

文章编号: 1006-6616 (2012) 02-0149-09

上拱力背景下正断裂剖面形态 及极限应力状态研究

宋随宏¹, 陈书平^{1,2}, 何明宇³

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

3. School of GeoSciences, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JW UK)

摘要: 上拱力构造背景下形成的正断裂及断裂极限应力状态研究在构造解释和油气运移成藏中具有重要的意义。在抛物线型莫尔包络线理论的基础上, 通过合理的假设和数学推导以及理论模拟, 进一步探讨上拱力构造背景影响下形成的正断裂剖面形态和断裂的极限应力状态, 并定量给出函数表达式。研究表明, 断裂在均质岩体中由浅到深, 倾角从竖直开始由大变小, 呈铲状断裂, 而变化的速率只与地层物性有关, 泥岩比砂岩变化快。断裂分布的深度与上拱力的大小成一次线性关系, 上拱力越大, 断裂分布越浅。砂泥岩互层地层中发育有典型的坡坪式正断裂。研究结果不仅与普遍认识相一致, 而且可以进一步在实际应用中预测断裂的存在, 定量解释断裂形态, 求取上拱力和断裂极限应力状态。

关键词: 上拱力; 正断裂形态; 极限应力; 断裂准则

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 引言

岩石断裂既是地壳构造变形和演化的重要产物, 也是一种重要的构造作用与构造变形方式, 它对油气运移和油气藏形成以及寻找金属矿床等很多方面都具有重要意义^[1]。

关于岩石断裂的机理和准则近百年来国内外众多专家和学者都做过很多探索。经典断裂力学理论中的一个根本假设是将岩石断裂轨迹视为直线型平面模型, 然而现场实测和实验观测均表明, 无论是在晶粒尺度还是在断层尺度上, 岩石的断裂面都是非常不规则和粗糙的, 难以用一个平直面来近似模拟^[2-3], 显示出了经典断裂力学理论的局限性。除此之外常用的断裂准则还包括: 库仑断裂准则、水平直线型莫尔包络线理论、抛物线型莫尔包络线理论、格里菲斯断裂准则^[4]。以卡门实验为例, 抛物线型莫尔包络线理论更符合实际情况^[5]。

关于地壳中岩石断裂的剖面形态, 国内外学者都做过很多研究和探讨, 总结出了常见的主要断裂样式: 平直型断裂(层)、铲式断裂(层)和坡坪式断裂(层)^[6]。这些认识符合

收稿日期: 2012-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41172124)和中国石油大学(北京)科技创新基金联合资助

作者简介: 宋随宏(1990-), 男, 中国石油大学(北京)地球科学学院地质工程专业本科生。E-mail: air_sunsuihong@yahooh.com

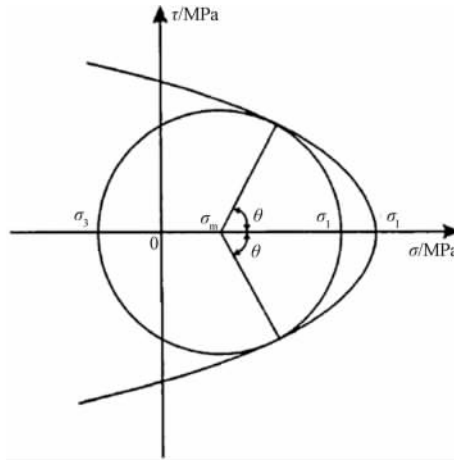
自然界实际情况,得到了普遍的认可,能定性解释和预测一些现象,但对断裂产生机理的定量解释和断裂形态的定量表达却很少^[7-8]。本文将在抛物线型莫尔包络线理论上,定量地探讨上拱力构造背景下产生正断裂的形态、断裂极限应力及其与上拱力、地层物性之间的关系。这将对于精确预测解释断裂、认识盆地、认识上拱构造以及预测油气藏、分析油气运移等有重大意义。

