

构造应力引起地下水位变化的主要特征

李 永 善

(陕西省地震局)

国内外的前兆观测资料表明,很多破坏性地震发生之前,经常出现明显的地下水位、水压以及与之有关的物理、化学异常。与此同时,也观测到另一种情况:类似的地下水异常出现之后,观测区并未发生相应的地震活动。例如,西安地区的西热六井,深两千米,给水层均在1600米以下。1974年5月开始观测水位,从未发现降雨过程和工农用水等因素的干扰。但1974年9月27日至28日突然发生一次自喷,喷高1.8米,水温 41°C ;1976年3月5日至6日又二次自喷,喷高1.8米左右,水温 43°C ;两次自喷相隔17个月零6天;1978年6月30日至7月15日又第三次自喷,喷高与前两次相当,水温 46°C 左右,与第二次自喷相隔了27个月零24天。每次井喷之后,关中地区均未出现过明显的地震活动,未发生过一次 $M \geq 4$ 的地震。可见,破坏性的地震过程经常会造成一些明显的地下水前兆异常,但每次深井水位的异常变化不一定是观测区的中、强地震前兆信息。一个合乎逻辑的疑问接着发生,深井水位(以及与之有关的物理、化学)异常变化是否只有地震过程这个唯一的原因呢?可惜很多刊物发表的“前兆理论”,对这样的重要问题,都讨论得较少。

如果说,地震是构造应力变化过程中所造成的岩体的突然破裂或再破裂过程,那么只有直接和间接反映此种过程的地下水异常(或其他物理化学异常),才算得上可靠的地下水前兆(或必震信息)。为了提高对地下水异常中的必震信息的鉴别能力,深入地研究由构造应力引起的孔隙流体压力变化的基本特征,可能是一个重要的环节。鉴于目前尚无法取全地下含水孔隙介质的基本物性资料,短时期内对该课题的研究恐怕只能限于半定性和半定量的范畴之内。本文将在这方面作一尝试。

一、弹性应变过程中孔隙流体压力(或水位)

随岩体(孔隙介质)应力变化的物理基础

从地下水力系统分析,潜水是地表之下的第一层水层,有自由面,流动不承压,可简称为开放渗流系统;另一种是凸镜体含水层,深浅不等,承压不流动,可简称为静止封闭系统;其它地下承压水层,均介于二者之间,可简称不同程度开放(或不同程度封闭)系统。开放系统和封闭系统是所有地下水层的两个极限情况,因之它们的岩体应力与流体压力之间的共同性特征,也应该是所有地下孔隙(或裂隙)水压力随构造应力变化的共同特征。为此,先来分析这两种极限情况。

1. 潜水水位变化的物理方程

在弹性应变范围内,孔隙介质的物理方程为

$$\frac{\Delta m}{m_0} \cong \beta_e \Delta \sigma_I, \quad (1)$$

式中 m_0 , Δm 表示孔隙率和它的增量; β_e 表示孔隙介质的等效体积压缩系数; $\Delta \sigma_I$ 表示等效球形应力张量 (或第 I 应力张量) 的增量。在引张情况下, $\Delta \sigma_I$ 为正。

另一方面, 潜水的物理方程为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cong \beta_s \frac{\Delta H \bar{r}_0}{10}, \quad (2)$$

式中 ρ_0 , $\Delta \rho$ 分别表示潜水的密度和增量; β_s , $\Delta H (= H - H_0)$, $\bar{r}_0$ 分别为潜水的体积压缩系数, 水位的增量和水的比重。

最后, 弹性应力变化过程中, 潜水的守恒定律可近似地写为:

$$\frac{H_{Im} \rho_1}{H_0 m_0 \rho_0} \cong 1, \quad (3)$$

式中角码 0 和 I 表示两个相应的状态。

联解 (1) - (3) 则得

$$\frac{\frac{\Delta H}{10 H_0} (10 + H_0 \beta_{sr_0} + \beta_{sr_0} \Delta H)}{1 + \frac{\Delta H}{10 H_0} (10 + H_0 \beta_{sr_0} + \beta_{sr_0} \Delta H)} = -\beta_e \Delta \sigma_I, \quad (4)$$

