



戴华阳. 岩层与地表移动变形量的时空关系及描述方法[J]. 煤炭学报, 2018, 43(S2): 450-459. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0270
DAI Huayang. Mining subsidence variables and their time-space relationship description[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(S2): 450-459. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0270

移动阅读

岩层与地表移动变形量的时空关系及描述方法

戴 华 阳

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 矿山开采沉陷是指地下开采引起的岩层与地表移动现象和过程, 移动变形的描述方法是开采沉陷研究的基础。本文较为全面地阐述了岩层与地表移动变形量的时空关系, 指出开采沉陷的岩层、地表、松散层等3个主体, 9个移动变形量。按照移动盆地、主断面、任意点3种描述模式, 给出了各移动变形量之间的数学关系; 论述地表动态移动变形与开采影响的传播过程的时空关系, 提出了开采推进时间、影响传播时间双变量的动态移动变形描述方法; 给出了直线型、折线型、网状观测站地表移动变形的关系式。可为开采沉陷观测分析、预计模型研究提供数学依据。

关键词: 岩层与地表移动; 移动变形量; 双时间变量; 时空关系; 描述方法

中图分类号: TD325 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2018)S2-0450-10

Mining subsidence variables and their time-space relationship description

DAI Huayang

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Mining subsidence refers to a phenomena and processes of strata movement and surface movement caused by underground mining. The description method of movement and deformation is the basis of mining subsidence research. In this paper, three principal objects (strata, surface and loose layer), nine variables of movement and deformation are confirmed. The mathematical relationships and description methods of mining subsidence variables are given as three kinds of mode (basin, profile and point) and two kinds of stability state (dynamic and static). The clear expression of each variable of observation or calculation is given as in main section and in any direction of movement basin. The time-space relationships between dynamic surface movement and the advancing position and the propagation process of mining influence are expounded. A method for describing the dynamic movement of mining time and propagation time is presented. The relationship of variables of surface movement and deformation is given for observation station with linear, folding and network shape. These results provide a mathematical basis for the observation and analysis of mining subsidence and the prediction model.

Key words: strata movement and surface movement; variables of displacement and deformation; double variables of time; time-space relationship; description method

《开采沉陷学》是研究矿山地下开采引起的岩层与地表移动规律、移动变形控制方法及相关问题的科学。它是一个工程技术研究领域, 也是矿山测量、采矿工程学科的专业方向之一。矿山开采沉陷(Mining

subsidence)是指矿层地下开采引起的岩层移动、松散层移动、地表移动现象和过程。

岩层移动(Strata movement): 是指开采引起的岩层垮落、裂缝、弯曲、片帮、滑移、隆起等位移和形变现

象。地表移动 (Surface movement 或 Ground movement): 是指开采影响波及地表, 引起地表移动变形、裂缝和台阶的现象。当岩层上方有较厚的松散层时, 松散层内也存在移动变形, 称为松散层移动 (Loose or unconsolidated layer movement)。

移动盆地是开采沉陷分布形态的一种整体描述方式。《煤炭科技名词(1996)》^[1] 03 矿山测量及 05 煤矿开采、中华人民共和国标准《煤矿科技术语-开采沉陷(GB/T 15663.7—1995)》^[2]、《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》^[3] 等, 对开采沉陷的相关概念给出了规范术语, 但其条目有限, 术语不全。其他有关文献对岩层与地表移动的概念的定义、描述又不够完整, 表述不够统一, 容易给初学者带来困惑。综合考虑这些标准和文献并根据作者的认识, 本文给出了岩层移动与地表移动相关术语和释义。对岩层与地表移动变形量的变量关系及描述方法进行讨论, 旨在更为系统、更加明确地表述各

沉陷变量的几何意义和数学关系。

1 开采沉陷的移动变形量及其层次关系

矿山开采沉陷是指煤层地下开采引起的岩层移动和地表移动, 有时还有松散层移动, 因此开采沉陷的主体有 3 个: 岩层(煤层上覆岩层与下伏岩层)、地表、松散层。沉陷是对移动变形的一个总体的描述, 按移动变形方式、方向、性质不同, 描述岩层与地表的沉陷状况有 9 个移动变形量 (Variables of movement and deformation), 即竖向移动变形量: 下沉 W (Subsidence)、倾斜 i (Tilt)、竖向变形 ε_z (Vertical deformation)、曲率 K (Curvature)、扭曲 S (Twist); 水平移动变形量: 水平移动 u (Horizontal displacement)、水平变形 ε (Horizontal deformation)、剪切变形 γ (Shear strain)、偏斜 i_z (Deflection)。其中, 下沉、倾斜、曲率, 水平移动、水平变形为通常采用的 5 个基本移动变形变量。各移动变形量的几何意义层次关系如图 1 所示。

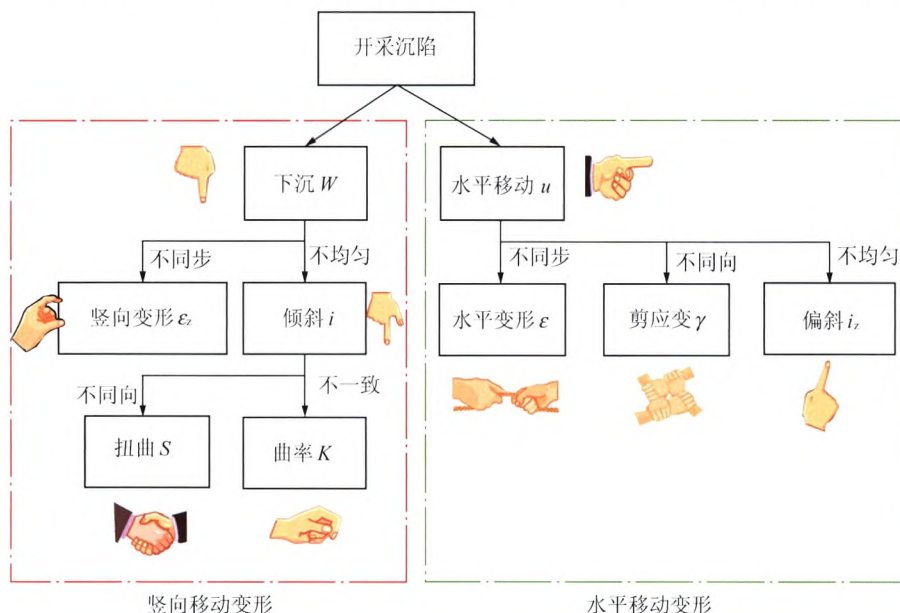


Fig. 1 Hierarchical diagram of displacement and deformation

显然, 各移动变形量之间并不完全独立, 有些变量之间存在函数关系。其关系可以从连续形式(如预计点的移动变形)和分段形式(实测点的移动及点间变形)来建立。根据岩层与地表移动变形量的特征, 本文绘制了移动变形量的图例(图2), 给出了各移动变形量的+/-定义和变量符号。

