

文章编号: 1009-3087(2014)05-0014-08

含夹层盐穴建腔期浓度场相似试验

姜德义¹ 易亮¹ 陈结¹ 任松¹ 张军伟¹ 李银平²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室 重庆 400030;

2. 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: 以湖北云应地区层状盐岩能源地下储库群建造工程为背景, 利用相似理论中的量纲分析法建立建腔期腔内浓度场相似模拟实验平台, 对含夹层盐穴建腔期腔内浓度场分布进行系统分析, 为含夹层盐穴的形状优化提供理论依据。研究发现: 夹层的存在并不改变卤水浓度随时间成指数分布的规律; 除边界层外, 溶腔内夹层周围卤水浓度在同一水平面上是均匀分布的; 当单一短夹层处于进水口上方时, 腔内夹层周围卤水浓度在竖直方向上较无夹层时有所降低, 而进水口下方的卤水浓度在竖直方向基本能和无夹层腔内卤水浓度相同; 当单一短夹层处于进水口下方时, 夹层上方的卤水浓度升高且夹层上下方卤水浓度梯度减小; 夹层数量增加到2个时, 不仅夹层周围的卤水浓度会有相应的变化, 腔内卤水浓度也会整体升高; 增加夹层的长度, 腔内卤水浓度随深度的变化趋势不会改变, 但会整体提高腔内卤水浓度。

关键词: 盐岩; 夹层; 浓度; 相似模拟; 形状优化

中图分类号: TD 45

文献标志码: A

Similar Experiment of the Concentration Field in Layered Salt-rock Cavity in Construction PeriodJIANG Deyi¹, YI Liang¹, CHEN Jie¹, REN Song¹, ZHANG Junwei¹, LI Yinpeng²

(1. State Key Lab. of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing Univ., Chongqing 400030, China;

2. State Key Lab. of Geomechanics and Geotechnical Eng., Inst. of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Taking the Yunying underground energy storage of layered salt rock in Hubei province as a demonstration project, a similar simulation experimental platform of concentration field in construction period of salt caverns was established based on the similar theory of dimensional analysis. The concentration distribution in salt rock cavity with interlayer in construction period was studied for providing the theory basis of shape optimization. The results showed that when there are interlayers existing in the cavity, the concentration of brine is subjected to exponential distribution with time, which is the same as that without interlayer. Except for boundary layer, the concentration of brine around the interlayer in the same level is uniformly distributed. When the cavity has a single short interlayer which located over the water inlet, the concentration of brine around the interlayer will decrease compared with the cavity with no interlayer, but the concentration of brine which below the water inlet will keep un-changed. When the single short interlayer is located under the water inlet, the concentration of brine which over the interlayer will increase and the concentration gradient around the interlayer in vertical direction will decrease. When there are two interlayers existed in the cavity, the concentration of brine around the interlayer will change accordingly, and the cavity's concentration will increase integrally. Lengthening the interlayer, the trend of the brine's concentration with depth will stay the same, but it will increase the concentration of the cavity.

Key words: salt rock; interlayer; concentration; similar simulation; shape optimization

盐岩是一种具有低渗透性、损伤自我恢复性和可水溶开采等特性的软岩, 它的这种优良特性使其

收稿日期: 2013-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51304256; 51204216); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130191130003); 中国博士后科学基金资助项目(2013M540620)

作者简介: 姜德义(1962—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 采矿工程; 岩土工程及安全工程. E-mail: deyj@cqu.edu.cn

http://jsuese.scu.edu.cn

成为国内外公认的理想能源地下储存场所,已在许多国家被大规模建造并已成功运营。盐穴建腔期腔体形状控制是确定建腔成败的一个关键因素,腔体的形状控制与腔体内壁盐岩的溶解速率、溶解时间、溶解的有效范围以及夹层有着密切的联系,夹层的存在会使腔内局部或整体的卤水浓度分布发生改变,从而影响到盐岩内壁的溶解速率,最终影响到腔体形状的控制,所以研究盐穴建腔期腔内卤水浓度分布对能源地下储库群的安全快速建设具有重要意义。

国外学者早在 20 世纪 60 年代对盐岩溶解特性及溶腔形状控制机制进行了初步研究^[1-3]。文献[4-5]通过数值模拟分析了盐穴形状、埋深、夹层对盐岩稳定性的影响,获得盐岩储库的最优腔体设计参数。杨春和等^[6-8]对含夹层盐岩的力学性质开展了研究。张强勇等^[9-10]进行了相似材料模拟盐岩腔体力学特性和水溶造腔方面的实验。杨骏六、吴乘胜^[11]根据单井对流水溶建腔过程中溶腔各区域的流动特征,将溶腔划分为 4 个区域,即边界层、溶腔主体、浮羽流区和“死水”区。杨骏六、王登芝^[12]根据流体力学的连续方程及盐岩溶解机理,建立了“集中参数”的数学模型并对溶腔形状的变化进行了数值模拟。任松等^[13]研究了地下储库造腔期流场运移规律,分析了不同注水流量、套管间距、夹层赋存状态以及不同造腔阶段对流场的影响。

