

背斜构造矿层开采地面沉陷规律研究

Surface subsidence patterns for mining ore seam with anticlinal structure

李永树

西南交通大学测量工程系, 成都, 610031)

王金庄

中国矿业大学北京研究生部, 100083)

文 摘 对曲面分布矿层进行地表移动预计时, 通常是把曲面分布近似地当作平面分布来处理, 例如把背斜构造形式的矿层简单地分为几个斜平面, 然后利用多工作面开采地表移动预计方法进行预计, 这样则会降低地表移动预计精度。本文介绍一种根据概率积分基本原理、利用曲线积分建立起来的地表移动预计新方法, 并讨论了积分区间划分及计算坐标确定方法。

关键词 背斜构造, 矿层, 多工作面开采, 概率积分法。

中图法分类号 TD 325.2

作者简介 李永树, 男, 1957年生, 副教授, 博士, 现在西南交通大学做博士后研究工作。主要从事岩层与地表移动方面的研究工作。

Li Yongshu

Wang Jinzhuang

Dept. of Surv. Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031) Beijing Graduate School, CUMT, Beijing, 100083)

Abstract To predict subsidence caused by mining ore seam of curved surface distribution, it is usually to take curved surface distribution as plane one approximately. For example, subsidence is predicted by the method for prediction of multi-face mining, with seam of anticlinal structure being simply divided into a few inclined seams. And obviously, the precision of predicted values of ground movement and deformation must be largely lowered. Based on the fundamental principles of the probability integration method, a new method for predicting subsidence is introduced in this paper. The method is established with the aid of curvilinear integral. And also the methods for delimiting integrated ranges and determining calculation coordinates are discussed.

Key words anticlinal structure, ore seam, multi-face mining, probability integration method.

开采影响传播角为

$$\theta(\xi) = \frac{\pi}{2} - K \cdot \alpha(\xi)$$

式中 k 为常数。因此, 单元矿体开采在地表形成的单元下沉盆地中心位置将向矿层倾斜方向偏移的距离为

$$S_d = Z(\xi) \cdot \operatorname{ctg} [\theta(\xi)]$$

这样, 根据随机介质理论^[1], 可以推出单元下沉盆地和单元水平移动表达式为

单元下沉盆地

$$W_e(X) = \frac{1}{r(\xi)} \exp \left\{ -\frac{\pi}{r^2(\xi)} [X - S(\xi) - S_d - \xi]^2 \right\}$$

单元水平移动

$$U_e(X) = B(\xi) \cdot \frac{\partial W_e(X)}{\partial X} + \frac{W_e(X)}{\operatorname{tg} [\theta(\xi)]}$$

式中 $S(\xi)$ 和 $r(\xi)$ 分别为在采深 Z 处的拐点平移距和主要影响半径, $B(\xi)$ 为水平移动系数。根据实测资料分析和理论证明, 有下面关系式成立^[1]:

$$S(\xi) = u \cdot Z(\xi), \quad r(\xi) = v \cdot \sqrt{Z(\xi)}$$

式中 u, v 均为常数, 由地质采矿条件决定。

如图1所示, 当在点 (ξ, z) 处开采了一微小段曲线

ds 的矿层, $ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dZ}{d\xi}\right)^2} \cdot d\xi$, 且令 $x = X - S(\xi) -$

1 前 言

现行的地表移动预计理论和方法, 都是建立在开采工作面主断面为线性分布的基础上, 即建立在水平矿层和倾斜矿层基础上, 而把曲面分布矿层近似地当作平面分布来处理, 例如, 对于背斜构造矿层, 通常采用以背斜轴为假想开采边界, 把采区分为两个或若干个开采工作面, 这样, 便把主断面为非线性分布的矿层近似地当做线性分布来进行地表移动预计, 因此, 其预计值将会产生一定的偏差, 而这种偏差产生的原因是由于采用了简化假设。本文以随机介质理论为基础, 利用曲线积分的方法推导出背斜构造矿层开采时地表移动与变形预计公式, 确定了计算坐标的数学表达式, 划分了积分区间, 并且利用数值积分法和叠加原理及计算机技术自动解算地表移动变形值, 进一步完善了地表移动预计理论, 同时也大大提高了地表移动预计精度。

2 单元下沉盆地

矿层埋藏条件如图1所示, 设矿层倾向断面的分布曲线方程为

$$Z = Z(\xi)$$

开采单元处的矿层倾角为

$$\alpha = \alpha(\xi)$$

到稿日期: 1997-12-15.

