

盐岩储气库造腔期流体运移最大影响范围实验研究

刘欢^{1,2}, 王述红¹, 徐素国², 梁卫国²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 太原理工大学矿业工程学院, 山西太原 030024)

摘 要: 采用染色法在三维盐岩储气库腔体模型中进行流体运移实验研究, 分析流体运移最大影响范围. 研究结果表明: 随腔内盐水浓度增大, 流体运移最大影响范围的上下边界都向腔体顶部方向移动, 促进腔体上部侧壁面盐岩溶解; 随注水流量增大, 径向运移速度增大, 促进侧壁面盐岩溶解, 并且最大影响范围下边界向腔体底部移动, 促进中间管口下部盐岩溶解. 将实验数值转换为工程值, 在腔内盐水质量浓度为 25, 50 和 75 g/L, 注水流量为 60, 80 和 100 m³/h, 管间距为 28, 42, 56, 70, 84 和 98 m 组合条件下, 得到流体运移最大影响范围数值. 研究结果和方法可为工程中提高造腔效率及控制腔体形态提供参考建议和途径.

关 键 词: 盐岩储气库; 盐水浓度; 流体运移; 影响范围; 染色法

中图分类号: TE 822; TD 871.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)02-0266-06

Experimental Research on Maximum Effect Range of Fluid Migration in Cavity Construction Period of Salt Rock Gas Storage

LIU Huan^{1,2}, WANG Shu-hong¹, XU Su-guo², LIANG Wei-guo²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Mining Engineer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The experiment of fluid migration is studied through staining method in the three-dimensional cavity model of salt rock gas storage, and the maximum influencing range of fluid migration is analyzed. The study results show as follows: the upper and lower boundaries of the maximum influencing range of fluid migration move towards the top of cavity with the increase of brine concentration, which facilitates the salt rock solution of the side walls of upper cavity. With the increase of water injection flow, the increase of radial migration velocity facilitates the salt rock solution of side walls, and the lower boundary of the maximum influencing range of fluid migration moves towards the bottom part of cavity, which facilitates the salt rock solution of lower part of middle tube mouth. The engineering values of the maximum influencing range of fluid migration are obtained through converting experimental values under the combined conditions of different brine concentrations (25, 50, 75 g/L), water injection flows (60, 80, 100 m³/h) and tubes spacing (28, 42, 56, 70, 84, 98 m). Research results and method can provide the reference and approach for improving cavity constructing efficiency and controlling cavity shape.

Key words: salt rock gas storage; brine concentration; fluid migration; influencing range; staining method

自 20 世纪 40 年代加拿大首先利用盐穴储存液化石油气以来^[1], 盐岩作为储存能源设施的应

用开始得到推广与重视. 目前中国已将盐岩储气库列为能源战略储备的重点部署方向, 因此盐岩

收稿日期: 2016-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474050); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLGP2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LR2014006).

作者简介: 刘欢(1989-), 男, 黑龙江伊春人, 东北大学博士研究生; 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师; 梁卫国(1972-), 男, 山西阳泉人, 太原理工大学教授, 博士生导师.

储气库的建设将得到大规模开展。

盐岩储气库的建造是利用水溶采矿的原理在地下盐岩层或盐丘中通过人工控制溶盐而形成存储石油、天然气的腔体,溶腔形态受到溶盐和流体运移的影响;为达到预计的、稳定的腔体形状和体积,研究水溶造腔时腔内盐岩溶解和流体运移十分必要。国外学者早在 20 世纪 60 年代就对盐岩溶解特性、流体流动和溶腔形状控制机制进行了初步研究^[2-4]。Saberian 等^[5]对流体流速、溶解角度与溶蚀速率间的关系进行研究。Reda 等^[6]通过实验研究了圆柱状腔体的造腔过程。Quintanilha 等^[7]研究了影响溶腔体积的因素,对溶腔建设进行优化设计。Jiang 等^[8]采用相似模拟实验对盐穴建腔期腔内浓度场分布进行研究。任松等^[9]采用相似模拟实验得出腔内流场分布情况,并将其划分为 6 个影响区。本文依据相似模化方法建立三维腔体相似模型,研究腔内浓度、注水流量和管柱位置对流体运移最大影响范围的影响,其中流体运移最大影响范围是研究腔内流体受迫作对流扩散运动所影响或波及的范围,若腔体边界不在流体运移最大影响范围内,则腔体边界溶盐速度相当于静态溶解速度;若腔体边界在流体运移最大影响范围内,则腔体边界溶盐较快,溶腔扩展较快,可以提高建腔效益。

