

地下水混合井流解析模型

陈崇希

(中国地质大学(武汉)环境地质研究所, 武汉 430074)

摘要: 建立了地下水定流量抽水的稳定混合井流模型和不稳定混合井流模型, 后者包括未抽水条件的混合水位(初始混合水位)模型和定流量混合抽水模型。得出若干基本规律。并与前人的相关问题做了对比, 证明了 Sokol D., Hantush M. S., Бочевер Ф. М. 和 Веригин Н. Н. 及 Neuman 关于混合观测孔水位建议方程所需要的条件以及 MODFLOW 软件关于混合抽水井各层流量的分配与各层的导水系数成正比建议所需要的条件。

关键词: 地下水; 井流; 混合井; 混合水位; 稳定流; 不稳定流; 解析模型

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)05-0001-07

自然界的含水系统, 绝大多数具多层性。对于多层含水系统, 为增大出水量, 简化施工工序和降低成本, 普遍采用混合井开采地下水(除非水质不佳), 甚至利用混合井做抽水试验。不仅如此, 还有不少观测孔也是混合的。因此, 如何建立混合井流模型, 是半个多世纪来人们十分关注的问题。但是, 由于混合井流的复杂性, 混合抽水井只知其抽水井的总流量(可称为井口流量), 而各层流量不得而知; 井中的水位——混合水位的形成问题也是单层井所无有的。由于这些因素, 其研究成果远远不能满足经济社会发展的需求。

关于解析模型, 笔者查到国际上最早研究混合井的论文似乎是 1963 年 Sokol D 关于混合观测孔稳定水位的解析模型^[1]。20 世纪 80 年代 Wikramaratna R S^[2-3] 提出一个简单条件的混合井流模型, 在解析模型上取得一定进展, 但其解析式已相当复杂, 不仅看不出其间的物理关系, 也难以应用。直到 20 世纪 90 年代初基本上还是稳定影响半径井流模型^[4], 基于“影响半径模型”的混合井流模型的解析解, 虽然其物理关系清晰, 但无界含水层的“稳定影响半径井流模型”早以得到批评^[5-7]。而 Hantush M. S.^[8], Бочевер Ф. М. 和 Веригин Н. Н.^[9] 及 Neuman^[10] 关于混合观测孔中的水头降深取其

积分/加权平均以及 MODFLOW^[14] 认为混合抽水井各层流量($Q_{p,1}, Q_{p,2}$)的分配与各层的导水系数(T_1, T_2)成正比的关系等, 但又未提出其理论依据。因此人们企望获得物理意义清晰(虽然条件理想化)的混合井流解析模型。

我国地下水混合井流研究的起步并不晚, 早在 20 世纪 50 年代后期已发表多篇论文^[11], 而且我国 1961 年第一本《地下水动力学》^[12] 已注意到混合井流的重要性, 设有专门一节; 1979 年又发表包括混合抽水井的《单井水力学》^[13]。当然, 那时都是属于“影响半径”稳定井流范畴。此后一段时间没有什么明显的进展。

关于数值模型, 国际上普遍应用的地下水三维流有限差分模拟软件 MODFLOW^[14] 关于混合抽水井的处理, 建议混合抽水的各层流量与各层导水系数成正比的关系来分配。陈崇希等^[15-17] 指出: MODFLOW 并未给出其理论依据。由广西北海混合抽水试验场研究项目提出的“渗流-管流耦合模型”^[18], 符合机理地刻画了混合井流问题, 并成功地应用于若干实例^[19-22]。

1 混合抽水井稳定流问题

以两承压含水层的混合抽水井系统为例讨论。假定两承压含水层分别均质、等厚, 其导水系数分别为 T_1 和 T_2 ; 两含水层间为隔水层; 假定抽水前各层的水头水平且相等, 即 $H_{0,1} = H_{0,2} = H_0$; 混合抽水后, 假定允许忽略混合井中水流的水头损失, 即各层于混合井中的水头相等, 即 $H_{wp,1} = H_{wp,2} = H_{wp}$; 假定各层混合井的有效井径相等, 即 $r_{w,1} = r_{w,2} = r_w$ 。

由于此条件下的水平无界含水系统定流量抽水不

收稿日期: 2011-10-17; 修订日期: 2011-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40872159、40172085)

