤)为研究对象,利用自主研发的煤岩剪切细观试验装置,开展不同试验条件下煤岩剪切细观开裂演化模式和细观贯通机理研究。在此基础上对煤岩剪切细观开裂演化特征进行量化分析,建立煤岩剪切裂纹演化特征量化参数与剪应力和声发射特征之间的量化关系。最后,结合煤岩剪切细观贯通机理的分析,建立煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型,利用该模型对不同试验条件下的煤岩剪切细观开裂分叉贯通类型进行统计分析,揭示煤岩剪切细观破坏和损伤机理。

全书共 6 章。第 1 章结合本书的主要研究内容,分别对煤岩剪切细观试验装置、煤岩剪切破坏理论、煤岩剪切破坏机理、煤岩剪切细观开裂演化特征量化及煤岩剪切细观开裂贯通模式五个方面的研究进行现状评述和总结。第 2 章介绍煤岩剪切细观试验装置。在重庆大学自主研制的含瓦斯煤岩剪切细观试验装置的基础上自主研制一套煤岩双面剪切试件夹具,利用含瓦斯煤岩剪切细观试验装置中的试验腔体、加载系统、裂纹细观观测系统和声发射系统,组成煤岩双面剪切细观试验装置,并与含瓦斯煤岩剪切细观试验装置合称为煤岩剪切细观试验装置。第 3 章针对砂岩开展不同饱水系数、不同加载速率和不同法向应力条件下的单面剪切和双面剪切细观试验研究,研究砂岩在不同试验条件下剪切细观开裂演化模式,分析影响因素对砂岩剪切细观裂纹开裂演化规律的影响,并进一步探究砂岩剪切破坏机理;在细观尺度上对砂岩剪切细观贯通机理进行研究,分析影响因素对砂岩剪切细观贯通机理和细观裂纹形态的影响,并对不同试验条件下的砂岩单面剪切和双面剪切试验结果进行对比分析,研究剪切形式对砂岩剪切破断机理的影响。第 4 章针对型煤开展不同黏结剂含量、不同成型压力和不同粒径条件下的含瓦斯煤单面剪切细观试验研究,针对原煤开展不同法向应力、不同瓦斯压力和不同原生裂

纹倾角条件下的含瓦斯煤单面剪切细观试验研究;研究型煤和原煤在不同试验条件下剪切细观开裂演化模式,分析影响因素对型煤和原煤细观裂纹开裂演化规律的影响,并进一步探究含瓦斯煤破坏机理,在细观尺度上对含瓦斯型煤和原煤剪切细观贯通机理进行研究,分析影响因素对贯通机理和细观裂纹形态的影响。第5章提出煤岩剪切细观开裂演化特征量化参数,对煤岩剪切细观开裂演化特征进行量化,建立煤岩剪切裂纹演化特征量化参数与剪应力和声发射特征之间的量化关系;研究不同试验条件下影响因素对量化参数的影响,分析裂纹快速扩展相对于峰值剪应力和峰值声发射率的滞后特性,并分析不同影响因素对煤岩剪切裂纹快速扩展滞后特性的影响。第6章提出煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型,利用该模型对不同试验条件下的煤岩剪切细观开裂分叉贯通类型进行统计分析;研究分叉贯通数目、分叉贯通类型、主裂纹贯通分叉数目、张拉型分叉贯通数目与各影响因素之间的统计规律,进一步揭示煤岩剪切细观破坏和损伤形成机理。

针对煤岩体在外载荷作用下发生破断的内在本质,国内外学者们已开展了大量的试验及理论研究,并取得了丰硕的成果,本书研究内容只是在前人研究的基础上对该研究领域提供一种新的途径,有关煤岩在剪切荷载条件下破断机理理论方面的研究仍需投入大量的工作。

最后,感谢各基金项目对本书研究工作的资助,感谢重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室及复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室所提供的大力支持和帮助!

