

陈实,董书宁,李竞生,等. 煤矿工作面顶板倾斜钻孔疏放水井流计算方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1517-1523. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0901

Chen Shi, Dong Shuning, Li Jingsheng, et al. Analytical solution for slanted well in the roof of coal mine working face[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1517-1523. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0901

煤矿工作面顶板倾斜钻孔疏放水井流计算方法

陈 实^{1,2} 董书宁^{1,2} 李竞生¹ 王 皓^{1,2} 杨 建^{1,2}

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘 要: 以顶板疏放水中常用的倾斜钻孔为对象, 以空间点源理论为基础, 运用反映法, 建立了均质各向异性无限水平承压含水层中非完整倾斜钻孔的井流计算方程, 讨论了多个倾斜钻孔同时工作时, 多孔叠加的疏放水井流计算方法。在此基础上, 运用陕北某矿顶板含水层疏放水工程实例, 验证了此方法的有效性。形成了一套集分析、模拟、预测为一体的倾斜钻孔疏放水计算方法。

关键词: 倾斜钻孔; 顶板疏放水; 井流计算; 煤矿工作面; 解析解

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2016)06-1517-07

Analytical solution for slanted well in the roof of coal mine working face

CHEN Shi^{1,2}, DONG Shu-ning^{1,2}, LI Jing-sheng¹, WANG Hao^{1,2}, YANG Jian^{1,2}

(1. Xi'an Research Institute Co. Ltd. of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Coalmine Water Hazard Control, Xi'an 710077, China)

Abstract: Water-inrush from roof is one of the most harmful hazards to coal mine construction and production. The technologies of slanted drilling and drainage have been widely used in the field of coal mine water prevention and treatment, especially in preventing and controlling the water-inrush from roof. Based on the theory of point source space, this paper derived a calculation method of the well flow caused by slanted borehole in infinite horizon confined aquifer. Superposition of infinite horizontal porous confined aquifer complete slanted bore-hole flow calculation equation has been verified. A set of analysis, simulation and forecast of the coal mine roof slanted borehole drainage theory and method of water was formed. Calculation equation for slanted borehole laid a good foundation to the design of the coal mining face water discharge.

Key words: slanted borehole; roof water gush in coal mines; well flow; coal mine working; analytical solution

煤矿顶板水害是煤矿建设与生产中的主要灾害之一, 频发的煤矿顶板突水造成了极为惨重的人身伤亡和经济损失, 已成为制约煤矿安全生产的瓶颈, 而开展顶板疏放水是预防这一灾害的关键。在众多的疏放水技术中, 倾斜钻孔疏放水因其施工难度低、疏放效率高, 已作为一项成熟的煤矿水害防治技术, 在煤矿防治水特别是在煤矿顶板水害防治中得到了广

泛的应用。

煤矿井下施工的倾斜疏放水钻孔开孔位置与钻孔轨迹有别于通常的水文地质供水井。井下疏放水钻孔开孔位置通常布置在煤矿工作面运输巷和回风巷道所处的煤层或煤层顶底板中, 钻孔穿过煤层顶板倾斜进入含水层。因此, 现有的井流计算方法在计算煤矿倾斜钻孔井流时都具有一定的局限性。

收稿日期: 2015-06-23 修回日期: 2015-12-08 责任编辑: 韩晋平

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302214); 陕西省自然科学基金基础研究资助项目(2014JM2-5064); 中煤科工集团有限公司面上基金资助项目(2014MS002)

作者简介: 陈 实(1983—), 男, 湖北孝感人, 助理研究员。Tel: 029-87862248, E-mail: 38785899@qq.com。通讯作者: 董书宁(1961—), 男, 陕西蓝田人, 研究员。Tel: 029-81778066, E-mail: dsn_61@hotmail.com

现有井流计算方法中,以钻孔从地面垂直进入含水层的垂直井流计算方法发展较早且较为成熟,这些方法在煤矿防治水中已有了大量应用^[1-2]。2009年,王旭升和万力^[3]对这些方法进行了归纳;孙讷正^[4]、李竞生和姚磊华^[5]、薛禹群^[6-7]、陈崇希^[8]运用解析解开展了含水层参数识别方法研究。詹红兵和万军伟^[9]针对含水层中的水平钻孔推导了系列水平井流计算方程。

