

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.03.004

# 复杂卸荷条件下卤水流量对盐岩溶解 损伤特征研究

张军伟<sup>1,2</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 陈 结<sup>1,3</sup>, 赵云峰<sup>1</sup>, 程艳飞<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆建工市政交通工程有限责任公司, 重庆 400021; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 为了解水溶造腔过程中盐腔围岩在应力-溶解耦合作用下的溶解损伤机制, 利用高温三轴盐岩溶解特性试验机, 开展了复杂卸荷条件下(即卸围压的同时增加轴压)不同卤水流量对盐岩的溶解损伤特征研究。研究发现, 盐岩的应力和溶解作用相互影响, 共同决定盐岩试件在卸荷溶解过程中的变化特征。表现为: 卸荷过程中偏应力越大, 盐岩溶出速率越大, 而且出水口卤水浓度随卸荷溶解时间呈现显著的二次函数关系; 盐岩在溶解作用下其力学强度降低, 变形能力不断增强, 而且流量越大, 变化趋势越明显。通过对盐岩卸荷溶解过程中有效溶解面积构成的分析, 建立了盐岩卸荷溶解作用下的有效溶解面积模型, 分别得到了各有效溶解面积随溶解时间和应力水平的变化方程, 并在此基础上构建了盐岩卸荷溶解损伤演化方程, 为进一步开展盐岩的损伤-溶解机制研究提供了理论和试验基础。

**关 键 词:** 盐岩溶解; 卸荷; 卤水流量; 有效溶解面积; 损伤演化

**中图分类号:** U 456.3+1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2017) 03 - 0640 - 10

## Effect of brine flux on damage and dissolving characteristics of rock salt under the condition of complex stress unloading

ZHANG Jun-wei<sup>1,2</sup>, JIANG De-yi<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1,3</sup>, ZHAO Yun-feng<sup>1</sup>, CHENG Yan-fei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for the Coal Mine Disaster Dynamics and Controls, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Construction Engineering Municipal Traffic Engineering Co., Ltd., 430021; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To understand the dissolution damage mechanism of the salt cavity surrounding rock in the process of water-soluble cavitation, the high-temperature triaxial dissolution testing machine is applied to conduct tests on salt rock specimens under complex unloading conditions (i.e. unloading confining pressure, increasing axial compression) with different brine flux. It is found that the stress and dissolution influence on each other, and the damage and dissolving characteristics of salt specimens are mutually decide in the process of unloading tests. It is shown that the higher the deviatoric stress is, the greater the amount of dissolved salt rock per unit time is. The outlet concentration of brine exhibits a significant quadratic function relation with the dissolving time. The mechanical strength of salt rock is constantly reduced and its capability of deformation is enhanced under the effect of dissolving. The greater the flux is, the more obvious change trend is. Then, a model of effective dissolving area under the coupled action of stress unloading and water dissolving is set up based on the analysis of effective dissolved area in unloading and dissolution of salt rock. The variation equations of the effective dissolution area with the dissolving time and stress level are obtained respectively. An unloading and dissolving damage evolution equation is established based on the effective dissolving area. The results can provide an important theoretical and experimental basis for further analysis of damage and dissolving mechanism of salt rock.

**Keywords:** salt rock dissolution; stress unloading; brine flux; effective dissolving area; damage evolution

## 1 引 言

盐岩体具有孔隙率低、渗透性小、损伤自恢复

能力强等优点, 再加上水文地质条件简单、分布广泛, 被国际上公认为是石油、天然气储备和放射性废物处置的理想场所<sup>[1-3]</sup>。目前, 建造盐岩储库普遍

收稿日期: 2015-03-26

基金项目: 中央高校基金 (No.106112016CDJZR245518); 国家自然科学基金 (No.51574048, No.41672292, No.51604044)

This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112016CDJZR245518) and the National Natural Science Foundation of China (51574048, 41672292, 51604044).

第一作者简介: 张军伟, 男, 1986 年生, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: cqj\_zjw@163.com

采用单井油垫对流法水溶开采<sup>[4]</sup>，因此，盐岩的溶解损伤特性研究是盐穴储库建腔的重要基础。目前，国内外学者对盐岩溶解性质做了大量研究，Durie 等<sup>[5]</sup>和 Saberian<sup>[6]</sup>做了大量基础性试验，得出流量和温度等一些基本因素对盐岩溶解速率影响分析，依据边界层理论推导出溶解速度基本方程；肖长富等<sup>[7]</sup>采用蒸馏水作为溶剂，研究盐岩溶解速率与溶液浓度之间关系；徐素国等<sup>[8]</sup>研究了不同溶剂对钙芒硝溶解速度的影响规律；李志萍等<sup>[9]</sup>采用芒硝矿石分析溶液温度、质量分数与溶解速率关系；姜德义等<sup>[10]</sup>研究了溶解面积、溶解面倾角、溶液浓度、溶液温度、水流速对盐岩溶解速率的影响规律，得到了各影响因素对盐岩溶解速率影响的主次顺序。

以上研究均是在无应力条件下对盐岩的溶解特性进行的分析，而在实际造腔过程中，盐岩处于三维应力状态下，此时，盐岩储库水溶造腔过程不同于普通情况下的溶解过程，它是一个应力与溶解强烈耦合作用的过程<sup>[11]</sup>。Bosworth<sup>[12]</sup>利用打有圆孔的盐岩晶体在加载条件下的溶解试验，分析了应变对盐岩表层溶解的影响，发现塑性应变在盐岩的溶解中比弹性应变发挥更大的作用。汤艳春等<sup>[13-15]</sup>研究了盐岩在单、三轴应力影响后的溶解试验，得出单轴压缩条件下盐岩的细观力学性质、建立了应力作用下盐岩的溶解模型、得出了三轴应力作用下盐岩溶解速率变化与不同围压下表面裂纹的发育与扩展有着直接的联系，但该系列试验中，盐岩的溶解过程与应力加载过程是分离的，并不能完全真实地反映应力与溶解的耦合作用；钱海涛<sup>[11, 16]</sup>在理论上分析了应力对盐岩溶解机制的影响，但这些理论分析缺少相应的试验数据印证；姜德义等<sup>[17]</sup>采用声波技术研究了盐岩在单轴载荷条件下的损伤特征对盐岩溶解速率的影响，该试验也没有实现应力与溶解过程的同步。以上研究的不足很大的一个制约因素是缺少相应的盐岩应力-溶解耦合试验平台。任松等<sup>[18]</sup>研制出一款高温三轴盐岩溶解特性试验机，成功解决了高温及三轴条件下溶解水流通过盐岩试样的关键技术问题和高温环境下的系列密封、加压稳压及仪器腐蚀等问题，在此基础上姜德义等<sup>[19]</sup>、宋书一等<sup>[20]</sup>开展了三轴应力作用下盐岩溶解特性试验分析，研究了溶液浓度、温度、流量和偏应力 4 个因素对盐岩溶解速率的耦合影响规律，并获得了一些研究成果。

