



# 白砂岩力学参数尺寸效应实验研究

孔晓璇<sup>1,2</sup>, 刘重羊<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**摘要:** 岩石力学性质参数具有尺寸效应, 这一重要性质在工程设计和建设中往往被忽略。进行不同尺寸岩石的力学性质实验是研究岩石材料尺寸效应的主要方法, 但是目前的实验规程缺少针对不同尺寸试样的实验方法, 并且缺少非标准尺寸试样的配套实验夹具装置。该文提出了岩石尺寸效应实验的试样制备标准, 设计了配套的实验夹具装置, 完善了岩石尺寸效应实验方法。选取白砂岩为研究对象开展抗压和抗拉强度尺寸效应实验, 研究岩石力学参数与试样尺寸之间的关系。结果表明, 岩石抗压强度和变形模量随着试样尺寸的增加而减小, 泊松比没有尺寸效应规律, 抗拉强度先增大后减小。

**关键词:** 岩石力学; 尺寸效应; 夹具装置; 单轴压缩实验; 巴西劈裂实验

中图分类号: TU455

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220303

## Experimental Study on Size Effect of White Sandstone Mechanical Parameters

KONG Xiaoxuan<sup>1,2</sup>, LIU Chongyang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Safety for Geotechnical and Structural Engineering of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Rock mechanical properties have size effect, and a large number of experiments have proved that rock mechanical parameters may vary with specimen size. This important property of rock is generally ignored in the stability analysis of underground engineering. Rock mechanical property experiments with different sizes are the most basic test methods to study the rock size effect. However, the current rock experiment rules are only for rock specimens with standard sizes, and there is a lack of test methods for specimens with different sizes. Moreover, the current rock mechanics test system is only equipped with test devices for standard-size specimens, and lacks device suitable for other size specimens. This paper proposed the test piece preparation method and test procedures of rock size effect test, designed the auxiliary device of the test, and improved the test method of rock size effect. The uniaxial compression size effect test and Brazilian splitting size effect test of sandstone were carried out to study the relationship between mechanical parameters and sample size. The compressive strength and deformation modulus of sandstone decreased with an increase in the specimen size, and the tensile strength first increased and then decreased.

**Key words:** rock mechanics; size effect; fixture device; uniaxial compression test; Brazil splitting test

岩石力学性质参数的准确获取可为研究岩石力学基础理论、判断岩石工程安全状态和评估岩体工程结构稳定性等提供重要参考依据。岩石力学参数一般通过室内岩石力学实验获得, 由于岩石内部存在若干矿物相和微观结构缺陷, 这些内部结构特征影响着地质材料的力学响应和断裂模式。岩块的力学行为与其尺寸相关, 其工程强度

小于实验室标准尺寸试件的测量强度, 因此采用小尺寸岩石试样的力学参数进行地下工程的安全性评估与控制存在安全隐患<sup>[1-2]</sup>。岩石力学性质尺寸效应是当前岩石工程领域的研究热点和难点。

不同尺寸岩石试样的力学实验是研究岩石尺寸效应常用的方法。文献 [3-4] 比较了不同尺寸岩

收稿日期: 2022-05-22; 修回日期: 2023-03-13

基金项目: 湖北省高等学校实验室研究项目(HBSY2020-53); 武汉大学实验技术项目(WHU-2020-SYJS-14)。

作者简介: 孔晓璇(1989-), 女, 博士, 实验师, 主要从事高校实验室岩土工程实验教学与科研实验方面的研究。

E-mail: kongxiaoxuan@whu.edu.cn

石的抗压强度发现,试样尺寸影响其受荷载后的破坏模式和强度;文献[5-6]分别通过对多种岩石小尺寸范围(试样直径 $D \leq 50$  mm)和大样品尺寸(底面积 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ )的单轴抗压强度实验,分析了试样尺寸对破坏模式和抗压强度的影响;文献[7]进行了直径范围为 $26 \sim 285$  mm的石灰岩岩样的单轴实验,研究认为抗压强度呈现出先增大后减小的趋势。岩石抗拉强度尺寸效应的实验研究主要是通过巴西劈裂实验,文献[8]对比6组尺寸的石灰岩试样的抗拉强度并未发现明显的尺寸效应规律;而文献[9]进行了较大尺寸范围的Gosford砂岩巴西劈裂实验,认为岩石的抗拉强度随试样尺寸的增加呈现出先增大后减小的趋势;文献[10]基于不同厚径比的砂岩圆盘劈裂实验,认为抗拉强度表现出先减小后增大的趋势。岩石抗剪强度尺寸效应的研究受到室内实验条件限制,开展得较少,文献[11]通过粉砂岩和泥岩的剪切实验指出摩擦角不受试件尺寸的影响,文献[12]则认为内摩擦角和粘聚力均具有尺寸效应。

