

# 应力、应变与构造超压关系及构造超压控制因素分析

李玉喜<sup>1,2</sup>, 庞雄奇<sup>2</sup>, 姜振学<sup>2</sup>

(1. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034; 2. 石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

**摘要:** 构造应力场引起岩石变形, 并使孔隙流体压力发生变化, 形成异常流体压力。根据对前人岩石力学实验结果的分析, 应力与流体压力间为非线性关系, 试件的体积应变与孔隙流体压力间为反相关线性关系。构造异常压力和其他异常压力的形成具有共性特征, 都可以抽象为由于孔隙体积和流体体积的相对变化这一个因素。由此也可以将异常压力形成的一般过程概括为: 孔隙被流体饱和的岩石, 体积缩小会使饱和流体排出, 体积增大会使其周围的流体流入, 如果渗透率足够大, 流体流动顺畅, 这一过程流体压力的变化相对较小。在岩石渗透率较小时, 由于流量的限制, 流体在这一过程中会产生明显的压力变化, 形成异常压力。对于符合达西渗流的流体, 异常压力计算时, 流量可以用孔隙体积相对变化量替代。这样可以描述构造变形等固体变形所引起的异常压力。根据异常压力的极大值为研究区相应深度的最小主应力和岩石抗张强度之和的特点, 可以预测流体封存箱箱壁的最小厚度要求, 分析流体封存箱形成的基本条件。构造活动过程中, 岩石孔隙的体积应变速率和封存箱壁的渗透率直接控制异常流体压力的大小。高应变速率和低的封存箱壁渗透率是形成构造超压的主要因素。

**关键词:** 应力; 应变; 流体; 构造超压。

中图分类号: P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)02-0179-06

作者简介: 李玉喜(1962—), 男, 石油大学(北京)博士后, 从事盆地构造、资源经济方向研究。

E-Mail: liiyuxi@163.com

地应力场引起岩石变形, 并产生异常流体压力, 这种现象在地震活动中表现明显。Sibson<sup>[1]</sup>的地震泵模式也揭示了岩石变形过程对流体的作用。由于含油气盆地中异常流体压力与油气运聚成藏关系十分密切, 所以构造活动与流体关系问题一直是石油地质理论与实践令人关注的问题。近几年来, 对其研究明显加强, 已成为固—液相互作用和油气运聚研究的一个新的热点。目前主要是进行构造应力场与渗流场耦合的理论及应用研究<sup>[2~11]</sup>。

地应力场的直接作用是导致岩石变形, 岩石在变形过程中, 岩石孔隙流体压力也随着变化。岩石孔隙流体压力的变化是地应力的直接作用, 还是地应力所产生的岩石变形引起流体压力的改变, 对此目前存在不同的观点。本文从分析前人岩石力学实验结果入手, 在对应力与流体压力、应变与孔隙流体压力之间的相关关系分析结果的基础上, 对异常压力形成的共性和构造异常压力控制因素进行了分析。

## 1 前人岩石力学实验结果分析

20 世纪七八十年代, 岩石力学和工程地质界为探讨流体的存在对岩石变形特性的影响进行了大量的饱和水岩石试件的三轴应力—应变实验。其实验结果反应了应力、应变及流体压力间的一般关系, 可以用来探讨应力—应变及其与流体压力变化间的相互关系(图 1)。可以看出, 随着应力差的增加, 密封于岩石孔隙中流体(水)的压力变化是由初期的线性增加到增量变小。在应力差达到一定值后, 孔隙流体的液压不但不再增加, 反而减小。反应出应力差与孔隙流体压力间的非线性关系。根据实验者的解释, 流体的压力随应力差的上述变化规律与岩石在不同变形阶段的变形特性有关。图 1 中 AB 段与岩石的弹性变形阶段相对应, 应力与应变和孔隙流体压力三者间均为线性关系; 在 BC<sub>1</sub> 段, 岩石内部出现微破裂, 并逐渐增多, 使岩石内出现裂缝型孔隙, 总孔隙体积的减小速度变慢; 在 C<sub>1</sub> 点, 岩石孔隙体积的减小量和裂缝型孔隙体积的增加量达到均衡, 流体压

