

不同水损伤程度下泥岩断裂力学特性试验研究

杨健锋^{1,2}, 梁卫国^{1,2}, 陈跃都^{1,2}, 黎力^{1,2}, 廉浩杰^{1,2}

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 原位改性采矿教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 为研究不同程度水损伤作用对泥岩断裂力学特性的影响, 对水中浸泡不同时间条件下的泥岩半圆盘试件进行三点弯曲试验, 同时利用 PCI-2 型声发射系统对泥岩试件的断裂全过程进行实时监测。结果表明: 天然泥岩的断裂力学行为受水-岩作用影响显著, 随着浸泡时间的增加, 其峰值载荷不断下降, 浸泡 200 min 后, 该泥岩纯 I 型至纯 II 型断裂韧度分别降低至未损伤条件下的 53%, 56.5%, 61%, 64%, 64.7% 和 67.6%, 且泥岩的断裂破坏形式由脆性逐渐转变为延性。通过声发射定位确定了不同损伤程度下泥岩半圆盘试件中断裂过程区长度, 随着损伤程度加深, 断裂过程区长度逐渐减小, 声发射事件累计总数不断增加; 同时, 将试验得到的等效断裂韧度与纯 I 型断裂韧度的比值与引入 T 应力后改进的最大周向应力理论比值进行比较, 表明在未浸泡及短时间浸泡条件下试验结果符合该理论结果; 但随着损伤程度的加深该试验结果拟合曲线逐渐偏离理论曲线, 浸泡时间达到 200 min 时, 该偏离情况较为明显。

关键词: 岩石力学; 泥岩; 声发射; 断裂韧度; 半圆盘三点弯曲试件; T 应力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2017)10-2431-10

Experiment research on the fracturing characteristics of mudstone with different degrees of water damage

YANG Jianfeng^{1,2}, LIANG Weigu^{1,2}, CHEN Yuedu^{1,2}, LI li^{1,2}, LIAN Haojie^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 2. Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: In order to study the effect of water damage on the characteristics of fracturing of mudstone, three-point bending test was carried out to the semi-circular bend(SCB) mudstone specimens that have been soaked in water for different durations. The real-time monitoring with PCI-2 type acoustic emission system was conducted on the fracturing process of the mudstone specimens. The results show that fracturing behaviors of the mudstone is significantly influenced by water-rock interaction. The peak load of the mudstone specimens decreases with the soaking time increases. After being soaked for 200 minutes, the fracture toughness of mudstone from pure mode I to pure mode II decreased respectively to 53%, 56.5%, 61%, 64%, 64.7% and 67.6% of those of the intact specimens, and the failure characteristics of mudstone was changed from brittle to ductile. The length of fracture process zone(FPZ) of the mudstone SCB specimens soaked for different durations was confirmed by the acoustic emission(AE) positioning. As the soaking time increases, the length of FPZ decreases and the accumulative

收稿日期: 2017-05-31; **修回日期:** 2017-06-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51225404); 山西自然科学基金项目(2014011044)

Supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China(Grant No. 51225404) and Natural Science Foundation of Shanxi Province(Grant No. 2014011044)

作者简介: 杨健锋(1992-), 男, 2014年毕业于太原理工大学采矿工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。E-mail: yangjianfeng0086@link.tyut.edu.cn. 通讯作者: 梁卫国(1972-), 男, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: liangweigu@tyut.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0690

number of acoustic emission events increases. The experimental ratio of K_{eff}/K_{IC} and the theoretical ratio based on the modified maximum tangential stress(MMTS) criterion that takes into account the T -stress matched well when the mudstone SCB specimens are not soaked or only soaked for a short time. However, as the soaking time increases, the experimental results of SCB specimens diverge from the theoretical values gradually. When the soaking time reaches 200 minutes, the deviation becomes very distinct.

Key words: soil mechanics; mudstone; acoustic emission; fracture toughness; semi-circular bend specimens under three-point bending; T -stress

1 引言

泥岩作为一种含黏土晶体矿物的沉积岩类,广泛存在于多种自然及工程地质环境中。由于其物理力学性质复杂,加之泥岩中包含伊利石、蒙脱石与高岭石等其中一种或多种黏土晶体矿物,遇水后水-岩作用十分强烈,对泥岩物理及力学特性的影响极为显著,而水作为工程地质中常见的外界影响因素,对含泥岩地质条件下诸多岩石工程的安全与稳定造成不利影响。如:姚强岭等^[1]以梅花井煤矿工作面机巷为例,研究表明泥岩顶板遇水导致围岩承载性能恶化,易于引起顶板冒顶事故;李汝成和王复明^[2]针对降雨入渗对济邵高速公路泥岩路堤边坡稳定性的研究,表明雨水渗入使得泥岩软化崩解及其抗剪强度明显下降,造成边坡稳定性降低;黄小兰等^[3]以大庆油田南二区某井筒套管破损段泥岩层为研究对象,结果表明泥岩含水量的增加会加快其蠕变应力的增长速度,对套管产生的蠕变挤压应力达到极值所需的时间迅速减小,缩短套管使用寿命等。针对水作用条件下对泥岩理化性质及岩石力学特性的影响,到目前为止国内外诸多学者做出大量室内试验研究及理论机制分析,杨建林等^[4]对内蒙古伊敏河地区泥岩进行遇水-风干循环试验,结果表明该种泥岩单轴抗压强度从 5.31 MPa 降为 0 MPa;谌文武等^[5]研究表明,含水率的增加使得灰绿色及红色泥岩抗剪强度不断降低直至抗剪能力丧失;熊德国等^[6]在饱水条件下对泥岩进行了巴西劈裂、单轴压缩和常规三轴压缩试验,结果表明饱水后泥岩试件抗拉强度、单轴及三轴抗压强度均出现明显降低;周翠英等^[7-8]试验研究得出泥岩各力学强度指标将随着饱水时间的延长而不断劣化及结果符合指数变化规律,且给出了泥岩遇水软化作用的微观解释;A. Ghorbani 等^[9]研究了不同含水率对泥岩中纵波 P 及横波 S 传播速度变化规律的影响。对于岩石类材料的破坏失稳,常表现为外力作用下裂纹的起裂扩展

直至大的宏观裂隙的贯通,而裂纹的起裂扩展规律与诸如断裂韧度等断裂力学指标密切相关;在油气开采、巷道掘进、边坡工程和岩体爆破等众多工程领域,岩石断裂力学的相关理论与试验研究获得了大量关注^[10-12],因此对于泥岩的断裂力学特性研究同样极为重要。但以往针对含黏土矿物泥岩及其在水作用损伤条件下的断裂力学试验及相关断裂力学理论鲜有人进行深入研究。

