

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202105009

## 基于连续-非连续方法的正断层下盘开采断层滑移演化研究\*

王学滨<sup>1,2</sup>, 刘桐辛<sup>2</sup>, 岑子豪<sup>2</sup>, 薛承宇<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学计算力学研究所, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 在自主开发的拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法的基础上, 为了模拟时间较长的煤炭开采过程, 提出了准静力计算模式; 针对煤层离散单元形成的聚集体仍能承受超过自身承载能力的问题, 发展了应力跌落方法; 以济三煤矿6303工作面的地质条件为背景建立了更准确的力学模型, 其中, 在断层上盘下端面施加了适当的垂直向上的均布载荷, 以克服前人力学模型中由于模型下端面位移被限制断层难以在此位置错动而造成的应力集中问题; 通过剔除开采前的断层滑移量, 提出了纯粹由采动引起的断层上盘滑移量的计算方法。结果表明: 当工作面与断层的距离减少时, 煤层下方测点的滑移量呈缓慢增加-缓慢减少-急剧增加的趋势, 煤层上方测点的滑移量呈缓慢增加-迅速增加的趋势; 同一岩层中测点的滑移量相差不大; 高位岩层将先于低位岩层发生明显滑移, 断层滑移基本是由上至下发展的, 且高位岩层的滑移程度比低位岩层的大; 当工作面与断层距离相同时, 若开采间隔较小, 则煤层上方测点的滑移量较小; 当工作面与断层距离小于等于100 m时, 采空区上方附近岩层发生明显滑移, 应该加强支护。

**关键词:** 连续-非连续方法; 煤炭开采; 断层; 应力集中; 滑移量

**中图分类号:** X936 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0804-09

### Study on Evolution of the Fault Slip during the Normal Fault Footwall Mining based on a Continuum-Discontinuum Method

WANG Xuebin<sup>1,2</sup>, LIU Tongxin<sup>2</sup>, CEN Zihao<sup>2</sup>, XUE Chengyu<sup>2</sup>

(1. Institute of Computational Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Based on a hybrid continuum-discontinuum method where the Lagrangian element method and the discrete element method are combined, a quasi-static model was proposed to simulate the long mining process. The stress drop method was developed for dealing with the problem that the aggregation formed by discrete elements of the coal seam can still sustain loads above its own bearing capacity. A more accurate mechanical model was established based on the geological conditions of the 6303 working face in the 3rd Jining coal mine. In order to overcome stress concentration problems in the previous mechanical model caused by the fault slip restriction due to limited displacement at the base of the model, an appropriate uniform stress was applied at the base of the fault hanging wall. The slip displacement of the fault before mining was eliminated, and a calculation method for the slip displace-

\* 收稿日期: 2021-05-09; 修回日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51874162)资助

作者简介: 王学滨(1975—), 男, 教授, 博士。主要从事工程材料变形、破坏及稳定性研究。E-mail: wxbbb@263.net

ment of the hanging wall caused by mining was proposed. The following results were found. When the distance between the working face and the fault decreases, slip displacements of monitored nodes below the coal seam exhibit a slow increase, followed by a slow decrease and a sharp increase; slip displacements of the monitored nodes above the coal seam exhibit a slow increase, followed by a rapid increase. There are few differences in slip displacements of the monitored nodes for the same strata. Higher overburden strata will have obvious slip before lower overburden strata. The fault slip basically develops from top to bottom, and the slip degree of higher overburden strata is greater than that of lower overburden strata. When the distance between the working face and the fault is the same, if the mining interval is small, slip displacements of the monitored nodes above the coal seam are small. When the distance between the working face and the fault is less than or equal to 100 m, strata in the vicinity of the goaf slips obviously so that the support should be strengthened.