1 抛物线型莫尔包络线理论

当莫尔包络线以抛物线来近似表示(见图1)时,其方程可写为^[5]:

$$\tau^2 = \frac{K^2}{\sigma_1}(\sigma_1 - \sigma) \quad (1)$$

式中: σ_1 为岩石在各向等值拉伸条件下的抗张断裂极限,MPa; K 为岩石粘结强度,MPa; τ 、 σ 分别为断裂面上的临界剪应力和临界正应力,MPa。本文中规定,正值表示拉力,负值表示压力。



τ 、 σ —断裂面上的临界剪应力和临界正应力,MPa; σ_1 、 σ_3 —发生断裂时最大和最小主应力,MPa;
 σ_m —平均应力($\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$),MPa; σ_1 —岩石在各向等值拉伸条件下的抗张断裂极限,MPa; $\frac{\theta}{2}$ —岩石剪裂角,(°)

图1 抛物线型莫尔包络线^[5]

Fig. 1 The Parabolic Mohr failure envelope

以主应力来表达,抛物线型莫尔包络线准则可写成^[5]:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 2 \frac{K^2}{\sigma_1}(\sigma_1 + \sigma_3) = K^2 \left(4 - \frac{K^2}{\sigma_1}\right) \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为发生断裂时最大和最小主应力,MPa。

按照这一准则,剪裂角可表达成^[5]:

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta &= 2 \frac{\sigma_1}{K} \left(1 - \frac{K^2}{2\sigma_1} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_1}\right)^{\frac{1}{2}} \\ \theta &= \arctan 2 \frac{\sigma_1}{K} \left(1 - \frac{K^2}{2\sigma_1} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2\sigma_1}\right)^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

随着 σ_1 与 σ_3 以及 K 和 σ_1 的变化,剪裂角可由 0° 变到 45° 。从(3)式可以看出,剪裂

角不仅与物性参数 (K, σ_1) 有关, 而且与各点极限应力状态有关。即使在同一种岩石中, 由于各处极限应力状态不同, 也可以形成不同的剪裂角^[5]。下面以此理论为基础讨论上拱力构造背景下正断裂剖面形态和极限应力状态。

2 正断裂剖面形态和极限应力状态的理论分析

研究表明, 地壳深部一般应力状态为:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -\rho gh \quad (4)$$

式中: ρ 表示岩体的密度, kg/cm^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 表示参考点的深度, m ; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别表示最大主应力、中间主应力、最小主应力, MPa 。

裂陷盆地中正断裂的形成常与盆地深部岩浆或地幔柱上升等有关^[9-12]。在上拱力构造背景下, 岩石除受到一般应力的作用, 还受到由上拱构造引起的附加水平拉力和上拱力共同作用。这种情况下, 假设岩体受到的上拱力恒定, 为 σ_{y2} , 附加水平拉力为 σ_{x2} , 埋深为 h 点处岩体竖直方向一般应力为 σ_{y1} , 水平方向一般应力为 σ_{x1} , 埋深为 h 点处岩体竖直方向总应力为 σ_y , 水平方向总应力为 σ_x , 则有:

$$\sigma_{y2} = -\rho gh_2 \quad (5)$$

$$\sigma_{y1} = -\rho gh \quad (6)$$

$$\sigma_{x1} = -\rho gh \quad (7)$$

$$\sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} \quad (8)$$

$$\sigma_x = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} \quad (9)$$

式中: σ_{y2} 为上拱力, MPa ; h_2 为上拱力以一般应力形式表示时对应的深度, m , 由 σ_{y2} 导出。

当该点处岩体承受的竖直和水平方向总应力达到极限应力状态而发生正断裂时, 根据抛物线型莫尔包络线理论, 将 (2) 式变形整理可得:

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \frac{K^2}{\sigma_1} \pm 2K \sqrt{1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_1}} \quad (10)$$

在正断裂中, 由于 $\sigma_x > \sigma_y$, 所以有:

$$\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_3 = \sigma_y \quad (11)$$

