

压力-溶解耦合作用下岩盐渗透特性演化试验

盛金昌¹,王珂¹,袁小龙^{1,2},刘艺召^{1,3},罗玉龙¹,詹美礼¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; 3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要:为分析老挝东泰钾盐矿区开发过程中遇到的地下水渗漏问题,采用岩土渗流-侵蚀-应力耦合试验装置,对来自矿区的岩盐原样进行压力-溶解耦合作用下的渗透特性演变规律试验。试验结果表明:岩盐试样的平均渗流速度随着水力梯度的增大先减小后增大;岩盐试样的渗透系数随着水力梯度的增大先快速减小,然后缓慢增大,最后逐渐趋于稳定的趋势;岩盐渗透特性的演化规律受到溶解作用和围压作用的共同影响,溶解作用促进渗流通道的形成,增强岩盐试样的渗透性,而围压作用则使渗流通道趋于闭合,降低岩盐试样的渗透性,这是一个相互促进、相互抑制的过程;溶解作用会促使岩盐试样内部进一步向不均匀的集中渗流通道发展,深刻影响岩盐的渗透特性的演变规律。

关键词:岩盐;渗透特性;压力-溶解耦合作用;渗透系数;水力梯度

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)06-0044-05

Experimental study on permeability evolution of rock salt under pressure-dissolution coupling effect//SHENG Jinchang¹, WANG Ke¹, YUAN Xiaolong^{1,2}, LIU Yizhao^{1,3}, LUO Yulong¹, ZHANG Meili¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: To analyze the seepage problem of groundwater during the development of potash salt mining area in Dongtai, Laos, a geotechnical seepage-erosion-stress coupling experimental device was used to study the permeability evolution of the rock salt collected from the mining area under pressure-dissolution coupling effect. The experimental results indicate that the average seepage velocity of the rock salt samples decreases first and then increases with the increase of hydraulic gradient during the experiment. The permeability coefficient of the rock salt samples decreases rapidly with the increase of hydraulic gradient at first, then increases slowly and finally tends to be stable. The permeability evolution of the rock salt is affected by both dissolution and confining pressure. The dissolution promotes the formation of seepage channels and enhances the permeability of the rock salt sample. The confining pressure makes the seepage channel close and reduces the permeability of the rock salt sample. It is a process of mutual promotion and mutual inhibition. Dissolution can promote the development of inhomogeneous concentrated seepage channels interior of the rock salt specimen, profoundly affecting the permeability evolution of the rock salt.

Key words: rock salt; permeability characteristic; pressure-dissolution coupling effect; permeability coefficient; hydraulic gradient

在岩盐资源开采工程中,复杂环境下岩盐渗透特性及其演化规律是人们重点关注的课题之一。国内外学者就多因素耦合条件下岩盐的溶解机制及渗透特性开展了一系列试验与理论研究,主要体现在以下方面:①岩盐的溶解机制。肖长富等^[1]研究了氯化钠从岩盐中溶解分离的过程和氯化钠溶液的传质过程,得出岩盐溶解速率和扩散系数随各主要影

响因素的变化规律及其相应的计算公式;徐素国等^[2]对钙芒硝岩盐的水溶特性进行试验研究,得出钙芒硝岩盐在水中的溶解特性曲线以及溶解速率和溶解速度方程;钱海涛等^[3]认为应力对溶解产生影响的内在关联在于应力引起的应变能会增大溶解反应的化学势能差,从而影响岩盐的溶蚀机制;汤艳春等^[4]通过三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验,研究

