

doi: 10.11720/wtyht.2024.1557

张海洋, 刘飞杨, 刘健. 多场耦合条件下含裂隙北山花岗岩蠕变特性研究[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1539–1544. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1557>

Zhang H Y, Liu F Y, Liu J. Creep characteristics of fractured Beishan granite under the condition of multi-field coupling[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1539–1544. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1557>

多场耦合条件下含裂隙北山花岗岩蠕变特性研究

张海洋^{1,2}, 刘飞杨^{1,2}, 刘健^{1,2}

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心, 北京 100029)

摘 要: 高放废物处置库运行后, 近场围岩将长期处于热—水—力耦合环境中, 其力学及渗透特性对处置库性能评价至关重要。我国高放处置库北山预选区围岩是典型的稀疏裂隙花岗岩体, 含裂隙花岗岩的蠕变特性直接关系到处置库的长期安全性能。为此, 首先通过水射流和线切割技术、裂隙表面封堵和岩样端部组合密封, 解决了热—水—力耦合三轴试验中含裂隙花岗岩样品的制备和密封难题。在此基础上, 开展了分级加载三轴蠕变试验。试验结果表明: 在多场耦合条件下, 含裂隙花岗岩三轴蠕变强度约为三轴强度的 80%, 蠕变变形随轴向荷载水平的升高而增大, 且横向蠕变比轴向蠕变更明显; 对应岩样的压密段和裂纹扩展段, 轴向应变率和渗透率均呈现先减小后增大的趋势; 渗透压差相等时, 裂隙内部较大的渗透水压会导致岩样峰值强度降低, 并产生更大的横向蠕变变形。该成果为处置库选址和围岩评价、处置库工程设计和建设提供了科学保障。

关键词: 含裂隙花岗岩; 蠕变; 热—水—力耦合; 力学特性; 渗透率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)06-1539-06

0 引言

我国高放废物处置库首选预选区(甘肃北山)的围岩属花岗岩类, 具有强度高、渗透性低等优点, 但是围岩中的各种裂隙结构面可能劣化岩体工程特性, 也构成了潜在的地下水渗流通道和核素迁移通道。在处置库的长期运行过程中, 近场围岩处于复杂的辐射热—地下水—地应力多场耦合环境, 其水力学特性和蠕变特性直接影响处置库的安全性能。针对处置库围岩, 在地下实验室开展原位试验可获得岩体真实响应^[1-2], 但成本过高。通过模拟多场耦合环境开展室内试验, 是研究裂隙岩体渗透和力学特性的有效手段。

目前, 针对岩石在水—力耦合条件下三轴蠕变特性的研究以完整砂岩居多^[3-4], 研究发现孔隙水压的增大会导致岩石更快进入到加速蠕变, 且蠕变加速度更大, 从而使岩样变形能力明显增大, 最终破

坏的偏应力也随之降低^[3,5]。部分学者通过预加载制备含有微裂隙的岩样研究了水压轴压耦合作用下的蠕变特性^[6-7], 也研究了法向恒定荷载作用下岩石裂隙的蠕变特性^[8]和渗流能力^[9], 均无法反映裂隙岩样在三轴应力加载条件下的水力力学特性。考虑温度效应的试验则多采用预热处理的方式研究温度对岩石力学特性^[10]、渗透特性^[11]及裂隙扩展破坏^[12]的影响。受热—水—力耦合测试技术的限制, 真正意义上的热—水—力耦合三轴试验多适用于完整岩样^[13-14]或者含有贯通裂缝的岩样^[15], 鲜见针对含裂缝岩样的多场耦合三轴蠕变试验研究。

本文以北山地区的典型花岗岩为研究对象, 综合应用裂缝岩样加工制备和密封技术, 解决了复杂热—水—力荷载加、卸载过程中含裂缝岩样由于初始缺陷的存在易于破坏等问题, 开展了含裂缝花岗岩在热—水—力耦合条件下的三轴蠕变试验, 研究了裂隙水压对北山花岗岩蠕变特性的影响, 为处置库运行期围岩特性评价提供了技术支撑和研究基础。

