

油田断裂封闭性研究

孙宝珊 周新桂 邵兆刚

(中国地质科学院地质力学研究所)

摘要 文中着重阐述了断裂封闭性的研究方法。定性研究以断裂的力学性质和断裂两侧岩性对置情况为重点,同时结合断裂几何学特征、断裂活动强度、断裂形成时期与油气成藏期匹配关系以及断裂与构造应力场关系分析方法。半定量-定量研究新引入排驱压力分析、油藏描述技术-断层封堵量计算和断层泥涂抹计算以及断层封闭性模糊综合评判等新技术,将断裂评判为不封闭、封闭较好和封闭最好三种类型。不封闭的断裂为油气运移的通道,封闭较好和封闭最好的断裂遮挡油气,聚集成藏。

关键词 断裂封闭性 开启性 油气运移

1 断裂封闭性研究的意义

不封闭或封闭性差的断裂(开启性)是油气运移的重要通道之一。对断裂封闭性的研究可揭示油气运移的方向、路线,了解断裂沟通油气源与储层及圈闭的关系,以及成藏期后的开启性断裂切穿含油构造时对油气的再分配的情况。对远离油气源的局部构造和圈闭,尤其要研究断裂开启时对油气的疏导特点。

通常封闭性或封闭性较好的断裂,对油气起遮挡作用并使之聚集成藏。由断裂遮挡形成的油气藏在构造油气藏中占相当大比重。研究断裂上下盘、深浅部位断裂的封闭性能的差异及其封闭油气的高度,对油气勘探有实际意义。

断裂封闭性研究还可以为油气储量计算提供基础资料。区分封闭性断裂与开启性断裂,以决定采用分块计算还是统一计算储量问题,对断裂发育的油气田尤为重要,以便于正确制订开发方案。

2 断裂封闭性研究方法

断裂封闭性问题目前仍处于探索阶段,系统的研究成果和研究方法方面的专著,国内外甚少。作者在中国科学院孙殿卿院士指导下,对断裂封闭性进行了多年探索和研究,认真参阅有关论述^[1-4],并结合塔里木盆地油区断裂封闭性研究成果,扼要阐述断裂封闭性主要的研究方法。

2.1 从断裂力学性质判识断裂的封闭性方法

地质力学将断裂力学性质划分为压性、扭性、压扭性、张性和张扭性。各种类型断裂的封闭性能不同,从定性的角度,通常认为张性、张扭性断层是开启的,为油气运移的通道。张性断裂如果产生细泥,裂隙被粘土涂抹把裂隙堵住了,对油气聚集也还是有利的;而压性、压扭性断裂则容易形成封闭性断层。封闭性断裂储油最好,扭压性断裂在转弯处对油气聚集有利;发育在帚状构造型式中的局部构造上的逆断层对找油有利,并对油气起封闭作用;局部构造上的放射状断裂,对油气起破坏作用。需指出的是断裂力学性质可能发生转化,因此,研究断裂的力学性质,可以判识断裂的封闭性。

2.2 断层面两侧对置的岩性条件分析法

这种分析法对定性判识断裂封闭性相当有效。当断面两侧为渗透层与非渗透层接触时,通常认为该断层是封闭的,但要注意,沿断裂延伸方向两侧渗透层与非渗透层接触情况是有变化的,断裂封闭性也会发生变化。在地表可直接观察断裂两侧的岩性情况,但在覆盖区就要对比断裂两侧钻井资料、地震速度资料、泥岩指数和砂岩指数。

2.3 断层带及其两侧岩层的排驱压力对比法

这一方法是由定性向半定量-定量研究的转化。油气在岩石中运移主要是要克服油气在岩石毛细管中运移的阻力。那么,分析断裂两侧对置岩层及断裂带内岩石的毛管阻力大小就成为研究断裂控油作用的关键。故此,引入排驱压力这一概念来分析断裂的封闭性,并应用于塔北油区断裂封闭与开启的判识。

2.3.1 建立理论模型 排驱压力一般指非润湿相进入岩样最大喉道半径的毛管压力,毛管压力理论公式

$$p_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}$$

式中: p_c 为毛管压力; σ 为流体表面张力; θ 为流体润湿接触角, r 为喉道半径。

可以看出,喉道半径愈小,毛管压力愈大,油气愈难进入岩石喉道;反之, r 愈大,毛管压力就愈小,油滴易克服其阻力进入岩石孔喉中实现运移。因此,排驱压力是实现油气二次运移所需的最小驱动力,可作为研究油气二次运移和封闭能力的主要指标。

