

文章编号: 0253—9985(2009)06—0684—05

构造抬升剥蚀与异常压力形成

包友书^{1, 2}

(1. 中国石油大学 地质资源与信息学院, 山东 东营 257064)

(2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要: 根据物理化学原理, 建立了完全封闭条件下构造抬升剥蚀后地层流体压力的定量计算公式。公式显示, 在完全封闭条件下构造抬升后的地层压力取决于抬升前的地层压力、地层流体的压缩系数、地层流体的膨胀系数、岩石孔隙体积的压缩系数、抬升前后地层温度的变化和剥蚀厚度。根据流体的压缩系数和膨胀系数及岩石孔隙体积压缩系数的特点, 经分析认为对于水层砂岩岩体, 构造抬升剥蚀趋向于形成异常低压; 对于气层, 构造抬升剥蚀趋向于形成异常高压。

关键词: 回弹; 收缩; 压缩系数; 膨胀系数; 构造抬升; 异常压力

中图分类号: TE121.3 **文献标识码:** A

Relationship between tectonic uplifting & erosion and formation of abnormal pressure

Bao Youshu²

(1. College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257064, China)

(2. Geology Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Based on the principles of physical chemistry, a formula is established for quantitatively calculating formation fluid pressure after tectonic uplifting and erosion in a closed system. The calculation results with the formula show that formation pressure after tectonic uplifting and erosion in a closed system depends on such factors as initial formation pressure before tectonic uplifting, compressibility coefficient and expansion coefficient of formation fluid, compressibility coefficient of pore volume, temperature variation before and after uplifting, and erosion thickness. An analysis of compressibility coefficient and expansion coefficient of formation fluid as well as compressibility coefficient of pore volume reveals that an abnormal low pressure is likely to be formed in water-bearing sandstone formations, while an abnormal high pressure is more possible in gas-bearing formations after the uplifting.

Key words: rebound; constringency; compressibility coefficient; expansion coefficient; tectonic uplifting; abnormal pressure

长期以来, 人们对于构造抬升上覆地层剥蚀对地层压力的影响形成了两种截然不同的观点, 即形成异常高压和形成异常低压。早期一些文献忽略了地层流体和岩石的卸压回弹性质和降温收缩性质, 认为对于较好封闭性的地层, 在抬升过程中, 能够在一定程度上保持原来的深度所对应的流体压力, 因此抬升后将出现异常高压^[1~3]。一

种观点认为, 构造抬升过程中由于上覆地层的剥蚀而使有效应力降低, 岩石回弹孔隙体积增加, 因而形成异常低压^[4~15]。而另有文献认为, 抬升过程中由于气体的压缩系数远大于孔隙体积的压缩系数, 流体压力的变化量小于静水压力的变化量, 因而抬升剥蚀后会形成异常高压^[16~17]。本文从物理化学原理分析入手, 建立构造抬升后地层压力

收稿日期: 2009—05—19

作者简介: 包友书(1972—), 男, 工程师、博士研究生, 石油地质。

基金项目: 国家重大专项“渤海湾盆地南部精细勘探关键技术”(2008ZX05000—006)。

的定量计算公式,并探讨构造抬升过程究竟趋向于形成异常高压还是形成异常低压。

1 构造抬升后地层压力计算

讨论构造抬升上覆地层部分剥蚀引起地层形成异常高压还是异常低压问题前,首先要明确岩石应具有一定的封闭条件;如果岩石为高渗透性岩石,则不会引起异常压力。因此,我们假设岩石为绝对封闭条件,来研究极限条件下构造抬升剥蚀后地层压力的变化情况。

岩石抬升剥蚀过程中,地层流体体积和岩石孔隙体积均会受温度和压力降低的影响而发生卸压回弹和降温收缩。

地层流体在由抬升前的状态 1 经构造抬升使上覆地层部分剥蚀变为状态 2 (图 1) 的过程中,既有地层水由于温度变化而引起的体积和压力变化,又有由压力变化而引起的体积变化 (或由体积变化而引起的压力变化) 并且这些变化同时发生,难以用简单的公式计算其复杂变化过程。但考虑到温度、压力、体积均为状态函数,在由初始状态变为最终状态的过程中,其变化量只取决于始、末状态,而与具体变化过程无关^[18]。因此,我们假设其物理变化过程如下:首先由状态 1 的 P_1 , T_1 , V_1 经历等温降压而变为中间状态 P_2 , T_1 和 V_m ,再由中间状态经历等压降温而变化为状态 2 的 P_2 , T_2 , V_2 。假设过程不会影响最终状态 (状态 2) 下的体积计算结果。

