

# 油田采油和注水对油井动态的影响

刘元生<sup>1</sup>, 张昭栋<sup>1</sup>, 李继训<sup>2</sup>, 尹志清<sup>2</sup>, 周 斌<sup>2</sup>

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014;

2. 胜利石油管理局地震台, 山东 东营 257027)

**摘要:** 采用弹性理论和地下流体动力学理论, 通过理想的水平层状含油层模型, 分析讨论了油田采油和注水对油井动态的影响. 认为异层采油和注水引起的含油层应力应变的变化, 使含油层孔隙压力发生变化, 进而对油井的动态产生影响.

**主题词:** 应力; 采油; 注水; 油井动态; 孔隙压力

**中图分类号:** TE357.6    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0311-06

## 0 引言

近年来环渤海地区被中国地震局确定为地震重点监视区. 为了加强对该区的地震监测, 增设了油田的油井动态观测. 研究工作证明, 油井动态与地震孕育和发生有密切的关系. 目前该项工作已引起了中外地震学者的重视.

在实际观测中发现, 在油井动态变化中存在一些干扰. 要从油井动态观测资料中提取地震信息, 就必需排除各种干扰的影响. 为此, 本文通过理想的水平层状含油层模型, 利用弹性理论<sup>[1]</sup>和地下流体动力学理论<sup>[2]</sup>, 对异层采油和注水引起的含油层应力应变的变化情况进行了分析研究, 建立了数学模拟表达式, 并根据其简化解讨论了采油和注水与油井动态变化之间的定性或定量的关系及其与含油层介质地质参数之间的关系, 供进行油井动态分析时参考.

## 1 边界应力对含油层介质的作用

设沿  $z$  轴方向有一个集中作用力  $Q$ , 其作用点在坐标原点. 在弹性半空间介质中的一个柱坐标系  $(r, \theta, z)$  内有<sup>[3]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1-2\mu} + \varepsilon_r \right\} = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1-2\mu} + \frac{\partial u}{\partial r} \right\} \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1-2\mu} + \varepsilon_\theta \right\} = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1+2\mu} + \frac{u}{r} \right\} \\ \sigma_z = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1-2\mu} + \varepsilon_z \right\} = \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{\mu\theta}{1-2\mu} + \frac{\partial \omega}{\partial z} \right\} \\ \tau_{rz} = \frac{E}{2(1+\mu)} r_{rz} = \frac{E}{2(1+\mu)} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (2)$$

当体积力  $f_r = f_z = 0$  时, 将式(2)代入式(1)得

$$\begin{cases} \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \nabla^2 u - \frac{u}{r^2} = 0 \\ \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \nabla^2 \omega = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

当  $z = 0, r \neq 0$  时,  $\tau_{rz} = 0, \sigma_z = 0$ .

假设在  $z = M_1$  平面中, 把弹性半空间的上半部分单独取出, 由被取出部分的  $z$  向平衡条件得到:

$$\int_0^\infty \sigma_z (2\pi r dr) + Q = 0 \quad (4)$$

这样可以解出  $z = M_1$  平面上的垂直向应力分布为:

$$\sigma_z(r, \theta, M_1) = -\frac{3Q}{2\pi} \frac{M_1^3}{(r^2 + M_1^2)^{5/2}} \quad (5)$$

根据叠加原理, 可以求出在一个正方形区域内均匀荷载情况下, 在  $z = M_1$  平面上的垂直向应力分布公式, 在笛卡尔坐标系中为:

$$\sigma_z(x, y, M_1) = \frac{3qM_1^3}{2\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{d\xi d\eta}{[M_1^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{5/2}} \quad (6)$$

其中:  $q$  为单位面积上的荷载力, 上式还可写成:

$$\sigma_z(x, y, M_1) = -q[1 - C(x, y, M_1; t)]$$

其中:  $C(x, y, M_1; t)$  是应力传递衰减系数.

由式(6)可以看出, 应力传递的衰减与荷载的面积有关, 也与距地面的深度  $M_1$  有关. 随着深度的增大, 应力迅速衰减, 在某一研究深度上, 荷载的面积越大, 应力也越大. 当荷载面积无限大时, 应力衰减系数  $C = 0$ .

## 2 油田采油和注水对油井动态影响的数学表达式

注水是油田为了达到增产的目的经常采用的一种方法. 由于注水将引起含油层的应力应变发生变化, 进而影响油井动态, 因此注水是油井动态观测的一种主要干扰因素. 注水的影响一般有 3 种情况: 一是水直接通过断层裂缝渗流到含油层内, 使含油层内流体压力增加, 这是直接渗流效应; 二是将水注入到封闭的含油层上层或下层内, 从而引起含油层的上层或下层压力增加, 导致含油层的应力应变产生变化; 三是前 2 种情况的混合.

