

断层开启与封闭的定量分析^{*}

童亨茂

(石油大学地球科学系, 北京 102200)

断层的开启与封闭性与断面正压力和流体压力的耦合关系有关, 据此可建立断层开启与封闭的定量数学模型, 并可计算断层的封闭系数。根据模型, 影响断层开启和封闭的因素主要有构造应力, 断层的走向、倾角、深度, 两盘岩性, 流体压力等。研究表明, 随着异常流体压力系数的增大、构造挤压力的减小、岩石泊松比的减小, 断层的封闭性都会降低。另外, 断层倾角和深度对断层封闭性的影响受构造应力性质控制, 在张性盆地中, 断层的封闭性随着深度的增加而增加, 随倾角增大而减小; 在压性盆地中则相反。断层走向对断层封闭性的影响随差异应力增大而增强。

关键词 断层 封闭 开启 应力 流体压力系数

作者简介 童亨茂 男 31 岁 讲师 构造地质学

油气藏的形成和破坏与断层的关系密切, 因此, 断层开启和封闭的研究对油气勘探和油气藏评价意义重大。目前已从以下几个方面进行了研究, (1) 从断层两盘砂泥岩对接的概率进行分析^[1]; (2) 从断层的发育深度和断层的倾角来分析^[1]; (3) 从断层的性质来分析^[2]等。上面几方面研究基本上处于定性到半定量的研究阶段, 而且有一定的局限性, 主要表现在: (1) 忽略了很重要的因素——构造作用(断层的封闭性与构造应力的关系) 和流体作用; (2) 断层的封闭性随倾角和深度的增大而增大的认识不完全正确。本文从含油气盆地的应力状态出发, 在构造力学与流体力学相结合的基础上, 推导出断层封闭与开启的定量关系式, 提出了断层封闭系数的概念, 并详细分析了各种因素对断层开启和封闭的影响方式和程度。

1 应力状态

地壳内每一点的应力状态都可以由水平方向和竖直方向的主应力表示, 岩体的变形是这些应力联合作用的结果, 最主要的力是构造力和重力。构造变形时, 这两种力是同时作用在岩体上的, 没有一种是可以忽略的。重力引起的应力和构造应力差不多是同一数量级。

重力作用下的最大主应力 σ_{gv} 是垂向的, 在岩石非线性弹性变形的假设条件下, 可求得竖直方向和水平方向的重力应力分别为^[3]

$$\sigma_{gv} = \rho_s gh \tag{1}$$

$$\sigma_{gh} = \sigma_{gv} \left(\frac{\mu}{1 - \mu} \right)^{1/n} \tag{2}$$

^{*} 中国石油天然气总公司“九五”重点理论研究项目——“成藏动力学”

式中 ρ_s 为上覆岩石的平均密度; h 为深度; g 为重力加速度; μ 为泊松比; n 为与非线性压缩有关的常数, 一般岩石采用 0.67。

构造作用引起的构造应力可以有很大的变化, 在张性盆地、压性盆地以及在盆地演化的不同阶段都有很大的变化, 但构造应力在盆地中基本上是近水平的。

我们所说的地壳内的应力状态就是各种应力叠加后得到的总应力状态, 是一切作用在该点上所有作用力影响的总和

$$\sigma_{h1} = \sigma_{gv} \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1/n} + \sigma_{ta} \quad (3)$$

$$\sigma_{h2} = \sigma_{gv} \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1/n} + \sigma_{ti} \quad (4)$$

σ_{h1} , σ_{h2} 分别为水平方向的两个总应力; σ_{ta} , σ_{ti} 分别为水平方向的构造应力。这样 σ_{h1} , σ_{h2} , σ_{gv} 代表含油气盆地一个点的三个主应力, 但大小和排列顺序由盆地的性质、活动情况和深度决定。