目前,岩石材料尺寸效应的研究集中于单轴抗压强度<sup>[13-16]</sup>,对于抗拉抗剪强度、变形参数与试样尺寸之间的关系以及不同参数尺寸效应之间关系还未开展深入研究。本文提出了岩石尺寸效应实验中单轴压缩实验和巴西劈裂实验试样的制备标准和实验步骤,设计了岩石尺寸效应实验的夹具装置,完善了岩石尺寸效应实验方法,选取白砂岩作为研究对象开展抗压和抗拉强度尺寸效应实验,揭示岩石材料参数的尺寸效应规律,进一步认识岩石力学性质及其影响因素,为岩石力学性质尺寸效应的研究提供可参考的实验方法。

## 1 岩石力学性质尺寸效应研究

### 1.1 试样的准备

岩石力学参数尺寸效应实验需要选择质地均匀、无明显裂隙、孔洞和其他缺陷的岩样,试样规格参考岩石试验方法标准或试验规程<sup>[17-18]</sup>。本文中选用5种尺寸高径比为2和0.5的圆柱体(如图1和表1所示)进行单轴压缩实验和巴西劈裂实验,每组由3个试样组成。试样底面平整度应控制在小于 $(D/50) \times 0.02 \text{ mm}$ 范围内,直径偏差应小于 $(D/50) \times 0.1 \text{ mm}$ , $D$ 为试样直径,轴向偏差应小于直径的 $1/1000$ 。

### 1.2 单轴压缩尺寸效应实验方法

本文中岩石力学实验研究均在RMT-150C岩石与混凝土力学实验系统上完成。实验前根据岩石抗压强度和试样直径预测最大尺寸试样破坏时峰值荷载,选择 $1500 \text{ kN}/50 \text{ mm}$ 的力传感器,记录加载过程中荷载(单位:kN)和位移(单位:mm)的变化,实验设备精度为1%。

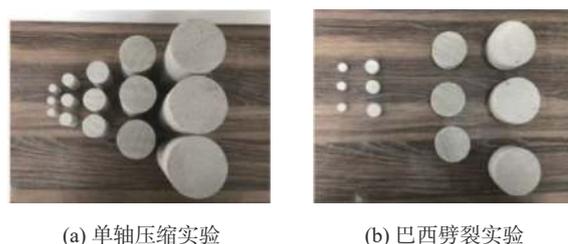


图1 尺寸效应实验试样

表1 尺寸效应实验试样尺寸与数量 单位:mm

单轴压缩实验		巴西劈裂实验	
尺寸(直径×高)	数量	尺寸(直径×高)	数量
20×40	3	20×10	3
30×60	3	30×15	3
50×100	3	50×25	3
75×150	3	75×37.5	3
100×200	3	100×50	3

如图2所示,适用于多种尺寸单轴压缩实验夹具装置安装于RMT-150C实验系统,用于多种尺寸单轴压缩实验中安装和固定位移引伸计,提高试样加载过程中轴向和径向变形的测量精度。在实验过程中,首先对试样施加预加载,调整轴向和径向位移引伸计的位置,使其与试样接触并将初始读数归零,在试样上施加荷载直至破坏,记录岩石试样破坏过程中裂纹法扩展过程和最终破坏形态,整理加载荷载及轴向和径向位移引伸计数据,并计算岩石试样的相关物理力学参数。

