

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.10.017

循环荷载作用下预制缺陷 对花岗岩动力特性的影响研究

丁小彬^{1,2}, 赵君行¹, 董耀俊¹

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640; 2. 华南岩土工程研究院, 广东 广州 510640)

摘要:花岗岩因长期受到各种荷载作用产生的裂隙缺陷会改变岩石的稳定性,危及工程和安全。文章利用三轴动荷载循环试验,分析围压、动荷载频率、动应力幅值及循环周次对预制缺陷花岗岩动力特性的影响。试验结果表明:花岗岩的动弹性模量随缺陷程度的增大递减,而动阻尼比随缺陷程度的增大而递增;频率增大,不同缺陷花岗岩动弹性模量增大,其增长幅度和动阻尼比也逐渐增大;动应力幅增大,不同缺陷花岗岩动弹性模量增大,动阻尼比减小;缺陷花岗岩动弹性模量、动阻尼比均随循环周次先降低后趋于稳定;围压的增大,不同缺陷花岗岩动弹性模量增大,增长幅度也逐渐增大,动阻尼比降低。该试验在多因素变量下进行,所得结论较为全面,既为研究缺陷花岗岩动力特性提供了较好参考,也为花岗岩动力特性的反演分析工作奠定基础。

关键词:三轴荷载;预制缺陷;围压;频率;动应力幅;循环周次;动力特性

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)10-1411-11

Influence of prefabrication defects on dynamic properties of granite under cyclic loading

DING Xiaobin^{1,2}, ZHAO Junxing¹, DONG Yaojun¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The fracture defects in granite produced by long-term exposure to various loads can change the stability of the rock, endangering the project and personnel safety. In this paper, the effects of confining pressure, dynamic load frequency, dynamic stress amplitude and cycle times on the dynamic properties of prefabricated defective granite are studied by using triaxial dynamic load cycle test. It is found that with the increase of the degree of defect, the dynamic elastic modulus of rocks decreases, while the dynamic damping ratio increases. With increasing frequency, the dynamic elastic modulus of rocks with different defects increases at an accelerating rate, and the dynamic damping ratio also increases gradually. With the increase of the dynamic stress amplitude, the dynamic elastic modulus of rocks with different defects increases, while the dynamic damping ratio decreases. The dynamic elastic modulus and dynamic damping ratio of defective rocks initially decrease with the number of cycles and then tend to stabilize. As the confining pressure increases, the dynamic elastic modulus of rocks with different defects increases at an accelerating rate, while the dynamic damping ratio decreases. The multivariate tests were carried out, yielding well-rounded findings. It provides a reference for the study of the dynamic properties of defective granites and a preparation for the inverse analysis of the dynamic properties of granites.

Key words: triaxial load; prefabrication defects; confining pressure; frequency; dynamic stress amplitude; cycle times; dynamic properties

收稿日期:2023-05-11;修回日期:2023-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41827807);广东省现代土木工程重点实验室2021年子课题资助项目(2021B1212040003)

作者简介:丁小彬(1984—),男,河南周口人,博士,华南理工大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:dingxb@scut.edu.cn.

隧道衬砌-岩体复合体由于会受到车辆荷载、频率的影响,导致衬砌内部岩体发生应力集中、滑动等现象,从而改变隧道围岩的力学性能。因此,围岩可能会坍塌、脱落,危及到人们的安全。

围岩的力学性能会受到很多方面的影响,学者们一直在探究不同变量对围岩力学性能的影响。文献[1]通过对千枚岩进行多级循环加卸载试验,通过分析应力-应变曲线,得出岩石的弹性模量、阻尼比和阻尼系数随着循环周次的增大而呈递减趋势;文献[2]利用多功能材料试验机对多种软岩试样进行循环荷载试验,得出含水率、应力水平和应力幅值与动剪切模量、阻尼比与阻尼参数的变化规律;文献[3]对中风化砂岩进行静态单轴压缩试验与三轴循环加卸载试验,研究循环加卸载条件下低围压对岩石损伤力学特性的影响,研究发现随着围压增大,动弹性模量明显增大而泊松比逐渐降低,围压增强砂岩抵抗变形破坏能力。

围压对于岩石动力特性有较大影响,文献[4]利用 X 射线衍射仪等设备分析花岗岩成分,提出一种直接利用数值方法求解花岗岩的弹性模量和泊松比,结果表明,石英强度高、力学性质稳定,云母软弱变形大且内部存在孔隙结构,岩石的宏观弹性模量随围压的增加呈增大趋势并趋于稳定;文献[5]采用 Drucker-Prager 塑性模型,使用分离式霍普金森压杆动态冲剪实验进行模拟,在加载率等方面进行对比,分析得出在高围压下,岩样的破裂裂纹减少,在加载率相差不大的条件下,岩样的动态剪切强度随围压增大而增大,而在围压一定的条件下,岩样的动态剪切强度随加载率的增大而增大;文献[6]通过带围压的霍普金森压杆对珊瑚岩开展冲击试验,研究发现随着围压增加,珊瑚岩动态抗压强度显著提高,而无围压情况下,珊瑚岩动态抗压强度与常规岩石相同;文献[7]研究围压对砂岩岩样的动力力学性质的影响,结果表明岩石的残余轴向应变和体变随围压增加而增加;文献[8]对大理岩在不同围压下阻尼参数和动弹性参数变化规律进行研究,发现大理岩动弹性模量随循环周次增加而增大,随围压增大而减小,而阻尼比随循环周次增加而减小,随围压增大而增大。

频率与动应力幅在影响岩石动力特性中也同样重要,文献[9]利用三轴试验机,研究围压、加载频率及加载幅值对泥岩的动抗压强度等的影响,结果表明在 0.2~2.0 Hz 的加载频率下,岩石破

坏形式受围压影响较大,岩石滞回曲线面积随加载幅值增加逐渐增加;文献[10]通过循环荷载实验,研究泥岩、白砂岩和红砂岩在循环荷载作用下的动力特性,研究发现在相同围压下,随加载频率增加,泥岩的动抗压强度大致呈增长趋势,白砂岩的动抗压强度呈先减小后增大趋势,红砂岩的动抗压强度大致呈先增大后减小趋势,而随着加载幅值增加,泥岩动弹性模量呈减小趋势,白砂岩和红砂岩动弹性模量呈增大趋势;文献[11]在岩石力学试验机上进行不同频率、不同动应力系数下的循环加卸载试验,发现阻尼系数随频率增加呈现抛物线递增,在相同频率、相同幅值条件下,应力增幅阶段的动弹性模量、阻尼比、阻尼系数、最大滞回环宽度等均大于应力降幅阶段。

对于花岗岩的研究,文献[12]对高温遇水冷却后的花岗岩、大理岩及绿砂岩试件开展单轴压缩和循环加卸载试验,发现 3 类岩样的塑性变形随循环次数增加而减小,弹性模量随循环次数增加而增大,3 类热处理水冷却岩石的单轴抗压强度随温度的升高而降低;文献[13]利用分离式霍普金森压杆对微波加热后的花岗岩进行试验,得出在一定微波功率内,花岗岩动态峰值随冲击气压升高而增大。

