



煤炭深部开采中的岩石力学问题及动力灾害防治基础研究学术丛书

储层岩石细观结构表征与 变形破坏行为

杨永明 鞠 杨 彭瑞东 著



科学出版社

煤炭深部开采中的岩石力学问题及动力灾害防治基础研究学术丛书

储层岩石细观结构表征与 变形破坏行为

杨永明 鞠 杨 彭瑞东 著

本书出版得到以下项目资助：

国家杰出青年科学基金项目(编号:51125017)

国家重点基础研究发展计划(编号:2010CB226804)

国家自然科学基金面上项目(编号:51374213)

2014 年度江苏省双创团队

江苏省高校优势学科建设工程资助项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了储层岩石细观结构(孔/裂隙)的空间形态和分布特征。基于统计学原理和数学方法,建立了储层岩石孔/裂隙模型的重构方法和重构模型。基于细观孔/裂隙重构模型和孔/裂隙岩石的物理模型,系统分析了孔/裂隙对岩石强度、泊松比和弹性模量等宏观力学性能的影响,研究了内部非连续的细观孔/裂隙结构对岩石变形破坏、应力场和裂缝扩展影响的力学机理。同时从能量角度分析了三轴应力作用下岩石变形破坏和裂缝扩展的能量机制,揭示了温度作用对岩石孔/裂隙细观结构演化规律和破坏裂缝扩展的影响机理。

本书可供高等院校工程力学、采矿工程、地质工程、油气开发以及土木工程等专业的师生和相关工程技术人员参考和使用。

图书在版编目(CIP)数据

储层岩石细观结构表征与变形破坏行为/杨永明,鞠杨,彭瑞东著. —北京:科学出版社,2016. 1

(煤炭深部开采中的岩石力学问题及动力灾害防治基础研究学术丛书)

ISBN 978-7-03-046910-6

I. ①储… II. ①杨…②鞠…③彭… III. ①储集层-岩石-结构性能-研究 ②储集层-岩石-岩石力学-研究 IV. ①P618. 130. 2②TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 311436 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/2 彩插:4

字数:270 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《煤炭深部开采中的岩石力学问题及动力 灾害防治基础研究学术丛书》编委会

主 编:姜耀东

副 主 编:刘长武 康立军 窦林名 潘一山 鞠 杨

编 委:(按姓氏笔画排序)

王连国	王学滨	乔建永	纪洪广
李忠华	何富连	姜福兴	高 峰
谭云亮	黎立云		

前 言

随着浅表矿产资源的日益枯竭,矿物资源地下开采的深度越来越大,人类的工程活动已经深入到地下 4000m 以下的深度,如千米深度的煤炭和金属矿产资源开采、数千米深度的油气资源开发、埋深逾千米的引水隧道、核废料的深层地质处理问题、深部地下防护工程等。深部矿产资源开发和工程建设最直接的作业对象是岩石,由于深部储层岩石所处的地质环境非常复杂,加上岩石微细观结构的无序、跨尺度和不连续特性,传统的基于连续介质的岩石力学理论难以科学准确地阐述和分析储层岩石的变形破坏、强度特征,对岩石的微细观变形破坏机理,特别是裂缝空间的起裂与扩展规律,缺乏足够的认识,难以建立准确的岩石变形破坏的判别准则,这已成为制约深部资源高效安全开采技术应用与发展的瓶颈难题。

天然岩石内部存在着大量不同尺度微细观缺陷(如孔隙、裂隙等),这些微观缺陷及其在外部载荷和环境作用下的演化规律直接影响着岩石的物理、力学和化学性质,认识和定量刻画微观孔/裂隙结构对岩石性质的影响,对于解决矿山、石油、地质、冶金、土木和水利工程中的实际问题具有十分重要的意义。然而,天然岩石孔/裂隙跨尺度无序分布,数量多且形态复杂,孔/裂隙的数量、形状、大小、空间分布以及它们随外部条件的变化规律异常复杂,加上受试验设备、技术和方法的限制,人们难以通过试验直接和定量地观测岩石内部孔/裂隙结构的演化模式、连通性、应力场和应变场等一系列对孔隙岩石宏观物理力学性质起决定作用的内部机制,一系列重要的岩石力学现象和力学行为无法得到合理的解释和科学的描述。岩石就像一个“黑箱”,人们更多地利用试验手段来观察岩石的表观物理、力学和化学性质的变化,从而间接地反映孔/裂隙结构特征及其影响。因此,人们需要深入分析和研究岩石内部细观孔/裂隙结构的形态和分布特征,从而建立能准确反映岩石内部微观结构的数值模型,利用这种模型就可以定量地描述岩石内部孔/裂隙的分布与演化,为揭示岩石渗透性、电导率、波速、颗粒吸附力、储层产能、物质传输、应力波动以及损伤破坏等一系列复杂的物理力学现象的内在本质、打开岩石这个“黑箱”创造条件。