目前对含夹层盐岩的研究工作主要集中在对其力学性质,含夹层腔体稳定性以及腔内流场等方面。在能源地下储库建造过程中,夹层的存在不仅会影响腔内流场的运移,还会影响腔内卤水浓度的分布,从而影响溶腔形态的发展变化,破坏溶腔边界的连续性,使腔体形态难以控制。准确掌握含夹层腔体卤水浓度分布规律有利于腔体稳定性以及腔体形状控制。作者运用相似模拟实验来研究建腔期腔内浓度场的动态变化及规律,实验控制淡水的流量、温度以及套管的位置,在此基础上,再来分析夹层位置,夹层数量,夹层长短对腔内浓度场的影响,从而了解浓度场在夹层不同赋存状态下的分布规律,为含夹层能源地下储库群的建造提供基本的理论依据。

1 试验概括

作者拟通过“量纲分析法”来建立相似模拟实验平台,量纲分析法^[14-15]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,对物理现象依然可以分析。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作为建腔期含夹层溶腔浓度场分析方法。

1.1 相似理论

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 。各参数的量纲如表 1 所示。

表 1 参数-量纲表

Tab. 1 Parameter-dimension

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

其中有 4 个基本量纲 L、M、T、 Θ 。L 为长度量纲, M 为质量量纲, T 为时间量纲, Θ 为温度量纲。所以由相似第二定理可知,此系统有 3 个相似准则。选取 l, t, ω, T 为基本物理量,其它 3 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:

$$q = l^\alpha t^\beta \omega^\lambda T^\gamma \quad (1)$$

由方程量纲齐次的原则,可得 $\alpha = 3, \beta = -1, \lambda = 0, \gamma = 0$, 则与 q 有关的 π 项为:

$$\pi_q = \frac{qt}{l^3} \quad (2)$$

同理:

$$\pi_\rho = \frac{\rho l}{t\omega}, \pi_c = \frac{lc}{t\omega} \quad (3)$$

参数的相似比用 K 表示时,几何相似比可表示为:

$$K_l = \frac{l_p}{l_m} \quad (4)$$

其中, l_p 为原型尺寸, l_m 为模型尺寸。其它参量相似比类似,则式(2)和(3)中各参量相似比的关系可表示为:

$$\frac{K_q K_l}{K_l^3} = 1, \frac{K_\rho K_l}{K_l K_\omega} = 1, \frac{K_c K_c}{K_l K_\omega} = 1 \quad (5)$$

1.2 试验材料

实验盐岩试件是采用巴基斯坦喜马拉雅山区天然盐岩,埋深 2 000 ~ 3 000 m。图 1(a) 为实验用的来自巴基斯坦喜马拉雅山区坑道开采出的盐岩原料,图 1(b) 为经过厂家加工成 5 cm × 10 cm × 20 cm 的盐砖供实验所用。其组成成分和质量百分含量见表 2,其中可溶物含量达 99.8%,密度为 2 338 kg/m³。由于盐岩质脆、遇水易溶,因此,盐岩试样

是通过手工切割、磨制加工而成。取样过程和试件加工均严格按照试验规范进行。

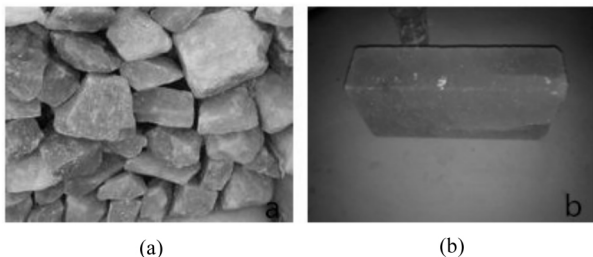


图1 盐岩照片

Fig.1 Photo of salt rock

表2 盐岩试样的成分

Tab.2 Components of salt rock specimens

可溶物		不溶物
NaCl	K ₂ SO ₃	少量泥质
99.4	0.4	0.2

1.3 试验仪器装置

由现有的单井水溶造腔技术可知,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垫的位置以及溶解时间来完成。在某一个特定的分步,当循环方式为正循环时,形成的腔体形状为圆柱体;当循环方式为反循环时,形成的腔体形状为圆台体。不管循环方式是正循环还是反循环,腔内卤水浓度在水平方向上是对称分布的。基于此种规律,实验选取圆柱的一部分,建立一个柱状楔形体的实验模型。整个实验装置是由有机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。为了监测溶腔内卤水浓度变化,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。卤水浓度采用盐度计进行测量,测量的浓度为质量百分浓度,浓度测量需要快速且小剂量进行测量,盐度计能满足实验的要求,盐度计如图2所示。