以上研究大多数是对完整岩石的动力特性进行探究。然而,在自然界中由于岩石受到多种荷载作用甚至撞击的影响,岩石表面往往存在着缺陷,这些缺陷会改变岩石的动力特性。文献[14]采用三维颗粒流代码,通过对含有 2 个裂隙的岩质材料进行三轴压缩试验,通过在微观下的分析得到材料破坏模式与围压之间的关系以及裂纹的扩展机理;文献[15]进行不同幅值、频率下循环剪切载荷作用下的数值模拟,研究方向加载幅值越大,每个循环内产生的节理损伤越多,加载频率越大,每个循环内节理产生的损伤越少;文献[16]探究裂隙类砂岩在单轴压缩条件下冻融损伤力学特性以及断裂破坏机理,得到不同试件破坏面颗粒的微观电镜图像和试件单轴压缩破坏后的宏观裂纹扩展形态。

本次试验定义一个因子量化岩石的缺陷程度,增加频率 20 Hz 作为试验变量,增大频率变化的范围,利用三轴试验机对预制缺陷程度为:单贯通裂隙 60°(简称 D_{60} ,下同)、单贯通裂隙 30°(简称 D_{30} ,下同)以及双贯通裂隙 30°(简称 S_{30} ,下同)的花岗岩进行试验,探究其在不同围压 σ_3 、动荷载频率 f 、动应力幅 σ_a 和循环周次 N 下动力特

性的变化规律。研究结果拟为研究预制缺陷岩石动力特性,也为下一步进行岩石动力响应的反演分析提供系统、全面的理论支撑。

1 试 验

1.1 试验设备

本次试验在真三轴试验机仪器进行,试验加载仪器如图 1 所示。真三轴试验机仪器竖向最大力值为 4 000 kN,水平方向最大力值为 2 400 kN;竖向动载加载装置位于仪器下方,最大动力设计值为 400 kN;竖直和水平方向加载系统的力值分辨率为 0.002 kN,位移分辨率为 0.005 mm,水平方向的最大加载速度为 400 mm/min。使用真三轴试验机执行 1~20 Hz 加载方案。

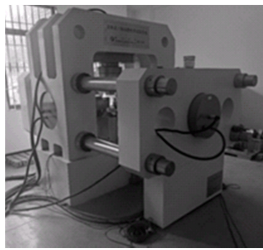


图 1 试验加载仪器

1.2 试样

试验所用花岗岩取自山东省日照市五莲县,岩石采用水磨机进行切割,切割成尺寸为 102 mm×102 mm×102 mm 的立方体岩块。为模拟自然环境中岩石缺陷程度的不同,本文的岩石缺陷程度采用人工贯通裂隙的数目进行表征,按照如图 2 所示的裂隙位置进行标定,接着沿着岩块表面进行切割,切割成单贯通裂隙、双贯通裂隙等。

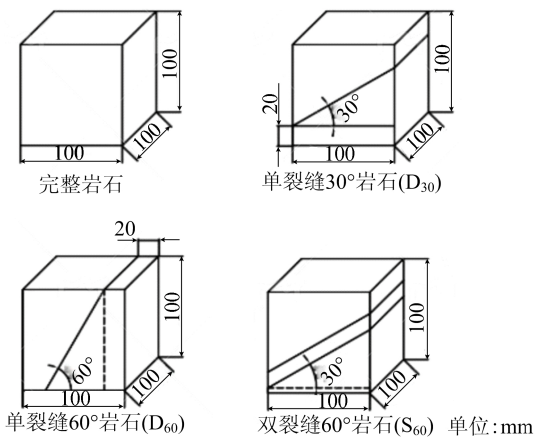


图 2 试样尺寸标定图

由于试样在切割后被分为 2 个或 3 个部分,为减少非闭合裂缝对岩石试样动力特性的影响,

使用环氧树脂对分开的部分进行粘合,得到最终试样。对粘合好的样块进行打磨,打磨至尺寸接近 100 mm×100 mm×100 mm。

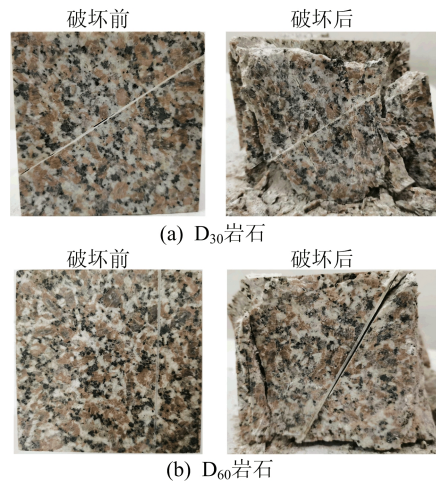
1.3 试验方法

本文主要研究岩石工作状态下,低频振动对岩石性能的影响,因此控制加载频率 $f \leq 20$ Hz,最大围压 30 MPa,最大动应力幅为岩石最大抗压强度的 35% 左右。试验每种缺陷程度的岩石各取 7 个试件,试件编号由加载条件确定,试件编号 $D_{30}1-10$ 表示动荷载频率 f 为 1 Hz,围压 σ_3 为 10 MPa 的单贯通裂隙 30° 岩石;试件编号 $S_{30}10-20$ 表示动荷载频率为 10 Hz,围压为 20 MPa 的双贯通裂隙 30° 岩石。将不同岩石按照加载方案分别放在试验加载仪器中进行试验,3 种裂缝岩试样加载具体方案见表 1 所列。

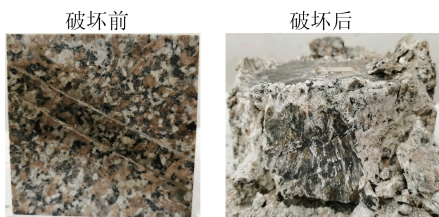
表 1 3 种裂缝岩试样加载方案

σ_3/MPa	f/Hz	σ_d/MPa	N
5	5	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
10	5	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
20	5	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
30	5	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
20	1	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
20	10	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50
20	20	5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5	50

令 $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$, 竖向静载 σ_1 加至完整岩石在围压 $\sigma_c = 5$ MPa 时的抗压强度 ($\sigma_{\max} = 205.7$ MPa) 的 35% 左右,即 $\sigma_1 = 70$ MPa; 竖向动荷载 σ_d 为循环荷载,动荷载波形为正弦波,综合试验仪器所能提供的最大压力、试件破坏所达到的应力幅值以及仪器在高频下捕捉数据的准确性,把试验加载的动应力幅分为 5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、27.5 MPa; 试验的终止条件为试样发生破坏或者动荷载加载完成。试样破坏前、后形态对比如图 3 所示。



