

砂岩透镜体成藏机理

陈冬霞^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 姜振学^{1,2}, 张俊²

1. 石油大学石油与天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

2. 石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

摘要: 砂岩透镜体油藏是隐蔽油气藏中增储上产的重要类型,但目前对其成藏机理的认识还存在很大分歧.从油气初次运移机理入手,结合砂泥岩压实成岩过程的分析,对砂岩透镜体的成藏动力和成藏阻力及成藏过程进行了分析.研究认为:烃类生成引起的膨胀力、烃浓度差引起的扩散力和砂泥岩间的毛管压力差是成藏主动力,岩石吸附和粘滞力是成藏主要阻力;油气水以混相涌流方式为主,孔隙、微裂隙和微层理面是油气运移的通道;早成岩阶段不成藏,晚成岩早期成藏,晚成岩晚期进入保存阶段.

关键词: 透镜体;成藏机理;济阳拗陷;初次运移;成藏动力;成藏模式.

中图分类号: P618.1

文章编号: 1000-2383(2004)04-0483-06

收稿日期: 2004-03-10

Accumulation and Filling Mechanism of Lenticular Sandbody Reservoirs

CHEN Dong-xia^{1,2}, PANG Xiong-qi^{1,2}, QIU Nan-sheng^{1,2}, JIANG Zhen-xue^{1,2}, ZHANG Jun²

1. Key Laboratory for Petroleum Accumulation Mechanism, University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing 102249, China

2. Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: Lenticular sandbody reservoir is an important subtle reservoir type for increase of reserve, but its accumulation and filling mechanism is not well understood. Driven force and resistance during lenticular sandbody reservoir-filling have been analyzed based on integrated research on the process of compaction and diagenesis in interbedded sand/mud strata. The results indicate that the driven forces resulting in the filling of reservoir include pressure due to the generation of hydrocarbon, diffusion by hydrocarbon concentration difference, capillary pressure between sand and mud. Rock absorption and adhibition are taken as resistance of reservoir-filling. Hydrocarbon and water spill into the reservoirs in the mixing pattern through pore, fracture and joint fissure. Hydrocarbon is filled in early phase of late-diagenetic stage and preserved in late phase of late-diagenetic stage.

Key words: lenticular sandbody; accumulation mechanism; Jiyang depression; primary migration; driven force of hydrocarbon accumulation; accumulation model.

透镜状油藏作为隐蔽油气藏中重要的一种类型,世界上已查明了许多油藏为透镜体状.随着世界非背斜圈闭勘探开发的发展,这方面的研究将越来越显示出其重要地位.现有的成藏理论并不统一,国内外学者对其成藏的微观机理的认识还存在很大的分歧,特别是成藏动力方面,是争论的焦点,目前仍在争议之中.有的学者趋向于毛管压力作用下油气由生油岩进入大孔隙的储集岩中(Magara, 1987;

Berg, 1975);有的学者认为差异突破压力是透镜体成藏的根本动力(陈荷立, 1995);而有人认为烃浓度差是主要动力(Stainforth, 1990);国外有的学者还认为未知重力运动使油气聚集成藏(Арбе, 1995).对于透镜体岩性油气藏的成藏机理,研究的重点应在于油气的初次运移机制的特殊性,也即从烃源岩中生成的油气,如何进入临近的孤立砂体内及如何排除临近的储集岩孔隙中的束缚水.

1 成藏动力与阻力

实际上,透镜体成藏并不是单纯的 1 个或 2 个动力促使油气聚集的,它是在过程复杂、动力类型多样、相互作用、复合动力的条件下完成油气运聚成藏的.由于泥岩包裹的砂岩透镜体中油气的运移可以看做是初次运移的一种特殊形式,而初次运移是指油气从低孔低渗细粒的生油岩运移到相对高孔高渗的运载层/储集层,其最大运移距离可达 1 km.因此,可以说,只要砂岩体被有效烃源岩包裹或接触有效烃源岩,其成藏的油气来源是充足的.能否成藏的关键是其成藏的动力是否大于成藏的阻力.