然而,无论是垂直井流计算方程还是水平井流计算方程,应用于煤矿井下倾斜钻孔疏放水的计算中,往往与生产实践有较大的背离。造成疏水量过小煤矿工作面被淹,或者疏放水过多水资源浪费的现象。

倾斜钻孔井流计算方法研究最早起源于石油斜井产能计算。本文参考了 Cinco-Ley^[10]推导的计算石油斜井产能的解析方程,建立了含水层中倾斜钻孔疏放水的井流方程。推导过程中考虑了石油斜井产能解析方程未涉及的渗透系数各向异性条件。建立的解析解方程同时适用于完整井和非完整井流计算。

建立的倾斜钻孔疏放水井流的计算方法将为准确预测倾斜钻孔疏放水量、疏放水时间、控制疏放水降深提供科学依据,对防治煤矿顶板水害具有重要意义。

1 倾斜钻孔井流计算方程推导

1.1 承压含水层倾斜钻孔理想模型

图1展示了承压含水层中一个倾斜钻孔的三维概念模型。含水层为均质各向异性,坐标系的原点位于含水层底板(倾斜钻孔竖直与水平的中点位置)。含水层厚度为 M ,且在水平平面上无限延伸。钻孔的长度为 L_w ,从含水层的下边界至钻孔中点的测得的距离为 Z_w ,如图1所示。图中 θ 为观测点和坐标原点连线在水平面上的投影与 r 轴的夹角, θ_w 为钻孔与水平方向的夹角。 $\theta_w = 90^\circ$ 表示垂直井的特殊情况。笔者不考虑水平井的情况,方程中 $\theta_w \neq 0$ 。

据以上条件作出如下假定:

- (1) 含水层是均质、各向异性、等厚且水平分布,含水层为弹性体;
- (2) 无垂向补给、排泄,即 $W=0$;
- (3) 渗流满足达西定律;
- (4) 钻孔可以是完整井也可以是非完整井,假定流量沿井壁均匀进水;
- (5) 水头下降引起地下水从储存量中的释放是瞬时完成的;
- (6) 疏放水前水头面水平;
- (7) 井径无限小且定流量疏放水;

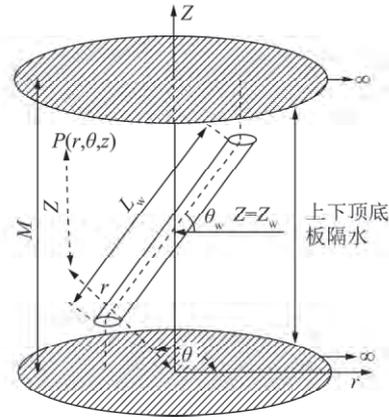


图1 承压含水层中部分止水的倾斜钻孔示意
Fig. 1 Slant well in confined aquifer with part sealing

(8) 含水层侧向无限延伸。

由于套管和滤管的作用,钻孔的导水段可以在含水层的任意位置倾斜任意角度。

1.2 空间瞬时点汇

1884年,L. Kelvin在研究热传导的理论中^[6],对均质各向同性无限介质中一瞬时空间点源作用下温度的分布规律提出一个基本解。这个解成为研究地下水的井流的一个重要方法——源汇法的基础(图2)。

将 Kelvin 的解拓宽到各向异性介质,在强度为 V_p 的瞬时点汇作用下,无限空间中任意观测点 $P(r, z, t)$ 处水头降深的分布规律可以表示为

$$s(r, z, t) = \frac{V_p}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z t^3)^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{\bar{r}^2 + (z - z')^2}{4a_z t} \right] \quad (1)$$

