

抽水引起的含水层水平运动及其在地质灾害分析中的应用^{*}

王庆良 王文萍 梁伟锋 刘 练

(中国西安 710054 国家地震局第二地形变监测中心)

摘要 根据 Darcy-Gersevanov 关系式, 导出了单井抽水引起的 Theis-Thiem 型承压含水层固体骨架的水平位移及水平应变表达式, 并详细分析了其随连续抽水时间 t 以及径向距离 r 的变化关系。在应用部分, 本文就地裂缝活动的抽水影响机理和油(水)井套管变形破坏的注(抽)水影响机理问题, 提出了比较新的观点。

主题词 水平运动 地裂缝 抽取地下水 含水层 套管变形破坏

引言

抽取地下流体可以引起多孔介质的垂直固结压密变形, 对此人们通过大量的地面沉降观测资料已进行过较为深入的研究(上海地质处, 1978)。但对于抽(注)地下流体引起的多孔介质固体骨架水平运动或变形特征问题, 人们却了解或研究得较少。其原因主要是由于多孔介质水平运动本身不如垂直固结压密变形或地面沉降那样直观、容易监测。但大量间接证据表明, 抽注地下流体(水、油等)引起的含水(油)层水平运动确实存在。例如, 因注水引起的地层水平运动, 世界许多油田均发生了大量的油井套管变形错断现象(张德元等, 1995); 我国许多以地下水为主要水源的城市, 如西安市等, 也有多口水井因长期抽水活动而产生套管水平错断现象(景北科, 1995)。对此, 本文以单井抽水情况为代表, 较系统地分析了单井抽水引起的 Theis-Thiem 型承压含水层固体骨架的水平位移和变形特征, 然后具体讨论了该理论在地裂缝、油(水)井套管损坏等地质灾害机理分析中的应用。

1 单井抽水引起的含水层水平运动和应变

理论上, 可以通过两种方法来研究抽水引起的含水层位移和变形特征: 一种方法主要利用多孔介质的应力-应变本构关系(Rice, Cleary, 1976; Segall, 1985; 刘鼎文, 1995); 另一种方法则主要利用流体相对于固体骨架的流动关系式, 即 Darcy-Gersevanov 关系式(Helm, 1987)。本文主要利用后一种研究方法。由于井群抽水情况可以看作是单井抽水的叠加, 因此本文重点研究单井抽水情况下的含水层水平运动特征。

单井抽水情况下, 地下水径向向内流动的 Darcy 定律可以表示为

* 本文为国家地震局第二地形变监测中心资助“抽水引起的含水层水平变形及相关灾害研究”课题的一部分。
1996-05-02 收到初稿, 1996-11-21 收到修改稿并决定采用。

$$q = k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1)$$

式中, q 是径向单位截面面积上、单位时间内水的渗透量, 量纲为 [LT^{-1}]; k 为径向渗透系数, 量纲也为 [LT^{-1}]; $\frac{\partial h}{\partial r}$ 为径向水力坡度, h 为水头, r 为距水井的径向距离.

根据 Gersvanov 广义达西定律(Helm, 1987), 式(1)还可以用流体相对固体骨架的渗透速率来表示, 即

$$q = n(V_w - V_s) = k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (2)$$

上式称为 Darcy-Gersevanov 关系式. 式中, V_w , V_s 分别为孔隙水和含水层固体颗粒的径向平均流速, V_s 可以不为零, n 为含水层孔隙度.

为了得到 V_s 的表达式, 还需要引入下面的体积渗透量关系:

$$q_b = nV_w + (1 - n)V_s \quad (3)$$

式中, q_b 为单位时间内通过单位截面积的孔隙水和固体颗粒流量之和, 量纲也为 [LT^{-1}].

重新安排式(1)、(2)和(3), 可以得到含水层固体颗粒平均径向流速的表达式

$$V_s = q_b - k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (4)$$

式(4)对了解和研究含水层水平运动是一个具有普遍意义的公式.

