

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.01.18

断层对压裂液运移影响的数值模拟研究

魏亚强^{1,2,3}, 董艳辉^{1,3}, 李国敏^{1,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049;
3. 中国科学院页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029)

摘要:水力压裂必然会带来相关环境问题,压裂液对浅层含水层的影响不容忽视。为了查明压裂液潜在的向上运移通道及不同地质条件下压裂液的运移情况,对压裂液潜在的运移通道进行了分类,基于变密度数值模拟软件 SEAWAT,考虑不同渗漏点与断层底部距离、不同断层倾角对压裂液运移的影响,设计了6种情景开展了数值模拟。结果表明:压裂液潜在向上运移通道主要有对流传输、裂隙传输以及井管泄露。密度差异产生的浮力是压裂液上升的主要动力。压裂液渗漏点距离断层底部越近,影响范围越大,监测点水位和浓度均最先降低。在存在微弱水力梯度条件下,断层倾角 α 为 20° 时,断层对局部水流水位及浓度影响较大; α 为 90° 时,对压裂液运移产生影响较小; α 为 70° 时,断层对压裂液运移影响最大,压裂液会扩散至较大范围。

关键词:水力压裂;压裂液;运移通道;数值模拟;SEAWAT;断层

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)01-0117-07

Numerical simulation of the fault impact on fracturing fluid migration

WEI Yaqiang^{1,2,3}, DONG Yanhui^{1,3}, LI Guomin^{1,3}

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Shale Gas and Geoengineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract: Hydraulic fracturing, as a new shale gas production method, inevitably raised environmental problems. Fracturing fluid may influence the shallow aquifer, which cannot be ignored. The objective of this study is to identify the potential pathways of fracturing fluid upward migration and show the different migration plume in various geological scenarios. We classified the potential upward migration pathways of fracturing fluid. Based on SEAWAT (a variable density simulation software), we considered the distance between the nearest leakage point and the fault, the inclination of the fault, and designed six simulation scenarios. The results show that the fracturing fluid potential migration pathways are convective transport, fracture transport and well pipe leakage. Buoyant caused by density differences is the main driving force of migration. The migration plume is greater if the distance between the leakage point and the fault is closer. The monitoring well also shows an earlier drop in water level and concentration. When there exists weak hydraulic gradient, scenario (dip angle is 20°) shows a greater impact on the local water level and concentration. If the dip angle is 90° , the fracturing fluid transport is less affected, and if the dip angle is 70° , the fault raises the greatest impact on the migration of fracturing fluid, and the fracturing fluid can spread to a wider range.

Keywords: hydraulic fracturing; fracturing fluid; migration pathways; numerical model; SEAWAT; fault

收稿日期: 2015-03-31; 修订日期: 2015-06-05

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)课题(XDB10030600);国家自然科学基金项目(41202182)

第一作者: 魏亚强(1990-), 博士研究生, 研究方向为地下水数值模拟。E-mail: weiyang0000@126.com

页岩气作为一种重要的非常规天然气资源,已成为全球油气资源勘探开发的新亮点。水平井由于能够增加与页岩接触面积,近年来被广泛使用,页岩气藏具有超低渗透率和低孔隙度,水平井需经过多级大规模水力压裂处理,才能保证页岩气藏经济生产。压裂液主要的组分为水和支撑剂,这些起不同作用的压裂液成分会依次注入页岩储层中并发挥水力压裂作用。据美国 Fayetteville 页岩气开采井数据^[1],该场地压裂液中占总体积 90.6% 为清水,8.95% 为砂粒,0.45% 为添加剂;美国 Marcellus 某开采场地单井使用 2 063 m³ 压裂液,其中 0.5% 为压裂添加剂。添加剂中的硼酸盐、戊二醛、异丙醇等有害物质对浅层地下水含水层产生了很大危害。在 Marcellus 场地,注入的压裂液中 30% ~ 70% 会返排到地面,而在 Pennsylvania 场地,该体积分数仅为 9% ~ 53%,平均为 10%^[2],其余返排水均为页岩储层中的原生卤水^[3]。Pennsylvania 场地中压裂液最高可有 91% 滞留在页岩气储层或者相邻地层及其余可能存储的结构中。滞留压裂液是否影响浅层饮用水含水层成为一个值得关注的问题^[4-6],如果能够影响浅层含水层,其潜在的向上运移通道及其运移动力来源更是一个值得探究的问题。