理论研究证明,在亲水岩石内,断面两侧岩层和断面物质的排驱压力,决定断层是否封闭。如果断面两侧岩层的排驱压力相同或接近,则此处断层开放;反之,如果断面两侧岩层的排驱压力悬殊,则该处断层是封闭的,且排驱压力相差愈大,封闭性就愈好。如果断面物质的排驱压力大于断面两侧岩层的排驱压力,断层也是封闭的,反之就不封闭。同时应该注意,断层封闭也不是一成不变的(图1)。

排驱压力大小的差异直接影响断层两旁油气柱的高度,是控制构造圈闭油气流充满率的关键,在油气勘探中必须重视断层封闭条件和圈闭能力的研究。模型中 H_{\max} 、 h_{\max} 分别为排驱压力差和 A 点毛管压力所控制的最大油气柱高度。据毛管压力理论

$$p_c = \Delta\rho gh$$
$$H_{\max} = \frac{(p'_d - p''_d)}{(p_w - p_h)0.433}$$
$$h_{\max} = \frac{p_{cA}}{(p_w - p_h)0.433}$$

其中 p'_d 、 p''_d 为研究对象对应的排驱压力(0.1Pa); p_{cA} 为断面 A 点处毛管压力(0.1Pa); p_w 、 p_h 分

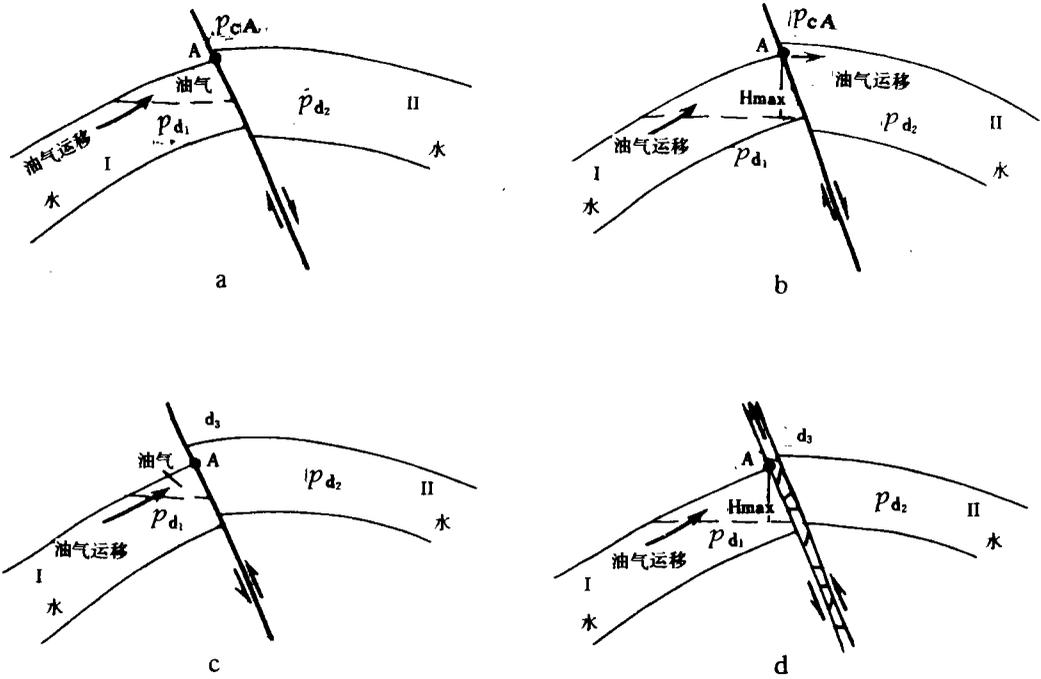


图 1 断面两侧岩层和断面物质排驱压力差异引起断层封闭与开启理论模型(据陈立官修改)

Fig. 1 Theoretical model demonstrating fault closure and opening caused by exhausting and driving pressure difference in both side rocks of the fault and materials in the fault

