

压实盆地自然水力破裂及其动力学

张小莉 冯 乔 李文厚

(西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

压实盆地中的自然水力破裂是欠压实带孔隙流体排驱的关键因素之一。欠压实带可描述成被“壳”包围的一个异常孔隙流体压力带。当盆地在连续沉积(加载)和不断剥蚀(卸载)作用过程中,其“壳”的自然水力破裂动力作用是完全不同的。在加载条件下,欠压实带的顶、底壳发生剪切破裂,底壳早于顶壳。在卸载条件下,只有当剥蚀所引起的负荷压力降大于“壳”发生垂直张破裂所需要 的最小负荷压力降时,壳才会破裂,且主要为顶壳破裂。对于经历了多期沉积-剥蚀作用过程的地区或盆地,其欠压实带中孔隙流体的排驱可以被描述成首先向下,然后向上,再向下再向上这样一个排驱方向不断变化的间歇性过程。

关键词 压实作用 “壳” 自然水力破裂 流体排驱 动力学

第一作者简介 张小莉 女 29 岁 讲师 煤田、油气地质与勘探

地下裂缝系统不仅使油气聚集形成裂缝型油气藏,而且在地下流体的排驱与油气的初次和二次运移中亦起着重要作用。地下岩石裂缝的形成与地下岩石所处的应力状态与岩石的性质有关。在不考虑构造应力作用条件下,压实盆地中岩石的应力状态主要与上覆负荷压力有关,以前的研究都将压实盆地中负荷压力与深度的变化作为线性关系处理^[1~3],而实际上因压实作用影响,不同深度其负荷递增量是不一样的。另外,前人均将岩石应力状态研究的对象放在欠压实带内^[4~6],而实际上只有欠压实带边缘的岩石破裂,流体才能排驱出来。因此,本文拟就这些问题作一初步探讨。

1 压实作用及“壳”的形成

1.1 负荷压力

当沉积物沉积下来并被随后的沉积物埋藏时,在上覆负荷压力作用下,沉积物的孔隙度减小,孔隙中的流体被排出。其中孔隙度随深度的变化为

$$\Phi = \Phi_0 e^{-cz} \quad (1)$$

式中 Φ_0 , Φ 分别为 $z = 0$ 时和 z 时的岩石孔隙度,取小数; z 为沉积物埋深, m; c 为常数, m^{-1} ; e 为自然对数的底。

岩石密度(ρ_b)是岩石骨架本身的密度(ρ_m)、孔隙流体的密度(ρ_f)和孔隙度(Φ)的函数

$$\rho_b = \Phi \rho_f + (1 - \Phi) \rho_m \quad (2)$$

将(1)式代入(2),整理得

$$\rho_b = \rho_m - (\rho_m - \rho_f) \Phi_0 e^{-cz}$$

则上覆负荷压力为

$$S = 10^{-3} g \int_0^z \rho_b(z) dz$$
$$= 10^{-3} g \left[\rho_m z + \frac{(\rho_m - \rho_f) \Phi_0}{c} (e^{-cz} - 1) \right] \quad (3)$$

式中 S 为上覆负荷压力, MPa; ρ_m , ρ_f 分别为岩石骨架和孔隙流体的密度, g/cm^3 ; g 为重力常数, 取 9.8; 其他参数同上。该式表明上覆负荷压力随深度变化并不是线性关系, 而是埋藏较浅时, 负荷压力增加较慢, 较深时, 增加较快(图 1)。

