

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1122

层状含水页岩的抗拉强度特性试验研究

腾俊洋^{1,2}, 唐建新^{1,2}, 张 闯^{1,2}

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044)

摘 要: 为分析层理和水对页岩的抗拉强度特性的影响, 现场选取龙马溪组黑色页岩制备成 4 种含水状态含层理页岩, 沿与层理呈 0°、30°、60°和 90°夹角加载进行巴西劈裂圆盘试验, 试验过程同步进行声发射测试, 并采用离散元软件 3DEC 对试验结果进行数值模拟验证。结果表明, 相比于含层理页岩, 同时考虑含水 and 层理的页岩在巴西劈裂试验中有其独特的破坏模式和力学特性。含层理页岩的巴西劈裂破坏模式和抗拉强度均与层理角度和含水率有关, 破坏模式主要受控于层理与荷载的加载方向, 水虽不会影响其破坏模式但能够导致次生裂纹的形成。抗拉强度则表现出随层理角度的增加而先减小后增大, 随含水率的增加而减小的趋势。并且, 在页岩同时受水和层理损伤作用时, 受层理损伤程度越大, 水对其损伤程度也越高。通过对含层理不同含水率页岩的微观结构分析得到了上述变化规律的内在机制, 即页岩层理面处的内部矿物颗粒遇水膨胀, 产生膨胀力作用, 使页岩内部结构变得松散、破碎, 微裂纹逐渐增多、变宽, 宏观表现为次生裂纹的增多, 矿物颗粒间的黏结力也在水的作用下降低从而使页岩的抗拉强度下降。

关 键 词: 页岩; 巴西劈裂; 含水率; 层理; 3DEC

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1317-10

Experimental study on tensile strength of layered water-bearing shale

TENG Jun-yang^{1,2}, TANG Jian-xin^{1,2}, ZHANG Chuang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To analyze the effects of bedding and water on the tensile strength of shale, specimens with four water contents were prepared with Longmaxi Formation black shale. Brazilian disc splitting tests were carried out on prepared specimens along the angles of 0°, 30°, 60° and 90°. Acoustic emission tests were simultaneously performed during the experiments, and results were further simulated by the discrete element software 3DEC. The results show that, compared with the bedding shale, the shale with both water and bedding presents a unique failure mode and special mechanical properties. Both the fracture pattern and tensile strength of Brazil shale are related to the bedding angle and water content. Particularly, the failure mode is mainly controlled by the loading direction of bedding. Although water does not affect the failure mode, it leads to the formation of secondary cracks. The tensile strength firstly decreases and then increases with increasing the bedding angle, while it decreases with increasing water content. Moreover, under the combined effects of water and bedding, the more the shale is damaged by the bedding, the higher it is damaged by the water. The mechanism of the above changes is obtained based on the analysis of the microstructure of the shale at different water contents. When the internal mineral particles are swollen with water at the surface of the shale, the expansion force is generated, and internal structure of the shale became loose and broken. Furthermore, microcracks gradually increased and broadened. The macroscopic performance accounted for the increase of secondary cracks. In addition, the bond strength between mineral particles is also reduced under the action of water, which further decreases the tensile strength of shale.

Keywords: shale; Brazilian test; moisture content; bedding; 3DEC

1 引 言

页岩在我国分布较为广泛, 尤其是西南山区^[1],

隧道、涵洞等工程开挖常常在页岩岩体中进行, 而页岩在压密胶结的成岩过程中形成较多层理、裂隙等结构面, 其强度受矿物成分含量、排列方式及胶

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主课题重点项目(No. 2011DA105287-ZD201504)。

This work was supported by the Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (2011DA105287-ZD201504).

第一作者简介: 腾俊洋, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程围岩稳定性方面的研究工作。E-mail: jteng89@hotmail.com

通讯作者: 唐建新, 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要从事矿山压力及地下工程围岩稳定性方面的教学与研究工作。E-mail: jtxtang@cqu.edu.cn

结程度影响较大,各向异性显著,遇水更易劣化,极易引发工程问题^[2-3]。因此,研究页岩在层理和水的作用下的力学特性工程意义巨大。

页岩的抗拉特性是评判页岩岩体工程稳定性的重要因素之一,由于岩石的抗拉强度远小于其抗压强度,工程开挖引起的局部拉应力常常导致岩体的局部或整体失稳,如页岩隧道的拱顶坍塌或底鼓等都与拉应力集中密切相关。可见,研究由页岩岩体中层理和水的存在所引起的其抗拉特性的改变尤为重要。

巴西劈裂试验是测试岩石的抗拉强度特性最为常用的一种手段。国内外学者从理论、试验、数值模拟等方面对层状岩体的巴西劈裂特性做了较多的研究工作^[4-8]。Claesson 等^[8]认为,由经典弹性力学所推导出的各向同性岩石巴西劈裂强度计算公式不再适用于含层理结构的各向异性体,并理论推导了横观各向同性体的巴西劈裂强度计算公式。该公式得到了一定的认可和应用^[9-12]。Debecker 等^[13]结合巴西劈裂试验、声发射和数字图形技术研究了板岩的破裂过程和破裂模式,指出层理、片理等结构面对岩石强度的各向异性的重要影响。Tavallali 等^[7, 14]在研究层理方向和岩石的微观组构对层状砂岩在巴西劈裂试验中的破坏模式影响规律时发现,砂岩的层理角度不同,其内部矿物成分及颗粒大小也有所区别,从而影响着岩石的破裂模式及抗拉强度。如作者在巴西劈裂试验中观察到,砂岩的层理角度 $\theta=45^\circ\sim 60^\circ$ 时,其破坏裂纹由中央裂纹向层理控制裂纹转化, $\theta<45^\circ$ 时,破坏裂纹主要为中央裂纹, $\theta<60^\circ$ 时,破坏裂纹主要由层理控制。刘运思^[15]、Khanlari^[16]等先后通过研究含层理板岩和砂岩的巴西劈裂情况后发现了类似的破坏模式。Vervoort 等^[17]则进一步研究了砂岩、页岩、板岩、片麻岩等 9 种含层理岩石的巴西劈裂破坏模式,认为岩石的抗拉强度和破坏模式是层理倾角的函数,并根据层理角度将其归纳为 4 种模式。

