

文章编号: 1000-7598 (2012) 06-1601-07

三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验研究

汤艳春^{1,2}, 房敬年³, 周 辉¹

(1. 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, 武汉 430071;
2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘 要: 通过大量的三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验, 对岩盐溶蚀特性进行了研究, 结果表明, 对于岩盐溶解速率来说, 三轴应力作用的影响不可忽略; 采用宏观溶解速率(即溶蚀质量)与围压、塑性体应变和溶解时间之间的关系来定量描述三轴应力作用下岩盐溶解速率的变化, 并在试验的基础上获得了宏观溶解速率与围压、塑性体应变和溶解时间之间的关系表达式; 在相同的溶解时间、塑性体应变条件下, 不同围压下岩盐试样溶蚀前后的形态差异较明显, 应力影响质量变化较大, 且随着围压的增加, 试样溶蚀后形态的变化越小, 应力影响质量越小; 揭示了三轴应力作用下岩盐溶蚀特性变化机制, 得出三轴应力作用下岩盐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。该研究成果为进一步研究岩盐应力-溶解耦合机制奠定了试验依据以及理论基础。

关 键 词: 岩盐; 溶蚀特性; 三轴应力; 塑性体应变; 围压; 裂纹

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Experimental study of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress

TANG Yan-chun^{1,2}, FANG Jing-nian³, ZHOU Hui¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Through a lot of tests under triaxial stress, rock salt dissolving characteristics have been studied. The results show that the influence of triaxial stress on rock salt dissolving velocity can not be ignored; the relationships between macro dissolving velocity (can be equal to dissolved mass in tests) and confining pressure, plastic volumetric strain and dissolving time, can be used to quantitatively describe the variation of rock salt dissolving velocity under the effect of triaxial stress according to the test data; the numerical expressions between macro dissolving velocity and confining pressure, plastic volumetric strain and dissolving time, are obtained; at the same dissolving time and plastic volumetric strain condition, under the different confining pressures, the obvious difference between the shape of rock salt sample before and after dissolved exists; dissolved mass with stress effect changes greatly, and with increased confining pressure, dissolved mass with stress effect on the variation for the shape decreases; the obtained mechanism of rock salt dissolving characteristics under triaxial stress is that the direct relationship between rock salt dissolving velocity under triaxial stress and development of surface cracks under different confining pressures is obtained. The achieved results can provide a foundation for the further analyses of coupled stress-dissolving mechanism of rock salt.

Key words: rock salt; dissolving characteristics; triaxial stress; plastic volumetric strain; confining pressure; crack

1 引 言

岩盐的用途广泛, 除了直接应用于石油化工工业、化学工业、通用动力工业、国防部门、农业以及环保等领域以外, 近年来, 随着世界范围内对能

源的需求量急剧增加, 能源危机日益突出, 岩盐矿藏还被各国用于进行国家战略能源地下储存以及核废料地下储存。

安全性问题是在岩盐中实施能源储存和核废料处置的首要问题, 储库盐腔一般采用水溶法建造,

收稿日期: 2011-01-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No. 50809035); 国家自然科学基金面上项目(No. 10772190); 中科院武汉岩土力学研究所岩土力学国家重点实验室开放基金(No. Z110705); 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(No. 2008KDZ02)。

第一作者简介: 汤艳春, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩盐应力-溶解耦合机理方面的研究工作。E-mail: tych8102-2002@163.com

通讯作者: 周辉, 男, 1972 年生, 研究员, 主要从事岩石力学试验、理论、数值模拟与工程安全性分析方面的研究工作。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