本书详细介绍了岩石细观孔/裂隙结构模型重构及变形破坏行为,汇集了作者近些年来开展孔/裂隙岩石模型重构方法和岩石变形破坏与裂缝扩展机理的部分研究成果,部分内容已经在国内外学术期刊上公开发表。全书共 8 章,内容涵盖了岩石细观孔/裂隙结构几何信息的提取方法和空间几何分布特征、岩石孔隙/裂隙模型的重构方法和重构模型、劈裂荷载作用下细观孔隙结构的演化规律及其

对岩石宏观力学性质的影响、卸载条件下裂隙岩石变形破坏的能量特征、高温作用下孔隙结构的演化特征及其对岩石变形破坏的影响,以及三轴应力下岩石裂缝扩展的空间分布特征和能量机制等。

本书出版得到了国家杰出青年科学基金项目(编号:51125017)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2010CB226804)、国家自然科学基金面上项目(编号:51374213)、2014 年度江苏省双创团队和江苏省高校优势学科建设工程资助项目的资助,在此作者深表感谢。

岩石内部微细观结构的分布特征、演化规律及其对岩石内部应力场、应变场、破坏裂缝扩展规律的影响机理是一个世界性难题,还有待继续深入研究。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 岩石力学性质和破坏机理研究现状	2
1.2 本书的主要内容	4
参考文献	5
第 2 章 岩石细观孔/裂隙结构特征分析	9
2.1 岩石孔/裂隙结构 CT 扫描	9
2.1.1 岩石孔隙结构 CT 扫描试验	9
2.1.2 岩石裂隙结构 CT 扫描试验	10
2.2 岩石孔/裂隙结构 CT 图像分析	12
2.2.1 孔隙结构 CT 图像分析	13
2.2.2 裂隙结构 CT 图像分析	14
2.3 岩石孔/裂隙结构统计特征和分布规律	16
2.3.1 孔径大小分布规律	16
2.3.2 孔隙空间位置分布规律	19
2.3.3 孔隙间距分布规律	24
2.4 本章小结	29
参考文献	29
第 3 章 岩石细观孔/裂隙结构的重构模型	31
3.1 模型重构方法概述	31
3.1.1 岩石孔隙模型回顾	31
3.1.2 岩石裂隙模型回顾	39
3.2 岩石孔隙模型重构方法	41
3.2.1 Monte Carlo 方法	41
3.2.2 随机数的产生	42
3.2.3 孔隙结构的数学模型	44
3.3 岩石孔隙重构模型	49
3.3.1 孔隙空间分布随机数	49
3.3.2 孔隙间距分布随机数	51
3.3.3 孔径大小分布随机数	51

3.3.4 孔隙模型的建立	51
3.4 岩石裂隙重构模型	53
3.4.1 三维裂隙几何模型的建立	53
3.4.2 三维裂隙有限元模型的建立	54
3.5 本章小结	56
参考文献	56
第4章 孔隙岩石变形破坏力学机理的数值分析	61
4.1 孔隙率对岩石力学性能和变形破坏的影响	61
4.1.1 孔隙率对岩石变形破坏的影响	61
4.1.2 孔隙率对岩石强度的影响	70
4.2 孔径对岩石力学性能和变形破坏的影响	71
4.2.1 孔径对岩石变形破坏的影响	71
4.2.2 孔径对岩石抗拉强度的影响	87
4.3 孔隙空间位置对岩石力学性质和变形破坏的影响	88
4.3.1 孔隙空间位置对岩石变形破坏的影响	88
4.3.2 孔隙位置对岩石抗拉强度的影响	100
4.4 孔隙对岩石应力场分布特征的影响	101
4.4.1 应力场的理论解	101
4.4.2 应力场的数值解	105
4.5 本章小结	108
参考文献	108
第5章 孔隙岩石物理模型劈裂破坏 CT 扫描试验	110
5.1 CT 加载装置	110
5.2 孔隙岩石物理模型制备及力学性能	111
5.2.1 孔隙岩石物理模型制备	111
5.2.2 孔隙岩石物理模型的孔隙结构特征	114
5.2.3 孔隙岩石物理模型的力学性质	122
5.2.4 孔隙岩石物理模型劈裂的应力-应变性质	124
5.3 孔隙岩石物理模型劈裂 CT 扫描试验	127
5.4 孔隙岩石细观结构的演化分析	132
5.5 本章小结	136
参考文献	136
第6章 卸载条件下裂隙岩石变形破坏及能量分析	137
6.1 材料参数和边界条件的选取	137
6.2 加、卸载条件和破坏准则	139

