

溶浸-应力条件下钙芒硝孔隙率变化规律研究^{*}

钱强,于艳梅,梁卫国

(太原理工大学 矿业工程学院,太原 030000)

摘要:采用原位溶浸法开采钙芒硝矿,会使钙芒硝内部物理结构改变,随之会引起其力学性能及渗透性的改变,从而影响原位溶浸开采效率。利用 μ CT225kVFC型显微CT试验系统,得到不同溶浸温度、单轴压缩条件下钙芒硝内部结构CT图像,通过孔隙率值的变化归纳出钙芒硝变形和溶蚀规律。研究表明:钙芒硝在35℃水中溶浸10h后发生膨胀,在1MPa轴向载荷下,处于孔裂隙压密向弹性变形过渡阶段;钙芒硝在浸泡后孔裂隙增长明显,施加1MPa轴向载荷后,孔裂隙增长不明显;溶浸温度为65℃时,钙芒硝孔隙率增长值最大;95℃时,孔隙率增长率最大,孔隙变化最明显。研究结果对钙芒硝矿床开采利用具有重要参考价值。

关键词:钙芒硝;温度;溶浸;轴压;孔隙率

中图分类号:TD871

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-0968-06

Research on Porosity Variation of Glauberite under Solution and Stress Effect

Qian Qiang, Yu Yanmei, Liang Weiguo

(College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, P.R.China)

Abstract: During the process of glauberite salt rock in-situ solution mining, the internal structure of glauberite salt rock changes, causing further changes of mechanical property and permeability. The internal structure images of the glauberite under different temperature and uniaxial compression conditions were obtained by using the μ CT225kVFC type micro-CT experimental system. The deformation and internal pore-fracture variation rules were summarized based on the porosity values affected by the dissolution and stress effects. The results are as follow: leaching inflation happens after the specimens are soaked in 35℃ aqueous solution for ten hours. The glauberite sample is in the transition stage between initial compression phase and elastic deformation stage under 1 MPa axial load. Hole crack growth is obvious after the specimens being soaked in water solution. However, when it was added with 1 MPa axial load, the change of porosity is not obvious. The porosity growth goes highest at 65℃ leaching temperature, and when it grows to 95℃, the porosity growth rate becomes largest and the pore change is most obvious. The results are of important value to glauberite solution mining.

Keywords: glauberite; temperature; solution; uniaxial compression; porosity

* 收稿日期:2018-01-05(修改稿)

作者简介:钱强(1990-),男,江苏连云港人,硕士,主要从事盐类矿床水溶开采及岩盐力学方面的研究工作。

E-mail:18734130679@163.com

通信作者:于艳梅(1984-),女,博士,讲师,硕导,主要从事多场耦合作用下煤岩细观结构基础理论方面的研究。

E-mail:yym2009@126.com

基金项目:国家自然科学基金(51504158);山西省基础研究项目(2015021128)

0 引言

钙芒硝矿床是一种重要的硫酸钠矿床工业类型,而硫酸钠是极具经济价值的化工原料,单独开采钙芒硝矿床时硫酸钠卤水浓度最高可达33.62%,有着非常高的开采价值。自20世纪80年代开始,硐室水溶法开始应用于钙芒硝矿石开采,对部分埋藏浅的钙芒硝矿床进行水溶开采^[1]。目前,各地钙芒硝矿山多以地面露天堆浸和硐室水溶法共采为主。钙芒硝矿石在水中溶浸时,将会引起岩体内部的物理结构改变,内部结构的变化又会引起岩石力学性能及渗透性的改变,从而影响钙芒硝矿原位溶浸开采效率^[2]。而在其他如石盐-硬石膏-钙芒硝等盐类矿床中,钙芒硝层往往以盐层的顶、底板或是以夹层的形式存在,所以研究钙芒硝岩盐在不同溶浸条件下的力学弱化特征和孔隙结构变化对盐岩溶腔建造稳定性也有重要意义^[3]。

