

倾向主断面地表残余移动变形数学模型

朱广轶¹,侯杰¹,陈瑞三²,吕士华³

(1. 沈阳大学建筑工程学院,辽宁 沈阳 110044;2. 沈阳建筑大学城市发展研究院,辽宁 沈阳 110168;
3. 北京建达道桥咨询有限公司,北京 100016)

摘要 目的 研究走向长壁冒落式开采的老采区地表沉陷盆地倾向主断面残余移动变形. 方法 通过对倾向主断面覆岩冒落、断裂、离层、弯曲过程的机理分析,采用概率积分法、随机介质理论和等影响原理构造了倾向主断面地表残余移动变形的数学模型,并采用实际观测数据与预测数据对比、不同数学模型分析对比两种方式进行了数学模型的验证. 结果 缓倾斜煤层和大倾角煤层倾向主断面实际观测数据与预测模型计算的误差均在允许范围10%以内. 得出倾向主断面地表残余下沉、倾向主断面地表残余倾斜变形、倾向主断面地表残余曲率变形、倾向主断面地表残余水平移动、倾向主断面地表残余水平变形数学模型. 结论 各数学模型不仅能够把矿区已有岩移参数转化为残余移动变形预测参数,而且可以定量描述倾斜煤层倾向主断面地表残余移动变形规律,可推广性强.

关键词 老采区;倾向主断面;地表残余移动变形;机理;数学模型

中图分类号 TU454;TD325

文献标志码 A

Mathematical Models of Residual Movement and Deformation of Surface in Inclined Main Section

ZHU Guangyi¹, HOU Jie¹, CHEN Ruisan², Lü Shihua³

(1. School of Architecture and Engineering, Shenyang University, Shenyang, China, 110044; 2. Institute of Urban Development, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Beijing Jianda Road and Bridge Consulting Co. Ltd, Beijing, China, 100016)

Abstract: Residual movement and deformation in inclined main section of surface subsidence basin in the old mining area mined by along strike longwall with caving is a hot research content of mining subsidence. Based on the study of the mechanism of overlying rock falling, breaking, separating and bending, mathematical models of residual movement and deformation of surface in inclined main fracture surface is constructed by probability integral method, stochastic medium theory and equal influence principle, and are verified by two ways, including the comparison of the actual observation data with the prediction data and the analysis and comparison of the different mathemati-

收稿日期:2019-01-11

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFF0213304);辽宁省自然科学基金项目(20170540651,2017054649)

作者简介:朱广轶(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事岩石力学方面研究.

cal models. The results show that the errors between the actual observation data and the prediction models calculation of gently inclined coal seam large angle inclined coal seam are within the allowable range of 10%. It is obtained that mathematical models of residual subsidence of surface, residual slope deformation of surface, residual curvature deformation of surface, residual horizontal movement of surface and residual horizontal deformation of surface in inclined main section. These mathematical models can not only transform the existing rock movement parameters into the prediction parameters of residual movement deformation parameters, but also quantitatively describe the residual movement and deformation law of the main section in inclined coal seam. And all of mathematical models have a high generalizability.

Key words: old goaf; inclined main section; residual movement and deformation of surface; mechanism; mathematical models

我国现行规范^[1-2]中没有涉及老采区残余移动变形数学模型问题。X. L. Yao 等^[3]认为,在外界因素影响下,采空区地表“稳定”后,地表仍会继续发生残余移动变形,可能对建筑物产生破坏,甚至引发地表塌陷。王正帅等^[4-5]指出,房柱式开采的老采空区残余下沉将会发生在 50 a 或更长时间。朱广轶等^[6-7]提出了地表残余移动变形的定义,并把残余移动变形分成两个阶段:第 1 阶段,连续 6 个月下沉不超过 30 mm 之后,各种移动变形增量逐渐趋于零的过程,此阶段地表变形对建筑物影响可以忽略;第 2 阶段,在外来因素影响下,老采区覆岩被活化,地表继续产生移动变形,此变形一般对地表建筑物产生有害影响。实质上,第 1 阶段形成了稳定的覆岩结构^[8],而第 2 阶段的地表残余变形是在外来因素影响下该覆岩结构的再次演变过程。朱广轶等^[9]研究了倾向开采倾向主断面的地表残余移动变形。对采空区岩体结构变化应用力学分析^[10]方法,以及覆岩移动规律的研究应用数值模拟分析方法^[11-12],要满足工程要求的定量分析的精度,推荐使用数学方法计算。开采沉陷现阶段数学模型^[6]研究的是走向主断面,对于倾向主断面地表残余移动变形观测研究极少。笔者在研究走向主断面残余移动变形的基础上,分析倾斜煤层走向长壁式开采、冒落式顶板管理的老采区沉陷盆地倾向主断面地表残余移动变形机

理,构造其定量分析的数学模型。

1 倾向主断面地表残余移动变形机制

走向长壁冒落式开采的老采区地表残余移动变形的大小和形态不仅取决于覆岩岩性、赋存状态,还取决于老采区的开采厚度以及冒落带、裂缝带和弯曲带的压实程度。对于覆岩岩性、赋存状态可用岩移参数反映;对于开采厚度以及冒落带、裂缝带和弯曲带的压实程度采用等效采厚反映;煤层倾角 α 对采动覆岩破坏的影响表现在其使覆岩破坏产生的形态不同,分为水平及缓倾斜煤层、大倾角煤层两类^[13]类型(见图 1)。图中, S_1 为下山方向的拐点偏距, S_2 为上山方向的拐点偏距; H_m 为冒落带高度, H_{fl} 为导水裂缝带高度。

(1) 缓倾斜煤层($\alpha < 36^\circ$)。在自重作用下,上覆岩层冒落带的中间区被挤密(见图 1(a)),拐点偏距 S_1 和 S_2 是覆岩由于悬臂现象而产生的空洞宽度。因上山方向拐点偏距 S_2 和下山方向拐点偏距 S_1 存在,故计算时可采用近似于水平煤层的计算方法。而在静态分析中,求取倾向的计算长度 L 时,采空区下边界和上边界的拐点偏距 S_1 和 S_2 须被减去,再乘以与煤层倾角 α 有关的系数。

