

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.01.10

温度-渗流-应力耦合作用下岩石损伤 及声发射特征研究

曾 晋

(成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000)

摘要: 深部地下围岩常常处于复杂的地质环境下, 这些复杂的地质环境造就了岩石多变的物理力学行为, 本文对取自某矿井的黏土岩开展温度-渗流-应力耦合特性及声发射试验研究, 对黏土岩在不同地质环境下的变形特征、渗透特性、损伤及声发射演化特征进行分析。研究表明: 温度和围压对试件的变形具有明显的损伤劣化和抑制作用, 温度越高, 围压越大, 试件逐渐由脆性断裂向脆延性破坏转变; 渗透率的变化对应于岩石体积变化出现降低-平衡-上升-回落四个阶段, 体变和环向应变突变点为渗透性加速增大分界点; 高围压和温度作用下, 岩石的声发射呈高能高幅值特征, 渐变特征不明显, 最活跃值越滞后, 低温和低围压下, 声发射具有明显的渐变特征, 最大值出现在峰值附近; 同等围压下, 渗透损伤值随温度的升高而增加, 围压越大, 渗透损伤值越小, 温度越高围压越大, 损伤发展越均匀。

关键词: 温度-渗流-应力场; 黏土岩; 突变点; 损伤; 声发射 (AE)

中图分类号: TU458⁺.4; TU459⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)01-0069-06

A study of the rock damage and AE characteristics under the coupling of temperature, seepage and stress

ZENG Jin

(The Engineering and Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan, Sichuan 614000, China)

Abstract: Rocks in the deep subsurface are often in a complex geological environment, and physical and mechanical behavior of the complex geological environment makes the rocks multivariate. Experimental research for the clay rocks from a mine on the thermo-hydro-mechanical coupling characteristics and acoustic emission is conducted, and the characteristics of deformation, infiltration, damage and acoustic emission of the clay rocks in different geological environments are analyzed. The results show that temperature and confining pressure have obvious damage degradation and inhibition of deformation for the specimen, and the higher the temperature, the greater the confining pressure is, and the specimen are gradually from brittle fracture to brittle ductile fracture transition. The corresponding Yu Yanshi volume changes with the change in permeability, resulting in four stages of “reduction-balance-increase-fall”. The volume change and mutation point to the ring strain correspond to the permeability accelerated boundary. Under the high confining pressure and temperature, the AE is characterized by “high amplitude”, and the gradient feature is not obvious, and the most active value is lag. Under low temperature and low confining pressure, the acoustic emission has obvious characteristics of the maximum gradient. The maximum value exists in the vicinity of the peak. Under the same confining pressure, the permeability damage value increases with the increasing temperature, and the greater the confining pressure, the less the permeability damage value is. The higher the temperature and the

收稿日期: 2017-06-06; 修订日期: 2017-07-11

基金项目: 四川省教育厅基金项目资助(2016ZB0407); 成都理工大学工程技术学院科学基金项目资助(C122017011)

作者简介: 曾晋(1983-), 男, 讲师, 工程师, 主要研究方向为岩土力学、地下工程等。E-mail: zengji@vip.qq.com

greater the confining pressure, the more uniform the damage is.

Keywords: temperature seepage stress field; clay rock; catastrophe; damage; AE

在矿山、水利、石油天然气、核废料存储等工程建设当中,经常会遇到诸如应力场、渗流场、温度场等多场耦合作用的情况,这些复杂的地质环境给工程岩体的长期强度和稳定性带来极大不利^[1-3]。因此,对处于温度-渗流-应力 (THM) 耦合作用的地下围岩进行研究成为近年来岩土工程界的热门话题。地下裂隙岩体在多场耦合作用下,不仅会影响深层地下水资源的精确评价,还会诱发失稳、涌水以及地热等多种自然灾害^[4]。不同孔隙比和含水量的岩石在三场耦合作用下的力学行为特征也是不同的,根据工程重要性,有些力学行为不能被忽视^[5-6]。对于矿山工程,于永江等^[7]、胡雄等^[8]开展了温度及应力对煤岩渗透特性影响的试验研究,促进了工程界对于煤岩三场耦合作用下力学行为的认识。