(b) D_{60} 岩石



(c) S₃₀岩石
图 3 试样破坏前、后形态对比

1.4 试验原理

动应力-应变滞回环如图 4 所示。本文在探究过程中需要对动弹性模量 E_d 和动阻尼比 η 进行计算,公式分别为:

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{1}{4\pi} \frac{S_{ADCBA}}{S_{\triangle OEA}} = \frac{A_R}{4\pi A_S} \quad (2)$$

其中: σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为最大动应力和最小动应力; ϵ_{\max} 、 ϵ_{\min} 分别为最大动应变和最小动应变; A_R 为滞回环 ADCBA 面积; A_S 为 $\triangle OEA$ 面积。

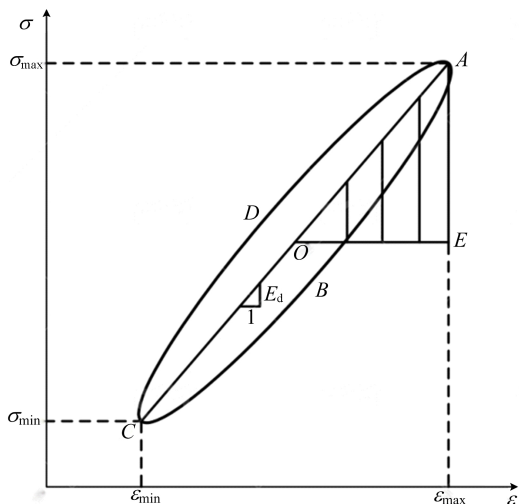


图 4 动应力-应变滞回环

围压、加载频率等因素对岩石的动力特性产生影响,本质是通过岩石内部微观结构或细微变形机制来对岩石动力特性产生影响。因此,岩石缺陷程度的轻重会使岩石动力特性存在差别。

在进行数据分析前,需要量化岩石的缺陷程度。本文以宏观缺陷为研究对象,试验中岩石的缺陷程度主要取决于人工裂隙的角度和条数。取预制贯通裂隙面在试件底部投影的面积为 A_i ,即预制裂隙面在受荷载方向的投影面积,定义其与试件底部面积 S 的比值 D 为缺陷程度因子,由于裂隙往往成组出现,岩石缺陷因子 D 的表达式为:

$$D = \frac{\sum_i A_i}{S} \quad (3)$$

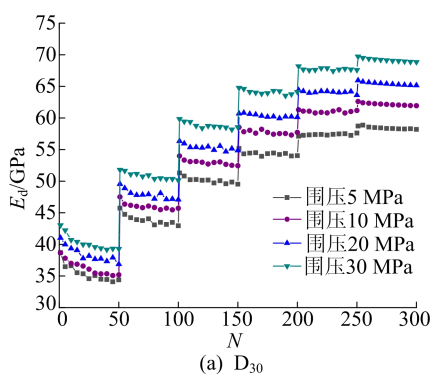
其中: A_i 为预制裂隙面在受荷载方向的投影面积; S 为试件底部面积。

本次试验中不同缺陷程度岩石的裂隙在荷载方向的投影和缺陷程度因子按缺陷程度排列依次为:单贯通裂隙 60° 、单贯通裂隙 30° 、双贯通裂隙 30° ,计算得到所对应的缺陷程度因子 D 分别为 0.58、1.00、2.00。

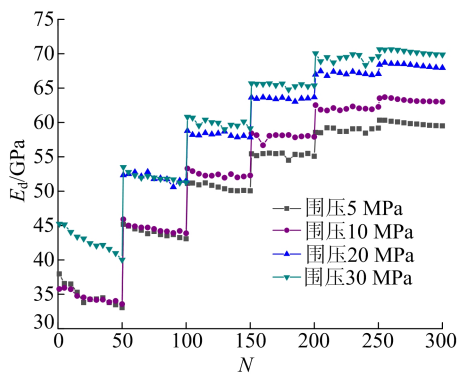
2 试验数据分析

2.1 围压对岩石动力特性的影响

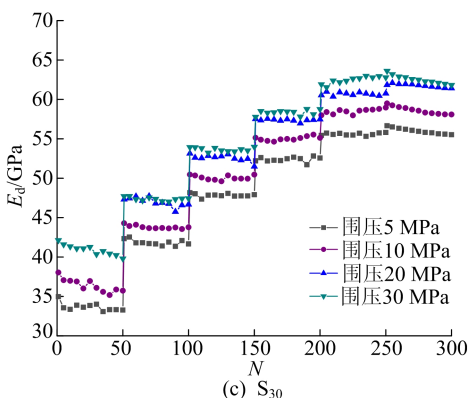
岩石动弹性模量变化规律如图 5 所示。



(a) D₃₀



(b) D₆₀



(c) S₃₀

图 5 围压对岩石动弹性模量的变化影响

从图 5 可以看出,不同缺陷程度的岩石动弹性模量均随动应力幅值的增大而增大。但是,随着岩石缺陷程度的加剧,岩石动弹性模量随动应

力幅值增大逐渐减小。由于动应力增大,使动应力对岩石内部颗粒的挤压效应得到增强,同时局部矿物颗粒间发生断裂等现象,微观裂纹逐渐发展,岩石内部产生高不可逆的变形。岩石动弹性模量变化是两者结合的结果。岩石动弹性模量增长幅度见表 2 所列。

表 2 围压增量对不同缺陷程度动弹性模量增长幅度

编号	动弹性模量增长幅度/%		
	5~10 MPa	5~20 MPa	5~30 MPa
D ₃₀	2.8~8.5	9~15	14~21
D ₆₀	1.2~7.6	14~18	18~23
S ₃₀	4.6~8.4	9~13	12~23