1.1 烃类生成产生的膨胀力是成藏主动力之一

McAulife(1979)、Barker(1980)等研究油气初次运移时,提出了孔隙中心网络运移说.随埋深的增加地温不断升高,烃源岩中干酪根不断热解和裂解生烃,当烃不断增加慢慢与临近干酪根连成一体形成网络,同时产物增容引起孔隙中的流体体积不断增加时,流体不断膨胀形成源岩内部压力,即为膨胀压力.这种膨胀使泥岩内压力增加,促进流体运动,这种压力越来越大,最终在页岩内部高压作用下将油从孔隙中挤出(图 1).在一个封闭体的层系内由干酪根生成的烃类、水和非烃气体,其体积要比原来有机质的体积大 2~3 倍,引起孔隙流体压力大幅度提高.这种压力是由源岩中部向储层方向递减的,是促使油气排运的重要动力,排油方向是从生油层到储集层(李明诚,1987).由于砂岩透镜体一般被烃源岩包裹,直接接触烃源岩,烃类生成所产生的膨胀力是促使油气向透镜体运移的重要动力.

1.2 烃浓度差引起的扩散力是成藏主动力之一

扩散(diffusion)是由物理量梯度引起的使该物

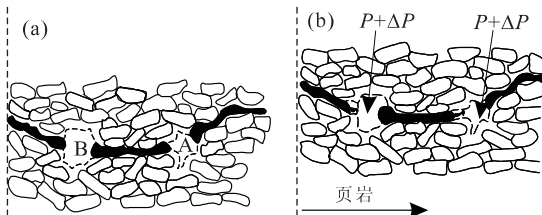


图 1 在邻近砂岩的页岩中孔隙中心网络里石油的可能分布(据 Barker,1978)

Fig. 1 Oil distribution in center pore network of shale (by Barker, 1978)

a. 埋深 3 048 m 和 80 °C 下,油和水的分布; b. 埋深 4 267 m 和 115 °C 时,由于孔隙 A 和 B 处水体的膨胀导致部分石油的排出

理量平均化的物质迁移现象.物质由高浓度一侧向低浓度一侧转移,直到两侧浓度平衡为止.多孔介质中由于浓度差而发生扩散作用,地下烃类由于与围岩存在浓度差,因此在不同程度上都有扩散作用.当生油层中含烃浓度比周围岩石高,烃的扩散方向由生油层指向围岩,与油气的运移方向一致,因此它是进行初次运移的一种动力.虽然扩散作用在物质运移方面的效率比较低,但只要有浓度差存在,扩散作用就无时无刻不在发生,甚至在异常高压下也能毫无障碍地进行.因此在漫长的地质时期,它是一种不可忽视的动力. Stainforth(1990)认为源岩内部因油气不断生成而形成的烃浓度梯度也是油气向砂体中运移的主要动力,即著名的“有机网络扩散排烃学说”.

1.3 毛细管压力差是成藏主动力之一

毛细管作用既是油气向外排运的阻力,也是油气向外排运的动力.如何作用取决于源岩内是否产生了足以饱和源岩残留需要的油气.在源岩内产生和残留足够量的油气之前,毛细管力对油气排运起阻碍作用,在源岩内产生和残留足够量的油气之后,毛细管力对油气排运起积极作用. Magara(1975, 1986)在研究初次运移的机制时提出,毛细管压力是烃源岩中生成的油气向储集层中初次运移的动力.

在砂泥岩接触带内,砂岩孔隙大,泥岩孔隙小,大小孔隙之间存在毛细管力的差异.在地层条件下,因压实作用使孤立砂体周边的围岩变得越来越致密,孔喉半径远远小于其包围的孤立砂体的孔喉半径,二者之间存在的毛管压力差使油气自外向内运移,毛管压力差是导致油气自围岩进入孤立砂岩体的主要动力.油气在烃源岩中排运的路径是由粗细不均的孔隙和喉道组成的(图 2).油相在孔喉体系中所受的毛细管压差的大小和方向取决于连续油相前后两端油水界面的曲率,即毛细管压差总是由连续油相曲率半径小的一端指向曲率半径大的一端.因为标号 1,2,⋯,4 的各个曲颈两侧所产生的两相界面的变形是相同的,所以在这些喉道两侧产生的毛细管压差为 0.连续油相两端的毛细管压差 $\Delta P_c = P_{c1} - P_{c2}$, ΔP_c 的大小和方向均与标号为 1 到 4 的中间段的孔喉形状无关.在外力(此处为有机质生烃产生的膨胀力浓度差引起的扩散力的作用)下,透镜体内有油气的聚集成藏.在差异毛细管力的作用下,油气首先从较大孔隙进入透镜体中,因油气的进入占据了砂岩透镜体中的孔隙空间,使其中的孔隙水被替换出来,并从较小孔隙进入到泥岩中.随着上述

