

由起潮力反演含油(水)层的应力变化

刘元生, 张昭栋, 崔桂梅, 王忠民, 董传富

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 通过水平层状封闭含油层模型, 根据弹性理论和地下流体动力学理论, 结合固体潮理论, 研究了起潮力对油井动态的影响, 给出了由起潮力反演含油层应力的方法. 用该方法计算了 1983 年菏泽 $M_s 5.9$ 地震和日本秋田 $M_s 7.7$ 地震的应力降, 所得结果与用其他方法计算的结果相近.

主题词: 引潮力; 应力; 含油层; 反演

中图分类号: TE33⁺1.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0329-04

0 引言

地震的孕育发生过程与地壳应力场的变化有直接关系. 深井油(水)动态对地壳应力场的变化有较灵敏的反映, 这已为大量的观测事实所证实. 不少学者正在研究利用油井动态变化进行地震的监测预报问题. 然而, 地壳应力场的变化在浅部有什么反映, 浅部地壳应力应变的变化对含油层的应力应变及油井的动态变化会产生什么影响, 这些问题都是需要进行研究的. 否则无法从油井动态观测资料中提取地震孕育和发生的信息.

在油田中除了用于地震观测的油井外还有不少用于水位观测的深井. 有些井的深度相当于含油层的深度, 而且封闭性良好, 对深层的应力应变有灵敏的反映. 这些深井水位的动态与油井动态有一些共性, 因为二者都是深层应力应变的反映, 都是多孔介质中流体孔隙压力的反映.

本文以油田的水位观测深井为例, 分析研究了起潮力与油(水)井动态的关系, 给出了明确的数学模拟方程, 并用其简化解给出了起潮力与含水(油)层应力应变之间的关系式, 提出了利用油(水)井动态反演含油(水)层应力变化的新方法.

1 用井水位的体应变固体潮效应反演含水层的应力变化

1.1 井水位体应变固体潮效应

人们对穿过封闭含水层的水井水位能够反映地球固体潮的认识, 已有 100 多年的历史了. 由于井水位响应的量值与含水层的弹性介质有关, 因此, 很多学者对此做了大量的观测研究工作^[1~5]. 本文采用了水文地质中最典型的水平分层承压含水层模型, 即含水层是各向同性的均匀介质, 其上下都分布有不透水隔层, 各层都是水平展布且向四周无限延伸. 含水层内有一口井径不大的完整井. 另外假定各层介质是完全弹性介质. 根据弹性理论和地下流体动力学理

收稿日期: 2000-01-10

基金项目: 山东省科委重点科研项目(98114410)

作者简介: 刘元生(1945—), 男(汉族), 山东济南人, 高级工程师, 从事地震科技开发和地震地质等研究工作.

论,可以建立体应变固体潮对承压含水层水位影响的偏微分方程^[6]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \nabla^2 H - \frac{K}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \frac{\partial \Theta}{\partial t} \tag{1}$$

其中: H 为含水层的承压水头; K 为含水层的渗透系数; ρ 为含水层内水的密度; g 为重力加速度常数; n 为含水层的孔隙度; α 为含水层固体骨架的体积压缩系数; β 为含水层内水的体积压缩系数; Θ 为固体潮应变.

通过一定的边界条件,可以求出方程(1)的简化解,从而得到水井水头与体应变固体潮之间的关系:

$$\mathcal{H}_w = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta]} \cdot \Theta \tag{2}$$

从上式可以看到,对某个井孔来说,其含水层系统的参数确定不变时,水位变化与固体潮体应变成正比.实际观测结果也证明了这个关系式是正确的^[7].

