

# 封闭性断层形成机理及研究方法

陆友明

(中国地质大学石油系 湖北武汉 430074)

牛瑞卿

(冀东石油管理局 河北唐山 063004)

**摘要** 综述了封闭性断层的形成条件、形成机理和影响因素以及定性、定量预测的方法,讨论了泥岩(粘土/页岩)涂抹、挤压和地球化学作用对断层封闭性的影响和作用,使用CSP、SGR和SSF方法定量预测断层的封闭性。并应用上述方法研究了巴楚地区色力布亚断裂的封闭性。

**关键词** 断层封闭性 泥岩涂抹 CSP SSF SGR 巴楚地区

在许多油气藏特别是断块油气藏中断层是控制油气分布的重要因素。断层在油气运移和聚集中起着非常重要的作用,断层的封闭性研究是在油田范围内进行油气资源评价和含油气系统划分的重要凭据。断层的封闭与否是现代石油地质学家在石油勘探、开发和生产中急待解决的课题。断层的封闭性与断层附近的储层岩石和围岩物质的毛细管压力及驱替压力有关,如围岩物质的驱替压力与储层岩石驱替压力相似则该断层是不封闭的,如围岩物质的驱替压力比储层岩石的驱替压力大,则认为该断层对一定厚度的油气柱是封闭的,也就是说该断层能捕获一定量的油气。围岩物质对油气捕获能力越强断层的封闭性就越好。任何断层的封闭能力是有一定的限度的,当油气柱的厚度大于或超过了围岩的捕获能力时,多余的油气就会逃逸而出<sup>[1]</sup>。

## 1 封闭性断层的形成机理及其影响因素

孔隙砂岩的断裂作用经历了从单个变形带到变形区带,然后形成滑动面,变形带一般侧向连续<sup>[2]</sup>。封闭性断层的形成与断裂作用密切相关,断裂过程中的一系列与断裂作用直接或间接相关的力学、地球化学作用因素是封闭性断层形成的主要原因。

### 1.1 封闭性断层形成的力学机理

(1)在断裂过程中,由断层上、下盘的相互挤压作用形成断层带,断层带包括变形带、滑动面、断层泥或角砾岩带,同时断层面附近的岩石颗粒受挤压发生破碎以及岩石颗粒重新粒化致使断层面附近的岩石出现下列变化:孔隙喉径减少,孔隙度降低,渗透性能降低,毛细管压力急剧增大等<sup>[3]</sup>。变形带岩石的孔隙度比围岩的孔隙度要小一个数量级,而渗透率却要小3个数量级,毛细管压力却增大10~100倍。接近断层面的断盘岩石的渗透率比原始砂岩要小7个数量级<sup>[2]</sup>。

收稿日期:1999-06-10

(2)在断裂形成过程中具有极高驱替压力值的粘土/页岩层以及岩石破碎形成的断层泥沿断层面涂抹甚至垂直侵入断层面并在断层面上形成一阻止油气运移的封闭性膜。该膜孔隙喉径和渗透性极低,因而阻止油气运移而捕获油气并形成油气藏<sup>[3]</sup>。

(3)断裂形成后使非渗透性粘土/页岩层与渗透性好的砂岩层对接,具高驱替压力值的非渗透性粘土/页岩层(封闭层)成为油气侧向运移的遮挡面从而捕获油气,当年代不同,驱替压力不同的砂岩层在断层两侧对接时,该断层对油气也具有一定的捕获能力<sup>[1]</sup>。

## 1.2 封闭性断层形成的地球化学机理

### 1.2.1 化学沉淀作用对断层封闭性的影响

如断裂在形成后由于变形岩石产生开启性裂缝以及断层角砾没有泥质胶结从而使断层成为地下水运移的通道,如富含矿物质的地下水沿断面向地表渗透,在渗透过程中由于物理环境的改变以及地下水与断面上的物质发生物理化学反应而形成次生矿物<sup>[3]</sup>,如形铁氧化物和  $\text{CaCO}_3$  沉淀物等。所生成矿物堵塞了岩石空隙,使岩石孔隙度减少,渗透率降低,从而使断层面附近的驱替压力值升高并对油气的捕获能力大大增强。

### 1.2.2 重结晶作用对断层封闭性的影响

在断裂过程中发生的挤压及物理化学反应使矿物发生重结晶作用、成岩作用、压溶作用。由重结晶作用和成岩作用所生成的结晶矿物有可能使孔隙度减小,渗透率降低<sup>[5]</sup>。压溶作用释放出的  $\text{CaCO}_3$  沉淀造成孔隙胶结,另外压溶作用的非渗透性残余物质(泥岩、铁质和有机质)也会堵塞孔隙使得岩石的孔隙度减少,渗透率降低<sup>[3]</sup>。