2 定量数学模型与封闭系数

断层可以成为油气运移的通道, 也可以成为油气聚集的遮挡边界。断层开启与封闭主要取决于断层面上正压力和孔隙压力的关系。当超过一定的深度时, 张应力就不可能存在^[4], 即使张性盆地也是如此。在张应力不存在的情况下, 断层保持开启必须有流体压力的作用。当流体压力大于或等于断面上的正压应力时, 断层就可以张开而成为油气运移的通道, 否则就成为油气的遮挡边界。根据前面的分析, 在盆地内垂向主应力为重力应力, 水平方向的主应力为重力应力和构造应力的代数和[见式(3)和式(4)]。根据计算, 倾角为 θ 、走向与构造主压应力夹角为 φ 的断层在断面上的正压力 σ_n 为

$$\sigma_n = \left\{ \rho_s g h \left[(1 + \cos 2\theta) + (1 - \cos 2\theta) \left(\frac{\mu}{1-\mu} \right)^{1/n} \right] + \left(\frac{\sigma_{ta} + \sigma_{ti}}{2} - \frac{\sigma_{ta} - \sigma_{ti}}{2} \cos 2\varphi \right) (1 - \cos 2\theta) \right\} / 2 \quad (5)$$

流体压力 P 为

$$P = f \rho_w g h \quad (6)$$

式中 f 为异常压力系数; ρ_w 为水的密度; $\rho_w g h$ 为静水压力。当流体压力大于断面上的正压力, 即 $P > \sigma_n$ 时, 断面就可以张开成为油气运移的通道。这样就可以根据流体压力 P 和断面上正压力 σ_n 的关系来确定断层的张开与封闭, 为此提出断层封闭系数的概念(I_f)

$$I_f = \frac{\sigma_n}{P} \quad (7)$$

当 $I_f > 1.0$ 时, 断层封闭, 值越大, 封闭程度越高; 当 $I_f < 1.0$ 时, 断层开启, 值越小, 开启程度越大。

3 影响因素分析

3.1 上覆岩层的平均密度

不同盆地相同深度上覆岩层的平均密度一般没有多大的区别, 具体分析时取一统一的平均值(下列图中平均密度取 2.45 g/cm^3) 即可, 因此基本上不产生影响。

3.2 深度

深度因素与其他因素不一致, 它在影响断面压力的同时, 也改变流体压力[见式(5), (6)]。

在不考虑构造应力的情况下, σ_n 和 P 都随深度 h 线性增加, 断层封闭系数 I_f 为常数(图 1 曲线 b)。对于挤压性盆地, 随着深度的增加, 封闭系数反而减小(图 1 曲线 c, d, e); 而对于伸展性盆地, 断层封闭系数则随深度增加而增加(图 1 曲线 a)。笼统地说随深度的增加, 断层封闭性增加的观点是不正确的, 应针对具体情况加以分析。

3.3 断层的走向与倾角

构造应力(差应力)影响断层走向的封闭性变化, 差应力越大, 断层走向封闭性的变化就越大; 差应力越小, 断层走向封闭性的变化就越小

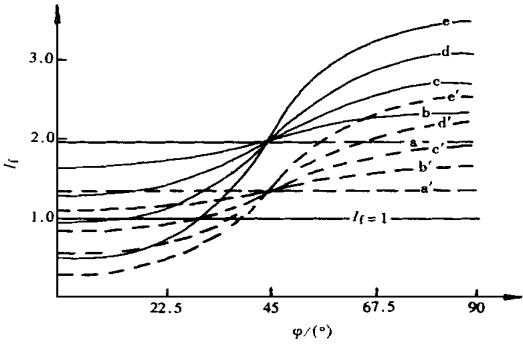


图 2 断层走向与断层封闭性关系图

实线 a, b, c, d, e 的差应力分别为 0, 5, 10, 15, 20 MPa, 其中 $\sigma_{11} = 0, f = 1.0, \mu = 0.3, \theta = 60^\circ, h = 2000 \text{ m}$; 虚线 a', b', c', d', e' 的差应力分别为 0, 5, 10, 15, 20 MPa, 其中 $f = 1.5$, 其他同上

3.4 构造应力的大小和方向

构造应力对断层封闭性的影响主要表现为两项, 一项为平均构造应力, 另一项为差应力。

平均构造应力与盆地的性质和活动强度相关。挤压性盆地, 在 3 000 m 的深度, 最大主压应力可达到 150 MPa, 平均主压应力也可达 100 MPa; 而张性盆地, 在同样深度, 构造张应力一般为 5 MPa 到 20 MPa。这样在其他条件相同的情况下, 压性盆地断层的封闭系数比张性盆地要大得多(图 3)。借此也可说明压性盆地比张性盆地更容易形成异常超压。