**Keywords:** continuum-discontinuum method; mining in coal mines; fault; stress concentration; slip displacement

## 引言

断层作为一种常见的地质构造,对煤炭安全开采带来了较大的影响。已有的一些研究表明,在含断层采场中进行开采活动更容易诱发煤矿灾害,尤其当工作面临近断层时,煤矿灾害发生的频次和强度明显增加<sup>[1-2]</sup>。在煤炭开采过程中,断层可能会发生滑移和失稳<sup>[3]</sup>。因此,断层滑移量演化规律研究对煤矿灾害的预防具有重要的意义。

目前,科技人员多采用连续方法开展采动条件下断层滑移量演化规律研究<sup>[4-7]</sup>。例如,张平松等<sup>[4]</sup>发现,随着工作面与断层距离的减小,断层滑移量呈缓慢增加到迅速增加的趋势;孙健<sup>[5]</sup>发现,越靠近模型上端面,断层区段滑移量越大;王学滨等<sup>[6]</sup>发现,对于逆断层下盘开采,断层上滑动危险区段较少,断层不容易发生滑移;对于正断层下盘开采,断层上滑动危险区段较多,断层更容易发生滑移。在含断层采场的开采过程中,岩层会发生开裂和运动,从岩层中脱离的岩块会与底板接触,并被冒落的岩层压实,断层附近岩层会发生明显的滑移。连续方法适于模拟连续介质的变形和破坏,仅能在一定程度上模拟介质的非连续性,例如,两部分之间的滑动,但难以模拟介质的开裂、运动和块体之间的相互作用<sup>[8]</sup>。在非连续方法中,介质的大变形、转动及开裂可被模拟,但应力、应变的求解不够精细,计算效率一般较低<sup>[9]</sup>。目前,已有一些连续-非连续方法相继问世<sup>[10-13]</sup>。此类方法具有连续方法和非连续方法的各自优势,可较好地模拟连续介质向非连

续介质转化和非连续介质进一步演化。在现有的采场断层滑移数值模拟研究中,通常在模型下端面施加垂直约束<sup>[6]</sup>。此种处理方式对于模型尺寸足够大的问题没有负面影响,对于连续介质模型没有大的负面影响,这是由于断层在连续介质模型中不会有大的滑移。然而,在非连续模型或连续-非连续模型中,此种处理方式会导致断层在模型下端面难以错动,进而出现应力集中。这会影响断层面上的应力分布,从而会给断层的滑移带来影响,尤其是在模型尺寸不是足够大时这一问题更加突出。在本文作者团队自主开发的拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法中,无法模拟时间较长的煤炭开采过程;煤层离散单元形成的聚集体仍能承受超过自身承载能力的高应力,这与实际情况尚有一定差别。

针对上述问题,本文在拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法的基础上,提出了准静力计算模式和应力跌落方法,以济三煤矿6303工作面的地质条件为背景建立了更准确的力学模型(在断层上盘下端面施加了适当的垂直向上的均布载荷,以克服前人力学模型中应力集中问题),为了研究采动条件下断层的滑移规律,提出了纯粹由采动引起的断层上盘滑移量的计算方法。

## 1 连续-非连续方法简介

### 1.1 四大模块

自主开发的拉格朗日元与离散元耦合连续-非

连续方法包括四大模块:应力—应变模块、开裂模块、接触—摩擦模块和运动模块。

在应力—应变模块中,1个四边形单元被离散成2个三角形子单元。离散方式有两种。先通过高斯定理求出子单元的应变,后由本构关系计算出子单元的应力,进而求出单元的应力。

在开裂模块中,利用最大主应力准则和莫尔—库仑准则分别判断介质是否发生拉裂和剪裂。

在接触—摩擦模块中,采用基于势的接触力计算方法求解单元之间的接触力。

在运动模块中,采用中心差分方法求解节点速度,进而计算出节点位移。

### 1.2 准静力模式

在准静力计算模式(不追求某一现象具体过程模拟的真实,只追求快速获得最终结果)和动力计算模式(追求具体过程模拟的真实,不适于模拟时间较长的过程)中,力和位移的大小和单位均相同。然而,准静力计算模式中的时间步长 $\Delta t'$ 与动力计算模式中的时间步长 $\Delta t$ 不同, $\Delta t'=1$ ,是虚拟的。因此,可以推出,准静力计算模式中的虚拟质量 $m'$ 与动力计算模式中的真实质量 $m$ 的关系为:

$$m' = \frac{m}{(\Delta t)^2} \quad (1)$$

同理,准静力计算模式中的虚拟重力加速度 $g'$ 与动力计算模式中的真实重力加速度 $g$ 的关系为:

$$g' = g(\Delta t)^2 \quad (2)$$

### 1.3 针对离散单元聚集体的应力跌落方法

在本文方法中,单元始终是弹性的,介质开裂只发生在单元边界处。从岩层脱离的离散单元可能会聚集在一起,在外界力的作用下,它们仍能承受超过自身承载能力的高应力,这明显与实际不符。为此,针对这些单元,本文提出了基于应力球张量不变假定的应力跌落方法,如图1所示。当某单元的应力处于极限应力状态时,即刚满足莫尔—库仑准则时,将该单元的应力由 $A(\sigma_x, \tau_{xy})$ 点和 $B(\sigma_y, \tau_{yx})$ 点跌落至 $A'(\sigma'_x, \tau'_{xy})$ 点和 $B'(\sigma'_y, \tau'_{yx})$ 点。此时,残余应力圆与残余屈服面相切。在此假定下,残余应力圆与初始应力圆共圆心 $C(\sigma_x + \sigma_y = \sigma'_x + \sigma'_y)$ ,即应力球张量保持不变),初始屈服面和残余屈服面通过同一点 $D$ 。经过推导,可以得到:

$$\begin{cases} \sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \alpha' \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \\ \sigma'_y = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \alpha' \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \\ \tau'_{xy} = \alpha' \tau_{xy} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\alpha'$ 为应力跌落系数,即残余应力圆与初始应力圆半径之比。

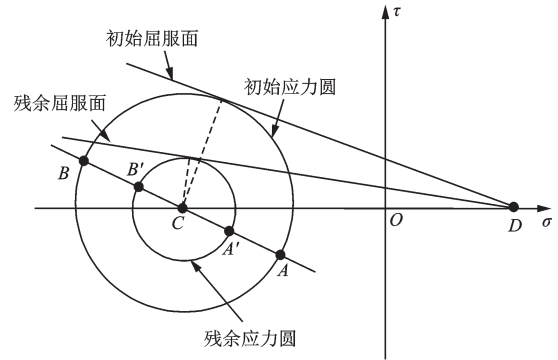


图1 针对离散单元聚集体的应力跌落

Fig.1 The stress drop for assemblies composed of discrete elements

## 2 计算模型、参数及方案

### 2.1 计算模型

根据文献[14]的地质条件建立了济三煤矿6303工作面力学模型(图2)。计算条件为平面应变、大变形。具体建模过程如下:

(1)建立平面直角坐标系 $xOy$ , $O$ 为坐标原点, $x$ 轴水平向右为正, $y$ 轴竖直向上为正。

(2)按照由下至上的顺序分别建立断层上盘和下盘各岩层。模型的长 $\times$ 高为 $300\text{ m} \times 109\text{ m}$ ,被剖分为32 733个单元。正断层倾角为 $45^\circ$ ,落差为2 m。断层附近的单元为梯形单元,最长边长为2.5 m,其它位置的单元为正方形单元,边长均为1 m。

(3)在断层上盘断层附近布置22个测点,相邻测点间隔相同的距离,测点序号从1开始由下至上逐渐增加。

(4)赋予各岩层物理、力学参数(表1),各参数均取自文献[14],摩擦系数 $f$ 为0.1;局部自适应阻尼系数 $\alpha$ 为0.1;法向接触刚度系数 $K_n$ 的数值为15倍的弹性模量 $E$ ,单位为 $\text{Pa/m}$ ;  $\alpha'$ 为0.25;  $\Delta t_1$ 为1;  $\Delta t$ 为 $5.4217 \times 10^{-5}\text{ s}$ 。文献[14]并未给出各岩层的实际抗拉强度 $\sigma_t$ 。通过莫尔—库仑准则计算出各岩层



离)即为工作面与断层的距离。

## 2.2 计算方案

共选择了3个计算方案:方案1~3中两次开采间隔的 $N$ 分别为1 000、2 000和3 000。开采间隔越大,代表工作面推进越慢。应当指出,本文采用准静力计算模式,因此,工作面推进快慢并非实际的开采速度。

