

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.010

# 裂隙-荷载耦合作用下砂岩强度变形 细观损伤机理研究

王凯毅, 王述红, 庄贤鹏, 王子和  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 通过岩石力学伺服试验机,对完整砂岩与裂隙砂岩进行单轴压缩试验与单轴循环加卸载试验,探究荷载-裂隙共同作用下砂岩力学性质的演化规律。试验结果表明:循环荷载作用对完整砂岩与含预制裂隙砂岩的力学性质有显著的强化作用;随着循环周数增加,试样弹性模量呈现出“强化”现象,且第一周加卸载循环对弹性模量的强化作用最为显著。结合试样的细观损伤机理,分析了初始抗压强度、加载路径、应力状态与宏观缺陷等条件对循环荷载下峰值强度演化规律的影响,并阐明了弹性模量“强化”现象的细观机理。

**关键词:** 循环荷载;力学性质;细观机理;强化现象;预制裂隙

中图分类号: TD315

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0060-06

## Meso - damage Mechanism of Sandstone Strength and Deformation under Fracture and Load Coupling

WANG Kaiyi, WANG Shuhong, ZHUANG Xianpeng, WANG Zihe

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

**Abstract:** Through the rock mechanics servo testing machine, the uniaxial compression test and the uniaxial cyclic loading and unloading test of complete sandstone and fractured sandstone were carried out to explore the variation law of the mechanical properties of sandstone under the combined action of load and fracture. The experiment results show that cyclic loading has significant strengthening effects on the mechanical properties of intact sandstone and sandstone with precast fissures. With the increase of cycle number, the elastic modulus of the samples shows a strengthening phenomenon, and the first loading - unloading cycle has the most significant strengthening effect on the elastic modulus. Combined with the microscopic damage mechanism of the specimens, the influence of initial compressive strength, loading path, stress state and Macro - defects on the variation of peak strength under cyclic loading is analyzed, and the micro - mechanism of elastic modulus strengthening is clarified.

**Keywords:** cyclic loading; mechanical property; meso mechanism; strengthening phenomenon; precast fissures

近年来,随着中国经济快速发展,矿业煤场与隧道轻轨等行业岩层开挖的深度与长度逐年增加,矿石的不断开采加上复杂的地形结构使得周围岩体经常处于反复的循环荷载作用,如硐室的开挖、房柱的开采等,都会对岩体造成不同程度的扰动,对工作人

员及设备财产安全造成巨大的威胁。大量研究资料表明,岩体中存在各种裂纹与孔隙等微观缺陷,其宏观力学特性与荷载作用方式密切相关。目前,国内外学者对此进行了大量的研究工作并取得了较多的成果。

收稿日期:2019-03-01 修稿日期:2019-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474050, U1602232);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(N170108029);辽宁省自然科学基金项目(20170540304, 20170520341);中建股份科技研发课题(CSECEC-2016-Z-20-8);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201810145043)

作者简介:王凯毅(1997—),男,辽宁营口人,本科在读,研究方向为裂隙岩石力学特性试验与模拟。E-mail: wangkaiyi\_neu@163.com

通讯作者:王述红(1969—),男,江苏泰州人,教授,博士生导师,主要从事非连续岩体力学与工程灾害等方面的工作。

E-mail: shwangneu@126.com

刘建锋等<sup>[1]</sup>以大理岩为载体进行了力学特性研究实验,得到了循环载荷下大理岩动泊松比、动弹性模量等力学性质的变化趋势与其振动频率及动应力幅值的关系。谷中元等<sup>[2]</sup>利用循环载荷与红外技术对花岗岩的力学特性进行研究,并以循环次数和强度振幅为变量说明循环加、卸载在一定条件下存在积极效应以及红外检测在灾害演化方面的优越性。葛修润等<sup>[3-5]</sup>对周期荷载下岩石的力学性质演变规律做了大量的研究,提出了循环荷载应力门槛值的概念,并发现循环上限应力和循环幅值对岩石变形与破坏的影响最为显著。马振洲等<sup>[6]</sup>对裂隙混凝土梁进行三点弯曲循环荷载试验,分析了试件断裂能与耗散能的演化规律。李润等<sup>[7]</sup>通过单轴等幅疲劳试验,分析了含裂隙类岩模型超声波波速与裂隙倾角的关系以及试样的疲劳损伤发展过程。林大能等<sup>[8]</sup>通过单轴模拟冲击加载实验,探究了围压、荷载冲量大小与冲击次数对岩石在循环冲击载荷下的损伤变化规律。然而目前有关循环荷载作用下含预制裂隙岩石的研究仍然较少。