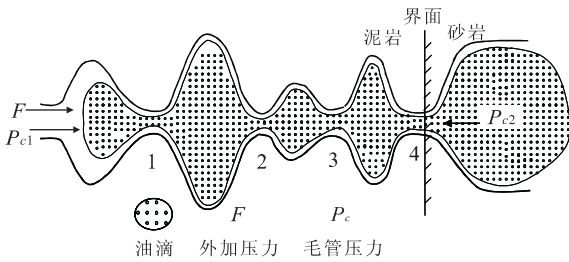


图 2 毛细管压力输导油气进入砂体

Fig. 2 Hydrocarbon accumulated model in sand by transport of capillary force

过程的继续进行,油气不断进入砂岩透镜体中,砂岩透镜体中的孔隙水不断被置换出来,直到砂岩透镜体被油气饱和为止。

1.4 成藏阻力

吕廷防等(2000)在研究盖层超压形成机理时,认为在泥岩中孔隙流体的流动遵循低速渗流规律,描述这一渗流规律的运动方程为:

$$v = \frac{k}{\mu} \left(1 - \frac{\lambda}{|\text{grad}_p|} \right) \text{grad}_p, \quad \text{grad}_p > \lambda \text{ 时} \quad (1)$$

$$v = 0, \quad \text{grad}_p < \lambda \text{ 时} \quad (2)$$

式中, v , 渗透速度; k , 渗透率; μ , 液体粘度; grad_p , 流体压力梯度。

$$\text{grad}_p = - \left(\frac{\mu v}{k} + \lambda \right) \quad (3)$$

λ 为常数,具有压力梯度的因子,流体力学称为起动力梯度或起始压力梯度。式(3)具有明显的力学意义,等号右边第一项为粘滞阻力,第二项为吸附阻力,驱动力则为二者之和,即单项流体在泥质岩中流动时,需要克服 2 个阻力—粘滞力和吸附力。

油气自源岩体中生成要进入砂岩体内,必须驱动砂体孔隙水流出。砂岩中孔隙水在砂泥岩体内流动,将受到岩石吸附和粘滞力的影响,岩石吸附和粘滞力是成藏的主要阻力。

2 油气充注方式

砂岩透镜体油藏的输导系统为裂隙型输导体系,是指油气从烃源岩向与其相邻的储集体中的运移,运移的途径主要有孔隙、微裂隙和微层理面。其中,砂岩与泥岩接触处的孔隙组成了油气充注的主要通道。暗色泥岩微裂缝(微裂隙)是砂岩透镜体油藏中水向外运移的通道,组成裂隙型输导体系,其通道—孔隙一般是不规则弯曲的,而且孔径大小不均。

微裂缝或微裂隙可能是油气成藏过程中,油向外排出的证据,且微裂缝越大,油气进入砂体后,向外排出的水的体积越多,砂体充满度就越高。液体的排出不是均匀的,而是一股股的涌流式。随暗色泥岩中大量烃类生成,流体压力随之增大,当流体压力达到临界值时,泥岩产生微裂缝,油气水发生混相涌流,进入砂体,随着排液的进行,泥岩中的流体压力降低,泥岩微裂缝重新闭合。砂体中的流体压力急剧增大,砂体内的油水发生分异,砂岩的总空间没有发生改变,当烃类聚集一定程度时,砂岩内的流体压力增大,泥岩的微裂缝又再次开启,砂体中的水通过微裂缝向外排出。烃源岩中的油气在向包围在其中的砂体运移后,势必增加圈闭中流体的体积。体积的增大又将导致圈闭内压力的增高,压力的增高对油气初次运移产生阻力。即当烃源岩的排烃压力与油藏内压力达到平衡时,油气成藏趋于稳定(停滞)。

3 成藏过程

由于砂岩体与烃源岩处于同一地质条件,因此在研究此类油藏成藏过程时,需要将这一特殊的地质体在统一的地质环境中进行研究。在随埋藏深度增加的过程中,砂体和烃源岩各自发生演化,但却在埋藏过程中一起压实成岩,经历相同的压实成岩过程。