1.2 潮汐应力和体应变固体潮

假设地球为各向同性的均匀弹性球体,选取右旋直角坐标系,以地心为原点,地球和月球的中心连线为 x 轴, z 轴在白道内, y 轴垂直于白道面.为简化起潮力位求解,设地球表面为自由边界,可以求得在地球坐标下地球内部的潮汐应力的一般表达式为^[5]:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{2(4\lambda + 3\mu)}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} (a^2 - r^2)(3\cos^2 \theta - 1) \\ \sigma_\theta &= -\frac{8\lambda + 6\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} (a^2 - r^2)(3\cos^2 \theta - 2) + \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} r^2 \\ \sigma_\varphi &= -\frac{8\lambda + 6\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} (a^2 - r^2) + \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} r^2 (3\cos^2 \theta - 2) \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{6(4\lambda + 3\mu)}{19\lambda + 14\mu} \frac{GM \rho_e}{R^3} (a^2 - r^2) \sin \theta \cdot \cos \theta \\ \tau_{r\varphi} &= 0 \\ \tau_{\theta\varphi} &= 0 \end{aligned} \right. \tag{3}$$

式中: σ_r 为径向潮汐正应力; σ_θ 和 σ_φ 分别为地球二个主方向的潮汐正应力; $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{r\varphi}$ 和 $\tau_{\theta\varphi}$ 为剪应力; λ 和 μ 为拉梅常数; G 是万有引力常数; M 为月球的质量; ρ_e 为地球的密度; R 为地心到月球质心的距离; a 为地球的平均半径; r 为地球到考察点的距离; θ 为月球对考察点的天顶距.

本文讨论的含水层距地表一般不超过 4km,比地球半径要小得多.为了计算方便,先考虑在地球表面潮汐应力的分布规律.当 $r = a$ 时,由式(3)得出:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \tau_{r\theta} = \tau_{r\varphi} = \tau_{\theta\varphi} = 0 \\ \sigma_\theta &= \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM \rho_e}{R^3} a^2 \\ \sigma_\varphi &= \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM \rho_e}{R^3} a^2 (3\cos^2 \theta - 2) \end{aligned} \right. \tag{4}$$

体应力的表达式为:

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_\varphi = \frac{3\lambda + 2\mu}{19\lambda + 14\mu} \cdot \frac{GM \rho_e}{R^3} a^2 (3\cos^2 \theta - 1) \tag{5}$$

如果只考虑近地球表面的潮汐应变, 则有:

$$\left\{\begin{aligned}\epsilon_r &= \frac{\lambda}{2\mu(19\lambda+14\mu)} \frac{GM\rho_e}{R^3} a^2 (1-3\cos^2\theta) \\ \epsilon_\theta &= \frac{3\lambda+2\mu}{2\mu(19\lambda+14\mu)} \frac{GM\rho_e a^2}{R^3} + \frac{\lambda}{3\mu(19\lambda+14\mu)} (1-3\cos^2\theta) \\ \epsilon_\varphi &= -\frac{3\lambda+2\mu}{2\mu(19\lambda+14\mu)} \frac{GM\rho_e a^2}{R^3} - \frac{\lambda+\mu}{3\mu(19\lambda+14\mu)} \cdot \frac{GM\rho_e a^2}{R^3} (1-3\cos^2\theta) \\ \epsilon_{r\theta} &= \epsilon_{r\varphi} = \epsilon_{\theta\varphi} = 0\end{aligned}\right. \tag{6}$$

因此可得体应变:

$$\Theta = \epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_\varphi = \frac{1}{19\lambda+14\mu} \cdot \frac{GM\rho_e}{R^3} a^2 (3\cos^2\theta - 1) \tag{7}$$

将体应力和体应变相比:

$$\frac{\sigma}{\Theta} = 3\lambda + 2\mu \tag{8}$$

1.3 井水位和含水层应力变化

对于某一给定的含水层来说, 体应力和体应变的比值是一个常数, 而对于不同性质的含水层而言, 这个比值是不同的.

Narasimhan 从另一个途径也推出类同的结论^[4], 即固体潮造成的平均主应力变化与固体潮产生的体应变有如下关系:

$$\bar{\sigma}_m = k \cdot \Theta \tag{9}$$

式中: k 是含水层弹性模量的估计值. 对于深部封闭含水层, k 一般取 50 GPa.

