

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

汤艳春, 周 辉, 冯夏庭, 姚华彦

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 通过大量的单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验, 发现在应力作用下岩盐的溶解特性会发生显著的变化。采用溶解质量(即宏观溶解速率)与轴向塑性应变和溶解时间之间的关系来定量描述应力作用下岩盐溶解速率的变化, 在试验结果的基础上得到溶解质量与轴向塑性应变和溶解时间之间的变化规律; 通过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。发现在溶蚀作用下, 岩盐的力学性质会发生变化。通过对溶解阶段应力随着溶解时间的变化关系的研究, 得出溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机制在于岩盐发生溶解从而使得岩盐裂纹的临界应力强度因子降低。研究成果为进一步研究岩盐的应力 - 溶解耦合机制奠定了试验依据以及理论基础。

关键词: 岩石力学; 岩盐; 应力 - 溶解耦合效应; 轴向塑性应变; 宏观溶解速率; 裂纹

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)02 - 294 - 09

ANALYSIS OF MESOMECHANICAL TEST OF ROCK SALT CONSIDERING COUPLED STRESS-DISSOLVING EFFECTS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, YAO Huayan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Through a large number of mesomechanical tests of rock salts under uniaxial compression considering coupled stress-dissolving effect, the differences of dissolving action on rock salts with/without considering stress are found; and the variation of dissolving action on rock salts considering stress can be described quantitatively with the relationship of dissolved masses. It can also be expressed with macro-dissolving velocity, axial plastic strain, and dissolving time with analyzing the data of the tests. Through analyzing the difference of crack shapes under different crack expansion phases after dissolution, the mechanism of variation of macro-dissolving velocity under different axial plastic strains is studied. Difference of mechanical properties of rock salts with/without considering the dissolving effect has also been achieved. With the gained relationship between stress and dissolving time upon the dissolution stage, the mechanism of variation of mechanical properties of rock salt considering dissolving effect, which is shown as critical stress intensity factor(SIF) of crack that is decreased because of dissolving, has been concluded. The achieved results can provide a foundation for the further analysis of coupled stress-dissolving mechanism of rock salt.

收稿日期: 2007 - 03 - 19; **修回日期:** 2007 - 06 - 11

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50579091)

作者简介: 汤艳春(1981 -), 男, 2001年毕业于长安大学水文地质工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: tyh8102-2002@163.com

Key words: rock mechanics; rock salt; coupled stress-dissolving effect; axial plastic strain; macro-dissolving velocity; crack

1 引言

目前, 全球相当大部分能源的储存采用地下存储方式, 且地下能源储存一般放置在低渗透性岩层(如岩盐和花岗岩等)以及多孔隙岩层中。而岩盐具有非常低的渗透特性(渗透率小于 10^{-20} m^2)与良好的蠕变行为, 能够保证储存洞室的密闭性。岩盐的力学性能较为稳定, 能够适应储存压力的变化, 且岩盐易溶解于水的特性使岩盐洞室的施工开挖更加容易和经济。因此, 大部分能源(如石油、天然气)储存库建在岩盐介质或废弃的盐矿井中。

在地下岩盐储存库运行期间, 岩盐的力学性质和溶解特性相互作用、相互影响: 一方面, 由于在一定的应力或有应力变化的作用下, 岩盐(储场围岩)发生塑性变形, 从而产生不同尺度的裂隙。当岩盐与水溶液相接触时, 由于裂隙的不断产生和扩展, 岩盐与水溶液的接触面积将变大, 从而加快岩盐的溶蚀速率; 另一方面, 水溶液对岩盐裂隙产生溶蚀作用, 从而进一步使裂隙开度增大, 对岩盐的力学性质以及储场围岩的应力场产生影响。总而言之, 制约岩盐性质的上述过程主要包括力学性质、溶解特性、渗透性、流 - 固耦合作用以及盐腔稳定性分析与溶腔形状控制。

众多学者对岩盐的性质进行了研究, 并取得了丰富的研究成果。U. Hunsche 等^[1~5]对岩盐的短期强度与变形特性进行了基本力学特性研究。在岩盐溶解特性研究方面, 刘成伦等^[6]得出了岩盐溶解动力学方程。杨骏六等^[7]分析了溶腔形状的发展和溶腔内速度场、浓度场的变化。梁卫国等^[8]研究钙芒硝盐岩溶解特性。Z. Hou^[9]对于地下工程 EDZ(开挖扰动区)内岩盐的力学和渗透性质进行了研究, 提出了有效应力形式的 Hou/Lux 本构模型、Darcy 流模型以及其他耦合模型。周辉等^[10]建立了盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型, 并通过试验验证了模型的适用性。王贵君等^[11~13]在溶腔稳定性方面也做了大量的解析分析和数值模拟工作。班凡生等^[14, 15]研究了岩盐储气库水溶建腔流体输运理论及溶腔形态变化的规律。