鉴于此,本文通过完整砂岩与含预制裂隙砂岩试样的单轴压缩试验与单轴循环加、卸载试验,探究了荷载-裂隙耦合作用下砂岩试样力学性质的演化规律。结合循环荷载细观损伤机理,对循环荷载作用下峰值强度与弹性模量的“强化”现象进行了解释,讨论了初始抗压强度、密实程度、循环应力水平、应力状态及宏观缺陷等变量对循环荷载峰值强度的影响。

## 1 实验材料和实验方法

本试验红砂岩采自山东省临沂市莒南县。经实验室精加工,将采集的红砂岩岩块制成长方体试样,高度为 100 mm,宽度和长度均为 50 mm。在完整试样的基础上,利用水刀预制如图 1 所示的裂隙。

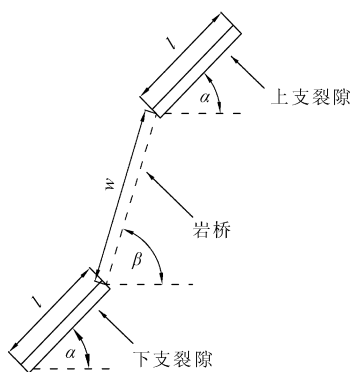


图 1 预制裂隙与岩桥分布图

如图 1 所示, $\alpha$  表示裂隙倾角, $\beta$  表示岩桥倾角。岩桥长度  $w = 15$  mm,裂隙长度  $l = 10$  mm,宽度约 2 mm。本试验砂岩试样共有 12 块,其中完整砂岩 6 块,均分为 W1 与 W2 两组;裂隙砂岩 6 块, $\alpha = \beta = 75^\circ$ ,均分为 L1 与 L2 两组。每组有 3 块砂岩试样,通过在试样组号后面标注数字来区分同一组的不同试样,例如 W1 组的三块试样分别命名为 W1-1、W1-2 和 W1-3。

本试验所用仪器为 YAW-2000B 液压微机伺服控制压力机。试验前,在试样端部均匀涂抹一层薄薄的凡士林试剂,以此减弱加载过程中端面效应的影响;在试样中部对称放置两枚千分表,表征试样试验过程中的横向变形特性;利用数码摄像技术,实时记录红砂岩试样的破坏全过程。

单轴压缩试验与单轴循环加、卸载试验均采用力控制加载方式,加载与卸载速率均为 200 N/s。首先进行 W1 组与 L1 组砂岩的单轴压缩试验,获取预估抗压强度值,为 W2 和 L2 组砂岩试样循环荷载试验各级循环应力值的选取提供依据。循环加、卸载方案如下:每个砂岩试样进行 6 周加、卸载循环;对于 W2 组砂岩试样,6 个加、卸载循环峰值应力依次为 22.0 MPa、25.0 MPa、28.0 MPa、31.0 MPa、34.0 MPa 和 37.0 MPa,而后加载直至岩石破坏;而对于 L2 组砂岩试样,6 个加、卸载循环峰值应力依次为 13.2 MPa、15.0 MPa、16.8 MPa、18.6 MPa、20.4 MPa 和 22.2 MPa,而后加载直至岩石破坏。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 荷载作用方式对应力-应变曲线的影响