在采用等效采厚来计算煤层倾向主断面产生的残余移动变形时,假设岩层移动结束后所有的采动空洞和空隙均被充分充填并压

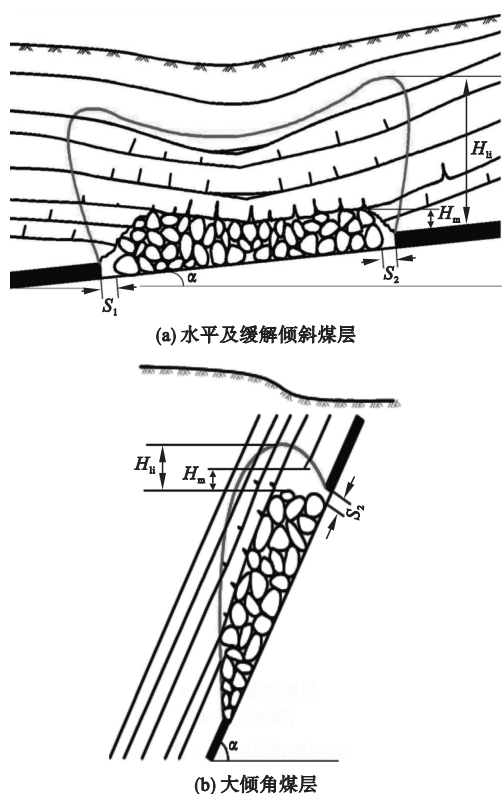


图1 倾向煤层覆岩破坏形态

Fig. 1 The failure mode of overlying strata in inclined coal seam

实. 故必须计算拐点偏距处空洞产生的沉陷影响; 包括残余下沉的最大下沉值不会超过采厚与煤层倾角余弦乘积的值. 而煤层倾向出现残余移动变形前, 拐点偏距处为空洞、老采区中间区段为未压实区. 故残余下沉系数不可采用采空区静态下沉系数 q . 则未压实区与空洞区的等效采厚计算表达式为

$$M_1 = M(1 - q), \quad (1)$$

$$M_2 = M. \quad (2)$$

式中: M_1 为空区未压实区等效采厚; M_2 为空洞部分等效采厚; M 为煤层采厚.

(2) 大倾角煤层 ($\alpha \geq 36^\circ$). 顶板冒落岩石块落到采空区底板后, 由于平行于底板方向的自重力分力的作用, 岩块向采空区下边界滚动^[14-15], 并将下边界填满, 抑制了下边界顶板的继续冒落 (见图 1(b)). 由于采空区下边界拐点偏距处的空洞会随着冒落、滚动岩石块的堆积而逐渐被填充、压密, 因此下

边界拐点偏距 S_1 的大小将趋于 0, 而上边界的空洞空间由于冒落和岩石块流失而变大, 促使了顶板的继续冒落, 采空区上边界的拐点偏距处的空间会形成一个拱梁式的空洞, 并达到新的平衡状态. 故除了沿煤层顶板法线方向的破坏外, 采空区上边界的岩层破坏显著增大. 亦即, 在大倾角条件下, 采空区下边界岩层破坏高度及其地表残余移动变形将减弱, 而上边界岩层破坏高度及其地表残余移动变形将增大. 为方便倾向主断面残余移动变形的计算, 厚度同样采用等效采厚, 其形成的平均厚度要大于原来的开采厚度, 其计算可以使用冒落带的最大高度求得.

2 倾向主断面地表残余移动变形数学模型

2.1 单元开采的地表残余下沉

由于岩体中有一系列原生的和开采引起的裂隙面和其他非连续面, 将覆岩假设为非连续随机介质模型^[13], 整个开采长度对地表的影响等于许多个无限小开采单元对地表影响的总和. 开采厚度及宽度都为一个无穷小单位的范围, 称开采单元. 单元开采形成的盆地称单元盆地. 单元盆地中的下沉称为单元下沉, 用 W_e 表示, 其计算模型^[13]为

$$W_e(x) = \frac{1}{r} e^{-\frac{x^2}{r^2}}. \quad (3)$$

式中: $W_e(x)$ 为走向主断面单元开采引起的地表下沉值; r 为主要影响半径; x 为走向主断面地表任意一点的坐标.

根据式 (3) 将走向主断面的数学模型, 推广到倾向主断面的数学模型为

$$W_e(y) = \frac{1}{r} e^{-\frac{y^2}{r^2}}. \quad (4)$$

式中: $W_e(y)$ 为倾向主断面单元开采引起的地表下沉值; y 为倾向主断面地表任意一点的坐标.

2.2 半无限开采残余下沉预计

根据半无限开采时, 地表移动盆地走向

主断面的移动和变形预计公式,得倾向主断面地表残余移动变形计算式。

(1)倾向主断面残余下沉预计计算

$$W_c(y) = \frac{W_0}{2} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{\pi}}{r}y\right) + 1 \right]. \tag{5}$$

式中: $W_c(y)$ 倾向主断面残余下沉值; W_0 为地表最大下沉值。

(2)倾向主断面残余倾斜预计计算

对式(5) $W_c(y)$ 求一阶导数,可得:

$$i_c(y) = \frac{dW_c(y)}{dy} = \frac{W_0}{r} e^{-\frac{\pi y^2}{r^2}}. \tag{6}$$

式中: $i_c(y)$ 倾向主断面残余倾斜值。

(3)倾向主断面残余曲率预计计算

对式(6) $i_c(y)$ 求一阶导数,可得:

$$K_c(y) = \frac{di_c(y)}{dy} = -\frac{2\pi W_0}{r^3} y e^{-\frac{\pi y^2}{r^2}}. \tag{7}$$

式中: $K_c(y)$ 倾向主断面残余曲率值。

(4)倾向主断面残余水平移动预计计算

根据半无限开采,走向主断面地表盆地水平移动的公式,得倾向主断面地表残余水平移动式

$$U_c(y) = bW_0 e^{-\frac{\pi y^2}{r^2}}. \tag{8}$$

式中: $U_c(y)$ 倾向主断面残余水平移动值; b 为水平移动系数。

(5)倾向主断面残余水平变形预计计算

对式(8) $U_c(y)$ 求一阶导数,可得:

$$\varepsilon_c(y) = \frac{dU_c(y)}{dy} = \frac{di_c(y)}{dy} = -\frac{2\pi bW_0}{r^2} y e^{-\frac{\pi y^2}{r^2}}. \tag{9}$$

式中: $\varepsilon_c(y)$ 倾向主断面残余水平变形值。

2.3 有限开采时倾向主断面地表残余移动变形预计

2.3.1 缓倾斜煤层

有限开采条件下倾向主断面 CD 区地表残余移动变形如图 2 所示。由于残余移动变形开始前,地表移动存在拐点偏距 S_1 、 S_2 处的空洞,故将开采煤层划分为 AC 、 CD 、 DB 3 个区段来分析。设工作面 A 处对应的地表点为坐标原点 o , C 、 D 、 B 分别对应地表点 o_1 、 o_2 、 o_3 , A 、 B 为实际开采边界,由于顶板悬臂作用,计算边界 A 、 B 处的下山、上山拐点偏距分别为 S_1 、 S_2 。与水平煤层拐点偏距所处位置不同,由于煤层倾角的影响,点 C 到上山无穷远处的点 G 之间煤层的半无限开采拐点偏距向下山方向偏移至 C' 处。 α 为煤层倾角, θ_0 为开采影响传播角。