6.3 结果与分析	140
6.3.1 应力、应变分布与变形破坏特征	140
6.3.2 单元耗散能与可释放应变能的特征	148
6.4 本章小结	150
参考文献	150
第7章 温度对孔隙岩石力学性能的影响	152
7.1 孔隙岩心制备	152
7.1.1 孔径分布	154
7.1.2 孔隙位置空间分布	155
7.1.3 孔隙间距分布	157
7.2 温度试验	160
7.3 高温下孔隙岩石单轴压缩试验	161
7.4 试验结果分析	164
7.4.1 温度作用下孔隙率对抗压强度的影响	164
7.4.2 温度作用下孔隙率对弹性模量的影响	165
7.4.3 温度作用下孔隙率对泊松比的影响	167
7.5 温度作用下孔隙微观结构的演化分析	168
7.6 温度作用下孔隙岩石基体化学性质分析	175
7.7 本章小结	178
参考文献	178
第8章 三轴应力下岩石裂缝扩展及破裂能量机理	180
8.1 裂缝扩展岩石三轴压缩 CT 扫描试验	181
8.1.1 样品制备及力学性能测试	181
8.1.2 岩石三轴压缩试验	182
8.1.3 CT 扫描试验	183
8.2 三轴应力对裂缝扩展规律的影响	184
8.3 裂缝展布形态和表征参数	187
8.3.1 裂缝面积分布特征	187
8.3.2 裂缝长度分布特征	191
8.3.3 裂缝宽度分布特征	194
8.3.4 裂缝形态的分形特征	197
8.4 裂缝发育及扩展的能量机制	199
8.5 本章小结	201
参考文献	202

第 1 章 绪 论

随着矿山资源的开发,地球的浅部资源已逐步枯竭,开采深度越来越深。从资源开采来说,目前煤炭开采深度已达 1500m,地热开采深度超过 3000m,有色金属矿开采深度超过 4350m,油气资源开采深度达 7500m,未来深部资源开采将成为常态^[1]。深部矿产资源开发和工程建设最直接的作业对象是岩石,储层岩石在宏观尺度上是一种均匀、连续、各向同性介质,但进一步研究其微细观结构时,岩石储层却是不均匀、不连续和各向异性的,其内部含有大量不同规模、形状各异的基体、相互连通的孔/裂隙和各种夹杂。这些缺陷使得岩石微观结构具有极端不规则性,主要表现为孔/裂隙空间结构的复杂性和无序性。研究结果表明,孔隙结构特征,如孔隙度、孔隙形状、孔隙空间分布、裂隙形状和连通性等对岩石物理力学性质有很大影响,如力学行为^[2~6]、流体渗流^[7,8]、松弛时间^[9]、热性能^[10]及电阻率^[11]等。

储层岩石孔/裂隙结构与石油天然气等开采领域中的很多问题密切相关,如含油岩石储层的孔/裂隙结构对于中高含水期剩余油的分布规律、调整注采井网、确定进一步挖潜方向和提高采收率等都有很大的影响。在油气勘探开采中,岩石孔隙结构的差别是导致复杂储集层油气层电阻率测井响应复杂多变的主要原因之一,孔隙结构参数,如孔喉配位数、颗粒表面水膜厚度等的变化对含油气储集层岩石电阻率性质的影响与控制作用都起着很重要的作用^[12]。在低孔低渗储集层中,孔/裂隙结构直接影响储集层产能的评价和油、气、水层测井评价的准确性。在储集层评价中,孔/裂隙结构是储集层性质微观物理研究的核心,其裂隙、喉道类型以及它们的分布情况,与储层岩石的物理特性和储集性能有着密切关系^[13]。