地层流体由初始状态 1 变为中间状态后,体积为

$$V_m = V_1 [1 - \beta_f (P_2 - P_1)] \tag{1}$$

再经历恒压降温变化至状态 2 后,体积变化为

$$\begin{aligned} V_2 &= V_m [1 + \alpha_f (T_2 - T_1)] \\ &= V_1 [1 - \beta_f (P_2 - P_1)] [1 + \alpha_f (T_2 - T_1)] \end{aligned} \tag{2}$$

(1 和 2 式中: V_1 为抬升前的地层流体体积, m^3 ; V_m 为初始状态地层流体经恒温降压至中间状态的体积, m^3 ; V_2 为初始状态地层流体变化至最终状态 2 的体积, m^3 ; T_1 和 T_2 分别为抬升前和抬升剥蚀后的地层温度, $^{\circ}C$; P_1 和 P_2 分别为抬升前和抬升剥蚀后的地层流体压力, MPa ; β_f 为地层流体的压缩系数, MPa^{-1} ; α_f 为地层流体的热膨胀系数, $^{\circ}C^{-1}$ 。

同样可以推导出,抬升前地层流体所占据的岩石孔隙体积经历构造抬升剥蚀后,体积变化为

$$V_{b2} = V_{b1} [1 - \beta_p (\sigma_2 - \sigma_1)] [1 + \alpha_p (T_2 - T_1)] \tag{3}$$

公式 (3) 中: V_{b1} 和 V_{b2} 分别为构造抬升剥蚀前、后的岩石孔隙体积, m^3 , 其中, $V_{b1} = V_b$; σ_1 和 σ_2 分别为抬升剥蚀前、后岩石所受的有效应力, MPa ; β_p 为岩石孔隙体积的压缩系数, MPa^{-1} ; α_p 为岩石孔隙体积随温度的变化率 (组成岩石的矿物降温收缩或受热膨胀引起孔隙体积的相应变化), $^{\circ}C^{-1}$ 。

由于岩石为封闭体系,因此抬升剥蚀后经历了温度和压力的变化,孔隙内地层流体仍占满岩石孔隙空间,即地层流体的体积 (V_f) 仍等于岩石孔隙的体积 (V_{b2})^[19]。即使是异常低压地层,其孔隙内也为流体所饱和。如果地层流体体积小于岩石孔隙体积,则岩石孔隙中会出现真空空间。封闭体内流体的压力仅仅来源于流体自身的重力,封闭体底部的流体压力最大。但即使是垂直高度为 200 m 的封闭体,其最大压力也仅仅为 2 MPa 左右。而实际上,许多异常低压的封存箱内,流体压力也都在十到几十 MPa,表明孔隙内流体仍然处于压缩状态。因此,

$$V_f = V_{b2} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} &[1 - \beta_f (P_2 - P_1)] [1 + \alpha_f (T_2 - T_1)] \\ &= [1 - \beta_p (\sigma_2 - \sigma_1)] [1 + \alpha_p (T_2 - T_1)] \end{aligned} \tag{5}$$

而

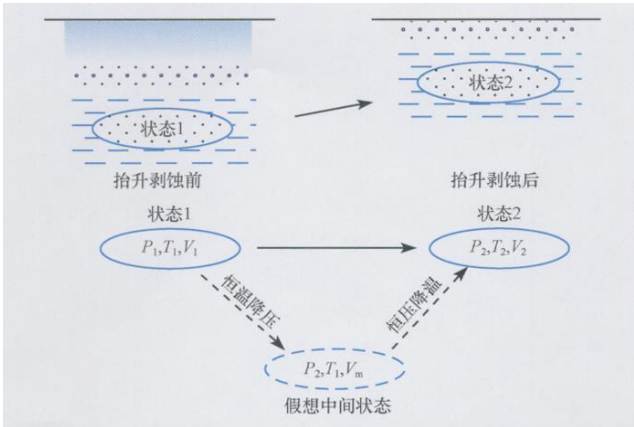


图 1 构造抬升前、后地层流体状态变化示意图
Fig 1 Sketch map showing the changes of formation fluid before and after tectonic uplifting

