

DOI: 10.11779/CJGE201505005

# 饱水灰岩巴西试验准静态加载应变率效应研究

黄彦华, 杨圣奇\*

(中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 通过对饱水灰岩进行不同加载应变率巴西试验、实时声发射监测以及破裂面扫描电镜观察, 试验研究了应变率对饱水灰岩强度及破裂机制的影响。结果表明: ①饱水对灰岩强度有明显的弱化作用, 其拉伸强度值与干燥时相比降低了约 15.99%; ②声发射特征会受到加载速率的影响, 试样中出现最大声发射事件数会随着应变率的增大而增大; ③较低应变率 ( $3.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$  和  $9.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ) 时灰岩破裂细观机制为沿晶破裂模式, 宏观上拉伸强度较低; 当应变率增大至  $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  时细观上为沿晶与穿晶耦合断裂模式, 宏观上拉伸强度较高, 而应变率为  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$  时细观上为穿晶断裂模式, 宏观上拉伸强度最高。基于试验结果, 采用三维颗粒流 (PFC<sup>3D</sup>) 分析了饱水灰岩加速速率效应细观机理。模拟显示, 较低应变率下荷载-位移曲线表现为脆性, 而随着应变率的提高曲线延性增大。灰岩拉伸强度随着应变率的提高近似线性增大。边界能与拉伸强度呈现为正比关系, 灰岩破坏所消耗的能量与微裂纹数均随着应变率增大而增加。

**关键词:** 饱水灰岩; 巴西试验; 拉伸强度; 细观机制; 三维颗粒流

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)05-0802-10

**作者简介:** 黄彦华 (1989-), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要从事断裂裂隙岩石力学试验与模拟方面的研究工作。E-mail: huangyh1219@163.com。

## Quasi-static loading strain rate effects on saturated limestone based on Brazilian splitting test

HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Based on the Brazilian splitting test, real-time acoustic emission (AE) monitoring and SEM observations, the influences of strain rate on tensile strength and deformation failure mechanism of saturated limestone specimens are investigated. The results show that: (1) Compared with the dry specimen, the tensile strength of saturated specimens has a reducing tendency and the decrease extent is about 15.99%. (2) The AE characteristics are also affected by the strain rate, i.e., the number of AE events increases as strain rate increases. (3) When the strain rate is smaller ( $3.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$  and  $9.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ), the failure mechanism of saturated limestone specimens is that the crack propagates between mineral particles, thus the tensile strength is the smallest. When the strain rate increases to  $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ , the failure mechanism is coupled of being penetrated and penetrating along mineral particles, so the tensile strength is medium. However, when the strain rate equals to  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ , the failure mechanism begins to penetrate mineral particles, then the tensile strength is the largest. Based on the experimental results, a discrete element method (DEM) PFC<sup>3D</sup> is used to analyze the meso-mechanism of strain rate effects. According the simulation results, the following conclusions can be drawn: the load-displacement curves are brittle when the strain rate is small. When the strain rate is high, the load-displacement curves show a ductile response. The tensile strength increases linearly with the increasing strain rate. The boundary energy is positively correlated with the tensile strength, i.e., the larger the boundary, the higher the tensile strength. The energy of sample failure at the high strain rate and the number of micro-cracks are all greater than those at the low rate.

**Key words:** saturated limestone; Brazilian splitting test; tensile strength; meso-mechanism; PFC<sup>3D</sup>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41272344, 51323004); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2014CB046905); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-12-0961); 2014 年江苏省双创团队项目

收稿日期: 2014-09-11

\*通讯作者

## 0 引 言

众所周知, 加载速率是影响岩石力学性质的一个

重要因素, 但至今尚未有一个统一的标准。研究加载速率效应一直是岩石力学学术界和工程界的热点, 因此涌现出很多成果。杨仕教等<sup>[1]</sup>进行了4种加载速率下石灰岩单轴压缩试验, 分析了加载速率对应力-应变曲线、峰值强度、峰值应变和破裂模式等的影响。黄达等<sup>[2]</sup>分析了静态加载速率对粗晶大理岩基本力学参数的影响规律并探讨了大理岩损伤演化的能力机制。周辉等<sup>[3]</sup>通过硬脆性大理岩在不同加载速率巴西试验与电镜扫描试验, 获得了大理岩荷载-位移曲线、拉伸强度以及断口形貌特征与加载速率之间的关系。此外, Liang等<sup>[4]</sup>进行了盐岩力学特性不同速率单轴压缩试验, 其结果对于盐岩处置库开挖稳定与安全有一定帮助。为分析动载作用下引起的岩石破裂问题, 有必要对高加载速率效应进行研究。李战鲁等<sup>[5]</sup>采用分离式霍普金森压杆进行了含边切槽大理岩圆盘试样动载试验, 试验表明动态断裂韧度值随着加载速率的增大而上升。宫能平等<sup>[6]</sup>对中心直切槽花岗岩试验进行了不同加载速率下纯I型动载试验, 并获得了动态断裂韧度与加载速率之间的相关性。Gong等<sup>[7]</sup>进行了一系列完整砂岩圆盘试样准静态及动态不同加载速率试验, 并通过DLSM数值模拟验证试验结果。随着地热资源开发和地下工程建设日益增多, 研究高温状态下加载速率对岩石力学性能的影响成为岩石工程问题中的重要课题之一。张连英等<sup>[8]</sup>通过200℃高温作用后石灰岩不同加载速率试验, 得到了峰值强度、峰值应变、弹性模量随加载速率的变化特征。Tang等<sup>[9]</sup>对经历700℃高温作用石灰岩不同加载速率试验, 并由此分析了力学参数与速率之间的关系。苏海健等<sup>[10]</sup>进行了不同高温后岩石加载速率效应单轴压缩试验, 获得加载速率对基本力学参数、破裂模式和分形维数的影响规律。许金余等<sup>[11]</sup>分析了加载速率对不同高温后大理岩动态特征的影响, 同时探讨了加载速率强化机理。

岩石的生成和赋存条件复杂, 其力学性质易受到周边环境的影响, 尤其是地下水作用。为此, 水对岩石力学特性的影响受到了研究者的广泛重视。Hawkins等<sup>[12]</sup>对一系列干燥和饱水砂岩进行了单轴压缩试验, 试验结果表明水含量对强度和变形的影响非常显著, 而且衰减程度主要受到石英和黏土矿物比例的影响, 受微观组构的影响较小。Vásárhelyi<sup>[13]</sup>根据文献[12]试验数据, 进一步分析了干燥和饱水岩石力学特征, 分析认为干燥和饱水岩石强度之间为线性关系, 而Vásárhelyi等<sup>[14]</sup>建立了一种评价砂岩中水敏感性的方法, 即通过密度、干燥度和饱水强度即可求得任意水含量的岩石强度。Erguler等<sup>[15]</sup>对不同含黏土矿物岩石进行了单轴压缩和拉伸试验, 获得了饱水对岩石拉伸强度、单轴压缩强度和弹性模量的衰减可分别达到