## 3 断层上盘滑移量的计算方法

同一岩层不同位置的受力通常不同。所以,上盘不同断层区段的滑移量通常也不尽相同。为此,引入了工作面推进过程中断层上盘不同测点 $i$ 的滑移量 $D$ 。 $D$ 的具体计算过程如下。

(1)在模型未加载时,确定上盘测点 $i$ 所在单元中心点 $A_i$ 的坐标。

(2)在模型已达平衡状态且未开采时,首先,确

定该时刻 $A_i'$ ( $A_i$ 的当前位置)的坐标;然后,计算矢量 $\overline{AA_i'}$ 在断层方向的投影 $T_i'$ 的大小 $|T_i'|$ :

$$|T_i'| = |\overline{AA_i'} \cdot \vec{s}| \quad (4)$$

式中, $\vec{s}$ 为沿断层切向向下的单位向量。

(3)在模型开采后的任一时刻,首先,确定该时刻 $A_i''$ ( $A_i$ 的当前位置)的坐标;然后,计算该矢量 $\overline{AA_i''}$ 在断层方向的投影的大小 $|T_i''|$ ;最后,由 $|T_i''|$ 与 $|T_i'|$ 之差计算出 $D$ 。 $|T_i''|$ 和 $D$ 的具体计算公式如下:

$$|T_i''| = |\overline{AA_i''} \cdot \vec{s}| \quad (5)$$

$$D = |T_i''| - |T_i'| \quad (6)$$

之所以做上述处理是因为在模型已达平衡状态且未开采时,断层会发生稍许滑移。本文主要研究采动条件下断层的滑移过程,因此,从开采后的 $|T_i''|$ 中剔除了开采前的 $|T_i'|$ ,进而计算出了纯粹由采动引起的断层上盘的 $D$ 。

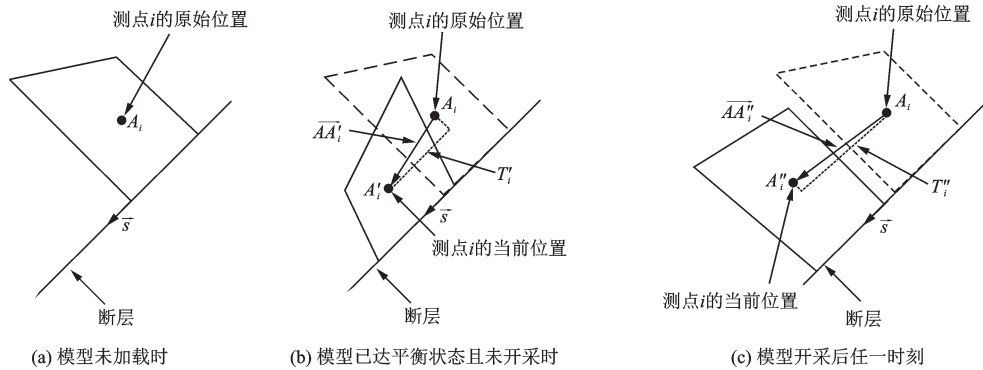


图3 测点所在位置

Fig.3 Locations of the monitored nodes

## 4 计算结果及分析

### 4.1 岩层的主应力分布

图4给出了 $L=130$  m时方案2的最大主应力 $\sigma_3$ 和最小主应力 $\sigma_1$ 分布,正、负分别代表拉、压。可以发现:

(1)在断层下盘工作面煤壁前方的20 m厚细砂岩层、13 m厚细砂岩层、11 m厚中砂岩层和8 m厚中砂岩层中,中性层上方和下方各存在1个 $\sigma_3$ 高值区(受拉区)和1个 $\sigma_1$ 低值区(受压区),其中,后三者的 $\sigma_3$ 高值区和 $\sigma_1$ 低值区已达断层,这将对断层的滑