联立 (5) — (11) 式, 整理可得深度为 h 点处岩体发生正断裂的极限应力状态:

$$\sigma_y = -\rho g(h + h_2) \quad (12)$$

$$\sigma_x = -\rho g(h + h_2) - \frac{K^2}{\sigma_1} + 2K \sqrt{1 - \frac{-\rho g(h + h_2)}{\sigma_1}} \quad (13)$$

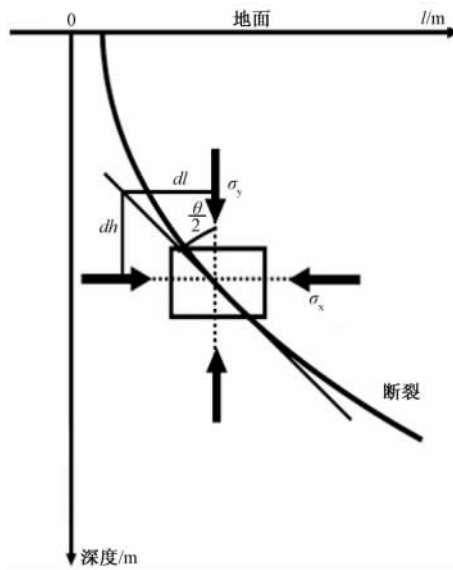
分析 (13) 式中水平方向极限应力并结合水平方向一般应力大小, σ_x 由两部分组成, 分别是地壳水平方向一般应力 σ_{x1} 和由上拱构造引起的附加水平拉力 σ_{x2} , 它们都随深度而变化。其中:

$$\sigma_{x2} = -\rho gh_2 - \frac{K^2}{\sigma_1} + 2K \sqrt{1 - \frac{-\rho g(h + h_2)}{\sigma_1}} \quad (14)$$

当岩体所承受的总应力达到断裂极限应力状态发生断裂 (见图 2) 时:

$$\frac{dl}{dh} = \tan \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

式中 l 为衡量地面水平长度的量, m 。



l —衡量地面水平长度的量, m; h —参考点深度, m; $\frac{\theta}{2}$ —岩石剪裂角, ($^{\circ}$);

σ_x, σ_y —深度为 h 点处岩体水平方向和竖直方向总应力, MPa

图2 岩体正断裂剖面数学分析

Fig.2 Mathematical analysis of geometric shape of normal fault of rock mass

联立 (3)、(11)、(12)、(13)、(15) 式, 可求得断裂剖面的数学表达式为:

$$\frac{dl}{dh} = \frac{\sqrt{1 + \frac{K^2}{4\sigma_1^2} + \frac{\rho g(h+h_2)}{\sigma_1}} - \frac{K}{\sigma_1} \sqrt{1 + \frac{\rho g(h+h_2)}{\sigma_1}} - \frac{K}{2\sigma_1}}{\sqrt{1 + \frac{\rho g(h+h_2)}{\sigma_1}} - \frac{K}{\sigma_1} \sqrt{1 + \frac{\rho g(h+h_2)}{\sigma_1}}} \quad (16)$$

式 (16) 即为在上拱力背景下, 岩体受到上拱力 σ_{y2} 和由上拱构造引起的附加水平拉力 σ_{x2} 而达到极限应力状态发生正断裂时, 断裂剖面的数学表达式。

分析 (16) 式可知, 断裂的剖面形态和极限应力状态只与地层物性参数 K 、 σ_1 、 ρ 有关; 而断裂的分布深度则与上拱力大小相关。

3 正断裂剖面形态及其分布深度和断裂极限应力状态模拟

3.1 正断裂剖面形态模拟

根据对式 (16) 的分析, 下文将研究上拱力大小为 0, 即在水平拉张背景下, 断裂形态和极限应力状态。

中国石油大学 (北京) 对兰聊断裂带附近砂岩进行测定及计算得到: $K = 50$ MPa、 $\sigma_1 = 16$ MPa、 $\rho = 2.32$ g/cm³。用此砂岩建立各向同性均质砂岩体模型, 模拟水平拉张背景下正断裂剖面形态和极限应力状态。根据理论分析, 并将具体数值代入 (12)、(13)、(14) 及 (16) 式, 可得到在水平拉张背景下, 发生断裂时断裂的极限应力状态为:

$$\sigma_y = -0.02273h \quad (17)$$

$$\sigma_x = -0.023h + \sqrt{14h + 10000} - 156.25 \quad (18)$$

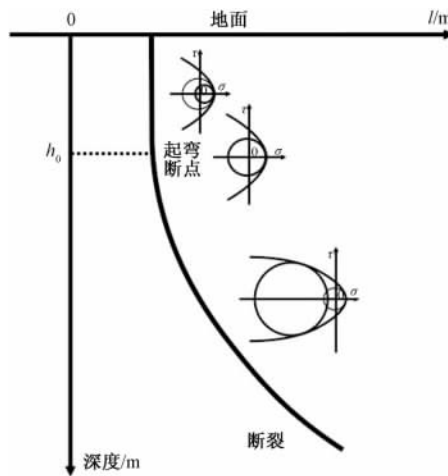
要达到断裂极限应力状态需要提供的附加水平拉力为：

$$\sigma_{x2} = \sqrt{14h + 10000} - 156.25 \quad (19)$$

断裂剖面函数表达式为：

$$\frac{dl}{dh} = \frac{\sqrt{0.0014h - 3.1 \times \sqrt{0.0014h + 1} + 3.44} - 1.56}{\sqrt{0.0014h - 3.1 \times \sqrt{0.0014h + 1} + 1}} \quad (20)$$

根据所求得断裂剖面函数表达式 (20) 画出断裂剖面 (见图 3), 可以看出: 断裂从 $h_0 = 6169$ m 深度点开始出现, 随深度增加, 断裂由陡变缓, 其内摩擦角由 90° 减小, 无限接近 0° , 即剪裂角由 0° 开始, 无限接近 45° 方向, 最终在地下不够提供断裂极限应力的某点消失, 呈铲式, 对应于抛物线型莫尔包络线中应力圆与抛物线相切于两点的情况; 对于从地表到地下 $h_0 = 6169$ m 深度点之间, 从函数角度来讲, 该表达式无解, 显示出了该表达式的缺陷。而从实际地质力学角度来讲, 存在竖直形态的断裂, 其剪裂角为 0° , 对应于抛物线型莫尔包络线中应力圆与抛物线相切于其顶点的情况; 深度为 h_0 的点, 则对应于应力圆与抛物线顶点相切的极限情况。在本文中, 将深度为 h_0 这种应力圆刚好与抛物线顶点相切、断裂开始出现弯曲的深度命名为起弯深度, 将这个深度点命名为起弯断点 (见图 3)。



l —衡量地面水平长度的量, m; h_0 —起弯深度, m

图 3 正断裂剖面及对应的抛物线型莫尔包络线模型

Fig. 3 The geometric shape of normal fault and parabolic Mohr failure envelope models

3.2 正断裂剖面形态和极限应力状态与地层物性关系模拟

根据对 (16) 式的分析, 断裂的分布深度与上拱力大小有关, 上拱力越大, 断裂分布越浅。下文将在上拱力 ($\sigma_{y2} = -\rho gh_2$) 为 -140.26 MPa (此值可使下文均质砂岩中的断裂起弯深度为 0, 其计算方法后文将阐述) 的前提下模拟不同物性地层产生的不同断裂形态和极限应力状态。

3.2.1 均质砂岩中正断裂的剖面形态和极限应力状态模拟

根据对兰聊断裂带附近砂岩的测定及计算结果 ($K = 50$ MPa、 $\sigma_1 = 16$ MPa、 $\rho = 2.32$ g/cm³) 建立各向同性均质砂岩体模型, 模拟此情况下正断裂剖面形态和极限应力状态。

