

断层幕式活动期 和间歇期流体运移与油气成藏特征

于翠玲¹, 曾 斌²

(1. 石油大学 资源与信息学院, 山东 东营, 257061; 2. 石油大学 盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

摘要: 断层的周期性幕式活动导致沿断层带流体运移具有周期性幕式运动的特点。断层的一次周期性幕式活动分为活动期和间歇期两个阶段。断层幕式活动期, 深部流体在超压作用或地震泵作用下以在断层带内的垂向运移和进入储层后的侧向运移为主, 流体运移的相态为油、气、水的混合相态。断层幕式活动间歇期, 当断层带尚未完全封闭, 输导系统内压力尚未平衡时, 流体在断层带及其两侧储层之间流动, 直至达到压力平衡。断层完全封闭后, 流体运移则不再发生。断层幕式活动期对油气的输导能力强, 而断层幕式活动间歇期对油气的输导能力相对较弱。断层幕式活动期导致断层带附近形成同层混源或异层同源的多层系(或多构造层)含油气复式油气聚集带; 而断层幕式活动间歇期使已经形成的油气藏发生再分配, 导致断层带垂向上形成欠饱和油藏—高饱和油气藏—油气藏及纯气藏的完整序列。

关键词: 断层幕式活动期和间歇期; 流体运移; 油气成藏

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

早在 1975 年, Sibson^[1] 就应用“地震泵”模式来解释含矿热液的运移过程, 认为含矿热液是通过较深古断裂呈幕式运移的, 通过断层带运移至具较低正应力的张裂隙中, 并指出地震泵作用有利于油气在构造活动区的运移。近 20 年来, 大量的地质、地球化学和地球物理研究结果进一步证实, 流体(油、气、水)沿断层带的流动具有幕式的特点^[2-14]。Hooper 认为, 通常流体沿断层运移是一个幕式流动过程, 该过程与断裂活动期次和性质密切相关, 且流动速度较快, 释放出的流体赋存于断裂上部的储层之中。但是, 目前对断层幕式活动期和间歇期流体运移特征及其油气成藏效应还缺乏深入的了解。本文试图在总结前人研究成果以及模拟实验结果的基础上, 探讨断层幕式活动期和间歇期流体运移的动力、方式和特征及其对油气成藏的影响。

1 断层幕式活动期和间歇期的流体运移特征

由于断层的周期性幕式活动, 导致沿断层带流体运移亦具有周期性幕式运动的特点。断层的一次

周期性幕式活动分为活动期和间歇期 2 个阶段。在活动期和间歇期 2 个阶段, 流体具有不同的运移动力, 从而表现为不同的运移特征。根据流体运移特征, 又可将断层带活动间歇期分为紧邻断层活动后阶段和断层封闭阶段。

1.1 断层带流体幕式运移模拟实验

为了探讨断层幕式活动期和间歇期流体运移方式和路径的差异, 我们以渤海湾盆地沾化凹陷上第三系主断裂控油地质模型之一, 即油源断层仅切割了馆陶组下段地层、油气通过油源断层直接运移进入馆陶组下段砂层为例, 构建实验模型(图 1), 进行二维模拟实验。图 1 沟通下第三系油源的断层 F 仅断到馆陶组下段的厚层砂层(S1)中。断层 F 和馆陶组下段厚层砂层(S1)的孔隙度分别为 35% 和 30%, 渗透率分别为 $13\ 366 \times 10^{-3}$ 和 $2\ 266 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

二维实验模型大小为 50cm × 30cm × 2cm, 模型前面为玻璃板, 可以直接观察油的运移和聚集。实验用砂为亲水的纯净白色石英砂。泥岩隔层或盖层均用橡胶代替, 其渗透率视为 0。实验用油为中性煤油, 密度为 $0.75\text{g}/\text{cm}^3$, 粘度(25℃)约 $42\text{mPa} \cdot \text{s}$;

