

“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)为主要水工建筑物，如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、龙盘、向家坝等水电站，其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米；锦屏二级水电站的 4 条引水隧洞，单洞长 16.67km，最大埋深 2525m，是目前世界上埋深与规模均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、CO₂ 地下隔离等已引起高度重视，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 CO₂ 隔离层的安全性问题，深部岩体的分区碎裂化演化机制与规律，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。

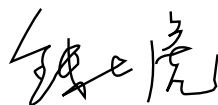
近几年来，863 计划、973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等对攻克上述科学与工程技术难题陆续给予了有力资助，并针对重大工程在设计 and 施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研，吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下，这些课题已经取得了很多很好的研究成果，并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结，并出版“岩石力学与工程研究著作丛书”，值得钦佩、支持与鼓励。

本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岩体力学的室内、原位试验方法和技术，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。本丛书较好地体现了岩石力学学科的这一属性与特色。

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 20 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 计划、863 计划、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、岩土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,先后在武汉市与葫芦岛市召开“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、试验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 75 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、国防科研领域的科研院所、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教授、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉编辑做了许多烦琐而有成效的工作,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”,这一理念已在国际上形成广泛共识。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研究的现状与成果,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”

编委会

2007 年 11 月 28 日

前 言

深部地下空间与矿产资源的开发利用,是人类应对资源能源供需矛盾、突破生存空间局限的关键路径。深部岩石工程爆破开挖过程中,常面临高水压、高应力和强烈工程扰动等极端恶劣环境,易诱发突涌水和围岩体失稳等灾害事故。围岩体受高水压高应力耦合作用导致的静态损伤,以及在此基础上承受爆破等动载荷造成的动态损伤,是形成突水、突泥灾害的两个重要原因。研究超声波在岩石中的传播与衰减特性对反演高水压高应力环境下岩石的赋存状态和表征岩石静态损伤程度具有重要作用。但仅从静态力学角度难以全面揭示岩石损伤破坏机理,需了解岩石在高水压高应力静态力学性能的基础上系统研究岩石动态力学响应特性,二者相辅相成、协同作用,共同构筑起岩石动力学理论的核心框架。因此,深入研究突涌水灾害孕育发展的各个关键过程,对深部岩石工程灾害防治具有重要理论意义与工程实际价值。

本书作者针对深部高水压岩石爆破开挖诱发突涌水灾害工程实际,研究高水压高应力岩石波传播及其动态力学响应性能。现将研究成果整理出版,期冀为深部岩石工程突涌水灾害的发生机制研究和防治提供一定参考。

本书共 11 章,各章主要研究内容如下。第 1 章绪论,主要分析深部岩石工程赋存的高水压高应力环境及其突涌水灾害频发的原因,指出高水压高应力岩石静态损伤及其动力学性能系统研究的必要性和重要性,分别对地下水、地应力和动载荷影响岩石物理力学性能进行详细总结,指出存在的问题,并阐述本书主要研究内容。第 2 章对深部高水压工程岩石进行受力分析,指出已有试验装置不能模拟研究深部水-力耦合环境下岩石动态力学性能的不足;研制高水压加载装置,进行高水压高应力岩石超声波传播试验及应力波传播试验,并验证试验装置的可行性。第 3 章和第 4 章基于自主研制的高水压高应力岩石超声波试验系统,从时域和频域角度研究水-力耦合作用下完整岩石和裂隙岩石超声波传播衰减规律,揭示高水压高应力环境下岩石超声波传播衰减机理。第 5 章设置固定的轴向静应力,对红砂岩试件开展循环水压力作用下的超声波传播试验,研究循环水压力对岩石超声波传播衰减的影响,构建红砂岩超声波传播的经验模型,研究循环水压力作用下红砂岩超声波传播的内在机理。第 6 章基于 Kelvin 模型和超声波传播试验,提出高水压高应力岩石静态黏性系数的测定方法,分析水压力和轴向静应力以及等幅循环水压力作用次数对静态黏性系数的影响规律,构建其与静态黏性系数的演化经验模型,为高水压高应

力岩石损伤本构方程和波动方程的构建提供理论参数。第 7~9 章基于自主研制的高水压高应力岩石动力学测试系统,分析水压力和轴向静应力对完整岩石和裂隙岩石动态强度变形、能量耗散、裂纹扩展和破坏模式的影响规律,探索高水压和高应力对岩石动态力学响应特性的影响机理。第 10 章对具有水压力和轴向静应力的岩石开展循环冲击试验,分析水压力和轴向静应力对岩石动态强度劣化、疲劳变形和能量耗散的影响规律,研究岩石动态力学参数随循环冲击次数的演化规律,揭示高水压高应力岩石动态疲劳力学响应的劣化机理。第 11 章基于 Maxwell 模型,通过应力波衰减系数反演岩石动态黏性系数,建立其理论表达式;通过具有水压力和轴向静应力的冲击试验得到应力波衰减系数随谐波频率的变化特性,确定计算岩石动态黏性系数时的谐波段及其应力波衰减系数,得到水-力耦合岩石动态黏性系数的测定方法,为深部岩石工程灾害防治提供关键数据支撑。

本书的相关研究工作得到了国家自然科学基金项目(52174112, 51964015)和江西省自然科学基金项目(20232ACB204015)的支持。作者课题组中博士和硕士研究生都为本书中的研究付出了辛勤努力,在此一并表示感谢。

高水压高应力岩石波传播及其动态力学响应特性的研究尚处于探索阶段,由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

