

东营凹陷油气运移的地震泵作用

阎福礼, 贾东, 卢华复, 徐光伟

(南京大学地球科学系, 江苏南京 210093)

摘要:断层活动对烃类的运移有重要的影响作用。岩石中微裂隙→裂缝→断层的动态发育过程,生动地体现了地震泵运移机制周期性、间歇状脉冲的特点。这是由地质历史时期地震活动的周期性和变化的应力场中裂隙引张的间歇性、脉动性的特点所决定的。东营凹陷复杂断块油气田中独特的油气纵向分布特征,是由构造活动平静时期的渗流运移和构造活动活跃期中地震泵作用的混相涌流方式相互交替、共同叠加的结果,这一现象在各大油气田中较为常见,是一个较为普遍的规律。

关键词:裂隙;地震泵;机制;流体运移;东营凹陷

第一作者简介:阎福礼,男,25岁,硕士,构造地质学

中图分类号:P618.130.1

文献标识码:A

“冒沙”、“突水”等地震预兆在自然界中被人们普遍认识和重视,这是断层活动造成地下水动力学条件发生改变的结果。浅源地震的流体运移能力常在地震发生的前后得以充分表现,断层活动能激发流体在断层或断层附近作大规模的运移^[1]。地震活动大多与断层的活动相伴生。从热液矿脉中矿物晶体的生长穿插关系可以判定这种矿化作用是不连续的,是热液多次沿裂隙或断层面运移、聚集的结果,这同样也适用于烃类的运移、成藏机制。地震泵作用可以大大促进烃类在构造活动地区的运移^[2]。Hooper^[3]在烃类的运移中首次运用了这一动力机制。在流体运移动力机制中,裂隙及断层面作为运移通道,对油气藏的形成有着极为重要的作用^[4],因而,裂隙产生机理一度成为研究热点。超孔隙压力可以使岩层形成张性裂隙^[5,6];在流体封存箱中,高流体压力或构造作用能引起封闭层破裂,会使流体以混相涌流的方式进入有利地层或构造圈闭中^[7];注入流体与地应力的耦合作用同样能使封闭层破坏,当流体压力处于上覆荷载的57%~80%范围时,形成裂隙的压力大小决定了裂隙的表现形式^[8]。垂直裂隙的形成与构造应力、地温条件及岩石物理性质有密切的联系^[9]。本文将主要在构造应力变化引起裂隙及其形成断层的动态发育过程中,对烃类的运移机制、运移特点加以探讨。

1 机制

断层的形成源于裂隙的递进发展。岩层在应力的作用下,在微裂隙的周围,特别在裂隙的尖端发生应力集中,使裂隙递进扩张形成优势裂隙,最后发展成大的断层面(图1)。断层的动态形成过程使其在流体运移过程中起了极为重要的驱动作用。

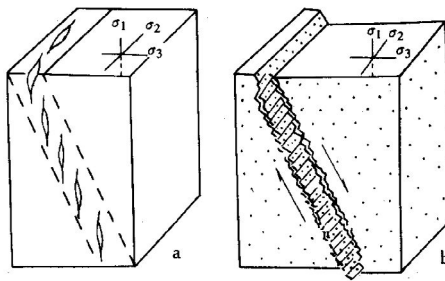


图1 断层形成演化图

Fig.1 The evolution process from fracture to fault

a—优势裂隙形成;b—岩石破裂形成断层

地震泵是指地下深处的岩层由于地震活动使震源区或活动断层附近的流体间歇性地顺地层或断面向别处运移的过程。这种流体的输送过程是由地震引发的,断层的活动使地下的岩层像一个泵一样把油气由较深部位抽出来,然后又将它们向浅处或上方压力较小的地层中排驱,并在有利的构造中成藏。地震前,震中附近的水动力学条件会发生急剧变化,这就是地震泵作用的结果。作为流体,油气的运聚同样在地下受到断层活动的影响。

无论是在裂隙发育成断层的过程中的那一阶段,地层中的应力总是在变化之中,即使断层形成以后的再次剪切滑动都会造成岩石中应力的巨大变化,从而引起岩层中裂隙的引张或闭合。在垂直于最小主应力 σ_3 的方向上由于 σ_1 与 σ_3 的应力差,而使岩层发生剪切破裂,引起岩石膨胀,体积增大,孔隙度、渗透率增加,造成空隙中的流体压力 (P) 的降低(图 2)。在裂隙内外压力差的驱动下,

