

油井产液量与井底压力关系的研究

刘元生¹, 胡久波², 张昭栋¹, 崔桂梅¹, 张德元³

(1. 山东省地震局, 山东 济南 250014; 2. 临沂市城建开发公司,
山东 临沂 276000; 3. 大港石油管理局, 天津 300201)

摘要: 利用流体动力学理论, 研究了油井产液量与井口压力、井底压力之间的定量关系, 给出了井口压力和油井产液量之间的等效互换关系, 进一步研究了油井动态观测资料的科学处理方法. 以胜利油田东水-3 井为例, 对其观测资料进行了处理, 并讨论了泄流管管径对流量及等效水位的影响.

主题词: 油井动态; 承压井; 产液量; 流量; 井底压力; 东水-3 井

中图分类号: TE33⁺1.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)03-0338-05

0 引言

油田含油层一般埋藏较深, 有些深达数千米, 并且封闭性较好, 所以对地壳应力应变反映较灵敏, 具体反映在油井动态变化方面. 然而, 油井动态观测资料中包含了多种干扰信息, 因此如何处理油井动态资料, 以提取准确的地壳应力应变信息, 这是近年来不少学者致力于研究的课题.

本文利用流体动力学理论, 研究了油井产液量与井口压力、井底压力之间的定量关系, 进一步研究了油井动态观测资料的科学处理方法.

1 油井产液量与井底压力的关系

油(水)井动态变化可以反映地壳的应力状态, 因此, 通过研究油(水)井动态变化可以了解震源区介质应力、应变的演化过程.

在目前的油井动态与地震关系的研究中, 采用的参量大多为油井的产液量, 作者认为用油井的井底压力可能更直接、更科学. 多年的油井动态观测实践表明, 油井的井底压力与井口压力和产液量三者之间有密切的关系^[1].

假设一口水位高出地面的承压井, 在近地面的井管上有一个泄流管(图 1). 当泄流管的开关闭后, 井水位将上升到某一高度后平衡下来. 根据流体静力学理论, 对于以泄流管中心轴线为起点的绝对全压强为:

$$P_w(t) = \rho g H(t) + P_a(t) \quad (1)$$

即

$$H(t) = [P_w(t) - P_a(t)] \cdot 1/\rho g \quad (2)$$

其中: ρ 为井水的密度; g 为重力加速度常数; $P_a(t)$ 为井水面上的大气压强; $H(t)$ 为平衡时

收稿日期: 2000-02-20

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.

的水头。

当打开泄流管的开关后, 井水从泄流管流出, 井孔中的水位随之逐渐下降, 经过一段时间后, 达到动态平衡, 井孔中的水位稳定在某一高度, 泄流管中的流量也稳定在某一数值. 如果把井水看作理想流体, 井水在各管道中流动无任何阻力, 根据流体力学理论可以导出相对泄流管中心轴线的水头绝对全压强为:

$$P_w(t) = \rho gh(t) + 1/2 \rho v_2^2(t) + P_a(t)$$

(3)

式中: $h(t)$ 为泄流平衡时的水位, 即从泄流管的中心线算起的井孔水位高度; $v_2(t)$ 为泄流管内水的流速.

由式(2)和式(3)有

$$H(t) = h(t) + v_2^2(t)/2g$$

(4)

由于泄流管的流量 $Q_2(t) = \pi r_2^2 v_2(t)$, 所以式(4)变成

$$H(t) = h(t) + Q_2^2(t)/2g\pi^2 r_2^4$$

(5)

其中: r_2 为泄流管的半径.

式(5)是在理想流体及泄流动态平衡状态下得出的. 实际流体在管道内流动时会产生某些阻力, 造成泄流阻力损失, 所以式(5)变成:

$$H(t) = h(t) + Q_2^2(t)/2g\pi^2 r_2^4 + h'$$

(6)

如果不是在泄流动态平衡情况下, 例如井孔压力由于某种原因突然增大, 那么将导致井孔内水位升高和泄流速度加快. 这时静水位、动水位和泄流量之间的关系就相当复杂, 而不象式(6)那么简单. 但是, 如果忽略在井孔中水的动力学效应(因为在井孔内水的流动是相当慢的), 那么式(6)还可以用来描述这种情况.

一般的承压深井都具有明显的气压效应和固体潮效应. 考虑到这 2 种效应以后, 式(6)应改写为:

$$H(t) = h(t) - B_P P_a(t) - B_G G(t) + Q_2^2(t)/2g\pi^2 r_2^4 + h'$$

(7)

其中: B_G 为水井水位的固体潮系数, $G(t)$ 为固体潮理论值, B_P 为水井水位的气压系数.