黏土岩作为高放处置库的地质屏障材料,由于核素会释放热量,因而围岩体经常处于温度-渗流-应力耦合作用下,研究在此地质环境作用下围岩的变形特性、渗流特征和损伤演化过程是关系到处置库安全的重要议题^[9]。通常而言,随着温度升高,黏土岩的强度会有所降低,渗透性显著增强,蠕变速率将明显加快^[10]。龚哲^[11]通过开展温度-渗流-应力耦合条件的固结不排水三轴压缩试验和排水三轴蠕变试验研究,建立了考虑温度、损伤、蠕变的黏土岩本构模型。

本文在前人研究基础,进一步针对黏土岩开展了水-热-力三场耦合作用下的力学行为研究,重点研究了温度及应力对黏土岩渗透特性的影响以及损伤变形关系,同时还进行了声发射 (以下简称 AE) 监测,研究了三场耦合作用下黏土岩的 AE 特征,对于三场耦合作用下黏土岩的力学行为有了更进一步的认识。

1 试验简介

将岩芯通过钻、切、磨的方法加工制成 $\Phi 50 \times H100$ 的标准圆柱形试件,保证两端平整度和垂直度。试验共设 5 MPa 和 10 MPa 两个围压以及 25 °C、50 °C、75 °C、100 °C 四种温度,渗透初始压差 1 MPa。试验过程如下:(1) 将试件用特制高温膜包裹、放到试验机上,安装渗透测试器、轴向、环向应变计,放下三轴室壁,在三轴室壁相应位置放置 8 个声发射探头,上下端各 4 个,将三轴室充满油;(2) 以每小时 30 °C 的加温速率对油进行加温,待加温至预定温度后,保持恒定温

度 30 min;(3) 对试件施加围压至指定大小,进行 1 次初始渗透率测试,渗透压差 1 MPa;(4) 对试件施加轴向应力,加载速率 30 kN/min,每隔一定时间,进行 1 次渗透测试,总共峰前 4 次,峰后 3 次;(5) 实验全过程均进行 AE 监测,AE 阈值 40 dB。

