

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.003

## 三轴应力作用下岩盐溶解特性试验分析

宋书一<sup>1</sup>, 姜德义<sup>1</sup>, 任松<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</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. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

**摘要:** 岩盐地下储备库是能源储备重要方式。三轴应力作用下岩盐溶解特性的研究, 为岩盐地下储库水溶造腔的形状控制、安全建设等提供理论基础。运用三轴岩盐溶解试验机进行了岩盐试样在三轴应力作用下溶解特性试验, 研究发现在应力作用下岩盐溶解特性发生显著变化。计算分析了岩盐试样通水孔壁处应力与试样外部载荷轴压和围压的关系, 运用等效应力描述通水孔壁处应力分布情况。采用多组围压条件下三轴应力和溶解耦合试验, 分析了不同围压条件下岩盐溶解速率与等效应力之间的关系。研究结果表明, 岩盐溶解速率随着等效应力的增大先缓慢减小, 随之降到最低点, 然后又随着等效应力的增加而迅速增大。三轴应力对岩盐溶解速率的影响主要是由于岩盐试样在三轴应力加载过程中造成试样内部裂纹发育及溶蚀面积的变化, 在弹性阶段时溶蚀面积减小(裂纹闭合), 溶解速率降低, 而在塑形阶段时溶蚀面积增大(裂纹发育), 溶解速率升高。

**关键词:** 岩盐; 三轴应力; 溶解速率; 溶蚀面积; 裂纹

**中图分类号:** TU 443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2013)09-014-07

## Experiment analysis on dissolution characteristics of rock salt on the effect of triaxial stress

SONG Shuyi<sup>1</sup>, JIANG Deyi<sup>1</sup>, REN Song<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Rock salt underground storage is an important way of energy reserves. The research of rock salt dissolution characteristics under triaxial stress provides theoretical basis for shape control, security building of rock salt underground storage in the process of making aqueous cavity. The dissolution characteristics of rock salt specimens experiment with triaxial testing machine under triaxial stress, through a lot of rock salt dissolution tests, finds that dissolution characteristics of rock salt change remarkably under stress. Analyzing the relationship between the stress of rock salt specimen with the water hole and sample external axial compression or confining pressure, equivalent stress is adopted to describe the stress distribution of the running water hole wall. Triaxial stress and dissolution coupling experiment on the different confining pressure is carried out to analysis the variation between rock salt dissolution rate and equivalent stress under different confining pressures. The results show that rock salt dissolution rate decreases first and then

**收稿日期:** 2013-04-05

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB724606); 国家自然科学基金资助项目(51074198); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11241182)

**作者简介:** 宋书一(1981-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事岩土力学、采矿工程、安全工程方面的研究。

姜德义(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)deyij@cqu.edu.cn.

rapid increases with the increase of equivalent stress. The main impact of the stress for rock salt dissolution rate is that cracks development and corrosion area in rock salt specimen are changed because of the triaxial stress loading. Dissolution rate reduces as a result of corrosion area decreasing (crack closure) in the elastic stage, however dissolution rate increases because of corrosion area increasing (crack development) in the plastic stage.

**Key words:** rock salt; triaxial stress; dissolution rate; corrosion area; crack

目前,能源(石油和天然气)已经成为世界上各个国家重要战略储备资源,而全球大部分能源储备主要采用地下储存,地下储存具有极高的安全性。而岩盐其物理特性上具有极低的渗透性及再结晶特性,力学上具有一定的可塑性,并且极容易溶解于水,已经成为地下能源储备的首选介质。为了维持人民安定生活和国家战略安全,中国已经开始建造岩盐地下能源储备库。国内外学者对岩盐溶解性质做了大量研究, Jessen 等<sup>[1]</sup>对自然对流作用下盐溶边界层现象进行了分析。Bosworth 等<sup>[2]</sup>利用打有圆孔的岩盐晶体在加载条件下的溶解试验,分析了应变作用对岩盐表层溶解的影响。Durie 和 Saberian 等<sup>[3-7]</sup>做了大量岩盐溶解特性试验,推导出垂直和光滑岩盐表面溶解速率基本方程,同时指出岩盐非均质性导致溶蚀速度增加。梁卫国、徐素国<sup>[8-10]</sup>、杨骏六等<sup>[11]</sup>研究了无应力条件下钙芒硝盐溶解特性。汤艳春等<sup>[12-13]</sup>进行单轴压缩条件下岩盐应力-溶解耦合效应细观力学试验分析,并建立了应力作用下溶蚀模型,然而其溶解过程并不是在进行加载同时进行通水溶解,跟实际情况有所差别。在水溶造腔时,岩盐溶腔腔体边界围岩将会产生微裂纹及破坏,对溶腔的稳定性及溶解特性产生重要影响<sup>[14]</sup>。姜德义、任松等<sup>[15-16]</sup>进行了高温三轴应力岩盐溶解试验机的研制和应用以及岩盐溶解速率影响因素试验和应力损伤岩盐的声波、溶解试验研究。钱海涛等<sup>[17]</sup>研究了应力对岩盐溶蚀机制的影响。

