

基于三维 SGR 模型的断层侧向封闭性定量表征 ——以尼日尔 M 油田为例

雷 诚¹,袁新涛¹,杨轩宇¹,徐庆岩¹,王 敏¹,余姣凤²

[1 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083; 2 中国石油 塔里木油田公司 勘探开发研究院,新疆 库尔勒 841000]

摘要:前人对断层封闭性的研究很多,但大多都基于断层受到的正压力大小对其进行表征,而对于断层压实成岩时间这一因素考虑较少。本文定义岩石压实强度,并利用该参数与断层岩的断层泥比率(SGR)值计算断层的排替压力;根据断层岩与储层的排替压力差定量表征断层侧向封堵性,最后将该方法应用到 M 油田。研究表明,在 M 油田,SGR 值小于 11 时,断层岩没有封闭能力;SGR 值大于 40 时,断层岩具有很强的封闭能力;介于两者之间时,断层岩 SGR 值与其能够封闭的最大烃柱高度($H_{\max}$)存在线性关系。

关键词:断层泥比率(SGR);烃柱高度;岩石压实强度;排替压力;断层侧向封闭性;断层岩;尼日尔 M 油田

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Quantitative characterization of fault lateral sealing capacity based on 3-D SGR model—A case from M field, Niger

Lei Cheng¹, Yuan Xintao¹, Yang Xuanyu¹, Xu Qingyan¹, Wang Min¹, She Jiaofeng²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. Exploration & Development Research Institute of Tarim Oilfield Company Ltd., PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Many studies have been performed on sealing capacity of faults. However, most of the previous studies characterize sealing capacity based on the normal stress on faults, without considering the timing of compaction and diagenesis of fault. In the study, rock compaction strength is defined and used, in combination with Shale Gouge Ratio (SGR), to calculate the displacement pressure of faults. Then, the lateral sealing capacity of fault is quantitatively evaluated according to the differential replacement pressure between fault rock and reservoir. Finally, the method is applied to the M oilfield. The results show that when SGR is less than 11, the fault rock has no sealing capacity; when it is over 40, the fault rock is strong in sealing capacity; while when it ranges between 11 and 40, the relationship between SGR and maximum oil column height that the fault rock could support can be characterized by a linear equation.

Key words: Shale Gouge Ratio (SGR), hydrocarbon column height, rock compaction strength, displacement pressure, lateral sealing capacity of fault, fault rock, M field of Niger

断层是控制含油气盆地各种地质作用及油气运移、储存的重要因素,在油气成藏过程中,断层的作用表现为两个方面:开启——为油气运移通道;封闭——为圈闭遮挡条件。对于断层封堵性的研究,20 世纪 70 和 80 年代主要集中于断层两盘砂泥对置关系和泥岩涂抹等间接的定性分析^[1-2],90 年代前后断层封闭性评价由定性进入定量阶段。吕延防等(1996)提出砂泥对接概率数值模拟法,对无钻井区断层的封闭性进

行定量评价^[3];Bouvier 等提出泥岩涂抹势(CSP)^[4]、Lindsay 提出泥岩涂抹因子(SSF)^[5]、Yielding 提出断层泥比率(SGR)^[6]等算法判断断层封闭性;刘泽容等(1998)提出多级模糊评价技术^[7];吕延防等提出断储排替压力差判断断层封闭性^[8-10];此后付广等人对该算法进行改进^[11-12]。本文在前人研究基础上,将断层岩压实成岩压力和压实成岩时间与 SGR 相结合定量评价断层封闭性,并结合已开发油田实际油藏数据,确

收稿日期:2018-03-13;修订日期:2019-05-17。

第一作者简介:雷诚(1989—),男,工程师,油气田开发地质。E-mail:leichengnx@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气集团公司重大专项(2016D-44)。

立断层岩 *SCR* 与其可封闭烃柱高度之间的定量关系。这对准确评价断层封闭油气能力,明确储层油水分布特征,完善断裂控藏理论具有十分重要的实际指导意义。

1 研究区概况

M 油田位于尼日尔 Termit 盆地 Dinga 断阶带中部,为受多条正断层控制的断鼻构造,构造走向 NW - SE (图1)。油田东侧的大断层 F1 对构造起主要控制作用,断鼻构造内部发育一系列近 NNW 走向的次级断