1 相似准则建立与模型腔体参数确定

盐岩储气库水溶造腔是复杂的流体动力学和化学动力学过程,很难根据相似理论建立相似模型去模拟这一过程,因此要对水溶造腔过程进行简化。在实际工程中,水溶造腔建造有效体积为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的腔体,需要约 3.5 年,但对于实验模型,流体运移状态相当于实际工程溶盐造腔的一瞬间,而稳定状态的流动才对工程有实际意义。此外,对整个腔体温度而言,水溶造腔时溶盐过程及盐溶液对流扩散过程热量和温度变化很小,因此可以忽略温度变化的影响。综上,将水溶造腔过程简化为溶质在溶剂流动体系中的输运过程,将流体运动视为黏性不可压缩流体的稳定等温运动。根据以相似理论为基础的模化方法^[10]去建立流体运动的基本微分方程组并写出全部单值条件,推导出得出原型和模型之间应满足的相似准则^[11]:

$$Eu = f(Re) .$$

(1)

式中:Eu 为欧拉数;Re 为雷诺数。

根据式(1)可知,Re 是 Eu 的自变量,只需满

足两体系中流体运动雷诺数相等并满足几何尺寸相似比,即确定了满足两体系流体流动状态相似的条件。

将实际工程盐岩储气库腔体简化为高 140 m,直径 70 m 的圆柱体。选择几何尺寸相似比:

$$c_l = l_p / l_m = 140 .$$

(2)

式中: l_p 为原型尺寸, l_m 为模型尺寸。

根据式(1)和式(2)及实际工程尺寸参数可以确定模型腔体尺寸参数和实验中对应的实际工程流量的大小,如表 1 和表 2 所示;依据当量粗糙度之比可以确定模型管柱的材质^[11]。

表 1 模型腔体和管柱的尺寸参数

Table 1 Parameters of modeled cavity and tubes

尺寸	腔体	中心管	中间管
内壁直径/m	0.5	0.002	0.006 5
高(长)度/m	1	0.9	0.7/0.6/0.5/ 0.4/0.3/0.2
材质	有机玻璃	铜管	铜管

表 2 工程流量对应的实验流量

Table 2 Flow of engineering and experiment

工程流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	60	80	100
实验流量/($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	2 385	3 174	3 950

2 实验平台搭建与实验方案

2.1 实验平台搭建

图 1 所示实验装置,通过节流阀调节流量。反循环时,染色池内的染色淡水经过水泵、节流阀流进中心管与中间管之间的环隙,最后进入腔体与盐水混合;排水由中心管流出腔体,最后流入量杯。为方便观测腔内流场,在腔体外表面划分区域并确定坐标系。腔体轴向边界范围为 $0 \sim 1.0 \text{ m}$,径向边界范围 $-0.25 \sim 0.25 \text{ m}$ 。

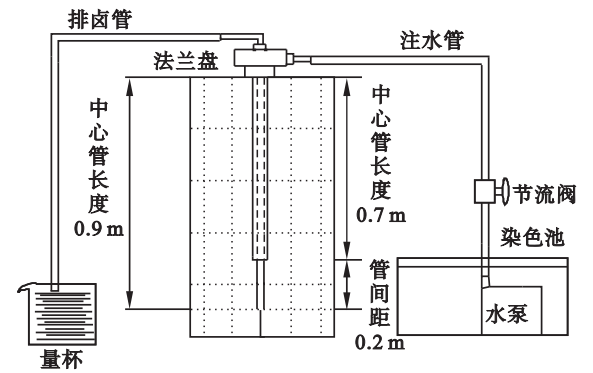


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

2.2 实验方案

2.2.1 实验目的及方案

实验采用染色法研究造腔期腔内的流体运移,盐水质量浓度分别为 25, 50 和 75 g/L,流量分别为 2 385, 3 174 和 3 950 L/h,中心管长度为 0.9 m,中间管长度分别为 0.7,0.6,0.5,0.4,0.3 和 0.2 m,在共计 54 组组合实验条件下研究流体运移规律、流体运移径向平均速度和流体运移最大影响范围。