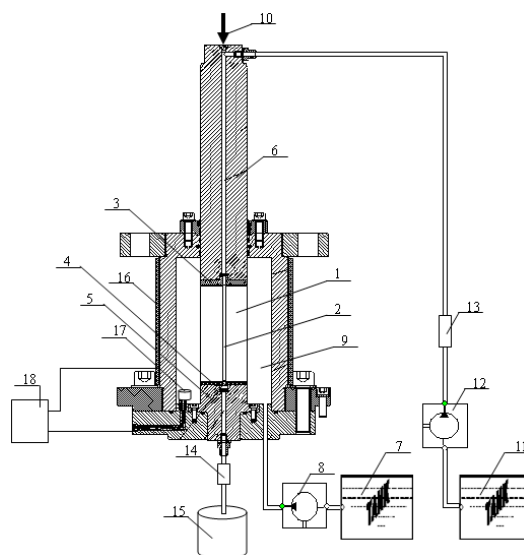
总体来说，目前国内在盐岩应力-溶解耦合作用方面的研究尚显不足。针对上述问题，本文基于水

溶造腔过程中盐穴围岩所处的特殊应力及水溶环境，利用高温三轴盐岩溶解特性试验机，开展了复杂卸荷条件下不同流量对盐岩的溶解损伤特征研究，分析了应力和不同流量的溶液对盐岩的溶解特征和损伤特征的影响规律，建立了盐岩卸荷溶解有效溶解面积的模型并揭示了其演化规律，在此基础上构建了盐岩溶解损伤演化方程，为进一步开展盐岩的损伤-溶解机制研究提供了理论和试验基础。

## 2 试验设备和方法

### 2.1 试验设备

盐岩卸荷溶解试验是在重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自行研制的高温三轴应力盐岩溶解特性试验机上进行。试验机主要由轴压、围压伺服系统、加温及保温系统和溶解水供应系统、数据采集系统 4 部分组成，如图 1 所示。该设备能够进行三轴应力状态下盐岩的应力-温度-溶解耦合试验。最高试验温度为 90℃，最大轴向压力为 400 kN，最大围压为 30 MPa，轴力误差精度小于示值的±0.8%，位移误差精度小于±0.8%。流量计采用 LZB-4 玻璃转子流量计，测量范围为 1.6~16 L/h，最小分度值为 0.4 L/h。卤水浓度采用 SA287 电子盐度计，测量范围为 0~100 ppt，分辨率为 0.1 ppt。



1 - 盐岩试样; 2 - 通水小孔; 3 - 上压头; 4 - 下压头; 5 - 压座; 6 - 压杆; 7 - 油缸; 8 - 双路伺服液站; 9 - 围压室; 10 - 轴压; 11 - 溶解液缸; 12 - 高压卤水泵; 13 - 流量计; 14 - 溢流阀; 15 - 溶解液容器; 16 - 硅橡胶加热带; 17 - 高压温度传感器; 18 - 温度微控制器

图 1 三轴应力条件下盐岩溶解特性试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of testing machine used for salt rock dissolution under triaxial stress conditions

### 2.2 试样制备

试样为巴基斯坦喜马拉雅山区天然盐岩，白色

中加杂淡红色，密度为  $2.338 \text{ g/cm}^3$ ，其成分和质量百分含量见表 1。试样加工成直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准圆柱体，在试样轴向中心钻一个直径为 6 mm 的通水小孔。取样和加工严格按照试验规范进行。加工好的试样尺寸误差在  $\pm 1 \text{ mm}$  以内，如图 2 所示。

表 1 盐岩试样的成分(单位:%)  
Table 1 Components of salt rock specimen (unit: %)

可溶物		不溶物
NaCl	$\text{K}_2\text{SO}_3$	少量泥质
99.4	0.4	0.2



图 2 试验试件  
Fig.2 Testing specimens

### 2.3 试验方法

水溶造腔过程中盐腔围岩经历了侧向围压卸荷和竖向应力增加的应力变化过程，为了模拟水溶造腔过程中盐腔围岩在卤水溶解作用下的应力变化特征，设计了复杂卸荷条件下的盐岩溶解试验。试验从盐岩的静水压力状态开始，在卸围压的同时增大轴压，并同时向试件内通一定流量的纯水，直到试件围压卸荷至 0 MPa 停止试验。盐岩溶解试验的示意图如图 3 所示。为了研究流量对盐岩三轴溶解特征的影响，分别设置了 5 个流量梯度进行试验，每个流量梯度为一组，每组 3 个试件。所有试验的初始应力状态和卸荷速率均相同，且均在室温(26 )条件下进行，试验方案如表 2 所示。详细的试验过程如下：

(1) 将加工好的干燥盐岩试件装入试验机，然后加围压至预定目标值 5 MPa，再加轴压至预定目标值 9.6 kN；

(2) 打开溶解液阀门通纯水，迅速调节纯水流量至设定值；

(3) 在完成第(2)步后，开始以 0.005 MPa/s 的速率卸围压，同时以 0.2 mm/min 的加载速率增大轴压，期间每隔 1 min 用小烧杯接取出水口流出的卤水 20 ml，用电子盐度计测出卤水浓度并记录，