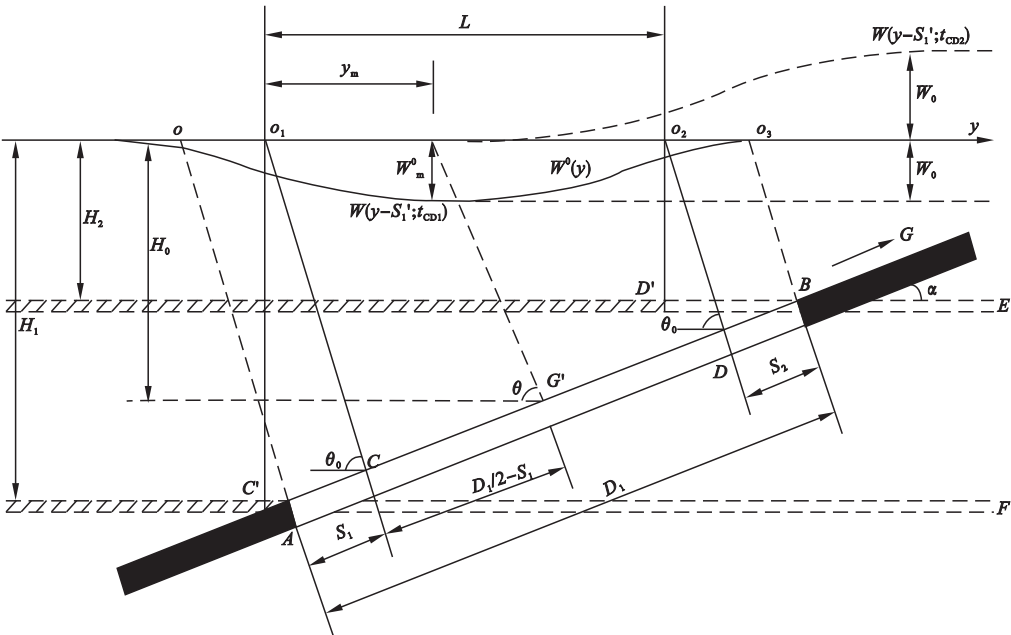


图2 有限开采条件下倾向主断面 CD 区地表残余移动变形

Fig. 2 Surface residual movement and deformation in the CD area of the main section in the condition of limited mining

半无限开采条件下, DG 引起的地表下沉曲线的拐点偏距位于点 o_2 处。计算等影响原理为: CF 的开采与 CG 的开采引起的地表移动和变形是相同的, 即 CF 与 CG 开采等影响。同理, DE 与 DG 为等影响。在 CD 内的开采对地表的影响等于 CG 与 DG 开采影响之差, 即为 CF 与 DE 开采影响之差。因此, 需要分别计算出 CF 与 DE 引起的地表移动和变形, 再求出它们的差, 即为有限开采条件下 CD 引起的地表残余移动和变形。同理, 可求得下山拐点偏距 AC 段煤层开采、上山拐点偏距 DB 段煤层开采引起的地表残余变形。缓倾斜煤层倾向主断面地表残余移动变形即为下山 (AC 段)、 CD 段、上山 (DB 段) 引起的地表残余移动变形之和。

(1) 倾向主断面地表残余下沉

$$W_c(y) = C_{xm} [W_{AC1}(y; t_{AC1}) - W_{AC2}(y - S'_1; t_{AC2})] + C_{xm} [W_{CD1}(y - S'_1; t_{CD1}) - W_{CD2}(y - S'_1 - L; t_{CD2})] + C_{xm} [W_{DB1}(y - S'_1 - L; t_{DB1}) - W_{DB2}(y - S'_1 - L - S'_2; t_{DB2})]. \quad (10)$$

式中: C_{xm} 为走向采动程度影响系数; S'_1 为下山拐点偏距对应地表的水平距离; S'_2 为上山拐点偏距对应地表的水平距离; L 为 CD 长度对应的地标水平距离, $W_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $W_{AC2}(y - S'_1; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余下沉表达式; $W_{CD1}(y - S'_1; t_{CD1})$ 和 $W_{CD2}(y - S'_1 - L; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余下沉表达式; $W_{DB1}(y - S'_1 - L; t_{DB1})$ 和 $W_{DB2}(y - S'_1 - L - S'_2; t_{DB2})$ 为 DB 区间下山方向和上山方向的残余下沉表达式; t_{AC1} 、 t_{AC2} 表示计算区域 AC 的下山边界、上山边界分别用其各自的相应参数; t_{CD1} 、 t_{CD2} 表示计算区域的 CD 下山边界、上山边界分别用其各自的相应参数; t_{DB1} 、 t_{DB2} 表示计算区域 DB 下山边界、上山边界分别用其各自的相应参数。

式(10)中各表达式计算式为

$$\begin{cases} W_{AC1}(y - S'_1; t_{AC1}) = \frac{M_{AC} q_{AC} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{AC1}} y \right] + 1 \right\}, \\ W_{AC2}(y - S'_1; t_{AC2}) = \frac{M_{AC} q_{AC} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{AC2}} (y - S'_1) \right] + 1 \right\}, \\ W_{CD1}(y - S'_1; t_{CD1}) = \frac{M_{CD} q_{CD} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{CD1}} (y - S'_1) \right] + 1 \right\}, \\ W_{CD2}(y - S'_1 - L; t_{CD2}) = \frac{M_{CD} q_{CD} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{CD2}} (y - S'_1 - L) \right] + 1 \right\}, \\ W_{DB1}(y - S'_1 - L; t_{DB1}) = \frac{M_{DB} q_{DB} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{DB1}} (y - S'_1 - L) \right] + 1 \right\}, \\ W_{DB2}(y - S'_1 - L - S'_2; t_{DB2}) = \frac{M_{DB} q_{DB} \cos \alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{DB2}} (y - S'_1 - L - S'_2) \right] + 1 \right\}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: α 为煤层倾角; M_{AC} 、 M_{CD} 、 M_{DB} 分别为 AC 、 CD 、 DB 区间的等效采厚; q_{AC} 、 q_{CD} 、 q_{DB} 分别为 AC 、 CD 、 DB 区间的残余下沉系数; r_{AC1} 、 r_{AC2} 为 AC 区间的下山、上山方向开采影响半径; r_{CD1} 、 r_{CD2} 为 CD 区下山、上山方向的开采影响半径; r_{DB1} 、 r_{DB2} 为 DB 区下山、上山方向的开采影响半径。

当煤层开采沿走向方向未达到充分时, C_{xm} 是不大于 1 的走向采动程度系数; 当走向方向达到充分时, C_{xm} 的值取 1。

$$C_{xm} = \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{1}{r} \right), \quad (12)$$

$$l = D_3 - S_3 - S_4. \quad (13)$$

式中: D_3 为开采工作面的走向长度; S_3 、 S_4 分别为工做面走向左侧的拐点偏距、右侧的拐点偏距; r 为走向主断面的开采影响半径。

S'_1 、 S'_2 为 S_1 、 S_2 对应的地表水平距离计算式为

$$S'_1 = S_1 \frac{\sin(\alpha + \theta_0)}{\sin \theta_0}, \quad (14)$$

$$S_2' = S_2 \frac{\sin(\alpha + \theta_0)}{\sin\theta_0}. \tag{15}$$

M_{AC} 、 M_{DB} 、 M_{CD} 为对应区域的等效采厚计算.

$$M_{AC} = M_{DB} = M, \tag{16}$$

$$M_{CD} = M(1 - q). \tag{17}$$

q_{AC} 、 q_{DB} 、 q_{CD} 为对应区域的残余下沉系数计算式为

$$q_{AC} = q_{DB} = 1, \tag{18}$$

$$q_{CD} = 1 - q. \tag{19}$$

L 计算式为

$$L = (D_1 - S_1 - S_2) \frac{\sin(\theta_0 + \alpha)}{\sin\theta_0}. \tag{20}$$

式中: D_1 为倾向主断面的长度, θ_0 为开采影响传播角.