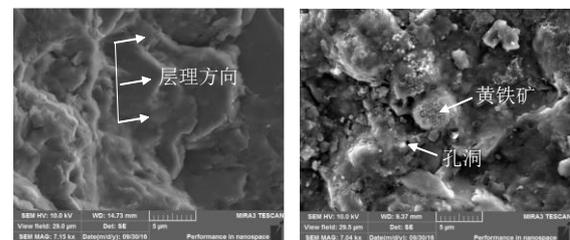
水对岩石的抗拉强度影响规律研究较少,但其对岩石抗拉强度的损伤作用和破坏模式的影响不容忽视,如尤明庆等^[18]指出巴西劈裂强度的遇水软化系数大于其压缩强度的软化系数。而水对含层理岩石的抗拉强度、巴西劈裂模式模型等的影响规律更是知之甚少,因此,本文通过对含水及层理构造页岩的巴西劈裂试验,结合声发射及 3DEC 数值模拟技术来研究层理和水对页岩的抗拉强度、巴西劈裂破坏模式等的影响规律。

2 页岩微观结构分析

试样取自重庆市南川区马嘴隧道,系志留系下统龙马溪组黑色页岩,呈黄灰色、黑色,页理状构造。利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM, TESCAN MIRA3)来分析页岩内部的矿物成分、排列方式和原始损伤等,从而为巴西劈裂试验结果分析提供依据。

图 1(a)为页岩层理处电镜扫描图像,由图 1(a)可见,层理处的矿物排列具有很好的方向性,沿层理方向分布有较为密集的微孔隙、裂隙,微孔隙、裂隙主要发育于石英、片状伊利石、碳酸盐等矿物颗粒。推测页岩内部的原生微孔隙、裂隙是页岩在成岩过程中矿物颗粒被长期的地质沉积挤压及黏土矿物脱水、伊利石、长石等矿物溶蚀作用的结果。矿物颗粒垂直于沉积挤压方向定向排列,并沿颗粒边界形成原生微裂纹,不稳定矿物则在溶蚀作用下形成微小孔洞。

图 1(b)为远离页岩层理部位的电镜扫描结果,由图可见,相比于原生微裂纹,该研究区域微孔洞更为发育,且微孔隙、裂隙的分布不具有明显的方向性。另外,该研究区域观察到由黄铁矿颗粒紧密堆集构成的集合体,呈蜂窝状分布,直径约 $2\ \mu\text{m}$,黄铁矿集合体附近发育有较密集的微孔洞。



(a) 页岩层理部位

(b) 页岩内部

图 1 黑色页岩电镜扫描图像
Fig.1 SEM images of black shale

3 试件制备及试验过程

3.1 试件制备过程

现场选取隧道内同一掌子面完整新鲜岩块带回实验室进行取芯,取芯之前先将现场带回的岩块在切割机上切割成含层理长方形岩体(见图 2),再用 SC-300 型自动取芯机进行取芯,该取芯机可调整钻取速度,由于页岩取芯率较低,钻取速度不宜过高,一般取 $2\ \text{mm}/\text{min}$ 。取芯时钻头钻取方向与岩块层理面呈 0° 夹角。另外,选取现场层理较厚的岩块钻取一组不含层理的岩芯作为对比。取芯后对试

件进行分组摆放并切割打磨，最后加工成 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 试件，两端面平行度 $\pm 0.02\text{ mm}$ 。试件制作过程见示意图 2。

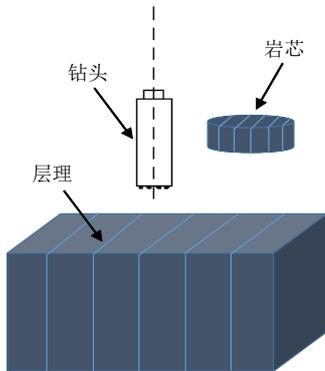


图 2 巴西劈裂试件制作

Fig.2 Preparation of Brazilian splitting specimen

将试件分组分别作如下处理：①烘干机内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘 24 h 作为烘干岩样；②自然晾干作为天然岩样；③烘干机内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘 24 h 后在水中浸泡 48 h 作为不饱水岩样；④烘干机内 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘 24 h

后在水中浸泡 120 h 作为饱水岩样。处理后测得上述 4 种情况的试件平均含水率 ω 分别为 0% 、 1.8% 、 2.7% 、 3.4% 。

3.2 室内试验方案

选取 4 种不同含水状态岩样沿与层理呈 0° 、 30° 、 60° 和 90° 夹角进行加载，试样见图 3。

加载时以轴向位移作为控制指标，以 0.05 mm/min 的速度加载试件直至破坏。试验过程中的声发射信号采用美国声学物理公司 PAC (Physical Acoustic Corporation) 生产的 PCI-2 型声发射系统进行采集。声发射试验检测阈值设为 40 dB ，峰值定义时间 (peak definition time) 设为 $PDT = 50\text{ }\mu\text{s}$ ，撞击定义时间 (hit definition time) $HDT = 200\text{ }\mu\text{s}$ ，撞击锁闭时间 (hit lockout time) $HLT = 300\text{ }\mu\text{s}$ ，采集频率取为 140 kHz 。试验用 4 个传感器探头均匀布置在试件两端，见图 4，探头与试件间涂抹凡士林以增强贴合效果。试验前，先以签字笔敲击试件以模拟信号源，观察各探头通道反应，确保各探头正常后方可进行试验。加载与层理角度方向及试件放置见图 4。

