

文章编号: 1000-582X(2012)07-107-07

盐穴建造期夹层与卤水运移相互作用机理分析

陈 结¹, 姜德义¹, 刘 春², 邱华富¹, 杜 超¹, 郭 平¹

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点试验室, 重庆 400030;

2. 重庆科技学院 安全工程学院, 重庆 400042)

摘 要:以金坛层状盐岩能源地下储库群建设工程为背景, 基于 RNG $k-\epsilon$ 湍流计算模型及物质输运理论, 研究了盐穴建造期夹层与卤水输运相互作用关系。计算发现, 建造期卤水在运移过程中受夹层影响会形成复杂的紊流, 一般在夹层附近会产生涡流, 其影响程度随腔体扩大而减弱, 另外夹层对流场的影响程度还受注水循环方式、注水流量及套管位置等造腔工艺影响。同时卤水的非均匀流动对夹层也会产生不同程度的扰动水压力, 一般建腔前期夹层主要受注入流产生的扰动水压力作用, 而后期主要受边界质量流作用, 卤水对夹层的扰动水压力大小同样受造腔工艺的影响, 但无论哪个造腔阶段卤水流动产生的压力都不足以使夹层垮塌破坏。利用 PIV 技术监测物理模型中的卤水运移规律, 实验中卤水运移规律与数值计算结果一致。

关键词: 盐穴; 建造期; 卤水运移; 夹层; PIV 技术

中图分类号: TD 45

文献标志码: A

Analysis on the relationship of interlayer and brine migration in salt cavern construction period

CHEN Jie¹, JIANG Deyi¹, LIU Chun², QIU Huafu¹, DU Chao¹, GUO Ping¹

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University,

Chongqing 400044, China; 2. Safety Engineering College, Chongqing University of

Science and Technology, Chongqing 400042, China)

Abstract: The interaction between interlayer and brine migration in cavity construction period is analyzed by taking the Jintan underground energy storage of salt rock in Jiangsu Province as a demonstration project and using RNG $k-\epsilon$ turbulence model and material transfer theory. The study shows the movement of brine in the cavity construction process forms complex turbulences due to the affecting of interlayer. Vortexes are produced around the interlayer and their influence diminishes with the expansion of chamber. Additionally, the influence of the interlayer on flow field is also affected by washing techniques, such as water injection method, location of injection flow rate and spatial location of casing. At the same time, the non-uniform flow of brine forms different degrees of water pressure on the interlayer. Generally, the interlayer is mainly affected by the water pressure generated by injection water flow in the former stage of cavity construction, while it is mainly affected by boundary mass flow in the latter stage of cavity construction. But in both

收稿日期: 2012-02-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724606); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11241182, CDJXS11241181); 国家自然科学基金资助项目(51074198); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2009BB6229)

作者简介: 陈结(1983-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事采矿工程、岩土工程方面的研究。

姜德义(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)deyij@cqu.edu.cn.

stages, the pressure generated by brine flows is insufficient to make the interlayer collapse. PIV techniques are adopted to monitor migration law of the brine in physical model, and the law of brine movement in experiments is consistent with calculation results.

Key words: salt caverns; cavity construction period; brine migration; interlayer; PIV technique

盐岩具有优良的物理特性和力学性质,许多国家均指出盐岩地层是能源地下储存的理想场所,目前已在部分国家被较大规模建造。国外学者早在上世纪 60 年代就对盐丘地质水溶造腔过程盐岩溶解、腔内卤水流动机理及溶腔形状控制技术进行了初步研究^[1],并通过有限元数值软件分析了盐穴尺寸、埋深、顶底板厚度、力学参数对盐穴的影响,获得了盐丘型储库的最优腔体设计参数^[2]。与国外大型盐丘型地质条件相比,中国盐岩层的特点是“矿层层数多,单层厚度薄”,薄夹层的存在使得造腔形状控制较难,造出的型腔不规则使得力学性能差、蠕变快,进而造成型腔体积减少过快,过早报废。针对上述问题,国内学者对层状盐岩的物理力学性质进行了系统的研究,获得了盐岩在不同条件下的力学特性及溶解特性^[3-6],并得出了几种夹层垮塌破坏模型^[7-10],对国内含夹层盐岩地层中泥岩夹层对能源地下储库建造稳定性的影响也进行了初步研究^[11]。