由于岩盐的力学性质和溶解特性相互作用, 岩盐的应力 - 溶解耦合作用对于地下岩盐储存库的安

全性至关重要, 然而, 目前关于这方面的研究尚不充分。通过单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验, 本文研究在应力作用下岩盐溶解速率的变化以及溶蚀作用下岩盐力学性质的变化规律, 为进一步研究岩盐的应力 - 溶解耦合机制提供理论依据和试验基础。

2 试验方法

2.1 试验仪器

本次试验是在中国科学院武汉岩土力学研究所研制的应力 - 水流 - 化学耦合的岩石破裂全过程细观力学试验系统上进行的。该系统主要由全数字电液伺服控制细观加载系统、观测系统、流体力学和化学系统构成^[16]。可以实现单轴或三轴压缩条件下岩石应力 - 水流 - 化学耦合过程的细观力学试验, 具有对荷载和变形进行伺服控制的功能, 可同时进行数据采集和控制; 试验过程中可以对试件多个表面的破坏进行全过程实时监测和记录, 并可以对某一个表面的破坏过程进行局部显微放大观测和记录, 能够实现高精度、小荷载下的岩石破裂全过程的多项力学试验。

2.2 岩盐的取样与加工

试验所用的岩盐试样取自于湖北省云应岩盐矿区, 取样盐层的埋深为 400~600 m。岩盐试样为灰白色, 其组成成分和质量百分含量见表 1, 其中可溶物含量达 92.2%。

表 1 岩盐试样的成分

可溶物		难溶物	不溶物
NaCl	Na ₂ SO ₄	(CaSO ₄)	(少量泥质)
80.7	11.5	4.7	3.1

岩盐试样的标准尺寸为 15 mm×15 mm×30 mm(如图 1 所示)。由于岩盐质脆、遇水易溶, 因此岩盐试样是通过手工切割、磨制加工而成, 所加工出来的岩盐试样尺寸的误差能够保证在 ±0.3 mm 以内, 试件端面平整到 0.02 mm。取样过程和试件加工均严格按照试验规范进行。

2.3 试验步骤

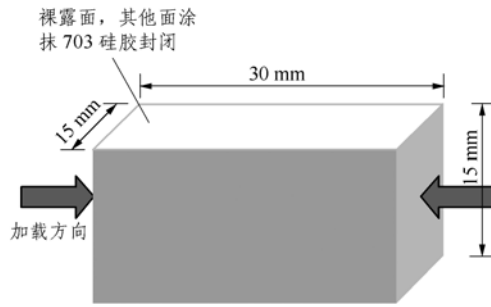


图 1 岩盐试样尺寸

Fig.1 Sizes of rock salt specimen

具体的试验步骤概述如下:

(1) 试验前的准备工作。由于岩盐极易溶解, 为了便于控制岩盐的溶解速率, 同时保证试验条件与岩盐溶腔过程的实际情况相符合, 本文在试验过程中仅考虑岩盐试样一个面溶解的情况, 因此, 除了 1 个面裸露外, 岩盐试样的其他各面均用 703 硅橡胶均匀地涂抹一层(如图 1 所示)。待 703 硅胶完全凝固干燥后, 用电子天平称量此时岩盐试样的质量。

(2) 采用位移加载方式(本文所有试验的加载速率均为 0.015 mm/min)对岩盐试样进行单轴压缩试验; 当加载到某一应变值时, 暂停加压, 保持位移不变。

(3) 快速向加载盒中加入蒸馏水, 当岩盐试样完全浸泡在水溶液之中后, 保持恒定的流速使蒸馏水缓慢地流过加载盒, 此时岩盐试样只有裸露面与水溶液接触而发生溶解。

(4) 当岩盐试样持续溶解至预定时间后, 将加载盒中水溶液全部放出, 此时可继续进行加载试验。

(5) 试验结束后, 将岩盐试样干燥, 用电子天平称量干燥的试样质量, 并计算试样被溶解掉的试样质量。

3 试验结果分析

3.1 试验数据

通过一系列的单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验, 可以得到不同轴向塑性应变和溶解时间下岩盐的溶解质量, 以及溶解前后轴向应力值的变化(如表 2 所示)。在表 2 中试样 A1 是在没有加载任何应力的情况下进行溶解试验的, 所得到的溶解质量试验值即为无应力作用时岩盐的溶解质量。