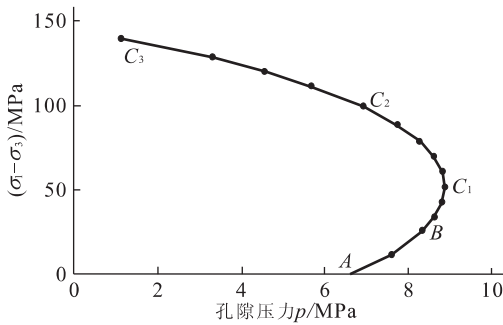


图 1 在 Berea 砂岩的不排水三轴应力实验中,孔隙液压与差应力的关系

Fig. 1 Relationship of stress and pressure in pores

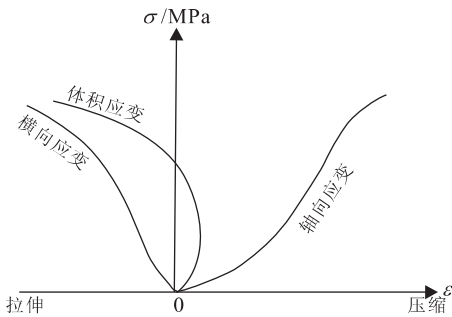


图 2 软弱砂岩的体积、轴向和横向变形规律

Fig. 2 Relationship of deformation to stress

力不再增加;从  $C_1$  点开始,岩石变形进入破裂变形阶段,岩石内部的微破裂大量形成,试件的总体积也不再减小,而是开始增大,裂缝孔隙体积生成量开始大于减小量,这时虽然应力仍在不断增加,但岩石孔隙流体压力开始下降,到  $C_2$  点流体压力下降到了实验开始时的水平;之后,随着应力差的进一步增加,流体压力继续直线下降。

试件内密封流体压力随岩石变形,除反应了应力与流体压力间的非线性关系外,还说明流体压力的变化与岩石的应变阶段和应变特征有密切关系。将岩石的体积应变曲线(图 2)与图 1 对比分析可以看出,在岩石变形过程中,流体压力增加对应的是试件体积的减小,流体压力的减小对应的是试件体积的增加,两者具有严格的反相关系。而试件体积的改变主要与试件内部微破裂的形成与发展有关,即与总孔隙体积的变化规律有关。这说明试件孔隙内流体压力的变化主要受试件的体积应变控制,试件的体积应变是形成异常流体压力的直接因素。应力的直接作用是使岩石孔隙体积发生非线性变化,对流体压力变化的影响是通过试件孔隙体积变化实现的,是间接的。

## 2 异常压力形成的共性特征分析

构造活动可以形成异常流体压力,其他地质因素和地质过程也可以形成异常流体压力。异常流体压力在形成机理上有构造活动、不均衡压实、成烃、烃类裂解、粘土矿物转化、水热增压、自生矿物充填作用等因素。由于流体具有不抗剪的特性,必须将流体围陷起来才能影响其压力。

以上形成异常流体压力的主要机理中,构造活动的直接结果是使岩石变形和变位,岩石变形包括岩石孔隙体积的改变。根据前文对岩石力学实验的分析结果,正是由于岩石孔隙体积的变化,才对其中的流体压力产生作用。其他异常流体压力形成的机制中,压实作用使岩石孔隙度和渗透率减小,正是这种减小形成超压。成烃使孔隙中烃类流体体积增加,蒙脱石脱水也导致岩石中流体体积相对增大。水热增压实质为水的体积膨胀,流体体积增加。

自生矿物充填作用,如石英的次生加大和方解石的形成使岩石孔隙体积减小。由此可见,被岩石孔隙围陷起来的流体,由于孔隙体积或流体体积的相对变化,才能引起流体压力的改变。因此可以将异常压力的形成机理抽象为孔隙体积和流体体积的相对变化(图 3)。这也说明构造异常流体压力的形成机制与其他机理形成的异常流体压力的本质特征是一致的。因此,将构造异常压力形成的直接因素归结为岩石孔隙体积变化这一因素也是符合异常压力形成的共性因素的。

由此将异常压力形成的一般过程概括为:孔隙被流体饱和的岩石,体积缩小会使饱和流体排出,体积增大会使其周围的流体流入,如果渗透率足够大,流体流动顺畅,这一过程流体压力的变化相对较小。在岩石渗透率较小时,由于流量的限制,流体在这一

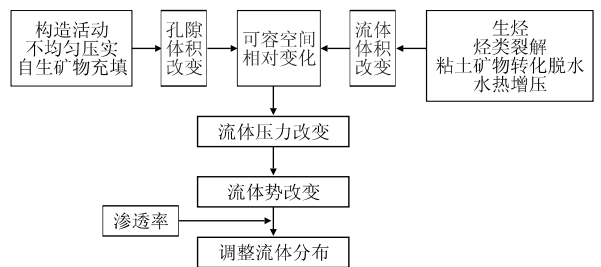


图 3 不同成因异常流体压力形成的共同因素

Fig. 3 Common forming factors of different abnormal fluid pressures

过程中会产生明显的压力变化,形成异常压力.即形成异常压力的因素中包括孔隙体积和其中流体体积的相对变化因素,还包括孔隙周围渗透率因素.