岩盐能源储备库在水溶造腔过程中,岩盐是处于三轴应力状态下,然而目前对于三轴应力状态下岩盐溶解特性试验研究很少,笔者利用自行研制的三轴岩盐溶解试验机,首次真正实现了岩盐试样在三轴应力压缩条件下进行通水溶解试验,分析三轴应力-溶解耦合状态下,应力与岩盐试样溶解速率之间的变化规律,为以后进一步的研究提供参考。

## 1 试验方法及过程

### 1.1 试样制备

试验所用岩样取自巴基斯坦喜马拉雅山区天然岩盐。岩盐试样为米黄色,其中可溶物含量达到了99.4%,其组成成分和质量百分含量见表1。

可溶物		不溶物	%
NaCl	K <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	少量泥质	
99.4	0.4	0.2	

由于岩盐具有极易溶解于水的特性,试样采用手工打磨加工而成,试样的加工尺寸直径为50 mm,高度为100 mm的标准圆柱体,试样轴向中心钻一直径6 mm的通水小孔,试样的取样和加工严格按照试验规范进行,岩盐试样如图1所示。



图1 岩盐试样图

### 1.2 试验设备

试验加载设备利用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三轴应力-溶解耦合岩盐溶解特性试验系统。该试验系统主要由轴压和围压伺服加载系统、加温及保温系统、溶解水供应系统、数据采集系统4部分组成,首次实现了岩盐试样在三轴应力加载的同时,对岩盐试样通水进行应

力-溶解耦合溶解特性试验。该系统最大轴向加载荷载 400 kN, 围压 30 MPa, 在试验过程中加载应力、溶解水浓度和流速等参数可以随时调控, 具有耐腐蚀性、测试精度高, 性能稳定和误差小等优点。

### 1.3 试验方法

本次试验主要研究在常温条件下, 在三轴应力作用下岩盐溶解速率与应力之间变化规律, 其中围压为 5、10、15、20 MPa 4 个等级, 溶解水流量为 40 mL/min, 通水时间为 300 s。其溶解原理如图 2 所示。

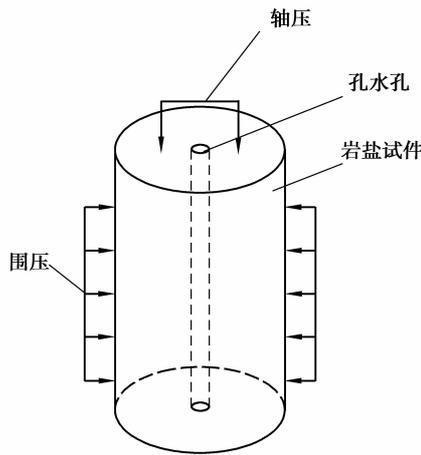


图 2 三轴岩盐溶解原理图

具体试验步骤如下:

- 1) 将加工好的岩样在干燥箱干燥 24 h 后, 用电子天平称量试验前岩盐试样的质量。
- 2) 安装试样。
- 3) 进行加载, 当轴压和围压达到试验目标值时, 保持压力不变。
- 4) 快速向三轴室通溶解水, 保持恒定流速使溶解水从进口端流入, 出水端流出。
- 5) 当岩盐试样持续溶解到达预定时间后, 停止通水。
- 6) 卸载, 试验结束。将试验后的试样进行干燥, 用电子天平称重, 计算岩盐试样溶解速率。

