

含油(气)饱和度与油(气)运移的关系

王志欣, 张一伟

(石油大学, 北京 100083)

摘要: 油(气)在岩层中必须达到某一门限值(临界饱和度)才开始运移的观点并不正确。在输导层中, 油气运移(二次运移)的主要条件是运移动力必须大于毛细管阻力和摩擦阻力。油气运移的动力由水动力和浮力提供, 均与连续油(气)相长度有关, 只要连续油(气)相长度足够长, 油气就能发生运移。因此, 输导层中的油(气)运移与含油(气)饱和度并不存在必然关系。盖层和烃源岩层基本上是无渗透性的, 油(气)要发生渗漏和运移, 必须要在连续油相两端形成 10 MPa 以上的压差, 在岩层内部仅靠剩余压力是无法达到的, 所以只有突发事件才能使烃源岩中的油(气)发生运移(初次运移), 与油(气)饱和度没有关系。在动力压差一定、孔隙结构和润湿性不变的储层中, 水驱油最后可达到一个较稳定的残余油饱和度, 但改变水驱条件(动力、孔隙等), 则残余油饱和度亦必然发生变化。所以, 油(气)是否能够运移, 取决于连续油(气)相的长度, 而不由含油(气)饱和度决定。

关键词: 油(气)饱和度; 毛细管力; 连续油相; 油气运移

第一作者简介: 王志欣, 男, 36 岁, 高级工程师(博士), 石油地质

中图分类号: TE122 **文献标识码:** A

含油(气)饱和度可能来自于油田开发生产中的多相渗流中的相对渗透率的概念^[1]。实验结果表明, 孔隙性介质中存在两相流体时, 其任何一相的饱和度必须达到某一限定值该相才开始流动, 即才开始存在该相的相渗透率; 在油(气)-水共存的条件下, 输导层中油(气)相要向圈闭中聚集, 就必须达到一定的饱和度^[2], 大多数孔隙性岩样的饱和度大约为 10%~20%。在现代盆地模拟研究中, 为了模拟油(气)在二次运移过程中的散失量, 通常将油相开始运动的饱和度值定义为临界饱和度值(亦即残余油饱和度)^[3,4], 该值除了受岩石孔隙结构影响, 还与孔隙表面的润湿性、流体的性质等因素有关^[1,5]。因此, 临界饱和度只是一个表观参数, 并不是影响油气运移过程的本质因素。

1 二次运移的临界条件

1.1 毛细管阻力

在输导层中, 油(气)相受到水的浮力、水动力、毛细管阻力以及孔隙介质摩擦阻力的影响。若要使油相发生运动, 推动油(气)相向前运动的动力必须克服毛细管阻力。即浮力和水动力作用于油柱运动方向上的分力的合力必须大于油相在该运动

方向上受到的阻力。

非润湿相在毛细管中受到两类毛细管力的影响^[5]: 其一是沿运移方向上毛细管前后端之间的毛细管压差, 其大小和方向取决于非润湿相两端的曲率半径的相对大小, 两端曲率半径相差越大, 毛细管压差也越大, 方向由曲率半径小的一端指向大的一端(其中又包括由于孔隙结构变化造成的非润湿相两端曲率半径差别和润湿滞后造成的曲率半径差别, 分别称为第一、第二种毛细管力); 其二是毛细管壁对非润湿相的作用力(第三种毛细管力), 方向垂直于管壁指向润湿相, 大小与毛细管的半径有关, 半径越小则力越大。第一种毛细管力与非润湿相的运动方向平行, 对非润湿相时而起阻碍作用, 时而起推动作用(图 1); 第二种毛细管力也与非润湿相的运动方向平行, 但对非润湿相总是起阻碍作用; 第三种毛细管力与非润湿相的运动方向垂直, 不直接阻碍或推动非润湿相运移, 但却增加了毛细管壁与非润湿相之间的摩擦力, 对盖层和生油层中的油气运移起强烈的阻碍作用。

在孔隙喉道比较粗的输导层中, 第三种毛细管力较小, 但它所引起的摩擦力始终是油气向前运移的阻力; 由毛细管半径变化引起的第一种毛细管力有时对油气运移起推动作用, 有时又起阻碍作用; 而由润湿滞后造成的第二种毛细管力也总是起阻碍作用。由此可见, 前进方向上的最大阻力才是油