90%, 93%和90%, 并由试验结果得到的经验模型能够很好地评价水敏感性。熊德国等<sup>[16]</sup>对自然及饱水状态下的砂岩、砂质泥岩和泥岩进行了单轴压缩、三轴压缩和巴西试验, 获得了饱水对力学性质的影响规律。王斌等<sup>[17]</sup>从细观力学角度分析了单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度特征, 试验结果与理论模型相符。陈旭等<sup>[18]</sup>利用声波仪对干燥和饱水条件下红砂岩、大理岩和花岗岩波速测试, 结果表明饱水条件下纵波波速略高于干燥状态下。Wong等<sup>[19]</sup>进行了石膏类岩石材料巴西试验水饱和效应试验研究, 分析了材料强度、刚度及裂纹扩展特征。Wasantha等<sup>[20]</sup>对干燥和饱水砂岩进行了三轴压缩试验, 分析了干燥与饱水条件下峰值强度、残余强度、体积应变、声发射特征及破裂机制等。

然而, 目前国内外关于饱水岩石巴西劈裂试验加载速率效应的研究鲜有报道。有鉴于此, 本文对取自煤矿巷道顶板的灰岩进行饱水, 并进行多级不同加载速率下巴西劈裂试验, 分析饱水灰岩宏观拉伸强度特性及破裂特征, 并从微细观层面揭示加载速率效应机制。

## 1 试验材料及程序

### 1.1 岩性特征

岩样采自山西省吕梁市某煤矿回风大巷。该回风大巷#8煤顶板岩层主要是石灰岩, 比较致密和坚硬, 总体表现出该岩层的稳定性较好。

现场采集的石块进行保鲜膜包装密封。为了减小试样自身的离散性, 钻取岩芯时均挑选大块完整的石块沿同一个方向进行取芯。在室内切割加工成直径50 mm, 高50 mm的试样, 保证试件的加工精度在SL 264—2001《水利水电工程岩石试验规程》<sup>[21]</sup>规定的范围之内。在KH-3000VD数字式三维视频显微系统下灰岩的微观结构如图1所示, 该灰岩表面微观表现比较均匀, 颗粒之间胶结紧密, 无明显初始微孔洞和微裂隙。



图1 灰岩表面视频显微照片

Fig. 1 Microscopic structure of limestone surface

## 1.2 饱水程序

试验所用饱水设备为自主研发的岩石饱水装置,装置主要由供水源、恒流泵、压力室及阀门等组成。图2为饱水装置连接原理图。饱水时,将干燥的岩样放入压力室内,并加入一定量的水。上、下游阀门均处于打开状态,启动恒流泵,设定一定的流速和初始压力,吸入一定量的水以挤走管道及压力室内的空气,待下游端水流量恒定时关闭下游阀门,压力室内的压力开始上升,上升至设定的初始压力后,关闭上游阀门,使试样在一定的压力环境中浸水饱和。

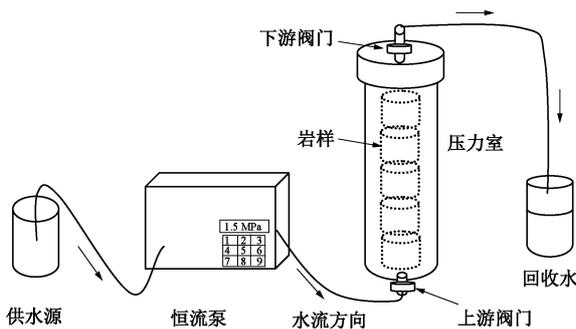


图2 岩石饱水系统连接原理图

Fig. 2 Principle diagram of system connection for rock

为了确保岩样已经饱和并可以观察岩样质量变化与浸水时间的关系,在饱水过程中间隔一定时间内对试样进行称重。图3给出了其中2块灰岩试样(L1和L4)质量与浸水时间的关系曲线。在浸水前期岩样质量增长速度很快,待岩样中含有一定水量后,岩样中的水增长速率减缓。试验灰岩浸水约50 h,岩样的质量基本不再增长,即不再吸收水量,说明岩样已经饱和。相比于自然饱水所需时间(14 d<sup>[16]</sup>, 30 d<sup>[17]</sup>),该设备能够大幅度缩短饱水的时间,提高试验效率。

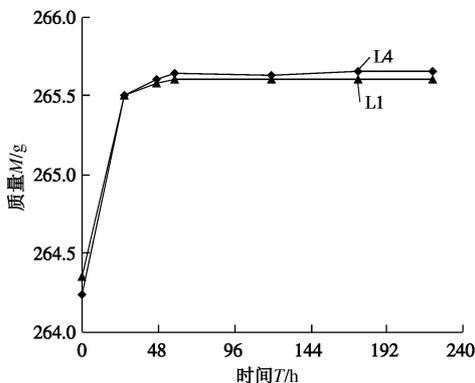


图3 灰岩质量与浸水时间的关系

Fig. 3 Relation between mass and immersion time

## 1.3 试验方案

加工好的试样在中国矿业大学 DNS100 型电液伺服万能试验机上进行,试验采用位移控制。

关于岩石加载应变率,李夕兵等<sup>[22]</sup>认为应变率小于  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  时为岩石静力学涉及范围,大于  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  时为岩石动力学范围。梁昌玉等<sup>[23]</sup>认为加载应变率小于  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时为静态试验,加载应变率在  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  之间时为准动态试验(中应变率加载)。尹小涛等<sup>[24]</sup>和黄达等<sup>[25]</sup>在总结文献的基础上,归纳为:应变速率小于  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  属于低应变速率;  $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$  属于中等应变速率,其中  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  属于准静态,  $10^{-2} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$  属于准动态;大于  $10^2 \text{ s}^{-1}$  属于高应变速率,即动态加载。综合考虑 DNS100 型电液伺服万能试验机的性质和速率范围(0.005~500 mm/min)及岩性特征,本文巴西劈裂试验的加载速率分别设定为 0.09, 0.27, 0.45 和 3 mm/min 等 4 个加载级别,换算为应变率分别为  $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 分布在  $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  范围内,即属于准静态加载应变率范畴。表1给出了本次试验岩样的基本参数和试验条件。需注意的是因现场取样岩块数量有限,且进行了一系列室内试验,表1中 L6 和 L7 为直径 50 mm,厚度 25 mm 的圆盘试样,仅用于下文岩样非均质性分析。