式中 $s(r, z, t)$ 为观测点 P 处 t 时刻的水头降深; r 为观测点 P 与空间点汇水平方向的距离; z 为观测点 P 与空间点汇垂直方向的距离; t 为从瞬时疏放水开始至观测时的时间; V_p 为空间点汇的瞬时点汇的强度,即点汇瞬时抽取的水的体积; μ_s 为给水度; $a_r = K_r / \mu_s$ 为含水层水平方向的压力传导系数; $a_z = K_{zz} / \mu_s$ 为含水层垂直方向的压力传导系数; K_r 和 K_{zz} 分别为水平方向和垂直方向的渗透系数; $\bar{r} = r \sqrt{K_{zz} / K_r}$ 为坐标变换后将各向异性含水层等效为各向同性含水层的观测点径向坐标; $(0, z')$ 为瞬时点汇在 z 轴上的位置。

式(1)为观测点 P 处水头降深的二维空间解,其意义为,在无限均质各向异性的空间(含水层)中,当 $t=0$ 时,在点 $(0, z')$ 处有一井径趋于0的球状井瞬时抽取地下水体积 V_p 后, t 时刻在 (r, z) 处引起的水头降深 s 。对于注水井, s 和 V_p 均取负值。

1.3 空间瞬时线汇

建立三维空间柱坐标系,纵轴为 z 轴,水平面为

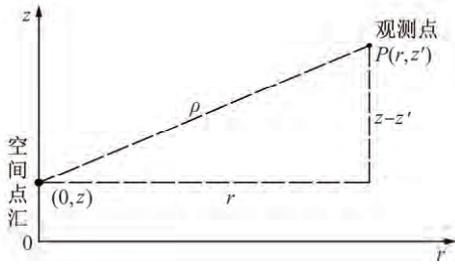


图 2 瞬空间点汇及观测点的位置

Fig. 2 Instantaneous sources point and observation point

极坐标系。柱坐标系中在 $(r, 0, z)$ 平面上存在长为 L_w 与水平方向夹角为 θ_w 中点坐标为 $(0, 0, z_w)$ 的瞬时线汇 (图 3) 线汇上瞬时疏放水强度为 V 。在线汇上取一极小段, 设其纵向长度为 dz_p 。当 $dz_p \rightarrow 0$ 时, 则微分线汇 dz_p 的瞬时强度为 $V_L = V/dz_p$ 。方程

式 (3) 即为在微分瞬时线汇 dz_p (可视为瞬时点汇) 的作用下, 三维空间中观测点 $P(r, \theta, z)$ 处的微分降深。

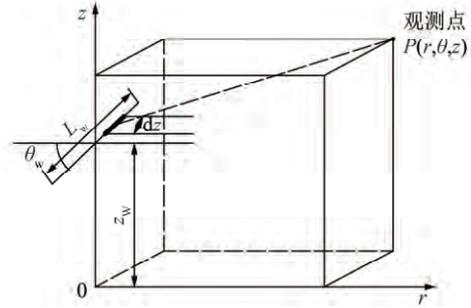


图 3 无限空间含水层倾斜线汇及观测点的位置

Fig. 3 Infinite space aquifer slanted line sinks and observation points

根据初始假定, 该定解条件可写成

$$\begin{cases} \lim_{r \rightarrow 0} H(r, \theta, z) = H_0 \\ s(r, \theta, z, t) = \frac{V_p}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z t^3)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{r^2 + (z - z')^2}{4a_z t}\right] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $H(r, \theta, z)$ 为 P 点处水头降深; H_0 为含水层初始水头高度; θ 为观测点与坐标原点的夹角。

均质各向同性无限含水层中 K 为渗透系数; $a = K/\mu_s$ 为含水层压力传导系数; 在线汇 L_w 的作用下 P 点的降深为

$$s = \frac{V_L}{8\mu_s (\pi a t)^{\frac{3}{2}} \sin \theta_w} \int_{z_w - \frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{z_w + \frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \exp\left[-\frac{r^2 + (z_p - z_w)^2 \cot^2 \theta_w - 2r(z_p - z_w) \cot \theta_w \cos \theta + (z - z_p)^2}{4at}\right] dz_p \quad (3)$$

对各向异性无限含水层, 设 $\alpha = K_{rr} / K_{zz}$, 则 P 点的降深为

$$s = \frac{V_L}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z t^3)^{\frac{1}{2}} \sin \theta_w} \int_{z_w - \frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{z_w + \frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \exp\left[-\frac{\alpha r^2 + \alpha (z_p - z_w)^2 \cot^2 \theta_w - 2\alpha r(z_p - z_w) \cot \theta_w \cos \theta + (z - z_p)^2}{4a_z t}\right] dz_p \quad (4)$$