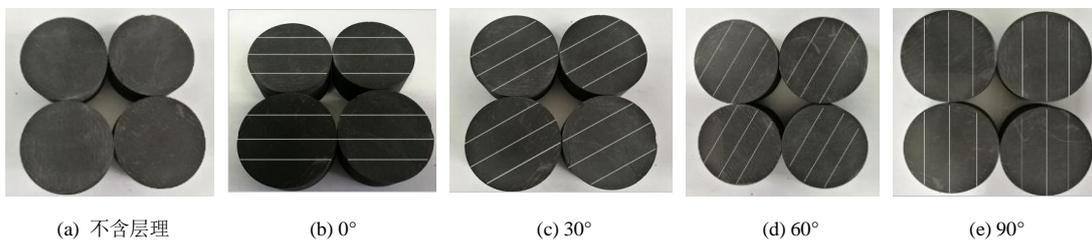


图 3 巴西劈裂试验岩样

Fig.3 Rock samples for Brazilian splitting test

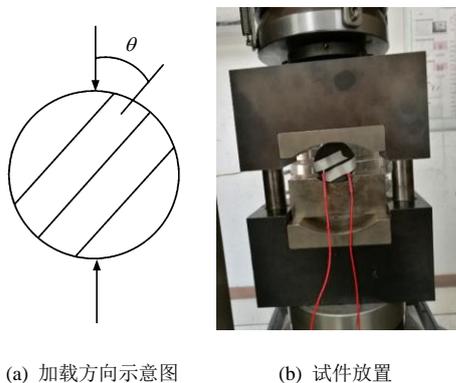


图 4 加载方向及试件放置

Fig.4 Loading direction and specimen placement

3.3 数值模拟方案

建立不含层理、层理角度分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 共 5 种数值模型，模型尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ ，

如图 5 所示。不同含水率下页岩的岩石力学参数也不同，因此，为考虑含水率对页岩破坏规律的影响，所建立的 5 种不同数值模型所采用块体力学参数也不同，块体力学参数根据室内试验结果选取。层理的力学参数诸如内摩擦角、凝聚力、剪胀角、抗拉强度及法向和切向刚度等一般可以从室内试验（即三轴或直剪试验）获得，也可以通过试算法获得。含有一组等间距的层理的刚度可用下式进行估算：

$$\left. \begin{aligned} k_n &= \frac{E_m E_r}{s(E_r - E_m)} \\ k_s &= \frac{G_m G_r}{s(G_r - G_m)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： E_m 、 E_r 为岩体、岩石杨氏模量； G_m 、 G_r 为岩体、岩石剪切模量； s 为层理间距； k_n 为层理法向刚度； k_s 为层理切向刚度。

有时运算中为了提高计算效率,层理的刚度值应小于 10 倍其相邻块体的等效刚度,即^[19]

$$k_n \text{ and } k_s \leq 10.0 \left[\max \left(\frac{K + 4/3G}{\Delta z_{\min}} \right) \right] \quad (2)$$

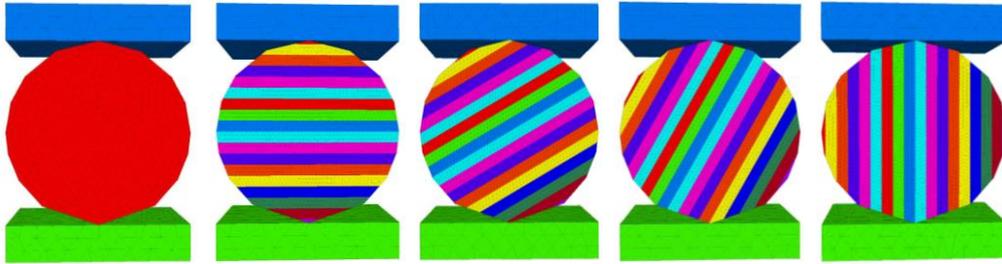


图 5 3DEC 试验数值模型
Fig.5 Model of 3DEC numerical test

4 试验结果

4.1 巴西劈裂破坏模式分析

由层理结构所引起的岩石力学、变形性质的各向异性问题近年来得到了国内外学者^[13, 17, 20-23]的广泛关注。在巴西劈裂试验中,对于不含层理结构的完整岩石试件,圆盘首先从两加载端起裂,而后裂纹贯穿圆盘中心形成竖向贯通裂缝。层理的存在所导致的岩石变形各向异性会使拉伸裂纹偏离圆盘中心位置而产生非中心裂纹,从而使岩石的破坏模式复杂化。目前,研究者通过巴西劈裂室内试验和数值模拟技术对含层理岩石的破坏模式做了较多的研究工作,根据已有研究结果,这里归纳出几种典型的层理岩石的巴西劈裂破坏模式如图 6 所示,以与本文试验研究结果进行对比。Guha Roy 等^[24]在试验研究温度对层状花岗岩的抗拉强度影响时归纳了 0°、30°、60°和 90°花岗岩的破坏模式(见图 6(a)), Tavallali 等^[7]将层状砂岩的巴西劈裂破坏模式分为中央裂纹、非中央裂纹和层理裂纹 3 种(见图 6(b)),侯鹏等^[12]受该裂纹分类方式的启发,将黑色页岩的巴西劈裂破坏模式也归纳为这 3 种模式。杨志鹏等^[11]将不同层理角度的黑色页岩的巴西劈裂破坏模式分为月牙形、曲弧形和直线形 3 种(见图 6(c)),认为 15°页岩的破坏裂纹为月牙形,30°~75°页岩的破坏裂纹为曲弧形,0°和 90°页岩的破坏裂纹为直线形。可见,层状岩石的巴西劈裂破坏模式的争论点上主要在 $0^\circ < \beta < 90^\circ$ 岩石上,该层理角度岩石的破坏模式受其基质的抗拉、抗剪强度和层理抗拉、抗剪强度的共同控制,随荷载与层理方向的不同,试件可能是基质和层理的拉伸破坏、基质和层理的剪切破坏、基质和层理的拉剪复合型破坏等,从而呈现出

式中的: K 、 G 为层理相邻块体体积模量、剪切模量; Δz_{\min} 为层理相邻块体在法向方向最小宽度。本文层理的力学参数采用式(2)结合试算法进行估算。

模型下边界固定,上边界位移加载,加载速率为 0.1 mm/min。

不同形状的破坏裂纹。0°和 90°岩石虽然破坏机制不同(0°岩石为基质拉伸破坏,90°岩石为层理拉伸破坏),但破坏裂纹均与不含层理岩石的破坏裂纹一样,通过圆盘中心,贯穿圆盘。