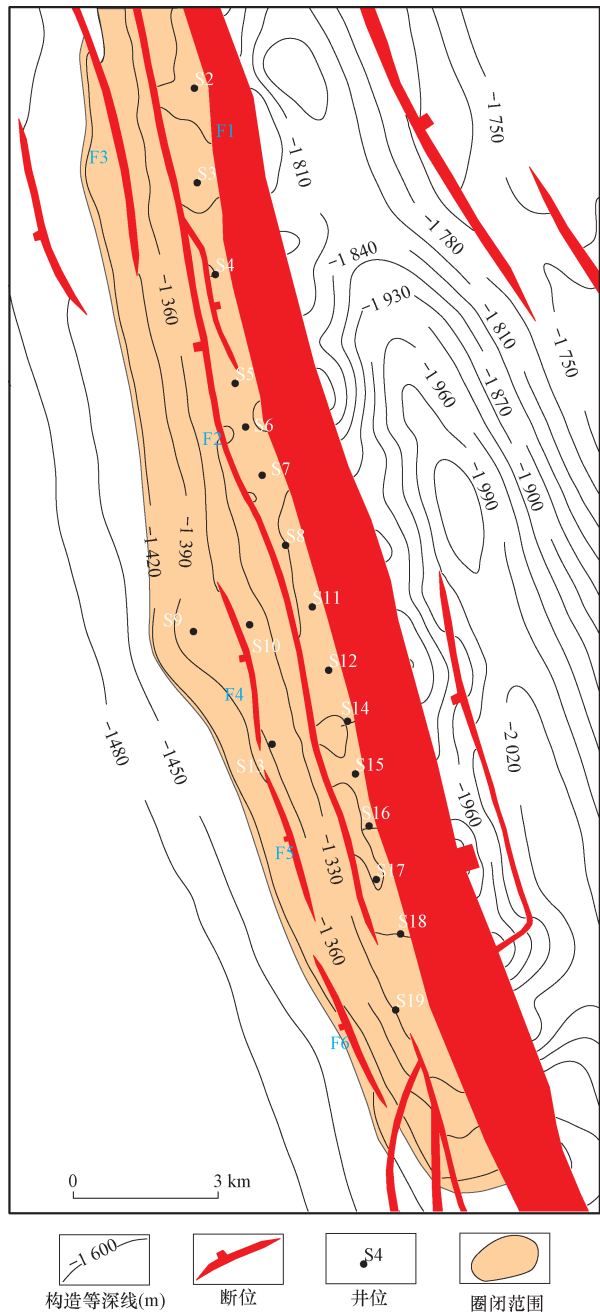


图1 M 油田 E1 砂层组顶面构造
Fig. 1 The top structural map of E1 sandstone layer in M oilfield

层(F2—F6),将油田进一步分割为多个油水系统。M 油田目的层段位于始新统 Sokor1 组,埋深 1 600 ~ 2 000 m,距今约 50 Ma(图2),地层整体为砂泥岩互层,岩性主要为灰色、深灰色泥岩和细砂岩、粉砂岩, Sokor1 组自下而上划分为 E5—E1 五个砂层组。

2 断层侧向封闭机理

断层侧向封闭性是指断层对其两盘岩层中沿断层面法线方向穿过断层面运移油气的封闭能力^[10]。在砂泥岩地层中,根据断层面两盘岩层接触类型,可将断层侧向封闭机理分为岩性对接封闭机理和断层岩高排替压力封闭机理。

2.1 岩性对接封闭机理

当断层两盘的岩层以“面”接触(图3a),此时岩性对接封闭为断层侧向封堵与否的主控因素。断层一盘储层若被另一盘非渗透岩层遮挡,即“砂-泥”对接时,断层能够封堵储层中聚集的油气;若断层两盘同为渗透性储层,即“砂-砂”对接时,断层的封堵性很差,油气可穿越断层进行运移。但在实际沉积地层中,断层两盘岩层以“面”状接触的很少,目前通常使用 Allan 图对断层两盘的岩性对接关系进行半定量研究。