### 3 用孔隙体积变化表示孔隙压力变化

前文分析结果将孔隙和流体体积的相对变化和渗透率特征明确为异常压力形成的根本原因.那么,体积的相对变化是如何改变流体压力的?考虑被流体饱和的孔隙,其体积的变化与孔隙中流体体积的变化是直接相关的,如果流体不可压缩,则两者是相等的.因此可以应用达西定律来描述体积的相对变化对流体压力的影响.

由于岩石的孔渗结构在自然界中是相当复杂的,为分析方便,首先考虑单孔—渗结构模型的异常压力(图 4).由一个孔隙和沟通该孔隙与正常压力区联系的吼道组成,孔隙形状为球形.

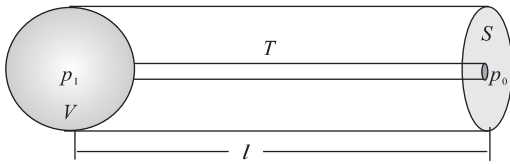


图 4 单孔—渗结构模型示意

Fig. 4 One pore-one pathway pressure model

图 4 中,球  $V$  为孔隙,为在单位时间内排出一定体积的流体需要升高压力至  $p_1$ ;细管  $T$  为孔隙  $V$  与外界压力为  $p_0$  的正常压力区连通的吼道,吼道长为  $l$ ,通过吼道  $T$ ,流体压力由  $p_1$  降为  $p_0$ ;包含吼道  $T$  的岩柱的横截面积为  $S$  形;吼道长为  $l$ ,渗透率为  $k$ ;垂直吼道的截面积为  $s$ .吼道外端的流体压力为正常流体压力  $p_0$ .若该孔隙内有体积为  $\Delta v$ 、粘度为  $\mu$  的流体在  $t$  时间内通过长为  $l$ 、截面积为  $s$ 、渗透率为  $k$  的吼道区排出,则根据达西定律,排出以上流体孔隙  $V$  中的流体压力需要升高至  $p_1$ ,2 点间压差  $\Delta p = p_1 - p_0$  为:

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot l}{k \cdot s} \cdot \frac{v}{t} \tag{1}$$

式(1)中: $\Delta v$  为流动流体体积 ( $m^3$ ); $k$  为吼道区岩层渗透率 ( $m^2$ ); $s$  为吼道区的横截面积 ( $m^2$ ); $l$  为吼道区长度或厚度 ( $m$ ); $\Delta p$  孔隙与吼道区外 2 点间压差 ( $Pa$ ); $t$  为流动的时间 ( $s$ ); $\mu$  为流体粘度 ( $Pa \cdot s$ ).

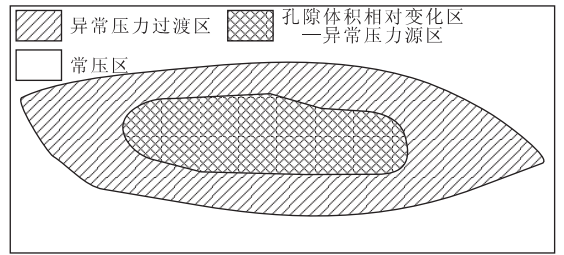


图 5 异常流体压力空间分布结构—异常压力流体封存箱  
Fig. 5 Structure of abnormal pressure in space — an abnormal pressure box

根据前文分析,在流体不可压缩情况下,单位时间该孔隙内流体体积的改变量应当等于孔隙体积的相对变化量,即:

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot l}{k \cdot s} \cdot \frac{\Delta v}{t} \tag{2}$$

式(2)中: $\Delta v/t$  为在  $t$  时间内孔隙体积改变量.这样就得到了用该孔隙体积相对变化量表示的异常压力值.这样变换的意义在于建立了固体变形与流体压力变化间的数量关系,并据此可以分析构造变形对流体压力的影响程度等固体变形对流体压力产生的影响.