3.2 试验全过程应力 - 应变曲线

试验的全过程应力 - 应变曲线如图 2~4 所示,

表 2 岩盐试验结果

Table 2 Results of experiments of various rock salt samples

试样 标号	溶解 时间/s	轴向塑性 应变/%	溶解 质量/g	溶解前应 力值/MPa	溶解后应 力值/MPa
A1	400	0.0	0.150	0.00	0.00
A2	400	2.0	0.160	16.75	16.03
A3	400	3.1	0.200	21.06	19.25
A4	400	4.4	0.320	25.66	21.65
A5	400	4.7	0.656	33.52	29.65
A6	400	4.8	0.400	29.41	25.36
A7	400	5.1	0.680	28.86	23.46
A8	400	5.5	1.450	22.82	16.45
A9	400	5.9	2.300	22.25	14.89
A10	400	6.6	3.600	27.31	17.10
A11	400	7.1	3.300	32.27	20.40
A12	400	7.2	3.800	20.99	12.21
B1	350	3.5	0.188	29.82	27.34
B2	200	7.2	0.800	29.24	22.88
B3	300	7.2	2.388	29.17	17.90
B4	340	4.2	0.240	30.52	27.11
B5	260	5.7	0.621	25.95	20.04
B6	300	6.8	1.622	30.12	21.61

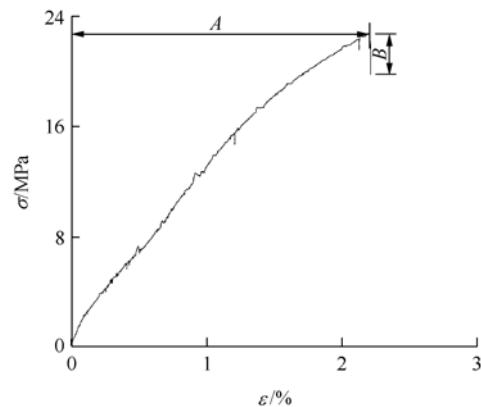


图 2 加载至 a 段范围内的试验应力 - 应变全曲线

Fig.2 Complete stress-strain curve of test in phase a

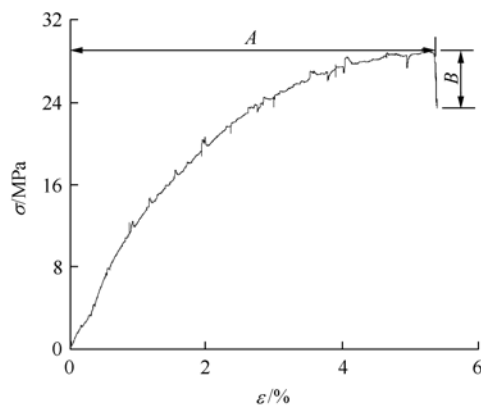


图 3 加载至 b 段范围内的试验应力 - 应变全曲线

Fig.3 Complete stress-strain curve of test in phase b

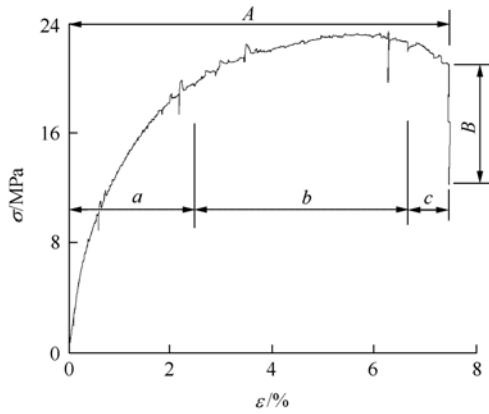


图 4 加载至 c 段范围内的试验应力 - 应变全曲线
Fig.4 Complete stress-strain curve of test in phase c

整个试验分为两个阶段：加载阶段(A 段)和溶解阶段(B 段)。在溶解阶段(B 段)，保持应变不变，在溶解过程中，应力值降低。

从岩盐的应力 - 应变曲线(见图 4)中可以看出，在加载阶段(A 段)的应力 - 应变曲线可以分为三个阶段：

- (1) a 段：该段曲线中应变较小的时候，应力 - 应变关系近似为直线；
- (2) b 段：该段曲线中应力值变化较小，且在极限应力值附近变化，但是应变持续增加，这说明岩盐呈现出较明显的塑性特征；
- (3) c 段：超过峰值强度，曲线开始下降。

4 应力作用下岩盐溶解特性的变化

通过上述试验可以发现，在溶解阶段，相同的溶解时间内岩盐试样所溶解的质量(即宏观溶解速率)与岩盐试样所处的应力 - 应变状态有关。本文采用在加载阶段中所产生的轴向塑性应变来量化这一状态。在相同的轴向塑性应变下，溶解质量随着溶解时间变化而变化。通过以上分析可知，应力作用下岩盐溶解速率的变化可以通过溶解质量(即宏观溶解速率)与轴向塑性应变和溶解时间之间的关系来进行定量的描述。

