

地震前油井动态变化机理的初步探讨

刘元生, 张昭栋, 朱建亚, 王尤培, 韩海华

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 根据理想的水平层状含油层模型, 分析研究了地震前油井动态变化的机理. 认为由于地壳应力应变的作用, 使得含油层内的孔隙流体压力发生变化. 当应力增大时, 孔隙流体压力也随之增大, 进而引起油井的产液量和产气量发生变化.

主题词: 应力; 应变; 油井动态; 变化机理

中图分类号: TE33⁺1.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0321-04

0 引言

大震前深井油气动态会发生明显的变化, 这已为许多震例所证实^[1]. 无论是产油量还是产气量在地震前的变化都是以产量增加为主. 关于地震前油井动态变化的原因目前还没有定论. 本文利用理想的含油层模式研究了油井动态变化的机理.

1 地震前油井动态变化机理探讨

1.1 理想的含油层模型

含油层的地质构造情况较为复杂, 其几何形状、分布范围、厚度等都是不规则的. 为便于计算, 本文将含油层做理想化、简单化处理. 假定含油层的固体介质在力学性质上是各向同性的、完全均匀的弹性多孔介质, 含油层呈水平层状分布, 向周围无限延伸, 上下都有不透水隔层, 即油层呈封闭状态. 这就是理想的水平层状含油层模型^[2].

1.2 含油层内孔隙压力与油井压力的关系

含油层的封闭性一般是良好的. 当在含油层内打出一口油井以后, 原则上改变了含油层的封闭性质. 但是, 如果含油层储油量较大, 油井的孔径较小, 在较短的时间内含油层的孔隙压力与含油层压力的关系近似于封闭条件下的关系. 对于一个理想的水平层状含油层, 在绝热的状态下, 其应力应变的基本关系为^[3]:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{K} \left[\frac{(1+\nu)}{(1-2\nu)} \right] \sigma_{ij} - \frac{\nu}{1-2\nu} \sigma_t \sigma_{ij} - \frac{2}{3} P \hat{q}_j \quad (1)$$

式中:
$$\sigma_t = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (2)$$

为六面体正应力, 而

$$\alpha = 1 - \frac{K}{K_s} \quad (3)$$

式中: K_s 为固体颗粒的体积模量, K 代表包含非连通孔隙影响在内的固体部分的体积模量. K 与杨氏模量 E 的关系为:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

在式(1)~(4)以及下面的公式中, 遵照岩土力学中一般的习惯取压缩为正. 变量 ϵ_{ij} 、 σ_{ij} 和 P 只代表增量值, 即相对于未扰动状态的偏移, 特别是流体压力增量 P 并不包括流体静压力随高度力变化的部分. 当考虑到流体在多孔介质内流动时, 可以导出流体流动的应力与流体压力相互作用的方程:

$$k \nabla^2 \rho = S' \frac{\partial}{\partial t} (\rho - \beta \sigma_t) \quad (5)$$

及
$$\nabla^2 \sigma_t = \lambda \nabla^2 \rho \quad (6)$$

式中:
$$S' = \rho g \left[\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \right] + n \left[\frac{1}{K_t} - \frac{1}{K_s} \right] \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} \left[\frac{1}{K} - \frac{1}{K_s} + n \left[\frac{1}{K_t} - \frac{1}{K_s} \right] \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{2\alpha(1-2\nu)}{3(1-\nu)} \quad (9)$$

方程(5)和(6)组合在一起, 构成了一对 P 和 σ_t 的耦合方程. 可以将式(5)和式(6)看作是由完全可变形成分构成的均匀多孔介质内孔隙压力和应力相互作用的基本的本构方程.

根据方程(1)可以给出有关体积膨胀的关系式:

$$\epsilon = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} = \frac{1}{K} (\sigma_t - \alpha P) \quad (10)$$

利用式(10), 基本耦合方程也可用 σ_t 和 ϵ , 或者用 P 和 ϵ 来表达.

由方程(6)可以直观地看出, 含油层应力变化直接影响到流体孔隙压力的变化. 当含油层的应力增大时, 流体的孔隙压力也随之增大; 反之当含油层的应力减小时, 流体的孔隙压力也随之减小.

1.3 油井压力对产油量的影响

油井的自喷过程如图1所示. 含油层内的石油经过管道从井口喷出. 假定井管的截面积与含油层的面积相比是可以忽略的, 所考虑的问题经历时间较短, 并且石油在管内的流动呈层流状态, 那么由实际流体恒定总能量方程(伯努利方程), 可得出油管上出口处和位于含油层内的入口处流体压力之间的关系式为^[4]:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + H + h_w \quad (11)$$

式中: H 为井管总长度; P_1 和 P_2 分别为入口和出口处的压力; v_1 和 v_2 分别为入口处和出口处的平均速度; γ 为油的比重; g 为重力加速度常数; α 为大于1的无因次数, 称为动能校正系数; h_w 为压力的损失, 它是管流的沿程损失 h_f 和局部的损失 h_j 的叠加, 即:

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j \quad (12)$$

由达西-魏斯赫公式, 管流的沿程损失由下式得出^[4]:

$$h_f = \lambda \frac{H}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (13)$$

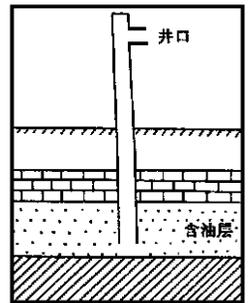


图1 含油层示意图
Fig.1 Sketch map of oil-bearing formation.