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

第 1 章 绪论	1
1.1 深部高水压工程岩石赋存环境及灾害	1
1.2 含水率对岩石物理力学性能的影响	2
1.3 孔隙水压力对岩石物理力学性能的影响	4
1.4 岩石(体)动态响应特性的研究	5
1.5 本书内容	6
参考文献	9
第 2 章 高水压高应力岩石超声波及动态力学性能测试技术	13
2.1 深部高水压工程岩石受力简化	13
2.2 岩石超声波及动力学测试系统的组成	14
2.2.1 动静组合加载试验系统的组成	14
2.2.2 高水压高应力岩石超声波测试系统的组成	15
2.2.3 高水压高应力岩石动力学测试系统的组成	17
2.2.4 端盖、压盖和密封腔的连接	19
2.3 高水压加载装置的密封设计及有效性	21
2.3.1 密封原理及材料确定	21
2.3.2 轴向密封设计	23
2.3.3 径向密封设计	24
2.3.4 密封性能测试	25
2.3.5 高水压加载装置对超声波和应力波传播的影响	26
2.4 高水压高应力岩石超声波传播试验	27
2.4.1 试验方案	27
2.4.2 试验结果	29
2.5 高水压高应力岩石应力波传播试验	32
2.5.1 试验方案	32
2.5.2 试验结果	33
2.6 本章小结	36

参考文献	36
第3章 高水压高应力完整岩石超声波传播衰减特性	38
3.1 超声波首波波形的演化特性	38
3.1.1 红砂岩超声波首波波形的演化特性	38
3.1.2 石灰岩超声波首波波形的演化特性	39
3.2 超声波波速的演化特性	41
3.2.1 水压力对岩石超声波波速的影响	41
3.2.2 轴向静应力对岩石超声波波速的影响	44
3.3 超声波首波幅值的演化特性	46
3.3.1 水压力对岩石超声波首波幅值的影响	46
3.3.2 轴向静应力对岩石超声波首波幅值的影响	49
3.4 超声波首波能量的演化特性	52
3.4.1 水压力对岩石超声波首波能量的影响	52
3.4.2 轴向静应力对岩石超声波首波能量的影响	54
3.5 超声波频谱的演化特性	55
3.5.1 红砂岩超声波频谱特征	55
3.5.2 石灰岩超声波频谱特征	57
3.6 超声波频域传输系数的演化特性	59
3.6.1 超声波频域传输系数的定义	59
3.6.2 红砂岩超声波频域传输系数	59
3.6.3 石灰岩超声波频域传输系数	64
3.7 质心频率的演化特性	65
3.7.1 红砂岩质心频率的演化特性	65
3.7.2 石灰岩质心频率的演化特性	67
3.8 品质因子的演化特性	69
3.8.1 红砂岩品质因子的演化特性	69
3.8.2 石灰岩品质因子的演化特性	70
3.8.3 品质因子和波阻抗关系	71
3.9 水压力和轴向静应力对岩石超声波传播衰减特性的机理探讨	72
3.10 本章小结	73
参考文献	74
第4章 高水压高应力裂隙岩石超声波传播衰减特性	75
4.1 裂隙岩石超声波传播试验方案	75
4.2 裂隙岩石超声波首波波形的演化特性	78
4.2.1 水压力对裂隙岩石超声波首波波形的影响	80

4.2.2	裂隙倾角对裂隙岩石超声波首波波形的影响	81
4.2.3	裂隙长度对裂隙岩石超声波首波波形的影响	82
4.3	裂隙岩石超声波波速的演化特性	83
4.3.1	水压力对裂隙岩石超声波波速的影响	83
4.3.2	裂隙倾角对裂隙岩石超声波波速的影响	85
4.3.3	裂隙长度对裂隙岩石超声波波速的影响	86
4.4	裂隙岩石超声波首波幅值的演化特性	89
4.4.1	水压力对裂隙岩石超声波首波幅值的影响	89
4.4.2	裂隙倾角对裂隙岩石超声波首波幅值的影响	91
4.4.3	裂隙长度对裂隙岩石超声波首波幅值的影响	92
4.5	裂隙岩石超声波首波能量的演化特性	94
4.6	裂隙岩石超声波频谱的演化特性	97
4.6.1	水压力对裂隙岩石超声波频谱的影响	97
4.6.2	裂隙倾角对裂隙岩石超声波频谱的影响	100
4.6.3	裂隙长度对裂隙岩石超声波频谱的影响	102
4.7	裂隙岩石超声波频域传输系数的演化特性	103
4.7.1	水压力对裂隙岩石超声波频域传输系数的影响	103
4.7.2	裂隙倾角对裂隙岩石超声波频域传输系数的影响	105
4.7.3	裂隙长度对裂隙岩石超声波频域传输系数的影响	107
4.8	裂隙岩石品质因子的演化特性	109
4.8.1	水压力对裂隙岩石品质因子的影响	109
4.8.2	裂隙倾角对裂隙岩石品质因子的影响	112
4.8.3	裂隙长度对裂隙岩石品质因子的影响	114
4.9	裂隙岩石频带能量的演化特性	114
4.9.1	超声波频带能量的分布	114
4.9.2	水压力对不同频带能量衰减系数的影响	116
4.9.3	裂隙倾角对不同频带能量衰减系数的影响	120
4.9.4	裂隙长度对不同频带能量衰减系数的影响	121
4.10	本章小结	122
	参考文献	122
第 5 章	循环水压力作用下岩石超声波传播衰减特性	124
5.1	循环水压力作用下岩石超声波传播试验方案	124
5.2	循环水压力作用下岩石超声波首波波形的演化特性	125
5.3	循环水压力作用下岩石超声波波速的演化特性	128
5.4	循环水压力作用下岩石超声波首波幅值的演化特性	129