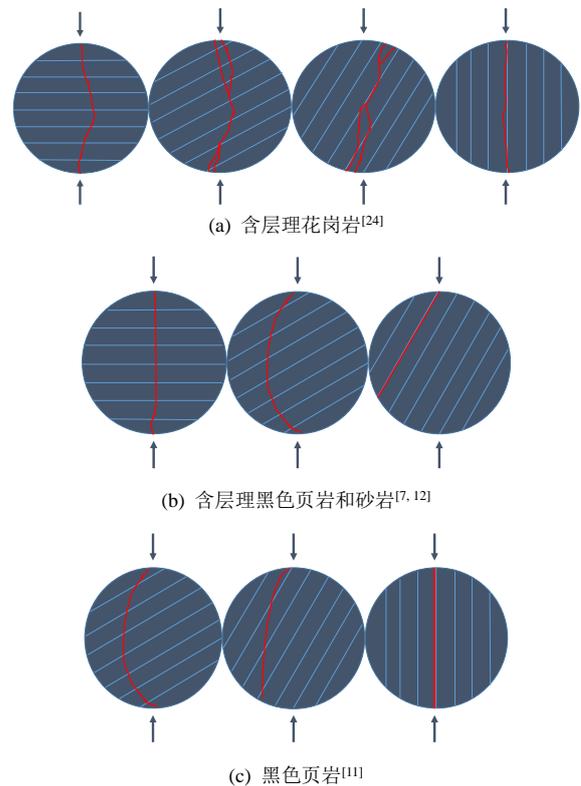


图 6 含层理岩石的巴西劈裂典型破坏模式
Fig.6 Typical fracture modes of bedding rocks in Brazilian splitting tests

本试验所得不同角度层理含水页岩巴西劈裂试验的典型破坏形态见表 1。其相应的数值模拟所取物理力学参见表 2。0°页岩与不含层理页岩的破坏模式相同,破坏裂纹为通过圆盘中心的中央裂纹,

90°页岩的破坏模式则与已有研究所得结论不再完全一致，主破坏裂纹仍为通过圆盘中心的直线形裂纹，但沿层理方向产生了与之平行的次生裂纹，注意到该岩样的含水率 $\omega=3.4\%$ ，为饱水页岩，可以推断该次生裂纹是水对层理面抗拉强度的弱化作用的结果。30°和 60°页岩同样出现了次生裂纹现象，主破坏裂纹起裂于加载一端，逐渐偏离圆盘中心，呈直线或弧形，次生裂纹起裂于同一加载端附近，与主裂纹近似平行扩展。无层理页岩含水率为 $\omega=2.7\%$ ，破坏裂纹通过圆盘中心，整体近似呈直

线，并未出现次生裂纹，说明水主要是沿着层理面附近的裂隙进入岩石内部对岩石产生损伤的，另外，也有研究^[25]表明，含层理岩石浸水后主要是充填于层理面附近的黏土矿物的体积膨胀，层理面附近及岩石内部的颗粒及胶结物形态没有明显变化。因此，与三轴试验破坏模式所得推论一致，页岩的巴西劈裂破坏模式主要与其层理和荷载的加载方向有关，水对含层理页岩的巴西劈裂破坏模式没有太大影响，但会影响次生裂纹的形成，且所产生的次生裂纹与主裂纹基本平行。

表 1 巴西劈裂试验层状含水页岩典型破坏形式
Table 1 Typical failure modes of layered water shale during Brazilian disc tests

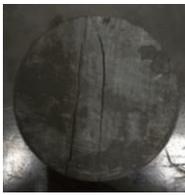
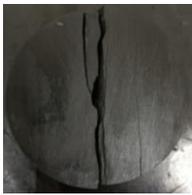
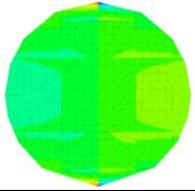
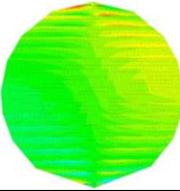
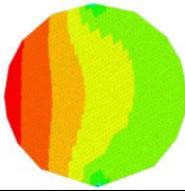
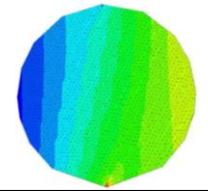
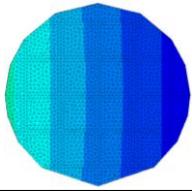
试件情况	无层理, $\omega=2.7\%$	$\beta=0^\circ$, $\omega=0\%$	$\beta=30^\circ$, $\omega=3.4\%$	$\beta=60^\circ$, $\omega=1.8\%$	$\beta=90^\circ$, $\omega=3.4\%$
室内试验 破坏形态					
3DEC 模拟破 坏形态					

表 2 数值模型物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical properties of layered shale model

倾角 $\beta/(^\circ)$	含水率 $\omega/\%$	弹性模量 /GPa	泊松比	凝聚力 /MPa	内摩擦角 / $^\circ$	抗拉强度 /MPa
无层理	2.7	3.41	0.34	11.24	36	11.27
0	0.0	4.24	0.27	9.38	34	6.85
30	3.4	5.13	0.24	10.21	30	9.74
60	1.8	4.21	0.25	7.32	28	5.32
90	3.4	6.40	0.25	5.91	35	4.21

4.2 层理和水对抗拉强度影响规律分析

巴西劈裂试验抗拉强度计算公式为

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (3)$$

式中： P 为破坏荷载； D 、 t 分别为圆盘的直径和厚度。该公式不考虑岩石的各向异性，而由岩石的各向异性所引起的岩石强度的变化往往是不容忽视的，为此，Claesson 等^[8]建立了可以考虑岩石层理倾角的横观各向同性岩石的抗拉强度计算公式

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \left[\left(\sqrt[4]{E/E'} \right)^{\cos(2\theta)} - \frac{\cos(4\theta)}{4} (b-1) \right] \quad (4)$$

式中： $b = \frac{\sqrt{EE'}}{2} \left(\frac{1}{G'} - \frac{2\nu'}{E'} \right)$ ； E 和 E' 分别为平行和

垂直各向同性面的弹性模量； ν' 为垂直于各向同性面的泊松比； G' 为垂直于各向同性面的剪切模量。 E 、 E' 和 ν' 可通过对不同层理角度的岩石进行单轴压缩试验测得， G' 则可以采用圣维南经验公式进行计算^[10]：

$$\frac{1}{G'} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E'} + \frac{2\nu'}{E'} \quad (5)$$

计算所得不同含水率页岩的 5 个弹性常数见表 3。

表 3 不同含水率页岩弹性常数
Table 3 Elastic constants of shale with different water contents

含水率/%	E /GPa	E' /GPa	ν	ν'	G' /GPa
0.0	8.77	6.73	0.27	0.25	2.97
1.8	7.36	5.27	0.28	0.24	2.40
2.7	5.24	4.68	0.31	0.26	1.94
3.4	4.28	3.13	0.32	0.29	1.35

