

开采沉陷

# 煤矿地表塌陷预测精度分析

马超 康建荣 何万龙(太原理工大学)

**摘要** 预测煤矿地表塌陷面积和地表破坏程度主要通过两种手段,一是利用地表移动角量参数预测地表塌陷程度和塌陷面积,另一是利用地表移动变形值预测地表塌陷面积。利用地表移动角量参数塌陷面积的预测精度主要取决于塌陷范围的圈定精度和塌陷面积的量算精度;利用地表移动变形值预测地表塌陷程度和塌陷面积的预测精度主要取决于地表移动变形值的预测精度。

**关键词** 塌陷预测 精度分析

## 1 利用地表移动角量参数预测地表塌陷面积的精度

地下煤层开采引起的地表塌陷范围的边界一般可按移动角或裂缝角等地表移动角量参数在井上下对照图上圈定(移动角多用于平地,裂缝角多用于山地),所圈定的地表塌陷面积一般用求积仪量算,故地表塌陷面积预测精度主要取决于塌陷范围的圈定精度和塌陷面积的量算精度。

### 1.1 塌陷范围的圈定误差

地表塌陷范围一般在1:5000井上下对照复制图上按开采边界向外扩展塌陷影响宽度 $d$ 圈定, $d=H \cdot \text{ctg} \delta$  其中 $H$ 为开采煤层深度, $\delta$ 为基岩和表土层的综合移动角或裂缝角。设 $H$ 的中误差为 $m_H$ , $\delta$ 的中误差为 $m_\delta$ ,则 $d$ 的中误差 $m_d$ 应为:

$$m_d = \pm \sqrt{\left(\frac{H}{\sin^2 \delta}\right)^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_H^2 \text{ctg}^2 \delta} \quad (1)$$

对于中硬覆岩,综合移动角 $\delta$ 可取 $70^\circ \sim 75^\circ$ ;裂缝角 $\delta$ 可取 $75^\circ \sim 80^\circ$ 。煤层开采深度 $H$ 可按地形图和开采煤层的底板等高线图确定。假定所用的图纸比例尺为1:5000,等高线间距为5m,图上高程判读精度 $m_0$ 约为 $\pm 1\text{m}$ ,则按等高线确定开采深度的中误差 $m_H$ 应为:

$$m_H = \pm \sqrt{2m_0} \pm \sqrt{2} \text{ (m)} \quad (2)$$

移动角和裂缝角的误差分析比较复杂,目前一般认为它们的中误差 $m_\delta$ 可按 $\pm 3^\circ$ 考虑,故取:

$$m_\delta = \pm 3^\circ \quad (3)$$

此外,在1:5000复制的井上下对照图上按开采边界和影响宽度 $d$ 圈定地表塌陷范围边界时,还受到绘图和图纸伸缩误差的影响,二者在图上的误

均可按 $0.2\text{mm}$ 考虑,故它们对塌陷边界圈定的综合影响 $m_j$ 可表示为:

$$m_j = \pm 0.0002 \times 5000 \sqrt{2} = \pm \sqrt{2} \quad (4)$$

地表塌陷范围圈定误差 $m_q$ 应为影响宽度 $d$ 的计算误差 $m_d$ 和边界描绘误差 $m_j$ 的综合影响,故 $m_q$ 应为:

$$m_q = \pm \sqrt{m_d^2 + m_j^2} \quad (5)$$

$$\text{或 } m_q = \pm \sqrt{\left(\frac{H}{\sin^2 \delta}\right)^2 \cdot \frac{m_\delta^2}{\rho^2} + m_H^2 \text{ctg}^2 \delta + m_j^2} \quad (6)$$

以式(2)、式(3)和式(4)代入式(6),可算出按不同采深和不同角量参数预测的地表塌陷范围圈定中误差 $m_q$ (表1)。

表1 不同采深地表塌陷边界圈定中误差表( $m_q$ )