有研究者对压裂液的运移问题展开了数值模拟研究,但是目前有针对性的研究不多见。Myers 曾用 SEAWAT-2000 模块,用一排竖井概化为水平井,对不同存储系数^[7]、不同断层渗透系数情形下的水流运移至 1500 m 以上含水层的运移时间进行了分析。针对该模型,Saiers 等指出,该模型并未考虑温度变化引发的流体密度差异对水流的影响,并指出沉积岩层中的孔隙介质水力传导系数在温度从 15 ℃ 变化到 70 ℃ 范围内能增加 3 倍^[8]。Cohen 等在此基础上指出该模型的上升水流因模型的上下边界为定水头边界而造成,并非密度流差异而造成^[9]。Gassiat 等使用 SUTRA-MS(USGS 变密度模拟软件)对一个含断层的沉积盆地中压裂液的运移进行了分析,指出长时间尺度情形时,压裂液通过断层影响浅层含水层的情况是存在的^[10]。然而该模型把压裂区域当作一个整体,对压裂液突破页岩储层进入上覆岩层的具体情形并未仔细刻画。

综上,本文拟对压裂液潜在向上运移通道进行分类,并分析其运移的动力来源,采用 MODFLOW 中的 SEAWAT 模块,对压裂液突破页岩储层,以多点状同时进入地层的情形进行了变密度流的模拟,并分析了不同渗漏点与断层底部距离、不同断层倾角对压裂液

运移的影响。

1 压裂液潜在向上运移通道

对于压裂液的污染研究,目前研究人员主要关注的是压裂液可能污染上部浅层饮用水含水层的污染通道。Rozell 等指出,页岩气开采过程水污染形式主要有运输泄漏、开采井筒泄露、破碎岩石泄露、施工场地排污以及废水处置不当^[11]。提及的井筒泄露和裂隙泄露是地下岩层中压裂液可能的运移通道。Vidic 等曾指出压裂液可以沿着废弃或不合理封堵的油页岩开采井运移,或是通过未密封的套管和井孔中间部位、天然或诱发的断裂运移扩散^[2]。Myers 曾明确指出,压裂液运移至浅层含水层有两种潜在通道,即穿过块状介质的对流传输以及通过断裂的优先流传输,并通过模型分析了两种通道到达模型预设浅层含水层所需时间^[7]。针对潜在运移通道的阐述并不多,本文将潜在污染通道概括为以下三类(图 1):

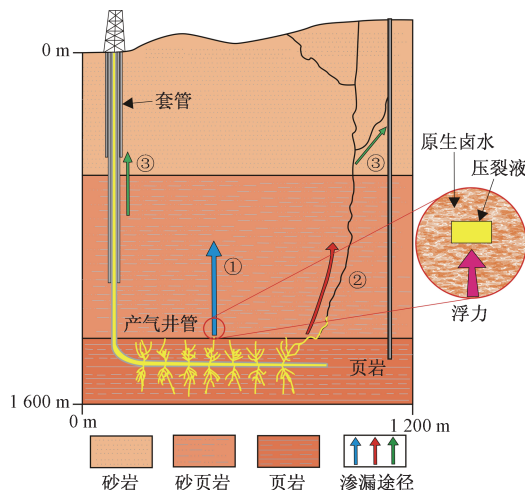


图 1 压裂液潜在运移通道及动力来源示意图

Fig. 1 Potential migration pathways of the fracturing fluid and migration power source

1.1 对流传输

压裂液的对流传输指压裂液通过页岩以及邻近岩层的块状基质运移^[7]。这是一种没有外界驱动力但流体依然存在运动的情况,引起流体运动的内在力量是温度差或者组分浓度差。由于水力压裂过程中产生高压,页岩储层中的纳米级连通孔隙可能会作为压裂液传输的重要介质。当压裂液突破页岩压裂储层后,若上覆岩层为弱透水层或含水层,压裂液会在岩层中发生对流传输。

