

抽水试验确定承压含水层参数方法探讨

聂庆林¹, 高广东¹, 轩华山¹, 聂秋月², 聂士展³, 叶强¹

(1. 山东聊城水文水资源勘测局, 聊城 252000; 2. 河海大学水文学院, 南京 210098;

3. 聊城市国土资源局, 聊城 252000)

摘要: 地下水资源评价与地下水可开采量计算, 需要对地下含水层组参数进行分析确定。本文结合鲁北地区两个地下水源地采用抽水试验确定承压含水层水文地质参数的实践, 探讨定流量(单孔或多孔)抽水试验确定含水层参数的可行性, 并对定降深抽水试验确定水文地质参数方法进行了探索。

关键词: 承压水; 抽水试验; 水文地质参数; 求参探讨

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)04-0037-04

地下水资源评价和以地下水作为供水水源的建设项目的资源论证工作, 在对评价区域水文地质条件进行勘测论证之后, 主要任务就是对取水水源地所在区域地下水可开采量进行估算, 以满足制定水资源开发利用规划和建设项目取水规划的需要。浅层地下水的评价论证, 可开采量估算通常采用水量均衡法、数值法和统计分析法; 但深层承压含水层组地下水可开采量的计算, 比较成熟的方法相对较少, 水文地质参数确定得合理与否, 直接影响到计算成果的可靠程度, 进而关系到水资源论证评价的科学性。本文结合两水源地抽水试验, 探讨承压含水层组水文地质参数确定的方法问题。

1 定流量抽水试验确定水文地质参数

1.1 单井抽水试验推求水文地质参数

1.1.1 方法原理^[1]

承压完整井非稳定流抽水的泰斯公式为:

$$S = \frac{Q}{4T} W(u) = \frac{Q}{4T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1)$$

式中: S ——与抽水井距离 r 处的水位降深(m);

Q ——抽水井流量(m^3/d);

T ——含水层导水系数(m^2/d);

a ——含水层压力传导系数(m^2/d);

t ——抽水历时(d);

$W(u)$ ——井函数, 与 a 、 t 、 r 有关。

对式(1)两边取对数可得:

$$\lg S = \lg \frac{Q}{4T} + \lg W\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (2)$$

式中, $\lg \frac{Q}{4T}$ 为常数。

由于 $u = \frac{r^2}{4at}$, 则 $t = \frac{r^2}{4a} \times \frac{1}{u}$, $\frac{r^2}{4a}$ 为常数, 两边取对数得:

$$\lg t = \lg \frac{r^2}{4a} + \lg \frac{1}{u} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知: $\lg S - \lg t$ 相当于 $\left[\lg W(u) + \lg \frac{Q}{4T} \right] - \left[\lg \frac{r^2}{4a} + \lg \frac{1}{u} \right]$, 与标准曲线 $\lg W(u) - \lg(1/u)$ 相似, 只是纵横坐标相差一个常数, $\lg S - \lg t$ 是抽水试验观测孔的实测曲线(t 为分钟)。据此可根据抽水试验观测数据, 采用图解分析法分析计算含水层参数。

操作步骤: 首先制作标准曲线 $\lg W(u) - \lg(1/u)$, 再依据抽水试验资料在双对数纸上点绘 $\lg S - \lg t$ 曲线, 纵横坐标平行移动, 找到一个最佳配合位置, 使 $\lg S - \lg t$ 实测点据与标准曲线 $\lg W(u) - \lg(1/u)$ 重合度最好, 然后固定两曲线图位置, 任意找到一个配合点 $M(S, t)$ (取整数), 读取其 $W(u)$ 、 $1/u$ 、 S 、 t 的值, 由下列公式计算含水层弹性给水度 μ_e :

$$T = \frac{Q}{4S} W(u), a = \frac{r^2}{4t} \times \frac{1}{u}, \mu_e = \frac{T}{a}$$

1.1.2 实例分析

以山东鲁西化工集团地下水水源地抽水试验为例, 水源地内建有深水井4眼, 其中3[#]、1[#]、2[#]井孔呈西向东排列, 3[#]、1[#]井间距215.6m, 1[#]、2[#]井间距197.7m, 4[#]井孔在2[#]井孔南422m, 3[#]、2[#]井间距

收稿日期: 2008-08-22; 修订日期: 2009-02-20

作者简介: 聂庆林(1956-), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事水文预报和水资源开发利用研究工作。