1.4 有限空间连续线汇

有限空间中, 在一连续强度为 Q 的线汇作用下, 任意点的降深为 s 。那么在 τ 时刻, 在瞬时强度为 $Qd\tau$ 的线汇作用下, 观测点则有 ds 的反映。对 τ 从 0 至 t 积分, 可以得到在任意点连续疏放水强度 Q_L 的线汇作用下 t 时间的降深。对于顶底板隔水的各向同性水平无限含水层:

$$\begin{aligned} s(r, \theta, z, t) = & \frac{Q_L}{8\mu_s (\pi a)^{\frac{3}{2}} \sin \theta_w} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^t \int_{-\frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{\frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \tau^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right) \times \\ & \left\{ \left[\exp\left(-\frac{z^2 \cot^2 \theta_w - 2rz' \cot \theta_w \cos \theta + (z + 2nM - z_w - z')^2}{4a\tau}\right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \exp\left(-\frac{z^2 \cot^2 \theta_w + 2rz' \cot \theta_w \cos \theta + (z + 2nM + z_w - z')^2}{4a\tau}\right) \right] \right\} dz' d\tau \quad (5) \end{aligned}$$

在均质各向异性有限含水层中 P 点的降深为

$$\begin{aligned} s(r, \theta, z, t) = & \frac{Q_L}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z)^{\frac{1}{2}} \sin \theta_w} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^t \int_{-\frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{\frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \tau^{-\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4a_z \tau}\right) \times \\ & \left\{ \left[\exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w - 2\alpha rz' \cot \theta_w \cos \theta + (z + 2nM - z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w + 2\alpha r z' \cot \theta_w \cos \theta + (z + 2nM + z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) \Big] dz' d\tau \quad (6)$$

式(6)即为顶底板隔水的含水层中,长度为 L_w ,与水平方向夹角为 θ_w 的倾斜连续线汇的解析解表达式。将式(6)转换成求直角坐标的形式:

$$s(x, y, z, t) = \frac{Q_L}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z)^{\frac{1}{2}} \sin \theta_w} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^t \int_{-\frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{\frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \tau^{-\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{\alpha(x^2 + y^2)}{4a_z \tau}\right] \times \\ \left\{ \left[\exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w - 2\alpha x z' \cot \theta_w + (z + 2nM - z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) + \right. \right. \\ \left. \left. \exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w + 2\alpha x z' \cot \theta_w + (z + 2nM + z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) \right] \right\} dz' d\tau \quad (7)$$

假设倾斜钻孔透水段中点在坐标系中的坐标为 (j, k) , 钻孔钻进方向与坐标系 x 方向的夹角为 γ , 则式(7)在该坐标系中的表达式为

$$s(x, y, z, t) = \frac{Q_L}{8\mu_s (\pi^3 a_r^2 a_z)^{\frac{1}{2}} \sin \theta_w} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_0^t \int_{-\frac{L_w}{2} \sin \theta_w}^{\frac{L_w}{2} \sin \theta_w} \tau^{-\frac{3}{2}} \times \\ \exp\left[-\frac{\alpha [(x \cos \gamma - j \cos \gamma + y \sin \gamma - k \sin \gamma)^2 + (y \cos \gamma - k \cos \gamma - x \sin \gamma + j \sin \gamma)^2]}{4a_z \tau}\right] \times \\ \left\{ \left[\exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w - 2\alpha(x \cos \gamma - j \cos \gamma + y \sin \gamma - k \sin \gamma) z' \cot \theta_w + (z + 2nM - z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) + \right. \right. \\ \left. \left. \exp\left(-\frac{\alpha z^2 \cot^2 \theta_w + 2\alpha(x \cos \gamma - j \cos \gamma + y \sin \gamma - k \sin \gamma) z' \cot \theta_w + (z + 2nM + z_w - z')^2}{4a_z \tau}\right) \right] \right\} dz' d\tau \quad (8)$$