$$\sigma_1 = P_1 - P_1 \tag{6}$$

$$\sigma_2 = P_2 - P_2 \tag{7}$$

因此, 公式 (5) 可转化为

$$\begin{aligned} & [1 - \beta_f (P_2 - P_1)] [1 + \alpha_f (T_2 - T_1)] \\ & = \{ 1 - \beta_p [(P_2 - P_2) - (P_1 - P_1)] \} \times \\ & [1 + \alpha_p (T_2 - T_1)] \end{aligned} \tag{8}$$

由公式 (8) 推导出

$$\begin{aligned} P_2 = P_1 + \\ \frac{(P_2 - P_1) \beta_p (1 + \alpha_p \Delta T) - \alpha_p \Delta T + \alpha_f \Delta T}{\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T + \beta_p \alpha_p \Delta T} \end{aligned} \tag{9}$$

上述公式中: P_1 和 P_2 分别为抬升前、后的上覆岩层压力, MPa; ΔT 为抬升前、后地层温度的变化量, $^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

实际上, 固体岩石矿物的膨胀系数远远低于流体的膨胀系数, 因此其膨胀或收缩对岩石孔隙体积的影响可以忽略不计, 即 α_p 可以近似为 0 因此,

$$P_2 = P_1 + \frac{(P_2 - P_1) \beta_p + \alpha_f \Delta T}{\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T} \tag{10}$$

公式 (10) 即为构造抬升剥蚀后封闭地层的压力计算定量公式。该公式表明, 构造抬升后的地层压力取决于抬升前的地层压力、地层流体的压缩系数、地层流体的膨胀系数、岩石孔隙体积的压缩系数、抬升前后地层温度的变化和剥蚀厚度等。

2 构造抬升剥蚀过程形成异常高压还是异常低压分析

由于构造抬升剥蚀后的地层压力与岩石和流体的力学性质有关, 而对于不同的流体, 其膨胀系数和压缩系数变化较大, 因此流体介质不同时, 构造抬升可能会形成不同的异常压力, 有时可能会形成异常高压, 有时可能会形成异常低压。

2.1 对孔隙流体为水的砂岩, 抬升趋向于形成异常低压

为方便讨论构造抬升剥蚀过程趋向于形成异常高压还是形成异常低压, 假设地层抬升前为静水压力, 且水平应力场不发生变化; 抬升剥蚀后剩余压力为 δ (地层压力 - 静水压力), δ 可正可负, 如果为正值则表示形成异常高压, 如果为负值则

形成异常低压。抬升剥蚀后地层压力为

$$\begin{aligned} P_2 = \rho_w g H_2 + \delta \\ = \rho_w g H_1 + \frac{\rho_r g (H_2 - H_1) \beta_p + \alpha_f \Delta T}{\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T} \end{aligned} \tag{11}$$

因此,

$$\begin{aligned} \delta = \rho_w g (H_1 - H_2) - \\ \frac{\rho_r g (H_1 - H_2) \beta_p}{\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T} + \frac{\alpha_f \Delta T}{\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T} \end{aligned} \tag{12}$$

上述两式中: ρ_w 和 ρ_r 分别为地层水密度和上覆岩层密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$; H_1 和 H_2 分别为构造抬升前、后的地层埋深, km。

水的压缩系数小于 $5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。根据流体静力仪测试的东营凹陷砂岩孔隙体积压缩系数变化如图 2。图 2 表明, 砂岩的孔隙体积压缩系数随埋深增加而变小, 但一般大于 $5 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ 。由于 $\beta_p \alpha_f \Delta T$ 为负值 (因为地层抬升后温度降低, ΔT 为负值), 因此公式 (12) 第二项中的 $\beta_p / (\beta_f + \beta_p + \beta_f \alpha_f \Delta T)$ 必然大于 0.5。如果上覆地层密度取 $2.3 \text{ g}/\text{cm}^3$, 地层水密度取 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$, 则 (12) 式中第二项必然大于 $1.15 \rho_w g (H_1 - H_2)$, 第一项减第二项小于 0 并且第三项小于 0 (ΔT 为负值), 因此剩余压力 δ 为负值。