5.5	循环水压力作用下岩石超声波首波能量的演化特性	131
5.6	循环水压力作用下岩石超声波频谱的演化特性	133
5.7	循环水压力作用下岩石超声波频谱能量传输系数的演化特性	135
5.8	循环水压力作用下岩石质心频率的演化特性	137
5.9	循环水压力作用下岩石品质因子的演化特性	138
5.9.1	循环水压力对岩石品质因子的影响	139
5.9.2	循环水压力作用下岩石品质因子与波阻抗的关系	140
5.10	本章小结	141
	参考文献	142
第6章	高水压高应力岩石静态黏性系数的测定及其演化特性	143
6.1	高水压高应力岩石静态黏性系数测定的理论基础	143
6.1.1	岩石本构模型的选取	144
6.1.2	静态黏性系数确定的理论方法	145
6.1.3	超声波空间衰减系数的确定	145
6.2	高水压高应力岩石静态黏性系数的试验测定	146
6.2.1	超声波数据的选定	146
6.2.2	静态黏性系数计算频率的选取	147
6.2.3	静态黏性系数测定方法的验证	148
6.3	岩石静态黏性系数随水压力和轴向静应力的演化特性	149
6.3.1	红砂岩静态黏性系数与水压力的关系	149
6.3.2	红砂岩静态黏性系数与轴向静应力的关系	152
6.3.3	石灰岩静态黏性系数与水压力的关系	153
6.3.4	石灰岩静态黏性系数与轴向静应力的关系	154
6.4	岩石静态黏性系数随等幅循环水压力作用次数的演化特性	154
6.4.1	红砂岩静态黏性系数与等幅循环水压力作用次数的关系	154
6.4.2	红砂岩静态黏性系数随等幅循环水压力作用次数的演化模型	155
6.5	本章小结	156
	参考文献	157
第7章	高水压高应力岩石动态强度和变形特性	158
7.1	试验方案	158
7.2	试验结果	160
7.2.1	水压力和轴向静应力对岩石动态应力-应变曲线的影响	160
7.2.2	岩石典型动态应力-应变曲线	161
7.3	岩石动态强度的演化特性	164
7.3.1	动态峰值应力与水压力的关系	164

7.3.2 动态峰值应力与平均应变率的关系	165
7.3.3 动态残余应力与水压力的关系	166
7.4 岩石动态变形的演化特性	167
7.4.1 平均应变率与水压力的关系	167
7.4.2 动态极限应变与水压力的关系	169
7.4.3 动态极限应变与平均应变率的关系	170
7.4.4 动态残余应变与水压力的关系	171
7.5 水-力耦合作用下岩石动态起裂分析模型的构建	172
7.5.1 水-力耦合作用下岩石的动态应力强度因子	172
7.5.2 水-力耦合作用下岩石的动态起裂韧度	174
7.5.3 水压力和轴向静应力对岩石动态起裂扩展的影响	175
7.6 水-力耦合对岩石的强化及弱化作用机理	178
7.7 本章小结	179
参考文献	180
第 8 章 高水压高应力岩石动态能量演化与破碎特性	181
8.1 试验方案	181
8.2 试验结果	183
8.3 岩石动态能量的演化特性	185
8.3.1 能量反射率和透射率的演化特性	185
8.3.2 能量耗散率随水压力的演化特性	189
8.3.3 能量耗散率随轴向静应力的演化特性	191
8.3.4 能量耗散率的应变率效应	193
8.4 基于能量耗散的岩石突水倾向性指数	194
8.4.1 岩石动态应力-应变曲线能量划分	194
8.4.2 岩石突水倾向性指数随水压力的变化关系	196
8.5 岩石动态破碎特性	198
8.5.1 岩石动态破坏模式	198
8.5.2 岩石动态破碎程度的演化特性	200
8.6 本章小结	202
参考文献	203
第 9 章 高水压高应力裂隙岩石动态力学响应特性	204
9.1 试验方案	204
9.2 试验结果	206
9.3 水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态强度的影响	209
9.3.1 裂隙岩石动态峰值应力随水压力的变化关系	209

9.3.2	裂隙岩石动态峰值应力随裂隙倾角的变化关系	210
9.3.3	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态临界卸载应力的影响	212
9.3.4	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态残余应力的影响	213
9.4	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态变形的影响	215
9.4.1	裂隙岩石动态应变时程曲线的演化特性	215
9.4.2	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态极限应变的影响	216
9.4.3	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态残余应变的影响	217
9.4.4	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石应变率的影响	218
9.4.5	裂隙岩石平均应变率随水压力的变化关系	220
9.4.6	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态变形模量的影响	223
9.5	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态能量演化的影响	224
9.5.1	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态能量透射率的影响	224
9.5.2	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态能量耗散率的影响	225
9.6	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态破坏特性的影响	226
9.6.1	水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态破坏模式的影响	226
9.6.2	水压力作用下裂隙岩石的典型裂纹动态扩展形态	232
9.7	本章小结	235
	参考文献	236
第 10 章	循环冲击作用下高水压高应力岩石动态疲劳力学响应特性	237
10.1	试验方案	237
10.2	试验结果	239
10.2.1	循环荷载下反射波和透射波波形的演化特性	239
10.2.2	循环荷载下应变率时程曲线的演化特性	240
10.2.3	循环荷载下动态应力-应变曲线的演化特性	241
10.3	水压力和轴向静应力对岩石动态强度劣化的影响	244
10.3.1	水压力和轴向静应力对岩石抵抗冲击载荷能力的影响	244
10.3.2	水压力和轴向静应力对岩石动态峰值应力劣化率的影响	245
10.3.3	动态峰值应力劣化经验模型的构建	247
10.3.4	动态峰值应力随平均应变率的变化关系	248
10.3.5	水压力和轴向静应力对岩石强度劣化的作用机理分析	251
10.4	水压力和轴向静应力对岩石动态疲劳变形的影响	251
10.4.1	岩石动态极限应变随循环冲击次数的变化关系	251
10.4.2	岩石动态变形模量随循环冲击次数的变化关系	254
10.4.3	累积动态残余应变随循环冲击次数的变化关系	255
10.4.4	岩石平均应变率随循环冲击次数的变化关系	256

