

Study on the Effect of Hydraulic Pressure on Fracture Behavior of Fractured Rock

Qian Wang¹, Mingyue Lu¹, Weizhong Wang²

¹Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing

²State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing

Email: qian.wang.0921@qq.com

Received: Jun. 30th, 2016; accepted: Jul. 14th, 2016; published: Jul. 21st, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

In order to study the failure characteristics of rocks under coupling effect of ground stress field and seepage field, MTS815 rock mechanics test system combined with plunger pump hydraulic loading device are used to load water pressures on concrete samples containing precast crack. After that, uniaxial cyclic loading and unloading compression failure contrast experiments are conducted with the seepage field and without the seepage field. The results show that: specimens with the seepage field present initial crack at the initial stage of loading, but species without seepage field present initial crack always in plastic zone or close to plastic zone. The failure mode under both conditions is not the same. The failure is caused by surface crack expand under the water pressure effects, and without water pressure it is caused by the internal damage and micro cracks extend. The strength under the two kinds of conditions is equivalent, while the dissipated energy in the process of failure is higher than those without seepage field.

Keywords

Fractured Rock, Water Pressure, Fracture Behavior, Energy Dissipation

水压作用对裂隙岩体断裂行为影响研究

王 倩¹, 卢明玥¹, 王维忠²

¹重庆工程职业技术学院, 重庆

²重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆

Email: qian.wang.0921@qq.com

收稿日期: 2016年6月30日; 录用日期: 2016年7月14日; 发布日期: 2016年7月21日

摘要

为研究在地应力场与水压耦合作用下裂隙岩石破坏特性, 利用MTS815岩石力学测试系统, 并结合柱塞泵水压加载装置, 对含有预制裂隙的混凝土试样加载预应力后, 进行有无水压作用单轴循环加卸载压缩破坏对比试验。试验结果表明: 有水压作用的试件在加载初期便出现初始裂隙, 而无水压时试件往往在塑性区或接近塑性区时出现初始裂隙, 两者的破坏模式也不相同, 在有水压作用时, 试件是由于水压引起的表面裂纹扩展而导致破坏, 而无水压时则是因为试件内部损伤微裂隙扩展引起的失稳破坏; 然而两种条件下的试件强度相差不大, 但其破坏过程中产生的耗散能却高于后者。

关键词

裂隙岩体, 水压, 断裂行为, 能量耗散

1. 引言

目前, 在矿山、隧道等工程围岩中广泛存在着渗流场与地应力耦合作用, 在某些条件下致使岩石破裂, 裂纹扩展, 导致地下空间与上部水体沟通, 造成突水事故。国内外学者对于岩体裂隙内水渗流也做了大量的研究。申林方等[1]通过开展单裂隙花岗岩在恒定三轴应力及化学溶液渗透压作用下的试验, 单裂隙花岗岩在承受三轴压缩荷载及渗透压共同作用条件下, 其侧向蠕变变形一直以稳定速率增加, 显示水对裂隙面的物理软化效果, 不同于完整岩石的扩容机制。贺少辉等[2]通过数值模拟的方法进行了裂隙岩体裂隙网络渗流场-应力场耦合分析。王月英等[3]对裂隙岩体流动模型进行综述, 对裂隙岩体流动模型进行综述, 提出了2种或者多种流动模型横向或纵向耦合而成的耦合模型。倪绍虎等[4]研究裂隙岩体的渗透特性及其高压渗透特性, 重点分析其水力学特性的应力相关性, 得出了裂隙岩体的渗透性与应力赋存环境密切相关, 且对应力十分敏感。

然而, 对于存在渗流场的裂隙岩体断裂行为的研究却很少见有报道, 岩体的性质不仅与不连续面力有关, 还深受裂隙水压力的影响。但是限于现场原位实验的种种困难, 室内相似材料的加载成了常用手段。本文采用单周循环加载下渗透水压压剪预制裂隙岩石破坏试验, 研究渗透水压对岩体断裂行为的影响。

2. 试件制备与实验方案

2.1. 试件制备

为了模拟裂隙岩体内的脆性断裂, 本实验采用与岩石相似(脆性、剪胀)的模型材料(由白水泥、沙子、水组成)制作类岩石模型试样, 试件由水泥、水、和经1 mm孔径筛分过的细沙按体积比2:1:1制作, 外形(长×宽×高)为: 150 mm×100 mm×200 mm; 采用预埋纸片法制作类岩石裂隙模型试样。脱模后的试件放入自来水中养护28 d。试件中裂隙分布状况如图1所示。图中: 裂隙角度为45°。裂隙大小(长、宽、厚)为50 mm×30 mm×1 mm。