将具体数值代入公式 (12)、(13)、(16)，可得此情况下极限应力状态和断裂剖面形态表达式：

$$\sigma_y = -0.022736(h_2 + 6169) \tag{21}$$

$$\sigma_x = -0.022736h + \sqrt{100 + 0.14 \times (h + 6169)} - 296.5 \tag{22}$$

断裂剖面的函数表达式为：

$$\frac{dl}{dh} = \frac{\sqrt{0.0014h - \sqrt{0.14h + 94.1 + 12.08}} - 1.56}{\sqrt{0.0014h - \sqrt{0.14h + 94.1 + 9.64}}} \tag{23}$$

由所求得的断裂剖面函数表达式画出断裂剖面 (见图 4a)，可以看出：在此上拱力的背景下，断裂的起弯深度恰好为 0，即断裂恰好从地表开始角度发生变化，随深度增加，断裂剪裂角由 0° 开始，无限接近 45° 方向，最终在地下不够提供其断裂极限应力的某点消失。这与实际情况中铲式断裂能够很好地吻合，能够很好定量解释其形成机制。

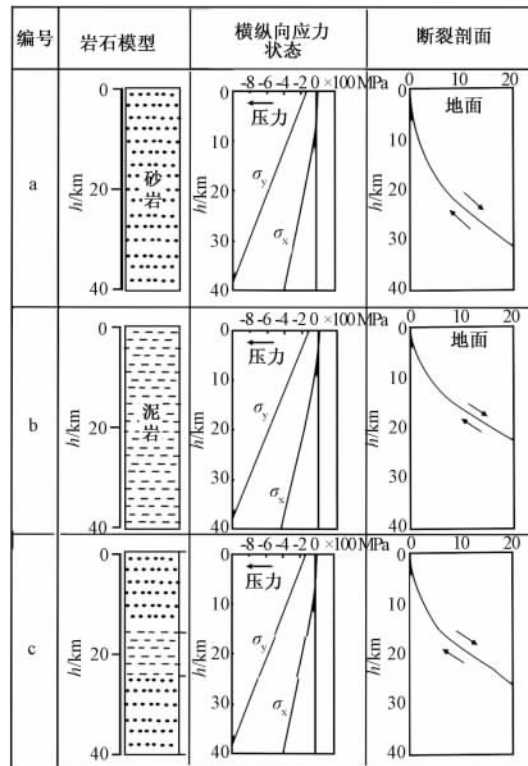


图 4 上拱力构造背景下岩石极限应力及正断裂剖面形态

Fig. 4 Critical stress state of rock and geometric shape of fault under tectonic setting of upwelling force

3.2.2 均质泥岩中正断裂的剖面形态和极限应力状态模拟

取兰聊断裂带附近泥岩，测定并计算其参数，建立均质泥岩体模型。应用同样的步骤可以计算出其极限应力状态和断裂剖面形态的函数表达式，并画出断裂剖面 (见图 4b)，其形态与上述均质砂岩中断裂类似，不同的是该剖面起弯深度为 -152 m，表示断裂从地上 152 m 开始剪裂角发生变化，而实际情况是断裂剖面只为其地下部分。此外，泥岩断裂剖面比砂岩剖面剪裂角变化更快，显示为更平缓。

3.2.3 均质砂泥岩互层断裂剖面形态和极限应力状态模拟

在上述均质砂岩模型中插入一薄层均质泥岩，建立砂泥岩互层模型。此时，断裂的极限应力状态和断裂剖面为同等情况下均质砂岩和泥岩模型中应力状态和断裂的组合（见图4c），可以看出：该砂泥岩互层模型中，砂岩段断裂面相对较陡，泥岩段断裂面较缓，由深至浅组合而形成典型的“陡—缓—陡”的坡坪式正断裂，能够很好地定量解释实际情况中的坡坪式断裂的形成机制和其形态。

3.2.4 实际地层断裂剖面形态和极限应力状态模拟

实际情况下，包括 K 、 σ_1 、 ρ 在内的各项地层参数都发生变化。资料显示，这3个参数都随地层深度增加而增大，并且增大的速度越来越慢。通过近似模拟可得出：在此上拱力背景下，实际地层的断裂剖面形态与均质岩体模型中的形态类似，呈铲式断裂。