因此本试验通过一种特殊取样方法获得大量天然泥岩试件岩芯,通过三点弯曲半圆盘(the semi-circular specimens under three-point bending, SCB)断裂力学试验方法得到该种泥岩在水中不同浸泡时间条件下纯 I 型、纯 II 型及 I-II 混合模式断裂韧度值;同时还进行了该泥岩断裂全过程阶段声发射特征分析,得到不同损伤程度下泥岩试件断裂过程区(fracture process zone, FPZ)的尺寸长度;并将试验比值与引入 T 应力后改进的最大周向应力理论(modified maximum tangential stress criterion, MMTS)值进行分析比较,对于深刻揭示水作用下不同损伤程度泥岩的断裂力学行为具有重要理论意义和应用价值。

2 试验方法及试验过程

2.1 试样采集及试验方法

该泥岩试样取自山西省兴县斜沟煤矿下统山西组 200~250 m 深度处。借助 X 射线衍射法(X-Ray diffraction, XRD)对原岩内晶体矿物做出初步分析,如图 1 所示;该泥岩中主要包含高岭石、伊利石、二氧化硅和正长石等晶体矿物,其中诸如高岭石、伊利石等黏土质晶体含量约占原岩的 34%,其余为非黏土质晶体矿物。

目前,对于岩石类材料 I-II 混合型断裂韧度测试方法主要包括四点弯曲试验方法^[13]、人字形切槽巴西圆盘试验法^[14]和紧凑型拉剪试样试验方法^[15];K. P. Chong 和 M. D. Kuruppu^[16]提出一种半圆盘三

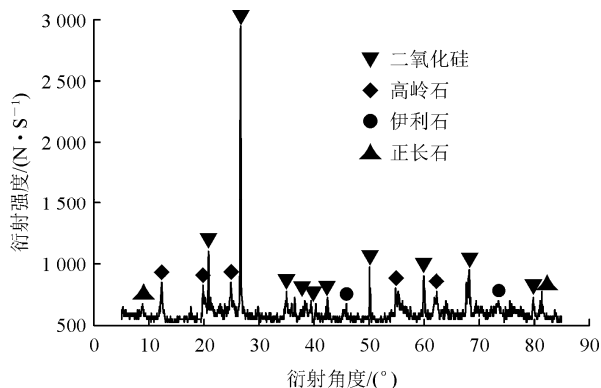


图 1 泥岩 X 射线衍射分析

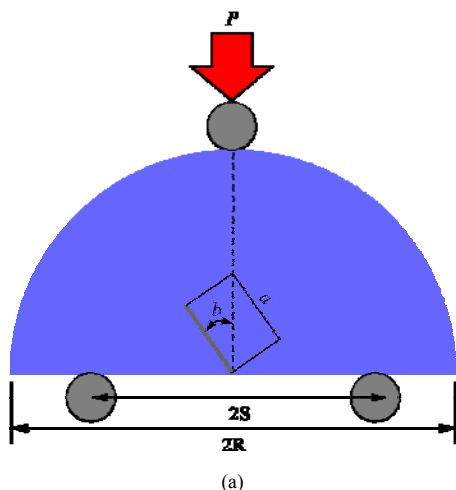
Fig.1 X-ray diffraction spectrum of mudstone

点弯曲试验方法，由于该方法中试件材料消耗小且制备简单、加载方式便捷、试验结果稳定、能实现测试从纯 I 型到纯 II 型间所有复合型断裂韧度值以及能够实现岩石动态断裂韧度的测试等优点，因此广泛应用于多种岩石类材料的断裂韧度测试；国际岩石力学学会 (ISRM) 已给出 SCB 方法测试岩石 I 型断裂韧度的试验建议标准^[17]。如图 2 所示， $2R$ 为 SCB 半圆盘试件的直径， α 为沿中心预制的人工裂缝长度， β 为裂缝与几何对称中心线的角度， $2S$ 为底部对称支撑滚轴跨距， P 为沿试件对称中心加载的压力载荷。通过该试验方法得到 I 型、II 型应力强度因子 (stress intensity factor, SIF) 计算公式^[18]为

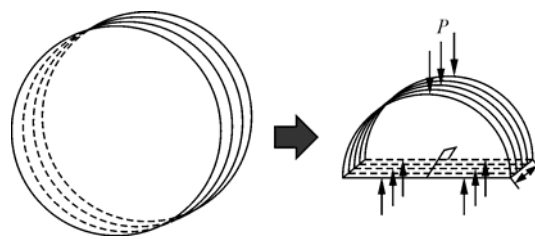
$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi\alpha}}{2RB} Y_I \left(\frac{\alpha}{R}, \frac{S}{R}, \beta \right) \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi\alpha}}{2RB} Y_{II} \left(\frac{\alpha}{R}, \frac{S}{R}, \beta \right) \quad (2)$$

式中： B 为半圆盘试件厚度； Y_I 、 Y_{II} 分别定义为 I 型、II 型断裂韧度一的几何参数，均为裂缝长径比 α/R 、跨径比 S/R 与裂缝角度 β 的几何方程。当 P 取临界值 P_{cr} 时，式(1)和(2)中计算的应力强度因子



(a)



(b)

图 2 半圆盘 (SCB) 试件

Fig.2 The semi-circular bend (SCB) specimen

即为断裂韧度值 K_{IC} 、 K_{IIc} 。

2.2 SCB 试件制备及试验过程

为避免传统取芯设备对天然泥岩的初始机械损伤，以及水基冷却润滑液对泥岩的影响作用，本试验采用数控金刚砂线切割技术，配以油基冷却润滑液，制取了大量直径为 78 mm 的圆柱形泥岩试件。如图 2 所示，截取厚度 $B = 30$ mm 圆盘试件，将其等分切割成半圆盘型；泥岩试件存在的天然层理面垂直于轴线方向，试验分析过程中将其简化为二维平面应力模型，将该泥岩 SCB 试件视为各项同性材料。采用厚度为 0.5 mm 的金刚砂切割片预制裂缝长径比 $\alpha/R = 0.35$ 的人工裂缝。试验时，调整支撑滚轴跨距使跨径比 S/R 固定为 0.5，通过调整预制裂缝角度来实现不同类型断裂韧度的测试。当裂缝角度 $\beta = 0^\circ$ 时 (即 $Y_I \neq 0$ ， $Y_{II} = 0$)，试验测试结果为纯 I 型断裂韧度值；对于该试验几何参数条件下，当 $\beta = 54^\circ$ 时 (即 $Y_I = 0$ ， $Y_{II} \neq 0$)，试验测试结果为纯 II 型断裂韧度值；本试验中又通过制备 β 角度分别为 5° 、 15° 、 30° 与 45° 的 SCB 泥岩试件 (即 Y_I 、 Y_{II} 均不为 0)，以实现混合 I-II 型断裂韧度的测试，如图 3 所示。进行试验前，将 SCB 泥岩试件置于干燥箱内，温度设置为 105°C ，进行 24 h 干燥。根据该种泥岩自身物理化学性质及其几何尺寸，将预制有不同角度裂缝的 SCB 泥岩试件分别浸泡于水中 50、100、150 和 200 min，以模拟水作用下泥岩的



