

傍河地下水开采过程中水温变化的预测

李 凡 生

(机械工业部第三勘察研究院 武汉 430030)

【摘要】傍河水源地在开采过程中水温的变化往往影响和制约着工业冷却用水对地下水资源的开发利用。本文试以流体力学为基础,通过热量守恒原理对水温变化预测的公式进行推导;以便合理指导设计开采涌水量,使在设定的抽水时限内取用的地下水温度不会超过生产所需要的取值范围。

【Abstract】The variation of the water temperature during the recovering in the water source near river affects and controls the developing and use of groundwater sources for industry cooling. The formula for predicting the water temperature varying is deduced based on the hydro-mechanics and the principle of conservation of thermal to design the exploiting water-make reasonably and to make the temperature of the groundwater taken in the planed time of pumping water not exceed the region of values required by production.

1 问题的提出

在供水水文地质勘察中,人们关注的问题往往是地下水的水量和水质,并对此有较为深入的研究。但对于开采过程中水温变化的研究则比较少,往往只是提供短时间抽水试验时所得的水温观测数据。单纯提供这种短时间观测的水温数据,远远不能反映开采过程中地下水的水温变化。特别是对于开采水量较大的工业冷却用水,对地下水水温的要求很高,这就远远不能满足要求。在傍河开采地下水时,随着降落漏斗的扩展,河水向钻井的渗透补给,相应引起地下水的水温变化,而这种变化往往制约着工业冷却用水对地下水资源的开采利用。因此,研究开采过程中地下水的水温变化有非常现实的意义。本文试由流体力学入手,利用热量守恒(平衡)原理对傍河开采地下水过程中水温的变化进行预测计算。

2 平面流基本表达式

傍河开采地下水水温变化预测的目的,就是预算取水温度在开采抽水时限内的变化,并应用取水温度与取水量之间的相关关系进行综合分析,以便更加合理地开发利用地下水资源。

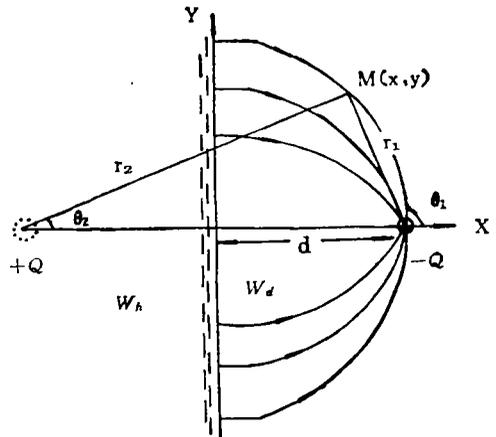


图 1

如图 1 所示,设某一取水钻孔位于距河边(即不同水温分界线)距离为 d 的地方,且取水量 Q 不变,水的质点沿流线向钻井运动所需的时间为 t

$$t = \int_{S_1}^{S_2} \frac{ds}{V} \quad (1)$$

而 $V = \text{grad}\varphi$

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

式中 ds ——流线单元;

V ——渗透速度;

φ ——位势函数。

$$ds = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{1 + y'^2} dx$$

质点到达钻井的时间为 t

$$t = \int_L \frac{\sqrt{1 + y'^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^2}} dx = f(x, y) \quad (3)$$

从流体力学可知, 流函数方程 $\Psi(x, y)$ 通过流线的微分方程进行积分, 得出

$$\psi(x, y) = \int_L (V_x dy - V_y dx) = Q(x, y) \quad (4)$$

设河水渗透流量为 q_k , 地下水流量为 q_d , 总涌水量为 q 。

$$q = q_k + q_d \quad (5)$$

取地下水温度为 W_d , 河水温度为 W_k , 混合水温计算的混合方程为

$$q \cdot W = q_k \cdot W_k + q_d \cdot W_d \quad (6)$$

式中 W ——混合水温度;

W_k ——河水温度;

W_d ——地下水温度。

则分界线上的质点流向钻井时间 t 内抽出的混合水温度为

$$W = W_d + (W_k - W_d) \frac{q_k(x, y)}{q} \quad (7)$$

如果使渗透平面与复变函数 $Z = x + iy$ 重合, 我们可结合问题的边界条件建立特征函数。

设多孔介质中流体的稳定平面层流与特征函数 $F(z) = F(x + iy)$ 相一致, 并将实部、虚部分开, 则函数 $F(z)$ 有如下形式

$$F(z) = F(x + iy) = \varphi + i\Psi \quad (8)$$

实部 φ 为位势函数, 虚部系数 Ψ 为流函数。

现对 $F(z)$ 求导, 得复变渗透速度 Vi

$$Vi = \frac{dF}{dz} = V_x - iV_y \quad (9)$$

$$V_x = n_0 \frac{dx}{dt} \quad V_y = n_0 \frac{dy}{dt}$$

$$\text{则 } \frac{dF}{dz} = n_0 \frac{dx - idy}{dt}$$

式中 n_0 ——有效孔隙度。

可求得渗流沿流线移动时间的通式

$$t = n_0 \int_L \frac{dx - idy}{\frac{dF}{dz}} \quad (10)$$

上式左边 t 为实数, 所以等式右边也应为实数。

3 预测问题的解法

假设条件: 取水构筑物是承压水完整钻井, 涌水量固定, 含水层均质等厚度。

在傍河地段设一钻井, 地下水水温为 W_d , 河水水温为 W_k , 钻井距河水的距离为 d (见图1)。钻井相当于“虚井” (源点) 和实井 (泄点) 组合, “虚井” 抽水量为 $+Q$, 实井抽水量为 $-Q$, 迭加后得

