doi:10.3799/dqkx.2011.117

惠民凹陷临盘油区断裂胶结带基本特征及形成机制

刘　金[1],宋国奇[2],郝雪峰[3],宿春梁[1],刘克奇[3]

1. 中国石化股份胜利油田分公司临盘采油厂,山东临邑 251507
2. 中国石化股份胜利油田分公司,山东东营 257000
3. 中国石化股份胜利油田分公司地质科学研究院,山东东营 257015

摘要: 惠民凹陷临盘油区断块油田广泛发育,但对其封闭机制认识不清.从临盘复杂断块油田的实际地质资料出发,依据岩心、测井资料,结合物性、扫描电镜等实验分析,探讨了断裂胶结带的基本特征和形成机制.研究表明,临盘油区富含钙镁离子的地层水在断裂活动过程中沿断裂向上流动,随着压力的降低导致在断层附近砂岩中易形成方解石、白云石等矿物的沉淀,从而形成了致密的断裂胶结带,胶结带内孔渗性急剧变差,喉道半径和渗透率约降低一个数量级,成为封堵油气的有利屏障.

关键词: 临盘油区;断裂胶结带;胶结特征;石油地质.

中图分类号: TE111.2　　**文章编号:** 1000－2383(2011)06－1119－06　　**收稿日期:** 2011－05－13

Characteristics of Fault Cementation Zone and Its Origin in Linpan Oil Pool of the Huimin Depression

LIU Jin[1], SONG Guo-qi[2], HAO Xue-feng[3], XU Chun-liang[1], LIU Ke-qi[3]

1. *Linpan Production Plant, Sinopec, Linyi 251507, China*
2. *Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257000, China*
3. *Geoscience Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying 257015, China*

Abstract: Fault block oil reservoirs are well developed in Linpan oil pool of the Huimin depression. But the sealing mechanism of fault is not clear. The fault cementation zone characteristics and its origin are discussed by means of core data, well logging data, physical property and scanning electronic microscope analysis. The subsurface water rich in Ca^{2+} and Mg^{2+} migrates from deep formation to shallow part along the fault zone during faulting activity in Linpan oil pool. Calcite and dolomite deposit along the fault zone due to the decreasing geothermal pressure upward. As a result, the permeability of the fault zone decreases about one order of magnitude and the accumulated oil is well sealed by fault cementation zone.

Key words: Linpan oil pool; fault cementation zone; cementation characteristics; petroleum geology.

临盘油区位于济阳坳陷惠民凹陷临南洼陷(图 1),勘探开发面积约 3 600 km^2,目前已发现临盘、商河、临南、曲堤等 6 个油田.区内断层异常发育,初步统计,四级以上的断层有 200 余条,加上五、六级断层可达 700 余条.这些复杂的断块构造为断块成藏研究提供了丰富的资料.近年来,为了进一步挖掘勘探潜力,对断层的封堵类型进行了总结分析,临盘油区除了发育“砂泥并置”、“泥岩涂抹”等封堵类型外,还存在许多无法用现有理论解释的封堵现象,如在较高砂岩百分含量、砂岩大量对接的情况下,一些断层的封堵性仍然很好.因而,断裂封堵能力成为断块成藏的关键问题.

针对这些现象,利用现有的岩心资料进行研究,发现断层附近的砂岩被大量的方解石、白云石等矿物充填胶结,岩石致密坚硬,储层物性急剧变差;同时测井资料研究也表明,在临盘地区,断层附近的砂岩出现异常,表现为声波时差变小,自然电位幅度降低、甚至平直无幅度,电阻率明显增高,这同岩心分析的结果一致,推测也为方解石、白云石等矿物胶结.本文把断层附近被大量方解石、白云石等矿物充

基金项目:中国石化股份公司科技攻关项目(No. P08037).
作者简介:刘金(1968－),男,高级工程师,长期从事油气勘探的研究工作. E-mail: lj8861051@sina.com