由于地质构造的复杂性, 含油层和含水层的分布情况也是十分复杂的. 为了讨论方便, 本

文只讨论 2 种典型的水平分层承压含油层理想模型。假设含油层、隔离层及地表覆盖层都是向四周无限伸展的水平层。各层都是理想的完全弹性各向同性的均匀介质。封闭含油层内有一个完整井。含油层被隔离层分隔为 2 个独立的封闭层, 如图 1 所示。

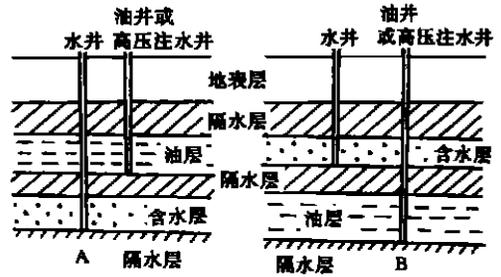


图 1 二种理想的水平分层含油层模型

Fig. 1 Two ideal models of horizontal layered oil-bearing formation.

以图 1 中模型 A 为例, 把含油层底面 (即含水层与含油层之间的隔离层的顶面) 作为  $xoy$  坐标面,  $z$  轴向下为正, 建立直角坐标系。当注水和采油引起的含油层压力的变化还没有超出各层介质的弹性极限时, 由弹性力学理论<sup>[1]</sup> 可以推知, 当含油层内压力变化时, 在含水层内应力将产生变化。这个应力变化的垂直向分量可表示为<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sigma_z(x, y, M_1; t) = -\frac{3}{2} \frac{M_1^3}{\pi} \frac{\partial}{\partial t} P(x, y; t) \cdot \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{d\xi d\eta}{[M_1^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{5/2}} \quad (7)$$

其中:  $M_1$  是含水层和含油层之间隔离层的厚度, 是含油层与隔离层接触面上的压强分布函数。

引入应力传递系数

$$\gamma = -\frac{3}{2} \frac{M_1^3}{\pi} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{d\xi d\eta}{[M_1^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{5/2}}$$

则式(7)可以简化成:  $\frac{\partial}{\partial t} \sigma_z(x, y, M_1; t) = \gamma \frac{\partial}{\partial t} P(x, y; z)$

由地下流体动力学理论可知, 对于水平分层模型的流体水运动的连续性方程为<sup>[5]</sup>:

$$-\left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} \right] M \hat{\alpha} \hat{\phi} = \frac{\partial}{\partial t} [n \rho M \hat{\alpha} \hat{\phi}] \quad (8)$$

其中:  $v_x$  和  $v_y$  分别是含油层内流体流速在  $x$  与  $y$  轴上的分量。

当只考虑垂直向压缩时, 水平坐标的增量  $\hat{\alpha}$  与  $\hat{\phi}$  可视为常量。含油层的孔隙度  $n$ 、流体的密度  $\rho$  和含油层的厚度  $M$  都为变量。所以方程(8)的右边就可写成

$$\frac{\partial}{\partial t} [n \rho M \hat{\alpha} \hat{\phi}] = \left[ \rho M \frac{\partial n}{\partial t} + n M \frac{\partial \rho}{\partial t} + n \rho \frac{\partial M}{\partial t} \right] \hat{\alpha} \hat{\phi} \quad (9)$$

假定含油层固体骨架满足虎克定律, 那么含油层单位面积内的体积变化是

$$dM \hat{\alpha} \hat{\phi} = -M \hat{\alpha} \hat{\phi} \cdot \alpha d\hat{\alpha} \quad (10)$$

其中  $\alpha$  为含油层固体骨架垂直向压缩系数。

含油层在外力作用下发生形变时, 主要是其孔隙体积  $V_p$  的变化, 而骨架固体颗粒的压缩性可以忽略不计, 所以含油层单位面积的体积变化可写作:

$$dV = dV_p \quad (11)$$

因此可得

$$dn = d\left(\frac{V_p}{V}\right) = \frac{V - V_p}{V} \cdot \frac{dV}{V} = (1 - n) \frac{dV}{V} \quad (12)$$

由式(10)与式(12)得出:

$$dn = -(1 - n) \alpha d\sigma_z \quad (13)$$

再假设含油层内的流体可压缩,并且也满足虎克定律,那么流体的密度与所承受的压强  $P$  有如下的关系:

$$dP = P\beta dP \quad (14)$$

其中:  $\beta$  为流体的压缩系数.