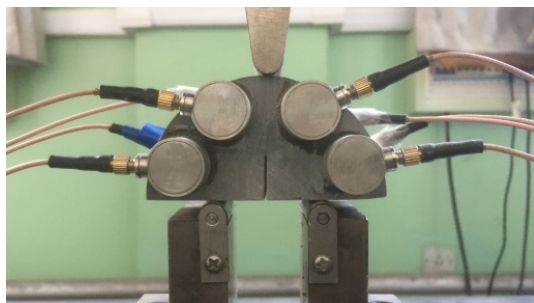
图 3 不同角度的泥岩 SCB 试件

Fig.3 Mudstone SCB specimens with different crack angles

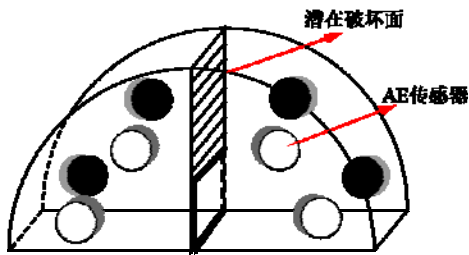
不同损伤程度。将半圆盘三点弯曲试验框架置于WDW型压力机试验系统中，试验机通过位移控制施加荷载，加载速率设为0.02 mm/min，以确保为静力加载作用下的断裂韧度试验。针对各类型不同损伤条件下每组SCB试验至少进行3个试件以确保结果的可靠性，本次试验共计完成试件数90个。

2.3 断裂过程声发射特征分析

测试该类泥岩纯I型断裂韧度试验过程中，采用PCI-2型声发射系统进行监测，研究分析泥岩断裂过程中的声发射(AE)信号特征，得以深入揭示该泥岩SCB试件内部裂纹起裂扩展演化规律。如图4所示，在SCB试件潜在破坏面两侧前后对称布置8个R3α型声发射传感器监测该试件断裂过程，前置放大器增益设置为40 dB。试验前采用断铅试验进行信号强度和定位测试，检查传感器与试样的耦合情况，为保证加载全过程进行了声发射信号定位，应同时开启加载系统与声发射监测系统。本次试验对干燥后未浸泡及浸泡50, 100, 150和200 min后的泥岩SCB试件均进行了声发射(AE)事件监测与定位。



(a)



(b)

图4 SCB试件上声发射传感器布局示意图

Fig.4 Setup of a SCB test and the layout of AE sensors

表1为I型断裂韧度试验测试结果。几类不同浸泡时间条件下泥岩试件典型力-位移曲线如图5所示，加载前期阶段曲线下凹，表明该阶段试件处于压实过程，随着浸泡时间增加，该阶段范围呈不断扩大状态。泥岩试件浸泡水中时间的增加，使得

表1 不同浸泡时间下泥岩I型断裂韧度

Table 1 The results of mode I fracture toughness for mudstone after different soaking durations

试件编号	浸泡时间 t/min	荷载峰值 P_{cr}/N	I型断裂韧度 $K_I/(MPa \cdot m^{0.5})$		平均含水率 $\varepsilon / \%$
			试验值	平均值	
S ₀₋₀₋₁	0	3 324.7	0.820		
S ₀₋₀₋₂	0	3 203.1	0.790	0.82	0.0
S ₀₋₀₋₃	0	3 446.3	0.850		
S ₅₀₋₀₋₁	50	2 972.0	0.733		
S ₅₀₋₀₋₂	50	2 890.9	0.713	0.73	3.4
S ₅₀₋₀₋₃	50	3 016.6	0.744		
S ₁₀₀₋₀₋₁	100	2 554.3	0.630		
S ₁₀₀₋₀₋₂	100	2 598.9	0.641	0.61	5.2
S ₁₀₀₋₀₋₃	100	2 266.5	0.559		
S ₁₅₀₋₀₋₁	150	2 100.2	0.518		
S ₁₅₀₋₀₋₂	150	2 015.1	0.497	0.52	8.3
S ₁₅₀₋₀₋₃	150	2 209.7	0.545		
S ₂₀₀₋₀₋₁	200	1 743.4	0.430		
S ₂₀₀₋₀₋₂	200	1 690.7	0.417	0.435	9.6
S ₂₀₀₋₀₋₃	200	1 857.0	0.458		

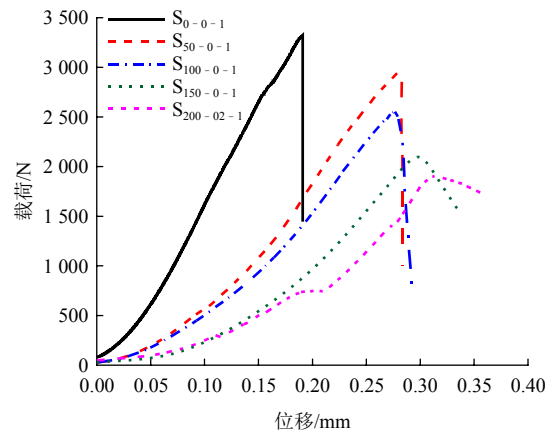


图5 SCB试件在不同浸泡时间下力-位移曲线

Fig.5 Load-displacement curves of the SCB specimens after different soaking durations

该试件损伤程度加深，表现为加载临界压力值随之降低；当浸泡时间达200 min后，泥岩试件I型断裂韧度仅为未浸泡条件下的53%。由峰后曲线可以看出，水作用下泥岩损伤程度的加深，导致其破坏形式由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。其他断裂模式不同浸泡时间条件下的泥岩SCB试件力-位移曲线变化规律与此类似。该种泥岩SCB试件在水中浸泡50, 100, 150和200 min分别对应平均含水率为3.4%, 5.2%, 8.3%与9.6%，与水相互作用时，水分子将进入黏土矿物颗粒之间，形成极化的水分子层，这些水分子层又可以不断吸水扩张；同时，水分子进入伊利石等黏土矿物晶胞层间，形成矿物内部层间水层；又由于黏土矿物吸水膨胀是不均匀

的，使得岩石内部产生不均匀的应力，从而产生大量的微孔隙与微裂隙；加之黏土矿物与其他非黏土粗颗粒矿物间的胶结联结及黏土矿物本身遇水溶蚀等，最终导致岩石的力学强度降低^[19]。