式(7)中右边第 4 项表示泄流造成的水头损失, 称之为等效水头, 即

$$h_e(t) = Q_2^2(t)/2g\pi^2 r_2^4$$

(8)

由式(8)可见, 等效水头与泄流量及泄流管管径有关. 当泄流管的半径一定时, 等效水头与泄流量的平方成正比; 当泄流量一定时, 等效水头与泄流管半径的 4 次方成反比. 由此可见, 泄流管的半径对等效水头的影响非常大, 只要泄流管的半径略有改变, 就将使等效水头产生明显的变化. 图 2 给出了等效水头与泄流量及泄流管管径的关系曲线.

2 产液量变化与井口压力资料的处理

油井的产液量即单位时间内油井产出的油(水)总量. 在实质上产液量与物理学中的液体流量相似, 即单位时间内流出液体的体积. 要用油井的井底压力来研究含油层的应力状态, 就必需排除油井产液量的变化对油井井底压力的干扰, 即应将油井井口压力与产液量换算为油井的井底压力. 现以东水-3 井为例来说明定量计算方法.

以前处理东水-3 井观测资料时, 把“动水位”和流量 2 个参数分别处理后, 得出经固体潮及气压改正后的水位曲线和不经任何改正的流量曲线. 其中没有考虑“动水位”和流量二者之

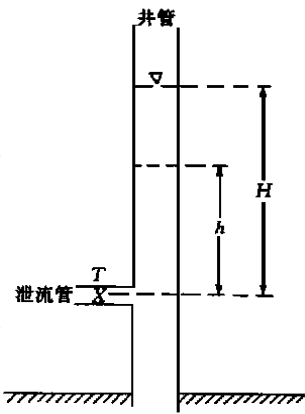


图 1 有泄流的承压井示意图

Fig. 1 Sketch map of a confined well with outlet.

间的定量关系. 本文提出一个新的处理方法, 用一个量来计算“动水位”和流量.

第一步: 对“动水位”进行固体潮和气压改正. 改正后的水位为:

$$h_1(t) = h(t) - B_P P_a(t) - B_G G(t)$$

(9)

这样式(7)可以简化为:

$$H(t) = h_1(t) + h_e(t) + h'$$

(10)

由式(10)可见, $h_1(t)$ 、 $h_e(t)$ 及 h' 相互关联, 当其中一项发生变化时, 其它项也随之发生相应的变化. 为了确定它们之间的关系, 可以考虑突出主要因素, 忽略影响较小的次要因素, 创造一些特定条件, 使其中的一二项保持不变. 例如, 如果选取一段无地震和降雨干扰的“平静”时段, 可以近似地认为此时段中含水层的孔隙压力不发生变化, 所以相当于井水静止水头 $H(t)$ 也基本上不发生变化. 在静水位观测中, 这样的“平静”时段是存在的. 那么式(10)中的右边等于常数.

式(10)中的阻力损失水头 h' 与井孔条件及水流速度有关. 例如, 截面积的大小、井管的长短、管壁的粗糙程度及井管大小等等. 当这些条件一定时阻力损失水头 h' 与水在管内的流速有关. 当管内的流速很小时, h' 变化也很小, 可以看成是一个常数.

因此, 关键是选取一个较“平静”的时段, 在这一时段里要求经固体潮和气压改正后的水位 $h_1(t)$ 变化很小, 而流量 Q_2 也变化很小, 那么就可以认为 $H(t)$ 和 h' 二者的变化都不大, 二者之和近似于一个常数. 事实上, 忽略 h' 变化的影响, 把这一影响归到流量 Q_2 的变化中, 这给计算系数 K 值带来一定的误差. 但是由于观测井孔的流量不大, 东水-3 井的流量小于 0.14 l/s, 所以 h' 值的变化也不大, 是可以忽略的. 在前面推证公式时, 用了分析渗流的最一般假定, 即水在井管内的流动是稳流. 这就要求其流速不很大, 这样也保证了 h' 的变化不大. 因此本文的公式是有一定的适用范围的. 如果不忽略这一影响, 是无法求出 h' 的, 因为对于已成井的井管很难用实验的办法来求出确切的值.

如果忽略 h' 的变化, 那么式(10)就简化成

$$h_1(t) = KQ_2^2(t) + b$$

(11)

其中: b 为一个常数, 而比例系数 K 是 r_2 的函数, 即

$$K = -1/2g\pi^2 r_2^4$$

(12)

在理论上比例系数 K 是一个常数, 但由于井水矿物质在泄流管壁沉淀, 使 r_2 的大小也随时间而变化, 再加上泄流管对水流的阻力, 所以利用式(12) 已很难确切计算出实际的比例系数 K 的大小.

第二步: 求比例系数 K . 通过式(11), 利用水位和流量的观测数据, 用一元回归得出比例系数 K .