气发生运移所需动力的临界值,其大小为毛细管压差起最大阻碍作用时的力及油气相与毛细管壁之间的最大静摩擦力之和。

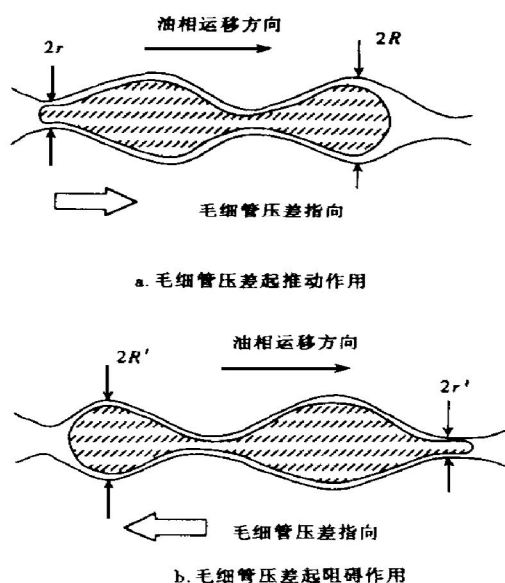


图 1 非润湿相两端毛细管压差的作用
Fig. 1 Function of capillary pressure difference between two ends of a non-wettable phase

1.2 二次运移的动力

倾角为 α , 厚度、孔隙结构均匀的输导层, 其中有一长度为 L 的连续油相, 连续油相延长方向与输导层顶面平行, 地层水和油相的密度分别为 ρ_w , ρ_o ; 输导层中存在稳定的指向上翘方向的水动力, 沿上翘方向的水压梯度为 T , 则油相在上翘方向上所受到的水动力 $\Delta P = lT$ (图 2)。油相在上翘方向上所受到的浮力分量为

$$B_2 = \Delta \rho h g \sin \alpha \\ = (\rho_w - \rho_o) l g \sin^2 \alpha$$

在稳定的水动力和浮力作用下, 当 $\Delta P + B_2$ 大于输导层对油相的毛细管阻力和摩擦阻力时, 油相才能沿输导层向上翘方向运动, 此时沿运移方向的动力为

$$F = \Delta P + B_2 \\ = lT + (\rho_w - \rho_o) l g \sin^2 \alpha \\ = l [T + (\rho_w - \rho_o) g \sin^2 \alpha]$$

在水动力、油-水密度差、输导层倾角不变的情况下, 油相真正的运移动力只与连续油相长度 l 有关。 l 越大, 则油相克服毛细管力运移的可能性就越大。

若水动力的方向相反, 油相运移的方向和动力的大小取决于两项的相对大小, 只要两项之和不为零, 则运移的动力仍取决于连续油相长度 L 。

由于深部地质条件下水动力一般要比油相浮力小得多, 油(气)的运移主要取决于连续油(气)相的浮力。

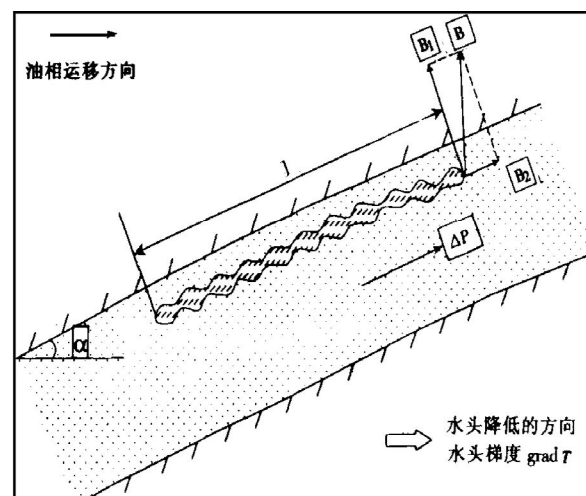


图 2 连续油相长度与油相运移动力之间的关系
Fig. 2 Relationship between length of continuous oil phase and dynamic force of migration
油相运移动力 $F = \Delta P + B_2$

1.3 连续油相长度

从连续油相长度 l 与运移动力之间的关系可以看出, 油相饱和度并不直接决定油相是否能发生运移, 但在油相饱和度较高的情况下, 在输导层中形成连续油相的机会大增。

可以想象, 在输导层中, 即使油相的饱和度非常低, 只要在局部形成足够长的连续油相, 就可以发生运移。油相饱和度与连续油相长度的关系是单方向的, 即高的油相饱和度通常都可以形成较长的连续油相, 但较长的连续油相却不一定对应着较高的油相饱和度。现在为大家所共知的油气运移“高速公路”的提法也与这一观点吻合。