断裂过程区为研究岩石类及混凝土类材料断裂力学特性的重要参数。加载过程中，由于裂纹尖端应力集中，在裂纹前端形成稳定的微裂纹扩展区域。达到峰值载荷时，该区域范围大小即为该试件中 FPZ 的尺寸，且 FPZ 长度尺寸与试件几何特征及其材料自身性质有关^[20]。对于断裂过程区尺寸确定可采用理论推导及物理试验方法，主要包括最大拉应力理论推导方法^[21]、激光散斑法^[22]及声发射法^[23]。其中声发射法可直观地反应 FPZ 尺寸大小，且精度较高。故本试验采用声发射对该泥岩 SCB 试件进行断裂全过程监测外，另一主要目的是测量不同浸泡时间条件下该泥岩试件断裂过程区的尺寸大小。图 6 给出典型泥岩 SCB 试件在 I 型断裂模式下加载至破坏阶段，试件内部声发射事件演化过程；该试件对应浸泡时间为 100 min。加载压实阶段，试件内部仅几处出现极少数声发射事件；加载压力达到峰值载荷 P_{cr} 的 50% 时，预制裂缝尖端附近发生一定数量的声发射事件，其他几处区域同时出现声发射信号；压力值达 70% P_{cr} 阶段，在试件预制裂纹尖端某一特定范围内，声发射事件逐步增多，支撑辊轮及加载压头应力集中处，开始出现声发射事件；压力达到 P_{cr} 阶段时，预制裂缝前端这一特定尺寸范围内声发射事件数量基本达到峰值，这一特定区域即为该泥岩试件断裂过程区的尺寸范围；试件达破坏阶段，沿预制裂纹断裂扩展破坏面，声发射事件急剧增加。图 7 为该泥岩(S₁₀₀₋₀₋₁)试件三点弯曲加载过程中力与位移及对应的声发射累计事件关系曲线。加载至

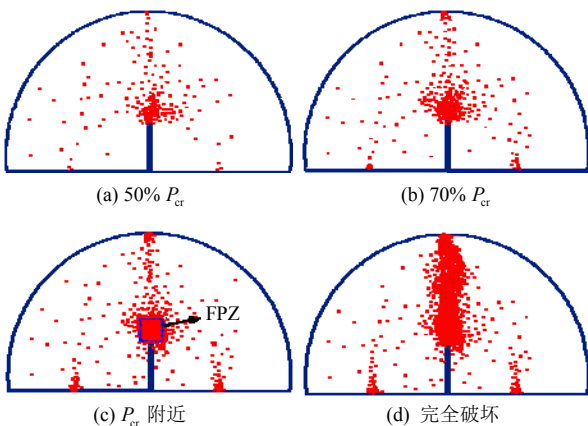


图 6 泥岩试件 S₁₀₀₋₀₋₁ 不同加载阶段声发射事件空间分布
Fig.6 Spatial distribution of AE events at different loading stages for the specimen S₁₀₀₋₀₋₁

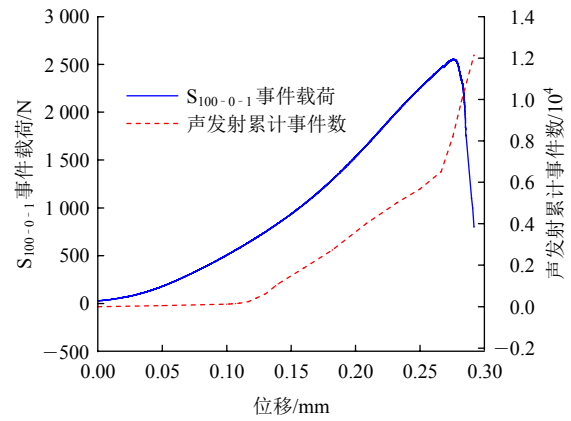


图 7 S₁₀₀₋₀₋₁ 试件荷载力 - 位移曲线及其对应的声发射累计事件曲线
Fig.7 Load-displacement curve/AE events curve derived from the specimen S₁₀₀₋₀₋₁

峰值载荷前，声发射事件累计数量大致呈线性规律增加；达到峰值点附近，累计曲线发生明显偏转。

图 8 中描述了各个浸泡时间条件下泥岩 SCB 试件加载至最大载荷阶段时声发射事件分布特点，及不同损伤程度下试件内断裂过程区的尺寸大小。断裂过程区尺寸大小由声发射事件密度所决定，将划定区域内声发射事件垂直投影到二维平面上，当声发射事件密度超过 200 个/cm²，点云已完全覆盖该划定区域面积，此时认为该区域内微裂纹得到充分发育，即该区域为断裂过程区(PFZ)的尺寸范围。对应浸泡时间为 0, 50, 100, 150 和 200 min，试验得到泥岩 SCB 试件中 FPZ 的平均长度分别约为 7.5,

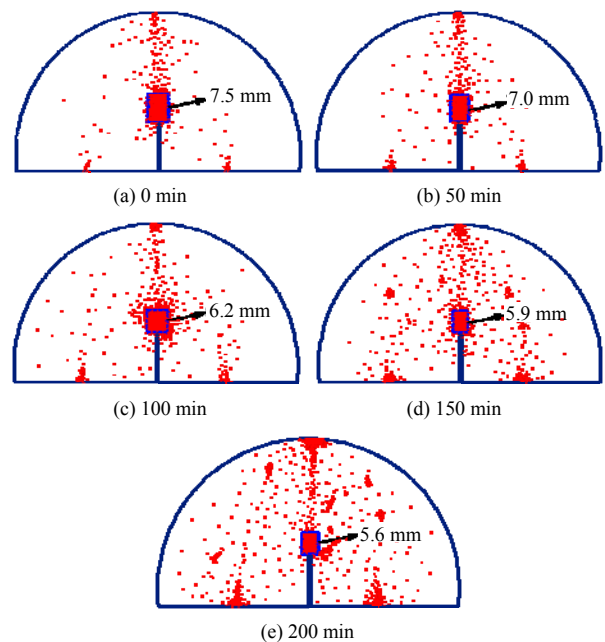


图 8 不同浸泡时间泥岩 SCB 试件声发射空间分布
Fig.8 Spatial distribution of AE events after soaking different durations for the mudstone SCB specimens

7.0, 6.2, 5.9 与 5.6 mm。此外随着浸泡时间的增加, 试件其他区域声发射事件增多及分布区域扩大; 同时在支撑辊轮及压头应力集中区域, 声发射事件数量随着试件浸泡时间的增加而增多; 这同样反映了水作用下, 伴随泥岩试件损伤程度的加深, 试件各部分力学承载能力不断降低。