因此, 对于孔隙介质为水的砂岩来说, 如果具备封闭条件, 则构造抬升上覆地层部分剥蚀会趋向于形成异常低压。

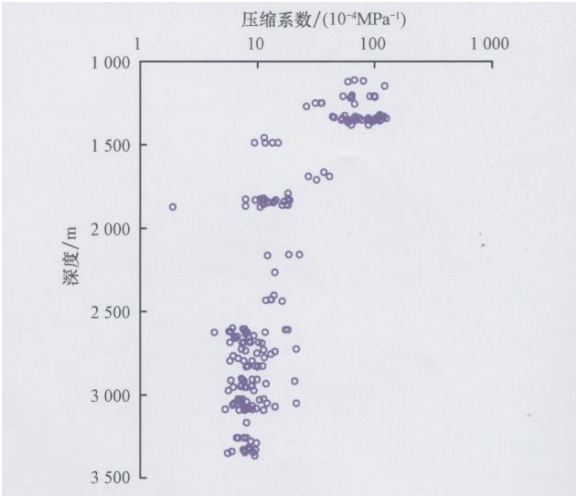


图 2 东营凹陷砂岩孔隙体积压缩系数随深度的变化
Fig 2 Sketch map showing the pore volume compressibility coefficient changing with burial depth of sandstone in the Dongying Depression

2.2 对气层, 抬升趋向于形成异常高压

对于气层来说, 压缩系数随压力的变化和膨胀系数随温度的变化均较大, 以公式 (12) 判定抬升过程中形成异常高压还是异常低压较为复杂。但可以假设抬升过程中地层压力等于静水压力, 再计算始终在静水压力条件下地层抬升剥蚀后孔隙内气体体积随压力降低而引起的回弹增加量、由温度降低而引起的体积收缩降低量及由于有效应力降低而引起的孔隙体积回弹增加量。如果气体由于压力降低而回弹增加的体积大于温度降低而收缩减少的体积与孔隙回弹而增加的体积的总和, 则表明抬升后地层压力不会为静水压力, 而是大于静水压力, 即趋向于形成异常高压; 相反, 则趋向于形成异常低压。

设 P 、 V 、 T 分别为气体的压力、体积和温度, 可以近似认为气层气体服从于理想气体状态方程:

$$\frac{PV}{T_a} = nR \quad (13)$$

式中: T_a 为绝对温度, K ; R 为摩尔气体常数, $R=8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot K)$; n 为摩尔数, mol

可以推导出气体的压缩系数为^[20]

$$\beta_f = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right) = \frac{1}{P} \quad (14)$$

膨胀系数为

$$\alpha_f = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{T+273.15} \quad (15)$$

而地层静水压力为深度的函数, 即

$$P = \rho_w gH \quad (16)$$

因此地层抬升过程中, 气体由于压力降低而引起的体积回弹率与深度的关系 (可简称气体随深度变化的回弹率) 为

$$-\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)_{\text{回弹}} = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial H} \right) = \frac{1}{P} \rho_w g = \frac{1}{H} \quad (17)$$

(16) 和 (17) 式中: P 为地层静水压力, MPa ; H 为地层埋深, km

地温也为深度的函数:

$$T = GH + T_0 \quad (18)$$

因此在抬升过程中, 气体由于温度降低而引起的体积收缩率与深度的关系 (简称气体随深度变化的收缩率) 为

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial H} \right)_{\text{收缩}} &= \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right) \\ &= \frac{1}{GH+14+273.15} G \\ &= \frac{G}{GH+287.15} \end{aligned} \quad (19)$$

(18) 和 (19) 式中: T 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; T_0 为地表温度, $^{\circ}\text{C}$, 一般取值为 14°C 。