$$F(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{z+d}{z-d} \quad (11)$$

式中 $q = \frac{Q}{h}$ ——含水层单位降深涌水量。

以复变函数表示

$$F(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} + i \frac{q}{2\pi} (\theta_2 - \theta_1) \quad (12)$$

$$\text{实部为位势函数 } \varphi = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (13)$$

$$\text{虚部为流函数 } \psi = \frac{q}{2\pi} (\theta_2 - \theta_1) \quad (14)$$

$$\theta_1 = \arctg \frac{y}{x-d} \quad \theta_2 = \arctg \frac{y}{x+d}$$

$$r_1 = \sqrt{(x-d)^2 + y^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x+d)^2 + y^2}$$

令 φ 和 Ψ 分别等于常数 α 和 β , 则

$$\frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = \alpha \quad (15)$$

$$\frac{q}{2\pi} (\theta_2 - \theta_1) = \beta \quad (16)$$

因为流线方程中

$$\begin{aligned}\theta_2 - \theta_1 &= \arctg \frac{y}{x+d} - \arctg \frac{y}{x-d} \\ &= \arctg \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x^2}\end{aligned}$$

公式(16)可简化为

$$\frac{q}{2\pi} \left(\arctg \frac{2dy}{d^2 - y^2 - x^2} \right) = \beta \quad (17)$$

设 $\beta_0 = \frac{2\pi}{q} \beta$ 可得

$$\arctg \frac{2dy}{d^2 - y^2 - x^2} = \beta_0$$

$$\text{亦即 } \beta_0 = \frac{d^2 - y^2 - x^2}{2dy} \quad (18)$$

(当 $\beta_0 \rightarrow 0$, $2\beta_0 d^2 \rightarrow 0$ 时)

故可得出标准形式

$$x^2 + (y + \beta_0 d)^2 = d^2 (1 + \beta_0^2) \quad (19)$$

公式(19)表示出流线为中心处于 y 轴上的一族圆。依上述情况, 钻井总涌水量中河水涌水量可通过公式(14)求得, 计算时考虑到水流与 x 轴对称, 则

$$q_k = \frac{q}{\pi} \arctg \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x^2} \quad (20)$$

将公式(20)代入公式(7)中

$$W = W_d + \frac{W_k - W_d}{\pi} \arctg \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x^2} \quad (21)$$

现在地下水与河水的分界线同河岸一致, 取 $x=0$, 则

$$W = W_d + \frac{W_k - W_d}{\pi} \arctg \frac{2yd}{d^2 - y^2} \quad (22)$$

又将 $\frac{dF}{dz} = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{2d}{d^2 - z^2}$ 代入公式(10)中
在 x_1 到 x_2 范围内求积分, 得

$$\begin{aligned}t &= \frac{2\pi n_0 d}{q} (1 + \beta^2) \left[(x_2 - x_1) \right. \\ &\quad \left. - \beta d \left(\arcsin \frac{x_2}{d\sqrt{1 + \beta^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \arcsin \frac{x_1}{d\sqrt{1 + \beta^2}} \right) \right] \quad (23)\end{aligned}$$

若取 $x_2 = d$, $x_1 = 0$, 代入界线位置的

$$\beta = \frac{d^2 - y^2 - x^2}{2yd},$$

$$\text{则 } t = \frac{2\pi n_0 d^2}{q} \left[1 + \left(\frac{d^2 - y^2}{2yd} \right)^2 \right]$$

$$\times \left[1 - \frac{d^2 - y^2}{2yd} \arcsin \right.$$

$$\left. \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d^2 - y^2}{2yd} \right)^2}} \right] \quad (24)$$

河水沿最短距离(x 轴)向钻井移动的时间为

$$T = \frac{2\pi n_0 d^2}{3q} \quad (25)$$

将公式(22)代入公式(24)中, 得

$$t = \frac{2\pi n_0 d^2}{q} \csc^2 \left(\pi \frac{W - W_d}{W_k - W_d} \right)$$

$$\left[1 - \left(\pi \frac{W - W_d}{W_k - W_d} \right) \text{ctg} \right.$$

$$\left. \left(\pi \frac{W - W_d}{W_k - W_d} \right) \right] \quad (26)$$

综上所述可见

(1) 公式(21)和公式(22)表明混合水温随着钻井中河水进水面的扩展呈反正切规律变化, 即随着降落漏斗增大, y 值也增大, 混合水温也逐渐增高;