储层岩石中的孔/裂隙结构为地下油气和水资源提供了储存场所和运移通道。地下开采活动打破了岩体的初始应力平衡状态,导致应力场重新分布,同时使得岩石中的孔/裂隙结构产生变形或破坏,改变了岩体的渗流场分布与渗流性质。随着地下开采与工程建设规模的扩大,这种岩体孔/裂隙结构-渗流-应力耦合现象成为工程和理论界高度关注的重要问题。研究表明:我国 90%以上的煤矿突水事故与岩层水渗透有关^[14~19],80%以上的煤矿瓦斯突出事故与煤层开采和巷道掘进引发的煤岩体应力释放及瓦斯渗透性改变直接相关^[20~22],35%~40%的水电工程大坝失事由渗透作用引起^[23~25],90%以上的岩体边坡失稳破坏与地下水渗透有关^[24,25]。此外,开采地表沉陷、水库诱发地震、高放核废料与污染物的地质封存和 CO₂ 地下储存等均涉及岩体节理/裂隙演化、应力-渗流的相互作用与耦

合等问题。

现有岩石类细观结构材料的非均质表征方法已经成功地应用于岩土工程材料的分析,并揭示了岩土工程材料的一些力学性质。但是大多数岩土工程材料的研究都是在传统表象理论基础上开展的宏观分析,众多理论和数值模型研究集中在岩石体的外部力学性质和力学过程上,需要进一步深入地分析岩石内部孔/裂隙结构的变化以及这种变化对岩石宏观力学性质和力学过程的影响,这样才能揭示引起岩石宏观性能变化的本质因素,进而对矿山、水利水电和土木工程的防灾和减灾进行科学的预测评估和控制。在土木工程中,孔/裂隙体的固结问题、基坑问题、抽排地下水引起的地表沉陷、隧道稳定与岩体渗流变形、大坝坝基的稳定性、山体滑坡和泥石流等;在采矿工程中,由于地下水流入矿井中引起的地面沉陷、裂隙岩层和煤层中瓦斯抽放、露天矿山边坡的稳定性、承压水上采煤、矿区水资源的保护等^[26~29];在环境工程中,孔/裂隙岩体中污染物的传播问题、污染物控制系统中的岩石力学问题、地下核废料处理中的热-液-力耦合问题、裂隙岩体中污染物的处理等。在石油工程中,石油地质学的一个主要研究对象是油气储集层,而在储集层中,孔/裂隙结构是微观物理研究的核心。因此,深入研究储层孔/裂隙结构对揭示油气储集层的内部结构,从而对提高油气采收率及充分发挥油气层的产能有重要意义^[30~32]。所有这些问题都与岩土材料本身的微观孔/裂隙结构密切相关。

1.1 岩石力学性质和破坏机理研究现状

岩石力学性质及变形破坏机理的研究已有多年历史,国内外学者相继开展了大量的相关研究工作,获得了许多有意义的成果。早在20世纪70年代,国外的学者就开展了有关岩石热物理性质的研究工作,分析了温度作用对岩石热应变、膨胀系数、可压缩波传播性质、导热系数、渗透性、电导率等物理性质的影响^[33~46]。岩石的基本力学性质指在应力作用下岩石表现出来的弹性、塑性、弹塑性、流变性、脆性、韧性等性质,具体主要包括岩石的杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度和断裂韧性等。早在60年代学者们就开展了相关的研究,例如,Wingquist^[47]通过试验得到了岩石的弹性模量、杨氏模量、剪切模量随温度的变化关系,发现在大约在650℃以下杨氏模量和剪切模量随温度的升高而下降,超过650℃后,温度对其的影响不明显;姜永东等^[48]研究了干湿循环条件下岩石的变形与单轴抗压强度、弹性模量等力学特性;熊德国等^[49]利用开展了巴西劈裂、单轴压缩和常规三轴压缩试验,研究了饱水对砂岩、砂质泥岩和泥岩的强度、弹性模量、摩擦因素、黏聚力等力学性质的影响;孙萍等^[50]利用ORTHOPLAM显微镜对岩石的显微结构及抗拉、抗压、抗剪断性质进行一系列试验研究;很多学者研究了花岗岩基本物理

力学参数与温度的关系(包括花岗岩的变形模量、泊松比、抗拉强度、抗压强度、内聚力、内摩擦角、黏度、热膨胀系数等)^[51~56]。还有其他一些学者开展了岩石的基本力学特性随温度的变化规律和岩石的破坏机理^[57~64]。