在实际的水溶建腔过程中, 保证储库盐腔的围岩稳定性至关重要。前人围绕着岩盐溶腔形态控制和稳定性开展了大量和富有成效的研究工作, 在岩盐的力学特性研究方面, 杨春和等^[1]、邱贤德等^[2]、Carter 等^[3]进行了单轴和三轴压缩、松弛状态以及不同温度条件下岩盐的蠕变试验研究, 房敬年等^[4]根据岩盐单/三轴压缩试验和细观力学试验结果, 对岩盐的弹塑性损伤耦合机制进行了研究; 在岩盐溶蚀特性研究方面, 杨骏六等^[5]、刘成伦等^[6]、梁卫国等^[7]进行了岩盐水溶特性试验研究; 在岩盐溶腔形状控制与稳定性研究方面, 刘新荣等^[8]、尹雪英等^[9]对岩盐溶腔围岩应力分布规律进行了数值模拟计算和分析, 班凡生等^[10]、赵志成等^[11]对岩盐储气库水溶建腔流体输运理论以及溶腔形态变化规律进行了研究; 在岩盐应力-溶解-渗流耦合特性研究方面, 周辉等^[12]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, 汤艳春等^[13-14]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对岩盐应力-溶解耦合特性进行了初步的研究。

目前所开展的研究主要集中在纯溶解作用以及单轴应力作用下岩盐溶解速率的试验等方面, 忽略了实际情况下三向应力作用对岩盐溶解速率的影响。通过大量的三轴应力作用下的岩盐溶蚀特性试验, 本文研究在三轴应力作用下岩盐溶蚀特性的变化规律, 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 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验

2.1 试验目的

(1) 通过无应力作用下的岩盐溶蚀试验以及不同围压作用下岩盐溶蚀特性试验, 对比不同应力作用(无应力、单轴应力和三轴应力)下的岩盐溶蚀特性;

(2) 通过不同围压作用下岩盐溶蚀特性试验, 获取三轴应力作用下岩盐溶蚀特性与岩盐力学性质之间的定量关系。

2.2 试验方案

本次试验所用的岩盐试样取自于湖北省云应岩盐矿区, 具体的试验方案概述如下:

(1) 岩盐试样制备

用于三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验的岩盐试样标准尺寸为 $\phi 37.5 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$, 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如图 1 所示。岩样的加工精度包括平行度、平直度和垂直度, 在

岩盐试样加工的过程中, 不仅要满足其加工精度, 而且还要注意对岩盐的保护, 避免对岩盐试样表面造成损坏, 影响试验结果。



图 1 岩盐试样照片

Fig.1 Photo of rock salt sample

(2) 无应力作用下岩盐溶蚀试验

采用长方体岩盐试样进行无应力作用下的岩盐溶蚀试验, 测试不同溶解时间长方体岩盐试样在蒸馏水中溶蚀的岩盐质量。在试验中, 除了 1 个面裸露外, 长方体岩盐试样的其他面均用 703 硅橡胶均匀涂抹。

(3) 力学试验阶段

力学试验阶段为三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验的第 1 阶段, 在中国科学院武汉岩土力学研究所与法国里尔科技大学合作研制开发的岩石全自动三轴伺服流变仪上进行, 试验的围压分别为 0、2、5、15 MPa, 采用轴向位移加载控制方式, 轴向加载速率为 0.022 mm/min 。将岩盐试样加载到不同的应力、应变状态后, 进行卸载, 将岩盐试样从三轴室中取出, 并将试样表面的油液清静, 因为试样表面的液压油液会阻碍岩盐的溶蚀。

(4) 溶蚀试验阶段

溶蚀试验阶段为三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验的第 2 阶段, 首先将卸载下来的试样轴线方向的两个端面用 703 硅橡胶均匀涂抹, 再将试样完全浸泡于蒸馏水中, 测试不同溶解时间试样在蒸馏水中所溶蚀的岩盐质量。

2.3 试验数据

无应力作用下岩盐溶蚀试验数据如表 1 所示, 并将溶蚀的岩盐质量统一换算为岩盐溶解速率, 称为无应力溶解速率。

对表 1 中无应力溶解速率与溶解时间的试验数据进行曲线拟合, 可以得出无应力溶解速率与溶解时间之间的关系表达式为

$$v(t) = 0.361 \exp(t/14.016) - 0.363 \quad (1)$$

式中： v 为无应力溶解速率，单位为 $\text{g}/(\text{cm}^2 \times 100 \text{ s})$ ； t 为溶解时间，单位为 100 s。