中国正处于能源地下储库建造起步阶段,需要对建造期各关键因素进行系统研究。其中,建造期卤水运移规律及夹层与卤水相互作用关系对盐穴能源储库建造将产生一定影响。因此有必要针对盐穴建造期注淡水排卤水过程中溶腔内部卤水运移特征及卤水与夹层的相互作用机理展开研究。盐穴水溶建造是全封闭无法实时观测的过程,所以真实造腔过程中腔内注入水的流动扩散形式及溶腔内部卤水在夹层附近的运移特征和夹层受力状态无法通过现场监测获取。笔者基于流体数值计算软件对建造期溶腔内流体运移规律进行了相应计算。利用数值计算软件除了可以模拟盐穴建造过程中注入淡水的流动扩散规律及卤水运移扩散特点外,还可以对不同造腔阶段卤水流动对夹层的受力分布进行分析。为了分析数值分析结果的正确性,利用 PIV 技术^[12-13]对含夹层腔体模型进行流场实验分析,其实验结果与数值结果很相似。

1 盐穴建造期流体力学理论简介

选用 Fluent 流体数值分析软件对含夹层溶腔流场进行数值模拟分析。Fluent 软件可以提供多种网格绘制模块,可以将较为复杂的几何模型建立过

程变得简单,并能保证计算精度,还提供了多种计算模型,通过选用其中的物质输运模型来分析多种物质之间的对流-扩散特征。

1.1 流体运移方程

采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行流场计算

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + \rho \epsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (2)$$

式中: G_k 是由流体平均流动速度梯度而产生的湍流能 k 的产生项; G_b 是由浮力产生的湍流能 k 的产生项; α_ϵ 是耗散率 ϵ 对应的普朗特数; α_k 是湍流能 k 对应的普朗特数。参数取值为: $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right)$

$$\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \right); C_{1\epsilon}^* = C_{1\epsilon} - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3}; G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}; Pr = 0.852; C_{1\epsilon} = 1.42; C_{2\epsilon} = 1.68; C_\mu = 0.845。$$

1.2 物质运动方程

在 Fluent 中的物质对流扩散方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y) + \nabla(\rho v Y) = -\nabla \mathbf{J}. \quad (3)$$

式中: Y 为物质的当地质量分数, \mathbf{J} 为物质的扩散通量。

$$\mathbf{J} = -\rho D \nabla Y, \quad (4)$$

式中: D 为物质在溶剂中的相对扩散系数,本研究中盐岩在淡水中的扩散系数取 $2.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[14]。

1.3 夹层受力模型

作用在夹层上的总应力为

$$\mathbf{F}_a = \mathbf{a} \cdot \mathbf{F}_p + \mathbf{a} \cdot \mathbf{F}_v, \quad (5)$$

式中: \mathbf{F}_v 为粘性力, \mathbf{F}_p 为压力; \mathbf{a} 为力的方向矢量。

$$\mathbf{F}_p = \sum_{i=1}^n (p - p_{\text{ref}}) \mathbf{A} \mathbf{n} = \sum_{i=1}^n P \mathbf{A} \mathbf{n} - p_{\text{ref}} \sum_{i=1}^n \mathbf{A} \mathbf{n}, \quad (6)$$

式中: A 为力作用的面积, n 为面数, \mathbf{n} 为垂直于面的单位矢量, p_{ref} 为参考压强,当流体流流速较低时取值为 0。

2 几何模型建立

2.1 建造期流场分析的基本假设

盐岩建腔过程中,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) 忽略温度和杂质对盐水扩散的影响;
- 3) 液体介质为不可压缩。

2.2 计算区域及边界条件

为了较好地分析含夹层盐穴建造过程中几个关键的造腔阶段流体的流动及物质输运特征,同时能分析腔体扩展后夹层的受力特征,笔者选择了3个关键造腔阶段进行数值计算分析:建槽期(腔体高34 m,平均直径20 m,套管间距29 m)、建腔前期(腔体高52 m,平均直径31 m,套管间距19 m)、建腔后期(腔体高92 m,平均直径45 m,套管间距20 m),以此来分析建造期流场与夹层的相互影响。计算模型地质参数见参考文献^[15],造腔套管尺寸为外套管直径224.5 mm,内套管直径125.7 mm,不考虑技术套管;夹层悬空最大跨度由夹层垮塌极限跨度公式^[9]计算,取5~9 m,建造期各造腔阶段腔体几何参数见图1,套管位置根据不同造腔阶段而异。边界条件:腔体顶部为油垫层和部沉渣区均可视为不溶固定边界,腔体盐岩层在竖直方向的溶解速率分布由卤水在竖直方向浓度值变化规律^[15]可折算为对应的NaCl质量入口;不溶夹层定义为固定边界,无质量传输,忽略不溶杂质沉降及温度的影响;建槽期采用正循环造腔,注水口流速取1.34 m/s;建腔