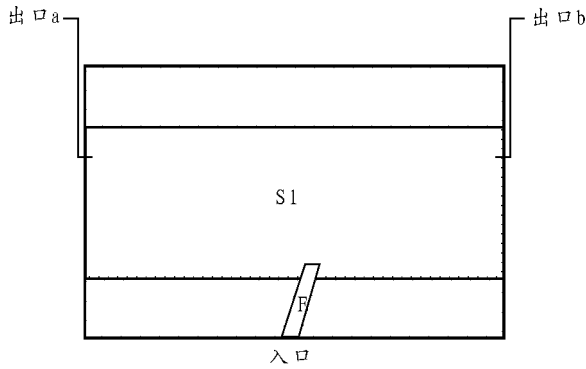


图 1 实验模型示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the experimental model

为了使油水间有明显的反差,用微量天然色素将煤油染成棕红色。实验用水为蒸馏水,密度为 1.0 g/cm^3 ,粘度(25℃) $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。在实验模型的断层处有一个油/水注入口。用直径很小的不锈钢管线将出口 a 和出口 b 置于同一高度,均高于实验模型 2.5 cm。

分别以油/水两相连续幕式充注和间隔幕式充注 2 种不同的充注条件代表断层幕式活动期和间歇期油的运移情况。油/水 2 相连续幕式充注时,一般 2 次充注的间隔为 5 min,以观察断层幕式活动期油的运移情况,总实验时间为 2 h;而油/水两相间隔幕式充注时,2 次充注之间的间隔为 24 h,以观察断层间歇期油的运移情况,总实验时间为 17 a。每次充注的油水量为油 32 ml/次、水 12 ml/次,充注压差大约为 10 mPa。

断层幕式活动期和间歇期油/水的运移动力不同。在断层幕式活动期,油/水运移的动力主要为构造作用力以及异常压力,作用力较大;而断层间歇期,油/水运移的动力主要为流体幕式运动后的剩余压力和浮力,作用力较小。由于作用力大小的差异,

导致油的运移路径不同。从图 2 中可知,注油倍数(注油体积与砂体孔隙体积之比)相似时(大约为 0.105),连续幕式充注实验和间歇幕式充注实验中油的运移路径和砂层的含油面积存在着差异。在连续幕式充注实验中,油主要聚集在断层带及其两侧的砂层,砂层中的含油面积比较小(图 2a);间歇幕式充注中的油在浮力的作用下运移至砂层的顶部并向两侧运移,到达了砂层的左、右边界,大部分油聚集在砂层的上部(图 2b),同时可以观察到间歇期两侧砂层中的油向断层带回流。

1.2 断层幕式活动期流体运移特征

断层幕式活动期流体运移的动力主要有 2 种:一种是地震泵作用;另一种是超压作用,运移的动力较大。地震泵作用主要指地下深处的地震活动使岩层发生剪切破裂,导致断层带内部的裂缝开启,断层带重新开始活动,其附近岩石渗透率也随之增加,这使得超压带内流体迅速外泄,孔隙流体压力也随之下降^[15];同时,在内外压力差的作用下,断层带象泵一样把围岩内大量流体吸入^[16],造成流体向断层带汇流;随着断层带的活动,应力得以释放,被吸入的流体则被带至浅部压力较小的地层,断层逐渐停止活动;当地层中应力再次积累导致地震时,断层再次活动,流体则又一次被带至浅层。这种地震泵作用在我国渤海湾盆地较为常见。超压作用为断层流体幕式运移的另外一种动力。在生长断层下降盘由于各种作用,往往形成异常高压带,当异常高压带的孔隙压力达到断层带内已固结破碎岩石的破裂压力时,断层带内的裂缝重新开启,大量超压流体进入裂缝,极大地提高了断层带的渗透性,并减小了断层滑动所需的剪切应力,可能造成断层的活动^[8];流体进入断层带后,在异常高压和浮力作用下向浅部地层运移,遇到合适的储层则使流体排出;流体排出后,