关于钙芒硝岩盐的力学特性研究,梁卫国等^[4]通过钙芒硝溶解渗透试验,阐述了钙芒硝由于矿物组分溶解特性的差异,在一定渗透压力作用下,钙芒硝盐岩体内会产生溶解渗透交互促进作用,从而由低渗透介质变为高渗透的多孔介质。杨晓琴等^[5]对不同浓度盐溶液中溶浸的钙芒硝进行单轴压缩试验,对钙芒硝物理力学特性弱化效应进行了研究。高红波等^[6]对与钙芒硝岩盐成分相近的石膏进行了在高温盐溶液浸泡下的力学特性试验,总结了石膏在高温盐溶液浸泡后的抗压、抗拉、抗剪强度等力学特性的变化规律。徐军等^[7]对取自盐化制碱厂的淡钙液与钙芒硝矿进行了溶解反应试验,提出一定条件下钙芒硝与淡钙液的理想反应量。由于CT扫描技术可以用来观测岩石受力后细观裂纹的产生、演化及其与宏观力学性质的联系,因此在细观岩石力学领域得到广泛运用。刘慧等^[8]运用CT识别技术,进行不同温度梯度下冻结岩石的CT扫描实验,完成了冻结岩石冰含量及损伤信息的数字表述。汤艳春等^[8]通过大量的单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合细观力学试验,对比基于不同阶段的裂纹溶解之后形态上的变化,对不同轴向塑性应变下岩盐宏观溶解速率发生变化的机制进行分析。但目前对溶浸-应力条件下钙芒硝孔隙率变化的研究还较少,本文从该角度进行了基础研究。

1 试验概况

1.1 主要试验设备

本试验中使用的CT设备是由太原理工大学与中国工程物理研究院应用电子学研究所共同研制的 μ CT225kVFCB型高精度CT实验分析系统。其工作原理是:由微焦点X光机发射X射线穿过物体后,射线强度的衰减程度与物体成分密度和物体厚度成正比。数字平板探测器再将X射线信号转换成电信号送入计算机系统,进行运算得出数字矩阵,经过计算机图像重建显示出图像,能够得到试样任意断面的CT图像。通过图像灰度的变化,可以观测到试样内部的裂纹分布状态。扫描单元分辨率0.194 mm/放大倍数,最小可以分辨0.5 μ m的孔裂隙。

试验通过TYT-600电液伺服控制岩石力学试验机,对试样施加1 MPa轴向载荷。该试验机可通过位移伺服控制系统控制加载应变速率,最大载荷为600 kN,本试验加载变形速率为0.002 mm/s。

1.2 试件及试验方法

试验所用钙芒硝矿石取自四川省彭山县某钙芒硝矿。该矿用炮采和硐室水溶法结合的方式开采钙芒硝,试验所取为爆破后落在巷道内的较大矿石块,以便于实验室取芯。其主要矿物成分为:钙芒硝占75%,伊利石、蒙脱石、石英、云母等其他泥杂质占25%,为难溶性岩盐矿石。本试验中,需对试样施加轴向载荷,故根据岩石力学试验规范,将试件加工成标准的 $\phi 50$ mm \times 100 mm圆柱形力学试验试件尺寸。

取3个按照上述试验尺寸加工好的钙芒硝试件,将其编号为1[#]、2[#]、3[#]。先对自然状态下的3个试件进行一次CT扫描,获得试件自然状态下的孔隙结构图像。根据试件的形状和大小,最终确定图像最佳放大倍数为2.78倍。随后,将1[#]、2[#]、3[#]试件分别放入装有35 $^{\circ}$ C、65 $^{\circ}$ C、95 $^{\circ}$ C水溶液的恒温加热容器中,容器中水的体积为12 L,均恒温浸泡溶解10 h。溶浸10 h后,对1[#]试件进行CT扫描,获得了1[#]试件在35 $^{\circ}$ C水溶液中溶解10 h后的CT图像。从1[#]试件溶解后的外观和扫描后获得的各层断面图像均可发现,本试验尺寸大小的钙芒硝在上述溶解条件下,只有试件表面较少部分被明显溶蚀,试件内部还未产生足够多与外界溶液贯通的裂隙溶蚀通道,在10 h的恒温溶解过程中产生的孔隙数量较少,与文献所述钙芒硝溶解规律^[10~11]相