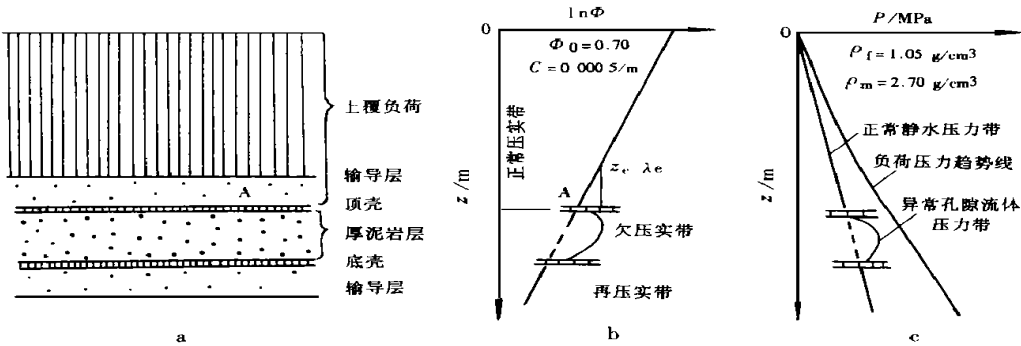


图 1 “壳”形成(a)、压实曲线(b)及其压力变化(c)示意图

1.2 “壳”的形成

随上覆负荷压力的增加, 厚层泥质岩边部岩石中的流体将首先排出而被压实。但当边部岩石所产生的毛细管阻力大于/等于泥质岩内部的流体压力时, 其内部的流体将不再被排出而被保留下来形成欠压实带。这种具有能够封堵欠压实带内部流体的边部岩石即为“壳”, 一般为钙质页岩或钙质泥岩致密层^[7,8]。“壳”的质量高低决定了流体压力被保存的程度, 于是欠压实带可以被描述成被“壳”包围的一个异常流体压力带(图 1)。

2 “壳”的应力分析

2.1 应力状态

假设“壳”为均质弹性岩体, 则“壳”中 A 点单位立方体上的应力状态如图 2a 所示。其中

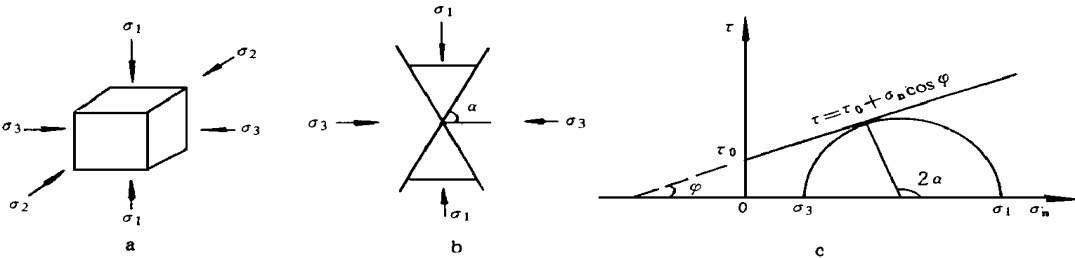
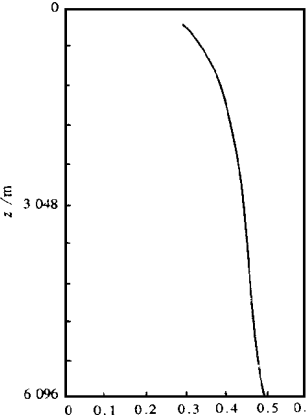


图 2 A 点应力组合(a)、剪切破裂(b)及摩尔圆(c)

σ_2 , σ_3 为水平方向的主压应力, 且 $\sigma_2 = \sigma_3$ 。由于岩石的变形主要受控于有效应力, 而有效应力(σ)等于上覆岩石的负荷压力(S)与孔隙流体压力(P)之差, $\sigma = S - P$ 。在围岩压力作用下, A

点的应力状态为^[1,9]



$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= S - P_A \\ \sigma_2 &= \frac{\nu}{1-\nu}(S - P_A) \\ \sigma_3 &= \sigma_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 P_A 为“壳”内 A 点的孔隙流体压力, 其值等于正常压实带底部的静水压力。 ν 为岩石的泊松比, 主要与岩石的性状有关。砂岩的 ν 介于 0.2~ 0.33 之间, 泥岩的 ν 约为 0.2~ 0.4^[3,9,10]。

Eaton 利用 Costley 的裂缝压力数据, 估算了湾岸地区地下岩石的原地泊松比(图 3), 认为随垂直应力或负荷压力的增加, 泊松比逐渐增大^[11]。但是大量的岩石力学实验表明, 随温度升高、孔隙含水率降低及泥岩中含砂量增高, 泊松比逐渐降低^[9,10]。由于泊松比受压实的影响, 随埋深增加, 在正常压实带, 压实作用增强, 泊松比应逐渐降低; 在欠压实带, 压实程度较低和含水率较高, 泊松比应较大。

2.2 孔隙流体压力的作用

孔隙流体压力是分布在多孔岩块体积内部的一种结构体积应力, 它可使岩石的变形模量、屈服极限、强度极限及抗压强度都随孔隙压力的增大而减小, 岩石的破裂压力随孔隙流体压力的增加而增大^[9]。