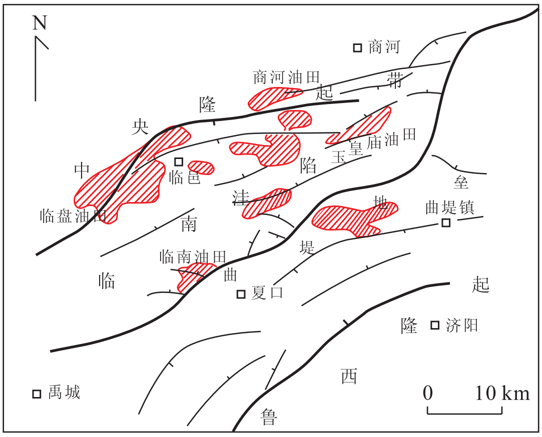

图1 惠民凹陷临盘油区构造位置

Fig. 1 Structural location of Linpan oilfield of the Huimin depression

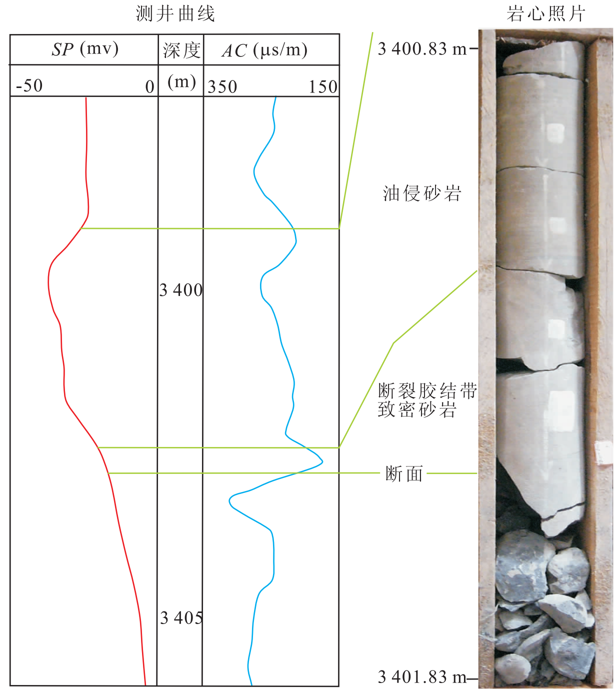

图2 XI503井岩心资料显示断裂胶结带与断面基本平行

Fig. 2 Fault cementation zone parallel to the fault plane according to the drilling data of well XI503

填胶结的致密砂岩带称之为“断裂胶结带”.

断层在油气勘探中是一种不可忽视的重要构造，它不仅可作为油气的运移通道，而且对油气还具有封闭能力. 关于断层封闭性的研究，自20世纪50年代～20世纪60年代至今已有半个多世纪(Allan, 1989; Yielding *et al*., 1997; 吕延防和付广, 2002; 李多丽和关平, 2004; 金之钧和张发强, 2005; Haney *et al*., 2005; 王连进等, 2006; 杜春国等, 2007; Jiang *et al*., 2008; 宋国奇和刘克奇, 2009). 总的来看，国内外对断层封闭性的研究，主要侧重于断层两盘岩性配置、碎裂作用和泥岩涂抹等方面，而对断裂带成岩胶结研究较少. 本文从临盘油区的实际地质资料出发，系统阐明了断裂胶结带的基本特征，探讨了其形成机制.

1 断裂胶结带基本特征

1.1 岩石学特征

临盘油区断面附近的取心井很少，XI503井取到了宝贵的断层岩心资料. 该井位于江家店油田XI503断块，取心层位沙三下段，井段3 372.00～3 402.83 m，心长30.71 m，断面深度约为3 401.60 m. 断层落差122 m，为XI503断块的控油断层，活动时间自沙四期一直到沙一期.

岩心观察表明断面以下为沙三下段底部的泥岩，碎裂严重(图2)；断面以上为沙三下段顶部的含油砂岩，以油侵砂岩为主，但靠近断层面附近，砂岩极为致密，基本不含油，为断裂胶结带，厚度约30 cm. 由于含油性的差异，胶结带与正常砂岩之间的物性分界面看起来比较明显，分界面倾角54°，而断层面倾角约55.3°，两者基本平行.