从济阳拗陷新生代碎屑岩压实阶段划分与特征来看,泥岩的压实和砂岩的压实均可以分为 4 个阶段,分别对应早成岩作用早、晚期及晚成岩作用早、晚期(王捷和关德范,1999)。在压实作用的影响下,岩石体积缩小、孔隙度降低、孔隙中流体排出、成藏动力与阻力发生变化,而且烃源岩中烃类的生成具有阶段性,因此,不同压实成岩阶段砂岩透镜体成藏过程和成藏机理存在差异(图 3)。

3.1 早成岩阶段不成藏

早成岩阶段,在埋藏压实作用过程中,随埋深的增加,岩石颗粒之间的孔喉半径减小。但在相同的埋深条件下,砂岩和泥岩的压实程度存在差异,泥岩压实程度较砂岩压实程度大,砂岩中的自由水和泥岩中的孔隙水及层间水一起大量排出,泥岩中不连通孔隙开始形成,砂岩中孔隙以原生残余孔为主(图 4a)。该时期,包裹透镜体的有效烃源岩内的有机母质开始热演化,干酪根脱氧以生成水及 CO_2 为主,有微弱的生烃作用,但是生成的烃类远远不能满足自身吸附、孔隙水溶解等残留作用,未进入排烃门限

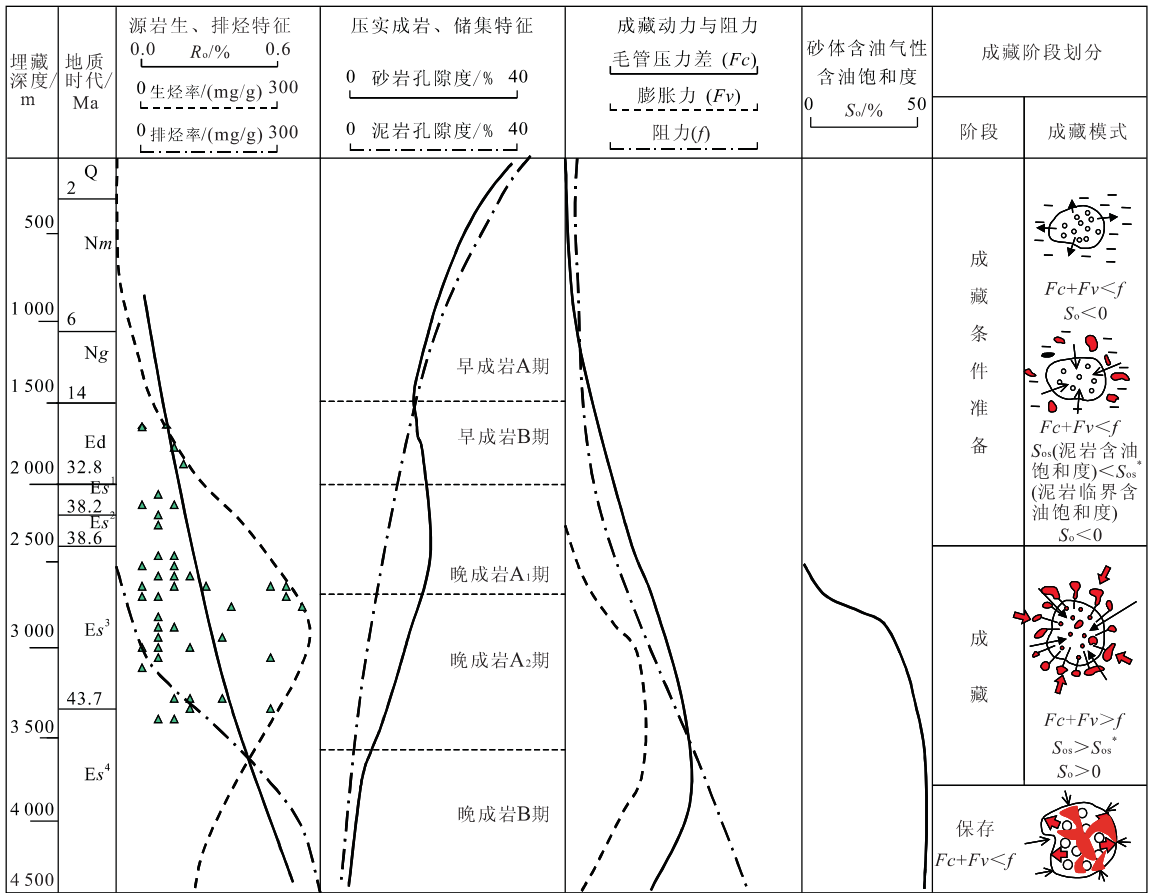


图 3 济阳坳陷砂岩透镜体油藏成藏阶段划分

Fig. 3 Accumulation stages of sand lens reservoir in Jiyang depression