从表 2 可以看出,岩石动弹性模量增长幅度随着围压的增大而增大。表明围压的增大降低了微观裂纹萌生和扩展产生的能量,抑制了岩石内部裂纹的发展^[17]。

岩石动阻尼比变化规律如图 6 所示。

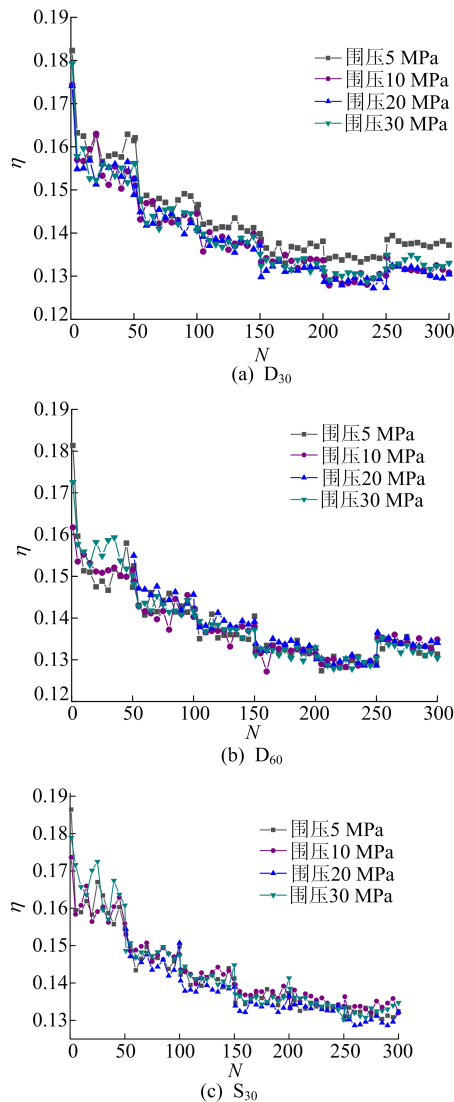


图 6 围压对岩石动阻尼比的变化影响

从图 6 可以看出,岩石动阻尼比随动应力幅增大呈下降趋势,且在相同动应力幅值条件下围压越大岩石动阻尼比越小。由于岩石试件在破坏前,动应力幅的增大使得岩石内部矿物颗粒接触更紧密,内部颗粒与颗粒、颗粒与流体间的摩擦力和黏滞阻力^[18]产生的能量消耗减小,岩石动阻尼比减小。与此同时,随着动应力幅增大,岩石内部出现新的微观裂纹,产生不可逆的变化,该过程需要消耗能量,导致岩石动阻尼比的递减趋势趋于平缓。

围压的增长使岩石内部天然裂隙被逐渐压密,微观裂纹的发展受到抑制^[14]。因此,相同动应力幅值条件下围压越大动阻尼比越小。所得结论与文献[19]在试验循环周次小于 50 次的结论相同,但学者所进行试验的循环周次高达上万次,本文所进行的循环周次最高为 50 次,而没有观察到的现象需要完善试验方案进行试验才可得出。

2.2 动荷载频率对岩石动力特性的影响

不同缺陷程度试样动弹性模量的变化规律如图 7 所示,不同频率增量下缺陷程度动弹性模量增长幅度见表 3 所列。

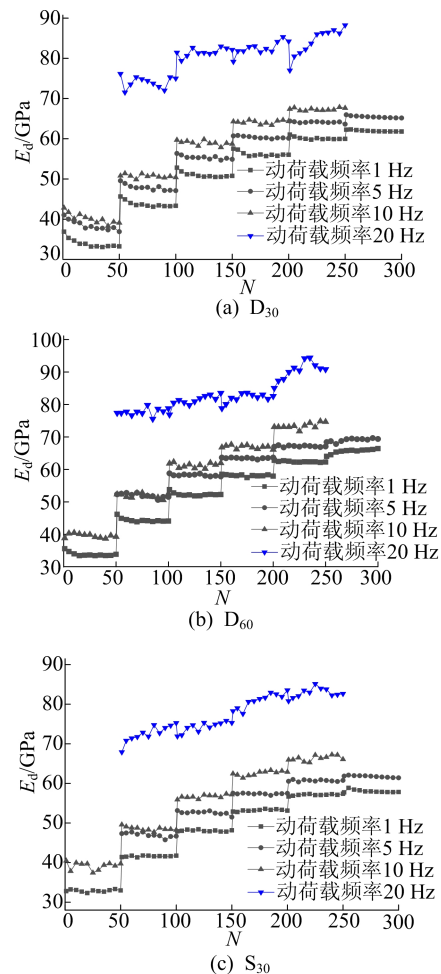


图 7 动荷载频率对岩石动弹性模量的变化影响

对于不同缺陷岩石试件,随着动荷载频率的增大,含缺陷花岗岩动弹性模量随之增大,动弹性模量增大幅度也随之增大。一方面,随着频率升高预制裂缝不易形成贯通破裂面^[20],且岩石内部产生的小颗粒塌入岩石内部裂纹之中,形成楔入愈合效应,促使裂纹的闭合^[21],从而使得试件会更加“压实”;另一方面,随着频率的增大,岩石内部矿物颗粒间流体黏性增强,矿物颗粒位移的阻力增大。

表 3 不同频率增量下缺陷程度动弹性模量增长幅度

编号	动弹性模量增长幅度/%		
	1~5 Hz	1~10 Hz	1~20 Hz
D ₃₀	5.6~13.1	12.0~19.0	39.0~69.0
D ₆₀	5.25~17.0	15.0~17.0	38.5~74.4
S ₃₀	4.29~13.0	16.0~20.0	50.0~75.0