岩石是由不同的矿物颗粒所组成的非均质体,由于组成岩石的各种矿物颗粒在高温条件下的热膨胀系数各不相同,岩石受热后,各种矿物颗粒的变形也不同,然而,岩石作为一个连续体,岩石内部各矿物颗粒不可能相应地按各自固有的热膨胀系数随温度变化而自由变形。因此,矿物颗粒之间产生约束,变形大的受压缩,变形小受拉伸,由此在岩石中形成一种由温度引起的热应力。应力最大值往往发生在矿物颗粒的边界处,如果此处的应力达到或超过岩石的强度极限(抗拉强度或抗剪强度),则沿此边界面的矿物颗粒之间的联结断裂,产生微裂纹,随着温度的提高,这些裂纹形成网络,这就是热-力耦合下岩石的破裂现象。不同的岩石,其门槛值温度不同,同一种岩石,由于其产地不同,门槛值温度也差异很大,这就迫使人们思考与研究岩石在温度和应力作用下的裂缝扩展机理^[65~73]。

研究表明,与应力峰值相关联的破坏,首先是通过局部裂隙分布的发展使试件普遍弱化,而不是宏观破裂的发生,局部剪切破坏只是在峰值后才变得明显。组成岩石的矿物晶体颗粒通过晶界分子作用力或胶结物胶结力结合,即岩石的结构、构造与矿物成分对其物理力学性质有重要影响,材料的强度和韧性等性能对其微结构涨落的非线性具有较强的依赖性,因此采用传统的宏观力学分析方法(如断裂力学方法)解释岩石的微观现象是不恰当的。许江等^[74]等对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展过程的试验观测表明,虽然在砂岩试件内部形成的微裂隙有少量产生于矿物颗粒内部的一些原生缺陷,但绝大部分产生于晶粒边界及其胶结物中,且砂岩试件的断裂破坏正是这些晶粒边界及其胶结物中的微裂隙发展为微断层,进而相互串联贯通的作用结果。并且近年来对微裂隙的微观观察表明,大多数裂隙呈张性扩展。砂岩 MTS 试验断口是岩石断裂后留下的关于断裂过程的记录,蕴涵着丰富的断裂机理信息,可以应用于研究岩石的微观破坏机理。

细观力学借助于连续介质力学的方法,考虑细观尺度固体变形过程的本构关系,以材料破坏过程中的不均匀性为研究重点。组成岩石的矿物晶体颗粒的力学行为符合经典连续介质力学理论,颗粒性质的不同和晶界的存在是岩石不均匀性的原因。岩石细观力学研究将试验、理论分析和数值计算相结合,需要试验结果提供岩石细观力学研究的实测数据和判断标准,需要理论研究总结出岩石细观力学的基本原理和理论模型,需要数值模拟计算手段进行岩石细观力学的辅助研究。作为宏观断裂的先兆,材料的细观微孔洞损伤与汇合研究包括孔洞聚集形态的识别、演化规律、所致裂尖形貌等内容;细观微裂纹损伤研究包括加载引起的各向异性、加载路径相关性及平行于微裂纹面的压缩应力亦可引发非线性变形的耦联效应等内容;材料的细观界面损伤研究包括近程与远程孔洞损伤等内容;局部

化带状损伤研究包括细观剪切带与带内损伤和细观屈曲折带及沿带损伤等内容^[75]。

岩体的非连续性、非均质性、各向异性及含水性等致使工程岩体与岩石试件的力学性能差异颇大。因此一般视宏观岩体为裂隙介质,结构面特别发育时甚至可视为碎块体或散体介质,仅在坚硬岩体的局部宜视为连续介质。岩石强度理论包括库仑准则、摩尔强度准则、单剪应力类强度理论、双剪应力类强度理论、八面体剪应力类强度理论、节理岩体的剪应力类经验性强度准则等几十种,绝大多数是以材料的均匀性和连续性假设为前提,没有考虑到岩石的非连续性和断裂破坏过程。工程断裂力学发展于20世纪50年代之后,其研究对象是高强度脆性材料。在细观上岩石是一种非均质材料,在宏观的工程尺度上更是非均质的,岩石的破坏往往呈由结构面引发的脆性破坏特征。岩石的非均质性和非连续性结构特征,决定了其断裂力学属性。岩石断裂力学是20世纪80年代发展起来的现代岩石力学,压剪应力状态下闭合裂纹的扩展判据是岩石断裂力学研究的主要问题之一。根据Griffith理论,在微裂隙尖端形成的应力集中是引起裂纹扩展、连接和贯通并导致破坏的重要原因,即裂尖有效应力达到形成新裂纹所需能量时裂纹开始扩展。对远场为压应力的情况,裂隙将发生压密闭合,裂隙面上作用有法向压应力和切向剪应力,剪切力大于剪切强度时,裂隙将继续破裂^[76]。