三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验中卸载点的应力、应变值以及不同溶解时间的溶蚀质量如表 2 所示。表 2 中试样 A0 代表圆柱形岩盐试样在无应力作用下的溶蚀试验数据，其所对应的不同溶解时间下的溶蚀质量是根据式 (1) 换算出来的。表 2 中应变是以压缩的正应变为正。

塑性体应变的计算公式为

$$\varepsilon_v^p = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) - \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

式中： ε_1 为轴向应变； $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ 为环向应变； σ_1 为轴向应力； $\sigma_2 = \sigma_3$ 为围压； E 为弹性模量； ν 为泊松比。各岩盐试样卸载点的塑性体应变值如表 2 所示，从表 2 中可以看出，不同围压下，在轴向塑性应变相同时，其塑性体应变相差较大，而且计算出来的

塑性体应变都为负值（负值说明岩盐试样体积在增加，正值说明岩盐试样体积在减少，在后续的分析中取其绝对值）。

表 1 无应力作用下岩盐溶蚀试验数据
Table 1 Data of rock salt dissolving tests without stress

试样	溶蚀端面尺寸 /mm	溶解时间 /s	溶蚀质量 /g	无应力溶解速率 /(g/(cm ² ×100s))
Z-1	74.3×35.0	100	0.607	0.023 3
		200	1.342	0.051 6
		300	2.131	0.081 9
		600	5.025	0.193 2
		900	8.362	0.321 5
Z-2	75.8×37.3	100	0.660	0.023 4
		200	1.459	0.051 7
		300	2.317	0.081 8
		600	5.464	0.193 3
		900	9.091	0.321 4
Z-3	74.5×36.0	100	0.626	0.023 3
		200	1.384	0.051 5
		300	2.198	0.082 0
		600	5.183	0.193 0
		900	8.624	0.321 6

表 2 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验数据
Table 2 Data of rock salt dissolving characteristics tests under triaxial stress

试样	卸载点应力/MPa		卸载点应变/%		塑性体应变 /%	溶蚀质量/g				
	偏压	围压	轴向	环向		100 s	200 s	300 s	600 s	900 s
A0						2.063	4.558	7.24	17.075	28.411
A1	16.53	0	1	-1.39	-1.84	2.284	4.792	7.605	17.567	30.536
A2	17.48	0	1.32	-2.08	-2.89	2.295	4.844	7.713	18.403	30.905
A3	18.35	0	1.73	-3.16	-4.65	2.427	5.222	8.285	19.617	33.214
A4	20.16	0	1.94	-3.62	-5.36	2.781	5.707	9.313	21.802	36.532
A5	22.04	0	2.02	-3.91	-5.86	3.316	6.413	11.224	26.375	42.107
A6	22.97	0	2.26	-4.17	-6.15	3.422	7.529	11.509	27.836	48.391
A7	23.24	0	2.5	-4.8	-7.19	4.202	8.804	14.018	33.72	55.463
A8	22.16	0	2.74	-5.75	-8.92	6.902	15.317	24.312	57.103	95.707
A9	21.56	0	3.06	-6.38	-9.85	7.871	15.812	24.901	58.968	102.424
A10	20.8	0	3.24	-7.32	-11.52	8.023	16.205	27.654	63.201	108.104
B11	17.93	2	1.00	-0.98	-1.03	2.224	4.705	7.581	17.713	30.606
B12	20.07	2	2.22	-2.48	-2.91	2.262	4.767	7.637	17.791	30.712
B13	24.18	2	2.84	-3.86	-5.09	2.303	4.947	7.814	18.833	32.849
B14	26.75	2	3.62	-4.91	-6.44	2.533	5.432	8.576	20.407	35.404
B15	29.38	2	4.04	-5.56	-7.34	2.807	5.822	9.201	21.776	36.913
B16	30.64	2	4.57	-6.32	-8.31	3.457	7.489	12.413	28.508	47.202
B17	28.35	2	5.28	-7.30	-9.53	5.122	11.532	19.706	46.051	76.95
C18	27.46	5	2.06	-1.43	-0.95	2.144	4.760	7.547	17.952	30.407
C19	33.65	5	4.12	-3.68	-3.49	2.183	4.787	7.649	18.088	30.512
C20	37.82	5	6.08	-5.74	-5.73	2.203	4.834	7.725	18.291	30.635
C21	38.97	5	7.11	-7.08	-7.23	2.226	4.896	7.835	18.657	32.252
C22	43.91	5	8.03	-8.13	-8.61	2.502	5.344	8.561	20.093	35.405
D23	32.63	15	2.54	-1.99	-1.68	2.071	4.602	7.421	17.571	29.474
D24	37.12	15	3.97	-3.34	-3.36	2.117	4.642	7.447	17.665	29.662
D25	42.63	15	6.13	-5.02	-4.18	2.141	4.692	7.483	17.782	29.958
D26	53.12	15	8.25	-6.17	-4.92	2.200	4.759	7.584	17.891	30.481