10.5 水压力和轴向静应力对岩石动态能量演化的影响	257
10.5.1 动态能量时程曲线阶段划分	257
10.5.2 循环动荷载对岩石动态能量时程曲线的影响	258
10.5.3 水压力和轴向静应力对岩石耗散能时程曲线的影响	260
10.5.4 能量耗散率随循环冲击次数的变化关系	261
10.5.5 岩石平均应变率与单位体积耗散能的关系	262
10.5.6 水压力和轴向静应力对岩石动态品质因子的影响	264
10.5.7 动态峰值应力随岩石动态品质因子的变化关系	266
10.6 本章小结	268
参考文献	268
第 11 章 高水压高应力岩石动态黏性系数的测定及其演化特性	270
11.1 动态黏性系数测定试验方案	270
11.2 高水压高应力岩石动态黏性系数的确定方法	271
11.2.1 模型选择	271
11.2.2 岩石动态黏性系数的求解	273
11.2.3 岩石动态黏性系数的测试方法	273
11.2.4 岩石应力波衰减系数计算频率范围的确定	275
11.2.5 试验验证	276
11.3 高水压高应力岩石动态黏性系数的演化特性	279
11.3.1 轴向静应力对岩石动态黏性系数的影响	279
11.3.2 水压力对岩石动态黏性系数的影响	281
11.4 水压力和轴向静应力对岩石动态黏性的影响机理	284
11.4.1 轴向静应力对岩石动态黏性系数的影响机理	284
11.4.2 水压力对岩石动态黏性系数的影响机理	285
11.5 本章小结	286
参考文献	287

第1章 绪 论

1.1 深部高水压工程岩石赋存环境及灾害

随着全球浅部矿产资源日趋枯竭，以及国家西部大开发战略和国家综合立体交通网规划的深入实施，深部地下空间开发利用已成为保障能源安全、拓展国土空间的刚性需求。深部煤炭资源开采和深埋隧洞(例如九龙川煤矿、木寨岭隧道、雅鲁藏布江下游水电工程等)等岩石工程多处于高水压和高应力共同作用的环境中^[1-9]，例如部分煤矿深部突水工作面承压水的压力高达 15MPa^[8]、锦屏水电站引水隧洞的水压力达到 10MPa^[1]。由于高水压高应力等赋存地质环境的特殊性，在爆破等动态扰动下，邻近既有隧(巷)道深受突水、突泥水等世界性难题的困扰，引发了许多重大地质灾害和安全事故，例如南丹拉甲坡矿发生特大透水事故、徐州三河尖矿大型底板突水事故^[2]。应力波在高水压高应力工程岩石中的传播示意图如图 1.1 所示。缺乏对处于高水压高应力岩石静态损伤程度及其动力学性能的系统研究，不能掌握解决复杂工况下突涌水防治的关键技术，是深部高水压岩石工程灾害频发且没有根治的主要原因之一。

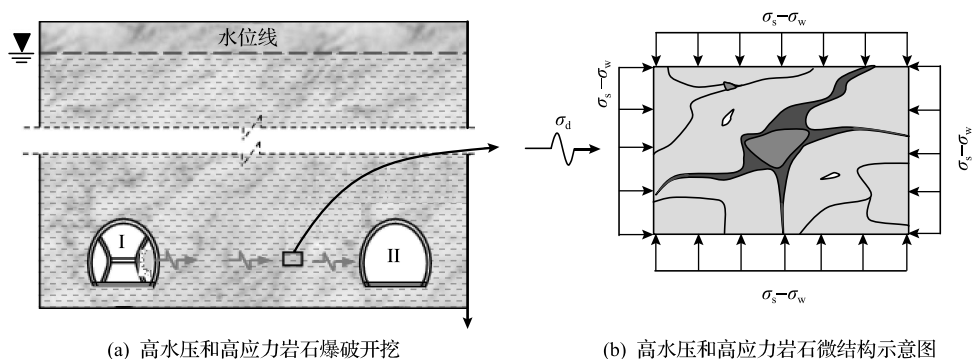


图 1.1 应力波在高水压高应力工程岩石中的传播示意图

I. 新建岩石工程; II. 既有岩石工程; σ_d . 应力波; σ_s . 地应力; σ_w . 水压力

工程实践中,深部高水压环境下的突涌水灾害在施工的不同阶段均可能发生,在施工前期发生的突涌水,其形成与地应力和水压力的共同作用紧密相关。从理论研究角度来看,地应力和水压力的联合作用促使岩石内部产生复杂的物理力学变化。地应力改变了岩石内部的应力分布状态,使得岩石内部原本存在的微缺陷

周围应力集中程度加剧,而水压力则通过渗透作用进入微裂纹,一方面增加了裂纹尖端的应力强度,另一方面弱化了岩石材料的力学性能,两者协同促进微裂纹的扩展与贯通。随着微裂纹的不断扩展与贯通,岩石的静态损伤程度逐渐累积,这种损伤累积导致岩石的静态力学性能发生劣化,如弹性模量降低、强度减小等。同时,地应力和水压力共同控制着岩石的含水率,较高的含水率会进一步削弱岩石的力学性能。此外,它们还影响着裂隙的应力强度因子和断裂韧度,应力强度因子的增大以及断裂韧度的降低,最终使得岩石裂纹更容易起裂和扩展,这一系列微观过程的综合作用,是地下岩石工程发生前期突涌水的微观过程和机理。

发生在施工中后期的突涌水的成因更为复杂,除了水-力耦合作用下岩石静态物理力学性能的劣化外,爆破动载荷作用下岩石的动态力学性能对其影响显著。在施工中后期,爆破作业频繁进行,爆破产生的动载荷对已存在静态损伤的岩石产生强烈作用。静态损伤使得岩石的黏性特性发生改变,岩石内部结构变得松散,波阻抗也随之改变。这种改变影响了岩石在动载荷作用下的动态力学响应性能,例如,波阻抗的变化会导致爆破应力波在岩石中的传播特性改变,进而影响岩石的起裂和扩展机理。当岩石承受爆破动载荷时,岩石内的高压水会产生多种复杂效应:弯月面效应使得高压水在微裂纹尖端形成特殊的应力分布,影响裂纹尖端的应力集中;斯特藩效应导致高压水与岩石之间发生复杂的水-力耦合作用,进一步影响岩石的力学性能;牛顿内摩擦效应则改变了高压水在微裂纹中的流动特性,增加了水流对裂纹壁的作用力。这些效应与高水压和高应力一起,共同控制着微裂纹处的动态应力状态、动态应力强度因子和断裂韧度。在它们的综合作用下,裂隙的动态起裂和扩展特性发生显著变化,岩石的动态损伤变量增大,黏性系数改变,动态强度下降,变形性能发生较大变化,能量耗散增加,破坏模式也从相对较为规则变得更加复杂。这些变化促使在围岩体中逐渐形成高压水流通道,这就是深部高水压环境下中后期突涌水形成的内在原因。