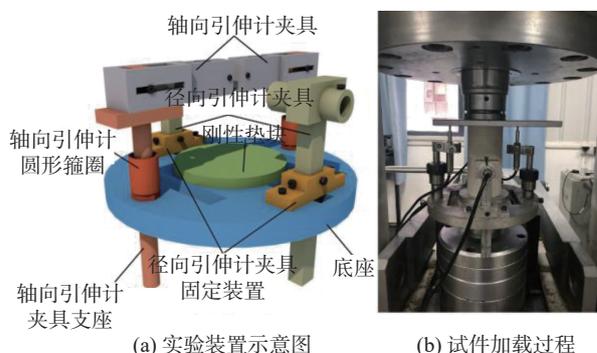


图2 适用于多种尺寸单轴压缩实验夹具装置

单轴压缩实验中单轴抗压强度和弹性模量的确定如下。

### 1) 单轴抗压强度

$$\sigma_c = P/A \quad (1)$$

式中： $\sigma_c$ 为岩样的单轴抗压强度，单位 Mpa； $P$ 为加载过程的最大破坏载荷； $A$ 为试样横截面积，单位  $m^2$ 。

### 2) 弹性模量

以峰值强度 50% 处的切线弹性模量表征岩石变形模量：

$$E = \sigma_{50}/\varepsilon_{150} \quad (2)$$

式中： $E$ 为弹性模量，单位 Mpa； $\sigma_{50}$ 为单轴抗压强度 50% 时的应力值，单位 Mpa； $\varepsilon_{150}$ 为应力  $\sigma_{50}$  时的轴向应变值。

## 1.3 巴西劈裂尺寸效应实验方法

适用于多种尺寸的巴西劈裂实验夹具装置如图 3 所示，图 3(a)为试样的安装定位过程，2 块试样定位夹持块下部坡面相对，通过定位螺栓进行固定，试样与试样定位夹持块的两坡面相切，然后通过左、右定位夹持板上的预加载固定螺栓将试样居中定位；图 3(b)为试样的加载破坏过程，上承压板补充块可放置于 H 型上承压板上，对于直径小于 50 mm 的试样可以仅适用 H 型上承压板。

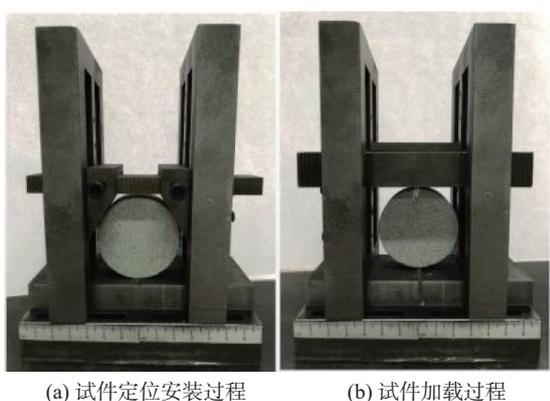


图 3 适用于多种尺寸巴西劈裂实验夹具装置定位安装和加载过程示意图

岩石的巴西劈裂实验中首先在试样底面通过中心点作直线，过直线两端在试样侧面沿轴线方向画两条平行的加载线，固定直径为 1 mm 钢丝垫条于加载线位置。准备工作完成后将试样置于巴西劈裂实验夹具装置中，将夹具置于实验机加载板下施加预加载，预加载完成后检查钢丝垫条是否位置不变，加载板是否保持水平，若不是则重复预加载过程。试样预加载完成后松开预加载固

定螺栓，以防止安装及加载过程中的试样偏转，此后进行试样加载破坏。加载过程采用力控制模式，以 0.05 kN/s 的速率加载直至试样破坏。

试样破坏面应通过试样底面中心点附近，否则实验失败结果不可用，整理和记录试样的加载曲线和试样破坏模式。

抗拉强度按下式计算：

$$\sigma_t = 2P/\pi DH \quad (3)$$

式中： $\sigma_t$ 为岩石抗拉强度，单位 Mpa； $P$ 为破坏荷载； $D$ 和 $H$ 分别为试样的直径和高度，单位 m。

## 2 实验结果分析

### 2.1 单轴压缩尺寸效应实验结果

在单轴压缩荷载作用下，岩样破坏表现为明显的脆性材料破坏特征，即单斜面剪切破坏模式，少部分产生共轭斜面剪切破坏，如图 4 所示。当  $D=20$  mm 时(图 4(a))，试样在加载过程中萌生多条裂隙，试件最终破碎成多块岩块并伴随有部分岩屑掉落；当尺寸增大时( $D=30$ 、50 mm，如图 4(b)和图 4(c))，试样破坏仅形成一条倾斜的较为平整破坏面，且宏观裂隙的倾角基本一致；尺寸继续增大时(如图 4(d)和图 4(e))，试样最终形成一条宏观大裂隙，在加载过程中也伴随着大量岩块的逐渐剥离，剥离部分的体积和数量随试样尺寸增大而增加。

