

北山深层花岗岩流变力学特性试验研究

朱其志^{1,2}, 曹家祥^{1,2*}, 赵星光³

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 3. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

摘要: 以甘肃北山深部地层的岩芯为研究对象, 探讨北山花岗岩在不同围压条件下的短期和长期力学特性, 进而为北山核废物地质处置地下实验室的深部建设提供理论支持。开展了常规三轴压缩试验和蠕变试验研究, 主要结论如下: (1) 在三轴压缩试验中, 北山花岗岩经历了5个阶段: 初始裂纹闭合、线弹性、稳定裂纹扩展、不稳定裂纹扩展和峰后软化。随着围压增加, 典型的特征应力和峰值应变显著增加, 显示出明显的围压效应, 并且可以通过线性拟合较好地描述。(2) 多级蠕变试验显示, 在不同破坏应力水平下, 北山花岗岩经历了衰减阶段、稳态阶段和加速阶段。(3) 在宏观破坏特征方面, 低围压下, 北山花岗岩呈现出拉剪混合破坏; 在较高围压下, 出现了贯穿试样表面的宏观主裂纹, 表现为典型的剪切破坏模式。

关键词: 北山深层花岗岩; 常规三轴压缩试验; 流变力学特性试验; 长期强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Experimental Study on Rheological Mechanical Properties of Deep Granite in Beishan

ZHU Qizhi^{1,2}, CAO Jiexiang^{1,2*}, ZHAO Xingguang³

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry, Beijing 100029, China)

Abstract: Taking the core samples from the deep strata of the northern mountains of Gansu Province as the research object, this study explores the short-term and long-term mechanical properties of the North Mountain granites under different confining pressure conditions, thereby providing theoretical support for the deep construction of the underground laboratory for nuclear waste geological disposal in the North Mountain. Conventional triaxial compression tests and creep tests were carried out to investigate the mechanical characteristics of the North Mountain granites under different confining pressure conditions. The main conclusions are as follows: (1) In the triaxial compression tests, the North Mountain granites experienced five stages: initial crack closure, linear elasticity, stable crack propagation, unstable crack propagation, and post-peak softening. With the increase of confining pressure, the typical characteristic stress and peak strain increased significantly, showing a clear confining pressure effect, and could be well described by linear fitting. (2) The multi-stage creep tests revealed that under different failure stress levels, the North Mountain granites experienced the attenuation stage, the steady-state stage, and the acceleration stage, with the attenuation stage and the steady-state stage alternating; and (3) In terms of macroscopic failure characteristics, under low confining pressures, the North Mountain granites exhibited mixed failure of tension and shear; under higher confining pressures, macroscopic main cracks penetrating the surface of the specimens appeared, presenting a typical shear failure mode.

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679068, 11902111); 国家重点研发计划(2017YFC1501100)

第一作者: 朱其志(1979—), 男, 江苏泗洪人, 博士, 教授, 从事多尺度多场耦合岩石本构理论、细观损伤力学及数值方法的研究。

* 通信作者: 曹家祥(2000—), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 从事岩石力学方面的研究。

Key words: Beishan deep granite; conventional triaxial compression test; rheological properties test; long-term strength

随着核能的开发与使用逐渐深化,核能使用产生的大量高放射性核废料的处置问题日益突出。在处置方案中“深地质处置”方案因安全性高、可行性强等优点被广泛认可^[1]。甘肃北山因其特殊的地理位置成为我国高放废物地质处置地下实验室的推荐选址^[2-3]。然而,地下硐室在建和后期运维过程中会对天然状态下的岩体造成不同程度的破坏,开挖扰动区的岩石力学性能和长期稳定性缺少相应的理论指导。近些年来,国内外的一些学者对北山花岗岩进行了探究,郑益武等^[4-5]针对北山花岗岩进行了破坏机理研究,展示了裂隙的剪切破坏特征及裂纹扩展过程;王超圣等^[6]详细探讨了北山花岗岩在三轴压缩等试验过程中的声发射特征,建立了岩石破坏的识别模型;王传乐等^[7-12]分析了北山花岗岩在不同条件下单、三轴压缩的强度特征、变形以及损伤演化规律;王春萍等^[13-14]开展了不同预处理后的北山花岗岩蠕变试验研究,总结了长期力学特性试验的变形、破坏特征及长期强度的变化规律,以上研究内容为针对北山花岗岩力学特性研究提供了重要参考。

本文以北山深部地层的花岗岩为研究对象,开展针对准脆性材料的短、长期力学特性试验研究,为北山核废料地质处置地下实验室后续的深部建设提供理论支撑。本文开展北山花岗岩在不同围压等级下的常规三轴压缩试验,获得加载过程中的应力应变曲线及弹性模量、泊松比、峰值强度等基本力学参数,为长期力学特性试验提供依据。开展不同围压等级下的多级蠕变试验,分析北山花岗岩在长期荷载作用下的强度演化和时效变形规律,为后续多尺度时效损伤本构模型的构建提供必要参数,为北山高放射性地下处置库的长期稳定性分析和工程建设提供依据。

1 试验材料和试验装置

1.1 试验材料

常规三轴压缩试验所使用的岩石试样全部来

自甘肃北山预选区新场场址 ZKD-03 钻孔岩芯,是典型的深部围岩。对现场采回的圆柱岩芯进行一系列加工处理,将其加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱试样,如图 1 所示。试样的平均密度为 2.65 g/cm^3 。

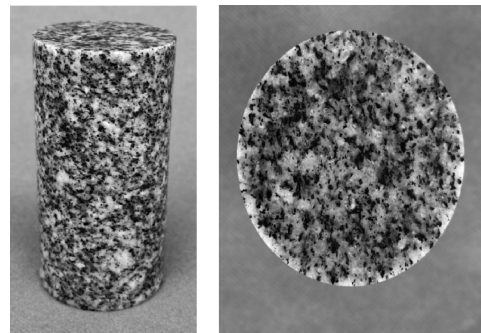


图 1 北山深部围岩外观

Fig. 1 Appearance of deep surrounding rock of Beishan Mountain

1.2 试验装置

本文中的短长期力学特性试验所用的仪器为三轴伺服流变仪。轴向位移使用 LVDT 位移传感器测量,因为其电压值与内部铁芯移动的距离成正比关系,可直接输出试样轴向位移值;侧向位移使用应变片式侧向应变仪测量,安装在试样橡皮套中部。

