

第四章 抽水试验

抽水试验是确定含水层参数，了解水文地质条件的主要方法。采用主孔抽水、带有多个观测孔的群孔抽水试验，包括非稳定流和稳定流抽水实验，要求观测抽水期间和水位恢复期间的水位、流量、水温、气温等内容。要求了解试验基地及其所在地区的水文气象、地质地貌及水文地质条件，了解并掌握抽水试验的目的意义、工作程序、现场记录的主要内容、数据采集与处理方法，掌握相关资料的整理、编录方法和要求，了解对抽水试验工作质量进行评价的一般原则，能够利用学过的理论及方法进行水文地质参数计算，并对参数的合理性和精确性进行分析和检验。

§ 4.1 基本要求

掌握抽水试验的目的、分类、方法及抽水试验准备工作。

4.1.1 抽水试验的目的

(1) 确定含水层及越流层的水文地质参数：渗透系数 K 、导水系数 T 、给水度 μ 、弹性释水系数 μ^* 、导压系数 a 、弱透水层渗透系数 K' 、越流系数 b 、越流因素 B 、影响半径 R 等。

(2) 通过测定井孔涌水量及其与水位下降（降深）之间的关系，分析确定含水层的富水程度、评价井孔的出水能力。

(3) 为取水工程设计提供所需的水文地质数据，如影响半径、单井出水量、单位出水量、井间干扰出水量、干扰系数等，依据降深和流量选择适宜的水泵型号。

(4) 确定水位下降漏斗的形状、大小及其随时间的增长速度；直接评价水源地的可开采量。

(5) 查明某些手段难以查明的水文地质条件，如确定各含水层间以及与地表水之间的水力联系、边界的性质及简单边界的位置、地下水补给通道、强径流带位置等。

4.1.2 抽水试验分类

抽水试验主要分为单孔抽水、多孔抽水、群孔干扰抽水和试验性开采抽水。

(1) 单孔抽水试验：仅在一个试验孔中抽水，用以确定涌水量与水位降深的关系，概略取得含水层渗透系数。

(2) 多孔抽水试验：在一个主孔内抽水，在其周围设置若干个观测孔观测地下水位。通过多孔抽水试验可以求得较为确切的水文地质参数和含水层不同方向的渗透性能及边界条件等。

(3) 群孔干扰抽水试验：在影响半径范围内，两个或两个以上钻孔中同时进行的抽水试验；通过干扰抽水试验确定水位下降与总涌水量的关系，从而预测一定降深下的开采量或一定开采定额下的水位降深值，同时为确定合理的布井方案提供依据。

(4) 试验性开采抽水试验：是模拟未来开采方案而进行的抽水试验。一般在地下水天然补给量不很充沛或补给量不易查清，或者勘察工作量有限而又缺乏地下水长期观测资料的水源地，为充分暴露水文地质问题，宜进行试验性开采抽水试验，并用钻孔实际出水量作为评价地下水可开采量的依据。

4.1.3 抽水试验的方法

单孔抽水试验采用稳定流抽水试验方法，多孔抽水、群孔干扰抽水和试验性开采抽水试验一般采用非稳定流抽水试验方法。在特殊条件下也可采用变流量(阶梯流量或连续降低抽水流量)抽水试验方法。抽水试验孔宜采用完整井(巨厚含水层可采用非完整井)。观测孔深应尽量与抽水孔一致。

4.1.4 抽水试验准备工作

- (1) 除单孔抽水试验外，均应编制抽水试验设计任务书；
- (2) 测量抽水孔及观测孔深度，如发现沉淀管内有沉砂应清洗干净；
- (3) 做一次最大降深的试验性抽水，作为选择和分配抽水试验水位降深值的依据；
- (4) 在正式抽水前数日对所有的抽水孔和观测孔及其附近有关水点进行水位统测，编制抽水试验前初始水位等水位线图，如果地下水位日变化很大时，还应取得典型地段抽水前的日水位动态曲线；
- (5) 为防止抽出水的回渗，在预计抽水影响范围内的排水沟必须采取防渗措施。当表层有 3 m 以上的粘土或亚粘土时，一般可直接挖沟排水。
- (6) 需要对多层含水层地下水进行分层评价时，应分层进行抽水试验，或用井中流速、流量仪解决分层抽水问题。