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-02-27

基金项目: 国家原子能机构高放废物地质处置创新中心基金项目(CXJJ21102204); 国防科工局核设施退役及放射性废物治理科研项目(科工二司[2020]194号)

第一作者: 张海洋(1989-), 女, 2016年毕业于清华大学土木工程专业, 研究领域为高放废物地质处置岩石力学。Email: haiyangzh118@163.com

1 含裂隙花岗岩试样的制备

1.1 含裂隙花岗岩试样加工

受成岩过程及物理化学环境影响,岩石中天然裂隙的形态、充填物和胶结状况存在较大差异,并且均对岩石的多场耦合特性有所影响,因此在室内试验的机理研究中多采用人工裂隙岩样,以降低离散性。选取我国高放废物处置库首选预选区甘肃北山BS33号钻孔附近浅地表完整花岗岩加工成直径50 mm、高度100 mm的圆柱形标准试样。首先采用高速水射流技术^[16]在岩样中部钻出直径1 mm的径向通孔,随后在岩样进水端端面中心竖直向内加工直径1 mm的轴向半通孔,直至与中部径向通孔连通。最后采用线切割技术,以径向通孔为中心向两侧加工具有倾角 α 、长度 b 和宽度 a 的预制裂缝,如图1所示。已有研究发现裂隙角度对含裂隙岩石的蠕变特性影响显著^[17-18],本研究统一制备倾角 45° 、长度27 mm、宽度0.5 mm的裂缝。轴向半通孔作为渗流通道,可使水压直接作用于预制裂缝内,以便研究裂隙水压对花岗岩蠕变特性的影响。

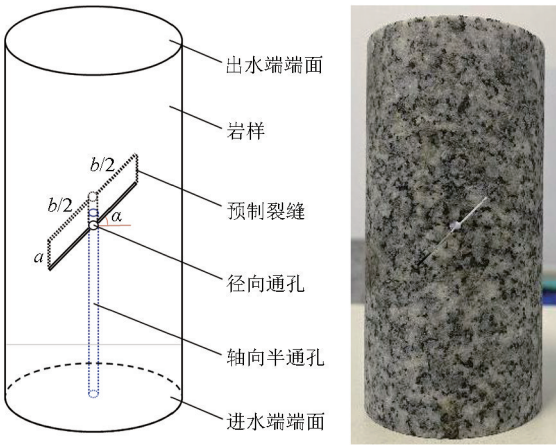


图1 含裂缝岩石试样示意

Fig.1 Schematic diagram of the rock sample with fracture

1.2 含裂隙花岗岩试样密封

在热—水—力耦合三轴蠕变试验中,岩样预制裂缝这一初始缺陷的存在容易导致岩样外部硅油围压或内部渗流水压击穿热缩管,从而破坏密封并直接导致岩样破坏。为此,综合采用图2所示的岩样预制裂缝密封和热缩管端部密封,共同实现试验全程中岩样的密封。即采用快干水泥外附防水硅胶材料封堵岩样预制裂缝表面,一方面提供适当的强度防止热缩管在预制裂缝处被围压或裂隙水压击穿;另一方面防止裂隙内的压力水通过预制裂缝渗出。