E-mail: nql-1026@163.com

414m, 1[#]、4[#]井间距 466m, 3[#]、4[#]井间距 600m。

根据试验条件共进行了 2 组单孔抽水试验, 第一组抽水孔为 1[#], 观测孔为 2[#]、3[#], 抽水历时 5d, 水位恢复观测 2d; 第二组抽水孔为 3[#], 观测孔为 2[#]、1[#], 抽水历时 3d。步骤如下:

(1) 抽水前准备就绪后, 同时量测取水孔与观测孔的静水位(精确至 0.01m), 校正好测绳、钢卷尺、秒表等; 开启抽水电泵各井孔并同时计时, 约定在开机后第 1, 2, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, ..., 1 440, ..., 分钟, 持续观测取水孔与观测孔水位降深 S_t , 通过安装在取水电泵上的流量计读取各取水时间段的抽水量, 得到抽水试验过程相应的稳定抽水流量、取水 t 时刻取水孔与观测孔的对应水位降深 S_t 等数据;

(2) 用校正好的测绳测量各观测孔距取水井孔的距离 r_1 、 r_2 , 测量各井孔基准点高程;

(3) 抽水结束停机时, 以同样的时距观测取水孔与观测孔的对应水位降深 S_t , 得到取水孔和观测孔水位恢复的试验资料;

(4) 根据试验资料采用图解分析法分析计算本次试验得到的含水层参数。

2 组单孔抽水试验结束后, 根据获得的数据, 利用图解分析法分析计算得 2[#] 和 1[#] 井孔各参数(表 1)。

1.2 利用水位恢复曲线法推求水文地质参数^[2]

原理: 某井以定流量 Q 抽水停止, 水位恢复过程

表 1 单孔抽水试验参数计算成果表

Table 1 Calculation of aquifer parameters with single-well pumping tests

试验分组及取水孔号		第一组 1 #		第二组 3 #	
抽水流量		2 743m ³ /d		2 699m ³ /d	
观测孔号		2 #	3 #	2 #	1 #
与取水孔距离(m)		197.7	215.6	414.0	215.6
标准曲线图解法	$T(\text{m}^2/\text{d})$	720	851	1 250	967
	$a(\text{m}^2/\text{d})$	1.38×10^6	1.44×10^6	1.51×10^6	1.59×10^6
	μ_e	0.000 52	0.000 59	0.000 83	0.000 61
水位恢复曲线图解法	$T(\text{m}^2/\text{d})$	826	893		
	$a(\text{m}^2/\text{d})$	1.24×10^6	1.56×10^6		
	μ_e	0.000 67	0.000 59		

注: 1[#]井孔深 516.0m, 取水段 251.06 ~ 504.0m; 2[#]井孔深 522.2m, 取水段 253.5 ~ 510.0m; 3[#]井孔深 479.2m, 取水段 242.8 ~ 471.8m。

1.3 多孔抽水试验推求含水层水文地质参数

为确保试验所得水文地质参数能客观反映水源地含水层组透水和弹性释水特性, 在客观条件允许时还应在单孔抽水试验基础上进行多孔(也称群孔)抽水试验, 进一步验证单孔试验取得参数的合理性。

1.3.1 方法原理^[1~2]

可等同认为从停抽时刻起, 有一个流量为 Q 的注水井开始工作, 其水位回升适用泰斯公式。当 $t > 5r^2/a$ 时,

$$S = 2.3 \frac{Q}{4T} \lg 2.25 \frac{at}{r^2} \\ = 0.183 \frac{Q}{T} \lg 2.25 \frac{a}{r^2} + 0.183 \frac{Q}{T} \lg t \quad (4)$$

由此可见, 不同时刻 t 与对应的水位恢复高度 S (从停抽时刻的稳定水位 S_0 算起), 在半对数纸上成直线, 其

斜率 $m = 0.183 \frac{Q}{T}$, 由此得到 $T = 0.183 \frac{Q}{m}$ 。

取 t_1 时刻为 $S - \lg t$ 直线段的起点, 则 t_1 时刻水位恢复高度 S_1 为:

$$S_1 = S_0 - S_1 = 0.183 \frac{Q}{T} \lg 2.25 \frac{at_1}{r^2} \quad (5)$$

当 $t = t_2$ 时, 以 t_1 为起点, t_2 时刻水位恢复高度为:

$$S_2 = S_2 - S_1 = 0.183 \frac{Q}{T} (\lg t_2 - \lg t_1) \quad (6)$$

联解式(5)、(6), 得:

$$a = \frac{r^2}{2.25 t_1} \times 10^{\frac{S_0 - S_1}{S_2 - S_1}} \times \lg \frac{t_2}{t_1}$$