图2 实验室盐度计

Fig.2 Laboratory salinometer

在水平方向上2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,为模拟夹层,在装置面一到两处用塑料薄板隔开,相似模拟实验平台如图3所示。

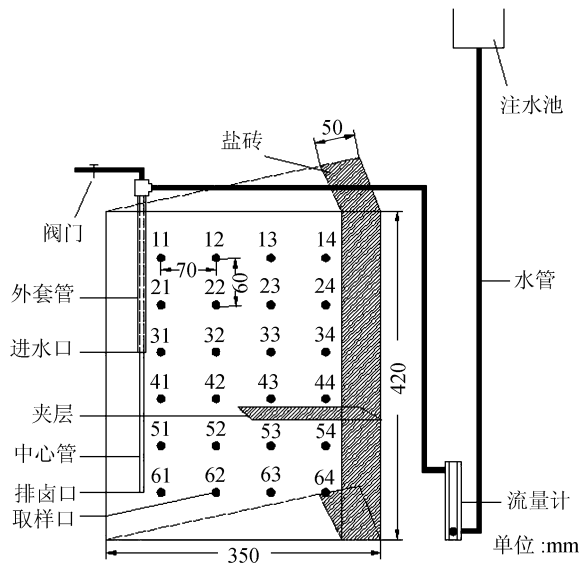


图3 相似模拟实验装置

Fig.3 Experimental facility of similar simulation

2 实验方案

2.1 建腔期浓度场分析的基本假设

盐岩建腔过程中,边界层的盐岩分子经扩散作用进入溶腔内,边界盐层不断被溶解,边界形状在不断变化,此过程是相当缓慢的,现做如下假设:

- 1) 忽略建腔过程中计算时段内腔体形状的变化;
- 2) 忽略温度 ± 1 °C 波动对盐岩溶解速率的影响;
- 3) 忽略短时间内取样口取样先后对卤水浓度的影响。

2.2 相似比的确定

为了确定流量相似比,需要首先确定溶解速率相似比,对试验所用巴基斯坦盐和参考工程云应地区原盐进行了不同温度下的溶解试验,溶解倾角为90°,溶解所用试件如图4所示。

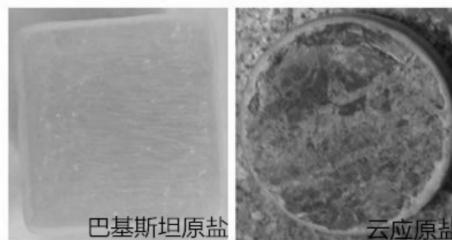


图4 溶解所用盐岩试样

Fig.4 Salt rock species for dissolution

试验结果见表 3。

表 3 不同温度下盐岩溶解速率

Tab.3 Dissolution rate of salt rock under different temperatures

试样	温度/℃	溶解速率/(g·cm ⁻² ·h ⁻¹)
巴基斯坦原盐	20	1.58
巴基斯坦原盐	30	1.82
巴基斯坦原盐	40	2.23
巴基斯坦原盐	50	2.64
云应原盐	20	1.41
云应原盐	30	1.69
云应原盐	40	2.29
云应原盐	50	2.72

由云应地区盐岩储库的基础参数可知,其造腔段顶深 520 m,盐层厚度 150 m,腔内平均温度为 50 ℃,

表 4 相似比参数

Tab.4 Similarity ratio parameter

	腔体半径/ m	盐岩密度/ (kg·m ⁻³)	盐岩溶解速率/ (g·cm ⁻² ·h ⁻¹)	造腔时间/ h	卤水浓度/ (g·mL ⁻¹)	流量/ (mL·min ⁻¹)
原型	35	2 160	2.72	—	—	1.27 × 10 ⁶
模型	0.3	2 338	1.58	—	—	50
相似比	117	0.92	1.72	63	0.92	25 422