由于作者的水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者朋友批评指正。

作 者

2015年10月于重庆大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究现状评述	2
1.2.1 煤岩剪切试验装置研究进展	2
1.2.2 煤岩剪切破坏理论研究	4
1.2.3 煤岩剪切破坏机理研究进展	8
1.2.4 煤岩剪切细观开裂演化特征量化研究进展	15
1.2.5 煤岩剪切细观开裂贯通模式研究进展	17
1.3 本书主要研究内容及方法	19
第 2 章 煤岩剪切细观试验装置及其试验方法	21
2.1 试验装置与特点	21
2.1.1 系统总体构成	21
2.1.2 技术指标与特点	29
2.2 试验方法	30
2.2.1 试验方案	30
2.2.2 煤岩样采集与加工	33
2.2.3 试验步骤	36
2.3 起裂应力水平与贯通应力水平	39
2.4 本章小结	40
第 3 章 砂岩剪切细观开裂演化与贯通机理	41
3.1 单面剪切试验条件下砂岩细观开裂演化分析	41
3.1.1 不同饱水系数	41
3.1.2 不同加载速率	51
3.1.3 不同法向应力	63
3.2 双面剪切试验条件下砂岩细观开裂演化分析	72
3.2.1 不同饱水系数	72
3.2.2 不同加载速率	81
3.2.3 不同法向应力	92

3.3 本章小结	103
第4章 含瓦斯煤剪切细观开裂演化与贯通机理	106
4.1 型煤剪切细观开裂演化分析	106
4.1.1 不同黏结剂含量	106
4.1.2 不同成型压力	114
4.1.3 不同煤粉粒径	123
4.2 原煤剪切细观开裂演化分析	132
4.2.1 不同法向应力	132
4.2.2 不同瓦斯压力	138
4.2.3 原生裂纹对原煤剪切细观开裂演化与贯通机理的影响	145
4.3 本章小结	153
第5章 煤岩剪切细观开裂演化特征量化分析	156
5.1 表面裂纹演化特征量化参数	156
5.1.1 等效长度、等效总长度和瞬时有效贯通量	156
5.1.2 瞬时有效贯通率	157
5.1.3 平均扩展速度与瞬时有效贯通速度	157
5.2 砂岩剪切破坏细观开裂演化特征量化分析	157
5.2.1 不同饱水系数	157
5.2.2 不同加载速率	167
5.2.3 不同法向应力	176
5.2.4 双面剪切条件下砂岩剪切破坏裂纹演化特征量化分析	187
5.3 型煤剪切破坏细观开裂演化特征量化分析	199
5.3.1 不同黏结剂含量	200
5.3.2 不同成型压力	206
5.3.3 不同煤粉粒径	212
5.4 原煤剪切破坏细观开裂演化特征量化分析	219
5.5 本章小结	225
第6章 煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型及其统计分析	228
6.1 煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型	228
6.2 砂岩剪切细观开裂分叉贯通统计分析	233
6.2.1 饱水系数对砂岩剪切裂纹贯通机理的影响	233
6.2.2 加载速率对砂岩剪切裂纹贯通机理的影响	237
6.2.3 法向应力对砂岩剪切裂纹贯通机理的影响	244
6.3 型煤剪切细观开裂分叉贯通统计分析	250
6.3.1 黏结剂含量对型煤剪切裂纹贯通机理的影响	250

6.3.2 成型压力对型煤剪切裂纹贯通机理的影响	255
6.3.3 粒径大小对型煤剪切裂纹贯通机理的影响	262
6.4 原煤剪切细观开裂分叉贯通统计分析	268
6.5 本章小结	272
参考文献	274

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

岩体是构成地壳的物质基础,人类主要在岩石圈上繁衍生息。矿产资源的开发、能源的开发、交通运输工程的建设、城市建设、地下空间的开发,无不涉及岩体的开挖。随着人类对自然环境需要的增大,工程的规模越来越大,其涉及岩石力学问题也就越来越复杂,研究岩石的地质特征、物理性质、水理性质、力学性质等方面的内容已经成为解决工程问题的重要途径,尤其是岩石变形破坏机理方面的研究^[1]。

剪切破坏是岩体破坏的基本形式之一。在坝基工程领域,历史上有很多因剪切破坏而引发的重大工程灾害的例子,如意大利 Vajont 水库岩坡滑动、法国 Malpasset 拱坝坝基位移导致整个拱坝坍塌、中国梅山连拱坝坝基(花岗岩)滑动等,从岩石力学角度开展工程岩体的稳定性,自 20 世纪 50 年代以来已越来越受到重视^[2]。在矿山工程领域,由于剪切引发的矿山顶板压力变化及预防和控制对策更是多年来从事矿山压力与岩层控制方面研究学者的关注重点^[3,4]。而剪切过程与地应力、瓦斯压力的耦合作用致灾机理及控制措施研究更是近几年研究的重点^[5~9]。因此,开展岩石剪切变形破坏机理研究,对完善地质灾害预测及防治理论,指导实际工程开挖和矿山灾害控制具有重要意义。