2.2.2 实验过程

- 1) 用精制盐 (NaCl) 与淡水配置质量浓度为 25 g/L 盐水,并将其注满腔体。
- 2) 选择 0.9 m 中心管、0.7 m 的中间管与法兰盘组合。在染色池中配置红色淡水,流量大小调节为 2 385 L/h。
- 3) 腔体内盐水静止平稳后,潜水泵通电,开始实验。当染色淡水进入腔体时,用相机记录 10 张腔体内流场分布的照片。实验发现,染色淡水开始时运移较快,然后越来越慢,因此拍照间隔由短到长:前 4 张间隔 5 s,接着 2 张间隔 10 s,然后 3 张间隔 30 s,在此之后 30 min 记录第 10 张照片。
- 4) 记录完该条件下流体运移数据后,将腔内的溶液排空。用同样方法和步骤完成其余条件的实验。

3 实验结果与分析

3.1 流体运移规律

根据实验数据,归纳总结出流体运移规律。盐水质量浓度为 50 g/L,中心管长为 0.9 m,中间管长为 0.4 m,即管间距 0.5 m,在流量 3 174 L/h 条件下的流体运移图,如图 2 所示:染色淡水经中间管与中心管之间的环形口流入腔内,向腔体底部方向运动,同时卷吸周围的盐水一起运动(在卷吸过程中发生盐离子的运移与扩散),随着淡水向腔体底部运动,射流断面不断增大,沿程流量增加,动量减小,速度降低,并且由于腔内的盐离子在重力作用下向腔底聚集,导致腔内盐水由顶部至底部形成浓度差;所以越向下运动所受浮力也越大,最后混合流体转而向上运动同时向周围运移扩散,运动到一定高度后不再上升。而沿径向的扩散运动一直在进行,但径向扩散的速度小于向上的运动速度。这是由于混合流体运动方向和溶液浓度差产生的作用力方向相同,而沿径向扩散时,同一界面上的浓度相同,不受这种力作用。混合流体始终向径向运移扩散,在反循环一段时间

后(当流体扩散到壁面边界时),流体运移的轴向影响面积开始明显增加。改变注水流量、腔内盐水浓度和管间距,只影响淡水所受惯性力和浮力的大小,间接影响淡水运动的距离和速度,并没有改变惯性力和浮力的方向,所以流体运移规律不改变。

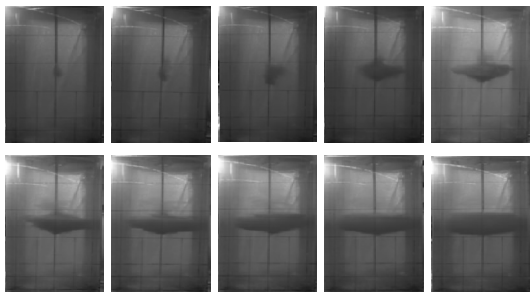


图 2 流体运移图 I
Fig. 2 Photo I of fluid migration

3.2 流体运移径向平均速度

根据每组实验数据可以计算出流体运移径向平均速度,在管间距为 0.3 m、盐水质量浓度为 50 g/L、注水流量为 3 174 L/h 条件时的流体运移图如图 3 所示;列出图中各个时间段的运移距离与速度值,如表 3 所示,其中取流场影响范围最大的一侧作为流体运移径向距离。

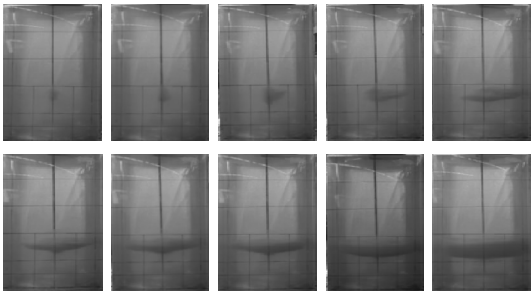


图 3 流体运移图 II
Fig. 3 Photo II of fluid migration

表 3 流体径向运移速度 Table 3 Velocity of radial fluid migration										
运移时间/s	5	10	15	20	30	40	70	100	130	1930
运移距离/cm	3	5	10	18	25	25	25	25	25	25
$v_i/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	0.6	0.4	1	1.6	0.7	0	0	0	0	0