4.1 溶解质量、轴向塑性应变和溶解时间之间的关系

通过对表 2 中溶解质量、轴向塑性应变和溶解时间的试验数据进行曲线拟合，可以得出溶解质量与轴向塑性应变和溶解时间之间的关系表达式为

$$m(\varepsilon^p, t) = \frac{1}{C}(0.21t + 0.16t^2) \cdot$$

$$\left\{ 4.75 - \frac{4.56}{1 + \exp[(\varepsilon^p - 6.2)/0.54]} \right\} \quad (1)$$

式中：C 为系数，且有 C = 3.4； ε^p 为轴向塑性应变 (%)；m 为岩盐溶解质量(g)；t 为溶解时间(100 s)。溶解质量 m、轴向塑性应变 ε^p 以及溶解时间 t 的关系见图 5。

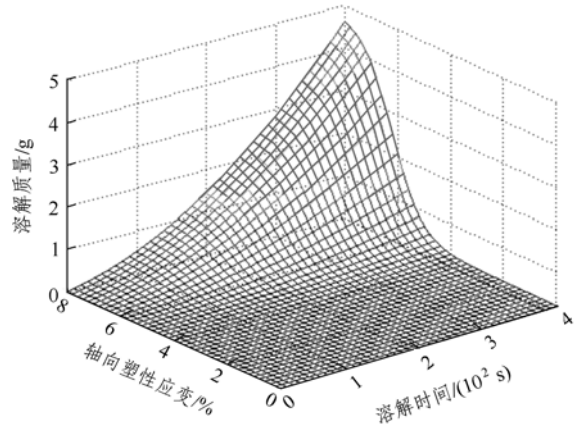


图 5 溶解质量、轴向塑性应变以及溶解时间的关系图
Fig.5 Relationship between dissolved mass, axial plastic strain and time

表 2 中溶解时间为 t = 400 s 时，不同轴向塑性应变与溶解质量之间的关系。根据图 6 中试验散点数据的趋势，对试验数据进行曲线拟合，其拟合曲线的函数表达式为

$$m(\varepsilon^p, t) \Big|_{t=400} = 4.75 - \frac{4.56}{1 + \exp[(\varepsilon^p - 6.2)/0.54]} \quad (0.00 \leq \varepsilon^p \leq 0.08) \quad (2)$$

式(2)的相关系数 $R^2 = 0.987 21$ ，说明曲线的拟合度很好。

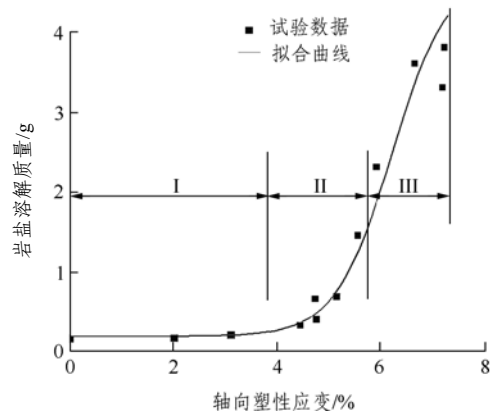


图 6 轴向塑性应变与岩盐溶解质量之间的关系
Fig.6 Relationship between axial plastic strain and dissolved mass

轴向塑性应变为 $\varepsilon^p = 7.2\%$ 时, 岩盐试样溶解质量 m 与溶解时间 t 之间的关系如图 7 所示。

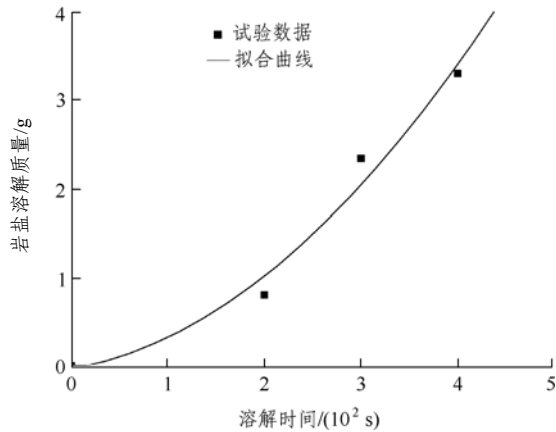


图 7 当 $\varepsilon^p = 7.2\%$ 时溶解时间与岩盐溶解质量之间的关系
Fig.7 Relationship between dissolving time and dissolved mass when $\varepsilon^p = 7.2\%$

在理论上, 当溶解时间为 $t = 0$ s 时, 溶解质量为 0。故根据试验数据, 并且结合理论可以得出: 当轴向塑性应变 $\varepsilon^p = 7.2\%$ 时, 岩盐试样溶解质量 m 与溶解时间 t 之间的函数关系表达式为

$$m(\varepsilon^p, t) \Big|_{\varepsilon^p=0.072} = 0.21t + 0.16t^2 \quad (0 \leq t \leq 400 \text{ s}) \quad (3)$$