分别采用式 (3) 和式 (4) 得到含层理页岩的抗拉强度，列于表 4 和表 5。对两表格相应状态的抗拉强度值做差值，两种计算方法的误差绝对值为

$$e = \left| \frac{\sigma_{t1} - \sigma_{t2}}{\sigma_{t1}} \right| \quad (6)$$

式中： σ_{t1} 为常规计算方法得到的抗拉强度值（见表4）； σ_{t2} 为 Claesson 公式所得的抗拉强度值（见表5）。结果见图7，可见，二者所计算结果差别不大，所差幅度在 0.02~0.08 之间，即通过两种方法计算所得岩石的抗拉强度值最大误差不超过 10%，而式（3）不需要通过对含层理页岩进行不用方向的单轴压缩试验来确定弹性参数，使用更为简单便捷，因此，本文采用常规计算方法得到的页岩抗拉强度值。

表 4 常规计算方法所得抗拉强度

Table 4 Tensile strength by conventional calculation method

角度/(°)	σ_{t1} /MPa			
	干燥	自然	不饱水	饱水
无层理	9.33	8.99	8.54	8.41
0	8.62	7.43	6.46	5.56
30	7.20	6.08	4.85	3.47
60	6.49	4.44	2.65	1.60
90	7.50	5.56	4.18	3.17

表 5 Claesson 公式所得抗拉强度

Table 5 Tensile strength by Claesson formula

角度/(°)	σ_{t2} /MPa			
	干燥	自然	不饱水	饱水
无层理	9.33	8.99	8.54	8.41
0	9.19	6.96	6.81	5.35
30	7.80	5.60	5.19	3.30
60	6.68	4.32	2.71	1.58
90	8.09	5.15	4.45	3.03

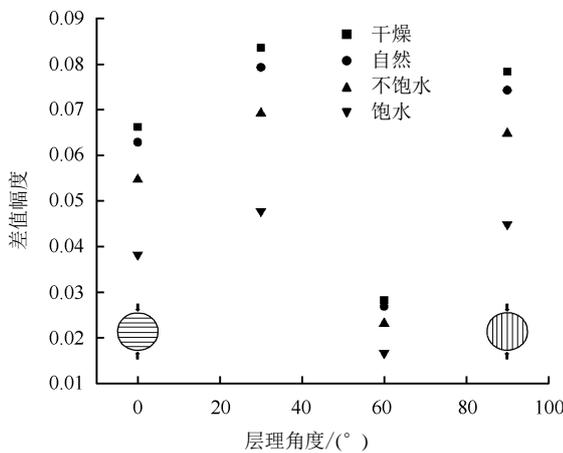


图 7 两种计算方法的差值比
Fig.7 The differences between two methods

不同含水状态页岩的抗拉强度随层理角度变化曲线见图 8。4 种含水状态的页岩抗拉强度值均随其层理角度的增加而呈现先逐渐减小后增大的变化趋势，0°和无层理页岩的抗拉强度值最大，层理倾角增至 60°时抗拉强度值达到最小值，90°时有小幅度的上升。0°页岩在 4 种含水状态下抗拉强度值（表 4）分别为 8.62、7.43、6.46、5.56 MPa，在含层理页岩中抗拉强度值最大，相比不含层理页岩抗拉强

度分别降低了 7.61%、17.4%、24.41%、33.89%。说明水和层理的存在降低了页岩的抗拉强度值，且含水率越高，降低幅度越大。60°页岩在 4 种含水状态下的抗拉强度值均最小，相比无层理页岩抗拉强度值分别降低了 30.41%、50.61%、68.99%、80.92%。

对比相同层理角度不同含水状态页岩抗拉强度可以发现，各角度层理页岩的抗拉强度值均随含水率的增加而降低，说明水劣化了页岩的抗拉强度。但需要注意的是，不同角度层理页岩的抗拉强度水损伤程度不同，同一角度层理页岩在不同含水状态下的抗拉强度损伤程度也不同，如 30°页岩自然含水状态相比干燥页岩抗拉强度值降低了 15.54%，而 60°页岩自然含水状态相比干燥页岩抗拉强度值降低了 31.61%；60°页岩不饱水状态相对自然含水状态抗拉强度值降低了 40.34%，饱水状态相对于不饱水状态又降低了 39.44%。4 种含水状态下不含层理页岩的抗拉强度值（见表 4）分别为 9.33、8.99、8.54、8.41 MPa，不同含水状态之间抗拉强度值分别降低了 3.64%、5.01%、1.52%，表明水对不含层理页岩的抗拉强度值影响相对较小。另外，对比不同层理页岩的饱水状态相对于干燥状态下的抗拉强度降低幅度，0°、30°、60°、90°页岩分别降低了 35.5%、51.81%、75.29%、57.71%，呈现先增大后减小的趋势，可见，在页岩同时受水和层理损伤作用时，受层理损伤程度越大，水对其损伤程度也越高。据此，可以推断水对含层理页岩的抗拉强度的损伤作用主要是通过层理来实现的，关于这一点的进一步讨论将在第 5 节进行。

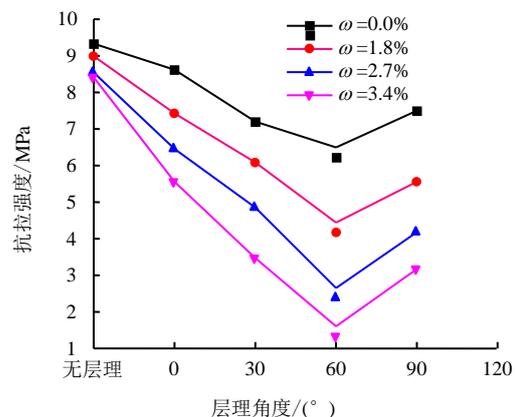


图 8 不同含水状态页岩的抗拉强度随层理角度变化曲线
Fig.8 Curves of tensile strength- bedding angle of different water-bearing shales