抽水试验工作量要求见表 4-1。

表 4-1 抽水试验工作量一览表

勘察阶段	试验类别		孔隙水	岩溶水	裂隙水
初步勘察阶段	单孔抽水	抽水钻孔占控制性勘探孔(不包括观测孔)数的百分比 /%	>60	凡具有供水价值和对参数计算有意义的钻孔均应抽水	
		稳定时间 /h	8~24		
	多孔抽水	抽水孔组数	每个有供水价值的参数区至少 1 组		
		最短延续时间 /d	7	10	

续表 4-1

勘察阶段	试验类别		孔隙水	岩溶水	裂隙水
详细勘察阶段	群孔干扰抽水	抽水孔组数	1		
		总抽水量占提交可开采量的百分比 /%	>30	>50	
		最短延续时间 /d	10	15	
	试验性开采抽水	抽水孔组数	1*		1
		总出水量	接近需水量		
		最短延续时间 /d	30 (枯水期进行)		

*凡作了群孔干扰抽水试验的水源地，可不作试验性开采抽水试验。

§ 4.2 抽水试验孔布置要求

4.2.1 抽水孔的布置要求

抽水孔的布置应符合下列要求：

- (1) 对勘察区水文地质条件具有控制意义的典型地段，应布置单孔抽水试验孔，根据单孔抽水试验资料计算的水文地质参数编制参数分区图；
- (2) 多孔抽水试验孔组，一般参照导水系数分区图，并结合水文地质条件布置，每个有供水意义的参数区至少布置一组，其抽水试验资料所求参数可作为该区计算参数(不用平均参数)；
- (3) 群孔干扰抽水试验和试验性开采抽水试验应在拟建水源地范围内，选择有代表性的典型地段，并结合开采生产井布置。

4.2.2 观测孔的布置要求

观测孔的布置应符合下列要求：

- (1) 为了计算水文地质参数，在抽水孔的一侧宜垂直地下水的流向布置 2~3 个观测孔。
- (2) 为了测定含水层不同方向的非均质性或确定抽水影响半径，可以根据含水层的不同情况，以抽水孔为中心布置 1~4 条观测线；如有两条观测线，一条垂直地下水流向，另一条宜平行地下水流向。
- (3) 群孔干扰抽水试验和试验性开采抽水试验应在抽水孔组中心布置一个观测孔；为查明相邻已采水源地的影响，应在连接两个开采中心方向布置观测孔。为确定水位下降漏斗形态和补给(或隔水)边界，应在边界和外围一定范围内布设一定数量的观测孔。
- (4) 多孔抽水孔组的第一个观测孔应尽量避免三维流的影响，相邻两观测孔的水位下降值相差不小于 0.1 m，最远观测孔的下降值不宜小于 0.2 m，各观测孔应在对数数轴上呈均匀分布。
- (5) 在半承压水含水层进行抽水试验时，宜在观测孔附近覆盖层(半透水层或弱含水层)中布置副观测孔。
- (6) 在进行试验性开采抽水试验时，应在水位下降漏斗范围内的重要建筑物附近增设工程地质、环境地质观测点。

§ 4.3 稳定流抽水试验要求

4.3.1 水位降深

稳定流抽水试验一般进行三次水位降深,最大降深值应按抽水设备能力确定。水位降深顺序,基岩含水层一般宜先大后小,松散含水层宜按先小后大逐次进行。

4.3.2 涌水量及水位变化

在稳定延续时间内,涌水量和动水位与时间关系曲线在一定范围内波动,而且没有持续上升或下降的趋势。当水位降深小于 10 m,用压风机抽水时,抽水孔水位波动值不得超过 10~20 cm;用离心泵、深井泵等抽水时,水位波动值不超过 5 cm。一般不应超过平均水位降深值的 1%,涌水量波动值不能超过平均流量的 3%。

