文章编号:1673-5005(2009)04-0001-05

惠民凹陷西南缓坡带断层的封闭性

朱志强[1,2], 高先志[2], 曾溅辉[1,2]

(1. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心,北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:为了解断层对惠民凹陷西南缓坡带油气成藏的作用,在分析缓坡带断层发育特征的基础上,采用泥岩涂抹系数法和断面压力与砂泥比结合法对研究区内主要控油断层的封闭性进行研究。研究结果表明:该区断层的封闭性在时空上存在着较大的差异,并在油气运、聚过程中起着不同的作用;夏口断层控制着运移至缓坡带的油气量,其东段侧向封闭差,可以连接源岩和圈闭形成油气运移的通道,西段侧向封闭好,阻止油气运移形成油气藏;缓坡带内三、四级断层控制着油气运、聚的层位;研究区北部沙四段(Es_4)地层中的断块圈闭应为下一步重要的勘探目标。

关键词:惠民凹陷; 缓坡带; 断层封闭性; 泥岩涂抹; 封闭压力

中图分类号:P 542.3;TE 122.12 **文献标识码**:A

Fault sealing of south-west gentle slope belt in Huimin depression

ZHU Zhi-qiang[1,2], GAO Xian-zhi[2], ZENG Jian-hui[1,2]

(1. *Basin and Reservoir Research Center in China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*;
2. *State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing* 102249, *China*)

Abstract: In order to study the role of fault on hydrocarbon accumulation of south-west gentle slope in Huimin depression, the fault sealing was researched through clay smearing factor and fault plane pressure combined with sand-clay ratio method based on the analysis of development characteristics of oil-controlled fault in gentle slope. The results show that the fault sealing in this area shows a great difference in time and space, and plays different roles in hydrocarbon migration and accumulation. Xiakou fault controls oil migrating to the gentle slope. The poor fault sealing of east section can form hydrocarbon migration channel through connecting source rock and trap, while the fault sealing of west section is good, which can form reservoirs by preventing hydrocarbon from migrating. The third or fourth grade faults within gentle slope control hydrocarbon migration and accumulation layer. Further exploration targets should be focused on the fault-block traps in the Es_4 formation in the northern of the study area.

Key words: Huimin depression; gentle slope belt; fault sealing; shale smear; sealed pressure

油气勘探的实践表明,断层在油气藏的形成过程中起着重要作用,它不仅可以作为油气从烃源岩运移到圈闭的通道,而且更重要的是它还可以作为遮挡物,阻止油气的运移,使油气聚集与保存下来,因此断层封闭性的研究是油气藏形成与分布研究中的重要内容[1-3]。惠民凹陷西南缓坡带位于渤海湾盆地惠民凹陷的西南部,属于临南地区的一个次级构造单元,缓坡带内烃源岩不发育,油气来自北部临南洼陷沙三段烃源岩[4-6]。该区位于油气运聚的有利构造背景上,但找到的储量与其所处的构造位置远不相称。断层对该区油气成藏所起的重要控制作用可能是导致这种现象产生的原因,因此笔者在分析缓坡带断层发育特征的基础上,采用泥岩涂抹系数和断面压力与砂泥比结合法对主控断层的封闭性进行研究。

1 断层发育特征

惠民凹陷西南部是一个长期发育的稳定斜坡,整体上表现为南抬北倾的大型鼻状构造背景上的宽缓坡带,并被多条断层切割,和北部生烃洼陷以夏口

收稿日期:2009-02-12

基金项目:国家"十五"重大科技攻关项目(2001BA605A09)

作者简介:朱志强(1979-),男(汉族),河北安国人,博士研究生,从事油气成藏机制研究。

万方数据

断层为界(图 1)。夏口断层总体走向近 NE,倾向 NNW,延伸长度 34 km,最大断距 1.3 km,下盘常有近东西向小断层与主断层斜交,构成羽状断层系。受夏口断层的影响,缓坡带古近系地层较薄,并发育以 NNE 向和近 EW 向为主的共轭正断层。近 SN 向断层较少且规模不大,多为主断层的分支断层,断裂组合大多为"Y"字型,由于断层相互切割,易形成断块圈闭。缓坡带内部 6 条重要断层,由北向南依次编号为Ⅰ~Ⅵ(图 2),多为 NEE 走向,倾角为 50°~60°。