宏观溶解速率与围压、塑性体应变和溶解时间之间的关系,揭示了在三轴应力作用下岩盐溶蚀特性变化机制;宋书一等^[5]进行了岩盐试样在三轴应力作用下的溶解特性试验,表明岩盐溶解速率随着等效应力的增大呈先缓慢减小后迅速增大的规律。②岩盐渗透特性演化机制。梁卫国等^[6]分析了钙芒硝岩盐的溶解渗透力学特性,认为在一定的渗透压力作用下,岩盐体内会产生溶解渗透交互促进作用且其渗透率是时间和渗透压力的函数;刘中华等^[7]对钙芒硝岩盐的渗透特性进行了试验研究,结果表明其渗透系数随注水压的增大和时间的延长而增大;Stormont 等^[8]指出岩盐在围压作用下发生压缩变形,孔隙结构向着亚孔隙增多的趋势发展,进而影响其渗透率;Xing 等^[9]通过试验表明岩盐的渗透性是各向异性的;赵顺柳等^[10]提出在压力变化的情况下,岩盐微粒间的小孔结构将发生变化,导致岩盐渗透性能发生变化;阳佳中等^[11]发现岩盐的渗透率受压力影响较大,而其渗透率的高低直接影响岩腔的稳定性;吴文等^[12]研究表明在其他条件相同的情况下,作用在岩盐上的围压越高,岩盐的渗透率越低,并拟合了围压与渗透率的关系式。③盐湖岩盐矿床溶解渗透机制。王文祥等^[13]对察尔汗盐湖固体钾矿水溶开采进行了现场试验研究,分析了溶剂在流动过程中发生的固液转化反应过程;潘海峰^[14]研究了察尔汗盐湖盐层的渗透性,认为其主要受岩盐的颗粒直径、孔隙度、不均质系数及卤水的物理化学性质等因素影响,得出计算岩盐渗透系数的公式;郑秀清等^[15]认为察尔汗区段岩盐渗透性具有明显的时空变异性,固液转化效应是渗透性时空变异的直接原因。

综上所述,国内外学者在岩盐溶解渗透特性方面已经取得一定的研究成果,但是由于岩盐组分的复杂性和盐层内部结构的非均质性,在水溶开采过程中,岩盐在压力和渗流溶解的共同作用下,其孔隙结构变化具有很强的不均匀性,导致岩盐内部可能形成集中渗流通道,进而深刻影响岩盐渗透特性的演化规律。目前对于压力和溶解耦合作用下岩盐渗透特性演化规律研究甚少,本文采用岩土渗流-侵蚀-应力耦合试验装置对老挝东泰钾盐矿区盐湖矿床地下岩盐渗透特性及其演变规律进行研究,可为解决东泰钾盐矿区开采井巷地下水渗漏问题提供理论依据。

1 试验方案设计

1.1 试验装置

试验采用河海大学渗流试验室自行研制的岩土渗流-侵蚀-应力耦合试验装置,该装置由围压系统、

轴向压力系统、渗透压力系统及数据采集系统组成,可以检测出完整圆柱形岩盐试样在围压、轴压以及渗透水压力共同影响下的渗透特性变化规律。

围压系统由围压室、围压压力源、围压输出控制盘等组成。围压室主要包括底座、顶盖及有机玻璃桶;围压输出控制盘一端与压力源连接,另一端与围压室底座连接,用于控制向围压室输出的高压水,围压室可以承受的最大围压为 2.0 MPa。