(2) 倾向主断面地表残余倾斜变形

$$i_c(y) = C_{xm} [i_{AC1}(y; t_{AC1}) - i_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})] + C_{xm} [i_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) - i_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})] + C_{xm} [i_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) - i_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})]. \tag{21}$$

式中: $i_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $i_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})$ 为AC区间下山方向和上山方向的残余倾斜表达式; $i_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1})$ 和 $i_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})$ 为CD区间下山方向和上山方向的残余倾斜表达式; $i_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1})$ 和 $i_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})$ 为DB区间下山方向和上山方向的残余倾斜表达式.

式(21)中各表达式计算式为

$$\begin{cases} i_{AC1}(y; t_{AC1}) = \frac{M_{AC} q_{AC} \cos\alpha}{r_{AC1}} e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}}, \\ i_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) = \frac{M_{AC} q_{AC} \cos\alpha}{r_{AC2}} e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{AC2}^2}}, \\ i_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) = \frac{M_{CD} q_{CD} \cos\alpha}{r_{CD1}} e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{CD1}^2}}, \\ i_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) = \frac{M_{CD} q_{CD} \cos\alpha}{r_{CD2}} e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{CD2}^2}}, \\ i_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) = \frac{M_{DB} q_{DB} \cos\alpha}{r_{DB1}} e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{DB1}^2}}, \\ i_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) = \frac{M_{DB} q_{DB} \cos\alpha}{r_{DB2}} e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L - S_2')^2}{r_{DB2}^2}}. \end{cases} \tag{22}$$

(3) 倾向主断面地表残余曲率变形

$$K_c(y) = C_{xm} [K_{AC1}(y; t_{AC1}) - K_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})] + C_{xm} [K_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) - K_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})] + C_{xm} [K_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) - K_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})]. \tag{23}$$

式中: $K_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $K_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})$ 为AC区间下山方向和上山方向的残余曲率表达式; $K_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1})$ 和 $K_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})$ 为CD区间下山方向和上山方向的残余曲率表达式; $K_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1})$ 和 $K_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})$ 为DB区间下山方向和上山方向的残余曲率表达式.

式(23)中各表达式计算式为

$$\begin{cases} K_{AC1}(y; t_{AC1}) = -\frac{2\pi M_{AC} q_{AC} \cos\alpha}{r_{AC1}^3} y e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}}, \\ K_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) = -\frac{2\pi M_{AC} q_{AC} \cos\alpha}{r_{AC2}^3} (y - S_1') e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{AC2}^2}}, \\ K_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) = -\frac{2\pi M_{CD} q_{CD} \cos\alpha}{r_{CD1}^3} (y - S_1') e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{CD1}^2}}, \\ K_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) = -\frac{2\pi M_{CD} q_{CD} \cos\alpha}{r_{CD2}^3} (y - S_1' - L) e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{CD2}^2}}, \\ K_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) = -\frac{2\pi M_{DB} q_{DB} \cos\alpha}{r_{DB1}^3} (y - S_1' - L) e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{DB1}^2}}, \\ K_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) = -\frac{2\pi M_{DB} q_{DB} \cos\alpha}{r_{DB2}^3} (y - S_1' - L - S_2') e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L - S_2')^2}{r_{DB2}^2}}. \end{cases} \tag{24}$$

(4) 倾向主断面地表残余水平移动

$$U_c(y) = C_{xm} [U_{AC1}(y; t_{AC1}) - U_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})] + C_{xm} [U_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) - U_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})] + C_{xm} [U_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) - U_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})]. \tag{25}$$

式中: $U_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $U_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})$ 为AC区间下山方向和上山方向的残余水平移动表达式, $U_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1})$ 和 $U_{CD2}(y - S_1' - L;$

t_{CD2}) 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余水平移动表达式, $U_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1})$ 和 $U_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})$ 为 DB 区间下山方向和上山方向的残余水平移动表达式.

式(25)中各表达式计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} &U_{AC1}(y; t_{AC1}) = M_{AC} q_{AC} \cos \alpha b_1 e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}} + \\ &W_{AC1}(y; t_{AC1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &U_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) = M_{AC} q_{AC} \\ &\quad \cos \alpha b_1 e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{AC2}^2}} + W_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &U_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) = M_{CD} q_{CD} \\ &\quad \cos \alpha b_1 e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{CD1}^2}} + W_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &U_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) = M_{CD} q_{CD} \\ &\quad \cos \alpha b_2 e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{CD2}^2}} + W_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &U_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) = M_{DB} q_{DB} \cos \alpha b_2 e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{DB1}^2}} + \\ &W_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &U_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) = \\ &M_{DB} q_{DB} \cos \alpha b_2 e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L - S_2')^2}{r_{DB2}^2}} + \\ &W_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) \operatorname{ctg} \theta_0. \end{aligned} \right. \quad (26)$$
$$\left\{ \begin{aligned} &\varepsilon_{AC1}(y; t_{AC1}) = -\frac{2\pi b_1 M_{AC} q_{AC} \cos \alpha}{r_{AC1}^2} y e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}} + \\ &i_{AC1}(y; t_{AC1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &\varepsilon_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) = -\frac{2\pi b_1 M_{AC} q_{AC} \cos \alpha}{r_{AC2}^2} \cdot \\ &(y - S_1') e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{AC2}^2}} + i_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &\varepsilon_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) = -\frac{2\pi b_1 M_{CD} q_{CD} \cos \alpha}{r_{CD1}^2} \cdot \\ &(y - S_1') e^{-\pi \frac{(y - S_1')^2}{r_{CD1}^2}} + i_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &\varepsilon_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) = -\frac{2\pi b_2 M_{CD} q_{CD} \cos \alpha}{r_{CD2}^2} \cdot \\ &(y - S_1' - L) e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{CD2}^2}} + i_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &\varepsilon_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) = -\frac{2\pi b_2 M_{DB} q_{DB} \cos \alpha}{r_{DB1}^2} \cdot \\ &(y - S_1' - L) e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L)^2}{r_{DB1}^2}} + i_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ &\varepsilon_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) = -\frac{2\pi b_2 M_{DB} q_{DB} \cos \alpha}{r_{DB2}^2} \cdot \\ &(y - S_1' - L - S_2') e^{-\pi \frac{(y - S_1' - L - S_2')^2}{r_{DB2}^2}} + \\ &i_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2}) \operatorname{ctg} \theta_0. \end{aligned} \right. \quad (28)$$

式中: b_1 、 b_2 分别为下山方向水平移动系数、上山方向水平移动系数.