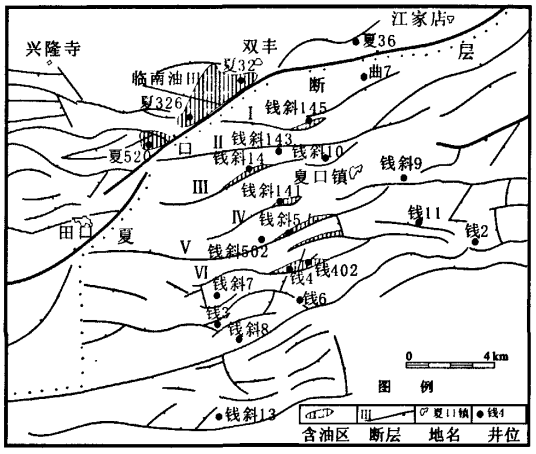

图 1　惠民凹陷西南缓坡带断裂与油藏分布

Fig. 1　Distribution of fractures and reservoirs in south-west gentle slope belt of Huimin depression

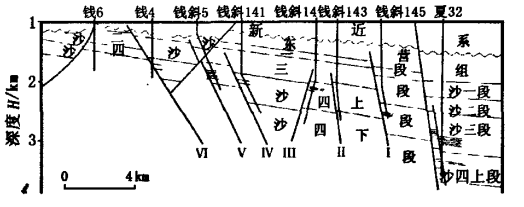

图 2　惠民凹陷西南缓坡带近南北向剖面

Fig. 2　South-north section of south-west gentle slope in Huimin depression

2　主要控油断层封闭性

2.1　研究方法和判断标准

对于断层封闭性,国内外许多学者先后用不同的研究方法从各个方面对其作了详细研究,并取得了较丰硕的成果。研究内容主要是断层侧向和垂向封堵油气的性能。

对于断层侧向封闭性,Smith 提出了砂泥岩层的对接关系法[7],尤其适合于较浅部位,断层力学性质为张性和张扭性,断裂带厚度较薄和不能连续分布的情况;Yielding 等[1]提出了断层泥比率(R_{SG})的计算方法,该方法是把进入断层带的非渗透物质作为断层泥;Bouvier 等[8]提出"泥岩涂抹能力"(CSP)法,该法适合于断面剪切型涂抹;Lindsay[9]和 Gibson[10]提出了适合于压入型涂抹的涂抹系数(F_{SS})的计算方法。根据本区的实际地质情况,泥岩涂抹系数法适用于本区断层侧向封闭性的研究。

泥岩涂抹系数(F_{SS})的定义是断层沿一个横截面的位移倾斜断距(L)与断距内发生明显位移的泥岩层累积厚度(H)之比,即

$$F_{SS}=L/\sum_{i=1}^{n}h_i,\ i=1,2,\cdots,n.$$

式中,L 为断层断距,m;h_i 为被断层错开的第 i 层泥岩厚度,m;n 为被断层错开的泥岩层数。

判断断层封闭性的涂抹系数标准由于盆地实际地质情况的差异也会有所不同。Gibson[10]根据对 Teak 和 Poui 油田泥岩涂抹系数的研究认为,只要断层泥涂抹系数小于 4,泥岩涂抹层就能保持空间连续分布,封闭性就好,反之则封闭性差。Lindsay[9]对 80 个断层研究得出,泥岩涂抹系数大于 7 时泥岩涂抹不完全,较小的涂抹系数与连续涂抹对应并可产生封闭。张煜[11]根据对东营凹陷东辛油田东营组地层内断层研究认为,该区泥岩涂抹系数界限值约为 4.3。笔者根据惠民凹陷已知封闭性断层的涂抹系数,将研究区断层封闭性涂抹系数的临界值定为 5,即当泥岩涂抹系数小于 5 时,断层是封闭的,大于 5 时断层对油气不能起侧向封闭作用。