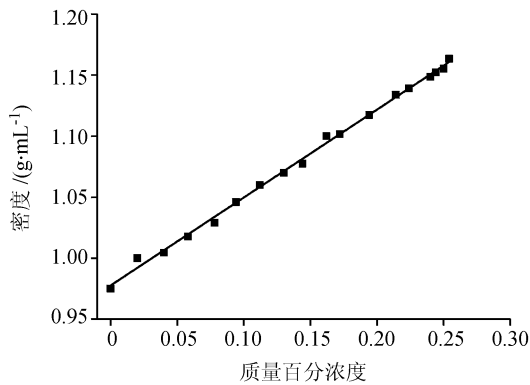


图 5 卤水密度与卤水质量百分浓度的关系

Fig.5 Relation between density and mass percentage concentration of brine

2.3 实验设计

取真实造腔的流量为 80 m³/h,得到模拟造腔时流量约为 50 mL/min。为了得到不同夹层赋存状态下盐岩水溶造腔过程中腔内浓度场的分布规律,设计了 3 组实验,分别考虑夹层空间位置、夹层数量、夹层长度对浓度场分布的影响,夹层的赋存状态如图 6 所示。

除改变夹层的赋存状态外,其它实验条件都相同。实验在 20 ℃ 下进行,循环方式为反循环,流量为 50 mL/min,进水口和排卤口位置分别与第 3 排

而本研究实验温度为室温 20 ℃,由表 3 溶解速率的数值即可推出溶解速率相似比,由实验所用模型大小可得几何相似比,由实验所用材料可得密度相似比,由式(5)几何相似比、盐岩密度相似比、盐岩溶解速率相似比推出造腔时间相似比,进而推出其它参数的相似比,其具体数值见表 4。

需要注意的是,在量纲分析中,卤水浓度为质量-体积浓度,而盐度计测量的卤水浓度为质量百分浓度,两者需要通过卤水密度建立关系,笔者对不同质量百分浓度的卤水密度进行了测量,如图 5 所示,对数据进行拟合,得到卤水密度 ρ 与质量百分浓度 w 的关系:

$$\rho = 0.72w + 0.978.$$

而卤水质量-体积浓度 v 与质量百分浓度 w 的关系为: $v = \rho \cdot w$ 。

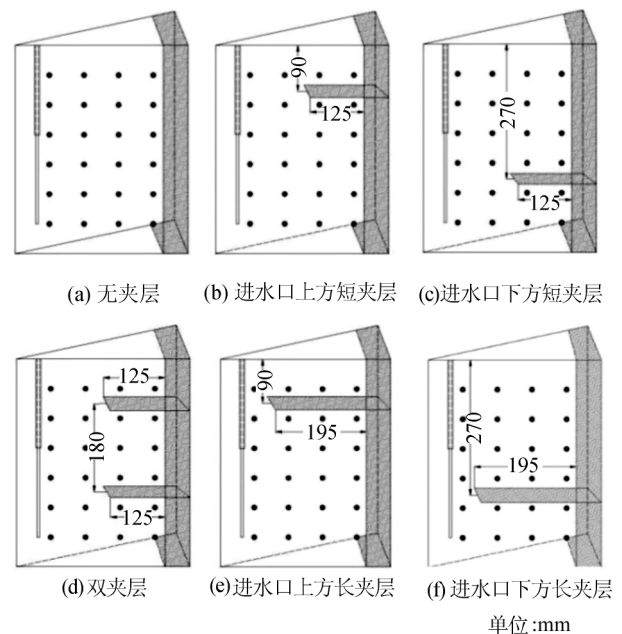


图 6 夹层赋存状态

Fig.6 Occurrence state of interlayer

和第 6 排取样口在同一水平面上。实验开始后,缓慢向腔体内注水,当腔内注满水时,卤水从排卤口排出,开始记录第一次取样口卤水浓度,以后每隔 30 min 记录一次,直到腔体内卤水浓度达到平衡稳定。