注意:① 当有观测孔时,应以最远观测孔的动水位判定;② 应考虑自然水位影响;③ 在滨海地区应考虑潮汐对动水位的影响。

4.3.3 观测频率及精度要求

(1) 水位观测时间一般在抽水开始后第 1、3、5、10、20、30、45、60、75、90 min 进行观测,以后每隔 30 min 观测一次,稳定后可延至 1h 观测一次。水位读数应准确到厘米 (cm);

(2) 涌水量观测应与水位观测同步进行;当采用堰箱或孔板流量计时,读数应准确到毫米 (mm);

注意:为保证测量精度要求,可根据流量大小,选用不同规格的堰箱。当流量小于 10 L/s 时,堰箱断面面积应大于 25 dm²(即 0.5×0.5 m);流量为 10~50 L/s 时,堰箱断面面积应大于 100 dm²(即 1×1 m);流量为 50~100 L/s 时,堰箱断面面积应大于 200 dm²(即 1×2 m)。

(3) 水温、气温宜 2~4 h 观测一次,读数应准确到 0.5 °C,观测时间应与水位观测时间相对应。

4.3.4 恢复水位观测要求

停泵后应立即观测恢复水位,观测时间间隔与抽水试验要求基本相同。若连续 3 h 水位不变,或水位呈单向变化,连续 4 h 内每小时水位变化不超过 1 cm,或者水位升降与自然水位变化相一致时,即可停止观测。

试验结束后应测量孔深,确定过滤器掩埋部分长度。淤砂部位应在过滤器有效长度以下,否则,试验应重新进行。

§ 4.4 非稳定流抽水试验要求

4.4.1 钻孔涌水量

钻孔涌水量应保持常量,其变化幅度不大于 3%。

4.4.2 抽水延续时间

抽水延续时间除满足表 4-1 的要求外,并可结合最远观测孔水位下降与时间关系曲线[S(或 Δ

h^2)- $\lg t$]来确定。

(1) 当 S (或 Δh^2)- $\lg t$ 曲线至拐点后出现平缓段, 并可以推出最大水位降深时, 抽水方可结束;

注意: 在承压含水层中抽水, 采用 S - $\lg t$ 曲线, 在潜水含水层中抽水采用 Δh^2 - $\lg t$ 曲线。

Δh^2 是指潜水含水层在自然情况下的厚度 H 和抽水试验时的厚度 h 的平方差, 即 $\Delta h^2 = H^2 - h^2$ 。

(2) 当 S (或 Δh^2)- $\lg t$ 曲线没有拐点或出现几个拐点, 则延续时间宜根据试验的目的确定。

4.4.3 观测频率及精度要求

观测频率及精度应符合下列要求:

(1) 水位观测宜按第 0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、5、6、7、8、10、12、15、20、25、30、40、50、60、75、90、105、120 min 进行观测, 以后每隔 30 min 观测一次, 其余观测项目及精度要求可参照稳定流抽水试验要求进行;

(2) 抽水孔与观测孔水位必须同步观测;

(3) 抽水结束后, 或试验期间因故中断抽水时, 应观测恢复水位, 观测频率应与抽水时一致, 水位应恢复到接近抽水前的静止水位。

4.4.4 群孔干扰抽水试验要求

群孔干扰抽水试验除按非稳定流抽水要求进行外, 还应满足下列要求:

(1) 干扰孔之间的距离, 应保证一孔抽水, 使另一孔产生一定的水位削减;

(2) 水位降深次数应根据设计目的而定, 一般应尽抽水设备能力做一次最大降深;

(3) 各干扰孔过滤器的规格和安装深度应尽量相同;

(4) 各抽水孔抽水起、止时间应该相同;

(5) 试验过程中, 宜同时对泉和可能受影响的地表水点进行水位、流量和水温的观测。

4.4.5 试验性开采抽水试验

试验性开采抽水试验除按群孔干扰抽水要求进行外, 还应满足下列要求:

(1) 抽水试验一般在枯水期进行;

(2) 抽水钻孔总涌水量尽量接近设计需水量;

(3) 水位下降漏斗中心水位稳定时间不宜少于一个月;

(4) 若水位不能达到稳定, 应及时调节总涌水量, 使其达到稳定。

§ 4.5 抽水试验资料整理及参数确定方法

4.5.1 抽水试验资料整理

试验期间, 对原始资料和表格应及时进行整理。试验结束后, 应进行资料分析、整理, 提交抽水试验报告。

单孔抽水试验应提交抽水试验综合成果表, 其内容包括: 水位和流量过程曲线、水位和流量关系曲线、水位和时间(单对数及双对数)关系曲线、恢复水位与时间关系曲线、抽水成果、水质化验成果、水文地质计算成果、施工技术柱状图、钻孔平面位置图等。并利用单孔抽水试验资料

编绘导水系数分区图。

多孔抽水试验还应提交抽水试验地下水水位下降漏斗平面图、剖面图。

群孔干扰抽水试验和试验性开采抽水试验还应提交抽水孔和观测孔平面位置图(以水文地质图为底图)、勘察区初始水位等水位线图、水位下降漏斗发展趋势图(编制等水位线图系列)、水位下降漏斗剖面图、水位恢复后的等水位线图、观测孔的 $S-t$ 、 $S-\lg t$ 曲线、各抽水孔单孔流量和孔组总流量过程曲线等。

注意：①要消除区域水位下降值；②在基岩地区要消除固体潮的影响；③傍河抽水要消除河水位变化对抽水孔水位变化的影响。

多孔抽水试验、群孔干扰抽水试验和试验性开采抽水试验均应编写试验小结，其内容包括：试验目的、要求、方法、获得的主要成果及其质量评述和结论。

4.5.2 稳定流抽水试验求参方法

求参方法可以采用 Dupuit 公式法和 Thiem 公式法。

1. 只有抽水孔观测资料时的 Dupuit 公式

承压完整井：

$$K = \frac{Q}{2\pi s_w M} \ln \frac{R}{r_w}$$
$$R = 10s_w \sqrt{K}$$

潜水完整井：

$$K = \frac{Q}{\pi(H^2 - h^2)} \ln \frac{R}{r_w}$$
$$R = 2s_w \sqrt{KH}$$

式中 K ——含水层渗透系数 (m/d)；

Q —— 抽水井流量 (m³/d)；

s_w —— 抽水井中水位降深 (m)；

M ——承压含水层厚度 (m)；

R —— 影响半径 (m)；

H ——潜水含水层厚度 (m)；

h ——潜水含水层抽水后的厚度 (m)；

r_w ——抽水井半径 (m)。

2. 当有抽水井和观测孔的观测资料时的 Dupuit 或 Thiem 公式

承压完整井：

$$h_1 - h_w = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_1}{r_w}$$

Thiem 公式：

$$h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi KM} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

潜水完整井：

$$h_1^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi KM} \ln \frac{r_1}{r_w}$$

Thiem 公式:

$$h_2^2 - h_1^2 = \frac{Q}{\pi KM} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

式中 h_w ——抽水井中水柱高度 (m);

h_1 、 h_2 ——与抽水井距离为 r_1 和 r_2 处观测孔 (井) 中水柱高度 (m), 分别等于初始水位 H_0 与井中水位降深 s 之差, $h_1 = H_0 - s_1$; $h_2 = H_0 - s_2$ 。