2 岩层与地表移动变形的描述方法

岩层与地表移动变形可以从多种模式、不同范围、不同方法进行描述。从应用上来看, 主要可按照移动盆地、移动变形主断面、任意点等 3 种模式, 以及

动态和静态 2 种稳定性状态进行描述。

2.1 移动盆地及移动变形量之间的数学关系

通常用移动盆地或下沉盆地来描述岩层与地表移动变形的分布形态, 图 3 所示为单工作面和多工作面开采的岩层与地表移动盆地分布形态。移动盆地 (Movement basin) 用来描述水平移动和下沉在空间上的整体分布形态, 下沉盆地 (Subsidence basin) 用来描述下沉的分布形态。

采动影响区的岩层内或地表上任一点 $P(x, y, z)$, (x, y) 为平面笛卡尔坐标系的坐标, z 轴原点取工作面开采下边界, 其正方向为竖直向下(图 4)。 P 点

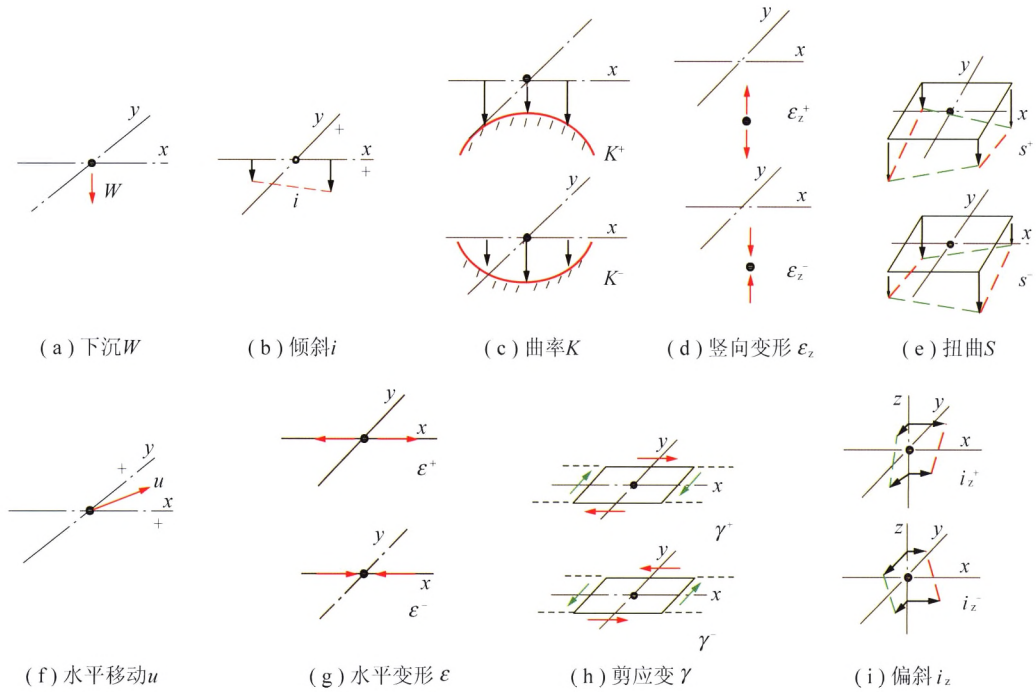


图 2 移动变形量图例

Fig. 2 Legend of displacement and deformation

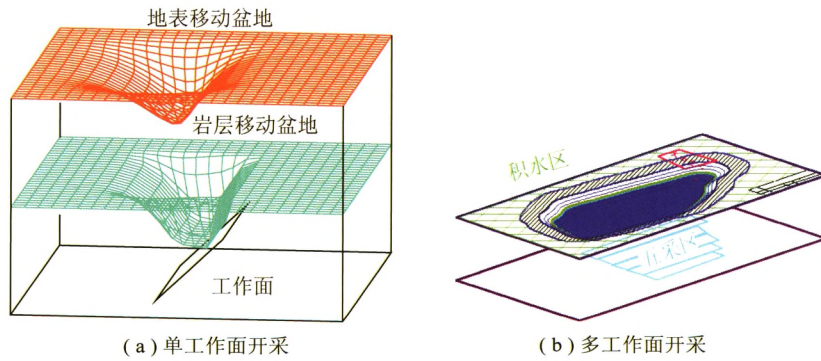


图 3 岩层与地表移动盆地分布形态

Fig. 3 Shape map of strata and surface movement basins

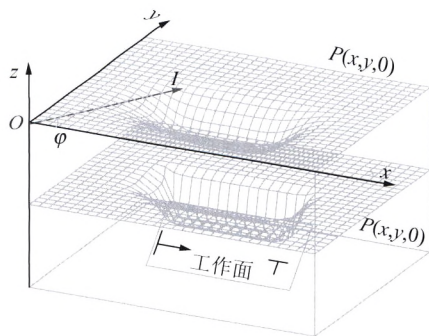


图 4 岩层与地表移动坐标系统

Fig. 4 Coordinate system of strata and surface movement

的下沉和水平移动是 P 点三维坐标的函数,用符号表示为 $W(x, y, z)$ 和 $u(x, y, z)$,下沉值的方向竖直向下,水平移动的方向为平面上某个方向。构成地表移动盆地(图 5)。 $W(x, y, z)$ 就是关于三维坐标的下沉函数,可以用来描述下沉盆地(图 6)。 P 点的其他移动变形

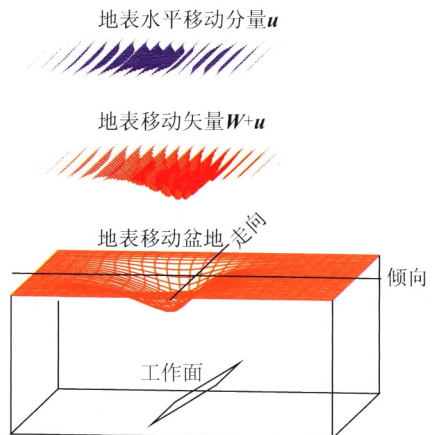


图 5 地表移动盆地及移动矢量

Fig. 5 Surface movement Basin and vector

也有各自的大小和方向,移动盆地内不同坐标的点,均有其对应的移动变形值,构成移动变形的分布。

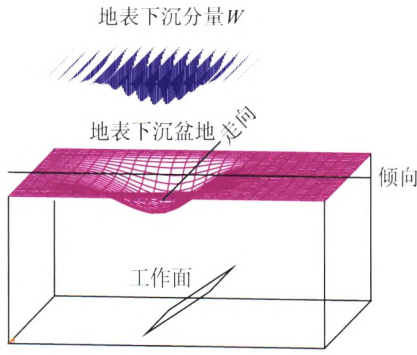


图6 地表下沉盆地及下沉分量

Fig. 6 Surface subsidence basin and vector

岩层或地表点 P 的移动变形基础变量有 2 个: 沿竖向向下的下沉 $W(x, y, z)$ 、在水平面上指向某方向的水平移动 $u(x, y, z)$, 其中 $u(x, y, z)$ 可以在平面上分解为沿不同方向的分类, 如沿 x, y 方向的分量 $u_x(x, y, z), u_y(x, y, z)$, 等等。