吻合,故没有再对恒温溶解后的 2[#]、3[#]试样进行 CT 扫描。将试件从溶液中取出,完成相关物理测量后,即刻进行相应力学试验。通过电液伺服控制岩石力学试验机对溶浸过后的钙芒硝试件进行单轴压缩,设定加载变形速率为 0.002 mm/s,当轴向载荷达到 1 MPa 时停止加载。

1.3 基于 CT 图像的孔隙率计算方法

通过 CT 扫描、重建最终得到的 CT 图像为灰度图像,每张图像由众多像素组成,每个像素都对应一个灰度值,灰度值的值域为 0 至 256,CT 技术原理决定了在重建出来的 CT 图像中密度越大的区域灰度值越大,亮度越高。而在试验环境中,空气密度最小,所以 CT 图像中钙芒硝外围的空气颜色呈黑色。同样,钙芒硝试样孔裂隙间也为空气,所以孔裂隙内部的灰度值应与空气灰度值相近。但是不同尺度的孔裂隙的灰度值也不尽相同,所以需要有一个合适的阈值来判别,灰度小于该阈值的部分为孔隙,大于该阈值的部分为非孔隙。选择合适的阈值将灰度图像二值化,统计二值图像像素点,将孔隙所占的像素点数 n 与全部像素点数 N 相比,即得孔隙率为

$$N_k = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

2 试验结果

2.1 孔裂隙变化规律

图 1 为钙芒硝试件在 3 种不同状态下的 CT 扫描断面图,由于轴向荷载为 1 MPa,由应力加载产生的孔裂隙主要集中在试件顶部和底部,因此选择靠近顶部的第 150 层断面图进行对比分析。图 1(a)为自然状态下钙芒硝,钙芒硝为复盐,其成分大部分为硫酸钠,在 CT 图像中显亮,密度大且致密,其中掺杂少部分泥质杂质,密度较硫酸钠小,呈斑状阴影,与硫酸钠胶结组合,呈各向异性分布。钙芒硝岩盐原生孔裂隙较少,基于图像灰度计算得到第 150 层断面孔隙率由表 1 可知仅为 0.65%。钙芒硝试件在 35 ℃ 水溶液中溶浸 10 h 后,在图 1(b)虚线外侧出现暗色圈,说明在试件边缘处发生了溶蚀,这是因为钙芒硝溶解首先发生在固液接触表面,硫酸钠易溶于水,硫酸钠所在部位遇水溶解后出现凹陷,未溶解的泥质成分则相对凸起,造成图像中钙芒硝试件边缘凹凸不平,密度分布不均匀,造成图像亮暗程度分布不规则。图 1(b)与图 1(a)相比,新生成 4 条裂隙,可以明显看出 1 号裂

隙和 2 号裂隙的一端均与溶蚀边缘相通,试样边缘可溶矿物首先被溶解,形成孔隙通道,随后溶液进入该孔隙通道,在新的固液界面继续溶解可溶矿物,使孔隙通道体积越来越大。随着可溶矿物的溶解,其他泥质成分遇水软化,钙芒硝强度下降,力学特性弱化。根据钙芒硝溶浸前后的尺寸变化可知,钙芒硝矿石溶浸后发生膨胀变形,使得生成的裂纹开度变大,由边缘向内部延伸。溶浸后该断面图层孔隙率变为 2.8%,是溶浸前孔隙率的近 4 倍。图 1(c)又新增裂纹区域 5,同样可以明显观察到,该区域裂纹的起点也位于试件边缘,边缘遇水溶蚀,产生众多细小裂隙,加载轴向应力后,边缘裂隙处出现应力集中现象,使之继续开裂形成更大的裂隙。然而由于加载 1 MPa 轴向应力后新生的裂纹数量较少,孔隙率仅为 3.21%,只增长 0.41%。说明在该组试验中,溶浸作用对孔隙的生成起了至关重要的作用,即使矿物溶解产生了较多孔隙,也使钙芒硝强度产生弱化现象,使之在加载应力后容易产生裂隙并扩展。