3 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性

3.1 不同应力作用下岩盐溶蚀特性对比

根据表 2 岩盐溶蚀特性试验数据, 对不同应力作用下岩盐溶蚀特性进行对比分析, 可得出:

(1) 在相同溶解时间下, 不同的围压, 特别是塑性应变明显产生后, 岩盐的溶蚀特性会发生显著的变化。

(2) 围压的大小对岩盐溶解速率有影响, 对于岩盐溶解速率来说, 三轴应力作用的影响不可忽略。

3.2 试验数据分析

通过上述试验可以发现, 在溶蚀试验阶段, 相同的溶解时间内岩盐试样宏观溶解速率 (即所溶蚀的质量) 与岩盐试样所处的应力-应变状态有关, 本文采用卸载点处的塑性体应变、围压来量化这一状态。在相同的塑性体应变与围压下, 宏观溶解速率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宏观溶解速率与塑性体应变、围压和溶解时间之间的关系来进行定量描述。对表 2 中溶蚀质量、塑性体应变、围压和溶解时间的试验数据进行曲线拟合, 并将溶蚀质量换算成宏观溶解速率, 可以得出宏观溶解速率与塑性体应变 ε_v^p 、围压 σ_3 和溶解时间 t 之间的关系表达式为

$$v(\sigma_3, \varepsilon_v^p, t) = 0.0113(0.5t^2 + 7.412t) \cdot \left[1 - \frac{0.716}{1 + \exp(0.8\sigma_3) \exp((- \varepsilon_v^p - 7.66)/0.915)} \right] \quad (3)$$

式中: v 为应力作用下宏观溶解速率 ($\text{g}/(\text{cm}^2 \times 100 \text{ s})$); $-11.52 \leq \varepsilon_v^p \leq 0(\%)$; $0 \leq \sigma_3 \leq 15(\text{MPa})$; $0 \leq t \leq 9(100 \text{ s})$ 。

3.3 相同围压条件下的岩盐溶蚀特性

为了直观地分析和比较有无应力作用岩盐溶蚀特性的差异, 定义应力影响质量这个概念, 其含义为相同溶解时间下应力作用下岩盐的溶蚀质量与无应力作用下溶蚀质量之差, 其值反应了相同溶解时间下应力作用与无应力作用下岩盐宏观溶解速率之间的差异。

围压分别为 0、2、5、15 MPa 时, 岩盐应力影响质量与塑性体应变、溶解时间之间的变化规律基本相似, 图 2 是围压为 5 MPa 时应力影响质量与塑性体应变、溶解时间之间的关系, 图中的曲线为试验数据拟合曲线。从图 2 中可以看出:

(1) 在相同围压条件下, 当给定塑性体应变值时, 随着溶解时间的增加, 应力影响质量不断增加, 并且其增长速率也不断增大;