目前对含水率(或饱和度)影响岩石物理力学性能、高水压影响岩石静态力学性能、地应力影响岩石应力波传播衰减特性进行了较为系统的研究。但由于相关试验技术与装置的缺失,关于水压力和地应力共同作用下岩石超声波传播衰减、动态力学响应及应力波传播衰减等均未进行系统研究。

1.2 含水率对岩石物理力学性能的影响

1. 物理性能

根据 Gassmann 理论以及大量的实测数据,随着含水率的增大,由于岩石矿物成分吸附水以及水体占据孔隙中的空间,岩石密度随含水率的增大而增大;含

水率对岩石声波或纵横波速有较大的影响,随着饱和度的增大,岩石波速逐渐增大;由于包含的矿物成分和微观结构不同,不同岩石声波波速或纵横波波速随含水率的变化规律不同^[2,10]。基于声波波速、波形时域或频域特性,可以反演岩石内部的孔隙、微裂隙的发育情况以及岩石饱和程度。饱和岩石的声波波速不仅与含水率有关,对频率也有一定的依赖性。出现速度频散和衰减的现象,与多孔介质中固体-流体的相互作用机制有关,主要有 Biot 模型、喷射流模型、裂缝-孔隙微结构模型、BISQ 模型和双孔模型等^[11]。巴晶等^[12]基于双重孔隙介质模型,得到非饱和岩石中的 Biot-Rayleigh 方程组,重点研究了非饱和岩石孔隙率与饱和度对纵波速度与衰减的影响,结果表明,纵波速度在声波频段以上对含气饱和度敏感;地震频段的衰减随含气饱和度的变化呈渐变的趋势。基于上述研究得到含水率对岩石密度和波速的影响特性,再结合岩石波阻抗是密度和波速的乘积,可以得到含水率的增大也影响岩石(体)的应力波传播特性。速度频散理论为研究高压岩石应力波传播衰减机理提供强有力的基础。

2. 静态力学性能

对沉积岩、岩浆岩和变质岩进行单轴压缩试验、巴西圆盘试验、直接拉伸试验和三轴压缩试验,结果表明含水率对岩石静态力学特性具有普遍的影响。随着含水率的增大,不同岩性岩石的静态强度、弹性模量、泊松比、耗散能均逐渐降低,岩石的破坏模式发生较大改变,表现出水对岩石静态力学性能的弱化作用^[13-15]。红砂岩特征应力随着含水率增大呈负指数函数衰减的趋势,起裂应力与闭合应力之差随着含水率的增大而减小,强度和弹性模量损失系数与含水率也具有指数函数关系^[16]。随着含水率的增大,煤岩的应力-应变曲线的压密阶段增大,弹性阶段缩小,屈服阶段更加显著,由剪切破坏逐渐演变为拉伸和剪切组合破坏;抗压强度与含水率呈负线性关系,峰值应变与含水率呈正线性关系,弹性模量与含水率呈负指数关系^[17]。不同岩性岩石随含水率递增的弱化性能不同,泥质粉砂岩单轴抗压强度和抗拉强度随含水率的增大先快速减小后趋于稳定,低含水率变化时,强度变化较灵敏,弹性模量随含水率的增大而线性降低^[18]。饱和状态花岗岩的平均断裂韧度为干燥状态下的 87.5%,且整体的变形变大,刚度变小,脆性减弱,强度变低;饱和花岗岩的声发射振铃计数率远小于干燥状态时的声发射振铃计数率^[19]。尽管岩石的岩性多种多样,但水对岩石静态力学特性都有弱化作用;相比变质岩和岩浆岩,水对沉积岩的弱化作用更普遍更严重。造成岩石静态力学性能弱化的原因是水岩的物理化学作用,水在岩石中主要以结合水和自由水两种方式存在,对岩石能够产生连接、润滑、水楔、孔隙水压力和溶蚀等作用^[20-22]。由上述研究可以看出,随着含水率的增大,岩石静态强度、变形、弹性模量、泊松比以及破坏模式等都出现了不同程度的弱化现象。在高水压和高静应力耦合作

用下,岩石的含水率及其弱化结果必然增强,进而对岩石的应力波传播衰减特性有极大的影响。

3. 动态力学性能

在认识到地下工程岩石爆破开挖时,多数情况下岩石处于含水状态,研究者开始聚焦含水率对岩石(体)动态响应方面的研究,分别对不同岩性的岩石开展了冲击试验^[23-27]。与含水率对岩石静态力学特性的影响不同,含水率对岩石动态力学性能的影响具有双重性,除了含水率弱化效应外,还有对加载速率的依赖性^[23-26]。当加载率较低时,饱和板岩的拉伸强度低于干燥板岩,岩石强度呈饱和弱化现象;当加载率较高时,饱和板岩的拉伸强度高于干燥板岩,岩石强度呈饱和强化现象^[28],红砂岩动态压缩试验也具有类似的结论^[29]。当岩石具有静应力时,含水率对岩石的动态力学特性也有较大的影响,且在静应力和饱和水共同作用下,岩石动态破坏过程和机理更为复杂^[24,30]。岩石在冲击载荷作用下,由于既存在水对岩石的弱化作用,又存在应变率、孔隙水以及岩石结构之间的动力耦合强化作用,这两种作用始终存在,但随着应变率的变化,两种作用的效能也会发生改变^[31],作用机理主要有弯月面效应、斯特藩效应和牛顿内摩擦效应等^[30,32]。关于含水率对完整岩石应力波传播的研究较少, Li 等^[33]和 Huang 等^[34]创新试验装置,研究了不同含水率时节理岩石应力波传播衰减特性。研究结果表明,饱和程度对岩石动态力学性能有较大的影响,其影响规律及机理又与应变率(或加载率)有关,这些为高水压下岩石应力波传播衰减特性研究提供很好的试验及分析方法。