P_{d1} · 储层 I 排驱压力; P_{d2} · 储层 II 排驱压力; P_{d3} · 断裂带排驱压力; P_{cA} · A 点处毛管压力

别为油层中水和油气密度(10^{-3}kg/m^3); 0.433 是毛管压力、流体密度及高度导出的常数。

当储层 I 的排驱压力小于储层 II 的排驱压力时, 断层该处是封闭的; 断层下盘油气向高部位移聚成藏(图 1a), 但当油气藏达到一定规模, 由排驱压力差控制的最大油气藏高度大于或等于 A 点处毛管压力所控制的油气最大高度时, 油气将通过断面向储层 II 作横向运移, 此时, 断层就不起封闭作用了(图 1b)。如果断面物质的排驱压力分别大于储层 I 和 II 的排驱压力, 那么, 断层处于封闭状态(图 1c); 如果是图 1d 的情况, 油气柱达到一定高度时断面则显示开放性, 油气将沿断面作垂向运移进入上部有利层位。实际工作中会碰到各种情况的断裂, 可根据实际情况建立相应模型。

2.3.2 排驱压力的求取及处理方法 理想毛管压力曲线呈三段式, 中间平缓直线代表非润湿相(汞)进入阶段, 延长直线段与喉道半径纵坐标有一交点, 该点沿水平轴在压力纵坐标上对应的数值即为所求的排驱压力。在实际工作中, 毛管压力曲线三段区不明显, 可采用突破压力 p_{c10} 近似代替。突破压力即非润湿相进入岩样, 当饱和度达 10% 时所附加的压力值。

2.3.3 建立断裂封闭性评判标准 (1)分析断裂封闭性以 p_{c10} 为主要技术指标,参考 p_{c30} 、 p_{c50} 。(2)依研究区盖层排驱压力值作封闭下限;(3)确定研究区流体流动喉道半径下限;(4)采取研究区孔隙度评价对岩样孔隙度考评。

2.3.4 具体评判每条断裂的封闭性 将断裂带与两侧地层排驱压力值比较,按封闭性评判标准分析与油气关系。笔者运用排驱压力分析方法确定塔北断层的封闭性及能力大小是有效的。

2.4 断裂活动期与油气移聚成藏期时序匹配关系分析法

(1)早于成藏期的老断裂。一般情况下已愈合停止活动,通常被认为是封闭性的;

(2)与成藏期同时的断裂,尤其是同生正断层,早期是开启性的,而发育晚期则是封闭性的;

(3)在主要成藏期之后产生并继续活动的断裂具开启性;

(4)油田内现今仍然活动的断裂是开启性的。

2.5 断裂活动强度估定法 活动强度大不易封闭油气,强度小可封闭油气。

2.6 断裂产状、断裂两侧岩层产状对置状态与断裂封闭性相关分析法 既使同时期同性质的断裂,由于产状和断裂两侧岩层对置情况不同,其封闭性亦不同。倾角随埋深变化,其封闭性可由下式计算出。

$$P = \frac{H(\rho - \rho_w)}{10} \cos\theta$$

式中: P 为断面上所承受的压力; ρ 、 ρ_w 为岩石和地层中水的密度; θ 为断裂倾角; H 为断点深度。

由上式可知, P 的大小主要取决于断裂倾角 θ 。 θ 越小,作用于断面裂缝壁上的压应力越大;当 P 大于裂缝壁的抗压强度时,张性断面裂缝将闭合,则逐渐形成封闭;压、压扭及扭性断裂面将被挤压的更紧闭,封闭性增强。断裂两侧岩层呈同向倾斜或反向屋脊对置,则断裂面本身具很高的渗透性,封闭能力较差;若断裂两侧岩层或一侧岩层与断裂倾向相反,则断裂封闭性较好。

2.7 构造应力场分析法 重点研究断裂走向与成藏期和现今应力场之关系。

2.8 分析断裂脉体充填特点,判断断裂封闭性 无脉体充填的张、张扭性断裂,常是开启性的;断裂全被充填则封闭性好,部分充填,则封闭性差。

2.9 采用油藏描述技术方法对断裂封闭性进行量化研究 当构造靠断裂遮挡,能否形成圈闭则取决于断裂的横向封闭性。正断层的封闭性很大程度上取决于断层两侧岩性接触关系。当储层与断层另一侧致密泥岩接触时,其封闭的可能性较大;如果是部分接触,则储层顶部的封闭性最为重要。同时,在正断层形成过程中,当储层附近具有厚层塑性层时,在断层上可形成粘土涂抹断层泥,亦对油气有封闭作用。