因之,

$$\frac{\partial H}{\partial \sigma_I} = - \frac{\beta_e H}{1 + \frac{\beta_{sr_0} H_0}{10}}. \quad (5)$$

对潜水讲, β_s (或 $H_0 \beta_{sr_0}$) $\ll 10$;

$\frac{\Delta H}{10 H_0} (10 + H_0 \beta_{sr_0} + \beta_{sr_0} \Delta H) \ll 1$, 故由 (4) 或 (5) 得

$$\frac{\partial H}{\partial \sigma_I} \cong -\beta_e H_0, \quad (6)$$

$$\Delta H \cong -\beta_e H_0 \Delta \sigma_I, \quad (7)$$

式 (6) 和 (7) 告诉我们, 由构造应力所引起的潜水水位 (以下简称构造水位或应力水位) 变化量等于潜水的原始水位 H_0 、介质的等效体积压缩系数和球形应力张量的增量的乘积, 应力水位的灵敏度 $\left| \frac{\partial H}{\partial \sigma_I} \right|$ 等于原始水位与等效体积压缩系数的乘积。式中负号

表示: 球形应力张量的增量为正时, 岩体变化增大, 水位将下降; 反之, 水位将上升。

对一般潜水来讲, $\beta_e H_0 \cong 10^{-4} - 10^{-5}$ 米/大气压。所以当应力增量等于一个大气压时, 按 (7) 估算, 潜水水位只变化 0.1—0.01 毫米左右。据此推断, 现用的一般水位仪器是无法观测到大气压, 固体潮以及一般的地壳应力变化的, 事实上至今也没有人观测到这类潜水变化。因此, 潜水观测并不宜作中长期地震前兆观测手段。

2. 封闭系统水头 ($H = \frac{10p}{r_0}$) 变化的物理方程

与潜水系统类似, 此种情况下质量守恒方程为:

$$\left(1 + \frac{\Delta V}{V_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta m}{m_0}\right) \left(1 + \frac{\Delta \rho}{\rho_0}\right) = 1, \quad (8)$$

而介质和液体的物理状态方程分别为:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \cong \beta_{se} \Delta \sigma_I; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cong \frac{\Delta m}{m_0} = \beta_s \Delta P = \beta_s \frac{\Delta H_{r_0}}{10}, \quad (10)$$

式中 $\beta_{se} \approx m\beta_s + (1-m)\beta_e$ 为封闭系统含水岩体的混合体积压缩系数; V_0 、 ΔV 分别为体积和体积增量, 其它符号同上。

联解 (8) - (10) 则得:

$$\frac{2\beta \frac{\Delta H_{r_0}}{10} + \left(\frac{\beta_s \Delta H_{r_0}}{10}\right)^2}{1 + \frac{\beta_s \Delta H_{r_0}}{10}} = -\beta_{se} \Delta \sigma_I, \quad (11)$$

或

$$\frac{\partial p}{\partial \sigma_I} = -\frac{\beta_{se}}{2\beta_s}, \quad (12)$$

$$\Delta p \cong -\frac{\beta_{se}}{2\beta_s} \Delta \sigma_I; \quad (13)$$

或者

$$\frac{\partial H}{\partial \sigma_I} \cong -5 \frac{\beta_{se}}{\beta_{sr_0}}, \quad (14)$$

$$\Delta H \cong -5 \frac{\beta_{se}}{\beta_{sr_0}} \Delta \sigma_I. \quad (15)$$

式 (14) 表明, 在封闭的地下水系统中, 每公斤的固体应力变化所引起的折算水位变化量等于 $5 \frac{\beta_{se}}{\beta_{sr_0}}$ (≈ 5 米)。式 (15) 的物理含意是, 由构造应力引起的封闭系统的折算水位差 ΔH (或压力差) 与岩体的球形应力张量的增量和含水层的混合体积压缩系数成正比, 与地下水的体积压缩系数成反比。

3. 上述两种情况的简单比较和讨论

比较式 (6)、(7) 和式 (14)、(15) 则得

$$\frac{\Delta H_{\text{封}}}{\Delta H_{\text{开}}} \cong \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial \sigma_I}\right)_{\text{封}}}{\left(\frac{\partial H}{\partial \sigma_I}\right)_{\text{开}}} \cong \frac{5 \beta_{se}}{r_0 \beta_s \beta_e H_0} \approx 5 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5. \quad (16)$$