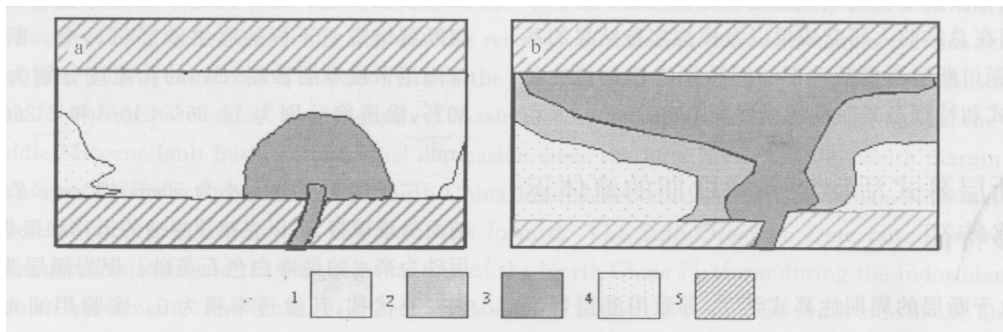


图 2 注油倍数相似时油的运移聚集过程示意图

a. 连续幕式充注; b. 间歇幕式充注

1, 2, 3. 不同含油饱和度的油层(其中从 1—2—3 含油饱和度逐渐增大); 4. 水层; 5. 盖层

Fig. 2 Diagrammatic sketch of oil migration and accumulation in the continuous

(a) and intermittent (b) episodic injection experiments, whose multiple of injecting oil are similar

断层带附近流体势“降落”、压力释放^[17], 同时断层带内裂缝逐渐闭合、流体压力降低, 断层带则重新作为异常压力带的侧向封闭层, 异常高压带内孔隙流体压力继续缓慢增加, 等待下一次释放。这种超压作用造成流体幕式运移的机制在莺歌海盆地非常普遍^[18]。

断层幕式活动期, 深部超压流体以在断层带(典型的断层破碎带由断层角砾岩、断层碎屑岩和断层破碎带组成^[19])内的垂向运移和进入储层后的侧向运移为主, 流体运移的相态为油、气、水的混合相态。在断层角砾岩不连续处, 断层带内流动的部分超压流体会在浮力和流体压力共同作用下穿过断层带进入断层上盘(图 3a)。当断层带内的流体进入储层后, 断层带内流体压力下降, 渗透率也随之降低, 可以有效地阻止进入储层的流体流回断层带, 此时断层带则起到单向阀的作用^[8]。

1.3 断层幕式活动间歇期流体运移特征

根据流体运移特征, 又可将断层幕式活动间歇期分为紧邻断层活动后阶段和断层封闭阶段。在紧邻断层活动后阶段, 断层带与两侧岩层之间处于一种短暂的压力不平衡时期, 流体运移的主要动力为流体幕式活动后的剩余压力和浮力, 且断层带渗透率虽然大大减小, 但仍有一定的渗透性, 所以该阶段仍有流体活动。断层封闭阶段则处于系统稳定的时期, 断层带本身或者断层带两侧围岩对置关系对油气形成封闭, 油气难以突破断层带的排驱压力, 故极少通过断层带运移至浅层。在断层幕式活动间歇期, 流体运移的动力远小于断层幕式活动时流体的运移动力。