基础移动变形量函数为: $W(x, y, z), u_x(x, y, z), u_y(x, y, z)$ 。

P 点沿 x, y 方向的倾斜、曲率、水平变形, 沿竖向的竖向变形 $\varepsilon_z(x, y, z)$ 推导如下:

$$\begin{cases} i_x(x, y, z) = \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial x} \\ K_x(x, y, z) = \frac{\partial i_x(x, y, z)}{\partial x} \\ \varepsilon_x(x, y, z) = \frac{\partial u_x(x, y, z)}{\partial x} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_y(x, y, z) = \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial y} \\ K_y(x, y, z) = \frac{\partial i_y(x, y, z)}{\partial y} \\ \varepsilon_y(x, y, z) = \frac{\partial u_y(x, y, z)}{\partial y} \end{cases} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z(x, y, z) = -\frac{\partial W(x, y, z)}{\partial z} \quad (3)$$

(W 的正方向与 z 轴正方向反向)

P 点沿 x, y 方向的竖向扭曲、水平方向剪切变形函数为

$$\begin{cases} S_x(x, y, z) = \frac{\partial i_y(x, y, z)}{\partial x} \\ S_y(x, y, z) = \frac{\partial i_x(x, y, z)}{\partial y} \\ \gamma_x(x, y, z) = \frac{\partial u_y(x, y, z)}{\partial x} \\ \gamma_y(x, y, z) = \frac{\partial u_x(x, y, z)}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

P 点沿 x, y 方向的偏斜函数为

$$\begin{cases} i_{zx}(x, y, z) = \frac{\partial u_x(x, y, z)}{\partial z} \\ i_{zy}(x, y, z) = \frac{\partial u_y(x, y, z)}{\partial z} \end{cases} \quad (5)$$

由于倾斜 i^2 一般远小于 1, 曲率计算常常进行简化。在《开采沉陷学》中, 曲率与其他移动变形量的数学关系均采取式(6), (7)的简化计算方法。

$$K_x(x, y, z) = \frac{\partial W^2(x, y, z) / \partial x^2}{[1 + i_x^2(x, y, z)]^{3/2}} \approx \frac{\partial W^2(x, y, z)}{\partial x^2} = \frac{\partial i_x(x, y, z)}{\partial x} \quad (6)$$

$$K_y(x, y, z) \approx \frac{\partial W^2(x, y, z)}{\partial y^2} = \frac{\partial i_y(x, y, z)}{\partial y} \quad (7)$$

用三维坐标描述移动变形时, 函数显示比较复杂, 实际中, 常常采用二维 $W(x, y)$ 或一维 $W(x)$ 进行描述, 其关系是: $W(x, y) = W(x, y, z_0), W(x) = W(x, y_0, z_0)$ 。

2.2 水平面上一点 P 的移动变形量之间的数学关系

对于由 $z = z_0$ (z_0 为某确定的 z 值) 的点组成的岩层面或地表, 岩层面上各点的移动变形函数可简化为二维坐标的移动变形。如下沉 $W(x, y)$ 、沿走向 x 和沿倾向 y 的水平移动 $u_x(x, y)$ 和 $u_y(x, y)$ 等。

基础移动变形量函数为: $W(x, y), u_x(x, y), u_y(x, y)$ 。

推导的移动变形量变量函数如下:

(1) P 点沿 x, y 方向的倾斜、曲率、水平变形

$$\begin{cases} i_x(x, y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \\ K_x(x, y) = \frac{\partial i_x(x, y)}{\partial x} \\ \varepsilon_x(x, y) = \frac{\partial u_x(x, y)}{\partial x} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} i_y(x, y) = \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \\ K_y(x, y) = \frac{\partial i_y(x, y)}{\partial y} \\ \varepsilon_y(x, y) = \frac{\partial u_y(x, y)}{\partial y} \end{cases} \quad (9)$$

(2) 竖向变形函数:

$$\varepsilon_z(x, y) = \varepsilon_z(x, y, z_0) \quad (10)$$

(3) P 点沿 x, y 方向的扭曲、剪切变形函数

$$\begin{cases} S_x(x,y) = \frac{\partial i_y(x,y)}{\partial x} \\ S_y(x,y) = \frac{\partial i_x(x,y)}{\partial y} \\ \gamma_x(x,y) = \frac{\partial u_y(x,y)}{\partial x} \\ \gamma_y(x,y) = \frac{\partial u_x(x,y)}{\partial y} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} S_\varphi(x,y) = \frac{\partial i_{\varphi+90^\circ}(x,y)}{\partial l} \\ \gamma_\varphi(x,y) = \frac{\partial u_{\varphi+90^\circ}(x,y)}{\partial l} \end{cases} \quad (14)$$

(4) P 点沿 x, y 方向的偏斜函数

$$\begin{cases} i_{zx}(x,y) = i_{zx}(x,y,z_0) \\ i_{zy}(x,y) = i_{zy}(x,y,z_0) \end{cases} \quad (12)$$

(5) P 点沿任意指定方向 l (l 顺时针旋转至 +x 轴的夹角为 φ) 的倾斜、水平移动、水平变形曲率、扭曲和剪切变形函数, 由方向导数推导:

$$\begin{cases} i_\varphi(x,y) = \frac{\partial W(x,y)}{\partial l} = i_x(x,y) \cos \varphi + i_y(x,y) \sin \varphi \\ u_\varphi(x,y) = u_x(x,y) \cos \varphi + u_y(x,y) \sin \varphi \\ \varepsilon_\varphi(x,y) = \frac{\partial u_\varphi(x,y)}{\partial l} = \varepsilon_x(x,y) \cos^2 \varphi + \varepsilon_y(x,y) \sin^2 \varphi + \gamma(x,y) \sin \varphi \cos \varphi \\ K_\varphi(x,y) = \frac{\partial i_\varphi(x,y)}{\partial l} = K_x(x,y) \cos^2 \varphi + K_y(x,y) \sin^2 \varphi + S(x,y) \sin \varphi \cos \varphi \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} i_x(x) = \frac{\partial W(x)}{\partial x} \\ K_x(x) = \frac{\partial i_x(x)}{\partial x} \\ \varepsilon_x(x) = \frac{\partial u_x(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (15)$$