式 (16) 表明, 同一的构造应力在完全封闭的地下水应力系统内所引起的折算水位变化量, 比在开放的水力系统内约大 $10^4 \sim 10^5$ 倍。尽管我们无法测量完全封闭的地下水力系统的折算水位 (因为任何钻穿完全封闭系统的水井, 必然导致其封闭性的局部破坏), 但式 (16) 还是告诉我们一个重要的结论, 地下水力系统封闭性愈强, 其反应构造应力变化的灵敏度愈高。

对比上述半定量半定性的物理方程表明,无论那种地下含水层,各点的水压(或折算水位)均与该点的体积应变量成正比。因此,当含水层各点的体积应变量不同时,在各点引起的流体压力变化量也将不同,后者必然在水层内引起一种构造应力所致的渗流过程。按地下弹性渗流力学理论,这种附加的渗流过程可用下列方程描述:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} = \bar{K} \nabla^2 \bar{P}, \quad (17)$$

$$\bar{P} \approx a \Delta \bar{\sigma}_I + b, \quad (18)$$

式(17)中 $\bar{K}$ 表示弹性渗流过程的导压系数,(18)中的 a 、 b 是两个常数,对开放系统(18)相当于(7),对封闭系统(18)相当于(15)。

(17)告诉我们,在构造应力变化过程中,各地下水力系统都要按该系统的弹性渗流规律均衡构造应力在其中引起的流体压力差异。因之,当岩体应力 $\Delta \bar{\sigma}_I$ 发生某种周期性的振荡时,势必引起相应的弹性渗流振荡。在很多深水井的水位和流量曲线上,能显示清晰的地震波正是这个原因。(17)的价值不仅在于它描述了上述物理过程,而且还给研究长周期的地壳应力和水力勘探液体有用矿田的物性提供了重要的途径。

由渗流力学的理论和实践得知,弹性渗流速度以及液压传播速度与岩体内应力传播速度比较,完全可以忽略不计。据此推测,应力所致的地下水水位变化,主要取决于测点周围的物理变化过程,井筒附近的应力所致水位变化,主要取决于井筒周围的物理变化过程。于是,各种承压深井均可近似地看作一个特殊的潜水系统,其物理变化方程可近似地写成:

$$\Delta H \approx -H_0 \bar{\beta}_e \Delta \bar{\sigma}_I, \quad (19)$$

式中 H_0 、 ΔH 分别为承压深井的原始水位和水位增量; $\bar{\beta}_e$ 、 $\Delta \bar{\sigma}_I$ 分别为深井周围岩体的等效压缩系数和等效球形应力张量的增量。而且应力速度变化愈快,(19)的精度愈高。

式(19)告诉我们:①深井水位反应岩体应变的灵敏度,与给水层的承压水头(H_0)成正比,因此,井愈深,承压性愈好,作为岩体形变测量手段愈理想;②对岩体相同的深井来讲(即 $\bar{\beta}_e = \text{常数}$),承压性愈强,反应岩体应力的能力也愈强;③相对水位变化量 $\frac{\Delta H}{H_0}$ 在数值上等于岩体的体积应变率,因此在 $H_0 = 1000$ 米的深井中,测出 $\Delta H = 1$ 毫米时,就等于测到 10^{-6} 岩体体积应变率。

汪成民等同志以及我局李志清、陈刚、范亚民等同志测试的实际资料(见图1、2、3),还有国外的资料(见表一)与上述结论非常符合。

依据西热六井($H_0 = 2000$ 米)计算,理论上应测到的体积应变量为 5×10^{-7} ;按固体潮计算约为 3×10^{-9} ,估计该井的封闭系数〔参见式(16)〕约为100左右。

此外,式(16)还告诉我们,在压缩区 ΔH 将上升;在引张区 ΔH 将下降。上升、下降的幅度不仅取决于应力的大小,而且还取决于水层承压大小和岩性 $\bar{\beta}_e$ 的差别。

图1 不同的井对不同的地壳形变过程的不同反应
(据王成民等)