直至围压卸荷至 0 MPa 停止试验。

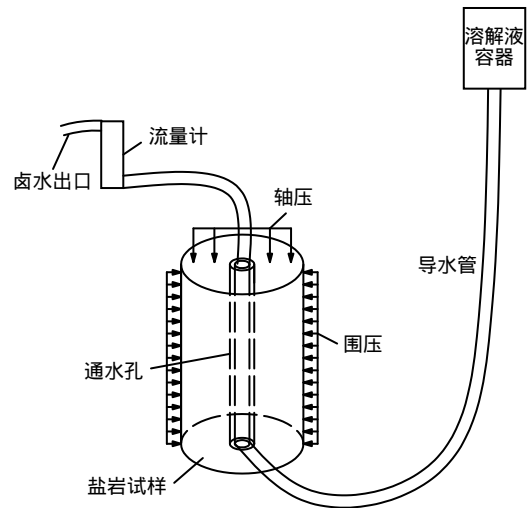


图 3 盐岩溶解原理示意图  
Fig.3 Schematic diagram of salt rock dissolution principle

表 2 三轴卸荷条件下盐岩溶解试验方案  
Table 2 Testing scheme of salt rock dissolution under the triaxial unloading condition

试件分组	A	B	C	D	E
流量/(L/h)	4	6	8	10	0

## 3 试验结果分析

### 3.1 流量对盐岩溶解特征的影响

图 4 是试验结束后盐岩试件的通水孔径变化趋势。图中从左至右对应的流量依次是 0、4、6、8、10 L/h，从图中明显可以看出，盐岩试件的通水孔径随流量变化的趋势十分明显。

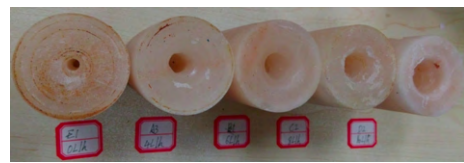


图 4 不同流量下试验结束时试件通水孔径变化  
Fig.4 Water pore size of specimens at the end of test changes along with different flux

图中各试件对应的卸荷溶解试验出水口卤水的质量百分浓度如表 3 所示。这里假设出水口单位质量的卤水体积与该卤水所含水的体积相同，则表中的出水口卤水质量体积浓度计算公式可以用下式计算得到：

$$\rho_{\text{卤水}} = \frac{mA}{m(1-A)/\rho_{\text{水}}} = \frac{A}{1-A} \quad (1)$$

式中： $\rho_{\text{卤水}}$  为卤水质量体积浓度 (g/ml)； $m$  为单位时间内出水口卤水质量 (g)； $A$  为电子盐度计所读

取的卤水质量百分浓度 (ppt) (1 ppt=0.1%) ;  $\rho_{\text{水}}$  为常温下纯水的质量体积浓度, 取 1 g/ml。

表 3 试验过程中出水口卤水浓度  
Table 3 Outlet brine concentration in process tests

卸荷溶解时间 / min	4 L/h		6 L/h		8 L/h		10 L/h	
	A / ppt	M / (g/min)	A / ppt	M / (g/min)	A / ppt	M / (g/min)	A / ppt	M / (g/min)
1	6.1	0.41	5.3	0.53	4.7	0.63	4.2	0.70
2	6.8	0.46	6.0	0.60	5.1	0.68	4.6	0.77
3	7.3	0.49	6.6	0.66	5.3	0.71	4.7	0.79
4	7.3	0.49	6.8	0.68	5.4	0.72	4.8	0.80
5	7.6	0.51	7.1	0.72	5.6	0.75	4.9	0.82
6	7.9	0.53	7.1	0.72	5.7	0.76	5.1	0.85
7	8.3	0.56	7.3	0.74	5.9	0.79	5.2	0.87
8	8.7	0.59	7.3	0.74	6.2	0.83	5.3	0.89
9	8.9	0.60	7.6	0.77	6.4	0.86	5.4	0.90
10	9.1	0.61	7.9	0.80	6.5	0.87	5.5	0.92
11	9.4	0.63	7.9	0.80	6.7	0.90	5.7	0.96
12	9.7	0.65	8.0	0.81	6.9	0.93	5.9	0.99
13	10.0	0.67	8.3	0.84	7.0	0.94	6.0	1.01
14	10.2	0.69	8.3	0.84	7.2	0.97	6.2	1.04
15	10.4	0.70	8.7	0.88	7.4	0.99	6.3	1.06
16	10.7	0.72	8.7	0.88	7.5	1.01	6.4	1.07
17	11.0	0.74	8.9	0.90	7.7	1.03	6.5	1.09

由式 (1) 可知, 单位时间内盐岩试件的溶解质量  $M$  可由下式得到:

$$M = \frac{1000}{60} \rho_{\text{卤水}} Q_{\text{卤水}} = \frac{50 \rho_{\text{卤水}} Q_{\text{卤水}}}{3} \quad (2)$$

式中:  $M$  单位为 (g/min);  $Q_{\text{卤水}}$  为卤水溶液流量 (L/h)。

各流量下单位时间内盐岩的溶解质量见如表 3 所示。从表中可以看出, 盐岩试件在卸荷的初期就表现出随流量的增大单位时间内盐岩溶解质量不断增大的趋势。从化学动力学的观点来看, 溶液在空间上的浓度差是盐岩中氯化钠发生溶解反应的动力, 由于盐岩具有极其致密性, 溶解过程主要发生在盐岩表层, 盐岩表层和远离矿物区域溶液间的浓度差促使蚀蚀边界层内的盐类物质向低浓度的方向扩散; 此外, 在盐岩溶解过程中, 除了存在扩散作用以外, 还存在对流现象, 不同注水流量形成的强迫对流使得溶质分子在流体中不断分散, 引起物质运输过程中溶液浓度场的变化<sup>[21]</sup>, 而且流量越大对流作用越明显, 溶液浓度也越低 (见表 3), 盐岩表层与溶液间的浓度差越大, 从而加剧了盐岩的溶解反应。因此, 在相同应力和环境温度情况下, 水溶液流量对盐岩的溶解特征有着显著的影响 (见图 5)。

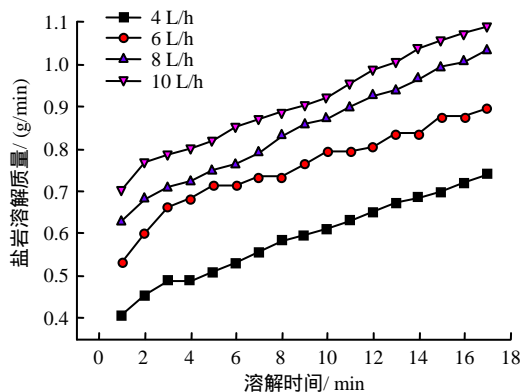


图 5 不同流量下盐岩溶解特征  
Fig.5 Dissolving characteristics of salt rock with different flux