1.3 试验方案和试验方法

根据甘肃北山具体地应力的分布情况,仅考虑在围压为 5 MPa 和 15 MPa 的情况下进行多级蠕变试验。相关研究表明,蠕变试验中偏压等级应该高于裂纹损伤应力,而低于破坏应力;对此,在多级蠕变试验中,拟设计三级偏压等级,分别对应围压下的三轴压缩试验得到的峰值强度的 80%, 85% 和 90%。具体的试验方案和对应的试样参数汇总于表 1。

先以 3 MPa/min 的加载速率将围压加载到预设值,然后继续以应力控制的模式将轴压加载到设计的第一级应力等级,保持轴压不变,让试样正式进入蠕变阶段;蠕变稳定之后,再加载轴压到下一等级,如此往复,直至试样发生破坏。

表 1 多级蠕变试验方案及试样参数

Tab. 1 Triaxial creep test scheme and sample parameters

试样编号	高度/mm	直径/mm	质量/g	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	围压/MPa	偏应力等级/MPa
ZKD-03-18	100.05	50.04	520.19	2.65	5	225→237→253
ZKD-03-24	100.00	49.98	520.91	2.66	15	323→343→363

2 试验结果分析

2.1 北山深部围岩常规三轴试验结果分析

2.1.1 应力-应变曲线特征分析

对北山花岗岩开展不同围压下的常规三轴压缩试验,得到偏应力-应变曲线如图 2 所示。可以发现,北山花岗岩在常规三轴压缩试验条件下首先进入初始裂纹闭合阶段;其次,北山花岗岩进入了线弹性阶段,在这一阶段应力应变响应呈线性关系,岩石材料的变形处于可恢复的弹性变形阶段,且材料内部损伤的演化基本可以忽略不计,通常根据这一阶段来测定试样的弹性模量和泊松比等基本物理力学参数;当北山花岗岩所承载的偏应力继续增加到裂纹起裂应力 σ_{ci} (σ_{ci} 通常为峰值

强度的 30% 至 50%) 时^[15-16],试样进入稳定的裂纹扩展阶段,偏应力-应变曲线呈现向上凸起状,该阶段裂纹的发展以平行于所施加主应力的方向为主^[15-16];裂纹损伤应力 σ_{cd} (σ_{cd} 通常为峰值强度的 70% 至 85%)^[17] 是裂纹稳定扩展阶段和不稳定扩展阶段的临界点,也是岩石在三轴压缩试验过程中体积从压缩状态到膨胀状态的转化点。随着北山花岗岩进入裂纹的不稳定扩展阶段,裂纹和裂纹之间以及裂纹和晶界之间的滑移行为成为微观层面材料物理性质劣化的主要机制,在该机制的作用下试样裂纹不断扩展、汇聚、交叉至贯通,导致试样宏观破坏;由于试验仪器的局限性,峰后的应力下降过程以及峰后软化阶段的数据没有被准确记录,本文将不作峰后软化阶段的具体分析。