圈定误差		采 深 $H$ (m)			
		100	200	300	400
移 动 角	70	6.117	11.953	17.851	23.764
	71	6.044	11.808	17.633	23.473
	72	5.976	11.672	17.429	23.201
	73	5.913	11.545	17.238	22.948
	74	5.854	11.427	17.062	22.712
裂 缝 角	75	5.799	11.318	16.898	22.494
	76	5.749	11.217	16.747	22.292
	77	5.702	11.124	16.608	22.106
	78	5.660	11.039	16.480	21.936
	79	5.621	10.962	16.364	21.781
	80	5.586	10.892	16.259	21.641

塌陷范围圈定误差对塌陷面积误差的影响显然与所预测的面积相对于圈定的塌陷范围的位置有关,可分为以下三种情况:

a 如果预测的面积包含全部塌陷范围,即预测塌陷范围的总面积,则塌陷范围圈定误差引起的面积误差亦全部包含在内。换句话说,全部塌陷范围总面积包含全部塌陷范围圈定误差引起的面积误差。

b 如果预测的面积为所圈定的塌陷范围一部分, 预测面积的边界 (例如已利用塌陷地的图斑边界) 与所圈定的塌陷边界部分重合, 则预测面积只包含与塌陷边界重合部分的塌陷范围圈定误差引起的面积误差。

c 如果预测的面积在所圈定的塌陷范围以内, 预测面积的边界 (例如已利用塌陷地的图斑边界) 未包含所圈定的塌陷边界, 则预测的面积不包含塌陷范围圈定误差引起的面积误差。

部分边界与所圈定的塌陷范围边界相生命的塌陷范围圈定误差  $m_q$  引起塌陷面积  $S$  的误差  $m_s$  可按下式估算:

$$m_s = \pm m_q \cdot L \text{ (m}^2\text{)} \quad (7)$$

式中

$L$ ——重合的塌陷边界长度 (m)。

对于塌陷范围圈定误差引起的全部塌陷范围总面积的误差, 包括按孤立的单一工作面开采圈定的塌陷面积、单一采区内各工作面联合开采范围圈定的塌陷面积和按全井田开采 (内部无宽大隔离煤柱形成的未塌陷地带) 圈定的塌陷总面积误差, 显然与塌陷区的大小有关。为讨论简便起见, 设塌陷区 (图斑) 的形状为近似正方形、近似长方形和近似椭圆形的三类典型情况, 我们可按上述图形的计算公式近似地估算塌陷面积的误差。

正方形面积  $S_z$  为:

$$S_z = a^2; \text{ (} a \text{ 为正方形边)} \quad (8)$$

长方形面积  $S_c$  为:

$$S_c = a \cdot b; \text{ (} a, b \text{ 为长方形长、短边)} \quad (9)$$

椭圆形面积  $S_t$  为:

$$S_t = \pi ab \text{ (} a, b \text{ 为椭圆形长、短轴)} \quad (10)$$

上列公式中的计算范围参量  $a, b$  中均含有塌陷范围圈定误差  $m_q$ 。设面积  $S_z, S_c$  和  $S_t$  的中误差为  $m_{s_z}, m_{s_c}$  和  $m_{s_t}$  以  $m_q$  代替  $m_a$  和  $m_b$ , 按误差传播律有:

$$m_{s_z} = \pm 2m_q \quad (11)$$

$$m_{s_c} = \pm \sqrt{a^2 + b^2} m_q \quad (12)$$

$$m_{s_t} = \pm \frac{\pi}{2} \sqrt{a^2 + b^2} m_q \quad (13)$$

取采深  $H = 200\text{m}$ 、裂缝角  $\delta' = 75^\circ$  为例, 由表 1 可知其塌陷边界圈定误差为  $m_q = 11.318\text{m}$ , 然后按式 (11)~ (12) 和式 (13) 以不同的计算范围参量 ( $a, b$ ) 求得不同形状的塌陷面积  $s$  及其相应的绝对误差  $m_s$  和相对误差百分数 (%) (见表 2)。表中  $a, b$  分别

为矩形的长、短边长;  $(a + b)/2$  为正方形的边长;  $a/2$  和  $b/2$  为椭圆形的长、短半轴。

### 1.2 塌陷面积的量算误差和总误差

塌陷面积一般采用求积仪量算, 某些情况下也采用图解法、透明方格法或平行线法量算。无论采用何种方法量算, 面积 (指平面的面积) 量算的相对误差一般要求小于  $1/100$ , 设面积 ( $S$ ) 的量测误差为  $m_{s1}$ , 则有

$$m_{s1} = \pm 0.01S \quad (14)$$

考虑面积量算误差塌陷面积总中误差  $m_s$  应为:

表 2 不同形状和大小的塌陷区面积  $S$  预测误差  $m_s$   
( $H = 200\text{m}, S = 75^\circ, m_q = 11.318\text{m}$ )

长 $a(\text{m})$	宽 $b(\text{m})$	正 方 形		
		$S(\text{亩})$	$m_s$	$m_s/S\%$
100	100	15.0	3.40	22.67
300	222	102.2	8.86	8.67
500	500	375.0	16.98	4.53
1000	500	843.8	25.5	3.02
2000	1500	4594	59.4	1.29
3000	2222	10227	88.7	0.87

长 $a(\text{m})$	宽 $b(\text{m})$	长 方 形		
		$S(\text{亩})$	$m_s$	$m_s/S\%$
100	100	15	2.4	16.0
300	222	100	6.3	6.30
500	500	375	12.0	3.20
1000	500	750	19.0	2.50
2000	1500	4500	42.4	0.94
3000	2222	10000	63.4	0.63

长 $a(\text{m})$	宽 $b(\text{m})$	椭 圆 形		
		$S(\text{亩})$	$m_s$	$m_s/S\%$
100	100	11.8	3.77	31.95
300	222	78.5	9.95	12.68
500	500	294.5	18.86	6.40
1000	500	589.1	29.8	5.06
2000	1500	3535	66.7	1.89
3000	2222	7854	99.6	1.27

$$m_s = \pm \sqrt{m_{s_q}^2 + m_{s1}^2} \quad (15)$$

式中  $m_{s_q}$  代表塌陷范围圈定误差引起的面积误差, 可根据具体情况采用式 (6) 或式 (11)~ 式 (13) 中任一式计算。

### 1.3 精度影响因素的分析

由上面的讨论和计算可知, 按移动角和裂缝角等地表移动角量参数预测地表塌陷面积精度的影响因素可大致作如下分析:

a 塌陷范围圈定精度和塌陷面积的预测精度主要取决于移动角或裂缝角的取值精度,其次为采深和边界描绘精度。显然,采用本矿观测求得的移动式裂缝角值,采用较大比例尺的作业图纸对提高塌陷面积的预测精度有利。

b 当使用的角量参数及其精度相同时,塌陷范围圈定误差  $m_q$  的绝对值随采深( $H$ )的增大而增大(见图 1);当开采深度相同时,塌陷范围圈定误差( $m_q$ )与角量参数大小有反比函数关系(见图 2)。

c 塌陷面积预测的绝对误差  $m_s$  与塌陷面积的大小成正比函数关系,而塌陷面积预测的相对误差则与塌陷面积的大小有反比函数的关系(见图 3)。

由于塌陷面积预测误差主要取决于塌陷范围

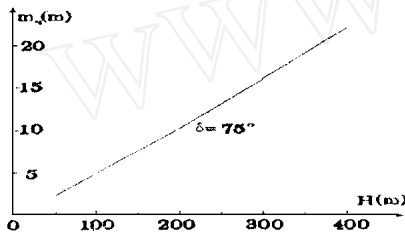


图 1 塌陷范围误差与采深的相关曲线

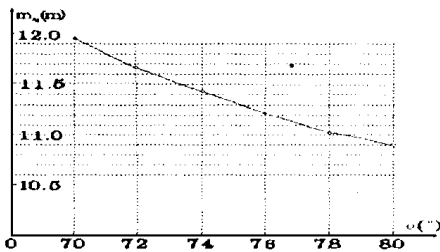


图 2 塌陷范围误差与角量参数的相关曲线

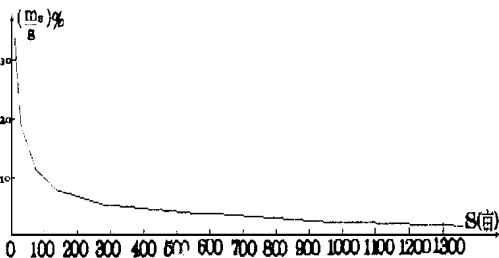


图 3 塌陷面积预测相对误差与面积的相关曲线

圈定误差,当角量参数和开采深度一定时,范围圈定误差也为定值,因而塌陷面积愈大,面积预测的相对误差就愈小,当塌陷面积大于 10000 亩(6.6 平方公里)时,面积预测的相对误差将小于 1%;而当塌陷面