式(3)的相关系数 $R^2 = 0.978 03$, 说明曲线的拟合度很好。

4.2 试验现象分析

从图 5 和 6 中可以看出, 随着轴向塑性应变的增加, 岩盐溶解质量相比于无应力作用时的岩盐溶解质量值发生了很大的变化, 这说明在应力作用下岩盐的溶解特性发生了变化, 并且当轴向塑性应变较大时, 应力作用对岩盐溶解速率的影响不可忽略。

从图 6 中也可以看出, 不同轴向塑性应变下岩盐的溶解质量相差较大, 根据轴向塑性应变与溶解质量之间的关系, 曲线可以分为 3 段:

(1) I 段, 该段曲线非常平缓。在此段曲线中, 溶解的岩盐质量很小, 随着轴向塑性应变的逐渐增加, 溶解质量也在缓慢增加, 但变化幅度非常小。该曲线段范围内的试验数据点是在加载阶段应力 - 应变曲线处于 a 段时, 进行应力 - 溶解耦合试验所得到的, 其典型试验全程应力 - 应变曲线见图 2。

(2) II 段, 该段曲线向上凹曲, 并且曲线斜率变化非常显著。这说明随着轴向塑性应变的增加, 溶解的岩盐质量显著增加, 且其变化幅度相当大。该曲线段范围内的试验数据点是在加载阶段应力 -

应变曲线处于 b 段时进行应力 - 溶解耦合试验所得到的, 其典型试验全过程应力 - 应变曲线见图 3。

(3) III 段, 该段曲线为上升曲线, 曲线斜率变化较小。这说明随着轴向塑性应变的增加, 虽然溶解的岩盐质量增加较快, 但是其增长幅度变化较小。该曲线段范围内的试验数据点是在加载阶段应力 - 应变曲线处于 c 段时进行应力 - 溶解耦合试验所得到的, 典型试验全程应力 - 应变曲线如图 4 所示。

4.3 机制分析

应力作用下岩盐溶解速率发生变化的原因在于: 岩盐与水溶液接触发生溶解, 其溶解速率的大小取决于岩盐与水溶液发生接触的溶解面的大小。在应力作用下, 随着塑性应变的产生和增大, 岩盐中的裂纹不断发育与扩展, 造成岩盐与水溶液发生接触的溶解面的大小不断增加, 从而使得溶解速率变大。这也说明在应力作用下岩盐溶解速率与裂纹的发育和扩展有着直接的关联, 可以通过不同阶段的裂纹的发育与扩展来分析岩盐溶解速率发生变化的原因。

岩盐在试验加载阶段(A 段)中裂纹的变化主要有以下 4 个阶段:

(1) 在低应力水平时, 除介质挤压密实、原始裂纹的压闭等局部结构调整外, 几乎没有任何新的裂纹产生(见图 8(a))。

(2) 较高水平的持续应力作用下, 大量细观裂纹不断产生和扩展(见图 8(b))。

(3) 随着应力的不断增加, 大量细观裂纹不断产生和扩展, 并逐渐形成细观主裂纹并继续扩展(见图 8(c))。

(4) 当应力水平过高时, 这些细观主裂纹会发展成为贯通性裂面, 试件发生宏观破坏, 见图 8(d)。

通过试验观察得出, (1), (2)两个阶段的裂纹都在处于加载阶段(A 段)中的 a 段范围内的应力 - 应变作用下发生; (3)阶段的裂纹主要在处于加载阶段(A 段)中的 b 段范围内的应力 - 应变作用下发生; (4)阶段的裂纹在处于加载阶段(A 段)中的 c 段范围内的应力 - 应变作用下发生。

在溶解阶段(B 段), 裂纹的变化与岩样裂纹所处的阶段以及溶解的时间、溶解溶液的介质等等因素有关。设定溶解的时间、溶解溶液的介质保持相同, 表层的裂纹由于岩盐的溶解, 造成裂纹的开度和迹长增加, 上述的(2)~(4)阶段的裂纹在溶解之后的形态也有很大的差别, 如图 9 所示。



(a) (1)阶段



(b) (2)阶段



(c) (3)阶段



(d) (4)阶段

图 8 不同裂纹变化阶段的岩样图片
Fig.8 Photos of cracks in the different phases



(a) (2)阶段



(b) (3)阶段



(c) (4)阶段

图 9 不同裂纹变化阶段的岩样溶解之后的图片
Fig.9 Photos of specimens after being dissolved in the different phases of cracks

图 9(a)为表面细观裂纹溶解之后的图片,从图 9(a)中可以看出,细观裂纹溶解之后其开度变大,裂纹的痕迹变得很清楚;图 9(b)为形成细观主裂纹之后溶解的岩样图片,图中非常明显的沟槽即是细观主裂纹溶解之后的显示;图 9(c)为细观主裂纹发展成为贯通性裂面之后溶解的岩样照片,其中那道裂开的深沟槽即是贯通性裂面溶解之后所造成的。