根据井群干扰原理多个疏放水孔在同一点产生的降深为各个疏放水孔单独引起降深的总和, 即

$$s = s_1 + s_2 + \dots + s_n \quad (9)$$

通过计算每个钻孔在观测点的降深, 并将其叠加, 即将式(8)代入式(9), 就可以求得观测点的最终降深。

1.5 线汇垂直与水平面

若线汇垂直于水平面, 即 $\theta_w = 90^\circ$ 时, 则式(5)可转化为

$$s = \frac{V_L}{8\mu_s (\pi a t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(z - z_p)^2}{4at}\right] dz_p \quad (10)$$

将式(10)进行简化, 换元, 令

$$v = \frac{z - z_p}{2\sqrt{at}}, \quad dv = \frac{-dz_p}{2\sqrt{at}} \quad (11)$$

则式(10)可转为

$$s = \frac{V_L}{4\pi K t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-v^2) dv \quad (12)$$

当含水层厚度为 M 时, 线汇贯穿整个含水层, 其强度为 V 。因此, 厚度为 M 的承压含水层, 平面瞬时点汇的方程为

$$s = \frac{V}{4\pi K M t} \exp\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (13)$$

在式(13)中观测点处降深仅与观测点和线汇的距离有关, 地下水可看作平面上的二维流动。1935年, Theis 发表的论文就是从该式出发推导出的泰斯公式。

2 数值求解算例

为了更深入了解各个方程中的参数如何影响并流分布, 本章选取了数个代表性参数并代入式(7)中, 采用 Matlab 程序计算观测点的降深。

具体的求解过程:

(1) 建立空间三维直角坐标系, 以 x, y, z 对应水平方向及纵坐标, 其中钻孔中点在 $z=0$ 平面的投影作为坐标原点, 钻孔钻进方向作为 x 轴正方向;

(2) 选择特定水文地质参数、钻孔参数、时间及水量参数代入方程计算;

(3) 计算观测点降深随时间变化的曲线, 并对比不同观测点降深随时间变化的曲线;

(4) 计算并对比不同观测位置, 倾斜钻孔疏放水对观测点降深的影响。

2.1 理想模型参数

图 4 反映了一个在承压含水层中进行疏放水的倾斜钻孔。为了讨论式(7)中各个参数对降深的影响,本节中考虑不同含水层参数、不同钻孔形态下的情形,并将承压含水层内水流假设为三维流。渗透系数的选取参考了砂岩含水层经验渗透系数。倾斜钻孔假定为透水段穿过整个含水层的完整井,当钻孔倾角变化时也将改变钻孔长度。其他参数的选取参考了陕北某矿工作面疏放水钻孔参数。

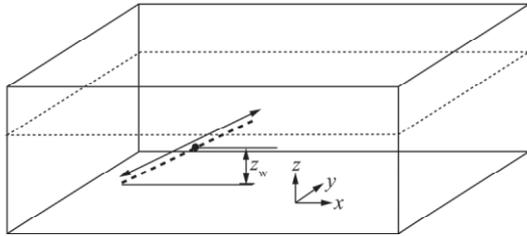


图 4 倾斜钻孔顶板疏放水示意

Fig. 4 Schematic slant drilling roof water drainage

为方便讨论,疏放水时间为 100 min,疏放水量为 1.167 m³/min。

与观测点相关的参数有 3 个,即观测的 x, y, z 坐标。观测点 P 的坐标见表 1。

表 1 观测点坐标取值

Table 1 Observation point coordinate values m

编号	x	y	z
P_1	30	0	20
P_2	-30	0	20
P_3	0	30	20
P_4	0	-30	20
P_5	10	0	0
P_6	-10	0	0
P_7	0	10	0
P_8	0	-10	0
P_9	100	0	0
P_{10}	-100	0	0

与钻孔形态有关的参数有 3 个: z_w, θ_w, L_w 。钻孔长度 L_w 反映了钻孔在含水层中的长度,取值 44.18 m,当钻孔穿过整个含水层时成为完整井,钻孔中点高度 z_w 位于 xy 轴 0 点处, z_w 取值为 20 m。 θ_w 反映钻孔与含水层之间的夹角,角度的变化将影响 s 的大小、降深等值线的形态, θ_w 取值为 65°。

