

盐穴储气库建腔期浓度场分布规律研究^{*}

邱华富^{1,2}, 姜德义³, 陈结³

(1.西安科技大学 能源学院,西安 710054;2.教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,西安 710054;3.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:以盐岩能源地下储库群建设工程为背景,用相似理论中的量纲分析法建立了建腔期腔内浓度场相似模型实验平台,对盐岩建腔期腔体内浓度场分布规律进行了系统分析,研究发现:建腔期腔体内卤水浓度在同一水平面上除边界层外是均匀分布的,边界层浓度高于同一水平面上其他位置;在竖直方向上,注水流量、套管位置、循环方式都会影响卤水浓度的分布;反循环造腔时,卤水浓度在竖直方向上呈现梯度分布,且随深度增加而增加,而且在竖直方向上的分布的浓度梯度受到造腔工艺的影响。在反循环建腔时,根据腔体卤水浓度在纵向上的分布特征,可以将其分为4个区域,饱和沉淀区,缓冲扩散区,对流扩散区和自由扩散区。获得了反循环建腔时卤水浓度分布函数,分析了造腔工艺相关参数对卤水浓度分布的影响规律,为盐穴储气库建腔提供指导意义。

关键词:盐穴储气库;相似理论;卤水;浓度场

中图分类号:TE 822

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1400-10

Study on the Concentration Field Distribution in Construction Period of Salt Cavity

Qiu Huafu^{1,2}, Jiang Deyi³, Chen Jie³

(1. Energy School, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P.R.China;

2. Key Laboratory of Western Mines and Hazard Prevention, Ministry of Education of China, Xi'an 710054, P.R.China;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: To analysis the concentration distribution and the concentration field variation in cavity, taking the underground energy storage of salt rock as a demonstration project, a similar model experimental platform of concentration filed in construction period of salt caverns is established based on the similar theory of "selected laws of physics". The study shows that: the brine concentration in the same horizontal plane is uniformly distributed beyond the boundary layer where has a higher concentration than other locations. The brine concentration is affected by water injection flow, casing position and circulation mode. In the reverse circulation method, the brine concentration has a continuous gradient distribution of increases with depth which affected by washing techniques. According to the distribution characteristic in the vertical direction, in the reverse circulation method, concentration field can be divided into four regions: the saturation precipitation zone; buffer diffusion zone; convection diffusion zone and free diffusion zone. Function of brine concentration distribution is obtained, and the influence on brine concentration distribution caused by related parameters of washing techniques has been made, which can provide guidance for the construction of salt cavern.

Keywords: salt cavity gas storage; similar theory; brine; concentration field

^{*} 收稿日期:2018-03-19(修改稿)

作者简介:邱华富(1986-),男,江西吉安人,博士,讲师,主要从事岩石工程、采矿工程方面的工作。

E-mail:luis_chiu@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51304256);陕西省自然科学基金(2015JQ5121);西安科技大学培育基金(201352)

0 引言

能源储气库作为西气东输工程中的重要环节,对天然气输运后储存和调节,其安全性受到广泛关注。盐岩是一种具有良好物理力学特性的软岩,渗透率低和良好的自我修复能力使得盐岩成为一种国内外公认的理想能源地下储存场所。在我国西气东输线路上,在江苏金坛、湖北云梦、河南平顶山等地区的地下岩层含有丰富的盐岩矿床。盐岩地下能源储气库已在许多国家大规模建造并已成功运营。建立盐岩地下储气库的有效方法是水溶建腔技术。国外研究者对盐岩水溶建腔的机理、盐岩的溶解特性以及盐岩溶腔形状控制理论进行了初步的研究^[1],并且通过数值分析的手段研究了溶腔形状、尺寸、埋深、力学参数等对盐穴建造的影响,获得了盐岩储气库安全运营的最优腔体设计参数^[2-4]。国内学者对盐岩及夹层的物理力学特性进行了基础研究^[5-10],并对溶腔稳定性进行了相关研究^[11-16]。

在地下能源储库建造过程中,腔体稳定性一直是大家关注的核心问题,影响腔体稳定性的最重要因素就是腔体的形状扩展。因此,在建腔过程中如何控制腔体形状扩展,建造安全可靠的溶腔是值得关注的问题。而在盐岩能源地下储库建造过程中,腔体形状扩展受盐岩溶解速率的影响,盐岩的溶解速率受腔内卤水浓度影响,腔体内卤水浓度是随时间、位置复杂变化的变量,这个变量还会受到注水流量、套管位置、循环方式等造腔工艺的影响。而现有的研究中并没有系统地对建腔期腔体内部浓度场的分布及变化规律进行研究。因此,准确掌握盐穴建造期腔内浓度场的分布特征,将有利用控制腔体形状扩展,为盐岩能源储气库建腔期造腔参数设计提供理论指导。

在盐穴造腔过程中,由于重力的影响,腔体内卤水在竖直方向上会呈现明显的上低下高的梯度分布,若卤水只受重力作用则在竖直方向上呈线性梯度分布,然而实际造腔过程中,卤水还要受到卤水对流作用,卤水循环对流时期卤水分布要受到套管位置、注水流量、循环方式等造腔工艺的影响,这使得卤水浓度分布变得更复杂,为了研究卤水的分

布规律,本文通过相似试验的方法模拟造腔过程,通过监测不同时间不同位置处的卤水浓度分布情况,得到卤水浓度分布规律,为盐岩造腔过程中形状控制提供指导。

1 相似理论及相似平台搭建

浓度场相似模拟实验的相似原理是指模型上重现与原型相似的物理现象。相似模型要求达到几何相似、运动相似和动力相似。量纲分析法是以量纲方程为核心,以方程的齐次性为依据而进行,量纲方程的真正作用表现在物理方程尚未掌握时,对物理现象的分析上,正是基于这些优点,量纲分析法成为一种应用广泛的相似准则推导方法,因此,选择量纲分析法建立了盐岩水溶建腔浓度场相似试验平台。