随着煤矿井下开采不断向深部延伸,地应力与煤层瓦斯压力不断增大,我国大部分煤矿将成为低透气性、高瓦斯开采矿井,造成煤矿动力灾害事故频发,安全高效开采难以实现。而煤矿动力灾害与煤岩自身力学性质和剪切破坏过程密切相关,因此,开展剪切荷载作用下的煤岩破坏机理研究,对揭示煤矿动力灾害机理,具有重要现实指导意义。

经过长期的地质演变和多次复杂的构造运动,煤岩材料中含有不同阶次的随机分布的微观孔隙和裂纹。因此,煤岩材料受载后的宏观断裂失稳和破坏与其变形时内部微裂纹的分布以及微裂纹的产生、扩展和贯通密切相关^[10~13]。仅从宏观尺度探讨其力学机理显然是不够的,从细观甚至微观尺度、“三观”相结合,将煤岩细观裂纹的特征同宏观破坏行为的力学机制联系起来进行研究,对更加全面探讨剪切荷载作用下的煤岩剪切细观损伤演化及破坏机理,深入理解煤岩材料的宏观力学特性,对进一步揭示煤矿动力灾害机理,具有重要的理论研究价值和指导意

义。针对煤岩剪切破坏开展细观力学实验与分析成为当前岩石力学界研究的前沿和热点。

砂岩作为工程开挖岩体中的主要构成部分,其在外力作用下通常表现为良好的脆性和各向同性性质,是开展基础试验研究常用的脆性材料之一。

原煤作为矿井开挖岩体的主要构成部分,由于其特殊的形成过程,造成原煤中包含大量的裂纹,使原煤呈现各向异性特点,导致现场取样、实验室切割打磨制作过程困难,且各煤样力学特性差异很大,试验结果难以比较等诸多问题,因此,目前有关原煤剪切力学特性方面的研究成果甚少。

型煤煤样是实验室研究中代替原煤较为常用的相似材料。许多学者认为,型煤与原煤在物理性质变化规律方面具有相当好的一致性,且型煤容易加工、成功率高,可应用型煤进行含瓦斯煤一般规律性研究^[14,15]。

为深入探究煤岩剪切破断机理,进一步揭示煤矿动力灾害形成机理,本书以砂岩和煤(包括型煤和原煤)为研究对象,利用自主研发的煤岩剪切细观试验装置,开展不同试验条件下煤岩剪切细观开裂演化模式和细观贯通机理研究。在此基础上对煤岩剪切细观开裂演化特征进行量化,建立煤岩剪切裂纹演化特征量化参数与剪应力和声发射特征之间的量化关系。最后,结合前面对煤岩剪切细观贯通机理的分析,建立煤岩剪切细观开裂分叉贯通模型,利用该模型对不同试验条件下的煤岩剪切细观开裂分叉贯通类型进行统计分析,进一步揭示煤岩剪切细观破坏和损伤形成机理。

1.2 研究现状评述

为深入探究煤岩剪切破断机理,结合本书拟开展的研究内容,主要进行煤岩剪切细观试验装置、煤岩剪切破坏机理、煤岩剪切细观开裂演化特征量化及煤岩剪切细观开裂贯通模式等四个方面的研究现状评述。书中参考文献以近十年研究成果为主,重点是近五年文献资料,并兼顾十年前有影响的研究成果。

1.2.1 煤岩剪切试验装置研究进展

根据现场工程岩体的受力形式,可以将岩体的剪切形式分为单面剪切和双面剪切两种类型,实验室通常存在单面剪切和双面剪切两种测试手段来测量材料的抗剪强度。随着科学技术的发展,许多观测技术引入到了岩石材料破坏过程的研究中,如电镜扫描技术、X射线技术、与X射线相结合的CT技术、声发射测试技术及红外热像技术。因为岩石材料所有的宏观力学特性都与微裂纹的萌生、扩展、相互作用有关,所以岩石细观损伤的实验研究成为近年来的热点课题。为研究岩

石的剪切破坏机制,国内外学者相继研发了功能各异的剪切试验装置和基于先进观测技术的细观试验装置。

在单面剪切试验装置研制方面,Barla 等^[16]研发了一套可进行高应力环境下土或岩石类材料直剪试验的直剪仪。Boylan 和 Long^[17]研发了一套新型 DSS 剪切装置,使用了 PIV 图像分析技术来监控材料在剪切过程中的力学行为。Kim 等^[18]研发了一套岩石天然节理面和人工节理面剪切试验装置。刘斯宏等^[19]研制了一种便携式现场和室内两用直剪仪。甘肃省水利水电勘测设计院^[20]研发了国内首台室内岩石中型直剪仪。夏才初等^[21]研制了岩石节理剪切-渗流耦合试验系统。