作者简介: 陈崇希(1933-), 男, 教授, 博士研究生导师, 长期从事地下水动力学, 水文地质数值模拟和地下水资源评价管理等的教学与科研工作。

E-mail: cex33@126.com

可能形成稳定井流,而圆岛模型自然界极少存在,因此本文以直线定水头边界的混合井流为例讨论之。此法可推广用于多边界条件。

由于上述假定条件,混合井流系统的诸层各自以单层井流规律运动,主要在混合井井筒中交换水量,遵循水均衡原则。

假设定水头河流边界为直立的平面并切穿两承压含水层,于是混合井的两层抽水井至定水头边界的距离相等($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$),稳定的边界水头(河水位 H_0)为两承压含水层共同的第一类边界条件(图 1)。当混合井抽水地下水形成稳定状态后,各层井流量分别为^[6,16]

$$Q_{p,1} = \frac{2\pi T_1(H_0 - H_{wp})}{\ln \frac{2\lambda}{r_w}} = \frac{2\pi T_1 s_{wp}}{\ln \frac{2\lambda}{r_w}} \quad (1)$$

$$Q_{p,2} = \frac{2\pi T_2(H_0 - H_{wp})}{\ln \frac{2\lambda}{r_w}} = \frac{2\pi T_2 s_{wp}}{\ln \frac{2\lambda}{r_w}} \quad (2)$$

式中: $Q_{p,1}, Q_{p,2}$ ——混合抽水流量为 Q_p 时 1 和 2 层的分流量;

s_{wp} ——相应的混合井水位降深。

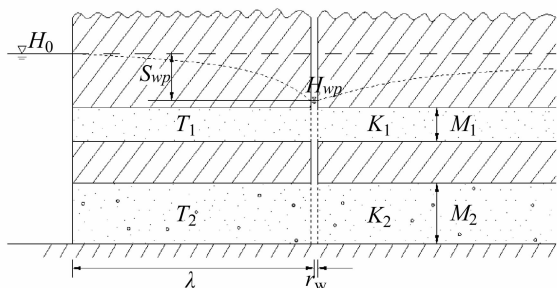


图 1 傍河混合抽水井

Fig.1 Multiaquifer pumping well on riverside

若记含水系统的总导水系数为 T ,即:

$$T = T_1 + T_2$$

则混合井的抽水流量 Q_p :

$$Q_p = Q_{p,1} + Q_{p,2} = \frac{2\pi T(H_0 - H_{wp})}{\ln \frac{2\lambda}{r_w}} \quad (3)$$

混合抽水时井中水位为:

$$H_{wp} = H_0 - \frac{Q_p}{2\pi T} \ln \frac{2\lambda}{r_w} \quad (4)$$

由(1)和(2)两式可得

$$\frac{Q_{p,1}}{Q_{p,2}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (5)$$

$$\frac{Q_{p,1}}{Q_p} = \frac{T_1}{T} \quad \frac{Q_{p,2}}{Q_p} = \frac{T_2}{T} \quad (5)'$$

由此表明,在上述假定条件下,混合抽水的各层流量分配是与各层的导水系数成正比。

2 不稳定混合井流问题

上述基本条件不变,但为无界含水层系统,两层初始水头分别为 $H_{0,1}$ 和 $H_{0,2}$,并假定两层压力传导系数(水头扩散系数)相等,即 $a_1 = a_2 = a$ 。(图 2)

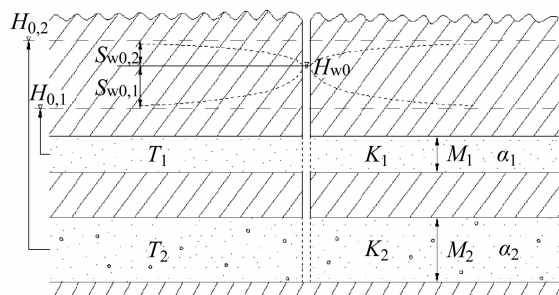


图 2 无界混合井未抽水条件(初始)的混合水位示意图

Fig.2 Hybrid initial head distribution around a multiaquifer well before pumping in infinite aquifers