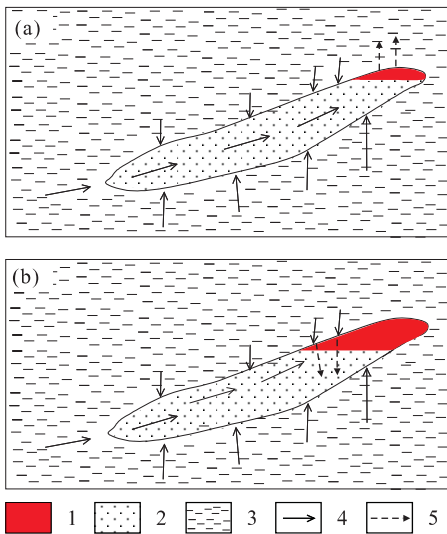


图 4 砂岩透镜体成藏模式

Fig. 4 Accumulation model of sand lens

1. 油气聚集; 2. 砂岩; 3. 泥岩; 4. 油气的运移方向; 5. 砂体中水的运移方向

3.2 晚成岩早期成藏

晚成岩作用早期(A₁期)泥岩进入突变压实带, 排量有所增加, 流体压力大于静岩压力, 孔隙被压开, 流体涌出, 形成大量泥岩裂缝, 砂岩内次生孔隙开始发育, 孔隙度继续降低, 有机质达到成熟阶段, 开始有油气生成和排出, 而且这一阶段, 烃源岩中的孔隙流体可以在压实作用下顺利排出而不受阻。埋藏到一定深度, 有机质演化干酪根降解达到大量生烃阶段, 进入生烃门限后开始大量生烃, 当其生烃量饱和了自身吸附、孔隙水溶解、油(气)溶解和毛细管封堵等多种形式的源岩残留需要, 进入排烃门限, 开始以游离相大量排运油气。油气除吸附于源岩颗粒表面和占据干酪根网络的大分子结构空间外, 有相当数量的烃占据着源岩孔隙并以油珠、油滴和油块的形式存在, 呈游离相态的烃(包括油和气)与孔隙中的水构成的多相流体由于毛细管的封堵不能及时排出。但随埋藏深度继续增加, 源岩内部生成的油气饱和干酪根网络吸附残留后, 再生成的油气就可以顺着干酪根网络克服毛细管阻力向外排运, 而且此