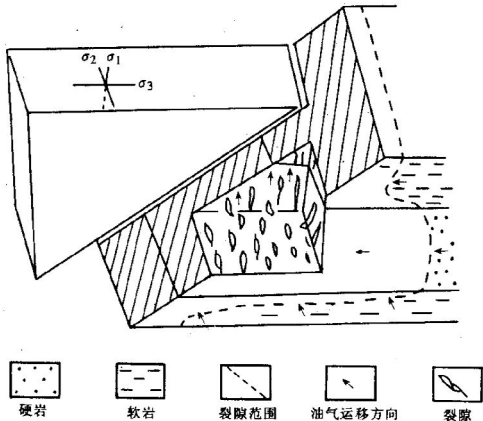


图 2 地震泵作用过程简图^[2]

Fig. 2 Synoptic diagram of seismic pumping process
围岩中的流体运移进入岩石的裂隙中,这就是地震活动的泵吸原理。在裂隙产生之初,裂隙中流体压力降低,使产生裂隙的摩擦阻力 $\tau_f = \mu(\sigma_n - P)$ 增大,其中 μ 为静摩擦系数; σ_n 为裂隙滑动处的正压力; P 为流体压力。当流体逐渐运移至裂隙中去时, P 增大, τ_f 逐渐减小,当剪应力累积增高大于 τ_f 时,裂隙又会继续张裂,裂隙的这一间歇张裂过

程决定了断层排驱机制呈周期性、脉动的特点。随着裂隙的产生,断层的滑动,应力逐渐释放,裂隙弹性回复闭合或岩石裂隙破裂滑动,将裂隙中的流体压出,将它们排驱进入压力较小的上部裂隙或沿断层面运移至上部地层中去。这就是地震泵的排驱机制(图 3)。

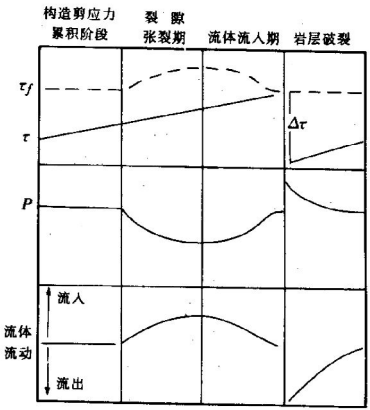


图 3 地震泵作用机制下烃类排驱示意图

Fig. 3 Sketch map showing hydrocarbon expulsion under seismic pumping mechanism

裂隙断续活动使流体呈现出间歇、脉冲状的运移特点。引发裂隙张裂的区域地应力的增大是一个渐进的过程,这就决定了裂隙递进发展成断层或断层的滑动是一个应力的逐渐积累过程,呈现周期性活动的特点。周期性、间歇、脉动的特点必然会引起油气垂向运移中的幕式活动。渤海地区油井产油能力在地震活动前后的变化(表 1),即是对地震泵驱动机制的最好表述。

表 1 地震前后油井异常统计表^[10]

Table 1 Statistics of anomalies of oil wells before and after seismic activities

井号	对应地震	震中距离/km	油层中部深度/m	异常情况及幅度				断层情况	备 注
				起至时间	产液量/ t·d ⁻¹	产水量/ m ³ ·d ⁻¹	产气量/ 10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹		
兴 5 井	海城(7.3)	80	1 850.3	1974-10-09~1975-02-04	上升 38	上升 16.8	下降 0.8	通过 NE 向断层与近 EW 向断层交汇处	自喷能力加强
热 10-6	海城(7.3)	80	1 923.0	1974-12-01~1974-12-29	上升 76	上升 3	变化不大	通过 EW 向断层	抽油变自喷并底大量出砂和泥浆
兴 201 井	唐山(7.8)	380	1 586.1	1976-04~1976-07 (约 90 天)	—	—	—	通过 NE 向断层与近 EW 向断层交汇处	自喷能力加强
于 11 井	官屯(6.0)	20	2 530.0	1978-05-12~1978-05-18	上升 53	上升 10	上升 4.7	通过 NE 向断层与近 EW 向断层交汇处	抽油变自喷
大 1 井	官屯(6.0)	20	1 785.1	1978-04-09~1978-05-18	上升 30	上升 16	上升 1.89	NE 向断层附近	抽油变自喷
板 804	唐山(7.8)	120	2 767.0	1976-03-01~1976-07-28	—	—	—	NE 向断层附近	震后静压继续上升
渤海 2 井	宁河(6.9)	50	3 070.0	1976-11-15~1976-11-26	下降后 上升 83	下降后 上升 12	—	—	震前突降 震后突升
坨 3-5-13	唐山(7.8)	250	1 981.0	1976-07-22~1976-07-26	上升 35.5	下降 2.5	—	位于 NE 向断层端部	临震前 油量突增