式中, $i_{\varphi+90^\circ}(x,y), u_{\varphi+90^\circ}(x,y)$ 为沿 $\varphi+90^\circ$ 方向的倾斜和水平移动函数, 可由 $i_\varphi(x,y), u_\varphi(x,y)$ 导出。

2.3 主断面上移动变形量的数学关系

移动剖面 (Subsidence profile) 是指对移动盆地从地表到煤层底板进行切割, 得到的移动变形剖面。地表移动主断面 (Main subsidence profile) 是通过盆地最大下沉点、平行于煤层走向 x 方向或倾向 y 方向的剖面, 由此分为移动盆地走向主断面和倾向主断面。

2.3.1 走向主断面的移动变形函数

移动盆地走向主断面是过盆地最大下沉点、沿 x 方向的剖面。此时 $y=y_0, z=z_0$, 主断面移动变形基础变量函数为下沉 $W(x)$ 、沿走向 x 的水平移动 $u_x(x)$ 。沿走向 x 的倾斜、曲率, 水平变形函数如式 (15), 走向主断面地表各移动变形分布曲线如图 7 所示。

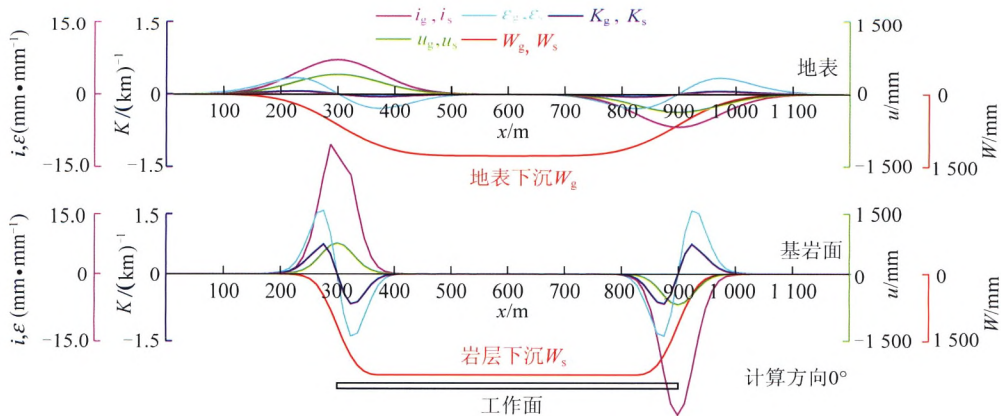


图 7 走向主断面的移动变形曲线

Fig. 7 Displacement and deformation curves along main section of seam strike
($M=3\text{ m}, \alpha=30^\circ, H_1=400\text{ m}, L=600\text{ m}, l=200\text{ m}$)

2.3.2 倾向主断面的移动变形函数

移动盆地倾向主断面是过盆地最大下沉点沿 y 方向的剖面。此时, $x=x_0, z=z_0$, 主断面的基础移动变形量函数为下沉 $W(y)$ 、沿走向 y 的水平移动 $u_y(y)$ 。倾斜、曲率、水平变形函数如式 (16), 倾向主断面地表各移动变形分布曲线如图 8 所示。

$$\begin{cases} i_y(y) = \frac{\partial W(y)}{\partial y} \\ K_y(y) = \frac{\partial i_y(y)}{\partial y} \\ \varepsilon_y(y) = \frac{\partial u_y(y)}{\partial y} \end{cases} \quad (16)$$

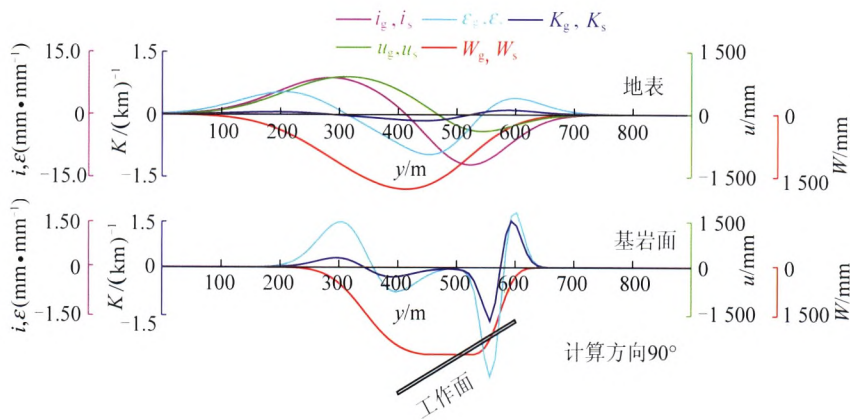


图8 倾向主断面的移动变形曲线

Fig. 8 Displacement and deformation curves along main profile of dip direction

3 地表观测站移动变形量的数学关系

地表移动观测站按性质分为线形观测站和网状观测站,线形观测站又分直线形和折线形观测站。直线形观测站沿煤层走向或倾向呈直线布置,观测地表移动盆地主断面各测点沿走向或倾向的移动变形;折线形观测站则根据地表地形地物等情况呈折线布置。以下分直线形、折线形和网状观测站讨论地表移动变形量的数学关系。

3.1 直线形观测站移动变形计算

直线形地表观测站布置平面如图9所示。图9中A,B,C,D为基准点,布置于沉陷影响区外,测点1,2等沿煤层倾向的近似方向布置。通过水准测量获得各点的高程值(H_n),通过测距获得相邻两点的水平距离(l_{n-1-n}),或者,通过导线测量获得各点的平面坐标(X_n, Y_n)。通过多次重复观测即可测得各点的位置变化,从而计算任意两次之间地表点的移动变形值。

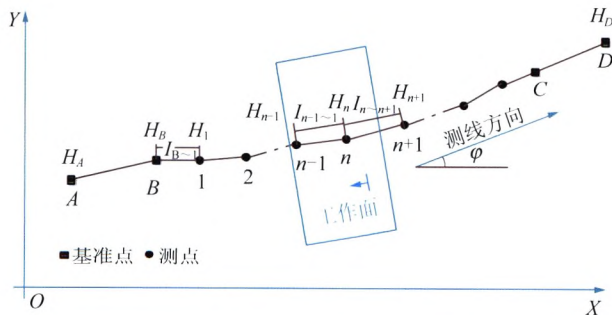


图9 直线形观测站布置

Fig. 9 Layout map of linear observation stations

在 t_1 次(在前)至 t_2 次(在后)观测时段内,地表的移动和变形值可按下列公式计算:

(1) 测点 n 的下沉值

$$W_n = H_n^{(t_1)} - H_n^{(t_2)} \quad (\text{单位 mm, 取整}) \quad (17)$$

(2) 测点 n 沿测线方向 φ 的水平移动值

① 在测距模式下,从基准点 A, B 起算时,各点的水平移动可按以下步骤累计计算:

$$u_{1\varphi} = (l_{B-1}^{(t_2)} - l_{B-1}^{(t_1)})$$

$$u_{2\varphi} = u_{1\varphi} + (l_{1-2}^{(t_2)} - l_{1-2}^{(t_1)})$$

... ..

$$u_{n\varphi} = u_{(n-1)\varphi} + (l_{n-1-n}^{(t_2)} - l_{n-1-n}^{(t_1)}) \quad (\text{单位 mm, 取整}) \quad (18)$$

② 在测坐标模式下,水平移动应按以下步骤分别计算:

$$u_{1x} = (X_1^{(t_2)} - X_1^{(t_1)})$$

$$u_{1y} = (Y_1^{(t_2)} - Y_1^{(t_1)})$$

... ..

$$u_{nx} = (X_n^{(t_2)} - X_n^{(t_1)}) \quad (19)$$

$$u_{ny} = (Y_n^{(t_2)} - Y_n^{(t_1)}) \quad (20)$$

$$u_{n\varphi} = u_{nx} \cos \varphi + u_{ny} \sin \varphi \quad (21)$$

(3) 测点 n 与 $n+1$ 间沿测线方向 φ 的平均倾斜值

$$i_{(n-n+1)\varphi} = \frac{W_{n+1} - W_n}{l_{n-n+1}} \quad (\text{单位 mm/m, 取至 0.1}) \quad (22)$$

(4) 测点 $n-1, n, n+1$ 间沿测线方向 φ 的平均曲率值

$$K_{(n-1-n-n+1)\varphi} = \frac{i_{(n-n+1)\varphi} - i_{(n-1-n)\varphi}}{(l_{n-1-n} + l_{n-n+1})/2} \quad (\text{单位 } 1/\text{km, 取至 0.01}) \quad (23)$$

(5) 测点 n 与 $n+1$ 间沿测线方向 φ 的平均水平变形值

$$\varepsilon_{(n-n+1)\varphi} = \frac{u_{(n+1)\varphi} - u_{n\varphi}}{l_{n-n+1}} \quad (\text{单位 mm/m, 取至 0.1}) \quad (24)$$

式中, $H_n^{(t_1)}, H_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的点 n 的高程, mm; $X_n^{(t_1)}, X_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的点 n 的 X 坐标, mm; $Y_n^{(t_1)}, Y_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的

点 n 的 Y 坐标, mm; l_{n-n+1} 为测点 n 至测点 $n+1$ 的初始水平距离, m 或 mm; φ 为测线方向顺时针至 $+X$ 的夹角, ($^\circ$)。

3.2 折线形观测站移动变形计算

折线形地表观测站布置平面如图 10 所示。折线型观测站各边有各自的指向, 与 X 轴呈不同的夹角(如 $\varphi_{12}, \varphi_{n-n+1}$)。由于水平移动是具有方向性的矢量, 不能沿不同方向累计。因此, 在水平移动计算时, 需先计算沿 X, Y 方向(统一方向)的值, 然后再化算到沿某一指定方向 Ψ 上。倾斜、曲率、水平变形不是矢量但具有方向性, 计算时仍需按此步骤进行。

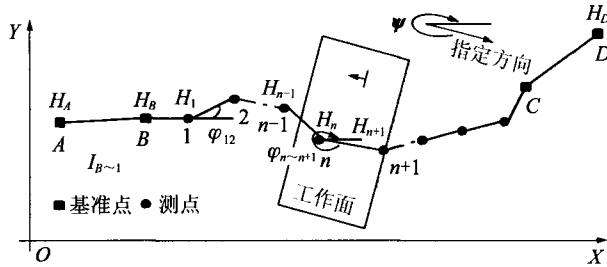


图 10 折线形观测站布置

Fig. 10 Layout map of broken line observation stations

对于折线形观测站, 在 t_1 次(在前)至 t_2 次(在后)观测时段内地表的移动和变形值可按下列公式计算:

(1) 测点 n 的下沉值

$$W_n = H_n^{(t_1)} - H_n^{(t_2)} \quad (\text{单位 mm, 取整}) \quad (25)$$

(2) 测点 n 沿指定方向 Ψ 的水平移动值
首先, 计算各点沿 X, Y 方向的水平移动。

① 在测距模式下, 可从基准点 A, B 起算, 进行累计计算。

$$\begin{aligned} u_{1x} &= (l_{B-1}^{(t_2)} - l_{B-1}^{(t_1)}) \cos \varphi_{B1} \\ u_{1y} &= (l_{B-1}^{(t_2)} - l_{B-1}^{(t_1)}) \sin \varphi_{B1} \\ u_{2x} &= u_{1x} + (l_{1-2}^{(t_2)} - l_{1-2}^{(t_1)}) \cos \varphi_{12} \\ u_{2y} &= u_{1y} + (l_{1-2}^{(t_2)} - l_{1-2}^{(t_1)}) \sin \varphi_{12} \\ &\dots \dots \end{aligned}$$

$$u_{nx} = u_{(n-1)x} + (l_{n-1-n}^{(t_2)} - l_{n-1-n}^{(t_1)}) \cos \varphi_{n-1-n} \quad (26)$$

$$u_{ny} = u_{(n-1)y} + (l_{n-1-n}^{(t_2)} - l_{n-1-n}^{(t_1)}) \sin \varphi_{n-1-n} \quad (27)$$

(单位 mm, 取整)

② 在测坐标模式下, 进行分别计算。

$$\begin{aligned} u_{1x} &= (X_1^{(t_2)} - X_1^{(t_1)}) \\ u_{1y} &= (Y_1^{(t_2)} - Y_1^{(t_1)}) \\ &\dots \dots \\ u_{nx} &= (X_n^{(t_2)} - X_n^{(t_1)}) \quad (28) \end{aligned}$$

$$u_{ny} = (Y_n^{(t_2)} - Y_n^{(t_1)}) \quad (29)$$

然后, 计算测点 n 沿指定方向 Ψ 的水平移动值。

$$u_{n\psi} = u_{nx} \cos \psi + u_{ny} \sin \psi \quad (30)$$

(3) 测点 n 与 $n+1$ 间沿测线方向 Ψ 的平均倾斜值

$$i_{(n-n+1)\psi} = \frac{W_{n+1} - W_n}{l_{n-n+1} \cos \psi} \quad (\text{单位 mm/m, 取至 0.1}) \quad (31)$$