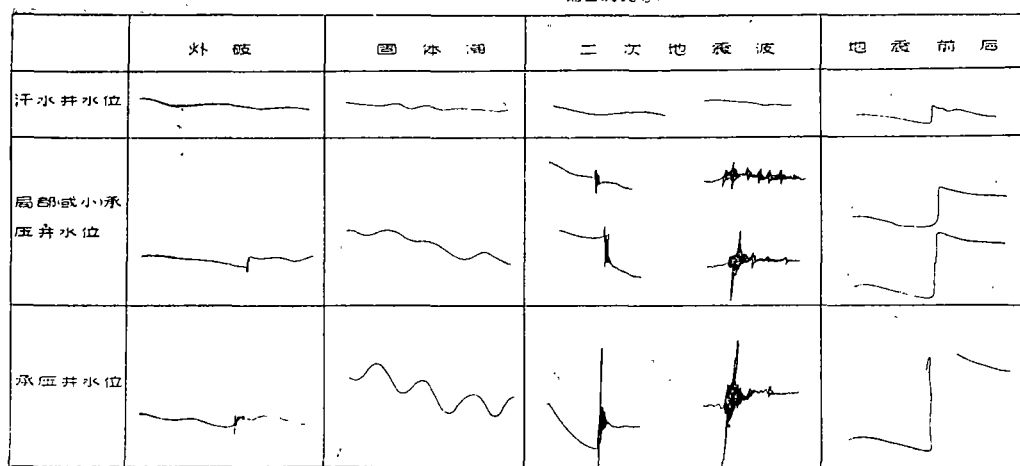
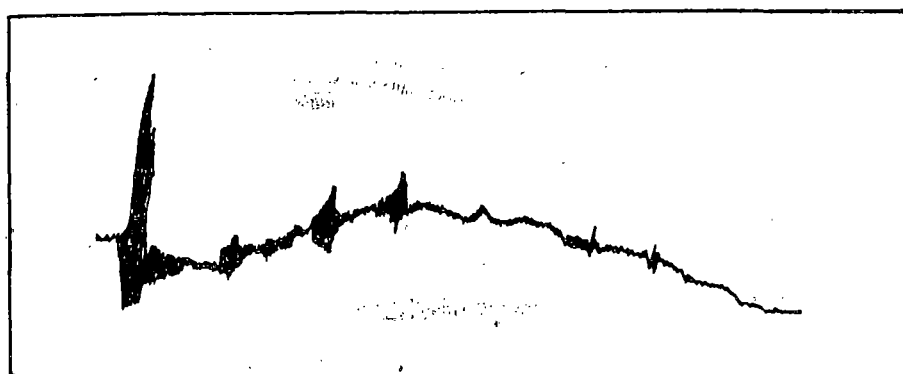
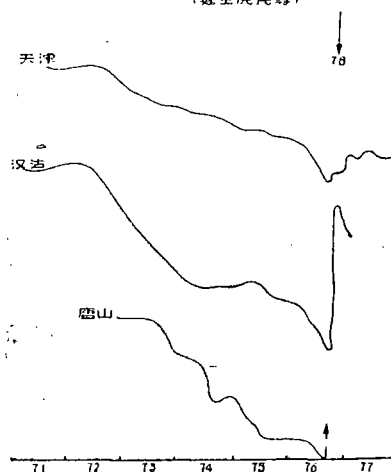


图2 西热一井(1000米)的流量自记录仪对国外一次8级强震的记录



(据李志需和陈刚)

图3 唐山地震前井水位趋势性变化图例
(据王成民等)



表一 (根据梅尔希奥)

	深度 (米)	“归算到赤道”的固体潮振幅
巴塞克萊斯(比利时)	39	1.11
Carlsbad (美国)	86	0.63
Mibwaukee(美国)	120	2.00
Sontra(德国)	120	2.88
衣阿华(美国)	252	2.06
Ducnov(捷克)	600	3.45
图恩霍特(比利时)	2175	3.79
Kiabukwa(扎伊尔)	2400	7.67