3 实验结果及分析

3.1 夹层对浓度变化趋势的影响

腔内卤水浓度随时间的变化趋势如图 7 所示。

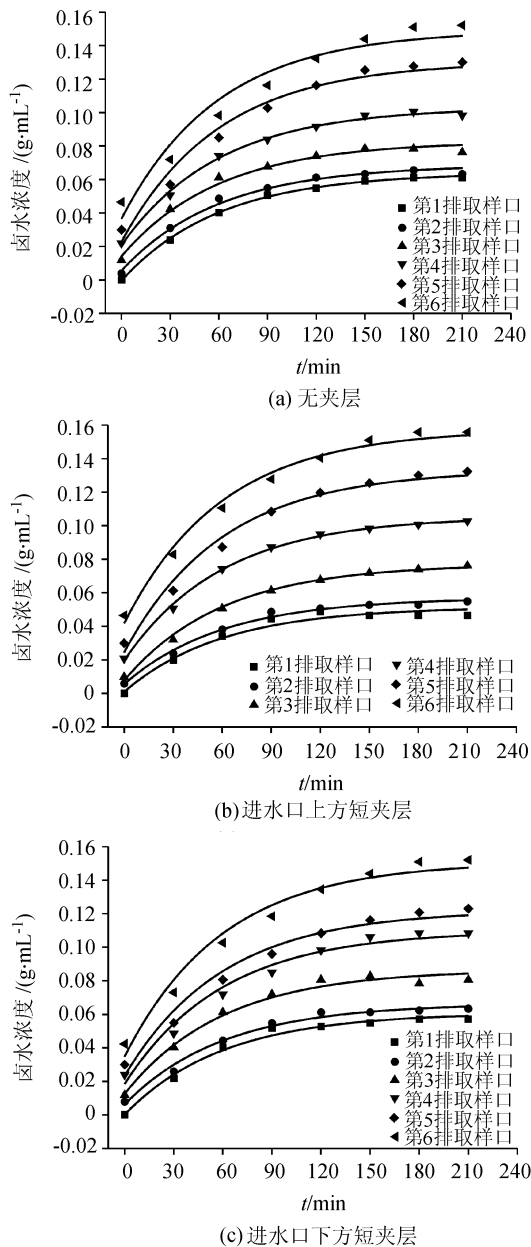


图 7 腔内卤水浓度随时间变化图

Fig. 7 Variation of brine's concentration with time

由图 7 可知,在卤水浓度稳定前,溶腔内卤水浓度大体上随时间增加而增加,但浓度变化率却随时间增加而减小,直至减为零,此时腔内卤水浓度也达到平衡。这可解释为:在溶解初期,溶腔内卤水浓度较低,其内壁盐岩溶解速率远大于采盐速率,即进入腔内的盐溶质多于排出的盐溶质,所以腔内卤水浓度会随时间增加而增加。但腔内卤水浓度的升高,会减小与边界层的浓度差,从而减小腔体内壁盐岩

溶解速率,腔内卤水浓度变化率也随之减小。最后腔内盐溶速率等于采盐速率,腔内卤水浓度达到稳定。对数据进行拟合可知,腔内卤水浓度随时间大体成指数分布,取指数公式为:

$$y = a - be^{-\frac{x}{c}} \quad (6)$$

其中, a 为平衡后的浓度, b 为浓度增长的速率。为了更好地比较各状态下腔内卤水浓度随时间的变化情况,将 c 赋予一个统一值 60,拟合度达到 0.95 以上,拟合较好,其中各状态下的 a 、 b 值见表 5。

表 5 不同夹层赋存状态下的 a 、 b 值

Tab. 5 Number of a and b in different interlayer occurrence

采卤口位置	无夹层		进水口上方短夹层		进水口下方短夹层	
	a	b	a	b	a	b
第 1 排采卤口	0.064	0.064	0.052	0.051	0.061	0.061
第 2 排采卤口	0.069	0.063	0.057	0.052	0.066	0.060
第 3 排采卤口	0.083	0.069	0.077	0.069	0.087	0.074
第 4 排采卤口	0.103	0.082	0.105	0.086	0.11	0.091
第 5 排采卤口	0.13	0.107	0.133	0.109	0.122	0.099
第 6 排采卤口	0.149	0.113	0.157	0.116	0.151	0.116

由表 5 可知,当卤水处于进水口下方时, b 值随腔体深度增加,即卤水浓度随时间的变化率与腔体深度成正比,这可解释为:在此区域卤水之间的分子扩散主要受重力作用的影响,盐分子在重力的作用下产生自上而下的沉降运动,从而使溶腔下部单位时间增加的盐分子要比上部多,造成下部的卤水浓度变化率要比上部高。不管进水口上方有没有夹层,腔内第 1 排采卤口和第 2 排采卤口的 b 值很接近,说明进水口上方的卤水受到强制对流的影响,清水和卤水之间的分子交换非常迅速,以致在此区域的卤水浓度随时间的变化率差别不大。当夹层处于进水口下方时,比较夹层上下排采卤口的 b 值变化,并与无夹层的相对照可知,夹层上下排采卤口的 b 值变化要明显小于同区域的无夹层的 b 值变化,说明夹层缩小了其上下区域卤水浓度随时间的变化率差值,说明夹层对边界层质量流起阻碍作用,使盐分子在夹层上表面富集,夹层上部卤水浓度随时间的变化率增加,而夹层下部却变化不大,从而使 b 值的差值减小。