在静水压力条件下, 岩石有效应力可以近似为深度的函数:

$$\sigma = P_r - P \approx 1.3\rho_w gH \quad (20)$$

因此, 岩石孔隙体积由于有效应力降低而回弹的变化率与深度的关系 (简称孔隙体积随深度变化的回弹率) 为

$$-\frac{1}{V_r} \left(\frac{\partial V_r}{\partial H} \right)_{\text{回弹}} = -\frac{1}{V_r} \left(\frac{\partial V_r}{\partial \sigma} \right) \left(\frac{\partial \sigma}{\partial H} \right) \approx 1.3\rho_w g\beta_p \quad (21)$$

(20) 和 (21) 式中: σ 为岩石有效应力, MPa ; P_r 为上覆岩层压力, MPa ; V_r 为岩石孔隙体积, m^3 。

根据公式 (17)、(19) 和 (21) 计算静水压力条件下不同地温梯度时的气体体积回弹率、气体体积收缩率和孔隙体积回弹率 (孔隙体积压缩系数选取东营凹陷砂岩压缩系数, 一般来说其他岩石的压缩系数要小于砂岩的压缩系数), 结果如图 3 所示。由抬升前至抬升剥蚀后的各个体积变化量可以通过对深度进行定积分求取。如抬升前埋深为 H_1 , 抬升剥蚀后埋深为 H_2 , 则过 H_1 和 H_2 平行于 X 轴的平行线与各条曲线所围成的面积即为各项体积变化量 (图 3)。从图 3 可以看出, 不管地温梯度、抬升前深度及抬升高度如何变化, 气体回弹体积增加量永远大于气体体积的收缩降低量与孔隙体积的回弹增加量之和 (注: 图 3 中横坐标为对数坐标), 因此在抬升剥蚀后地层压力应大于静水压力。所以对于气层来说, 不管地温梯度、抬升前深度及抬升高度如何变化, 抬升后总是趋向于形成异常高压。

由于仅仅讨论了构造抬升剥蚀对气层压力的影响, 并没有考虑构造抬升剥蚀后气藏气体分子的扩散过程, 而一些文献认为气体的扩散也是气层形成低压的一种原因。因此, 虽然抬升剥蚀后瞬间趋向于引起气层形成异常高压, 但经历构造抬升剥蚀的气藏并不一定都会是异常高压气藏。同样为抬升剥蚀背景的气藏, 有的现今为高压气

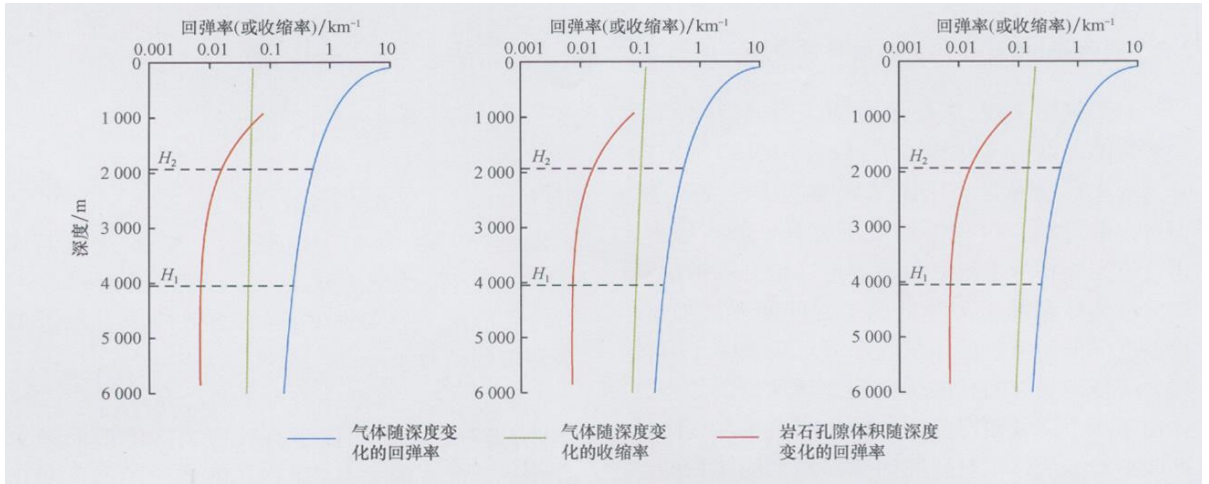


图 3 静水压力条件下气体的回弹率和收缩率及岩石孔隙体积回弹率与深度的关系

Fig 3 Burial depth vs rebound and constringency coefficient of gas as well as rebound coefficient of pore volume under hydrostatic pressure