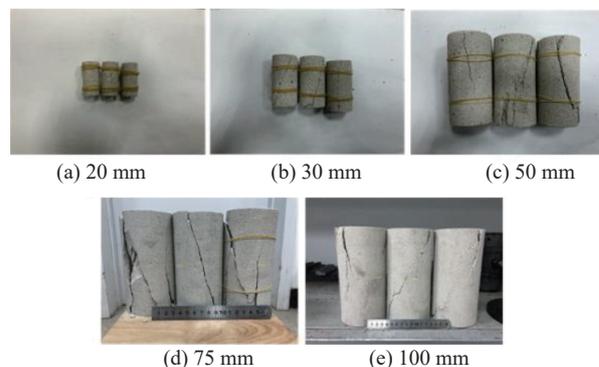


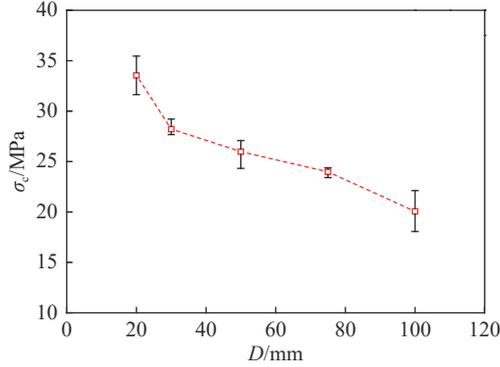
图 4 单轴压缩不同直径实验试样的裂纹分布和破坏形态

岩石的单轴抗压强度( $\sigma_c$ )和弹性模量( $E$ )随着试样尺寸的增加而减小，尺寸越大减小速度越趋于平缓，泊松比没有尺寸效应规律，如图 5 所示，图中数据为每组 3 个试样的平均值，并标注正负偏差。

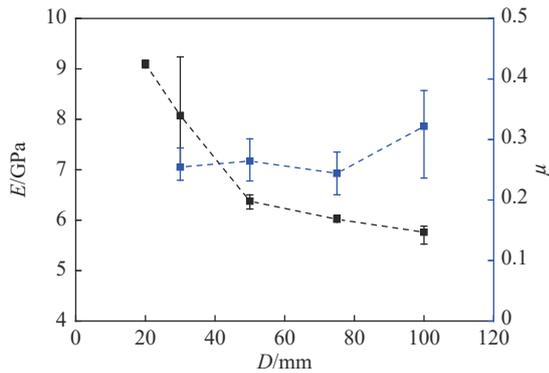
### 2.2 巴西劈裂尺寸效应实验结果

岩石在劈裂荷载作用下的破坏模式如图 6 所示，一般为脆性破坏：当  $D < 50$  mm 时(图 6(a)和图 6(b))，破坏时形成一条略偏离底面中心的宏观

裂纹, 裂纹倾斜的原因可能由于在预加载时试样较小垫条发生偏斜导致加载方向偏离; 当尺寸增大时( $D \geq 50 \text{ mm}$ , 图 6(c)~图 6(e)), 试样尺寸越大裂纹越趋于一条通过底面中心的直线, 越趋于预期裂纹形态。