轴向压力系统由轴向加压装置、平衡调节装置、压杆、砝码等组成,最大轴向压力可达 3.0 MPa,围压与轴压系统能够模拟岩体承受的三向受压状态。

渗透压力系统由渗压压力源和移动水箱等组成,可以模拟岩体承受的渗流作用,可实现高水头与低水头模式的快速切换,渗透压力最高水头可达 200 m。

数据采集系统包括孔隙水压力传感器、位移采集装置、应变采集装置、浊度采集装置等,可以记录渗流进出口端水头的变化等。岩土渗流-侵蚀-应力耦合试验装置如图 1 所示。

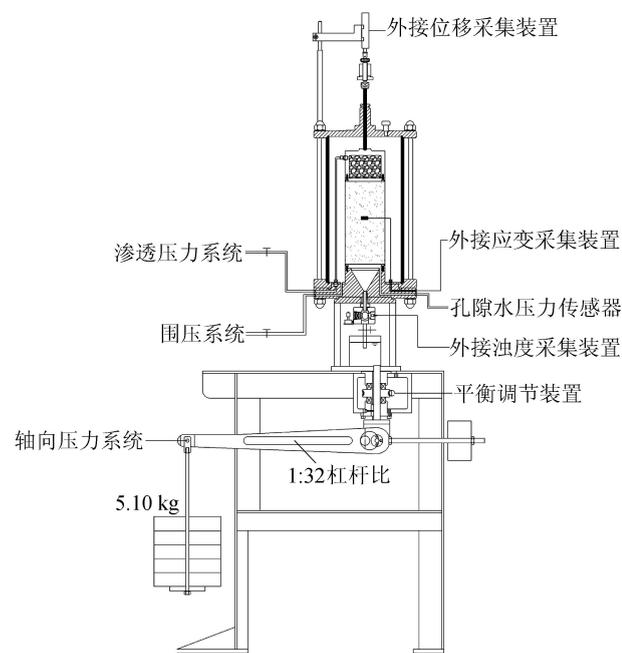


图 1 岩土渗流-侵蚀-应力耦合试验装置示意图

1.2 试样制作

本次试验采用的试样来自老挝万象盆地呵叻高原东泰矿区,采样矿区岩层自下而上的完整序列包括:基底硬石膏层—下膏盐层—下碎屑层—中膏盐层—中碎屑层—上膏盐层—上碎屑层,其中上盐段岩盐层因完全被淋滤而仅剩顶部石膏或硬石膏残余,但中、下盐段一般保存完好。试验所用的岩盐原样取自中膏盐层,此层岩性为无色透明或灰白色或灰黑色石盐岩,部分层位可见筛网状硬石膏夹层。岩盐原样经成分检测可知其主要矿物为氯化钠

(NaCl),所占质量百分比为84.3%,含其他可溶矿物为硫酸钠(Na₂SO₄)及硫酸钾(K₂SO₄),所占质量百分比分别为8.3%和5.2%,同时含少量难溶及不溶物,主要为硬石膏(CaSO₄·2H₂O)和方硼石(Mg₃B₇O₁₃Cl),所占质量百分比为2.2%。岩盐原样如图2所示。

将高10 cm、直径6 cm的岩盐试样上下表面打磨平整,以免产生集中应力,两断面的不平整度不超过0.5 mm。将试样四周用乳胶膜封死,保证试样四周不透水,并将其套入事先准备好的4块厚度为2 cm的1/4圆形有机玻璃板内部,可起到传递围压的作用;各缝隙用703硅胶涂抹均匀,以防渗透水从缝隙中流走从而影响试验结果;最后将其放入通风处,待硅胶完全风干后进行试验。岩盐渗透系数测试试样如图3所示。



图2 岩盐原样

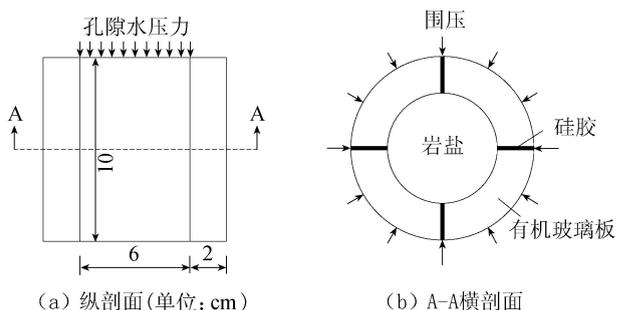


图3 岩盐渗透系数测试试样示意图

1.3 试验方法

试验步骤如下:①将热缩管安装在漏斗型金属底座上,并将事先处理好的完整试样套入热缩管内,使得试样处于竖直状态。盖上实验帽并用硅胶封闭热缩管底部和热缩管与盖帽连接处,待硅胶凝固后,缓慢地通入浓度为5 mol/L的NaCl溶液。②待试样饱和后将围压室安装在金属底座上,用移动水箱给围压室加水,当围压室内的水从放水阀溢出时,关闭放水阀和进水阀,对试样施加轴向压力,再打开下游测压管和围压控制阀,利用围压输出控制盘开始对试样分级施加围压。③分级施加渗透压力,不得改变围压及轴向压力,当加载一级渗透压力后,待上下游测压管内水位保持稳定,方可量测此渗透压力下

的渗流量。渗透水流通过进水管进入试样,通过出水管进入量杯。试验过程中实时测量并记录渗流量与渗透坡降之间的关系。

由于钻探所取出的岩盐试样脱离原有的地下应力状态,物理性质会发生一定的改变,呈现较大的脆性,同时本次试验旨在研究岩盐在低压状态下的溶解机制及渗透特性的演变规律,因此设计的试验工况如下:轴压为0.1 MPa,围压分别为0.05 MPa、0.1 MPa及0.20 MPa,共计3组试验。