从各个不同浸泡时间泥岩岩样声发射事件统计规律来看, 如图 9 所示, 随着浸泡时间的增加, 声发射事件累计总数越来越多。未与水接触的泥岩 SCB 试件平均声发射事件统计总数约为浸泡时间 200 min 条件下平均声发射事件总数的 53.7%。

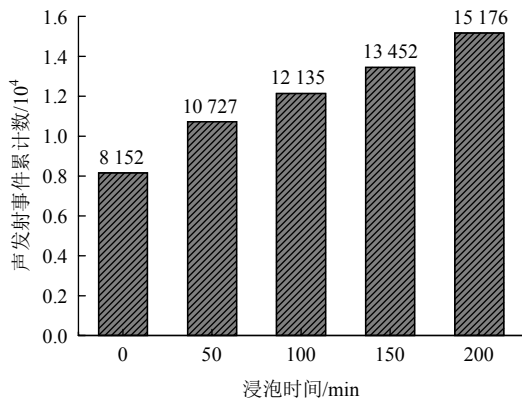


图 9 不同浸泡时间下泥岩 SCB 试件声发射累计比较
Fig.9 Comparison of accumulative number of acoustic emission events of the mudstone SCB specimens with different soaking durations

3 I - II 混合型断裂力学特性分析

3.1 理论依据

在实际工程中, 由于受到外部复杂的应力作用, 岩石内部多发生 I - II 混合型裂纹扩展破坏。对此目前存在多种 I - II 复合型裂纹扩展理论, 较为经典的为最大周向应力理论^[24]、最小应变能密度理论准则^[25]、最大能量释放率理论^[26]等。其中最大周向应力理论简单实用, 且对于岩石这类抗拉强度较低的材料来说更加符合实际情况, 故该理论应用最为广泛。其理论表达公式如下:

$$\sigma_{\theta\theta c} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos^2 \frac{\theta_m}{2} \left(K_I \cos \frac{\theta_m}{2} - 3K_{II} \sin \frac{\theta_m}{2} \right) \quad (3)$$

式中: K_I , K_{II} 分别为 I 型、II 型应力强度因子; 当理论起裂角度 θ 达到特定值 θ_m 时, 切应力 $\sigma_{\theta\theta}$ 达到临界值 $\sigma_{\theta\theta c}$, 原始裂纹开始扩展。该传统最大周向力理论仅考虑了奇异项, 即应力强度因子的作用, 而忽略了非奇异项。此处非奇异项主要是指与裂纹方向平行的常数项, 即 T 应力。B. Cotterell 和 J. R.

Rice^[27]研究表明, T 应力对于 I 型断裂韧性及裂纹扩展角度在一定条件下存在较大影响, 同样 T 应力对于 I - II 混合型裂纹扩展路径及断裂韧度值影响显著^[28]。M. L. Williams^[29]给出裂纹尖端附近应力场分布规律, 极坐标系下裂纹尖端简化应力场分布状况计算式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\theta\theta} \\ \sigma_{r\theta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{\theta}{2} \sin^2 \frac{\theta}{2} & \frac{3}{2} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} - 2 \sin \frac{\theta}{2} \\ \cos^3 \frac{\theta}{2} & -\frac{3}{2} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \\ \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} & \frac{3}{2} \cos \theta \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T \cos^2 \theta \\ T \sin^2 \theta \\ T \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o(r^{1/2}) \\ o(r^{1/2}) \\ o(r^{1/2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ 与 $\sigma_{r\theta}$ 分别为裂纹尖端附近法向应力场、周向应力场及切向应力场; K_I 和 K_{II} 分别为 I 型、II 型应力强度因子; T 为非奇异常数项; $o(r^{1/2})$ 为该应力场分布中高阶无穷小项, 此处可忽略不计。由此得出引入 T 应力后改进的最大周向应力理论 (the maximum modified tangential stress criterion, MMTS), 表达式为

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos^2 \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos \frac{\theta}{2} - 3K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right) + T \sin^2 \theta \quad (5)$$

M. R. Ayatollahi 和 M. R. M. Aliha^[18]将改进后的最大周向应力理论引入到半圆盘三点弯曲(SCB)试验方法中, 并通过有限元方法模拟计算了 SCB 试件在相应预制裂纹角度 β 、裂纹长径比 α/R 与跨径比 S/R 条件下的 T 应力值。定义 SCB 试件中 T 应力表达式为

$$T = \frac{P}{2RB} T^* \left(\frac{\alpha}{R}, \frac{S}{R}, \beta \right) \quad (6)$$

式中: T^* 为裂纹长径比 α/R 、跨径比 S/R 和角度 β 的几何函数(量纲一)。欲通过 MMTS 理论分析计算泥岩 SCB 试件 I - II 混合模式加载条件下的断裂韧度, 该 I - II 混合型裂纹开裂临界角度计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_m} &= 0 \\ [K_{Im} \sin \theta_m + K_{IIm} (3 \cos \theta_m - 1)] - \frac{16T}{3} \sqrt{2\pi r_c} \cos \theta_m \sin \frac{\theta_m}{2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: r_c 为断裂过程区(PFZ)的范围半径长度。式(7)表明 I - II 型混合模式下断裂韧度 K_{Im} , K_{IIm} 与 T 应

力共同决定了临界角度 θ_m 值。将式(7)中得到的 θ_m 值代入式(5)中得 I - II 混合模式下临界最大周向应力 $\sigma_{\theta\theta c}$ 的计算公式：

$$\sqrt{2\pi r_c} \sigma_{\theta\theta c} = \cos^2 \frac{\theta_m}{2} \left(K_{I_m} \cos \frac{\theta_m}{2} - 3K_{II_m} \sin \frac{\theta_m}{2} \right) + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_m \quad (8)$$

由式(8)可知，当试件为纯 I 型断裂，即 $K_{II_m} = 0$ ， $\theta = 0$ 时，得到如下结果：

$$\sqrt{2\pi r_c} \sigma_{\theta\theta c} = K_{IC} \quad (9)$$

式中纯 I 型断裂韧度 K_{IC} 可由临界最大周向应力值表示；则由式(8)和(9)可建立 I - II 型混合模式下的断裂韧度 K_{I_m} ， K_{II_m} 与纯 I 型断裂韧度 K_{IC} 的关系表达式：

$$K_{IC} = \cos^2 \frac{\theta_m}{2} \left(K_{I_m} \cos \frac{\theta_m}{2} - 3K_{II_m} \sin \frac{\theta_m}{2} \right) + \sqrt{2\pi r_c} T \sin^2 \theta_m \quad (10)$$