(庞雄奇, 1995), 成藏动力小于阻力, 不能成藏。

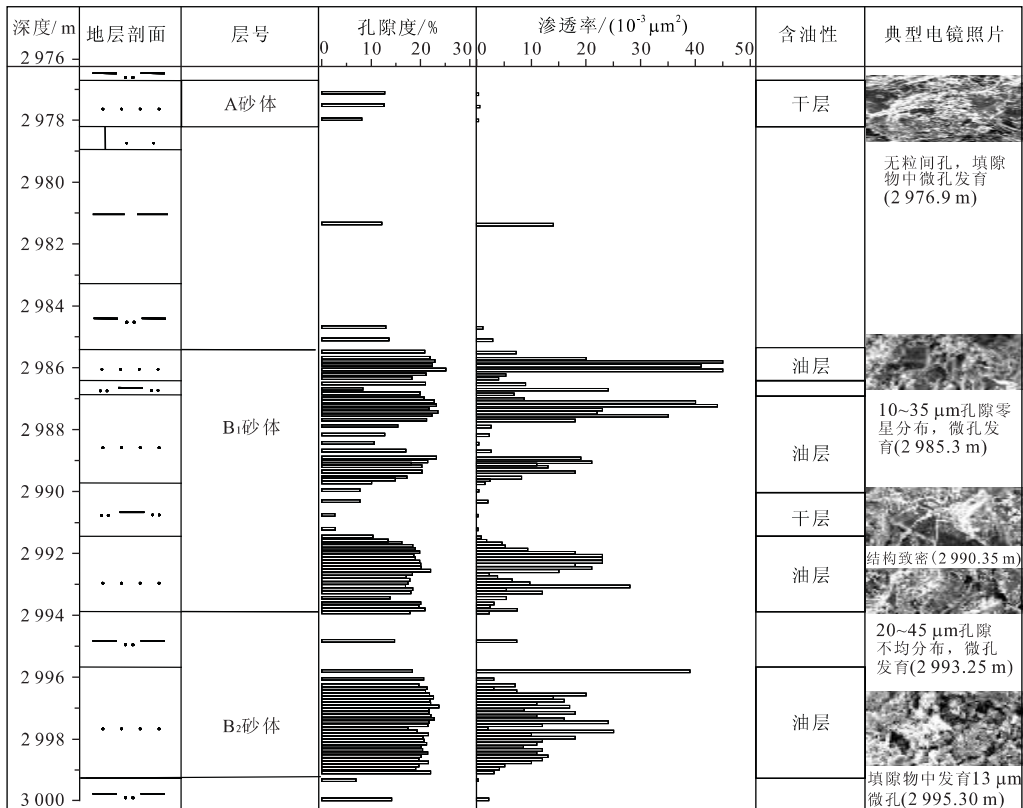


图 5 牛 35 井砂体含油气性剖面图

Fig. 5 Oil-bearing section of Niu 35 well

时,由于烃类的大量生成,在源岩中膨胀力和烃浓度差产生的扩散力作用下,油气沿有机网络向砂体扩散运移.在砂泥岩接触带,由于此时砂泥岩孔喉半径存在差异,导致两者间毛管压力差异显著,油气占据砂体内较大的孔隙,并逐步在砂体内聚集,含油饱和度开始增加,进入早期成藏阶段,此时,砂岩透镜体中的水可以通过上覆的亲水泥岩盖层发生渗滤作用(图 4a).

晚成岩作用早期(A₂期)泥岩进入重力间歇稳定带,有机质达到成熟和高成熟阶段,开始有大量油气生成和排出.源岩中烃生成产生的膨胀力和烃浓度差产生的有机网络扩散作用和毛细管输导作用仍然是导致砂岩透镜体成藏的基本动力.此时虽然由于砂、泥岩孔喉半径急剧减小,流体阻力增大,但成藏动力仍大于成藏阻力,砂体继续成藏,含油饱和度增加幅度较大.随着泥岩中的油不断进入砂岩透镜体,砂岩透镜体中的油逐渐增多,在浮力作用下,逐渐形成具有一定高度的连续油相,由于密度差,导致油的压力都比水的压力高,有较大的油压施加于湿润的水上,产生一个向下的流体势梯度,致使油在砂

岩透镜体中向上运移的同时把水向下排替(图 4b).

3.3 晚成岩晚期油藏开始保存

该阶段砂岩和泥岩孔隙大大缩小,砂岩和泥岩已经基本压实成岩,压实作用对流体排出不起主要作用,流体排出受阻以及温度的增高、上覆压力的增大、粘土矿物脱水、烃类生成等原因,必然导致孔隙压力升高,形成异常高孔隙压力,异常高压下微裂隙的产生,使得该时期泥岩和砂岩连通孔隙基本以微裂隙为主,流体主要在异常高压的作用下,通过微裂隙排出.此时,烃内生成和排出的高峰期已过,加上砂岩和泥岩的孔喉半径急剧下降,成藏动力急剧下降,而成藏阻力继续增加,到一定埋藏深度,阻力开始大于动力,油藏进入保存状态.

4 油藏实例

济阳拗陷牛庄洼陷发育大量暗色泥岩中包裹的砂岩透镜体油藏,其中牛 35 砂体较为典型.牛 35 砂体位于牛庄洼陷西部斜坡上,构造简单,受岩性控制,下第三系沙三中段为其主力含油层段,砂体呈透

镜状,中部主体含油,充满度较高,其中 B_1 砂体充满度可达 72.8%,为三角洲前缘滑塌形成的滑塌浊积体,四周为泥岩包裹,在单井剖面上呈砂泥岩互层(图 5)。根据牛 35 井试油结果分析,油藏原始地层压力 37.1 MPa,压力系数 1.24,为高压油藏。