为了讨论问题的方便, 下面将主要分析 Theis-Thiem 水平承压含水层的情况. 对此考虑一个径向无限延伸、厚度为 b 的承压含水层(其上、下均为非渗透性隔水层). 对应于一定的稳定抽水速率 Q , 由质量连续性方程条件可得

$$Q = 2\pi r b q_b \quad (5)$$

由式(4)和(5)联合可得

$$V_s = \frac{Q}{2\pi r b} - k \frac{\partial h}{\partial r} \quad (6)$$

另一方面, Theis 降深解的表达式(薛禹群, 朱学愚, 1979)为

$$h_0 - h = \frac{Q}{4\pi r b} \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (7)$$

式中, $u = \frac{r^2 S_s}{4kt}$ 为参变量, S_s 为贮水率, 量纲为 [L^{-1}], t 为从抽水时刻计算的连续稳定抽水时间, h_0 和 h 分别为初始时刻 $t=0$ 和任意时刻 t 时的水头. 由式(7)两边对径向半径 r 求偏导可得

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \frac{Q}{2\pi k r b} e^{-u} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)可得

$$V_s = \frac{Q}{2\pi r b} (1 - e^{-u}) \quad (9)$$

这就是 Theis-Thiem 承压含水层固体颗粒在抽水过程中的径向流动速度表达式.

由式(9)对时间 t 积分, 并假设 $t=0$ 时含水层的水平位移为零, 则可以得到任意抽水时刻含水层内任一径向点 r 处固体颗粒的径向位移表达式为

$$U_r = \frac{Q r S_s}{8\pi k b} \left(\frac{1 - e^u}{u} + \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \right) \quad (10)$$

由式(10)可进一步导出抽水过程中含水层的水平径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t 分别为

$$\epsilon_r = \frac{QS_s}{8\pi kb} \left(\int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx - \frac{1-e^u}{u} \right) \quad (11)$$

$$\epsilon_t = \frac{QS_s}{8\pi kb} \left(\int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx + \frac{1-e^u}{u} \right) \quad (12)$$

公式(9)~(12)是分析抽水过程中含水层水平运动和应变的 4 个重要公式。下面将集中对影响 V_s , U_r , ϵ_r 和 ϵ_t 的主要因素进行分析讨论。

由于当 Q , S_s , k 和 b 固定时, 式(11)、(12)可以表示为

$$\epsilon_r = Ae_r \quad (13)$$

$$\epsilon_t = Ae_t \quad (14)$$

式中, $A = \frac{QS_s}{8\pi kb}$ 为常量。

$$e_r = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx - \frac{1-e^u}{u} \quad (15)$$

$$e_t = \int_u^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx + \frac{1-e^u}{u} \quad (16)$$

即此时 e_r 与 ϵ_r 以及 e_t 与 ϵ_t 之间仅差一个常数 A , 不失一般性, 在下一节中将主要针对式(15)、(16)进行讨论分析。

2 影响含水层水平变形的主要因素

含水层的水平运动和变形, 是包含许多参变量的复杂函数。本文重点讨论抽水时间和径向距离两个因素的影响。

2.1 抽水时间的影响

为讨论问题方便, 将式(9)、(10)、(15)和(16)变换为用无量纲时间 td 表达的无量纲速率、无量纲位移和应变的函数, 这里

$$td = \frac{kt}{S_s r^2} \quad (17)$$

$$u = u(td) = \frac{1}{4td} \quad (18)$$

此时与式(9)、(10)、(15)和(16)对应的公式为

$$V_s(td) = \frac{2\pi br V_s}{Q} = 1 - e^{-u(td)} \quad (19)$$

$$U_r(td) = \frac{8\pi kb U_s}{Qr S_s} = \frac{1 - e^{u(td)}}{u(td)} + \int_{u(td)}^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (20)$$

$$e_r(td) = \int_{u(td)}^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx - \frac{1 - e^{u(td)}}{u(td)} \quad (21)$$

$$e_t(td) = \int_{u(td)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx + \frac{1 - e^{u(td)}}{u(td)} \quad (22)$$

图1给出了无量纲速度 $V_s(td)$ 、位移 $U_r(td)$ 、应变 $e_r(td)$ 和 $e_t(td)$ 随无量纲时间 td 的变化关系，可以看出：

(1) 在开始抽水的瞬间 $td=0$ 时，含水层无量纲径向运动速度 $V_s(td)=1.0$ ，为最大；随着抽水时间的增长， $V_s(td)$ 呈指数关系迅速减小并趋于零，即当连续稳定抽水时间相当长之后，固体骨架的水平运动已基本停止。因此，抽水引起的含水层水平运动仅在非稳定流情况下存在。在稳定流情况下，含水层不发生水平运动。