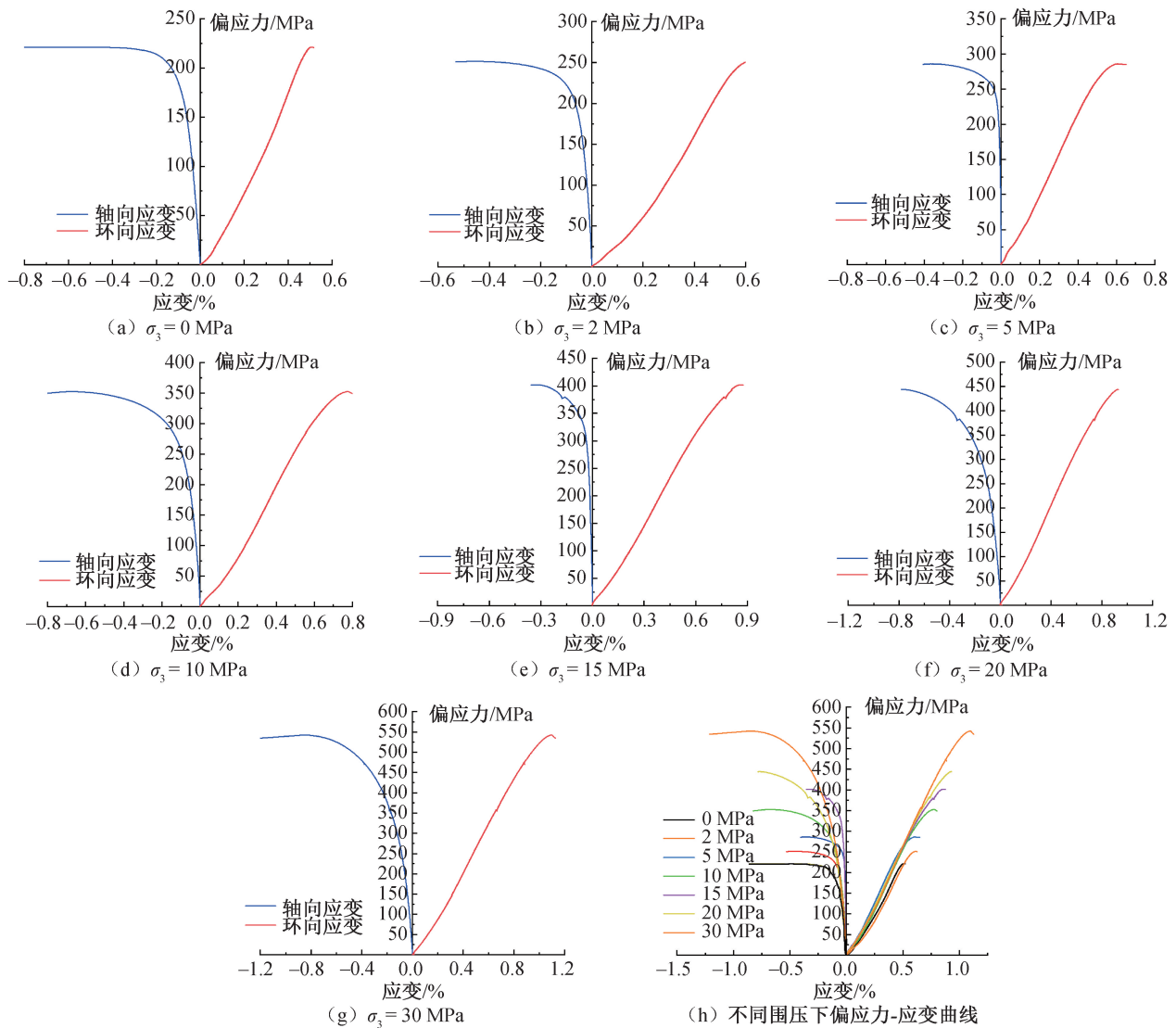


图 2 不同围压下常规三轴压缩试验的偏应力-应变曲线

Fig. 2 Deviatorial-stress-strain curves of conventional triaxial compression tests under different confining pressures

从图2可以观察到,随着围压的增加,北山花岗岩的峰值强度逐渐提升,峰值强度对围压变化非常敏感。随着围压的增加,试样的峰值强度对应的应变也有所增加。此外,随着围压的增加,北山花岗岩在峰前表现出非线性特征增强的趋势,这一趋势随着围压的增大而更加显著。在压缩应力下,花岗岩的塑性变形主要由微裂纹间的滑移和搓动引起,这些不可恢复的变形被视为岩石损伤演化的结果,而非弹性变形反过来影响了损伤演化的发展趋势。

2.1.2 北山花岗岩强度特征分析

通过上述试验结果,利用式(1)、式(2)可以得到北山花岗岩裂纹体积应变。

$$\varepsilon_{V_{\text{elastic}}} = \frac{1 - 2\nu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{V_{\text{crack}}} = \varepsilon_V - \varepsilon_{V_{\text{elastic}}} \quad (2)$$

式中, σ_1 为偏应力,MPa; σ_3 为围压,MPa; E 为弹性模量; ν 为泊松比; ε_V 为体积应变; $\varepsilon_{V_{\text{elastic}}}$ 为弹性体积应变; $\varepsilon_{V_{\text{crack}}}$ 为裂纹体积应变。

图3为体积应变-轴向应变关系曲线图,裂纹体积应变的曲线中有一个平台段,平台段的起始点对应到应力-轴向应变曲线中的应力值为裂纹闭合应力值 σ_{cc} ,而平台段的终点对应到应力-轴向应变曲线中的应力值为裂纹起裂应力值 σ_{ci} ,裂纹损伤应力 σ_{cd} 是体积应变由最大值开始减小时对应的应力值。北山花岗岩的所有特征应力值汇总于表2。

由表2数据可知,特征应力的大小与围压紧密相关,基本都随围压的增加而增加。北山花岗岩的裂纹闭合应力 σ_{cc} 与峰值应力 σ_f 的比值在20%~40%之间,起裂应力 σ_{ci} 与峰值应力 σ_f 的比值在45%~55%之间,而损伤应力 σ_{cd} 与峰值应力 σ_f 的比值在70%~90%之间。

表2 不同围压下的强度特征应力值

Tab. 2 Strength characteristic stress values under different confining pressures

围压 /MPa	裂纹闭合 应力 σ_{cc} /MPa	裂纹起裂 应力 σ_{ci} /MPa	裂纹损伤 应力 σ_{cd} /MPa	峰值应力 σ_f /MPa	σ_{cc}/σ_f	σ_{ci}/σ_f	σ_{cd}/σ_f
0	45	110	170	221	20.3%	49.8%	76.9%
2	82	132	207	253	32.4%	52.2%	81.8%
5	95	165	250	290	32.8%	56.9%	86.2%
10	120	180	265	362	33.1%	49.7%	73.2%
15	125	205	345	416	30.0%	49.3%	82.9%
20	170	240	300	464	36.7%	51.7%	64.7%
30	220	290	380	572	38.5%	50.7%	66.4%

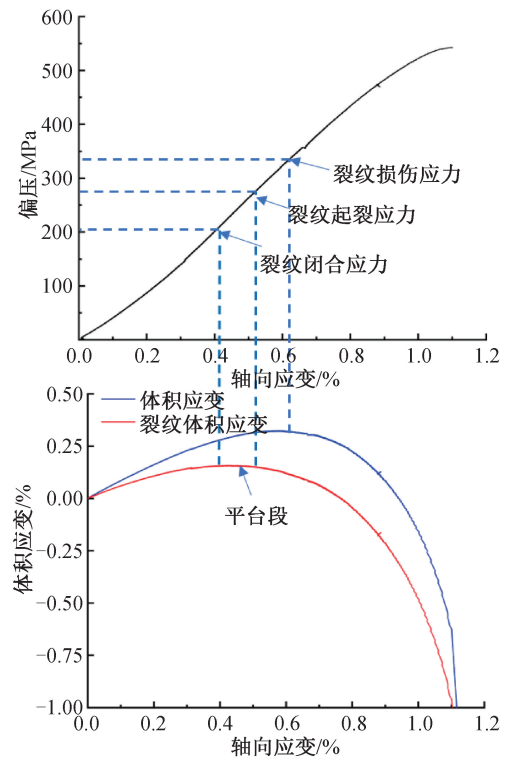


图3 体积应变-轴向应变关系曲线图

Fig. 3 Curve graph of volume strain-axial strain relationship

Mohr-Coulomb 强度准则和 Hoek-Brown 强度准则是拟合岩石三轴压缩试验中的峰值应力和围压关系的两种有效手段。在 Mohr-Coulomb 强度准则中,岩石材料在三轴压缩试验过程中的轴向应力与围压之间的关系可以表示为

$$\sigma_1 = K\sigma_3 + b \quad (3)$$

式中, σ_3 为围压,MPa; K 、 b 是与材料摩擦角 ϕ 和内聚力 c 有关的参数,可以表示为式(4)、式(5)。

$$K = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (4)$$

$$b = \frac{2c\cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (5)$$

式中, ϕ 为材料摩擦角, $(^\circ)$; c 为内聚力,MPa。

将公式(4)(5)代入到公式(3),并且与 Mohr-Coulomb 准则拟合的强度包络线公式(图 4)对比可解得: $\phi = 57.1^\circ, c = 21.9 \text{ MPa}$ 。