## 2 岩盐溶解速率推导计算

在三轴应力作用下岩盐溶解速率试验时, 温度、压力等试验条件保持不变, 试验过程中通水小孔内径不断扩大及溶解面积随时间变化, 因此溶解面积是时间函数, 试验过程中岩盐溶解速率保持不变, 定义为常数  $v$ , 并且试验中通水孔孔径扩展速率保持不变, 设为常数  $b$ , 单位 cm/s。因此岩盐溶解速率  $v$  可以进行如下推导计算。

微小时间内岩盐溶解质量为

$$dm = v s dt, \quad (1)$$

通水孔径变化满足

$$bt = r - r_0, \quad (2)$$

式中:  $m$  为岩盐的溶解质量;  $s$  为岩盐溶解面积;  $t$  为溶解时间;  $r$  为  $t$  时试件通水小孔半径;  $r_0$  为试件通水小孔初始半径。

溶解面积可表示为

$$s = 2\pi r h = 2\pi h (bt + r_0). \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)有

$$dm = 2\pi v h (bt + r_0) dt, \quad (4)$$

对式(4)进行积分可得

$$m = \int dm = 2\pi v h \int (bt + r_0) dt = 2\pi v h \left( r_0 t + \frac{bt^2}{2} \right). \quad (5)$$

岩盐溶解质量由岩盐溶解体积和密度计算式可得

$$m = V\rho = \pi(r^2 - r_0^2)h\rho, \quad (6)$$

$$2v\left(r_0 t + \frac{bt^2}{2}\right) = (r^2 - r_0^2)\rho, \quad (7)$$

$$2v\left(r_0 t + \frac{r - r_0}{2}t\right) = (r^2 - r_0^2)\rho, \quad (8)$$

$$v = \frac{r - r_0}{t}\rho. \quad (9)$$

将式(6)和(9)联立可得

$$v = \frac{\sqrt{\frac{m}{\pi\rho h} + r_0^2} - r_0}{t}\rho, \quad (10)$$

式中:  $v$  为岩盐溶解速率,  $g/(cm^2 \cdot h)$ ;  $m$  为岩盐溶解质量,  $g$ ;  $h$  为岩盐试样高度,  $cm$ ;  $t$  为溶解时间,  $s$ ;  $\rho$  为岩盐试样密度,  $g/cm^3$ ;  $r_0$  为岩盐试样通水孔初始半径,  $cm$ 。

## 3 岩盐试样通水孔壁应力分布

在进行三轴应力作用下岩盐溶解试验时, 溶解过程发生在试样中心孔壁处, 而试验中轴压和围压加载在试样外表面, 因此需要分析试样外表面应力与试样中心孔壁处应力之间的关系, 从而得到试样中心孔壁上应力分布。根据厚壁圆筒应力分布模型<sup>[18-19]</sup>, 试样孔壁处应力分布可以由式(11)计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{p_i R_i^2 - p_0 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{(p_i - p_0) R_i^2 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2}, \\ \sigma_r &= \frac{p_i R_i^2 - p_0 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{(p_i - p_0) R_i^2 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2} \frac{1}{r^2}, \\ \sigma_z &= \frac{p_i R_i^2 - p_0 R_0^2}{R_0^2 - R_i^2}. \end{aligned} \right\} (11)$$

当  $p_i = 0, r = R_i, K = \frac{R_0}{R_i}$  时,

$$\sigma_{\theta} = -2p_0 \left( \frac{K^2}{K^2 - 1} \right), \quad (12)$$

$$\sigma_r = 0, \quad (13)$$

$$\sigma_z = -p_0 \left( \frac{K^2}{K^2 - 1} \right). \quad (14)$$

试验过程中岩盐试样  $R_0 = 25 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 3 \text{ mm}$ , 因此  $\frac{K^2}{K^2 - 1} \approx 1$ , 由此可得

$$\sigma_{\theta} = -2p_0, \sigma_r = 0, \sigma_z = -p_0. \quad (15)$$

式中:  $\sigma_{\theta}$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$  分别为试样孔壁上环向、径向和竖向应力;  $P_i$  和  $P_0$  分别为试样中心孔壁内压和外压;  $R_i$  和  $R_0$  分别为试样中心孔内径和外径。