(a) 单轴抗压强度和试样尺寸的关系



(b) 弹性模量、泊松比和试样尺寸的关系

图 5 岩石的单轴抗压强度和弹性模量、试样尺寸的关系

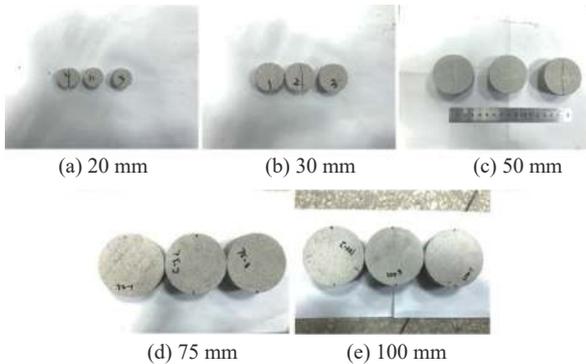


图 6 巴西劈裂不同直径实验试样的裂纹分布和破坏形态

岩石抗拉强度随着试样尺寸的增大先增大后减小, 减小速度随尺寸越大越趋于平缓, 最大抗拉强度值在直径为 50 mm 时, 如图 7 所示。

### 2.3 实验数据分析

对上述实验所测得岩石参数(单轴抗压强度 $\sigma_c$ 、抗拉强度 $\sigma_t$ 和弹性模量 $E$ )与试样尺寸进行拟合, 如图 8 所示, 拟合曲线分别为幂函数形式  $y = ax^b$ 、直线形式  $y = a + bx$  和幂函数形式  $y = y_{50}(0.05/x)^a$ 。

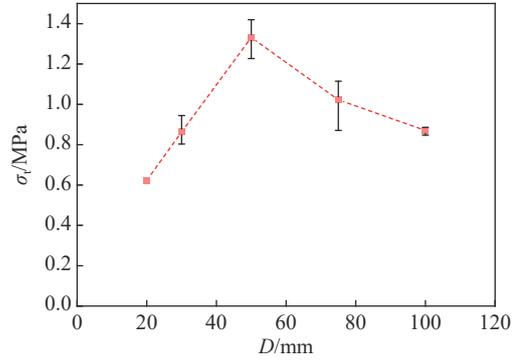
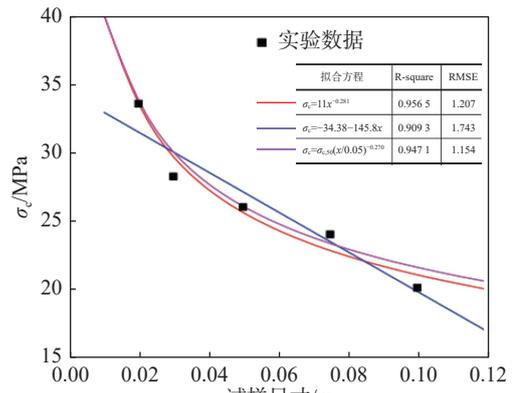
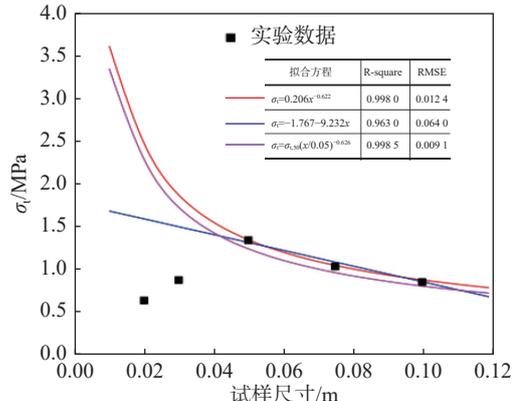