利用第一组单孔抽水试验的水位恢复资料, 在半对数纸上点绘水位恢复高度 S 与对应时刻 t 关系图, 图解计算得到各水文地质参数值见表 1。

假设含水层均质、各向同性、等厚且无限延伸, 水力坡度很小。有 n 眼取水井布设, 各井到中心井 M 的距离分别为 r_1, r_2, \dots, r_n , 各井同时抽水流量分别为 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 。在各井抽水影响下, 根据势叠加原理中心井 M 点的水位降深, 应等于 n 眼井取水对它引起降深的总和, 且各井均是定流量非稳定流抽水, 各井对

M 点的影响应符合泰斯公式, 即有:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \left[Q_i W(u_i) \right] \quad (5)$$

$$\text{式中, } u_i = \frac{r_i^2 S}{4 T t} = \frac{r_i^2}{4 a t}$$

当 $u_i \leq 0.01$ 时, 上式简化为:

$$\begin{aligned} S &= \sum_{i=1}^n S_i = \frac{2.3}{4} \sum_{i=1}^n \left[Q_i \lg \frac{2.25 a t}{r_i^2} \right] \\ &= \frac{2.3}{4} \sum_{i=1}^n \left[Q_i \lg \frac{2.25 a}{r_i^2} \right] + \frac{2.3}{4} \sum_{i=1}^n \left[Q_i \right] \lg t \quad (6) \end{aligned}$$

从式(6)可知, S 与 $\lg t$ 为线性关系, 将试验观测数据 S 、 t 点绘在半对数格纸上, 即可图解分析得到含水层参数。

1.3.2 实例分析

1.1.3 节中的项目在 2 组单孔抽水试验基础上, 进行了 1 组多孔抽水试验, 取水孔为 1[#]、3[#] 井, 观测孔为 2[#]、4[#] 井, 抽水历时 5d, 1[#] 号井抽水流量 $Q_1 = 2160 \text{ m}^3/\text{d}$, 3[#] 井抽水流量 $Q_2 = 1440 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2 取水孔抽水时观测孔同步观测某一时刻 t 两孔水位降深 S_1 、 S_2 , 时距要求同单孔抽水试验, 取水停止后同样观测取水孔与观测孔恢复水位。

根据以上方法原理, 含水层水文地质参数推求采用半对数图解法。本次试验在 2 孔同时抽水的条件下,

当 $\frac{r_{\max}^2}{4 a t} \leq 0.05$ 时, 降深方程可近似改写为:

$$\begin{aligned} S &= \frac{Q}{4 T} \ln \left[\frac{2.25 a t}{r_1^2 + r_2^2} \right] \quad (7) \\ &= \left(0.183 \frac{Q}{T} \right) \lg \left[\frac{2.25 a}{r_1^2 + r_2^2} \right] + (0.183 \frac{Q}{T}) \lg t \end{aligned}$$

式中: $\frac{Q}{T}$ ——取水孔抽水流量占总流量的比重;

r ——观测孔与某取水孔的距离;

其他符号意义同前。

$S - \lg t$ 曲线的直线部分的斜率 $m = 0.183 \frac{Q}{T}$, 由

此得到 $T = 0.183 \frac{Q}{m}$;

从式(3)~(7)可以看出, 直线的延长部分与横轴 $\lg t$ 交于 t_0 点, 即 $S = 0$ 时, $t = t_0$, 将此关系式代入式

$$(7), \text{得 } a = \frac{\left(\frac{r_1^2 + r_2^2}{2.25 t_0} \right)^2}{2.25 t_0}。$$

据此由 4[#]、2[#] 观测孔降深资料图解分析得到含水层参数见表 2。

1.4 不同试验方法取得水文地质参数的对比分析

通过 2 组单孔、1 组多孔抽水试验, 分析得到本水

源地含水层多组水文地质参数, 其中 2[#] 井孔取得 2 组参数, 1[#]、3[#] 井孔各取得一组参数。对比分析可知, 2[#] 井孔第一组参数与其它两孔参数接近, 第二组单孔试验资料分析得到的参数值偏大, 分析其主要原因是观测孔距抽水孔距离较远, 水位降深变化不灵敏, 影响分析参数的精度, 故确定水源地含水层参数时不予采用。各观测孔参数取不同方法分析结果的平均值, 在此基础上将各组参数应用于抽水孔计算抽水量, 以与实际抽水量总体误差最小原则确定水源地采用的参数(表 3)。由表可知, 抽水试验各种方法确定的参数分析成果基本一致。