在双面剪切试验装置研制方面,Hugo 等^[22]研发了一套测试材料黏结性能的双面剪切装置,竖向剪切力由上方千斤顶提供,竖向力反力框架与试件左右侧面局部接触,靠水平推力挤压夹紧,可进行不同法向力接触面黏结特性的双面剪切试验。卜良桃等^[23]考虑到工程应用的实际情况,选用双面剪切试验方法^[24],将凹型底座突出部位与钢纤维水泥砂浆层接触,不与混凝土接触,形成对钢纤维水泥砂浆层与混凝土层黏结界面的剪切,进行了外包钢纤维水泥砂浆加固混凝土试件的双面剪切试验。蔡安江等^[25]研制了原位双砖双面剪切仪,通过多孔砖砌体抗剪强度原位检测的试验研究,提出了多孔砖砌体抗剪强度原位双砖双面剪切的检测方法及其抗剪强度的计算公式。吴立新等^[26]采用双面剪切法,设计了岩石双面剪切摩擦滑移加载系统,利用双轴加载试验系统和红外热像仪,对四类断层组合条件下双面剪切黏滑过程中的红外辐射温度场的时空演变特征进行了模拟试验研究。

在细观试验装置研发方面,Bobet 和 Einstein^[27]研发了一种单轴和双轴加载状态下的显微观测试验系统,并对含有预制裂纹的石膏试件进行了试验研究。葛修润等^[28]研制了岩石细观力学加载仪(YXJY-5T),该仪器设备配装在光学体视显微镜下,可以观察岩样在加载过程中,四个平面变形破坏的全过程,并获得岩样的应力-应变曲线和相对应的细观结构变化的图像。后来,在该装置的基础上增加了全过程录像系统,并采用了一种二次复型技术,可以观察到更加详细的破坏过程及不同矿物颗粒的微观破坏特征^[29]。冯夏庭等^[30]在已有岩石细观加载仪的基础上研制了侵蚀装置和数字显微观测系统,观察到穿晶裂纹、绕晶裂纹以及沿晶裂纹的动态扩展全过程。何学秋等^[31]研制了一种含瓦斯煤变形及破裂动态显微观测系统,尝试对含瓦斯煤岩进行细观试验研究。曹树刚等^[32]研制了煤岩固-气耦合细观力学试验装置,可进行多种受力状态和瓦斯压力条件下软弱煤岩的细观力学试验。许江等^[33~35]研发了含瓦斯煤岩细观剪切试验装置,可进行流固耦合作用下煤岩单面剪切细观力学特性试验,利用该装置研究了煤岩材料在不同条件下剪切破坏过程中的细观裂纹演化特征。

在基于 X 射线的 CT 扫描技术方面,近几十年来,由于其具有无损化、精细化、量化、三维数字化等优点^[36,37],可实现同一岩石试件的连续无损扫描等优点,越来越受到广大岩石力学与工程研究人员的青睐。1986 年日本首先研制成功室内受压岩样弹性波 CT 机,并用该机对受压岩样内部裂隙发展过程进行了研究,成为岩石力学 CT 技术研究和应用的开端^[38]。1989~1991 年,Raynaud 等^[39]利用 CT 机研究受轴对称荷载作用的岩石内部破坏机制。Verhelst 等^[40]于 1995 年利用 X 射线 CT 机研究了岩样的微裂缝和不均一结构。Kawakata 等^[41]于 1997 年用 X 射线 CT 机研究了 Westerly 花岗岩在三轴压缩时的损伤扩展特性。在国内,杨更社等^[42~44]于 1995 年最早应用医用 X 射线 CT 机对岩石的初始损伤特性进行了研究,并给出了用 CT 数表示的岩石损伤变量公式。1999 年,葛修润等^[45]研制了岩土 CT 专用的三轴加载装置,从而实现了试验过程中的实时扫描。任建喜^[46~49]、简浩^[50]和李廷春^[51]等相继进行了众多单轴、三轴岩石 CT 实时试验。戴永浩等^[52]则对含有层理的非饱和板岩进行了单轴压缩条件下的 CT 实时试验,研究非饱和板岩破坏过程中微裂隙的发展演化规律。赵阳生等^[53~60]利用显微 CT 试验分析系统研究了煤体的细观裂隙特征及煤体的热破裂过程,结合分形理论,得到了 CT 下的孔隙度、空隙团、空隙团数量分形维数三个方面的参数值。赵东等^[61]针对较小煤岩试件单轴抗压强度的测定和破坏规律研究的不足,设计针对 $\phi 5\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的微小试件单轴试验的微型试验机,并与三维显微 CT 耦合使用,在整个试验过程中可以将单轴压缩引起的试件内部原生裂隙的发展及新的裂纹、裂缝的产生规律加以分析,以更好地对单轴压缩时岩石变形的细观特性及破坏规律进行研究,并进行了试验验证^[62]。