(1) 未抽水的混合水位(初始混合水位)问题

当钻孔打穿第 1、2 承压含水层成为混合井时,井中形成未抽水(初始)的混合水位 H_{w0} ,假定 $H_{0,2} > H_{0,1}$ (反之也可),必有 $H_{0,2} > H_{w0} > H_{0,1}$ 。此时,第 2 承压含水层起抽水作用,该层井流量为正值 $Q_{0,2} > 0$;第 1 承压含水层起注水作用,该层井流量为负值 $Q_{0,1} < 0$ (图 2)。故可依变流量平面点源/汇方程(见文献[6](7-2-12)式,或文献[23](8-2-12)式)表示混合井未抽水条件下两层的井中水位降深($s_{w0,2}, s_{w0,1}$)与流量($Q_{0,2}, Q_{0,1}$)的关系,分别为:

$$s_{w0,1} = \frac{1}{4\pi T_1} \int_0^t \frac{Q_{0,1}(\tau)}{t - \tau} e^{-\frac{r_w^2}{4a(t-\tau)}} d\tau \quad (6)$$

$$s_{w0,2} = \frac{1}{4\pi T_2} \int_0^t \frac{Q_{0,2}(\tau)}{t - \tau} e^{-\frac{r_w^2}{4a(t-\tau)}} d\tau \quad (7)$$

式中: $s_{w0,1}, s_{w0,2}$ ——混合井未抽水条件下形成(初始)混合水位的 1、2 层水位降深。

由于该混合井(井口)未抽/注水,依水均衡原理,并忽略井筒的储/释水效应:

$$Q_{0,2}(t) = -Q_{0,1}(t) \quad (8)$$

得:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{s_{w0,2}}{-s_{w0,1}} = \frac{H_{0,2} - H_{w0}}{H_{w0} - H_{0,1}} \quad (9)$$

由此得未抽水条件的混合水位——初始混合水位：

$$H_{w0} = \frac{T_1 H_{0,1} + T_2 H_{0,2}}{T_1 + T_2} \quad (10)$$

该式表明：此条件下形成了稳定的混合水位 (H_{w0} 与 t 无关)，但流场是不稳定的，各层井流量的绝对值随时间的延续而减小，两含水层中的水头也在变化中。

混合并未抽水条件(初始)各层的井水位降深：

$$s_{w0,1} = H_{0,1} - H_{w0} = \frac{T_2(H_{0,1} - H_{0,2})}{T_1 + T_2} \quad (11)$$

$$s_{w0,2} = H_{0,2} - H_{w0} = \frac{T_1(H_{0,2} - H_{0,1})}{T_1 + T_2} \quad (12)$$

由于此条件下 H_{w0} 为常量， $s_{w0,1}$ 和 $s_{w0,2}$ 也分别为常量，因此各层流量可按定降深井流公式(见文献[23](5-5-5)式)计算，即

$$Q_{0,1}(t) = 2\pi T_1 s_{w0,1} G\left(\frac{at}{r_w^2}\right) \quad (6)'$$

$$Q_{0,2}(t) = 2\pi T_2 s_{w0,2} G\left(\frac{at}{r_w^2}\right) \quad (7)'$$

式中： G ——无越流系统定降深井流的流量函数。

如果有 n 个承压含水层(其它条件不变)，得：

$$H_{0w} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i H_{0,i}}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (13)$$

此式说明，在此条件下的混合水位是以各层导水系数为权重的水头加权平均值。

(2) 定流量混合抽水问题

如果在上述形成混合井之后的 t_{0p} 时刻开始，以定流量 Q_p 进行混合抽水，其中 $t \geq t_{0p}$ ，则，

$$Q_p = Q_{p,1} + Q_{p,2} \quad (14)$$

式中， $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ 分别是由于混合井以 Q_p 进行抽水，在混合井中的初始混合水位基础上产生附加水位降深 s_{wp} 时，各层分配到的抽/注水流量，其中不包括形成初始混合水位 H_{w0} 时所形成的各层的抽/注水流量 $Q_{0,1}$ 和 $Q_{0,2}$ 。

混合抽水量 Q_p 引起井中(附加)水位降深 s_{wp} 与其对应各层分配流量($Q_{p,1}$, $Q_{p,2}$)的关系，可分别表示为(由于上述假定忽略抽水井中水流的水头损失，因此对于1,2层的(附加)水位降深是同一值 s_{wp}) (其中 $t \geq t_{0p}$)：

$$s_{wp}(t) = \frac{1}{4\pi T_1} \int_{t_{0p}}^t \frac{Q_{p,1}(\tau)}{t-\tau} e^{-\frac{r_w^2}{4a(t-\tau)}} d\tau \quad (15)$$

$$s_{wp}(t) = \frac{1}{4\pi T_2} \int_{t_{0p}}^t \frac{Q_{p,2}(\tau)}{t-\tau} e^{-\frac{r_w^2}{4a(t-\tau)}} d\tau \quad (16)$$