但随着流量不断增大, 单位时间内盐岩溶解质量增大的比例却在降低。以第 10 min 时的溶解特征为例 (见图 6), 当水流量为 4 L/h 时, 盐岩单位时间内的溶解的质量为 0.612 2 g, 当水流量为 6 L/h 时, 盐岩单位时间内的溶解的质量为 0.796 3 g, 单位时间盐岩溶解质量增加了 30.1%; 当流量从 6 L/h 增大到 8 L/h 时, 这一增长比例仅为 9.6%; 而当流量由 8 L/h 增大到 10 L/h 时, 这一增长比例降为 5.7%。可见, 流量的增大在一定程度上能增大盐岩单位时间的溶解量, 但是流量与盐岩溶出速率 (单位时间内盐岩溶解的质量) 却并不是线性的关系。

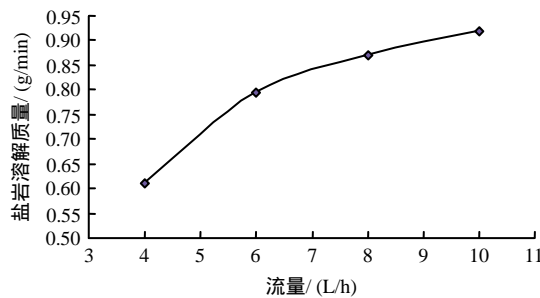


图 6 相同时间段不同流量盐岩单位时间溶解质量变化趋势

Fig.6 Change trend of dissolved amount of testing specimens per unit time in the same period with different flux

此外, 虽然流量能改变盐岩单位时间的溶解质量, 但在相同应力条件下盐岩的溶解量变化趋势是相同的, 早期均表现为 (偏应力较低时) 单位时间溶解量较小, 随着溶解时间的增加, 单位时间的溶解量不断增大。通过对流量 4 L/h 时出水口卤水浓度的监测及拟合发现, 在试验过程中该浓度随溶解时间呈现显著的二次函数关系, 如图 7 所示, 拟合度达到了 0.994 4。而且各流量情况下出水口的卤水

浓度均有相似特征，其拟合关系见表 4。

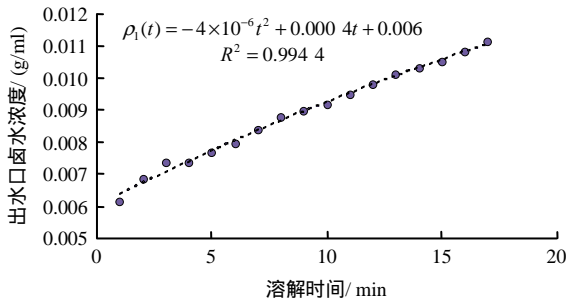


图 7 试件 A3 出水口卤水浓度随时间变化规律

Fig.7 Curve of outlet brine concentration along dissolution time of specimen A3

表 4 不同流量情况下出水口卤水浓度与溶解时间的拟合关系

Table 4 Fitting functions of outlet brine concentration and dissolution time for different flux

流量/(L/h)	出水口卤水浓度 $\rho_1(t)$ 拟合公式	拟合度/ $R^2$
4	$\rho_1(t) = -4 \times 10^{-6} t^2 + 0.0004t + 0.0060$	0.9944
6	$\rho_1(t) = -7 \times 10^{-6} t^2 + 0.0003t + 0.0055$	0.9632
8	$\rho_1(t) = -1 \times 10^{-6} t^2 + 0.0002t + 0.0046$	0.9961
10	$\rho_1(t) = -3 \times 10^{-7} t^2 + 0.0001t + 0.0042$	0.9915

### 3.2 应力状态对盐岩溶解特征的影响

图 8 为试件 A3 在卸荷过程中的偏应力及出水口卤水每分钟溶解的盐岩质量。从图中可以看出，在卸荷初期，盐岩处于弹性变形阶段，卤水溶出速率最小；随着偏应力的不断增大，盐岩逐渐进入屈服阶段，卤水溶出速率也不断随之增大。这一特征存在于所有的卸荷溶解试验中。这主要是由于在相同的溶解环境中盐岩的溶解速率是相同的，当溶解作用面增大时，相同时间内的溶解量也相应增大，而在整个卸荷溶解试验中，盐岩的有效溶解面积在不断增加。

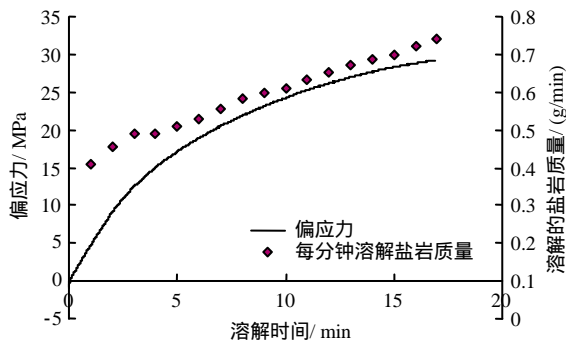


图 8 卸荷过程中盐岩溶解特征

Fig.8 Dissolution characteristics of salt rock in different stress states

一方面，试件中部的通水小孔是溶解液的主要

通道，在水的溶解作用下通水小孔的半径会不断扩展；在溶解试验初期，通水孔径较小，孔壁表面积相对较小，相同流量情况下单位时间内溶解的盐岩质量也较小，而随着溶解时间的增加，通水孔径逐渐增大，通水孔壁的表面积也不断扩大，从而使单位时间内溶解的盐岩质量也不断增加。

另一方面，盐岩试件的应力状态对其有效溶蚀面积的改变产生了重大影响。具体表现在，弹性阶段盐岩在轴压和围压的作用下相对比较致密，盐岩内部的微孔、微裂隙在应力作用下闭合；而且，该阶段的偏应力较小，通水孔径因盐岩试件卸荷产生的变形量也较小，从而使得盐岩卸荷的初始阶段水溶液的有效溶解面积相对较小，相同流量情况下单位时间内溶解的盐岩质量也较小。而当盐岩在偏应力作用下进入屈服阶段时，盐岩内部的孔裂隙不断发育、扩展、汇集，为水溶液浸入盐岩内部提供了通道；同时，随着围压的进一步卸荷，盐岩试件的偏应力不断增大，试件径向发生膨胀变形，引起通水孔径因盐岩试件的黏弹性变形而不断增大，从而增大了试件内部的有效溶解面积，使得盐岩溶出速率也随之增大。可见，应力状态能通过改变盐岩本身的结构特征来影响其溶解特征。