从式(9)、(10)、(13)和(14)可得到:

$$\frac{\partial}{\partial t} [n\rho M \hat{q} \hat{q}] = \left[ -\rho\alpha \frac{\partial \hat{q}}{\partial t} + n\beta \frac{\partial P}{\partial t} \right] M \hat{q} \hat{q} \quad (15)$$

按照 Terzaghi<sup>[5]</sup> 和 Skempton<sup>[6]</sup> 的理论,单位面积上含油层上覆地层的总压力  $\sigma$  与流体的压力  $P$  和含油层固体骨架所承受的应力  $\sigma_s$  有如下的关系:

$$\sigma = P(1-m) + m\sigma_s \quad (16)$$

式中:  $m$  表示单位面积内固体颗粒之间的接触面积,  $(1-m)$  是单位面积内流体与固体颗粒的接触面积. 由于  $m$  的实际值一般很小,而  $\sigma_s$  的值却很大,大约等于该面上固体的屈服应力,所以式(16)可以写为:

$$R + \sigma_c = \sigma_z + P$$

其中:  $R$  为传递到含油层顶面上的(由异层含油层产生的)垂直应力,  $\sigma_c$  为上覆地层在含油层顶面上产生的压力,  $\sigma_z = m\sigma_s$  为固体骨架的有效应力. 由于  $\sigma_c$  一般为常数,所以有:

$$d\sigma_z = dR - dP \quad (17)$$

由流体力学理论可知,压力水头  $H$  和动力压强  $P$  之间有如下关系:

$$gH = gz + \int_{P_0}^P \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} v^2$$

由于流体的压缩系数很小,而单位质量的动能也很小,因而可以忽略由于水的流速  $v$  产生的动能效应,那么有:

$$dP = \rho g dH$$

这样就可以把方程(8)写成

$$-\rho \left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right] - \left[ v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right] = \rho\alpha \left[ \frac{\partial R}{\partial t} - \rho g \frac{\partial H}{\partial t} \right] + n\theta^2 \beta g \frac{\partial H}{\partial t} \quad (18)$$

式(18)中左边第二括号项比第一括号项小得多,可以略去不计. 再由各向同性的含油层满足的达西定律,可以推得:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = \frac{\rho g (\alpha + n\beta)}{K} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\alpha}{K} \frac{\partial R}{\partial t} \quad (19)$$

其中:  $g$  为重力加速度,  $K$  为含油层的渗透系数.

方程(19)就是异层应力对封闭含油层影响的二维偏微分方程. 它的形式像一个有源的二维扩散方程.

### 3 方程的求解

先考虑边界荷载只在一个以油井为中心的正方形区域  $D$  ( $-1 < x < 1, -1 < y < 1$ ) 内, 设

$$f(x, y, t) = \begin{cases} \frac{-\alpha}{\rho g (\alpha + n\beta)} & \text{当 } (x, y) \in D \\ 0 & \text{当 } (x, y) \notin D \end{cases}$$

再令

$$a^2 = \frac{K}{\rho_g(\alpha + n\beta)}$$

油井液面降深

$$S = H_0 - H$$

则方程(19)及初始条件和边界条件可以表示为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = a^2 \left[ \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right] + f(x, y, t) \quad \begin{matrix} -\infty < x < \infty \\ t > 0 \end{matrix} \quad (20)$$

$$S(x, y, t)|_{t=0} = 0 \quad -\infty < x < \infty \quad (21)$$

$$\lim_{(x^2+y^2) \rightarrow \infty} S(x, y, t) = 0 \quad t > 0 \quad (22)$$

将方程(20)和初始条件式(21)对变量  $x, y$  进行二维傅里叶变换, 得到:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -a^2(\xi^2 + \eta^2)S + f \\ S|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

其中:  $F[S] = S, F[f(x, y, t)] = f$ . 方程(23)的解为:

$$S = \int_0^t f e^{a^2(\xi^2 + \eta^2)(t-\tau)} d\tau \quad (24)$$

对式(24)进行傅里叶逆变换, 可得到:

$$\begin{aligned} S(x, y, t) &= F^{-1}[S] = \\ &= \frac{-\alpha}{\rho_g(\alpha + n\beta)} \int_0^t \frac{1}{4\pi a^2(t-\tau)} \frac{\partial}{\partial t} R(\xi, \eta, \tau) d\tau \cdot \int_{-1}^1 e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\xi \cdot \int_{-1}^1 e^{-\frac{(y-\eta)^2}{4a^2(t-\tau)}} d\eta \end{aligned} \quad (25)$$

这就是异层应力影响油井压力的计算公式.