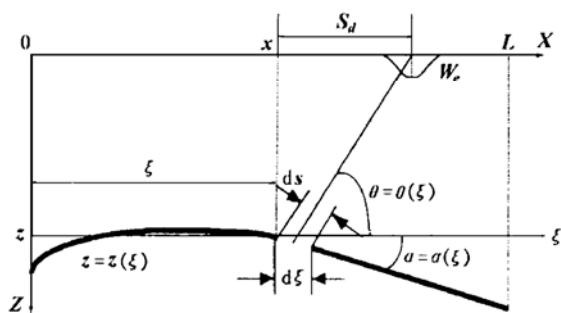


图1 单元下沉盆地

Fig.1 Unit subsidence trough
 S_d , 地表最大下沉值为 W_0 , 则有

微小下沉盆地

$$dW(x) = \frac{W_0}{v \cdot \sqrt{z(\xi)}} \exp \left\{ -\pi \left[\frac{x - \xi}{v \cdot \sqrt{z(\xi)}} \right]^2 \right\} \times \sqrt{1 + [z'(\xi)]^2} \cdot d\xi \quad (1)$$

微小水平移动

$$dU(x) = W_0 \left\{ B(\xi) \cdot \frac{\partial W_e(x)}{\partial x} + \frac{W_e(x)}{\tan \theta(\xi)} \right\} \times \sqrt{1 + [z'(\xi)]^2} \cdot d\xi \quad (2)$$

3 地表移动预计公式

设开采工作面倾斜方向水平长度为 L , 对式 (1) 进行积分, 得到地表下沉预计公式为

$$W(x) = \int_0^L dW(x) = \int_0^L \frac{W_0}{v \cdot \sqrt{z(\xi)}} \exp \left[-\frac{\pi (x - \xi)^2}{v^2 \cdot z(\xi)} \right] \sqrt{1 + [z'(\xi)]^2} \cdot d\xi \quad (3)$$

对式 (3) 求导, 可推导出地表倾斜变形预计公式为

$$i(x) = \frac{\partial W(x)}{\partial x} \quad (4)$$

对式 (4) 再求导, 即得到地表曲率变形预计公式为

$$K(x) = \frac{\partial i(x)}{\partial x} = \frac{\partial^2 W(x)}{\partial x^2} \quad (5)$$

对式 (2) 积分, 便可推出地表水平移动预计公式为

$$U(x) = \int_0^L dU(x) = \int_0^L \left\{ -\frac{2\pi B(\xi) W_0 \cdot (x - \xi)}{v^3 \cdot \sqrt{[z(\xi)]^3}} + \frac{W_0}{v \cdot \tan \theta(\xi)} \cdot Z(\xi) \right\} \exp \left[-\frac{\pi (x - \xi)^2}{v^2 \cdot z(\xi)} \right] \sqrt{1 + [z'(\xi)]^2} \cdot d\xi \quad (6)$$

对式 (6) 求导后, 便得到地表水平变形预计公式为

$$E(x) = \frac{\partial U(x)}{\partial x} \quad (7)$$

4 积分区间划分方法

通常, 采区矿层沿倾斜方向的长度仅为 100 多 m,

并且绝大部分矿层属于平缓曲面构造 (包括倾斜构造), 所以利用数学性质良好的二次曲线来拟合开采矿层, 对于地表移动预计所产生的误差非常小。因此, 设开采矿层沿倾向断面的分布形态为二次曲线分布, 即