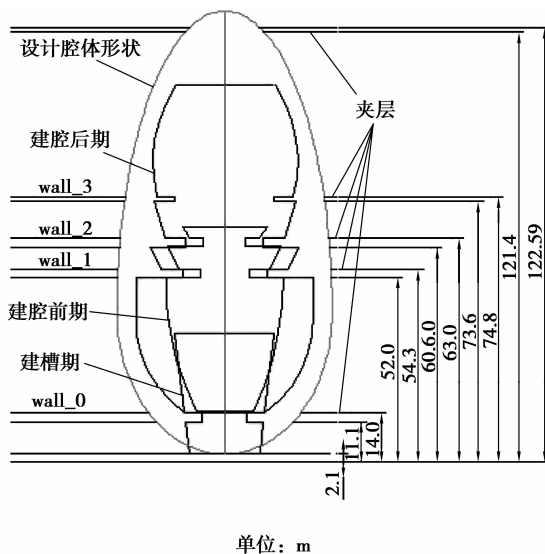


图1 几何模型

初期和后期采用反循环造腔,注水口流速取0.92 m/s。

3 数值计算结果与分析

按上述方案对盐穴建造期流场进行数值计算发现:几个造腔阶段注水管注入淡水进入腔体后受注入流惯性力作用将向下继续前移,同时受卤水浮力作用又转而向上运动,并伴随扩散运动(因浓度差的存在)。当注入水上浮运动到顶部油垫处时,受顶部界面约束随后向两侧运动,然后与盐岩边界层的高浓度卤水混合转而向下运动。因腔体上部区域小,且流体流动变化又较为频繁,使得上部流场较为复杂,卤水扩散也更显著。一般盐岩边界层高浓度卤水受重力作用向下运动时,若遇到夹层将发生沿夹层的绕流和涡旋流。夹层附近卤水的不均匀流动将对夹层产生不同程度的水压力,其大小受夹层空间位置、注水速度、卤水浓度分布及腔体大小等因素影响。

3.1 建槽期夹层与卤水流动相互作用特征

建槽期腔体体积小,夹层单一,采用正循环造腔时注入淡水的作用区域很大。注入水受腔体底部阻碍及卤水浮力作用转而向两侧运动,在夹层下方形成涡流。在盐层壁面新溶解的高浓度卤水在重力作用下向下运动,同时向腔体中心部位扩散。受夹层影响,盐岩边界层下沉的质量流与上浮注入水流在夹层处相遇,因2种不同流向的流体相遇形成较为复杂的紊流。从图2建槽期流场分布图可知,溶腔

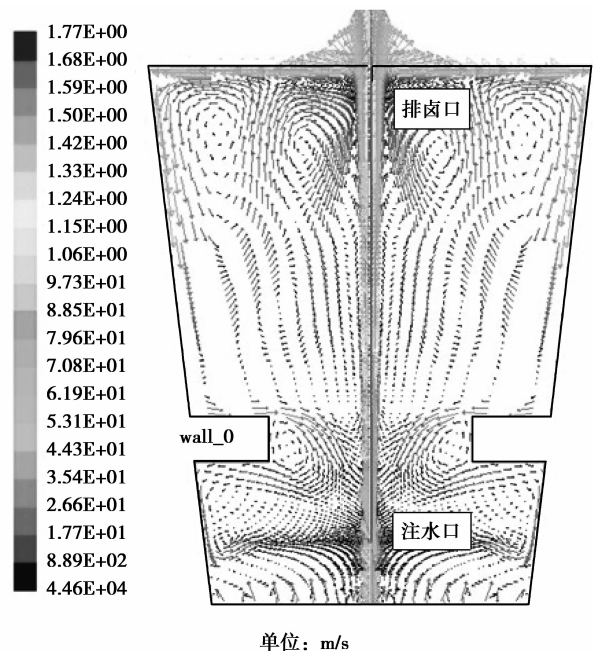


图2 建槽期卤水流场矢量分布图

内卤水运移的动趋势及规律。卤水流动过程中将对夹层产生不同程度的水流压力,图 3 为正循环注水作用下,卤水流动在夹层表面产生水压力分布图。从图 3 可知夹层受到的最小静压力为 494 Pa,最大压力约为 561 Pa。其作用在夹层垂直方向的压力合力约为 77 N/m^2 ,比夹层自身所受的重力(21.8 kN/m^2)小很多。