可见,单面剪切试验装置种类繁多、功能各异,对其细观力学的研究逐步增多,有关岩石在双面剪切状态下细观力学特性的研究未见报道,主要原因是缺乏专门的双面剪切试验装置,且没有能够实现双面剪切与细观相结合的力学试验系统。因此,需要研发一套岩石双面剪切细观试验装置,应用其开展砂岩双面剪切细观力学特性试验研究,分析砂岩双面剪切过程的变形特性、裂纹时间演化规律和细观演化特征,以及分析和探讨不同剪切形式对煤岩剪切变形及破坏机理的影响。

1.2.2 煤岩剪切破坏理论研究

欧文于 1957 年将简单裂纹分为三种类型(图 1.1)。I 型裂纹代表在垂直于裂纹面的拉应力作用下,裂纹表面位移垂直于裂纹面的情况,所以又称为张开型;其受力情况如图 1.2(a)所示,一无限大平板,板内有一长为 $2a$ 的穿透裂纹,边缘受到分布力 $\sigma_{xx}=0, \sigma_{yy}=\sigma_y^\infty, \tau_{xy}=0$ 。II 型及 III 型裂纹代表在剪应力作用下,裂纹表面相互滑动的情形,称为剪切型裂纹。其中 II 型裂纹称为面内剪切型裂纹,受力

情况如图 1.2(b)所示,无穷大板中有一长为 $2a$ 的穿透裂纹,板边作用着均匀的剪应力 $\tau_{xy} = \tau^\infty$; III型裂纹称为面外剪切型或反平面裂纹,受力情况如图 1.2(c)所示,在一无穷大板中央有一长为 $2a$ 的穿透裂纹,在板的两端作用以均匀剪应力 $\tau_{yz} = \tau^\infty$ [63]。