积小于 100 亩(0.66 平方公里)时,面积预测误差可能超过 10%。由此可见,开采面积较大的矿井,塌陷面积预测精度较高,而开采面积较小的矿井,塌陷面积预测的精度较低。

## 2 利用地表移动变形值预测地表塌陷面积的精度分析

### 2.1 地表移动变形实测值的精度

地下煤层开采引起地表移动和变形值一般是根据现场的高程和距离测量结果通过计算求得的,称为移动变形实测值。根据误差理论分析,采用现代测量和计算方法进行测量和数据处理。上述各种移动、变形实测值的中误差大致为:

$$\text{下沉 } W \quad m_w = \pm (50 \sim 20) \text{ mm}$$

$$\text{水平移动 } U \quad m_u = \pm (5 \sim 20) \text{ mm}$$

$$\text{倾斜变形 } i \quad m_i = \pm (1 \sim 5) \times 10^{-3}$$

$$\text{曲率变形 } K \quad m_k = \pm (0.1 \sim 0.5) \times 10^{-3} / \text{m}$$

$$\text{水平变形 } \epsilon \quad m_\epsilon = \pm (1 \sim 5) \times 10^{-3}$$

### 2.2 地表移动变形预测值的精度

塌陷区地表移动和变形值的预测一般是采用某种预测数学模型进行的,这些数学模型有的是建立在某种数学、力学理论基础上的理论模型;有的则是建立在现场观测资料分析和实验基础上的经验模型;还有的是理论和经验相结合的模式。地表移动和变形值的预测精度主要包括以下两部分:一是数学模型本身的精度:是否能在总体上真实地反映开采沉陷引起地表移动与变形规律;二是预计参数选取的精度:选取参数是否符合预计对象的具体条件。

由于开采沉陷和地表移动与变形问题本身的复杂性,目前所使用的预测模型的数学形式都比较复杂,加上公式中的某些参数大都涉及岩土体诸多的物理、力学性质和地质、采矿条件等复杂因素,所以从理论上严格估计移动和变形值的预测误差难度很大,在这方面还有等进一步探讨。目前评价移动变形值预测精度的方法通常是采用与对应条件实测值相比较的方法进行评定。

实践经验表明,我国现时采用较多的概率积分法预测模型对平地的预测值与实测值比较的相对精度大致如下:

$$\text{地表下沉: } \frac{m_w}{W} \% = 5\% \sim 10\%$$

$$\text{水平移动: } \frac{m_u}{U} \% = 10\% \sim 20\%$$

$$\text{倾斜变形: } \frac{m_i}{i} \% = 20\% \sim 30\% \quad (16)$$

$$\text{曲率变形: } \frac{m_K}{K} \% = 30\% \sim 50\%$$

$$\text{水平变形: } \frac{m_e}{e} \% = 25\% \sim 35\%$$

山区地表移动预计涉及的问题更多一些, 因而预测精度可能比平地略低 5% ~ 10%, 应当指出的是, 地表移动、变形预计是一项专业性很强的技术工作, 必须由有经验的技术人员担任, 才可能获得较好的效果。

### 2.3 移动变形值预测误差对地有塌陷预测的影响

a 下沉量预测误差对塌陷破坏程度及塌陷面积预测的影响。据文献[1]规定: 轻度塌陷为“地表塌陷不明显”(可理解为塌陷深度 5~ 20cm); 中度塌陷为“塌陷深度不超过 50cm (可理解为 20~ 50cm); 重度塌陷为“塌陷深度大于 50cm”。上述规定的数值界限不一定适合所有情况, 但用下沉量作为划定塌陷破坏边界和破坏程度的一个重要指标是正确的, 特别是对于平地高潜水位地区, 下沉量应当是划定塌陷破坏程度最重要的指标。