从图 9 可以看出,岩盐裂纹主要的延展方向与轴向应力的方向大致平行,并且不同阶段的裂纹的状态下岩盐的宏观溶解速率有着明显的差异,它们之间存在着一定的联系。通过对岩盐试样不同阶段裂纹溶解之后所产生的变化进行分析,就可以对产生图 6 中轴向塑性应变与溶解质量(即宏观溶解速率)之间关系的原因进行解释:

(1) 在图 6 的 I 段中,在应力的作用下裂纹的变化处于(1), (2)阶段,表面细观裂纹在与水溶液接触之后产生的变化较小,岩盐试样与水溶液接触的溶解面的有效面积缓慢增加,这就使得宏观溶解速率也只能缓慢增大。

(2) 在图 6 的 II 段中,裂纹处于(3)阶段,岩盐试样的表面已经出现了主裂纹,并且在此阶段,随着轴向应变的增加,主裂纹的变化幅度逐渐变大。当主裂纹与水溶液发生接触后,会发生很大的变化,溶解面的有效面积发生较快的增长,这就使得宏观溶解速率相比于 I 段有了显著的增加,并且随着轴向应变的增加,宏观溶解速率的增幅也相应增大。

(3) 在图 6 的 III 段中,裂纹处于(4)阶段,已经形成了贯通性裂面,并且在此阶段,随着轴向应变的增加,贯通性裂面的变化较小。当贯通性裂面与水溶液发生接触后,相对于 I, II 段,溶解面的有效面积增长较大,并且随着轴向应变的增加,溶解面的有效面积继续增加,但增幅变化很小。这就使得随着轴向应变的增加,宏观溶解速率也继续增

大，但其增长幅度变化很小。

5 溶蚀作用下岩盐力学性质的变化

从表 2 可以看出：溶解后岩盐的应力值降低了，这说明在溶蚀作用下，岩盐的力学性质发生了变化。在溶解阶段，由于溶蚀作用的存在，岩盐的应力值发生了变化，通过对溶解阶段应力随着溶解时间的变化关系的研究，可以定性分析出溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机制。

5.1 在溶解阶段应力与时间的关系

在溶解阶段，应力随时间的变化曲线如图 10, 11 所示。其中图 10 为在加载阶段裂纹未充分贯通时进行溶解试验所得出来的应力随时间的变化曲线；图 11 为形成贯通性裂纹后进行溶解试验所得出来的应力随时间的变化曲线。

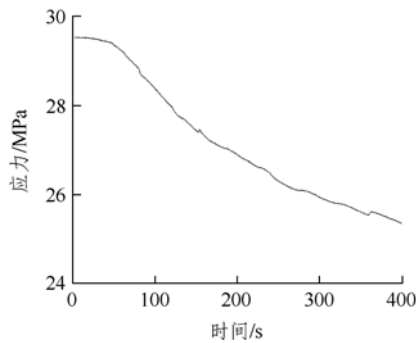


图 10 裂纹未充分贯通时进行溶解试验所得出来的应力随时间的变化曲线

Fig.10 Stress-time curve of dissolving test before cracks cut through the specimen completely

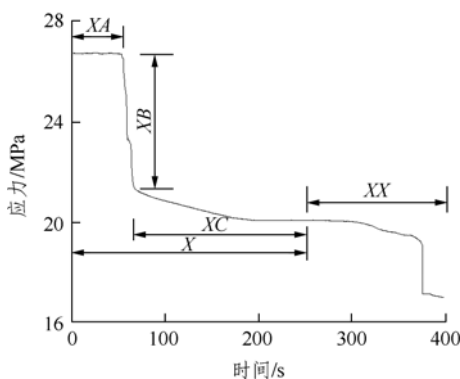


图 11 形成贯通性裂纹后进行溶解试验所得出来的应力随时间的变化曲线

Fig.11 Stress-time curve of dissolving test after cracks cut through the specimen completely

可以看出，不同裂纹状态下的岩盐试样在溶解阶段应力随溶解时间的变化关系既有相同点又有不

同之处。相同点在于，随着溶解时间的逐渐增加其应力值不断降低；不同之处在于不同裂纹的变化情况下岩盐试样的应力降的规律有明显的差异。

从图 10 中可以看出，当裂纹未充分贯通时进行溶解，应力降值较小，并且随着溶解时间的增加，应力缓慢降低。从图 11 中可以看出，当形成贯通性裂纹后进行溶解试验，应力降值很大，并且随着溶解时间的增加，应力值的变化与图 10 中的应力变化有着很大的差别。从图 11 中还可以看出，应力随着时间的变化关系可以分为两个相似的阶段——X 和 XX 段。X 段可以分为 XA, XB, XC 三小段。XA 段中，应力值基本不变；XB 段中，时间增量很小，但应力值陡降；XC 段中，随着时间的增加，应力值缓慢降低，并且应力降的幅度越变越小。XX 与 X 段相似，是 X 段中应力 - 时间关系的一个再现。