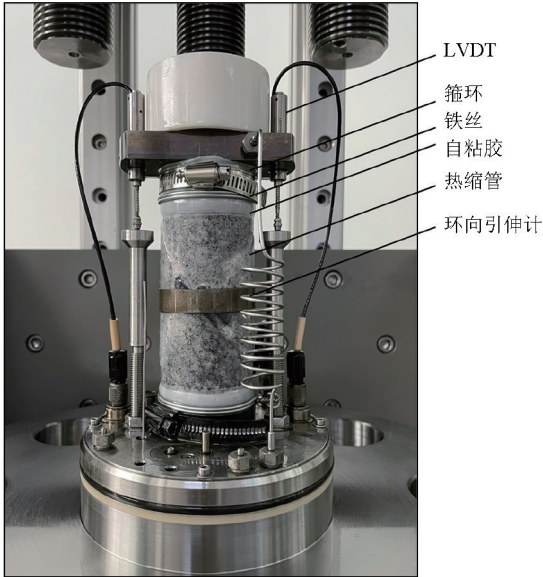


图2 含裂隙花岗岩三轴蠕变试验密封及安装

Fig.2 Sealing and installation of granite sample with single fracture for triaxial creep test

将表面密封处理后的岩样安装于试验机上的渗流压头时,通过热缩管、自粘胶、箍环和铁丝组合密封。首先采用自粘胶对岩样与渗流压头接触位置缠绕密封,强化后续箍环和铁丝的密封效果。随后套入热缩管将渗流压头和岩样包裹成整体,并与岩样紧密贴合。最后在渗流压头自粘胶位置处采用箍环和铁丝进行双重密封,其中,箍环靠近渗流压头一侧,铁丝靠近岩样一侧。通过组合密封方法保证试验中外部围压硅油不渗入,内部压力水不渗出。

2 多场耦合条件下含裂隙花岗岩的三轴蠕变试验

2.1 三轴蠕变试验方案

为更好地反映轴向加载与渗流的耦合作用,应用岩石高温三轴流变试验系统,针对上述制备的含裂隙花岗岩样开展了热—水—力耦合条件下的分级加载三轴蠕变试验。岩石高温三轴流变系统由伺服围压加载系统、伺服偏应力加载系统、伺服渗透压加载系统、温度控制系统和数据采集系统组成,具有足够的动静态强度、刚度、稳定性和高精度,能够提供最大围压60 MPa,最大渗透压60 MPa,温度范围为室温~200℃,尤其适用于岩石力学蠕变试验。

根据北山场址地应力、地下水条件和处置库运营期废物罐的释热情况,选定试验围压为15 MPa,渗透压差为2.5 MPa,温度为120℃。为了研究裂隙水压对花岗岩损伤破坏规律和蠕变特性的影响,

设定了两组试验的初始渗透水压,分别为 0.5 MPa、1.5 MPa,相应的测试渗透水压为 3 MPa、4 MPa。张国朋^[19]研究发现在三轴蠕变荷载的作用下,含贯通裂缝的岩石试样长期强度仅为常规荷载作用下峰值强度的 70%左右。本研究以围压 15 MPa 时含裂隙花岗岩样的三轴强度 159.6 MPa 为基准设定轴向加载应力水平,按照 25、50、70、84、98、105、112、118.6、125.6、132.6 MPa 的顺序分级加载,直至岩样破坏。

2.2 三轴蠕变试验流程

将饱水处理后的含裂隙花岗岩试样安装在试验系统三轴腔底座上并完成密封,安装轴向和环向变形传感器,轴向变形通过双 LVDT 测量,环向变形通过环向引伸计测量(图 2)。以 1 kN 的轴向力完成预加载后,首先施加围压至预定水平 15 MPa,再于试样两端同步施加初始渗透水压,使试样再次饱和。在围压保护下,既能有效防止裂隙水渗出破坏岩样密封,又能防止裂隙水在后续升温时汽化。随后,通过三轴室外壁的加热线圈控制围压硅油和岩样升温至 120 ℃。保持 2 h 后,将岩样进水端水压升高至

测试渗透水压,开始按照预定轴向应力水平逐级加载,每级荷载水平保持 48 h 后以 0.5 kN/s 的速率加载至下一级荷载水平,直至岩样发生破坏。试验过程中始终保持岩样两端水压不变,使其在 2.5 MPa 的固定压差下稳定渗流,并计算岩样在不同加载阶段的渗透率。