2 试验结果与分析

根据达西定律来分析试验数据。由达西定律知,岩盐试样的渗透系数与渗流量有以下关系:

$$K = \frac{QuL}{A\Delta h} \quad (1)$$

式中: Q 为渗流量, m^3/s ; A 为试样的横截面积, m^2 ; μ 为渗透流体的动力黏滞系数, $Pa \cdot s$; L 为试样长度, cm ; Δh 为试样上的水头差, cm ; K 为渗透系数, cm/s 。通过式(1)计算并运用Origin软件进行分析,可得出岩盐渗透特性的演化规律。

2.1 岩盐渗流速度与水力梯度的关系

图4为围压 $\sigma=0.05$ MPa、0.10 MPa、0.20 MPa时1、2、3号岩盐试样平均渗流速度 v 与水力梯度 J 的关系曲线,可以看出,岩盐试样平均渗流速度随水力梯度变化的总体趋势是随着水力梯度的增大先有小幅下降然后不断增大。1、2、3号试样平均渗流速度分别由初始时刻的 7.26×10^{-3} cm/s、 7.23×10^{-3} cm/s、 1.65×10^{-2} cm/s 逐渐下降至 4.16×10^{-3} cm/s、 3.40×10^{-3} cm/s和 1.11×10^{-2} cm/s,之后均随水力梯度的增大呈上升趋势。

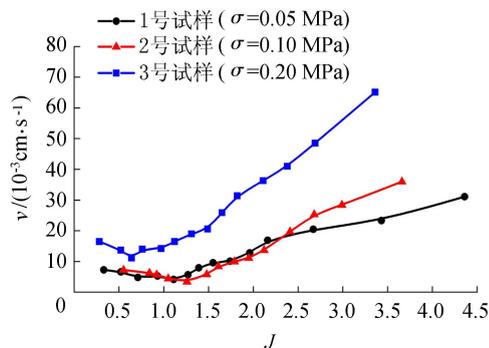


图4 不同围压下岩盐试样的渗流速度变化曲线

试验过程中,若岩盐试样的渗透系数保持不变,那么渗流速度与水力梯度曲线应该为一条通过原点的直线,但由图4可以看出,渗流速度与水力梯度的关系图为一先下降后上升的曲线,说明在围压和渗透溶解共同作用下,岩盐渗透特性在试验整个阶段不断发生改变。

2.2 岩盐渗透系数演变规律

图5为围压 $\sigma = 0.05 \text{ MPa}$ 、 0.10 MPa 、 0.20 MPa 时1、2、3号岩盐试样的渗透系数变化曲线,可以得出,3个岩盐试样的渗透系数变化曲线趋势保持一致,渗透系数随着水力梯度的增大先快速减小,然后缓慢增大,最后逐渐趋于稳定。1、2、3号试样初始渗透系数分别为 $2.20 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $1.31 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、 $5.89 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,随后下降最低至 $3.75 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $2.70 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $1.38 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,最后分别在 $7.13 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 、 $9.85 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 及 $1.94 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 左右有稳定趋势。图中3号试样的渗透系数变化曲线明显高于1号试样和2号试样的渗透系数变化曲线,这是因为在试验开始前3个岩盐试样内部孔隙及裂隙结构有所不同。