(2) 公式(22)表明钻井开始抽水后 $t < T$ 时间内, 取公式(22)中的 $y=0$ 置换, 可知钻井中的水温为 W_d , 说明河水补给流还没有到达钻井。同样, 当 $t \geq T$ 时间内, 河水开始进入钻井, 造成水温逐渐升高, 取公式(22)中的 $y = \infty$, 可知钻井的水温达到或接近 W_k , 说明这时将出现最大的混合水水温;

(3) 公式(26)中, 在抽水过程中, 除 q 、 t 、 W 三个变量外, 其余参数均可视为常数, 任意设定三个变量中的一个, 其余两个变量的关系都呈线性变化。也就是说: ①在确定钻井流量 q 时, 可求出满足取水水温不超过 W 时的抽水时间; ②当要求的水温 W 值固定时, 可求出在需用的抽水时限内, 采

(下转第12页)

工的螺杆焊接而成。对中支架 每2m 一个。锚杆自由段长2m，先涂上一层黄油，然后用塑料布包裹。

每将一根锚杆杆体置入孔前，先用洛阳铲清孔，然后再送进杆体，注意使锚杆居中。

3.3 注浆

根据现场情况，锚杆孔中水量较大，采用底部注浆。即将注浆管随锚杆杆体一同插入孔底，高压灌浆，压力为0.6~0.8MPa。注浆浆液中掺加少量三乙醇胺等早强剂，并严格控制用量。

3.4 腰梁架设

腰梁采用2 [20a槽钢。腰梁架设前，先在桩上找平，然后将槽钢架上并焊接起来。

3.5 锚杆张拉锁定

锚杆注浆十天，采用SY—60型油泵及YC—60型千斤顶进行张拉。张拉锁定荷载为160kN。

4 加固效果

锚杆注浆16天后，对两根锚杆进行了验收试验。试验锚杆由监理单位随机抽取，试验

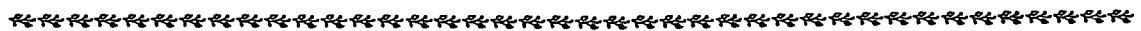
规程按《土层锚杆设计与施工规范》(CECS 22:90)进行，试验结果表明，锚杆满足规范及设计要计。

护坡桩经锚杆加固后，进行的观测表明，桩顶位移没有进一步发展，护坡桩和基坑土体稳定良好。这说明，本次采用锚杆方案对护坡体系进行加固、补强是合理的，施工工艺是可行的。

本工程亦表明，基坑护坡桩及时采用预应力锚杆加固，能有效地控制桩顶位移的发展，减少对邻建的危害，同时根据实际情况，采用洛阳铲人工成孔，不但大大降低锚杆费用，而且工艺简单，施工快捷。

参 考 文 献

- 1 程良奎等. 岩土加固实用技术. 地震出版社, 1994
- 2 岩土工程手册. 中国建筑工业出版社, 1995
- 3 林宗元等. 岩土工程治理手册. 辽宁科技出版社, 1995



(上接第15页)

用多大的流量 q 才不会使水的温度超过所需的标准。

4 举例

预测满足抽水水温要求的抽水时限

$$W_i = 27^\circ\text{C} \quad W_d = 18^\circ\text{C} \quad W = 20^\circ\text{C}$$

$$n_0 = 0.1 \quad d = 200\text{m} \quad h = 10\text{m}$$

$$Q = 1000\text{m}^3/\text{d} \quad q = 100\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{m}$$

将已知数据代入公式 (26) 中

$$t = \frac{2\pi \times 0.1 \times 200^2}{100} \text{csc}^2\left(\pi \frac{20-18}{27-18}\right)$$

$$\times \left[1 - \left(\pi \frac{20-18}{27-18}\right) \text{ctg}\left(\pi \frac{20-18}{27-18}\right)\right]$$

$$= 251.33 \times 2.42 \times 0.168$$

$$\approx 102(\text{天})$$

上述说明，在102天的抽水时限内，保

持抽水流量不超过 $Q = 1000\text{m}^3/\text{d}$ ，可控制取水温度不会超过要求范围(即不高于20度)。式中的 n_0 (有效孔隙度)除了可取用经验数据外，还可利用短时间的抽水试验，从 $T = \frac{2\pi n_0 d^2}{3q}$ 中求得。由于河床常常有淤积情况，这种淤积现象相当于加大了河床到钻井的距离 d 值，因此，当 d 固定时，如果将 $n_0 d^2$ 作为一个组合常数值求取，则可相当于消除了存在淤积而对求 n_0 值的影响，提高计算的精度。

5 结语

本文是以流体力学为基础而进行的公式推导，提出了预测傍河开采地下水过程中水温变化的方法，由于资料欠缺，还需在实践中进一步的完善和修正。