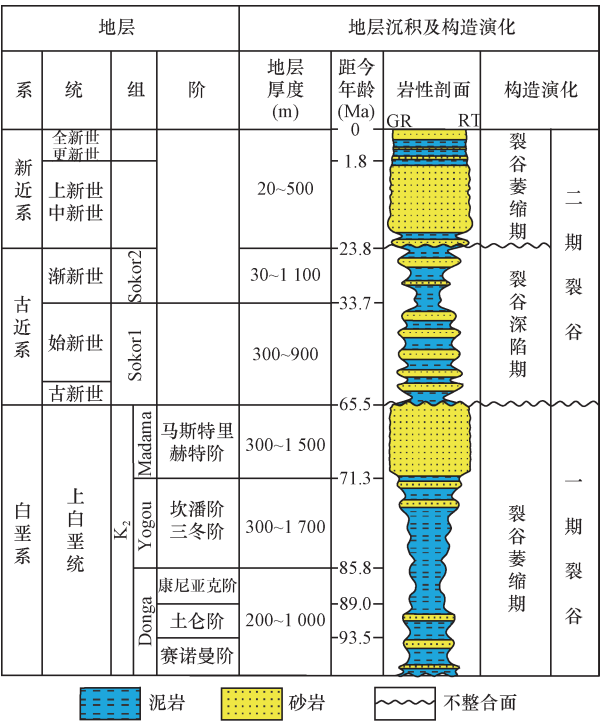


图2 M 油田地层综合柱状图
Fig. 2 The composite stratigraphic column of the M oilfield

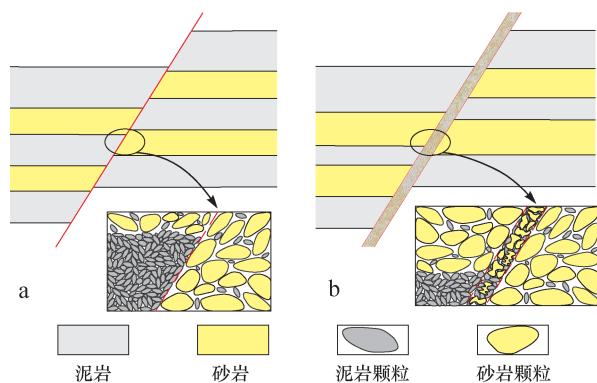


图3 断层侧向封闭机理模式

Fig. 3 Modes of lateral sealing mechanism of fault

a. 断裂带不发育型; b. 断层带发育型

2.2 断层岩高排替压力封闭机理

当断层两盘为“带”接触时(图3b),围岩破碎后被卷入断裂带,形成具有特征性结构和矿物成分的岩石,即断层岩。在砂泥岩地层中,断层岩的泥质含量是决定断层封堵与否的决定性因素。若断层岩的泥质含量高,断裂带的排替压力大于油气运移盘砂岩层的排替压力,断裂带就能阻止油气的侧向运移,断层具侧向封闭性。否则,油气进入断裂带,或沿断裂带发生垂向运移,或穿断裂带进入对置盘砂岩层发生侧向运移,断层不能形成侧向封闭^[13-14]。Knipe 和 Yielding 等人用泥岩涂抹因子($SSF = \text{断距}/\text{泥岩层厚度}$)、泥岩涂抹势($CSP = \text{泥岩层厚度平方}/\text{泥岩涂抹距离}$)、断层泥比率($SGR = \text{泥岩层厚度}/\text{垂直断距}$)^[4-6]等参数对断层泥质含量进行定量研究(图4),其中 SGR 考虑了多套泥岩涂抹的情况,同时考虑了地层的非均质性,计算结果