不同缺陷程度试样动阻尼比的变化规律如图 8 所示。

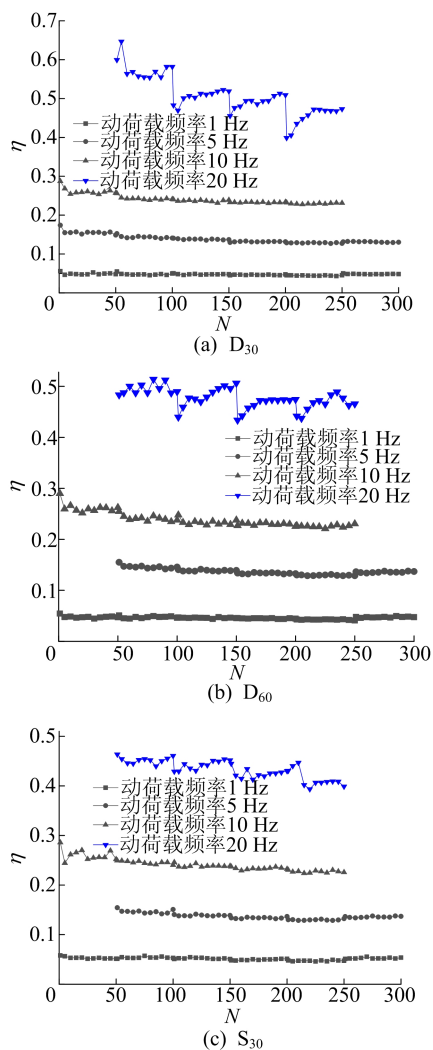


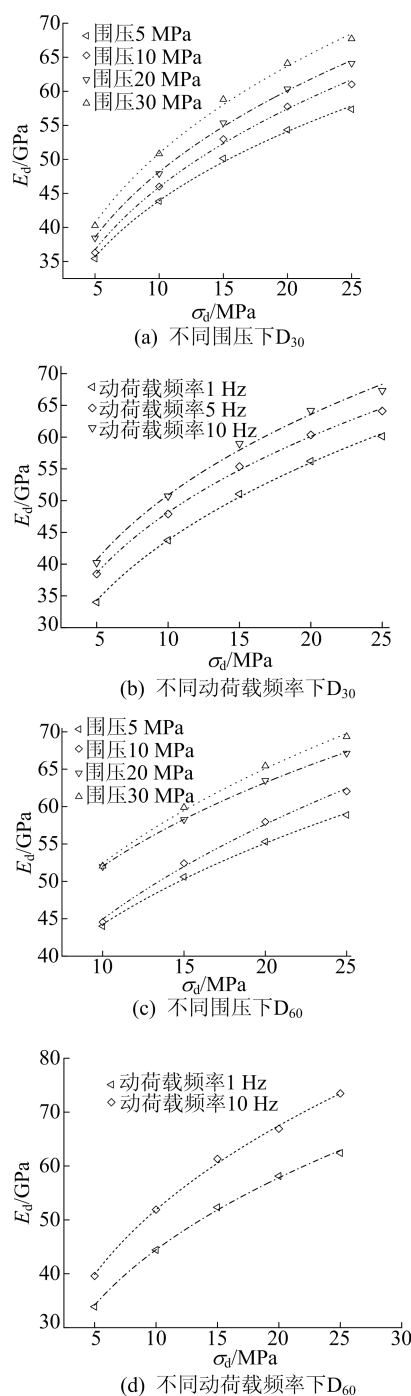
图 8 岩石动阻尼比变化规律

从图 8 可以看出:在相同动应力幅值下,岩石

动阻尼比随着频率增大而增大,这是由于增大频率可以增大岩石内部矿物颗粒与颗粒、流体间的黏滞阻力,从而消耗更多的能量;在相同频率下,随着动应力幅值增大,岩石内部矿物颗粒间逐渐密实,因而产生的不可逆的应变逐渐减小,在加载过程中能量损耗降低。所得结论与文献^[22-24]结论以及微观下观察到的现象一致。

2.3 动应力幅对岩石动力特性的影响

不同围压、频率下动应力幅与动弹性模量的变化关系如图 9 所示。



(d) 不同动荷载频率下D₆₀

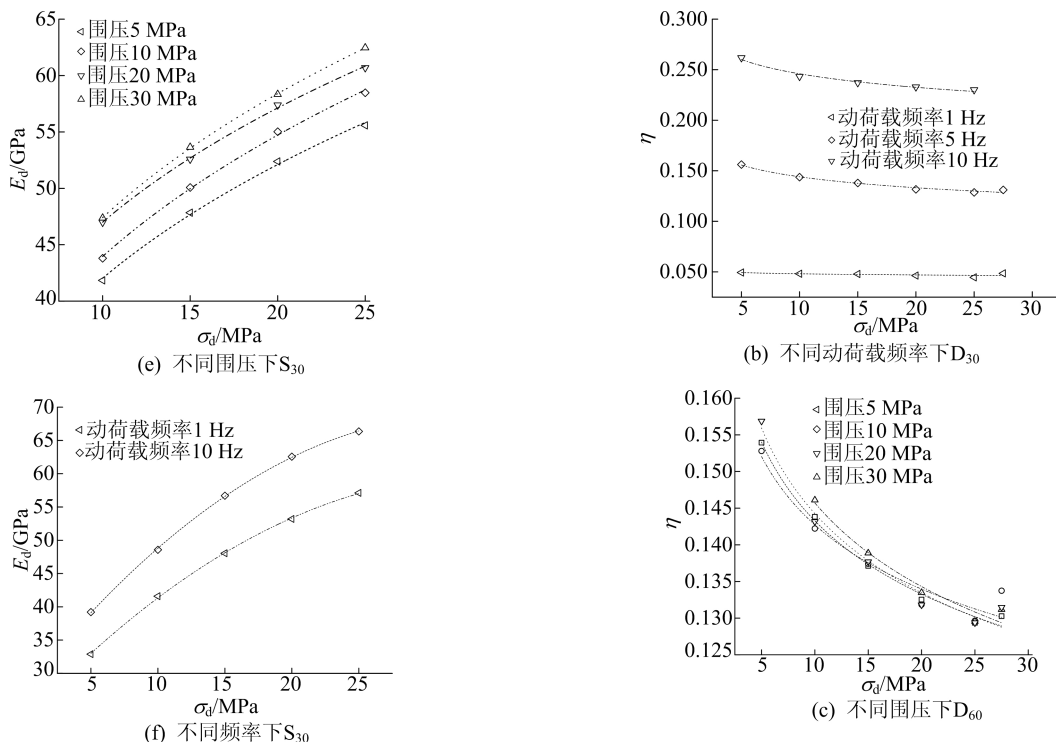


图 9 动压力幅对动弹性模量的变化影响

无论何种缺陷程度的岩石,其动弹性模量都随动应力幅增大而增大,这是由于内部天然缺陷逐渐被压密,岩石内部矿物颗粒接触更为紧密。对于不同缺陷程度岩石动弹性模量随动应力幅增大而变化幅度的有:动应力幅每增加 5 MPa,单贯通裂隙 30° 岩石的动弹性模量提升 1.03% ~ 26.7%,单贯通裂隙 60° 岩石提升 0.34% ~ 28.68%,双贯通裂隙 30° 岩石提升 0.12% ~ 24.67%。

由此可知,随着缺陷程度增大,岩石动弹性模量幅值降低得越快。这是由于随着岩石缺陷程度增大,动应力幅增长使得岩石内部塑性应变加剧,岩石产生不可逆的应变增多。

不同围压、动荷载频率下动应力幅与动阻尼比的关系如图 10 所示。

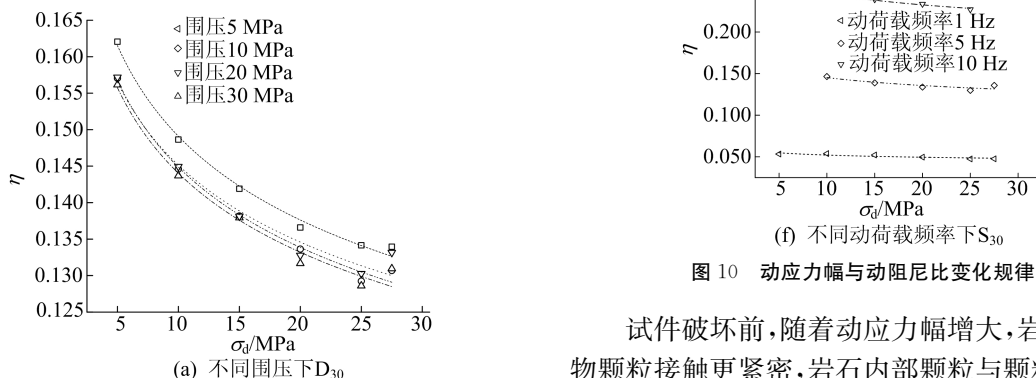


图 10 动应力幅与动阻尼比变化规律

试件破坏前,随着动应力幅增大,岩石内部矿物颗粒接触更紧密,岩石内部颗粒与颗粒、颗粒与

流体间的摩擦力和黏滞阻力产生的能量消耗减小,从而动阻尼比逐渐降低。同时,随着动应力增长,岩石内部产生新的裂隙,矿物颗粒接触断裂需要消耗能量,从而动阻尼比减小趋势慢慢平缓。