表1 试样基本参数及试验条件

Table 1 Basic parameters of test limestone and conditions

岩样编号	质量 $M_{\text{dry}}/\text{g}$	密度 $\rho_{\text{dry}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	质量 $M_{\text{sat}}/\text{g}$	应变率 $v/\text{s}^{-1}$	岩样状态
L1	264.35	2.698	265.60	$3.0 \times 10^{-4}$	饱水
L2	263.97	2.696	265.35	$9.0 \times 10^{-4}$	饱水
L3	263.68	2.639	265.00	$1.5 \times 10^{-3}$	饱水
L4	264.24	2.693	265.65	$1.0 \times 10^{-2}$	饱水
L5	264.24	2.665	—	$9.0 \times 10^{-4}$	干燥
L6	128.80	2.647	—	$9.0 \times 10^{-4}$	干燥
L7	134.06	2.705	—	$9.0 \times 10^{-4}$	干燥

注:表中下标 dry 表示干燥, sat 表示饱水。

## 2 饱水灰岩力学特性分析

### 2.1 非均质性对试验结果的影响

由表1知,试样的密度很接近,分布在  $2680 \text{ kg/m}^3$  附近,说明试样的均质性较好。

为分析加载速率对饱水灰岩的拉伸强度和变形破坏特性的影响,首先对完整干燥的2个直径为 50 mm,高为 25 mm 灰岩试样(即 L6 和 L7)进行巴西劈裂试验,以讨论岩样非均质性对灰岩巴西试验结果的影响程度。

试样间抗拉强度表达式为

$$\sigma_t = \frac{F_f}{\pi R t}, \quad (1)$$

式中,  $\sigma_t$  为试样间接抗拉强度 (MPa),  $F_f$  为破坏时的荷载 (N),  $R$ ,  $t$  分别为圆盘的半径、厚度 (mm)。

图4给出了 L6 和 L7 两个灰岩试样的荷载-位移

曲线及对应的破裂模式。由图 4 可见, 两条曲线的斜率有所差异, 最大变形有所不同, 但是总体差别不大。L6 和 L7 两个岩样的劈裂荷载值分别为 14.01 kN 和 13.97 kN, 由式 (1) 可求得其拉伸强度值分别为 7.21 MPa 和 7.08 MPa。离散系数 (定义为最大值与最小值之差与平均值比值百分数) 约为 0.89%, 由此可见, 两者的拉伸强度值非常接近。此外, 两者的破裂模式也相近, 主要发生主裂纹沿加载方向贯穿试样破裂。由此说明了本文采用的灰岩非均质性对拉伸强度的影响可以忽略, 即该试验灰岩均质性良好, 可用于后续强度和破坏特征的研究。

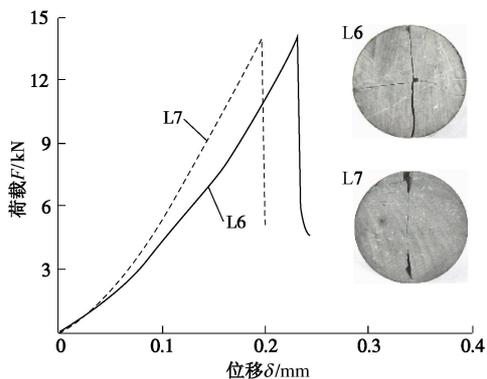


图 4 非均质性对荷载 - 位移曲线及破裂模式的影响

Fig. 4 Effect of heterogeneity on load-displacement curves and failure modes of limestone specimens

### 2.2 饱水对灰岩强度的影响

为分析饱水对灰岩拉伸强度的影响, 进行了相同加载速率下干燥和饱水灰岩试样巴西试验。一般而言, 在静载作用下, 饱水对岩石的强度和变形等参数有一定的弱化作用<sup>[16-17]</sup>。

图 5 给出了干燥和饱水灰岩在相同加载速率下的荷载 - 位移曲线。由图 5 可见, 就荷载 - 位移曲线的斜率而言, 峰前曲线受饱水的影响并不明显, 峰后曲线也均表现为脆性破坏, 但劈裂荷载受饱水的影响显著。饱水灰岩 L1 和干燥灰岩 L5 两个岩样的劈裂荷载值分别为 22.09 kN 和 26.40 kN, 由式 (1) 可求得其拉伸强度值分别为 5.65 MPa 和 6.73 MPa。与干燥灰岩相比, 饱水灰岩的拉伸强度值降低了约 15.99%, 说明了饱水对灰岩的拉伸强度具有显著的弱化作用, 这与水分子会削弱颗粒之间的黏结力及水会溶解某些矿物成分等相关<sup>[16]</sup>。两者的破裂模式相近, 主裂纹贯穿试样破裂, 同时伴生有次生拉裂纹。

### 2.3 声发射特征分析

进行不同加载速率巴西试验时, 同时采用了 DS2 声发射仪对试验全过程进行了实时监测, 以分析灰岩巴西试验过程中内部损伤特征。DS2 声发射系统可全自动采集和记录声发射信息, 可直接统计单位时间内

的声发射振铃计数率和能量计数率等声发射指标。

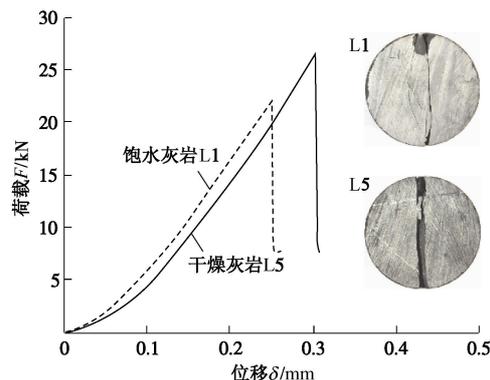
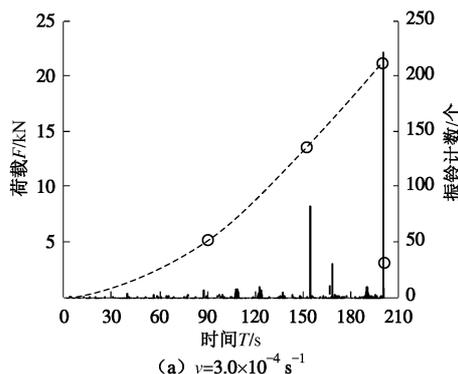