3 三轴蠕变试验结果分析

3.1 含裂隙花岗岩典型蠕变特征

将热—水—力耦合三轴蠕变试验所得轴向偏应力、轴向和环向应变随时间的变化绘制于图 3 中。本研究设定的分级加载条件下,偏应力与时间关系曲线是确定的。测试渗透水压 3 MPa 和 4 MPa 的蠕变试验中,岩样峰值偏应力分别为 132.6 MPa 和 118.6 MPa,与相同围压和渗透水压下的三轴试验相比,两者分别下降了 16.8% 和 18.0%,即在蠕变试验中恒定荷载的持续作用下,特别是荷载水平较高时,岩样内部损伤逐渐积累,导致更早发生宏观破坏。

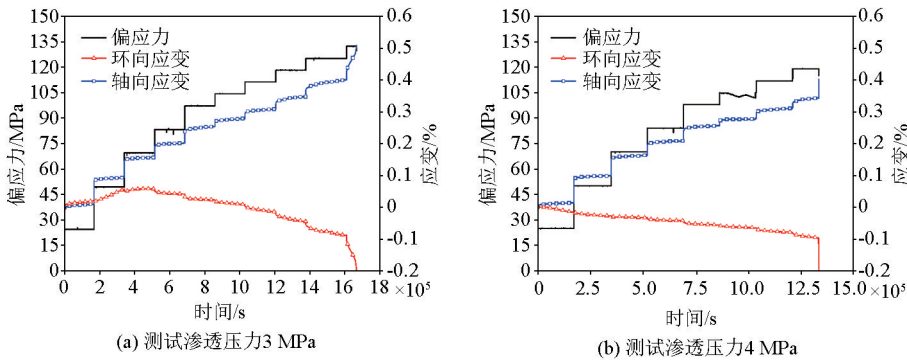


图 3 不同测试渗透水压下热—水—力耦合三轴蠕变试验应力应变与时间关系曲线
Fig.3 Relationship curves between deviatoric stress, strain and time in THM coupled triaxial creep test with different water pressures

岩样轴向变形包括加载变形和蠕变变形,其中,加载变形是轴向偏应力加载直接导致岩样产生的瞬时变形;蠕变变形又包括初始蠕变变形和稳态蠕变变形,即每级偏应力加载结束后,进入蠕变变形阶段,首先产生初始蠕变变形,随后变形速率逐渐稳定,产生稳态蠕变变形。当轴向偏应力水平较低时,蠕变现象不甚明显,即以轴向加载变形为主,蠕变变形,特别是稳态蠕变变形量值很小。随着偏应力水平升高,在轴向恒定荷载的作用下,岩样中裂纹持续扩展,且速率加快,导致蠕变变形量逐级增大,直至轴向偏应力水平临近峰值强度时,蠕变变形速率持续增大无法保持恒定,进入加速蠕变阶段直至岩样破坏。

裂隙花岗岩蠕变过程中,轴向总变形大于横向

总变形,但是轴向变形主要是加载瞬时产生的变形,因此时间增长对轴向变形影响较小;而横向变形具有明显的时效特征,表现为裂隙岩样体积随时间不断膨胀,即横向蠕变变形大于轴向蠕变变形。这与蒋海飞等^[20]对高围压、高水压作用下岩石三轴蠕变试验的研究结论一致,即岩石的横向蠕变较轴向蠕变更敏感。由此可推断,对于地下实验室开挖后的含裂隙围岩,沿侧向的蠕变变形将更为显著;在洞壁附近,由于开挖后侧向压力减小,围岩会出现更大的侧向蠕变变形。