2.2. 试验装置

本次实验在MTS815岩石力学测试系统中进行, 如图2所示; 利用液压加载装置, 通过预制注水孔

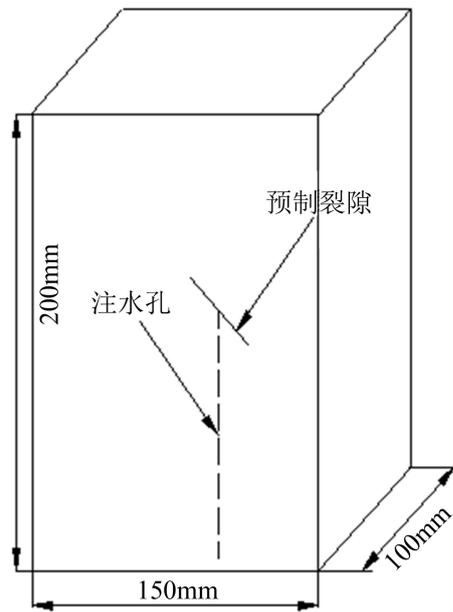


Figure 1. Distribution map of fracture
图 1. 裂隙分布图



Figure 2. MTS815 rock mechanics test system
图 2. MTS815 岩石力学测试系统

向裂隙注入 1 MPa 水压，为了防止试件与压头之间的缝隙产生渗流通道，保证流体压力通过注水孔进入预支裂隙内，在下压头与试件之间加入密封垫片，在通入水压之前先预加载 30 kN 轴向压力使密封垫片压密，保证了试件与压头之间的密闭性。加载装置示意图如图 3，同时通过摄像机记录试件加载破坏过程。

2.3. 实验加载步骤

为了研究水压在岩体破坏时对其内部能量损耗的影响，在加载(示意图如图 4 所示)过程中加入波动载荷，通过分析岩体在波动载荷加载过程中的能量变化，进而得出水压对裂隙岩体破坏的影响。

(1) 方案 I

按 1 kN/S 的加载速率至 30 kN，待密封垫压密后，通过液压泵加入 1 MPa 液压；流体压力稳定后按 1 kN/S 加载至 100 kN，在此应力点对试件加载频率为 1 Hz，振幅为 100 kN 的波动载荷，波形采用正弦波，循环次数为 20 次；波动载荷结束后按 1 kN/s 速率加载至破坏。

