

# 鲁29井重锤试验的解释

张昭栋<sup>1)</sup> 郑香媛<sup>2)</sup> 殷积涛<sup>2)</sup> 张教祥<sup>1)</sup>

## 摘 要

鲁29井通过重锤试验求出了含水层的导水系数为 $10.8\text{m}^2/\text{d}$ ，这比抽水试验给出的小一些，但数量级相同。这可能与试验时水位降深有关，水位降深越小，则得出的含水层的导水系数也越小。

重锤试验法比抽水试验法简单易行和经济迅速，用来解释地下水微动态更合理，较易推广应用。

## 一、前 言

地下流体是地壳运动和地震成因中的一个重要的因素。在地震发生的深度内，固体与流体两相并存。两者之间的力学和物理化学方面的相互制约和动态平衡，通过地下流体的压力和化学性质能比较迅速地把变化信息反映出来。特别是深井水位，对地壳的应力应变反映比较灵敏，所以我国自80年代初开始建立全国地震地下水动态观测网，希望能捕捉到地震前兆信息。在对深井水位的观测资料分析中，发现深井水位对固体潮和气压有明显的反映<sup>[1,2]</sup>，部分水井对降水荷载变化也有不同程度的反映<sup>[3]</sup>。这些反映与水井含水层的参数有关，特别是与水井含水层的渗透特性有关。因此，人们一般通过现场试验来求出含水层的渗透参数。例如，通过抽水试验等。然而，抽水试验工作量大，需要较大的人力和物力，化费一定的时间。所以，人们想通过较简单的经济的方法来测试含水层的渗透参数。

本文介绍了一个测试水井含水层渗透特性的简易方法——重锤试验法。以地下水不稳定流偏微分方程为基础，通过理想情况下的理论解，结合简易的试验观测数据，求出了鲁29井含水层的导水系数为 $10.8\text{m}^2/\text{d}$ 。它比抽水试验得出的值小一些，但数量级相同。这可能与试验时的水位降深有关，降深小的得出的导水系数也小。由于地下水微动态影响水位变化幅度较小，所以，用重锤试验得出的系数分析微动态更合理。

## 二、鲁29井概况

鲁29井在山东省聊城市市郊王官屯村，位于华北大平原的中部，水井位置处在聊考大断

---

1) 山东省地震局。

2) 国家地震局分析预报中心。

裂的附近(图1)。而聊考断裂以西,是中新生化沉积,聊考断裂以东,是晚第三纪第四纪沉积。井东30多公里是黄河,井西40多公里是沧东大断裂。

鲁29井原是水文观测井(钻孔编号为聊观3—1),钻孔深度400米,井管内径100毫米,滤水管总长30.63米。成井后用粘土珠围填止水(图2)。

水文部门曾在该井做过抽水试验,第一次试验抽水流量3.59升/秒,计算出含水层的渗透系数为2.18米/日。第二次试验抽水流量7.13升/秒,计算出渗透系数为2.377米/日。