为更加深入地揭示 I - II 型混合模式下该泥岩的断裂力学特性，更好地表达 K_{I_m} ， K_{II_m} 与纯 I 型断裂韧度 K_{IC} 的内在关系；此处定义了 I - II 型断裂条件下，等效断裂韧度值 K_{eff} ，及 I，II 型断裂韧度值相关比值参数 M^e ：

$$K_{eff} = \sqrt{K_{I_m}^2 + K_{II_m}^2} \quad (11)$$

$$M^e = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{K_{II_m}}{K_{I_m}} \right) \quad (12)$$

式(12)中， M^e 取值变化范围为 0~1；纯 I 型断裂条件下 M^e 取值为 1，纯 II 型断裂条件下 M^e 取值为 0。对于本试验中 SCB 试件不同预制裂纹角度 β 条件下得到的 M^e 值不同，如表 2 所示。针对 SCB 试件进行的 I - II 型混合断裂韧度测试试验，将式(1)，(2)，(6)与(11)代入式(10)中，最终得到等效断裂韧度 K_{eff} 与纯 I 型断裂韧度 K_{IC} 关系表达式：

$$\frac{K_{eff}}{K_{IC}} = \sqrt{Y_I^2 + Y_{II}^2} \left[\cos^2 \frac{\theta_m}{2} \left(Y_I \cos \frac{\theta_m}{2} - 3Y_{II} \sin \frac{\theta_m}{2} \right) + T^* \sqrt{\frac{2r_c}{\alpha}} \sin^2 \theta_m \right]^{-1} \quad (13)$$

式(13)表明，SCB 试件得到的 K_{eff} / K_{IC} 理论值，由该 SCB 中的几何参数 Y_I ， Y_{II} 与 T^* 及该试件中断裂过程区长度 r_c 所决定。

表 2 关于 SCB 试件对应各个预制裂纹角度 β 时的断裂几何参数($\alpha / R = 0.35$ ， $S / R = 0.5$)

Table 2 Fracture parameters for the SCB specimens with and for various crack inclination angles($\alpha / R = 0.35$ and $S / R = 0.5$)

$\beta / (^\circ)$	Y_I	Y_{II}	T^*	M^e
0	2.787	0.000	-0.697 2	1.000 0
5	2.748	0.249	-0.591 8	0.942 5
15	2.397	0.671	0.014 2	0.826 2
30	1.461	0.978	1.487 5	0.624 5
45	0.518	0.871	2.714 3	0.341 6
54	0.000	0.659	3.083 0	0.000 0

3.2 试验结果分析

图 10 为 II 型断裂模式即预制裂纹角度 β 为 54° 时在各个浸泡时间条件下，几类典型泥岩 SCB 试件中裂纹实际扩展路径图。在未浸泡或浸泡时间较短的试件中，只有 1 条宏观裂纹从预制裂缝尖端开裂，直至施加集中力载荷位置处；但随着损伤程度不断加深，外载荷作用所产生的裂纹开裂起始位置逐渐偏离了预制裂缝尖端，同时施加载荷应力集中处破坏加剧，并伴随着试件表面微裂纹的增多；当浸泡时间达到 200 min 时，宏观裂纹偏离预制的裂缝尖端现象明显；浸泡时间远大于 200 min 后，试件中出现多条交错的宏观裂纹及次生裂纹，施加载荷应力集中处破坏明显，表明此时泥岩试件已严重损伤破坏。表 3 为最终浸泡 200 min 条件下，该泥岩纯 I 型至纯 II 型断裂韧度试验值。结果表明该种条件下泥岩各类型断裂韧度劣化十分明显；纯 I 型至纯 II 型断裂韧度值分别为未损伤条件下的 53%，56.5%，61%，64%，64.7%与 67.6%。同时可得出该泥岩纯 I 型至纯 II 型断裂韧度对水作用的敏感程度逐渐降低，即 I 型断裂韧度值受水作用影响程度最大。其他混合断裂模式下不同浸泡时间的泥岩 SCB 试件裂纹扩展规律与上述试验现象相类似。

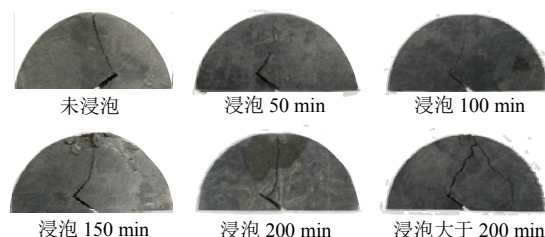
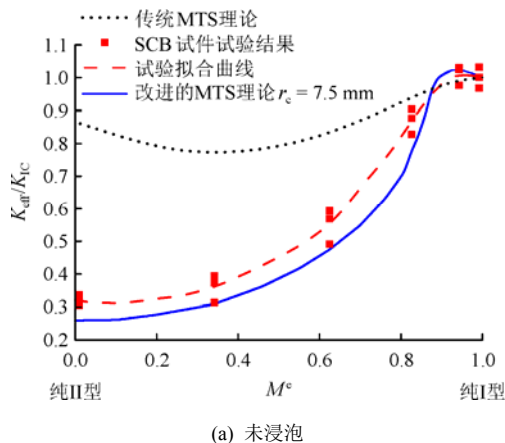


图 10 不同浸泡时间 SCB 试件纯 II 型裂纹扩展路径
Fig.10 The crack propagation of the SCB specimens for pure mode II with different soaking durations

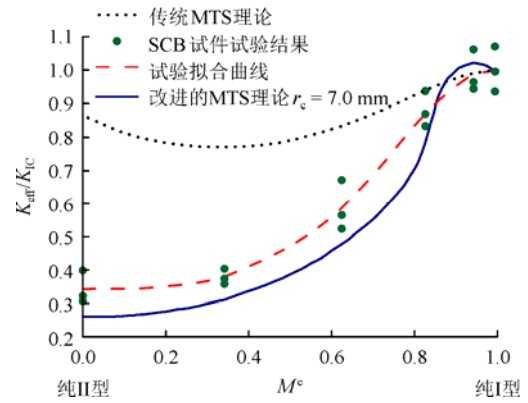
表3 浸泡 200 min 条件下泥岩 I 型至 II 型断裂韧度
Table 3 The fracture toughness from mode I to mode II for the mudstone after soaking 200 minutes

裂缝角度 $\beta / (^\circ)$	平均载荷峰值 P_{cr} / N	平均断裂韧度 $K_{Im} / (MPa \cdot m^{0.5})$		损伤程度 $\rho / \%$
		K_{Im}	K_{IIm}	
0	1 946.1	0.435	0.000	53.0
5	1 914.8	0.466	0.042	56.5
15	2 072.7	0.440	0.123	61.0
30	2 454.4	0.317	0.212	64.0
45	2 915.9	0.134	0.225	64.7
54	2 417.7	0.000	0.141	67.6