由上述公式可以得知试样中心通水孔壁处应力与试样外表面应力(轴压和围压)之间的关系, 中心孔壁环向应力值为围压的 2 倍, 竖向应力值与轴压相等, 由于试样中心通水孔中溶解水没有压力, 因此径向应力为 0。根据通水孔壁上应力与岩盐试样外部载荷之间的关系, 运用等效应力来计算通水孔壁上应力分布, 同时分析岩盐通水孔壁处等效应力与岩盐溶解速率之间关系, 等效应力计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\sigma_{\theta} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_z)^2}{2}}. \quad (16)$$

## 4 试验结果分析

### 4.1 试验数据

试验在常温条件下, 恒定流量  $40 \text{ mL/min}$ , 溶解时间为  $300 \text{ s}$  情况下进行, 分析试样通水孔壁等效应力与岩盐溶解速率之间的关系, 发现随着三轴应力条件的改变, 岩盐溶解速率变化明显, 其试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果

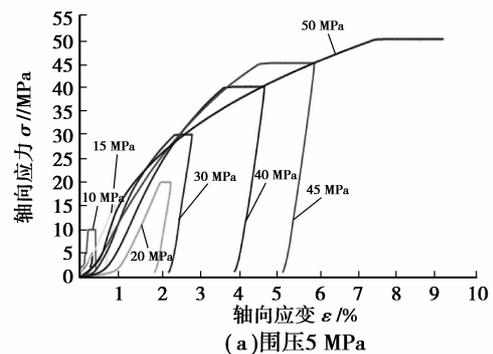
试样 编号	围压/ MPa	轴压/ MPa	等效应力/ MPa	溶解速率/ $\text{g} \cdot (\text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
1	5	5	8.66	3.07
2	5	10	10.00	2.78
3	5	20	17.32	2.40
4	5	30	26.46	1.66
5	5	40	36.06	2.03
6	5	45	40.93	2.21
7	5	50	45.83	2.87

续表 2

试样 编号	围压/ MPa	轴压/ MPa	等效应 力/ MPa	溶解速率/ $\text{g} \cdot (\text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$
8	10	10	17.32	2.17
9	10	15	18.03	2.11
10	10	25	22.91	1.84
11	10	35	30.41	1.69
12	10	45	39.05	1.24
13	10	50	43.59	2.14
14	10	55	48.22	2.50
15	15	15	25.98	2.10
16	15	25	27.84	2.00
17	15	35	32.79	1.88
18	15	45	39.69	1.60
19	15	50	43.59	1.32
20	15	55	47.70	2.29
21	15	60	51.96	2.93
22	20	20	34.64	2.44
23	20	30	36.06	2.40
24	20	40	40.00	2.27
25	20	55	49.24	2.11
26	20	65	56.79	2.47
27	20	75	65.00	2.54
28	20	80	69.28	2.68