### 3.3 流量对盐岩力学特征的影响

试验过程中还发现，盐岩的溶解对盐岩力学强度也有着明显的影响。如图 9 所示，无溶解作用的盐岩在卸荷过程中其承载的偏应力明显比有溶解条件下盐岩的偏应力要大，而且相同应变情况下，盐岩的偏应力随溶解液流量的增加而逐渐减小，尤其当流量达到 10 L/h 后盐岩的力学强度降低的尤为明显；在相同偏应力条件下，盐岩的轴向应变和径向应变则随流量的增大而增大。

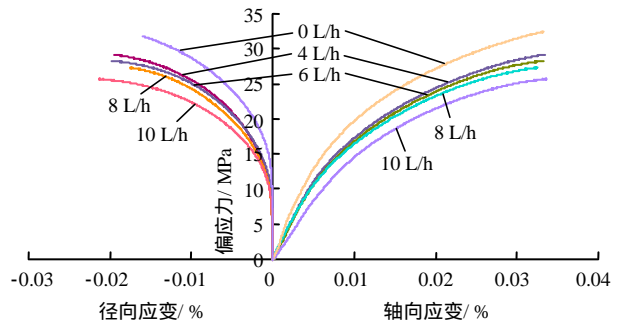


图 9 不同流量下盐岩的应力应变特征

Fig.9 Stress-strain characteristics of salt rock at different flux rates

图 10 反映了盐岩的弹性模量和泊松比随流量的变化趋势，从图中可以看出，盐岩在无溶解卸荷

试验中的弹性模量相较于流量为 4 L/h 时降低了 14% ,泊松比增加了 11.2% ;在流量从 4 L/h 到 10 L/h 时,盐岩的弹性模量降低程度和泊松比增大趋势均越来越大。这说明盐岩在溶解作用下其力学强度在降低,变形能力在不断增强,而且流量越大,变化趋势也越明显。

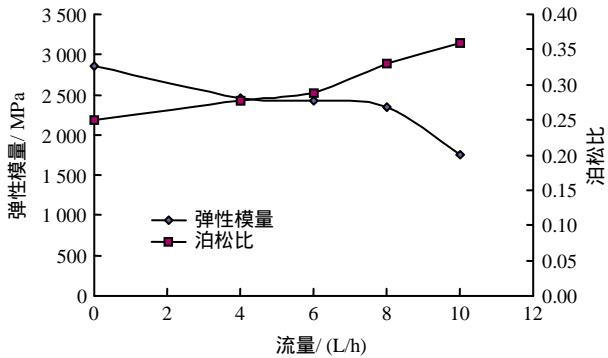


图 10 盐岩的弹性模量和泊松比与流量的关系

Fig.10 Change trend of elastic modulus and Poisson ratio of salt rock with different flux

一方面这是由于通水孔径在水分子的溶解作用下不断扩大,使得盐岩试件的有效承载面积减小,损伤加剧,抵抗变形的能力也相应降低,而且流量越大,这种趋势越明显;另一方面在通水孔壁处存在着因后期钻孔产生的损伤裂隙以及盐岩自身的原生孔裂隙,这些导水裂隙表面的盐岩在水分子作用下不断溶解,使得其孔裂隙不断发育,盐岩损伤不断增大强度被软化,尤其当流量增大时加速了溶解面上盐岩固体的溶解,致使盐岩强度劣化更加明显。结合 3.2 节的分析可知,盐岩的应力和溶解是一个相互耦合作用的过程,二者相互影响,共同决定盐岩试件在卸荷溶解过程中的变化特征。

#### 4 盐岩有效溶解面积模型

试验过程中,盐岩试样的有效溶解面积主要由两部分组成:一部分是由于水溶液对通水孔壁处的盐岩由表及里的溶解引起的有效溶蚀面积增加量,设此部分的有效溶解面积为  $A_1$ ;另一部分是在应力作用下盐岩内部孔裂隙不断扩展、贯通至通水孔壁,以及通水孔径因盐岩试件的黏弹性变形不断增大而引起的有效溶解面积增加,设此部分的有效溶解面积为  $A_2$ 。而且,两部分有效溶解面积在卸荷试验过程中均是时间的函数,因此,可以得出下式:

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) \quad (3)$$

式中:  $A(t)$  为盐岩总的有效溶解面积。

如果假设在卸荷过程中,通水孔始终是一个理

想圆柱体,只是在偏应力作用下其高度不断减小,在卤水溶解作用下其半径不断扩大。那么,  $A_1(t)$  满足下式:

$$A_1(t) = 2\pi r(t)h(t) \quad (4)$$

式中:  $r(t)$  为  $t$  时刻通水孔的半径;  $h(t)$  为  $t$  时刻通水孔的高。

$$r(t) = bt + r_0 \quad (5)$$

$$h(t) = H - at \quad (6)$$

式中:  $b$  为通水小孔内径扩展速率 (cm/s);  $r_0$  为通水孔初始半径 (cm);  $H$  为通水孔初始高度 (cm);  $a = 0.02$  cm/min 为试件轴向变形速率,等于轴向加载速率。

如图 11 所示,  $t$  时间内卤水在  $S$  面积上的溶解深度为  $L$ 。由盐岩溶解速率定义:单位面积单位时间内溶解的盐岩质量,可知:

$$v = \frac{m_{\text{salt}}}{St} = \frac{\rho_{\text{salt}}SL}{St} = \rho_{\text{salt}}b \quad (7)$$

式中:  $v$  为溶解速率 ( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ ),在相同溶解条件下为常数;  $m_{\text{salt}}$  为  $t$  时间内溶解的盐岩质量;  $\rho_{\text{salt}}$  为盐岩密度。