(2) 某点 r 处的径向位移 $U_r(td)$ 和切向应变 $e_r(td)$ 随 td 的变化形式一样，均为单调递增函数。其中在抽水初期增长速度最快，随着抽水过程的增长，增长速度越来越慢。另外，在抽水过程中切向应变 $e_r(td)$ 始终处于压缩状态($e_r(td)$ 为正表示切向压缩)。

(3) 某一点 r 处的径向应变 $e_r(td)$ 随 td 的变化关系要复杂一些，可经历两个不同阶段，即抽水初期的径向拉张阶段和后期的径向挤压阶段(e_r 为正，表示处于径向挤压状态)。表1给出了 $e_r(td)$ 随 td 的详细变化关系，其分段时间是通过数值计算求得的。

表1 径向应变 $e_r(td)$ 随无量纲时间 td 的阶段性变化特征(固定距离 r)

td	径向应变特征(固定 r 和其它水文参数)
$0 < td < 0.1991$	拉张阶段，随 td 增大，拉张应力不断增大
$td = 0.1991 = td_1$	拉张应变达最大值， $e_r(td_1) = -0.4245$
$0.1991 < td < 0.7776$	拉张阶段，随 td 增大，拉张应变逐渐减小
$td = 0.7776 = td_2$	无径向应变状态， $e_r(td_2) = 0$
$td > 0.7776 = td_2$	挤压阶段，随 td 增大，挤压应变逐渐增大

表2 径向应变 $e_r(rd)$ 随无量纲距离 rd 的分区性变化特征(固定时间 t)

rd	径向应变特征(固定 r 和其它水文参数)
$0 < rd < 1.1340$	径向挤压区，越近井处挤压应变越大
$rd = 1.1340 = rd_1$	内部挤压区与外围拉张区分界， $e_r(rd_1) = 0$
$1.1340 < rd < 2.2413$	拉张区，随 rd 增大，拉张应变增大
$rd = 2.2413 = rd_2$	拉张应变最大， $e_r(rd_2) = -0.4245$
$rd > 2.2413 = rd_2$	径向拉张区，随 rd 增大，拉张应变逐渐减小

2.2 径向距离的影响

类似于讨论含水层水平变形随时间变化关系时的处理方法，将式(9)、(10)、(15)和(16)变换为用无量纲径向距离 rd 表达的无量纲速率、无量纲位移和应变的函数，这里

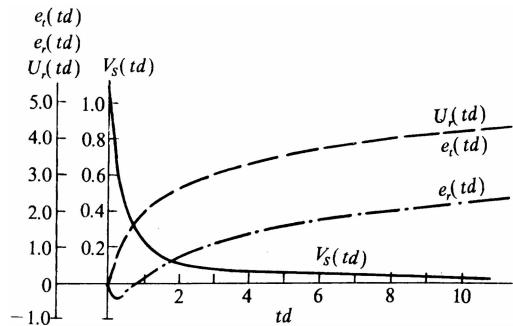


图1 含水层水平运动随无量纲时间 td 的变化曲线。图中纵横坐标均为无量纲量

$$rd = \frac{\sqrt{S_s} r}{\sqrt{kt}} \quad (23)$$

$$u = u(rd) = \frac{rd^2}{4} \quad (24)$$

此时与式(9)、(10)、(15)和(16)对应的公式为

$$V(rd) = \frac{2\pi b \sqrt{kt} V_s}{Q \sqrt{S_s}} = 1 - e^{-u(rd)} \quad (25)$$

$$U(rd) = \frac{2\pi b \sqrt{k} U_s}{Q \sqrt{S_s t}} = \frac{1 - e^{u(rd)}}{u(rd)} + \frac{rd}{4} \int_{u(rd)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx \quad (26)$$

$$e_r(rd) = \int_{u(rd)}^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx - \frac{1 - e^{u(rd)}}{u(rd)} \quad (27)$$

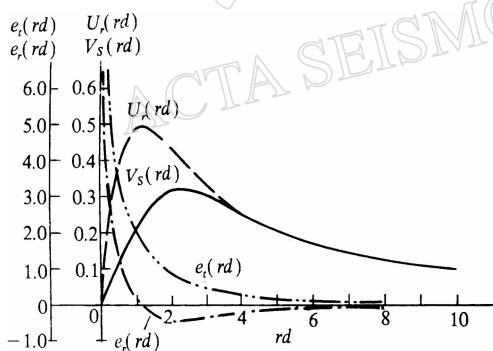


图 2 含水层水平运动随无量纲距离 rd 的变化曲线. 图中纵横坐标均为无量纲量

图 2 给出了无量纲速度 $V_s(rd)$ 、位移 $U_r(rd)$ 、应变 $e_r(rd)$ 和 $e_t(rd)$ 随无量纲距离 rd 的变化关系, 可以看出:

(1) 随着 rd 的增大, 速度 $V_s(rd)$ 和位移 $U_r(rd)$ 均表现为一个由小到大, 再由大到小的变化过程. 其中, $rd = 2.2413$ 时, 无量纲速度 $V_s(rd) = 0.3191$, 达到最大; $rd = 1.1340$ 时, 无量纲速度 $U_r(rd) = 0.4848$, 达到最大. 近井处 $V_s(rd)$ 和 $U_r(rd)$ 较小甚至为零, 是由于在井壁处井棚对固体骨架运动起阻挡作用, 加了位移为零的边界条件所致.

(2) 切向应变 $e_t(rd)$ 始终为挤压应变且是 rd 的单调递减函数, 随着 rd 的增大迅速衰减. $rd \rightarrow 0$ 时, $e_t(rd) \rightarrow \infty$. 因此, 近井处的切向应变最大.

(3) 径向应变 $e_r(rd)$ 随 rd 的变化较为复杂, 可分为近井压缩区和远井拉张区. 其分区变化特征详见表 2. 值得强调的是, 由式(23)可以看出, rd 与抽水时间 t 的方根成正比. 因此, 随着连续稳定抽水时间的增长, 内部径向压缩区将逐渐向外扩大, 相应的最大拉张应变圆周也不断向外扩展.

3 在地质灾害分析中的应用

以上我们导出了单井抽水活动引起的 Theis-Thiem 承压含水层的水平变形解析表达

式，并具体分析了抽水时间和距离对含水层水平变形的影响，群井的影响可以用叠加原理来处理。本节将着重分析该理论在地裂缝活动以及油(水)井套管损坏等方面的应用。

3.1 在地裂缝活动机理解释中的应用

构造地裂缝是地下断层活动在地表土层中的破裂表现。抽水作用对地裂缝活动有显著影响，这已为西安、大同等地区的地裂缝活动所证实。传统的地裂缝“水成”观点认为，抽水对地裂缝加速活动的影响是通过产生不均匀地面沉降和沉降漏斗的边缘拉张作用来实现的（李永善，1992）。但大同机车厂地裂缝近几年的静力水准监测资料表明，上述“水成”观点可能并不是抽水加速地裂缝活动的主要影响机理。图3给出了大同机车厂地裂缝（走向N60°E左右）NS向静力水准1991和1992年的日变曲线（刘玉海等，1995）。可以看出，地裂缝具有准周期性的台阶状加速活动特征，其加速活动普遍集中在每年的4~7月份，且主要由几个台阶组成，每个形变台阶的形成时间仅一天至数天。4~7月份的几个形变台阶的形变量约占地裂缝全年总活动量的63%。其它年份也有类似的特征。据调查，该地裂缝每年4~7月份的台阶状加速活动与该期间地裂缝附近几次农田、菜地的集中用水和单位自备井启动密切相关。由于大同市地面沉降量很小，且地裂缝处又无明显沉降漏斗存在（刘玉海等，1995），不存在短时间内（一至数天）形成较大沉降漏斗边缘拉张应力的条件，因而无法用传统的地裂缝“水成”观点来解释上述台阶状活动特征。而本文提出的含水层水平变形机理，则可以很好地解释这种现象。

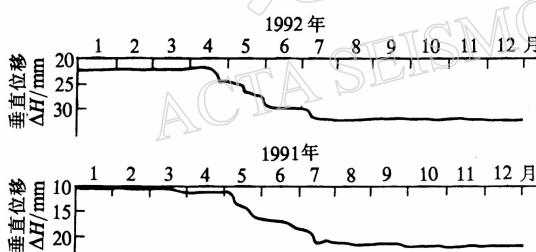


图3 大同机车厂地裂缝NS向静力水准日变曲线(1991~1992年)