差应力主要与盆地的活动性有关, 也与盆地的性质有一定的关系。它主要使盆地内不同走向的断层的封闭性表现为各向异性, 差

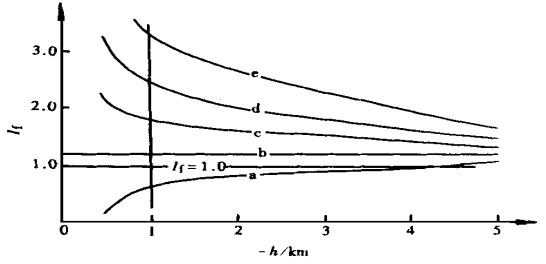


图 1 断层封闭性与深度关系图

曲线 a, b, c, d, e 的构造应力分别为 -15, 0, 15, 30, 60 MPa (张应力为负), 其中 $\sigma_{11} = \sigma_{33}, f = 1.5, \mu = 0.3, \theta = 45^\circ$

(图 2)。因此, 无论是压性盆地还是张性盆地, 在盆地构造活动期, 构造差应力较大, 断层的走向会对断层的封闭性产生较大的影响; 若存在较大的差应力(大于 10 MPa), 就可使断层沿走向有的表现为开启, 有的表现为封闭(图 2); 盆地稳定期, 构造差应力较小或为零, 断层的封闭性就不会因走向而发生较大的变化。

断层的倾角与断层的封闭性关系密切(图 3): 张性盆地, 断层的封闭性随倾角的减小而增大; 挤压性盆地, 断层的封闭性随着倾角的减小而减小; 扭性盆地介于压性盆地和张性盆地之间。

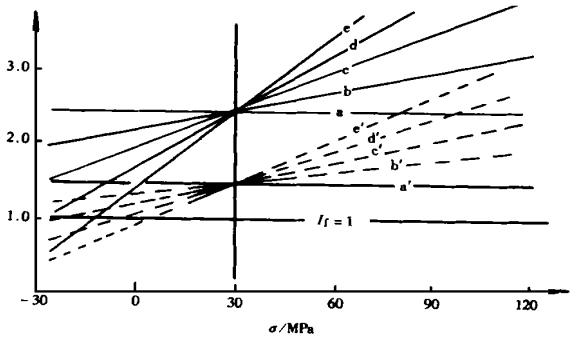


图 3 构造应力和断层倾角与断层封闭性的关系

实线 a, b, c, d, e 的断层倾角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ,$

90° , 其中 $\varphi = 90^\circ, f = 1.0, \mu = 0.3, h = 3000 \text{ m}$

虚线 a', b', c', d', e' 的断层倾角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,

其中 $f = 1.6$, 其他同上

应力越大,各向异性程度就越高。一般来说,扭性盆地差应力最大,压性盆地其次,张性盆地最小,相应的断层封闭性的各向异性程度也有同样的次序。

值得注意的是,盆地的构造活动性是可以改变的,如渤海湾盆地,第三纪为伸展构造作用,而现今应力场则表现为扭动构造作用。因此同一断层的封闭性在地质历史期间可以发生很大的变化。

3.5 岩石物性

岩石物性对断层封闭性的影响表现为两个方面:一是不同岩石(如砂岩和泥岩)力学性质的差异(变形不一致);二是断层作用导致物质迁移出现渗透率的差异。这两方面对断层的封闭性都有非常大的影响。

断层两盘由于岩性不同、岩石力学性质的差异产生对断层封闭性的影响可以从式(5)右端第一项因子 $(\frac{\mu}{1-\mu})^{1/n}$ 定量计算。在不考虑构造应力的情况下,成岩作用很好的砂岩 μ 一般为 0.25 左右,而含水的泥岩 μ 可接近 0.5,对应的 $(\frac{\mu}{1-\mu})^{1/n}$ 值分别为 0.45 和 1.0,这样,在其他条件一致的情况下,根据式(6)两盘是泥岩情况下断层的封闭系数比都为砂岩要大很多。由此充分说明,岩性对断层的封闭性可以产生巨大的影响。

