

水力耦合岩体宏细观变形破坏过程的研究现状

赵天阳, 刘中原, 陈以超

青岛理工大学, 山东 青岛

收稿日期: 2021年12月3日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月14日

摘要

地下洞室、地下采矿、引水隧洞工程中, 岩体会直接与地下水作用, 由此导致的突水事故屡见不鲜, 严重威胁工程安全。孔隙水压力作用下岩体的物理力学特性、破坏行为特征和裂纹发展规律等变形破坏行为都与无水条件下存在明显差异。为深入了解水力耦合作用下岩体宏细观变形破坏机制, 通过收集整理国内外文献, 系统综述了水力耦合岩体变形破坏方面研究的进展与成果。简述了水力耦合下岩体力学特性, 重点分析了水力耦合岩体变形破坏机制的最新研究进展, 介绍了声发射AE、计算机断层摄影CT和微观扫描电镜等现代辅助试验技术在细观变形破坏分析中的应用。这对评价岩体工程的安全性和稳定性具有借鉴意义。

关键词

水力耦合, 变形破坏机制

Research Status of Macro and Mesoscopic Deformation and Failure Mechanism of Hydraulically Coupled Complete Rock Mass

Tianyang Zhao, Zhongyuan Liu, Yichao Chen

Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

Received: Dec. 3rd, 2021; accepted: Jan. 6th, 2022; published: Jan. 14th, 2022

Abstract

In underground caverns, underground mining, and water diversion tunnel projects, the rock mass

will be directly affected by groundwater. The resulting water inrush accidents are not uncommon and seriously threaten the safety of the project. The deformation and failure behaviors of the rock mass under the action of pore water pressure, such as the characteristics of failure behavior and the law of crack development, are obviously different from those under the condition of no water. In order to gain insight into the macro- and meso-mechanism of complete rock mass deformation and failure under hydraulic coupling, through collecting and sorting out domestic and foreign documents, the research progress and results of hydraulic coupling complete rock deformation and failure are systematically reviewed. The mechanical characteristics of the complete rock mass under hydraulic coupling are briefly described, and the latest research progress on the deformation and failure mechanism of the hydraulic coupling fractured rock mass is analyzed. The application of modern auxiliary test techniques such as acoustic emission AE, computed tomography CT and microscopic scanning electron microscopy in the analysis of mesoscopic deformation failure is introduced. It is of reference significance for evaluating the safety and stability of rock mass engineering.

Keywords

Hydraulic Coupling, Deformation and Failure Mechanism

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

因周围应力场的改变使得岩体产生变形、膨胀和剪切滑移,并伴随着裂纹的萌生与扩展。与此同时,地下水以孔隙水压力的方式作用在岩体四周,影响着岩体应力场的分布。两种压力互相作用、影响的现象被称为水力耦合[1] [2] [3]。孔隙水压力作用下岩体的物理力学特性、破坏行为特征和裂纹发展规律都与无水条件下存在明显差异[4] [5]。比较而言,孔隙水压力作用下更容易发生工程失稳破坏。根据国家统计局的关于近十年来地质灾害数据可知,百分之九十左右的地质灾害例如滑坡煤矿突水均与地下水有关[6]。

本文针对饱水岩体的水力耦合问题,通过搜集整理国内外的研究成果,本文分别从力学特性、宏观变形破坏机制等方面对水力耦合作用下的岩体进行系统的归纳和分析。这对评价岩体工程的安全性和稳定性具有借鉴意义。

2. 水力耦合完整岩体力学特性研究

2.1. 水力耦合完整岩体宏观力学特性以及变形研究

截至目前,水力耦合作用下渐进破坏过程中岩体力学特性研究已取得不错成就[7] [8]。Otto [9]等通过对岩盐进行室内渗流应力耦合试验,通过特征应力点将水力耦合作用下的岩样渐进破坏过程分为3个阶段。沈明荣和陈建峰[10]认为典型岩石的应力-应变曲线可分为4个阶段。众多学者[11] [12] [13]总结得出,脆性岩石的破坏全过程可分为5个阶段,分别为裂纹压密阶段、弹性阶段、裂纹稳定扩展阶段、裂纹非稳定扩展阶段以及峰后阶段。此外,试验结果表明渗压相同围压不同时,岩石强度随围压增大而增加;围压相同渗压不同时,较低的渗压对低渗透岩石强度影响不明显。俞缙等[1]通过对砂岩卸围压试验得出,岩样的应力峰值对有效围压很敏感;岩样加载过程中,随着围压增大,脆性减弱且延性增强。刑福东等[14]对高水压力和高围压作用下的砂岩和大理岩进行试验,得出较高的孔隙水压里会加速岩石的破坏,且岩石峰值强度降低;无水作用下岩样的弹性模量会小于10 MPa孔隙水压条件。彭俊等[15]基于试