### 4 讨论

为了能得到一个解析解, 以便讨论采油和注水对封闭油层的影响, 假定在某一较短的时间间隔内, 这一影响为一个常量, 即

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t} P(x, y, t) = \text{常量} \quad (26)$$

并设

$$\mu = \frac{x-\xi}{2a\sqrt{t-\tau}}, \quad \nu = \frac{y-\eta}{2a\sqrt{t-\tau}}$$

把式(25)作变量置换, 然后考虑式(26), 就可得出:

$$\begin{aligned} S(x, y, t) &= \frac{-\alpha r p}{4\rho_g(\alpha + n\beta)} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \int_0^{\frac{1-x}{\sqrt{t-t_0}}} e^{-u^2} du + \int_0^{\frac{1+x}{\sqrt{t-t_0}}} e^{-u^2} du \right] \cdot \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \int_0^{\frac{1-y}{\sqrt{t-t_0}}} e^{-u^2} du + \int_0^{\frac{1+y}{\sqrt{t-t_0}}} e^{-u^2} du \right] = \frac{-\alpha r p}{4\rho_g(\alpha + n\beta)} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{1-x}{\omega}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{1+x}{\omega}\right) \right] \cdot \\ &\quad \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{1-y}{\omega}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{1+y}{\omega}\right) \right] \end{aligned} \quad (27)$$

其中:  $\omega = 2a\sqrt{t-t_0}$ , 而  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$  为误差函数.

由式(27), 当  $x \rightarrow 0, y \rightarrow 0$  时, 就可以得到油井液面降深公式为:

$$S_w = \frac{-\alpha r p}{\rho_g(\alpha + n\beta)} \cdot \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\omega}\right) \right]^2 \quad (28)$$

对于式(28)误差函数中的变量  $z$  有:

$$z = \frac{1}{\omega} = \frac{1 \sqrt{\rho g (\alpha + n\beta)}}{2K \sqrt{t - t_0}} \quad (29)$$

由误差函数的性质可知:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \operatorname{erf}(z) = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx = 1$$

由此可推知, 油井液面降深的极大值为:

$$S(O, O; t) = \frac{-\alpha \gamma p}{\rho g (\alpha + n\beta)} \quad (30)$$

由以上分析可见, 当油层内压力由于注水和采油发生变化时, 通常在含油层与含水层之间的隔离层内这种压力一部分衰减掉或变成水平分力, 另一部分传递到含水层与隔离层之间的接触面上. 接触面上的压力是由含油层固体骨架与含油层内的流体二者共同承受的, 其中小部分压力由固体骨架弹性形变承受, 而大部分压力由孔隙压力的变化来承受. 孔隙压力的变化使得油井动态发生变化. 另一方面, 由于压力的变化使含油层内的压力失去原来的平衡. 为了达

到新的平衡, 含油层内的流体产生渗流. 这种渗流变化使液面降按  $\operatorname{erf} \left( \frac{1}{\sqrt{t_1}} \right)$  的平方量值发生变化, 即液面降随时间的增加而逐渐恢复.

由式(30)可以看出, 异层采油和注水对封闭含油层应力应变的影响与采油和注水产生的压力变化有直接关系. 这种压力变化越大, 则产生的影响也越大, 在其它条件不变的前提下, 二者的变化成正比.

由式(30)还可以看出, 异层采油和注水对封闭含油层应力应变的影响与含油层介质的地质参数有关, 但此关系并不是一种简单的线性关系, 而是一种较复杂的非线性关系.

## 5 结语

本文的结论是在较理想化的情况下得出的, 只是基本上反映了油井动态与含油层应力应变的关系, 但是可以为油井动态的观测及排除干扰提供参考.

### [参考文献]

- [1] 铁摩辛柯 S T, 古地尔. 弹性理论[M]. 徐芝纶, 吴永祯译. 北京: 人民教育出版社, 1964. 48—75.
- [2] Bear J. Dynamics of Fluids in Porous[M]. Medis; American Eisevier Publishing Company, 1972. 151—167.
- [3] Terzaghi K. From Theory to Practice in Soil Mechanics[M]. New York, 1960. 45—81.
- [4] Skempton A W. Effective Stresses in Soils, Concrete and Rocks in Conference on Pore Pressure and Suction in Soils[M]. London, 1961. 4—16.
- [5] Robinson E S, Bell R T. Tides in confined well-aquifer systems[J]. J Geophys Res 1971, 76; 1957—1869.
- [6] 复旦大学数学系. 数学物理方程[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1960. 207—262.

(下转 324 页)

- [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-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Zhao-dong<sup>1</sup>, LI Ji-xun<sup>2</sup>, YIN Zhi-qing<sup>2</sup>, ZHOU Bin<sup>2</sup>  
(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