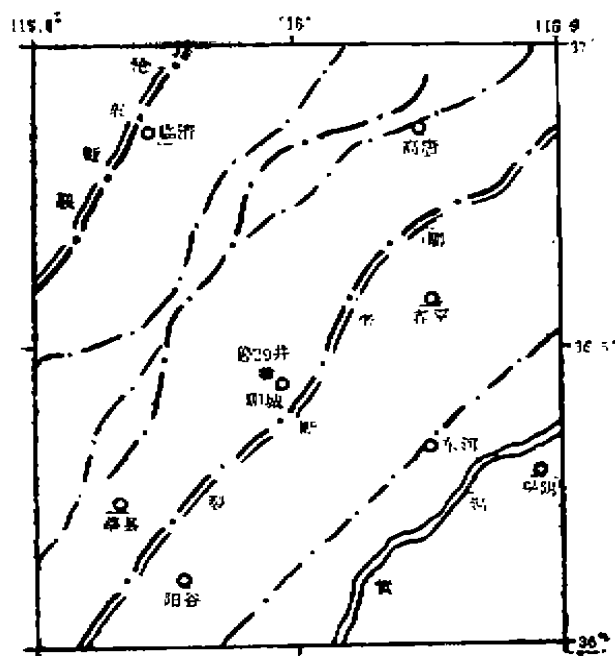


图1 鲁29井的地质构造图  
Fig. 1 geologic structure of the well No. 29

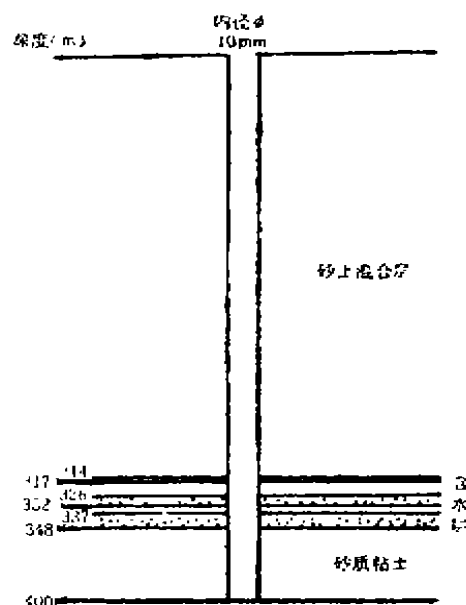


图2 鲁29井柱状简图  
Fig. 2 columnar sketch of the well No. 29

### 三、计算理论

考虑一个均匀的水平无限伸展的含水层,其上下都为水平无限大不透水层所挟持,含水层内为水所饱和,只有一口管径不大的完整井。由多孔介质的渗流理论可知,这样的水井含水层系统应满足下面的非稳定流偏微分方程

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} \right) = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

此方程是以水井轴线为z轴(向上为正),含水层的下底面为底面的圆柱坐标系。式中H为含水层内任一点的压力水头,t为时间,α为含水层的压力传导系数,即 $\alpha = T/S$ ,其中T为含水层的导水系数,S为含水层的贮水系数。

当含水层的厚度比含水层的水平面积的平方根小得多的时候,即对于薄层型含水层,可以忽略含水层内水在垂直向渗流的影响,所以方程(1)中没有考虑垂直向的问题。

为了给出齐次的初始条件,以便求解方程简化,将压力水头的参考面取在含水层的试验

前一瞬间的初始水头面上，这样我们有初始条件

$$H(r, 0) = 0 \quad (2)$$

在做试验时，迅速地将一个比井管细的圆柱体压入井水面以下，使井水位瞬时升高了一定的高度，所以水井中的初始条件为

$$H_w(0) = H_{w0} \quad (3)$$

其中 $H_{w0}$ 为压入圆柱体后使水井水位升高的高度。

在试验中圆柱体的体积只有几升，这个体积对于该含水层的体积来说是一个小量，完全可以认为，这对无穷远处的含水层没有什么影响。所以，在无穷远处有边界条件

$$H(\infty, t) = 0 \quad (4)$$

由于水在井孔与含水层之间渗流的速度一般不是太快，所以因渗流产生的水的动力学效应也可以忽略。我们只需考虑含水层内的水头与井孔中水柱产生的压力水头两者的静态平衡问题。在井孔与含水层间的滤水管外壁上，上述的两个水头应平衡，故有

$$H(r_b, t) = H_w(t) \quad (5)$$

其中 $r_b$ 表示井孔底部滤水管的外半径。

再由滤水管处渗流条件知，在单位时间内，从滤水管进入井孔中的水量，应等于井管内水的增加量，即水位增高的体积变化量，那么

$$2\pi r_b T \frac{\partial H(r_b, t)}{\partial r} = \pi r_w^2 \frac{\partial H_w(t)}{\partial t} \quad (6)$$

其中 $r_w$ 是井孔上部水面所在处的井管内径。

H·H·Cooper等利用分离变量法和叠加原理等方法，得出了方程(1)满足初始条件和边界条件(2)——(6)的解，求出水井水头的表达式为<sup>[4]</sup>

$$H_w(t) = \frac{8H_{w0}\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty e^{-\frac{\beta u^2}{a}} \frac{du}{u\Delta(u)} \quad (7)$$