为了考察孔隙流体压力与负荷压力的关系, 定义 $\lambda = P/S$ 。当处于正常压实带时, 流体能够顺利地从岩石孔隙中排出, 流体压力等于静液柱压力,

即 $P = 10^{-3} g \int_0^z \rho_f(z) dz$ 。若将流体视为不可压缩的, 则流体密度(ρ_f) 随深度的变化为一常数。则

$$\lambda = \frac{\rho_f z}{\rho_m z + (\rho_m - \rho_f) \Phi_0 (e^{-cz} - 1)/c} \quad (5)$$

式中参数同前。上式表明 λ 是深度、地表孔隙度、压实斜率、流体和岩石骨架密度的函数。由于流体密度和岩石骨架密度相对比较小, 流体密度一般为 1.0~ 1.1 g/cm³, 石英颗粒的骨架密度为 2.65 g/cm³, 粘土岩为 2.7~ 2.8 g/cm, 因此 λ 主要受埋深、地表孔隙度和压实斜率的影响。若 $\rho_f = 1.05 \text{ g/cm}^3$, $\rho_m = 2.7 \text{ g/cm}^3$, $c = 0.0005 \text{ m}^{-1}$, 则 λ 随深度和地表孔隙度的变化如图 4 所示。当 $\Phi_0 = 90\%$ ~ 50% 时, 地表 $\lambda = 0.85 \sim 0.54$, 埋深 2 000 m, $\lambda = 0.58 \sim 0.46$, 3 000 m 时, $\lambda = 0.52 \sim 0.44$, 即 λ 随埋深增加逐渐减小。

欠压实带孔隙度大于紧邻上覆正常压实带的孔隙度, 根据平衡深度原理, 欠压实带的压实状态相当于正常压实带中孔隙度与此相等深度的压实状态, 因此欠压实带的 λ 值应与平衡深度点 Z_e 的 λ_e 相当(图 1), 从而可以根据 $P_a = \lambda_e S$ 计算出欠压实带的孔隙流体压力(P_a)。

但是由于“壳”处于欠压实带的边缘部位, 压实程度较高, 基本上相当于正常压实或接近正

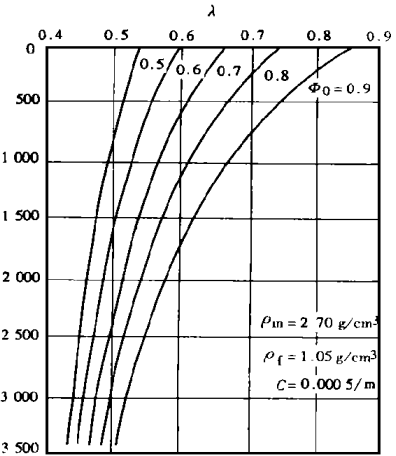


图 4 λ 与埋深、地表孔隙度关系图

常压实, 因此其流体压力只是深度的函数。对于欠压实带的顶壳来说, 其孔隙流体压力等于正常压实带底部的静液柱压力, 即 $P = \rho_f z$; 对于底壳, 其流体压力等于或接近于上覆负荷压力与该点 λ_A 的乘积, 即 $P = \lambda_A S$ 。

3 “壳”的破裂及其动力学

地下岩石的破裂主要表现为剪切破裂或张破裂或二者的联合。大量的实验资料表明: 在无围压或低围压下, 脆性岩块在轴向压力作用下产生平行于 σ_1 方向的张破裂; 在有围压和高围压作用下主要表现为剪切破裂^[10]。

3.1 加载条件下“壳”的破裂动力学

3.1.1 原理与模型

对于连续沉积的盆地中异常孔隙流体压力带边部岩石的破裂, 可以用“壳”的剪切破裂模型(图2)代替, 这是因为随着上覆负荷压力增加, “壳”的泊松比减小和围压增大, 因而“壳”在较高围压下主要发生剪切破裂。

根据库仑-维纳破裂准则, 岩石发生剪切破裂的条件为^[9]

$$\tau = \tau_0 + \sigma_n \tan \varphi$$

式中 τ 为岩石的抗破裂强度; τ_0 为 $\sigma_n = 0$ 时的抗剪强度; σ_n 为破裂面上的正应力; $\tan \varphi$ 为岩石的内摩擦系数; φ 为内摩擦角。

在 σ_2, σ_3 垂向平面应力条件下, 若沿某一潜在面发生破裂, 并设该潜在面与水平面的夹角为 α (图2b), 则该潜在面上的剪切应力及正压应力为

$$\begin{aligned}\tau_n &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \alpha \\ \sigma_n &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha\end{aligned}$$