图 2 给出了单轴循环加、卸载和单轴压缩两种荷载作用方式下完整砂岩试样的应力-应变曲线。

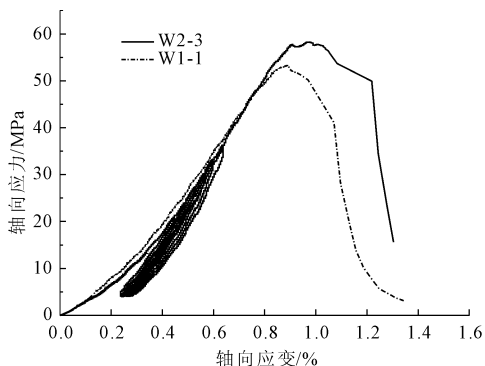


图 2 不同加载方式下完整砂岩的应力-应变曲线

由图 2 可知,完整砂岩试样在两种荷载作用方式的初期阶段,其应力-应变曲线均呈现出明显的

非线性特征,这是由于加载过程中试样内部的原生微裂隙被逐渐压密,试样内部有效接触面积增加,使得试样刚度有所提高,反映到应力-应变曲线上,就会导致曲线斜率逐渐增大,呈现出明显的非线性特征。随着轴向应力增加,试样 W2-3 进入循环加、卸载区段,每一级循环曲线的加、卸载路径并不重合,形成塑性滞回环;随着循环周数的增加,试样 W2-3 的塑性滞回环逐渐向轴向应变增大的方向移动,不可逆变形逐渐增加。不难看出,试样 W2-3 经过 6 次加、卸载循环后,其峰值强度明显高于试样 W1-1。

## 2.2 加载方式对试样力学性质的影响

表 1 给出了所有砂岩试样力学参数的变化情况,用以进一步分析荷载作用方式对砂岩试样力学性质的影响规律。本试验中取加载时应力-应变曲线近似直线段来计算弹性模量,表 1 中弹性模量数值为 W2 与 L2 组试样最后一次加载时的弹性模量。

表 1 不同加载方式下试样力学参数对比

编号	峰值强度 /MPa	弹性模量 /GPa	编号	峰值强度 /MPa	弹性模量 /GPa
W1-1	53.2	7.61	W2-1	66.9	10.00
W1-2	58.1	7.82	W2-2	57.3	9.76
W1-3	51.5	7.85	W2-3	59.8	9.64
L1-1	36.5	6.30	L2-1	51.2	8.13
L1-2	40.3	7.15	L2-2	44.5	8.14
L1-3	46.2	6.84			

由表 1 数据可以看出,循环荷载作用对砂岩力学性质有显著的强化作用。完整砂岩试样循环荷载峰值强度强化幅度为 12.9%,而含预制裂隙试样的峰值强度强化幅度为 16.8%,其强化幅度略高于完整砂岩试样。由此可知,循环荷载作用下完整砂岩和含预制裂隙砂岩均可表现出峰值强度的“强化”现象,这与尤明庆等<sup>[9]</sup>的试验结果相近。笔者发现经历了 6 周加、卸载循环后,试样的弹性模量与常规单轴压缩试验弹性模量相比有大幅提升,其中完整试样弹性模量提升了 26.3%,含裂隙试样弹性模量提升了 20.3%。

为了更全面的认识不同循环荷载条件下岩石峰值强度的演化规律,笔者对多位学者的试验数据进行了整理,因篇幅所限,本文仅列出部分具有代表性的数据见表 2。

结合表 2 与本文的试验数据,笔者发现以下规律:

(1) 单轴循环加、卸载作用既可能提高试样的

峰值强度,也可能削弱其峰值强度。当试样循环加、卸载后峰值强度大于其单轴抗压强度,则称该试样表现出“强化”现象,反之则称该试样呈现“弱化”现象。

(2) 试样的初始单轴抗压强度和密实程度越高,循环荷载作用后发生“弱化”现象的可能性越大;反之试样的抗压强度和密实度越低,循环荷载作用后发生“强化”现象的可能性越大。

(3) 循环荷载作用对岩石力学性能的影响规律与其岩性及循环荷载路径密切相关,当相似的加载条件作用在岩性不同的试样时,产生的力学效应截然不同;当不同的循环加、卸载路径作用在岩性相似的试样时,产生的力学效应也是不尽相同。

(4) 结合本试验与尤明庆等<sup>[9]</sup>试验的现象可以发现,不论是完整岩石试样还是具有宏观缺陷的岩石试样,循环荷载作用均可使其强度发生“强化”现象。