(5) 倾向主断面地表残余水平变形

$$\varepsilon_c(y) = C_{xm} [\varepsilon_{AC1}(y; t_{AC1}) - \varepsilon_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})] + C_{xm} [\varepsilon_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1}) - \varepsilon_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})] + C_{xm} [\varepsilon_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1}) - \varepsilon_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})]. \quad (27)$$

式中: $\varepsilon_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $\varepsilon_{AC2}(y - S_1'; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余水平变形表达式, $\varepsilon_{CD1}(y - S_1'; t_{CD1})$ 和 $\varepsilon_{CD2}(y - S_1' - L; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余水平变形表达式, $\varepsilon_{DB1}(y - S_1' - L; t_{DB1})$ 和 $\varepsilon_{DB2}(y - S_1' - L - S_2'; t_{DB2})$ 为 DB 区间下山方向和上山方向的残余水平变形表达式.

式(27)中各表达式计算式为

2.3.2 大倾角煤层

依据图1(b)的倾向主断面大倾角煤层残余变形机制构建图3所示的大倾角煤层计算模型.从图3可以看出,由于煤层倾角的影响,采空区上山方向覆岩冒落向下山方向滚动,使上山方向的空洞增大,冒落充分形成空间 L_2 ,而下山方向由于上山方向滚落的岩石抑制了下山方向覆岩冒落,使下山方向冒落岩石量减少,充填压密形成空间 L_1 ,最终可形成三角形 ADE 的冒落岩层.冒落岩层 ADE 区域的面积与冒落岩石的碎胀系数 K 乘积等于 ACE 的面积加上 L_1 长度上的采空区煤层的矩形面积^[16],其中 L_1 和 L_2 大小的计算式为

$$\frac{D_1 \cdot H_m \cdot K}{2} = L_1 \cdot M + \frac{H_m \cdot L_1}{2} = \frac{(H_m + 2M)}{2} \cdot L_1. \quad (29)$$

式中: H_m 为冒落带的最大高度; K 为冒落岩石的碎胀系数.

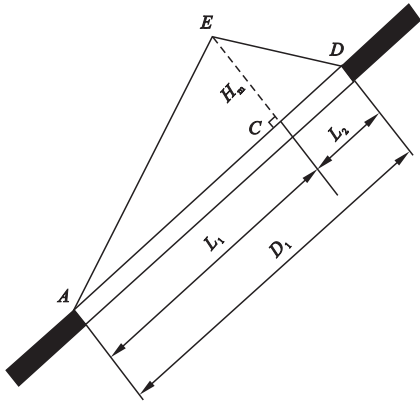


图3 有限开采条件下地表残余下沉计算模型
Fig. 3 Calculation model of surface residual subsidence in the condition of limited mining

当覆岩岩性为坚硬时,导水裂缝带高度 H_{li} 表达式为

$$H_{li} = \frac{100Mh}{4.1h + 133} \pm 8.4, \tag{30}$$

式中: h 为回采阶段的垂高.

当覆岩岩性为中硬、软弱时,导水裂缝带高度 H_{li} 表达式为

$$H_{li} = \frac{100Mh}{7.5h + 293} \pm 7.3, \tag{31}$$

冒落带 H_m 的高度表达式为

$$H_m = (0.4 \sim 0.5) H_{li}. \tag{32}$$

式(29)进一步化简得:

$$L_1 = \frac{D_1 H_m K}{2M + H_m}, \tag{33}$$

$$L_2 = D1 - \frac{D_1 H_m K}{2M + H_m}. \tag{34}$$

在计算大倾角煤层时,依然适用等影响原理.此时,对于老采区地表残余下沉预计公式叠加计算时,需要求出 L_1 、 L_2 的对应地表计算长度:

$$L = L_1 \frac{\sin(\theta_0 + \alpha)}{\sin\theta_0}, \tag{35}$$

$$L' = L_2 \frac{\sin(\theta_0 + \alpha)}{\sin\theta_0}. \tag{36}$$

式中: L 、 L' 分别为 L_1 、 L_2 对应的地表水平距离.

从图3可以看出,在研究大倾角煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型时,在 AC 开采段和 CD 开采段上,先分别用其各自下边界和上边界两个半无限开采影响相叠加方法,来分析这两段各自的开采影响数学模型,采用由 AC 段和 CD 段的开采影响数学模型再次叠加的方法计算整个工作面 AD 的开采影响数学模型.

(1) 大倾角煤层倾向主断面地表残余下沉

$$W_c(y) = C_{xm} [W_{AC1}(y; t_{AC1}) - W_{AC2}(y - L; t_{AC2})] + C_{xm} [W_{CD1}(y - L; t_{CD1}) - W_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})]. \tag{37}$$

式中: $W_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $W_{AC2}(y - L; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余下沉表达式; $W_{CD1}(y - L; t_{CD1})$ 和 $W_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余下沉表达式.

式(37)各表达式计算式为

$$\begin{cases} W_{AC1}(y; t_{AC1}) = \frac{M_d q_d \cos\alpha}{2} [\operatorname{erf}(\frac{\sqrt{\pi}}{r_{AC1}} y) + 1], \\ W_{AC2}(y - L; t_{AC2}) = \frac{M_d q_d \cos\alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{AC2}} (y - L)\right] + 1 \right\}, \\ W_{CD1}(y - L; t_{CD1}) = \frac{M_k q_k \cos\alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{CD1}} (y - L)\right] + 1 \right\}, \\ W_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2}) = \frac{M_k q_k \cos\alpha}{2} \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{\pi}}{r_{CD2}} (y - L - L')\right] + 1 \right\}. \end{cases} \tag{38}$$

式中: M_d 、 M_k 分别为 AC 、 CD 等效采厚; q_d 、 q_k 分别为 AC 、 CD 区间的残余下沉系数; r_{AC1} 、 r_{AC2} 为 AC 区间的下山、上山方向开采影响半径; r_{CD1} 、 r_{CD2} 为 CD 区下山、上山方向的开采影响半径; t_{AC1} 、 t_{AC2} 表示计算区域 AC 的下山边界、上山边界分别用其各自的相应参数; t_{CD1} 、 t_{CD2} 表示计算区域的 CD 下山边界、上山边界分别用其各自的相应参数.

等效采厚及残余下沉系数计算式为

$$M' = M + \frac{1}{2}H_m. \quad (39)$$

式中: M' 为大倾角煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型计算时的等效采厚.

$$M_d = M'q_d = \left(M + \frac{1}{2}H_m\right)(1-q), \quad (40)$$

$$M_k = M'q_k = M + \frac{1}{2}H_m. \quad (41)$$

式中: q_d 、 q_k 对应为下山方向、上山方向的下沉系数.

$$q_d = 1 - q, \quad (42)$$

$$q_k = 1. \quad (43)$$

(2) 大倾角煤层倾向主断面地表残余倾斜变形

$$i_c(y) = C_{xm} [i_{AC1}(y; t_{AC1}) - i_{AC2}(y - L; t_{AC2})] + C_{xm} [i_{CD1}(y - L; t_{CD1}) - i_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})]. \quad (44)$$

式中: $i_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $i_{AC2}(y - L; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余倾斜表达式; $i_{CD1}(y - L; t_{CD1})$ 和 $i_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余倾斜表达式.