断层幕式活动间歇期, 断层带与两侧岩层的压

力平衡由于断层活动的停止而被打破, 从而引起断层带及两侧储层之间流体的再分配(运移)。在此过程中, 流体的运移以砂层内及穿越断层的侧向运移为主, 运移动力为浮力和断层带与其两侧砂层的排驱压力差, 流体则以连续游离相为主。此时, 断层角砾岩则成了流体在断层带内侧向运移的障碍, 由断层一侧储层排入断层带的流体只有在角砾岩不连续处才能横穿断层带进入另一侧储层, 且多为断层下盘流体进入断层上盘(图 3b)。这种流体穿越断层带的侧向运移会一直持续到断层带与两侧砂层所构成的输导系统达到压力平衡为止, 它影响着断层带油气藏的再分配。除此以外, 当断层带两侧岩层内的流体聚集达到连续相时, 则可能突破断层带毛管排替压力进入断层带^[5]。由于断层带中有一定的渗透率, 连续油气柱高度所形成的浮力以及由于断层上下方超压不同所造成的势差在一定条件下可以克服断层中的毛细管阻力向上缓慢运移^[13]。与断层幕式活动期流体运移相比, 此时的流体运移以连续游离相为主, 但以这种方式运移的流体量往往较少, 对断层带油气成藏的贡献也不大。断层完全封闭后, 流体运移则不再发生。

2 断层幕式活动期和间歇期的油气成藏特征

2.1 断层幕式活动期和间歇期对油的输导能力存在着差异

断层幕式活动期流体运移的动力主要有 2 种: 一种是地震泵作用; 另一种是超压作用。由于运移的动力较大, 导致对油气的输导能力很强。而断层

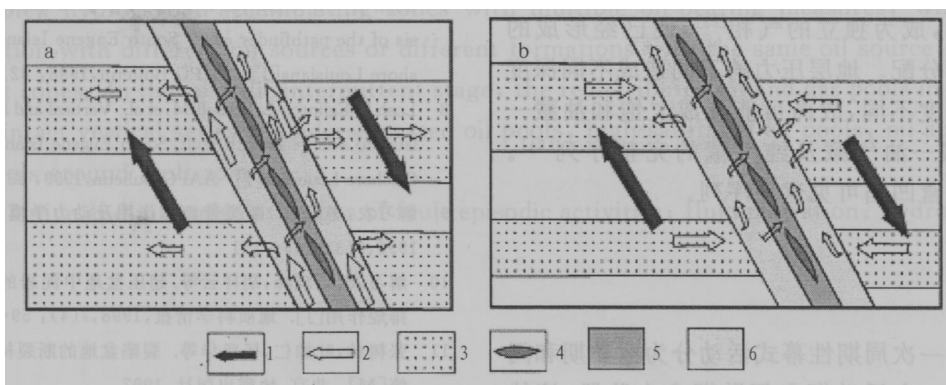


图3 流体的运移方式和运移路径示意图

a. 断层幕式活动期; b. 断层幕式活动间歇期

1. 断层破碎带; 2. 断层碎屑岩; 3. 断层以角砾岩; 4. 砂岩; 5. 流体运移方向; 6. 断层活动方向

Fig. 3 Diagrammatic sketch of fluid migration modes and paths in the active (a) and intermittent (b) stages of fault episodic activities

幕式活动间歇期由于运移的动力较小, 导致对油气的输导能力相对较弱。我们的模拟实验亦证实了这一点^[20, 21]。

2.2 断层幕式活动期导致断层带附近形成同层混源或异层同源的多层系(或多构造层)含油气复式油气聚集带

断层带流体幕式运移时, 沟通了不同层系的流体(包括油、气、水), 使来自不同油源的油气得以混合, 聚集后便形成同层混源的油气藏^[19]; 而同一层的油气经过长距离运移进入不同储层, 则又会形成异层同源的油气藏。同时, 多期幕式运移可使不同成熟度的油气在同一层聚集, 造成同一油气藏不同部位原油性质的差异。断层带连通了深部超压层系与浅部常压层系, 在流体幕式运移期油气以混相涌流的形式溢出, 可以在超压或构造应力驱动下长距离垂向运移, 随机进入不同的储集层, 并最终进入上部常压储集层内聚集成藏。该过程使部分原生油气藏遭到破坏, 油气向上运移进入不同储集层形成次生油气藏。这样就在不同层系内形成垂向叠加的复式油气聚集带, 其不同部位两侧储层内流体类型、油水界面不同^[22]。我国许多大型整装油气田均具有这种油气藏垂向叠加的特点, 例如济阳拗陷的胜坨和孤岛油田等^[18]。