式(2)中各参数的含义需要进一步说明: $\Delta v$  为该孔隙体积的相对改变量,为孔隙本身参数; $l$ 、 $s$ 、 $k$  为吼道区岩石的有关参数; $\mu$  为孔隙流体本身的粘度; $p_1$ 、 $p_0$  为异常压力区和常压区流体压力.

以上单孔—渗结构可以进一步推广为由孔隙体积改变区、过渡区和外围常压区构成的地质体.其中孔隙体积相对改变区为异常压力形成的源区,也是异常压力极值区(高压或低压);过渡区是异常压力向正常压力的过渡区,其渗流能力是决定孔隙改变区异常压力大小的一个重要方面(图 5).压力源区异常压力的确定需要考虑异常压力源区、过渡区、常压区和流体本身 4 方面参数.这种结构的实质是异常压力流体封存箱<sup>[12]</sup>.

从构造变形角度分析,封存箱内的构造异常压力可以是异常高压,也可以是异常低压.这取决于岩石的体积应变.从岩石力学实验结果分析,在压缩环境下,在破裂变形前,岩石的体积是在减小的,因此会形成构造超压;如果应力进一步增加,岩石出现大规模破裂变形,体积膨胀,则会形成异常低压.因此,强烈的变形区在变形期间应当是低压区.

## 4 构造异常压力最大值形成条件

异常压力的最大值为地下岩石的破裂压力<sup>[2~4]</sup>,是有极限的.同样,构造异常压力的最大值也应有极限的,不会超过地下岩石的破裂压力.破裂压力的大小应为研究区相应深度的最小主应力( $\sigma_3$ )和岩石抗张强度( $T$ )之和,即破裂压力 $\Delta p + p_0$ 为:

$$\Delta p + p_0 \geq \sigma_3 + T. \quad (3)$$

式(3)中: $p_0$ 为距异常压力区为 $L$ 处的最小正常流体压力.相当于达到破裂压力时流体封存箱壁的最小厚度,是一个有实际应用价值的参数.将(2)、(3)式结合,消去 $\Delta p$ ,得到 $L$ 的表达式:

$$L \geq (\sigma_3 + T - p) \cdot \frac{k \cdot s}{\mu \cdot (v/t)}. \quad (4)$$

式(4)反映出, $L$ 随着最小主应力、封隔体渗透率、流体粘度、孔隙体积相对变化速率( $v/t$ )以及岩石抗张强度和流体正常压力等多因素变化而变化,不是固定值.

但式(4)可以说明以下问题:(1)构造异常压力和其他成因的异常压力一样,不但受异常压力形成区的孔隙体积或流体体积的变化趋势控制,还受围陷条件控制,即由一定渗透率的封存箱壁厚度控制,只有在封存箱壁的厚度大于 $L$ 的部分,流体压力可以达到极大值( $\sigma_3 + T$ ),形成水力压裂区.如图 6a 中的 $L_2$ 部分,当封存箱顶板厚度 $L_1$ 和底板厚度 $L_3$ 分别满足式(4)时,中部 $L_2$ 部分形成水力压裂区.区内压力在 $p_2$ 处为 $\Delta p_1 + p_1$ ,在 $p_3$ 处为 $\Delta p_2 + p_2$ ,压力梯度为正常压力梯度.由于水力裂缝的大量形成,

$L_2$ 区内渗透率变大.(2)当等压区内流体压力大于 $\Delta p_1 + p_1$ 或 $\Delta p_2 + p_2$ ,封存箱的顶板或底板就会被压裂,流体外泄,压力降低后,水力裂缝闭合,剩余流体又被封存.(3)箱壁小于 $L$ 时(图 6b), $L_1$ 和 $L_3$ 达不到式(4)的条件时,流体压力 $p_2$ 不会达到极值( $\sigma_3 + T$ ),不会形成流体压裂,但会有异常压力存在(图 6b).