应该注意, 当 Ψ 接近 90° 时, 会出现式(30)分母为零、变形值超大或计算溢出的情况, 因此要注意 Ψ 的取值。

(4) 测点 $n-1, n, n+1$ 间沿测线方向 Ψ 的平均曲率值

$$K_{(n-1-n-n+1)\psi} = \frac{i_{(n-n+1)\psi} - i_{(n-1-n)\psi}}{(l_{n-1-n} + l_{n-n+1}) \cos \psi / 2} \quad (\text{单位 } 1/\text{km, 取至 0.01}) \quad (32)$$

(5) 测点 n 与 $n+1$ 间沿测线方向 Ψ 的平均水平变形值

$$\epsilon_{(n-n+1)\psi} = \frac{u_{(n+1)\psi} - u_{n\psi}}{l_{n-n+1} \cos \psi} \quad (\text{单位 mm/m, 取至 0.1}) \quad (33)$$

式中, $H_n^{(t_1)}, H_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的点 n 的高程, mm; $X_n^{(t_1)}, X_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的点 n 的 X 坐标, mm; $Y_n^{(t_1)}, Y_n^{(t_2)}$ 分别为 t_1 次和 t_2 次测得的点 n 的 Y 坐标, mm; l_{n-n+1} 为测点 n 至测点 $n+1$ 的初始水平距离, m 或 mm; φ_{n-n+1} 为边 $n \sim n+1$ 所指方向顺时针至 $+X$ 的夹角, ($^\circ$); Ψ 为指定方向顺时针至 $+X$ 的夹角, ($^\circ$)。

3.3 网状观测站的移动变形计算

网状观测站由多条纵横交叉的直线观测线组成, 通常布置在地表移动盆地的一端(图 11)。与线形观测站不同, 网状观测站测得的面域数据更能反映移动盆地的全貌和变形细节。根据地表移动基本规律, 在移动盆地走向主断面上地表点沿倾向的移动变形为 0, 在倾向主断面上地表点沿走向的移动变形为 0。可见, 线形观测站对于移动盆地的揭示不够全面, 有

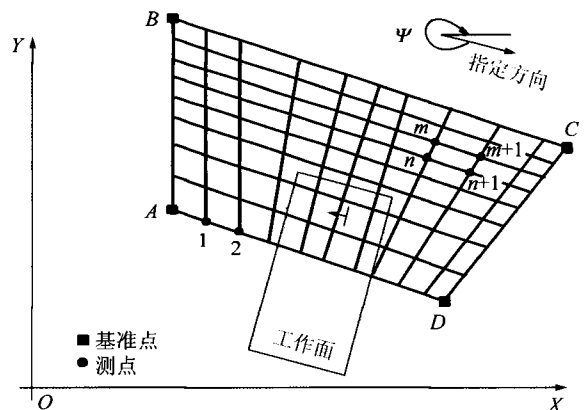


图 11 网状观测站布置

Fig. 11 Layout map of net observation station

一定的局限性;网站观测站为非主断面上的移动变形,特别是为扭曲、剪切变形的计算提供可能。

网状观测站的移动变形计算,可以按直线形观测站的模式计算各直线形观测站的移动变形,包括下沉值、水平移动值、倾斜值、水平变形值、曲率值。网状观测站的扭曲值、剪切变形值可按以下方法计算。

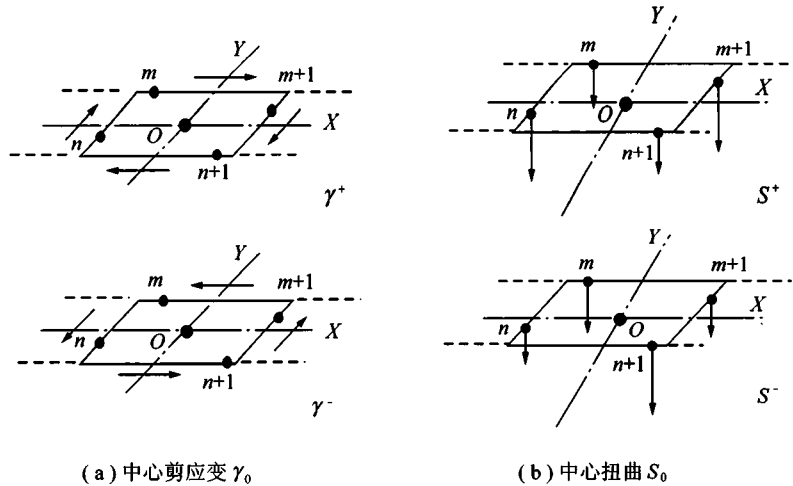


图 12 网状观测站面域中心点的剪切变形、扭曲

Fig. 12 Shear deformations and distortions of the central point of the surface area of net observation stations

3.3.1 面域上的平均剪切变形的计算

以上述 4 测点面域的中心点 O 为计算点,从上往下看,使面域顺时针旋转的剪切变形为“+”,反之为“-”。剪切变形分两部分:沿 X 方向和 Y 方向的剪切变形,计算式为

$$\gamma_0 = \gamma_{OX} + \gamma_{OY} \quad (\text{单位 mm/m, 取至 0.1}) \quad (34)$$

$$\gamma_{OX} = \frac{\Delta \bar{u}_Y}{\Delta \bar{X}} = \frac{(u_{(n+1)Y} - u_{nY}) + (u_{(m+1)Y} - u_{mY})}{(X_{n+1} - X_n) + (X_{m+1} - X_m)} \quad (35)$$

$$\gamma_{OY} = \frac{\Delta \bar{u}_X}{\Delta \bar{Y}} = \frac{(u_{(n+1)X} - u_{nX}) + (u_{(m+1)X} - u_{mX})}{(Y_m - Y_n) + (Y_{m+1} - Y_{n+1})} \quad (36)$$

式中, $\gamma_0, \gamma_{OX}, \gamma_{OY}$ 分别为面域上的平均总剪切变形、沿 X, Y 方向的剪切变形, mm/m ; X_n, Y_n 分别为测点 n 的坐标, m ; $\Delta \bar{X}$ 为 t_1 次观测测点 $n+1, m+1$ 的 X 坐标平均值与测点 n, m 的 X 坐标平均值之差, m ; $\Delta \bar{Y}$ 为 t_1 次观测测点 $m, m+1$ 的 Y 坐标平均值与测点 $n, n+1$ 的 Y 坐标平均值之差, m ; u_{nX}, u_{nY} 分别为 t_1 次至 t_2 次观测测点 n 沿 X 方向、沿 Y 方向的水平移动, mm ; $\Delta \bar{u}_Y$ 为测点 $n+1, m+1$ 沿 X 方向水平移动平均值与测点 n, m 沿 X 方向水平移动平均值之差, mm ; $\Delta \bar{u}_X$ 为测点 $m, m+1$ 沿 Y 方向水平移动平均值与测点 $n, n+1$ 沿 Y 方向水平移动平均值之差, mm 。