(2) 在相同围压条件下, 当给定溶解时间随着塑性体应变的增加, 应力影响质量不断增加。

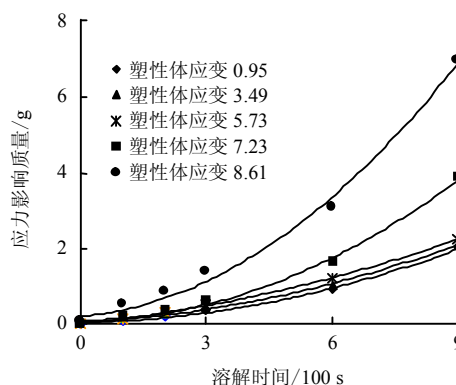


图 2 围压为 5 MPa 时不同塑性体应变下应力影响质量与溶解时间之间的关系

Fig.2 Relationships between dissolved mass with stress and time while $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ under different plastic volumetric strains

图 3~5 分别为 A1、A5 和 A9 试样溶蚀前后的照片, 在图 5 中使用线框标记了不同溶解时间时岩盐裂纹形态的变化。从图 3~5 中可以看出:

(1) 在相同的围压条件下, 随着 ε_v^p 和溶解时间的增加, 岩盐试样溶蚀后形态发生了变化, 且随着 ε_v^p 的增加, 试样溶蚀后形态的变化越大;

(2) 当 ε_v^p 较小时, 表面裂纹未扩展至贯通性状态 (如图 3、4 所示), 试样溶蚀后形态变化较小;

(3) 特别是出现如图 5 所示的贯通性裂纹后, 随着溶解时间的增加, 裂纹的形态变化显著, 其意味着随着溶解时间的增加, 岩盐与水溶液接触的溶蚀面积随之较快增加, 应力影响质量明显增加。

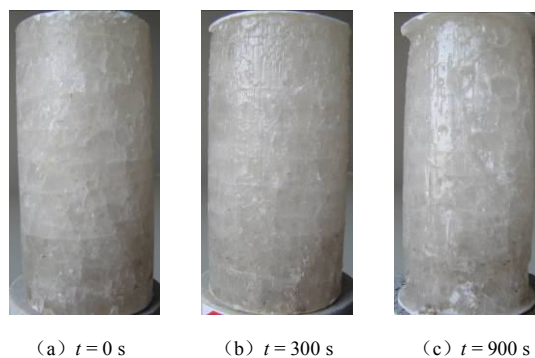


图 3 A1 试样 ($\varepsilon_v^p = 1.84\%$) 溶蚀前后的照片

Fig.3 Photos of sample A1 dissolved at $\varepsilon_v^p = 1.84\%$

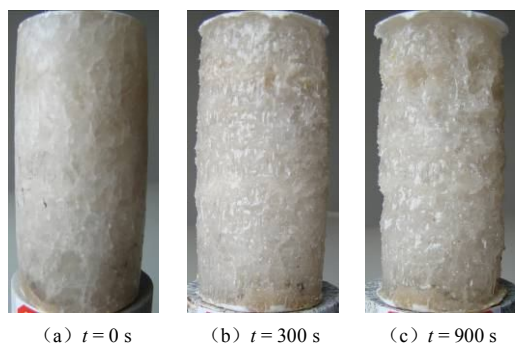


图4 A5试样 ($\varepsilon_v^p=5.86\%$) 溶蚀前后的照片
Fig.4 Photos of sample A5 dissolved at $\varepsilon_v^p=5.86\%$