4.3 声发射试验结果

试验所得页岩中心拉应力-时间和振铃计数-时间关系曲线见图 9，由于试件较多，这里只列出了

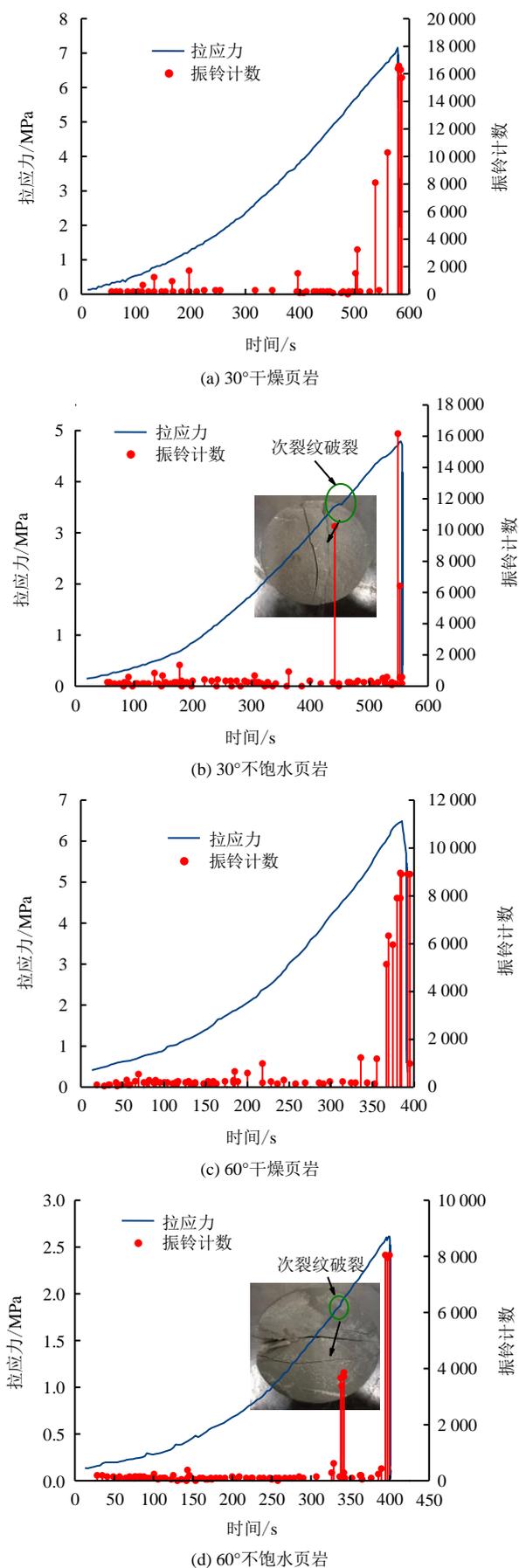


图 9 不同层理页岩中心拉应力-时间和振铃计数-时间曲线
 Fig.9 Center tensile stress-time and ringing count-time curves of different bedding shales

30°干燥和不饱水页岩、60°干燥和不饱水页岩的结果。由图 9 可发现如下规律：

(1) 试件在巴西劈裂试验各个加载阶段均有声发射信号产生，振铃计数最大值均在应力峰值前后并且持续时间较短。

(2) 无论是 30°页岩还是 60°页岩，不饱水 ($\omega=2.7\%$) 页岩相对于干燥页岩振铃计数均明显减少，也即含水率增加，其振铃计数减小。另外，30°和 60°不饱水页岩在应力峰值 80%左右出现了应力跌落点，相应的振铃计数显著增加，结合表 1 中所述试件破坏模式，可以认为，该跌落点是试件产生次裂纹的结果，但荷载尚未达到页岩的抗拉强度峰值，该次裂纹未能贯通，试件仍有一定的承载力，待加载到峰值强度时，试件才发生突然的脆性破坏，并沿层理或偏离层理一定距离部位产生主破坏裂纹。因此，试件表现出表 1 中所述多裂纹破坏现象。

(3) 页岩的声发射振铃计数与层理角度密切相关。各种试件的声发射累计振铃计数与层理角度的关系如图 10 所示，层理倾角 $\beta=0^\circ\sim 60^\circ$ 时，累计振铃计数逐渐减小，60°时降至最低点，60°~90°时略有上升，不含层理页岩的累计振铃计数最大。对比图 10 中不同含水率页岩的累计振铃计数可知，含水率越高，累计振铃计数越小，其中，相邻含水状态之间，干燥状态与自然含水状态页岩的累计振铃计数相差最大。

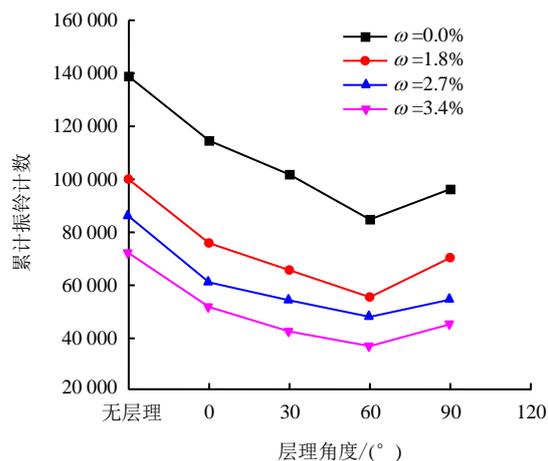


图 10 页岩累计振铃计数-层理角度曲线
 Fig.10 Cumulative ringing count-bedding angle curves of shale

5 水对含层理页岩抗拉强度特性损伤机制分析

取不同含水率页岩微小块体进行 SEM 扫描，观察其微观结构，如图 11 所示。由图 11(a)可知，

烘干的页岩试样内部矿物颗粒呈片层状按一定方向有序堆叠，整体形状较规则，结构较为致密，连续性好。内部偶见一定的微小孔隙。图 11(b)为自然含水状态页岩的微观结构，内部含有一条较为明显的原生微裂隙，微裂隙附近整体比较致密，但散见少量片状、絮状颗粒分布，并且越靠近裂隙附近，片絮状颗粒分布越密集。图 11(c)为介于自然和饱水状态的页岩内部微观结构，局部片层状松散颗粒数量开始增多，微孔隙数量也开始增加，该现象沿层理面方向呈条带状分布，而远离层理面处矿物颗粒排序仍相对较为致密。饱水页岩（见图 11(d)）的这一现象更为明显，层理处颗粒变得极为松散、破碎，片层状颗粒明显剥落，微裂纹数量明显增加、宽度明显变大，部分联通、扩展为微裂隙。这说明，随着含水率的增加，页岩内部结构逐渐变得松散、破碎，微裂纹逐渐增多、变宽，并且这一现象随与层理面的距离不同而有所差异，具体表现为，越是靠近层理面处该现象越明显，远离层理面处的变化则相对较弱，这便解释和印证了 4.2 节所得试验结果和推断：水对含层理页岩的抗拉强度的损伤作用主要是通过层理来实现的。同时也可以进一步认为，水对含层理页岩的强度参数的损伤作用主要是通过层理来实现的。