断层由于两盘的相对位移使得不同渗透率的各种岩层对接在一起,这种对接状况的差异可以造成断层侧向封闭性的巨大差异。如果是砂岩对接,而断层面上没有塑性的断层泥,则断层不造成侧向封堵;若砂岩和泥岩对接,则很容易形成侧向封堵。另外在断层的剪切作用下泥岩在一定范围内可出现塑性变形,从而造成侧向封堵;而脆性岩石由于断层的剪切破碎作用则使断裂带成为一高渗流带^[5]。

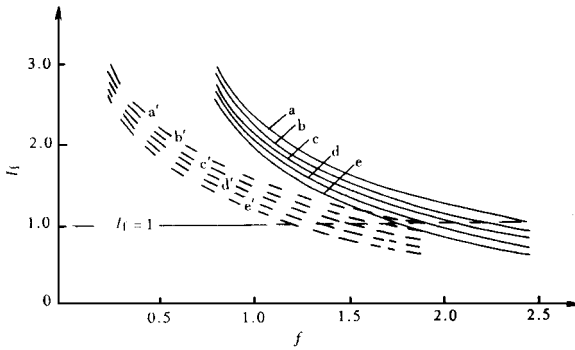


图 4 流体压力与断层封闭性的关系

实线 a, b, c, d, e 的断层倾角分别为 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 其中 $\sigma_{1a} = \sigma_{1c} = 0, \mu = 0.3$

虚线 a', b', c', d', e' 的断层倾角分别为 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 其中 $\sigma_{1a} = \sigma_{1c} = 0.25\sigma_{gv}, \mu = 0.3$

3.6 流体压力(异常压力系数)

由于在盆地内超过一定的深度时,张应力就不可能存在^[4],即使张性盆地也是如此。断层要保持开启必须有流体压力的支撑,因此在一定程度上流体压力决定着断层的开启与封闭。流体压力可以用异常压力系数 f 来描述,深度小于 2 000 m 时,一般是正常的流体压力(静水压力),压力系数为 1.0;异常压力常常出现在 2 000~3 500 m 的深度^[4],主要表现为超压,即压力系数大于 1.0,有些情况下,可达 2.45 左右。在高异常超压存在的情况下断层容易出现开启状态(图 4)。

从图 2, 3, 4 都可以看出,断层处于张开区间的范围很小,说明断层的封闭是普遍的,而断层的开启是相对的和局限的。这一结论为渤海湾盆地勘探开发的实践所证实。

4 断层封闭性的分析步骤

断层封闭性的分析步骤可概括为以下几个方面:(1)断层的几何要素的确定,包括断层的走向,断层的剖面形态;(2)不同演化阶段的构造应力场的定量模拟计算;(3)断层两侧岩性分

布的确定、物性参数的测量; (4) 目的层流体压力系数的确定。

现今构造应力场的数值模拟研究方法目前已相对比较成熟, 已进入量化应用阶段; 古应力场研究存在较大的难度, 但最近几年也获得了较大的进展, 已在有些地区获得半定量-定量的研究结果^{*}。现今流体压力资料比较容易获得, 而古流体压力恢复目前还处于探索阶段。

由于古应力场和古流体压力场研究手段的限制, 根据本文模型对前新生代断层封闭性的研究精度有限, 只能获得定性到半定量的结果, 而新生代特别是晚第三纪以后, 在资料比较好的条件下, 则可获得较好的结果。

5 应用举例

5.1 胜金口油田

胜金口油田位于吐哈盆地台北凹陷南端的火焰山构造带, 圈闭为一断展背斜^{**} (图5), 距生油凹陷中心约40 km。如何实现这种较长距离的水平运移呢? 我们的解释

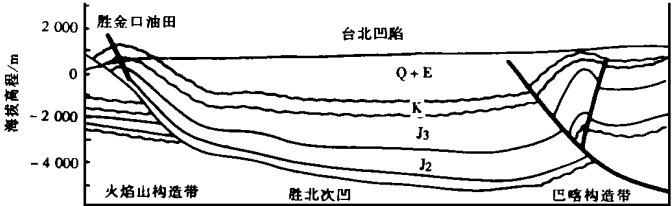


图5 台北凹陷南北向构造剖面(T92-199, 200测线)