对于水平和缓倾斜煤层来说, 下沉量的大小主要取决于煤层的采高(开采厚度)。现以中硬覆岩下沉系数  $q = 0.8$ ,  $\text{tg}\beta = 2.0$ , 采高  $M = 1.25\text{m}$ , 采深  $H = 200\text{m}$  的半无限充分开采为例, 按概率积分法和上述划分破坏程度的下沉量指标, 估算平地由于下沉值预测误差按下沉相对误差(5% ~ 10%)估算, 引起的塌陷破坏程度边界误差(即相对于下沉误差的水平位置误差)见表 3。

表 3 下沉值预测误差引起的塌陷边界圈定误差( $m_q$ )

塌陷破坏程度	轻度塌陷区	
	外边界	里边界
塌陷(下沉)深度(mm)	50	200
下沉预测误差(mm)	2.5~ 5.0	10~ 20
边界圈定误差(mm)	1.0~ 2.0	1.5~ 3.0
塌陷破坏程度	中度塌陷区	
	外边界	里边界
塌陷(下沉)深度(mm)	200	500
下沉预测误差(mm)	10~ 20	25~ 50
边界圈定误差(mm)	1.5~ 3.0	2.5~ 5.0
塌陷破坏程度	重度塌陷区	
	外边界	里边界
塌陷(下沉)深度(mm)	500	> 500
下沉预测误差(mm)	25~ 50	> 50
边界圈定误差(mm)	2.5~ 5.0	5.0

由表 3 可见, 按预测的下沉值圈定塌陷范围(最外边界)的误差  $m_q$  大致为 2~ 4m; 塌陷区内破坏程度分界的误差大致为 3~ 10m。与表 1 比较可知, 用下沉预测值圈定塌陷范围的精度, 高于用移动角或裂缝角圈定塌陷边界的精度, 因此, 在平地高潜水位区宜采用下沉预测值圈定塌陷范围。

b 变形值预测误差对塌陷破坏程度及塌陷面积预测的影响。对于山地、丘陵低潜水位塌陷区, 地表破坏程度主要取决于地表裂缝, 而地表裂缝的大小与水平拉伸变形值的大小有关。根据文献[1]关于塌陷地破坏程度分级指标, 轻度裂缝宽度为 10~ 20cm, 间距小于 50~ 30m; 重度裂缝宽度大于 30cm, 间距小于 30m 的规定, 我们根据山西各矿区的经验, 采用以水平拉伸变形( $+e$ )作为相应破坏程度预测的划分指标, 即:

$$\text{轻度破坏: } +e = 5 \sim 10(10^{-3})$$

$$\text{中度破坏: } +e = 10 \sim 20(10^{-3}) \quad (17)$$

$$\text{重度破坏: } +e > 20(10^{-3})$$

由概率积分法可知, 对于半无限开采, 地表永久拉伸区位于拐点外侧, 水平宽度等于主要影响半径( $r$ ), 最大水平变形值为:

$$\epsilon_{\max} = 1.52b \frac{W_{\max}}{r} \quad (18)$$

对于水平煤层开采, 以  $W_{\max} = qM$ ,  $r = \frac{H}{\text{tg}\beta}$  代入得  $\epsilon_{\max} = 1.52b \cdot q \cdot \text{tg}\beta \cdot \frac{M}{H}$  (19) 式中

$q, b$ ——分别为下沉和水平移动系数;

$\text{tg}\beta$ ——主要影响角正切;

$M$  和  $H$ ——分别为开采厚度和深度。

由式(18)可知, 当  $q, b, \text{tg}\beta$  取定时,  $\epsilon_{\max}$  与  $M/H$  有正比函数关系。对于中硬覆岩, 取  $q = 0.8$  和  $b = 0.33$ ,  $\text{tg}\beta = 2.0$ , 则式(19)可写为:

$$\epsilon_{\max} = 0.803 \frac{M}{H} \quad (20)$$

以式(17)的破坏程度指标代入上式有:

$$\text{当 } \epsilon_{\max} = 5 \times 10^{-3}, \frac{M}{H} = 0.006, \text{ 或 } \frac{H}{M} = 160$$

$$\text{当 } \epsilon_{\max} = 10 \times 10^{-3}, \frac{M}{H} = 0.0125, \text{ 或 } \frac{H}{M} = 80$$

$$\text{当 } \epsilon_{\max} = 20 \times 10^{-3}, \frac{M}{H} = 0.0250, \text{ 或 } \frac{H}{M} = 40$$