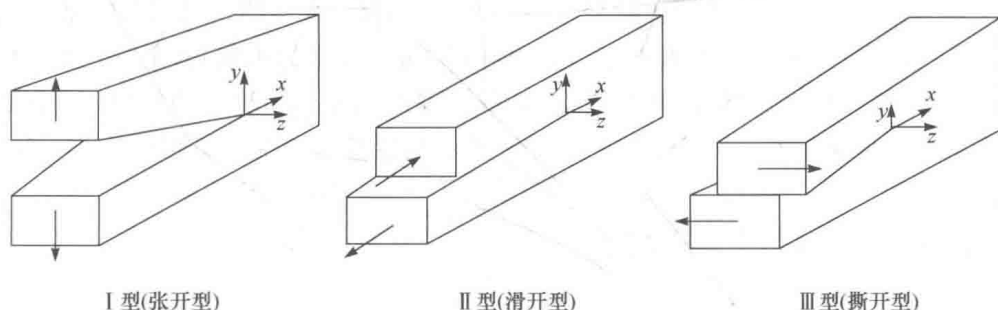


图 1.1 裂纹的三种基本类型

Fig 1.1 Three basic types of cracks

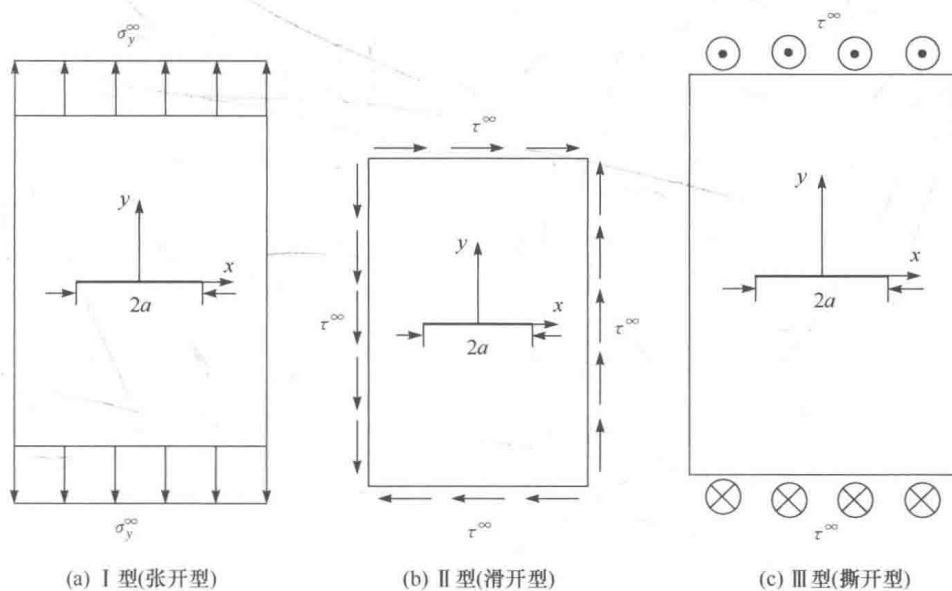


图 1.2 三种基本裂纹的应力状态

Fig 1.2 Stress state of three basic cracks

裂纹(非经典意义上的裂纹)能在非线性弹性断裂力学条件下萌生与扩展。一条这样的裂纹可能完全由发展中的过程区所组成,也可能部分是真正的裂纹,部分是过程区。预测这种裂纹的扩展需要材料非线性分析的能力。

关于过程区扩展的准则是用能量而不是用应力或应力强度来表达的。如果一

个区域的前沿点上释放了足够的能量使之完全到达表征材料特性的 δ -COD 曲线的最低点($\sigma=0$ 及 $\delta_c=\text{COD}$), 则此区间将要扩展。这种裂纹的扩展轨迹取决于裂纹扩展过程中所通过区域的主应力场, 裂纹将沿垂直于主拉应力的方向扩展。当裂纹扩展时, 一般说来, 它本身又能改变主应力场的大小及方向。

如果已经确定满足线弹性断裂力学的条件, 则模拟裂纹的扩展需要两类参数: 应力强度因子(可由解析方法确定, 它是载荷及几何形状的函数)及适当的断裂韧度(表征材料性质的参数, 由实验测定)。应力强度因子与临界应力强度因子间的关系类似于无裂纹的韧性试件中应力与其一临界应力参数(如屈服应力)间的关系。

对于纯 I 型及纯 II 型裂纹, 只要

$$K_I < K_{IC} \quad (1.1)$$

$$K_{II} < K_{IIC} \quad (1.2)$$

裂纹就不会扩展。类似地, 在单轴应力条件下, 只要

$$\sigma < \sigma_{yld} \quad (1.3)$$

材料就不会发生屈服^[64]。

求应力强度因子的方法是各式各样的, 可分为计算与实验两大类。计算方法又可分为很多种方法, 通过极坐标变换可得裂纹端部的应力, 如下:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2}\theta \right) + o(r^{-1/2}) \\ \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3}{2}\theta \right) + o(r^{-1/2}) \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3}{2}\theta \end{cases} \quad (1.4)$$

式(1.4)称为 I 型裂纹应力的近场式, 其中 K_I 称为 I 型裂纹的应力强度因子, 其中

$$K_I = \sigma_y^\infty \sqrt{\pi a} \quad (1.5)$$

同理, 可得 II 型裂纹的应力强度因子

$$K_{II} = \tau^\infty \sqrt{\pi a} \quad (1.6)$$

目前国内外对于岩石破裂过程研究多集中于对 I 型、II 型裂纹的应力强度因子的组合与修正以及应用裂纹强度因子计算裂纹长度等参数。其中 Li 等^[65]利用 I 型断裂韧度等参数计算裂纹扩展长度并进一步得出裂纹的侧向位移, 其计算公式如下:

$$L = \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\sqrt{K_{IC} + 4\sigma_2 F} - K_{IC}}{\sigma_2} \right]^2 \quad (1.7)$$

$$u^L = \frac{4}{\pi E} L^3 N^3 \left[\ln \left(\frac{L}{L_0} \right) + 1 \right] F \quad (1.8)$$

其中, L 为扩展裂纹长度(预制裂纹与翼裂纹之和); K_{IC} 为断裂韧性; σ_2 为中间主应力; F 为楔形力; L_0 为 L 的初始值; N 为裂纹密度; u^L 为楔形力加载裂纹中间的侧向位移。

Shetty 等^[66]通过对预制裂纹的巴西劈裂试验进行数值模拟,得到应力强度因子,如式(1.9)与式(1.10)所示:

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{\pi R B}} \sqrt{\alpha} N_I \quad (1.9)$$

$$K_{II} = \frac{P}{\sqrt{\pi R B}} \sqrt{\alpha} N_{II} \quad (1.10)$$

其中, P 是正压力; R 为试件半径; B 为试件厚度; $\alpha = (a/R)$, 其中 a 为预制裂纹缺口长度的 1/2; N_I 、 N_{II} 分别为与预制裂纹缺口长度的与缺口倾角的无量纲应力强度因子。

Chang 等^[67]通过实验提出,当无法确认 II 型裂纹断裂韧度时,通过式(1.11)中 I 型裂纹与 II 型裂纹之间的关系获得

$$\frac{K_I}{K_{IC}} + \left(\frac{K_{II}}{CK_{IC}} \right)^2 = 1 \quad (1.11)$$

其中, K_I 、 K_{II} 分别为 I 型裂纹与 II 型裂纹应力强度因子; K_{IC} 为 I 型裂纹断裂韧度; $C = K_{II}/K_{IC}$, 是经验常数。

在流体压力作用下, I 型裂纹与 II 型裂纹应力强度因子随之改变, Rahman 等^[6]总结出在流体压力作用下,结合莫尔-库仑准则,得到 I 型裂纹与 II 型裂纹应力强度因子,具体过程如下:

$$\sigma_n = \{ \sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha \} \quad (1.12)$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1.13)$$

其中, σ_1 与 σ_3 分别为最大主应力与最小主应力; σ_n 为作用力裂纹面的正应力; α 为正应力与裂纹面夹角; τ 为裂纹面上的剪切力。将流体压力 P_f 代入式(1.12)与式(1.13)可得

$$P_n = \{ P_f - (\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha) \} \quad (1.14)$$

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1.15)$$

将以上结果结合 Rice 于 1968 提出的应力强度因子公式可得如下:

$$K_I = C \sqrt{l} \{ P_f - (\sigma_1 \sin^2 \alpha + \sigma_3 \cos^2 \alpha) \} \quad (1.16)$$

$$K_{II} = \frac{1}{2} C \sqrt{l} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha \quad (1.17)$$

其中, C 取决于裂纹的几何形状和裂纹半长度的常数; l 为裂纹的半长度。

1.2.3 煤岩剪切破坏机理研究进展

早在 1921 年, Griffith 根据微裂隙控制破坏和渐进破坏的概念, 提出了脆性破坏理论, 为后来深入研究岩石的破坏机理提供了一个重要途径。

在工程实践范围内, 脆性岩石的破裂早已引起人们的普遍重视, 岩石破裂过程的实验室研究已进行了多年, 但是迄今为止, 对岩石微观和细观尺度上的破裂机理仍未完全了解。为了解决这一问题, 已经有许多学者对岩石的微观和细观断裂过程进行了各种研究。

在细观观测方面, Riedel^[68] 和 Cloos^[69] 分别于 1929 年和 1955 年用饼状黏土进行简单面剪切试验, 研究发现, 剪切区域是由一系列离散的且与剪切方向呈不同角度裂隙组成的。茂木清夫^[70] 于 1962 年进行的试验是先把岩样切成直方形并磨光, 而后在岩样上加一轴向应力, 直至最终破坏, 试验表明, 在施加应力的速率不变时, 对于非均匀样品, 在主破裂前会发生许多微裂, 但对极其均匀的样品来说, 主破裂前却无微裂。Brace^[71] 于 1966 年用中粒大理岩、韦斯特里花岗岩和细晶岩脉三种岩石做过试验, 其结果认为膨胀是在破裂应力的 $1/3 \sim 2/3$ 时开始发生的。

自从 Bieniawski^[72] 于 1967 年对岩石脆性破裂的机制作了系统的论述后, 许多岩石力学和地球物理工作者作了大量的试验和理论工作, 试图揭示这一从微观到宏观的破裂发展过程。总的趋势是, 研究逐渐从宏观向微观发展, 从定性描述到试图得出一些半定量的结果。Lajtai^[73] 于 1969 年提出在整个剪切断裂过程中, 首先萌生一组倾斜的拉裂纹, 随着应力的增加, 这些拉裂纹相互贯通, 然后形成一个贯穿的剪切面导致最终的剪切断裂或破坏。Hallbauer 等^[74] 于 1973 年将试件加载到不同的应力水平, 卸载后制成薄片, 在光学显微镜下进行了观察, 结果表明, 微裂纹开始是随机而分散地出现的, 当裂纹密度达到一定的水平之后, 就开始在未来宏观断裂带周围的一个窄带上集中, 最后连通而形成宏观断裂带。Ollson^[75] 于 1974 年研究了石灰岩在围压状态下的变形, 得到在变形过程中存在着轴向的微破裂和微断层两种主要不同的微断裂。Sangha 等^[76] 于 1974 年对单轴压缩下砂岩的微断裂的研究表明, 在所有应力级和加载速率下, 微断裂总是由胶结物的破坏形成的, 而不是由颗粒的破坏形成的。