由上两式可得：

$$\frac{Q_{p,1}}{Q_{p,2}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (17)$$

$$\frac{Q_{p,1}}{Q_p} = \frac{T_1}{T} \quad \frac{Q_{p,2}}{Q_p} = \frac{T_2}{T} \quad (17)'$$

很有意思，此式与(5)式相同。即，在初始混合水位条件下以流量 Q_p 抽水，各层分配的流量 $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ 与其导水系数 T_1 和 T_2 成正比。这里我们再次强调： $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ 仅是混合抽水流量 Q_p 作用下各层流量的分配，并非各层的总流量(Q_1 和 Q_2)。

由(14)和(17)两式表明，在本节的假定条件下，只要 Q_p 为常量，则 $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ 也会各自会保持常量。因此(15)和(16)公式转变为 Theis 公式(其中 $t \geq t_{0p}$)，即：

$$s_{wp}(t) = \frac{Q_{p,1}}{4\pi T_1} W\left(\frac{r_w^2}{4a(t-t_{0p})}\right) \quad (15)'$$

$$s_{wp}(t) = \frac{Q_{p,2}}{4\pi T_2} W\left(\frac{r_w^2}{4a(t-t_{0p})}\right) \quad (16)'$$

由此得：

$$Q_p = Q_{p,1} + Q_{p,2} = \frac{4\pi T s_{wp}(t)}{W\left(\frac{r_w^2}{4a(t-t_{0p})}\right)} \quad (18)$$

$$s_{wp}(t) = \frac{Q_p}{4\pi T} W\left(\frac{r_w^2}{4a(t-t_{0p})}\right) \quad (19)$$

式中： s_{wp} ——在混合抽水流量 Q_p 作用下的混合水位下降值(从初始混合水位起算的下降值)。

$$H_{wp}(t) = H_{w0} - s_{wp}(t) \quad (20)$$

由此可得抽水条件下的混合水位 H_{wp} ：

$$H_{wp}(t) = \frac{(T_1 H_{0,1} + T_2 H_{0,2})}{T} - \frac{Q_p W\left(\frac{r_w^2}{4a(t-t_{0p})}\right)}{4\pi T} \quad (21)$$

抽水条件下1,2层的总流量 Q_1 、 Q_2 为形成初始混合水位的流量($Q_{0,1}(t)$, $Q_{0,2}(t)$)与混合抽水分配的流量($Q_{p,1}$, $Q_{p,2}$)的代数和。即

$$Q_1(t) = Q_{0,1}(t) + Q_{p,1} \quad (22)$$

$$Q_2(t) = Q_{0,2}(t) + Q_{p,2} \quad (23)$$

综合上述分析结果：已知 T_1 、 T_2 和 $H_{0,1}$ 、 $H_{0,2}$ ，可依式(10)计算 H_{w0} ；依式(6)和式(7)计算得 $Q_{0,1}$ 和 $Q_{0,2}$ 。在此基础上进行定流量 Q_p 混合抽水，可依式(19)计算得 $s_{wp}(t)$ ；依式(17)'可以计算 $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ ；最后，由式(22)和式(23)分别计算混合抽水条件下1,2层的总流量 $Q_1(t)$ 、 $Q_2(t)$ 。

3 混合井流算例

由两层承压含水层构成无界含水系统,已知:
 $T_1 = 100\text{m}^2/\text{d}, T_2 = 200\text{m}^2/\text{d}, a_1 = a_2 = 2 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{d},$
 $H_{0,1} = 50.0\text{m}, H_{0,2} = 53.0\text{m}, r_{w1} = r_{w2} = 0.10\text{m}.$ 试计算:

(1) 在钻孔贯穿两含水层形成混合井时的混合水位 H_{w0} ;

(2) 预测 $5 \times 10^{-5} \sim 500\text{d}$ 时段各层流入混合井的流量 $Q_1(t)$ ($t = 5 \times 10^{-5} \sim 500\text{d}$) 和 $Q_2(t)$ ($t = 5 \times 10^{-5} \sim 500\text{d}$);

(3) 计算距混合抽水井 10m 处, 0.5d 时第 2 层的水头降深 $s_2(r = 10\text{m}, t = 0.5\text{d})$;