断层垂向封闭性的研究方法有断面压力法[12]和断移地层砂泥比值法[13]。断层面所受到的压力应该为上覆岩层静岩压力、区域主压力应力和孔隙流体压力,由于惠民凹陷西南缓坡带断层均为正断层(图 2),实测地层压力为正常压力,因此区域主压力应力和孔隙流体压力对断层面的压力作用可以忽略不计,所以在该区求取断面正压力的计算公式为

$$p=0.009\,876H(\rho_r-\rho_w)\cos\theta.$$

式中,p 为断面所受的正压力,MPa;H 为断面埋深,m;ρ_r 为上覆地层的平均密度,g/cm^3;ρ_w 为地层水密度,g/cm^3;θ 为断面倾角,(°)。

断移地层砂泥比值法是泥岩涂抹系数法的一种演化变形,即把原来的分子断层断距改为断距内砂岩层累积厚度,而分母不变。前人[14]对连河油田 34 条已知封闭性断层的砂泥比值统计后认为,当断移地层的砂泥比值小于某一下限值时,断层具垂向封闭性。

万方数据

单独应用这两种方法判断断层的垂向封闭性都具有一定的局限性。一方面,尽管断面所受正压力较大,当断移地层剖面上的砂泥比值较大时,断裂充填必然以砂质为主,不利于断层的垂向封闭;另一方面,即使断移地层剖面上具有较低的砂泥比,如果没有足够的断面压力,断面之间会形成缝隙,也会使油气沿断层面散逸。因此,评价断层垂向封闭时,应当兼顾断面压力和断移地层的砂泥比值两个方面。文中根据前人[12]的评价方法进行了改进,制定了断层垂向封闭性评价标准,见表 1。

表 1　不同断面压力下断层垂向封闭性评价标准

Table 1　Evaluation standard of vertical sealing at difterent pressure

砂泥比	断面压力 p/MPa				
	<1.5	1.5~3.5	1.5~3.5	1.5~3.5	>3.5
<1.00	差	较差	中	较好	好
1.00~1.25	差	差	较差	中	较好
1.25~1.33	差	差	差	较差	中
2.33~4.00	差	差	差	差	较差
>4.00	差	差	差	差	差

2.2　夏口断层的封闭性

缓坡带北部的控烃断层夏口断层从西到东不同部位的沙三下亚段到沙一段的不同层段侧向封闭性具有不同特征(图 3)。在夏口断层的夏 326 井处沙三中亚段、夏 32 井处沙三下亚段和夏 36 井处的沙二、沙三下亚段的泥岩涂抹系数大于 5,断层不封闭,其他部位的泥岩涂抹系数均小于 5,断层是封闭的。

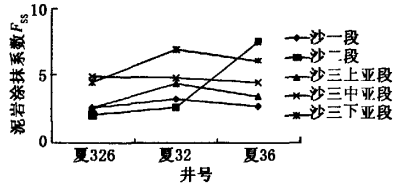

图 3　夏口断层西段侧向封闭特征

Fig. 3　Lateral sealing characteristics of the western part of Xiakou fault

夏口断层西段的夏 326 井、夏 32 井和夏 36 井处地层断层泥比率的统计和断面压力的计算结果非常相似。以夏 32 井为例,夏口断层西段在现今不活动期垂向上是封闭的,阻止了油气沿夏口断层垂向的运移(表 2)。