1.1 相似理论推导

影响盐岩水溶造腔有关的参数有,几何尺寸 l ,盐岩的溶解时间 t ,盐岩的密度 ρ ,溶解速率 ω ,腔内卤水的浓度 c ,温度 T ,注水流量 q ,扩散系数 D ,运动粘度 v 。各参数的量纲如表 1 所示。

表 1 参数-量纲表

Table 1 Parameter-dimension

参数	量纲
l	L
t	T
ρ	ML^{-3}
ω	ML^2T^{-1}
c	ML^{-3}
T	Θ
q	L^3T^{-1}
D	L^2T^{-1}
v	L^2T^{-1}

其中有 4 个基本量纲 $[L]$ 、 $[M]$ 、 $[T]$ 、 $[\Theta]$,由相似第二定理可知,此系统有 5 个相似准则。选取 l 、 c 、 ω 、 T 为基本物理量,其他 5 个物理量可用基本物理量来表示,而本次试验需要确定的物理量为注水流量,它可表示为:

$$q = l^\alpha c^\beta \omega^\lambda T^\theta \quad (1)$$

由方程量纲齐次的原则,可得 $\alpha = 2$, $\beta = -1$,

$\lambda=1, \theta=0$, 则与 q 有关的 π 项为:

$$\pi_q = \frac{qc}{l^2 \omega} \quad (2)$$

参数的相似比用 K 表示时, 几何相似比可表示为:

$$K_l = \frac{l_1}{l_2} \quad (3)$$

式中: l_1 表示原型尺寸, l_2 表示模型尺寸。其他参量相似比类似, 则(2)式中各参量相似比的关系可表示为:

$$\frac{K_q K_c}{K_l^2 K_\omega} = 1 \quad (4)$$

1.2 相似试验平台搭建

目前, 我国拟建的储气库设计单腔高度 80~120 m 左右, 腔体平均直径 60~100 m 左右, 矿柱宽度 230 m。造腔注水流量一般取 45~100 m³/h, 外套管半径 175.0 mm, 中心管半径 122.2 mm。

在单井水溶造腔中, 腔体形状一般为梨形或椭球形, 由数值模拟分析结果得知, 这样的腔体形状有利于腔体的稳定性和安全性, 腔体形状的控制是通过分步造腔来实现, 即通过控制套管和油层的位置以及溶解时间来完成。在每一次特定的套管和油层位置时, 腔体的有效溶解范围近似为一个对称的圆柱形, 整个腔内卤水浓度分布在水平方向上也是对称的, 所以实验选取圆柱的一部分, 建立一个柱状楔形体的实验模型。整个实验装置是由玻璃板衔接制成的柱状楔形体, 高为 420 mm, 底面尺寸为 350 mm×350 mm×100 mm。为了监测腔体内卤水浓度变化, 在柱状楔形体 420 mm×350 mm 面上均匀设置了 24 (6 行 4 列) 个取样口。在水平方向上, 两个相邻取样口相距 70 mm, 而在竖直方向上, 取样口之间距离为 60 mm。在模型的侧面 (尺寸为 420 mm×100 mm) 铺上厚度为 50 mm 的盐砖, 相似模拟实验平台如图 1 所示。

1.3 试验方法

岩盐溶腔现场中多采用油垫法建造溶腔, 加油垫的目的是为了控制上溶, 因为岩盐上溶速度大于侧溶、下溶速度, 为了更有效地建造出形状规则的稳定腔体, 建腔过程中主要是侧溶。用于建腔试验的盐砖尺寸是 20 cm×10 cm×5 cm, 先将两块盐砖

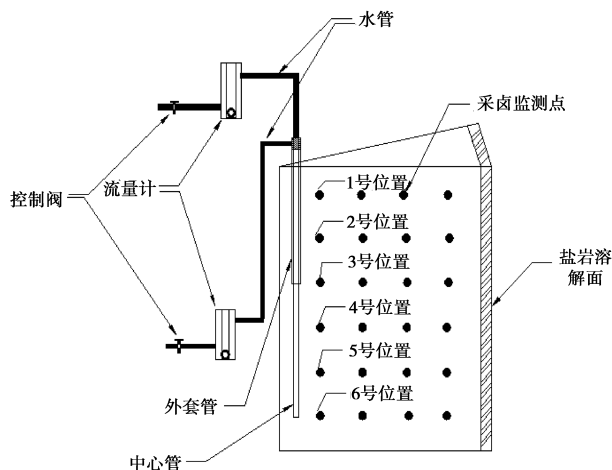


图1 相似模型实验装置图

Fig. 1 Test device of similar model

烘干, 然后密封盐砖不需要参与溶解的面, 只保留其中一个 20 cm×10 cm 的溶解面, 其他 5 个面都用稠度较高的黄油密封, 因为黄油与水不相溶, 将 2 块盐砖竖直紧贴楔形腔体较宽一端, 盖上玻璃盖 (中间夹有密封条防止漏气), 玻璃盖可以起到油垫作用不令其上溶, 装上注采套管, 调整好套管位置, 连接好流量计, 用来控制注水流量, 密封好整个装置后, 按照预设的注水流量注水模拟盐岩水溶造腔的注采过程, 每隔一段时间从各个采卤检测点处采出少量卤水, 用盐度计测量各个点处的浓度并记录, 观测流场分布和盐岩溶解面的情况。第 1 次采出卤水时间为溶解 15 min 后, 以后每隔 30 min 采一次卤水测量, 得到其浓度, 分析其浓度变化情况。试验装置图如图 1。