由此可见, 在油气运移研究中给定输导层一个油气运移临界饱和度值是不合理的, 这样做的结果一是高估了油气运移的难度; 二是高估了油气在二次运移途中的耗散量。

2 水驱采油

在油田开发的水驱采油过程中, 不管是边水、底水的驱动还是人工注水驱动, 从根本来说都是水动力驱动油相运移。由于生产压差常常很大, 注水井与生产井的井口压差常达 10 MPa 以上, 而注水井与生产井一般仅距数百米, 所以在油藏中实际的水动力强度很大, 常比油相的静浮力沿层面方向的分量大几个数量级, 因此油田注水开发中油相运

移时的主要动力是水动力。

在水驱开发的早期, 含油饱和度高, 这时油相基本上为连续相, 有时会出现一个相当长时间的无水采油阶段; 之后, 由于油层孔隙结构的非均质性等因素的影响, 水突入大孔道并逐步向生产井延伸, 水的前缘到达生产井后, 油田进入含水开发阶段。随着采出程度的提高, 油层的含油饱和度逐步下降, 油井产液的含水率也逐步升高, 最后含油饱和度降到残余油临界饱和度, 即使继续注水, 油也很难采出来。

浮力在水驱采油过程中的作用微乎其微, 这里只考察水动力的作用。设油层中沿油相向生产井运动方向上的连续油相长度为 l , 若已知注采井口的压力和井筒的能量损失, 可以很容易地求出油层中的水动力梯度 T , 则连续油相两端的水动力压差为 $\Delta P = lT$ 。

设油层为水润湿的, 要使油相流向生产井, 油相两端的压力差必须超过油层的毛细管阻力。

在油层为均质的情况下, 从理论上讲油相应均匀向生产井推进。但油层或多或少都是非均质的, 喉道较粗的地方毛细管阻力小, 油运动较快, 容易被后续的水驱替; 而喉道较细的地方, 毛细管阻力和摩擦阻力较高, 油不易驱走。当细喉道中的油相的连续长度不足以在两端产生足以克服其毛细管阻力的水动力压差时, 其中的油相就被“剩”在了油层中。这样被“剩”下来的油相不均匀地、彼此孤立地分布于油层之中, 在通常的生产条件下已难以

采出。这时油层的含油饱和度即是残余油临界饱和度。油层的非均质性越强烈, 残余油饱和度就越高。由此可以看出, 在石油二次运移过程中, 油相选择孔喉最粗、阻力最小的通道, 只要连续油相达到一定的长度就可以运移, 因而与饱和度没有直接关系; 在水驱采油过程中, 水优先驱走大孔道中的油, 残余油则分布在细孔道中。对动力压差一定、孔隙结构和润湿性一定的储层来说, 其残余油饱和度为一稳定值; 若改变水驱条件, 其值则也会随之改变。因此, 以残余油临界饱和度作为油气二次运移发生的临界条件是不合理的。

3 盖层排驱压力与非润湿相临界饱和度

吕延防等^[6]将饱和度达到 10% 时对应的毛细管压力定为盖层岩样的排替压力。在压汞或饱和煤油样品气驱的实验中, 是不是汞和气的饱和度达到 10% 就能够形成可流动连续相了呢?

如果把盖层也看作连通孔隙介质, 那么其中油(气)相的运移与输导层中的油气二次运移的道理是一样的, 二者之间的主要区别是: 在盖层中, 孔隙喉道十分细小, 不仅第一、二类毛细管阻力(即非润湿相两端的毛细管压差)大大地增加了, 而且第三类毛细管力(由非润湿相指向孔隙壁)引起的摩擦阻力也极大地上升, 这就使得油(气)相极难通过盖层的孔隙和喉道。在致密的盖层或生油层中, 油气要通过超微毛细管运动的主要阻力应该是第三类毛细管力引起的摩擦力(图3)。