式中

$$a = \frac{r_b^2 S}{r_w^2} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{T t}{r_w^2} \quad (9)$$

$$H_{w0} = \frac{V_0}{\pi r_w^2} \quad (10)$$

$$\Delta(u) = [uJ_0 - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2uY_1(u)]^2 \quad (11)$$

其中 $J_0$ 和 $J_1$ 分别为零阶和一阶第一类贝塞尔函数， $Y_0$ 和 $Y_1$ 分别为零阶和一阶第二类贝塞尔函数。

试验时将圆柱体压入井孔水面下以后，井孔内水头随时间的变化为理论表达式(7)，它在一般情况下得不出普通的解析解，所以多用近似计算求出其积分值。文献[4]把式(7)

做了数值积分，得出了试验的水头变化比值 $H_w/H_{w0}$ ，并给出了其中几种可能的数值表（见表1）。此表为我们分析试验结果提供了很大方便。利用此表画出的曲线组，可以得出

表1 瞬时抽注井流 $\frac{H_w}{H_{w0}}$ 值表

Table 1 the value of the well current  $\frac{H_w}{H_{w0}}$  at the instantaneous pumping and flooding

$\beta$	$\frac{H_w}{H_{w0}}$				
	$a=10^{-1}$	$a=10^{-2}$	$a=10^{-3}$	$a=10^{-4}$	$a=10^{-5}$
$1.00 \times 10^{-3}$	0.9771	0.9920	0.9969	0.9985	0.9992
$2.15 \times 10^{-3}$	0.9658	0.9876	0.9949	0.9974	0.9985
$4.64 \times 10^{-3}$	0.9490	0.9807	0.9944	0.9954	0.9970
$1.00 \times 10^{-2}$	0.9238	0.9693	0.9853	0.9915	0.9942
$2.15 \times 10^{-2}$	0.8860	0.9505	0.9744	0.9841	0.9888
$4.64 \times 10^{-2}$	0.8293	0.9187	0.9545	0.9701	0.9731
$1.00 \times 10^{-1}$	0.7460	0.8655	0.9183	0.9434	0.9572
$2.15 \times 10^{-1}$	0.6289	0.7782	0.8538	0.8935	0.9167
$4.64 \times 10^{-1}$	0.4782	0.6436	0.7436	0.8031	0.8410
$1.00 \times 10^0$	0.3117	0.4598	0.5729	0.6520	0.7080
$2.15 \times 10^0$	0.1665	0.2597	0.3543	0.4364	0.5033
$4.64 \times 10^0$	0.07415	0.1095	0.1554	0.2082	0.2620
$7.00 \times 10^0$	0.04625	0.06204	0.08319	0.1161	0.1521
$1.00 \times 10^1$	0.03065	0.03783	0.04821	0.06355	0.08378
$1.40 \times 10^1$	0.02392	0.02414	0.02344	0.03492	0.04426
$2.15 \times 10^1$	0.01297	0.01414	0.01545	0.01723	0.01999
$3.00 \times 10^1$	0.009070	0.009315	0.01016	0.01083	0.01169
$4.64 \times 10^1$	0.005711	0.005919	0.006111	0.006319	0.006554
$7.00 \times 10^1$	0.003722	0.003803	0.003884	0.003962	0.004046
$1.00 \times 10^2$	0.002577	0.002618	0.002653	0.002698	0.002725
$2.15 \times 10^2$	0.001179	0.001187	0.001194	0.001201	0.001208