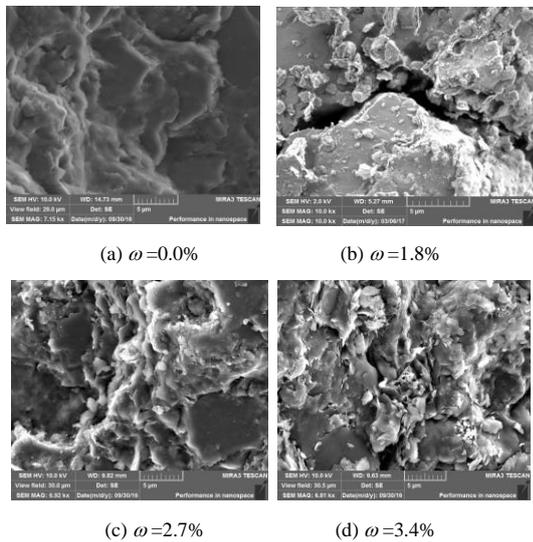


图 11 不同含水率下页岩 SEM 图像

Fig.11 SEM images of shale under different water contents

对页岩的内部矿物成分进行测试会发现，黑色页岩主要由石英、白云母、黄铁矿及蒙脱石、伊利石、高岭石等各类黏土矿物组成，见图 12。其中，黏土矿物遇水后会与水发生化学反应，产生膨胀作用，引起矿物颗粒的体积膨胀，从而使其松散、破

碎，黏土矿物的这一性质是由其晶体结构所决定的。以蒙脱石为例，其晶体结构是由两层硅氧四面体中间夹一层铝或镁氧八面体构成的层状硅酸盐（见图 13）。两结构单元层之间以分子间力进行连接，结构较为松散，在外力或极性水分子作用下，层间将产生相对运动而膨胀或剥离。有研究^[26]表明，晶层间距的变化会使两晶层间应力发生变化，从而在晶层间产生膨胀力作用，而含水率的增加则会诱使晶层间距不断发生变化，所产生的层间膨胀力使页岩的微结构破坏，宏观上就表现为遇水膨胀、崩解及软化。

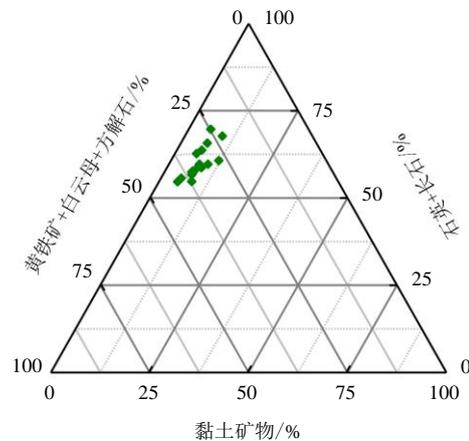


图 12 黑色页岩矿物组分三角图

Fig.12 Triangle diagram of mineral composition of black shale

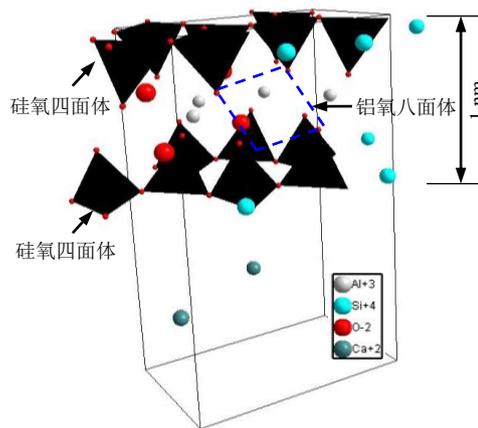


图 13 蒙脱石晶体结构

Fig.13 Montmorillonite crystal structure

另外，不仅矿物颗粒晶体结构会遇水膨胀，矿物颗粒间的黏结力也会因水岩作用而发生改变。当岩石中有水存在时，矿物颗粒间的黏结力 F_c 可分为颗粒间引力 F_g 、颗粒与水作用力 F_w 、颗粒表面张力 σ_{gw} 和水压力 P_w 。其中，颗粒与水的作用包括强

作用力 F_1 、弱作用力 F_2 和毛细管力 P_c 。毛细管力是能使润湿其管壁的液体自然上升的力,与颗粒表面张力成正比,颗粒半径 r 成反比。岩石浸水后颗粒体积膨胀,颗粒半径增大,使得毛细管力减小,从而使矿物颗粒间黏结力减小,岩石强度降低。毛细管压力作用也是层状页岩遇水损伤劣化的主要原因之一。

6 结 论

(1) 页岩的巴西劈裂破坏模式主要与其层理和荷载的加载方向有关,水与含层理页岩的巴西劈裂破坏模式没有太大关系,但会影响次生裂纹的形成,且所产生的次生裂纹与主裂纹基本平行。

(2) 含层理页岩的抗拉强度与其层理角度和含水率密切相关。抗拉强度表现出随层理角度的增加而先减小后增大,随含水率的增加而降低的趋势。并且,在页岩同时受水和层理损伤作用时,受层理损伤程度越大,水对其损伤程度也越高。

(3) 含层理页岩在不同含水率下的微观结构显示,随着含水率的增加,页岩内部结构逐渐变得松散、破碎,微裂纹逐渐增多、变宽,并且这一现象随与层理面的距离不同而有所差异,即越是靠近层理面处该现象越明显,远离层理面处的变化则相对较弱。