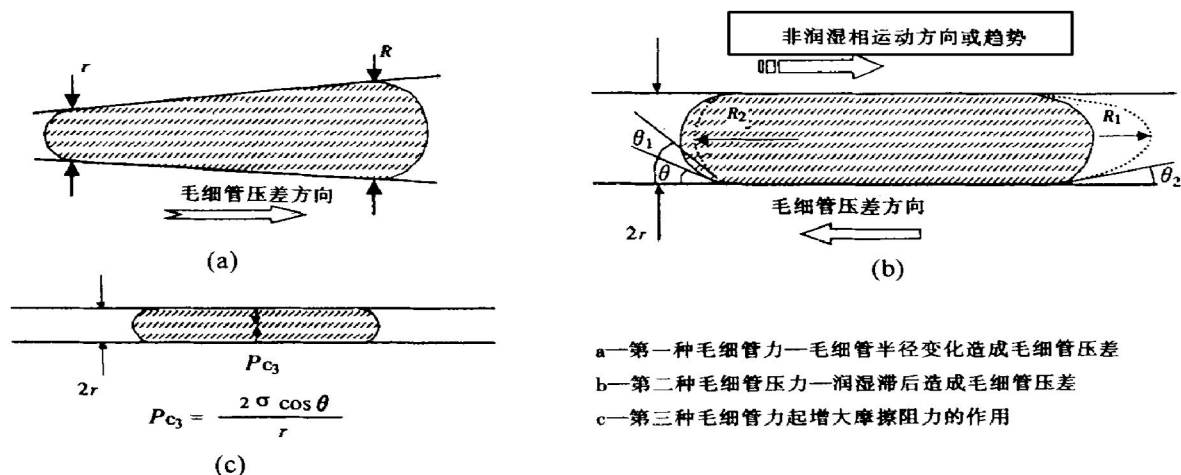


图3 毛细管力的类型和作用

Fig. 3 Types and functions of capillary forces

非润湿相只占据岩样中的最大孔喉, 而相对均匀的贯通性的孔喉可能只占样品孔隙体积的一小

部分, 而当岩样中的非润湿相饱和度达到该数值时岩样就已被完全突破, 也就是说, 非润湿相在盖层

中的运动就同油气在输导层中的运动一样,并不存在一定的饱和度门限,只要其所受到的推动力超过毛细管阻力和静摩擦阻力就可以进入盖层。因此,以非润湿相饱和度达到 10% 时的压力作为排替压力是不科学的,这样求得的岩样的排替压力可能偏高。

“假盖层”的研究给我们提供了另外的线索。封盖层条件较差时,油气藏中的油气容易漏失。对于评价等级较低的盖层如“假盖层”的研究并未发现盖层层内具有高达 10% 以上的残余油饱和度。这从侧面证明了油气的散失并不是油气藏中的油气柱浮力及水动力突破了盖层的毛细管阻力,而主要是盖层中的裂缝或断层的突然开启造成的。事实上泥岩或其他泥质含量较高的岩石中由于片状粘土矿物叠覆排列,垂直于岩层面方向上的微孔隙喉道常被堵塞,在岩层厚度大的情况下,这些孔喉就更难贯通整个岩层。所以对于绝大多数盖层来讲,因突破毛细管阻力后以两相渗流方式的漏失是微不足道的,而主要的漏失方式应该是沿微裂隙或断层的突发式混相涌流。对完整、均质(不发育裂缝)且厚度较大的泥页岩盖层来说,可能根本就不存在能贯通岩层的孔喉,因而泥页岩盖层作为整体来讲很可能既不存在渗透率,也不会发生多相流。把泥页岩盖层作为连通性的多孔介质本身就是不合理的。

4 烃源岩与排烃临界饱和度

在研究烃源岩排烃时,有人把烃源岩看作连通孔隙性介质,因此认为在水湿条件下,油气要以游离相态排出,必须达到一定的临界饱和度。不同学者给出的含油气饱和度门限值有很大差别,变化范围为 0.1%~20%^[7],这些门限值显然是相互矛盾的。

烃源岩排烃过程与油气藏和异常压力突破盖层封闭的过程相似。假使烃源岩是连通的孔隙介质,则与泥页岩盖层相似,在水润湿条件下油相受到的毛细管阻力和摩擦阻力都非常大。据研究^[1],泥页岩的排替压力一般在 10 MPa 左右。生烃初期,含油饱和度较低,随着生油过程的持续,饱和度逐渐升高,烃类排出的主要动力来自泥质岩内的高孔隙压力。油相要从源岩中排出,需要在连续油相两端形成高达 10 MPa 的压差;而就泥页岩内部的

剩余压力条件来看,要使连续油相两端压差达到如此之高是不可能的。

实际上,烃源岩中的微孔结构与盖层中的一样,多是孤立的互不相连的死孔隙,所以水和烃类不是以达西渗流的形式排出的,而必须另辟蹊径,例如通过突发的构造变动,形成微裂缝以降低毛细管阻力(摩擦阻力)。烃类生成和粘土矿物成岩转化产生的水分会导致孔隙压力升高;而构造应力的改变则会引起泥质岩内孔隙流体压力的剧烈变化,容易发生天然压裂过程,因此烃类从烃源岩排出的过程可能主要是突发过程,而不是受饱和度影响的多相渗流过程,而且不论油相饱和度多高,都难以克服烃源岩的毛细管阻力和摩擦阻力。因此给烃源岩设定排烃临界饱和度是没有意义的。