(4) 此后 ($t = 0.5\text{d}$) 混合井以流量 $Q_p = 1800\text{m}^3/\text{d}$ 进行混合抽水, 试计算 $t = 0.5 \sim 500\text{d}$ 各层流入混合井的流量 $Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$ 及此时混合井水位 $H_{wp}(t =$

$0.5 \sim 500\text{d})$ 、降深 $s_{wp}(t = 0.5 \sim 500\text{d})$;

(5) 做 $H_w - t, Q_1 - t$ 和 $Q_2 - t$ 的动态曲线。

解:

(1) 计算初始混合水位 H_{w0} 。

依式(10):

$$H_{w0} = \frac{T_1 H_{0,1} + T_2 H_{0,2}}{T_1 + T_2} = 52\text{m}$$

$$s_{w0,1} = H_{0,1} - H_{w0} = -2\text{m}$$

$$s_{w0,2} = H_{0,2} - H_{w0} = 1\text{m}$$

(2) 形成初始混合水位 H_{w0} 后的各层流入混合井的流量 $Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$ 。

依式(7)':

$$Q_{0,2}(t) = 2\pi T_2 s_{w0,2} G\left(\frac{at}{r_w^2}\right) = 2 \times 10^7 t$$

$$t = 5 \times 10^{-8} \bar{t}$$

依文献[23]表 5-5-1, 计算结果见表 1。

表 1 综合计算成果表

Table 1 Summary of calculation results

t	H_{w0}	$Q_{0,1}(t)$	$Q_{0,2}(t)$	$s_{w,p}$	$H_{w,p}$	$Q_1(t)$	$Q_2(t)$	H_w
5×10^{-8}	52	-1238	1238			-1238	1238	52
5×10^{-7}		-671	671			-671	671	52
5×10^{-6}		-435	435			-435	435	52
5×10^{-5}		-315	315			-315	315	52
5×10^{-4}		-247	247			-247	247	52
5×10^{-3}		-202	202			-202	202	52
5×10^{-2}		-171	171			-171	171	52
5×10^{-1}		-148	148			-148	148	52
0.50000125				1.92	50.08	600 - 148	1200 + 148	50.08
1		-142	142	8.08	43.92	600 - 142	1200 + 142	43.92
2		-137	137	8.61	43.39	600 - 137	1200 + 137	43.39
5		-130	130	9.13	42.87	600 - 130	1200 + 130	42.87
50		-117	117	10.28	41.72	600 - 117	1200 + 117	41.72
500		-105	105	11.38	40.62	600 - 105	1200 + 105	40.62
5000		-96	96	12.48	39.52	600 - 96	1200 + 96	39.52

(3) 计算第 2 层 $r = 10\text{m}, t = 0.5\text{d}$ 处的水头降深 $s_2(r = 10\text{m}, t = 0.5\text{d})$ 。

当 $t \leq t_{0p}, t_{0p} = 0.5$, 依文献[23](5-5-11)式

$$s = s_w A(\bar{r}, \bar{t})$$

式中: $\bar{r} = \frac{r}{r_w}$ ——无因次径距;

$\bar{t} = \frac{at}{r_w^2}$ ——无因次时间;

$A(\bar{r}, \bar{t})$ ——无越流含水层定降深井流的降深函

数。

降深函数 $A(\bar{r}, \bar{t})$ 可查文献[23]的附表 2。

$$\bar{r} = \frac{r}{r_w} = 100$$

$$\bar{t} = \frac{at}{r_w^2} = 10^7$$

由于 $\bar{t} > 500, A(\bar{r}, \bar{t})$ 按文献[23](5-5-14)计算, 即:

$$A(\bar{r}, \bar{t}) \approx \frac{W\left(\frac{\bar{r}^2}{4\bar{t}}\right)}{\ln 2.25\bar{t}} = 0.456$$

因此,第2层

$$s_2(r=10, t=0.5) = s_{w,2}A(100, 10^7) \cong 0.456\text{m}$$

第2层

$$H_2(r=10, t=0.5) = H_{0,2} - s_2 = 52.54\text{m}$$

(4) 计算混合井在 $t_{0p} = 0.5\text{d}$ 之后以流量 $Q_p = 1800\text{m}^3/\text{d}$ 进行混合抽水时,混合井水位 $H_w(t)$ 、降深 $s_w(t)$;及 $t = 0.5 \sim 500\text{d}$ 各层流入混合井的流量 $Q_1(t)$ 和 $Q_2(t)$ 。