验方法探讨了孔隙水压力对石英砂岩的渐进破坏过程的影响(图 1), 得出在相同围压条件下, 随着孔隙水压的增大, 岩样的起裂应力有逐渐增大的趋势, 且损伤应力与峰值应力逐渐减小(图 2)。

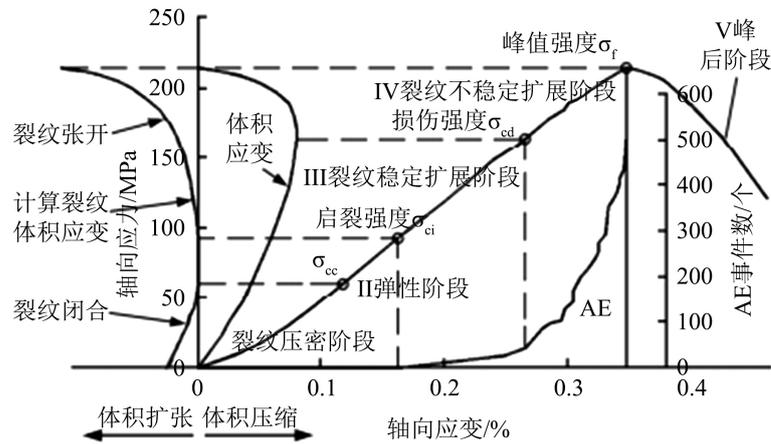


Figure 1. Schematic diagram of progressive failure stage under pore water pressure [15]
图 1. 孔隙水压力作用下的渐进破坏阶段示意图[15]

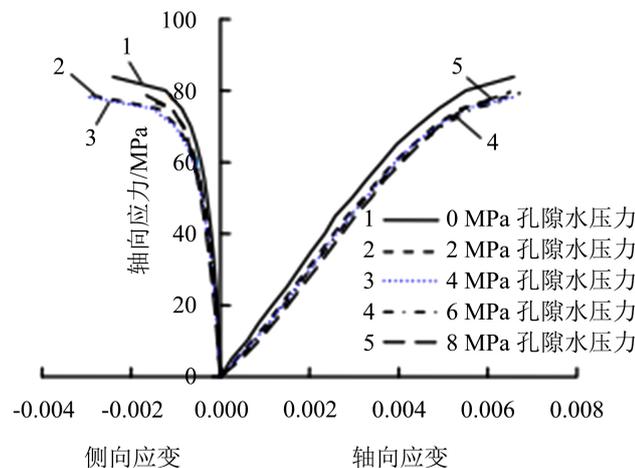


Figure 2. Stress-strain curve of rock sample under 10 MPa confining pressure and water pressure [15]

图 2. 10 MPa 围压、不同孔隙水压条件下岩样应力 - 应变曲线[15]

2.2. 水力耦合完整岩体细观力学特性以及变形研究

丁卫华等[16]借助 SOMATOM PLUS CT 螺旋扫描机对加载至不同轴压梯度下的饱水砂岩进行习惯细观分析。并通过试验结果推断出基于 CT 扫描数的岩石孔隙率的计算公式。朱珍德等[17]利用微观电镜扫描仪对高围压高孔隙水压力下的大理岩破坏形态进行扫描, 得出了高围压条件下大理岩断口裂纹长度小、密度大等特点, 随后分析得出了孔隙水压力的有无对岩样破坏后的微观形貌无明显影响, 断口形状均为根状花样(图 3)、河流状花样(图 4)。与给出了此条件下岩石破裂产生的微观损伤力学机理。马天寿等[18]开展了不同水化阶段页岩岩样的 CT 扫描试验, 分析了页岩水化的细观损伤特性, 得出随着浸泡时间的增加, 页岩主要发育所能缓慢的扩展; 微裂纹所在的区域 CT 扫描图像的完整度和破损度数值较大, 完整度(图 5)和破损度(图 6)还有利于定量的评价页岩的细观损伤。