a 地温梯度为 15 °C/km; b 地温梯度为 35 °C/km; c 地温梯度为 55 °C/km

藏,如川西侏罗系气藏^[21];有的为低压气藏,如鄂尔多斯上古生界气藏^[22-23]。

3 结论

1) 根据物理化学原理,推导出构造抬升剥蚀后地层压力的定量计算公式。公式表明,抬升剥蚀后,在绝对封闭的极限条件下,地层压力取决于抬升前的地层压力、流体的压缩系数、流体的膨胀系数、岩石孔隙体积的压缩系数、抬升剥蚀前后地层温度的变化和上覆地层的剥蚀厚度等。

2) 根据流体的压缩系数和膨胀系数及岩石孔隙体积压缩系数的变化特点,认为对于水层砂岩岩体,构造抬升剥蚀趋向于形成异常低压;对于气层,不管何种岩性,构造抬升剥蚀趋向于形成异常高压。因此,构造抬升剥蚀既可能形成异常高压,又可能形成异常低压,具体情况下应根据具体地质条件和岩石及流体的力学性质作具体分析。

参 考 文 献

1 贾致芳.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1989.135~136
2 张厚福,方朝亮,高先志,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.208~209
3 胡海燕.超压的成因及其对油气成藏的影响[J].天然气地球科学,2004.15(1):99~102
4 Neuzil C E, Pollock D W. Erosional unloading and fluid pressures in hydraulically tight rocks[J]. The Journal of Geology 1983

91(2): 179-193
5 Neuzil C E. Low fluid pressure within the Pierre Shale: a transient response to erosion[J]. Water Resour Res 1993. 29(6): 2 007-2 020
6 Parks K P, Toth J. Field evidence for erosion induced underpressuring in upper Cretaceous and Tertiary strata west central Alberta, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology 1995. 43(3): 281-292
7 关德范.大庆长垣成因及油气生成条件探讨[J].大庆石油学院学报,1981.5(1):11~22
8 关德范,王国力,张金功,等.成盆成烃成藏理论思维——从盆地到油藏[M].北京:石油工业出版社,2004.90~109
9 夏新宇,宋岩,房德权.构造抬升对地层压力的影响及克拉2气田异常压力成因[J].天然气工业,2001.21(1):30~34
10 夏新宇,宋岩.沉降及抬升过程中温度对流体压力的影响[J].石油勘探与开发,2001.28(3):8~11
11 夏新宇,曾凡刚,宋岩.构造抬升是异常高压的成因吗?[J].石油实验地质,2002.24(6):496~500
12 邹华耀,郝芳,蔡勋育.沉积盆地异常低压与低压油气藏成藏机理综述[J].地质科技情报,2003.22(2):45~49
13 姜振学,庞雄奇,田丰华,等.构造抬升卸压与油气成藏效应[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2006.28(3):47~49
14 田丰华,姜振学,夏淑华.砂体回弹在大庆油田形成过程中的贡献[J].中国石油大学学报(自然科学版),2008.32(2):16~20
15 关德范,徐旭辉,李志明,等.成盆成烃成藏思维与有限空间生烃模式[J].石油与天然气地质,2008.29(6):709~715
16 Russe ll W L. Pressure-depth relation in Appalachian region[J]. AAPG Bulletin 1972. 56(3): 528-536

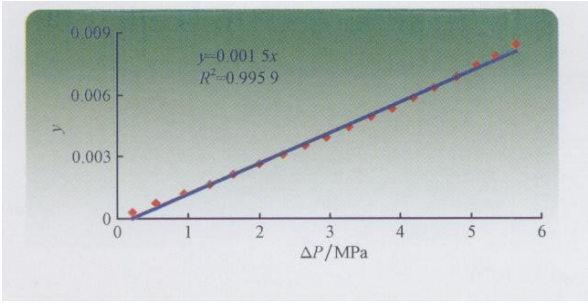


图 1 新 3 井水体能量分析

Fig 1 Diagram showing the aquifer energy in well X in 3

3 结论

1) 相对于正常压力系统气藏, 异常高压气藏有限封闭水体能量计算较复杂, 随着压力的降低, 含气区储层的再压实和岩石颗粒的弹性膨胀作用及束缚水的弹性膨胀不能忽略, 否则将引起较大的误差。