依式(19):

$$s_{wp}(t_p) = \frac{Q_p}{4\pi T} W\left(\frac{r_w^2}{4at_p}\right), \text{其中 } t_p = t - t_{0p}。$$

当 $\left(\frac{r_w^2}{4at_p}\right) < 0.01$, 即:

$$t_p > \frac{r_w^2}{0.01 \times 4a} = 1.25 \times 10^{-6} \text{时, Theis 井函数可用}$$

对数近似表示, 即上式改写为:

$$s_{wp}(t_p) = \frac{Q_p}{4\pi T} \ln \frac{2.25at_p}{r_w^2} = 0.4775 \times \ln(4.5 \times 10^7 t_p)$$

依式(20) $H_{wp} = H_{w0} - s_{wp} = 52 - s_{wp}$ (计算结果见表1)

依式(17)'

$$Q_{p,1} = \frac{T_1}{T} Q_p = 600 \text{ m}^3/\text{d};$$

$$Q_{p,2} = \frac{T_2}{T} Q_p = 1200 \text{ m}^3/\text{d}。$$

依式(22)

$$Q_1(t) = Q_{0,1}(t) + Q_{p,1} = Q_{0,1}(t) + 600$$

依式(23)

$$Q_2(t) = Q_{0,2}(t) + Q_{p,2} = Q_{0,2}(t) + 1200$$

(计算结果见表1)

(5) 做 $H_w - t, Q_1(t) - t$ 和 $Q_2(t) - t$ 动态曲线, 见图3~4。

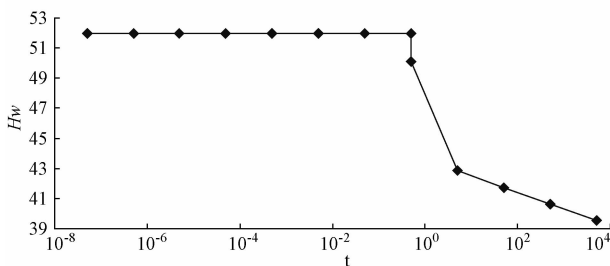


图3 $H_w - t$ 动态曲线

Fig.3 Change of H_w with t

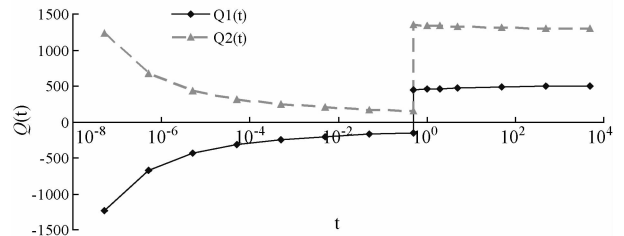


图4 $Q_1 - t, Q_2 - t$ 曲线

Fig.4 Change of Q_1 and Q_2 with t

4 与以往相关文献的对比

(1) 关于混合井孔 (未抽水) 初始水位模型

Sokol D. 虽然导得的方程与本文式(13)相同,但前者是稳定流模型,且在无界含水层中引入了已被证明^[5-7]是错误的“稳定影响半径”概念,此外假定不同渗透系数/导水系数的含水层具有同一个“影响半径”值,这也是错误的。

很有意思,美国著名学者 Hantush M. S.^[8] 及前苏联著名学者 Бочевер Ф. М. 和 Веригин Н. Н.^[9] 在对承压含水层非完整井流的研究中,都认为观测孔中的水头降深 $s(r, l', d', t)$ 反映该孔滤水管中各点降深 $s_p(r, z, t)$ 的平均降深;美国著名学者 Neuman^[10] 也认为,潜水含水层观测孔中的水头降深可视为滤管内各点降深的平均值。

笔者^[25]曾批评他们提出的“积分平均水位”未涉及水流的机理,是缺乏物理基础的纯数学方法;但本文建立的井孔混合(未抽水)初始水位模型——其解析解正是“积分平均水位”,且明确了推导的假定条件:各层的压力传导系数相等($a_1 = a_2 = a$)和允许忽略井筒中水流的水头损失。这是建立在水流的机理之上的方程。“就说明性算例而言, Hantush-Бочевер 方程只能近似用于观测孔孔径大于 0.2m 且径距大于 10~20m 的条件”^[25], 此限制条件说明了算例条件下“允许忽略井筒中水流的水头损失的条件”。