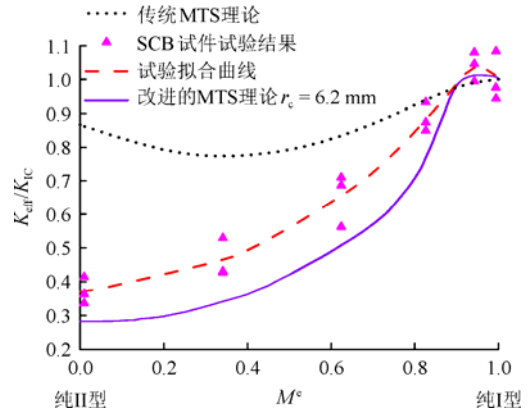
本试验中采用厚度 B 为 30 mm 的 SCB 试件, 固定裂缝长径比 $\alpha/R = 0.35$, 及支撑滚轴跨径比 $S/R = 0.5$, 通过改变预制裂缝角度 β 以实现不同模式下的断裂韧度测试。M. R. Ayatollahi 和 M. R. M. Aliha^[30]给出了 $\alpha/R = 0.35, S/R = 0.5$ 及预制裂纹角度 $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 及 54° 条件下对应的 Y_I, Y_{II} 与 T^* 几何参数值, 如表 2 所示。该参数适用于均质各项同性材料, 本试验初始假定浸泡不同时间后泥岩试件内部发生均匀损伤, 仍将浸泡后的泥岩 SCB 试件视为各项同性材料; 故将该参数用于式(1)与(2), 经试验测量峰值载荷以确定泥岩不同浸泡时间下的断裂韧度值。通过式(5), (13)得到 K_{eff} 与 K_{IC} 的理论比值, 将其与试验得到的 K_{eff}/K_{IC} 值进行对比分析。图 11 为不同浸泡时间条件下, 通过 SCB 试件三点弯曲试验得到的 K_{eff}/K_{IC} 拟合曲线与传统 MTS 理论及引入 T 应力后改进的 MTS 理论值曲线对比图。如图所示, 未浸泡及浸泡时间较短的条件下, 试验结果与改进后的最大周向应力理论(MMTS)结果符合程度较高; 但随着损伤程度的加深, 试验值拟合曲线逐渐偏离 MMTS 理论曲线, 当浸泡时间达到 200 min 时, 该偏离较为明显。浸泡时间的增加使得泥岩试件内部微裂纹逐渐增多, 增加的微裂



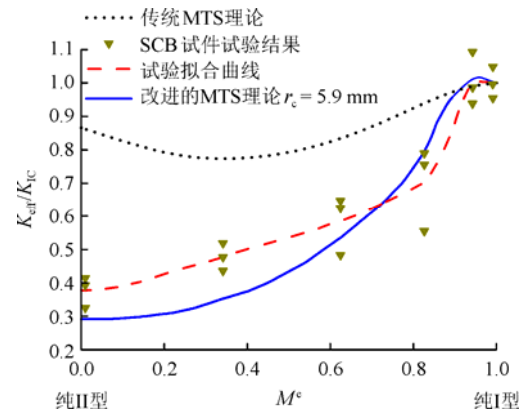
(a) 未浸泡



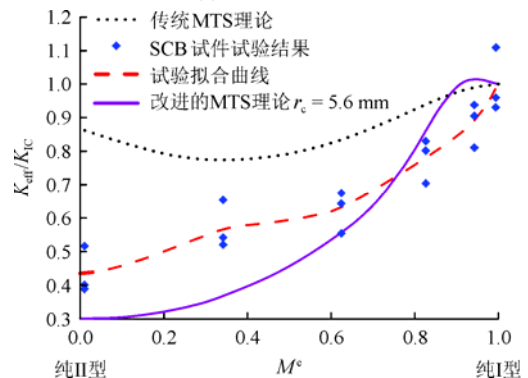
(b) 浸泡 50 min



(c) 浸泡 100 min



(d) 浸泡 150 min



(e) 浸泡 200 min

图 11 泥岩 SCB 试件试验比值 K_{eff}/K_{IC} 与改进的最大周向应力理论值比较

Fig.11 Comparison of the test ratio K_{eff}/K_{IC} of the mudstone SCB specimens with the theoretical values based on the modified MTS criterion

纹及非均匀损伤区域使得试件各项异性逐步显现, 最终导致试验值偏离理论值。

4 结 论

(1) 随着浸泡时间的增加, 三点弯曲加载作用下泥岩 SCB 试件的峰值载荷随之降低, 断裂韧度不断劣化; 浸泡时间达 200 min 时, 泥岩纯 I 型至纯 II 型断裂韧度分别降低至未浸泡条件下的 53%, 56.5%, 61%, 64%, 64.7% 与 67.6%; 同时水对该泥岩纯 I 型至纯 II 型断裂韧度影响程度逐渐降低, I 型断裂韧度值对水作用影响的敏感程度最大; 随着损伤程度的加深, 泥岩试件由脆性破坏逐渐转变为延性破坏。

(2) 经声发射实时定位系统确定了各个浸泡时间下泥岩 SCB 试件中断裂过程区(FPZ)的长度, 对应未浸泡及浸泡 50, 100, 150 与 200 min 条件下, FPZ 平均长度分别为 7.5, 7.0, 6.2, 5.9 与 5.6 mm。断裂过程区长度随着浸泡时间增加呈缩减趋势, 同时伴随损伤程度的加深, SCB 试件中声发射事件发生区域范围逐渐扩大, 声发射事件累计总数不断增加, 泥岩试件在未浸泡条件下的声发射事件累计总数仅为浸泡 200 min 时的 53.7%。

(3) 在未浸泡及浸泡时间较短的泥岩试件中, 裂纹扩展路径仅表现为只有 1 条宏观裂纹从预制裂缝尖端开裂至施加集中力载荷位置处; 但随着损伤程度不断加深, 裂纹开裂起始位置逐渐偏离预制裂缝尖端, 并伴随着试件表面微裂纹的增多; 当浸泡时间达到 200 min 时, 宏观裂纹偏离预制裂缝尖端现象明显; 浸泡时间远大于 200 min 后, 试件中出现多条交错的宏观裂纹及次生裂纹, 此时试验数据已不再可信。

(4) 未浸泡或浸泡时间较短条件下, 通过 SCB 试件三点弯曲试验得到的 I - II 混合型断裂韧度比值 $K_{\text{eff}}/K_{\text{IC}}$ 与引入 T 应力改进后的最大周向应力(MMTS)理论比值符合, 但随着损伤程度加深, 试件内部增加的微孔隙、微裂纹及非均匀损伤区域使得泥岩试件的各项异性不断加剧, 试验值曲线逐渐偏离该理论值曲线; 浸泡时间达到 200 min 时, 试验结果偏离理论结果较为明显。