2 试验设计

为了使模型腔体内卤水浓度分布能够反映真实造腔情况, 笔者选取真实造腔过程中的造腔中期腔体形状作为参照对象, 此阶段腔内卤水浓度规律性比较明显, 且对应的几何相似模型更有利于实验操作。建腔中期的真实腔体平均半径为 45 m, 模型溶腔半径为 0.3 m (去除盐砖的厚度), 根据式(3)可确定几何相似比为 150。试验用的盐岩试件是采用巴基斯坦喜马拉雅山区天然盐岩, 其在 20 ℃ (实验温度) 的侧溶速率为 0.022 04 g/(cm²·min), 而真实造腔是在一定地温下进行的, 整个腔体的平均地温约为 50 ℃, 金坛原盐在 50 ℃ 的溶解速率为

0.040 87 g/(cm² · min), 所以溶解速率相似比 $K_w=1.854$ 。整个实验的目的是为了模拟真实腔体的浓度分布,所以浓度相似比为 $K_c=1$ 。由式(4)得流量相似比=4171 5,取真实造腔的流量为 120 m³/h,得到模拟造腔时流量约为 50 ml/min。

为了研究不同造腔工艺对浓度场分布的影响,本文设计了 A、B、C3 组对比试验,A 组试验对比不同注采循环方式下卤水浓度长分布特征;B 组试验设计考虑了不同注水流量对卤水浓度场分布特征的影响;C 组考虑了不同套管位置对浓度场的影响。

2.1 A 组实验

按照 1.3 的试验方法操作,控制注水流量在 50 ml · min⁻¹,按照每 30 min 采一次卤水,采 6 次卤水,测量其浓度,得到相关数据。按要求做下面 4 组试验,反循环时,出水口位置高度位于第 6 行采卤监测点处(6 号位置),进水口位置高度分别位于第 2 和第 3 行采卤检测点位置(2,3 号位置)。正循环时,进水口位置高度位于第 6 行采卤监测点处(6 号位置),出水口位置高度分别位于第 2 和第 3 行采卤检测点位置(2,3 号位置)。

2.2 B 组实验

按照 1.3 的试验方法操作,采用反循环注采过程,注水口位置高度位于第 3 行采卤监测点处(3 号位置),出水口位置高度位于第 6 行采卤监测点处(6 号位置)。按照每 30 min 采一次卤水并测量其浓度,得到相关数据。这样做 5 组不同流量的试验,根据相似比设计的注水流量如下表 2。

表 2 流量、套管间距对比表

流量		套管位置	
实体/ (m ³ · h ⁻¹)	模型/ (ml · min ⁻¹)	实体/ m	模型/ mm
40	30	9	6
54	40	18	12
68	50	27	18
81	60	36	24
95	70		

2.3 C 组实验

按照 1.3 的试验方法操作,采用反循环注采过程,控制注水流量在 50 ml · min⁻¹,按照每 30 min 采一次卤水并测量其浓度,得到相关数据。按要求做下面四组试验,出水口位置高度位于第 6 行采卤监测点处(6 号位置),进水口位置高度分别位于第 2 到第 5 行采卤检测点位置(2~5 号位置)。实际工程中套管间距与模型套管间距的对应关系如表 2。

3 试验结果分析

3.1 浓度与时间关系

在流量为 50 ml/min,淡水从 3 号位置注入,卤水出口设置在 6 号位置时,此时为反循环建腔,试验得到的各个位置的浓度随时间变化关系如图 2 所示。从图 2 得出,造腔过程中卤水浓度随时间增加而增加,但是增加速度在不断减小,直到腔体浓度场稳定。这是因为在溶解的初始阶段,溶液的浓度很低,盐岩的溶解速率快,溶液的浓度增长速度快,但是,随着溶液浓度的增加,盐岩的溶解速率降低,溶液浓度的增长速度降低,直到整个腔体的溶液浓度达到稳定状态。

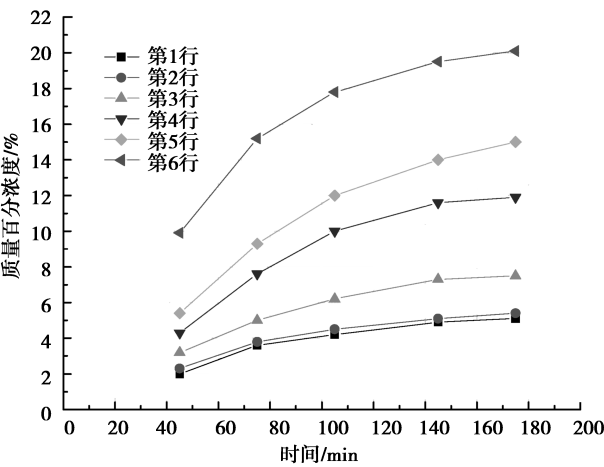


图 2 流量为 50 ml · min⁻¹ 各个位置的浓度变化图

Fig. 2 Concentration filed in each pozision while the rate of flow is 50 ml · min⁻¹

3.2 浓度与位置关系

在流量为 50 ml · min⁻¹,淡水从 3 号位置注入,卤水出口设置在 6 号位置时,此时为反循环建腔,试验得到的各个时刻的浓度分布如图 3,从图 3 中可以得出,除边界层外,腔体内同一平面内的卤

水浓度基本上是均匀分布的,在竖直方向上卤水浓度呈现梯度分布,随着腔体深度的增加而增大。从进水口注入的淡水受惯性力影响在浮力的作用下先向下运动一段距离后转而向上运动到腔体顶部,而后沿腔体顶部壁面运动到边界,在质量流作用下沿两边壁面转而向下运动,同时伴随向四周扩散到

盐岩溶解面,在盐岩壁面发生溶解,在盐岩壁面附近形成一层很薄的边界层,边界层的卤水浓度要明显高于同一高度其他位置的浓度。在重力作用下,盐岩壁面的水流向下运动,同时由于边界层的浓度高于同一高度其他位置的浓度,形成对流扩散,直到同一高度其他位置浓度达到相同水平。