$$Z(\xi) = a\xi^2 + b\xi + c$$

式中 a, b, c 为常数。

由数学知识可知, 当开采矿层为背斜构造时, $a > 0, b \neq 0, c \neq 0$, 极大值点的坐标为 $[x_d, Z(x_d)]$, 其中 $x_d = -0.5b/a, Z(x_d) = c - 0.5b^2/a$, 且 $x_d \in [0, L]$ 。如果以矿层分布曲线极值点 x_d 为界, 在其两侧进行矿层开采将会分别在两侧矿层的下山方向的上方地表形成下沉盆地。因此, 在 x_d 附近地表移动与变形的方向不同, 地表点将会分别受到来自背斜构造矿层两翼开采产生的采动影响, 且与移动向量方向相反, 进而可知求取计算坐标时其计算公式中的符号相反。求解地表移动与变形值的积分区间的划分, 也就以矿层分布曲线极值点为界, 分为左、右两翼, 即将开采区间分为两个单斜构造矿层。相对于左翼工作面的地表点计算坐标为 x_j , 而相对于右翼工作面的地表点的计算坐标为 x_k , 并且其积分区间即为开采工作面的计算长度, 因此, 在预计地表任意点移动与变形值时, 计算 x_j, x_k 则不再考虑拐点平移距的影响。同时, 也可以看出在确定地表点的计算坐标时, 计算 x_j 时认为右翼工作面已经开采, 而计算 x_k 时则认为左翼工作面已经开采, 这就是说, 需要进行地表移动与变形值的叠加运算。

5 确定计算坐标

在倾向断面上, 当 $x \in [0, x_d]$ 区间时, 开采影响传播范围将偏向开采位置的下山方向, 这时, 地表点的计算坐标为:

$$x_j = x + Z(x) \cdot \cotg \theta(x)$$

而 $\theta(x) = 90^\circ - k \cdot \alpha(x)$, $\alpha(x) = \arctg [2ax + b]$ 。再由极值点坐标 $x_d = -0.5b/a$ 可知, 当 $x = x_d$ 或 $x \approx x_d$ 时, $\alpha(x) = 0$ 或 $\alpha(x) \approx 0$, $\theta(x) = 90^\circ$ 或 $\theta(x) \approx 90^\circ$, 这时, $x_j = x$ 或 $x_j \approx x$ 。因此, 在 x 从 0 趋近 x_d 的过

表1 地表点计算坐标公式

Table 1 Formulas for calculating coordinates of surface points	
地表点位置	$[x_j, x_k]$
$x < 0$	$[x + Z(x) \cotg \theta(x), 0]$
$0 < x < x_d/2$	$[x + Z(x_d/2) \cotg \theta(x_d/2), x]$
$x_d/2 < x < x_d$	$[x + Z(x_d) \cotg \theta(x_d), x]$
$x = x_d$	$[x, x]$
$x_d < x < (x_d + L)/2$	$[x, x - Z(x_d) \cotg \theta(x_d)]$
$(x_d + L)/2 < x < L$	$[x, x - Z[(x_d + L)/2] \cotg \theta[(x_d + L)/2]]$
$L < x$	$[0, x - Z(x) \cotg \theta(x)]$

表 2 预计参数
Table 2 Predicted subsidence parameters

u	v	k	m	q	b	L	L_0	H_1	H_2	$\text{tg}\beta$	N	N_0
0.085	8.69	0.221	2.1	0.76	0.37	214	317	213	201	2.5	3	11