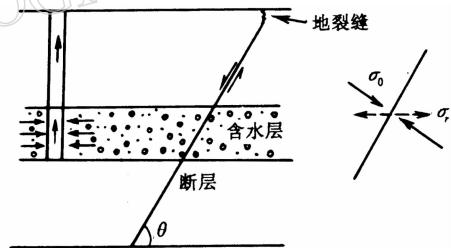


图4 抽水对断层及地裂缝活动影响的机理模型

根据前面的分析，抽水作用可以在水井周围某点产生随时间变化的水平应变。当某条地裂缝及其下伏断层处于抽水引起的径向水平拉张应变区域的时候，断面上的抗剪强度就会降低，从而加速断层或地裂缝活动；且抽水速率越大，影响越显著。

抽水作用对断层或地裂缝活动的影响机理可用图4来示意说明。如图4所示，有一抽水井，距断层面的径向距离为 r ，断面倾角为 θ ，断面上的内聚力为 c ，内摩擦角为 φ ，抽水前作用在断面上的正应力为 σ_0 ，断面的抗剪强度为

$$\tau_0 = c + \sigma_0 \operatorname{tg} \varphi \quad (29)$$

抽水引起的水平拉张应力为

$$\sigma_r = E |\varepsilon_r| \quad (30)$$

式中， E 为含水层的弹性模量， $|\varepsilon_r|$ 为径向拉张应变绝对值。

受抽水引起的含水层水平拉张应力影响，断面上的抗剪强度变为

$$\tau = c_0 + (\sigma_0 - \sigma_r \sin \theta) \operatorname{tg} \varphi \quad (31)$$

断面上的抗剪强度减小量为

$$\Delta\tau = \tau_0 - \tau = \sigma_r \sin\theta \tan\varphi \quad (32)$$

给定含水层固体骨架的弹性模量 $E=40$ MPa, 断面内摩擦角 $\varphi=30^\circ$. 图5分别给出了断面抗剪强度最大减小量 $\Delta\tau_{\max}$ 随渗透系数 k 、贮水率 S_s 、含水层厚度 b 、抽水速率 Q 以及断层倾角 θ 的变化关系. 可以看出, 固定其它参数, 而仅改变某一参数时, 断面抗剪强度最大减小量 $\Delta\tau_{\max}$ 随抽水速率 Q 、贮水率 S_s 增大而线性增大; 随断层倾角 θ 增大而呈正弦型增大; 随渗透系数 k 、含水层厚度 b 增大而减小. 断面抗剪强度最大减小量 $\Delta\tau_{\max}$ 一般可达几十至几百帕. 可见, 抽水作用对断层及地裂缝活动的影响还是比较大的.

3.2 在油(水)井套管损坏机理分析中的应用

高压注水是油田油(水)井套管损坏的主要原因之一. 在机理研究方面, 目前主要的观

点认为, 高压注水窜入泥页岩, 引起泥页岩膨胀和地应力改变, 是导致套管变形破坏的主要原因(崔孝秉等, 1993). 但完全用此机理来解释套管变形破坏, 还存在几个比较突出的问题: 其一, 有相当数量的套管变形破坏并不发生在泥页岩层位; 其二, 套管变形破坏主要是由于地层间相对水平剪切滑动所引起的, 但由于一般情况下地应力水平分量大于垂直分量, 泥页岩的浸水膨胀主要是以垂向膨胀和隆起为主, 并不一定能发生显著的水平剪切运动; 其三, 注水过程中泥页岩的浸水域是有限的, 但事实上, 在浸水域之外仍有相当数量的油井发生套管变形破坏.

为了更合理地解释油田油(水)井套管变形损坏机理, 本文提出了一种新的注水层水平运动模式. 其主要观点为: 注水可以看作是抽水活动的反过程. 注水时, 位于注水井周围的含油砂岩层(注水段), 将