目前采用两种断裂封堵量计算方法:(1)与断层两侧地层接触相关的断裂封堵量计算方法。利用地震资料确定断层上下盘地层在断面上的形态,沿断面给出两侧岩性序列,根据岩性变化对储层盘、封堵盘分别给出按深度排列的储集系数和封堵系数序列,再将同一深度两系数序列的对应值相乘即得封堵序列,进而算出全断层的封堵量。关于封堵储集系数的确定,应严格评估某地层的储盖性,即考虑到岩性孔隙度,渗透率等因素。单独选用孔隙度或泥质含量为依据,只能粗略给出储层特性。在塔北油区可选用砂泥岩孔隙度作为储盖评价依

据,选用:

$$\text{储集系数: } RC = \begin{cases} 0.0 & POR \leq 10.0 \\ POR/5.0 & POR > 10.0 \end{cases}$$

$$\text{封堵系数: } SC = \begin{cases} 4.0 & POR \leq 5.0 \\ 4.0 - 3.2 \times (POR/5.0 - 1) & 5.0 < POR \leq 11.25 \\ 0.0 & POR > 11.25 \end{cases}$$

最后,计算和编制封堵评价图,以反映断裂上、下盘储层被泥岩、页岩封闭的性能。(2)与断层泥涂抹相关的封堵量算法。在正断层形成过程中,如果储层附近具有未固结的厚层塑性层时,在断层面可形成粘土涂抹断层泥,从而封闭油气。J. D. Bourrier 等(1989)进一步提出 CSP 值的概念。计算方法如下:

$$CSP(X, Y) = \int_{D_0(x, y)}^{D_m(x, y)} \frac{V_{th} \cdot D}{e + D^2} dD$$

其中 $CSP(X, Y)$ 为点 (X, Y) 处断层泥的相对厚度; $D_0(X, Y)$ 、 $D_m(X, Y)$ 分别为点 (X, Y) 处滑过该点的泥质层的最大、最小位移; V_{th} 最小、最大位移范围内的任一层泥质含量; D 为位移(总断距)。

上述 CSP 值代表断面上任一点断层泥的相对厚度,反映了封堵系数的相对大小,将它与储集系数矩阵相乘,得到由断层泥控制的封堵量矩阵。作者根据岩性封堵和泥质涂抹封堵评价方法,对达里亚断层三叠系砂岩的封堵情况进行了计算,作出上下盘岩性封堵及泥质涂抹评价图,评价了油气运移、聚集与断裂封闭性的关系。

2.10 断层封闭性模糊综合评判法^[4] 上述研究只是从影响断裂封闭性的单因素去考评,具有一定的局限性。为此,以地震、地质、测井资料为基础,从分析影响断层封闭性的主要因素入手,采用模糊综合评判方法,对研究区主要断层的封闭性进行评判更趋于科学性。现结合塔北油区介绍其原理、方法及应用。

(1)断层封闭性模糊综合评价原理。考虑了与断层封闭性相关的各个因素,对其进行综合评价。评价的着眼点是所要考虑的各个相关因素,即断层力学性质、岩性配置关系、断层活动强度等。

(2)综合评判的数学模型。在断层封闭性模糊综合评判中考虑的主要因素集合为:

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_7\}$$

式中 U_1 —断层力学性质; U_2 —岩性接触配置关系; U_3 —断层活动期与油气运移期匹配关系; U_4 —与现今应力场方向关系; U_5 —断层产状; U_6 —断层活动强度或现今活动性; U_7 —与岩层产状配置关系。决择评语集合为:

$$V = \{\text{断层 } 1, \text{断层 } 2, \dots, \text{断层 } m\}$$

设单因素评判矩阵 $R = \{r_{ij}\}_{m \times n}$, r_{ij} 表示 i 因素对第 j 个评语的隶属度,又设各因素的权重 $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$, 则模糊综合评判方程为:

$$B = AOR$$

评判结果为 $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$

(3)建立单因素评判矩阵 R 及权重向量 A 。根据专家知识,结合研究区实际特点,确定各评价因素的隶属函数(表 1)。依据上述标准,建立区内断裂封闭性单因素评判矩阵 R (表

略)。本文采用专家调查法,确定权重向量 A 为: $A=[0.21, 0.21, 0.18, 0.15, 0.13, 0.07, 0.05]$ 。

表1 塔北断层封闭性模糊综合评判隶属度

Table 1 Grade of fault closing in the north Tarim basin by Fuzzy complex evaluation