1.2 裂隙传输

裂隙传输指通过水力压裂产生的裂隙以及诱发或

原生断裂运移。水力压裂过程易诱发断裂,可能通过其直接导通附近原生断裂,也可能通过诱发断裂直接连通上覆含水层。由于断裂相较于基质具有较大渗透性,压裂液在断层中极易形成优先流^[7],能极大地缩短压裂液运移至浅层含水层的时间^[12]。

1.3 井管泄露

井管泄露指水力压裂返排水过程中,通过正在生产的气井套管泄露,或是通过废弃油气井等通道连通浅层含水层。目前 Marcellus 页岩气开采井共有四层套管,所有套管之间均用水泥固化填充^[2]。四层套管组合模式一旦有密封不严的情况发生,极易造成压裂液从套管中流窜传输。水力压裂产生的裂隙也可能连通废弃油气井井作为运移通道。

1.4 压裂液向上运移动力来源

页岩气储层中注入压裂液后,压裂液会沿着裂隙向相邻岩层泄露。目前,水力压裂后,压裂液沿裂隙和相邻含水层向上运移的动力来源仍是一个未知的问题。同类问题中,关于 CO₂ 的地质储层过程涉及的水力捕获问题已得到深入研究,CO₂ 气体注入咸水层后,由于其密度小于咸水,在浮力作用下上升至咸水层顶部,在盖层底部随地下水缓慢流动^[13]。有研究人员对 CO₂ 注入后产生高压情形下,高浓度卤水通过盖层断裂向上覆低浓度含水层运移情景开展了模拟^[14],反映了浮力对于低密度流体向上运移的重要贡献。

Myers 研究得出,Marcellus 页岩储层中的原生卤水总溶解固体量浓度达 35×10^4 mg/L,在 25 °C 时密度大约为 1290 kg/m³,当地表的压裂液(体积分数 90% 为清水^[1])压入页岩储层时,产生的浮力即为压裂液置换的卤水与压裂液重量之差^[7]。因而,页岩气开采过程中由于高压注入压裂液,压力可能是压裂液向上运移的主要动力^[15],主要途径是裂隙传输和含水层中的对流传输。在水力压裂之后,因密度差异而产生的浮力是压裂液上升的主要动力,而高温以及高浓度的原生卤水即为最主要的动力来源。

2 压裂液运移数值模拟

SEAWAT 软件是一款用于模拟变密度地下水流的软件,在处理咸水环境时以等价淡水水头为基础。经典的恒密度水流模型 MODFLOW 采用体积守恒来建立水流方程,但对于变密度地下水模型,体积守恒不再适用。因此,SEAWAT 采用质量守恒建立水流模型,并将地下水密度定义为地下水中溶解物质浓度的函数,忽略温度对地下水密度的影响^[16],控制方程

如下:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\rho K_{f\alpha} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \beta} \left[\rho K_{f\beta} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[\rho K_{f\gamma} \left(\frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s$$

式中: α, β, γ ——渗透的主方向;

$K_{f\alpha}, K_{f\beta}, K_{f\gamma}$ ——沿 α, β, γ 方向的渗透率/m⁻¹;

S_f ——以等价淡水水头表示的储水率/m⁻¹;

ρ ——地下水的密度/(kg·m⁻³);

θ ——有效孔隙率;

C ——溶解物质的浓度/(kg·m⁻³);

q_s ——单位时间进入单位体积含水层源、汇项的体积/s⁻¹;

ρ_s ——源汇项中溶解物质的密度/(kg·m⁻³)。

2.1 模型建立

假设一个页岩储层上覆地层为均质砂岩,水力压裂产生裂隙在页岩储层与上覆地层界面形成点状接触,采用多点渗漏情形模拟压裂液进入上覆含水层情景。文章基于 SEAWAT 建立了二维剖面模型,模型深 1500 m,长 3000 m。模拟断层存在时,低浓度压裂液进入高浓度含水层后的传输情形。具体模型及边界条件见图 2。