在已知 K 、 σ_1 、 ρ 三个参数随深度变化的关系时，可定量得出实际地层断裂的极限应力状态和断裂剖面的函数表达式。

3.3 正断裂分布深度与上拱力关系的模拟与分析

从数学角度分析（16）式可知，断裂分布的深度或起弯深度与上拱力有一次线性关系。

由于起弯断点对应于应力圆恰好与抛物线型莫尔包络线相切于其顶点的情况（见图3），且：

$$\tan\theta > 0 \quad (24)$$

所以可联立（3）、（11）、（12）、（13）、（24）式，求解得出：

$$h > \frac{1}{\rho g}(\sigma_{y2} + \frac{K^2}{\sigma_1} - \sigma_1) \quad (25)$$

进而可求得起弯深度 h_0 ：

$$h_0 = \frac{1}{\rho g}(\sigma_{y2} + \frac{K^2}{\sigma_1} - \sigma_1) \quad (26)$$

式（26）即可表示起弯深度随上拱力的变化关系。

因此，对于在上拱力背景下产生的断裂，断裂形态只与地层物性有关，断裂分布的深度或起弯深度与上拱力呈一次线性关系，上拱力绝对值越大，断裂分布深度越浅，反之则越深。当上拱力为0时，即为水平拉张背景下产生的断裂（见图3）；当上拱力达到 $\sigma_{y2} = \sigma_1 - K^2/\sigma_1$ 时，断裂起弯深度为0，断裂刚好从地表开始发生弯曲（见图4a、图5）

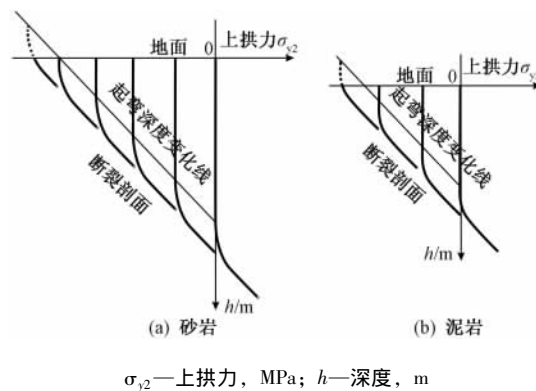


图5 起弯深度随上拱力变化关系

Fig. 5 The relationship of fault's depth and upwelling force

4 结论

在上拱力背景下, 假设上拱力恒定, 均质地层受到一般应力、上拱力和由上拱构造引起的附加水平拉力, 当上拱力和附加水平拉力达到一定值时, 地层处于极限应力状态发生正断裂, 断裂极限应力状态和剖面函数表达式可以定量得出。这将对于断裂解释预测、极限应力状态和上拱力以及附加水平拉力求取、油气藏预测及分析具有重大意义。

断裂由浅到深可以分为两个部分: 从地表到起弯断点之间, 断裂呈现竖直形态; 起弯断点以下, 随深度增加, 断裂由陡变缓, 剪裂角由 0° 无限趋近 45° , 一直延伸至不够提供其断裂所要求的极限应力的地下某点消失, 呈现出铲式断裂的形态。这与实际情况中对铲式断裂的认识相一致, 能够很好地定量解释其形成机制。

断裂的形态只与地层物性有关, 泥岩中产生的断裂剪裂角比砂岩角度变化快; 断裂分布的深度与上拱力呈一次线性关系, 上拱力绝对值越大, 断裂分布深度越浅。

当在较硬均质砂岩中夹入较软泥岩层时, 可形成典型的“陡—缓—陡”的坡坪式正断裂, 断裂在硬岩层中较陡, 软岩层中较缓。断裂剖面形态的函数表达式和极限应力状态亦可定量表达出来。能够很好地解释和预测坡坪式断裂的形态及其形成机理。