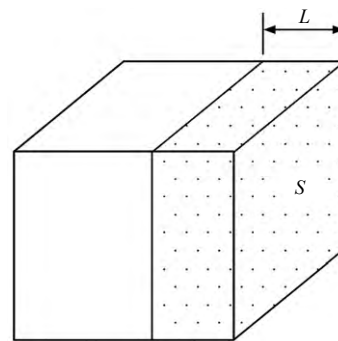


图 11 单位体积盐岩的溶解深度示意图

Fig.11 Schematic diagram of rock salt's dissolving depth with unit volume

故,联立以上各式可得

$$r(t) = \frac{v}{\rho_{\text{salt}}}t + r_0 \quad (8)$$

$$A_1(t) = 2\pi \left( \frac{v}{\rho_{\text{salt}}}t + r_0 \right) (H - at) \quad (9)$$

由盐岩溶解速率定义可知

$$A(t) = \frac{dm}{vdt} \quad (10)$$

卸荷溶解试验中,单位时间内流出试件的卤水

质量可以由下式计算得出

$$dm = [\rho_1(t) - \rho_2]Qdt \quad (11)$$

式中： $\rho_1(t)$  为出水口的卤水浓度； $\rho_2$  为进水口的卤水浓度，这里为纯水，取 0 g/ml； $Q$  为出水口流量。

由式 (10) (11) 可得

$$A(t) = \frac{[\rho_1(t) - \rho_2]Q}{v} \quad (12)$$

那么，联立式 (9) (12)，得

$$A(t) = \frac{[\rho_1(t) - \rho_2]Q}{v} - 2\pi \left( \frac{v}{\rho_{\text{salt}}} t + r_0 \right) (H - at) \quad (13)$$

由王春荣<sup>[22]</sup>的溶解试验数据知，溶解速率与流量存在如下关系式：

$$v = 0.583 2e^{0.003 1Q} \quad (14)$$

故式 (13) 变为

$$A_2(t) = \frac{[\rho_1(t) - \rho_2]Q}{0.583 2e^{0.003 1Q}} - 2\pi \left( \frac{0.583 2e^{0.003 1Q}}{\rho_{\text{salt}}} t + r_0 \right) (H - at) \quad (15)$$

式 (15) 即是盐岩试件在复杂卸荷过程中因应力状态改变引起的有效溶解面积改变量。

为了定量描述该有效溶解面积与应力状态之间的关系，可以建立盐岩试件偏应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  与卸荷时间  $t$  (也是溶解时间) 之间的关系  $f(\sigma_1 - \sigma_3, t)$ ，以及出水口的卤水浓度  $\rho_1$  与盐岩偏应力之间的关系  $f(\sigma_1 - \sigma_3, \rho_1)$ ，然后将两个方程代入式 (15) 即可得到应力状态与盐岩溶解有效溶蚀面积之间的定量关系。

这里，以 4 L/h 流量下 A3 试件的卸荷溶解试验数据为例，利用 Origin 软件对试验数据拟合，发现  $f(\sigma_1 - \sigma_3, t)$  与  $f(\sigma_1 - \sigma_3, \rho_1)$  均符合 ExpDec1 函数关系，如图 12、13 所示。各拟合方程分别为

$$t = -0.683 2 + 1.149 6 \text{EXP} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{10.836 84} \right) \quad (16)$$

$$\rho_1 = 0.005 48 + 6.413 8 \times 10^{-4} \text{EXP} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{13.646 92} \right) \quad (17)$$

将式 (16) (17) 代入式 (15) 得

$$A_2 = \frac{\left[ 5.48 + 0.641 38 \text{EXP} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{13.646 92} \right) - \rho_2 \right] Q}{0.583 2 \text{EXP}(0.003 1Q)} \cdot \left\{ \frac{0.583 2\pi \text{EXP}(0.003 1Q)}{30\rho_{\text{salt}}} \cdot \left[ -0.683 2 + 1.149 64 \text{EXP} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{10.836 84} \right) \right] + 2\pi r_0 \right\} \cdot \left[ H + 0.683 2a - 1.149 64a \text{EXP} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{10.836 84} \right) \right] \quad (18)$$

式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为最大和最小主应力 (MPa)； $\rho_{\text{salt}} = 2.33 8 \text{g/cm}^3$ 。

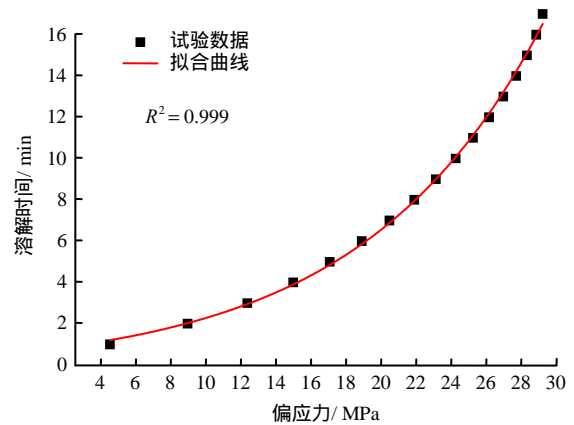


图 12 A3 试件偏应力与溶解时间关系曲线  
Fig.12 Curve of dissolving time - deviatoric stress of specimen A3 in the process of unloading dissolving test

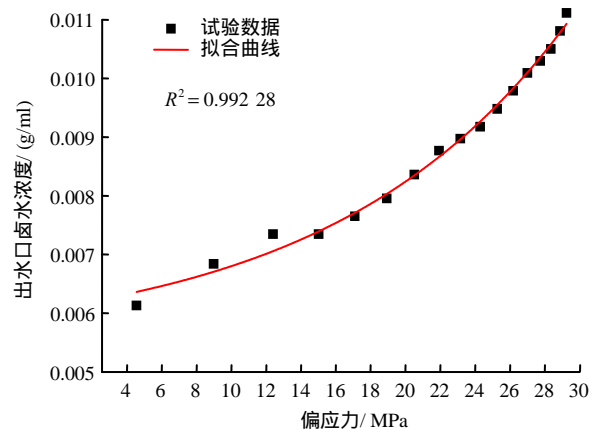


图 13 A3 试件偏应力与出水口卤水浓度关系曲线  
Fig.13 Curve of outlet brine concentration-deviatoric stress of specimen A3 in unloading dissolving test process

试验中， $Q = 4 \text{L/h}$ ， $\rho_2 = 0$ ， $r_0 = 0.3 \text{cm}$ ， $a = 0.02 \text{cm/min}$ 。将各参数代入式 (18) 即可得试验过程中 A3 试件的有效溶解面积  $A_2$  与偏应力  $\sigma_1 - \sigma_3$  之间的关系，如图 14 所示。从图中可以看出，在溶解