更接近砂泥岩地层真实情况,被广泛应用。

3 断层封闭能力定量评价

M 油田主要为砂泥岩薄互层,断层以张性为主,断裂带发育,断层的封堵性主要由储层与断层岩的排替压力差异来确定^[9,15],其基础是准确刻画断层岩的泥质含量。

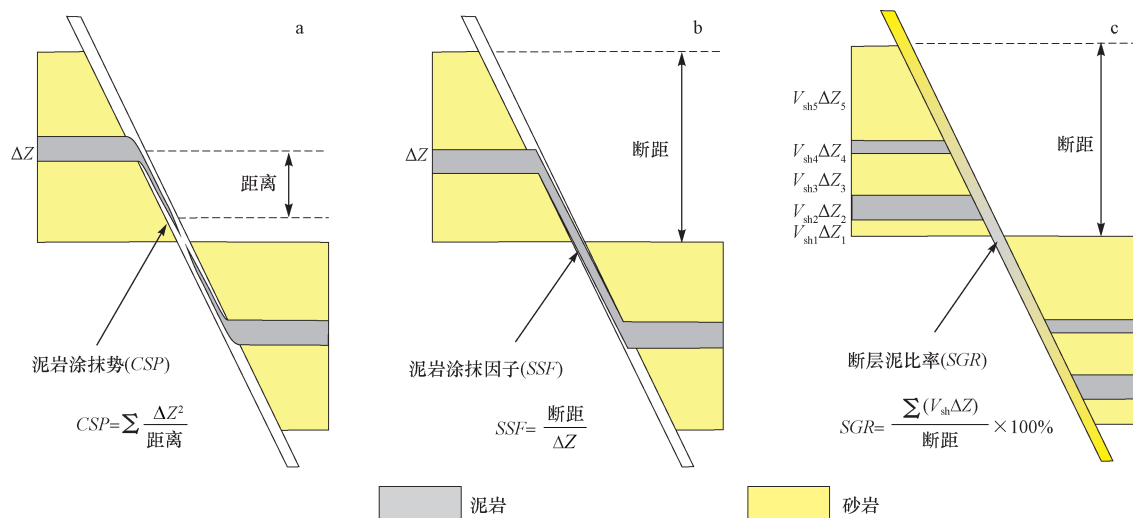
3.1 建立三维 SGR 模型

利用断层、地震反演及测井数据建立 M 油田构造模型和岩相模型,再根据断层两盘地层的砂泥岩分布和断距,建立断层面的三维 SGR 模型(图5,图6)。

M 油田目的层主要为砂泥岩互层,且砂体主要分布在 E1 和 E2 砂层组,因此 SGR 值在断层面上也呈现条带状分布(图6)。分析 M 油田三维 SGR 模型,E1 砂层组 SGR 值主要介于 30%~50%,成稳定的带状分布;E2 砂层组的 SGR 值非均质性最强,垂向上 E2-3, E2-5 小层 SGR 值最低,介于 10%~25%;水平方向由断层中间至两侧,SGR 值由大变小。同一条断层,不同位置 SGR 值分布差异较大,其封闭性也存在差异。

3.2 建立泥质含量-埋深-排替压力图版

根据 M 油田及其相邻油田 6 口取心井 41 块岩样的泥质含量及压汞测试的最大排替压力值,建立 M 油田岩石泥质含量-埋深-排替压力关系图版(图7),由图版可以看出,在特定的泥质含量范围内,排替压力与岩石埋深呈指数关系,且同一深度下,岩石泥质含量越高,排替压力越大。

图4 3种主要计算断层岩泥质含量的方法^[15]Fig. 4 Three main algorithms to work out the clay content in fault rocks^[15]