3.2 裂隙水压对花岗岩蠕变特性的影响

对比两种测试渗透水压下的试验结果(图 4),更大的测试渗透水压(4 MPa)不仅会导致岩样峰值强度降低,还会导致其产生更大的横向蠕变变形。

除了在第 6 级荷载水平下轴向偏应力有少许下降导致轴向变形量较低外,两个试验中的其他各级轴向应变量相差无几。

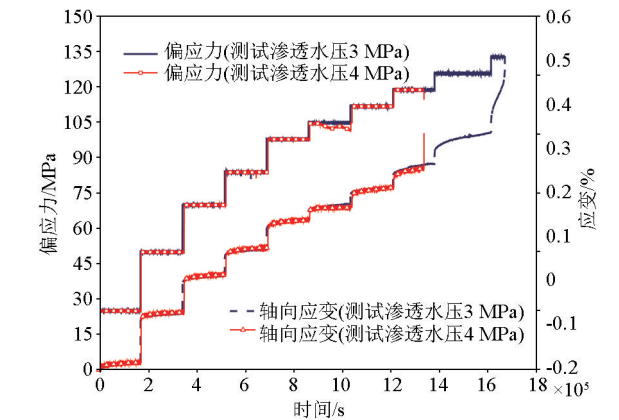


图 4 不同渗透水压下轴向偏应力及应变与时间关系曲对比
Fig.4 Comparison of axial deviatoric stress and strain versus time curves under different water pressures

为了更直观地对比渗透压差均为 2.5 MPa,但测试渗透水压不同的两个试验结果的差异,将每级荷载加载时长(48 h)内的轴向应变率变化绘于图 5 中。整体而言,轴向应变率经历了先减小后增大的变化趋势。试验初期岩样处于压密段,虽然轴向偏应力水平较低,但在蠕变阶段岩样内部微裂隙和孔隙被持续压密,表现为较大的轴向应变率。试验中期岩样已经达到较为密实的状态,因此蠕变变形很小,表现为轴向应变率下降至最低水平。当偏应力水平达到 100 MPa 左右时,进入塑性变形阶段,岩样中开始出现微裂纹的萌生和扩展,并且主要沿着原有裂隙出现和扩展,蠕变变形愈发明显,轴向应变率随之上升。临近破坏时轴向应变率陡增,最终裂隙贯通导致蠕变破坏。含裂隙花岗岩在恒定荷载作用时,损伤开始出现和发展的临界应力值约为其抗压强度的70%~80%,损伤加速发展的临界应力值

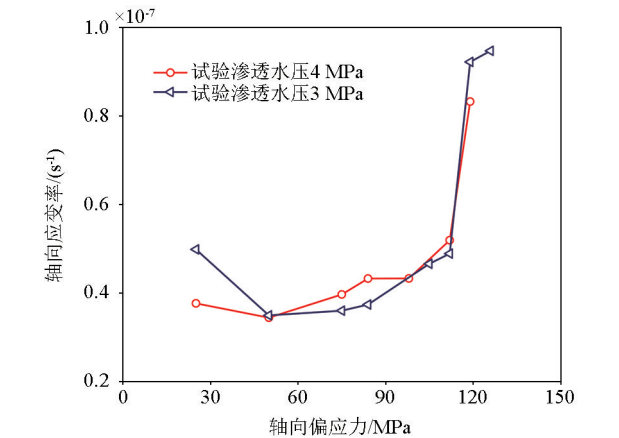


图 5 不同渗透水压下各级加载水平的轴向应变率
Fig.5 Axial strain rates at different loading levels under different water pressures

约为抗压强度的 90%。损伤随时间的演化规律与蠕变变形特征和蠕变速率变化规律一致,即初始蠕变阶段损伤发展呈递减特征,稳态蠕变阶段损伤发展速率稳定,加速蠕变阶段损伤呈加速发展。