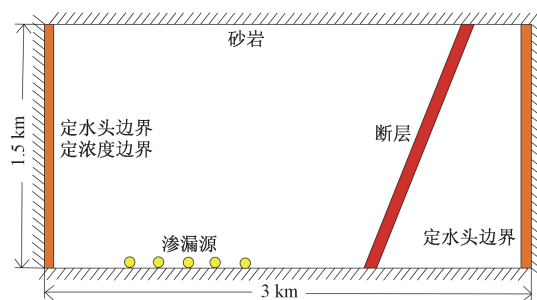


图2 模型范围及边界条件示意图

Fig. 2 Numerical model domain and boundary conditions

假设砂岩含水层为承压含水层,除断层处,其余均质各向同性。断层渗透系数较大,均质各向同性。模型左右两侧设定水头边界,左侧边界水头为 1 700 m,右侧边界水头为 1 600 m。模型初始水头设为 1 650 m。砂岩渗透系数 $K_x = K_y = K_z = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s,断层底部在 $x = 2 000$ m 处,渗透系数为 0.005 m/s。为了还原真实的承压卤水含水层,根据文献资料^[7],设定含水层初始浓度为 1.0×10^5 mg/L,渗漏源主要为页岩卤水和压裂液混合物,假设持续渗漏浓度为 500 mg/L,为保证含水层浓度的稳定性,设定左侧为定浓度边界,浓度设为 1.0×10^5 mg/L。

模型设计了一个水位观测孔,一个浓度观测孔,监测位置在 $x = 2\ 000\ \text{m}$ 处,监测深度为 $1\ 499\ \text{m}$,主要为了观测断层底部的水位和浓度变化。

持续运移时间为 $10\ 000\ \text{d}$,分 3 个计算应力期,采用 PCG 算法计算 SEAWAT 模型。

为了反映断层距压裂液渗漏处的距离以及断层角度对运移情况的影响,模型共设置 6 种计算情景:

情景 a:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,没有断层。

情景 b:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,最右渗漏点与断层底部距离 $700\ \text{m}$,断层倾角

70° 。

情景 c:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,最右渗漏点与断层底部距离 $500\ \text{m}$,断层倾角 70° 。

情景 d:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,最右渗漏点与断层底部距离 $200\ \text{m}$,断层倾角 70° 。

情景 e:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,最右渗漏点与断层底部距离 $700\ \text{m}$,断层倾角 90° 。