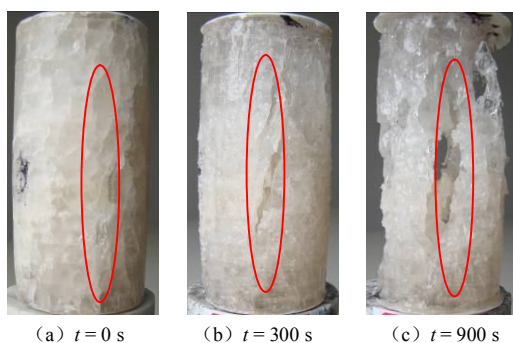


图5 A9试样 ($\varepsilon_v^p=9.85\%$) 溶蚀前后的照片
Fig.5 Photos of sample A9 after dissolved at $\varepsilon_v^p=9.85\%$

3.4 不同围压条件下的岩盐溶蚀特性

图6为溶解时间为900 s时不同围压条件下应力影响质量与塑性体应变之间的关系图, 图中曲线为试验数据拟合曲线。其他溶解时间(100、200、300、600 s)时不同围压条件下应力影响质量与塑性体应变之间的关系与图6相似。

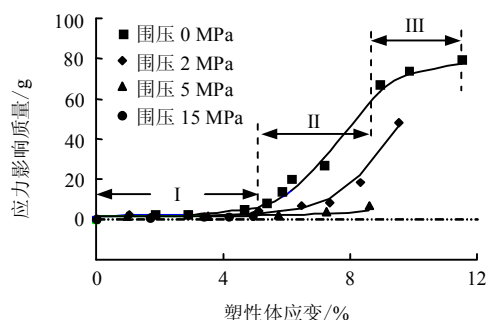


图6 溶解时间为900 s时不同围压下应力影响质量与塑性体应变之间的关系
Fig.6 Relationships between dissolved mass with stress and plastic volumetric strain while $t=900$ s under different values of σ_3

从图6中可以看出:

(1) 在相同的溶解时间下, 不同的围压下, 岩盐应力影响质量与塑性体应变之间的变化规律存在着差异。当围压 $\sigma_3=0$ 时, 应力影响质量与塑性体应变之间的变化规律可分为3个阶段: 缓慢增长阶

段(I阶段)、急剧变化阶段(II阶段)以及最后的减缓阶段(III阶段); 当围压 $\sigma_3=2, 5$ MPa时, 只有I、II阶段存在; 当围压 $\sigma_3=15$ MPa时, 只有III阶段存在。

造成这个现象的原因在于: 塑性体应变与围压的值相关, 随着围压的增加, 由于仪器测量量程的限制, 部分变化阶段无法获得。

(2) 在相同的溶解时间下, 当塑性体应变一定时, 随着围压的增加, 应力影响质量值不断降低。当围压 $\sigma_3=0$ 时, 应力影响质量值最大; 当围压 $\sigma_3=15$ MPa时, 应力影响质量值较小。

为了更直观地分析不同围压下的岩盐溶蚀特性, 选取试样A5、B14、C21和D26溶蚀前后的照片进行对比, 这4个试样的试验条件是围压不同, 但溶蚀时塑性体应变值相差较小。A5试样溶蚀前后的照片已在图4中列出, 图7~9分别为B14、C21和D26试样溶蚀前后的照片。

从图4、7~9中可以看出: 在相同的溶解时间、塑性体应变也相差较小的条件下, 不同围压下岩盐试样溶蚀前后的形态差异较明显, 且随着围压的增加, 试样溶蚀后形态的变化越小, 在围压为15 MPa时, 试样溶蚀前后形态基本无变化。

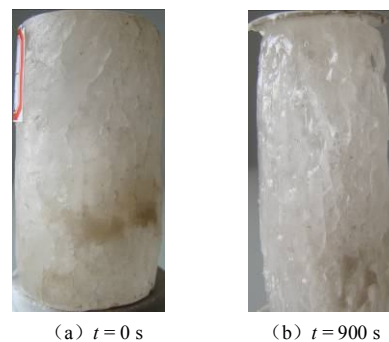


图7 B14试样 ($\varepsilon_v^p=5.86\%$, $\sigma_3=2$ MPa) 溶蚀前后的照片
Fig.7 Photos of sample B14 dissolved at $\varepsilon_v^p=5.86\%$ and $\sigma_3=2$ MPa