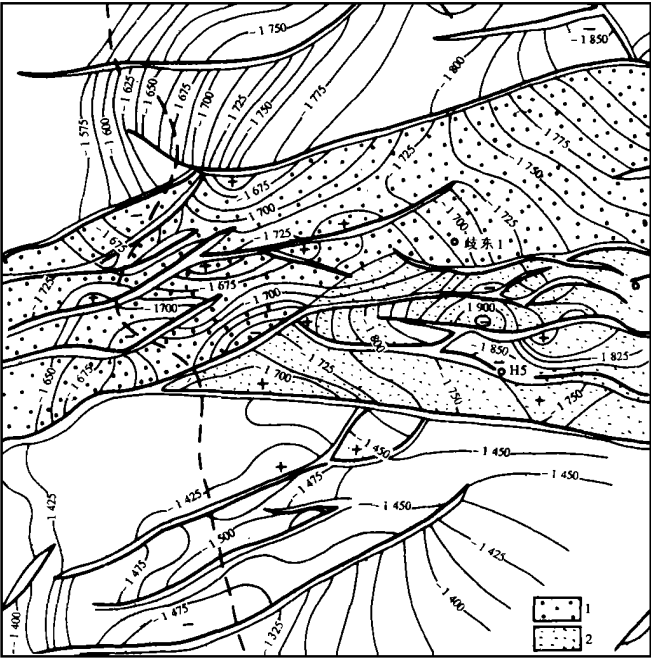


图6 歧东构造明化镇组二段断层构造图

1—受北东向断层控制的区域; 2—受东西向断层控制的区域

是, 挤压性盆地断层的封闭性随断层倾角的减小而减小, 所以近水平的滑脱断层就相对容易开启成为油气运移的通道, 同时超压的存在又为滑脱断层的开启提供了条件。结合应力场的数值模拟结果, 利用本文的数学模型计算亦表明, 在第三纪油气运移期滑脱断层能部分开启成为油气运移的通道。

5.2 歧东构造带

歧东构造带(图6)位于渤海湾盆地黄骅拗陷的东部, 油气藏的形成、分布及规模决定于圈闭条件和断层封闭保存条件。结合应力场数值模拟和有关研究成果, 利用本文的数学模型进行断层封闭系数的计算, 结果表明, NE向断层封闭系数值比近EW向断层大20%左右, 近EW向断层如果是砂岩对接则普遍处于开启状态。这样, 受近EW向

* 石油大学(北京)构造地质研究室, 黄骅盆地中、新生代构造解析, 1997
** 石油勘探开发研究院, 石油大学, 吐哈盆地分析及油气资源评价, 1995

断层控制的区域, 主要靠背斜圈闭; 而受 NE 向断层控制的区域则能形成断鼻圈闭和断块圈闭 (图 6)。这一结论符合本区的勘探实践。

参 考 文 献

- 1 吴延防, 李国会, 王跃文, 等. 断层的封闭性的定量研究方法. 石油学报, 1996, 17(3): 39~ 45
- 2 鲁兵, 陈章明, 关德范, 等. 断面活动特征及其对油气的封闭作用. 石油学报, 1996, 17(3): 32~ 45
- 3 王平. 含油气盆地构造力学原理. 北京: 石油工业出版社, 1993. 34~ 50
- 4 Gretener P E. 孔隙压力的基本原理通常所引起的后果及其构造地质含意. 陈荷立, 汤锡元译. 北京: 石油工业出版社, 1982. 17~ 30
- 5 Berg R R, Avery A H. Sealing properties of Tertiary growth faults, Texas Gulf Coast. AAPG Bulletin, 1995, 79(3): 375~ 393

QUANTITATIVE ANALYSIS OF FAULT OPENING AND SEALING

Tong Hengmao

(*Department of Earth Sciences, University of Petroleum, Beijing*)

Abstract

The opening and sealing properties of faults are closely related to reservoir formation or destruction. Based on the coupling of pressure of fault surface and fluid pressure, a quantitative mathematical model of the fault opening and sealing is developed, and the fault sealing coefficient could be calculated. The factors influencing the fault opening and sealing properties include structural stress, strike, dip angle and depth of the fault, the lithology of each wall and fluid pressure. Fault sealing property decreases as fluid pressure coefficient increases, structural compress stress and Poisson's ratio decrease. The influence of dip angle and depth of the fault on the sealing property is controlled by structural stress.