2.3 断层幕式活动间歇期导致断层带垂向上形成欠饱和油藏—高饱和油气藏—油气藏及纯气藏的完整序列

流体幕式运移携带的高气油比的油气进入不同深度的储层, 在断层幕式活动间歇期, 由于断层幕式活动期的剩余压力和浮力作用以及温压条件的改变, 流体发生相态分异。例如溶解在石油或水中的天然气, 从深层运移至浅层, 由于温压的降低会从石油或水中释出, 成为独立的气相^[23], 使已经形成的油气藏发生再分配。地层压力的不同造成不同深度油气藏的饱和度不同, 故而可能形成欠饱和油藏—高饱和油气藏—油气藏及纯气藏的完整序列^[24]。渤海湾盆地东营凹陷可见这种序列。

3 结论

1) 断层的一次周期性幕式活动分为活动期和间歇期 2 个阶段。在活动期和间歇期 2 个阶段, 流体具有不同的运移动力, 从而表现为不同的运移特征。

2) 断层幕式活动期, 深部流体在超压作用或地震泵作用下以在断层破碎带内的垂向运移和进入储层后的侧向运移为主, 流体运移的相态为油、气、水

的混合相态, 运移的动力较大。

3) 断层幕式活动间歇期, 当断层带尚未完全封闭、输导系统内压力尚未平衡时, 流体在断层带及其两侧储层之间侧向运移, 直至达到压力平衡; 同时少量深部流体突破断层带排驱压力, 在浮力作用下呈连续游离相态沿断层带缓慢向上运移。断层完全封闭后, 流体运移则不再发生。

4) 断层在幕式活动期对油气的输导能力强, 而在幕式活动间歇期对油气的输导能力相对较弱。断层幕式活动期导致断层带附近形成同层混源或异层同源的多层系(或多构造层)含油气复式油气聚集带, 而断层幕式活动间歇期导致断层带垂向上形成欠饱和油藏—高饱和油气藏—油气藏及纯气藏的完整序列。

参考文献:

- 1 Sibson R H, McMoore J, Rankin A H. Seismic pumping — a hydrothermal fluid transport mechanism[J]. *Journal of Geological Society of London*, 1975, 131: 653~ 659
- 2 Ramsay J G. The crack-seal mechanism of rock deformation[J]. *Nature*, 1980, 284: 135~ 139
- 3 Sibson R H. Fluid flow accompanying faulting: field evidence and models[A]. In: Simpson D W, Richards P G, eds. *Earthquake Prediction: an International Review*[C]. American Geophysical Union, Maurice Ewing Series, 1981, 4: 593~ 603
- 4 Sibson R H. Crustal stress, faulting and fluid flow[A]. In: Parnell J, ed. *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins*[C]. Geological Society Special Publication, 1994, 78: 69~ 84
- 5 Hooper E C D. Fluid migration along growth faults in compacting sedimentary basins[J]. *Jour Petrol Geol*, 1991, 4(2): 161~ 180
- 6 张启明, 胡忠良, 莺—琼盆地高温高压环境及油气运移机制, *中国海上油气*, 1992, 6(1): 1~ 9
- 7 Losh S. Oil migration in a major growth fault: structural analysis of the pathfinder core, South Eugene Island Block 330, Offshore Louisiana[J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82: 1 694~ 1 710
- 8 Losh S, Eglinton L, Schoell M, et al. Vertical and lateral fluid flow related to a large growth fault, South Eugene Island Block 330 Field, Offshore Louisiana[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83: 244~ 276
- 9 解习农, 李思田. 断裂带流体作用及动力学模型[J]. *地质前缘*, 1996, 3(3): 145~ 151
- 10 解习农, 刘晓峰, 胡祥云等. 超压盆地中泥岩的流体压裂与幕式排烃作用[J]. *地质科学情报*, 1998, 7(4): 59~ 63
- 11 张树林, 叶加仁, 杨清华等. 裂陷盆地的断裂构造与成藏动力系统[M]. 北京: 地震出版社, 1997
- 12 张树林, 田世澄, 毕研鹏等. 油气垂向运移与复式成藏的动力学研究[A]. 见: 油气成藏研究系列编委会编. *油气成藏机理及油气资源评价国际研讨会论文集*[C]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 170~ 174
- 13 华保钦. 构造应力场、地震泵和油气运移[J]. *沉积学报*, 1995,