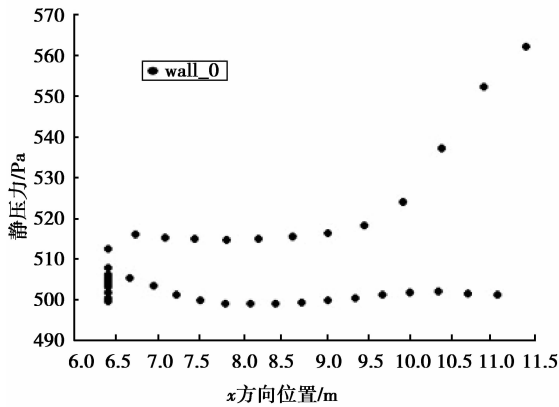


图 3 夹层表面受力分布图

3.2 建腔前期夹层与卤水流动相互作用特征

建腔前期,腔体体积逐渐增大,注入水作用范围只在套管附近一定区域范围内。另外,这一阶段采用反循环,所以注入水主要影响注水注水口之上区域,注水口下方主要受下沉质量流与卤水扩散驱动力作用。由图 4 可知,采用反循环造腔,淡水从套管环孔喷出后受浮力影响而向上浮动,因上浮距离较

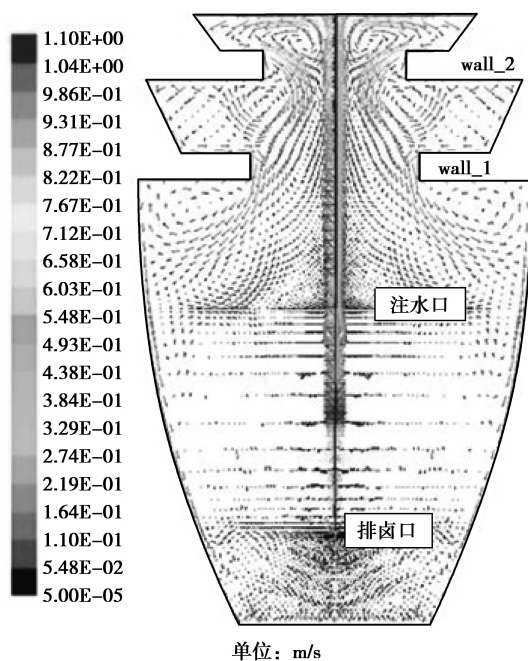


图 4 建腔初期卤水流场矢量分布图

长加上上部夹层的影响,再加上边界层向下流动的质量流影响,上浮水流在腔体上部区域形成较为复杂的紊流区。由图 5 可知在建腔前期的某个时段,夹层 wall_2 表面受的压力要比夹层 wall_1 受的压力大,这主要是因为夹层 wall_2 离油垫层较近,上浮水流在到达顶板油垫处时仍有一定速度,故对上部夹层产生的扰动水压力要明显一些,而位于下部的夹层 wall_1 受水流扰动压力作用要小些。两夹层所受的最大水压力约为 2376 Pa ,最小水压力约为 1972 Pa ,其作用在夹层 wall_2 垂直方向的压力合力最大约为 94 N/m^2 ,比夹层自身所受的重力(21.8 kN/m^2)小很多。