2.2 钙芒硝孔隙率分布及其变形特征

图 2 为 1[#]试件分别在自然状态、溶浸后、轴向加载后孔隙率在试件轴向上的分布情况。从图中可以看出,不同状态下钙芒硝试件的孔隙率分布存在着规律性:断面图层编号从第 100 层到第 1 400 层,即沿试件顶端到底端的轴向方向,3 条孔隙率曲线有着相同个数的孔隙率极大值点(点 A, C, E)和极小值点(点 B, D),且极值点排列顺序相同,但是出现极大值点和极小值点的图层位置和数值都有所改变。极值点是与附近点孔隙率差异较大的点,所以将极值点作为特征点重点分析,其中极大值点是附近点中孔隙率最大的点,因此,它所在图层是所有图层中最能体现孔裂隙结构特征的。用字母标明各极值点,首字母相同的极值点对应钙芒硝的同一部位,下标数字 1、2、3 分别表示初始、溶浸、应力条件。各极值点以第 750 层为分界点,分别向两个端部偏移。由于溶浸前后 2 次 CT 扫描所用 X 射线的电流电压、图像放大倍数、试件放置位置均相同,所以引起图 2 中极值点图层位置改变的原因是试件在轴向方向上发生了变形,试件长度有所增加,钙芒硝在浸泡后发生了膨胀。这可以从表 2 钙芒硝试件溶浸前后测量得到的尺寸和质量数据得到验证:由表 1 可知,1[#]试件在 35 ℃ 水溶液中溶浸 10 小时后,直径由 48.9 mm 增大到 49.0 mm,高度由 97.8 mm 增加到 98.1 mm;同样,2[#]、3[#]

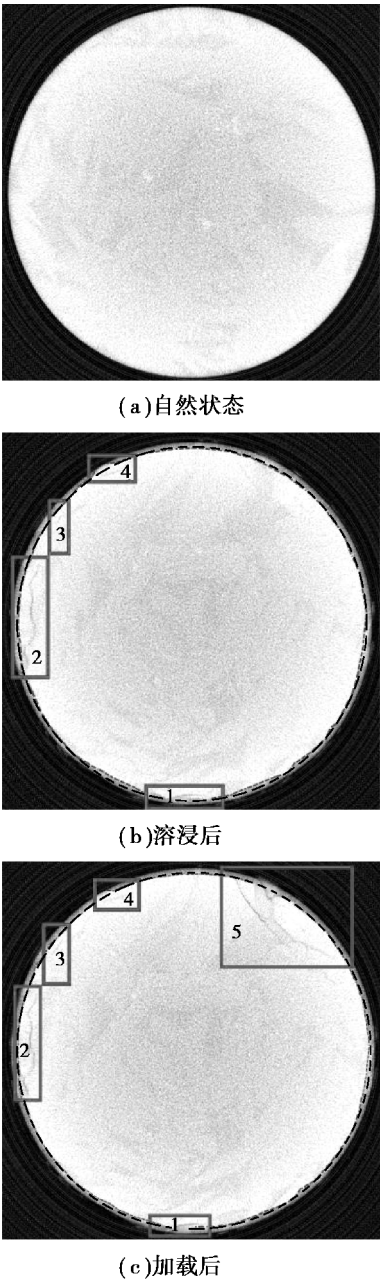


图 1 1[#]钙芒硝试件不同状态下第 150 层 CT 断面图

Fig. 1 150th CT profile of 1[#] glauberite specimen with different states

试件的直径和高度也都有所增大,也发生了膨胀。试件膨胀变形在轴向方向上还具有对称性,从图 2 中可以看到,试件中心处位置并没有发生明显的改变,试件是从中部向两端发生膨胀变形。