2 试验结果分析

2.1 应力-应变曲线及强度特征

试验得到的应力-应变曲线及强度特征见图 1。

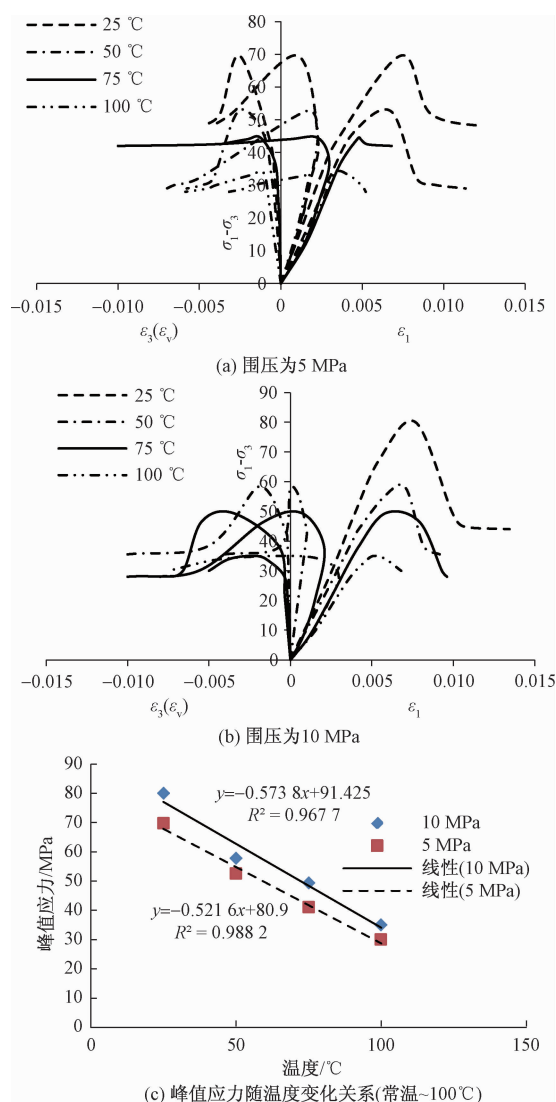


图 1 应力-应变曲线及强度特征

Fig. 1 stress-strain curves and strength characteristics

从图 1 中可以看到,黏土岩在三维应力状态下的变形特征可以分为三个阶段:弹性变形阶段、塑性变形

阶段以及峰后残余变形阶段;温度越高,塑性变形越明显,破坏形式逐渐由脆延性向弹塑性变形破坏转变,破坏时对应的变形量逐渐减小;在同等围压下,黏土岩的峰值应力随着温度的升高而呈线性降低。出现上述现象的原因在于:高温会造成黏土岩矿物成分发生分解变化,内部结构逐渐由晶态向非晶态转变,力学性质发生相应弱化,同时颗粒之间的相互胶结力也发生劣化,使得岩石出现热塑性和热软化现象,试件内部损伤发展越迅速,强度也随之降低。

2.2 渗透率-变形特征

试验过程中渗透率的变化趋势见图2。

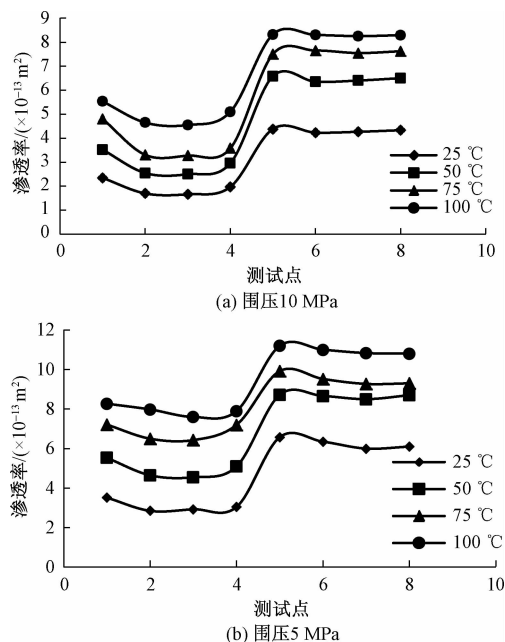


图2 渗透率变化特征

Fig. 2 Variation in permeability

从图2中可以看到,渗透率随着试验的进行经历了降低-平衡-上升-略有回落四个阶段,分别与应力-应变曲线压密、弹性、塑性以及峰后残余变形四个阶段相对应,即与试件内部孔隙度以及微裂隙的发展变化相关。压密阶段,原始微孔隙被压密,试件孔隙度降低,渗透通道减少,渗透率降低;弹性阶段,新生微裂隙产生,但在应力作用下,又不断被压密,试件内部处于应力平衡状态,渗透率基本不变;塑性变形阶段,新生裂纹不断产生且贯通,渗透率逐渐增大,并在峰值应力处变化较快;峰后残余阶段,试件内部出现应力重分布且部分渗流通道会被破散颗粒堵塞,而峰后采取的应变控制方式也会对渗透率产生一定影响,因而渗透率略有降低。对比5 MPa和10 MPa围压下的渗透率大小可以发现,相同温度下,围压越大,渗透率越小;相同围

压下,渗透率随着温度的升高而降低,这是因为在高温作用下,黏土岩内部的各种矿物成分发生物理化学作用,试件内部热损伤程度超过了热膨胀效应,同时试件内部易挥发的物质成分随温度升高而流失,导致孔隙度增加,从而使得黏土岩的渗透率增大^[12];侧向约束力的存在,又在一定程度上使得试件内部结构更加致密,因而在同等温度下,渗透率逐渐随围压升高而降低。

根据岩石的变形规律,可将其分为硬化压缩、硬化剪胀以及软化剪胀三个阶段。分别以各围压下50 °C试件为例,试验得到的轴向应变、体积应变、环向应变与渗透率的关系见图3。