情景 f:页岩气压裂液从砂岩岩层底部呈点状渗漏,最右渗漏点与断层底部距离 $700\ \text{m}$,断层倾角 20° 。

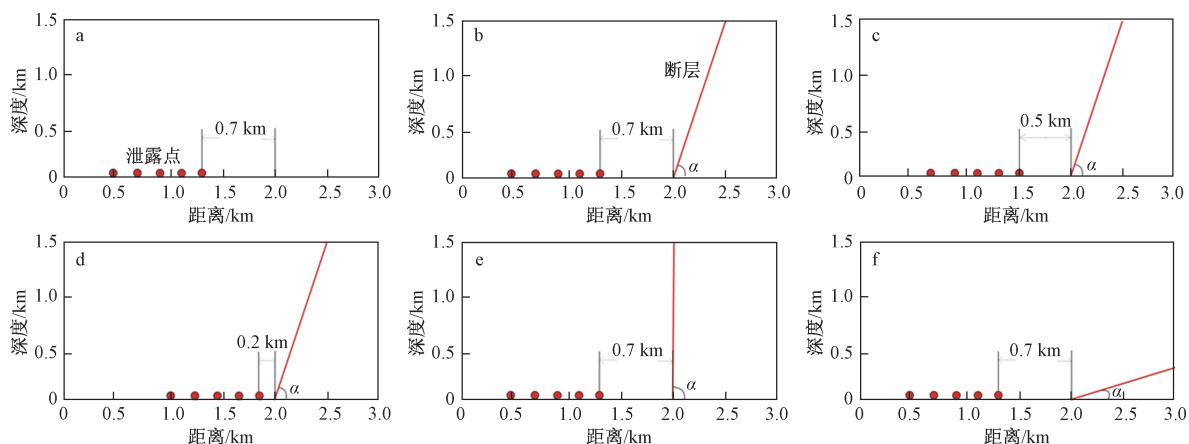


图 3 不同渗漏情景示意图

Fig. 3 Sketch maps of different leakage scenarios

2.2 结果分析

2.2.1 渗漏点与断层距离对压裂液运移影响

模型计算得出不同距离的渗漏点渗漏时的,不同时间压裂液的渗漏情况(图 4)。

由图 4 可以看出,当没有断层时,压裂液进入岩层 5 点同时开始渗漏后,在整个区域的流场作用下,开始

缓慢向右运移,并且因为密度流的影响而向上扩散,在模型终止时间时,已经运移到最右侧的定水头边界处。当断层存在时,明显发现压裂液运移至断层底部($2000\ \text{m}$ 处)后,压裂液在高密度卤水中向上运移现象明显,并且在向上运移后开始在流场作用下向右缓慢扩散,在 $10000\ \text{d}$ 时,距离 $500\ \text{m}$ 以及 $200\ \text{m}$ 的情景显

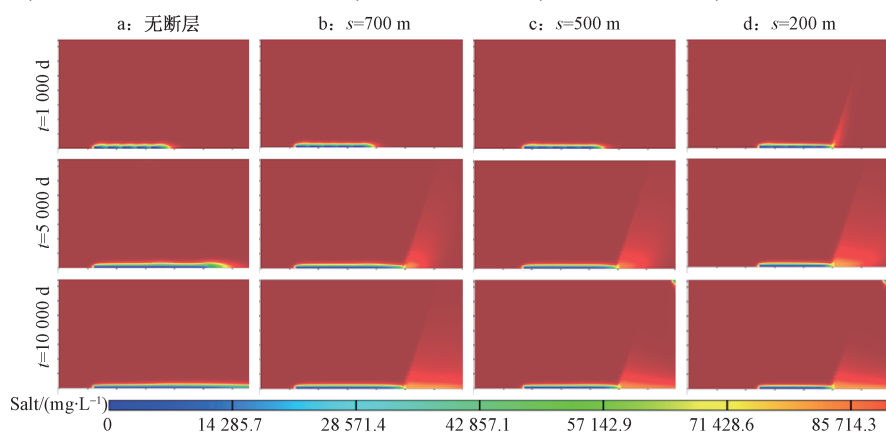


图 4 不同时间、不同情景时的压裂液运移浓度分布图(图中模型横坐标为 $0 \sim 3\ \text{km}$,纵坐标为 $0 \sim 1.5\ \text{km}$)

Fig. 4 Migration of the fracturing fluid with time in different scenarios(model abscissa is $0 \sim 3\ \text{km}$, ordinate $0 \sim 1.5\ \text{km}$)

示了压裂液已经在右侧定水头边界向上流窜。压裂液渗漏点距离断层底部越近,其影响范围越大,模型很好地说明了这点。

总体来看,当存在断层时,导致整个含水层系统的渗透系数偏大,监测点水位有所下降(图 5a)。b、c、d 情景水头的大致趋势显示了流体缓慢向右运移的过程,但是,离断层底部越近,水位越先下降。监测孔的浓度(图 5b)显示,当不存在断层时,压裂液需约 2 000 d 运移至断层处,监测孔浓度出现明显下降,浓度稳定所需时间较长,c 情景时,压裂液运移至断层时间仅需约 200 d,断层存在的三种情景中,监测孔浓度平衡所需时间基本一致,由于断层较好的稀释作用,较 a 情景平衡时间短,最后平衡浓度稳定在 $6.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ mg/L 之间。

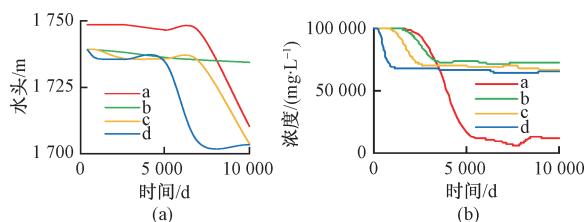


图 5 监测孔水位 (a) 及浓度 (b) 随时间变化图

Fig. 5 Changes in water level (a) and concentration (b) in the monitoring well with time