a. 泥岩涂抹势计算示意图; b. 泥岩涂抹因子计算示意图; c. 断层泥比率计算示意图

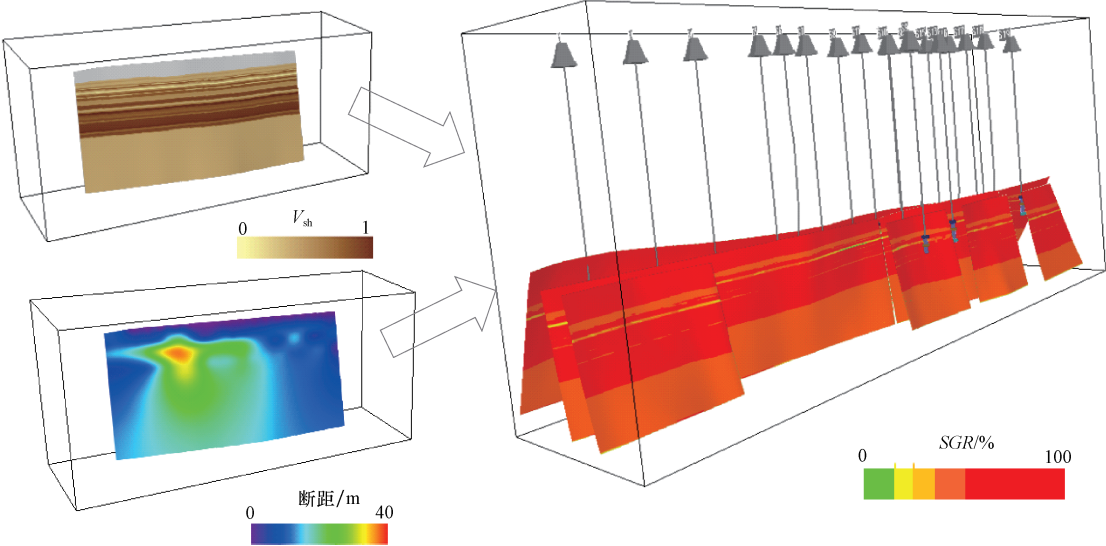


图5 M油田三维SGR模型
Fig.5 3-D SGR model of M field

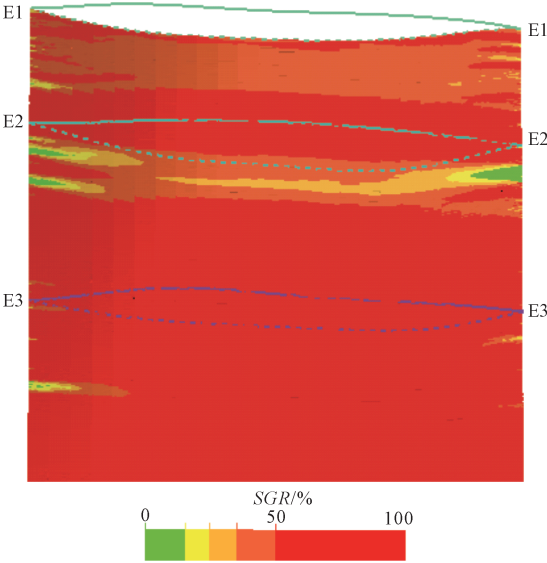


图6 M油田F4断层SGR分布
Fig.6 SGR distribution of F4 fault in M oilfield

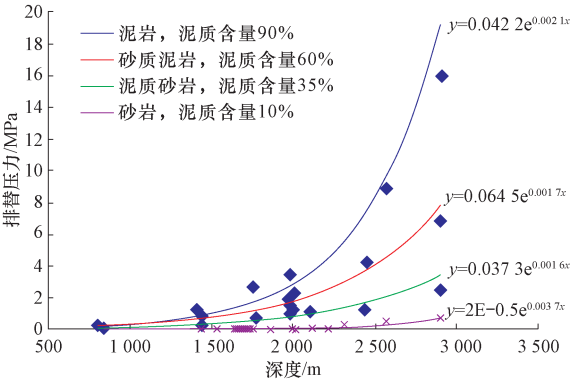


图7 M油田不同泥质含量岩石排替压力与埋深关系
Fig.7 The relationship between displacement pressure and burial depth of rocks with various clay content in M oilfield

3.3 计算储层与断层岩排替压力差

3.3.1 储层排替压力计算

根据储层泥质含量(可由测井解释结论及三维地质模型得到)及储层埋深,基于岩石泥质含量-埋深-排替压力关系图版(图7)插值可以得到储层的排替压力。

3.3.2 断层岩排替压力计算

断层岩的排替压力取决于其泥质含量及成岩程度,而断层岩的成岩程度又受控于断点的断面压力,断层倾角及断层岩压实成岩的时间^[11]。断层静止时,其所受的压力主要为上覆地层的重力,其它力可忽略不计,断层所受压力可分解为垂直于断面的正应力和平行于断面的剪切力(图8)。定义岩石的压实强度为上覆地层静岩压力与该点岩石的成岩压实时间的乘积,则断层岩的排替压力可等效于具有和其相同泥质含量及压实强度的沉积地层的排替压力。

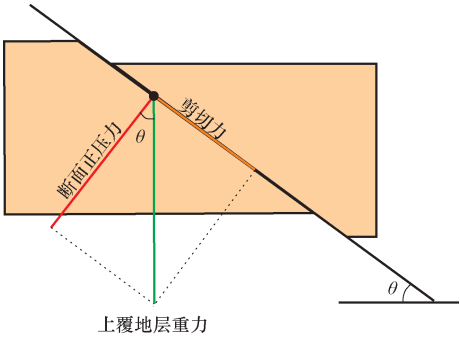


图8 断面正压力示意图
Fig.8 The schematic diagram of fault normal pressure

断层静止后(图9),整条断层的成岩压实时间相等,则断层岩A点的压实强度(D_A)为:

$$D_A = p_A t_A = Z_A(\rho_r - \rho_w)g \cos \theta t_B \quad (1)$$

式中: p_A 为断面所承受的正压力,MPa; Z_A 为断层岩埋深,m; θ 为断层倾角,(°); ρ_r 为上覆地层的平均骨架密度,g/cm³; ρ_w 为地层水密度,g/cm³; $t_A = t_B$,为断层岩压实成岩时间,Ma; g 为重力加速度(9.81 m/s²)。

等效地层C点的压实强度(D_C)为:

$$D_C = p_C t_C = Z_C(\rho_r - \rho_w)g t_C \quad (2)$$

式中: p_C 为与断面同等正压力的静岩压力,MPa; Z_C 为同等压实强度下断层岩对应的地层埋深,m; t_C 为同等压实强度下断层岩对应的地层成岩压实时间,Ma。

若压实强度相同,则 $D_A = D_C$,则

$$Z_A(\rho_r - \rho_w)g \cos \theta t_B = Z_C(\rho_r - \rho_w)g t_C \quad (3)$$

由公式(3)可得

$$Z_A \cos \theta t_B = Z_C t_C \quad (4)$$

式中, Z_A, θ, t_B 已知。

根据前人研究成果(图2),通过选取多个样点,拟合出研究区储层埋深 Z 与其对应的成岩压实时间 t 关系曲线:

$$Z = -0.336 3t^2 + 58.692t - 1.007 3 \quad (5)$$

由公式(4)和公式(5),可得到 Z_C ,结合断层岩SGR值,由岩石泥质含量-埋深-排替压力关系图版(图7)插值得到断层岩的排替压力。

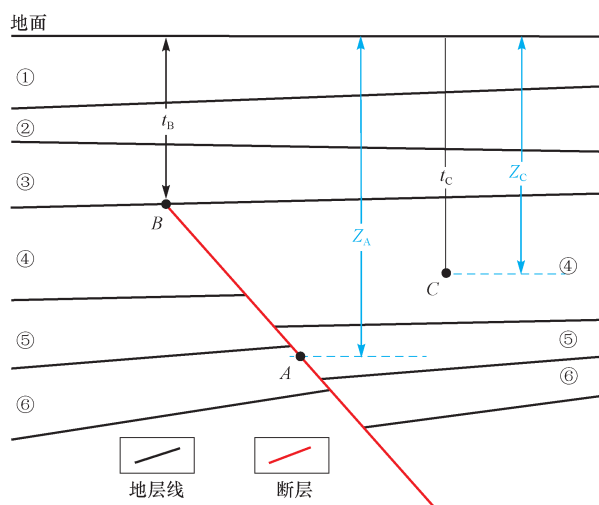


图9 考虑成岩压实时间的排替压力计算模型

Fig. 9 A calculation model of displacement pressure with the timing of diagenesis compaction considered

A. 断层岩中的任意点;B. 断层岩顶灭点;C. 与A点具有同等压实强度下地层中的对应点; Z_A . 断层岩埋深,m; Z_C . 同等压实强度下断层岩对应的地层埋深,m; t_B . 断层岩压实成岩时间,Ma; t_C . 同等压实强度下断层岩对应的地层成岩压实时间,Ma

4 圈闭最大烃柱高度计算

根据储层与断层岩的排替压力差,断层岩能够封闭的最大烃柱高度可由下式得到^[16]:

$$H = \frac{p_d}{1\,000(\rho_w - \rho_o)g} \quad (6)$$

式中: H 为断层岩可封闭的最大烃柱高度,m; p_d 为储层与断层岩的排替压力差,Pa; ρ_w 和 ρ_o 分别为地层条件下水和油的密度,g/cm³,M油田分别为1.003 g/cm³和0.83 g/cm³; g 为重力加速度。

5 应用效果评价

M油田F1,F2,F4三条断层在古近系最为发育,F1在新近系上新统停止活动,断层尖灭点埋深581m,距今时间(t_B)为10.56 Ma;F2和F4两条断层在新近系中新统停止活动,断层尖灭点埋深分别为1140 m和912 m,距今时间(t_B)为22.29 Ma和17.27 Ma。

分别选取井区不同深度储层计算F1,F2及F4断层岩与储层的排替压力差,再计算各断层岩能够封闭的最大烃柱高度,并与实际油藏进行比较,其结果如表1。

M油田油藏分布在E1,E2和E3砂层组,储层埋深1650~2000 m,岩性主要以细砂岩、粉-细砂岩为主,储层泥质含量小于20%,排替压力小于0.2 MPa。断层倾角均大于50°,受其影响,断层岩所承受的断面正压力相当于正常沉积地层埋深600~1200 m的静压力,断层岩的排替压力均小于0.5 MPa。若储断排替压力差为正值(表1中储层1~5,7,8,11,12,13),则断层封闭,封闭程度可根据封闭的烃柱高度进行表征;若储断排替压力差为负值(表1中储层10),则断层无封闭能力,这与M油田的油藏实际情况一致。另外,表中计算的可封闭烃柱高度与实际油柱高度存在一定误差,一方面由于根据排替压力差计算的断层岩可封闭高度,指的是断层岩测试点处能够封闭的烃柱高度,而油藏实际的烃柱高度是根据油气充注量、构造溢出点及断层泄漏点等多种因素共同作用的结果,因此通过排替压力差计算的断层岩可封闭的烃柱高度值应大于或等于实际油藏的烃柱高度;另一方面是地层的沉积压实时间目前很难精确的计算,存在误差,需要下一步做更多的研究去解决。

表 1 M 油田 F1,F2 和 F4 断层岩与储层排替压力计算参数

Table 1 The parameters for calculating displacement pressure of F1,F2 and F4 fault rocks and reservoir in M oilfield