## 5 应变速率和封存箱壁单位厚度渗透率( $k/L$ )对构造异常压力的影响

式(2)中的 $\Delta v/t$ 为 $t$ 时间内孔隙体积改变量,即孔隙体积应变速率.这是一个难以获取的量.目前对其变化规律的认识是:地层(岩石)的应变速率在板块内部相对较小,据万天丰<sup>[13]</sup>研究,我国东部在中新生代构造活动期的线应变速率在侏罗纪为 $0.16 \times 10^{-16} \sim 9.50 \times 10^{-16}$  s;白垩纪为 $4.4 \times 10^{-16} \sim 7.5 \times 10^{-16}$  s;老第三纪(东北、华北地区)为 $1.09 \times 10^{-15} \sim 1.29 \times 10^{-15}$  s.以上应变速率数据中包含了造山带的资料,沉积盆地中地层的变形一般较造山带要小.因此,在不考虑地层的局部破裂变形的情况下,可以认为盆地内地层的总体应变速率在 $10^{-14} \sim 10^{-16}$  s的数量级内,属于流变变形(主要为蠕变).而岩石在破裂变形时应变速率较高,应在 $10^{-4}$  s左右变化<sup>[14]</sup>(地震发震应变速率).由于断裂活动和非断裂活动的应变速率( $\Delta v/t$ )的变化范围在 10 个数量级以上,并且 $\Delta v/t$ 与 $\Delta p$ 为线性正相关,因此断裂活动形成的异常压力与非断裂活动形成的异常压力的差也会在 10 个数量级以上.由于地壳构造变形的非均质性,导致构造异常压力分布十分不均匀.

封存箱壁单位厚度渗透率( $k/L$ )与异常压力间为线性反相关(式(2)).由于岩石渗透率的变化范围很大,从砂岩的 $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上到泥岩、岩盐的 $1 \times 10^{-10} \mu\text{m}^2$ 以下.显然,封存箱壁岩石的渗透率越低, $k/L$ 越小,形成的构造超压越高.由于极限压力的存在,渗透率越低,封存箱壁的厚度要求越薄.

## 6 结论

(1)构造异常压力是岩石孔隙体积变化形成的;其他异常压力形成的共性也可以抽象为孔隙体积和流体体积的相对变化这一个因素.由此也可以将异

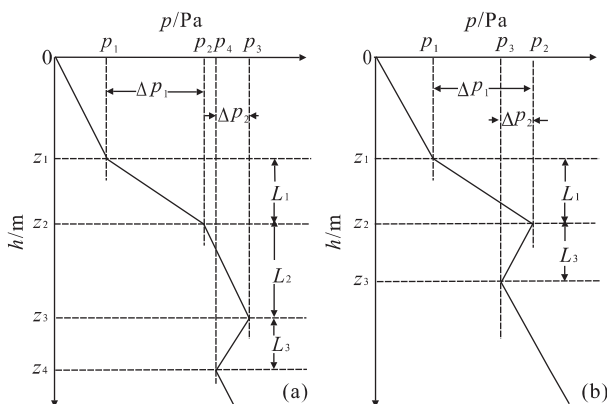


图 6 封存箱内异常压力发育的 2 种类型

Fig. 6 Two abnormal pressure types in abnormal pressure box

常压力形成的一般过程概括为:孔隙被流体饱和的岩石,体积缩小会使饱和流体排出,体积增大会使其周围的流体流入,如果渗透率足够大,流体流动顺畅,这一过程流体压力的变化相对较小.在岩石渗透率较小时,由于流量的限制,流体在这一过程中会产生明显的压力变化,形成异常压力.(2)对于符合达西渗流的流体,计算异常压力时,流量可以用孔隙体积相对变化量替代.孔隙体积的相对变化一般是可以预测和描述的.(3)根据异常压力的极大值为研究区相应深度的最小主应力和岩石抗张强度之和的特点,可以预测流体封存箱箱壁的最小厚度要求,分析流体封存箱形成的基本条件.(4)构造活动过程中,岩石孔隙的体积应变速率和封存箱壁的渗透率直接控制异常流体压力的大小.高应变速率和低的封存箱壁渗透率是形成构造超压的主要因素.