牛庄洼陷烃源岩主要为沙四上段和沙三段,为深湖相—半深湖相暗色泥岩、油页岩、油泥岩。牛 35 油藏埋深 2 970~3 010 m,属于压实成岩作用的晚期,围岩已经进入生、排烃门限,能够形成足够的烃量满足圈闭成藏。碎屑岩储层及储集性能既受沉积相的控制又受成岩作用的影响,高能环境下形成的高渗透性砂体由于强烈的成岩作用改造,储集性能降低。在牛 35 油藏内,砂体物性对成藏起着控制作用。砂体内部可以划分为 3 个砂层,砂层之间为泥岩或粉砂质泥岩隔层。A 砂层岩性致密,孔隙度 < 12%,渗透率一般 < $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,不含油; B_1 砂层平均孔隙度较高,达 17.6%,平均渗透率 $13.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砂体含油性好,充满度达 72.8%; B_2 砂层平均孔隙度较高,达 20.9%,平均渗透率 $12.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砂体含油性好,充满度为 70.6%。引起砂体含油气性差异的主要原因除了孔渗好的砂体储集性能好之外,更重要的原因是物性好的砂体内部孔喉类型和结构好,孔隙以粒间孔、长石溶蚀孔以及泥质微裂缝为主,孔隙连通性好,孔喉半径大,对于油气进入储集体的毛管压力差异显著,容易成藏。

牛 35 井多数油浸砂岩上下泥岩中伊利石层间扫描电镜下发育 0.5~4.0 μm 的微裂缝,是超压作用的产物,微裂缝的产生和微裂缝的大小与砂体含油气性存在一定的相关性,那些发育 0.5~2.0 μm 微裂缝的泥岩,其顶底的砂体不含油,而那些顶部底部泥岩中发育 2.0~4.0 μm 的微裂缝的砂体则含油(图 6)。

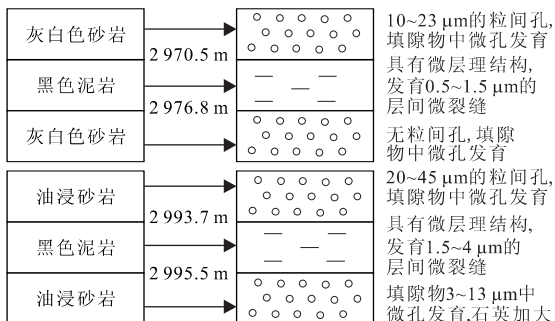


图 6 牛 35 井泥岩微裂缝与砂体含油气性关系

Fig. 6 Relation between mudstone microfracture and oil-bearing property in Niu 35 well

References

- Barker, C., 1980. Primary migration—The importance of water-organic-mineral matter interactions in the source rock. *AAPG Studies in Geology*, Tulsa, Oklahoma, 1—13.
- Berg, R. R., 1975. Capillary pressures in stratigraphic traps. *AAPG Bull.*, 59(5): 939—956.
- Chen, H. L., 1995. An efficient approach to hydrocarbon migration researches. *Oil and Gas Journal*, 16(2): 126—130 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., 1987. Oil and gas migration. Petroleum Industry Press, Beijing, 1—38 (in Chinese).
- Lü, Y. F., Fu, G., Zhang F. Q., et al., 2000. Quantitative study on sealing ability of ultra-pressure caprock. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 465—468 (in Chinese with English abstract).
- Magara, K., 1987. Compaction and fluid migration. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford, New York, 319.
- McAuliffe, C. D., 1979. Oil and gas migration—Chemical and physical constraints. *AAPG Bull.*, 63(5): 767—781.
- Pang, X. Q., 1995. Theory and application of hydrocarbon expulsion threshold. Petroleum Industry Press, Beijing, 1—270 (in Chinese).
- Stainforth, J. G., 1990. Primary migration of hydrocarbons by diffusion through organic matter networks, and its effect on oil and gas generation. *Org. Geochem.*, 16(1): 1—3.
- Wang, J., Guan, D. F., 1999. Model research on oil and gas generation, migration and accumulation. Petroleum Industry Press, Beijing, 194—199 (in Chinese).
- Арве, А. Г., 1995. Discuss on oil-bearing mechanism of sand lens in mudstone. *Геол. нефти и газа*, (2): 41—45.

附中文参考文献

- 陈荷立, 1995. 油气运移研究的有效途径. *石油与天然气地质*, 16(2): 126—130.
- 李明诚, 1987. 石油与天然气运移. 北京: 石油工业出版社, 1—38.
- 吕延防, 付广, 张发强, 等, 2000. 超压盖层封烃能力的定量研究. *沉积学报*, 18(3): 465—468.
- 庞雄奇, 1995. 排烃门限控油气理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 1—270.
- 王捷, 关德范, 1999. 油气生成运移聚集模型研究. 北京: 石油工业出版社, 194—199.