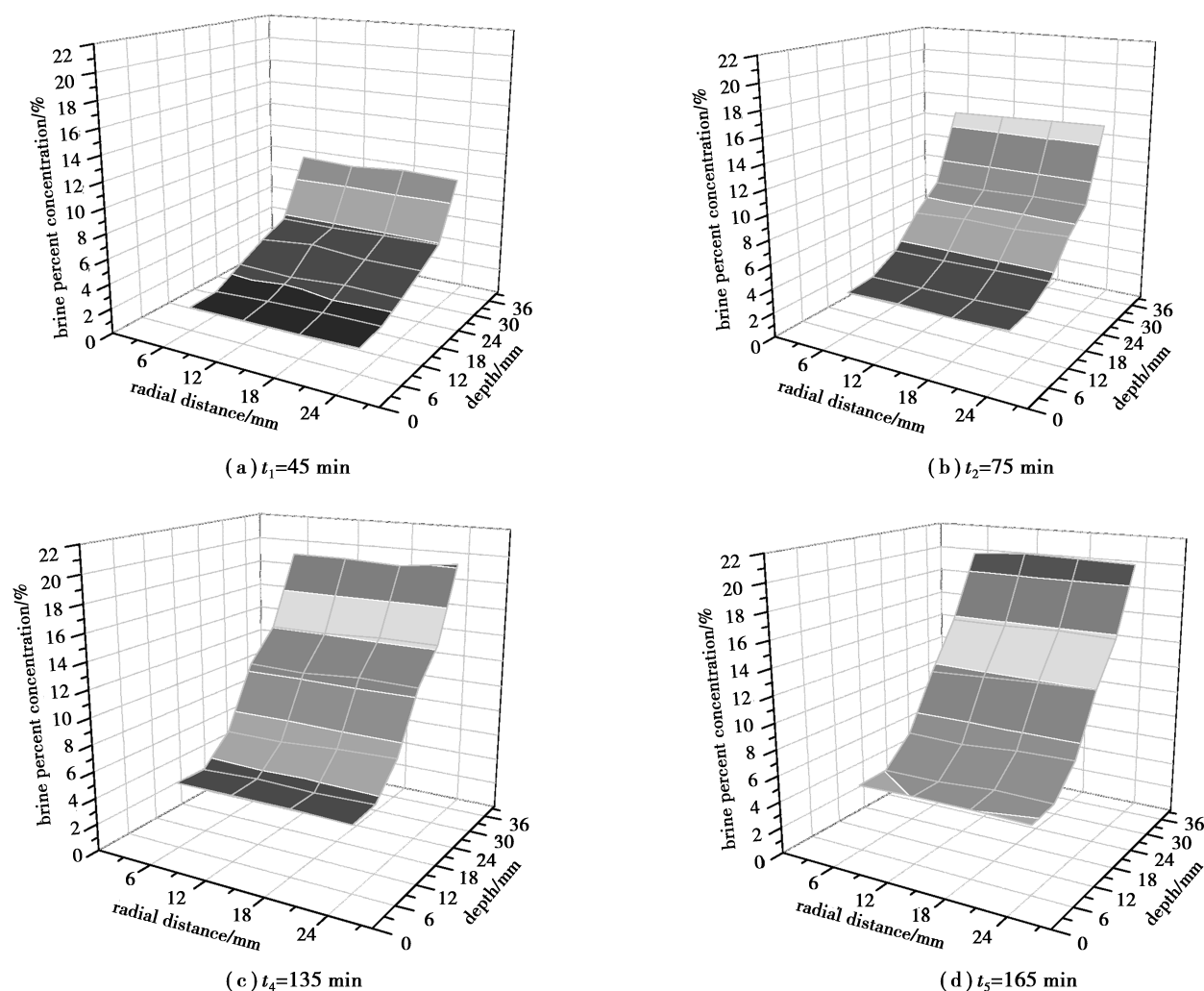


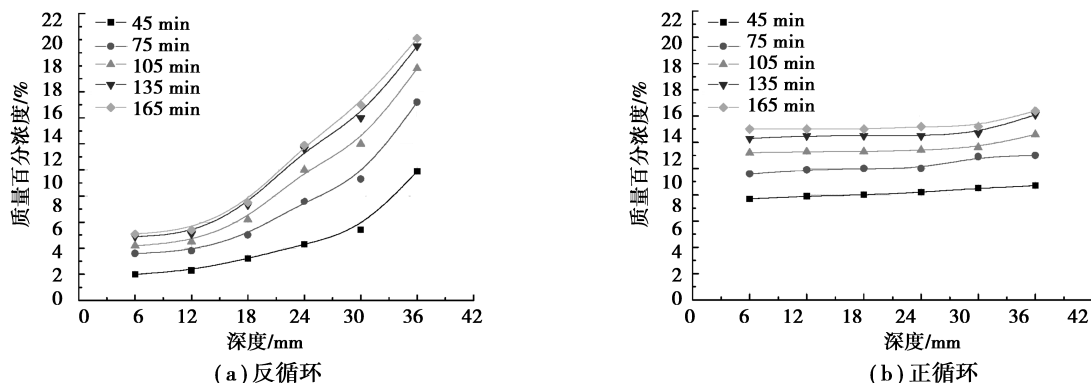
图3 流量为 $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 各个时刻的浓度场分布图

Fig. 3 Concentration field in each time while the rate of flow is $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$

3.3 浓度与循环方式的关系

盐岩的造腔过程包括建槽期和建腔期,在盐岩造腔的建槽期是采用正循环的注采方式,在建腔期是采用反循环的注采方式,不同的循环方式下,盐岩腔体内卤水浓度在竖直方向上的分布规律不一样,图4是不同循环方式下卤水浓度在腔体竖直方向上的分布图,对应的套管位置为3号和6号位

置。从图4中可以得到,在采用反循环注采方式时,腔体内卤水浓度在竖直方向上呈梯度分布很明显,腔体底部的浓度明显高于顶部。当采用正循环方式时,腔体内浓度梯度很小,大致成均匀分布。所以除了建槽期为了防止中心管堵塞而采用正循环,而在后续的造腔阶段都是采用反循环方式进行水溶建腔。