2.2.2 不同断层倾角对压裂液运移影响

图 6 展示了不同断层角度对压裂液运移的影响,

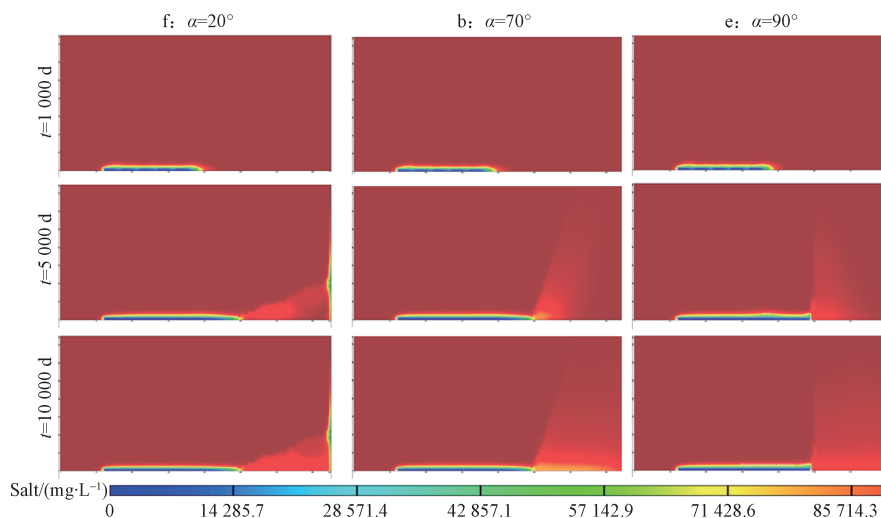


图 6 不同时间、不同情景时的压裂液运移浓度分布图(图中模型横坐标为 0~3 km,纵坐标为 0~1.5 km)

Fig. 6 Migration of the fracturing fluid with time in different scenarios(model abscissa is 0~3 km, ordinate 0~1.5 km)

2.3 讨论

压裂液在地下深层传输机理是一个多物理场耦合的问题。对压裂液的运移研究离不开对地下水流场、

断层会作为压裂液的向上运移通道,由于水力梯度的存在,压裂液向上运移的过程也会向右运移,形成了一个以断层地段为顶点的扇面。f 情景展示的 $\alpha = 20^\circ$ 时的压裂液运移面积相对较小,但是很快影响到了右侧定水头边界的浓度。b 情景展示的 $\alpha = 70^\circ$ 时的压裂液运移面积明显最大,且图 7 说明了在 $t = 5\,000$ d 时,压裂液在断层右侧的扩散羽略微由于浮力原因而上移,压裂的在 10 000 d 时,压裂液在底部沿水平方向运移了近 800 m。e 情景展示的 $\alpha = 90^\circ$ 时的压裂液在水力梯度作用下,与小角度断层相比,与压裂液与断层相互接触时间较短,随即向右侧转移扩散。因而,从情景图对比来看, $\alpha = 70^\circ$ 时,断层对压裂液运移影响最大,压裂液也影响范围较大。

图 8(a) 显示,断层角度 α 越小,监测孔水位整体越低,而且水位降低较大,可能因为小角度断层叠加水平方向的地下水流场,很容易作为压裂液的一个运移通道,作为优势通道的特征更明显。 $\alpha = 90^\circ$ 时,对监测孔水位及浓度影响均不明显,而 $\alpha = 20^\circ$ 、 70° 时,对浓度影响类似,浓度在 2000 mg/L 以后由于距断层底部距离一致而同时达到平衡,小角度断层可能由于更容易传输压裂液而在一段时间内浓度相对较低,最终平衡浓度在 $7.0 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ mg/L 之间。由此可以看出,在存在微弱水力梯度影响时, $\alpha = 20^\circ$ 对局部水流水位及浓度影响较大。