与承压含水层有关的参数有 4 个: 含水层厚度 M , 取值为 40 m; 渗透系数 K , 取值为 0.000 125 m/min; 垂向压力传导系数和水平压力传导系数比值 α , 取值为 1; 给水度 μ_s , 取值为 0.000 008。

2.2 降落漏斗形态计算

描述垂直钻孔疏放水时降深与时间关系的泰斯井流计算方程为二维流方程。求解泰斯井流计算方程所绘制观测点的 $s-t$ 曲线仅与观测点与钻孔的水平距离有关。但倾斜钻孔井流计算方程所求解的是三维空间中各观测点的降深分布,求解倾斜钻孔井流计算方程所绘制的 $s-t$ 曲线与观测点在三维空间中的位置有关。 P_3, P_4 观测点以 $x=0$ 平面,即倾斜钻孔所在垂直平面为对称平面,相互对称。此时 2 个观测点的 $s-t$ 曲线完全相同。 P_1, P_2 点虽然距离钻孔中心的距离与 P_3, P_4 点相同,但 P_1, P_2 点与 P_3, P_4 点的 $s-t$ 曲线并不相同。

为了进一步了解倾斜钻孔定流量疏放水在不同观测点引起的水头降深的形态,选取三维空间中 4 个观测点,计算当 t 由 0~4 320 min 时各点的降深。观测点的坐标为: P_5, P_6, P_7, P_8 计算结果如图 5 所示。 P_5, P_6, P_7, P_8 观测点与坐标轴原点的距离完全相同。

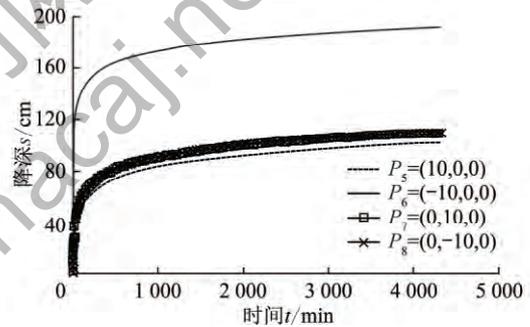


图 5 不同观测点降深-时间的对比

Fig. 5 Different observation points drawdown-time comparison chart

由图 5 可以看出:以 $x=0$ 平面,即倾斜钻孔所在垂直平面为对称平面,相互对称的两个观测点 P_7, P_8 的 $s-t$ 曲线形状完全相同。以 $y=0$ 平面,相互对称的两个观测点 P_5, P_6 的 $s-t$ 曲线形状却完全不同,它们与 P_7, P_8 的 $s-t$ 曲线形状也完全不同。

P_5, P_6 虽然与坐标轴 0 点距离相同,但 P_6 点降深明显大于 P_5 点,这与倾斜钻孔的倾斜特点有关。对于任意 2 个观测点,只有当其坐标满足与钻孔距离的积分和相同时其 $s-t$ 曲线形状才能完全相同。

为了了解含水层同一水平面内各观测点固定时刻的降落漏斗形态,计算 $t=4 320$ min 时, $z=0, y=0$ 线上 -60 m 至 60 m 的区域降深。以 x 轴为横坐标,降深 s 为纵坐标绘制图 6,如图 6 所示降深曲线为一个不对称的漏斗形状,降深最大值位于 $x=-9$ m 点附近,这证明在该点处,观测点与疏放水钻孔上各点距离的平方和相对其他各观测点是最小的。

选取钻孔钻进方向沿 $y=0$ 面做剖面图,计算

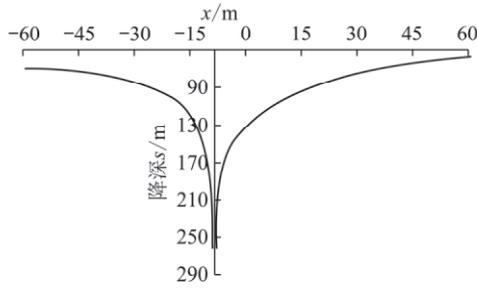


图 6 x 轴上降落漏斗形态示意

Fig. 6 x-axis cone of depression

$x = -40$ m 至 $x = 40$ m, $z = 0$ 至 $z = 40$ m 区域内在 $t = 4\ 320$ min 时的降深,如图 7 所示。图 7 中颜色深浅代表该点降深的大小,由图 7 可以看出,在 $y = 0$ 剖面上靠近钻孔的区域降深最大。假设初始水头相等, $y = 0$ 剖面上地下水流速矢量图如图 8 所示。