地震活动使油井产油能力发生较大变化,这说明地震泵作用是使烃类从地下深处向浅处运移的一种有效机制。由于地震活动的周期性,油气在断层中的这种由地震泵诱导的排驱作用,同样表现出间歇、脉动的特点。

2 实例分析

渤海东营凹陷中的复杂断块油气田,具有断层相互交错、多而复杂的构造特点,油气在纵向上有一定的变化规律,由上而下地饱压差逐渐增大,当埋深为 1 000 m 左右时,压力系数小于 1.0,饱和压力大于 10 MPa,地饱压差小于 1.5 MPa,油中溶解气基本游离出来,进入新的圈闭,形成浅层气藏;当油藏埋深在 1 500 ~ 1 800 m 时,压力系数 1.0 ~ 1.03,饱和压力 7.5 ~ 10 MPa,地饱压差为 1.5 ~ 2.0 MPa,溶解气部分从石油中游离出来,形成气顶气;埋深超过 1 800 m 时,压力系数为 1.03 ~ 1.79,饱和压力小于 7.5 MPa,地饱压差 15 ~ 30 MPa,天然气完全以溶解状态存在。当压力继续增加天然气含量越来越高,甚至出现全部为甲烷的纯气藏^[11]。以东营凹陷的东辛油气田为例,下部的沙河街组三段、二段为低饱和油藏,沙河街组一段、东营组以高饱和油藏、油气藏为主,浅层馆陶组出现重油油藏,明化镇组出现纯气藏。我们认为该区的油气运移大致可以分为两种形式:(1)在构造活动平静时期,烃类以分子扩散穿越盖层或沿断层面以渗流的方式缓慢运移;(2)在构造活动活跃期,油气在地震泵排驱机制作用下以混相涌流的方式沿断层面运移。其具体作用是:早期在构造活动平静阶段,烃类在运移过程中经过地层的色层效应、分馏效应而发生组分的变化,分子直径较小的 CH_4 随着运移距离的加大而明显增加,并沿断层的两侧在有利区段富集,一般在中、浅部形成含有大量天然气的油气藏。后期在构造活动活跃阶段,由于断层活动,地层中的岩石裂隙因应力的变化而引张,裂隙中流体压力逐渐降低,摩擦阻力逐渐增大;当烃源岩或原有圈闭中的含烃流体被吸进裂隙时,裂隙中流体压力逐渐增大,摩擦阻力逐渐降低。当剪应力大于摩擦阻力时裂隙继续扩大,岩石最终破裂,此时裂隙闭合,裂隙中的大量流体受到挤压,流体压力迅速上升,冲破封闭层以混相运移方式进入断层面或压力较小的孔隙中。如此反复,便形成了周期性、幕式或脉冲形式的流体运移特点。断层活动

的地震泵作用机制将地下深处的烃类输送进入断层,以较高的气油比运移进入中浅部的圈闭,由于浅部的压力、温度较低,含烃流体发生分异,大量气体析离出来与原来的天然气溶在一起,这样就形成了含有过量天然气的油气藏(图 4)^[12]。这一过程大都发生在东营-馆陶组沉积的早期^[13]。在此以后,又经过了明化镇组等上第三系层逾 1 000 m 厚的地层的沉积、压实和埋藏,地层的压力逐渐增大,下部的沙河街组三段、二段层系原油藏饱和压力基本保持不变,而原来浅层沙河街组一段、东营组呈游离状态的气顶气,大部分溶于液态石油中,使油藏出现高饱和压力,形成从上到下依次出现“高饱和和纯气藏”,“饱和油气藏”,“低饱和油藏”的特征序列^[12]。

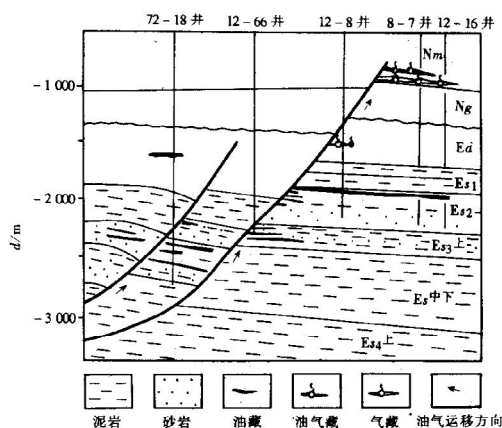


图 4 东营凹陷东辛油田烃类纵向运移图^[12]