(2) 方案 II

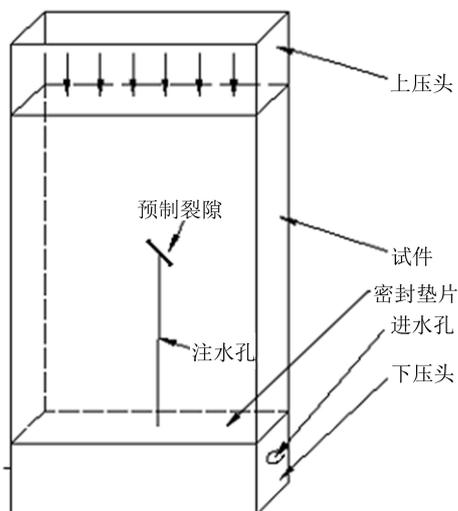


Figure 3. Schematic diagram of hydraulic loading installation

图 3. 液压加载装置示意图

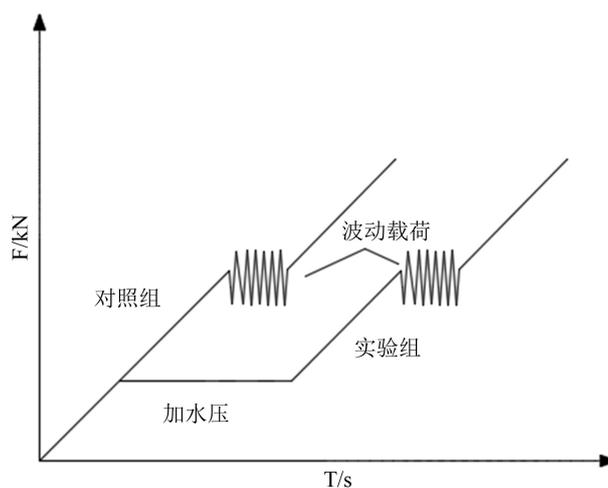


Figure 4. Schematic diagram of loading path

图 4. 加载路径示意图

按 1 kN/S 的加载速率加载至 100 kN 时，加载 1 Hz，振幅为 100 kN 的正弦波 20 次，最后按 1 kN/s 速率加载至破坏。

3. 实验结果与分析

3.1. 外部裂隙发育分析

利用摄像机可以观测到试件表面开裂时间，进而确定开裂点在应力应变曲线上的位置，结果如图 5 所示，图中有水压存在的试件其初期压密阶段较长，这是由于加载初期注水孔密封垫片的变形引起的(垫片的强度很小，本实验不考虑垫片变形影响)。在载荷作用下，有水压存在的试件在刚进入弹性阶段便会出现初始裂隙，且试件初始裂隙往往沿试件中部开始发育，随着压力的不断增大裂隙不断扩展，最终导致试件整体破坏；但试件最终强度和对照组强度基本相同，其最终强度并没有因为水压的存在而明显减小。

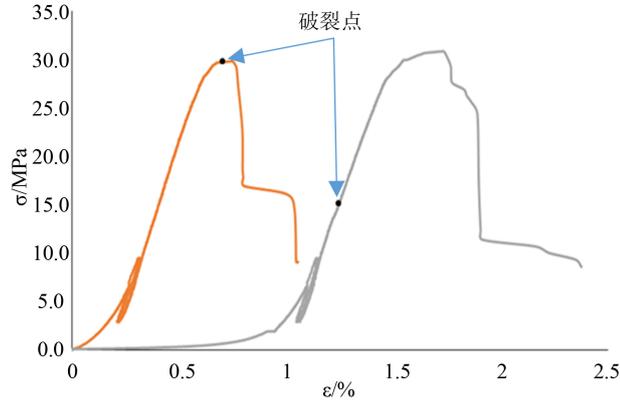


Figure 5. The showed point of initial fracture during loading process

图 5. 加载过程中初始裂隙出现点

在没有水压存在的情况下试件往往在塑性区或接近塑性区时才出现初始裂隙，且初始裂隙往往在试件边缘产生，出现初始裂隙后试件紧接着试件就会发生破坏，有时初始裂隙几乎和峰值点同时出现，裂隙瞬间扩展失稳破坏。图 5 显示了在加载过程中初始裂隙出现时所处的加载阶段。分析其原因，由于水压的存在，在试件受压初期在裂隙尖端产生了应力集中区，由于岩石的天然属性是抗压不抗拉，且水压是以拉应力的形式作用在裂纹尖端，最终裂纹在尖端起裂，并向外扩展，形成了表面裂纹，然后由外部的表面裂纹由中部沿着裂纹尖端向两端发展；而无水压存在的裂纹则是由于内部损伤、破坏引起开裂，有内部发展到外部，所以当外部裂纹出现时意味着试件的整体失稳。所以在有水压存在的情况下，试件在弹性阶段就出现了初始裂隙，而在无水压时，试件失稳前才出现裂纹。

3.2. 试件破坏过程能耗分析

能量耗散是岩石破坏的本质属性，是分析力学系统失稳破坏的常用方法[5] [6]。材料破坏过程是能量积聚与耗散的过程[7]，是物质内部能量演化的过程。在试件外力作用后，在不考虑与外界的热量传递，由热力学定律可知：

$$U = U^d + U^e \quad (1)$$

式中： U 为外力对岩体做的总功； U^d 岩石内部的耗散能； U^e 岩石存储在内部的可释放弹性能。 U 、 U^d 、 U^e 单位均为 MJ/m^3 ；以一个单位体积的煤体单元为例，在单轴压缩试验中， U^d 与 U^e 的关系如图 6。

其中可释放变形能表示为[8]：

$$U^e = \frac{1}{2\bar{E}} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\bar{\nu}(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (2)$$

式中： \bar{E} 和 $\bar{\nu}$ 分别为卸荷弹性模量与泊松比平均值。

假设煤样在全应力 - 应变曲线上卸载曲线与加载曲线基本一致，卸载弹性模量 E_i 可以采用峰值前弹性段的弹性模量 E 代替[9]。煤样应力状态为单轴受压，侧向不受力，则

$$U = \int_0^\varepsilon \sigma_1 d\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_{i-1}) (\varepsilon_i + \varepsilon_{i-1}) \quad (3)$$