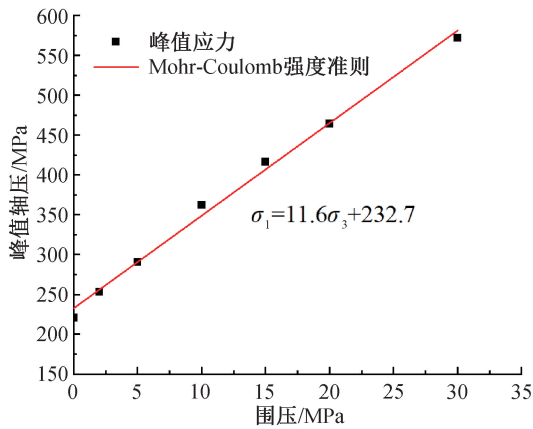


图 4 Mohr-Coulomb 准则拟合的北山花岗岩强度包络线
Fig. 4 Strength envelope line of Beishan granite fitted by Mohr-Coulomb criterion

Hoek-Brown 准则的表达式如公式(6)所示。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_0 \left(n_i \frac{\sigma_3}{\sigma_0} + 1 \right)^{0.5} \quad (6)$$

式中, σ_0 为单轴抗压强度, MPa; n_i 为与岩石矿物成分和岩石类型紧密相关的待定材料参数。

拟合结果如图 5 所示。由拟合结果可知, $\sigma_0 = 215.6 \text{ MPa}, n_i = 36.5$ 。Mohr-Coulomb 准则和 Hoek-Brown 准则拟合结果汇总于表 3。可以发现两种准

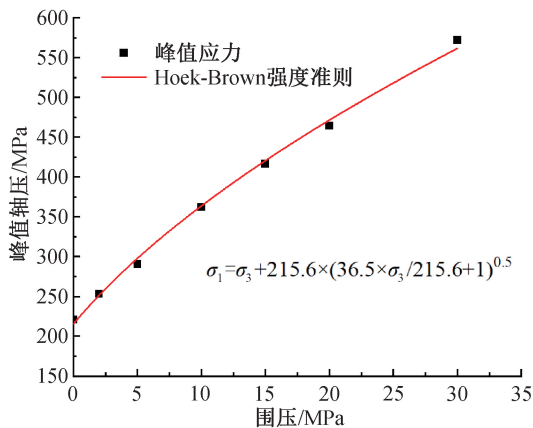


图 5 Hoek-Brown 准则拟合的北山花岗岩强度包络线
Fig. 5 Strength envelope line of Beishan granite fitted by Hoek-Brown criterion

表 3 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度准则拟合结果

Mohr-Coulomb 拟合参数			Hoek-Brown 拟合参数		
K	b	R^2	σ_0	n_i	R^2
11.5	147.8	0.993 6	215.6	36.5	0.996 5

则都可以很好地拟合北山花岗岩的强度包络线,且拟合效果几乎一致。

2.2 北山深部围岩多级蠕变力学特性试验结果

2.2.1 应变-时间关系

5 MPa 和 15 MPa 围压下多级蠕变试验的典型应变时间关系如图 6 所示。北山花岗岩的蠕变有显著的三阶段变形特征,即衰减阶段、稳态阶段以及加速阶段;每一级偏应力的加载均导致明显的瞬时变形,加载结束后试样首先进入初始衰减阶段,蠕变速率会从较高值逐渐降低至一个较低的稳定值,随后进入稳态阶段,直到下一级加载。在最后一级破坏应力等级的加载下,北山花岗岩会经历衰减阶段到稳态阶段再到加速阶段这一完整的三阶段过程,并在加速蠕变阶段引起应变的突增,导致试样发生破坏。图 7 是 5 MPa 和 15 MPa 围压下多级蠕变试验中轴向应变-偏应力-时间曲线,从图中可以直观地看出应力加载引起的瞬时变形,以及恒定荷载作用下的应变发展,在破坏应力等级下应变突增引起岩石破坏后,伴随发生的是其内部承载力的迅速下降。

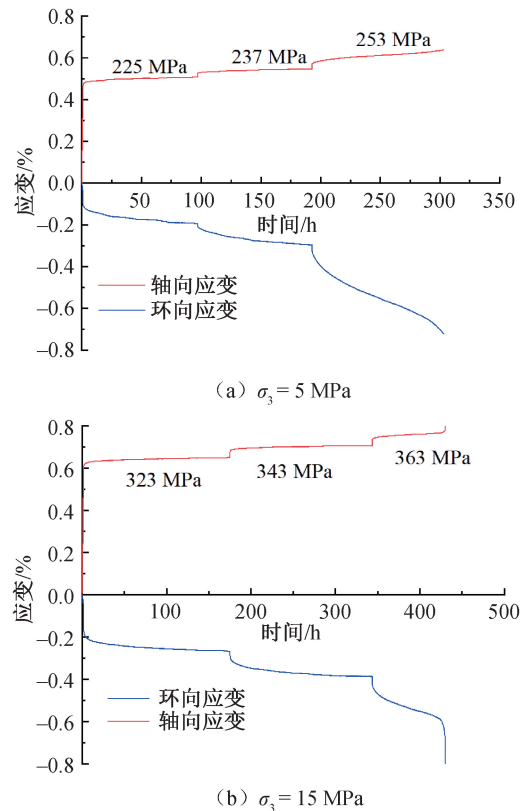


图 6 5 MPa 和 15 MPa 围压多级蠕变试验中应变-时间关系

Fig. 6 Strain-time relationship of multi-stage creep tests under confining pressures of 5 MPa and 15 MPa