从图 2 可知,1[#]钙芒硝溶浸后的孔隙率曲线上各值比初始状态下各值都大,溶浸后孔隙率平均值是初始状态的 2.80 倍,钙芒硝在 35 ℃ 水溶液中浸泡 10 h 后,试件被部分溶蚀,钙芒硝中易溶成分 Na₂SO₄ 首先被溶解,使试件密度减小,孔隙率增

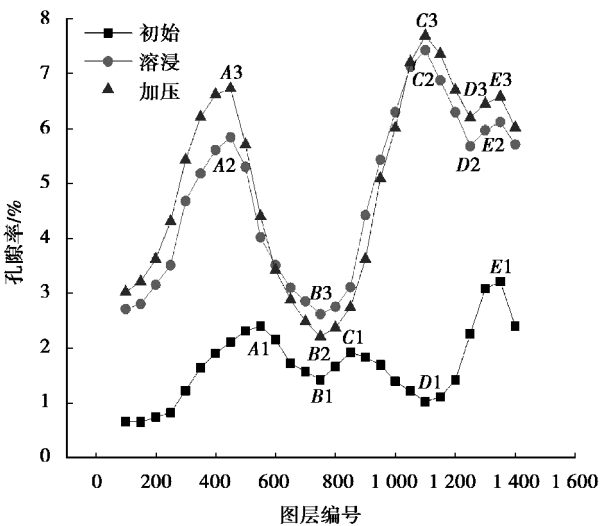


图 2 1[#]钙芒硝试件在不同试验条件下各图层孔隙率分布

Fig. 2 Porosity distribution of 1[#] glauberite specimen in each layer under different test conditions

大。施加轴向荷载后试件各断面孔隙率与溶浸后的各断面孔隙率值相比,试件 A 点处变大,C 点处变小,E 位置处变大,孔隙率增减趋势不一致。钙芒硝属于软岩^[12],应符合单轴压缩条件下软岩的变形特征。结合图 2 和表 1 中 1[#]试件溶浸后和加压后孔隙率值变化情况,推测钙芒硝试件在 1 MPa 轴压下,处于孔裂隙压密向弹性变形过渡阶段,在靠近两端部的区域,1 MPa 轴压下孔隙率值比加载前孔隙率值大且差异较明显,越远离端部孔隙率增长越小直至减小。说明在端部以外区域,可能出现原张开性结构面或裂隙逐渐闭合、被压实的情况。吴池^[13]在岩盐三轴蠕变声发射特征研究试验中,根据各时段内事件发生的数量和部位,对各时间点的岩盐内部损伤破坏部位进行了空间定位,其在 0~5 min 蠕变初始阶段内部损伤分布情况与本试验中孔隙率位置分布情况相吻合。

表 1 钙芒硝试件孔隙率变化

Table 1 Variations in porosity of glauberite							
1 [#] 试件第 150 层		自然状态		溶浸后		加载后	
孔隙率/%		0.65		2.80		3.21	
试件编号	溶液温度/(℃)	孔隙率/%			孔隙率增长值/%	孔隙率增长率/%	
		初始	溶浸	加压			
1	35	1.69	4.74	4.97	3.28	194.08	
2	65	2.61	—	8.46	5.85	224.11	
3	95	1.40	—	6.71	5.31	377.99	

表 2 钙芒硝试件的尺寸和质量
Table 2 Size and weight of the glauberite specimen

自然状态			
试件	直径/mm	高度/mm	质量/g
1	48.9	97.8	492.43
2	49.0	99.0	504.48
3	48.6	99.5	504.47
溶浸后			
试件	直径/mm	高度/mm	质量/g
1	49.0	98.1	478.52
2	49.0	99.4	483.96
3	48.8	99.9	479.83