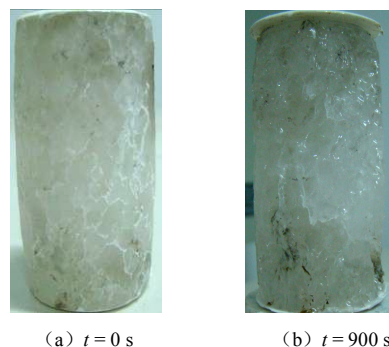


图8 C21试样 ($\varepsilon_v^p=7.23\%$, $\sigma_3=5$ MPa) 溶蚀前后的照片
Fig.8 Photos of sample C21 dissolved at $\varepsilon_v^p=7.23\%$ and $\sigma_3=5$ MPa

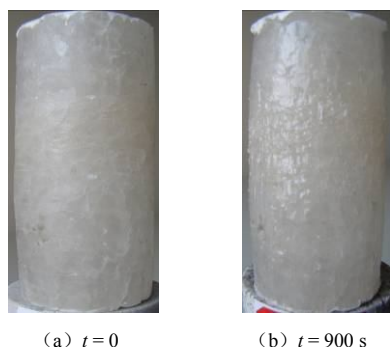


图9 D26试样 ($\varepsilon_v^p=4.92\%$, $\sigma_3=15\text{ MPa}$) 溶蚀前后的照片
Fig.9 Photos of sample D26 dissolved at $\varepsilon_v^p=4.92\%$ and $\sigma_3=15\text{ MPa}$

4 三轴应力作用下岩盐溶蚀特性变化机制分析

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接触的溶蚀作用面有效面积的大小。在三轴应力作用下,特别是产生塑性变形后,表面裂纹会不断发育与扩展,使得溶蚀作用面有效面积增加,从而使得岩盐溶解速率变大;同时,由于围压的存在,限制了岩盐表面裂隙的发育与扩展,阻止了岩盐晶粒间的相对滑移,从而造成不同围压下表面裂纹的发育与扩展程度不同。

基于三轴应力作用下岩盐溶蚀特性试验成果,以及上述机制分析,可认为三轴应力作用下岩盐溶解速率变化和不同围压下表面裂纹的发育与扩展有着直接的联系,具体分析如下:

(1) 围压一定时 在塑性变形产生、塑性体应变较小时,岩盐表面出现细观裂纹,与水接触后,表面细观裂纹变化较小,溶蚀作用面有效面积缓慢增加。

随着塑性体应变的增加,岩盐表面出现细观主裂纹,与水接触后细观主裂纹形态急剧变化,溶蚀作用面有效面积增加明显,造成溶解速率增加,且其增加幅度也在变大;当塑性体应变较大时,贯通性裂纹产生,与水接触后,贯通性裂纹形态发生变化,溶蚀作用面有效面积增加,但其增幅变缓。

(2) 不同围压时 单轴压缩状态下,岩盐裂纹的发育与扩展未受围压的限制,表面裂纹的开度相对较大,使得水溶液较容易侵入发生溶蚀作用,溶解速率易受应力作用的影响。

低围压(2、5 MPa)条件下,岩盐裂纹的发育与扩展受到围压的影响,表面裂纹的开度较小,水溶液较难侵入到裂纹内部发生溶蚀作用,溶解速率受应力作用的影响降低;当围压较高(15 MPa)时,围压限制了裂纹的发育与扩展,且由于应力的压密

作用使得裂纹的开度较小,溶解速率受应力作用的影响较小。

从以上分析可知,随着围压的增加,表面裂纹的发育与扩展受到的限制越强,溶蚀作用面的有效面积越小,造成溶解速率受应力作用的影响越小。

5 试验影响因素分析

试验的主要影响因素如下:

(1) 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,造成了岩盐力学和溶蚀特性的差异。

(2) 在试验过程中,岩盐试样先加载至一定应力-应变状态,再将应力卸载,最后进行溶蚀试验。在进行溶蚀试验之前,岩盐试样的变形特征会由于卸载而发生变化,从而对试验结果造成影响。