表 3 预计结果与实测结果对比
Table 3 The predicted values vs measured ones

点号	地表下沉 (mm)			倾斜变形 (mm/m)			曲率变形 (10 ⁻³ /m)			水平移动 (mm)			水平变形 (mm/m)		
	预计	实测	偏差	预计	实测	偏差	预计	实测	偏差	预计	实测	偏差	预计	实测	偏差
1	805	854	-49	3.64	3.70	-0.06	-0.07	-0.05	-0.02	385	414	-29	-6.90	-6.76	-0.14
2	966	906	60	-1.66	-1.50	-0.16	-0.11	-0.15	0.04	-99	-116	17	-8.45	-7.52	-0.93
3	850	764	86	-3.94	-3.42	-0.52	-0.05	-0.07	0.02	-322	-295	-27	-4.76	-3.85	-0.91
4	607	549	58	-5.44	-5.32	-0.12	-0.01	0.01	-0.02	-469	-336	113	-2.32	-3.24	0.92
5	334	311	23	-5.05	-5.41	0.36	0.03	-0.01	-0.04	-427	-405	22	2.14	1.76	0.38
6	218	205	13	1.73	1.18	0.55	-0.01	-0.03	0.02	168	143	25	-1.18	-1.84	0.66
7	446	404	42	4.86	3.52	1.34	0.00	-0.01	0.01	388	369	19	-0.08	-0.16	0.08
8	781	771	10	3.09	3.44	-0.35	-0.05	-0.04	-0.01	182	137	45	-4.29	-3.76	-0.53
9	562	604	-42	2.71	2.53	0.18	-0.04	-0.07	0.03	165	116	49	-3.12	-3.16	0.04
10	204	259	-55	3.58	4.15	-0.57	0.03	0.05	-0.02	268	287	-19	2.45	3.14	-0.69
11	72	128	-56	0.88	1.20	-0.32	0.00	0.02	-0.02	75	131	-56	0.05	0.57	-0.52

程中，随着矿层倾角 $\alpha(\xi)$ 值由大变小，这时开采影响传播角将由小变大，并且， $\alpha(\xi_d) = 0$ ，而在 x_d 处 $\theta(\xi_d) = 90^\circ$ ，这样，地表点的计算坐标 x_j 趋向于地表点在工作面坐标系中的坐标 x 。

当 $x \in [\xi_d, L]$ 区间时，开采影响将偏向开采位置的另一翼下山方向，地表点的计算坐标为

$$x_k = x - Z(\xi) \cdot \text{ctg} [\theta(\xi)]$$

因此，当 $x = x_d$ 时， $\theta(\xi) = 90^\circ$ ，则 $x_k = x$ 。当 x 值逐渐增加时，由 $\alpha(\xi) = 2ax + b$ 和 $a > 0$ 可知， $\alpha(\xi)$ 为单调增加函数，随着矿层倾角逐渐加大，开采影响传播角 $\theta(\xi)$ 将随之减小，这样，地表受到开采影响的范围将会逐渐地向下山方向延伸。表 1 为位于不同位置地表点计算坐标的数学表达式。

6 实 例

从式 (3)~(7) 中可看出，这些积分公式非常繁琐，且为不可积函数。因此，采用数值积分方法进行解算^[5]，所有参数求取和预计过程均利用计算机处理，菜单形式人机对话，使用方便，计算精度高。下面是峰峰矿务局 3701 观测站的验证实例，表 2 为预计参数，其中 N 为开采矿层分布曲线定位点个数，其坐标分别为 $[0, 478.0]$ ， $[08.0, 449.0]$ ， $[14.0, 512.0]$ ； L_0 为工作面走向方向长度； N_0 为待预计点个数。表 3 为计算结果对比，表中预计栏为本文方法的预计值，实测栏是观测站的实

测值，偏差栏是预计值与实测值之差，可以看出预计值具有较高的精度，能够满足“三下”采煤工程要求。

7 结 语

随着矿产资源开发工作的深入进行，采区地质采矿条件和地表环境越来越复杂，这样，对地表移动预计精度的要求也将会越来越高。同时，由于计算机技术和数值计算技术的迅猛发展，因此，目前有条件进一步补充和完善现行地表移动预计方法，以满足不断增长的工程精度要求。

本文以随机介质理论为基础，采用曲线积分的方法推导出了背斜构造矿层开采地表移动预计公式，而其它构造形式的地表移动预计公式也可以采用类似方法推导出^[6]，这样，矿层倾角、主要影响半径及拐点平移距等都是以变量的形式出现，把概率积分法的应用范围从平面构造矿层开采推广到了曲面构造形式，进一步完善了地表移动预计理论和方法。

参 考 文 献

1 刘宝琛，廖国华. 煤矿地表移动的基本规律（第一版）. 北京：中国工业出版社. 1965.
2 李永树. 地表移动预计方法及信息处理（SPDP）系统研究 [博士学位论文]. 中国矿业大学北京研究生部，1997.
3 王 镭等. 计算机技术与工程应用基础（第二版）. 天津大学出版社，1991.