（根据小库珀、布雷德雷弗特和帕珀多珀勒斯）

与试验井孔有关的参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $t$ 。再由式（7）—（11）可以计算出水井含水层系统的某些水文地质参数。例如，由式（9）可以求出含水层的导水系数

$$T = \frac{\beta r_w^2}{t} \quad (12)$$

由式（8）可以求出含水层的贮水系数

$$S = \frac{\alpha r_w^2}{r_b^2} \quad (13)$$

这些参数对分析利用水井的观测资料有很大的作用。

#### 四、鲁29井试验的解釋

1988年6月，我们在鲁29井进行试验。用一个底半径为 $r_c$ ，高为 $h$ 的圆柱体，迅速地压入

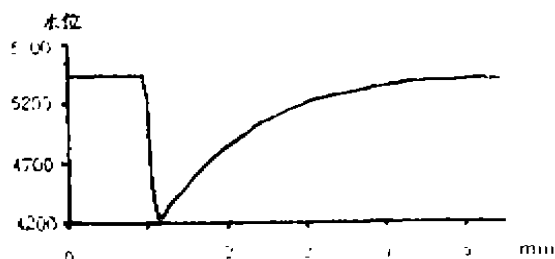


图3 鲁29井试验水位曲线

Fig. 3 the water level curve at the test of the well No. 29

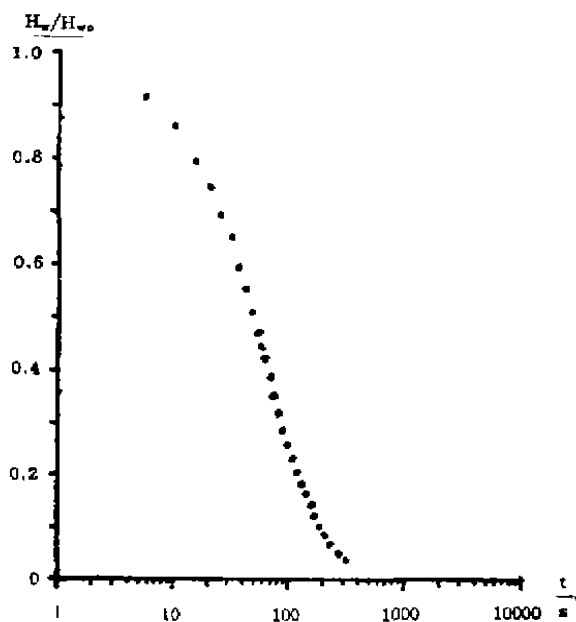


图4 恢复比值与时间的关系

Fig. 4 relations between the specific value of resumption and the time

由以上重叠拟合方法，可以得到鲁29井试验曲线，与图5中的 $\alpha=10^{-6}$ 的曲线拟合得较好。再从两个重叠图上选一个横坐标对应点，为了计算方便，一般选取 $\beta=1.0$ 时的对应点。此时在图4的时间 $t$ 坐标上，对应于图5上的 $\beta=1.0$ 点的是 $t=20s$ 。把此值代入式(12)中，可以求出鲁29井水井含水层系统的导水系数为

$$T = \frac{\beta r_w^2}{t} = 10.8 \text{ (m}^2/\text{d)}$$

井孔水面以下。这相当于给井孔迅速地注入了一段水柱，所以水位瞬时升高。由于井孔内水头压力升高，与含水层内的水头压力失去平衡，导致水从井孔向含水层内渗流，直到两者压力重新平衡为止。

利用压力传感式高精度水位仪，对试验中的水位变化进行加密采样记录（例如每秒钟水位采样一次）。图3绘出了鲁29井试验的水位变化曲线。和渗透性能较好的水井相比，鲁29井试验水位恢复得比较慢，在压入圆柱后300多秒才基本恢复。

由圆柱体的尺寸和井管尺寸，可以算出圆柱体压入井孔水面下引起井孔水面升高而变化的体积为

$$V_0 = \pi r_c^2 h = \pi r_w^2 H_{w0} \quad (14)$$

从而可以求出井水位恢复比值  $H_w/H_{w0}$ （见表2）。由此可以画出水位恢复比值与时间的关系曲线（图4）。图中时间 $t$ 取以10为底的常用对数。

根据表1给出的数值积分的理论值，用与图4相同比例的坐标，分别做出五条不同 $\alpha$ 参数值的曲线（图5）。为了便于和图4拟合，图5最好是绘制在一张透明片上。