1.3 孔隙水压力对岩石物理力学性能的影响

岩石工程中孔隙水压力包括静孔隙水压力和超静孔隙水压力。本书仅讨论静孔隙水压力问题。

孔隙水压力通过两种形式影响岩石力学性能,一是孔隙水压力会抵消部分轴向应力和围压对岩石的影响,通过有效应力作用岩石,进而影响岩石的强度、变形以及破坏过程的能量耗散等;二是孔隙水压力对岩石内部裂纹扩展、贯通起到加剧作用,岩石微裂纹的扩展规律及机理与无孔隙水压力作用时的区别较大^[35-37]。孔隙水压力与岩石损伤发展相互影响,互为关联,损伤扩展造成孔隙水压力降低,孔隙水压力降低又影响损伤发展^[38]。孔隙水压力削弱岩石的峰值强度、增大其能量耗散程度、降低其储能能力,耗散程度与孔隙水压力呈线性关系,有效峰值强度折减系数随着孔隙水压力增大近似呈线性增长的趋势,孔隙水压力的增大有助于增强岩石的稳定性^[36,39]。高水压的存在抑制岩石由脆性向塑性的发展,降低岩

石的强度,同时对软化区裂纹的扩展、贯通起到加剧作用^[35],这是由于裂隙中高水压降低了岩石裂隙尖端附近高应力集中效应^[40],孔隙水压力使得扩容提前发生,扩容现象与水岩耦合作用相互促进^[36]。孔隙水压力增强岩石的变形能力,黏弹性模量随时间和水压力呈指数函数变化^[41]。由上述研究可以看出,从微观角度看,孔隙水压力有利于岩石微裂纹的扩展、岩石封闭孔隙的贯通和岩石含水率的增加;在宏观角度上,孔隙水压力与外部作用力抵消形成有效应力,对岩石强度、变形、破坏模式及破坏机理都有较大影响,改变岩石破坏的脆延性和能量耗散特性,这些必然进一步影响岩石应力波传播性能。

由于试验技术与装置研制的滞后,水压力对岩石动态力学响应性能影响的研究严重落后于工程实践。在分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)的基础上,可以实现不同形式的水压力加载,用于模拟工程实际中的水压力^[42-45]。水压力对煤岩和红砂岩动态强度和能量利用率的提升有积极作用^[44],但水压力抵消围压对岩石动态变形的束缚作用时,随着水压力的增大岩石的动态强度也会减小^[45]。由于侧向水压力对岩石裂纹有闭合作用,随着水压力的增大,岩石动态断裂韧度逐渐增大;当水压力较高时,只有较大的冲击载荷才能使岩石发生I型断裂破坏,例如,当水压力为20MPa,加载率低于 $100\text{GPa}\cdot\text{m}^{1/2}/\text{s}$ 时,岩石不发生断裂破坏^[45]。水压力对岩石强度具有强化和弱化双重作用,这加深了突涌水灾害防治技术的复杂性,研究水压力对岩石动态力学性能的作用机理势在必行。

1.4 岩石(体)动态响应特性的研究

岩石动态力学性能包括两大方面,一是岩石动态响应特性,二是岩石应力波传播特性。岩石动态响应特性主要指在动载荷作用下,岩石表现出一系列关于强度、变形、能量耗散以及破坏模式及程度的特征,是研究岩石爆破开挖、地震灾害以及其他动态扰动的关键基础,研究手段主要是利用SHPB以及动静组合加载试验装置进行试验^[46-48]。考虑到工程岩石处于不同的环境条件,例如地应力和温度等,研究者分别对不同岩性的岩石开展了常规冲击试验^[49]、“静应力+冲击”试验^[50]、“温度+静应力+冲击”试验^[51]等,分别模拟研究工程岩石承受的温度和地应力对岩石动态强度、变形、能量耗散、破坏模式及破坏机理的影响。试验结果表明,静应力的存在会对岩石材料的动态压缩强度与破坏模式产生明显影响;具有静应力岩石材料的动态压缩强度依旧表现出明显的率相关性,初始应力状态是影响岩石动态压缩强度变化的重要因素。此外,温度也会对静水围压状态下岩石的动态压缩强度产生很大影响。针对深部地下工程岩石多次爆破开挖,研究者研究了具有三维地应力岩石的动态疲劳力学性能,得到地应力对岩石动态强度劣化、疲劳变形、能量耗散、损伤累积演化、破坏模式及破坏机理^[52]。

多次(或循环)动载荷作用下岩石的动态力学响应称为岩石动态疲劳力学性能,包括动态强度劣化、疲劳变形、能量耗散、损伤累积演化、破坏模式及破坏机理^[52]。利用微震监测等技术可以研究多次爆破开挖过程中围岩体的变形和损伤累积演化特性;除此之外,利用 SHPB 及其改进装置可以对岩石试件进行循环冲击试验,模拟多次爆破动载荷以及地应力和地温等环境。随着循环冲击动载荷的作用,岩石动态峰值应变、残余应变、平均应变率和单位体积吸收能逐渐增大,岩石动态峰值应力逐渐减小,这些均表明循环冲击作用下岩石具有动态强度劣化、疲劳变形和能量耗散的特性。根据冲击试验得到的入射波和透射波,计算岩石的波阻抗值,可以很好地定义循环冲击作用时岩石的动态损伤变量^[53];随着循环冲击次数的增加,岩石的动态损伤累积演化具有快速上升—平缓发展—急速上升的态势;岩石动态损伤累积演化模型为构建动态疲劳损伤本构模型奠定了基础^[54]。具有三维地应力岩石的动态疲劳力学性能方面的研究,为深部高应力岩石工程爆破开挖建设与运营奠定了坚实的理论基础。但目前仅分别考虑了地应力、温度或含水的地质环境,没有关注地应力和水压力共同存在时的工况,也没有研究岩石动态黏性系数和动态断裂韧度随动载荷循环作用次数的劣化特性,相应的理论研究远落后于深部高水压岩石工程实践的需要,亟待进行水-力耦合下岩石动态疲劳力学性能研究。