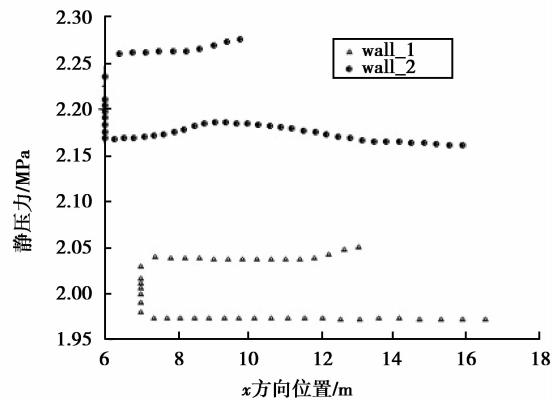


图 5 夹层表面受力分布图

3.3 建腔后期夹层与卤水流动相互作用特征

随着腔体体积的进一步扩展,在流量不变的条件下,注入水流相对于整个腔体而言其作用区域将会相对变小,故此阶段水流运动较建腔前期要平缓许多。图 6 中,因注水口位置和夹层 wall_1 空间位置相同,使得注入上浮水流不能作用到注水口附近及以下的夹层,所以夹层 wall_1 附近流场分布平缓。而腔体注水口上部区域受上浮流和质量流及边界效应共同作用,使得上部区域流场波动较大,特别在夹层附近形成明显的涡流区。由图 7 可知,夹层 wall_3 位于腔体最上方受到注入流和质量流作用最大,故其所受的水压力也最大。下部夹层因注入水流受卤水阻力作用,速度逐渐降低,对夹层产生的水压力也逐渐减小。3 个夹层所受的最大水压力约为 5302 Pa ,最小水压力约为 4853 Pa ,其作用在夹层 wall_3 垂直方向的压力合力约为 318 N/m^2 ,比夹层自身所受的重力(21.8 kN/m^2)小很多。

由上述分析可知,随着腔体形状扩展,腔内空间静水压效应也会增加,所以造腔后期作用在夹层上

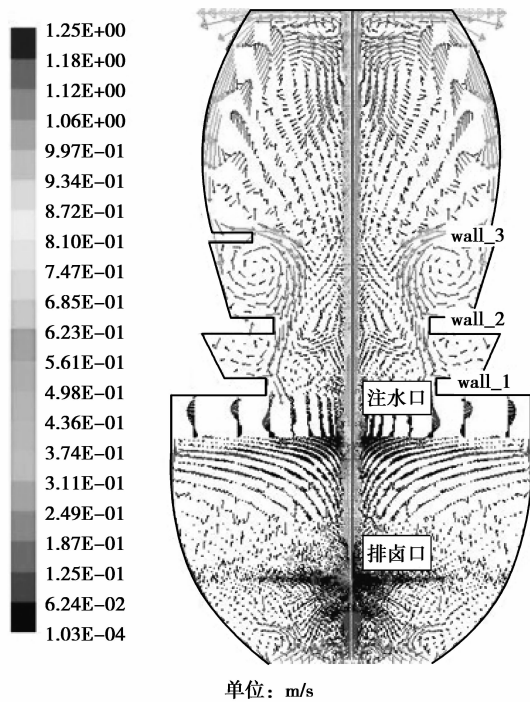


图 6 建腔后期卤水流场矢量分布图

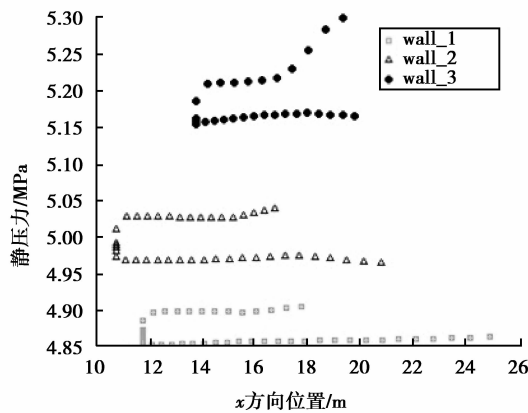


图 7 夹层表面受力分布图

总的水压力要明显高于前 2 个阶段,故在建腔后期卤水流动产生的扰动水压力对夹层垮塌破坏的影响将会增强。

4 物理模型实验

4.1 实验装置及方法

为了进一步确定盐穴建造期腔内卤水运移与夹层相互作用机理,笔者开展了物理模型试验,模型参数选取基于相关造腔工艺参数及“选定物理法则”^[16]相似理论,利用 PIV 技术(粒子成像测速仪,