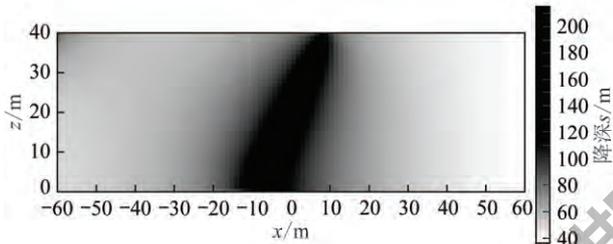


图 7 $y = 0$ 面计算区域降深灰度图

Fig. 7 $y = 0$ calculate surface area grayscale drawdown

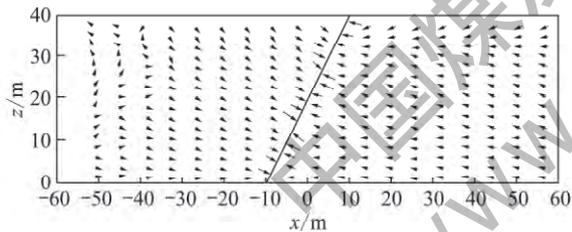


图 8 $y = 0$ 面计算区地下水流速矢量

Fig. 8 $y = 0$ surface groundwater velocity vector calculation

由图 7、8 可以看出,在倾斜钻孔定流量疏放水的情况下,在剖面上降深自钻孔向外逐渐减小,地下水集中向钻孔区域流动。

为研究降深在水平方向的分布,选取 $z = 10$ m 时 $x = -60$ m 至 $x = 60$ m, $y = -60$ m 至 $y = 60$ m 的平面,计算降深的分布情况,如图 9 所示。

由图 9 可以看出,在 $z = 10$ m 平面上最靠近倾斜孔与平面交点处的降深最低,在平面上地下水呈现出降落漏斗的形态,等降深曲面的形状近似为椭圆形。

3 倾斜钻孔多孔叠加疏放水预测

3.1 研究区背景

陕北某矿 31101 工作面是该矿井首采工作面,工作面回采 3-1 煤层,属于侏罗系延安组地层。31101

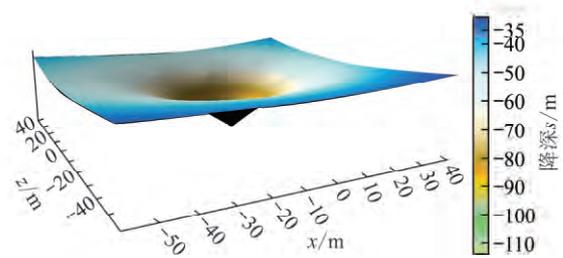


图 9 $z = 10$ m 平面计算区地下水降深三维示意

Fig. 9 Three-dimensional schematic diagram of groundwater drawdown $z = 10$ m flat calculate area

工作面回采后,导水裂缝带高度将达到 3-1 煤顶板的侏罗系直罗组砂岩裂隙含水层。为了保证工作面安全回采,计划对 31101 工作面顶板施工倾斜疏放水钻孔对含水层进行提前疏放。本节应用上节推导的解析解对钻孔井流进行了计算,为疏放水钻孔方案验证,确定疏放水时间提供了依据。

3.2 倾斜钻孔多孔叠加疏放水工程设计

矿方以前期勘探资料为基础,对整个工作面进行了疏放水钻探工程施工。钻孔参数及位置详见表 2。

表 2 31101 工作面井下探放水钻孔参数

Table 2 Parameters of slanted boreholes in 31101

work face					
巷道	钻孔编号	倾角/ (°)	方位角/ (°)	预计进尺/m	进含水层/m
回风巷	T1-1—T21-1	45	131	180	105
	T1-2—T21-2	45	171	180	105
	T1-3—T21-3	45	206	180	105
运输机巷	Y1-1—Y21-1	45	51	180	105
	Y1-2—Y21-2	45	111	180	105
	Y1-3—Y21-3	45	151	180	105