图 4 流量为 $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 时浓度场在纵向上的分布图Fig. 4 Concentration filed in depth (the rate of flow is $50 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$)

3.4 腔体竖直方向上浓度梯度分析

反循环造腔时,盐岩造腔期不同流量下其浓度梯度分布曲线如图 5,不同进水口位置(套管间距)下其浓度梯度分布曲线如图 6。分析图 5 和图 6 发现,从浓度梯度变化情况来看,反循环造腔时,盐岩的水溶建腔期腔内浓度分布情况可以总结为:可以将腔内浓度场分为 4 个区域,从下往上分别为饱和沉淀区,缓冲扩散区,对流扩散区和自由扩散区。

在不同外部条件影响下,各个区的大小不一样,影响分区的因素有:注入淡水的流量,进水口和出水口的位置,以及循环方式。一般来说,腔体内的溶液浓度是从上到下先后达到稳定状态的,而且流量越大,饱和沉淀区达到平衡所需时间越长,浓度梯度越大,在流量较大的情况下,出水口对浓度场的影响作用表现明显,导致在缓冲扩散区的浓度梯度最大值出现在出水口和进水口中间位置。

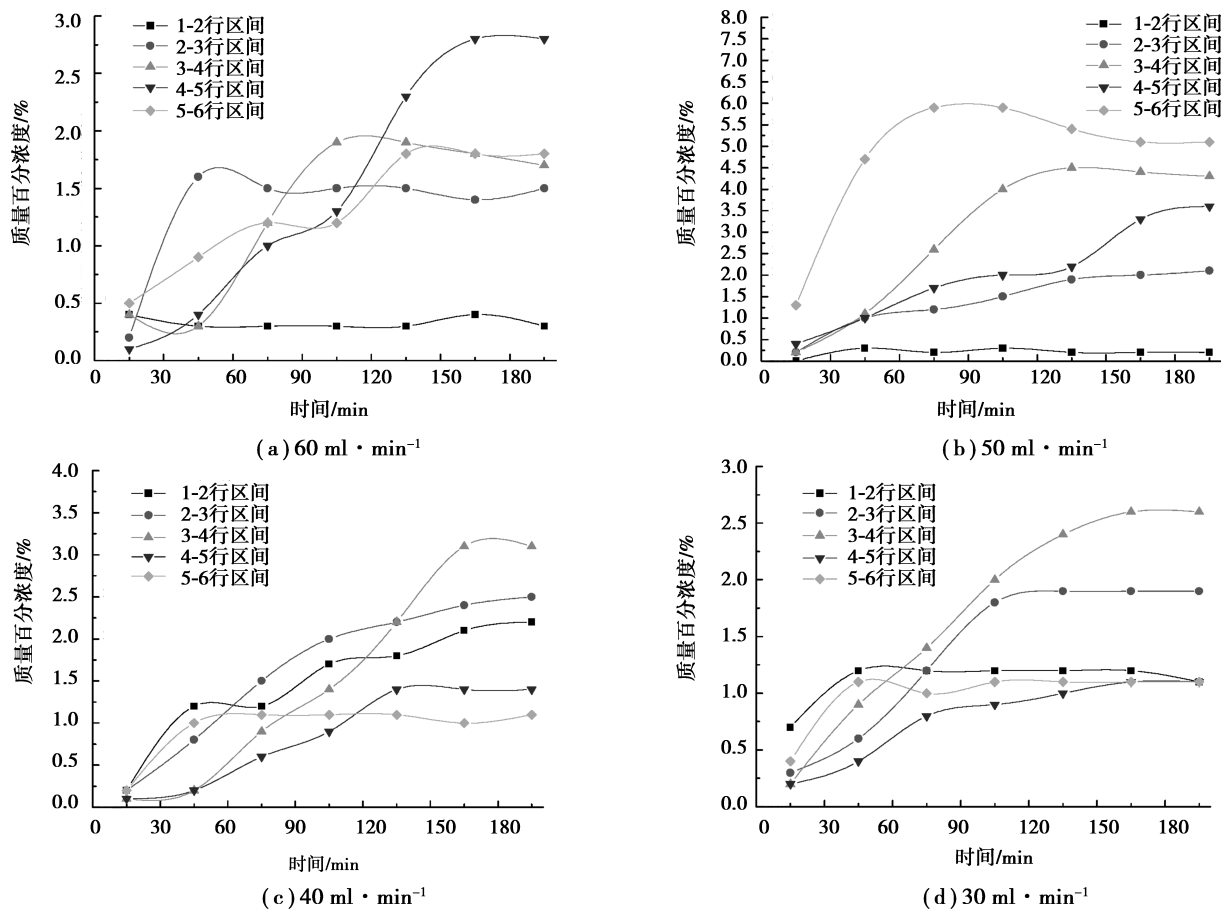


图 5 不同流量下各个时刻的浓度梯度分布图

Fig. 5 Concentration filed in each time under different flow

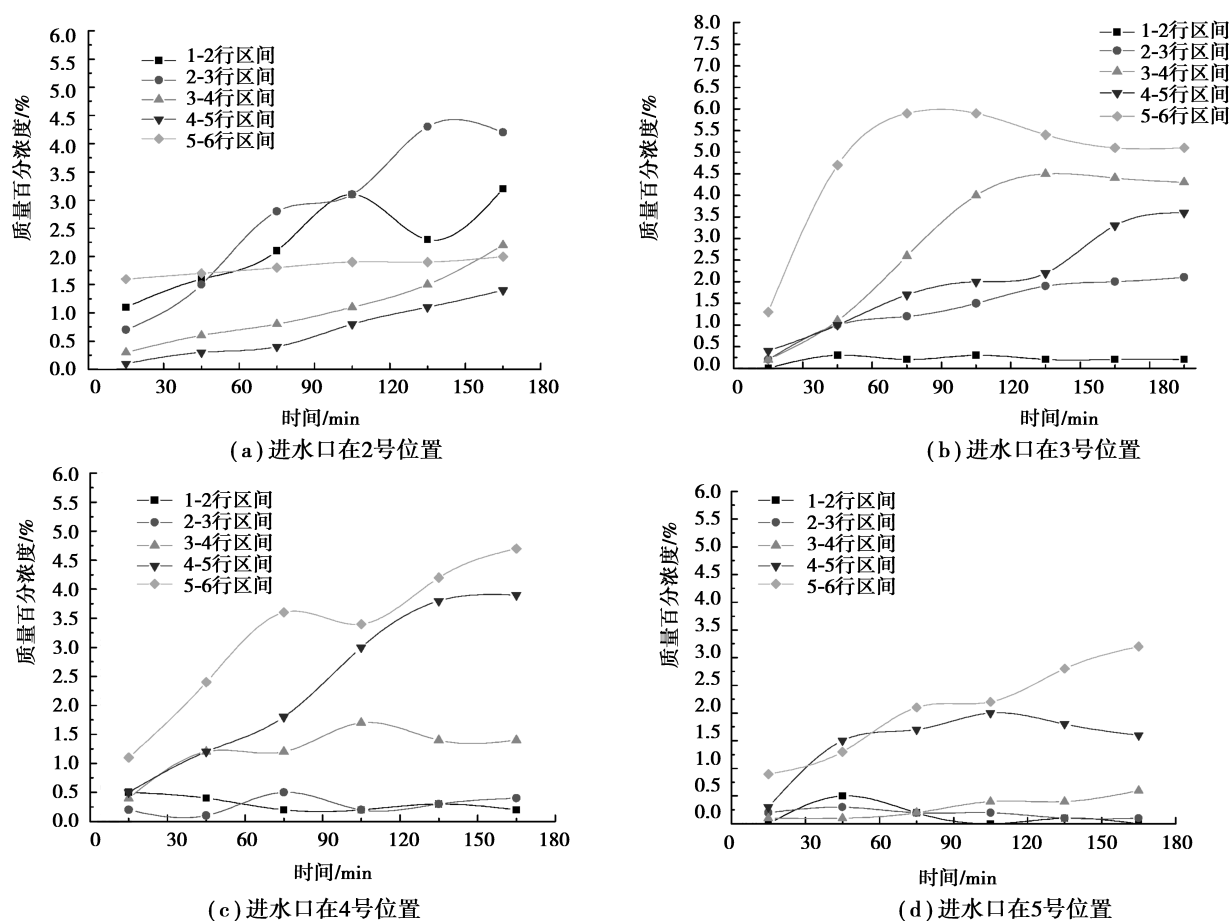


图6 进水口在不同位置时各个时刻的浓度梯度分布图

Fig. 6 Concentration filed in each time on different position of the water injection

在盐岩造腔过程中,随着时间的增加,腔体的浓度随之增加直到达到稳定状态,在腔体底部的卤水浓度要高于其上部浓度,依据试验数据分析及拟合,可以得到卤水浓度的表达式为:

$$C = C' + a \frac{h}{H} e^{\frac{t}{T}} + b \frac{t}{T} e^{\frac{h}{H}} \quad (5)$$