压力场、温度场以及化学反应的同时考虑。

笔者针对压裂液的运移开展的单纯的密度流模拟,SEAWAT 模块并未考虑压力场、温度场以及溶质

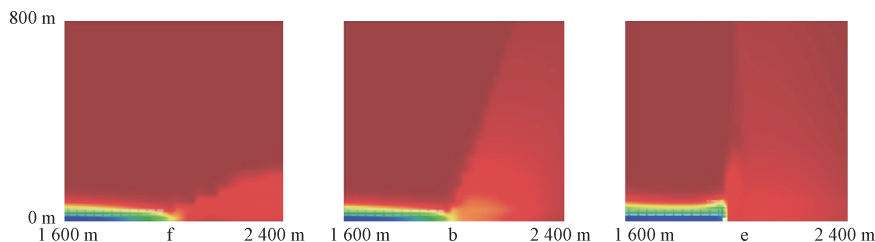


图7 5 000 d 时不同情景局部放大图

Fig. 7 Local extent of migration in different scenarios at 5 000 d

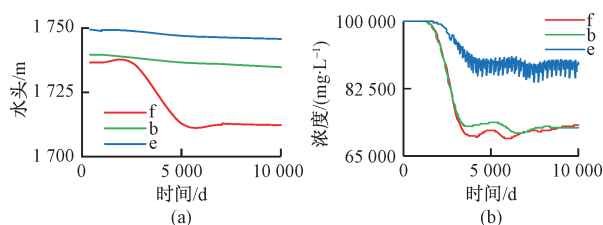


图8 监测孔水位(a)及浓度(b)随时间变化图

Fig. 8 Changes in (a) water level and (b) concentration in the monitoring well with time

之间的相互反应等问题,但是对于其中的密度流导致的对流传输以及不同断层参数对运移传输的影响给出了很好的展示和分析。对于断层的厚度、渗透系数等参数对压裂液运移的影响可进一步考虑,同时不同参数对压裂液运移的敏感性也值得考虑。

笔者认为,可进一步结合实际场地情况,开展多情景下的溶质运移模拟研究,同时设计相应的室内物理实验,辅助开展数值模拟研究工作。相关的数值模拟研究也需侧重于地下水流场与地下压力场或温度场的耦合^[17],探寻多场耦合的数值模拟新方法,为页岩气开发引发的环境地质问题研究提供参考。

3 结论

(1)压裂液可能影响浅层含水层的运移通道主要有对流传输、裂隙传输以及井管泄露。密度差异产生的浮力是压裂液上升的主要动力,而高温以及高浓度的原生卤水即为最主要的动力来源。

(2)针对压裂液泄露后情形,建立了 SEAWAT 数值模型,考虑不同渗漏点与断层底部距离、不同断层倾角对压裂液运移的影响,设计了 6 种模拟情景,较好地展现了密度流情形下,低浓度压裂液进入高浓度卤水地下含水层时的情景,说明了不同断层参数对压裂液运移的影响。

(3)压裂液渗漏点距离断层底部越近,其影响范围越大,监测点水位和浓度均最先降低。三种不同距离情景中,监测孔浓度平衡所需时间基本一致,最后平

衡浓度稳定在 $6.0 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ mg/L 之间。

(4)在存在微弱水力梯度条件下,断层倾角 $\alpha = 20^\circ$ 时对局部水流水位及浓度影响较大。 $\alpha = 90^\circ$ 时对压裂液运移产生影响较小。 $\alpha = 70^\circ$ 时,断层对压裂液运移影响最大,压裂液会扩散至较大范围。 $\alpha = 20^\circ$ 和 70° 时最终平衡浓度在 $7.0 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ mg/L 之间。从模拟结果可以得出,断层角度位于中间区间时 ($20^\circ \sim 90^\circ$) 时,对压裂液运移整体影响较大。

参考文献:

- [1] Lee D S, J D Herman, D Elsworth, *et al.* A critical evaluation of unconventional gas recovery from the marcellus shale, northeastern United States [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2011, 15 (4): 679 - 687.
- [2] Vidic R D, S L Brantley, J M Vandenbossche, *et al.* Impact of shale gas development on regional water quality [J]. Science, 2013, 340 (6134): 1 - 9.
- [3] Haluszczak L O, A W Rose, L R Kump. Geochemical evaluation of flowback brine from Marcellus gas wells in Pennsylvania, USA [J]. Applied Geochemistry, 2013, 28: 55 - 61.
- [4] Kramer D. Shale-gas extraction faces growing public and regulatory challenges [J]. Physics Today, 2011, 64 (7): 23.
- [5] Jackson R B, S G Osborn, A Vengosh, *et al.* Reply to Davies: Hydraulic fracturing remains a possible mechanism for observed methane contamination of drinking water [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108 (43): 872.
- [6] Davies R J, S A Mathias, J Moss, *et al.* Hydraulic fractures: How far can they go? [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 37 (1): 1 - 6.
- [7] Myers T. Potential Contaminant Pathways from Hydraulically Fractured Shale to Aquifers [J]. Groundwater, 2012, 50 (6): 872 - 882.
- [8] Saiers J E, E Barth. Comment on Potential contaminant