式中 τ_n, σ_n 为该潜在破裂面上的剪切应力和正压应力。当该潜在面发生破裂时 $\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$, $\tau_n \geq \tau$, 则破裂平衡条件为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \alpha = \tau_0 + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha \right) \tan \varphi$$

整理得

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 \cos \varphi - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$$

设 $\sigma_3 = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_1$

则 $\sigma_1 = \frac{2(1 - \nu) \tau_0 \cos \varphi}{1 - 2\nu - \sin \varphi}$ (6)

这就是“壳”发生剪切破裂时, 最大主压应力、最小主压应力与岩石抗剪强度和内摩擦角的关系, 可用剪切破裂莫尔圆表示(图2c)。

若将(6)式代入(4)式, 且 $P_A = \lambda_A S$ 则可推导出“壳”完整保存时上覆负荷的极限压力

$$S_{\max} = \frac{2(1 - \nu) \tau_0 \cos \varphi}{(1 - \lambda_A)(1 - 2\nu - \sin \varphi)} \quad (7)$$

结合(3)式, 据此可以推算出“壳”完整保存的极限埋深。当深度超过此极限时, “壳”将剪切破裂, 形成微裂隙, 流体从其中排出。随流体压力下降, 微裂隙又会逐渐闭合。

3. 1. 2 结果讨论

(1) 当处于正常压实带时, 由于孔隙流体能顺利排出, 岩石处于正常压实状态, 既不会出现异常孔隙压力, 也不会破裂。若(7)式改写为

$$(1 - \lambda_1) S = \frac{2 \tau_0 (1 - \nu) \cos \varphi}{1 - 2 \nu - \sin \varphi}$$

由于 S 为深度的函数, 则随深度增加, 等式右边的分子增加和分母减小, 因此 τ_0 应随深度和压实作用增强而增加, ν 和 φ 随深度增加而减小。

(2) 无论在何种压实状态下, 必须要求 $1 - 2 \nu - \sin \varphi > 0$, 即 $\nu < (1 - \sin \varphi) / 2$, 否则负荷压力将出现负值, 这显然是不切合实际的。当 $\varphi = 0$ 时, ν 必须小于 0. 5, 当 $\varphi = 30^\circ$ 时, $\nu < 0. 25$ (图 5)。安欧^[9]认为, 当 $\sigma_1 - \sigma_3 > 4T$ 时, 岩石发育剪切裂隙, $\sigma_1 / \sigma_3 = (\tan \varphi + \sqrt{1 + \tan^2 \varphi})^2$, 与本文的结论是一致的^[9]。Watts^[5]在研究北海 Albuskjell 油田 Chalks 地区的微裂缝成因时, 取 $\varphi = 30^\circ$, 则 $\sigma_1 = 3 \sigma_3$, 并设岩石抗张强度为 T , 当 $\sigma_1 - \sigma_3 > 4T$ 时发育剪切裂隙, $\sigma_1 - \sigma_3 \leq 4T$ 时发育张裂隙。

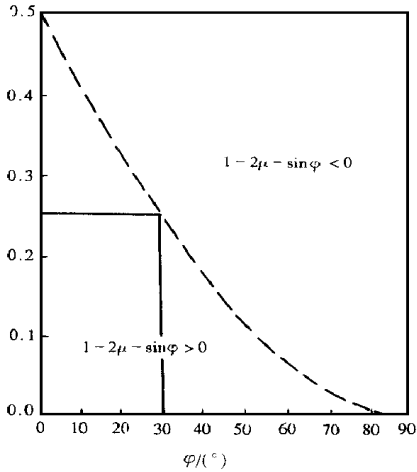


图 5 泊松比与内摩擦角关系图

3. 1. 3 实例分析

根据上述原理, 当欠压实带顶、底壳形成后, 上覆负荷压力再增加部分将由欠压实带中的孔隙流体支承, 因此欠压实带部分的压实曲线将平行于正常压实曲线变化。由于底壳比顶壳承担了更多的负荷压力, 若设顶底壳的岩石性质完全一致, 那么当顶壳还没有达到其破裂的极限负荷压力时, 底壳就已经剪切破裂, 因此欠压实带中的流体将向下排驱, 而不能向正常压实带排驱。随流体的排出, 岩石被压实, 压实曲线向正常压实趋势线靠拢, 越邻近底壳, 欠压实曲线向正常压实趋势线靠拢的幅度越大, 据此可以确定流体的排驱强度, 其值等于欠压实带泥质岩的压实斜率。