3.2 夹层对水平浓度的影响

由分析可知,夹层既能起到淡水流的分流作用,也会对边界层质量流起阻碍作用。图 8 为双夹层下各排采卤口的水平浓度分布。可看出,平衡后的卤水浓度,不管是处在夹层上方,还是处在夹层下方,

除边界层以外, 溶腔其它区域在同一水平面上的浓度是均匀分布的, 这种规律是和无夹层状态是一致的, 说明溶腔卤水浓度沿径向均匀分布这一性质并不受夹层的影响。这是因为溶腔内的卤水的扩散作用非常迅速, 正是由于这种扩散作用, 使夹层上下方局部的浓度突变难以形成。

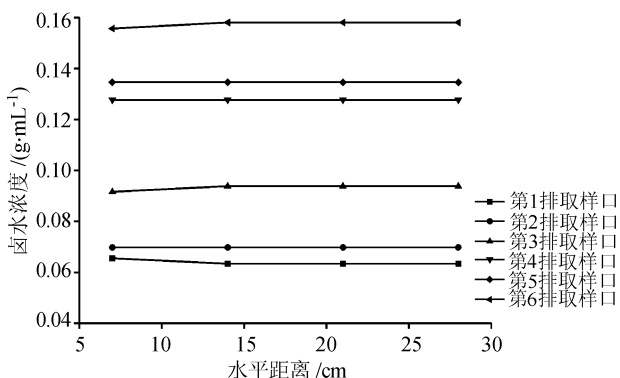


图 8 腔内卤水水平浓度分布

Fig. 8 Concentration distribution in radial distance

3.3 夹层对竖直方向卤水浓度的影响

3.3.1 夹层位置对竖直方向卤水浓度的影响

腔内竖直方向卤水浓度会由于夹层的存在而有所改变, 夹层的不同赋存状态对其影响大小不大相同。当考虑夹层位置对竖直方向卤水浓度的影响时, 需要分夹层位于进水口上方和下方 2 种情况。由图 9 可看出, 当夹层处于进水口上方时, 腔内夹层周围的卤水浓度较无夹层时有所降低, 而进水口下方的浓度基本能和无夹层腔内卤水浓度相同, 这是因为此时夹层的影响主要体现在对淡水流的分流作用, 淡水流的涌入降低了夹层周围的卤水浓度, 而进水口下方的卤水浓度受夹层的影响不大, 所以浓度基本能和无夹层状态时一致。

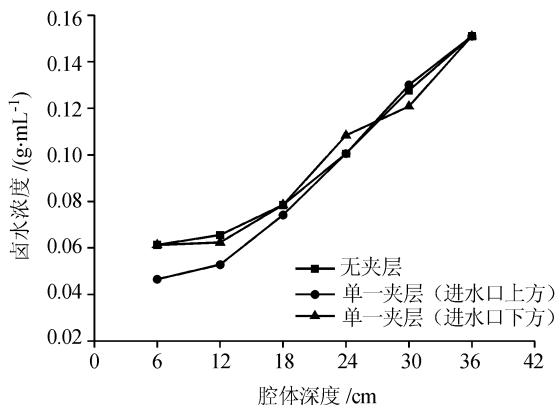


图 9 不同夹层位置对应腔内竖直方向卤水浓度分布

Fig. 9 Concentration distribution in vertical direction with different interlayer locations

然而当夹层位于进水口下方时, 夹层的作用不

再是对淡水流的分流作用, 此时它起的作用是对边界质量流的阻碍作用, 高浓度卤水在夹层上积聚, 从而使夹层上方的卤水浓度增加, 而夹层下方的卤水由于没有高浓度卤水的补充, 所以相对无夹层状态时, 此处卤水浓度是减小的, 从而夹层的存在使夹层周围卤水浓度梯度在竖直方向上减小。

3.3.2 夹层数量对竖直方向卤水浓度的影响

在真实造腔中, 夹层的数量不定, 腔体内的卤水浓度分布会随夹层数量的变化而变化。由图 10 可以看出, 当腔体无夹层时, 从竖直方向上的浓度梯度来看, 溶腔内的卤水浓度随腔体深度分布大致可以分为 3 个区域, 从进水口到腔体顶部为第 1 区域, 此区域受到淡水流的影响比较明显, 所以整体的卤水浓度梯度相对第 2 区域较小, 且随着深度加大浓度梯度加大。从进水口到排卤口区域为第 2 区域, 因为此区域基本不受淡水流的影响, 在横向、纵向的扩散运动又比较均一, 所以该区域卤水浓度随深度成线性增长。从排卤口至腔体底部为第 3 区域, 随着浓度的进一步增加, 浓度梯度会减小, 当浓度达到饱和时, 浓度梯度减为零。