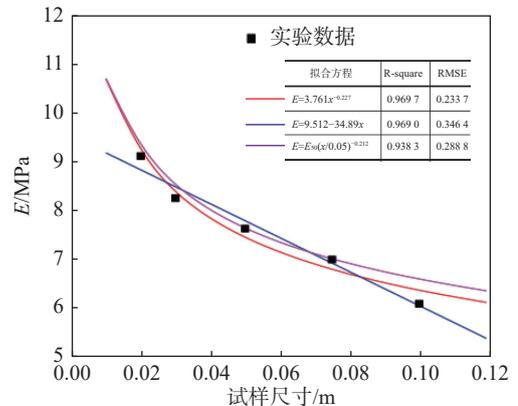
图 7 岩石抗拉强度和试样尺寸的关系



(a) 单轴压缩强度



(b) 抗拉强度



(c) 弹性模量

图 8 砂岩参数的尺寸效应的拟合结果

$y = y_{50}(0.05/x)^a$ 是常用的岩石单轴抗压强度尺寸效应拟合公式<sup>[19]</sup>,文献 [20] 指出各向同性的原岩的系数  $a$  的取值范围为 0.1~0.3, 本文实验结果符合这一规律。除抗压强度外, 其他力学参数由于没有大量的实验数据支持, 并没有提出相应的拟合公式, 为验证试验的可靠性, 将实验结果与文献中的试验数据进行对比分析, 抗拉强度的尺寸效应规律与文献 [9] 砂岩的实验结果趋势相同, 关于弹性模量和泊松比的研究较少, 本文结果无法与之进行对比分析。单轴抗压强度 $\sigma_c$ 和抗拉强度 $\sigma_t$ 的拟合结果中系数 $a$ 分别为-0.269 7 和-0.626 4, 相差 2.3 倍, 不同材料参数尺寸效应规律出现差异的原因可能是破坏方式不同。

### 3 结束语

本文提出了岩石尺寸效应实验的试样制备标准和实验步骤, 设计了配套的实验夹具装置, 完善了岩石尺寸效应实验方法。选取白砂岩为研究对象开展抗压和抗拉强度尺寸效应实验, 实验结果表明: 随着试样尺寸的增加, 岩石的单轴抗压强度和弹性模量减小且减小趋势随之变缓, 抗拉强度先增大后减小。岩石力学参数的尺寸效应规律推断可能受其破坏方式影响。本文中砂岩的单轴压缩尺寸效应实验方法和巴西劈裂尺寸实验方法为岩石力学参数尺寸效应研究提供参考依据。

### 参考文献

- [1] 杨永杰, 陈绍杰. 同种岩石强度离散性的实验技术研究[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(1): 51-53.
- [2] 张鹏海, 朱万成, 牛雷雷, 等. 岩石与岩体力学参数估算虚拟仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(1): 131-134.
- [3] 路新景, 李志敬, 房后国, 等. 岩石单轴抗压强度优势尺寸及尺寸效应[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 107-109.
- [4] 孙国文, 王刚, 蔡泳, 等. 某金矿岩尺寸效应性质试验研究及应用[J]. 金属矿山, 2022, 558(12): 1-9.
- [5] 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等. 小尺寸岩样单轴压缩实验尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 865-873.
- [6] 王连山, 孙东生, 郑秀华, 等. 三种典型岩石单轴抗压强度的尺寸效应实验研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(2): 327-332.
- [7] ZHAI H, MASOUMI H, ZOORABADI M, et al. Size-dependent behaviour of weak intact rocks[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(8): 3563-3587.
- [8] THURO K, PLINNINGER R J, ZAH S, et al. Scale effect in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test [C]//*Rock Mechanics A Challenge for Society*. Zeitlinger: Sarkka and Eloranta, 2001, 169-174.
- [9] MASOUMI H, ROSHAN H, HEDAYAT A, et al. Scale-size dependency of intact rock under point-load and indirect tensile Brazilian testing[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 04018006.
- [10] 邓华锋, 李建林, 朱敏, 等. 圆盘厚径比对岩石劈裂抗拉强度影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 792-798.
- [11] TANI K. Scale effect on shear strength of sedimentary soft rocks observed in triaxial compression test (influence of potential joints) [C]//*Proc of 36th National Conference of the Japanese Geotechnical Society*. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2001: 597-598.
- [12] MASOUMI H, SAYDAM S, HAGAN P C. Incorporating scale effect into a multiaxial failure criterion for intact rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 83: 49-56.
- [13] 孟庆彬, 韩立军, 浦海, 等. 尺寸效应和应变速率对岩石力学特性影响的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 233-243.
- [14] 林军, 沙鹏, 伍法权, 等. 基于尺寸效应的类岩石材料点荷载指标与单轴抗压强度对应关系研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(3): 34-44.
- [15] 李帅, 陈军斌, 王汉青, 等. 基于多尺度页岩巴西劈裂实验的岩石强度尺寸效应根源研究[J]. 力学与实践, 2020, 42(1): 35-41.
- [16] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112-118.
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50266—2013工程岩体实验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. SL/T 264—2020水利水电工程岩石实验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [19] DARLINGTON W J, RANJITH P G, CHOI S K. The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rock-like cementitious brittle materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(5): 513-529.
- [20] YOSHINAKA R, OSADA M, PARK H, et al. Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect[J]. *Engineering Geology*, 2008, 96(3-4): 173-186.