浓度 C 是一个与时间、位置高度相关的函数,式中 C' , a , b 为与造腔工艺有关的参数, H 为区域的高度, T 为该区域达到稳定状态时所需时间。

3.4.1 饱和沉淀区

在饱和沉淀区,其卤水基本上不再进行对流扩散,卤水浓度基本上达到饱和状态,盐岩基本上不溶解,该区域位于腔体的底部,在该区域的浓度是一个定值,即饱和浓度。饱和沉淀区的定义是相对造腔进行了一定时间,在饱和沉淀区达到饱和之前,其浓度是可以用品(5)表示。

3.4.2 缓冲扩散区

在饱和沉淀区上面是缓冲扩散区,该区域主要是扩散作用,注入淡水对其影响很小,所以在该区域

的浓度分布在重力作用下随着深度的增加而线性增加,该区域的浓度梯度基本不变,此时 $b=0$,有:

$$C = C' + a \frac{h}{H} e^{\frac{t}{T}} \quad (6)$$

当该区域的卤水分布达到稳定状态时,即 $t=T$ 。

$$C = C' + a e \frac{h}{H} \quad (7)$$

假定 $M = \frac{ae}{H}$,则有:

$$C = C' + Mh \quad (8)$$

3.4.3 对流扩散区

对流扩散区浓度分布较复杂,由于受到注入淡水的影响,在竖直方向上的浓度梯度并不是一个定值,在对流扩散区的浓度场分布,可以将其划分为上区和下区,分界点为进水口的位置。在上区,浓度梯度随着时间的增长而增加直到浓度梯度达到一个稳定值,浓度梯度随深度的增加而增加,在出水口位置达到最大值,所以在上区, $c>0$, 浓度随时

间增长而越快增加,直到浓度达到稳定。在下区,浓度梯度随时间增长而增大直到浓度梯度达到一个稳定值,浓度梯度随深度增加而减小,在下区, $c < 0$,浓度随时间增长而越快增加,直到浓度达到稳定值。当对流扩散区的卤水浓度达到稳定时,即 $t = T$,式(5)可以表示为:

$$C = C' + ae^{\frac{h}{H}} + be^{c\frac{h}{H}}$$

(9)

设 $M = \frac{ae}{H}$,则有:

$$C = C' + Mh + be^{c\frac{h}{H}}$$

(10)

将浓度表达式对 h 求导,即是卤水浓度在竖直方向上的梯度表达式,为:

$$\frac{\partial C}{\partial h} = \frac{a}{H}e^{\frac{h}{H}} + \frac{bc}{H}e^{c\frac{h}{H}}$$

(11)