### 4.2 试验结果分析

在三轴应力作用下岩盐溶解速率与其力学特性有着密不可分的关系。图 3 为岩盐试样在受到 4 个不同等级围压作用下时轴向应力与轴向应变之间的关系。



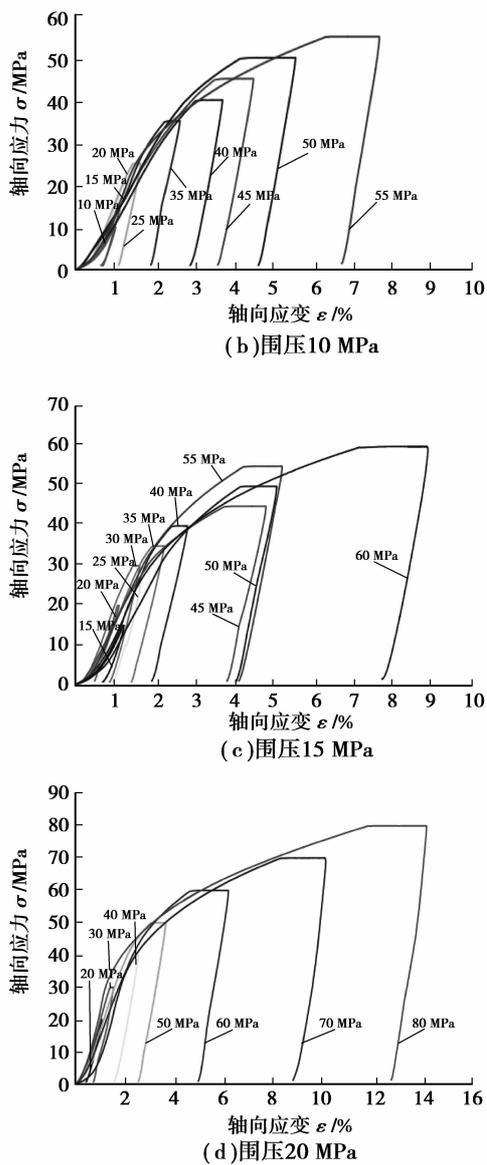


图 3 不同围压下轴向应力与轴向应变关系

根据图 3 可以得知岩盐试样轴向应变随着轴向应力的增加而变大,同一围压条件下,轴向应力越大其应变值就越大,当围压为 5 MPa 时,轴向应力为 50 MPa 时轴向应变为 9%,轴向应力为 5 MPa 时轴向应变为 0.3%,两者相差 30 倍。

试样在加载过程中经历加载压缩、弹性阶段、塑性阶段、保压阶段和卸载 5 个过程。首先是加载压缩阶段,应变缓慢增加,在轴向力较小时试样处于弹性阶段,应力与应变近似直线关系,应变随着应力的增加迅速增加,进入塑性阶段时应力与应变呈现非线性上升曲线,应变增加较快。由于岩盐蠕变特性好,可塑性大,其塑性阶段较长。当轴压和围压达到实验目标值时保持压力不变,应变值缓慢增加,试验结束时进行卸载,应变随着应力的降低逐渐变小。

从图 3 中也可以得知在相同的轴压条件下,随着围压增大应变值随之减小。当轴压为 40 MPa 时,围压由 5~20 MPa 时,岩盐试样应变值依次为 3.91%、3.32%、2.51%、2.43%,围压 5 MPa 的应变是 20 MPa 时的 1.6 倍,由此可知随着围压增大,限制了岩盐试样径向变形,因此使得轴向应变减小。围压由 5~20 MPa 时岩盐试样由弹性阶段进入塑性阶段时轴向应力临界值大约依次为:30、40、45、50 MPa。