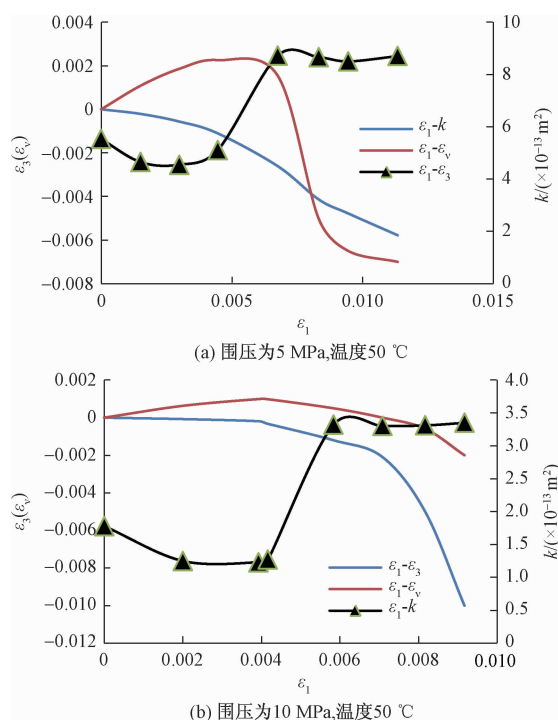


图3 应变与渗透率变化关系

Fig. 3 Variation in strain and permeability

从图3中可以看到,硬化压缩阶段,即岩石的压缩及弹性变形阶段,由于围压的侧向约束力,横向变形较轴向变形缓慢,在此期间,岩石呈现出自我调整至原位状态的趋势,新生裂纹在荷载作用下会被迅速压密闭合,因而渗透率也在一定降低后保持基本恒定;当试件进入硬化剪胀损伤阶段(塑性变形阶段)后,新生裂隙逐渐发展贯通,横向应变开始加速增大,试件力学性质发生劣化,对应的渗透率也急剧增加,即横向应变以及体应变的突变点与渗透率的突变点相对应;软化剪胀期间,体积应变快速增加,横向应变有所放缓,应力控制方式以及部分渗流通道被堵塞导致裂纹扩展速度变

缓,因而渗透率略有降低^[11]。

2.3 声发射特征分析

岩石在损伤演化过程中,会将积累的能量以弹性波的方式释放出来,形成可以被放大探测器捕捉到的声学信号,这些信号可反映黏土岩在三场应力耦合作用下损伤演化过程。为分析围压和温度对试验整过程以及渗透测试过程 AE 信号的影响,本文以 10 MPa, 100 °C 和 5 MPa, 25 °C 两种情况为例,分析得到了高围压高温作用下以及低围压低温作用下 AE 振铃计数率随测试过程的变化规律(图 4)。