由于岩石孔/裂隙结构的复杂性以及基础理论和研究手段的局限,目前针对岩石的应力场演化规律和变形破坏行为以及细观结构对破坏性质的影响等方面的研究成果,与实际工程需要相距甚远。天然岩石原始存在着大量不规则跨尺度分布的孔/裂隙和软弱夹层等非连续薄弱结构。理论上讲,这些断续结构的几何形态、尺寸、分布、接触以及填充物性质决定着岩石整体力学响应与变形破坏行为,但由于断续结构的几何形态、分布与接触性质复杂,从理论上建立孔/裂隙岩石的整体力学响应、本构方程和变形破坏规律随细观结构特征与物性变化的解析关系极为困难,人们更多地忽略了细观结构的对变形、强度与破坏特征的影响。

1.2 本书的主要内容

本书共8章,第1章为本书主要内容的概述,简单介绍了基于细观结构的岩石力学性质及破裂机理研究的工程背景和科学意义,并对岩石孔/裂隙模型重构和建模方法的研究现状进行了归纳和总结。第2章介绍了岩石细观孔/裂隙结构几何信息的提取方法,分析了孔/裂隙结构的几何分布特征。第3章主要介绍了岩石孔/裂隙模型的重构方法,并建立了孔/裂隙三维重构模型。第4章主要介绍了基于三维重构模型开展孔隙岩石变形破坏力学机理的数值方法,揭示了微观孔隙结构对岩石力学性质、应力场及裂缝扩展规律的影响。第5章介绍了CT

加载装置和孔隙岩石物理模型的研制方法,分析了劈裂荷载下孔隙细观结构的演化特征及其对岩石力学性能的影响机理。第6章介绍了卸载条件下裂隙岩石变形破坏的能量特征。第7章介绍了温度作用下孔隙结构的演化规律及其对岩石变形破坏的影响。第8章介绍了三轴应力下岩石裂隙扩展规律和断裂能量机制。

参 考 文 献

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161—2179.
- [2] 时贤,程远方,蒋恕,等. 页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 32(S2): 3439—3445.
- [3] 董茜茜,马国伟,等. 含充填物的大理岩裂隙扩展过程及破坏特性[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(9): 1375—1382.
- [4] 邓继新,周浩,王欢,等. 基于储层砂岩微观孔隙结构特征的弹性波频散响应分析[J]. 地球物理学报, 2015, 58(9): 3389—3400.
- [5] 肖巧林,唐伯明. 孔隙玄武岩力学性质试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 272—276.
- [6] 王宝善,陈颢,葛洪魁,等. 高孔隙岩石变形的离散单元模型[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1336—1342.
- [7] Sahimia M. Flow and transport in porous media and fractured rock [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1996, 16: 181—182.
- [8] Biswal B, Manwart C, Hilfer R. Three-dimensional local porosity analysis of porous media [J]. Physical A, 1998, 255: 221—241.
- [9] Hilfer R. Transport and relaxation phenomena in porous media [J]. Advance in Chemical-Physics, 1996, 92: 299.
- [10] Kennedy, Lawrence A, Fridman A A, et al. Superadiabatic combustion in porous media: Wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor [J]. Fluid Mechanics Research, 1995, 22(2): 1—26.
- [11] Bekri S, Howard J, Muller J, et al. Electrical resistivity index in multiphase flow through porous media [J]. Transport in Porous Media, 2003, 51: 41—65.
- [12] 毛志强,高楚桥. 孔隙结构与含油岩石电阻率性质理论模拟研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 87—90.
- [13] 甘秀娥. 低孔低渗砂泥岩储层裂缝发育程度与产能关系[J]. 天然气工业, 2003, 3(5): 41—43.
- [14] Zisman W A. A comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rock[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1933, 19: 680—686.
- [15] Ide J M. Comparison of statically and dynamically determined Young's modulus of rocks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1936, 22: 81—92.