对断裂胶结带进行密集取样分析，并与上部正常砂岩系统对比，发现胶结带砂岩孔隙度只有4.8%(6个样平均值)，而上部正常砂岩平均为14.3%. 从岩石成分看，碎屑类(包括石英、长石和岩屑)含量变化不大，正常砂岩和胶结带砂岩中，石英含量分别为45%和46.4%；长石含量分别为33.3%和34.3%；岩屑类含量分别为21.5%和19.1%. 填隙物变化较大，正常砂岩和胶结带砂岩中泥质含量分别为6.1%和0.8%；方解石、白云石和重晶石含量分别为5.2%和25.3%.

通过以上分析，断裂胶结带与正常砂岩相比，陆源碎屑各组分含量变化甚微，变化较大的是填隙物和孔隙体积(表1). 在填隙物方面，方解石、白云石等矿物含量由5.2%增加到25.3%，增加值为20.1%，其中有5.3%的方解石等矿物交代了泥质杂基，使岩石泥质含量减少，只剩0.8%；另有14.8%的方解石等矿物充填到孔隙中，即填隙物累计增加14.8%. 在孔隙体积方面，孔隙度由14.3%降至4.8%，减小了9.5%. 如果陆源碎屑总量保持不变，填隙物累计增加了14.8%，增加的填隙物充填到孔隙中，但孔隙体积只减少了9.5%，相差5.3%. 这说

表 1　断裂胶结带砂岩与正常砂岩成分对比

Table 1　Correlation of sands in fault cementation zone and normal sands

类别		正常砂岩	断裂胶结带
陆源碎屑(%)	石英	45.0	46.4
	长石	33.3	34.3
	岩屑类	21.5	19.2
填隙物(%)	泥质	6.1	0.8
	方解石、白云石等矿物	5.2	25.3
	合计	11.3	26.1
孔隙体积(%)	孔隙度	14.3	4.8

明断裂胶结带在被方解石等矿物充填前,孔隙度较大,至少要大于19.6%,由于被方解石等矿物充填胶结后,岩石致密坚硬,在后期成岩过程中,同正常砂岩相比,岩石体积少压实了 5.3%. 断裂胶结带的总体变化是:方解石、白云石等矿物含量累计达到25.3%,孔隙体积仅剩 4.8%.

1.2　物性特征

由于断裂胶结带被大量方解石、白云石和重晶石等矿物充填,孔隙度降低到 4.8%,其渗透性也大大降低. 6 块样品中,除其中一块有裂缝,渗透率稍高外,其他 5 块样品,平均渗透率为 $0.37\times10^{-3}\ \mu m^2$,而正常砂岩平均为 $3.73\times10^{-3}\ \mu m^2$,相差了一个数量级(图 3). 从压汞资料看,正常砂岩最大喉道半径 3.467 1 μm,平均喉道半径 1.055 4 μm;

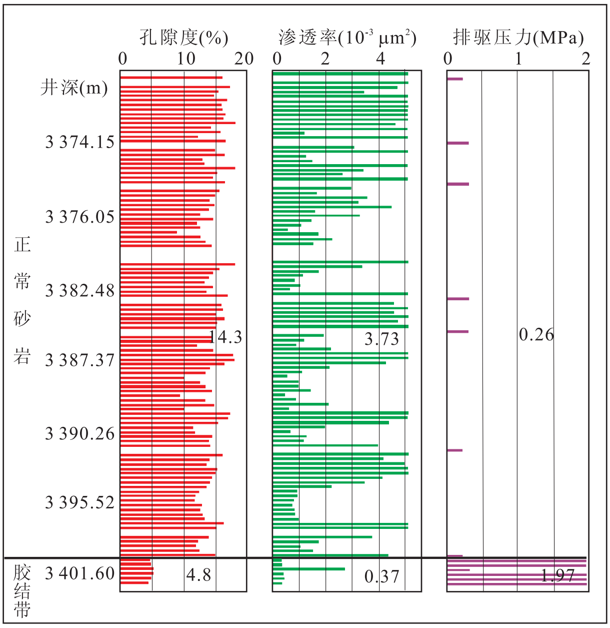

图 3　断裂胶结带与正常砂岩物性对比

Fig. 3　Correlation of physical property of sands in fault cementation zone and normal sands

断裂胶结带砂岩最大喉道半径 0.372 6 μm,平均喉道半径0.142 1 μm,相差约一个数量级. 由于喉道半径变小,胶结带排驱压力明显增大,为 1.97 MPa,而正常砂岩 0.26 MPa(图 3).