- 13(2)
- 14 Hao F, Li S, Gong Z et al. Thermal regime, interreservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang Gas Field, Yinggehai Basin, South China Sea: evidence for episodic fluid injections in overpressured basins? [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(5): 607~ 626
- 15 李大伟. 试论天然地震与油气成藏和开发的关系[J]. 新疆石油地质, 2002, 24(1): 19~ 23
- 16 阎福礼, 贾 东. 东营凹陷油气运移的地震泵作用[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(4): 295~ 298
- 17 刘晓峰, 解习农. 超压释放剂其对油气运移和聚集的意义[J]. 地质科技情报, 2001, 20(4): 51~ 56
- 18 费 琪. 成油体系分析与模拟[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 309~ 312
- 19 Gudmundsson A. Fluid overpressure and flow in fault zones: field measurements and models [J]. Tectonophysics, 2001, 336: 183~ 197
- 20 曾溅辉, 王洪玉. 输导层和岩性圈闭系统中油气运移和聚集模拟实验研究[J]. 地球科学, 1999, 24(2)
- 21 曾溅辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 174~ 175
- 22 解习农, 李思田. 莺歌海盆地底辟带流体输导系统及其成因机制[J]. 中国科学(D), 1999, 29(3): 247~ 256
- 23 张厚福. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 142~ 143
- 24 蒋有录, 刘 振. 断块油气田油气运移聚集的一种模式[J]. 断块油气田, 1997, 4(6): 1~ 4

FEATURES OF FLUID MIGRATION AND HYDROCARBON ACCUMULATION IN THE ACTIVE AND INTERMITTENT STAGES OF FAULT EPISODIC ACTIVITIES

Yu Cuiling¹, Zeng Jianhui²

(1. School of Resources and Information, Petroleum University, Dongying, Shandong 257061, China;

2. Basin & Reservoir Research Center, Petroleum University, Beijing 102249, China)

Abstract: Periodical episodic activities of faults lead to the periodical episodic movement of fluid migration along fault zones. One episodic activity of a fault consists of two stages: the active stage and the intermittent stage. During the active stage, fluid in deep formation migrates vertically along fault zones and then flows laterally in reservoirs under the power of superpressure or seismic pump, and the fluid migrates in the mixed phase states of oil, gas and water. In the intermittent stage, when fault zones are still open and pressure in leading systems has not got to balance, fluid flows adjustively in fault zones and bilateral reservoirs until the pressure is balanced. When faults close completely, fluid flow ceases. So the transport ability of fault zones is strong in the active stage but weak in the intermittent stage. In the episodic active stage, complex hydrocarbon-accumulating zones with multiple oil-bearing measures, which contain the same formation with different oil sources or different formations with the same oil source, will form adjacent to fault zones. In the episodic intermittent stage, the redistributed oil and gas pools in leading systems lead to the intact vertical series of undersaturated oil pools, high-saturated oil pools, oil and gas pools and pure gas pools around fault zones.

Key words: active and intermittent stages of fault episodic activities; fluid migration; hydrocarbon accumulation