(2) 关于混合抽水井的模型——各层流量分配问题

美国地质调查局推出的,并在国际上普遍应用的地下水三维流有限差分模拟软件(MODFLOW)^[14],建议混合抽水井各层流量($Q_{p,1}, Q_{p,2}$)的分配与各层的导水系数(T_1, T_2)成正比。他并未提出理论依据,也未指明其应用条件的限制。

本文对于稳定和 不稳定混合抽水井的模型,建立了形式相同的式(5)和式(17),即混合抽水井总抽水量 Q_p 对于各层流量 $(Q_{p,1}, Q_{p,2})$ 的分配与各层的导水系数 (T_1, T_2) 成正比,与 MODFLOW 的建议相同。但本文明确了其建立方程的假定条件,即:

①对于稳定的混合抽水井问题,要求定水头边界面直立,即使混合井的两层抽水井至定水头边界的距离相等 $(\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda)$,而且要求两层处井孔有效井径相等 $(r_{w,1} = r_{w,2} = r_w)$,否则不能获得式(5),而是

$$\frac{Q_{p,1}}{Q_{p,2}} = \frac{\frac{T_1}{\ln \frac{2\lambda_1}{r_{w,1}}}}{\frac{T_2}{\ln \frac{2\lambda_2}{r_{w,2}}}} \quad (24)$$

②对于无界含水层的不稳定混合抽水井问题,则要求各层压力传导系数相等 $(a_1 = a_2 = a)$,两层处井孔有效井径相等 $(r_{w,1} = r_{w,2} = r_w)$ 和假定抽水井井筒中的水流允许忽略水头损失,否则不能获得式(17)。

另外特别指明: $Q_{p,1}$ 和 $Q_{p,2}$ 分别是由于混合井以 Q_p 进行抽水,在混合井中的初始混合水位基础上产生附加水位降深 $s_{w,p}$ 时,各层分配到的抽/注水流量,而不是包括形成初始混合水位 H_{w0} 时所形成的各层的抽/注水流量 $Q_{0,1}$ 和 $Q_{0,2}$ 的 Q_1 和 Q_2 。

就算例条件而言,形成初始混合水位 H_{w0} 而引起的分层流量 $Q_{0,1}$ 和 $Q_{0,2}$,衰减得不是很快,由 5×10^{-8} d 的 $1238\text{m}^3/\text{d}$ 到 5000d 还有 $96.0\text{m}^3/\text{d}$ 。可见,一般情况还不能忽略不计。它在 Q_1 和 Q_2 中还占一定比例。

参考文献:

[1] Sokol D. Position and fluctuations of water level in wells perforated in more than one aquifer[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(4):1079 - 1080.
 [2] Wikramaratna, R S. Analytical solution for the effects abstraction from a mutiplelayered aquifer with no cross flow[J]. Water Resources Research, 1984,20(8), 1067 - 1074.
 [3] Wikramaratna, R S. On the components of flow resulting from abstraction in a mutiplelayered confined aquifer with no cross flow [J]. Water Resources Research, 1985,21(7),985 - 989.

[4] Rathod, K S, K R Rushton. Interpretation of pumping from two-zone layered aquifers using numerical model [J]. Ground Water, 1991,29(4),499 - 509.
 [5] 陈崇希.地下水动力学[M].北京:北京地质学院,1966:197. [CHEN C X. Groundwater Dynamics [M]. Beijing: Beijing College of Geology,1966:197. (in Chinese)]
 [6] 陈崇希.地下水不稳定井流计算方法[M].北京:地质出版社,1983. [CHEN C X. Unsteady Flow of Groundwater [M]. Beijing: Geological Publishing House,1983. (in Chinese)]
 [7] 陈崇希.“影响半径稳定井流模型”与可持续开采量:地下水动力学一个基本理论问题的分歧:与薛禹群院士商榷[J].水利学报,2010,41(8),1003 - 1008. [CHEN C X. Stable well flow model of the radius of influence and sustainable exploitation: a basic theory of groundwater dynamics differences [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010, 41(8),1003 - 1008. (in Chinese)]
 [8] Hantush , M S. Aquifer test on partially penetrating wells[J]. Proc Am Soc Civil Engrs, 1961, 87(5): 171 - 195.
 [9] Бочевер Ф М, Веригин Н Н. Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения [М]. Игостройиздат, 1961.
 [10] Neuman, S P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table [J]. Water Resour Res, 1972,18(4), 1031 - 1045.
 [11] 葛亮韬.关于混合抽水试验分层计算方法的探讨 [J].水文地质工程地质,1957(9):31 - 38. [GE L Z. Pumping experiment stratified calculation Discussion [J]. Hydrogeology & Engineering geology, 1957(9):31 - 38. (in Chinese)]
 [12] 陈崇希,胡佩清,林敏.地下水动力学[M].北京:中国工业出版社,1961. [CHEN C X, HU P Q, LIN M. Groundwater Dynamics [M]. Beijing: China Industry Press, 1961. (in Chinese)]
 [13] 陈雨荪.单井水力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1977. [CHEN Y S. Single wells mechanics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1977. (in Chinese)]
 [14] Mcdonald M G, Harbaugh A W. A modular Three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U. S. Geological Survey, Techniques of Water Resources Investigations Book 6 [M]. Washington, D. C: United States Government Printing Office,