Fig. 4 Vertical migration of hydrocarbon in Dongxin Oil field, Dongying Depression

因此,我们认为东营凹陷复杂断块油气田中烃类的运移是构造稳定阶段流体势驱使的垂向运移和构造活跃期地震泵作用驱使的垂向运移相互交替的运移过程。只要断层带中有一定的渗透性,由油气柱高度形成的浮力以及由断层上下方超压所造成的流体势差就可克服断层中的毛细管力,使油气向上缓慢运移,直到断层活动及地震泵作用的产生,油气才会加快运移速度,形成周期性、间歇运移的幕式或脉冲式以地震泵作用为主要排驱动力的混相涌流方式。地震泵现象不仅在渤海湾油区,在其他油区也是较为常见的现象,地震泵运移机制同样也是一个较为普遍的油气运移规律。

3 结论

(1)裂隙逐渐积累发育成优势裂隙,并递进变

形形成断层,这一过程是地应力逐渐积累的结果,地应力的逐渐积累决定了断层活动的周期性。

(2)在应力引张裂隙或地震引发断层活动的过程中,断层活动能够形成类似于泵动力的排驱机制,裂隙在摩擦阻力与剪切应力的作用下间歇活动使流体呈现出间歇、脉冲式的混相涌流的运移特点。

(3)东营凹陷复杂断块油气田中,别具特色的油气纵向分布特征是由构造平静时期的扩散、渗流运移方式和构造活跃期的地震泵作用机制下的混相涌流方式共同作用的结果。

参 考 文 献

- 1 Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. Earthquake prediction: a physical basis[J]. *Science*, 1973, 181: 803 ~ 810
- 2 Sibson R H, Moorme J M, Rankin A H. Seismic pumping — a hydrothermal fluid transport mechanism [J]. *Journal of Geological Society*, 1975, 131: 653 ~ 659
- 3 Hooper E C D. Fluid migration along growth fault in compacting sediments[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1991, 14: 161 ~ 180
- 4 Snarskiy A N. Relationship between primary migration and compaction of rocks[J]. *Petroleum Geology*, 1961, 5: 362 ~ 365
- 5 Miller T W. New insights on natural hydraulic fractures induced by abnormally high pore pressures [J]. *AAPG Bull*, 1995, 79: 1 005 ~ 1 018
- 6 Secor D T. Role of fluid pressure in jointing[J]. *American Journal of Science*, 1965, 263: 633 ~ 646
- 7 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. *AAPG Bull*, 1990, 74: 1 ~ 12
- 8 Palciauskas V V, Domenico P A. Microfracture development in compacting sediments: relation to hydrocarbon migration kinetics [J]. *AAPG Bull*, 1980, 64: 927 ~ 937
- 9 Narr W, Currie J B. Origin of fracture porosity—example from Altamont field, Utah[J]. *AAPG Bull*, 1982, 66: 1 231 ~ 1 247
- 10 华保钦, 林锡祥, 杨小梅. 天然气二次运移和聚集研究[J]. *天然气地球科学*, 1994, 5(4): 1 ~ 37
- 11 钱凯, 张雅斌, 周望, 等. 中国油区天然气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 12 蒋有录. 东辛复杂断块油气田成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 1998, 19(1): 68 ~ 73
- 13 王平. 济阳拗陷复杂断块油田含油特点[J]. *石油学报*, 1981, 2(3): 37 ~ 43

SEISMIC PUMPING MECHANISM OF HYDROCARBON MIGRATION IN DONGYING DEPRESSION

Yan Fuli Jia Dong Lu Huaifu Xu Guangwei

(*Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing*)

Abstract: Fault activities have important effects on hydrocarbon migration. The evolution process from microfracture→fracture→fault shows vividly the characteristics of periodic and intermittent pulse under the seismic pumping migration mechanism, which were determined by the periodic seismic activities and intermittent pulse of fracture extension of stress field change in geological history. The unique vertical distribution of the complex fault block oilfields in Dongying Depression is the result of alternation of transfusion during tectonic inactivity and seismic pumping during tectonic activity. This phenomenon is common in big oil-gas fields.

Key words: fracture; seismic pumping; mechanism; fluid migration; Dongying Depression