- pathways from hydraulically fractured shale aquifers [J]. *Ground Water*, 2012, 50(6):826–828.
- [9] Cohen H A, T Parratt, C B Andrews. Comment on Potential Contaminant Pathways from Hydraulically Fractured Shale to Aquifers[J]. *Groundwater*, 2013, 51(3):317–319.
- [10] Gassiat C, T Gleeson, R Lefebvre, *et al.* Hydraulic fracturing in faulted sedimentary basins: Numerical simulation of potential contamination of shallow aquifers over long time scales[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(12):8310–8327.
- [11] Rozell D J, S J Reaven. Water pollution risk associated with natural gas extraction from the Marcellus Shale [J]. *Risk Anal*, 2012, 32(8):1382–93.
- [12] Soeder D J. The Marcellus shale: Resources and Reservations[J]. *EOS*, 2010, 91(32):277–288.
- [13] 许志刚, 陈代钊, 曾荣树, 等. CO₂ 地下地质埋存原理和条件[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(1):91–97. [XU Z G, CHEN D Z, ZENG R S, *et al.* The theory and conditions of geological storage of CO₂ [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(1):91–97. (in Chinese)]
- [14] Oldenburg C M, A P Rinaldi. Buoyancy Effects on Upward Brine Displacement Caused by CO₂ Injection [J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 87(2):525–540.
- [15] Hermanrud C, J M Venstad, J Cartwright, *et al.* Consequences of Water Level Drops for Soft Sediment Deformation and Vertical Fluid Leakage [J]. *Mathematical Geosciences*, 2013, 45(1):1–30.
- [16] 栾熙明, 郑西来, 黄翠, 等. 变密度地下水流模拟软件 SEAWAT_2000 简介[J]. 海洋科学集刊, 2010(20):99–104. [LUAN X M, ZHENG X L HUANG C, *et al.* Introduction to software Seawat – 2000 for variable density groundwater flow simulation [J]. *Studia Marina Sinica*, 2010(20):99–104. (in Chinese)]
- [17] 王晓星, 吴能友, 张可霓, 等. 增强型地热系统开发过程中的多场耦合问题[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2):126–130. [WANG X X, WU N Y, ZHANG K N, *et al.* Multi-field coupling for enhanced geothermal system development[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2):126–130. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华

(上接第116页)

- [10] 宋汉周, 岳克强, 施永新. 湖南镇水电站左坝肩地下水水质酸化的成因机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4):73–82. [SONG H Z, YUE K Q, SHI Y X. Formation mechanism of acid groundwater in left dam abutment of Hunanzheng Hydro-power Station [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(4):73–82. (in Chinese)]
- [11] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2002, 27(2):127–133. [SHEN Z L, WANG Y X. Review and outlook of water-rock interaction studies [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2002, 27(2):127–133. (in Chinese)]
- [12] Mitchell J K, Soga K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York: Wiley, 2005.
- [13] 王志兵, 徐则民. 头寨滑坡玄武岩腐岩的岩石化学和矿物学特征[J]. 矿物学报, 2008, 28(4):447–454. [WANG Z B, XU Z M. Petrochemistry and mineralogy of Basalt Saprolite in Touzhai Landslide [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(4):447–454. (in Chinese)]
- [14] 张先伟, 孔令伟, 臧濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5):855–863. [ZHANG X W, KONG L W, ZANG M. Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou Peninsula [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(5):855–863. (in Chinese)]
- [15] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制[J]. 地质论评, 2007, 53(5):691–698. [XU Z M, HUANG R Q, TANG Z G. Engineering geological characteristics of the Touzhai Landslide and its occurrence mechanisms [J]. *Geological Review*, 2007, 53(5):691–698. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华