仪器为美国产 TSI 三维激光测速系统,观测范围 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$,可精确测定观测区流体流动轨迹和速度变化)观测含夹层腔体模型中卤水运动过程,以聚苯乙烯微球(密度 $1.00 \sim 1.07\text{ g/cm}^3$)作为示踪粒子提高观测效果。搭建高 $30\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ 长方体腔体模型,在其中一个面铺设 2 cm 厚盐砖,并在腔体 10 cm 高度处放置横跨为 5 cm 的薄片用于模拟夹层,取中心套管内径为 0.1 cm ,外套管内径为 0.3 cm ,注入水流量取 300 mL/min ,根据试验要求预先向腔内注满一定浓度的卤水,之后按现场造腔工艺开始模拟水溶造腔过程。选定图 8 中 a、b、c 3 个主要观测区域进行 PIV 流场分析。

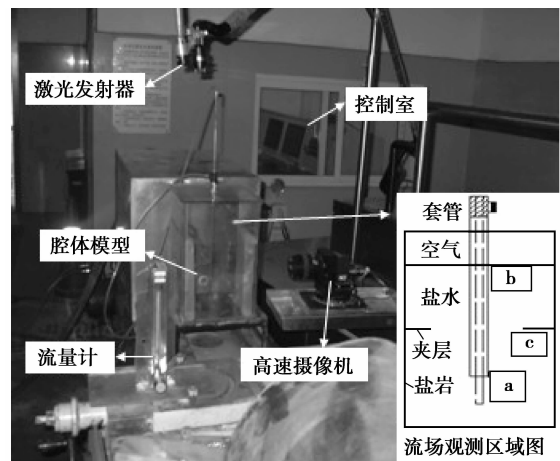


图 8 PIV 流场分析实验装置图

4.2 实验结果及分析

通过 PIV 技术测得的相似模型流场实验结果发现,实验中腔内卤水流动规律与数值计算卤水运移规律相同。由图 9(a)可知,在注水口附近注入的淡水在注入流惯性力作用下会向下运动一段距离,然后在卤水浮力作用下转而向上运动,上升的淡水与周围的卤水发生相互扩散效应。数值计算中各阶段注入的淡水同样是以上浮运动为主,上浮速度与腔内卤水浓度及注水速度有关;图 9(b)中,当注入淡水流上浮到顶部边界时,受顶顶板界面约束开始向侧向运动,其速度逐渐减小。这与数值计算流场分布图中现象相似,只是数值计算中横向运动的淡水在竖向的扩散没有试验中的明显;图 9(c)中,盐岩边界层新溶解的高浓度卤水受重力作用向下运动,当遇到夹层时会绕过夹层继续向下运动,在夹层下方与上升流相遇形成涡流区。这种质量流与夹层相互作用引起的涡流现象与数值计算流场分布规律

相似。综上结果分析可知,PIV 相似模型实验中卤水运移情况与数值计算结果基本相同,因此采用 RNG $k-\epsilon$ 模型进行流场计算,并保证边界条件一致,就可以近似反映真实造腔过程中腔内卤水运移规律及夹层与流场相互作用关系。