## 2 断层封闭性的影响因素

(1)断层性质 在相同的深度下由于生长断层相对接近松软沉积物面,于是对油气的捕获能力比接近固化沉积物面的沉积后期断层要强得多<sup>[4]</sup>,在相同情况下逆断层比正断层更有可能趋向于封闭<sup>[6,7]</sup>。

(2)时间 有的断层在油气生成时充当暂时性的油气运移遮挡面,但在地质历史时期油气有可能发生渗透而挥发<sup>[6]</sup>,总的来说,断层的封闭性是相对的,任何一个现在看来是封闭的断层经过足够长的地质历史时间后也可能是不封闭的。

(3)埋藏深度 岩石的变形力度随着埋藏深度的增加而增加,同时使得岩石的孔隙度和渗透率大大减少的成岩作用随着深度的增加而加强,当然浅层未固结的粘土/页岩层的涂抹更有可能使断层封闭<sup>[6]</sup>。

(4)页岩涂抹方式 Lindsay 等(1993)提出可能有三种涂抹方式,如:剪切涂抹、侵蚀性涂抹和侵入性涂抹,不同的涂抹方式的涂抹能力是不同的。但一般来说涂抹方式不可能只是其中某一种,而可能是其中两种或三种的组合<sup>[3]</sup>。

## 3 封闭性断层的预测方法

(1)在砂岩层对接时,如果在断层附近的岩石包括围岩和储层岩石的毛细管性质已知的情况下,就能判定该断层是否封闭,如封闭则其捕获的油气柱高度按如下公式求出<sup>[1]</sup>:

$$Z_{\max} = (P_{\text{围岩}} - P_{\text{储层}}) / [(\rho_w - \rho_h) \times 0.443]$$

$Z_{\max}$ 表示捕获的最大油气柱高度, $P_{\text{围岩}}$ 表示断层附近的围岩的驱替压力, $P_{\text{储层}}$ 表示与断层对接的储层岩石的驱替压力, $\rho_w$ 、 $\rho_h$ 分别表示水和油气的密度。

(2)当页岩涂抹而使断层封闭时,断层所能封闭的最大油气柱就由以下公式求得<sup>[8]</sup>:

$$Z_{\max} = 2\gamma / [Rg(\rho_w - \rho_h)]$$

$Z_{\max}$ 表示捕获的最大油气柱高度, $\gamma$ 为油水界面张力, $\rho_w$ 、 $\rho_h$ 分别表示水和油气的密度, $g$ 表示重力加速度, $R$ 表示孔隙喉径。

(3)Weber 等(1978)首先提出页岩涂抹概念,页岩涂抹是页岩层的混合作用和衰减作用在断层带发展过程中形成的,最后沿上、下盘削蚀的砂岩层之间形成一个薄薄的含粘土薄层。在单层页岩错开时含粘土薄层逐渐地削蚀,其页岩的涂抹综合厚度随断距地增大而减小。页岩的空间连续性与页岩的厚度和断距的比值有关。如该含粘土薄层连续的话,则该断层可能是封闭的<sup>[8]</sup>。

(4)Speksnijder(1987)提出用涂抹潜能(CSP:clay smear potential)来表示粘土/页岩在断裂过程中沿断层面涂抹的能力,CSP 表示在断层面上粘土/页岩层在断裂时沿断层面涂抹在一特定点的可能涂沫量<sup>[3,9]</sup>。CSP 随着页岩层的厚度和经过特定点的页岩层数的增加而增加,并随着断距和断层落差的增大而减小。CSP 值的大小反映了断层对油气捕获能力的大小,CSP 值大说明其对油气捕获能力大,但并没有明显的数量对比关系。Jev 等(1993)提出 CSP 大于 30 才有可能使断层封闭<sup>[3]</sup>。

Fulljames 等(1996)简单地表述了 CSP 的计算公式<sup>[3]</sup>:

$$CSP = \Sigma Z^2 / D$$

其中 CSP 表示涂抹潜能, $\Sigma$ 表示求和符号, $Z$ 表示粘土/页岩层的厚度, $D$ 表示特定点到粘土层/页岩层的距离,并取该点到上、下盘粘土/页岩层的最短距离。