试验开始前盐岩内部已经产生了有效溶解面积，这部分有效溶解面积，主要是由盐岩通水孔钻孔时产生的损伤裂隙及原岩内部的原始孔裂隙组成。随着卸荷试验地进行，试件所受偏应力不断增大，盐岩的有效溶解面积  $A_2$  也逐渐增大，并且在盐岩试件进入屈服区时，随着盐岩内部损伤和通水孔径的不断增大， $A_2$ -偏应力曲线的斜率也呈增大趋势。在围压卸荷至 0 时，盐岩内部有效溶解面积达到最大值。

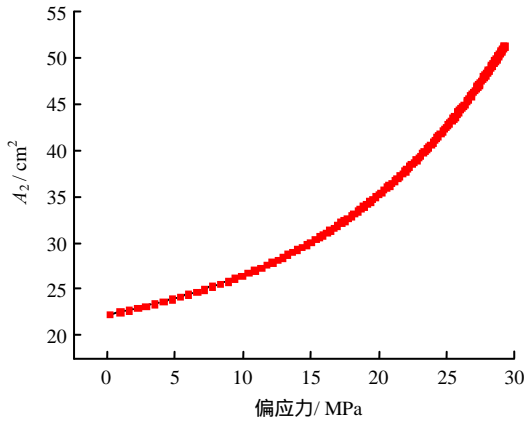


图 14 卸荷试验过程中 A3 试件的有效溶解面积  $A_2$  与偏应力关系曲线

Fig.14 Relationship between effective solution area  $A_2$  and deviation stress of specimen A3 during the unloading test

其他流量下盐岩内部有效溶解面积随时间的变化公式均可由以上方法推导得出。

### 5 基于有效溶解面积的损伤定义

在卸荷溶解试验过程中，盐岩在偏应力的作用下产生变形，使得通水孔的高度减小，并造成盐岩内部孔裂隙的发育及扩展，这为卤水的浸入提供了通道；而卤水的溶解作用使得通水孔径不断扩大，造成盐岩的有效承载面积减小，同时，卤水沿着通水孔壁处的裂隙进入盐岩内部，在卤水的溶解作用下盐岩内部孔裂隙体积进一步扩大、贯通，导致盐岩损伤不断增大。可见，卤水溶解作用加剧了盐岩的损伤。这里用盐岩的有效溶解面积来定义盐岩的标量型损伤变量为

$$D = \frac{A(t) - A_0}{A_s - A_0} \quad (19)$$

式中： $A_0$  为初始有效溶解面积； $A_s$  为试件破坏时的有效溶解面积。

将式 (12)、(14) 和式 (17) 代入式 (19)，可得

$$D = \frac{\left[ a_1 + a_2 \exp\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{a_3}\right) - \rho_2 \right] Q - 0.583 \cdot 2e^{0.003 \cdot 1Q} A_0}{0.583 \cdot 2e^{0.003 \cdot 1Q} (A_s - A_0)} \quad (20)$$

式中： $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  为盐岩偏应力与出水口卤水浓度关系曲线的拟合系数。式 (20) 即为盐岩卸荷溶解试验过程中的损伤演化方程。可以看出，盐岩的卸荷溶解损伤与盐岩的所处的应力水平、溶解液流量  $Q$ 、溶液初始浓度  $\rho_2$  等密切相关。

由于在整个卸荷过程中盐岩试件并没有达到破坏，因此，本次试验中利用式 (20) 无法获得盐岩的卸荷溶解损伤演化公式。但该方法为研究盐岩储库建腔期腔体围岩的卸荷溶解损伤过程提供了一条新的途径，在后期的研究中，将更深入的研究应力状态、溶解环境（包括温度、流速、溶解液浓度等）对盐岩的溶解损伤规律。

### 6 结 论

(1) 应力状态能通过改变盐岩本身的结构特征来影响其溶解特征，表现为偏应力越大，盐岩有效溶解面积越大，溶出速率越大。

(2) 相同应力条件下，流量越大，盐岩在单位时间内的溶解质量越大，而且出水口卤水浓度随溶解时间呈现显著的二次函数关系。

(3) 盐岩在溶解作用下其力学强度降低，变形能力不断增强，而且流量越大，变化趋势越明显。

(4) 建立了盐岩卸荷溶解作用下的有效溶解面积模型，并在此基础上构建了盐岩卸荷溶解损伤演化方程。

### 参 考 文 献

[1] WAWERSIK W R, STONE C M. A Characterization of pressure records in inelastic rock demonstrated by hydraulic fracturing measurements in salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1989, 26(6): 613 - 627.

[2] CHAN K S, MUNSON D E, BODNER S R F. Cleavage and creep fracture of rock salt[J]. *Acta Material*, 1996, 44(9): 3553 - 3565.

[3] 杨春和, 梁卫国. 中国盐岩能源地下储存可行性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(24): 4409 - 4417. YANG Chun-he, LIANG Wei-guo. Investigation on possibility of energy storage in salt rock in China[J].



- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4409 - 4417.
- [4] 王清明. 盐类矿床水溶开采[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.  
WANG Qing-ming. Solution mining in salt deposits[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [5] DURIE R W, JESSEN F W. The influence of surface features in the salt dissolution process[J]. **Society of Petroleum Engineers Journal**, 1964, 4(3): 275 - 281.
- [6] SABERIAN A. Cavity development in a three layer bedded salt model. Solution mining Research Institute file[R]. [S. l.]: [s. n.], 1977.
- [7] 肖长富, 阳友奎, 吴刚, 等. 盐岩溶解特性及其传质过程的研究[J]. 重庆大学学报, 1993, 16(2): 51 - 57.  
XIAO Chang-fu, YANG You-kui, WU Gang, et al. The dissolution characteristics of rock salt and mass transmission process[J]. **Journal of Chongqing University**, 1993, 16(2): 51 - 57.
- [8] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝盐岩溶解特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(6): 253 - 255.  
XU Su-guo, LIANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng. Experimental study on dissolution characteristics of glauberite of rock salt[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2005, 36(6): 253 - 255.
- [9] 李志萍, 赵阳升. 芒硝溶解特性的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(3): 329 - 312.  
LI Zhi-ping, ZHAO Yang-sheng. The experimental research of the dissolution characteristics of rock salt[J]. **Journal of Taiyuan University of Technology**, 2003, 34(3): 329 - 312.
- [10] 姜德义, 王春荣, 任松, 等. 盐岩溶解速率影响因素的实验[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(9): 126 - 130.  
JIANG De-yi, WANG Chun-rong, REN Song, et al. Experiments of the influencing factors on dissolution rate of rock salt[J]. **Journal of Chongqing University**, 2012, 35(9): 126 - 130.
- [11] 钱海涛, 谭朝爽, 李守定, 等. 应力对盐岩溶解机制的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 757 - 764.  
QIAN Hai-tao, TAN Zhao-shuang, LI Shou-ding, et al. Analysis of effect of stress on dissolution mechanism of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 757 - 764.
- [12] BOSWORTH W. Strain-induced preferential dissolution of halite[J]. **Tectonophysics**, 1981, 78: 509 - 525.
- [13] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 单轴压缩条件下盐岩应力—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 Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Analysis of mesomechanical test of rock salt considering coupled stress dissolving effects under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 294 - 302.
- [14] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下盐岩的溶蚀模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 296 - 302.  
TANG Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Study of dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 296 - 302.
- [15] 汤艳春, 房敬年, 周辉. 三轴应力作用下盐岩溶蚀特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1601 - 1607.  
TANG Yan-chun, FANG Jing-nian, ZHOU Hui. Experimental study of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1601 - 1607.
- [16] 钱海涛, 孙强, 王思敬. 地应力对碳酸盐岩溶解和岩溶发育的影响[J]. 中国地质大学学报(地球科学), 2014, 39(7): 896 - 904.  
QIAN Hai-tao, SUN Qiang, WANG Si-jing. Effects of geo-stress on carbonate dissolution and karst evolution[J]. **Journal of China University of Geosciences (Earth Science)**, 2014, 39(7): 896 - 904.
- [17] 姜德义, 陈结. 应力损伤盐岩的声波、溶解试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3569 - 3573.  
JIANG De-yi, CHEN Jie. Experimental research on acoustic and dissolved properties of stress damaged salt rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3569 - 3573.
- [18] 任松, 杨春和, 姜德义. 高温三轴盐岩溶解特性试验机研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 289 - 295.  
REN Song, YANG Chun-he, JIANG De-yi. Development of a new triaxial testing machine with high temperature for dissolution characteristics of salt rock and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 289 - 295.

- SU Hui, YANG Shi-fei, GU Guo-rong. Analysis of an elastoplastic constitutive model of soil based on pressure meter test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, (Supp.1): 131 - 136.
- [6] 沈国富, 苏立凡. 弹塑性冻结壁厚度的计算[J]. 煤炭科学技术, 1977, 5(12): 39 - 42.
- SHEN Guo-fu, SU Li-fan. The elasto-plastic computation of frozen sidewall thickness[J]. **Coal Science and Technology**, 1977, 5(12): 39 - 42.
- [7] 王建州. 深厚表土层非均质厚冻结壁力学特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
- WANG Jian-zhou. Research on the mechanical properties of inhomogeneous thick frozen wall in deep alluvium[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.
- [8] 梁惠生. 冻结凿井中冻结壁的弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 1980, (2): 23 - 32.
- LIANG Hui-sheng. Analysis of elasto-plasticity of frozen wall in shaft sinking[J]. **Journal of China Coal Society**, 1980, (2): 23 - 32.
- [9] 汪仁和, 李栋伟, 王秀喜. 摩尔-库仑强度准则计算冻结壁应力场和位移场[J]. 工业建筑, 2005, 35(10): 40 - 42.
- WANG Ren-he, LI Dong-wei, WANG Xiu-xi. Calculating frozen wall stress and displacement fields by Mohr-Coulomb strength criterion[J]. **Industrial Construction**, 2005, 35(10): 40 - 42.
- [10] 胡向东. 卸载状态下与周围土体共同作用的冻结壁力学模型[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 507 - 511.
- HU Xiang-dong. A mechanical model of interaction of frozen soil wall and surrounding earth mass in unload state[J]. **Journal of China Coal Society**, 2001, 26(5): 507 - 511.
- [11] 杨维好, 杨志江, 柏东良. 基于与围岩相互作用的冻结壁弹塑性设计理论[J]. 岩土工程学报, 2013, 1: 175 - 180.
- YANG Wei-hao, YANG Zhi-jiang, BO Dong-liang. Elastic-plastic design theory of frozen soil wall based on interaction between frozen wall and surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 1: 175 - 180.
- [12] 周晓敏, 管华栋, 罗晓青, 等. 竖井圆形冻结壁弹性设计理论的对比研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 247 - 251.
- ZHOU Xiao-Min, GUAN Hua-dong, LUO Xiao-qing, et al. Comparative study of elastic design theories of circular frozen wall of shaft[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Supp.1): 247 - 251.
- [13] 周晓敏, 陈建华, 罗晓青. 孔隙型含水基岩段竖井井壁厚度拟订设计研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1174 - 1178.
- ZHOU Xiao-min, CHEN Jian-hua, LUO Xiao-qing. Research on the preliminary thickness design of shaft lining in porous aquifer[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(9): 1174 - 1178.

---

### 上接第 648 页

- [19] 姜德义, 宋书一, 任松, 等. 三轴应力作用下盐岩溶解速率影响因素分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1025 - 1030.
- JIANG De-yi, SONG Shu-yi, REN Song, et al. Analysis of factors influencing rock salt dissolution rate under triaxial stress effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1025 - 1030.
- [20] 宋书一, 姜德义, 任松, 等. 三轴应力作用下盐岩溶解特性试验分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(9): 14 - 20.
- SONG Shu-yi, JIANG De-yi, REN Song, et al. Experiment analysis on dissolution characteristics of rock salt on the effect of triaxial stress[J]. **Journal of Chongqing University**, 2013, 36(9): 14 - 20.
- [21] 赵志成. 盐岩储气库水溶建腔流体输运理论及溶腔形态变化规律研究[D]. 河北: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2003.
- ZHAO Zhi-cheng. Theory of fluid transportation and configuration development in solution mining cavern for underground gas storage[D]. Hebei: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [22] 王春荣. 盐岩溶解速率影响因素实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 35 - 39.
- WANG Chun-rong. Experimental study of the influencing factors on dissolution rate of rock salt[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 35 - 39.