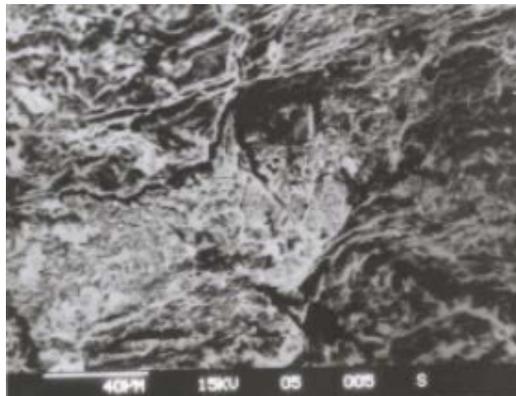


Figure 3. Root-like pattern micro-fracture crack [17]
图 3. 树根状花样微观断口裂纹[17]

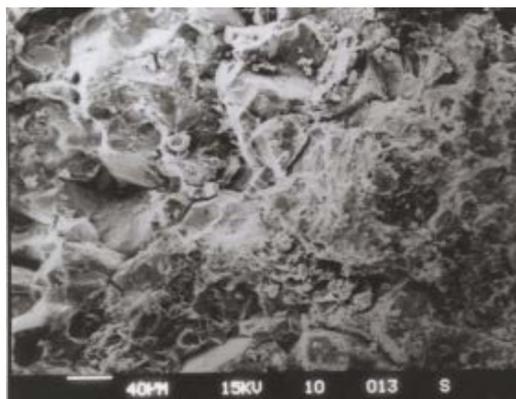


Figure 4. River-like pattern micro-fracture crack [17]
图 4. 河流状花样微观断口裂纹[17]

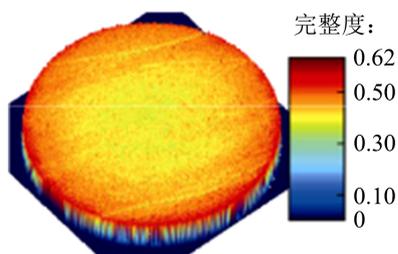


Figure 5. Completeness surface map [18]
图 5. 完整度表面图[18]

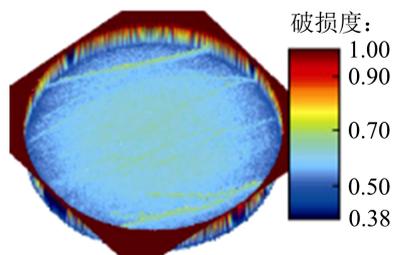


Figure 6. Damaged surface map [18]
图 6. 破损度表面图[18]

3. 水力耦合裂隙岩体力学特性以及变形研究

3.1. 水力耦合裂隙岩体宏观力学特性以及变形研究

曹加兴等[19]通过对存在预制裂隙的类岩石材料进行水力耦合试验,详细分析了单裂隙与平行双裂隙组试件在孔隙水压力和单向压缩下的内部裂纹扩展情况,得出水压对花瓣形裂纹和反翼形裂纹有抑制作用,对包裹式翼型裂纹有促进作用。赵程等[20]采用高强石膏借助预埋薄片的方法制作了不同裂隙角度的类岩石试样,并进行了水力耦合三轴试验,得出三轴他压缩强度、峰后残余强度和弹性模量均随着孔隙水压的增大而减小(图 7),且随着裂纹倾角的增大而先减小后增大(图 8)。李地元等[21]对孔隙水压力作用下的类岩石材料的裂纹起裂特性进行细致研究,结果表明,裂纹起裂角度随预制裂隙角度的变化不大,其值约为 70.5%。裂纹起裂强度与孔隙水压力、裂纹长度和裂纹尖端曲率半径呈反比(图 9),与围压的大小呈正比。