2.4 循环周次对岩石动力特性的影响

不同缺陷程度岩石循环周次与动弹性模量的关系如图 11 所示。

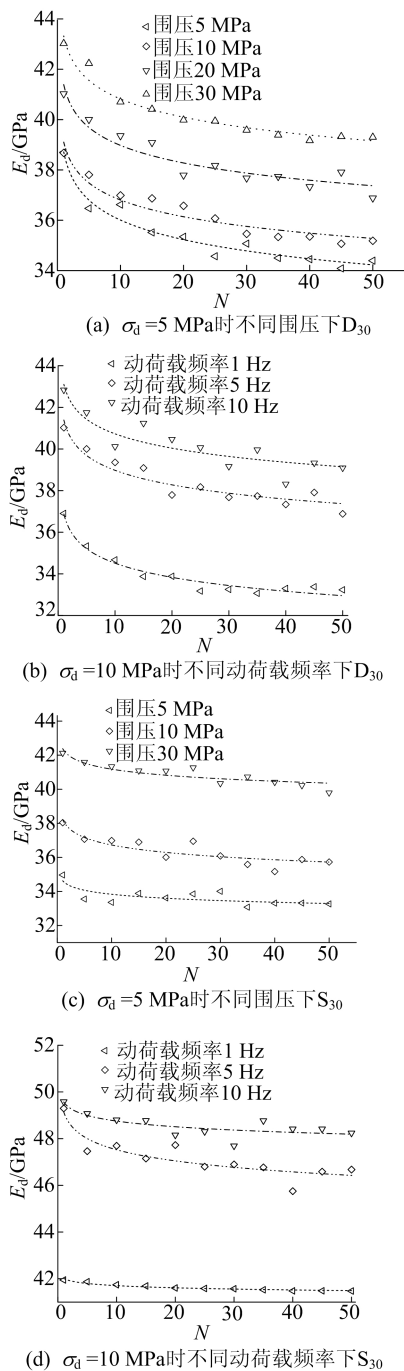


图 11 循环周次对岩石动弹性模量的变化影响

岩石动弹性模量随循环周次的增大而减小,加载后期下降趋势逐渐平稳,这是由于在加载初期,岩石内部矿物颗粒出现“结构调整”,该阶段以

大变形、高耗能为特征^[25],在这一时期结束后岩石内部颗粒趋于稳定,耗能也趋于稳定。

不同缺陷程度岩石循环周次与动阻尼比的关系如图 12 所示。

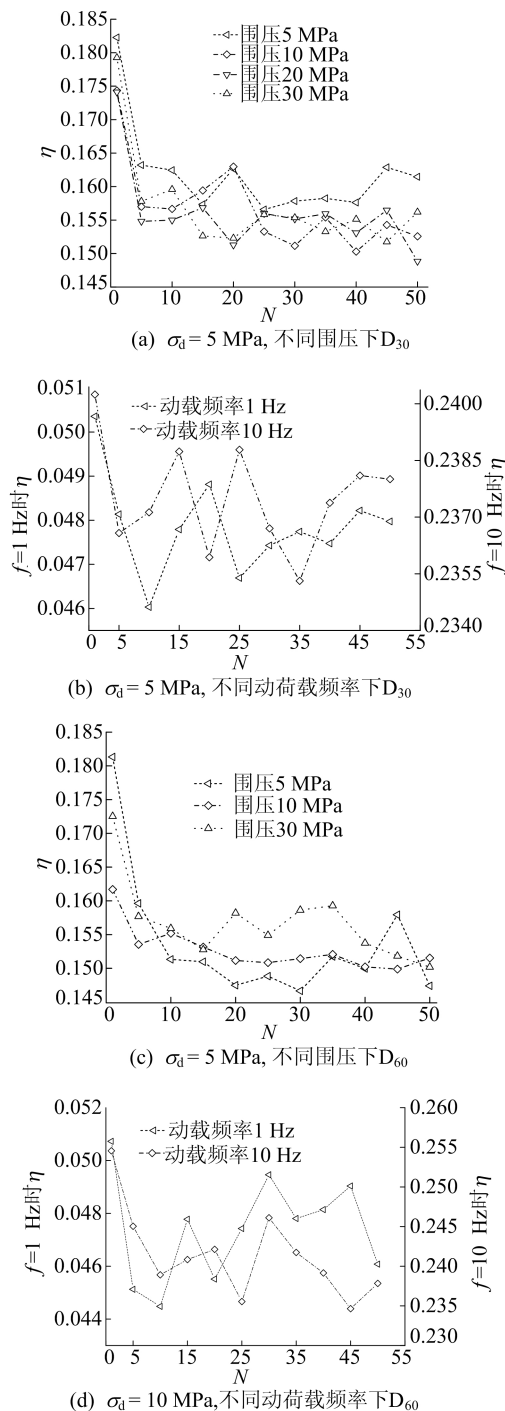


图 12 循环周次对岩石动阻尼比的变化影响

岩石动阻尼比随循环周次的增大逐渐降低,在加载开始阶段,岩石内部应力水平达到了矿物颗粒接触的弹性极限,产生新的断裂,使得能量消耗增大,而随着加载进行,岩石内部矿物颗粒进行“结构调整期”,在该时期结束后矿物颗粒排列紧

密,微观裂纹发展趋于稳定,岩石内部耗能减小。本文结论与文献[22,26]所得结论一致。

2.5 缺陷程度对岩石动力特性的影响

岩石动弹性模量随缺陷程度的变化趋势如图 13 所示。

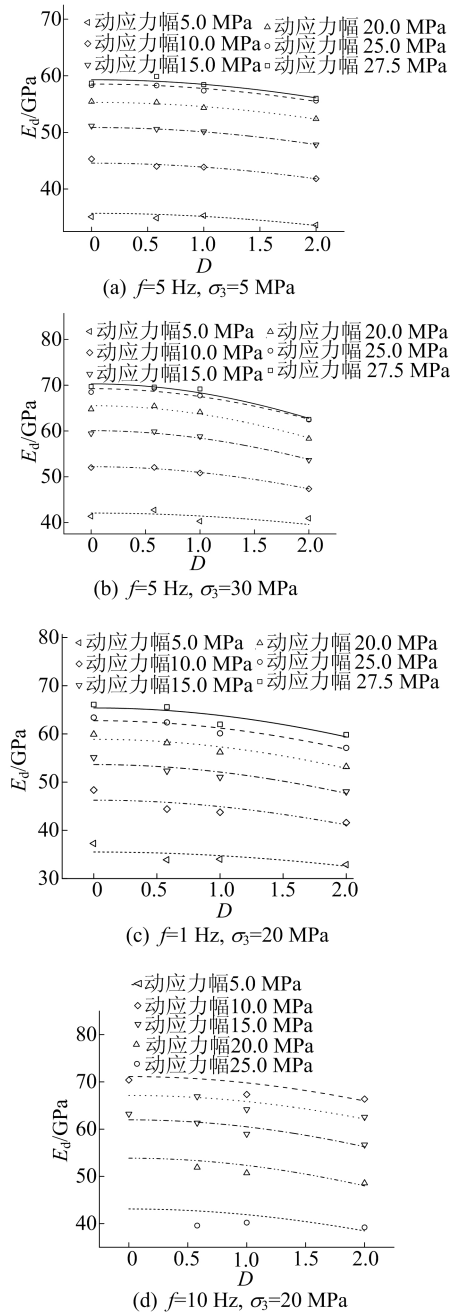


图 13 动弹性模量变化规律

由图 13 可知,在不同围压和频率下,岩石动弹性模量均随着缺陷程度的增大而下降,岩石动弹性模量的下降幅度随着缺陷程度因子的增大而增大。对单贯通裂隙为 60° 岩石而言,可从整体上看作 2 个块体,2 个块体在荷载方向均有一定的承载能力与稳定性,且加载过程中的裂隙多为