夏口断层作为西南缓坡带与生烃洼的分界断层,其封闭性特征直接控制着运移至西南缓坡带油气的数量并影响其分布的层位。研究认为,夏口断层在夏 326 井处沙三中亚段地层中侧向上是开启的,从录井可以看到多处含油级别为"油斑"和"油浸"的储层段,但没有形成油气藏;在沙三上、下亚段地层中泥岩涂抹充分,油气被断层遮挡聚集成藏。断层在夏 32 井处沙三下亚段地层中侧向上是开启的,沙三中亚段及以上地层中侧向上是封闭的。位于夏口断层上盘的夏 32 含油断块,沙三中、上亚段有含油层,而沙三下亚段和沙四段虽发现多处含油级别为"油斑"和"油浸"的储层层段,但实际上不是含油层,说明这些储层中曾经有过油气,但运移或散失掉了。在夏 36 井处,夏口断层的侧向封闭性与夏 32 井处相似,但缺少油源,在夏 36 井和对盘的曲 7 井都没有发现油气。

表 2　夏 32 井处不同层位垂向封闭性评价

Table 2　Vertical sealing evaluation of different layers in well Xia 32

层段	断层泥比率 R_{SC}/%	断面正压力 p/MPa	垂向封闭性评价
Es_1	75.4	12.5	好
Es_2	69.1	14.0	好
$Es_{3上}$	54.3	22.1	好
$Es_{3中}$	82.1	33.5	好
$Es_{3下}$	63.7	29.6	好

在夏口断层以南没有烃源岩的缓坡带内钱 4 和钱斜 5 井的沙四上亚段均发现工业油流,证实洼陷内生成的油气有一部分经过夏口断层运移到了缓坡带。但是,由于夏口断层垂向上具有良好的封闭性,所以只有与生烃洼陷沙三段地层对接的西南缓坡带沙四段地层中有工业油流,其他层段没有油气显示。因此,应优先对沙四段储层进行勘探和开发。

2.3　缓坡带内部断层的封闭性

由于惠民凹陷西南缓坡带内的 6 条主要控油断层为三、四级断层,断层规模小,并且地层厚度由北向南变化大(图 2),对它们进行断层封闭性研究时,采用将目的层段细分的办法(图 4)。

Ⅰ号断层西段沙四段地层中在 2.2 km 处泥岩涂抹系数小于 2.5,断层侧向封闭性好,随深度增加泥岩涂抹系数增大,大于或接近 5,说明Ⅰ号断层西段沙四段地层断层上部侧向封闭性较好,中、下部较差。断层东段中上部泥岩涂抹系数随深度增加而增大,断层侧向由封闭转为不封闭,下部泥岩涂抹系数又逐渐变小,断层侧向封闭。

Ⅱ号断层东、西两段沙四段涂抹系数变化趋势相似,都是从大于 5 逐渐变为小于 5。中段整体上泥岩涂抹系数大于 5 或接近 5,只是在最下部较小,断层封闭性总体上较差。

万方数据

Ⅲ号断层西段沙四段除2.15 km处的泥岩涂抹系数大于5外其余都小于5,说明Ⅲ号断层沙四段在此处是开启的,其余砂层之间是封闭的。中段沙四段上部断层封闭性好,下部断层封闭性差。东段沙四段2.25 km和2.50 km处泥岩涂抹不充分,断层封闭性差,断层两盘其余砂层间封闭性好。

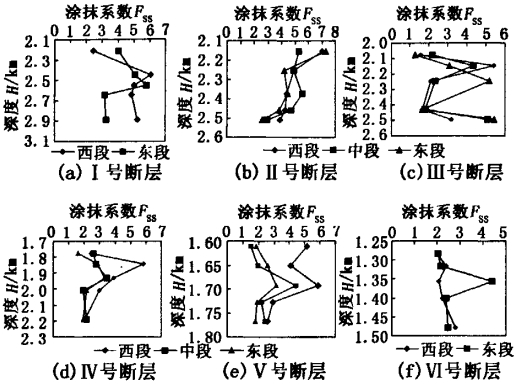

图4　惠民凹陷西南缓坡带6条断层侧向封闭特征

Fig. 4　Lateral sealing characteristics of 6 faults of south-west gentle slope in Huimin depression