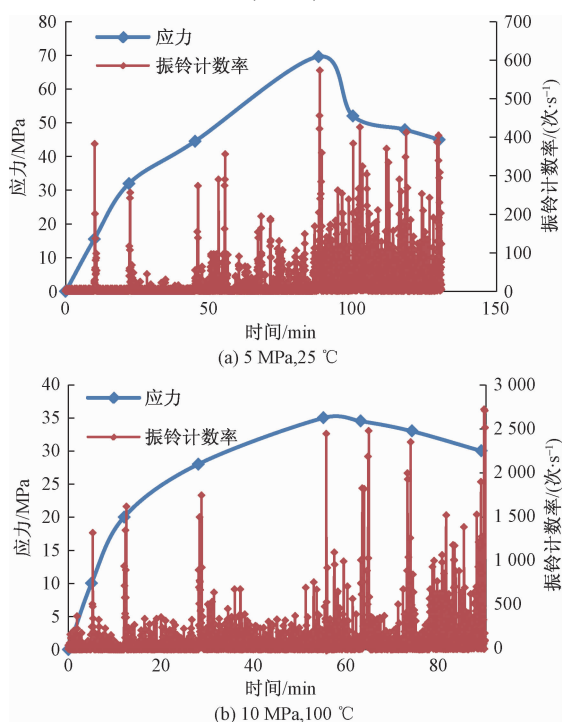


图 4 声发射振铃计数变化特征

Fig.4 Variation in acoustic emission ringing count

从图 4 中可以看到,低围压和低温作用下,在应力加载的短暂时间内,声发射较为活跃,渗透测试过程中,振铃计数率随着应力差的变化则呈明显的阶段性的渐变特征。弹性阶段,渗透测试过程的 AE 信号十分平静;塑性变形阶段,渗透测试过程中的声发射逐渐增强,并在峰值应力处达到最强值;峰后残余变形阶段,渗透测试过程的声发射略有减弱。整个渗透过程的声发射信号与渗透率大小变化趋势保持一致,此时的声发射主要受应力加载的影响较大。在高围压和高温作用下,声发射呈明显的高频高幅值特征,声发射最强值出现在残余变形阶段,且渗透测试过程中信号强度的渐变特征不再明显,这是因为:在高围压和高温作

用下,黏土岩内部主要体现为延性破坏特征,在加载应力之前,由于高温软化作用,渗流通道较低温下发展充分,且在高围压下,黏土岩破坏产生的辐射能也增大,因而出现全过程的高频高幅值声发射特征,此时渗透过程的声发射信号受应力加载影响减小,受围压和温度影响增大。

不同温度-应力场下的声发射累计数见图 5。从图 5 中可以看到,低围压低温作用下,黏土岩渗流破坏过程中的声发射近似于致密型,而在高围压高温作用下,黏土岩的累计声发射更接近于致密不稳定型,这主要是因为越高围压和温度,黏土岩的塑性变形越明显,破坏方式会从张-剪型向延-剪型过渡^[12]。

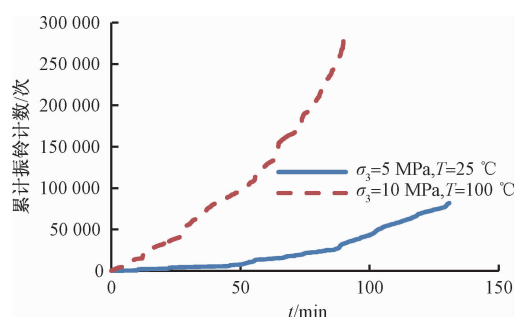


图 5 AE 累计特征

Fig.5 AE cumulative features

3 损伤特征分析

经典损伤定义为材料损伤前后横截面积的比值:

$$D = \frac{A_d}{A} \quad (1)$$

式中: A_d ——试样当前横断面上裂纹的面积;

A ——试件无损时的横截面面积。

假设使整个截面完全破坏时的声发射总参数为 N ,那么使单位面积微元破坏产生的参数为:

$$n = \frac{N}{A} \quad (2)$$

因此,当试样的破坏面积达到 A_d 时,声发射事件数应为:

$$N_d = N \frac{A_d}{A} \quad (3)$$

结合(1)和(3)式,当试样的破坏面积达到 A_d 时,材料的损伤变量 D 为:

$$D = \frac{N_d}{N} \quad (4)$$

然而,由于试验机刚度的局限性,往往不能保证试件完全断裂时,机器停止,而是在损伤变量还没有达到

$D=1$ 时,便已停止运行,因此,这里引入一个修正系数 D_u 对损伤变量进行修正^[13],即:

$$D = D_u \frac{N_d}{N} \quad (5)$$

式中, D_u 可用残余强度和峰值应力表示:

$$D_u = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_p} \quad (6)$$

假设黏土岩的声发射参数服从 Weibull 分布,而每个微元体破坏就能产生相对应的声发射信号,任意微元时间的声发射参数即为:

$$n(t) = N \frac{m}{n} \left(\frac{t}{n} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{n} \right)^m \right] \quad (7)$$

将式(7)两边对时间 t 进行积分,可以得到任一阶段的声发射参数累计值(此时试件破坏的面积为 A_d)为:

$$N_t = N_d = N \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{n} \right)^m \right) \right] \quad (8)$$

结合(4)、(5)、(8)式定义,可得损伤变量的表达式为:

$$D = D_u \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{n} \right)^m \right) \right] \quad (9)$$