断层	储层 编号	砂层组	储层及断点 埋深/m	断层 倾角/ (°)	断层岩转换 深度/m	断层岩 SGR/%	断层岩排 替压力/ MPa	储层泥质 含量/%	储层 流体 性质	储层排替 压力/ MPa	储断排替 压力差/ MPa	可封闭烃柱 高度/m	实际油柱 高度/m
F1	1	E1	1 690.5	52.48	765.108	49.2	0.189	14.6	油	0.111	0.078	45.96	42.5
	2	E1	1 678.2	52.48	762.477	57.1	0.223	13.4	油	0.083	0.140	82.49	77.9
	3	E2	1 750.0	51.40	786.809	23.7	0.072	10.8	油	0.032	0.040	23.57	20.0
	4	E2	1 775.7	51.40	792.300	24.2	0.075	4.2	油	0.006	0.069	40.66	32.8
	5	E3	1 918.6	51.62	820.11	32.8	0.126	9.2	油	0.022	0.104	61.28	16.4
	6	E3	1 938.6	51.62	824.16	37.8	0.153	12.1	水	0.097	0.056	33.00	0
F2	7	E1	1 677.8	52.4	1 067.33	47.5	0.300	15	油	0.117	0.183	107.83	76.0
	8	E1	1 691.8	52.4	1 071.46	50.6	0.326	17	油	0.164	0.162	95.46	30.7
	9	E2	1 772.5	53.5	1 089.97	12.7	0.024	4.6	油	0.007	0.017	10.02	2.0
	10	E2	1 784.7	53.5	1 093.44	13.1	0.028	11.3	水	0.048	-0.020	0.00	0
	11	E3	1 952.0	53.3	1 191.42	25.8	0.159	13.8	油	0.038	0.121	71.30	3.2
	12	E3	1 864.0	53.3	1 143.57	16.0	0.057	10.1	水	0.023	0.034	20.03	0
F4	13	E1	1 716.0	67.2	785.34	37.5	0.142	7.5	油	0.009	0.133	78.37	12.0
	14	E1	1 756.7	67.8	784.65	23.2	0.069	11.7	水	0.055	0.014	8.25	0
	15	E2	1 803.3	66.9	808.84	16.8	0.037	10.6	水	0.031	0.006	3.54	0

将 M 油田 F1,F2 和 F4 三条断层的断层岩 SGR 值与可封闭烃柱高度作交会图(图 10)。由图可以看出,当 SGR 小于 11% 时,断层岩没有封闭能力;当 SGR 大于 40% 时,断层岩具有很强的封闭能力,且其能封闭的最大烃柱高度不再随 SGR 的值增大而增大;介于两者之间时,根据测试点的包络线,可得 M 油田断层岩 SGR 值与其可封闭的最大烃柱高度有如下线性关系:

$$H_{\max} = 5.57SGR - 61.8 \quad (7)$$

式中:SGR 为断层岩的泥质含量,%;H_{max} 为该 SGR 值下断层岩可封闭的最大烃柱高度,m。

6 结论

1) 当断层以断裂带形式发育时,断层侧向是否封

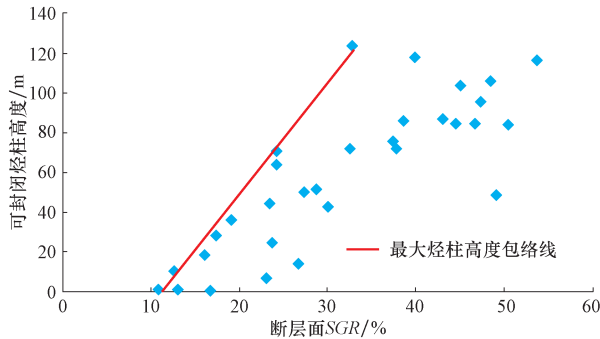


图 10 M 油田断层岩 SGR 与可封闭烃柱高度交汇图
Fig. 10 The cross plot of fault rock SGR and hydrocarbon column height in M oilfield

堵关键在于油气所在盘储层与断层岩排替压力差。若断层岩埋深越大,承压时间越长,泥质含量越高,其排替压力越大,断层的侧向封闭性越好。

2) 断层岩 SGR 值与其侧向封闭性存在定量关系。对于 M 油田,SGR 小于 11% 时,断层没有封闭能力;SGR 大于 40% 时,断层封闭;介于两者之间时,SGR 值与其可支撑的最大烃柱高度有很好的线性关系。

参 考 文 献

[1] Harding T P, Tuminas AC. Structural interpretation of hydrocarbon traps sealed by basement normal blocks and at stable flank of foredeep basin and at rift basin[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(7): 812-840.

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

[3] 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.

Lyu Yanfang, Li Guohui, Wang Xuwen, et al. Quantitative analysis in fault sealing properties[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(3): 39-45.

[4] Bouvier J D, Kaars-Sijpestijn C H, Onyejekwe C C, et al. Three-dimensional seismic interpretation sealing investigations, Nun River Field, Nigeria[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(9): 1379-1414.

[5] Lindsay N G, Murphy F C, Walsh J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces[M]. Alger: International Association of Sedimentologist Special Publication, 1993: 113-123.

[6] Yielding G, Freeman B. Quantitative fault seal prediction[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.