参 考 文 献

- [1] 谭凯旋, 谢焱石, 陈广浩, 等. 岩石断裂作用的复杂性和混沌动力学 [J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27 (4): 372 ~ 377.
TAN Kai-xuan, XIE Yan-shi, CHEN Guang-hao, et al. Complexity and chaotic dynamics of rock faulting [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2003, 27 (4): 372 ~ 377.
- [2] Perie P J. Determination of fracture mechanism by microscopic observation of crack [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28 (1): 83 ~ 84.
- [3] 谢和平. 大理岩微观断裂的分形 (fractal) 模型研究 [J]. 科学通报, 1989, 34 (5): 365 ~ 368.
XIE He-ping. The investigation of fractal model of micro-fracture of marble [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34 (5): 365 ~ 368.
- [4] 朱志澄. 构造地质学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 1 ~ 226.
ZHU Zhi-cheng. Structural geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 1 ~ 226.
- [5] 陈庆宣, 王维襄, 孙叶, 等. 岩石力学与构造应力场分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1 ~ 241.
CHEN Qing-xuan, WANG Wei-xiang, SUN Ye, et al. The investigation of rock mechanics and tectonic stress field [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 241.
- [6] 陆克政. 含油气盆地分析 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2001: 1 ~ 424.
LU Ke-zheng. The analysis of petroliferous basin [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001: 1 ~ 424.
- [7] Suppe J, Chou G T, Hook S C. Rates of folding and faulting determined from growth strata [C] //McClay K R. Thrust tectonics. London: Chapman & Hall, 1992: 105 ~ 121.
- [8] 庄培仁, 常志忠. 断层构造研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1 ~ 346.
ZHUANG Pei-ren, CHANG Zhi-zhong. The investigation of fault structures [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1 ~ 346.
- [9] 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征 [J]. 石油学报, 1980, 1 (1): 7 ~ 20.

- LI De-sheng. Geology and structural characteristics of the Bohai Bay [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1 (1): 7~20.
- [10] 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1~110.
- DENG Jin-fu, ZHAO Hai-ling, MO Xuan-xue, et al. Continental roots plume tectonics of China: Key to the continental dynamics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1~110.
- [11] 牛树银, 胡华斌, 毛景文, 等. 鲁西地区地质构造特征及其形成机制 [J]. *中国地质*, 2004, 31 (1): 34~39.
- NIU Shu-gen, HU Hua-bin, MAO Jing-wen, et al. Structure in western Shandong and its genetic mechanism [J]. *Geology in China*, 2004, 31 (1): 34~39.
- [12] 牛树银, 邵济安, 孙爱群, 等. 华北东部盆山耦合与内生成矿作用 [J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30 (3): 331~342.
- NIU Shu-gen, SHAO Ji-an, SUN Ai-qun, et al. Coupling relationship between basin-mountain and neogene mineralization in the eastern part of north China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30 (3): 331~342.

THE INVESTIGATION OF NORMAL FAULT UNDER UPWELLING FORCE AND ITS CRITICAL STRESS STATE

SONG Sui-hong², CHEN Shu-ping^{1,2}, HE Ming-yu³

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. School of Geosciences, University of Edinburgh, Edinburgh EH9 3JW, UK)

Abstract: The investigation of normal fault formed under tectonic setting of upwelling force and its critical stress state is of significance in the structural interpretation and the hydrocarbon migration. Based on the theory of parabolic Mohr failure envelope, and certain assumptions, mathematical derivation and theory modeling being carried out, quantitative functions of geometric shape of normal fault and its critical stress state were given. It is found that the fault dip becomes smaller from shallow to deep, being a listric fault. The rate of dip change is only related to the properties of strata. And the rate of dip change is faster in isotopic sandstone than in mudstone. It is also proved that the depth of the fault is linear against the amplitude of upwelling force. A typical ramp-flat normal fault can be drawn from the fracture modeling of interbedded sandstone-mudstone rock body. Not only are these conclusions consistent with the natural phenomena and general cognition, but also they can explain the geometric shape of faults quantitatively and find the critical stress state.

Key words: upwelling force; fault geometry; critical stress; fracture criterion