图 5 饱水对荷载 - 位移曲线及破裂模式的影响

Fig. 5 Effect of immersion on load-displacement curves and failure modes of limestone specimens

图 6 给出了不同应变率下灰岩巴西试验荷载 - 时间 - 振铃计数曲线。由图 6 可见, 不同应变率下灰岩巴西试验过程中声发射特征呈现一些相同特征: 在加载初期, 荷载 - 位移曲线有一段较为明显的初始变形阶段, 随后曲线呈上凹型上升, 即荷载随着时间呈非线性增长, 而在该阶段声发射事件数很少, 处于零星分布特征。此后, 荷载进入线性增长阶段, 在该阶段的声发射事件较为活跃, 试样在线性阶段均有较大声发射事件发生, 说明该阶段内试样内部出现了较大的损伤, 即有较大的裂纹产生和扩展发生。荷载到达劈裂荷载后迅速跌落, 说明该试验灰岩为脆性岩石。此时对应产生一次大的声发射事件。

此外, 灰岩的声发射特征明显受到加载速率的影响。试样中出现最大声发射事件数会随着应变率的增大而增大, 当应变率为  $1.5 \times 10^{-3}$  增大至  $1 \times 10^{-2}$  时, 最大声发射事件数出现量级变化。这可以解释为: 当应变率为  $1 \times 10^{-2}$  时, 试样从加载至破坏整个过程仅约 8 s 左右, 试样在短时间内积蓄了大量的能量, 而在劈裂荷载之前试样内只有 3 次较为明显的声发射事件发生, 因此在劈裂荷载时瞬间释放大量的能量, 因此其声发射事件数很大。



(a)  $\nu = 3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

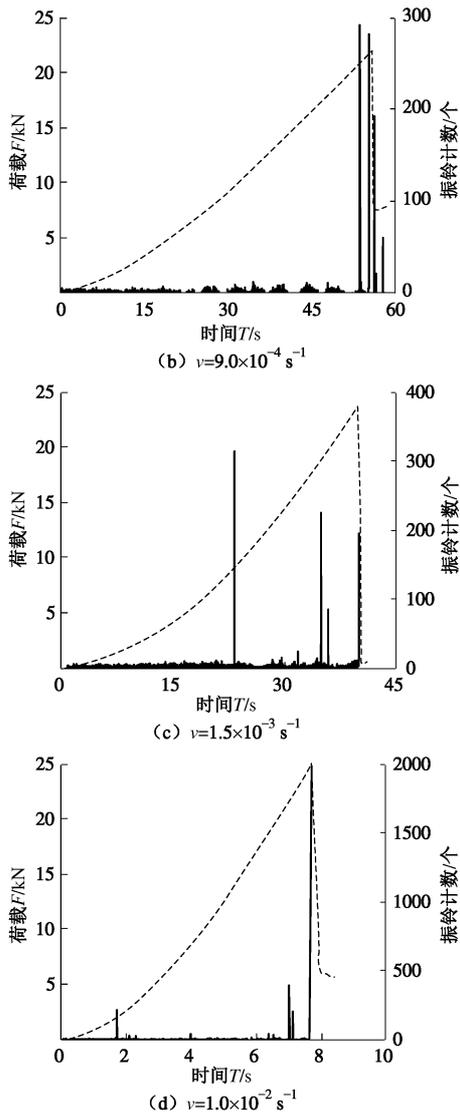


图6 不同应变率灰岩声发射分布曲线

Fig. 6 AE distribution curves under different strain rates

### 3 饱水灰岩破裂特征分析

#### 3.1 宏观破裂模式分析

在进行巴西试验的同时采用摄像机对试样变形发展全过程进行摄像, 便于观察灰岩裂纹扩展过程。图7给出了L1灰岩巴西试验破裂过程, 图中字母对应于图6(a)中标注的各点。

由图7(a)可见, 虽然荷载已经增大至一定值( $F=5.19$  kN), 但试样尚未发生明显的变形, 也没有明显的宏观裂纹产生。当荷载增大至13.52 kN时(B点), 试样上端表面发生剥落, 一块碎片掉落, 如图7(b)所示。而此时, 声发射曲线上对应产生了一个较大的振铃计数, 如图6(a)所示。由此也说明了在试样的端部发生应力集中现象, 并首先导致了上部端部岩石破裂。B点之后, 试样表面又进入一个相对平静期, 表面没有明显的裂纹产生。直到荷载增大至劈裂荷载

时, 在试样的中部沿着加载方向产生了一条明显的宏观拉伸裂纹, 如图7(c)所示。在应力迅速跌落的瞬间, 产生了多条较小的拉伸裂纹, 而试样的右半部分也被弹射出去。试验灰岩属于硬脆性岩石, 整个过程中并不会会有很多宏观裂纹的产生与扩展现象, 裂纹主要集中在试样峰值强度及破坏阶段的短时间内萌生与扩展。