1.3　测井特征

由于在断层附近取心井很少,针对断裂胶结带是否普遍发育的问题,本文对大量的测井资料进行了研究.

1.3.1　二级断层胶结带的测井特征　二级断层为洼陷与凸起的边界断层,具有延伸长、断距大等特点. 二级断层胶结带厚度往往较大,在普通直井上测井特征较明显. 以盘 7 断层(落差 300～500 m)为例,如 L202-1 井钻遇该断层,断层附近砂岩测井曲线出现异常,声波时差明显变小,电阻率增高,孔渗性变差,推测很可能被方解石等矿物充填,岩石致密.

1.3.2　三、四级断层胶结带的测井特征　三、四级断层由于规模小,断裂胶结带较窄,但从 XI503 井的岩电对比资料看,表现了与大断层相似的特征,断裂胶结带由于被方解石等矿物充填,孔渗性急剧降低,测井特征表现为声波时差变小(由于厚度小,声波时差曲线上呈现为一个"小尖"),自然电位幅度降低(图 2、图 4).

三、四级断层因胶结带窄,正常直井在测井曲线上难以识别,即使声波时差有异常,也很难与正常的灰质层区分开. 但在钻井轨迹紧贴断层面,或呈小角度穿过断层面的情况下,因胶结带与断面相平行,其钻遇井段会明显加长,而正常沉积的灰质层却变化不大. 这种井在临盘油区较少,典型井为Q104-X205、P40-X961 井等.

Q104-X205 井钻遇断层落差 103～139 m,该井先是从上升盘钻至下降盘,后又从下降盘返至上升盘,两次穿过断面,离断面很近(0～3 m). 沙三段在离断面很近的部位,地层测井特征明显发生了异常,异常井段约 200 m,与邻井或与上下层对比发现,砂岩自然电位几乎没有幅度,声波变小,电阻率变高(图 5),与 XI503 井胶结带特征一致.

P40-X961 井钻遇 1 条四级断层,落差约 33 m. 由于井轨迹紧贴断层面,该井从上升盘钻至断层下降盘,断层上升盘为油层,下降盘为水层. 断点附近的砂岩测井特征明显出现了异常,异常井段约12 m,自然电位基本没有幅度,声波时差明显变小,电阻率增高,推测断层附近的砂岩发生了碳酸盐胶结,孔渗性急剧下降.