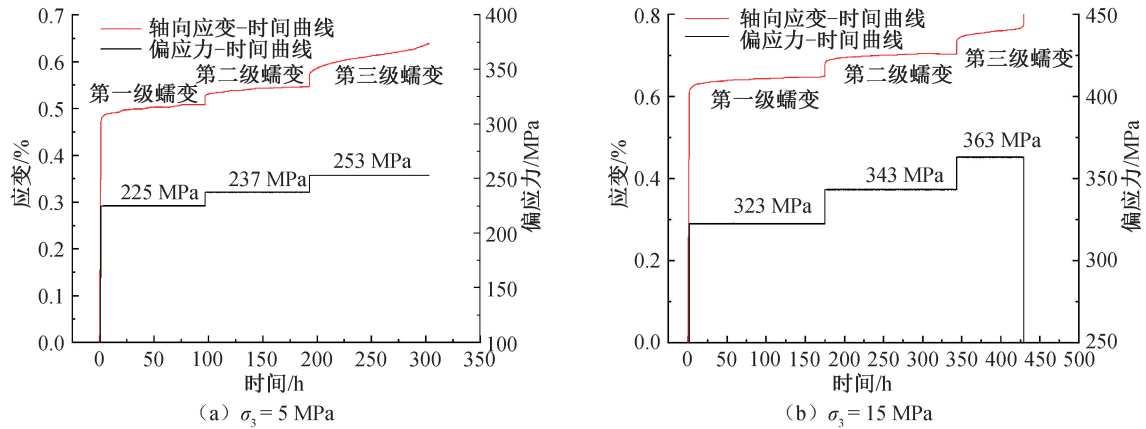


图 7 5 MPa 和 15 MPa 围压多级蠕变试验中轴向应变-偏应力-时间曲线

Fig. 7 Axial strain-strain rate-time curves of the multi-stage creep tests under confining pressures of 5 MPa and 15 MPa

如图 8 所示,由于第一级应力水平相对于岩石的屈服强度较低,在此应力等级下岩石体积处于压缩状态,原有裂隙被压缩闭合。当偏应力水平增加到第二等级,岩石内部的闭合裂纹开始扩展,并有新的裂纹形成和发育,随着蠕变继续,裂纹逐渐交叉贯通,体积应变由正转负,体积从压缩状态转变为膨胀状态。在此应力等级下,5、15 MPa 围压下北山花岗岩的体积应变分别从 0.12% 变为 -0.06% 和从 0.11% 变为 -0.07%,扩容效应显著。值得注意的是,15 MPa 围压下北山花岗岩的体积应变在 200 h 左右由压缩状态转为膨胀状态,而 5 MPa 围压下这一转变发生的时间约在 150 h 阶段,这反映了围压对岩石体积膨胀的限制作用,符合围压效应。

陈氏加载法是对分级加载下的前一级蠕变曲线进行虚线延长,下一级荷载造成的蠕变增量就是真实曲线与虚线之间的差值量,将差值量提取出来并绘制曲线,以坐标平移法将该曲线起点平

移至坐标零点。图 9 是通过陈氏加载法处理后多级蠕变应变-时间曲线。在偏应力达到北山花岗岩破坏应力等级之前,岩石蠕变主要由衰减蠕变和稳态蠕变组成,即应力瞬时加载导致岩石材料开始发生蠕变,随着时间增加,蠕变速率由较高值逐渐降低,最终维持在一个较小值而进入第二阶段,即稳态蠕变,此时应变时间曲线整体呈现上凸状。在破坏应力等级阶段,岩石会经历第三阶段,即再次的应力瞬时加载导致岩石材料进入更大初始速率的衰减蠕变阶段,随着时间的增加,蠕变速率逐渐降低至一个稳定值而进入稳态蠕变阶段,在经历前两个瞬时加载和蠕变阶段之后,岩石内部的微观结构发生改变,裂纹发育、扩展、交叉,导致岩石在经历稳态蠕变阶段之后蠕变速率开始陡升,进入加速蠕变阶段,应变表现出指数型增长过程,最终形成贯通型裂纹,岩石发生宏观破坏,整个阶段中的应变时间曲线呈现下凹状。

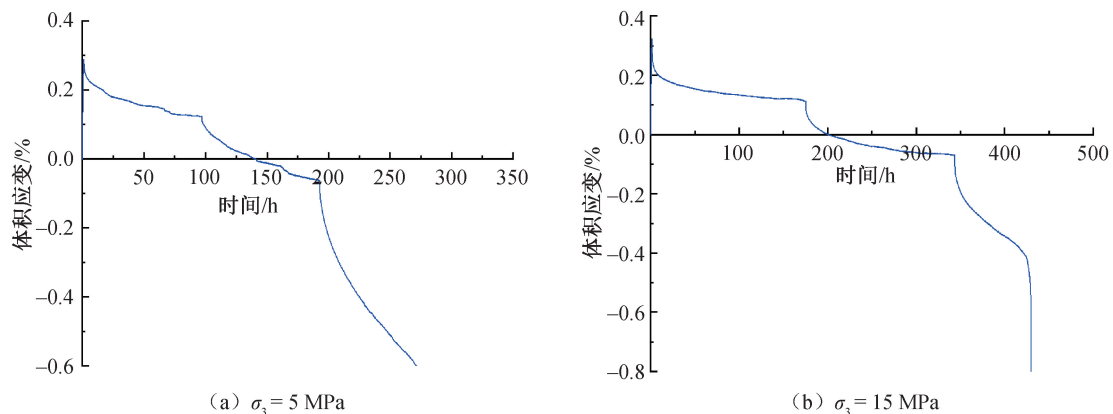


图 8 5 MPa 和 15 MPa 围压多级蠕变试验中体积应变-时间关系

Fig. 8 Volumetric strain-time relationship in the multi-stage creep tests under confining pressures of 5 MPa and 15 MPa