(5) 试样循环加、卸载力学响应规律与其所处的应力状态密切相关。低围压条件下循环加、卸载更易产生“强化”现象,而高围压条件下循环加、卸载则更易产生“弱化”现象。

## 2.3 循环荷载对弹性模量的影响

笔者采用近似直线计算方法对试样 L2-2 各级循环荷载的弹性模量进行计算,计算结果如图 3 所示。

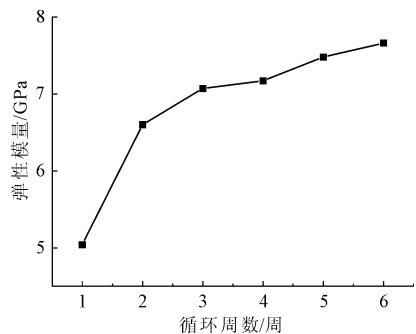


图 3 试样 L2-2 弹性模量演化规律

由图 3 可以看出:试样弹性模量随循环周数的增加整体上呈现出“强化”趋势;并且第一周加、卸载循环对试样弹性模量的强化作用最为显著,而后随着循环周数增加,弹性模量强化幅度较小。

## 3 微观损伤机理分析

### 3.1 峰值强度演化规律的微观机理

针对循环荷载作用下岩石试样峰值强度的试验现象与规律,笔者做出如下解释:由于岩石内部随机分布的原生微裂隙和孔隙的存在,使得加载初期试样的有效接触面积偏小。随着轴向应力增加,试样

的有效应力迅速增至裂隙面凸起的强度值,使裂隙面发生破坏并产生松动颗粒<sup>[17]</sup>,新生成的松动颗粒与原生微裂隙共同参与承载,增大了试样的承载面积;而后的卸载阶段中裂隙面部分弹性变形得以恢

复,裂隙内空间增大,松动颗粒发生位移并填充至附近的孔隙中,新生裂隙层面间结构得以调整,裂隙层面间的摩擦能力和密实程度有所提高,使得岩石试样循环加、卸载峰值强度有“强化”趋势。