(5)Lindsay 等提出用页岩涂抹因素(SSF:shale smear factor)来表示涂抹连续的可能性,并使用如下公式来计算:

$$SSF = D / Z$$

其中 SSF 表示页岩涂抹因素, $D$ 表示断层断距, $Z$ 表示粘土/页岩层的厚度。

SSF 值在上、下盘之间是一个恒定值,并提出只有当 SSF 小于 7 时粘土/页岩层在断层面的涂抹才有可能连续。但 SSF 值的计算只适用于单个涂抹的粘土/页岩层<sup>[7]</sup>。

(6)在厚度较大的非均质岩性层序中要划出每一个粘土/页岩层以及计算它 SSF 的值几乎是不可行的,为此 G. Yielding 等(1997)提出了用页岩断层泥率(SGR:the shale gouge ratio)来代替 SSF,并且提出只有当 SGR 值大于 14%时,粘土/页岩层在断层面的涂抹才有可能连续。并用如下公式表示<sup>[3]</sup>:

$$SGR = \Sigma(Z/D) \times 100\%$$

其中 SGR 表示页岩断层泥率, $\Sigma$ 表示求和符号, $Z$ 表示粘土/页岩层厚度, $D$ 表示断层断距。

该公式还可以推广用以下公式表示<sup>[3]</sup>:

$$SGR = \Sigma(Z \times R/D) \times 100\%$$

其中 SGR 表示页岩断层泥率, $\Sigma$ 表示求和符号, $Z$ 表示储层厚度, $R$ 表示储层中粘土/页岩的百分含量, $D$ 表示断层断距。

#### 4 巴楚地区色力布亚大断裂的封闭性研究

巴楚隆起是塔里木盆地西北部一个在震旦纪基底基础上发展起来的继承性隆起,色力布亚断裂是新生代断裂,倾角  $50^\circ \sim 62^\circ$ ,长约 74 km,该断裂对巴楚隆起油气资源评价和含

油气系统的划分起着重要的作用。在该地区钻井资料、野外露头分析和研究的基础上,利用前文所述方法计算了二叠系、石炭系、泥盆系和志留系中如图 1 所示各点的 CSP 和 SGR 值(表 1)。