$$U^e = \frac{\sigma_i^2}{2E} \quad (4)$$

式中： σ_i 、 ε_i 为轴向应力 - 轴向应变曲线上每一点的应力、应变值，且初始应力、初始应变均为 0； E 为

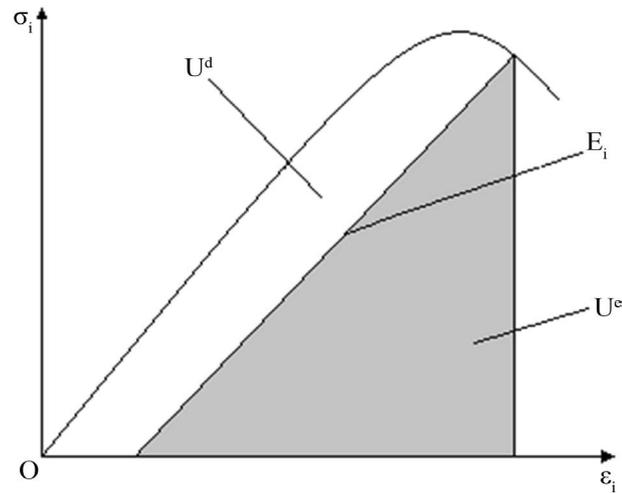
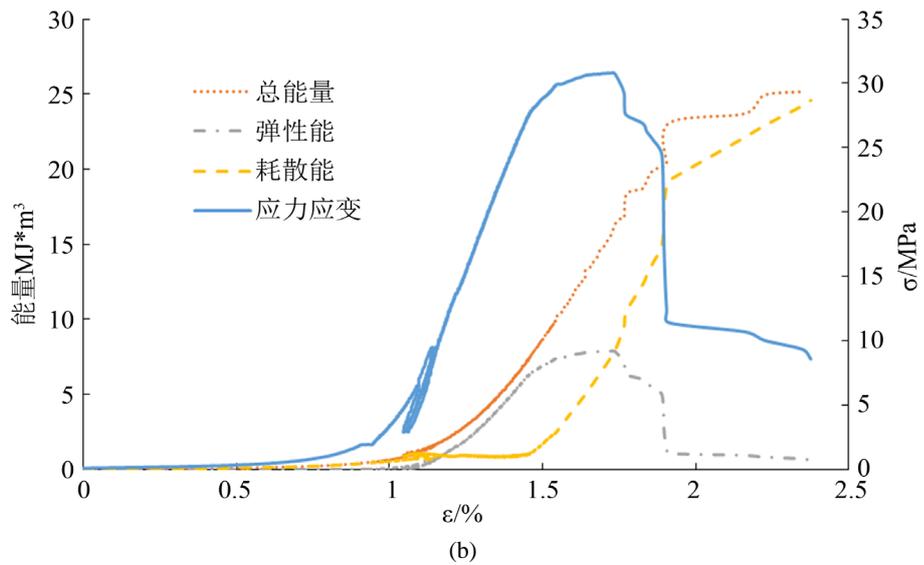
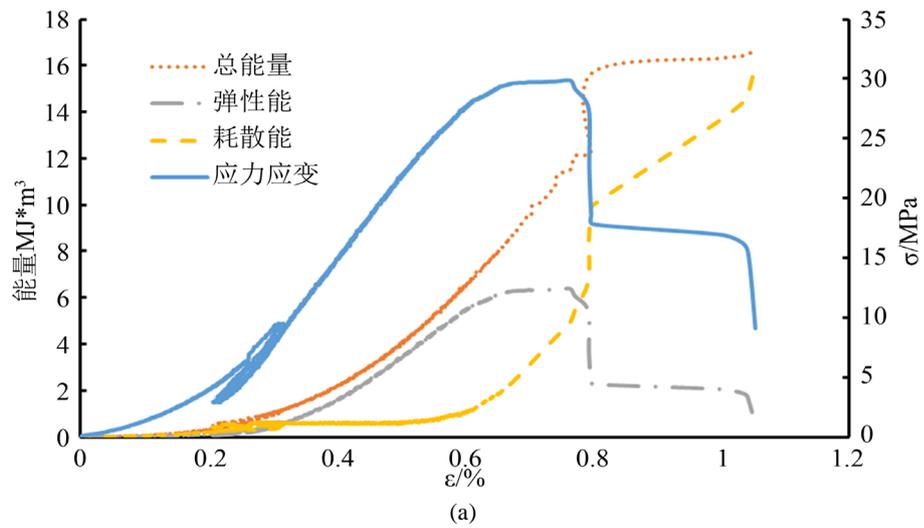


Figure 6. Relationship between dissipated energy and releasable strain energy of mass element