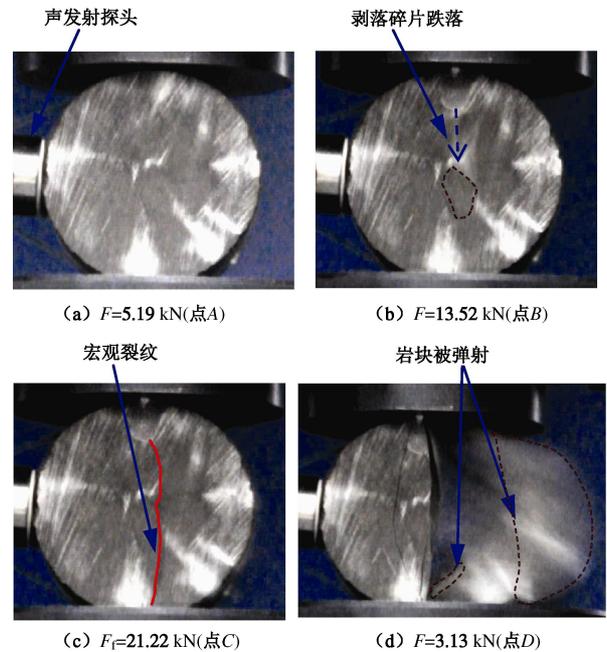


图7 灰岩巴西试验破裂过程

Fig. 7 Failure process of limestone specimens under Brazilian test

图8给出了不同应变率下饱水灰岩巴西试验破裂模式。饱水灰岩在荷载作用下, 主裂纹均为沿着加载方向扩展。在试验范围内应变率对饱水灰岩的破裂模

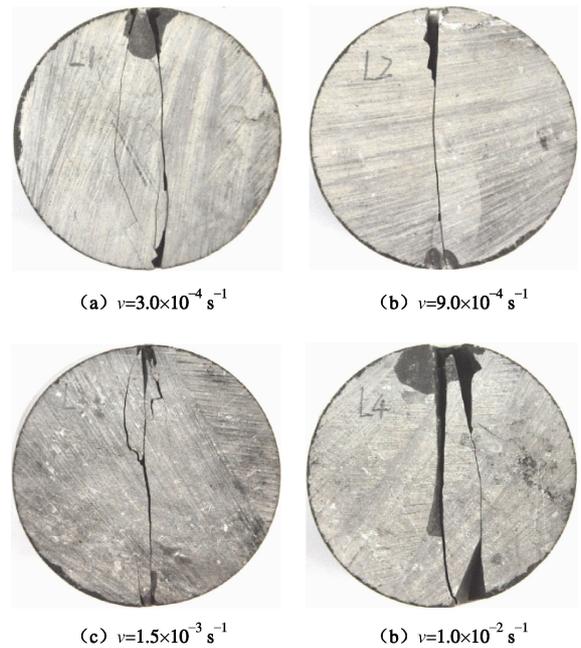


图8 不同应变率下灰岩破裂模式

Fig. 8 Failure modes of limestone under different strain rates

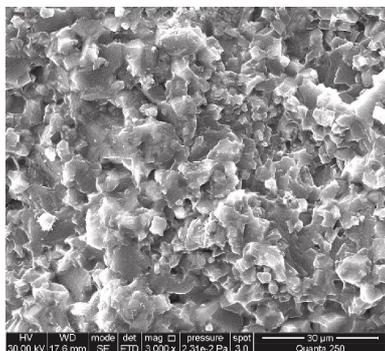
式的影响主要表现在试样的破裂程度, 应变率为  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  (即 L4) 时, 试样的端部破裂较为严重, 而且次生裂纹也贯通了整个试样。

### 3.2 微观破裂机制分析

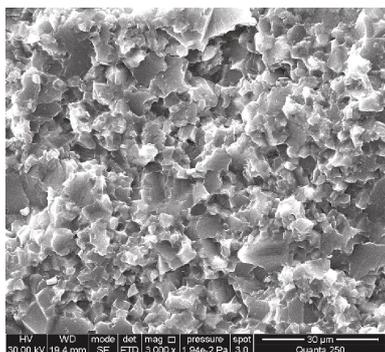
为分析饱水灰岩加载速率效应破裂微观机制, 对灰岩巴西试验破裂后断口进行了扫描电镜观察。扫描在 Quanta™ 250 环境扫描电子显微镜在上进行。图 9 分别给出了不同应变率下灰岩断口的扫描电镜照片。

如图 9 (a) 所示, 当应变率为  $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时, 灰岩断面上方解石颗粒表面光滑, 无明显棱角和摩擦痕迹, 呈颗粒状, 且无微裂隙发育, 断面颗粒保持较为完整, 可以认为该断面为沿晶断裂机制。该应变率下灰岩宏观上表现为拉伸强度较低, 因为其主要依靠颗粒之间的胶结承载, 而胶结较弱, 因此其强度值较低。图 9 (b) 与图 9 (a) 类似, 应变率为  $9.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时灰岩也表现为沿晶断裂机制。

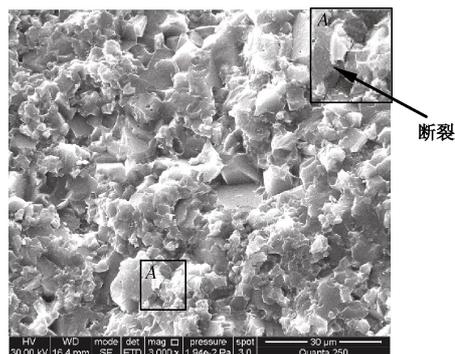
如图 9 (c) 所示, 当应变率为  $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时, 灰岩断面上大部分颗粒保持较为完好, 呈颗粒状, 该部分表现为沿晶断裂机制; 但是部分颗粒表面呈平整平面, 有明显的被切割或撕裂痕迹, 该部分表现为穿晶断裂。因此, 图 9 (c) 显示, 该应变率下灰岩破裂机制为沿晶与穿晶耦合断裂模式, 宏观上表现为拉伸强度较高。



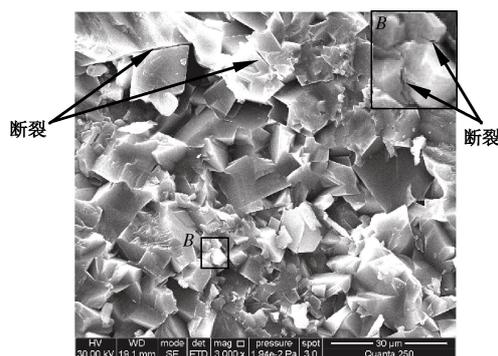
(a)  $v=3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$



(b)  $v=9.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$



(c)  $v=1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



(d)  $v=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$

图 9 不同应变率下灰岩断口扫描电镜图

Fig. 9 SEM images on fracture section under different strain rates

如图 9 (d) 所示, 当应变率为  $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  时, 灰岩断面上颗粒棱角分明, 颗粒表面呈平整平面, 被切割或撕裂痕迹显著, 且断面上微裂隙较多, 可以认为该断面为穿晶断裂机制。该应变率下灰岩宏观上表现为拉伸强度值最高, 这是因为颗粒本身有较大的承载能力, 穿切晶体需要较高的强度。

## 4 数值模拟分析

颗粒程序 (PFC) 作为离散元分析软件之一, 能够有效地解决不同尺度固体力学相关问题。二维颗粒流 (PFC<sup>2D</sup>) 已经广泛应用于岩土工程相关问题中<sup>[26-28]</sup>, 但三维颗粒流 (PFC<sup>3D</sup>) 应用于岩石巴西试验的研究成果还较少。

本文采用 PFC<sup>3D</sup> 对不同应变率灰岩巴西试验结果进行验证。图 10 为 PFC<sup>3D</sup> 巴西试验数值模型。采用墙代替加载板, 上下墙以恒定速率进行加载来模拟室内巴西试验。