二、扩容阶段的构造孔隙压力变化的物理基础

很多室内整体岩石破裂试验证明, 大约在岩石应力相当于 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 的岩石破裂应力时, 岩体内经常出现扩容现象。在地壳内几乎到处都存在着原始裂隙、断裂、层理以至较大的破裂带。因之, 合乎逻辑的推论是: 扩容过程将比实验室出现得更早, 即当岩体应力小于 $\frac{1}{2}$ 破裂应力时, 就会有局部地区出现扩容现象。扩容现象的力学实质是主压应力之差的增大, 因为当各主压应力相等(即各方向的围压相等)时, 就失去了扩容的力学基础。其次还必须指出, 一般情况下, 地壳上部主压应力差的相对值较大, 对扩容过程较为有利, 所以地壳上部的扩容过程, 很可能发生在下部扩容过程之前。这一点对分析地下水前兆很有价值。

扩容前, 孔隙率随主压应力增加而减小, 扩容开始后, 孔隙率将随主压应力差(或最大剪切应力)增大而增大, 因此扩容过程中应把式(1)、(9)中的球形张量改成最大剪切应力 τ (或剪切应力的函数)。与(7)、(14)、(15)等式同理, 可导出扩容开始后的水位变化为:

$$\Delta H \approx -\beta^* e H_0 \Delta \tau^*, \quad (20)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \approx -\beta^* e H_0, \quad (21)$$

式中 $\beta^* e$ 为扩容系数, H_0 、 ΔH 分别为扩容开始后的水位和增量。

式(20)与(21)表明, 扩容开始后, 地下水位随着测点附近岩体剪切应力的增大而下降, (在个别地区 $\Delta \tau$ 下降时水位上升)。所以剪切应力最大的地区(一般即震中区)的水位应以下降为优势, 而且这种下降一般应早于波速比异常, 这与汪成民同志收集的唐山地震前的实际资料非常符合。

* (20)是一个半定量的公式, 其中 $\Delta \tau^*$ 也许采用偏斜应力张量(或广义应力, 或某个剪切应力的函数)更为合理, 但为了简便, 暂用最大剪切应力增量 $\Delta \tau$ 。

三、破裂前塑性过程的水位变化

很多实验和理论研究表明,岩体破裂前,主要破裂区要经历很短的一段塑性形变过程。该过程的一个主要物理特征是局部塑性区由扩容过程迅速转为塑性压缩过程,所以在临震期,震中区附近水位应迅速由下降转为上升。这一点既可帮助判断临震信息,又有助于判断震中区。

四、小 结

1.本文先把地下水划分为开放、封闭和半开放半封闭三种渗流力学系统,并对各系统的构造应力引起的水位变化的物理方程进行了理论和应用性的讨论。

2.结合井筒附近的地下水特点,讨论了弹性渗流过程对水位变化的定性影响,认为各种承压深井的构造水位变化主要取决于井筒附近的岩体应力与水压力的传递过程,所以承压水位愈高的深井,反应岩体应力、应变愈灵敏。

3.结合实际资料半定性、半定量地讨论了地壳破裂过程中弹性、弹性到扩容、扩容到破裂等阶段的水位变化的主要特点,认为:①弹性应变过程中在压缩区地下水位应相应地上升,在引张区应相应地下降;②在从弹性过渡到扩容阶段,原来上升的水位,应转为下降,而且浅部出现扩容过程一般比深部为早;③在扩容过程中,水位应以下降为主,如果伴随强化过程,下降速度还应逐步减慢,如果伴随裂缝加速扩展过程,水位下降时应出现相应的波动,这可能是地下水的中、短期前兆的主要物理基础;④在扩容向破裂过渡阶段,岩体物性要再次发生突变,由扩容强化转入塑性蠕动时,破裂区地下水位应再次由下降转为回升,如果伴随小破裂所致的不同水力系统的串通现象,将出现突然的加速下降和上升现象。这种由前边几个阶段延伸出来的转变可能才是真正的必震信息或临震信息。所有这些结论均与汪成民等同志公布的唐山地震地下水的实际变化非常符合。本文讨论的方法和结果与前人有相同之处,也有不少区别,是对是非,愿接受实践的进一步鉴定。本文提供的一些半定性和半定量结果可能对地下液体矿床的勘探工作也有一定的参考价值。