式(44)各表达式计算式为

$$\begin{cases} i_{AC1}(y; t_{AC1}) = \frac{M_d q_d \cos \alpha}{r_{AC1}^3} e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}}, \\ i_{AC2}(y - L; t_{AC2}) = \frac{M_d q_d \cos \alpha}{r_{AC2}^3} e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{AC2}^2}}, \\ i_{CD1}(y - L; t_{CD1}) = \frac{M_k q_k \cos \alpha}{r_{CD1}^3} e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{CD1}^2}}, \\ i_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2}) = \frac{M_k q_k \cos \alpha}{r_{CD2}^3} e^{-\pi \frac{(y-L-L')^2}{r_{CD2}^2}}. \end{cases} \quad (45)$$

(3) 大倾角煤层倾向主断面地表残余曲率变形

$$K_c(y) = C_{xm} [K_{AC1}(y; t_{AC1}) - K_{AC2}(y - L; t_{AC2})] + C_{xm} [K_{CD1}(y - L; t_{CD1}) - K_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})]. \quad (46)$$

式中: $K_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $K_{AC2}(y - L; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余曲率表达式; $K_{CD1}(y - L; t_{CD1})$ 和 $K_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的残余曲率表达式.

式(46)各表达式计算式为

$$\begin{cases} K_{AC1}(y; t_{AC1}) = -\frac{2\pi M_d q_d \cos \alpha}{r_{AC1}^3} y e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}}, \\ K_{AC2}(y - L; t_{AC2}) = -\frac{2\pi M_d q_d \cos \alpha}{r_{AC2}^3} (y - L) e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{AC2}^2}}, \\ K_{CD1}(y - L; t_{CD1}) = -\frac{2\pi M_k q_k \cos \alpha}{r_{CD1}^3} (y - L) e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{CD1}^2}}, \\ K_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2}) = -\frac{2\pi M_k q_k \cos \alpha}{r_{AC2}^3} (y - L - L') e^{-\pi \frac{(y-L-L')^2}{r_{AC2}^2}}. \end{cases} \quad (47)$$

(4) 大倾角煤层倾向主断面地表残余水平移动

$$U_c(y) = C_{xm} [U_{AC1}(y; t_{AC1}) - U_{AC2}(y - L; t_{AC2})] + C_{xm} [U_{CD1}(y - L; t_{CD1}) - U_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})]. \quad (48)$$

式中: $U_{AC1}(y; t_{AC1})$ 和 $U_{AC2}(y - L; t_{AC2})$ 为 AC 区间下山方向和上山方向的残余水平移动表达式; $U_{CD1}(y - L; t_{CD1})$ 和 $U_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})$ 为 CD 区间下山方向和上山方向的水平移动表达式.

式(48)各表达式计算式为

$$\begin{cases} U_{AC1}(y; t_{AC1}) = M_d q_d \cos \alpha b_1 e^{-\pi \frac{y^2}{r_{AC1}^2}} + W_{AC1}(y; t_{AC1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ U_{AC2}(y - L; t_{AC2}) = M_d q_d \cos \alpha b_1 e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{AC2}^2}} + W_{AC2}(y - L; t_{AC2}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ U_{CD1}(y - L; t_{CD1}) = M_k q_k \cos \alpha b_2 e^{-\pi \frac{(y-L)^2}{r_{CD1}^2}} + W_{CD1}(y - L; t_{CD1}) \operatorname{ctg} \theta_0, \\ U_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2}) = M_k q_k \cos \alpha b_2 e^{-\pi \frac{(y-L-L')^2}{r_{CD2}^2}} + W_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2}) \operatorname{ctg} \theta_0. \end{cases} \quad (49)$$

(5) 大倾角煤层倾向主断面地表残余水平变形

$$\varepsilon_c(y) = C_{xm} [\varepsilon_{AC1}(y; t_{AC1}) - \varepsilon_{AC2}(y - L; t_{AC2})] + C_{xm} [\varepsilon_{CD1}(y - L; t_{CD1}) - \varepsilon_{CD2}(y - L - L'; t_{CD2})]. \quad (50)$$

式中: $\varepsilon_{AC1}(y;t_{AC1})$ 和 $\varepsilon_{AC2}(y-L;t_{AC2})$ 为AC区间下山方向和上山方向的水平变形表达式; $\varepsilon_{CD1}(y-L;t_{CD1})$ 和 $\varepsilon_{CD2}(y-L';t_{CD2})$ 为CD区间下山方向和上山方向的水平变形表达式.

式(50)各表达式计算式为

$$\left\{\begin{aligned}\varepsilon_{AC1}(y;t_{AC1}) &= -\frac{2\pi b_1 M_d q_d \cos\alpha}{r_{AC1}^2} y e^{-\frac{y^2}{r_{AC1}^2}} + i_{AC1}(y;t_{AC1}) \operatorname{ctg}\theta_0, \\ \varepsilon_{AC2}(y-L;t_{AC2}) &= -\frac{2\pi b_1 M_d q_d \cos\alpha}{r_{AC2}^2} (y-L) \cdot \\ &\quad e^{-\frac{(y-L)^2}{r_{AC2}^2}} + i_{AC2}(y-L;t_{AC2}) \operatorname{ctg}\theta_0, \\ \varepsilon_{CD1}(y-L;t_{CD1}) &= -\frac{2\pi b_2 M_k q_k \cos\alpha}{r_{CD1}^2} (y-L) \cdot \\ &\quad e^{-\frac{(y-L)^2}{r_{CD1}^2}} + i_{CD1}(y-L;t_{CD1}) \operatorname{ctg}\theta_0, \\ \varepsilon_{CD2}(y-L-L';t_{CD2}) &= -\frac{2\pi b_2 M_k q_k \cos\alpha}{r_{CD2}^2} (y-L-L') e^{-\frac{(y-L-L')^2}{r_{CD2}^2}} + \\ &\quad i_{CD2}(y-L-L';t_{CD2}) \operatorname{ctg}\theta_0.\end{aligned}\right. \quad (51)$$

3 实例验证

3.1 缓倾斜煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型验证

(1)阳泉矿区^[17]的采空区分布地表移动预测基本岩移参数如表1、表2所示. 笔者研究3#煤层中1001工作面引起的地表残余下沉. 考虑到采区回采率问题,计算煤层等效采厚时,要比实测数据减少25%.

使用缓倾斜煤层残余下沉数学模型式(10)、式(11)编程后加入到朱广轶ZMS9.0^[18]计算软件. ZMS9.0计算出1001工作面地表残余下沉值.