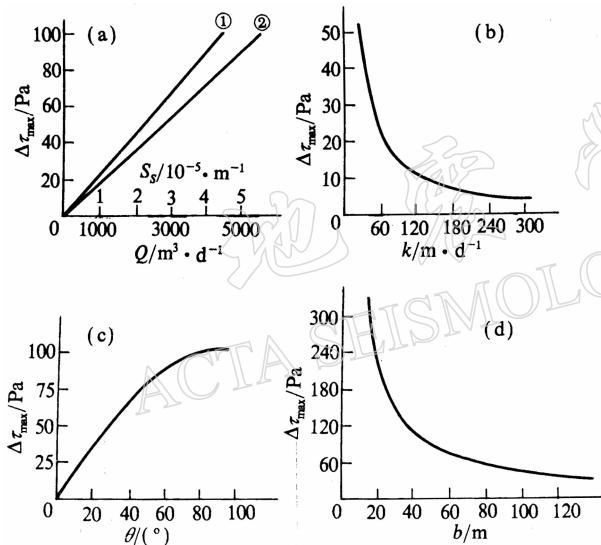


图5 断面抗剪强度最大减小量 $\Delta\tau_{\max}$ 随各参数的变化关系
(a) $\Delta\tau_{\max}$ 随 Q 和 S_s 的变化关系. $k=15 \text{ m/d}$, $b=50 \text{ m}$, $\theta=60^\circ$. ① 固定 $S_s=5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, 改变 Q . ② 固定 $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$, 改变 S_s ;
(b) $\Delta\tau_{\max}$ 随渗透系数 k 的变化关系. $b=50 \text{ m}$, $S_s=5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$, $\theta=60^\circ$, 改变 k ;
(c) $\Delta\tau_{\max}$ 随断层倾角 θ 的变化关系. $k=15 \text{ m/d}$, $b=50 \text{ m}$, $S_s=5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$, 改变 θ ;
(d) $\Delta\tau_{\max}$ 随含水层厚度 b 的变化关系. $k=15 \text{ m/d}$, $S_s=5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$, $Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$, $\theta=60^\circ$, 改变 b

相对于其上下地层发生径向向外的水平运动, 且注水压力越大(即 Q 越大), 则运动速度越大. 当注水压力接近或超过上覆岩体的自重压力时, 含油层上下边界上的有效正应力接近于零. 这时, 将在含油层和上下地层之间发生比较显著的水平相对剪切运动, 从而导致位于其影响范围之内的油(水)井套管发生破坏. 根据上述观点, 注水引起的含油层相对于上下地层之间的相对水平剪切运动, 有可能才是注水诱发油(水)井套管变形破坏的主要原因.

对于抽水活动引起的水井套管变形损坏问题，本文的单井抽水含水层水平形变理论可以给出很好的解释。由图1、2可以看出，抽水作用将在水井附近产生一定的水平径向挤压应变，且抽水时间越长，挤压应变越强烈。受这种径向挤压应变的长期影响，套管将会发生缩颈变形。如果含水层是径向不对称的，或者由于地壳应力场的叠加作用，套管将会发生径向不均匀变形，随着抽水时间的增长或抽水次数的增多，最终有可能导致套管在含水层边界或内部沿最大主压应力方向产生水平错断。

4 结论

(1) 抽水引起的含水层水平运动和变形，是一种最基本的地下水动力学问题，是独立于含水层固结压密变形之外的另一种运动形式，它始终伴随着抽水过程而存在。

(2) 抽水引起的含水层水平变形，是抽水时间 t 、径向距离 r 以及其它水文地质参数的复杂函数。其水平运动和变形在抽水初期变化最剧烈。随着稳定抽水过程的增长，含水层固体骨架的变形将逐渐稳定下来。

(3) 抽(注)地下流体(水、油)引起的含水层和含油层的水平运动，有可能是水井、油井套管变形破坏的主要原因。而抽水引起的含水层拉张应变则可能是抽水加速地裂缝(活断层)活动的主要影响机理。

参 考 文 献

- 崔孝秉, 宋治, 岳伯谦, 等, 1993. 注水开发油田套管损坏的机理研究. 石油学报, 14(3): 93~101
景北科, 1995. 西影井水位特异动态的成因分析. 地震, (2): 161~165
李永善, 1992. 西安地裂及渭河盆地活断层研究. 北京: 地震出版社. 212
刘鼎文, 1995. 地下水径向辐射渗流单井排放诱发地壳形变的解析表达. 地壳形变与地震, 15(2): 1~6
刘玉海, 陈志新, 倪万魁, 1995. 大同城市地质研究. 西安: 西安地图出版社. 380
上海地质处, 1978. 国外地面沉降论文选译. 北京: 地质出版社. 310
薛禹群, 朱学愚, 1979. 地下水动力学. 北京: 地质出版社. 370
张德元, 刘元生, 李一兵, 1995. 油田地震信息监测研究与应用. 北京: 地震出版社. 109~119
Helm D C, 1987. Three-dimensional consolidation theory in term of the velocity of solids. *Geotechnique*, 37(3): 369~392
Rice J R, Cleary M C, 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents. *Rev. Geophys.*, 14: 227~241
Segall P, 1985. Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of the 1983 Coalinga earthquake. *J Geophys Res*, 90(8): 6 801~6 816