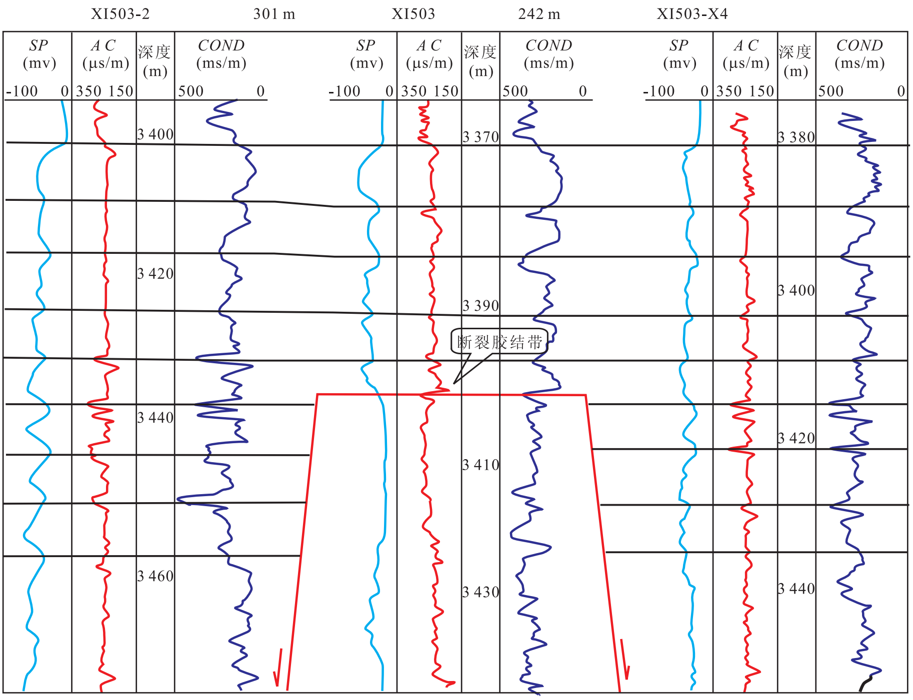

图4 XI503井断裂胶结带与邻井测井特征对比

Fig. 4 Correlation of well logging characteristics between fault cementation zone of well XI503 and normal strata in neighboring well

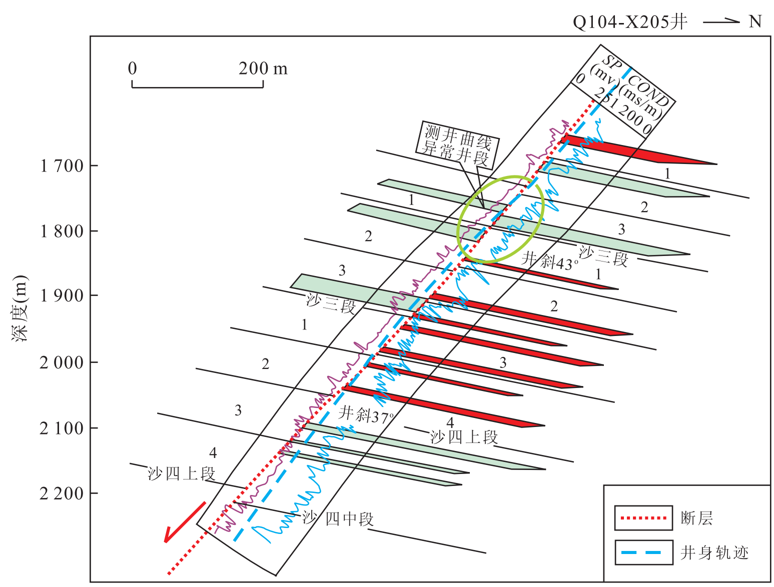

图5 Q104-X205井身轨迹与断层相对位置剖面

Fig. 5 Fault section along wellbore trajectory of well Q104-X205

从以上分析可知，二级大断层胶结带测井资料容易识别，而三级以下断层，由于胶结带窄（XI503井仅0.3 m），正常的直井识别较难，但紧贴断层的斜井，能够清楚地反映其异常特征．断裂胶结带总体测井特征是：声波时差明显变小，自然电位幅度降低，电阻率增高，反映岩性致密，物性变差．由于在盘河、临北、江家店、曲堤等多个地区都发现了断面附近砂岩测井特征异常现象，说明断裂胶结带在临盘油区普遍发育．