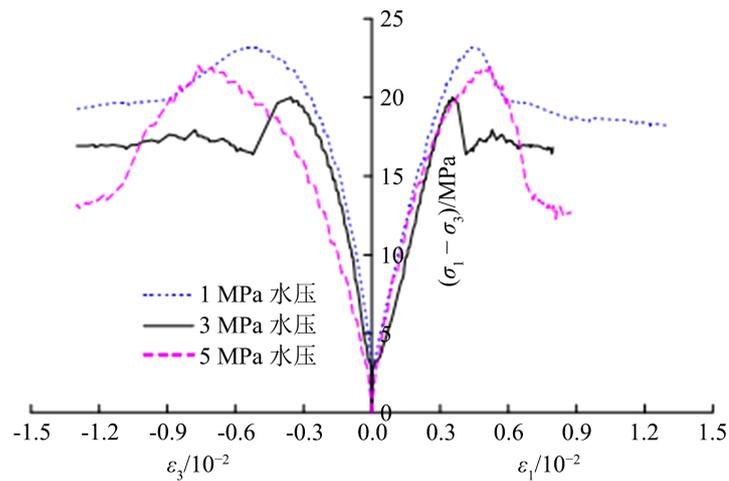


Figure 7. The inclination angle of prefabricated cracks under different pore water pressures is 30° [20]

图 7. 不同孔隙水压力条件下预制裂隙倾角 30° [20]

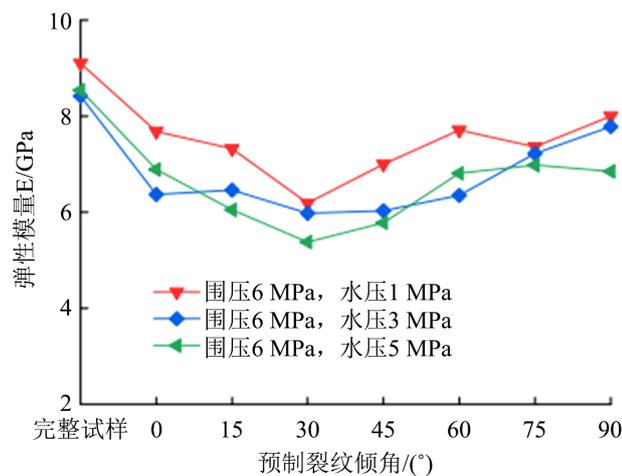


Figure 8. The relationship curve of elastic modulus-crack inclination angle under different water pressure [20]

图 8. 不同水压下弹性模量 - 裂纹倾角关系曲线[20]

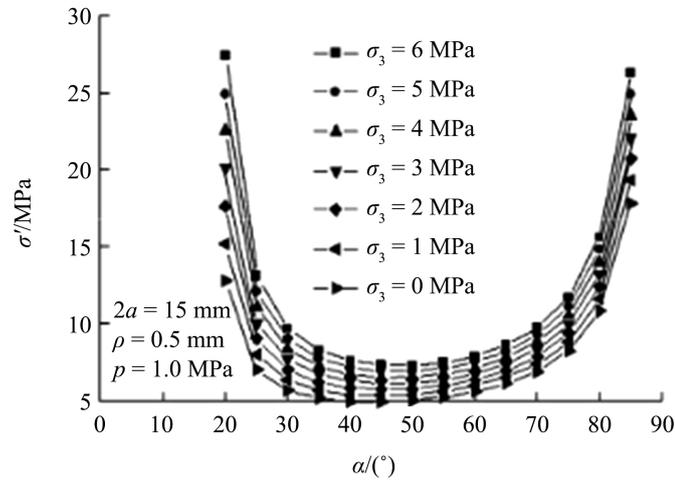


Figure 9. Influence of confining pressure on initiation strength of rock cracks [21]

图 9. 围压对岩石裂纹起裂强度的影响[21]

寇苗苗等[22]对预制裂隙类岩石材料开展了水力耦合室内试验,描述了不同围压、孔隙水压条件下岩样的宏观破坏形式,并对其进行分析,分析表明在围压 8 MPa、孔隙水压 2 MPa 条件下,随着加载时间的增大,翼型裂纹和反翼型裂纹从预制裂隙尖端起裂,且沿着最大主应力的方向扩展;翼型裂纹和反翼型裂纹通过反平面剪切裂纹互相连接,最终形成破裂面导致试样最终破坏(图 10)。

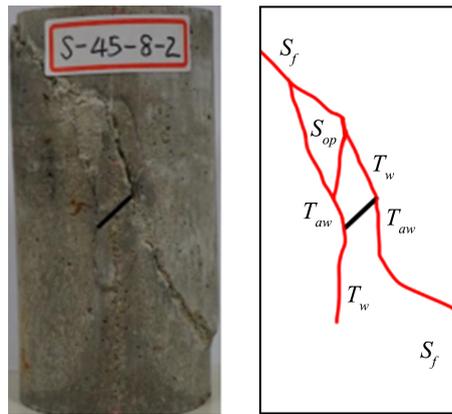


Figure 10. Sample under the conditions of 8 MPa confining pressure and 2 MPa pore water pressure [22]