图 4 为 5、10、15、20 MPa 围压下岩盐试样通水孔内壁处等效应力与岩盐溶解速率的关系曲线。

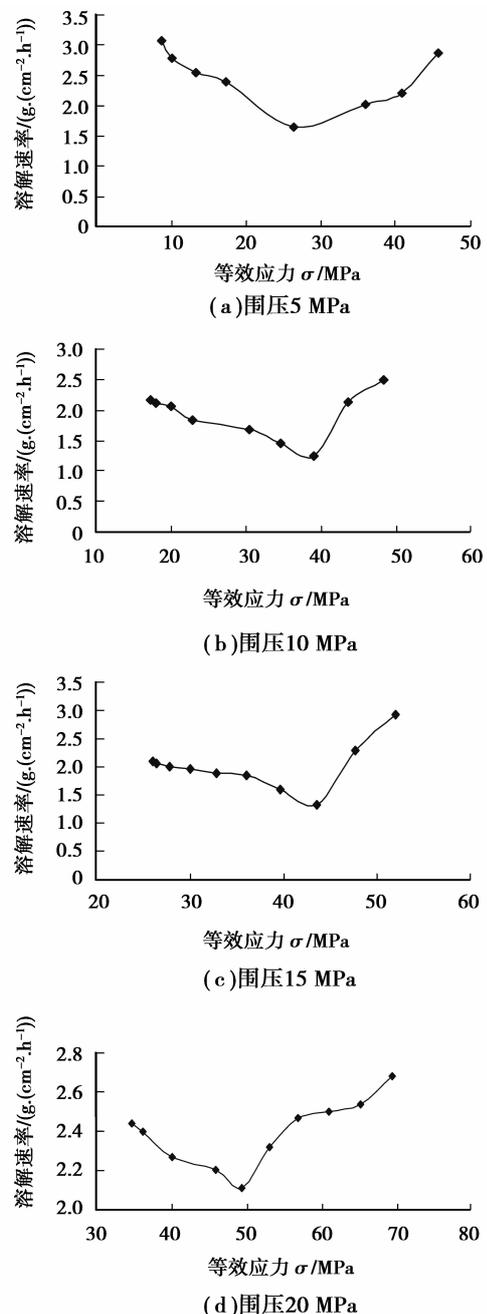


图 4 不同围压下等效应力与岩盐溶解速率关系

图4(a)~(d)中岩盐溶解速率与等效应力之间表现一致性规律,岩盐的溶解速率都随着等效应力的增大而缓慢减小,当溶解速率将至最低点后又迅速开始增大,由此可见在三轴应力作用下岩盐溶解速率发生了明显变化,其溶解机理分析如下:

在等效应力较小的情况下,如图3所示岩盐试样处于加载压缩和弹性阶段,此时岩盐介质处于压紧、压实和初始裂纹闭合的状态,同时试样处于弹性阶段不会对试样造成破坏而产生新的裂纹,因此试样溶解面积在减小,岩盐溶解速率随着等效应力增加而缓慢地降低。

当等效应力达到试样弹性变形转化为塑性变形的临界值时,此时试样处于最密实状态,溶解面积最小,因此溶解速率就降到最低,由图4可知,当围压为5 MPa,岩盐试样溶解速率最小时的等效应力为25~30 MPa;当围压为10 MPa,岩盐试样溶解速率最小时的等效应力为40 MPa左右;当围压为15 MPa,岩盐试样溶解速率最小时的等效应力为40~45 MPa;当围压为20 MPa,岩盐试样溶解速率最小时的等效应力为50 MPa左右,由前文可知围压5~20 MPa时岩盐试样由弹性阶段进入塑性阶段时轴向应力临界值分别为30、40、45、50 MPa,可以看出溶解速率最小时等效应力值基本上跟岩盐试样由弹性阶段进入塑性阶段时轴向应力临界值相吻合。

等效应力持续增大,此时岩盐试样开始发生塑性变形,与此同时岩盐内部裂纹不断产生和扩张,溶解水的溶解面积逐渐增大,从而使得岩盐溶解速率逐渐增大。由于岩盐具有强烈腐蚀性,该试验没有加载试样直至破坏,可以推断当试样破坏时,溶解速率将达到最大值(见图5)。

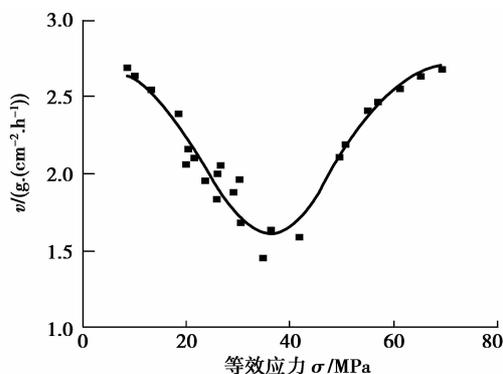


图5 等效应力与岩盐溶解速率拟合关系

运用 Origin 对岩盐试样在三轴应力作用下溶解速率与等效应力之间的关系进行拟合,得到岩盐

溶解速率与等效应力之间呈高斯曲线关系,即

$$v = v_0 + \frac{A}{w \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(\sigma - x_c)^2}{w^2}}, \quad (17)$$

式中: $v$  为三轴应力作用下岩盐溶解速率; $\sigma$  为等效应力; $v_0$ 、 $x_c$ 、 $w$ 、 $A$  为常数,其中  $v_0 = 2.75$ ,  $x_c = 36.18$ ,  $w = 25.47$ ,  $A = -36.26$ ,  $R^2 = 0.9$ 。