参考文献(References):

[1] 姚强岭, 李学华, 瞿群迪, 等. 泥岩顶板巷道遇水冒顶机理与支护对策分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 28 - 33.(YAO

Qiangling, LI Xuehua, QU Qundi, et al. Supporting countermeasures and roof falling mechanism reacting with water in mudstone roof roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(1): 28 - 33.(in Chinese))

[2] 李汝成, 王复明. 降雨入渗对泥岩 - 土混填路堤稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 260 - 2 266.(LI Rucheng, WANG Fuming. Effect of rainfall infiltration on stability of mudstone-soil mixture embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 260 - 2 266.(in Chinese))

[3] 黄小兰, 杨春和, 刘建军, 等. 不同含水情况下的泥岩蠕变试验及其对油田套损影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3 477 - 3 482.(HUANG Xiaolan, YANG Chunhe, LIU Jianjun, et al. Experimental study on mudstone's creep behavior under different water contents and its effect on casing damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 477 - 3 482.(in Chinese))

[4] 杨建林, 王来贵, 李喜林, 等. 遇水 - 风干循环作用下泥岩断裂的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 3 606 - 3 612.(YANG Jianlin, WANG Laigui, LI Xilin, et al. Research on micro-fracture mechanism of mudstone after wet-dry cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp.2): 3 606 - 3 612.(in Chinese))

[5] 谌文武, 林高潮, 刘 伟, 等. 全风化灰绿色及红色泥岩物理力学性质对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2 572 - 2 582.(CHEN Wenhui, LIN Gaochao, LIU Wei, et al. Physical and mechanical properties of weathered green and red mudstones[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2 572 - 2 582.(in Chinese))

[6] 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 - 1 006.(XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 998 - 1 006.(in Chinese))

[7] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33 - 38.(ZHOU Cuiying, DENG Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33 - 38.(in Chinese))

[8] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394 - 400.(ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. Research on softening micro-mechanism of special soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394 - 400.(in Chinese))

- [9] GHORBANI A, ZAMORA M, COSENZA P. Effects of desiccation on the elastic wave velocities of clay-rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(8): 1 267 - 1 272.
- [10] 陈建国, 邓金根, 袁俊亮, 等. 页岩储层 I 型和 II 型断裂韧性评价方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1 101 - 1 105. (CHEN Jianguo, DENG Jingen, YUAN Junliang, et al. Determination of fracture toughness of modes I and II of shale formation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1 101 - 1 105.(in Chinese))
- [11] 王蒙, 朱哲明, 王雄. 冲击荷载作用下的 I/II 复合型裂纹扩展规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1 323 - 1 332. (WANG Meng, ZHU Zheming, WANG Xiong. The growth of mixed-mode I/II crack under impacting loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1 323 - 1 332.(in Chinese))
- [12] 陈明, 郭天阳, 卢文波, 等. 爆破开挖对边坡岩体裂纹扩展的扰动机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(7): 1 307 - 1 314. (CHEN Ming, GUO Tianyang, LU Wenbo, et al. Disturbance of blasting excavation on crack growth in rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(7): 1 307 - 1 314.(in Chinese))
- [13] 黄建安, 王思敬. 岩石断裂韧性的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 1982, 4(2): 67 - 75. (HANG Jian'an, WANG Sijing. Experimental study of the fracture toughness of rock[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982, 4(2): 67 - 75.(in Chinese))
- [14] 许媛, 戴峰, 徐奴文, 等. 人字形切槽巴西圆盘岩石试样复合型断裂渐进过程数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(12): 2 189 - 2 197. (XU Yuan, DAI Feng, XU Nuwen, et al. Numerical analysis of mixed mode progressive rock fracture mechanism of cracked chevron notched Brazilian disc specimens[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12): 2 189 - 2 197.(in Chinese))
- [15] MACCAGNO T M, KNOTT J F. The fracture behaviour of PMMA in mixed modes I and II[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1989, 34(1): 65 - 86.
- [16] CHONG K P, KURUPPU M D. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials[J]. *International Journal of Fracture*, 1984, 26(2): 59 - 62.
- [17] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen[M]. [S. l.]: Springer International Publishing, 2013: 267 - 274.
- [18] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Fracture parameters for a cracked semi-circular specimen[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 20 - 25.
- [19] 黄宏伟, 车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 866 - 870. (HUANG Hongwei, CHE Ping. Research on Micro-mechanism of Softening and argillitization of mudstone[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(7): 866 - 870.(in Chinese))
- [20] OTSUKA K, DATE H. Fracture process zone in concrete tension specimen[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2000, 65(2): 111 - 131.
- [21] 卿龙邦, 李庆斌, 管俊峰. 混凝土断裂过程区长度计算方法研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(4): 197 - 201. (QING Longbang, LI Qingbin, GUAN Junfeng. Calculation method of the length of fracture process zone of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(4): 197 - 201.(in Chinese))
- [22] WANG C, LIU P, HU R, et al. Study of the fracture process zone in rock by laser speckle interferometry[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(1): 65 - 69.
- [23] OHTSU M, KAMINAGA Y, MUNWAM M C. Experimental and numerical crack analysis of mixed-mode failure in concrete by acoustic emission and boundary element method[J]. *Construction and Building Materials*, 1999, 13(1): 57 - 64.
- [24] ERDOGAN F, SIH G C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 527.
- [25] SIH G C. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems[J]. *International Journal of Fracture*, 1974, 10(3): 305 - 321.
- [26] HUSSAIN MA, PU S L, UNDERWOOD J. Strain energy release rate for a crack under combined mode I and mode II[C]// *Proceedings of the 1973 National Symposium on Fracture Mechanics*. [S. l.]: [s. n.], 1974: 2 - 28.
- [27] COTTERELL B, RICE J R. Slightly curved or kinked cracks[J]. *International Journal of Fracture*, 1980, 16(2): 155 - 169.
- [28] 唐世斌, 黄润秋, 唐春安, 等. T 应力对岩石裂纹扩展路径及起裂强度的影响研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(6): 1 521 - 1 529. (TANG Shibin, HUANG Runqiu, TANG Chun'an, et al. Effect of T-stress on crack growth path in rock and fracture strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(6): 1 521 - 1 529.(in Chinese))
- [29] WILLIAMS M L. On the stress distribution at the base of a stationary crack[J]. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1957, 24: 109 - 114.
- [30] AYATOLLAHI M R, ALIHA M R M. Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading[J]. *Computational Materials Science*, 2007, 38(4): 660 - 670.