影响因素	评价标志	隶属度	影响因素	隶属度	
断裂力学性质	压性断裂	0.9	与现今主压应力场方向关系	断裂走向与主压应力场方向一致	0
	压扭性断裂	1.0		断裂走向与主压应力场方向垂直	1.0
	扭性断裂	0.8		断裂走向与主压应力场方向斜交	0.5
	张性断裂	0	断层产状	$\theta < 30^\circ$	1.0
	张扭性断裂	0.5		$30^\circ < \theta < 45^\circ$	0.8
	同生正断层	0.8		$45^\circ < \theta < 60^\circ$	0.6
	同生逆断层	0.9		$60^\circ < \theta < 80^\circ$	0.4
岩性配置关系	断层两盘砂泥岩与变质岩对接	1.0	断裂活动强度	$80^\circ < \theta < 90^\circ$	0
	断层两盘碳酸盐岩对接	0.7		断裂上部活动速率 (m/Ma) < 3 m/Ma	1.0
	断层两盘砂岩与碳酸盐岩对接	1.0		断裂上部活动速率 > 3 m/Ma	0.5
	断层两盘砂岩与泥岩对接	1.0		断裂下部活动速率 < 4 m/Ma	1.0
	断层两盘同时代砂岩对接	0		断裂下部活动速率 > 4 m/Ma	0.5
	断层两盘不同时代砂岩对接	0.5		与岩层产状配置关系	顺向正断层
断裂活动期与油气运移期匹配关系	断裂在油气运移期活动	0.3	反向正断层		0.8
	断裂在油气运移期停止活动	1.0	顺向逆断层		0.8
	断裂在油气运移后仍活动	0	反向逆断层		0.9
注:盆缘断裂以“现今活动性”代替断裂活动强度进行计算			现今活动性	历史地震(活断裂)	0.5
				地表油气苗、泉水等	0

(4)计算方法及评判结果。采用 $M(\cdot, +)$ 模型计算 $B=AOR$,或采用 $M(\cdot, V)$ 和 $M(\wedge, V)$ 模型计算。结果表明,塔北地区14条断裂封闭性最好,阈值在0.960—0.769间;封闭性较好的断裂阈值0.754—0.632;不封闭或封闭较差断裂,阈值 < 0.632。封闭性最好和较好的断裂对油气起遮挡聚集作用,封闭性差的断裂具开启性,是油气运移的通道。

3 断裂封闭性评价结果的检验

- (1)断裂两盘流体性质截然不同,油水界面标高不同,则断裂是封闭性的。
- (2)静态 $P-H$ 曲线分析。断裂两侧各井原始地层压力处于同一压力梯度直线上,即属于同一压力系统,断裂是开启的。
- (3)动态 $P-t$ 曲线分析。断裂两侧各井生产压降规律一致时,其断裂是开启的。
- (4)探边测试方法。如油藏边界与断裂位置一致,则说明断裂是封闭的。
- (5)沿断裂有大量油气苗分布,其断裂曾经是开启性的。
- (6)钻井过程中沿断裂有大量泥浆漏失,可认为断裂是开放的。

参 考 文 献

- 1 李四光,地质力学概论。北京:科学出版社,1973。
- 2 陈立官,油气田地下地质学。北京:地质出版社,1982。
- 3 刘泽容等,油藏评价及预测。北京:石油工业出版社,1993。
- 4 邓俊国、刘泽容等,断块油藏中的断层封闭性模糊综合评判。地质论评,1993,39(增刊)。

RESEARCH ON FAULT CLOSURE OF OIL

Sun Baoshan Zhou Xingui and Shao Zhaogang

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Abstract This paper discusses methods for fault closure studies and its relation to oil-gas migration and accumulation. Qualitative researches focus on the mechanical properties of faults, disposition of rock types on the two sides of a fault surface for the closure fault geometry, fault activity, and its relation to oil-gas trap, as well as the relationship between faulting and tectonic stress field. The Semi-full quantitative research includes such methods as entry pressure measurement, reservoir description, fault closure grading, fault-gouge closure grading and comprehensive fuzzy evaluation of fault closures, etc.

Key words fault closure, opening, oil-gas migration

第一作者简介

孙宝珊,男,57岁,研究员。1960年毕业于长春地质学院,主要从事地质力学和石油地质构造研究。通讯地址:北京市海淀区中央民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081。