3.3.2 面域上的平均扭曲的计算

面域以中心点 O 为计算点,从上往下看,使面域

网状观测站中相邻 4 个测点 $n, m, m+1, n+1$ 组成的面域,如图 11 所示。由于各点间的下沉不均匀、水平移动不同步,带来面域上的扭曲和剪切变形,如图 12 所示。为了避免计算式中分母太小引起分式的值失真,要求所取 4 点形成四边形,而不是三角形或直线。

顺时针旋转的剪切变形为“+”,反之为“-”。剪切变形分由沿 X 方向和 Y 方向两部分组成,计算公式为

$$S_0 = S_{OX} + S_{OY} \quad (\text{单位 } 1/\text{km, 取至 } 0.01) \quad (37)$$

$$S_{OX} = \frac{\Delta \bar{i}_Y}{\Delta \bar{X}} = \frac{i_{(n+1)(m+1)Y} - i_{nmY}}{[(X_{n+1} - X_n) + (X_{m+1} - X_m)]/2} \quad (38)$$

$$S_{OY} = \frac{\Delta \bar{i}_X}{\Delta \bar{Y}} = \frac{i_{m(m+1)X} - i_{n(n+1)X}}{[(Y_m - Y_n) + (Y_{m+1} - Y_{n+1})]/2} \quad (39)$$

式中, S_0, S_{OX}, S_{OY} 分别为面域上的平均总扭曲及沿 X, Y 方向的扭曲, $1/\text{km}$; i_{nX}, i_{nY} 分别为测点 n 沿 X 方向、沿 Y 方向的倾斜, mm/m ; $\Delta \bar{i}_Y$ 为测点 $n+1, m+1$ 沿 X 方向倾斜平均值与测点 n, m 沿 X 方向倾斜平均值之差, mm ; $\Delta \bar{i}_X$ 为测点 $m, m+1$ 沿 Y 方向倾斜平均值与测点 $n, n+1$ 沿 Y 方向倾斜平均值之差, mm 。

4 动态移动变形的描述

4.1 开采沉陷的阶段性与动态性

采区是煤矿开采的基本系统,工作面是煤矿开采的基本单元,一个采区有多个工作面,一个工作面需要推进几个月甚至 $1 \sim 2$ a。因此,开采沉陷影响伴随整个开采过程,经历启动、增值扩展、速度趋缓、基本稳定、二次扰动、最终稳定的移动变形全程。

开采沉陷是岩层、松散层和地表移动的时间-空间过程,开采沉陷具有显著的阶段性和动态性(Staged property)和动态性(Dynamic property),动态性是必然的,阶

段性是相对的。沉陷阶段性表现为采动程度对移动变形程度的不同影响,移动过程中移动变形速度的阶段性变化。沉陷动态性是指移动盆地的不断变化、盆地内某点的移动变形变化全程。

沉陷过程还表现为周期性(Periodicity)和非连续性(Discontinuity)。动态移动变形还表现为同一点在推进工程中移动量的变化、水平变形拉压变化、竖向变形拉压变化、曲率正负性质的变化。

开采影响过程(Influence process)和影响传播过程(Propagation process)中位置关系变化、影响传播过程的动态移动变形,传播过程两者交叉作用,因此动态移动变形的描述十分复杂。

动态移动变形主要表现在 3 个方面:一是开采过程的动态性;二是开采影响传播的动态性;三是相邻开采和外部扰动的后续影响。以下主要分析移动盆地的形成过程和单点的移动过程。

4.2 地表动态移动盆地的描述方法

以一个工作面的开采过程和地表移动动态问题为研究对象,讨论动态移动变形的描述方法。

4.2.1 动态移动变形的双时间变量的设计

地表动态移动变形是开采时间和传播时间的双时间变量的函数。由于开采过程与传播过程不同步,开采停止后传播还在延续,两者是不同的变化过程;两者有一定的关联性,开采过程在前,影响传播过程在后,传播过程有时伴随开采过程,有时独立于开采过程。如果用一个时间变量描述,则难以描述这两个

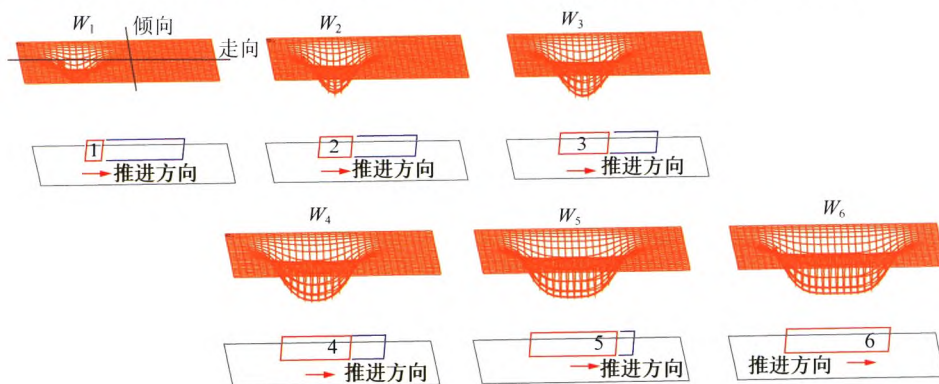


图 13 工作面推进过程地表动态下沉盆地

Fig. 13 Surface dynamic subsidence basin during the advancing process of panel

工作面推进长度是描述动态开采充分性的主要指标,它是开采时间 t_1 的函数。当工作面匀速开采(推进速度为 v)时,推进距离 $l(t_1)$ 可表示为

$$l(t_1) = vt_1 \quad (41)$$

同理,地表点 $P(x, y)$ 在工作面开采时间为 t_1 、影响传播时间为 t_2 时,沿走向和沿倾向的动态水平移动、动态倾斜、动态曲率、动态水平变形函数分别表示

过程所涉及的不同因素和不同的影响机理。因此,定义地表动态移动变形双时间变量如下:

(1) 开采推进时间 t_1 是指工作面开采推进时间,它是描述采动程度和推进位置的时间维度。其计时起点可取研究区首采工作面起采日期;计时终点为工作面推进结束日期。工作面推进历时即为开采时长 T_1 , 开采时间的取值区间为 $t_1 \subseteq [0, T_1]$ 。

(2) 影响传播时间 t_2 是指岩层或地表任意点 P 受采动影响的移动时间,它反映沉陷影响在岩层中的传播时间,是描述竖向影响、反映岩性介质传播特性的时间维度。对于地表点,计时起点为开始下沉(下沉值达到 10 mm)的日期;计时终点为地表点移动基本稳定(6 个月下沉值小于 30 mm)的日期。影响传播时长即是地表点移动延续时间 T_2 , 传播时间的取值区间为 $t_2 \subseteq [0, T_2]$ 。 T_2 取值的经验公式^[3]为

$$\begin{cases} T_2 = 2.5H_0 & H_0 \leq 400 \text{ m} \\ T_2 = 1\,000 \exp\left(1 - \frac{400}{H_0}\right) & H_0 > 400 \text{ m} \end{cases} \quad (40)$$