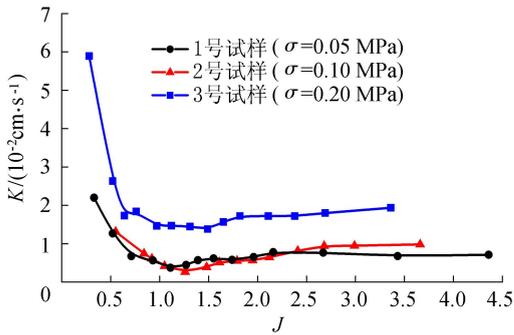


图5 不同围压下岩盐试样的渗透系数变化曲线

初始时刻当浓度为 5 mol/L 的 NaCl 溶液渗入岩盐试样内部时,溶液能够沿着试样内部孔隙和裂隙结构流动,但是由于施加在岩盐试样上的围压作用,使得试样骨架发生变形,导致部分渗流通道闭合或变小,减弱了渗流通道运输流体的能力,造成岩盐试样渗透特性显著降低。同时在围压的作用下,渗流通道变小抑制了溶液与氯化钠等可溶性矿物的接触,减小了接触溶解面积,降低了可溶性矿物的溶解速率,不利于渗流通道的形成,使得渗透系数进一步减小,因此曲线快速下降。但随着水力梯度的不断增大,作用在岩盐试样上的渗透压力不断增大,溶液在渗透压力的驱动下与试样中固体矿物不断接触溶解,形成新的固液界面,增大了固液接触面积,加快了岩盐试样溶解速率,促进岩盐内部新的渗流通道的形成,使得溶液在试样内部流动愈加通畅,因此渗透系数不断提高,曲线呈上升趋势。随着试验不断进行,溶解作用与围压作用逐步达到平衡,所以岩盐试样的渗透系数在相应的范围内有稳定的趋势。

由于不同岩盐试样的渗透特性演化规律会因其内部孔隙结构的不同而有所差别,为了能够更直观地比较不同试样的渗透系数的变化趋势,此处引入一个无量纲参数——渗透系数变化率 K' , $K' = K/K_0$,即试

验进行到不同时刻岩盐试样的渗透系数 K 与初始时刻的渗透系数 K_0 的比值,表征某时刻渗透系数占初始渗透系数的比例。图6为3个岩盐试样的 K' 变化曲线,由图6可知,1、2、3号试样的 K' 变化趋势呈现一致性,在试验过程中先快速减小,然后缓慢增大,最后呈稳定趋势。1号试样的 K' 曲线在初始阶段迅速下降至 0.15 左右,然后增大至 0.35 ,最后在 0.32 左右有稳定趋势, K' 增大阶段曲线斜率较小。2号试样的 K' 变化曲线与1号试样有所不同,主要区别在于增大阶段,2号试样的 K' 增大阶段的曲线斜率大于1号试样,且 K' 在 0.55 左右保持稳定,说明2号试样内部渗流通道比1号试样畅通。3号试样相较于1号试样与2号试样,其增大阶段不明显,很快便在 0.33 左右有了稳定趋势。3个试样的 K' 有所不同,这是因为不同的岩盐试样初始状态内部孔隙结构分布不同,使得在溶解驱动作用下逐渐形成的渗流通道分布不同且不均匀,影响岩盐试样的渗透特性,因此3个试样的 K' 在试验后半阶段出现分化。同时由于溶解作用具有不均匀性,当岩盐试样内部渗流通道溶解贯通扩大后,溶液沿着最为通畅的渗流通道流动,不再溶解试样其他部分的可溶矿物,使得试样内部进一步向不均匀的集中渗流通道发展,深刻影响岩盐渗透特性的演化,因此 K' 有稳定的趋势。

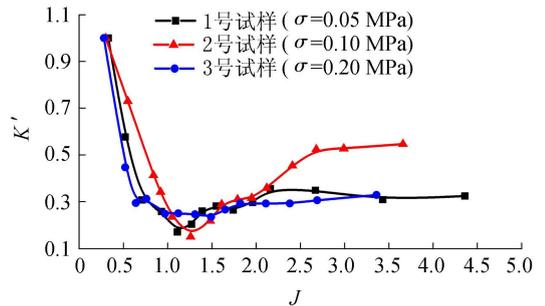


图6 岩盐试样的 K' 变化曲线

3 结论

a. 随着水力梯度的增大,岩盐试样的平均渗流速度呈现先小幅度减小至最低值,然后不断增大的趋势,试验过程中平均渗流速度与水力梯度不成正比关系。

b. 3个岩盐试样的渗透系数变化曲线趋势保持一致,随着水力梯度的增大,渗透系数先快速减小,然后缓慢增大,最后逐渐趋于稳定。

c. 岩盐渗透特性受到溶解作用和围压作用的共同影响,溶解驱动促进渗流通道的形成,增强岩盐试样的渗透特性,而围压作用则使渗流通道趋于闭合,降低岩盐试样的渗透特性,表明岩盐渗透特性演

变过程是一个相互促进、相互抑制的过程。

d. 不同的岩盐试样初始状态内部孔隙结构分布不同,使得在溶解驱动下逐渐形成的渗流通道分布不同且不均匀,导致岩盐溶解的非均质性。当岩盐试样内部渗流通道溶解贯通后,溶液沿着最为通畅的渗流通道流动,不再溶解试样其他部分的可溶矿物,使得试样内部进一步向不均匀的集中渗流通道发展,深刻影响岩盐渗透特性的演化。