2 断裂胶结带的形成机制探讨

断裂胶结带的发育与断层活动有密切关系，主要表现在以下4方面：(1) XI503井岩心表明，碳酸

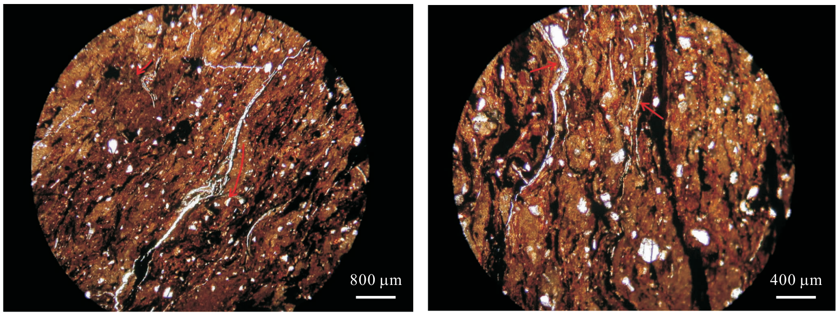

图 6　XI503 井断面下部泥岩 NY-4 样品薄片照片

Fig. 6　Calcite filled in the mudstone of fault cementation zone

表 2　临南洼陷各层位油田水

Table 2　Field water of different strata in Linnan sag

层位	矿化度(mg/L)	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Ca^{2+}	$K^+ + Na^+$	Mg^{2+}	Na^+/Cl^-	水型	样品数
N*g*	9 031	318	40	5 955	214	3 276	68	0.56～0.92	$CaCl_2$	36
E*d*	18 495	484	64	10 171	227	6 373	94	0.55～0.97	$CaCl_2$	42
Es_1	25 224	618	43	14 334	567	8 659	172	0.41～1.29	$CaCl_2$	65
Es_2	29 122	664	165	16 534	849	9 783	312	0.21～1.57	$CaCl_2$	181
Es_3	38 573	630	119	22 082	1 574	12 385	308	0.36～1.33	$CaCl_2$	78
Es_{4s}	57 475	345	349	35 799	3 229	17 881	528	0.45～0.97	$CaCl_2$	43
Es_{4x}	102 933	264	610	68 757	16 351	41 790	42 084	0.45	$CaCl_2$	8

表 3　温度对碳酸盐岩淋溶作用的影响

Table 3　Leaching effect of temperature on carbonate

温度(℃)	溶解时间(h)	1 g 样品淋溶数量(mg/h)		
		$MgCO_3$	$CaCO_3$	$CaMg(CO_3)_2$
25	5.75	0.20	0.42	0.62
50	4.5	0.22	0.69	0.91

盐胶结带紧靠断层面,且物性分界面与断层面相平行,而与地层产状明显不一致.(2)测井曲线对比显示(图 4),XI503 井断层附近砂岩出现明显异常,而邻井(相距 200～300 m)在相同层位的砂岩中测井曲线未有异常,这说明碳酸岩胶结带与断裂活动有关.(3)许多钻遇临邑、盘 7 等二级断层的井资料显示,在断层附近砂岩物性变差,与 XI503 井所揭示的情况一致.(4)Q104-X205、P40-X961 等贴近断面的斜井证实,在三、四级断层附近确有一个砂岩致密带,孔渗性急剧变差,其产状与断层相平行,电性与 XI503 岩心资料一致,推测为断裂胶结带.

另外,在 XI503 井断面附近的泥岩中也发现了方解石充填现象(图 6),显然方解石充填在断层附近比较发育.碳酸盐胶结对于储层物性影响很大,临盘油区在碳酸盐含量大于 20%的情况下,孔隙度多在 10%以下,渗透率多小于 $1\times10^{-3}\ \mu m^2$. XI503 井岩心资料显示,碳酸盐含量在 25%左右时,孔隙度 4.8%,渗透率 $0.34\times10^{-3}\ \mu m^2$.

研究认为断裂胶结带的形成机理与流体沿断裂带活动有关.地层水分析表明(表 2),地下水并不是纯水,临南洼陷各层段的地层水主要为 $CaCl_2$ 型,富含钙离子和镁离子,同时又普遍含 CO_3^{2-}. 一方面,温度对碳酸盐岩淋溶作用的影响试验表明地下水对碳酸盐岩的溶蚀能力与地温条件关系密切(表 3),温度升高,淋溶物质数量增大,一般认为,地温每增加 10 ℃(就济阳坳陷而言,深度增加约 300 m),溶蚀程度增加约两倍(张厚福和张万选, 1989).当断裂带深部流体流经含碳酸盐岩的地层时,会对其进行淋溶,使得流体中含有大量 Ca^{2+},为胶结作用的发生提供物质基础.另一方面,当碳酸钙遇到溶有 CO_2 的水时就会变成可溶性的碳酸氢钙(式 1),像其他气体一样,CO_2 随着温度升高,在水中的溶解度降低,随着压力增大,溶解度增高(Wiebe and Gaddy, 1940).当深层高温高压流体沿断裂带向上运移时,压力的降低是快速的,而温度的降低是相对缓慢的,此时 CO_2 的溶解度主要受压力降低的影响而大量脱离出来,使得化学反应方程向右进行,形成碳酸钙沉淀.这些矿物沉淀将导致断裂带渗率降低和封闭,从而更加有利于重结晶过程的进行.

$$Ca(HCO_3)_2 = CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O. \qquad (1)$$

3 结论

(1)断裂胶结带的陆源碎屑含量变化不大,但填隙物中的方解石、白云石等矿物含量急剧增加,总量可达 25%,并交代了大部分泥质杂基.