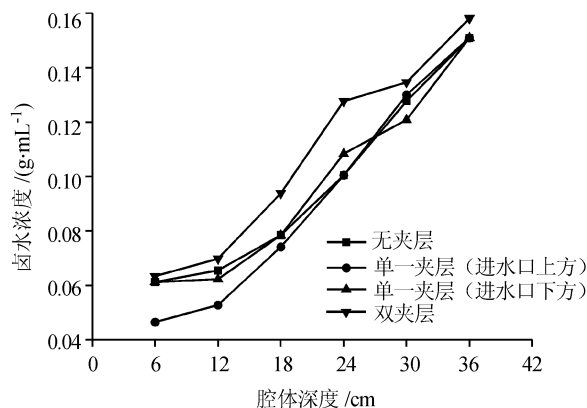


图 10 不同夹层数量对应腔内竖直方向卤水浓度分布

Fig. 10 Concentration distribution in vertical direction with different interlayer number

当腔内含有一个夹层时, 夹层的上下排卤水浓度会受其影响, 但对其它区域的卤水浓度影响不大, 此部分在 3.3.1 节已分析。当腔内的夹层数量增加到 2 个时, 夹层会对夹层上下排卤水浓度有相应的影响, 且和单一夹层在相应位置的影响程度很接近, 在数值上表现出的就是夹层上下排卤水浓度梯度两者相近。双夹层的存在也会增加整个溶腔内卤水的浓度, 这是因为夹层数量越多, 夹层对溶腔内卤水的流动限制就越大, 从而减缓了卤水的上下扩散运动, 使边界质量流的高浓度卤水不会很快到达腔体底部, 从而使整个腔体卤水浓度增加。

3.3.3 夹层长度对竖直方向卤水浓度的影响

在真实造腔过程中,随着水溶造腔的进行,难溶夹层会暴露于腔体中,此时悬空夹层受到卤水的长期浸泡,其力学特性会发生弱化,最终将发生大面积的垮塌,垮塌前后夹层长短不一样。由图 11 可看出,当夹层处在相同位置时,夹层的长短对卤水浓度沿深度的变化趋势影响不大,但长夹层会使腔内卤水浓度整体提升,这是因为夹层长度越长,对边界层质量流的阻碍作用越大,且使腔内竖直方向有效的扩散面积减小,所以腔内卤水浓度会由于夹层长度的增加而增大。

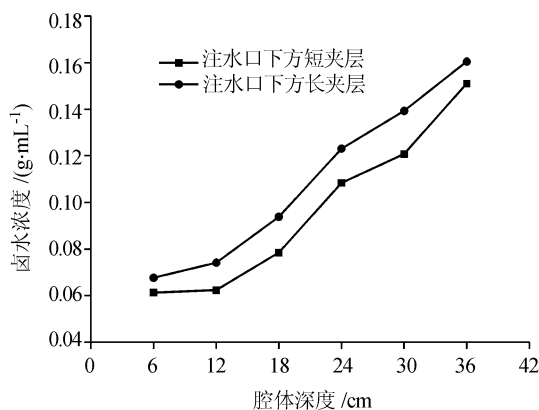


图 11 不同夹层长度对应腔内竖直方向卤水浓度分布

Fig. 11 Concentration distribution in vertical direction with different interlayer lengths

从真实造腔来看,现有的造腔手段还不是特别成熟。主要是造腔工艺还需要依赖于造腔模拟软件,对于地质条件很复杂的盐岩地层,造腔模拟软件并不能反映真实情况,特别是对于多夹层盐岩地层。夹层的存在会影响溶腔内卤水浓度,最终影响到腔体的扩展,所以在进行造腔工艺设计时,在借助于造腔模拟软件的时候,也要根据夹层所处地层的位置对造腔工艺进行调整,同时在造腔过程中,要密切关注排卤口卤水浓度的变化情况。在每一个造腔阶段完成后,要利用声纳探测技术对腔体形状进行探测,对夹层附近的腔体形状进行分析,以便为后面阶段的造腔工艺提供理论依据。

4 结 论

利用量纲分析法搭建了研究建腔期含夹层腔内浓度场分布规律的相似模拟实验平台,主要得出如下结论:

1) 夹层的存在并不改变卤水浓度随时间成指数分布的规律。

2) 除边界层外,溶腔其它区域卤水浓度在水平

方向上均匀分布,这一规律并不受夹层的影响。

3) 单一短夹层处在进水口上方时,会使夹层周围的卤水浓度较无夹层时在竖直方向有所降低,单一短夹层处在进水口下方时,夹层上方的卤水浓度会升高,且夹层上下方卤水浓度梯度减小。