当上覆负荷压力持续增加时, 可以在上述第一次欠压实带之上发育第二欠压实带。当第一欠压实带的底壳/或第二欠压实带的顶壳负荷压力(或埋深)都超过其各自的极限负荷压力(或极限埋深)时, 亦将发生剪切破裂, 其欠压实带的流体都将向着各自邻近的输导层排驱(第一欠压实带的流体向下排驱, 第二欠压实带的流体向上排驱)。如塔里木盆地塔北坳陷中的乡 1 井就是一典型的例证(图 6), 在 3 070 m 之上为正常压实, 之下出现欠压实, 并且发育了两个欠压实带, 从老到新, 分别称之为第一欠压实带和第二欠压实带。在两个欠压实带的顶底皆被压实程度较高的岩石隔开, 可分别作为底壳和顶壳。这两个欠压实带都有一个共同的特点, 即顶壳附近, 欠压实程度较高, 说明流体压力较大, 向着底壳, 欠压实程度逐渐降低, 压实曲线向着正常压实趋

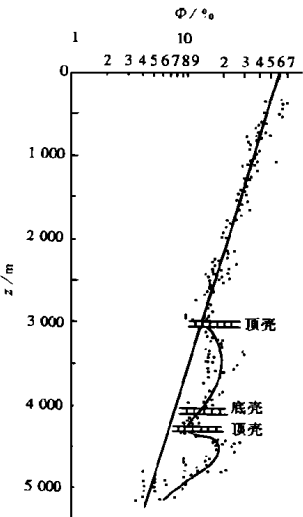


图 6 塔里木盆地乡 1 井泥岩压实曲线

根据上述讨论,我们可以据此对曾遭受过地层剥蚀的地区或盆地的地下流体的实际排驱情况进行分析。如黄骅拗陷在早第三纪末曾短暂抬升,盆地中心部位,地层剥蚀较小,并且整个晚第三纪和第四纪都处于沉降阶段^[12]。该拗陷中心的欠压实带发育于 2 700~ 3 800 m,如图 8 所示。

由于港深 10 井在早第三纪末的地层剥蚀厚度明显要比新港 57 井大,因此其欠压实带的压实程度也明显要比新港 57 井的大,特别是前者的欠压实程度向着顶壳明显降低,说明即使顶壳泥岩具有可渗透性^[13],流体也不能排出,这是因为港深 10 井在剥蚀期间,顶壳曾形成张性微裂隙,使一部分流体排驱从而压实程度增加。但由于剥蚀时间太短,随着晚第三纪和第四纪的快速沉降和负荷压力的急速增加,微裂隙闭合,使得部分异常高的孔隙流体压力被保存下来。

吐哈盆地是地层大量剥蚀而导致流体排驱的典型地区。如位于山前构造带上的勒 4 井,估计侏罗纪末期地层剥蚀厚度逾 1 500 m^{*},欠压实带压实曲线显示以最大异常孔隙流体压力点(约 2 350 m)为界向顶壳和底壳,压实曲线向正常压实趋势线靠拢(图 9),说明欠压实带上、下可能有微裂缝发育,且越靠近顶、底壳,裂缝发育程度越强。另外,构造裂缝和断裂对流体排驱可能也有一定的影响。

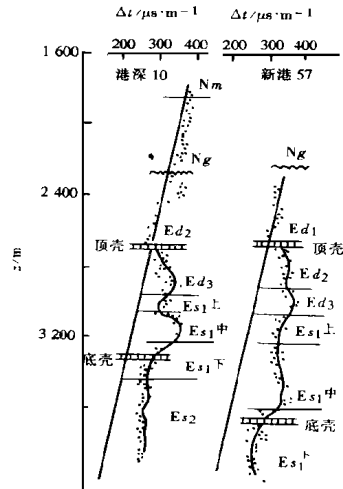


图 8 黄骅拗陷泥岩压实曲线^[12]

4 结论

(1) 负荷压力随埋深的变化规律是: 在埋深较浅时, 负荷压力递增较慢; 埋深较大时, 负荷压力递增较快。欠压实带可以描述成被顶、底壳所包围的一个异常流体压力带, 只有当“壳”在自然水力作用下破裂后, 孔隙流体才能排出。

(2) “壳”的破裂主要受作用于其上的有效应力控制, “壳”的泊松比在正常压实带随埋深增加, 随压实作用增强及孔隙度与含水率减小而逐渐减小。

(3) 加载条件下“壳”的破裂为剪切破裂。只有当“壳”的负荷压力(或埋深)大于或等于“壳”所能承受的极限负荷压力(或极限埋深)时, “壳”才能发生剪切破裂, 并且底壳早于顶壳, 因此欠压实带中的流体只能向下排驱, 其排驱强度相当于欠压实带的压实斜率。