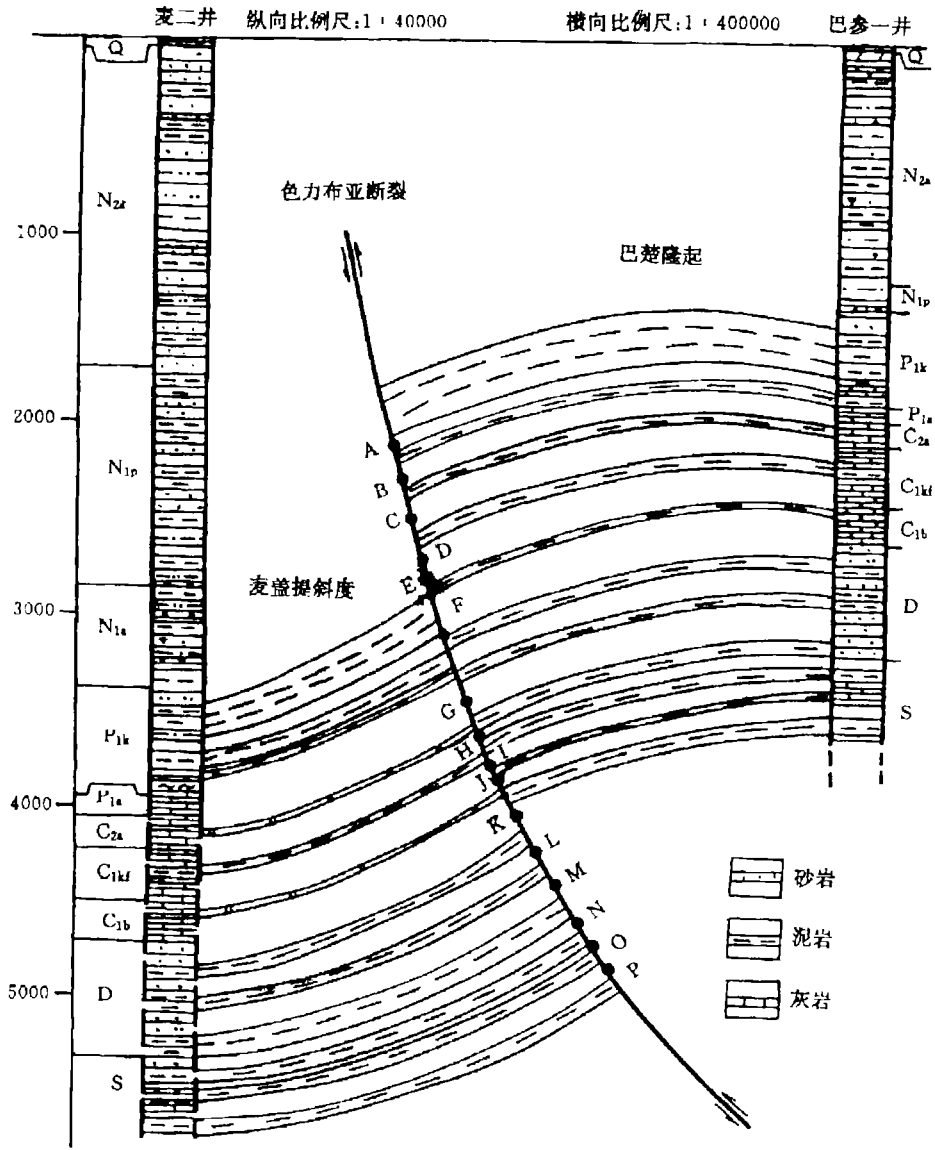


图 1 麦二井—巴参一井岩性构造图

从表 1 中可以看出各点的 CSP 值均大于 30,说明色力布亚大断裂对油气具有一定的捕获能力,除 A、O、P 点外各点的 SGR 值都大于 14%,说明粘土/页页层在 B 点到 N 点的涂抹还是连续的。从而根据前文所述的标准可以初步认定色力布亚断裂是封闭的。

表 1 色力布亚断裂 CSP、SGR 值表

涂抹点	CSP(m)	SGR(%)	涂抹点	CSP(m)	SGR(%)
A	284.70	13.75	I	106.40	25.91
B	131.08	18.04	J	144.04	29.25
C	93.11	20.42	K	79.24	29.00
D	104.99	25.03	L	95.39	31.04
E	139.01	28.45	M	57.89	25.04
F	399.14	34.45	N	63.80	19.16
G	121.87	26.70	O	40.48	11.21
H	62.88	22.42	P	80.00	8.08

5 小 结

断层的封闭性研究一直是油气田特别是断块油气藏在勘探、开发和生产中所重视的问题。本文综述了封闭性断层的形成条件、形成机理和影响因素以及定性、定量预测的方法,讨论了泥岩(粘土/页岩)涂抹、挤压和地球化学作用对断层封闭性的影响和作用 and 如何使用 CSP、SGR 和 SSF 值定量预测断层的封闭性。但定量预测方法只是讨论了泥岩(粘土/页岩)涂抹的作用,没有涉及到挤压作用对岩石颗粒破碎以及地球化学作用对断层封闭性定量预测的影响,同时也没有讨论断面形态、断层活动期次和泥岩(粘土/页岩)涂抹次数对泥岩(粘土/页岩)涂抹空间连续性的影响。

参 考 文 献

1 Smith, D. A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults. AAPG Bulletin, 1966, 50: 363~374.

2 Antonellini, M. and A. Aydin. Effect of faulting flow on porous sandstones: petrophysical properties. AAPG Bulletin, 1994, 78: 355~377.

3 Yielding, G. , Freeman, B. , and T. Needham. D Quantitative Fault seal prediction. AAPG Bulletin, 1997, 81: 897~917.

4 Smith, D. A. Sealing and non-sealing faults in Louisiana Gulf Coast salt basin. AAPG Bulletin, 1980, 64: 145~172.

5 Downey, M. W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations. AAPG Bulletin, 1984, 68: 1752~1763.

6 Knott, S. d. Fault seal analysis in the North Sea. AAPG Bulletin, 1994, 77: 778~792.

7 Harding T. P. and Tuminas, A, C. Interpretation of footwall (lowside) traps sealed by reverse faults and convergent wrench faults. AAPG Bulletin, 1988, 72: 738~757.

8 Gibson, R. G. , Fault-zone seals in siliciclastic strata of the Columbus Basin, Offshore Trinidad. AAPG, Bulletin, 1994, 78: 1372~1385.

9 Bouvier, J. D. , C. H. Kaars-Sijpestijn, D. F. Kluesner, et al Three-dimensional seismic interpretation and sealing investigations , Nun River Field, Nigeria. AAPG Bulletin, 1989, 73: 1379~1414.