#### 参考文献:

- [1] Sibson R H. Conditions for fault value behavior [A]. In: Knipe R J, Rutter E H, eds. Deformation mechanisms, rheology and tectonics [C]. London: Geological Society Special Publication, 1990, 54: 15—28.
- [2] 解习农, 刘晓峰. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2): 103—108.  
XIE X N, LIU X F. Related to black shale series fluid dynamic system and relationship with accumulation of hydrocarbon in over pressured basin [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemist, 2000, 19(2): 103—108.
- [3] 郝芳, 董伟良. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 79—85.  
HAO F, DONG W L. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1): 79—85.
- [4] 黄志英. 沉积盆地中超压力的形成机理[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(2): 92—112.  
HUANG Z Y. Forming mechanisms of over pressure in sedimentary basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(2): 92—112.
- [5] 李延钧, 陈义才, 黄健全, 等. 吐哈盆地红南—红西地区油气负压系统成因[J]. 西南石油学院学报, 1999, 21(1): 6—9.  
LI Y J, CHEN Y C, HUANG J Q, et al. Formation of under pressured fluid compartments and its relation with shallow oil and gas accumulations: Hongnan-Hongxi ar-
- ea, Tufan-Hami basin [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1999, 21(1): 6—9.
- [6] 曾海容, 宋惠珍. 地下流体场与应力场耦合方程的有限单元法[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(4): 90—92.  
ZENG H R, SONG H Z. Limited element coupling method of fluid field with stress field underground [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(4): 90—92.
- [7] 孙雄, 洪汉净. 构造应力场对油气运移的影响[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 1—4.  
SUN X, HONG H J. Influence of tectonic stress on hydrocarbon migration [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(1): 1—4.
- [8] 徐则民, 杨立中. 渗流场与应力场相互关系研究中应注意的两个问题[J]. 矿物岩石, 1998, 18(1): 102—107.  
XU Z M, YANG L Z. Two problems for studying on the relationship between seepage field and stress field [J]. Mineral Petrol, 1998, 18(1): 102—107.
- [9] 葛云龙, 逯径铁, 廖保方, 等. 构造应力场与油气运移关系的研究[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 84—87.  
GE Y L, LU J T, LIAO B F, et al. Tectonic stress field modeling and relation to hydrocarbon migration [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 84—87.
- [10] 曾联波, 金之钧, 汤良杰, 等. 柴达木盆地北缘油气分布的构造控制作用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2001, 26(1): 54—58.  
ZENG L B, JIN Z J, TANG L J, et al. Structural controls of petroleum and gas distribution on northern margin of Qaidam basin, China [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2001, 26(1): 54—58.
- [11] 曾联波, 周天伟, 吕修祥. 喜马拉雅运动对库车坳陷油气成藏的影响[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(6): 741—744.  
ZANG L B, ZHOU T W, LÜ X X. Influence of Himalayan orogeny on oil & gas forming in Kuqa depression, Tarim basin [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(6): 741—744.
- [12] 郑玉凌, 郝石生, 柳广弟, 等. 流体封存箱研究若干问题思考[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5): 90—92.  
ZHENG Y L, HAO S S, LIU G D, et al. A discussion about the research of abnormally pressured fluid compartment [J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(5): 90—92.
- [13] 万天丰. 中国东部中·新生代板内变形构造应力场及

其应用[M]. 北京:地质出版社,1993. 9, 55—59.  
WAN T F. Inner plate deformation in the east of China in Mesozoic and Cenozoic and its applications [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 9, 55—59.

[14] 陈子光. 岩石力学性质与构造应力场[M]. 北京:地质出版社,1986. 6, 68, 90.  
CHEN Z G. The mechanics characters of rocks and tectonic stressfield [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986. 6, 68, 90.

## Relationship of Stress & Strain to Abnormal Tectonic Pressure and Main Control Aspects on Abnormal Tectonic Pressure Forming

LI Yu-xi<sup>1,2</sup>, PANG Xiong-qi<sup>2</sup>, JIANG Zhen-xue<sup>2</sup>

(1. *Strategic Research Center for Oil & Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China*; 2. *Basin & Reservoir Research Center, Petroleum University, Beijing 102249, China*)

**Abstract:** Tectonic stress can cause the deformation of rocks as well as the change of fluid pressure in the pore of rocks forming anomaly tectonic fluid pressure. Through analysis of the lithomechanical experiment results of Paterson etc, the authors find that the stress has a non-linear relationship to anomaly fluid pressure, while the volume strain has a linear relationship to anomaly fluid pressure. The anomaly pressures formed by other mechanisms all have the same characters — the relative changes of pore volume and fluid volume in the pore. So the general process of anomaly pressure formed by different mechanisms; when the rocks that have been saturated by fluid, the relative reduction of the pore volume causes the expelling of fluid; and the relative enlargement of the pore volume causes the inflow of fluid. If the permeability of the surrounding rocks is large enough, there would be no obvious anomaly fluid pressure formed. In contrast, if the permeability of surrounding rocks is small, the anomaly fluid pressure will be formed. The thickness and permeability of surrounding rocks and the strain rate of the pore are the main factors for forming anomaly pressure.

**Key words:** stress; strain; fluid; anomaly pressure.