表1 地表移动预测基本岩移参数

Table 1 The basic rock movement parameters of surface movement prediction

煤层号	下沉系数 q	主要影响角正切 $\tan\beta$	水平移动系数 b	开采影响传播角 $\theta_0/(^\circ)$
3#	0.85	3.54	0.29	67.4

表2 3#煤计算工作面数据

Table 2 Calculation working face data of 3# coal seam surface movement prediction

工作面编号	采厚/mm	上山采深/m	下山采深/m	走向长/m	倾向长/m	终采年份
3-13	1 100	10	12	151.5	242.0	1960

缓倾斜倾向主断面地表残余倾斜变形、曲率变形、水平移动、水平变形是地表残余下沉数学模型的导数,故验证时采用下沉模型. 通过缓倾斜倾向主断面地表残余下沉数学模型式(10)和式(11)代入表1、表2,1001工作面中部的地表残余下沉最大值为24.36 mm,与实测数据近似25 mm的误差为3%,预测结果与实测数据的误差在允许范围以内.

(2)山西离军高速公路下采空区1347和1349工作面分布如图4所示.

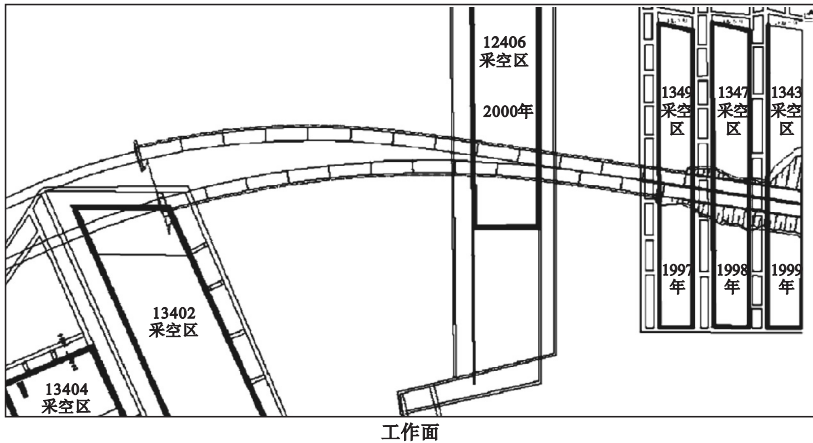


图4 山西离军高速公路桥跨越的煤矿采空区分布图

Fig. 4 Distributing of mined-out area under Lijun highway bridge in Shanxi

终采时间分别为 1998 年、1997 年,其特征参数^[19]:采空区走向长度 300 m,倾向长度 35 m,平均开采深度为 190 m,开采厚度 2 400 mm,拐点偏距 S 与采深 H 的比值为 0.1,实测所得两个工作面的平均下沉约为 600 mm. 已知参数代入数学模型式(10)、式(11)可得最大残余下沉值为 585 mm,与实测误差为 2.5%,在允许范围内.

通过两个实例验证可得,提出的缓倾斜倾向主断面地表残余下沉数学模型可以较为准确地描述实际工程问题.

3.2 大倾角煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型验证

采用与其他文献相关的数学模型对比方式验证. 根据相关资料和其提出的有关模

型^[20],选取大黄山矿区 7#煤层,代入大倾角残余下沉计算模型式(37)、式(38)计算其残余下沉值,与笔者提出的大倾角煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型进行对比.

7#煤层地表移动计算参数如表 3 所示. 研究区域煤层工作面的分布如图 5 所示,其走向长为 215 m,倾向长为 146 m,下山采深 230 m,上山采深 50 m,开采影响传播角 θ_0 为 50° .

表 3 7#煤层地表移动计算参数

Table 3 Surface movement calculation parameters of 7# coal seam

采厚/ mm	下沉 系数 q	煤层 倾角 $\alpha/(^\circ)$	水平移 动系数 b	主要影 响角正 切 $\tan\beta$	拐点偏 移系数 S/H
900	0.65	65	0.3	1.3	0.08

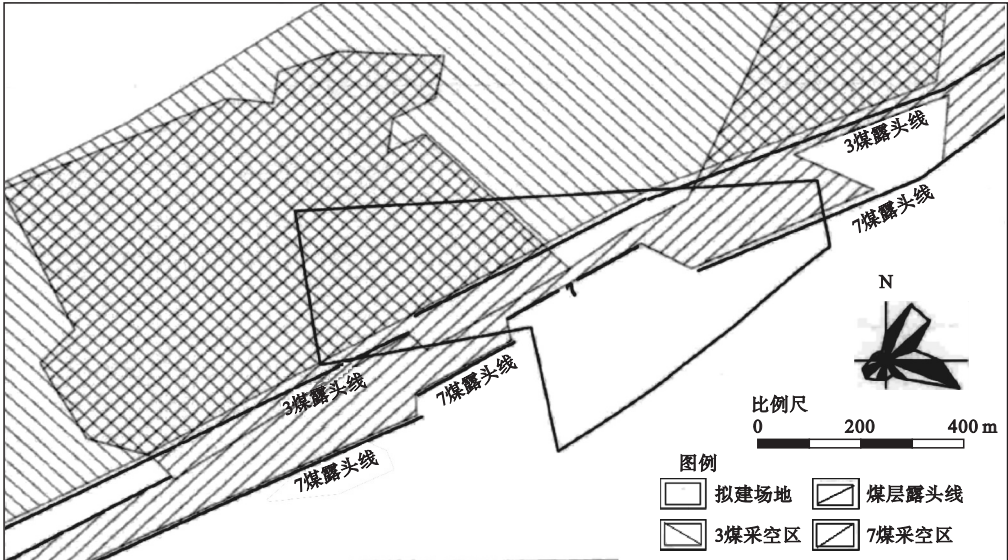


图 5 大黄山矿区 3#和 7#煤层的分布示意图

Fig. 5 Distribution Diagram of 3# and 7# Coal Seams in Dahuangshan mining area

将相关的参数代入本文中的大倾角煤层倾向主断面地表残余下沉预测数学模型式(37)、式(38)中,通过朱广轶 ZMS9.0 软件,可得地表残余下沉曲线图(见图 6). 从图 6 可知,笔者提出的大倾角煤层倾向主断面地表残余下沉数学模型式(37)和式(38)计算所得的形态呈现瓢形,符合大倾角煤层倾向主断面残余移动变形机理的分析且与实际情

况相符;所得大倾角煤层倾向主断面地表残余最大下沉值大小为 380 mm,与对比模型^[20]计算所得最大下沉值 420 mm 的误差为 9%,两者误差小于允许值 10%. 根据计算结果可得,大倾角煤层倾向主断面地表残余移动下沉数学模型可以较为合理地描述实际工程,具有可推广性.