2.3 溶浸温度对钙芒硝孔隙率的影响

表 1 给出了溶浸温度条件分别为 35 ℃、65 ℃ 和 95 ℃ 时试件前后的孔隙率值(试件孔隙率用该试件各断面孔隙率平均值代替),3 种条件下试样最终状态孔隙率相对初始状态分别增长了 3.28%、5.85%、5.31%。

从图 3 可以直观地看出,试件在 65 ℃ 溶浸温度下,试样前后孔隙率增长值(最终状态孔隙率与初始状态孔隙率的差值)最大,溶浸温度从 35 ℃ 到 65 ℃ 时,试样孔隙率增长值呈变大趋势,孔隙率增长值增加了 2.57%,增长幅度较大,溶浸温度从 65 ℃ 到 95 ℃,试样前后孔隙率增长值减小了 0.54%,有小幅度的减小。

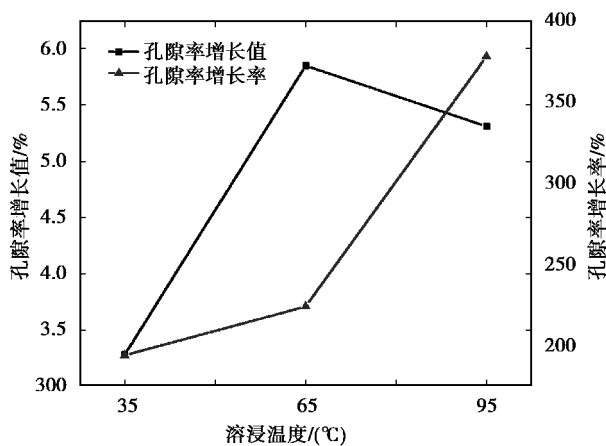


图 3 钙芒硝试件孔隙率增长值及孔隙率增长率

Fig. 3 Porosity growth and porosity growth rate of glauberite specimens

考虑到不同试件初始状态的孔隙率并不相同,

不同的孔隙率初始值对试验过程中孔隙率的变化影响程度不同(一般情况下,同一种钙芒硝,孔隙率越大,渗透性越好,越有利于钙芒硝矿石中硫酸钠的溶解从而生成新的孔裂隙),所以引入孔隙率增长率(孔隙率增长值与初始状态孔隙率的比值),便可以忽略初始孔隙率不同的影响,以此来量化试样孔隙率前后变化的明显程度,使表征意义更明确。3 种溶浸温度下试样孔隙率增长率分别为 194.08%、224.11%、377.99%。从 35 ℃ 到 65 ℃,孔隙率增长率小幅增加,从 65 ℃ 到 95 ℃,增长率增长幅度变大,说明在 95 ℃ 水溶液中,试样孔隙率相比初始孔隙率变化最大。综合来讲,在本试验中,钙芒硝试样在 95 ℃ 溶浸温度条件下,孔隙率变化最明显。这一规律与孔隙率增长值变化规律不尽相同,这说明溶浸温度条件对孔隙率变化的影响比初始孔隙率这一影响因素更大。

3 结论

通过对 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 钙芒硝试件在溶浸前后、轴向加载后进行 CT 扫描,基于重建后的钙芒硝 CT 断面图像进行孔隙结构分析,通过试样孔隙率的变化来表征孔隙结构的变化。主要得到以下结论:

(1) 对 1[#]试件不同状态下第 150 层 CT 断面进行分析,可知钙芒硝在自然状态下结构致密,孔隙率仅为 0.65%,在 35 ℃ 水溶液中溶浸 10 h 后,试件由表及里开始溶解,在边缘形成溶蚀圈,在溶浸过程中产生了明显的裂纹,裂纹起始点位于边缘溶蚀区域,孔隙率增加到 2.80%。加载 1 MPa 轴压后,新增少量裂纹,孔隙率变为 3.21%,孔隙率增长不明显,说明溶浸作用在本试验中对孔裂隙的生成影响最大,起主导作用。