移产生不可忽视的影响。

(2)模型上边界并非水平,这是由于一些岩层发生了较大的变形甚至垮落。然而,通过观察上述云图并不能发现断层的细致滑移规律。

### 4.2 不同测点的 $D$ 的演化

图5给出了方案2不同测点的 $D-L$ 曲线,其中,图5(a)~(g)分别给出了测点1~3、测点4~6、测点7~10、测点11~13、测点14~16、测点17~19和测点20~22的 $D-L$ 曲线。测点1和2位于断层上盘12 m厚粉砂岩层,测点3位于断层上盘6 m厚细砂岩层,测点4位于断层上盘2 m厚粉砂岩层,测点5位于断层上盘5 m厚煤层,测点6位于断层上盘

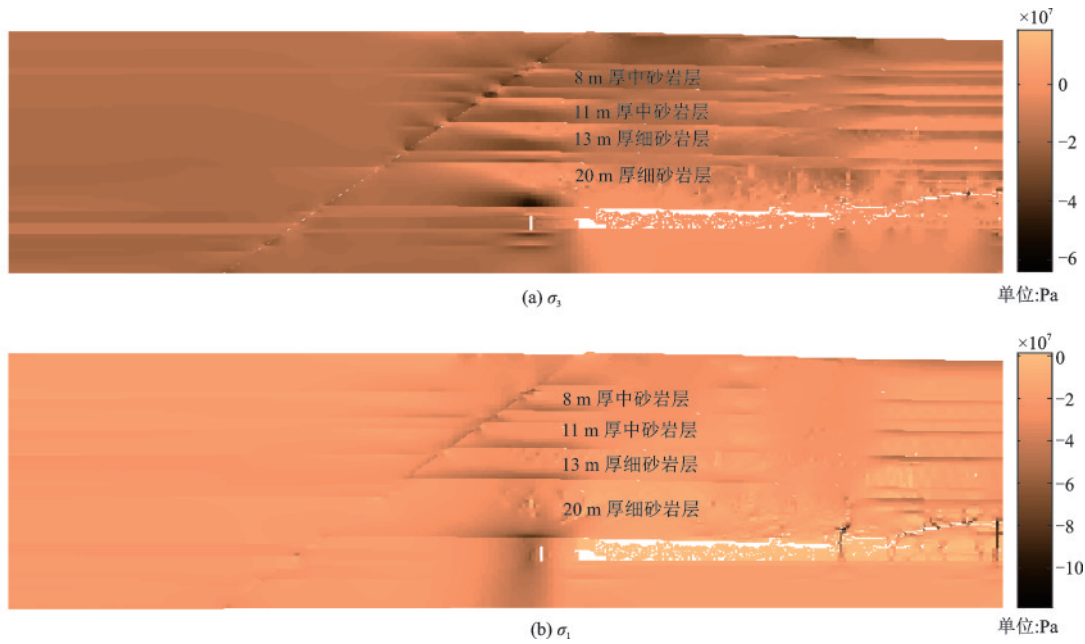


图4  $L=130$  m时方案2的 $\sigma_3$ 和 $\sigma_1$ 分布

Fig.4 Distributions of  $\sigma_3$  and  $\sigma_1$  in scheme 2 for  $L=130$  m

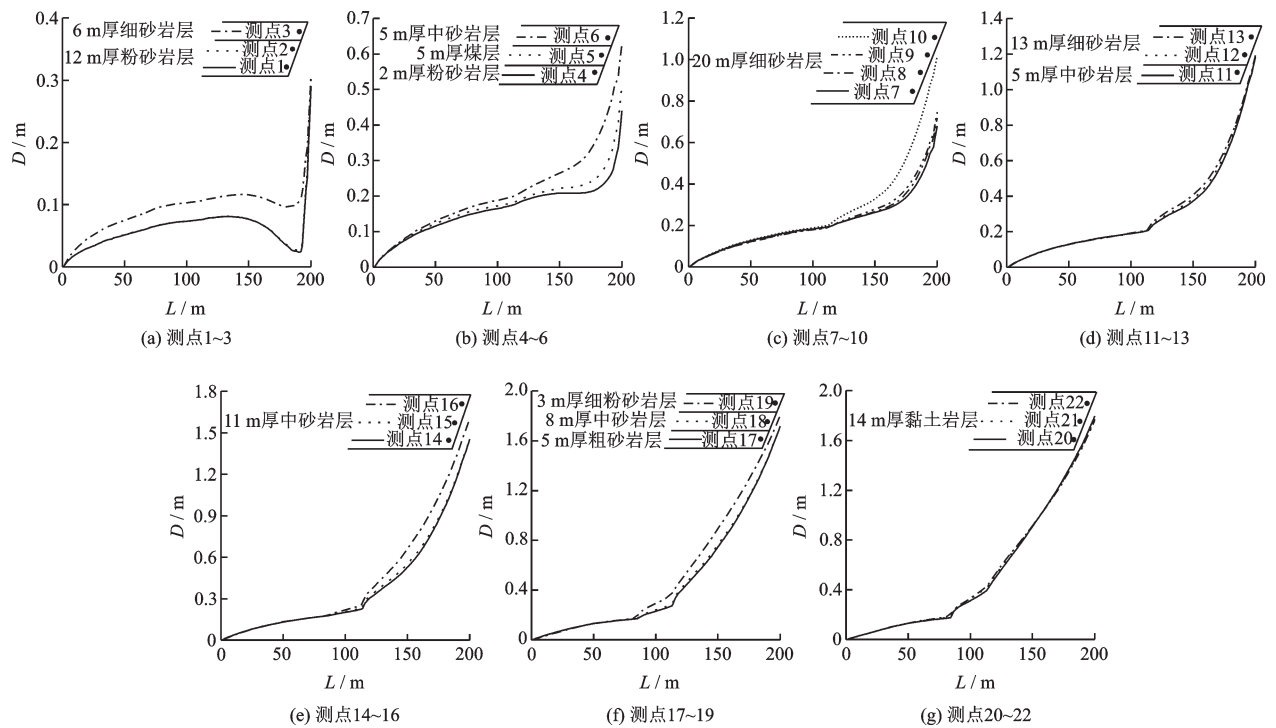


图5 不同测点D—L曲线

Fig.5 D-L curves for different monitored nodes

5 m厚中砂岩层,测点7~10位于断层上盘20 m厚细砂岩层,测点11位于断层上盘5 m厚中砂岩层,测点12和13位于断层上盘13 m厚细砂岩层,测点14~16位于断层上盘11 m厚中砂岩层,测点17位于断层上盘5 m厚粗砂岩层,测点18位于断层上盘8 m厚中砂岩层,测点19位于断层上盘3 m厚细粉

砂岩层,测点20~22位于断层上盘14 m厚黏土岩层。可以发现:

(1)测点1~3的D随L的增加均呈缓慢增加-缓慢减少-急剧增加的趋势。例如,对于测点1,当 $L=0\sim 134$  m时,D由0缓慢增加至0.081 m;当 $L=134\sim 191$  m时,D由0.081 m缓慢减少至0.024 m;

当 $L=191\sim 200$  m时, $D$ 由0.024 m急剧增加至0.33 m。相比之下,测点1和2的 $D-L$ 曲线基本重合,而测点3的在它们的上方,这说明越靠近断层上盘下端面,岩层的 $D$ 越小。

下面,以测点1为例,解释 $D$ 随 $L$ 的演化过程。 $D$ 随 $L$ 的增加缓慢增加意味着测点所在断层上盘岩层沿断层向下的滑移受到阻碍。断层下盘的采动会引起断层下盘某些岩层的变形、开裂和破断,这会引起断层上盘局部出现松动区,即断层下盘对断层上盘的挤压应力降低。所以,断层上盘某些高位岩层将沿断层向下滑移,这有利于测点所在断层上盘岩层的加速滑移。显然,上述解释无法解释 $D$ 随 $L$ 的增加缓慢增加的现象。众所周知,采动会引起采空区上方岩层应力的转移,工作面煤壁前方会存在挤压应力集中区。当 $L$ 达到一定值时,挤压应力集中区会作用于断层,这会使断层的正应力增加,从而使断层难以滑移。当这一因素的作用效果超过了某些高位岩层沿断层向下滑移的作用效果时, $D$ 随 $L$ 的增加缓慢增加的现象就会出现。随着 $L$ 的进一步增加,工作面煤壁前方的挤压力集中区逐渐覆盖断层,因而其对断层的压紧作用愈发强烈,该作用效果将大于某些高位岩层沿断层向下滑移的作用效果。所以,将出现 $D$ 随 $L$ 的增加达到峰值后减少的现象,这意味着断层上盘发生了反向滑移,即沿着断层面面向上滑移。随着 $L$ 的继续增加,工作面煤壁前方的煤柱尺寸极小,挤压应力集中区已经跨过断层,其不再对断层有作用效果。所以,在某些高位岩层沿断层向下滑移的作用下,测点所在断层上盘岩层将急剧向下滑移。正是由于本文模型区别于前人模型的边界条件处理,才可以呈现上述结果。