图 6. 单元体中能量耗散和可释放应变能的量值关系



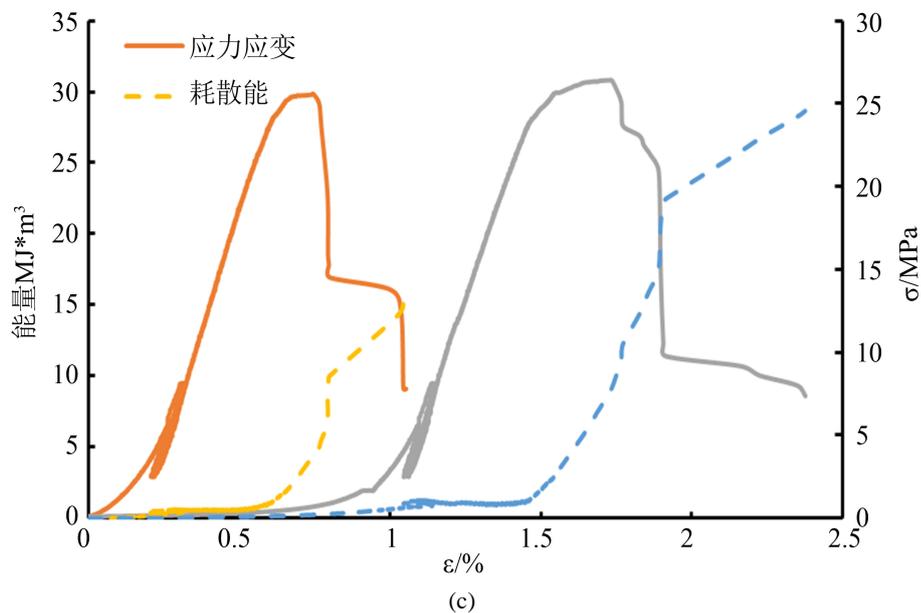


Figure 7. Energy dissipation properties of specimens: (a) Energy dissipation situation without hydraulic pressure; (b) Energy dissipation situation with hydraulic pressure; (c) Comparison of stress and energy dissipation between them

图 7. 试件能耗特征: (a) 无水压试件能耗情况; (b) 水压下试件能耗情况; (c) 两者应力及能耗情况对比

弹性模量。

根据公式并结合试验结果, 得出试件的能量特征如图 7 所示。

从图 7(a)-(b)中可以看出, 不论有无水压, 随着载荷的不断加大, 试件总能量不断增大, 在试件弹性阶段, 耗散能增加缓慢, 在试件进入塑性区后, 耗散能开始大幅增长, 当试件破坏瞬间, 此时弹性能大幅转化为耗散能, 耗散能迅速增长。

在图 7(c)中可以看出, 两者的强度相当, 但在有水压存在时试件耗散能明显增大, 且岩石破碎比较剧烈, 这是因为有水压存在的试件, 水压也在对试件做功, 所以总能量会增加, 最终转化为的耗散能也会增加。同时在加载波动载荷时, 有水压存在的试件产生的耗散能会多一些。

4. 分析讨论

有无水压存在对试件强度影响不大, 但有水压存在的裂隙岩体破坏时产生的耗散能却大于后者, 这是因为在弹性阶段, 液压引起了开裂, 释放了加载引起的变形能, 释放掉了一部分试件内部的应力, 使得试件内部应力集中区的弹性能得到了释放, 避免了突然释放引起的破坏性后果, 增大了裂纹出现后试件的承载力, 从而使得试件的强度没有明显下降, 其耗散的能力却明显增加。

5. 结论

- (1) 有水压作用的试件在加载初期便出现初始裂隙, 而无水压时试件往往在塑性区或接近塑性区时出现初始裂隙;
- (2) 有水压作用时, 试件的破坏是由表面裂隙扩展引起的; 而无水压作用时, 试件则是由内部损伤微裂纹扩展而引起的破坏。
- (3) 有水压存在的试件其强度与无水压的试件相当, 但其破坏过程中产生的耗散能却高于后者。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51374256)。

参考文献 (References)

- [1] 申林方, 冯夏庭, 潘鹏志, 等. 单裂隙花岗岩在应力 - 渗流 - 化学耦合作用下的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1379-1388.
- [2] 贺少辉, 廖国华, 李中林. 裂隙岩体裂隙网络渗流场 - 应力场耦合的刚体元分析[J]. 南方冶金学院学报, 1995, 16(3): 8-15.
- [3] 王月英, 姚军, 黄朝琴. 裂隙岩体流动模型综述[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(5): 42-48, 116-117.
- [4] 倪绍虎, 何世海, 汪小刚, 等. 裂隙岩体水力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 488-498.
- [5] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565-3570.
- [6] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 砂岩拉伸过程中的能量耗散与损伤演化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2526-2531.
- [7] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003-3010.
- [8] 许国安, 牛双建, 靖洪文, 等. 砂岩加卸载条件下能耗特征试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3611-3617.
- [9] 韩立军. 岩石破坏后的结构效应及锚注加固特性研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.

期刊投稿者将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>