由式(2)和式(8)可以得到:

$$\bar{H}_w = \frac{1}{\rho g[(1-n)\alpha + n\beta](3\lambda + 2\mu)} \cdot \bar{\sigma} \tag{10}$$

由式(10)可见, 对于某一井孔含水层系统来说, 由固体潮引起的承压水头的变化与引起它的潮汐平均应力变化成正比, 故可把式(10)写为:

$$\bar{H}_w = k_w \bar{\sigma} \tag{11}$$

对于给定的井含水层系统, 式(11)中的比例系数 k_w 也是一个常数. 当然, 对于不同的井孔, 由于各参数不一样, 比例系数 k_w 也因井而异.

式(11)是利用井水位变化反演含水层应力变化的主要公式. 根据固体潮理论^[9] 计算出处在不同纬度的井孔含水层受到的固体潮体应力的最大变化值, 再由井孔水位观测资料计算出水头对固体潮响应的最大变化值, 这 2 个值之比即该井孔的平均比例系数 k_w . 即

$$k_w = \frac{\Delta h_{\max}}{\Delta \sigma_{\max}} \tag{12}$$

有了这个比例系数, 就可以利用式(11)来计算井水位变化所对应的含水层应力变化. 表 1 给出了部分井的应力比例系数值.

表 1 部分井孔的应力系数

井孔名称	应力系数	井孔名称	应力系数	井孔名称	应力系数
定襄井	5.437	静乐井	16.257	太原井	3.588 7
孝义井	2.709 0	介休井	9.744 0	霍县井	9.967 5

续表 1

井孔名称	应力系数	井孔名称	应力系数	井孔名称	应力系数
镇川堡井	0.020 60	万全井	0.010 3	永清井	0.027 3
玉田井	1.752 9	昌黎井	0.020 8	雄县井	1.307 8
马 17 井	0.014 0	永年井	1.692 2	丰南井	1.233 7
滦南井	0.007 7	完县井	1.775 9	深泽井	0.007 7
双桥井	0.002 94	徐庄子井	0.002 94	东台子井	0.002 94
高村井	0.140	五里营井	0.026 24	丰台井	0.007 7
塔院井	3.048 2	通县井	1.787 2	—	—

2 震例分析

2.1 1983 年菏泽 Ms5.9 地震时应力场的变化

1983 年菏泽 Ms5.9 地震前后,鲁西和豫东地区部分深井水位发生明显的变化.其中变化最大的水井是豫 01 井,该井是距震中最近的一口承压井,震中距约 72 km.该井水位在震后短时间内下降了 120 mm.根据该井的固体潮效应,利用本文给出的方法反演震时应力降为 $1.16\times 10^5\text{ Pa}^{[7]}$.1986 年魏富胜等利用震源机制资料得出菏泽 5.9 级地震产生的应力降为 $7.0\times 10^5\text{ Pa}^{[8]}$.二种结果具有相同的数量级.

2.2 1983 年日本秋田地震时中国应力场的调整变化

1983 年日本秋田 7.7 级地震前后,中国有许多井水位产生阶变.利用本文的方法反演了这些井含水层的应力变化,结果见表 2.

表 2 用二种方法反演的含水层应力变化

序号	井名	应力变化/Pa		序号	井名	应力变化/Pa	
		理论模型	固体潮			理论模型	固体潮
1	蛟河	87	150	21	鲁 14	-2 100	-880
2	本溪 1	23 000	7 900	22	豫 40	-270	-250
3	本溪 2	11 000	1 400	23	豫 49	-1 200	-890
4	丹东变电	2 000	3 100	24	蚌埠	240	1 000
5	岫岩 1	1 200	230	25	马鞍山	4 800	2 100
6	温泉	-2 500	-1 200	26	含山	-3 700	-2 800
7	高村	-1 200	-420	27	太原 2	-1 200	-1 300
8	容 1	-120	-87	28	浦原	3 700	3 300
9	雄县	-170	-140	29	龙岩	2 500	1 700
10	新泽	-100	-140	30	柱坑	3 400	3 400
11	永年	-620	-500	31	凤翔	210	490
12	苏 01	-760	-420	32	石咀山	-250	-940
13	苏 02	-1 900	-450	33	西昌	-2 500	-1 200
14	苏 07	470	620	34	盐边	-520	-330
15	苏 15	-620	-630	35	泸州	-170	-400
16	苏 17	-100	-550	36	个旧	-5 100	-4 800
17	苏 21	-370	-710	37	曲靖	-250	-320
18	苏 22	-100	-450	38	楚雄	-160	-190
19	苏 07	-2 400	-930	39	保山	87	990
20	苏 09	-2 500	-1 900	40	乌 11	130	180