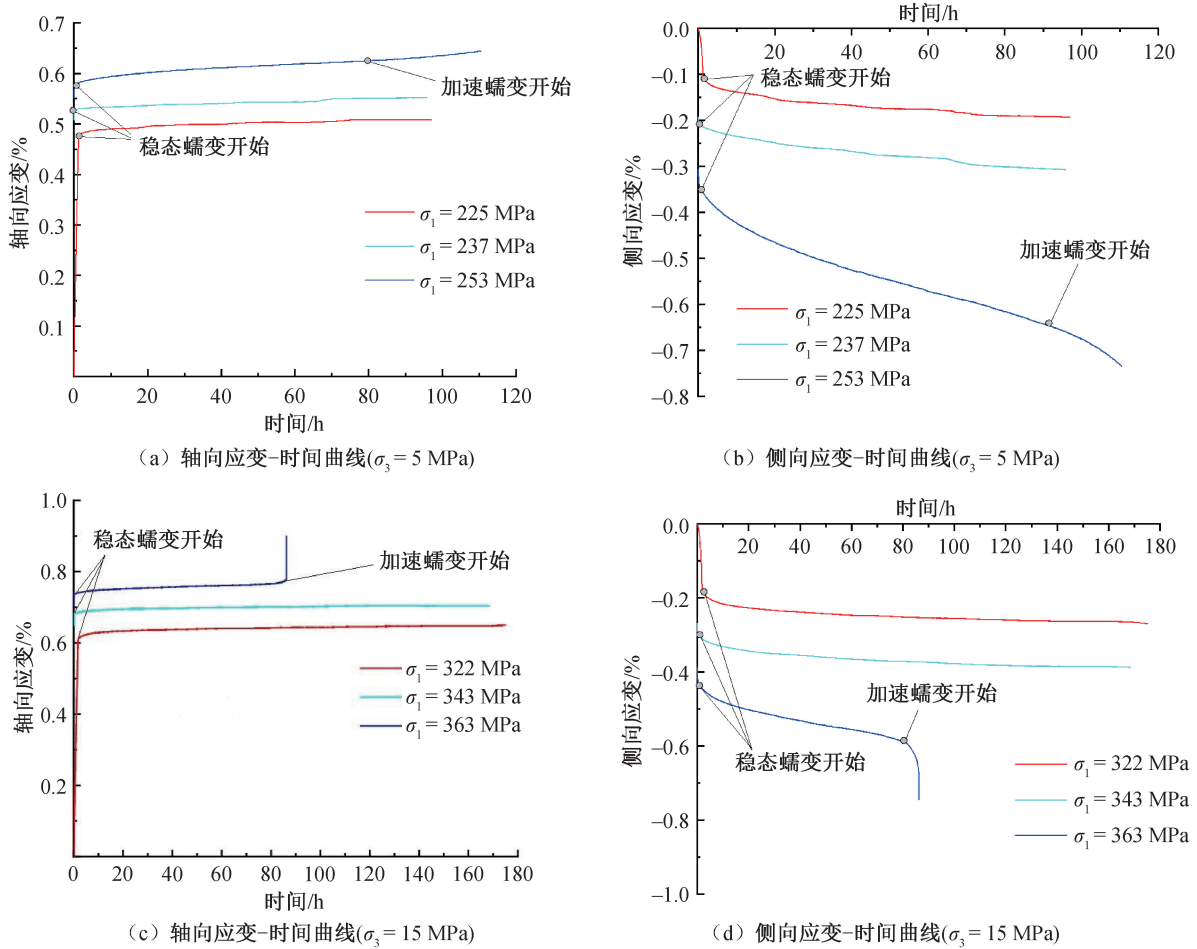


图 9 陈氏加载法处理后应变-时间曲线

Fig. 9 Strain-time curve after treatment by Chen's loading method

2.2.2 偏应力-应变关系

如图 10 所示,倾斜阶段对应图 6 应变时间曲线中的加载阶段,而平台阶段则对应正式蠕变阶段。应力应变曲线中加载阶段的斜率可以反映材料抵抗变形的能力,其值越大说明材料抵抗变形

的能力越强;在 5 MPa 围压下的多级蠕变中,三级加载阶段的轴向应力应变曲线的斜率呈现出逐渐增大的过程,由第一级的 51.3 GPa 到第二级的 64.5 GPa,再到第三级的 71.2 GPa,最终的增长幅度约为 38.8%。在 15 MPa 围压下的多级蠕变中弹

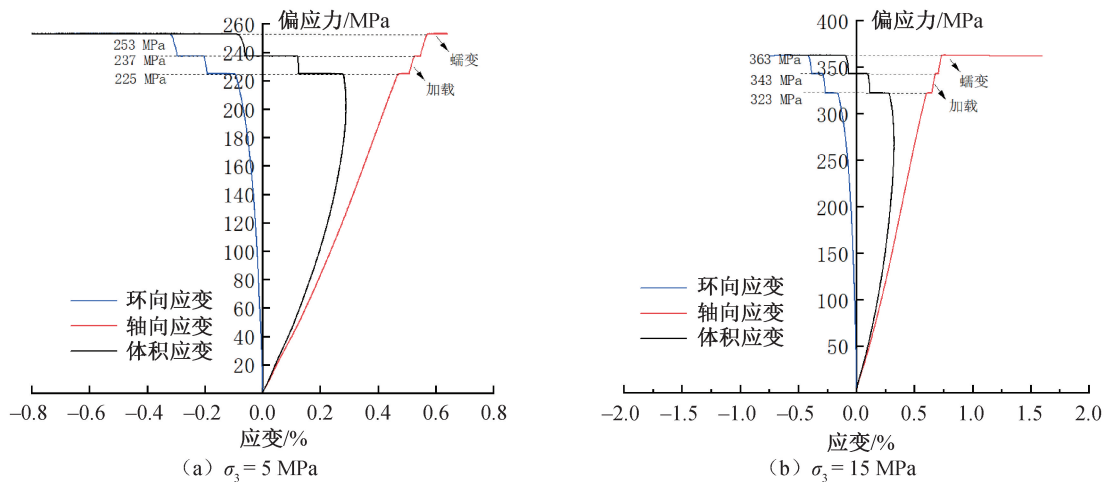


图 10 5 MPa 和 15 MPa 围压多级蠕变试验中偏应力-应变关系

Fig. 10 Deviatorial-stress-strain relationship in the multi-stage creep tests under confining pressures of 5 MPa and 15 MPa