4) 夹层数量为 2 个时,夹层不仅会影响夹层上下方的卤水浓度,同时也会使腔内卤水浓度整体升高。增加夹层的长度,夹层的长短不会改变卤水浓度随腔体深度的变化趋势,但腔内卤水浓度会整体升高。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Park B Y, Ehgartner B L, Herrick C G. Sensitivity of storage field performance to geologic and cavern design parameters in salt domes [C]. 44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, American Rock Mechanics Association, 2010.
- [5] Fuenkajorn K. Prediction of cavern configurations from subsidence data [J]. Engineering Geology, 2010, 110(1/2): 21-29.
- [6] Yang Chunhe, Li Yinping, Qu Danan, et al. Advance in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484-494. [杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展 [J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484-494.]
- [7] Wang Anming, Yang Chunhe, Huang Cheng, et al. Numerical experiment study of deformation and mechanical properties of layered salt rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2173-2178. [王安明, 杨春和, 黄诚, 等. 层状盐岩力学和变形特性数值试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2173-2178.]

- [8] Li Lin, Chen Jie, Jiang Deyi, et al. Analysis of surface crack growth in layered salt rock under uniaxial compression [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2011, 32(5): 1394 – 1398. [李林, 陈结, 姜德义, 等. 单轴条件下层状盐岩的表面裂纹扩展分析[J]. *岩土力学* 2011, 32(5): 1394 – 1398.]
- [9] Zhang Qiangyong, Liu Dejun, Jia Chao, et al. Development of geomechanical model similitude material for salt rock oil-gas storage medium [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(12): 3581 – 3586. [张强勇, 刘德军, 贾超, 等. 盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3581 – 3586.]
- [10] Liu Jianping, Jiang Deyi, Chen Jie, et al. Experimental research on similitude material of rock salt [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2009, 30(12): 3660 – 3663. [刘建平, 姜德义, 陈结, 等. 一种盐岩相似材料的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(12): 3660 – 3663.]
- [11] Wu Chengsheng, Yang Junliu. Mathematical model of solution mining with single well convection method [J]. *Mechanics and Engineering* 2003, 25(1): 11 – 13. [吴乘胜, 杨骏六. 单轴对流法水溶采矿的数学模型[J]. *力学与实践*, 2003, 25(1): 11 – 13.]
- [12] Yang Junliu, Wang Dengzhi. The numerical simulation of cavern shape changing in solution mining [J]. *Journal of Sichuan Union University: Engineering Science Edition*, 1997, 1(6): 21 – 25. [杨骏六, 王登芝. 水溶采矿中溶腔形状变化的数值模拟[J]. *四川联合大学学报: 工程科学版*, 1997, 1(6): 21 – 25.]
- [13] Ren Song, Chen Jie, Jiang Deyi, et al. Similar experiment of the flow field in cavity construction period of underground energy storage [J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(5): 103 – 108. [任松, 陈结, 姜德义, 等. 能源地下储库造腔期流场相似实验[J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(5): 103 – 108.]
- [14] 徐挺. 相似理论与模型试验 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [15] 江守一郎. 模型实验的理论与应用 [M]. 郭延伟, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1986.

(编辑 张琼)

(上接第13页)

- [9] Chen Deming, Wang Zhaoyin, He Yun. Experimental study on the fluvial process of debris flow discharging into a river [J]. *Journal of Sediment Research* 2002(3): 22 – 28. [陈德明, 王兆印, 何耘. 泥石流入汇对河流影响的实验研究[J]. *泥沙研究* 2002(3): 22 – 28]
- [10] Guo Zhixue, Fang duo, Yu bin. Experiment study on debris flow confluence with main river [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2003, 17(5): 175 – 178. [郭志学, 方铎, 余斌. 泥石流与主河交汇的试验研究[J]. *水土保持学报* 2003, 17(5): 175 – 178.]
- [11] Guo Zhixue, Cao shuyou, Liu Xingnian, et al. Experimental study on parameters affecting the river-blocking due to debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(11): 39 – 45. [郭志学, 曹叔尤, 刘兴年, 等. 泥石流堵江影响因素试验研究[J]. *水利学报* 2004(11): 39 – 45.]
- [12] Li Yong. Several results concerning the gradient of debris flow gully [J]. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation*, 1999, 5(6): 51 – 55. [李泳. 泥石流沟床比降的几点讨论[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(6): 51 – 55.]

(编辑 李轶楠)