由表 2 可见,根据文献[1]给出的理论模型计算的结果与利用本文给出的公式计算的结果基本上具有同一数量级.

利用井水位变化对 2 次地震引起的压力变化的反演结果表明,利用本文的方法得出的反演结果有一定的参考价值.

[参考文献]

(下转 342 页)

- [1] 张昭栋, 刘元生, 丁仁杰. 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.

A STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN LIQUID OUTPUT OF OIL WELL AND PRESSURE AT THE BOTTOM OF THE WELL

LIU Yuan-sheng¹, HU Jiu-bo², ZHANG Zhao-dong¹,
CUI Gui-mei¹, ZHANG De-yuan³

(1. *Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China;*

2. *Development Company for Urban Construction of Linyi City, Linyi 276000, China;*

3. *Dagang Oil Administrative Bureau, Tianjin 300201, China*)

Abstract: The quantitative relation between liquid output of an oil well and pressure at the mouth and the bottom of the well is studied by using the theory of hydrokinetics. The relation exchanging liquid output of the oil well for the pressure at the mouth of the well equivalently is given. The processing method for observation data of oil well dynamic is studied further. Taking Dongshui-3 well in Shengli oil field as an example, processing of observation data of the well is made and effect of radius of outlet pipe on flow of the pipe and equivalent water level is studied.

Key words: Dynamic of oil well; Confined well; Liquid output; Flow; Pressure at the bottom of well; Dongshui-3 well

(上接 332 页)

- [1] 张昭栋, 张广城. 利用水位阶变资料反演震时应力场的调整变化[J]. 地震研究, 1987, 10(6): 693—702.
[2] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 一种估算地震引起应力场调整的新方法[J]. 地震, 1988, (3): 19—27.
[3] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 日本秋田地震(1983年7.7级)引起我国应力场的震时调整变化[J]. 地震学报, 1990, 12(1): 60—69.
[4] 张国民, 杨军. 潮汐现象和地震前兆观测[J]. 地震, 1983, (1): 1—8.
[5] 张昭栋. 地下水潮汐分析[M]. 济南: 山东大学出版社, 1988.
[6] Melchior P. The tide of the planet earth[M]. Pergmon press, 1978. 249—303.
[7] 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 从深井水位变化反演鲁西应力场在菏泽 5.9 级地震时的调整[J]. 地壳形变与地震, 1991, 11(1): 29—35.
[8] 魏富胜, 谷继成. 山东菏泽地震的震源参数[J]. 地震学报, 1986, 8(2): 108—110.

INVERSION OF CHANGE OF STRESS IN OIL (WATER)-BEARING FORMATION BY TIDE-GENERATION FORCE

LIU Yuan-sheng, Zhang Zhao-dong, CUI Gui-mei,
WANG Zhong-min, Dong Chuan-fu

(*Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250014, China*)

Abstract: On the basis of the theory of elasticity and hydrokinetics, effect of tide-generation force on dynamics of oil wells is studied referring to the theory of earth tide and by using model of horizontal layered oil-bearing formation. A method inverting stress in oil-bearing formation by tide-generation force is given. The stress drops of two earthquakes are calculated by the method. The results by the method approach results by other methods.

Key words: Tide-generation force; Stress; Oil-bearing formation; Inversion