性模量呈现出相同的规律,由第一级的 54.9 GPa 到第二级的 57.3 GPa,再到第三级的 62.4 GPa,增长幅度约为 13.7%。与轴向应力应变曲线斜率变化规律不同的是,环向应力应变曲线的斜率则表现出明显减小的趋势,5 MPa 围压下环向应力应变斜率由第一级的 145.9 GPa 减小到最后级的 68.0 GPa,15 MPa 围压下的环向应力应变曲线斜率由第一级的 248.4 GPa 减少至最后级的 64.4 GPa,主要原因是在加载阶段,岩石内部的裂纹和微观结构会经历重新分布和调整,随着应力的增加,初始裂纹会闭合或被压缩,微观结构发生改变,在低应力阶段,微裂纹对应力的响应较强;而在应力增加后,裂纹的闭合和微观结构的改善使得岩石的刚度增加,从而使弹性模量增幅逐渐增大且环向应力应变增幅逐渐减小。以上斜率的变化过程反映了北山花岗岩在整个多级蠕变试验中轴向抵抗变形的能力是逐级增大的,而环向则表现出扩容的现象。

2.2.3 北山花岗岩长期强度分析

岩石长期强度作为描述岩石类材料特性的重要物理量,是指岩石在长期应力场或者变形场的作用下,能够保持岩体稳定的最大应力。确定岩石的长期强度可以为保障实际工程的安全性能提供重要参考。

图 11 是应力-应变等时曲线图,该曲线的非线性特征随时间的推进逐渐明显,将该曲线中由线性阶段转向非线性阶段的拐点所对应的应力视为岩石的长期强度。根据多级蠕变试验中每一级的蠕变时间,将 5 MPa 和 15 MPa 围压下的多级蠕变试验对应的等时应力应变曲线时间参数分别设置为 10、30、50、70、90 h 和 8、28、48、68、86 h。轴向等时应力应变曲线如图 11 所示。轴向的等时应力应变曲线中偏应力与轴向应变关系没有明显地从线性转向非线性的拐点,原因是北山深部围岩是典型的准脆性岩石,延性较小,破坏前的应变也较小且呈线性增加,不会有显著的变化。侧向等时应力应变曲线如图 12 所示,北山深部围岩的长期

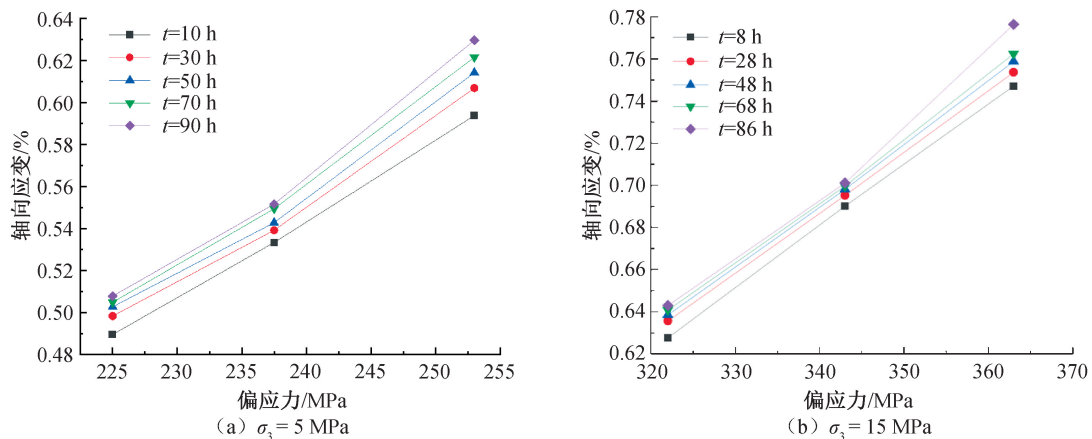


图 11 轴向等时应力应变曲线

Fig. 11 Axial isochronous stress-strain curve

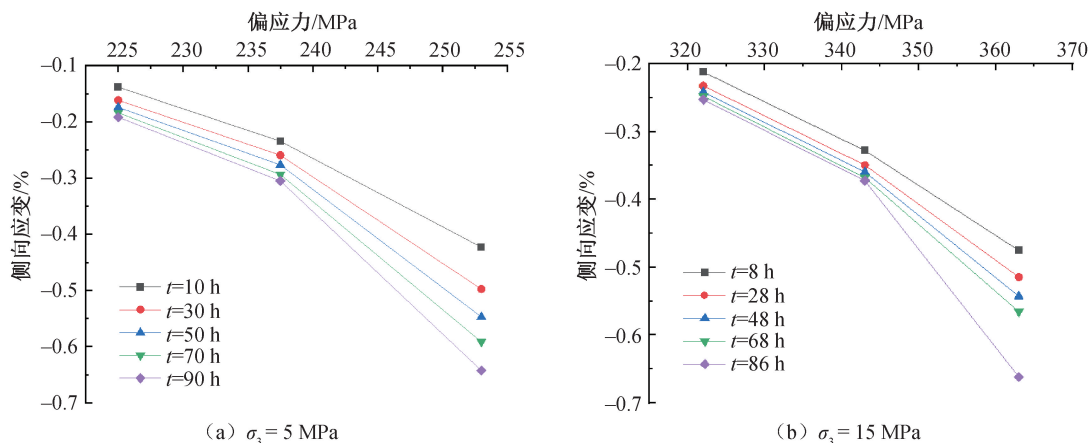


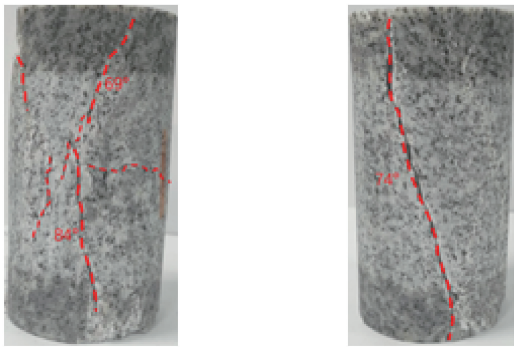
图 12 侧向等时应力应变曲线

Fig. 12 Lateral isochronous stress-strain curve

强度在 5 MPa 围压下约为 237 MPa,在 15 MPa 围压下约为 342 MPa。

2.2.4 宏观蠕变破坏特性分析

如图 13 所示,在 5 MPa 围压下,北山花岗岩表面遍布各种角度的狭窄裂纹,没有形成能贯穿试样的完整裂纹,两条相对较大的主要裂纹与水平面的夹角分别为 69° 和 84° ,宏观破坏形式表现为拉剪混合破坏。不同的是,在 15 MPa 围压下,一条与水平面成约 74° 的主裂纹贯穿试样表面,破坏形式表现为典型的剪切破坏。在北山花岗岩的蠕变试验中,随着围压的增大,岩石破坏形式由拉剪混合破坏转变到典型的剪切破坏。