横向裂纹,故其对岩石刚度折减效果有限。对单贯通裂隙为 30° 岩石而言,加载过程中横向裂隙多与贯通裂隙进行合并,试件沿着 30° 贯通节理面发生断裂,对试件刚度的削弱较为明显。对双贯通裂隙为 30° 岩石而言,2 条贯通裂隙平行分布,沿着贯通裂隙方向形成受力薄弱带,岩石裂隙更容易沿着该薄弱带发生破坏。

岩石动阻尼比随缺陷程度变化的情况如图 14 所示。

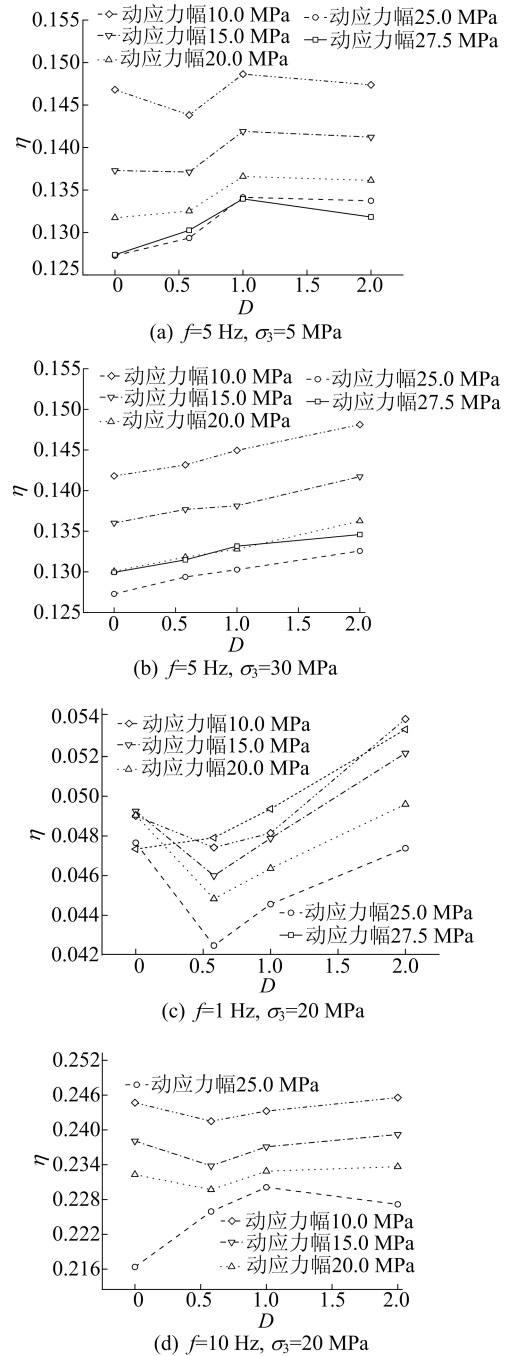


图 14 岩石缺陷程度与动阻尼比变化规律

由图 14 可知,在不同围压和动荷载频率下,

随着岩石缺陷程度增大,缺陷岩石动阻尼比总体逐渐增大。这是由于随着缺陷程度增大,岩石刚度降低,岩石内部产生微观裂纹相对容易,在动载作用下产生裂纹消耗的能量增大;粘结缺陷岩石试件采用的是环氧树脂,其具有良好的黏弹性而被广泛应用到各个领域^[27],在进行粘合后试件变成了“岩石+环氧树脂”复合体,即“黏弹塑性材料+黏弹性材料”组合,增大了试件的阻尼效应和能量损耗。

3 结 论

本文利用循环三轴荷载试验,分析围压、动荷载频率、动应力幅值及循环周次对预制缺陷岩石动力特性的影响,得出如下结论:

1) 试验定义了岩石缺陷程度因子 D ,对花岗岩缺陷程度进行了量化。随着缺陷程度(缺陷因子 D 从 0~2)的增加,花岗岩的动弹性模量逐渐减小,而动阻尼比逐渐增加。

2) 随着围压的增大,在 3 个增量阶段 3 种缺陷程度花岗岩弹性模量增长幅度大致相同,以围压 5 MPa 为基准,从 5 MPa 增加到 30 MPa,不同贯通裂隙类型的花岗岩动弹性模量增长幅度最大能达到 23%。随着缺陷程度增大,动应力幅的增大使花岗岩内部产生的塑性变形更剧烈,动弹性模量的增长梯度变小。在相同的缺陷程度下,花岗岩动弹性模量的增长幅度随围压的增大有所增大,花岗岩动阻尼比逐渐降低。

3) 试验设置了 10、20 Hz 的动荷载频率试验变量,与 1.5 Hz 条件相比,岩石的动弹性模量增加幅度有了大幅度增大:以频率 1 Hz 为基准,当动荷载频率增 20 Hz 时,不同贯通裂隙类型的花岗岩动弹性模量增长幅度最大能达到 75%。频率增加使得花岗岩内部颗粒与裂纹之间的楔入愈合效应抑制了宏观裂隙周边和花岗岩内部裂纹的萌生与扩展,花岗岩刚度提升明显。高频作用下矿物颗粒之间流体的黏滞阻力得到增强,动阻尼比也逐渐增大。

4) 动应力幅增大,花岗岩动弹性模量增大,动阻尼比减小,变化幅度受缺陷程度影响。随着动应力幅增加,花岗岩内部天然缺陷逐渐被压密,而人工裂隙程度增大导致花岗岩内产生塑性应变增大,花岗岩动弹性模量的提升幅度变小。

5) 循环周次的影响表现为:缺陷花岗岩在加载初期发生结构调整,经历大变形和高耗能,随着时间推移,内部矿物颗粒逐渐稳定,耗能减少,塑

性变形逐渐稳定。因此,动弹性模量在初期循环下降后趋于稳定。类似地,在加载早期,荷载使薄弱区域产生微观裂纹,增加了能量消耗。这导致矿物颗粒进入结构调整期,在该期结束后,矿物颗粒排列变得更紧密,微观裂纹的发展逐渐趋于稳定。因此,动阻尼比在加载初期下降后趋于稳定。试验所得结论和数据为下一步进行花岗岩动力特性的反演分析工作做准备,后续工作正在有序开展。