虽然两个试验中含裂隙岩样的轴向应变率具有相同的变化趋势,但是测试渗透水压较大(4 MPa)的试验起始轴向应变率更小而中期轴向应变率更大。推断由于测试渗透水压通过岩样底部的轴向半通孔直接作用于岩样裂隙内部,相当于承受更大的内部压力,因此在轴向偏应力作用下更难以被压至密实,所以起始轴向应变率较小;在试验中期以裂纹扩展为主的蠕变阶段,更大的内水压力对裂纹扩展有促进作用,因此轴向应变率更大。

3.3 三轴蠕变过程中岩样渗透率变化规律

通过蠕变试验中岩样进水端和出水端水泵的行程可得到每级加载水平下的流量 Q ,根据式(1)计算相应的渗透系数 K ,式中 i 为渗透梯度, A 为过水断面面积,在本试验中即为岩样端面面积。进一步应用 120 ℃ 下水的动力粘滞系数 $\eta(2.373 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s})$ 、密度 $\rho(0.943 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)$ 以及重力系数 $g(9.8 \text{ N/kg})$,由式(2)换算出渗透率 k 。选取每级荷载水平前 3 h 和后 3 h 的渗流数据计算各级偏应力水平加载初期和末期的岩样渗透率绘于图 6 中。

$$K = Q/iA \quad , \quad (1)$$

$$k = K\eta/\rho g \quad . \quad (2)$$

含裂隙花岗岩渗透率的量级在 $10^{-18} \sim 10^{-17} \text{ m}^2$,渗透率随着轴向偏应力的增大先减小后增大,与热—水—力耦合三轴试验中渗透率的变化趋势一致。而且在渗透率达到最小值之前,即轴向偏应力水平较低的压密段,蠕变过程中渗透率会有少量降低;随后偏应力水平升高进入塑性变形段后,蠕变过

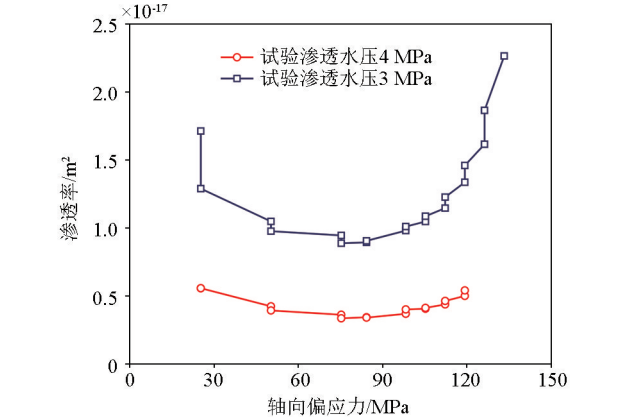


图 6 不同渗透水压下岩样渗透率变化趋势对比
Fig.6 Comparison of permeability variation trends of rock samples under different water pressures

程中渗透率有所增大,并且在接近破坏时有明显增大。渗透率的变化由两部分组成,分别由轴向加载和蠕变引起,两者引起的渗透率变化都是先减小后增大,在试验初期和末期更加明显,而在中等偏应力水平下的岩样密实段,渗透率变化很小,这与图 5 反映出的轴向变形规律是一致的。相比于完整岩样,含裂隙岩样由于初始裂隙的存在,更易于产生新裂纹或原有裂纹扩展,蠕变对其渗透特性的影响更加明显。

4 结论

本研究提出了含裂隙花岗岩样的制备方法,解决了热—水—力耦合三轴试验中含裂隙岩石试样的密封难题,根据我国高放废物处置库北山预选区的场址特征设计并开展了含裂隙花岗岩的热—水—力耦合分级加载三轴蠕变试验,研究结果表明:

1) 含裂隙花岗岩的三轴蠕变强度与相同条件下的三轴强度相比有所下降。根据蠕变变形特征和蠕变速率的变化规律,岩样的损伤发展过程可分为初始蠕变、稳态蠕变和加速蠕变 3 个阶段,损伤加速发展的临界应力值约为三轴蠕变强度的 90%。