表 2 鲁化集团多孔抽水试验参数计算成果表

Table 2 Calculation of aquifer parameters with multi-well pumping tests

取水孔编号	1 [#]	3 [#]
抽水流量 (m^3/d)	2160	1440
观测 2 [#] 距主孔 (m)	197.7	414
观测 4 [#] 距主孔 (m)	466	600
T (m^2/d)	775	856
半对数图解法	a (m^2/d)	
	μ_e	
	1.49 $\times 10^6$	1.50 $\times 10^6$
	0.000 52	0.000 57

注: 1[#]、2[#]、3[#] 井孔深与取水段同表 1, 4[#] 井孔深 599.92m, 取水段 207.5~587.92m。

2 定降深抽水试验推求水文地质参数

在利用抽水试验的方法确定水源地水文地质参数时, 往往受外部环境条件的限制, 水源地取水井孔的数量或观测条件不能满足单孔、群孔抽水试验的基本要求。如水源地取水井影响范围内无适合作为观测孔的管井, 有井孔而一直处于取水状态不能专门作为观测孔使用等。因此, 有必要研究单孔取水而无观测孔条件下, 利用抽水试验确定水文地质参数的方法。定降深抽水试验推求水文地质参数, 即是一种无观测孔条件下抽水试验确定含水层参数的方法。

2.1 方法原理^[2]

在无限承压含水层进行抽水, 如果使井中水头 H 或降深 S_w 保持不变, 那么抽水流量 Q 随着抽水时间的延续而减少, 流量公式为:

$$Q = 2 T S_w G(t_D) \quad (8)$$

$$G(t_D) = \frac{4 t_D}{0} x e^{-t_D x^2} \left\{ \frac{1}{2} + \lg^{-1} \left[\frac{Y_0(x)}{J_0(x)} \right] \right\} dx \quad (9)$$

其中: S_w ——取水井降深;

$G(t_D)$ ——无越流系统定降深井流的流量函数;

表3 鲁西化工集团水源地水文地质参数分析成果对照表

Table 3 Comparison of the calculated hydrogeological parameters in the Western Shandong Chemical Enterprise wellfiled with different methods

参 数	2 [#]	1 [#]	3 [#]	多孔试验值	采用值
$T(\text{m}^2/\text{d})$	758	978	860	816	860
$a(\text{m}^2/\text{d})$	1.41×10^6	1.58×10^6	1.48×10^6	1.50×10^6	1.48×10^6
μ_e	0.000 54	0.000 62	0.000 58	0.000 55	0.000 58

$t_D = \frac{at}{r_w^2}$ ——无因次时间, a 、 r_w 意义同前;

$J_0(x)$ 、 $Y_0(x)$ ——零阶第一类、第二类贝塞尔函数。

当 $t_D \gg 10^4$ 时,定降深井流的流量公式可近似写为:

$$Q = \frac{4 TS_w}{\ln \frac{2.25 at}{r_w^2}} \quad (10)$$

式(10)在一般的条件下都是有效的,因为通常 a 的值都很大而 r_w^2 又很小,条件 $t_D \gg 10^4$ 很容易满足。上式可写为:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q} &= \frac{2.3}{4 TS_w} \lg \frac{2.25 at}{r_w^2} \\ &= \frac{0.183}{TS_w} \lg \frac{2.25 a}{r_w^2} + \frac{0.183}{TS_w} \lg t \end{aligned} \quad (11)$$

由此可见,将 $1/Q - t$ 数据点在单对数坐标纸上,则出现直线段,此直线的斜率 m 为:

$$m = \frac{0.183}{TS_w}, \text{即 } T = \frac{0.183}{mS_w} \quad (12)$$

当试验时间足够长,可相应得到若干组降深 S_w 一定时的 $r-Q$ 试验观测数据,确定稳定的 $1/Q - \lg t$ 曲线,可读得曲线在 $1/Q$ 轴上的截距 $(1/Q)_0$,利用公式

$$a = 0.445 r_w^2 10^{\left(\frac{1}{Q}\right)_0 / m} \quad (13)$$

计算出含水层参数 a ,再根据 T 、 a 、 μ_e 之间的关系推求出 μ_e 值。

2.2 实例分析

以山东祥光铜业有限公司年产 $40 \times 10^4 \text{ t}$ 阴极铜项目水源地抽水试验为例,探讨定降深抽水试验确定含水层参数的方法步骤。

试验过程:选择厂区西南部生产用取水井,作为定降深抽水试验井孔。开机后用阀门控制取水电泵出水流量大小,并用安装在取水电泵上的流量计读取水泵单位时间抽取的水量。

开机初始取水量 $119.6 \text{ m}^3/\text{h}$, 0.5 h 后用阀门压缩电泵出水量,以此时水位降深 S_w 作为降深定值,并读

取压缩后电泵取水量;当电泵出水量被压缩后,水位瞬间回升,以后逐渐下降,当水位降至 S_w 时,第二次压缩出水量,观测第二次控压阀门的时间并读取压缩后电泵取水量;水位瞬间回升逐渐回落至 S_w 时,第三次压缩出水量,……。依次类推,本次试验共进行5个回合,得到5组相应 $r-Q$ 试验观测数据。在半对数格纸上点绘 $1/Q - t$ 相关曲线图。