5 结论

(1) 油气在输导层中的二次运移过程,主要是烃类克服毛细管阻力和摩擦阻力、排替水的过程;只要油(气)形成足够长度的连续相就可以发生运移,因此不存在某个临界饱和度。

(2) 水驱油层最后可以达到一个比较稳定的残余油饱和度,从本质上讲此时残余在细孔道中的连续油相的长度已低于油相在该毛细管中能运动的下限长度,这与油气二次运移问题本质是一致的。

(3) 盖层和烃源岩层基本上是无渗透性的,更不可能产生两相流;烃源岩是否排烃取决于突发过程,微裂缝的产生大大降低了岩层的毛细管阻力和摩擦阻力。所以临界饱和度的概念不适用于对盖层封闭能力评价和烃源岩排烃研究。

参 考 文 献

- 1 葛家理. 油气层渗流力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1982
- 2 Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of oil migration [J]. AAPG Bull, 1995, 79(1): 19~ 29
- 3 查明. 断陷盆地油气二次运移与聚集[M]. 北京:地质出版社, 1997
- 4 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京:石油工业出版社, 1999
- 5 罗蛰潭. 油层物理[M]. 北京:地质出版社, 1985
- 6 吕延防, 付广, 高大岭, 等. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社, 1996
- 7 庞雄奇. 排烃门限控油气理论与应用[M]. 北京:石油工业出版社, 1995

(下转第213页)

2 李京昌, 金之钧. 论塔里木盆地构造反转的周期性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(3): 11~14

3 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 90~92

COMPLEX PETROLEUM SYSTEM AND MULTICYCLE BASIN IN TARIM

He Zhiliang¹ Mao Hongbin² Zhou Xiaofeng² Gong Ming¹ She Xiaoyu¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration, CNSPC, Jingzhou, Hubei; 2. Planning and Designing Institute, Northwest Petroleum Bureau, CNSPC, Urumqi, Xinjiang)

Abstract: The evolution history of multicycle in Tarim Basin is determined by long distance drifted small plates, complicated basement and complex tectonic activities of the neighbouring plates. The basin underwent four evolution stages such as Paleasian Ocean, Paleotethys Ocean, Mesotethys Ocean and Neotethys Ocean, which resulted in a multi-prototype basins, the superimposition in which the basin united as a whole at first, then disintegrated later and reunited again at last with variable thermal regime. The multicyclic evolution of the basin resulted in multiple petroleum system, multi-set of source rocks, multiple oil generating depression, multi-stage of oil generation, multi-type of reservoiring spaces, multi-type of sealing and covering system, complex passage networks and multi-type of trap system. The reformation, re-sealing and preservation of post-formation of oil and gas led to complicated hydrocarbon pool-forming history in multiple hydrocarbon accumulation belts. On this basis, oil and gas exploration in Tarim Basin from now on should aim at the discovered oil and gas fields, increase reserves and expand exploration realm.

Key words: plate; basement; multicycle; complex; Tarim Basin

(上接第 200 页)

RELATIONSHIP BETWEEN OIL(GAS) SATURATION AND MIGRATION

Wang Zhixin Zhang Yiwei

(Petroleum University, Beijing)

Abstract: The viewpoint that oil and gas in rocks can migrate only when they reach certain threshold is not correct. The primary condition for oil and gas migration (secondary migration) is that the dynamic force must be greater than capillary resistance and fractional resistance. The dynamic force includes hydrodynamic force and buoyancy, both of which are related to the length of oil and gas phases. That is to say, oil and gas can migrate so long as the length of oil or gas phase is sufficient. This suggests that there is no inevitable relationship between oil and gas migration and saturation. It is pointed out that differential pressure greater than 10 MPa between the two ends of the oil or gas phase is needed to cause the migration. Only sudden event can produce such differential pressure but not formation residual pressure. When dynamic differential pressure is certain, the reservoir's pore texture and wettability remain invariable, water-driving oil may reach stable residual oil saturation. But the residual saturation would change with the variation of water-driving condition. So it is considered that oil and gas can migrate or not is determined by the length of continuous oil (gas) phase but not the oil saturation.

Key words: oil(gas) saturation; capillary force; continuous oil phase; oil-gas migration