5.2 机制分析

当岩盐与水溶液相接触后，岩盐中的裂纹会由于溶蚀作用的存在而使得裂纹的尖端发生溶解，且形状发生改变，导致裂纹的临界应力强度因子 K_{Ic} 降低，当降低后的 K_{Ic} 小于裂纹的尖端附近产生的应力强度因子 K_I 时，裂纹发生失稳并扩展。由此可知，溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机制在于岩盐发生溶解，从而使得岩盐裂纹的临界应力强度因子降低，表现在单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验中，随着溶解时间的增加，应力值不断地降低。

不同裂纹的变化情况下溶解阶段岩盐试样的应力降的规律有明显的差异，其原因在于：

(1) 当裂纹未充分贯通时，进行溶解试验，此时只有表面裂纹与水溶液发生接触，随着溶解的发生，应力值不断降低，但是由于表面裂纹的溶解并不能够明显的降低岩盐试样的整体性能，所以应力值只能缓慢的降低。

(2) 当形成贯通性裂纹后进行溶解试验，贯通性裂纹与水溶液接触发生溶解后，岩盐试样的整体性能发生明显的降低，应力值的变化也就与图 10 中的应力变化有着很大的差别。

另外，出现图 11 中应力随时间的变化规律的机制在于：

(1) 当溶解过程刚刚开始时，已形成贯通性裂面的主裂纹与水溶液发生接触进行溶解时，裂纹发生失稳扩展时的 K_{Ic} 由于溶解的作用而不断降低。但在短时间之内， K_{Ic} 比 K_I 要高，故在 XA 段中在

短时间内应力值基本不动。

(2) 当 K_{IC} 不断降低, 直至 $K_{IC} < K_I$ 时, 裂纹就会发生扩展, 此时应力值会在很短时间内陡降, 故在 XB 段中, 时间增量很小, 但应力值陡降。

(3) 随着时间的增加, 裂纹在短时间内扩展释放出大部分积聚的能量之后, 其残余能量随着裂纹后期的缓慢扩展而慢慢释放, 到一定时间之后裂纹扩展基本停下来形成一个新的裂纹, 这就造成在 XC 段中, 随着时间的增加, 应力值缓慢降低, 并且应力降的幅度越变越小。

(4) 但是随着溶解时间的进一步增加, 新裂纹的应力强度因子临界值 K'_{IC} 值与新裂纹的尖端附近产生的应力强度因子 K'_I 会将在 X 段中的关系近似的重演, 这就是 XX 与 X 段相似的原因。在有的试验中 XX 段曲线并没有出现, 这是因为这些试验中, 第一个循环所持续的时间已经超过了试验时间 ($t = 400$ s)。

6 试验影响因素分析

对试验产生影响的因素有岩盐试样尺寸的误差、测量溶解质量的误差、岩盐试样的不同等, 但对试验产生影响最大的是由于岩盐试样出于本身微观组成上的不同而造成的。岩盐是以 $NaCl$ 晶体为主要成分, 通过晶界及其胶结、充填物所组成的沉积岩。组成岩盐的主要 $NaCl$ 晶体尺寸的大小以及晶粒之间的胶结、充填物的性质的不同, 造成了不同岩盐力学性质的差异。 $NaCl$ 晶体尺寸的最大值可以达到 $4 \sim 10$ mm, 这相比细观力学试验中的岩盐试样的尺寸来说, 是不可忽略的。由于岩盐试样本身微观组成上的差异, 造成各个试样的试验结果之间存在着差别。

7 结 论

本文通过大量的单轴压缩条件下岩盐应力 - 溶解耦合效应的细观力学试验, 研究了应力作用下岩盐溶解速率的变化以及溶蚀作用下岩盐力学性质的变化, 得出了如下结论:

(1) 发现了在应力作用下岩盐的溶解特性会发生显著的变化, 对于岩盐溶解速率来说, 应力作用的影响是不可忽略的。

(2) 采用溶解质量(即宏观溶解速率)与轴向塑性应变和溶解时间之间的关系来定量描述应力作用下岩盐溶解速率的变化, 并在试验结果的基础上得出了溶解质量与轴向塑性应变和溶解时间之间的变化规律。

(3) 通过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原因进行了分析。

(4) 发现了在溶蚀作用下, 岩盐的力学性质会发生变化。并通过对溶解阶段应力随着溶解时间的变化关系的研究, 得出溶蚀作用下岩盐力学性质发生变化的机制在于岩盐发生溶解从而使得岩盐裂纹的临界应力强度因子降低。