根据式(12)推求导水系数,得 $T = \frac{0.183}{mS_w}$,由 $1/Q$

- $\lg t$ 曲线量测斜率 m 。

本次水源地定降深抽水试验相关试验数据为: S_w

$= 18.3$, $m = 0.000 33 \text{ h}/\text{m}^3 = 0.000 013 75 \text{ d}/\text{m}^3$;

代入式(12)得到: $T = 727 \text{ m}^2/\text{d}$

然后由式(13)推求参数 a 、 μ_e 之值。

$\left(\frac{1}{Q}\right)_0 = 0.000 116$, $r_w = 0.108$,代人(4~6)式得 $a = 1.42 \times 10^6$, $\mu_e = 0.000 51$ 。

3 结论及建议

采用抽水试验确定水源地含水层组水文地质参数,是目前普遍采用的方法。从2个水源地进行抽水试验的实践看,定流量单孔抽水试验确定水源地含水层组水文地质参数是一种便于操作、相对经济,且成果比较可靠的方法。由单孔和多孔抽水试验取得的含水层参数对比分析可知,单孔抽水时如观测孔距取水孔距离在合理的范围内($100 \sim 250 \text{ m}$ 为宜,太远取水影响水位降深不灵敏,太近对水源地含水层特性代表性不足),参数分析结果与群孔抽水试验结果基本吻合,能满足水源地评价与开发利用规划的需求。

抽水试验井孔位置的确定应在区域地质调查基础上进行,所求参数适用于地质构造与含水层岩性相同或相近的区域,如选定的水源地范围较大,抽水试验布井时应充分论证其代表性,必要时划分单元布井抽水试验,分别确定参数。

(下转第49页)

Research on changes and prediction of trend of the groundwater regime in Hohhot

YANG Liang-ping¹, JIANG Zhen-jiao², ZHAO Yi-ting², ZHA En-shuang²

(1. Institute of Hydrogeology & Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050803, China;

2. School of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Based on formation of groundwater and its affecting factors and consideration of the hydrogeological conditions, groundwater regime types in the study area are examined. The groundwater regime of the phreatic aquifer mainly belongs to subsurface runoff and exploration type, infiltration-subsurface runoff and exploration type, while the groundwater regime of the confined aquifer is of subsurface runoff and exploration type. On the basis of analyses of groundwater levels, a groundwater level dynamic trend model is established with BP network, and the characteristics of groundwater level change and the expansion trend of the depression cone of are predicted.

Key words: groundwater level; groundwater regime; BP network

责任编辑:汪美华

(上接第 40 页)

定降深抽水试验推求水文地质参数的方法,从祥光铜业水源地抽水试验过程看,试验条件容易满足,简便经济,也能够确定水源地含水层组的参数,但试验时阀门控制取水流量比较困难,试验时间足够长时需多次调控阀门调减出流量以稳定降深,深井电泵调控难度较大。同时因条件限制,试验获取的参数不能采用其他方法验证,故不宜在生产实践中推广应用。

参考文献:

- [1] 叶水庭,施鑫源.地下水水文学[M].南京:河海大学出版社,1991.
- [2] 陈崇希.地下水不稳定井流计算方法[M].北京:地质出版社,1983.

Methods of determining parameters of a confined aquifer with pumping tests

NIE Qing-lin¹, GAO Guang-dong¹, XUAN Hua-shan¹, NIE Qiu-yue², NIE Shi-zhan³, YE Qiang¹

(1. Liaocheng Hydrographic and Water Resources Survey Bureau, Liaocheng 252000, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Liaocheng Municipal Bureau of Land and Resources, Liaocheng 252000, China)

Abstract: It is necessary to determine parameters of aquifers in evaluation of groundwater resources and calculation of recoverable groundwater withdrawal. Based on pumping tests conducted at two wellfields in northern Shandong province, the possibility of determination of aquifer parameters with pumping tests under a constant pumping rate is discussed in this paper. The method of determination of hydrogeological parameters with pumping tests of constant drawdown is also examined.

Key words: confined water; pumping test; hydrogeological parameter; determination of parameters

责任编辑:汪美华