根据式(3)和式(4)计算流体径向运移平均速度:

$$v_i = \frac{r_i}{t_i}, \tag{3}$$

$$v_{\text{ave}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (n \leq 10 \text{ 且 } v_i > 0). \tag{4}$$

式中: v_i 为第 i 个时间段内的平均速度; t_i , r_i 分别为第 i 个时间段的径向运移时间和距离; n 为时

间段数量; v_{ave} 为计算得出该条件下流体径向运移平均速度值,计算得 $v_{ave}=8.6\times 10^{-3}$ m/s.

在盐水质量浓度分别为 25,50 和 75 g/L,不同管间距条件下,注水流量和流体运移径向平均速度的关系如图 4 所示.分析可知,在腔内浓度不变,各管间距条件下,随注水流量增大,流体运移

径向平均速度都逐渐增大,盐腔径向扩容加快;在流量恒定时,随腔内浓度增大,各管间距条件下大部分点径向平均速度值都有微弱增大;由此可知,在反循环造腔时,注水流量对流体向腔体径向方向运移起主要作用,即注水流量对腔体径向扩容起主要作用.

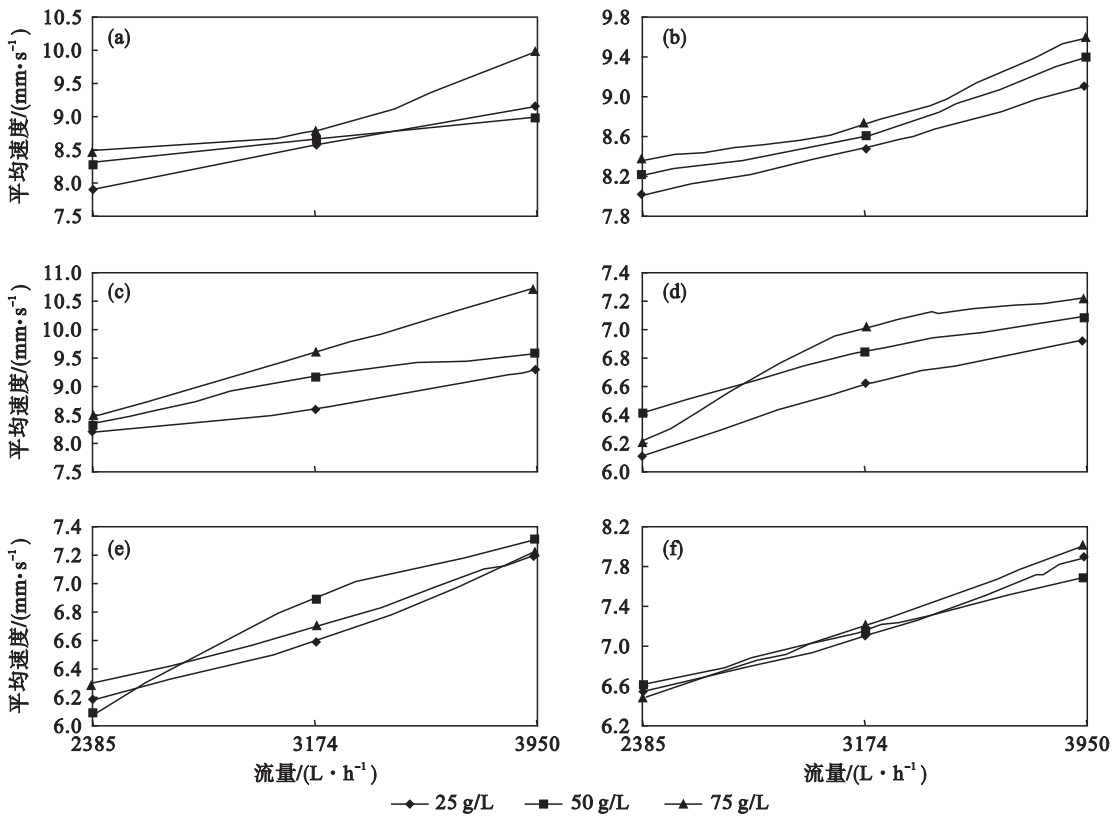


图 4 不同实验条件下流体运移的径向平均速度
Fig. 4 Average velocity of radial fluid migration with different conditions of experiments
(a)—管间距 0.2 m; (b)—管间距 0.3 m; (c)—管间距 0.4 m;
(d)—管间距 0.5 m; (e)—管间距 0.6 m; (f)—管间距 0.7 m.

3.3 流体运移最大影响范围

将各组实验所得数据中的第 10 张照片作为流体运移最大影响范围的分析数据.在初期实验中发现流场的运移范围在大概 30 min 后与 3 h 和 6 h 的运移范围没有明显变化,因此认为 30 min 内流体作受迫对流扩散运动,30 min 后流体作扩散运动,所以将第 10 张照片作为流体运移的最大影响范围的分析数据.