3.4.4 自由扩散区

对流扩散区上面还有一个基本上不受注入淡水影响的一个自由扩散区,该区域的浓度分布特点和缓冲扩散区一样,但是在竖直方向上的浓度梯度要比缓冲扩散区小。所以,在自由扩散区,其浓度分布表达式和缓冲扩散区有同一个形式,但其 C' , M 的值不一样。

上面的分区和各区浓度分布规律都是在反循环作用下的浓度分布特征,正循环时的浓度分布没有这么复杂,不同循环方式下浓度梯度分布如图 7,此时套管位置分别位于 2 号和 6 号位置,注水流量为 $50\text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ 。从图中可以看出,除了进水口浓度梯度稍大于其他位置处的浓度梯度,其他位置的浓度梯度达到稳定时基本是一个很小的定值。

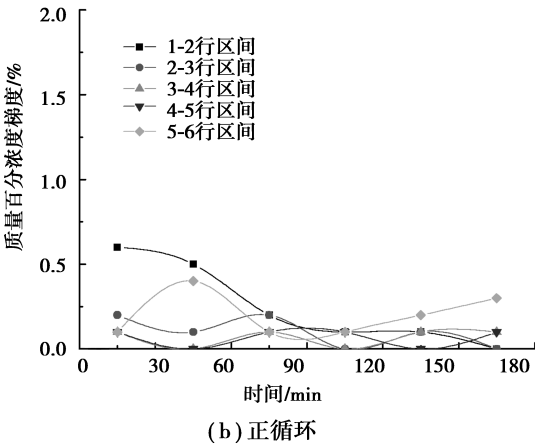
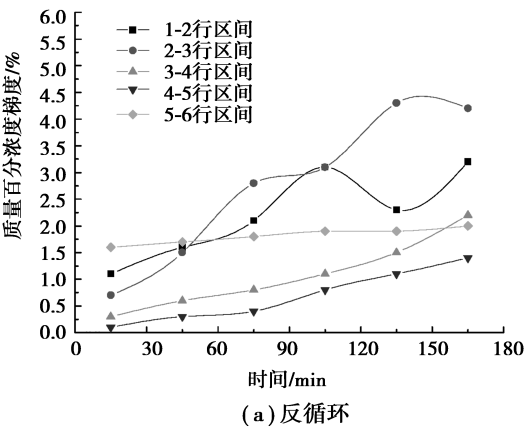


图 7 不同循环方式下各个时刻的浓度梯度分布图
Fig. 7 Concentration filed in each time
under different circumvent method

4 现场应用

以江苏金坛储气库某在建溶腔为模型,该腔体高度 100 m,中心管位置距腔体底部 30 m,外套管位置距底部 60 m,套管间距 30 m,注水流量 $70\text{ m}^3/\text{h}$,获得不同高度浓度分布如表 3。

表 3 浓度分布表			
Table 3 Concentration distribution			
距腔底高度/m	质量浓度/%	浓度分区	浓度公式(稳定时)
10	25.6	饱和沉淀区(高度 20 m)	$C = 25.6\%$
20	25.6		
20	25.6	缓冲扩散区(高度 20 m)	$C = 17.2\% + 0.42\%h$ (h 取值 0~20)
30	21.2		
40	17.2		
40	17.2	对流扩散区(上区 20 m)	$C = 8.0\% + 0.42\%h + 0.3\%e^{\frac{h}{H}}$ (h 取值 0~20)
50	12.7		
60	8.3		
60	8.3	对流扩散区(下区 20 m)	$C = 6.1\% + 0.105\%h + 0.3\%e^{-\frac{h}{H}}$ (h 取值 0~20)
70	7.3		
80	6.4		
80	6.4	自由扩散区(高度 20 m)	$C = 4.6\% + 0.09\%h$ (h 取值 0~20)
90	5.0		
100	4.6		

5 结论

通过盐岩水溶建腔浓度场模型试验的研究,得出盐岩水溶造腔期浓度场分布规律,结论如下:

(1)盐岩水溶建腔期腔体内除边界层外同一平面内的卤水浓度是基本上是均匀分布的,边界层浓度高于同一水平其他位置浓度,在竖直方向上卤水浓度呈现梯度分布,随着腔体深度的增加而增大。造腔过程中卤水浓度随时间增加而增加,但是增加速度在不断减小,直到腔体浓度场稳定。一般来说,腔体内的溶液浓度是从上到下先后达到稳定状态的,而且流量越大,饱和沉淀区达到平衡所需时间越长,浓度梯度越大。在造腔过程中,腔体内的溶液浓度达到稳定所需时间是不一样的,在条件确定的情况下,腔体的上部比腔体下部先达到稳定状态。注入淡水的流量越大,饱和沉淀区达到稳定所需的时间就越长,达到稳定时纵向浓度梯度就越大。在流量不断增大达到一定时,对出水口附近浓度场的分布影响作用会表现明显。

(2)腔体底部的卤水浓度随流量的增加先增加后减小,腔体顶部的浓度随腔体底部流量的增加先减小后增加,分析得知,在注水流量为 50 ml/min 时,腔体内流场在竖直方向上浓度梯度最大。在流量为 50 ml/min 时,套管间距为 18 cm 时腔体底部的浓度达到同期最大值 20.2%,腔体底部位置浓度随着套管间距先增大后减小,腔体顶部位置浓度随着套管间距的增大而减小。在采用反循环注采方式时,腔体内卤水浓度在竖直方向上呈梯度分布很明显,腔体底部的浓度明显高于顶部,当采用正循环方式时,腔体内浓度梯度很小,大致成均匀分布。

(3)盐岩的水溶建腔期(反循环)内浓度分布情况可以总结为:从浓度梯度变化情况来看,可以将腔内浓度场分为 4 个区域,从下往上分别为饱和沉淀区,缓冲扩散区,对流扩散区和自由扩散区。在饱和沉淀区,其卤水基本上不再进行对流扩散,卤水浓度基本上达到饱和状态,盐岩基本上不溶解。在缓冲扩散区,浓度分布在重力重用下随着深度的增加而线性增加,该区域的浓度梯度基本不变。在对流扩散区,在该区域浓度分布较复杂,由