表 2 不同循环荷载试验条件下的峰值强度演化规律

研究学者	年份	试验材料	循环加、卸载试验条件	试验现象
藕明江等 <sup>[10]</sup>	2017	大理岩	(1) 恒下限分级循环加、卸载:循环上限应力步长为 10 MPa,循环下限轴力恒定为 2 kN。 (2) 恒差值分级循环加、卸载:循环上限应力步长为 10 MPa,首周循环下限轴力为 2 kN,此后各周循环的下限应力均与其上一周循环的上限应力值相同。 上述两种加载方式均循环加、卸载直至试样破坏	单轴抗压强度 51.36 MPa,方案 1 峰值强度 60.85 MPa,方案 2 峰值强度 67.48 MPa。
尤明庆等 <sup>[9]</sup>	2008	大理岩	该论文中未详细说明加载方式,从本构关系中可以看出,所有试样的荷载作用方式整体上为恒下限分级循环加、卸载,均是循环加、卸载直至试样破坏。	粗晶、中晶、细晶和含孔道缺陷试样的循环峰值强度均大于其单轴抗压强度。
李春阳等 <sup>[11]</sup>	2016	花岗岩	(1) 恒下限分级循环加、卸载:循环上限应力步长 10 MPa,下限应力 0 MPa。 (2) 恒差值分级循环加、卸载:循环上限应力步长 10 MPa,首周循环下限轴力 0 MPa,此后各周循环的下限应力均与其上一周循环的上限应力值相同。 上述两种加载方式均循环加、卸载直至试样破坏	单轴抗压强度 58.71 MPa,方案 1 峰值强度 69.70 MPa,方案 2 峰值强度 66.46 MPa。
谷中元等 <sup>[2]</sup>	2018	花岗岩	以预估单轴抗压强度的 12%、24%、36%、48% 和 60% 为振幅进行单轴循环加、卸载预处理。循环次数固定为 5 或 10 次,预处理后将试样静置并冷却至室温,然后进行常规单轴压缩试验。	单轴抗压强度 201.88 MPa,除 36% 振幅下 10 次循环预处理试样呈强化现象,其余试样强度均降低。
左建平 <sup>[12]</sup>	2011	煤岩组合物	单轴循环加、卸载:循环上限轴力为 $(2 + 2n)$ kN,下限轴力恒为 1 kN,一直循环直至试样破坏。其中 $n$ 代表循环加卸载的周数。	单轴抗压强度约为 26 MPa,循环峰值强度 27.5 MPa。
徐速超等 <sup>[13]</sup>	2009	砂卡岩	单轴一次循环加、卸载:首先加载至预估单轴抗压强度的 80%,然后卸载至预估单轴抗压强度的 5%,再加载直至砂卡岩试样破坏。 单轴循环加、卸载:首先加载至预估单轴抗压强度的 50%,循环上限应力步长 10%,下限应力恒为预估单轴抗压强度的 5%,循环加、卸载直至岩石破坏。	单轴抗压强度约 100 MPa,单轴一次循环加、卸载峰值强度 104.16 MPa,单轴循环加、卸载峰值强度 119.84 MPa。
李涛等 <sup>[14]</sup>	2018	冻结饱水灰砂岩	围压为 2 MPa、3 MPa、4 MPa、5 MPa、6 MPa、7 MPa、8 MPa 和 9 MPa,首次加载至预估抗压强度的 50%,循环上限应力步长 5%,循环下限应力恒等于其偏应力数值。	当 $\sigma_3 \leq 6$ MPa 时,循环峰值强度高于常规三轴试验强度;当 $\sigma_3 > 6$ MPa 时,循环峰值强度低于常规三轴试验强度。
周家文等 <sup>[15]</sup>	2010	砂岩	循环加、卸载方案 1:循环上限应力为 71.4 MPa、81.6 MPa、91.8 MPa、102.0 MPa、112.2 MPa 和 122.5 MPa,循环下限应力为 0 MPa,经过 6 周循环加、卸载后一次加载直至破坏。 循环加、卸载方案 2:在 50 MPa~100 MPa 的轴向应力区间内循环 40 周一60 周,然后加载至岩石破坏为止。	单轴抗压强度约为 170 MPa~195 MPa 之间,两种循环试验方案的峰值强度均低于 160 MPa,两种方案的峰值强度较为接近。
汪泓等 <sup>[16]</sup>	2017	砂岩	单轴分级循环加、卸载:循环上限应力逐渐提高,相邻循环间峰值轴力提升幅度为 20 kN,下限轴力恒为 10 kN,并在下一级加载循环峰值增大 30 kN,仍降至 10 kN,以此为一次加、卸载循环;循环直至试样破坏。	单轴抗压强度 86.77 MPa,循环峰值强度 69.87 MPa。

注:“下限应力(轴力)”指卸载阶段的目标值应力(轴力),“上限应力(轴力)”指加载阶段的目标值应力(轴力);“步长”指相邻循环上限应力的差值。

葛修润<sup>[18]</sup>认为当轴向应力低于周期荷载的应力门槛值时,即使经历上万次的周期荷载也不会导致岩石破坏,并经过大量试验证明门槛值实质上就是应力-应变曲线线性区段与非线性区段的分界点;而当循环上限应力高于门槛值时,岩石在一定次数的循环荷载后必会发生破坏。从细观损伤力学的

角度分析,当轴向应力高于试样的弹性极限强度时,试样内部的微裂纹开始发育;如果在这样的条件下进行反复的循环加、卸载,势必会导致微裂纹的逐渐扩展,进而加重岩石试样的损伤程度,弱化试样的承载结构,最终导致岩石试样循环加、卸载峰值强度出现“弱化”趋势。

笔者认为单轴循环加、卸载后试样峰值强度变化规律主要取决于“强化”作用与“弱化”作用的相对关系,本文将据此对上述试验现象及规律进行简要的分析。

(1) 由于循环加、卸载作用对岩石试样同时存在“强化”与“弱化”两种作用,不同的试验条件下两种作用的相对强弱关系不尽相同,所以循环加、卸载峰值强度既可能发生“强化”现象,也可能发生“弱化”现象。

(2) 试样的初始抗压强度与密实程度越高,试样的孔隙度往往越小,可供循环荷载作用压密调整的细观结构相对较少,“强化”作用发挥的空间较小,故而发生“弱化”现象的可能性较大;反之,则发生“强化”现象的可能性较大。