当管间距为 0.4 m,盐水质量浓度为 50 g/L,流量依次为 2 385,3 174 和 3 950 L/h 时流体运移最大影响范围如图 5 所示.改变流量,径向最大影响范围达到腔体侧壁边界,其范围为 (-0.25 ± 0.005) m \sim (0.25 ± 0.005) m;轴向最大影响范围依次为 (0.35 ± 0.005) m \sim (0.48 ± 0.005) m, (0.32 ± 0.005) m \sim (0.49 ± 0.005) m, (0.3 ± 0.005) m \sim (0.5 ± 0.005) m.可知随注水流量增

大,流体运移最大影响范围的下边界逐渐向腔体底部移动,上边界无明显向腔体顶部方向的移动;因此,增大注水流量可以使中间管管口以下流体运移加速,促进管口下部及侧壁盐岩溶解.当管

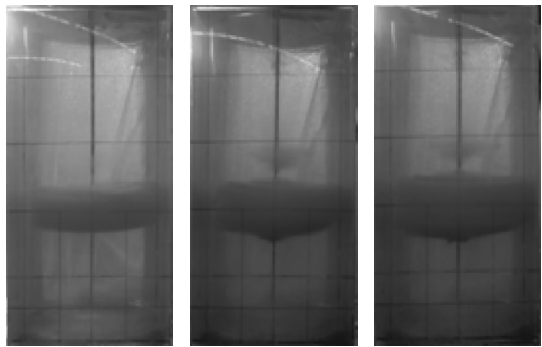


图 5 改变注水流量流体运移最大影响范围图
Fig. 5 Maximum effect range picture of fluid migration with different flows

间距为 0.2 m,注水流量为 3 174 L/h,盐水质量浓度依次为 25,50 和 75 g/L 时,流体运移最大影响范围如图 6 所示.改变质量浓度,径向最大影响范围为 $(-0.25 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.25 \pm 0.005) \text{ m}$;轴向最大影响范围依次为 $(0.1 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.3 \pm 0.005) \text{ m}$, $(0.13 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.37 \pm 0.005) \text{ m}$, $(0.19 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.4 \pm 0.005) \text{ m}$.可知随腔内质量浓度的升高,流体运移最大影响范围的上、下边界都逐渐向腔体顶部方向移动,促进腔体上部盐岩溶解.腔内上部与下部的盐水浓度差对染色淡水产生向上的浮力作用.随盐水浓度升高,浓度差会增大,淡水所受浮力随之增大,所以轴向影响范围的上、下边界都会向腔体顶部方向移动.