1.5 本书内容

1. 水-力耦合作用下岩石超声波传播和动力学测试试验技术及装置

针对深部高水压高应力环境下突涌水灾害防治的迫切需求,本书围绕工程岩石在水压力、地应力和爆破动载荷共同作用下的应力状态开展研究。水压力促进岩石含水率增大和裂隙扩展程度,与地应力一起控制岩石静态物理力学性能,进而影响其超声波和爆破应力波传播衰减性能。但现有试验装置不能模拟研究水压力和地应力共同作用下岩石超声波传播及动态力学测试,本书提出了水-力耦合作用下岩石超声波传播和动力学性能测试技术,并研制了相应的试验装置,主要包括高水压高应力岩石超声波测试系统(含轴向静应力加载、超声波测试、高水压加载模块)和动力学试验系统(动力扰动发生装置和数据采集系统)。详细阐述了高水压加载装置的密封原理、密封圈材料的选取以及轴向和径向密封结构的设计方法,并通过测试验证了其密封性能良好,且不影响超声波和应力波传播。最后开展岩石超声波和应力波传播试验,验证了所提出的深部高水压环境下岩石超声波传播与动力学性能测试技术的可行性,以及所研制的试验装置的有效性。

2. 水-力耦合作用下岩石超声波传播衰减特性及其黏性系数的确定

借助自主研制的高水压高应力岩石超声波测试系统,研究完整岩石和裂隙岩石在水-力耦合作用下的超声波传播衰减特性。以孔隙结构特性差异明显的红砂岩和石灰岩为研究对象,通过设置不同的水压力、轴向静应力和裂隙几何产状,模拟地下水压力和地应力环境,开展超声波传播衰减试验。从时域分析出发,分析完整岩石和裂隙岩石超声波波速、首波幅值和能量随水压力和轴向静应力的演变趋势,研究地应力和水压力耦合效应对完整岩石和裂隙岩石超声波传播特性的影响规律。剖析完整岩石和裂隙岩石超声波频谱特征、频域传输系数、质心频率和品质因子的波动规律,从频率响应角度揭示高水压高应力环境下岩石超声波传播衰减机理。建立完整岩石和裂隙岩石声学参数与水压力、轴向静应力之间的经验关系模型,不仅为深部高水压环境下岩石损伤程度的表征以及水压力和地应力的反演提供超声波传播理论基础,也为深部岩石工程灾害预警、稳定性评估等关键技术的发展贡献绵薄之力。

依托自主研制的高水压高应力岩石超声波试验系统,设定恒定的轴向静应力,并选取五个循环水压力等级,对红砂岩试件开展循环水压力作用下的超声波试验。研究循环水压力对岩石超声波波形与波速的影响特性,分析超声波波形及波速随等幅循环水压力作用次数的变化特性。研究循环水压力对岩石超声波首波幅值和能量的影响,剖析首波幅值、能量随等幅循环水压力作用次数的变化关系,构建适用于红砂岩超声波传播的经验模型,揭示循环水压力作用下红砂岩超声波传播的内在机理。基于岩石超声波频谱能量,创新性地定义频谱能量传输系数,详细分析该系数的变化规律,并建立红砂岩超声波频域传播的经验模型。此外,通过计算不同工况下红砂岩的质心频率,运用谱比法获取相应的品质因子,研究循环水压力对红砂岩超声波质心频率和品质因子的影响特性。

为深入研究高水压高应力环境下岩石黏性性能的演变特征,基于 Kelvin 模型,提出高水压高应力岩石静态黏性系数的测定方法。结合不同水压力和轴向静应力作用下岩石超声波传播试验数据,计算岩石超声波空间衰减系数的试验值和静态黏性系数的理论值。研究岩石超声波空间衰减系数和静态黏性系数的频率相关性,确定岩石静态黏性系数的计算频率;将静态黏性系数计算得到的超声波波速与实测波速进行对比,验证测定方法的正确性。计算高水压高应力岩石静态黏性系数,研究水压力和轴向静应力以及等幅循环水压力作用次数对静态黏性系数的影响规律和机理,构建静态黏性系数与水压力、轴向静应力和等幅循环水压力作用次数的演化经验模型,分析孔隙结构对黏性系数变化的影响,为高水压高应力岩石损伤本构方程和波动方程构建提供理论参数,为深部工程相关分析提供依据。

3. 动载荷作用下具有水压力和地应力岩石的动态力学性能

对完整红砂岩试件进行不同水压力和轴向静应力作用下的冲击试验,分析水压力和轴向静应力对岩石动态应力-应变曲线变化特性的影响。分析岩石动态峰值应力、残余应力、极限应变、平均应变率、能量反射率和透射率、能量耗散率、岩石破坏模式和破碎程度等随水压力、轴向静应力的变化规律,并构建水压力和轴向静应力对岩石动态力学参数的演化经验模型。研究岩石动态强度和变形参数随应变率的变化特性,探索水压力对岩石强度和变形性能的率相关性的影响机理。综合考虑岩石应力-应变曲线峰前和峰后阶段能量转换特性,利用能量演化参数定义岩石突水倾向性指数,反演水压力和轴向静应力对岩石突涌水的影响。计算具有水压力和轴向静应力下的岩石微裂纹动态应力强度因子,分析微裂纹起裂与扩展的影响因素及机理,探索高水压和高应力对岩石力学响应特性的影响机理。

基于高水压高应力岩石动力学测试系统,设置不同的水压力和轴向静应力,对具有不同裂隙工况的岩石试件进行冲击试验,分析水压力和裂隙倾角对裂隙岩石动态应力-应变曲线的影响特性。基于动态应力-应变曲线,计算裂隙岩石动态强度特征参数,构建水压力作用下裂隙岩石动态强度参数的演化经验模型,探索水压力及裂隙倾角对裂隙岩石动态强度的影响机理。利用动态应变时程曲线、应变率时程曲线和应力-应变曲线,计算裂隙岩石动态变形特征参数,探索水压力及裂隙倾角对裂隙岩石动态变形的影响机理。分析裂隙岩石的能量透射率和能量耗散率随水压力和裂隙倾角的演化规律,从能量耗散角度解释岩石损伤破坏机理。通过分析高水压裂隙岩石在动态载荷下的裂纹萌生和扩展过程,系统揭示水压力和裂隙倾角对裂隙岩石破坏模式和典型裂纹扩展形态的影响规律及机理。