把透明片上的图5重叠在图4上，在保持纵坐标 $H_w/H_{w0}$ 一致的前题下，相对平移图5，使得图4上的观测值各点与图5上的理论值曲线拟合得最佳为止。需要注意图5只能左右平移，不能上下移动，更不能使坐标倾斜。

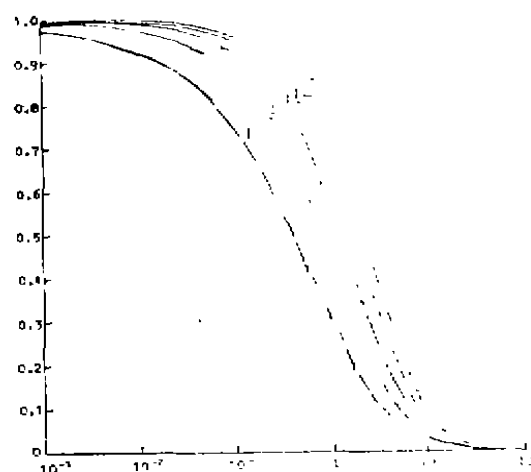


图5 理论恢复曲线

Fig. 5 restored curve of theory

1.  $a=10^{-1}$  2.  $a=10^{-2}$  3.  $a=10^{-3}$  4.  $a=10^{-4}$  5.  $a=10^{-5}$

由于鲁29井含水层的厚度是已知的，即 $b=20\text{m}$ ，所以可以进一步求出鲁29井含水层的渗透系数为

$$K = \frac{T}{b} = 0.54 \text{ (m/d)}$$

再由式(13)可以计算出鲁29井含水层的贮水系数为

$$S = \alpha \frac{r_w^2}{r_b^2} = 10^{-3}$$

由以上算出的参数，可以分析鲁29井水井含水层的渗透性能了。

## 五、讨论和结论

### 1. 鲁29井水井含水层的渗透性能

鲁29井处于华北平原，覆盖层厚度相当大，含水层主要是细砂和含砾粗砂。根据含水层的颗粒分析，细砂里颗粒直径 $0.25 \sim 0.1\text{mm}$ 的占62%，含砾粗砂里颗粒直径 $1 \sim 0.25\text{mm}$ 的占61.3%（见表2），所以含水层的渗透性能较差，并且对水运动的阻力较大。

郑香媛和殷积涛在我国首次采用上述“重锤试验法”对全国井网的20余口井做了试验，发现井孔水位的振荡有三种不同的类型：过阻尼型，阻尼振荡型和临界阻尼型。鲁29井的水位恢复曲线属于过阻尼型振荡，所以其含水层的阻尼系数相当大，含水层对水渗流的阻力也相当大，可以说鲁29井水井含水层的渗透性能较差。

表2 含水层颗粒分析(%)

Table 2 granulated analysis of the aqueous stratus (%)

颗粒直径 (毫米) 取样深度(米)	3~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	<0.1	岩性定名
321.00				23.50	62.00	15.50	细砂
346.00	12.80	19.80	35.80	25.50	3.80	8.10	含砾粗砂

• 据山东省地矿局第二水文地质队的钻探地质综合图表。

## 2. 重锤试验和抽水试验结果的比较

如何获得深部地层的水文地质参数是地下水资源调查、油田开发以及深部核污物处理等工作的一项重要内容。水文工作者传统的方法是现场抽水试验,要求在主孔抽水的同时,对一定距离的数个观测孔进行水位观测。尽管这样测得的水井含水层渗透参数较接近实际情况,但抽水试验耗费较大的物力和财力,工作复杂繁琐,试验时间也较长。采用重锤试验法仪器设备简单,工作简单明了,只需几分钟最多几小时便可以做完试验。所以重锤试验法更易推广应用,尤其在地震地下水动态观测中具有广阔的应用前景。

鲁29井成井后,山东省地矿局第二水文地质队曾做过抽水试验,抽水试验的部分结果见表3。鲁29井含水层的总厚度为20m,由表3可知抽水试验得出的含水层的导水系数为 $47.54\text{m}^2/\text{d}$ (对于第一次抽水)和 $43.6\text{m}^2/\text{d}$ (对于第二次抽水)。而我们用重锤试验得出的导水系数为 $10.8\text{m}^2/\text{d}$ ,和抽水试验的结果同数量级。