于受到注入淡水的影响,在竖直方向上的浓度梯度并不是一个定值,在对流扩散区的浓度场分布,可以将其划分为上区和下区,分界点为进水口的位置,在上区,浓度梯度随着时间的增长而增加直到浓度梯度达到一个稳定值,浓度梯度随深度的增加而增加。在下区,浓度梯度随时间增长而增大直到浓度梯度达到一个稳定值,浓度梯度随深度增加而减小,浓度随时间增长而越快增加,直到浓度达到稳定值。在自由扩散区,浓度分布特点和缓冲扩散区一样,但是在竖直方向上的浓度梯度要比缓冲扩散区小。

(4)卤水浓度的表达式为 $C = C' + a \frac{h}{H} e^{\frac{t}{T}} + b \frac{t}{T} e^{c \frac{h}{H}}$,在自由扩散作用区和缓冲扩散区, $b = 0$, 有 $C = C' + a \frac{h}{H} e^{\frac{t}{T}}$,当该区域的卤水分布达到稳定状态时,即 $t = T$ 时 $C = C' + ae \frac{h}{H}$,假定 $M = \frac{ae}{H}$,则可以表示为 $C = C' + Mh$,但是,在自由扩散区和缓冲扩散区,其 C' , M 的值不一样。在对流扩散区,在上区, $c > 0$,在下区, $c < 0$ 。当该区域的卤水浓度达到稳定时,即 $t = T$, $C = C' + ae \frac{h}{H} + be^c \frac{h}{H}$,设 $M = \frac{ae}{H}$,则有 $C = C' + Mh + be^c \frac{h}{H}$ 。

参考文献(References)

- [1] Hossein K, Jessen F W. Mechanism of flow and controlled dissolution of salt in solution mining [R]. SPE1007.1964
- [2] Tao Z Y, Ma Z H. The research of salt cavern 3D modeling technology [A] // Asia-Pacific Conference on Information Processing [C]. 2009: 241-243.
- [3] Ehgartner B L, Park B Y. Sensitivity of storage field performance to geologic and cavern design parameters in salt domes [R]: SAND2009-1278, 2009
- [4] Fuenkajorn K. Prediction of cavern configurations from subsidence data [J]. Engineering Geology, 2010, 110 (1-2): 21-29.
- [5] 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 salt rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3569-3573. (in Chinese))
- [6] 梁卫国,徐素国,莫江. 盐岩力学特性应变率效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1): 43-50. (Liang Weiguo, Xu Suguo, Mo Jiang. Test study of strain rate effects on mechanical performances of salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(1):43-50. (in Chinese))
- [7] 周宏伟,何金明,武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其细观结构特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (10): 2068-2073. (Zhou Hongwei, He Jinming, Wu Zhide. Permeability and meso-structure characteristics of bedded salt rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (10): 2068-2073. (in Chinese))
- [8] 施锡林,李银平,杨春和,等. 卤水浸泡对泥质夹层抗拉强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (11): 2301-2308. (Shi Xilin, Li Yinping, Yang Chunhe, et al. Test study of influence of brine on tensile strength of muddy intercalation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11):2301-2308. (in Chinese))
- [9] 施锡林,李银平,杨春和,等. 盐穴储气库水溶造腔夹层垮塌力学机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30 (12): 3615-3620. (Shi Xilin, Li Yinping, Yang Chunhe, et al. Research on mechanical of interlayer collapse in solution mining for salt cavern gas storage, 2009,30(12): 3615-3620. (in Chinese))
- [10] 杨春和,李银平,屈单安,等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4):484-494. (Yang Chunhe, Li Yindan, Qu Danan, et al. Advance in researches of the mechanical behavios of bedded salt rocks [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38 (4): 484-494. (in Chinese))
- [11] 邵保平,赵阳升,赵延林,等. 层状盐岩储库长期运行腔体围岩流变破坏及渗透现象研究[J]. 岩土力学, 2008, 29 (增): 241-246. (Xi Baoping, Zhao Yangsheng, Zhao Yanlin, et al. Investigation on rheodestruction and permeability of surrounding rock for long-term running storage cavern in bedded rock salt [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Supp.): 241-246. (in Chinese))
- [12] 陈剑文,杨春和,郭印同. 基于盐岩压缩-扩容边界理论的盐岩储气库密闭性分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009, 28(增2):3302-3308. (Chen Jianwen, Yang Chunhe, Guo Yintong. Study of sealability of cavern for natural gas storage in deep salt formation based on compaction-dilatancy boundary of salt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 3302-3308. (in Chinese))
- [13] 陈卫忠,谭贤君,伍国军. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7): 1297-1304. (Chen Weizhong, Tan Xianjun, Wu Guojun. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (7): 1297-1304. (in Chinese))
- [14] 任松,姜德义,杨春和. 盐穴储气库破坏后地表沉降规律数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12):3595-3601. (Ren Song, Jiang Deyi, Yang Chunhe. Numerical simulation research on ground subsidence after salt cavern gas storage collapsing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3595-3601. (in Chinese))
- [15] 杨强,刘耀儒,冷旷代,等. 能源储备地下库群稳定性与连锁破坏分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12):3553-3561. (Yang Qiang, Liu Yaoru, Leng Kuangdai, et al. Stability and chain destruction analysis of underground energy storage cluster based on deformation reinforcement theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12):3553-3561. (in Chinese))
- [16] 陈锋,杨海军,杨春和. 盐岩储气库注气排卤期剩余可排卤水分析[J]. 岩土力学,2009,30(12):3602-3606. (Chen Feng, Yang Haijun, Yang Chunhe. Analysis of residual brine of salt rock gas storage during injecting gas to eject brine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3602-3606. (in Chinese))