为研究循环动荷载作用下,水压力与轴向静应力对红砂岩动态力学性能的劣化机制,采用自主研发的高水压高应力岩石动力学测试系统,对红砂岩进行循环冲击试验,通过设置不同的水压力与轴向静应力工况,模拟研究工程现场的实际水压力及地应力环境。分析具有不同水压力和轴向静应力岩石在循环冲击过程中反射波和透射波波形、应变率时程曲线、动态应力-应变曲线的变化特征。研究岩石动态峰值应力、动态极限应变、动态变形模量和能量耗散随循环冲击次数的演化规律,并分别构建其演化经验模型。分析水压力和轴向静应力对岩石动态强度劣化、疲劳变形和能量耗散的影响规律及机理,得到水-力耦合下岩石在循环冲击过程中的动态疲劳力学响应特性。研究循环动荷载作用过程中动态极限应变、变形模量及平均应变率的变化特征,表征岩石动态力学响应特性劣化过程中的应变率效应。

基于高水压高应力岩石在冲击载荷作用下的黏弹性变形特征,采用 Maxwell 模型建立水-力耦合下岩石的一维黏弹性波的波动方程。应用谐波法求解波动方

程, 并得到岩石动态黏性系数的理论表达式。研究冲击试验得到的应力波衰减系数随谐波频率的变化特性, 确定并计算岩石动态黏性系数的谐波段及其应力波衰减系数, 得到水-力耦合岩石动态黏性系数的测定方法。基于高压高应力岩石的冲击试验数据, 计算不同工况下岩石的动态黏性系数, 并分析水压力和轴向静应力对岩石动态黏性系数的影响规律及机理。

参 考 文 献

- [1] 黄书岭, 冯夏庭, 周辉, 等. 水压和应力耦合下脆性岩石蠕变与破坏时效机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3441-3446, 3451.
- [2] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 饱水度对砂岩纵波波速及强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(8): 1625-1631.
- [3] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [4] 薛翊国, 孔凡猛, 杨为民, 等. 川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 445-468.
- [5] Liang Z Z, Song W C, Liu W T. Theoretical models for simulating the failure range and stability of inclined floor strata induced by mining and hydraulic pressure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 132: 104382.
- [6] Wang Z C, Bi L P, Kwon S K, et al. The effects of hydro-mechanical coupling in fractured rock mass on groundwater inflow into underground openings[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2020, 103: 103489.
- [7] Yang F J, Zhou H, Zhang C Q, et al. An analysis method for evaluating the safety of pressure water conveyance tunnel in argillaceous sandstone under water-weakening conditions[J]. Tunn Undergr Space Technol, 2020, 97: 103264.
- [8] 王朋朋, 赵毅鑫, 姜耀东, 等. 邢东矿深部带压开采底板突水特征及控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2444-2454.
- [9] Chen Z Q, Ma C C, Li T B, et al. Experimental investigation of the failure mechanism of deep granite under high seepage water pressure and strong unloading effect[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17: 5009-5030.
- [10] 陈旭, 俞缙, 李宏, 等. 不同岩性及含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2527-2533.
- [11] 王海洋, 孙赞东, Mark C. 岩石中波传播速度频散与衰减[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 332-342.
- [12] 巴晶, Carcione J M, 曹宏, 等. 非饱和岩石中的纵波频散与衰减: 双重孔隙介质波传播方程[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 219-231.

-
- [13] Yao Q L, Chen T, Ju M H, et al. Effects of water intrusion on mechanical properties of and crack propagation in coal[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 4699-4709.
- [14] Zhao Z H, Yang J, Zhang D F, et al. Effects of wetting and cyclic wetting-drying on tensile strength of sandstone with a low clay mineral content[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(2): 485-491.
- [15] Liu B L, Yang H Q, Karekal S. Effect of water content on argillization of mudstone during the tunneling process[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 799-813.
- [16] 于超云, 唐世斌, 唐春安. 含水率对红砂岩瞬时和蠕变力学性质影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 473-481.
- [17] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [18] 贾海梁, 王婷, 项伟, 等. 含水率对泥质粉砂岩物理力学性质影响的规律与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1618-1628.
- [19] 邓朝福, 刘建锋, 陈亮, 等. 不同含水状态花岗岩断裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1538-1544.
- [20] Wasantha P L P, Ranjitha P G. Water-weakening behavior of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, 178: 91-101.
- [21] 王伟, 李雪浩, 朱其志, 等. 水化学腐蚀对砂板岩力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2559-2566, 2573.
- [22] Huang S B, He Y B, Liu G F, et al. Effect of water content on the mechanical properties and deformation characteristics of the clay-bearing red sandstone[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 1767-1790.
- [23] Zhao Y X, Liu S M, Jiang Y D, et al. Dynamic tensile strength of coal under dry and saturated conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 1709-1720.
- [24] Zhou Z L, Cai X, Zhao Y, et al. Strength characteristics of dry and saturated rock at different strain rates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1919-1925.
- [25] 高龙山, 徐颖, 吴帮标, 等. 温度损伤大理岩不同含水条件下的动态压缩特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3826-3833.
- [26] Cai X, Zhou Z L, Du X M. Water-induced variations in dynamic behavior and failure characteristics of sandstone subjected to simulated geostress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 130: 104339.
- [27] Weng L, Wu Z J, Liu Q S. Dynamic mechanical properties of dry and water-saturated siltstones under sub-zero temperatures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53: 4348-4401.
- [28] 刘运思, 何楚韶, 傅鹤林, 等. 冲击荷载下饱水板岩拉伸力学特性及能耗规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2226-2233.