(5) 分析了在不同的裂纹变化情况下, 溶解阶段岩盐试样的应力随着时间的变化规律。

本文的研究成果为进一步研究岩盐的应力 - 溶解耦合机制奠定了试验依据以及理论基础, 从而为岩盐溶腔的稳定性分析与评价奠定基础。

参考文献(References):

- [1] HUNSCHE U, ALBRECHT H. Results of true triaxial strength tests on salt rock[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35(4/5): 867 - 877.
- [2] HANSEN F D, MELLEGARD K D, SENSENY P E. Elasticity and strength of ten natural rock salts[C]// HARDY H R, LANGER J M ed. *Proceedings of the First Conference on the Mechanical Behavior of Rock Salt*. Clausthal-Zellerfeld: Trans. Tech. Publications, 1984.
- [3] 周时光, 阳友奎, 李晓东. 岩盐力学特性的刚性试验研究[J]. *西南工学院学报*, 1994, 9(2): 42 - 46.(ZHOU Shiguang, YANG Youkui, LI Xiaodong. Experimental study on mechanical properties of rock salt by stiff machine[J]. *Journal of Southwest Institute of Technology*, 1994, 9(2): 42 - 46.(in Chinese))
- [4] 梁卫国, 赵阳升. 岩盐力学特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(3): 391 - 394.(LIANG Weiguang, ZHAO Yangsheng. Testing study on mechanical properties of thenardite rock salt[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(3): 391 - 394.(in Chinese))
- [5] 刘江, 杨春和, 吴文, 等. 盐岩短期强度和变形特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增 1): 3104 - 3109.(LIU Jiang, YANG Chunhe, WU Wen, et al. Experimental study on short-term strength and deformation properties of rock salts[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.1): 3 104 - 3 109.(in Chinese)
- [6] 刘成伦, 徐龙君, 鲜学福. 长山岩盐动溶的动力学特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, 23(4): 58 - 71.(LIU Chenglun, XU Longjun, XIAN Xuefu. Kinetics characteristics of resolving of rock salt of Changshan under dynamical state[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2000, 23(4): 58 - 71.(in Chinese))
- [7] 杨骏六, 杨进春, 邹玉书. 岩盐水溶特性的试验研究[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1997, 1(2): 74 - 80.(YANG Junliu, YANG Jinchun, ZOU Yushu. Study on experiments of solution mining properties of rock salts[J]. Journal of Sichuan Union University (Engineering Science), 1997, 1(2): 74 - 80.(in Chinese))
- [8] 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))
- [9] HOU Z. Mechanical and hydraulic behavior of salt rock in the excavation disturbed zone around underground facilities[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 725 - 738.
- [10] 周 辉, 汤艳春, 胡大伟, 等. 盐岩裂隙渗流 - 溶解耦合模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 946 - 950.(ZHOU Hui, TANG Yanchun, HU Dawei, et al. Study on coupled penetrating-dissolving model and experiment for salt rock cracks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 946 - 950.(in Chinese))
- [11] 王贵君. 盐岩层中天然气存储洞室围岩长期变形特征[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 431 - 435.(WANG Guijun. Long-term deformation characters of salt rock surrounding a gas storage cavern[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 431 - 435.(in Chinese))
- [12] 梁卫国. 盐类矿床水压致裂水溶开采的多场耦合理论及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1 090.(LIANG Weiguo. Study on multi-field coupling theory and its application to hydraulic fracturing and solution mining for salt deposit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1 090.(in Chinese))
- [13] 姜德义, 任 松, 刘新荣, 等. 岩盐溶腔稳定性控制研究[J]. 中国井矿盐, 2005, 36(3): 16 - 19.(JIANG Deyi, REN Song, LIU Xinrong, et al. Study on the stability control of rock salt caverns[J]. China Well and Rock Salt, 2005, 36(3): 16 - 19.(in Chinese))
- [14] 班凡生, 耿 晶, 高树生, 等. 岩盐储气库水溶建腔的基本原理及影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 261 - 266.(BAN Fansheng, GENG Jing, GAO Shusheng, et al. Studying on basic theory and influence factor of gas storage in salt caverns building with water solution[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(2): 261 - 266.(in Chinese))
- [15] 赵志成, 朱维耀, 单文文. 盐穴储气库水溶建腔机制研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 107 - 109.(ZHAO Zhicheng, ZHU Weiyao, SHAN Wenwen, et al. Research on mechanism of solution mining for building underground gas storage in salt cavern[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 107 - 109.(in Chinese))
- [16] 冯夏庭, 丁梧秀. 应力 - 水流 - 化学耦合下岩石破裂全过程的细观力学试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1 465 - 1 473.(FENG Xiating, DING Wuxiu. Meso-mechanical experiment on micro-fracturing process of rock under coupled mechano-hydro-chemical environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1 465 - 1 473.(in Chinese))