2) 可以运用本方法的思路对异常高压油藏有限封闭水体能量进行评价。

符号注释:

B_g 、 B_g 分别为原始气藏压力 P_i 及目前气藏压力 P 的气体体积系数, 无量纲;

B_w 表示地层水的体积系数, 无量纲;

C_r 、 C_w 分别为岩石压缩系数和地层水压缩系数, MPa^{-1} ;

G 、 G_p 分别为天然气原始地质储量和累计产气量, $10^8 m^3$;

n 表示水体倍数;

P_i 表示原始地层压力, MPa ;

P_s 表示标准状况下的压力, MPa ;

P 为开采到某一时刻的地层压力, MPa ;

S_w 为束缚水饱和度, %;

T_s 表示标准状况下的温度, K ;

T 为开采到某一时刻的气藏温度, K ;

V_{pw} 表示水体的地下体积, $10^8 m^3$;

W_e 、 W_p 分别为累计水侵量和累计产水量, $10^8 m^3$;

Z_i 、 Z 分别表示原始条件和开采到某一时刻下的天然气偏差因子, 无量纲;

ΔP 表示压降, MPa 。

参 考 文 献

1 李传亮. 油藏工程原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003

2 丁良成. 气藏有限封闭水体能量的评价方法 [J]. 新疆石油地质, 2006 27(5): 591~592

3 王鸣华. 气藏工程 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997

4 冈秦麟. 气藏开发应用基础方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997

5 陈元千. 油藏工程计算方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991

6 黄炳光, 冉新权, 李晓平. 气藏工程分析方法 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004

7 Dake L P. Fundamentals of Reservoir Engineering [J]. Amsterdam: Elsevier, 1978

8 塔雷克, 艾哈迈德. 油藏工程手册 [M]. 冉新权, 何江川, 译. 北京: 石油工业出版社, 2002

9 李传亮. 气藏水侵量的计算方法研究 [J]. 新疆石油地质, 2003 24(5): 430~431

10 李士伦, 王鸣华, 何江川. 气田与凝析气田开发 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004

11 叶军, 陈昭国. 川西新场大型气田地质特征与预测关键技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(3): 384~391

12 魏力民, 柳梅青. 川西新场蓬莱镇组层序地层研究与储层横向预测 [J]. 石油与天然气地质, 2000 21(3): 220~225

13 郑祥克, 何顺利, 王昔彬, 等. 新场蓬莱镇异常高压气藏气体单相渗流实验特征 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(1): 88~91

14 王占国. 异常高压对储层物性的影响 [J]. 油气地质与采收率, 2005 12(6): 31~33

(编辑 高 岩)

(上接第 688 页)

17 焦尊生, 萨达姆 R C 怀俄明州 Laramide 类盆地中的异常地层压力圈闭及其在天然气勘探开发中的意义 [J]. 断块油气田, 1994 1(6): 27~44

18 傅献群, 沈文霞, 姚天扬. 物理化学 (第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1990 17~19

19 李传亮. 地层抬升会导致异常高压吗? [J]. 岩性油气藏, 2008 20(2): 124~126

20 宋世谟, 庄公惠, 王正烈. 物理化学 (第 3 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993 44

21 张数球, 刘传喜, 刘正中. 异常高压气藏产能特征分析——以四川盆地河坝场构造飞三气藏河坝 1 井为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29(3): 376~382

22 李仲东, 郝蜀民, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界压力封存箱与天然气的富集规律 [J]. 石油与天然气地质, 2007 28(4): 466~472

23 李仲东, 郝蜀民, 李良, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界气藏与深盆气藏特征对比 [J]. 石油与天然气地质, 2009 30(2): 149~155

(编辑 李 军)