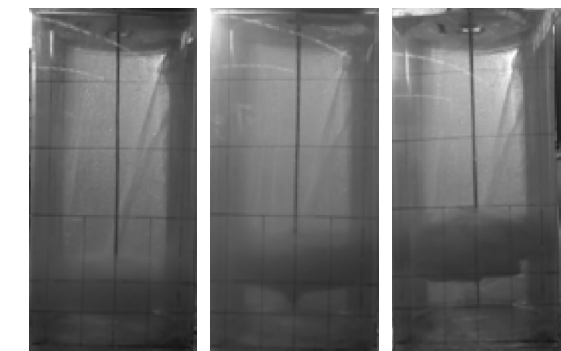


图 6 改变盐水浓度流体运移最大影响范围图
Fig. 6 Maximum effect range picture of fluid migration with different brine concentrations

提升中间管的位置对流体运移最大影响范围也有影响.图 7 是管间距为 0.7 m,注水流量为 3 174 L/h,盐水质量浓度为 50 g/L 时的流体运移图,将其与图 2 和图 3 比较可知,随着中间管位置的提升,轴向影响范围在逐渐向上移动,但影响区域上移距离逐渐变小.图 7 中径向影响范围已达腔体侧壁边界,轴向影响范围为 $(0.5 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.7 \pm 0.005) \text{ m}$.同理,归纳总结其余实验条件下的数据可知,径向最大影响范围为 $(-0.25 \pm 0.005) \text{ m} \sim (0.25 \pm 0.005) \text{ m}$,依据几何尺寸相似比将其换算为实际工程最大影响范围值,为 $(-35 \pm 0.7) \text{ m} \sim (35 \pm 0.7) \text{ m}$,换算得到实际工程中的轴向最大影响范围值如图 8 所示.同样的方法可以得到对应实验管间距的实际工程管间距值.图 8 中纵坐标表示轴向影响范围的边界与腔体底面间距离.

由图 8 可知,反循环造腔时,注水流量、腔内盐水浓度、管间距组合条件下流体运移的最大影响范围值,再结合现场声呐探测的腔体尺寸值,可为工程中水溶造腔的腔体体积控制以及提高建腔效率提供参考.将声呐探测到的腔体尺寸与实验

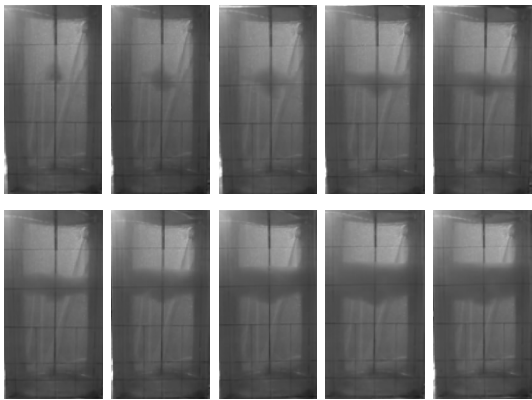


图 7 流体运移图 III
Fig. 7 Photo III of fluid migration

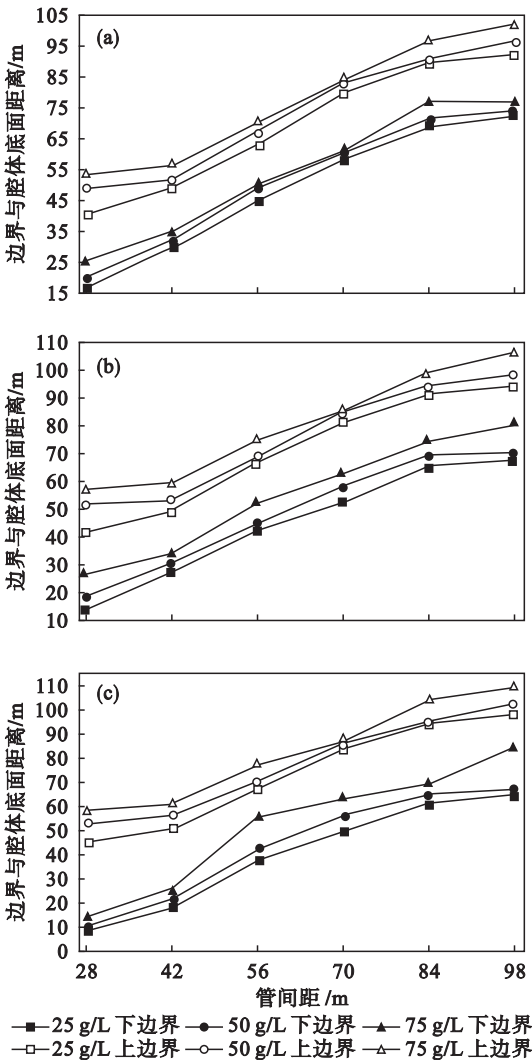


图 8 实际工程中流体运移轴向最大影响范围值
Fig. 8 Maximum effect range of axial fluid migration in actual engineering

(a)—60 m³/h; (b)—80 m³/h; (c)—100 m³/h.