表3 抽水试验成果表

Table 3 results of the pumping test

降低次序		$S_1$	$S_2$
降低水位	米	17.73	8.91
抽水流量	升/秒	7.13	3.59
单位涌水量	升/秒米	0.402	0.403
影响半径	米	273	132
渗透系数	米/日	2.377	2.180
稳定时间	小时	9	6

• 据山东省地矿局第二水文地质队

重锤试验得到的含水层的导水系数比抽水经验的小一些,这可能和水井内抽水降低的水位大小有关。表3中有两次抽水结果,抽水时降低的水位大的对含水层的影响半径也大,得出的渗透系数或导水系数也大。这次的重锤试验时井孔水位只改变了46.8cm,所以它对含水层的影响半径也相当小,得出的导水系数也比较小,但与抽水试验得出的同数量级,

地震地下水动态观测中, 各种主要干扰因素, 例如固体潮、气压和降水荷载, 影响承压井水位变化一般只有几十厘米。因此, 用重锤试验法得到的含水层的导水系数来分析这些干扰因素的影响, 比用抽水试验的结果更合理一些。

### 3. 拟合法的误差

从图 5 及 H·H·Cooper 给出的理论积分结果来看, 用拟合理论曲线的办法求含水层的导水系数时, 对参数  $\alpha$  的大小依赖比较明显, 即对参数  $\alpha$  的变化比较敏感。这从图 4 也可以看到, 当实测曲线从一条理论曲线移到另一条时, 求出的含水层导水系数的差异并不是太大。就我们计算的鲁 29 井来看, 如果将实测数据曲线向右移动到  $\alpha=10^{-4}$  的理论曲线位置上, 这时的拟合不如在  $\alpha=10^{-6}$  时拟合的好。移动后对应于  $\beta=1.0$  的时间坐标变成  $t=22s$ , 这时可算出含水层的导水系数变成  $9.82m^2/d$ 。由此可见, 当参数  $\alpha$  差一个数量级时, 对导水系数影响只有 10% 左右。所以拟合法产生的误差不是太大, 一般决不会相差一个数量级。

由讨论的 2 和 3 可见, 重锤试验法求出的含水层的导水系数一般比抽水试验小一些, 但数量级相同, 所以有一定的参考价值。尤其是用于地下水微动态分析, 比抽水试验给出的导水系数更合理。

感谢聊城市地震办公室协助我们现场试验, 并提供了有关资料。感谢山东省地矿局第二水文地质队提供了鲁 29 井抽水试验有关资料及结果。

### 参 考 文 献

- [1] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 体膨胀固体潮对水井水位观测的影响, 地震研究, 9 卷, 4 期, 1986。
- [2] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 气压对水井水位观测的影响, 地震, 1 期, 1986。
- [3] 张昭栋、郑金涵、冯初刚, 水井水位的降水荷载效应, 地震学报, 8 卷增刊, 1986。
- [4] Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., and Papadopoulos, I. S., Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, water. Resources, vol. 3, 263-269, 1967.

## INTERPRETATION OF GRAVITY BOB TEST IN WELL LU-29

Zhang Zhaodong<sup>1)</sup>      Zheng Xiangyuan<sup>1)</sup>  
Yen Jitao<sup>2)</sup>              Zhang Jiaoxiang<sup>1)</sup>

- 1) Seismological Bureau of Shandong Province)
- 2) Analysis and Prediction Center, SSB)



### Abstract

On the basis of heavy hammer test, the transmissibility of the aquifer in the well Lu-29 has been estimated. It equals  $10.8\text{m}^2/\text{d}$ . It is slightly smaller than that given by the pumping test, but they have the same order. This perhaps relates to the water level downs in the test. The smaller the water level downs, the smaller transmissibility of the aquifer will be gotten by the test.

The heavy hammer test is more simple, more convenient, more economical and more swift than the pumping test, it is also more reasonable to explain the micro-behavior of groundwater and easier to put into practice.