(4) 页岩层理面处的内部矿物颗粒遇水膨胀,产生膨胀力作用,及矿物颗粒间的黏结力在水的作用下降低是层状含水页岩损伤劣化的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 张金川, 杨超, 陈前, 等. 中国潜质页岩形成和分布[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 74—86.
ZHANG Jin-chuan, YANG Chao, CHEN Qian, et al. Deposition and distribution of potential shales in China[J]. **Earth Science Frontiers**, 2016, 23(1): 74—86.
- [2] MARTIN C D, GIGER S, LANYON G W. Behaviour of weak shales in underground environments[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(2): 673—687.
- [3] 朱自强, 李华, 鲁光银, 等. 页岩发育区浅埋隧道超前地质预报方法研究[J]. 地球物理学报进展, 2007, 22(1): 250—254.
ZHU Zi-qiang, LI Hua, LU Guang-yin, et al. The research of advanced forecast of geology method in shallow cover up of tunnel of the shale region[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22(1): 250—254.
- [4] 谢凯楠, 姜德义, 蒋翔, 等. 页岩巴西劈裂试验的能量分布与临界特征分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 613—620.
XIE Kai-nan, JIANG De-yi, JIANG Xiang, et al. Energy distribution and criticality characteristics analysis of shale Brazilian splitting test[J]. **Journal of China Coal Society**, 2017, 42(3): 613—620.
- [5] 李果, 艾婷, 于斌, 等. 不同岩性巴西劈裂试验的声发射特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 870—881.
LI Guo, AI Ting, YU Bin, et al. Acoustic emission characteristics of different lithologies under Brazilian splitting[J]. **Journal of China Coal Society**, 2015, 40(4): 870—881.
- [6] 刘运思, 傅鹤林, 伍毅敏, 等. 基于单弱面理论对板岩巴西劈裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1775—1780.
LIU Yun-si, FU He-lin, WU Yi-min, et al. Study on Brazilian splitting test for slate based on single weak plane theory[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(10): 1775—1780.
- [7] TAVALLALI A, VERVOORT A. Effect of layer orientation on the failure of layered sandstone under Brazilian test conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 313—322.
- [8] CLAESSEON J, BOHLOLI B. Brazilian test: Stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(8): 991—1004.
- [9] WANG J, XIE L, XIE H, et al. Effect of layer orientation on acoustic emission characteristics of anisotropic shale in Brazilian tests[J]. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, 2016, 36: 1120—1129.
- [10] 刘胜利, 陈善雄, 余飞, 等. 绿泥石片岩各向异性特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3616—3623.
LIU Sheng-li, CHEN Shan-xiong, YU Fei, et al. Anisotropic properties study of chlorite schist[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3616—3623.
- [11] 杨志鹏, 何柏, 谢凌志, 等. 基于巴西劈裂试验的页岩强度与破坏模式研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3447—3455.

- YANG Zhi-peng, HE Bai, XIE Ling-zhi, et al. Strength and failure modes of shale based on Brazilian test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3447—3455.
- [12] 侯鹏, 高峰, 杨玉贵, 等. 黑色页岩巴西劈裂破坏的层理效应研究及能量分析[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(5): 930—937.
- HOU Peng, GAO Feng, YANG Yu-gui, et al. Effect of bedding orientation on failure of black shale under Brazilian tests and energy analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(5): 930—937.
- [13] DEBECKER B, VERVOORT A. Experimental observation of fracture patterns in layered slate[J]. **International Journal of Fracture**, 2009, 159(1): 51—62.
- [14] TAVALLALI A, VERVOORT A. Failure of layered sandstone under Brazilian test conditions: Effect of micro-scale parameters on macro-scale behaviour[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2010, 43(5): 641—653.
- [15] 刘运思, 傅鹤林, 饶军应, 等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(4): 785—791.
- LIU Yun-si, FU He-lin, RAO Jun-ying, et al. Research on Brazilian disc splitting tests for anisotropy of slate under influence of different bedding orientations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 785—791.
- [16] KHANLARI G, RAFIEI B, ABDILOR Y. An experimental investigation of the Brazilian tensile strength and failure patterns of laminated sandstones[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 48(2): 843—852.
- [17] VERVOORT A, MIN K-B, KONIETZKY H, et al. Failure of transversely isotropic rock under Brazilian test conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 70(70): 343—352.
- [18] 尤明庆, 陈向雷, 苏承东. 干燥及饱水岩石圆盘和圆环的巴西劈裂强度[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(3): 464—475.
- YOU Ming-qing, CHEN Xiang-lei, SU Cheng-dong. Brazilian splitting strengths of discs and rings of rocks in dry and saturated conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 464—472.
- [19] Itasca Consulting Group Inc.. 3DEC (three dimensional distinct element code) manual[M]. [S. l.]: Itasca Consulting Group Inc., 2013.
- [20] RYBACKI E, MEIER T, DRESEN G. What controls the mechanical properties of shale rocks?—Part II: Brittleness[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2016, 144: 39—58.
- [21] RYBACKI E, REINICKE A, MEIER T, et al. What controls the mechanical properties of shale rocks?—Part I: Strength and Young's modulus[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2015, 135: 702—722.
- [22] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2014, 33(9): 1772—1779.
- CHEN Tian-yu, FENG Xia-ting, ZHANG Xi-wei, et al. Experimental study on mechanical and anisotropic properties of black shale[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(9): 1772—1779.
- [23] CHO J-W, KIM H, JEON S, et al. Deformation and strength anisotropy of Asan gneiss, Boryeong shale, and Yeoncheon schist[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2012, 50(2): 158—169.
- [24] GUHA ROY D, SINGH T N. Effect of heat treatment and layer orientation on the tensile strength of a crystalline rock under Brazilian test condition[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(5): 1663—1677.
- [25] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(12): 2090—2098.
- YANG Chun-he, MAO Hai-jun, WANG Xue-chao, et al. Study on variation of microstructure and mechanical properties of water-weakening slates[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2090—2098.
- [26] 朱宝龙, 李晓宁, 巫锡勇, 等. 黑色页岩遇水膨胀微观特征试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2015, 34(增刊 2): 3896—3905.
- ZHU Bao-long, LI Xiao-ning, WU Xi-yong, et al. Experimental study of micro-characteristics of swelling for black shale under influence of water[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Supp.2): 3896—3905.