自从 Sprunt 和 Brace^[77] 于 1974 年将扫描电镜观测技术引入岩石微破裂研究以来, 已有许多这方面的成果陆续发表。Lajtai^[78,79] 分别于 1971 年和 1974 年对熟石膏材料进行了单轴压缩条件下的裂纹扩展规律的研究。Wu 和 Thomsen^[80] 于

1975 年研究了 Westerly 花岗岩在单轴压缩蠕变试验中的微破裂试件累积数,并且对一些试件在临近破坏时卸载,切出薄片在光学显微镜下作了观察,结论是,观察到的裂纹比记录到的事件数要少得多。Tapponnier 和 Brace^[81]于 1976 年研究了 Westerly 花岗岩中应力诱发的裂纹的扩展,结论是,“很少看到与剪切有关的扩展裂纹”,扩展裂纹大多数“与颗粒边界有关,并与外应力方向成高角度”。Kranz^[82~84]于 1979~1980 年研究了 Barre 花岗岩蠕变过程中的裂纹生长和发展,受应力花岗岩中裂纹-裂纹和裂纹-孔洞之间的相互作用,以及围压和应力差的大小对花岗岩静疲劳的影响。作为另外一种方法,有些学者(如 Sangha 等^[85]、陈颢等^[86])还曾采用揭膜法研究过受载岩石中的微破裂。Ingraffea 和 Heuze^[87]于 1980 年对石灰石和花岗闪长岩材料进行了单轴压缩条件下的裂纹扩展规律的研究。Hoek 和 Bieniawski^[88]于 1984 年对单轴压缩下玻璃材料中预制单一张开椭圆裂纹和单一闭合裂纹起裂和扩展规律进行了研究,并对椭圆形张裂纹组的裂纹起裂和扩展规律进行了研究。Horii 和 Nemat-Nasser^[89]于 1986 年对烯丙基二甘醇酸酯(CR39)材料进行了单轴压缩条件下的裂纹扩展规律的研究。Petit 和 Barquins^[90]于 1988 年对砂岩材料进行了单轴压缩条件下的裂纹扩展规律的研究。Lajtai 等^[91]于 1994 年进行了钾盐岩中雁行裂纹阵列形成机制,在拉伸机制中的子裂纹之间只有很小的重叠,扩展方向与最大值应力方向一致,与最小主应力方向垂直,在剪切裂纹阵列中的拉伸裂纹,相互之间有较大的重叠,其彼此横向位移被偏置于一个方向,扩展方向与最大主应力方向呈 $20^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 角度,随着应力的增大,相邻裂纹之间经常发生垮塌,形成包络或沙漏结构。

Kawakata 等^[92]于 1997 年对岩石的初始细观损伤特性进行了研究并进行了单轴受力损伤扩展的 CT 分析。Hatzor 等^[93]于 1997 年研究了白云石的细观结构与微裂隙起裂的初始应力和试样最终强度之间的关系。Bobet 和 Einstein^[94]于 1998 年对单轴和双轴条件下石膏材料中的不同相对位置的预制裂纹的贯通过程和贯通方式进行了研究,研究了不同类型预制裂纹、不同预制裂纹倾角条件下内部裂纹起裂应力和外部裂纹起裂应力之间的关系,韧带长度与翼裂纹起裂应力之间的关系,韧带长度与翼裂纹起裂角度(相对于加载方向)之间的关系,外部次级裂纹起裂应力与内部次级裂纹起裂应力之间的关系,韧带长度与次级裂纹起裂应力之间的关系,翼裂纹起裂应力与次级裂纹起裂应力之间的关系,平均翼裂纹起裂应力与平均次级裂纹起裂应力之间的关系,韧带长度与贯通应力之间的关系,以及贯通应力与破坏应力之间的关系。Wong 等^[95]于 1999 年用含两条平行预制裂纹的天然岩块和石膏模型进行了一系列直剪试验,认为:岩石的抗剪强度在很大程度上取决于裂纹的贯通模式,对于低抗剪强度材料容易出现拉伸破裂贯通模式,而高抗剪强度则容易出现拉剪混合破裂贯通模式。Gehle 等^[96]于 2003 年研究了节理岩体