钻孔布置如图 10 所示。图中绿色线条围成的矩形区域为工作面范围,蓝色线条为施工的疏放水钻孔。工作面内共设计布置疏放水钻孔总数为 126 个,钻孔仰角均为 45° ,孔深为 180 m。

3.3 工作面疏放水预测计算

1.4 节中推导的方程中的二重积分十分复杂,直接求解非常困难,选用数值法进行计算是更为可行的方法。本节采用 Matlab 编程,将工作面内钻孔参数及含水层参数代入方程数值求解了式(9),含水层参数:厚度 M 为 120 m;渗透系数 K 为 0.18 m/d;纵向、横向渗透系数比 α 为 1; μ_s 为 0.000 008。得到了 31101 工作面顶板 $z = 0$ 平面内各点的降深,并将所求得结果绘制了降深等值线图。计算得到钻孔已定流量抽水 3 d 后 31101 工作面内地下水等降深值,如图 10 所示。

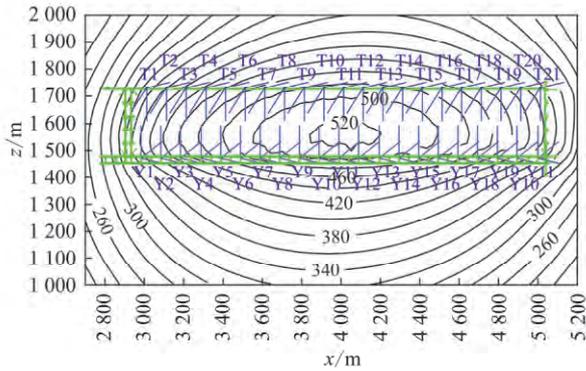


图10 31101工作面钻孔疏放水降深等值线

Fig. 10 31101 work face drilling water drainage drawdown contour map

由图10可知,31101工作面内疏放水钻孔全部按计划进行定流量疏放3d后工作面内顶板直罗组含水层水位降深最大将达到500m,满足了工作面顶板疏放水的要求。

按照设计疏放3d后总疏放水量为82万 m^3 ,在陕北某矿矿井工作面实际施工过程中,总疏放水量约为78万 m^3 ,计算水量与实际疏放水量接近。

4 结 语

(1) 倾斜钻孔井流计算方程所求解的是三维空间中各观测点的降深分布,求解倾斜钻孔井流计算方程所绘制的 $s-t$ 曲线与观测点在三维空间中的位置有关。

(2) 降深曲线为一个不对称的漏斗形状,降深最大值靠近钻孔所在位置。观测点与疏放水钻孔上各点距离的平方和相对其他各观测点是最小的。在 $y=$

0m剖面上,靠近钻孔的区域降深最大。在倾斜钻孔定流量疏放水的情况下,在剖面上降深自钻孔向外逐渐减小,地下水集中向钻孔区域流动。观测点越靠近倾斜孔与平面交点处其降深越低,在平面上地下水呈现出降落漏斗的形态。

(3) 通过对现场试验的研究结合倾斜钻孔井流计算方程,进一步验证了倾斜钻孔井流计算方程适用于煤矿疏放水的实际工作。

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [2] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- [3] 王旭升, 万力. 地下水运动方程[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [4] 孙训正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
- [5] 李竞生, 姚磊华. 含水层参数识别方法[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [6] 薛禹群, 吴吉春. 地下水水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [7] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [8] 陈崇希. 地下水流数值模拟理论方法即模型设计[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [9] 詹红兵, 万军伟. 水资源和环境工程中水平井研究简介[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(5): 511-517.
Zhan Hongbing, Wan Junwei. Horizontal wells in water resources and environmental engineering[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences) 2003, 28(5): 511-517.
- [10] CincoLey. Unsteady-state pressure distribution created by a directionally drilled well[J]. Journal of Petroleum Technology, 1975, 27(11): 1392-1400.