值换算得到的工程值进行比较,如果腔体尺寸大于流体运移的最大影响范围,则腔体边界流体运移速度很慢,处于扩散运动状态,因此水溶造腔溶盐速度慢,相当于静态溶解.为提高溶盐造腔效

率,通过调节注水流量和管间距,使得声呐探测尺寸值包含在流体运移最大影响范围实验值换算得到的工程值内,此时腔体边界处存在流体对流运动和扩散运动,流体运移速度比较快,加快了盐岩溶解,可以提高建腔效率. 工程中不同的造腔注水流量和管间距条件下,可以采用同样的实验方法得出对应条件下流体运移最大影响范围换算值,为造腔期的腔体控制提供指导.

4 结 论

- 1) 改变腔内盐水浓度、管柱位置和注水流量时流体运移规律不改变.
- 2) 随腔内盐水浓度升高,流场轴向最大影响范围的上下边界都逐渐向腔体顶部方向移动,促进腔体上部盐岩溶解. 随注水流量增大,流体径向运移平均速度增大,径向最大影响范围逐渐增大,加快了侧壁盐岩的溶解;轴向影响范围的下边界逐渐向腔体底部移动;在实际工程中增大流量主要会促进中间管管口以下盐岩溶解.
- 3) 随着中间管位置的提升,流体运移影响区域逐渐向腔体顶部方向移动,但是影响区域上移距离逐渐变小,因此水溶造腔后中间管提升距离可以比前期距离大一些.
- 4) 腔内盐水质量浓度分别为 25, 50 和 75 g/L,注水流量分别为 60,80 和 100 m³/h,管间距分别为 28,42,56,70,84 和 98 m,根据上述组合条件下的流体运移最大影响范围值,再结合实际工程腔体尺寸,可对注水流量和管柱位置进行调整来实现对腔体形态的控制和建腔效率的提高.

参考文献:

[1] Thoms R L, Gehle R M. A brief history of salt cavern use [C]//The 8th World Salt Symposium. [S. l.]: Elsevier,

2000:207 – 214.

[2] Kazemi H, Jessen F W. Mechanism of flow and controlled dissolution of salt in solution mining [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1964, 4(4):317 – 328.

[3] Durie R W, Jessen F W. The laminar boundary layer in the free convection dissolution of salt[C]//The 2nd Symposium on Salt. Cleveland, OH, 1962:326 – 335.

[4] 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.

[5] Saberian A, von Schonfeldt H A. Convective mixing of water with brine around the periphery of vertical tube [C]// The Fourth Salt Symposium. Houston, Texas, 1973:195 – 202.

[6] Reda D C, Russo A J. Experimental studies of salt-cavity leaching by freshwater injection [J]. *SPE Production Engineering*, 1986, 1(1):82 – 86.

[7] Quintanilha J E, Nguyen-Minh D. An approach for optimizing an underground hydrocarbon storage field in bedded salt rock formations [C]//Rock Mechanics in Petroleum Engineering. Delft, 1994:725 – 730.

[8] Jiang D Y, Qiu H F, Chen J, et al. The similar experimental study on the concentration field in construction period of the storage of salt rock in solution mining [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 524/525/526/527:494 – 502.

[9] 任松, 陈结, 姜德义, 等. 能源地下储气库造腔期流场相似实验 [J]. 重庆大学学报, 2012, 35(5):103 – 108, 114. (Ren Song, Chen Jie, Jiang De-yi, et al. Similar experiments of the flow field in cavity construction period of underground energy storage [J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(5):103 – 108, 114.)

[10] 李之光. 相似与模化:理论及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1982. (Li Zhi-guang. Similarity and modeling: theory and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982.)

[11] 刘欢. 盐岩储气库溶控建造流体运移实验研究 [D]. 太原:太原理工大学, 2016. (Liu Huan. Experiment research of fluid migration in solution and controlling to construction of gas storage of salt rock [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.)