式中: m, n ——与黏土岩外形和应力水平以及温度有关的参数。

根据声发射测试结果,采用非线性拟合软件,分别得到了与温度-应力相关的损伤参数 n 和 m ,再将 n, m 代入式(9),可得到三场耦合作用下黏土岩的损伤演化规律(以 5 MPa, 25 °C 和 10 MPa, 100 °C 为例,图 6)。从图 6 中可以看到,在低围压和低温作用下,黏土岩的损伤主要集中于变形后期,并存在一个损伤阈值,当损伤小于此值时,损伤缓慢增加,当损伤大于此值时,损伤快速增大,表明黏土岩内部力学性质发生实质性的变化;在高温及高围压作用下,损伤作用更趋向于线性增加,由于高温的软化作用使得黏土岩力学性质弱化,并产生较多的渗流通道,因而损伤发展时间提前,失稳破坏时所能承受的实际损伤也较低温低围压下小。

通过上述分析,得到了整个三场耦合作用下试件的损伤演化情况,同理,通过对每一次渗流测试时间段相对应声发射信号的提取,对渗透阶段产生的损伤值进行分析,得到了各应力-温度-渗流耦合场下渗透损伤值的变化关系(图 7)。从图 7 中可以看到,同等围压下,渗透损伤值随温度的升高而增加,表明了温度对黏土岩试件力学性质的弱化作用,相同温度下,围压越大,渗透损伤值越小,表明了侧向约束力对损伤发展的

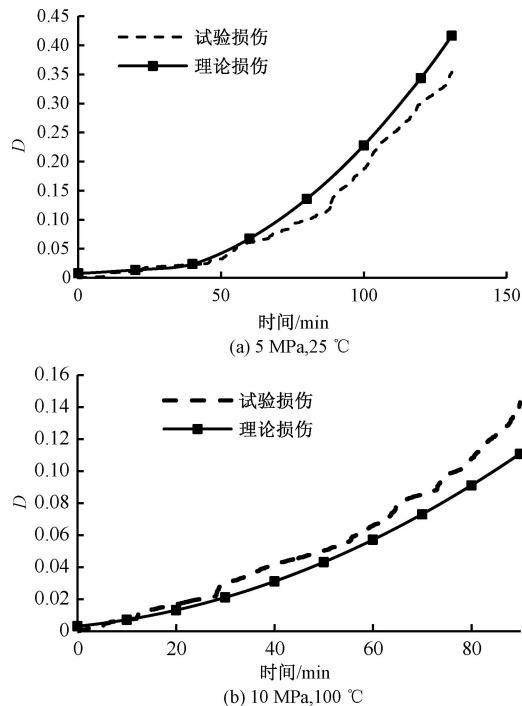


图 6 试验与理论损伤对比

Fig. 6 Comparison of the experimental and theoretical damage

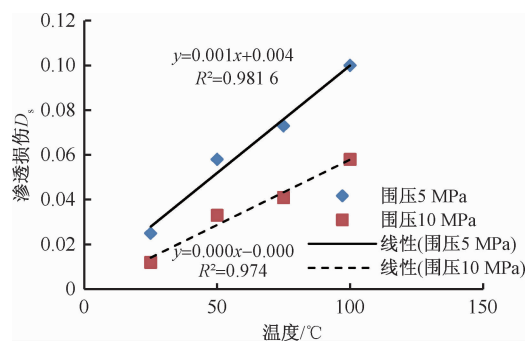


图 7 渗透损伤围压和温度的关系

Fig. 7 Relationship between the osmotic pressure and temperature

约束作用。

4 结论

(1) 温度和围压对试件的变形具有明显的损伤劣化和抑制作用,温度越高,围压越大,试件逐渐由脆性断裂向脆延性破坏转变;渗透率随试验全过程呈降低-平衡-上升-略有回落四个阶段,体变和环向应变突变点为渗透性加速增大分界点;同等围压下,温度越高,渗透率越大,相同温度下,围压越大,渗透率越小。

(2) 低围压、低温下黏土岩的声发射表现为致密型,并呈阶段性渐变特征,高温高围压下,声发射呈致

密不稳定型,渐变特征不明显。

(3)基于声发射试验结果和 Weibull 分布损伤理论,得到了各三场耦合作用下黏土岩的损伤演化过程,认为温度越高,围压越大,其损伤发展越早,越均匀,低温低围压下的损伤主要集中于变形后期;同等围压下,渗透损伤值随温度的升高而增加,相同温度下,围压越大,渗透损伤值越小。