式中: d 为井管的内直径; v 为流体的平均流速; λ 为无因次数, 称为沿程阻力系数, 它与流体流动状态的雷诺数及管道的相对粗糙程度有关。

式(12)中的局部损失可写成:

$$h_j = \epsilon \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

其中: ϵ 称为局部阻力系数。

将式(13)和式(14)代入式(12)和式(11)中, 在沿程损失计算中, 考虑到流体在管道中的连续性, 故取管道内的平均流速等于管道底部的流速, 即 $v = v_1$, 并考虑到管道进口点和出口点 2 处的局部损失, 可得:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + H + \lambda \frac{H}{d} \frac{v^2}{2g} + \epsilon_1 \frac{v_1^2}{2g} + \epsilon_2 \frac{v_2^2}{2g} \quad (15)$$

再用流体的密度 $\rho = \frac{\gamma}{g}$ 代入上式得到:

$$(\alpha + \epsilon_2) v_2^2 = \frac{2}{\rho} (P_1 - P_2) - 2gH + \left[\alpha - \frac{\lambda H}{d} - \epsilon_1 \right] v_1^2 \quad (16)$$

由式(16)可见, 油井出口流体速度与许多复杂因素有关. 当井管出口开启的截面积不变时, 产油量取决于井口流速 v_2 的大小; 当系数 α 、 ϵ_1 、 ϵ_2 和 λ 不变时, 产油量取决于 P_1 、 P_2 和 v_1 , 其中起决定作用的是井底压力 P_1 的大小. 井底压力 P_1 越大, 油井管口压力 P_2 越大, 井口流速 v_2 越大, 产油量就越大。

由于石油的粘滞性, 因此在流动时就有摩擦力产生. 加上管道壁的阻力, 产生了能量损失, 形成压力损失. 为了讨论方便, 不考虑这些压力损失, 将其当作理想流体, 则式(16)可简化为:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho \alpha (v_2^2 - v_1^2) + \rho g H \quad (17)$$

由式(17)可以更清楚地看出, 油井管口流速主要取决于井底压力 P_1 . 井底压力越大, 则油井管口流速将越大, 产油量将越大。

进一步研究分析表明, 石油粘滞阻力及压力的损失, 将对管口流速产生 2 个方面的影响: 一是使得流速减小; 二是管口流速变化滞后于井底压力变化, 即井底压力增大(或减小)后, 要滞后一段时间才影响管口流速的变化. 这一滞后时间的长短与石油的粘滞性及管道各种阻力有关. 粘滞性及各种阻力越大, 滞后时间越长。

2 结语

地震的孕育和发生与大区域应力场的调整变化有关. 大区域应力场的调整变化使得孕震区及其以外大范围的应力场发生变化, 使那里的岩层先发生弹性形变, 当应力增大到超过岩石应力屈服点后, 出现塑性形变, 并在岩石破裂前产生微破裂扩容. 这一系列的应力应变演化过程将影响到含油层的应力应变, 使含油层内的孔隙压力发生相应的变化, 致使油井口压力及流体流速发生变化, 从而引起油井产油量发生变化. 因此, 油井的动态变化反映了区域应力场的变化。

[参考文献]

- [2] 张昭栋, 刘元生. 油田注水和采油的压力变化对承压水位的影响[J]. 华北地震科学, 1985, 3(增刊): 57—62.
- [3] Van der kamp G, Gale J E. Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains[J]. Water Resources Research, 1983, 19(2): 538—544.
- [4] 黄文煌. 水力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980.

A PRELIMINARY STUDY ON MECHANISM OF DYNAMIC CHANGE OF OIL WELLS BEFORE STRONG EARTHQUAKE

LIU Yuan-sheng, ZHANG Zhao-dong, ZHU Jian-ya, WANG You-pei, HAN Hai-hua
(*Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China*)

Abstract: On the basis of model of ideal horizontal layered oil-bearing formation, a preliminary study on mechanism of dynamic change of oil wells before strong earthquake is made. Pressure of poro-fluid in oil-bearing formation changes by stress and strain in the crust. The pressure of poro-fluid is increased with increase of stress in the crust, then changes of oil output and gas output of oil wells are caused.

Key words: Stress; Strain; Dynamic of oil well; Change mechanism

(上接 316 页)

EFFECT OF OIL RECOVERY AND WATER FLOODING ON DYNAMIC OF OIL WELLS IN OIL FIELD

LIU Yuan-sheng¹, ZHANG Zhao-dong¹, LI Ji-xun², YIN Zhi-qing², ZHOU Bin²
(1. *seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China*;
2. *Seismological Office, Shangli oil Field, Dongying 257000, China*)

Abstract: On the basis of theory of elasticity and dynamics of ground fluid, effects of oil recovery and water flooding on dynamic of oil wells in oil field are analysed by horizontal layered oil-bearing formation model. It is discovered tha changes of stress and strain of the oil-bearing formation by oil recovery in other layer and water flooding resulted in change of pore pressure in the oil-bearing formation, which effected change of dynamic of oil wells.

Key words: Oil recovery; Water flooding; Dynamic of oil well; stress