Ⅳ号断层西段沙四段除1.85 km处的泥岩涂抹系数大于5,其余都小于5,说明Ⅳ号断层西段沙四段在此处是开启的,其余部位是封闭的。中段和东段泥岩涂抹系数变化接近,且都小于5,泥岩涂抹充分,断层是封闭的。

Ⅴ号断层西段沙四段泥岩涂抹系数随深度增大逐渐减小,在1.61 km和1.70 km处涂抹系数大于5,其余小于5,说明Ⅴ号断层西段沙四段在这两个深度处断层两盘砂层间泥岩涂抹不充分,断层是开启的,其余深度断层是封闭的。中段和东段泥岩涂抹系数变化接近,随深度增加先增大后减小,但都小于5,说明断层是封闭的。

Ⅵ号断层东、西两段沙四段的泥岩涂抹系数随深度的增加略有增大,除东段在1.35 km处涂抹系数略大一些,其余的数值在2~3,说明总体上断层沙四段侧向上是封闭的。

沙四段垂向断层封闭性评价结果显示,在现今非活动期,断层在垂向上是封闭的,这就阻止了油气在断层垂向上的运移。

缓坡带内的主要控油断层封闭性的好坏控制着油气在缓坡带的聚集和分布。在油气运移方向上,断层侧向封闭性普遍较好,能够有效地阻止油气的侧向运移,形成油气聚集;个别部位封闭性差,断层作为油气运移的通道,使油气继续向低势区运移。这些主要的控油断层整体上垂向封闭都较好,阻止了油气沿断层面作垂向运移,所以缓坡带的油气主要分布在沙四段地层中,分布层位单一。该缓坡带内最有利的目标就是与断层相关的圈闭,因此下一步勘探目标应该是沙四段地层中的断块圈闭。

3　主要控油断层封闭史

断层的形成与发展并非是平稳进行的,而是间歇性活动的。无论断层的现今封闭性如何好,地质时期均有过开启的过程。如果断层开启时期与烃源岩生排烃时期相匹配,断层将作为油气运移的通道使其运移到上覆地层的圈闭中聚集成藏或者运移到地表而散失。因此,断层封闭史研究也是断层封闭性研究中的一个重要方面。

为了搞清地质历史时期研究区断层的封闭性,笔者通过对构造演化史的恢复,重塑断层在各地史时期的古落差,同时恢复各地史时期地层的泥岩含量。在以上基础上运用泥岩涂抹系数法,计算各地史时期断层的侧向封闭程度。再根据古埋深、断层倾角来计算古断面压力,研究断层的垂向封闭性,最后进行断层封闭性演化史的综合定量评价。

临南洼陷生成的油气大规模运移发生在晚第三纪馆陶-明化镇组沉积时期[6],因此对这一时期夏口断层夏326井、夏32井和夏36井处的断层封闭史的演化进行分析,3口井处的模拟分析结果非常相似。以3口井中间的夏32井为例:馆陶组地层沉积前和明化镇组地层沉积前,沙河街组三段中亚段及以上地层的泥岩涂抹系数小于5,断层在侧向上是封闭的,阻止了油气的侧向运移,形成了临南油田;沙河街组三段下亚段的泥岩涂抹系数大于5,表明经过东营运动,夏口断层在夏32井处沙河街组三段下亚段侧向封闭性差,作为油气运移的通道,使得部分油气向缓坡带运移。

断层泥比率和断面正压力演化数据计算结果表明,夏32井在馆陶组地层沉积前,除沙河街组一段地层垂向封闭性为中等以外,其余沙河街组地层垂向封闭性均为好或较好。在明化镇组地层沉积前,整个沙河街组地层垂向封闭性为好或较好,东营组地层垂向封闭性为中等。由此可以看出,夏口断层西段在油气大规模运移的馆陶组和明化镇组时期垂向封闭性比较稳定,始终是好或较好,这就阻止了油气沿夏口断层垂向运移,从而影响着缓坡带含油层位。