2) 分级加载条件下,随着轴向偏应力水平的升高,裂纹扩展导致蠕变变形逐级增大,且横向蠕变变形大于轴向蠕变变形。处置库建设中,需特别关注洞室开挖后围岩的侧向蠕变。各级加载水平下,由轴向加载和蠕变引起的渗透率变化都是先减小后增大,与轴向变形规律一致。

3) 裂隙内部的渗透水压对试验初期岩样压密阶段的轴向加载变形有反向作用,对试验中期的裂纹扩展有促进作用。在岩样两端渗透压差相等的情况下,更高的测试渗透水压会导致试验初期轴向应变率较小,而中期轴向应变率更大。

本文研究成果有助于测试及预测含裂隙花岗岩在热—水—力耦合条件下的蠕变强度和变形特征,可以为处置库选址和围岩特性评价提供必要的技术手段和研究基础,同时为处置库工程设计和建设提供参考和指导。

参考文献 (References):

[1] Rutqvist J, Freifeld B, Min K B, et al. Analysis of thermally induced changes in fractured rock permeability during 8 years of heating and cooling at the Yucca Mountain Drift Scale Test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1373-1389.

[2] Souley M, Homand F, Pepa S, et al. Damage-induced permeability

changes in granite: A case example at the URL in Canada[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(2): 297-310.

[3] 欧阳蕊灿, 王卫军, 袁超. 考虑孔隙水压的岩体蠕变本构模型[J]. 矿业工程研究, 2022, 37(2): 1-8.

Ouyang R C, Wang W J, Yuan C. On constitutive model of rock mass creep considering pore water pressure[J]. Mineral Engineering Research, 2022, 37(2): 1-8.

[4] 杨红伟, 许江, 聂闻, 等. 渗流水压力分级加载岩石蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1613-1619.

Yang H W, Xu J, Nie W, et al. Experimental study on creep of rocks under step loading of seepage pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1613-1619.

[5] 蒋海飞, 刘东燕, 黄伟, 等. 高围压下高孔隙水压对岩石蠕变特性的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1248-1256.

Jiang H F, Liu D Y, Huang W, et al. Influence of high pore water pressure on creep properties of rock under high confining pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1248-1256.

[6] 刘德峰, 刘鹏涛, 张臻悦, 等. 轴压水压耦合作用下裂隙砂岩蠕变特性[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(1): 94-103.

Liu D F, Liu P T, Zhang Z Y, et al. Creep characteristics of fractured sandstone under the coupling action of axial compression and hydraulic pressure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(1): 94-103.

[7] 陈英, 谢辉, 杨俊, 等. 真实水压作用下裂隙大理岩蠕变特性试验研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 149-157.

Chen Y, Xie H, Yang J, et al. Experimental study on creep properties of fractured marble under water pressure[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 149-157.

[8] 郭保华, 田采霞. 岩石裂隙的法向蠕变及渗流的影响[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2012, 31(4): 403-408.

Guo B H, Tian C X. Normal creep deformation law of rock fracture and the influence of seepage[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2012, 31(4): 403-408.

[9] 王辰霖, 郭保华. 大理岩裂隙渗流的时间效应试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1498-1504.

Wang C L, Guo B H. Experimental study on time effect of seepage properties of marble fracture[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1498-1504.

[10] Park S, Kim J S, Kim G Y, et al. Evaluation of mechanical properties of KURT granite under simulated coupled condition of a geological repository[J]. Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2019, 21(4): 501-518.

[11] Yang S Q, Xu P, Li Y B, et al. Experimental investigation on triaxial mechanical and permeability behavior of sandstone after exposure to different high temperature treatments[J]. Geothermics, 2017, 69: 93-109.

[12] Yang S Q, Hu B, Tian W L. Effect of high temperature damage on triaxial mechanical failure behavior of sandstone specimens containing a single fissure[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 233: 107066.

[13] 江宗斌. 多场环境作用岩石蠕变特性试验及力学模型研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

Jiang Z B.Creep characteristics test and mechanical model study of rock under multi-field environmental action [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.