图 10. 围压 8 MPa、孔隙水压 2 MPa 条件下岩样破坏后试样[22]

3.2. 水力耦合裂隙岩体细观力学特性以及变形研究

郭孔灵等[23]研究了无水以及水力耦合条件下预制三维裂隙类岩石材料的破裂模式并借助声发射技术开展了室内压缩破裂试验,结果表明试验破裂模式经历了张拉为主、拉剪复合-剪切为主的转变过程;与无水条件(图 11)相比,在水力耦合条件(图 12)下试样加载过程中相对高频、低频信号占比均不同程度的降低。寇苗苗等[22]通过室内试验研究了预制裂隙的类岩石材料在水力耦合作用下卸围压条件下的渐进破坏过程,借助 CT 扫描设备对岩样进行三维重构,从细观的角度分析了岩样内、外部裂纹的裂纹分布(图 13)。

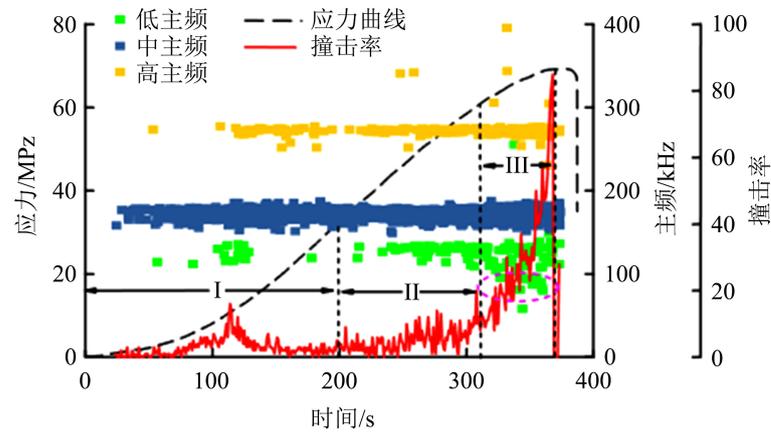


Figure 11. The main frequency change of acoustic emission signal during the rupture of the specimen under anhydrous conditions [23]

图 11. 无水条件下试件破裂过程的声发射信号主频变化[23]

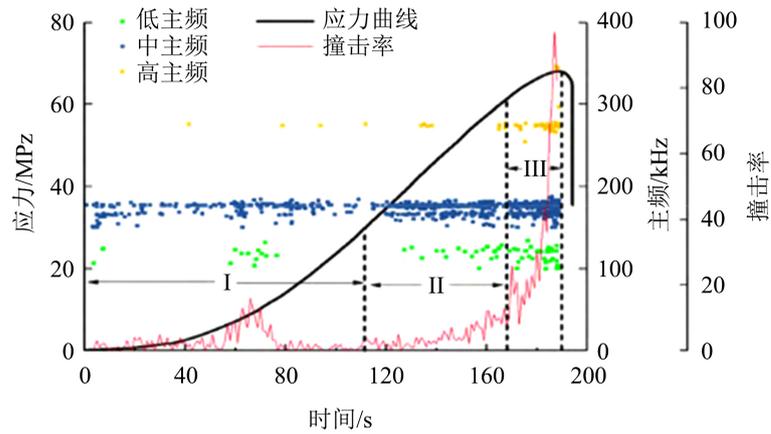


Figure 12. The main frequency change of acoustic emission signal during the rupture process of the specimen under the action of hydraulic coupling [23]

图 12. 水力耦合作用下试件破裂过程的声发射信号主频变化[23]



Figure 13. 3D reconstruction of rock-like materials [22]

图 13. 类岩石材料三维重构图[22]

4. 存在的不足与解决意见

4.1. 存在的不足

国内外学者针对水力耦合问题进行了一系列科学研究,例如力学特性与变形破坏特征、渗流特性等,并取得了实质性的成果。然而,由于岩体材质的非均匀性、几何形状多样性等随机性,还与完全弄清楚水力耦合作用下岩体破坏机制存在一定差距。目前水力耦合条件下的研究具体存在两点不足之处。其一,研究中所采用的裂隙试样多为类岩石材料(水泥砂浆、石膏等)以及人工切割的裂缝深度、宽度较为单一的预制裂隙岩样。然而,天然岩体在沉积、地质运动和风化的影响下形成的物理性质与类岩石材料性质以及人为预制裂隙岩样仍存在差距,故获得的结论与实际岩体仍存在偏差。其二,水力耦合试验中,为模拟实际工程中的开挖扰动等工况,对应主要研究加荷、循环围压和轴压条件岩体的力学特性和渗流特性,而对在卸荷条件的研究相对较少。