万方数据

4 结 论

(1)夏口断层作为缓坡带与生烃洼陷的分界断层,其东段侧向封闭性差,西段侧向封闭性好,其封闭性特征控制着运移至缓坡带的油气量,同时影响着油气分布的层位。

(2)缓坡带内三、四级断层控制着油气的运聚和分布的层位。

(3)惠民凹陷西南缓坡带下一步勘探目标应选择其北部沙四段地层中的断块圈闭。

参考文献:

[1] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault prediction[J]. AAPG, 1997,81(6):917-987.

[2] 孟庆芬,徐朝晖,徐怀民,等.准噶尔盆地西北缘百口泉区前陆冲断带撕裂断层特征及控藏作用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(5):18-22.
MENG Qing-fen, XU Zhao-hui, XU Huai-min, et al. Characteristics and controlling over reservoir accumulation of tear fault in foreland thrust belt of Baikouquan area in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(5):18-22.

[3] HIPPLER S J. Deformation microstructures and digenesis in sandstone adjacent to an extensional fault: implications for the flow and entrapment of hydrocarbon[J]. AAPG, 1993,77(4):625-637.

[4] 张金亮,杨子成.流体包裹体分析方法在惠民凹陷油气成藏研究中的应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(6):33-38.
ZHANG Jin-liang, YANG Zi-cheng, Application of fluid inclusion analysis to hydrocarbon accumulation research in Huimin depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition Natural Science), 2008,32(6):33-38.

[5] 邓春呈.临南洼陷有机质丰度研究[J].新疆石油学院学报,2001,13(1):39-43.
DENG Chun-cheng. Research into abundance of organic matter in Linnan Low-lying[J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2001,13(1):39-43.

[6] 杨万芹,蒋有录.惠民凹陷西部油气成藏期分析[J].油气地质与采收率,2004,11(1):19-22.
YANG Wan-qin, JIANG You-lu. Analysis of hydrocarbon reservoir forming stages in the west of Huimin seg[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(1):19-22.

[7] SMITH D A. Theoretical consideration of sealing and nonsealing faults[J]. AAPG,1966,50(2):363-374.

[8] BOUVIER J D, SIJPESTEIJN K, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun Ricerfield, Niggeria[J]. AAPG, 1989,73(11):1397-1414.

[9] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smear on fault surfaces[C]. London:Blackwell,1993:113-123.

[10] GIBSON R G. Fault-zone seals in siliciclastic of the strata of the Columbus Basin, offshore Trinidad[J]. AAPG, 1994,78(9):1372-1385.

[11] 张煜,李亚辉.东辛油田东营组泥岩沾污因子与断层封闭性关系探讨[J].石油勘探与开发,2000,27(6):14-15.
ZHANG Yu, LI Ya-hui. An application to the relationship of shale smear factor and fault sealing properly of Dongying Formation, Dongxin oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000,27(6):14-15.

[12] 吕延防,李国会,王跃文,等.断层封闭性的定量研究方法[J].石油学报,1996,17(3):39-45.
LÜ Yan-fang, LI Guo-hui, WANG Yue-wen, et al. Quantitative analyses in fault sealing properties[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996,17(3):39-45.

[13] 付广,王朋岩,孙洪斌.断层垂向封闭模式及研究方法[J].新疆石油地质,1998,19(1):7-10.
FU Guang, WANG Peng-yan, SUN Hong-bin. Vertical confining model of fault and its study method[J]. XinJiang Petroleum Geology, 1998,19(1):7-10.

[14] 吕延防,陈章明,陈发景.非线性映射分析断层封闭性评价方法[J].石油学报,1996,10(2):7-12.
LÜ Yan-fang, CHEN Zhang-ming, CHEN Fa-jing. Evaluation of sealing ability of faults using nonlinear mapping analysis[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996,10(2):7-12.

(编辑 徐会永)

万方数据