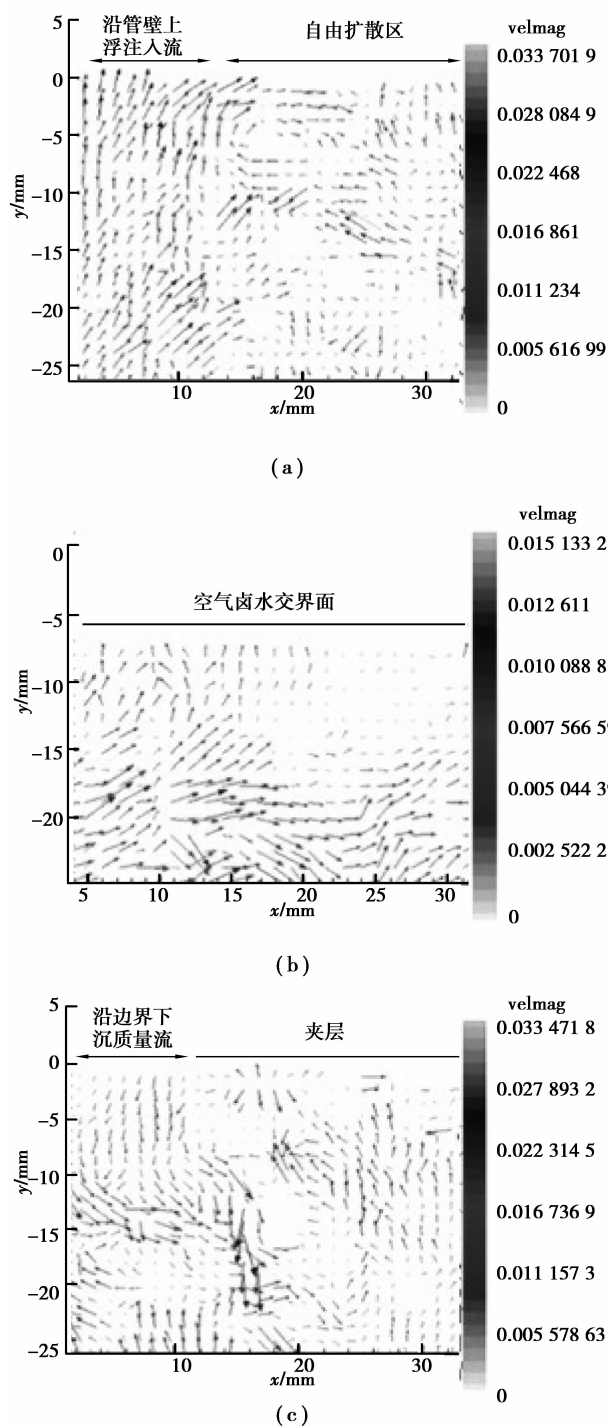


图 9 溶腔中标定区域卤水运移矢量图

5 结 论

盐穴建造期各造腔阶段夹层不仅改变了注入淡水的流动状态还改变了边界层盐岩溶解形成的高浓度卤水运动状态,最终使得腔内卤水运移复杂化。一般边界高浓度卤水在夹层附近会形成涡流或扰动,改变卤水运移趋势及扩散速度。造腔阶段不同,卤水运移状态对夹层产生扰动水压力也将不同,腔内速度场和浓度场波动会增加夹层附近流速梯度,同样会在夹层表面产生较为明显的作用力,但这种作用力不足以使夹层垮塌破坏。总之,层状盐穴建造期夹层与流场相互作用影响,夹层会改变卤水运动规律,同时夹层的受力状态也因流场的波动而发生明显变化,只是在不同的造腔阶段,受注水速度、夹层空间位置、套管位置及腔体尺寸等因素影响,两者作用强度会有所变化。

参考文献:

- [1] Kazemi H, Jessen F W. Mechanism of flow and controlled dissolution of salt in solution mining[J]. SPE Journal, 1964, 4(4): 317-328.
- [2] Tao Z Y, Ma Z H. The research of salt cavern 3D modeling technology[C]// Asia-Pacific Conference on Information Processing, 2009, July 18-19, 2009, Shenzhen. [S.l.]: IEEE, 2009: 241-243.
- [3] 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. Research on mechanism of solution mining for building underground gas storage in salt cavern[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 107-109.
- [4] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下岩盐的溶蚀模型研究[J]. 岩土力学报, 2008, 29(2): 296-302. TANG Yanchun, ZHOU Hui, FENG Xiating, et al. Study on dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 296-302.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 周宏伟, 何金明, 武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其微观结构特征[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.
- [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.
- [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[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3615-3620.
- [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 Yinping, QU Dan'an, et al. Advance in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(4): 484-494.
- [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(增刊): 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(Suppl): 241-246.
- [12] 许丹宇, 张代钧, 陈钊, 等. 卡鲁塞尔氧化沟反应器三维流场体视 PIV 测量[J]. 应用力学学报, 2008, 25(3): 387-391.
- XU Danyu, ZHANG Daijun, CHEN Zhao, et al. Stereoscopic PIV measurement of 3-Dimensional flow field in carrousel oxidation ditch reactor mode [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 25(3): 387-391.
- [13] 杨敏官, 刘栋, 顾海飞, 等. 盐析液固两相流场的 PIV 测量方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 25(3): 387-391.
- YANG Minguan, LIU Dong, GU Haifei, et al. Using the PIV technology to measure the liquid-solid flow with salt coagulation [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 25(3): 387-391.
- [14] 汤艳春. 考虑岩盐应力溶解耦合效应的盐腔溶腔机理研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2008.
- [15] 赵志成. 盐岩储气库水溶建腔流体输运理论及溶腔形态变化规律研究[D]. 河北: 中国科学院渗流流体力学研究所, 2003.
- [16] 江守一郎. 模型实验的理论与应用[M]. 郭廷伟, 李安定, 译. 北京: 科学出版社, 1986.

(编辑 郑洁)