(3) 溶蚀后从水溶液中取出试样,再进行溶蚀质量的测定,在此过程中,溶蚀质量值会产生一定的偏差。

6 结 论

(1) 不同的应力作用下,特别是塑性应变产生后,岩盐的溶蚀特性会发生显著的变化,对于岩盐溶解速率来说,三轴应力作用的影响不可忽略;

(2) 采用宏观溶解速率(即溶蚀质量)与围压、塑性体应变和溶解时间之间的关系来定量描述三轴应力作用下岩盐溶解速率的变化,并在试验的基础上获得了宏观溶解速率与围压、塑性体应变和溶解时间之间的关系表达式;

(3) 在相同的溶解时间、塑性体应变条件下,不同围压下岩盐试样溶蚀前后的形态差异较明显,应力影响质量变化较大,且随着围压的增加,试样溶蚀后形态的变化越小,应力影响质量越小;

(4) 揭示了三轴应力作用下岩盐溶蚀特性变化机制,得出三轴应力作用下岩盐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。

该研究成果为进一步研究岩盐应力-溶解耦合机制奠定了试验依据以及理论基础。

参 考 文 献

- [1] 杨春和,殷建华, DAEMEN J J K. 盐岩应力松弛效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 262—265.
YANG Chun-he, YIN Jian-hua, DAEMEN J J K. The investigation of stress relaxation of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999,

- 18(3): 262—265.
- [2] 邱贤德, 姜永东, 阎宗岭, 等. 岩盐的蠕变损伤破坏分析[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(5): 106—109.
QIU Xian-de, JIANG Yong-dong, YAN Zong-lin, et al. Creep damage failure of rock salt[J]. **Journal of Chongqing University**, 2003, 26(5): 106—109.
- [3] CARTER N L. Rheology of salt rock[J]. **Journal of Structural Geology**, 1993, 15(10): 1257—1272.
- [4] 房敬年, 周辉, 胡大伟, 等. 岩盐的弹塑性损伤耦合模型研究[J]. 岩土力学(已录用).
FANG Jing-nian, ZHOU Hui, HU Da-wei, et al. Study on coupled elasto-plasto-damage model of rock salt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, (to be published).
- [5] 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 Jun-liu, YANG Jin-chun, ZHOU Yu-shu. Study on experiments of solution mining properties of rock salts[J]. **Journal of Sichuan Union University (Engineering Science)**, 1997, 1(2): 74—80.
- [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 Cheng-lun, XU Long-jun, XIAN Xue-fu. Kinetics characteristics of resolving of rock salt of Changshan under dynamical state[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science)**, 2000, 23(4): 58—71.
- [7] 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 Wei-guo, XU Su-guo, ZHAO Yang-sheng. Investigation on solution pervasion and mechanical characteristics of glauberite salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(5): 951—955.
- [8] 刘新荣, 姜德义. 岩盐溶腔围岩应力分布规律的有限元分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(2): 43—46.
LIU Xin-rong, JIANG De-yi. FEM analysis of stress distribution law in the rock salt cavity's surrounding rock[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2003, 26(2): 43—46.
- [9] 尹雪英, 杨春和, 陈剑文. 金坛盐矿老腔储气库长期稳定性分析数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 869—874.
YIN Xue-ying, YANG Chun-he, CHEN Jian-wen. Numerical simulation research on long-term stability of gas storage in Jintan salt mine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 869—874.
- [10] 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 Fan-sheng, GENG Jing, GAO Shu-sheng, 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.
- [11] 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 Zhi-cheng, ZHU Wei-yao, SHAN Wen-wen, 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.
- [12] 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 Yan-chun, HU Da-wei, 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.
- [13] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 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 Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Analysis of meso-mechanical test of rock salt considering couple 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. 应力作用下岩盐的溶蚀模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 296—302.
TANG Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Study on dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 296—302.