- [16] 刘凯欣,刘颖. 液饱和多孔介质中三维应力波的传播[J]. 力学学报,2003,35(4):469—473.
- [17] 张立海,张业成. 中国煤矿突水灾害特点与发生条件[J]. 中国矿业,2008,17(2):44—46.
- [18] 于景邨,刘志新,刘树才,等. 深部采场突水构造矿井瞬变电磁法探查理论及应用[J]. 煤炭学报,2007,32(8):818—821.
- [19] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京:煤炭工业出版社,2005.
- [20] 周心权,陈国新. 煤矿重大瓦斯爆炸事故致因的概率分析及启示[J]. 煤炭学报,2008,33(1):42—46.
- [21] 周世宁,林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [22] 付建华,程远平. 中国煤矿煤与瓦斯突出现状及防治对策[J]. 采矿与安全工程学报,2007,24(3):253—259.
- [23] 何峰,王来贵,王振伟,等. 煤岩蠕变-渗流耦合规律试验研究[J]. 煤炭学报,2011,36(6):930—933.
- [24] 王华俊. 锦屏二级水电站闸基深厚覆盖层渗流分析与控制研究[D]. 成都:成都理工大学,2005.
- [25] 仵彦卿,张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995.
- [26] 陈占清,缪协兴. 影响岩石渗透率的因素分析[J]. 矿山压力与顶板管理,2001,2:84—86.
- [27] 谢和平,冯夏庭. 灾害环境下重大工程安全性的基础研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [28] 张国新,武晓峰. 裂隙渗流对岩石边坡稳定的影响——渗流、变形耦合作用的 DDA 法[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(8):1269—1275.
- [29] 罗蛰潭,王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [30] 秦积舜,李爱芬. 油层物理学[M]. 北京:中国石油大学出版社,2006.
- [31] 杨胜来,魏俊之. 油层物理学[M]. 北京:石油工业出版社,2004.
- [32] 胡志明,把智波,熊伟,等. 低渗透油藏微观孔隙结构分析[J]. 大庆石油学院学报,2006,30(3):51—53.
- [33] Chstensen N I. Compressional wave velocities in rocks at high temperature and Pressure, critical thermal gradients, and crustal low-velocity zones [J]. Journal of Geophysical Research,1979,84(B12):6849—6857.
- [34] Vander M L. The shift of the $\alpha \sim \beta$ transition temperature of quartz associated with the thermal expansion of granite at high pressure[J]. Tectonophysics,1981,73:323—342.
- [35] Kern H,Riechter A. Temperature derivatives of compressional and shear wave velocities in crustal and mantle rocks at 6kbar confining pressure[J]. Journal of Geophysics,1981,49(1):47—56.
- [36] Kern H. P- and S- wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high Confining pressure, and high temperature and the effect of the rock microstructure [C]//High-pressure Research in Geoscience, E. Sehzreithart'sche Verlagsbuehhandlung. Stuttgart,1982:15—45.
- [37] Wai R S C,Lo K Y,Rowe R K. Thermal stress analysis in rocks with nonlinear properties [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics

- Abstracts, 1982, 19(5): 211—220.
- [38] Ito K. Effects of H_2O on elastic wave velocities in ultrabasic rocks at $900^{\circ}C$ under 1GPa [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1990, 61(3-4): 260—268.
- [39] 杨树锋, 陈汉林, 姜继双, 等. 高温高压下华南 I 和 S 型花岗岩的波速特征及其地质意义 [J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(1): 33—38.
- [40] 刘斌, 葛宁洁, Kern H, 等. 不同温压条件下蛇纹岩和角闪岩中波速与衰减的各向异性 [J]. 地球物理学报, 1998, 41(3): 371—382.
- [41] 高平, 杨骅元, 李艳军. 秦岭-大别山壳幔岩石高温高压下的电性特征 [J]. 地质科学, 1998, 33(2): 195—203.
- [42] 赵发展, 蔡敏龙, 赛飞雅. 高温高压下岩石声波及电阻率实验研究 [J]. 测井技术 [J], 1998, 22(增刊): 3—5.
- [43] 朱茂旭, 谢鸿森, 郭捷许, 等. 高温高压下滑石的电导率实验研究 [J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 429—435.
- [44] 白利平, 杜建国, 刘巍, 等. 高温高压下辉长岩纵波速度和电导率实验研究 [J]. 中国科学(D 辑), 2002, 32(11): 959—968.
- [45] 黄晓葛, 白武明, 胡健民. 斜长角闪岩弹性和流变性质的高温高压实验研究 [J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 29—37.
- [46] 张云霞, 戴明刚, 万芬, 等. 高温高压下地幔矿物岩石电导率影响因素研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1336—1345.
- [47] Wingquist C F. Elastic moduli of rock at elevated temperatures [J]. BurMines, 1969, 7269—7291.
- [48] 姜永东, 阎宗岭, 刘元雪, 等. 干湿循环作用下岩石力学性质的实验研究 [J]. 中国矿业, 2011, 20(5): 104—110.
- [49] 熊德国, 赵忠明, 苏承东, 等. 饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 998—1006.
- [50] 孙萍, 殷跃平, 吴树仁, 等. 东河口滑坡岩石微观结构及力学性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(s1): 2872—2878.
- [51] Almo J L L, Kou S Q. The influence of micro crack density on the elastic and fracture mechanical properties of stropa granite [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1985, 40(3): 161—179.
- [52] Suzuki K, Oda M, Kuwahara T, et al. Material property changes of granitic rock under long-term in immersion in hot water [J]. Engineering Geology, 1995, 40: 29—39.
- [53] 寇绍全, Alm O. 微裂隙和花岗岩的抗拉强度 [J]. 力学学报, 1987, 19(4): 366—373.
- [54] 张静华, 王靖涛, 赵爱国. 高温下花岗岩断裂特性的研究 [J]. 岩土力学, 1987, 8(4): 11—16.
- [55] 王靖涛, 赵爱国, 黄明昌. 花岗岩断裂韧度的高温效应 [J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6): 13—118.
- [56] 徐小丽, 高峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1752—1758.

- [57] Oda M. Modern developments in rock structure characterization[J]. Comprehensive Rock Engineering, 1993, (S1): 185—200.
- [58] Kwon S, Kim J. Effect of temperature variation on a rock salt deformation—A case study [J]. Mining Technology, 2005, 114(2): 89—98.
- [59] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.
- [60] 张晶瑶, 马万昌, 张风鹏. 高温条件下岩石结构特征的研究[J]. 东北大学学报, 1996, 17(1): 5—9.
- [61] 王颖轶, 张宏君, 黄醒春, 等. 高温作用下大理岩应力-应变全过程的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2345—2349.
- [62] 黄炳香, 邓广哲, 王广地. 温度影响下北山花岗岩蠕变断裂特性研究[J]. 岩土力学, 2003, 12(S2): 203—206.
- [63] 谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 4432—4446.
- [64] 秦本东, 谌伦建, 晁俊奇, 等. 高温石灰岩膨胀应力的试验研究[J]. 中国矿业大学学报[J], 2009, 38(3): 326—330.
- [65] Johnson B, Gangi A F, Handin J. Thermal cracking of rock subject to slow, uniform temperature changes [C]//Proceedings of the 19th US Symposium on Rock Mechanics. Nevada, 1978, 259—267.
- [66] Fredrich J T, Wong T F. Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 91(B12): 1243—1264.
- [67] Simmons C. Deformation of granitic rocks across the brittle-ductile transition [J]. Journal of Structural Geology, 1985, 7: 503—511.
- [68] Homand-Etienne F, Houpperta R. Thermally induced microcracking in granites: Characterization and analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1989, 26(2): 125—134.
- [69] Wang H F, Bonner B. Thermal stress cracking in granite [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B2): 1745—1758.
- [70] 寇绍全. 热开裂损伤对花岗岩变形及破坏特性的影响[J]. 力学学报, 1987, 19(6): 550—556.
- [71] 陈颢, 吴晓东, 张福勤. 岩石热开裂的实验研究[J]. 科学通报, 1999, 4(8): 880—883.
- [72] 周克群, 楚泽涵, 张元中, 等. 岩石热开裂与检测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 412—416.
- [73] Zuo J P, Xie H P, Zhou H W, et al. Thermal-mechanical coupled effect on fracture mechanism and plastic characteristics of sandstone [J]. Science in China(E), 2007, 50(6): 833—843.
- [74] 许江, 李贺, 鲜学福, 等. 对单轴应力状态下砂岩微观断裂发展全过程的实验研究[J]. 力学与实践, 1986, 4: 16—20.
- [75] 杨卫. 宏微观断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [76] 庄茁, 蒋持平. 工程断裂与损伤[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.