### 4.1 细观参数标定

进行 PFC 数值模拟前, 应选择合理的细观参数。为此, 首先对某一应变率下灰岩巴西试验进行标定, 本文以应变率为  $9 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  为例 (即试样 L1) 进行标定。表 2 为标定获得的灰岩细观参数。

表 2 灰岩试样 PFC3D 细观参数

Table 2 Micro-parameters in PFC <sup>3D</sup> for limestone specimens			
参数	取值	参数	取值
颗粒最小半径/mm	1.0	摩擦系数	0.55
颗粒粒径比	1.6	平行黏结模量/GPa	8.0
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2680	平行黏结刚度比	1.3
颗粒模量/GPa	8.0	平行黏结法向强度/MPa	15.55±3.6
颗粒刚度比	1.3	平行黏结切向强度/MPa	36.0±7.2

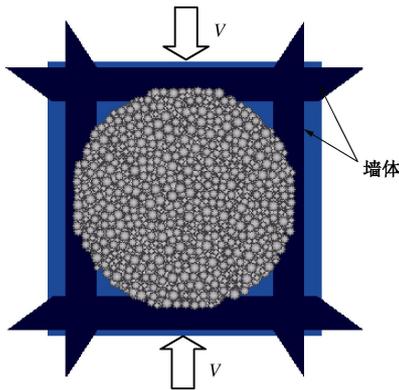
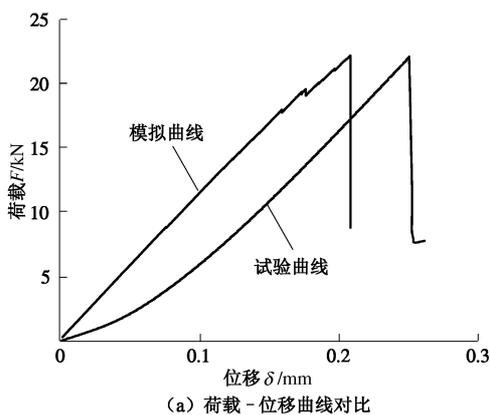


图 10 巴西试验 PFC<sup>3D</sup> 数值模型

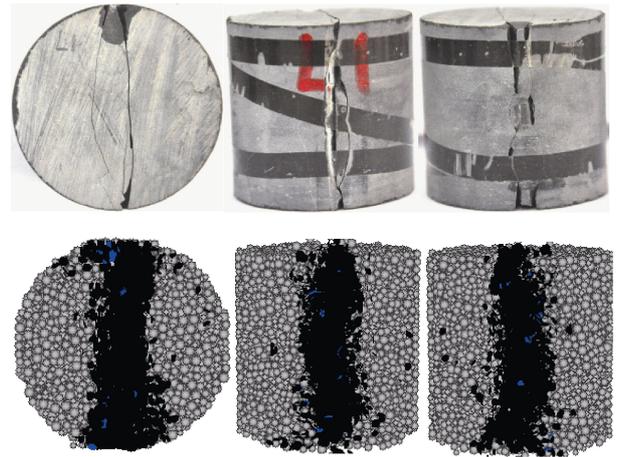
Fig. 10 PFC<sup>3D</sup> numerical model for Brazilian test

图 11 给出了灰岩室内试验和 PFC 模拟的荷载 - 位移曲线及最终破裂模式的对比。由图 11 (a) 可见, 模拟曲线与试验曲线吻合度较好, 两者的斜率及峰值都近似相等。由此计算得到的试验和模拟拉伸强度值分别为 5.654 MPa 和 5.630 MPa。模拟曲线劈裂荷载对应的位移略小于试验值, 这是因为 PFC 不能体现初始变形阶段。

试验及模拟获得的最终破裂模式均为轴向劈裂破坏, 两者总体上表现为较为相似, 如图 11 (b) 所示。综合荷载 - 位移曲线及破裂模式的对比可见, 选择的细观参数 (表 2) 能够较好地反映灰岩基本力学特性。基于此, 可进行后续不同应变率下灰岩巴西试验模拟。



(a) 荷载 - 位移曲线对比



(b) 破裂模式对比

图 11 灰岩试验和 PFC 模拟荷载 - 位移曲线和破裂模式对比

Fig. 11 Comparison of load-displacement curves and failure modes of limestone obtained from experiment and PFC simulation

#### 4.2 拉伸强度分析

图 12 给出了灰岩在不同应变率下巴西试验得到的荷载 - 位移曲线。根据图 12 可知, 应变率对劈裂荷载的影响显著。除此之外, 应变率还影响峰后曲线的斜率。在较低应变率下, 曲线表现较为脆性, 而随着应变率的提高曲线延性增大, 与 Gong 等<sup>[7]</sup>采用 DLSSM 模拟结论相同。

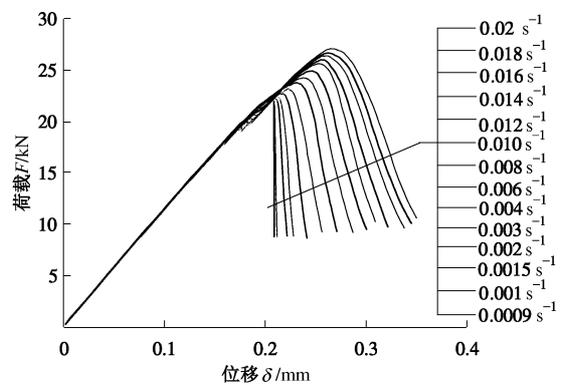


图 12 不同应变率下荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of limestone under different strain rates

基于图 12 所示的荷载 - 位移曲线, 结合式 (1) 可以计算得到不同应变率下灰岩的拉伸强度值, 汇总于图 13。为方便比较, 同时还给出了室内试验强度值。由图 13 可见, 饱水灰岩拉伸强度试验值和模拟值均随着应变率的增大而增大, 拟合表达式为

$$\sigma_t = 69.235v + 5.6001 \quad (R_2 = 0.9877) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_t$  为岩样的单轴抗拉强度,  $v$  为应变率。