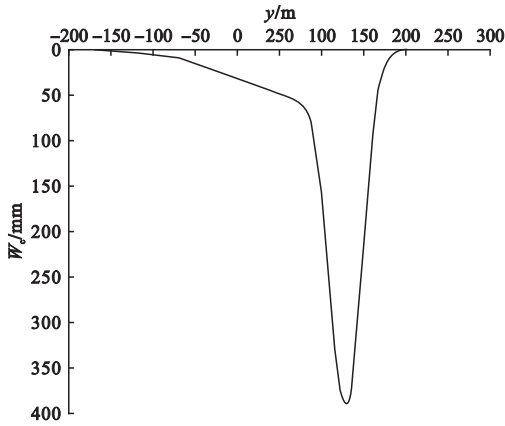


图6 大倾角煤层倾向主断面地表残余下沉曲线

Fig.6 Surface residual subsidence of tendency main section in large inclination coal seam

4 结 论

(1)老采空区倾向主断面会呈现出两种覆岩破坏形态:在煤层倾角较小时,导水裂缝带会出现中间低两端高的马鞍形,倾向主断面地表残余下沉曲线与走向主断面地表残余下沉曲线相近;在大倾角时,冒落岩石会出现滑落滚动的特征,而使采区下边界空洞被充填,使采空区上边界的覆岩冒落破坏范围增大,使其冒落带和导水裂缝带呈拱形,倾向主断面地表残余下沉曲线呈弧形。

(2)获得了地表残余移动变形参数与我国广泛使用的静态岩移预测参数之数学关系,数学模型依托了静态岩移参数。故所提出的缓倾斜和大倾角煤层倾向主断面地表残余移动变形数学模型推广性强。

(3)以缓倾斜煤层和大倾角煤层两种情况,采用随机介质理论和等影响原理完整地创立了走向长壁式开采、冒落式顶板管理的老采区倾向主断面地表残余移动变形预测的数学模型。

(4)依据代入实测岩移参数后的倾向主断面地表残余移动变形数学模型预测结果与实际观测数据对比、该数学模型与其他数学模型的计算对比分析均表明:实际观测数据与预测模型计算的误差均在允许范围 10%

以内。构建的数学模型可以定量分析老采空区沉陷盆地倾向主断面地表残余移动变形。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿采空区岩土工程勘察规范: GB 51044—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Code for investigation of geotechnical engineering in the coal Mine goaf: GB 51044—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿采空区建(构)筑物地基处理技术规范: GB 51180—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Technical code for ground treatment of buildings in coal mine goaf: GB 51180—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)
- [3] YAO X L, REDDISH D J. Analysis of residual subsidence movements in the UK coalfields [J]. Quarterly journal of engineering geology & hydrogeology, 1994, 27(1): 15–23.
- [4] 王正帅. 老采空区残余沉降非线性预测理论及应用研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
(WANG Zhengshuai. Study on the non-linear prediction theory of old goaf residual subsidence and its application [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.)
- [5] 孙富强. 山区煤矿老采空区地表残余移动变形预测模型研究 [D]. 徐州: 江苏师范大学, 2018.
(SUN Fuqiang. Study on the prediction model of residual ground movement and deformation above old mine goaf in mountainous area [D]. Xuzhou: Jiangsu Normal University, 2018.)
- [6] 朱广铁, 徐征慧, 解陈, 等. 老采空区地表残余移动变形影响函数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 1962–1970.
(ZHU Guangyi, XU Zhenghui, XIE Chen, et al. Study of influence function of surface residual movement and deformation for old goaf [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(10): 1962–1970.)
- [7] 朱广铁, 马亚丽, 徐征慧, 等. 地下水对老采区地表残余移动变形的影响 [J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2015, 27(3): 238–242.
(ZHU Guangyi, MA Yali, XU Zhenghui, et al. Influence of groundwater on surface residual deformation in goaf [J]. Journal of shenyang university (natural science), 2015, 27(3): 238–242.)
- [8] JIANG Bangyou, WANG Lianguo, LU Yinlong, et al. Ground pressure and overlying strata

- ta structure for a repeated mining face of residual coal after room and pillar mining[J]. International journal of mining science and technology, 2016, 26(4): 645 - 652.
- [9] 朱广轶, 侯杰, 马亚丽, 等. 开采缓倾斜煤层倾向主断面地表残余移动变形函数[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2018, 30(1): 34 - 38. (ZHU Guangyi, HOU Jie, MA Yali, et al. Function of movement and deformation of surface residue of tend main section plane under mining gently inclined seam[J]. Journal of shenyang university(natural science), 2018, 30(1): 34 - 38.)
- [10] 吴侃, 王悦汉, 邓喀中. 采空区上覆岩层移动破坏动态力学模型的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2000(1): 34 - 36. (WU Kan, WANG Yuehan, DENG Kazhong. Application of dynamic mechanics model of overlying strata movement and damage above goaf[J]. Journal of china university of mining & technology, 2000(1): 34 - 36.)
- [11] 杨逾, 于洁瑜, 王宇. 条带开采采空区覆岩移动规律数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 96 - 101. (YANG Yu, YU Jieyu, WANG Yu. Numerical simulation study on movement law of overlying strata of goaf in strip mining[J]. The Chinese journal of geological hazard and control, 2017, 28(1): 96 - 101.)
- [12] 王军, 宁建国, 刘学生, 等. 构造应力下采空区上覆岩层破坏规律数值模拟[J]. 煤矿安全, 2017, 48(1): 183 - 186. (WANG Jun, NING Jianguo, LIU Xuesheng, et al. Numerical simulation of overburden failure in gob under tectonic stress[J]. Safety in coal mines, 2017, 48(1): 183 - 186.)
- [13] 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. (HE Guoqing, YANG Lun, LING Gengdi, et al. Mining subsidence theory[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1991.)
- [14] YIN Yanchun, ZOU Jianchao, ZHANG Yubao, et al. Experimental study of the movement of backfilling gangues for goaf in steeply inclined coal seams[J]. Arabian journal of geosciences, 2018, 11(12): 1 - 8.
- [15] 吕士华. 地下水对倾向主断面地表残余移动变形影响的理论研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018. (Lü Shihua. Study on groundwater impact of residual mobile deformation theory over ground tendency main section [D]. Shenyang: Shenyang University, 2018.)
- [16] 王红伟, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角采场矸石充填量化特征及覆岩运动机制[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 886 - 892. (WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. The quantitative filling characteristics of the waste rock and roof movement mechanism in the steeply inclined working face [J]. Journal of China university of mining & technology, 2016, 45(5): 886 - 892.)
- [17] 丁陈建. 采动场地残余变形特征及预测模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009. (DING Chenjian. Study on the characteristics and prediction model[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2009.)
- [18] 朱广轶, 吕士华, 赵柏冬, 等. 地表残余移动变形预测软件开发[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016, 28(2): 147 - 150. (ZHU Guangyi, Lü Shihua, ZHAO Baidong, et al. Software development for prediction on surface residual deformation [J]. Journal of Shenyang university(natural science), 2016, 28(2): 147 - 150.)
- [19] 胡海峰, 赵阳升, 康建荣, 等. 煤矿采空区跨度和延续时间与地面残余变形的相关规律及实证[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 65 - 71. (HU Haifeng, ZHAO Yangsheng, KANG Jianrong, et al. Related laws and verification of mined-out area span, time and residual deformation [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(1): 65 - 71.)
- [20] 张国堂. 急倾斜煤层采空区地表残余移动变形特征研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. (ZHANG Guotang. Study on the deformation characteristics of ground residual movement of deep coal mining [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.)
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)