(4) 在不考虑构造裂隙和断裂作用的条件下, 地层剥蚀引起的欠压实带的动力学变化可以用卸载条件下“壳”的力学作用过程描述。只有当剥蚀地层所引起的负荷压力降大于“壳”完整保存时的最小压力降或残留负荷压力小于“壳”能够完整保存的最大负荷压力时, “壳”才能发生垂直张

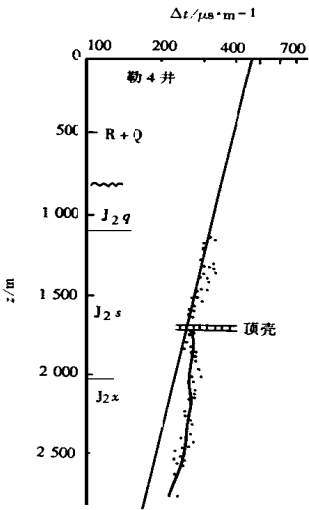


图 9 吐哈盆地勒 4 井泥岩压实曲线

* 陈荷立, 邱世祥, 冯乔等. 吐哈盆地侏罗系油气运移与成藏研究. 科研报告, 1995

破裂, 且顶壳早于底壳破裂, 促使流体向上排驱。

(5) 对于经历了多期次沉降或地层剥蚀的地区或盆地, 其欠压实带“壳”的破裂为底壳破裂→顶壳破裂→底壳破裂→顶壳破裂这样一个间歇性的过程, 其中的流体排驱亦相应为首先向下, 然后向上, 再向下再向上这样一个排驱方向不断变化的间歇性过程。

参 考 文 献

1 Magara K. Mechanisms of natural fracturing in a sedimentary basin. AAPG Bull, 1981, 65(1): 123~ 132
2 Mello U T, Karner G D. Development of sediment overpressure and its effect on thermal maturation: application to the Gulf of Mexico Basin. AAPG Bull, 1996, 80(9): 1 367~ 1 396
3 du Rouchet J. Stree fields, a key to oil migration. AAPG Bull, 1981, 65(1): 74~ 85
4 Plumley W J. Abnormally high fluid pressure: survey of some basic principles. AAPG Bull, 1980, 64(3): 414~ 430
5 Watts N L. Microfractures in chalks of Albuskjell field, Norwegian sector, North Sea: possible origin and distribution. AAPG Bull, 1983, 67(2): 210~ 234
6 Palciauskas V V, Domenico P A. Microfracture development in compacting sediments: relation to hydrocarbon-maturation kinetics. AAPG Bull, 1980, (6): 927~ 937
7 胡济世. 异常高压、流体压裂和油气运移(上). 石油勘探与开发, 1989, (2): 16~ 23
8 胡济世. 异常高压、流体压裂和油气运移(下). 石油勘探与开发, 1989, (3): 16~ 23
9 安欧. 构造应力场. 北京: 地震出版社, 1992. 6~ 10
10 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988. 159~ 181
11 Eaton B A. Fracture gradient prediction and its application in oil field operations. Jour Petroleum Technology, 1969, 21: 1 353 ~ 1 360
12 陈发景, 田世澄. 压实与油气运移. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989
13 真柄钦次. 石油圈闭的地质模型. 童晓光, 贾承造译. 武汉: 中国地质大学出版社, 108~ 127

NATURAL HYDRAULIC FRACTURE IN COMPACTED
BASIN AND ITS KINETICS

Zhang Xiaoli Feng Qiao Li Wenhou
(Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi)

Abstract

In a compacted basin, natural hydraulic fracturing is one of the key factors of the pore fluid expulsion of uncompacted belt. An uncompacted belt can be described as an abnormal pore fluid pressure belt surrounded by “shell”. The kinetics of the natural fracturing of the “shell” in continuous sedimentation(loading) is different from that in successive erosion(unloading) . In loading condition, the shear fracturing of the bottom shell of the uncompacted belt would appear earlier than that of the top. In unloading condition, the “shell” would crack only when the load pressure decrease resulted from erosion is greater than the minimal load pressure required in vertical tensile crack of the “shell”, and the crack usually happens on the top shell. In this view, the expulsion of the pore fluid of the uncompacted belt can be described as a intermittent change process of expelling up and down.