其余符号意义同前。

当前水井中的降深较大时, 可采用修正降深。修正降深 s' 与实际降深 s 之间的关系为:

$$s' = s - \frac{s^2}{2H_0}$$

4.5.3 非稳定流抽水试验求参方法

4.5.3.1 承压水非稳定流抽水试验求参方法

1. Theis 配线法

在两张相同刻度的双对数坐标纸上, 分别绘制 Theis 标准曲线 $W(u)-1/u$ 和抽水试验数据曲线 $s-t$, 保持坐标轴平行, 使两条曲线配合, 得到配合点 M 的水位降深 $[s]$ 、时间 $[t]$ 、Theis 井函数 $[w(u)]$ 及 $[1/u]$ 的数值, 按下列公式计算参数 (r 为抽水井半径或观测孔至抽水井的距离):

$$T = \frac{0.08Q}{[s]} [w(u)]$$

$$K = \frac{T}{M}$$

$$s = \frac{4T[t]}{r^2 \left[\frac{1}{u} \right]}$$

$$a = \frac{r^2}{4[t]} \left[\frac{1}{u} \right]$$

以上为降深——时间法 ($s-t$)。也可以采用降深---时间距离法 ($s-t/r^2$)、降深---距离法 ($s-r$) 进行参数计算。

2. Jacob 直线图解法

当抽水试验时间较长, $u = r^2/(4at) < 0.01$ 时, 在半对数坐标纸上抽水试验数据曲线 $s-t$ 为一直线 (延长后交时间轴于 t_0 , 此时 $s=0.00$ m), 在直线段上任取两点 t_1 、 s_1 、 t_2 、 s_2 , 则有

$$T = \frac{0.183Q}{s_2 - s_1} \ln \frac{t_2}{t_1}$$

$$s = \frac{2.25Tt_0}{r^2}$$

$$a = \frac{r^2}{2.25t_0}$$

3. Hantush 拐点半对数法

对半承压完整井的非稳定流抽水试验（存在越流量， K'/b' 为越流系数），当抽水试验时间较长， $u = r^2/(4at) < 0.1$ 时，在半对数坐标纸上抽水试验数据曲线 $s-t$ ，外推确定最大水位降深 S_{\max} ，在 $s-\lg t$ 线上确定拐点 $S_i = S_{\max}/2$ ，拐点处的斜率 m_i 及时间 t_i ，则有

$$m_i = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$$

$$\frac{2.3s_i}{m_i} = e^{\frac{r}{B}} K_0\left(\frac{r}{B}\right)$$

查表求得：

$$e^{\frac{r}{B}} K_0\left(\frac{r}{B}\right), \frac{r}{B}$$

则：

$$T = \frac{0.183Q}{m_i} e^{-\frac{r}{B}}$$

$$s = \frac{2T t_i}{B r}$$

$$\frac{K'}{b'} = \frac{T}{B^2}$$

4. 水位恢复法

当抽水试验水位恢复时间较长， $u = r^2/(4at) < 0.01$ 时，在半对数坐标纸上绘制停抽后水位恢复数据曲线 $s-t$ ，在直线段上任取两点 t_1, s_1, t_2, s_2 ，则有

$$T = \frac{0.183Q}{s_1 - s_2} \ln \frac{t_2}{t_1}$$

$$a = \frac{r^2}{2.25t_1} 10^{\frac{s_0 - s_1}{s_1 - s_2} \lg \frac{t_2}{t_1}}$$

$$s = \frac{T}{a}$$

5. 水位恢复的直线斜率法

当抽水试验水位恢复时间较长， $u = r^2/(4at) < 0.1$ 时，在半对数坐标纸上绘制停抽后水位恢复数据曲线 $s-t$ ，直线段的斜率为 B ，则有

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi B}$$

$$B = \frac{s_r}{\lg \frac{t}{t'}}$$

$$t' = t - t_0$$

4.5.3.2 潜水非稳定流抽水试验求参方法

潜水参数计算可采用仿泰斯公式法、Boulton 法和 Neuman 法。

1. 仿泰斯公式法

$$H_0^2 - h_w^2 = \frac{Q}{2\pi K} W(u)$$

$$u = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu}{4Tt}$$

式中 H_0 、 h_w ——初始水头及抽水后井中水头；

$W(u)$ ——泰斯井函数；

Q ——抽水井的流量(m^3/d)；

r ——到抽水井的距离(m)；

t ——自抽水开始起算的时间(d)；

T ——含水层的导水系数(m^2/d)； $T=Kh_m$ ；

h_m ——潜水含水层的平均厚度(m)；

K ——含水层的渗透系数(m/d)；

a ——含水层的导压系数($1/\text{d}$)