(2) 以 1[#]试件为研究对象,在 CT 扫描后获得 1 500 层断面图像,在第 100 到 1 400 层中,每 50 层选取一个断面,共取 27 个断面图像做孔隙率分析,得到孔隙率随图层层编号分布图。分析得出,试件溶浸后发生膨胀,与其初始状态下孔隙率分布曲线相比,试件对应各点以中部 750 层为界,分别向两端部偏移,各断面孔隙率均显著变大,平均孔隙率由初始状态的 1.69% 增长到溶浸后的 4.74%。加载轴压后,靠近试件端部的断面孔隙率变大,离端部位置越远,孔隙率增长越小,部分区域孔隙率减小。推断在 1 MPa 轴向载荷下,钙芒硝岩盐处于孔裂隙压密向弹性变形过渡阶段,出现端部裂隙

扩展,中部孔隙闭合现象。

(3)对不同溶浸温度下的3个试件平均孔隙率对比分析得出:溶浸温度为65℃时,试样试验前后孔隙率增长值最大;溶浸温度为95℃时,试样孔隙率增长率最大,试样孔裂隙变化最明显。

参考文献(References)

- [1] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京:化学工业出版社, 2003. (Wang Qingming. Solution mining in salt deposit[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 梁卫国, 赵阳升, 徐素国, 等. 原位溶浸采矿理论研究[J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(3): 382-387. (Liang Weiguo, Zhao Yangsheng, Xu Suguo, et al. Theoretical study of in-situ solution mining[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2012, 43(3): 382-387. (in Chinese))
- [3] 邵保平, 赵阳升. 层状盐岩溶腔储气库长期运行稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(增2): 1562-1567. (Xi Baoping, Zhao Yangsheng. Investigation on stability of gas storage caverns in bedded rock salt[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(supp.2): 1562-1567. (in Chinese))
- [4] 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 Suguo, 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))
- [5] 杨晓琴, 梁卫国, 于艳梅, 等. 溶浸作用下难溶盐岩力学特性弱化及细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 134-143. (Yang Xiaoqin, Liang Weiguo, Yu Yanmei, et al. Mechanical property weakening and meso-mechanism of hard dissolved salt rock soaked in brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 134-143. (in Chinese))
- [6] 高红波, 梁卫国, 杨晓琴, 等. 高温盐溶液浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 935-943. (Gao Hongbo, Liang Weiguo, Yang Xiaoqin, et al. Experimental study of mechanical of gypsum rock soaked in hot saturated brine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(5): 935-943. (in Chinese))
- [7] 徐军, 梁卫国, 张继龙, 等. 不同离子浓度钙液环境中钙芒硝溶解试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 503-509. (Xu Jun, Liang Weiguo, Zhang Jilong, et al. Experimental research on glauberite dissolution in calcium liquid with different ion concentration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 503-509. (in Chinese))
- [8] 刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于CT图像的冻结岩石冰含量及损伤特性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 912-919. (Liu Hui, Yang Gengshe, Ye Wanjuan, et al. Analysis of ice content and damage characteristics of frozen rock based on pseudo-color enhanced CT image[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 912-919. (in Chinese))
- [9] 汤艳春, 周辉冯, 夏庭. 单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应的细观力学试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 294-302. (Tang Yanchun, Zhou Hui, Feng Xiating. Analysis of mesomechanical test of rock salt considering coupled stressed-dissolving effects under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 294-302. (in Chinese))
- [10] 高红波, 徐素国, 韩传磊, 等. 钙芒硝盐岩溶解机理细观研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 722-725. (Gao Hongbo, Xu Suguo, Han Chuanlei, et al. Study of meso-dissolution mechanism of glauberite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 722-725. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩物理力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1054-1059. (Xu Suguo, Liang Weiguo, Zhao Yangsheng. Study on physico-mechanical property of glauberite salt rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1054-1059. (in Chinese))
- [13] 吴池, 刘建锋, 周志威, 等. 岩盐三轴蠕变声发射特征研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增2): 328-323. (Wu Chi, Liu Jianfeng, Zhou Zhiwei, et al. Creep acoustic emission of rock salt under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Supp.2): 328-323. (in Chinese))