(2)断裂胶结带测井特征显著异常,主要表现为声波时差减小、自然电位幅度降低或平直无幅度、电阻率增大等现象.

(3)在临盘油区,地层水富含钙离子和镁离子,在断裂活动过程中,地层水在断层附近穿层流动,使碳酸钙和碳酸镁等在断层附近的砂岩中沉淀下来,形成方解石、白云石充填胶结带.

(4)由于大量方解石、白云石等矿物的充填,断裂胶结带物性急剧变差. XI503 井岩心资料表明,胶结带孔隙度仅 4.8%,喉道半径、渗透率约降低一个数量级,岩石排驱压力显著增大,为油气成藏提供了良好的遮挡条件.

References

Allan, U. S., 1989. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures. *AAPG bulletin*, 73(7): 803-811.

Du, C. G., Hao, F., Zou, H. Y., et al., 2007. Progress and problems of faults conduit systems for hydrocarbon migration. *Geological Science and Technology Information*, 26(1): 51-55 (in Chinese with English).

Haney, M. M., Snieder, R., Sheiman, J., et al., 2005. A moving fluid pulse in a fault zone. *Nature*, 437(7055): 46.

Jiang, Z. X., Dong, Y. X., Li, H. Y., et al., 2008. Limitation of fault-sealing and its control on hydrocarbon accumulation: an example from the Laoyemiao oilfield of the Nanpu sag. *Petroleum Science*, 5(4): 295-301.

Jin, Z. J., Zhang, F. Q., 2005. Status and major advancements in study of hydrocarbon migration. *Oil & Gas Geology*, 26(3): 263-270 (in Chinese with English).

Li, D. L., Guan, P., 2004. Research situation and prospect of hydrocarbon migration in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 40(4): 658-668 (in Chinese with English).

Lü, Y. F., Fu, G., 2002. Research on fault sealing properties. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Song, G. Q., Liu, K. Q., 2009. Fracture characteristics around faults and their significance in petroleum accumulation. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(4): 1-3 (in Chinese with English).

Wang, L. J., Wu, C. L., Wang, C. H., 2006. A review of the advances in the study of secondary oil-gas migration. *Geological Bulletin of China*, 25(9-10): 1220-1224 (in Chinese with English).

Wiebe, R., Gaddy, V. L., 1940. The solubility of carbon dioxide in water at various temperatures from 12° to 40° and at pressures to 500 atmospheres. *Journal of the American Chemical Society*, 62(4): 815-817.

Yielding, G., Freeman, B., Needham, D. T., 1997. Quantitative fault seal prediction. *AAPG Bulletin*, 81(6): 897-917.

Zhang, H. F., Zhang, W. X., 1989. Petroleum geology. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

杜春国,郝芳,邹华耀,等,2007.断裂输导体系研究现状及存在的问题.地质科技情报,26(1):51-55.

金之钧,张发强,2005.油气运移研究现状及主要进展.石油与天然气地质,26(3):263-270.

李多丽,关平,2004.中国油气二次运移的研究现状及展望.北京大学学报(自然科学版),40(4):658-668.

吕延防,付广,2002.断层封闭性研究.北京:石油工业出版社.

宋国奇,刘克奇,2009.断层两盘裂缝发育特征及其石油地质意义.油气地质与采收率,16(4):1-3.

王连进,吴冲龙,王春辉,2006.油气二次运移研究进展述评.地质通报,25(9-10):1220-1224.

张厚福,张万选,1989.石油地质学.北京:石油工业出版社.