也就是说, 达到轻度破坏开采的深厚比为 160~ 80; 达到中度破坏的开采深厚比为 80~ 40; 重度破坏开采的深厚比应为小于 40。为便于记忆和掌握, 同时考

虑到上述计算也会有误差,我们一般取深厚比 200~100 为轻度;深厚比 100~50 为中度;深厚比 < 50 为重度。

按式(17)圈定塌陷区破坏程度范围时,由于水平变形预测值本身含有 30% 左右的误差,因而使圈定的边界也将产生误差( $m_q$ )。同样以概率积分法水平煤层半无限开采为例,塌陷拉伸区水平变形预测值可按下式计算:

$$\epsilon(x) = 2\pi b W_{\max} \frac{x}{r^2} e^{-\pi(\frac{x}{r})^2} \quad (22)$$

以  $W_{\max} = q \cdot M$ ;  $r = \frac{H}{\tan \beta}$  代入上式得:

$$\epsilon(x) = 2\pi b q \tan^2 \beta \frac{M}{H^2} x \cdot e^{-\pi(\frac{\tan^2 \beta}{H^2} x^2)} \quad (23)$$

令  $b = \pi \frac{\tan^2 \beta}{H^2}$ ,  $a = 2\pi b q \tan^2 \beta \frac{M}{H^2}$ , 则式(23)可写为:

$$\epsilon(x) = ax \cdot e^{-bx^2} \quad (24)$$

以  $\epsilon(x)$  对  $x$  求微分得:

$$d\epsilon(x) = ae^{-bx^2} (1 - 2bx^2) dx \quad (25)$$

以上式两端同除以式(24)得:

$$\frac{d\epsilon(x)}{\epsilon(x)} = (1 - 2bx^2) \frac{dx}{x} \quad (26)$$

以  $m_{\epsilon(x)}$  和  $m_x$  分别代换  $d\epsilon(x)$  和  $dx$  得:

$$\frac{m_{\epsilon(x)}}{\epsilon(x)} = (1 - 2bx^2) \frac{m_x}{x}, \text{ 即}$$

$$m_x = \pm \frac{x}{1 - 2bx^2} \cdot \frac{m_{\epsilon(x)}}{\epsilon(x)} \quad (27)$$

上式即为水平变形相对误差及其位置误差的表达

式,  $m_x$  亦即由水平变形预测误差引起的塌陷地破坏等级范围圈定误差  $m_q$ 。对于概率积分法坐标系,  $\epsilon(x)$  计算的  $|x|$  取值范围应为  $0 < |x| < r_0$ 。

前面已经提到,水平变形预测相对误差  $\frac{m_{\epsilon(x)}}{\epsilon(x)}$

0.3, 取  $\tan \beta = 2.0$  而  $b = \pi \frac{\tan^2 \beta}{H^2} = \frac{4\pi}{H^2}$  故由式(27)可将按水平变形预测值圈定塌陷破坏范围的误差  $m_q$  写为:

$$m_q = \pm \frac{0.3H^2}{H^2 - 8\pi x^2} \quad (28)$$

以不同的开采深度  $H$  和  $x$  代入上式可算得不同位置( $x$ )的圈定误差  $m_q$ 。通常水平变形用于划定塌陷范围内部的破坏等级,而不常用于圈定塌陷范围边界。还应指出的是,这里考虑的主要是与裂缝宽度和密度有关的水平拉伸变形,没有考虑裂缝的落差以及地形影响,因此在按水平变形预测值划定破坏程度范围时,还应参照开采的深厚比以及倾斜、曲率等其它变形预测值,这样才比较可靠,也有利于提高划分精度。

**作者简介:** 马超,男,32岁,硕士工程师。1989年毕业于山西矿业学院,从事矿山测量及开采沉陷的教学及科研工作,曾发表论文数篇。

(收稿日期:1998年9月7日)