(3) 岩性不同的试样,其内部细观结构特征与弹性极限强度差别较大,所以试样在循环荷载作用下的力学响应相差很大;弹性强度极限越低,其加、卸载循环后的损伤程度越大,发生“弱化”现象的可能性就越大。岩性相似的试样,在不同应力水平下进行加、卸载循环,其力学响应相差也很大;如果循环应力水平较高,则试样产生损伤的可能性较大,即发生“弱化”现象的可能性越高。

(4) 由上述“强化”现象细观机理可知,试样发生“强化”现象的原因主要是循环加、卸载作用对试样细观结构的调整,尽管宏观预制缺陷会导致试样力学性能的劣化,却不会对试样内部细观结构造成太大改变,所以循环加、卸载作用仍可对含缺陷岩石细观结构进行调整,进而提高岩石试样的强度,使其发生“强化”现象。

(5) 三轴循环加、卸载的过程中,试样的循环应力下限值均是以其偏应力值为准,所以在高围压状态下的循环加、卸载过程中,试样始终处于较高的三向应力状态,裂隙层面间的调整作用受到抑制,并最终导致“弱化”现象发生的可能性提高;反之则会导致“强化”现象发生的可能性提高。

本试验中循环荷载应力水平较低,无围压,且砂岩试样初始单轴抗压强度较低,所以循环荷载作用下峰值强度发生“强化”现象的可能性非常大,这与 2.2 节所述试验结果相一致。

### 3.2 弹性模量“强化”现象的细观机理

由 2.2 节和 2.3 节的试验结果可知,循环荷载对弹性模量的强化作用分为两个层次。针对单个试样来说,循环荷载作用下试样的弹性模量会随循环周数的增加而不断增加;针对不同加载方式来说,6

周加、卸载循环后,试样的弹性模量与单轴压缩试验测得的弹性模量相比有较大幅度的提高。

由 3.1 节的描述可知,循环加、卸载对裂隙的层面间结构有调整作用,反复的加、卸载作用可以提高试样的有效接触面积与密实程度,这使得试样的弹性模量整体上呈现出“强化”现象;并且天然状态下砂岩内部存在大量的原生缺陷,首次加载时,试样内部大量原生微裂纹被压密,而在卸载阶段,仅有少数微裂纹得以恢复,这使得第一周加、卸载循环后试样的密实程度有较大幅度的提升,进而导致其弹性模量在第一周加、卸载循环后大幅提升,这与周家文等<sup>[15]</sup>的试验结果相近;经过第一周加、卸载循环后,试样内部细观结构调整基本完成,所以从第二周加、卸载循环开始,弹性模量的增幅变小。

由于反复的循环加、卸载作用使得试样密实程度不断提高,且较低的循环应力不足引起试样微裂纹的大量扩展,这使得 6 周加、卸载循环后试样的密实程度与循环前相比有大幅提高,进而导致末次加载弹性模量高于常规单轴压缩试验的弹性模量。

## 4 结 论

(1) 循环荷载作用对完整砂岩与含预制裂隙砂岩的峰值强度有显著的强化作用,且经历了 6 周加、卸载循环后,试样的弹性模量也有大幅的提升。随着循环周数的增加,红砂岩试样的弹性模量整体上呈现出“强化”趋势;并且第一周加、卸载循环对弹性模量的强化作用最为显著。分析了弹性模量强化现象的细观成因。

(2) 从细观损伤机理的角度对循环荷载作用下岩石力学性质的演化规律进行了分析。一方面,循环荷载作用可以调整微裂隙的层面间结构,提高裂隙层面间的摩擦能力和密实程度,使得岩石试样循环加、卸载峰值强度有“强化”趋势;另一方面,如果在轴向应力超过微裂纹扩展临界应力的状态下进行循环加、卸载,就必然会导致微裂纹的扩展,加重岩石试样的损伤程度,弱化岩石的承载结构,导致岩石试样循环加、卸载峰值强度出现“弱化”趋势。