参考文献:

- [1] GENS A, OLIVELLA S. Clay barriers in radioactive waste disposal[J]. *Revue Française de Génie Civil*, 2001, 5(6): 845 – 856.
- [2] CHEN L, LIU Y M, WANG J, *et al.* Investigation of the thermal-hydro-mechanical (THM) behavior of GMZ bentonite in the China-Mock-up test [J]. *Engineering Geology*, 2014, 172: 57 – 68.
- [3] 王长轩,刘晓东,刘平辉. 高放废物地质处置黏土岩处置库围岩研究现状[J]. *世界核地质科学*, 2008, 25(2): 98 – 103. [WANG C X, LIU X D, LIU P H. Research Status of Surrounding Rock of High Quality Radioactive Waste Geological Disposal Clay Rock Disposal [J]. *World Nuclear Geology Science*, 2008, 25 (2) : 98 – 103. (in Chinese)]
- [4] 杨立中,黄涛. 初论环境地质中裂隙岩体渗流-应力-温度耦合作用研究[J]. *水文地质工程地质*, 2000, 27(2): 33 – 35. [YANG L Z, HUANG T. A preliminary Study on the Coupling of Seepage, Stress and Temperature in Fractured Rock Mass in Environmental Geology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2000, 27 (2) : 33 – 35. (in Chinese)]
- [5] SCHIFFMAN R L. A thermoelastic theory of consolidation [C] // *Environmental and Geophysical Heat Transfer*. New York: ASME, 1972: 78 – 84.
- [6] 陈卫忠,谭贤君,伍国军,等. 非饱和岩石温度-渗流-应力耦合模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2395 – 2403. [CHEN W Z, TAN X J, WU G J, *et al.* Study on Temperature Seepage Stress Coupled Model of Unsaturated Rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (12) : 2395 – 2403. (in Chinese)]
- [7] 于永江,张华,张春会,等. 温度及应力对成型煤样渗透性的影响[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(6): 936 – 941. [YU Y J, ZHANG H, ZHANG C H, *et al.* Influence of Temperature and Stress on the Permeability of Formed Coal Samples [J]. *Journal of the Chinese Society of Coal Science*, 2013, 38 (6) : 936 – 941. (in Chinese)]
- [8] 胡雄,梁为,侯△靖,等. 温度与应力对原煤、型煤渗透特性影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6): 1222 – 1229. [HU X, LIANG W, HOU S J, *et al.* Experimental Study of Influence of Temperature and Stress on Permeability of Raw Coal and Briquette [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31 (6) : 1222 – 1229. (in Chinese)]
- [9] SAVAGE D. The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste [M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1995.
- [10] 陈卫忠,龚哲,于洪丹,等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1217 – 1238. [CHEN W Z, GONG Z, YU H D, *et al.* Review of Thermo-hydro-mechanical Coupled Tests and Constitutive Models of Clays [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (5) : 1217 – 1238. (in Chinese)]
- [11] 龚哲. Boom 黏土岩温度-渗流-应力耦合长期力学特性研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015. [GONG Z. Study on Long Term Mechanical Properties of Temperature, Seepage and Stress Coupling of Boom clay [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)]
- [12] 张流,薛丽霞,施良骐,等. 高围压下岩石破坏和摩擦滑动过程中的声发射性活动性[J]. *岩石力学与工程学报*, 1990, 9(1): 38 – 47. [ZHANG L, XUE L X, SHI L Q, *et al.* Acoustic Emission Response of Rock During Fracture and Friction at High Confining Pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1990, 9 (1) : 38 – 47. (in Chinese)]
- [13] 杨永杰,王德超,郭明福,等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(1): 98 – 104. [YANG Y J, WANG D C, GUO M F, *et al.* Study of Rock Damage Characteristics Based on Acoustic Emission Tests under Triaxial Compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33 (1) : 98 – 104. (in Chinese)]

责任编辑:张明霞