## 5 结 论

1) 利用自行研制三轴岩盐溶解试验机实现了岩盐试样在三轴应力作用下岩盐溶解试验。

2) 通过推导计算得知岩盐试样通水孔壁上应力并不完全等同于试样外部载荷,孔壁处的环向应力值为围压的2倍,竖向应力等于轴向应力,径向应力为0。

3) 岩盐试样在受到4个不同等级围压作用下时试样轴向应变随着轴向应力的增加而变大,同一围压条件下,轴向应力越大其应变值就越大。

4) 岩盐试样溶解速率随着等效应力的增大先缓慢减小,然后又逐渐增大。三轴应力对岩盐溶解速率的影响主要是由于加载过程中造成试样内部溶蚀面积的变化,在弹性阶段时溶蚀面积减小溶解速率降低,而在塑形阶段时溶蚀面积增大,溶解速率增加。

5) 岩盐试样在三轴应力作用下溶解速率最小时等效应力值基本上与试样在三轴压缩过程中由弹性变形变为塑性变形时轴向应力临界值一致。

## 参考文献:

- [1] Jessen F W, Durie R W. The laminar boundary layer in the free convection dissolution of salt [J]. *Tectonophysics*, 1962, 6(5): 110-125.
- [2] Bosworth W. Strain-induced preferential dissolution of halite [J]. *Tectonophysics*, 1981, 78 (1/2/3/4): 509-525.
- [3] 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.
- [4] Saberian A. Cavity development in a three-layer bedded salt model [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1977, 12(1): 85-98.
- [5] Durie R W, Jessen F W. Mechanism of the dissolution of salt in the formation of underground salt cavities [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1964, 4(2): 183-190.
- [6] Saberian A. Study on mixing in water-brine systems [M]. America: Solution Mining Research Institute, 1971.

- [7] Hunsche U, Albrecht H. Results of true triaxial strength tests on salt rock [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(4/5): 867-877.
- [8] 梁卫国, 李志萍, 赵阳升. 盐矿水溶开采室内试验的研究[J]. *辽宁工程技术大学学报: 自然科学版*, 2003, 22(1): 54-57.  
LIANG Weiguo, LI Zhiping, ZHAO Yangsheng. Experimental study on solution mining of salt deposit [J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2003, 22(1): 54-57.
- [9] 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*, 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*, 2005, 24(1): 5-7.
- [10] 徐素国, 梁卫国, 赵阳升. 钙芒硝岩盐溶解特性的实验研究[J]. *太原理工大学学报*, 2005, 36(3): 253-255.  
XU Suguo, LIANG Weiguo, ZHAO Yangsheng. Experimental study on dissolution characteristics of glauberite of rock salt [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2005, 36(3): 253-255.
- [11] 杨骏六, 杨进春, 邹玉书. 岩盐溶解特性的试验研究[J]. *四川联合大学学报: 工程科学版*, 1997, 1(2): 74-80.  
YANG Junliu, YANG Jinchun, ZHOU Yushu. The study on experiments of solution mining properties of salt [J]. *Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition*, 1997, 1(2): 74-80.
- [12] 汤艳春. 考虑岩盐应力与溶解耦合效应的盐腔溶腔机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所博士学位论文, 2007.
- [13] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下岩盐溶蚀模型研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 296-302.  
TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Study of dissolving model under effect of stress for rock salt [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 296-302.
- [14] Tsang C F, Bernier F, Davies C. Geohydro-mechanical processes in the excavation damaged zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, 42: 109-125.
- [15] 姜德义, 陈结, 刘建平, 等. 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 Deyi, CHEN Jie, LIU Jianping, et al. Experimental research on acoustic and dissolved properties of stress damaged rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3569-3573.
- [16] 任松, 杨春和, 姜德义, 等. 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 Chunhe, JIANG Deyi, et al. 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.
- [17] 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, 29(4): 757-764.  
QIAN Haitao, TAN Zhaoshuang, LI Shouding, 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.
- [18] 吴家龙. 弹性力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [19] 杨贵通. 弹塑性力学引论[M]. 北京: 人民教育出版社, 2004.

(编辑 张 苹)