#### 4.3 能量机制分析

加载过程中, 边界 (即墙, 如图 10 所示) 不断对试样做功, 边界对试样做的功称为边界能。对边界能

进行跟踪记录, 以探讨试样变形破裂过程中能量演化规律, 进一步加深对应变率效应微观机制的认识。

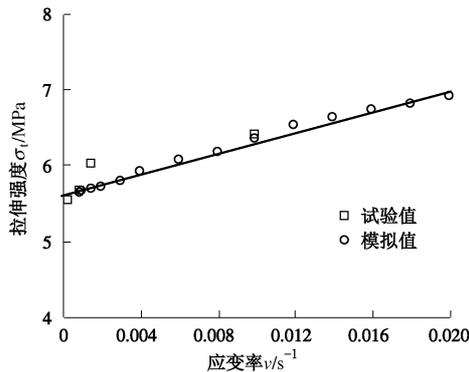


图 13 不同应变率拉伸强度值

Fig. 13 Tensile strengths of limestone under different strain rates

为分析边界能与应变率之间的关系, 绘制了边界总能与应变率关系曲线, 如图 14 所示。由图 14 可见, 边界能随着应变率的提高而增大, 这意味着灰岩破坏所消耗的能量随加载应变率的增大而增加。此外, 为方便比较, 同时还给出了拉伸强度与应变率关系曲线。由图 14 可知, 试样中边界总能与拉伸强度总体上呈现为正比关系, 即边界能越大, 则拉伸强度越大。

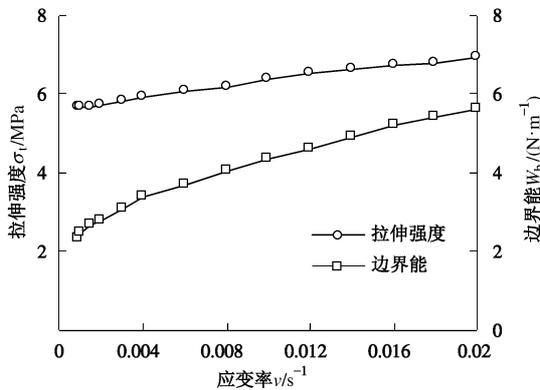


图 14 边界能与应变率之间的关系

Fig. 14 Relation between boundary energy and strain rate

#### 4.4 破裂程度分析

由前述破裂模式分析已知在较高加载速率下, 灰岩试样的破裂程度较高, 但这只是一种定性描述。而在 PFC 中通过追踪和记录试样变形破裂过程中的微裂纹数目, 则可以对试样的破裂程度作定量的评价。

为此, 图 15 给出了不同应变率下在最终破裂时试样中含有的微裂纹总数柱状图。由图 15 可见, 随着应变率的增大, 微裂纹的数量逐渐增大, 但增大的幅度有所不同: 在  $9.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之间, 微裂纹涨幅较大, 而在  $1.0 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  之间, 微裂纹涨幅较小。由此表明了岩石破裂程度会随着应变率的增大而提高。

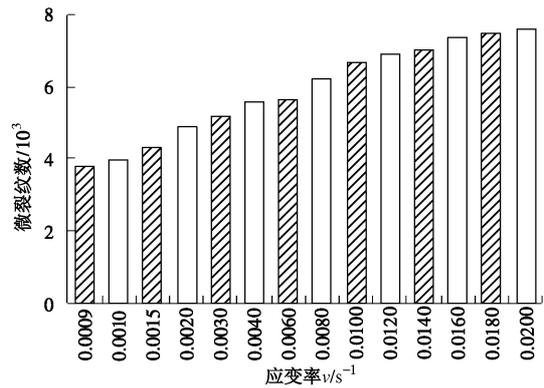


图 15 微裂纹数与应变率之间的关系

Fig. 15 Relation between number of micro-cracks and strain rate

## 5 结 论

(1) 饱水对灰岩强度特性有较为明显的弱化作用, 表现为饱水灰岩的拉伸强度值与干燥灰岩相比降低了约 15.99%。

(2) 声发射事件与试样裂纹扩展过程相对应, 试样中发生较大的破裂损伤, 体现为产生一次较明显的声发射事件数。声发射特征会受到加载速率的影响, 试样中出现最大声发射事件数会随着应变率的增大而增大。

(3) 在试验范围内, 较低应变率 ( $3.0 \times 10^{-4}$ ,  $9.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) 时灰岩破裂机制为沿晶破裂模式, 宏观上拉伸强度较低; 当应变率增大至一定程度 ( $1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) 时灰岩为沿晶与穿晶耦合断裂模式, 宏观上拉伸强度较高, 而应变率较高 ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) 时灰岩为穿晶断裂模式, 宏观上拉伸强度最高。

(4) PFC<sup>3D</sup> 模拟结果表明, 较低应变率下, 荷载-位移曲线表现较为脆性, 而随着应变率的提高曲线延性增大。灰岩拉伸强度随着应变率的提高近似线性增大。边界总能与拉伸强度呈现为成正比关系, 灰岩破坏所消耗的能量随加载应变率的增大而增加, 微裂纹数也随着应变率的增大而增多。

### 参考文献:

[1] 杨仕教, 曾 晟, 王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 786 - 788. (YANG Shi-jiao, ZENG Sheng, WANG He-long. Experimental analysis on mechanical effects of loading rates on limestone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 786 - 788. (in Chinese))

[2] 黄 达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245 - 255. (HUANG Da, HUANG

- Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(2): 245 - 255. (in Chinese))
- [3] 周 辉, 杨艳霜, 肖海斌, 等. 硬脆性大理岩单轴抗拉强度特性的加载速率效应研究—试验特征与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(9): 1868 - 1875. (ZHOU Hui, YANG Yan-shuang, XIAO Hai-bin, et al. Research on loading rate effect of tensile strength of hard brittle marble—test characteristics and mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(9): 1868 - 1875. (in Chinese))
- [4] LIANG W G, ZHAO Y S, XU S G, et al. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**(1): 161 - 167.
- [5] 李战鲁, 王启智. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的实验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(12): 2116 - 2120. (LI Zhan-lu, WANG Qi-zhi. Experimental research on effect of loading rate for dynamic fracture toughness of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(12): 2116 - 2120. (in Chinese))
- [6] 宫能平, 罗裕繁, 高 远. 加载速率对岩石动态断裂韧度影响的试验[J]. 上海交通大学学报, 2012, **46**(10): 1570 - 1572. (GONG Neng-ping, LUO Yu-fan, GAO Yuan. Experimental study on the effect of loading rate for dynamic fracture toughness of rock[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, **46**(10): 1570 - 1572. (in Chinese))
- [7] GONG F Q, ZHAO G F. Dynamic indirect tensile strength of sandstone under different loading rates[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**: 2271 - 2278.
- [8] 张连英, 茅献彪. 高温状态下加载速率对石灰岩力学效应研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(11): 3511 - 3515. (ZHANG Lian-ying, MAO Xian-biao. Experimental study of the mechanical effects of loading rates on limestone at high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(11): 3511 - 3515. (in Chinese))
- [9] TANG F, MAO X, ZHANG L, et al. Effects of strain rates on mechanical properties of limestone under high temperature[J]. Mining Science and Technology (China), 2011, **21**(6): 857 - 861.
- [10] 苏海健, 靖洪文, 赵洪辉. 高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(6): 1064 - 1071. (SU Hai-jian, JING Hong-wen, ZHAO Hong-hui. Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(6): 1064 - 1071. (in Chinese))
- [11] 许金余, 刘 石. 加载速率对高温后大理岩动态力学性能的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(5): 879 - 883. (XU Jin-yu, LIU Shi. Effect of impact velocity on dynamic mechanical behaviors of marble after high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(5): 879 - 883. (in Chinese))
- [12] HAWKIN A B, MCCONNELL B J. Sensitivity of sandstone strength and deformability to changes in moisture content[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1992, **25**(2): 115 - 130.
- [13] VÁSÁRHELYI B. Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2003, **62**(3): 245 - 249.
- [14] VÁSÁRHELYI B, VÁN P. Influence of water content on the strength of rock[J]. Engineering Geology, 2006, **84**(1): 70 - 74.
- [15] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, **46**(2): 355 - 370.
- [16] 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 - 1006. (XIONG De-guo, ZHAO Zhong-ming, SU Cheng-dong, 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 - 1006. (in Chinese))
- [17] 王 斌, 李夕兵. 单轴荷载下饱水岩石静态和动态抗压强度的细观力学分析[J]. 爆破与冲击, 2012, **32**(4): 423 - 431. (WANG Bin, LI Xi-bing. Mesomechanics analysis of static compressive strength and dynamic compressive strength of water-saturated rock under uniaxial load[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, **32**(4): 423 - 431. (in Chinese))
- [18] 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. (CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2013, **34**(9): 2527 - 2533. (in Chinese))
- [19] WONG L N Y, JONG M C. Water saturation effects on the brazilian tensile strength of gypsum and assessment of cracking processes using high-speed video[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, **47**: 1103 - 1115.
- [20] WASANTHA P L P, RANJITH P G. Water-weakening behaviour of Hawkesbury sandstone in brittle regime[J]. Engineering Geology, 2014, **178**: 91 - 101.
- [21] SL 264—2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 2001. (SL 264—2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. 2001. (in Chinese))
- [22] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学研究内容及其应用[J]. 西部探矿工程, 1996, **8**(6): 1 - 2. (LI Xi-bing, GU De-sheng. Research content and application of rock impulsion dynamics[J]. West-China Exploration Engineering, 1996, **8**(6): 1 - 2. (in Chinese))
- [23] 梁昌玉, 李 晓, 李守定, 等. 岩石静态和准动态加载应变率的界限值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1156 - 1161. (LIANG Chang-yu, LI Xiao, LI Shou-ding, et al. Study of strain rates threshold value between static loading and quasi-dynamic loading of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1156 - 1161. (in Chinese))
- [24] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 1): 2610 - 2615. (YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 2610 - 2615. (in Chinese))
- [25] 黄 达, 岑夺丰, 黄润秋. 单裂隙砂岩单轴压缩的中等应变率效应颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 535 - 545. (HUANG Da, CEN Duo-feng, HUANG Run-qiu. Influence of medium strain rate on sandstone with a single pre-crack under uniaxial compression using PFC simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 535 - 545. (in Chinese))
- [26] 蒋明镜, 陈 贺, 刘 芳. 岩石微观胶结模型及离散元数值仿真方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 15 - 23. (JIANG Ming-jing, CHEN He, LIU Fang. A microscopic bond model for rock and preliminary study of numerical simulation method by distinct element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 15 - 23. (in Chinese))
- [27] YANG S Q, HUANG Y H, JING H W, et al. Discrete element modelling on fracture coalescence behavior of red sandstone containing two unparallel fissures under uniaxial compression[J]. Engineering Geology, 2014, **178**: 28 - 48.
- [28] 黄彦华, 杨圣奇. 孔槽式圆盘破坏特性与裂纹扩展机理颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(8): 1644 - 1653. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Particle flow simulation on fracture characteristics and crack propagation mechanism of holed-cracked Brazilian disc specimen[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(8): 1644 - 1653. (in Chinese))

## 新书预告

《地基处理监测技术》一书将于今年5月问世,它由南京水利科学研究院姜炎与何宁两位教授共同完成,由中国建筑工业出版社出版,全书50多万字。该书第一次全面阐述了软基处理中的现场监测技术,是作者三十多年从事软土特性研究和软土地基加固的成果和实践经验的总结,全书共8章。第1章为总论,内容包括:从总体上阐述地基处理中监测的目的、意义、对象和内容;首次提出了监测应遵循的真实性、及时性、整体性和统一性原则;介绍了监测手段、监测系统、仪器布置、仪器安装以及预警值设定和资料整理分析的原则,特别提出了搞好监测要具备的基本知识和技能。后面7章分别详细阐述地表沉降、分层沉降、水平位移、孔隙水压力、土压力、地下水位和真空度的监测,内容包括监测的具体目的、监测仪器、埋设技术、监测要求、资料整理与成果应用,以及工程应用实例。本书不仅仅介绍具体的监测技术以及如何实施这些监测技术,同时也花了大量篇幅阐明这些监测技术依据的原理、在地基处

理工程中的运用以及它们能解决的与工程有关的土力学问题。这当中有很多是作者与南科院同行的经验、体会和总结,不少内容都是一般书中难以见到的。作者在写具体内容时,做到叙述要求与阐明原理相结合;在讲清做法的同时,也把为什么说明白;在介绍应用案例的同时也给出作者的看法。书中第7、8章是讲地下水位和真空度的监测,其中负压下的地下水位和真空度监测工作历史较短,还不太成熟,行业内对一些问题还存在不同看法,作者花费不少篇幅阐明了测试方法的原理、存在问题及解决思路,不少意见也是首次提出。相信本书的出版对推动现场监测技术的研究和在工程中的正确应用将有很大帮助。

本书内容丰富,叙述详尽具体,技术实用,理论与实践结合紧密。可供建筑、水利、电力、交通、铁路、环境等部门的岩土工程技术人员使用;对规范制定、教学、科研、设计、施工、管理的岩土工程人员有着很好的参考作用。