- [7] 刘泽容,信荃麟,邓俊国,等. 断块群油气藏形成机制和构造模式[M]. 北京:石油工业出版社,1998.
Liu Zerong, Xin Quanlin, Deng Junguo, et al. Formation mechanism and tectonic pattern of hydrocarbon reservoirs in fault block groups [M]. Beijing: Petroleum industry press, 1998.
- [8] 吕延防,付广. 断层封闭性研究[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
Lyu Yanfang, Fu Guang. Fault sealing research[M]. Beijing: Petroleum industry press, 2002.
- [9] 吕延防,马福建. 断层封闭性影响因素及类型划分[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2003,33(2):163-166.
Lyu Yanfang, Ma Fujian. Controlling factors and classification of fault seal[J]. Journal of Jinlin University: Earth Science Education. 2003, 33(2):163-166.
- [10] 吕延防,黄劲松,付广,等. 砂泥岩薄互层段中断层封闭性的定量研究[J]. 石油学报,2009,30(6):824-829.
Lyu Yanfang, Huang Jinsong, Fu Guang, et al. Quantitative study on fault sealing ability in sandstone and mudstone thin interbed [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6):824-829.
- [11] 付广,史集建,吕延防. 断层侧向封闭性定量研究方法的改进[J]. 石油学报,2012,33(2):414-418.
Fu Guang, Shi Jijian, Lyu Yanfang. An improvement in quantitatively studying lateral seal of faults[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2):414-418.
- [12] 吕延防,王伟,胡欣蕾,等. 断层侧向封闭性定量评价方法[J]. 石油勘探与开发,2016,43(2):310-316.
Lyu Yanfang, Wang wei, Hu Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing[J]. Petroleum Exploration And Development, 2016, 43(2):310-316.
- [13] Bretan P, Yielding G, Jones H. Using calibrated shale gouge ratio to estimate hydrocarbon column heights[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2003, 87(6):397-413.
- [14] Bretan P, Yielding G. Using buoyancy pressure profiles to assess uncertainty in fault seal calibration[J]. American Association of Petroleum Geologists Hedberg Series, Tulsa, 2005, 2, 151-162.
- [15] Yielding G, Bretan P, Freeman B. Fault seal calibration: a brief review. Geological Society[J], London, 2010, 347, 243-255.
- [16] Jennings J B. Capillary pressure techniques: Application to exploration and development geology[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(9):1196-1209.

(编辑 张玉银)

(上接第1316页)

- [20] 邹才能,张国生,杨智,等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术—兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发,2013,40(4):385-399.
Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4):385-399.
- [21] 邱旭明,钱诗友,于雯泉,等. 苏北盆地“十二五”油气勘探主要成果、新认识及技术进展[J]. 中国石油勘探,2016,21(3):62-73.
Qiu Xuming, Qian Shiyu, Yuwenquan, et al. Main achievements, new understanding and technological progress for oil and gas exploration in North Jiangsu Basin during the 12th Five-Year Plan[J]. Chain Petroleum Exploration, 2016, 21(3):62-73.
- [22] 于雯泉,王路,陆梅娟. 高邮凹陷阜一段致密砂岩孔隙演化差异分析[J]. 复杂油气藏,2017,10(1):9-16.
Yu Wenquan, Wang Lu, Lu Meijuan. Differences analysis for porosity evolution of tight sandstone in the first member of Funing Formation in Gaoyou Sag[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(1):9-16.
- [23] 秦伟军,李娜,付兆辉. 高邮凹陷深层系有效储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质,2015,36(5):788-792.
QinJianjun, Li Na, Fu Zhaohui. Factors controlling formation of effective reservoirs in deep of the Gaoyou Sag[J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(5):788-792.
- [24] 戴金星,裴锡谷,戚厚发. 中国天然气地质学:卷二[M]. 北京:石油工业出版社,1996,66-73.
Dai Jinxing, Pei Xigu, Qi Houfa. Natural gas geology in China: Vol. 2 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996:6-73.
- [25] 代全齐,罗群,张晨. 基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征—以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油学报,2016,37(7):887-897.
Dai Quanqi, Luo Qun, Zhang Chen, et al. Pore structure characteristics of tight oil sandstone reservoir based on a new parameter measured by NMR experiment: a case study of Seventh Member in Yan-chang Formation, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7):887-897.
- [26] 郑可,徐怀民,陈建文,等. 低渗储层可动流体核磁共振研究[J]. 现代地质,2013,27(3):710-718.
Zheng Ke, Xu Huaimin, Chen Jianwen, et al. Movable fluid study of low permeability reservoir with nuclear magnetic resonance technology [J]. Geoscience, 2013, 27(3):710-718.
- [27] 庞雄奇,周新源,董月霞,等. 含油气盆地致密砂岩类油气藏成因机制与资源潜力[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):28-37.
Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Dong Yuexia, et al. Formation mechanism classification of tight sandstone hydrocarbon reservoirs in petroliferous basin and resources appraisal[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5):28-37.
- [28] 侯启军,赵占银,黄志龙. 松辽盆地深盆油成藏门限及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发,2011,38(5):523-529.
Hou Qijun, Zhao Zhanyin, Huang Zhilong. Accumulation threshold and exploration potential of deep basin oil in the Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(5):523-529.

(编辑 张亚雄)