[14] 张培森,赵成业,侯季群,等.温度—应力—渗流耦合条件下红砂岩渗流特性试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2020, 39 (10): 1957–1974.

Zhang P S,Zhao C Y,Hou J Q,et al.Experimental study on seepage characteristics of deep sandstone under temperature-stress-seepage coupling conditions[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1957–1974.

[15] Meng L B,Li T B,Xu J,et al.Deformation and failure mechanism of phyllite under the effects of THM coupling and unloading[J].Journal of Mountain Science, 2012, 9(6): 788–797.

[16] 胡波,杨圣奇,徐鹏,等.单裂隙砂岩蠕变模型参数时间尺度效应及颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报, 2019, 41 (5): 864–873.

Hu B,Yang S Q,Xu P,et al.Time-scale effect of the creep model parameters and particle flow simulation of sandstone with a single crack[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (5): 864–873.

[17] 秦楠,张作良,冯学志,等.蠕变作用后裂隙类岩石单轴强度和裂纹扩展规律研究[J].煤炭科学技术, 2020, 48 (12): 244–249.

Qin N,Zhang Z L,Feng X Z,et al.Study on uniaxial strength and crack propagation law of cracked similar rock after creep[J].Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 244–249.

[18] 梁冰,张涛,王俊光,等.裂隙辉绿岩蠕变试验及模型研究[J].实验力学, 2019, 34(2): 351–357.

Liang B,Zhang T,Wang J G,et al.Creep experimental study and model improvement of fissured diabase[J].Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2): 351–357.

[19] 张国朋.岩石通透裂隙扩展机理及其蠕变特性研究[D].青岛: 山东科技大学, 2018.

Zhang G P. Study on cracks propagation mechanism and creep properties of fractured rock [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.

[20] 蒋海飞,刘东燕,赵宝云,等.高围压高压条件下岩石非线性蠕变本构模型[J].采矿与安全工程学报, 2014, 31 (2): 284–291.

Jiang H F,Liu D Y,Zhao B Y,et al.Nonlinear creep constitutive model of rock under high confining pressure and high water pressure[J].Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31 (2): 284–291.

Creep characteristics of fractured Beishan granite under the condition of multi-field coupling

ZHANG Hai-Yang^{1,2}, LIU Fei-Yang^{1,2}, LIU Jian^{1,2}

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. CAEA Innovation Center for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste, Beijing 100029, China)

Abstract: After a disposal repository for high-level radioactive waste operates, the near-field surrounding rocks will be long in a thermal-hydrological-mechanical coupling environment. Therefore, their mechanical and permeability characteristics are crucial to the performance evaluation of the disposal repository. The surrounding rocks of the Beishan preselected area for the disposal of high-level radioactive waste in China are typical sparsely fractured granites, whose creep characteristics are directly related to the long-term safety of the disposal repository. Using water jet and wire cutting techniques, along with fracture surface blocking and combined sealing at rock sample ends, this study addressed the challenges of the sample preparation and sealing of fractured granite in thermal-hydrological-mechanical coupling triaxial tests. Based on this, multi-loading triaxial creep tests were conducted. The test results indicate that under the condition of multi-field coupling, the triaxial creep strength of the fractured granite was approximately 80% of its triaxial strength. Creep deformation increased with the axial load level, with lateral creeps more pronounced than axial creeps. For the compacted and crack propagation sections of the rock samples, both the axial strain rate and permeability decreased initially and then increased. In the case of consistent osmotic pressure difference, a higher osmotic water pressure within fractures would lead to decreased peak strength of the rock samples and result in greater lateral creep deformation. The results provide scientific support for the site selection, surrounding rock evaluation, engineering design and construction of the repository.

Key words: fractured granite; creep; thermal-hydrological-mechanical coupling; mechanical property; permeability

(本文编辑:蒋实)