4.2. 解决意见

本文通过总结国内外的水力耦合岩体研究现状,随后发现水力耦合研究领域还存在的不足之处。现结合上述不足之初对水力耦合岩体的研究给出一点建议。1) 着重研究真实裂隙岩体的渐进破坏全过程的变形破坏机制和渗透特性。2) 亟需加强对卸荷条件下的水力耦合岩体的变形破坏机制以及渗透特性进行研究。

5. 结论与展望

5.1. 结论

从宏观力学特性和变形破坏机制方面出发,叙述了现阶段对水力耦合条件下岩体的研究现状;利用声发射、光学显微镜以及 CT 扫描等先进设备对水力耦合条件下完整和预制裂隙的岩体进行分析;对水力耦合岩体的研究给出了一定的意见,即需要重点研究完整、裂隙真实岩体的渗流特性、宏观力学特性,并加强水力耦合条件下渐进破坏过程研究。

5.2. 展望

地下洞室、地下采矿、引水隧洞工程以及高温地热开发等地下工程领域越来越多的涉及到渗流应力耦合现象,这会使学术研究背景和工程施工更为复杂、多变。为了更加高效地开采地下能源和有效地预防地质灾害,开展多场耦合条件下的岩体破裂机制的研究对科学研究、工程应用都具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 俞缙,李宏,陈旭,蔡燕燕,武娜,穆康. 渗透压-应力耦合作用下砂岩渗透率与变形关联性三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1203-1213.
- [2] 王伟,刘桃根,吕军,王如宾,徐卫亚,翦波. 水岩化学作用对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3607-3617.
- [3] 王小江,荣冠,周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(Z1): 2940-2947.
- [4] Biot, M.A. (1941) General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, **12**, 155-164. <https://doi.org/10.1063/1.1712886>
- [5] 陈岩. 采动影响下岩石的变形破坏行为及非线性模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [6] 杨天鸿,唐春安,谭志宏,等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268-277.

- [7] 赵延林. 裂隙岩体渗流 - 损伤 - 断裂耦合理论及应用研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [8] 尹乾. 复杂受力状态下裂隙岩体渗透特性试验研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [9] Otto, S., Till, P. and Hartmut, K. (2001) Development of Damage and Permeability in Deforming Rock Salt. *Engineer Geology*, **61**, 163-180. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00051-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00051-5)
- [10] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
- [11] 王伟, 郑志, 王如宾, 王环玲, 徐卫亚. 不同应力路径下花岗片麻岩渗透特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 260-267.
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [13] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21-33.
- [14] 邢福东, 朱珍德, 刘汉龙, 阮怀宁, 王军. 高围压高水压作用下脆性岩石强度变形特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004(2): 184-187.
- [15] 彭俊, 蔡明, 荣冠, 周创兵, 赵星光. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1091-1100.
- [16] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 崔中兴, 曹广祝. X 射线岩石 CT 的历史与现状[J]. 地震地质, 2003(3): 467-476.
- [17] 朱珍德, 徐卫亚, 张爱军. 脆性岩石损伤断裂机理分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1411.
- [18] 马天寿, 陈平. 基于 CT 扫描技术研究页岩水化细观损伤特性[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 227-233.
- [19] 曹加兴, 朱珍德, 田源, 赵晨羽, 董晓庆. 水压作用下三维裂隙组扩展过程试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(4): 92-98.
- [20] 赵程, 幸金权, 牛佳伦, 马闯闯. 水 - 力共同作用下预制裂隙类岩石试样裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2823-2830.
- [21] 李地元, 李夕兵, 张伟, 宫凤强, 黄炳仁. 基于流固耦合理论的连拱隧道围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(5): 1056-1064.
- [22] 寇苗苗. 卸荷渗流耦合作用下裂隙岩体破坏机理研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [23] 郭孔灵, 杨磊, 盛祥超, 梅洁, 李邦翔, 张波, 杨为民, 宋光啸. 水力耦合作用下含三维裂隙类岩石材料的破裂力学行为及声发射特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4380-4390.