(a) 拉剪混合破坏 ($\sigma_3=5$ MPa) (b) 剪切破坏 ($\sigma_3=15$ MPa)

图 13 北山花岗岩多级蠕变试验后的宏观破坏形式

Fig. 13 Macroscopic failure modes of Beishan granite after multistage creep test

3 结论

1) 北山花岗岩在三轴压缩试验中经历 5 个阶段:初始裂纹闭合、线弹性、稳定裂纹扩展、不稳定裂纹扩展和峰后软化。其特征应力和峰值应变显示出明显的围压效应,与围压关系可线性拟合。在较低围压下,岩石呈脆性,表现为拉剪混合破坏;而在较高围压下,则呈现典型的剪切破坏。

2) 在蠕变试验中,北山花岗岩依次经历衰减、稳态和加速阶段。随着偏应力等级提升,蠕变速率加快,持续时间缩短。试验中,岩石轴向抗变形能力逐级增强,侧向则明显扩容。

3) 北山花岗岩的总应变由瞬时应变和蠕变应变组成。随着偏应力等级提升,蠕变应变在总应变中的比例增加。在破坏偏应力等级下,蠕变应变成为岩石变形和破坏的主导因素。通过等时应力应变曲线法,测得北山深部围岩在 5 MPa 围压下的长期强度约为 237 MPa,15 MPa 围压下约为 342 MPa。

参考文献:

- [1] DUQUETTE D J, LATANISION R M, DI BELLA C A, et al. Corrosion issues related to disposal of high-level nuclear waste in the Yucca Mountain Repository—Peer reviewers' perspective [J]. Corrosion, 2009, 65 (4): 272-280.
- [2] 王驹,范显华,徐国庆. 中国高放废物地质处置十年进展[M]. 北京:原子能出版社,2014:1-12.
- [3] ZHANG Y, ZHANG Q Y, DUAN K, et al. Reliability analysis of deep underground research laboratory in Beishan for geological disposal of high-level radioactive waste [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118:103328.
- [4] 郑益武,刘子斌,赵星光. 北山花岗岩闭合裂隙剪切破坏机理研究[J]. 世界核地质科学, 2023, 40 (S1): 547-553.
- [5] 李莹,陈亮,刘建锋,等. 饱水与晶体粒度对北山花岗岩断裂韧度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37 (S1): 3169-3177.
- [6] 王超圣,蔡俊超,韩书娟,等. 北山花岗岩声发射特征及破坏模式识别研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (1): 87-94.
- [7] 王传乐,李二兵,韩阳,等. 三轴压缩条件下北山花岗岩的力学特性及破裂演化[J]. 林业工程学报, 2018, 3 (4): 151-158.
- [8] 史海兵,赵齐,纪磊. 北山新场深部花岗岩三轴压缩力学特性试验研究[J]. 江苏建筑, 2022 (3): 105-109+140.
- [9] 李鹏飞,赵星光,马利科,等. 北山花岗岩在单轴压缩条件下的端部效应试验研究[J]. 中国测试, 2023, 49 (5): 181-188.
- [10] YIN J Q, FENG J Z, JIA M Y. Research on rural tourism environment perception based on grounded theory a case study of Beishan Village, Zhuhai City, Guangdong Province, China [J]. Heliyon, 2024, 10 (11): e32373.
- [11] YI H Y, ZHOU H W, KOLDITZ O, et al. Insight into the elastoplastic behavior of Beishan granite influenced by temperature and hydraulic pressure [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 177:105744.
- [12] 朱其志,纵跃. 北山花岗岩短长期常规三轴力学特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40 (4): 52-59.
- [13] 王春萍,刘建锋,刘健,等. 含卸荷裂隙北山花岗岩蠕变特征试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (3): 888-896.
- [14] 罗星,杨兴国,鲁功达. 高温作用后的北山花岗岩时效变形特征研究[J]. 吉林水利, 2024 (3): 1-7.

(下转第 36 页)

- Berkeley, 1994:287.
- [11] 高玮,胡瑞林. 基质胶结对土石混合体强度变形特性影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4):1164-1172.
- [12] 金磊,曾亚武,张森. 块石含量及形状对胶结土石混合体力学性能影响的大型三轴试验[J]. 岩土力学, 2017, 38(1):141-149.
- [13] HU Y R, SUN S R, WEI J H. Effect of cementation degree on shear characteristic and failure mechanism of bimrocks containing gravels of different sizes[J]. Lithosphere, 2022(Special 10):1334579.
- [14] AFIFIPOUR M, MOAREFVAND P. Mechanical behavior of bimrocks having high rock block proportion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 65:40-48.
- [15] AVŞAR E. An experimental investigation of shear strength behavior of a welded bimrock by meso-scale direct shear tests[J]. Engineering Geology, 2021, 294:106321.
- [16] MAHDEVARI S, MAAREFVAND P. An investigation into the effects of block size distribution function on the strength of bimrocks based on large-scale laboratory tests [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(7):509.
- [17] LIN Y X, PENG L M, LEI M F, et al. Mechanical properties of bimrocks with high rock block proportion[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(12):3397-3409.
- [18] NAPOLI M L, BARBERO M, RAVERA E, et al. A stochastic approach to slope stability analysis in bimrocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 101:41-49.
- [19] 周承京,王红鑫,陈群,等. 黏土-石膏胶结材料的强度试验[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1):56-60.
- [20] 任明辉. 土石混合体剪切强度的尺寸效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
- [21] LI K, SUN S R, LE H L, et al. Study on uniaxial compressive strength of double matrix bimrocks considering different block proportions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(8):293.

(责任编辑 王利君)

(上接第 27 页)

- [15] BRACE W, PAULDING JR B, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16):3939-3953.
- [16] CAI M, KAISER P, TAsAKA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5):833-847.
- [17] BIENIAWSKI Z T. Mechanism of brittle fracture of rock: Parts I, II and III [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1967, 4(4):395-406.

(责任编辑 王利君)