参考文献:

[1] 肖长富,阳友奎,吴刚,等. 岩盐溶解特性及其传质过程的研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1993, 16(2): 51-57. (XIAO Changfu, YANG Youkui, WU Gang, et al. The dissolution characteristics of rock salt and mass transmission process[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1993, 16(2): 51-57. (in Chinese))

[2] 徐素国,梁卫国,赵阳升. 钙芒硝岩盐溶解特性的实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2005, 24(1): 5-7. (XU Suguo, LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Experimental study on dissolution characteristic of glauberite rock salt [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2005, 24(1): 5-7. (in Chinese))

[3] 钱海涛,谭朝爽,李守定,等. 应力对岩盐溶蚀机制的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(4): 757-764. (QIAN Haitao, TAN Chaoshuang, LI Shouding, et al. Analysis of effect of stress on dissolution mechanism of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(4): 757-764. (in Chinese))

[4] 汤艳春,房敬年,周辉. 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1601-1607. (TANG Yanchun, FANG Jingnian, ZHOU Hui. Experimental study of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1601-1607. (in Chinese))

[5] 宋书一,姜德义,任松,等. 三轴应力作用下岩盐溶解特性试验分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2013, 36(9): 14-20. (SONG Shuyi, JIANG Deyi, REN Song, et al. Experiment analysis on dissolution characteristics of rock salt on the effect of triaxial stress [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2013, 36(9): 14-20. (in Chinese))

[6] 梁卫国,徐素国,赵阳升. 钙芒硝盐岩溶解渗透力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 951-955. (LIANG Weiguo, XU Suoguo, ZHAO Yangsheng. Investigation on solution pervasion and mechanical characteristics of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 951-955. (in Chinese))

[7] 刘中华,薛晋霞,胡耀青,等. 钙芒硝溶解渗透试验研

究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 73-80. (LIU Zhonghua, XUE Jinxia, HU Yaoqing, et al. Experimental study on the dissolution and permeability of glauberite [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 73-80. (in Chinese))

[8] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29: 325-342.

[9] XING Wei, ZHAO Juan, DUSTERLOH U, et al. Experimental study of mechanical and hydraulic properties of bedded rock salt from the Jintan location [J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(1): 145-151.

[10] 赵顺柳,杨骏六. 关于地下岩盐溶腔利用的特性研究[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 2003, 29(1): 65-68. (ZHAO Shunliu, YANG Junliu. A review of investigations into features of underground salt caverns used for storage [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2003, 29(1): 65-68. (in Chinese))

[11] 阳佳中,杨骏六. 岩盐溶腔渗透率研究的一些进展[J]. 西南民族学院学报(自然科学版), 2004, 30(1): 109-113. (YANG Jiazhong, YANG Junliu. Research progress in the permeability of salt cavities [J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2004, 30(1): 109-113. (in Chinese))

[12] 吴文,侯正猛,杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746-749. (WU Wen, HOU Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on permeability of rock salt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 746-749. (in Chinese))

[13] 王文祥,李文鹏,刘振英,等. 察尔汗盐湖低品位固体钾矿液化开采的现场试验研究探讨[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 697-703. (WANG Wenxiang, LI Wenpeng, LIU Zhenying, et al. A tentative discussion on in-situ experimental liquefaction and exploitation of low grade solid potassium resources in Qarhan Salt Lake [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(4): 697-703. (in Chinese))

[14] 潘海峰. 察尔汗盐湖岩盐层渗透性的初步研究[J]. 军工勘察, 1995(3): 11-17. (PAN Haifeng. Preliminary study on permeability of salt rock in Qarhan Salt Lake [J]. Journal of Military Investigation, 1995(3): 11-17. (in Chinese))

[15] 郑秀清,李铎,谢石连. 察尔汗盐湖首采区岩盐渗透性分析[J]. 河北地质学院学报, 1994(2): 198-204. (ZHENG Xiuqing, LI Duo, XIE Shilian. Analysis of rock salt permeability in the first mining area of Qarhan Salt Lake [J]. Journal of Hebei College of Geology, 1994(2): 198-204. (in Chinese))

(收稿日期:2017-12-04 编辑:骆超)