- 1988.
- [15] 陈崇希,林敏.地下水混合井流理论及其应用[J].武汉:中国地质大学出版社,1998;43. [CHEN C X, LIN M. Groundwater mixing well flow theory and its application[J]. Wuhan: Chinese Geology University Press, 1998;43. (in Chinese)]
- [16] 黎明,刘文波,陈崇希. MODFLOW 能模拟地下水混合井流吗? [J]水文地质工程地质,2003,30(5), 116-117. [LI M, LIU W B, CHEN C X. MODFLOW can simulate groundwater mixing well flow [J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2003, 30(5), 116-117. (in Chinese)]
- [17] 陈崇希,胡立堂,王旭升.地下水模拟系统 PGMS (1.0 版)简介[J].水文地质工程地质,2007,34(6): I- II. [CHEN C X, HU L T, WANG X S. Groundwater flow simulation system Introduction of the GMS (version 1.0)[J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2007,34(6): I- II. (in Chinese)]
- [18] 陈崇希,蒋健民,林敏,等.地下水不稳定混合抽水的渗流-管流耦合模型及其应用[R].中国地质大学(武汉)环境地质研究所,1992. [CHEN C X, JIANG J M, LIN M, *et al.* Seepage of groundwater pumping unstable hybrid pipe coupling model and its application[R]. Environmental Institute of Geology, China University of Geosciences (Wuhan), 1992. (in Chinese)]
- [19] Chongxi Chen, Jiu Jimmy Jiao. Numerical Simulation of Pumping Tests in Multilayer Well with Non-Darcian Flow in the Wellbore [J]. Ground water, 1999, 37(3):465-474.
- [20] Chongxi Chen, Shunping Pei, Jiu Jimmy Jiao. Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China [J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11:275-287.
- [21] Chongxi Chen, Junwei Wang, Hongbin Zhan. Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well [J]. Journal of Hydrology, 2003, 281: 159-171.
- [22] Litang Hu, Chongxi Chen, Xunhong Chen. Simulation of groundwater flow within observation boreholes for confined aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2011, 398:101-108.
- [23] 陈崇希,林敏,成建梅.地下水动力学(第五版)[M].北京:地质出版社,2011:377. [CHEN C X, LIN M, CHENG J M. Groundwater dynamics (fifth edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011;377. (in Chinese)]
- [24] Bear J. 地下水水力学[M].北京:地质出版社,1985. [Bear J. Groundwater hydraulics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985. (in Chinese)]
- [25] 陈崇希.三维地下水流中常规观测孔水位的形成机理及确定方法[J].地球科学,2003,28(5):483-492. [CHEN C X. Formation Mechanism of Water Level and Its Determination Method in Conventional Observation Wells for Three-Dimensional Groundwater Flow [J]. Earth Science, 2003, 28(5):483-492. (in Chinese)]

Analytical Model of Groundwater Flow in Multiaquifer Wells

CHEN Chong-xi

(*Environmental Geology Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: Multiaquifer well flow models are developed for constant pumping rate, including the steady state flow model and the transient flow model. In the transient flow model, both analytical solutions of hybrid initial head within a well before pumping and hybrid head under pumping on constant rate are obtained. The results of the models are compared with relevant analyses in the literature.

Key words: Groundwater; multiaquifer well; hybrid head; steady state flow; transient flow; analytical model

责任编辑:张若琳