式中, T_2 为地表点移动延续时间, d; H_0 为工作面平均采深, m。

4.2.2 地表动态移动变形的描述

地表点 $P(x, y)$ 在工作面开采时间为 t_1 、影响传播时间为 t_2 时,下沉为 $W(x, y, t_1, t_2)$ 。地表三维动态下沉盆地如图 13 所示,工作面推进 6 个位置时,下沉盆地呈现不同范围和幅度。

为 $u_x(x, y, t_1, t_2)$ 和 $u_y(x, y, t_1, t_2)$, $i_x(x, y, t_1, t_2)$ 和 $i_y(x, y, t_1, t_2)$, $K_x(x, y, t_1, t_2)$ 和 $K_y(x, y, t_1, t_2)$, $\varepsilon_x(x, y, t_1, t_2)$ 和 $\varepsilon_y(x, y, t_1, t_2)$ 。

走向主断面和倾向主断面上地表动态下沉盆地如图 14 所示,走向主断面上一点 $P(x)$ 在 t_1, t_2 时刻的下沉为 $W(x, t_1, t_2)$; 倾向主断面上一点 $P(y)$ 在 t_1, t_2 时刻的下沉为 $W(y, t_1, t_2)$ 。

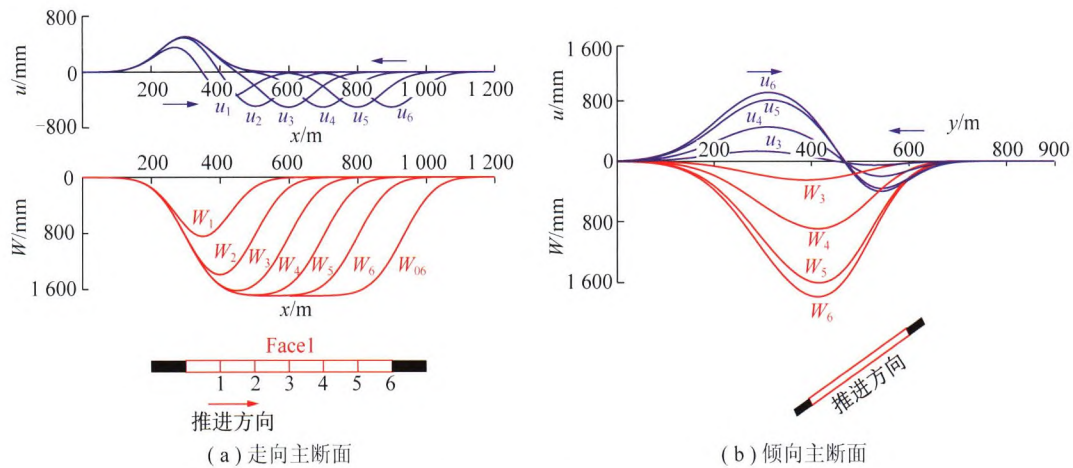


图14 工作面推进过程地表动态下沉和水平移动

Fig. 14 Surface dynamic subsidence and horizontal movement during the advancing process of working face

(M=3 m, $\alpha=30^\circ$, $H_1=400$ m, $L=600$ m, $l=200$ m, $\Delta L=100$ m)

走向主断面上地表点 $P(x)$ 沿走向的动态水平移动、动态倾斜、动态曲率、动态水平变形函数可分别表示为 $u_x(x, t_1, t_2)$, $i_x(x, t_1, t_2)$, $K_x(x, t_1, t_2)$ 和 $\varepsilon_x(x, t_1, t_2)$ 。

倾向主断面上地表点 $P(x)$ 沿倾向的动态水平移动、动态倾斜、动态曲率、动态水平变形函数分别表示为 $u_y(y, t_1, t_2)$, $i_y(y, t_1, t_2)$, $K_y(y, t_1, t_2)$ 和 $\varepsilon_y(y, t_1, t_2)$ 。

4.2.3 动态移动变形与静态移动变形的关系

静态移动变形是相应的动态移动变形的极限形式,即当沉陷基本稳定或完全稳定时,动态移动变形就收敛于静态移动变形。根据稳定性的评价指标,可得到静态下沉 $W(x, y)$ 与动态下沉 $W(x, y, t_1, t_2)$ 的数学关系为

$$W(x, y) = W(x, y, T_1, T_2) \quad (42)$$

或(考虑传播时间在理论上的无限性)

$$W(x, y) = \lim_{t_2 \rightarrow \infty} W(x, y, T_1, t_2) \quad (43)$$

其他静态移动变形与相应的动态移动变形的关系,与以上数学关系相同。

5 结 论

(1)在诸多参考文献的基础上,系统总结了岩层与地表移动变形量的时空关系,阐明了《开采沉陷学》的3个主体(岩层、地表、松散层)、9个移动变形量,总结提出了开采沉陷的3种描述模式和2种稳定性状态的描述方法。

(2)按照移动盆地、主断面、任意点等描述模式,给出了各移动变形量之间数学关系的函数式;给出了直线形、折线形、网状观测站地表移动变形量的计算关系式。

(3)论述了工作面开采过程中地表动态移动变形与变化的推进位置、开采影响的传播过程的时空关系,提出了双变量(开采推进时间、影响传播时间)的动态移动变形描述方法。

(4)通过典型地质采矿条件的图件展示沉陷变量的大小、单位、取位,制作了移动变形量图例。成果可为开采沉陷观测分析、预计模型研究提供参考。

致谢 感谢邓喀中教授对本文提出的指导意见!

参考文献(References):

- [1] 煤炭科技名词审定委员会. 煤炭科技名词[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [2] 全国煤炭标准化技术委员会. 煤矿科技术语-开采沉陷 GB/T 15663.7—2008[S]. 北京:煤炭出版社,1995.
- [3] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京:煤炭工业出版社,2017.
- [4] 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1991.
- [5] 煤炭科学研究总院北京开采所. 煤矿地表移动与覆岩破坏规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1986.
- [6] 阿维尔申 C Г. 煤矿地下开采时的岩层移动[M]. 北京:煤炭工业出版社,1959.
- [7] National Coal Board. Subsidence Engineers' Handbook[M]. London:National Coal Board Mining Department,1975.
- [8] KRATZSCH H. Mining Subsidence Engineering[M]. New York: Translated by R. F. S. Fleming. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1983.
- [9] PENG S S. Surface Subsidence Engineering[M]. Colorado: Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton,1992.
- [10] 邓喀中,谭志强,姜岩,等. 变形监测及沉陷工程学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2014.