[参 考 文 献]

- [1] 刘汉香,别鹏飞,李欣,等. 三轴多级循环加卸载下千枚岩的力学特性及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 265-274, 281.
- [2] 何明明,李宁,陈蕴生,等. 分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2907-2913.
- [3] 蔡国军,孙文鹏,陈锡锐,等. 分级循环加卸载下砂岩损伤力学特性研究[J]. 中国测试, 2023, 49(1): 161-168.
- [4] 李明耀,彭磊,左建平,等. 基于 DIP-FFT 数值方法的花岗岩多尺度力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(11): 2254-2267.
- [5] 朱看远,赵格立,徐颖,等. 不同围压条件下砂岩动态剪切特性数值模拟分析[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 25-33, 43.
- [6] 桑登峰,廖强林,宇轩,等. 围压对珊瑚岩动态力学行为影响[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(6): 588-595.
- [7] 刘恩龙,黄润秋,何思明. 循环加载时围压对岩石动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3009-3013.
- [8] 聂明,徐进,任浩楠,等. 大理岩阻尼参数与动弹性参数的动三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 3989-3994.
- [9] 龙慧,刘书文,庄轲,等. 循环荷载作用下泥岩动力特性[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 35-40.
- [10] 刘书文. 循环荷载作用下不同强度岩石动力特性实验研究[D]. 衡阳:南华大学, 2021.
- [11] 朱明礼,令狐朋,唐胡丹,等. 不同频率增幅降幅加卸载条件下红砂岩动力参数及耗散能研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(2): 81-86.
- [12] 贾蓬,王茵,李博,等. 高温遇水冷却岩石循环加卸载力学性能试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(2): 126-134.
- [13] 朱清耀,戴俊,负菲菲,等. 微波照射后花岗岩动力响应及破碎特征[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 60-72.
- [14] HUANG Y H, YANG S Q, ZHAO J. Three-dimensional numerical simulation on triaxial failure mechanical behavior of rock-like specimen containing two unparallel fissures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(12): 4711-4729.
- [15] 蒋宇静,张孙豪,栾恒杰,等. 循环荷载对岩石节理宏观剪切特性影响的模拟研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1):

- 199-211.
- [16] 吴冠男. 冻融循环条件下含弧状裂隙类岩石的裂纹扩展机理和力学特性研究[D]. 济南:山东大学,2021.
- [17] 周杰,刘礼标,黄龙生. 人工单节理砂岩的三轴试验研究[J]. 水文地质工程地质,2017,44(4):85-90,97.
- [18] FU H L, LI J, LI G L, et al. Hysteresis behavior modeling of hard rock based on the mechanism and relevant characteristics[J]. Sustainability, 2022, 14(16):10412.
- [19] WARANGA H P, BEHZAD F, HALEH R. Experimental investigation for vibration characteristics of jointed rocks using cyclic triaxial tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 160:107377.
- [20] 王宇,高少华,孟华君,等. 不同频率增幅疲劳荷载下双裂隙花岗岩破裂演化声发射特性与裂纹形态研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(10):1976-1989.
- [21] 朱珍德,孙林柱,王明洋. 不同频率循环荷载作用下岩石阻尼比试验与变形破坏机制细观分析[J]. 岩土力学,2010,31(增刊1):8-12.
- [22] 肖建清,冯夏庭,丁德馨,等. 常幅循环荷载作用下岩石的滞后及阻尼效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(8):1677-1683.
- [23] 席道瑛,刘小燕,张程远. 由宏观滞回曲线分析岩石的微观损伤[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):182-187.
- [24] 席道瑛,陈林,张涛. 砂岩的变形各向异性[J]. 岩石力学与工程学报,1995,14(1):49-58.
- [25] 刘建,乔丽苹,李鹏. 砂岩弹塑性力学特性的水物理化学作用效应:试验研究与本构模型[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(1):20-29.
- [26] 付小敏,熊魂,王从颜,等. 三轴循环荷载下岩石的变形及阻尼特性试验研究[J]. 中国测试,2015,41(2):1-4.
- [27] 赵静,王昉昉,孙慧斌. 环氧树脂对透水混凝土的力学性能和渗透性能的影响研究[J]. 功能材料,2022,53(9):9080-9084.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 1396 页)

- [14] ZHOU F F, PAN M K, LIU Y, et al. Effects of Na⁺ on the cold gelation between a low-methoxyl pectin extracted from *Premna microphylla* turcz and soy protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104:105762.
- [15] CHEN S, LI Q, MCCLEMENTS D J, et al. Co-delivery of curcumin and piperine in zein-carrageenan core-shell nanoparticles: Formation, structure, stability and *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99:105334.
- [16] LU Y, AN D, LV W, et al. Fucoidan extracted by different methods and bound to zein loaded curcumin nanoparticles: preparation, physicochemical stability, and *in vitro* functions[J]. Food Bioscience, 2023, 53:102576.
- [17] ZHANG J, SONG Y, HU X, et al. Nanoparticles loaded with phlorizin fabricate a fortified yogurt with antioxidant potential[J]. Food Bioscience, 2023:102849.
- [18] LI H, YUAN Y, ZHU J, et al. Zein/soluble soybean polysaccharide composite nanoparticles for encapsulation and oral delivery of lutein [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103:105715.
- [19] YUAN Y, LI H, ZHU J, et al. Fabrication and characterization of zein nanoparticles by dextran sulfate coating as vehicles for delivery of curcumin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151:1074-1083.
- [20] ALBOGAMY N T S, ABOUSHOUH S F, ALJOU D F, et al. Preparation and characterization of dextran-zein-curcumin nanoconjugate for enhancement of curcumin bioactivity[J]. Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition, 2023, 34(14):1891-1910.
- [21] ZHANG H, JIANG L, TONG M, et al. Encapsulation of curcumin using fucoidan stabilized zein nanoparticles: preparation, characterization, and *in vitro* release performance [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 329:115586.
- [22] MENG R, WU Z, XIE Q T, et al. Preparation and characterization of zein/carboxymethyl dextrin nanoparticles to encapsulate curcumin: physicochemical stability, antioxidant activity and controlled release properties [J]. Food Chemistry, 2021, 340:127893.
- [23] GUO S, ZHAO Y, LUO S, et al. Encapsulation of curcumin in soluble soybean polysaccharide-coated gliadin nanoparticles: interaction, stability, antioxidant capacity, and bioaccessibility[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(12):5121-5131.
- [24] WANG L, HAO L, HOU H, et al. Carboxymethylpachymaran-coated zein nanoparticles for oral delivery of curcumin: formation, characterization, physicochemical stability, and controlled release properties[J]. ACS Food Science & Technology, 2023, 3(1):170-181.
- [25] ZHUO Y, LIANG Y H, XU D X, et al. Improvement of physicochemical stability and digestive properties of quercetin using zein-chondroitin sulfate particles prepared by antisolvent co-precipitation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242(Part4):125109.

(责任编辑 闫杏丽)