μ ——潜水含水层的给水度。

具体计算时可采用配线法、直线图解法、水位恢复法等。

2. 潜水完整井考虑迟后疏干的 Boulton 公式

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{2}{x} \left\{ 1 - e^{-u_1} \left[chu_2 + \frac{\alpha\eta(1-x^2)t}{2u_2} shu_2 \right] \right\} J_0\left(\frac{r}{vD}x\right) dx$$

$$= \frac{Q}{4\pi T} w(u_{a,y}, \frac{r}{D})$$

式中：

$$v = \sqrt{\frac{\eta-1}{\eta}} = \sqrt{\frac{\mu}{\mu^*+\mu}}$$

$$\eta = \frac{\mu^*+\mu}{\mu^*}$$

$$D = \sqrt{\frac{T}{\alpha\mu}} \text{ (疏干因素)}$$

抽水早期：

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_a, \frac{r}{D})$$

$$u_a = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu^*}{4Tt}$$

抽水中期：

$$s = \frac{Q}{2\pi T} K_0\left(\frac{r}{D}\right)$$

抽水晚期：

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_y, \frac{r}{D})$$

$$u_y = \frac{r^2}{4at} = \frac{r^2 \mu}{4Tt}$$

可根据抽水早期、中期、晚期的观测资料，采用相应的方法计算参数。

3. Neuman 法

对于潜水含水层完整井非稳定流抽水试验，也可以采用 Neuman 模型求参，具体求参过程可

参阅《地下水动力学》等教科书。

4.5.4 参数计算结果的验证

上述参数计算结果的精度如何，取决于试验场地水文地质条件的概化，也取决于观测数据的精度。对于所求得的参数，应将其代入相应的公式，通过对比计算降深与实测降深的差值，分析所求参数的精度及其可靠性和代表性，最终确定抽水试验场地的有代表性意义的参数值。

§ 4.6 报告提纲

4.6.1 抽水试验设计提纲

抽水试验设计提纲内容包括：

(1) 前言(目的及意义)；(2) 水文地质概念模型；(3) 技术要求(场地、抽水井、观测井、观测要求、事故处理)；(4) 求参方法；(5) 时间安排与质量保证；(6) 注意事项；(7) 摘要(500字)及英文摘要。

4.6.2 抽水试验报告提纲

- (1) 前言(目的及意义)：目的及意义、试验完成情况、存在问题及解决方法。
- (2) 气象与水文条件：
 - a. 气象条件：气温、降水、蒸发、风等；
 - b. 水文条件：江河、湖泊、流量、水位等。
- (3) 地质与水文地质条件：
 - a. 地形地貌；
 - b. 地质条件：地层岩性、地质构造；
 - c. 水文地质条件：含水层与地下水类型、地下水埋藏分布条件、地下水循环条件、地下水动态特征、地下水化学特征。
- (4) 抽水试验观测：
 - a. 观测内容：水位、流量、水温；
 - b. 观测方法及工具、精度及要求；
 - c. 观测记录成果。
- (5) 水文地质参数计算：
 - a. 稳定流求参方法；
 - b. 非稳定流求参方法：配线法、直线图解法、水位恢复法、有越流补给的拐点法。
- (6) 参数分析与讨论：
 - a. 计算结果的合理性分析与可靠性分析；
 - b. 参数计算的影响因素；
 - c. 参数的时空变化特点。
- (7) 结论及建议。
- (8) 参考文献。
- (9) 英文摘要。

(10) 附图附表:

- a. 抽水试验平面位置图;
- b. 抽水井钻孔柱状图;
- c. 初始流场图;
- d. 抽水历史曲线图;
- e. 水位、流量观测记录表;
- f. 参数计算有关图表。