如果把式(11)的二边对时间 t 求一阶导数, 可得到

$$K = dh_1(t)/dQ_2^2(t)$$

(13)

其中 $dh_1(t)$ 和 $dQ_2^2(t)$ 分别用一阶差分值代替, 就可以方便地计算出 K 值.

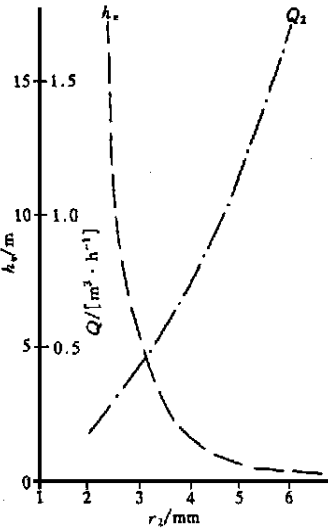


图 2 等效水头 (h_e) 与泄流量 (Q_2) 和泄流管径 r_2 的关系

Fig. 2 Relationship between equivalent head of water (h_e) and sluicing capacity (Q_2) and radius of outlet pipe (r_2).

第三步: 计算等效静水位. 有了比例系数 K , 可以把流量化成等效水头(或等效水位), 即

$$h_e(t) = kQ_2^2(t) \tag{14}$$

把等效水位与“动水位”加到一起, 可以得出等效静水头(或等效静水位), 即

$$H_e(t) = h_1(t) + h_e(t) \tag{15}$$

3 实例计算

用上述步骤处理了东水-3 井 1998 年 1~5 月的观测资料, 见图 3. 由于清洗泄流管, 图 3 中 1 月 16 日的“动水位”和流量产生了不连续的阶跃, 使得等效静水位产生一个不连续的突变.

从图 3 中可以清楚地看出, “动水位”和流量二条曲线, 一个呈趋势性上升, 一个呈趋势性下降, 给综合分析造成一定的困难. 把流量转化为水位后, 得出一条等效静水位曲线, 由图可见, 东水-3 井 1998 年 3~5 月的等效静水位相对平稳, 这段时间内该井的外界干扰因素比较少.

4 讨论

4.1 泄流管管径对流量的影响

由流体力学理论可知, $Q = \omega v$. 若泄流管为圆管, 则 $Q = \pi r^2 v$. 由此可见, 流量与泄流管管径的平方成正比 (当然指在其它条件不变的情况下). 东水-3 井的井内矿物质较多, 这些矿物质沉淀在泄流管壁上, 使管径变小, 所以流量就慢慢变小. 可见泄流管管径对流量的影响较大.

4.2 泄流管管径对等效水位的影响

由式(14)和式(12)可知, 流量的等效水位是

$$h_e(t) = Q_2^2(t)/2g\pi^2r_2^4 \tag{16}$$

所以当泄流量不变时, 等效水位与泄流管管径的 4 次方成反比. 因此, 泄流管管径的轻微变化将对等效水位产生明显的影响.

4.3 流量对等效水位的影响

由式(16)可知, 当泄流管管径不变时, 等效水位与流量的平方成正比. 可见流量对等效水位有显著的影响.

由式(15)和式(14)可以看出, 在水井水头绝对全压强不变的情况下, “动水位”与等效水位之和是一个常数. 所以流量增大时, “动水位”反而减小; 流量减小时, “动水位”反而增大.

当水井水头绝对全压强发生变化时, 将引起“动水位”和泄流量二者同时发生变化. 把流量化为等效水位, 那么等效静压力水头也要发生变化, 这种水头的变化也恰好反映了水井水头绝对全压强的变化. 所以用等效静压力水头的变化可以研究含水层应力应变的变化情况.

对于油井产液量来说, 可以用等效静压力 $\rho_e g H_e(t)$ 来研究含油层应力应变的变化. 其中 ρ_e 和 H_e 分别为油井液体混合密度和等效静压力水头.

感谢胜利油田地震台为本项研究提供了东水-3 井的有关资料.

[参考文献]

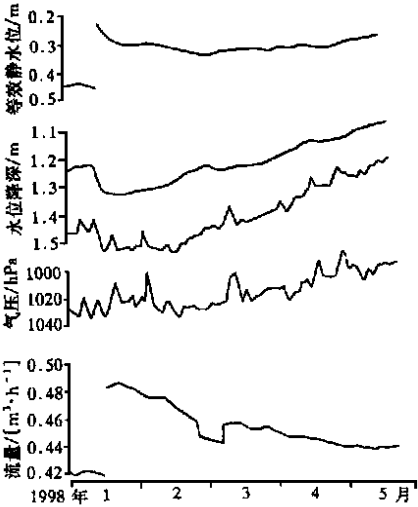


图 3 东水-3 井观测资料的处理结果
Fig. 3 The processing result for observation data of Dongshui 3 well.

- [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