(3) 总结了本试验和多位学者的试验数据,发现较低的初始抗压强度、密实程度、循环应力水平和围压有助于岩石在循环荷载作用下呈现出强化现象;并且宏观缺陷的存在不影响其强化现象的发生。结合细观损伤机理的解释,对上述试验规律逐条进行了分析。

## 参考文献:

- [1] 刘建锋,翟俨伟,裴建良,等.不同频率循环荷载下大理岩动力学特性试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2014,33(4):432-436.
- [2] 谷中元,周科平.单向循环加载下花岗岩力学特性及红外分析[J].中国安全生产科学技术,2018,14(8):148-153.
- [3] 葛修润,蒋宇.周期荷载作用下岩石疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1581-1585.
- [4] 章清叙,葛修润,黄铭,等.周期荷载作用下红砂岩三轴疲劳变形特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):473-478.
- [5] 葛修润,卢应发.循环荷载作用下岩石疲劳破坏和不可逆变形问题的探讨[J].岩土工程学报,1992,14(3):56-60.
- [6] 马振洲,钟红,李云途.循环荷载下含裂缝缺陷的混凝土断裂特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):157-161.
- [7] 李润,简文彬.含裂隙类岩材料疲劳损伤过程声学特性研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):115-120,124.
- [8] 林大能,陈寿如.循环冲击荷载作用下岩石损伤规律的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(22):4094-4098.
- [9] 尤明庆,苏承东.大理岩试样循环加载强化作用的试验研究[J].固体力学学报,2008,29(1):66-72.
- [10] 藕明江,周宗红,王友新,等.单轴循环加、卸载条件下大理岩力学以及声发射特征研究[J].中国钨业,2017,32(6):34-39.
- [11] 李春阳,周宗红,刘松.花岗岩单轴循环加、卸载试验及声发射特性研究[J].煤矿机械,2016,37(11):67-70.
- [12] 左建平,谢和平,孟冰冰,等.煤岩组合体分级加、卸载特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(5):1287-1296.
- [13] 徐速超,冯夏庭,陈炳瑞.矽卡岩单轴循环加、卸载试验及声发射特性研究[J].岩土力学,2009,30(10):2929-2934.
- [14] 李涛,马永君,刘波,等.循环荷载作用下冻结灰砂岩强度特征与弹性模量演化规律[J].煤炭学报,2018,43(9):2438-2443.
- [15] 周家文,杨兴国,符文熹,等.脆性岩石单轴循环加、卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1172-1183.
- [16] 汪泓,杨天鸿,刘洪磊,等.循环荷载下干燥与饱和砂岩力学特性及能量演化[J].岩土力学,2017,38(6):1600-1608.
- [17] 郭保华,李小军,苏承东.岩石裂隙法向循环加载本构关系试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):2973-2980.
- [18] 葛修润.岩石疲劳破坏的变形控制律、岩土力学试验的实时X射线CT扫描和边坡坝基抗滑稳定分析的新方法[J].岩土工程学报,2008,30(1):1-20.

(上接第36页)

- [5] 赵丽雅,许宏发,晋学辉,等.盾构隧道下穿铁路群的路基加固及沉降分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):85-90.
- [6] 刘少明.公路工程路基路面压实施工技术分析[J].山西建筑,2019,45(4):158-159.
- [7] 卢汉文.试析路基换填技术在公路施工中的应用[J].中国高新技术企业,2016(12):101-102.
- [8] 肖金宝.海砂换填道路软基的方案设计与施工应用[J].福建交通科技,2017(3):31-32,44.
- [9] 公路工程技术标准:JTG B01—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [10] 建筑地基基础技术规范:DB21/T 907—2015[S].沈阳:辽宁科学技术出版社,2015.
- [11] 建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [12] 戴成元,刘鹏博.地下车库结构抗浮稳定性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(3):304-309.
- [13] 李增涛,付长波,马孝云,等.半地下水池抗浮稳定性分析与研究[J].工程建设,2016,48(4):40-43.
- [14] 建筑地基基础设计规范:DBJ 15—31—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] 高层建筑岩土工程勘察规程:JGJ 72—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [16] 梁妍妍.地下结构的抗浮研究与优化分析[D].广州:广州大学,2016.