(2)测点4~22的 $D$ 随 $L$ 的增加均呈缓慢增加-迅速增加的趋势。例如,对于测点22,当 $L=0\sim 85$  m时, $D$ 由0缓慢增至0.204 m;当 $L=85\sim 200$  m时, $D$ 由0.204 m迅速增至1.78 m。当 $L\geq 110$  m时,断层上盘20 m厚细砂岩层的测点的 $D$ 迅速增加。该岩层为硬厚岩层,且距采空区近。所以,该岩层发生滑移对开采活动的影响较大。因此,当 $L\geq 110$  m,即工作面与断层距离小于等于100 m时应该加强顶板支护。

(3)通常,高位岩层中测点的 $D$ 开始迅速增加时的 $L$ 比低位岩层中测点的小,且前者最大的 $D$ 比

后者的大。例如,测点20~22的 $D$ 开始迅速增加时的 $L=85$  m,最大的 $D=1.78$  m;测点12和13的 $D$ 开始迅速增加时的 $L=114$  m,最大的 $D=1.21$  m。这说明高位岩层将先于低位岩层发生明显滑移,断层滑移基本是由上至下发展的,且高位岩层的滑移程度比低位岩层的大。

#### 4.3 加快工作面推进对测点的 $D$ 的影响

图6给出了方案1~3中测点1~22的 $D-L$ 曲线。由此可以发现:

(1)对于测点1~3,当开采间隔较小时(方案1),测点的 $D$ 随 $L$ 的增加总体上呈单调递增趋势;测点的 $D$ 的最大值较小。当开采间隔较大时(方案2和3),测点的 $D-L$ 曲线变化趋势基本相同。在急剧增加阶段之前,方案2中测点的 $D$ 的峰值比方案3中测点的低,而在急剧增加阶段开始时,方案2中测点的 $D$ 比方案3中测点的高,这说明方案3中测点所在断层上盘岩层反向滑移程度比方案2中的大。方案2中测点的 $D$ 的最大值比方案3中测点的大,这说明方案2中测点所在断层上盘岩层向下滑移程度比方案3中的大。

(2)对于测点4~22,当开采间隔不同时,测点的 $D-L$ 曲线变化趋势基本相同。当 $L$ 相同时,若开采间隔较小,则断层上盘煤层上方岩层测点的 $D$ 较小。例如,当 $L=100$  m时,方案1~3中测点6的 $D$ 分别为0.129、0.189、0.234 m;当 $L=150$  m时,方案1~3中测点12的 $D$ 分别为0.300、0.392、0.454 m。

(3)通常,当开采间隔较小时,测点的 $D$ 开始迅速增加时的 $L$ 较大,即测点所在断层上盘岩层发生明显滑移的时间较晚;当开采间隔较大时,测点的 $D$ 开始迅速增加时的 $L$ 较小,即测点所在断层上盘岩层发生明显滑移的时间较早。例如,对于测点12和13,方案1~3中 $D$ 开始迅速增加时的 $L$ 分别为125、114、120 m;对于测点20~22,方案1~3中 $D$ 开始迅速增加时的 $L$ 分别为93、85、68 m。

(4)通常,当开采间隔不同时,同一岩层中测点的 $D$ 相差不大。例如,当 $L=0\sim 200$  m时,方案1~3中测点12和13的 $D$ 相差的最大值分别为0.026、0.025、0.025 m;方案1~3中测点20~21的 $D$ 相差的最大值分别为0.036、0.034、0.039 m。

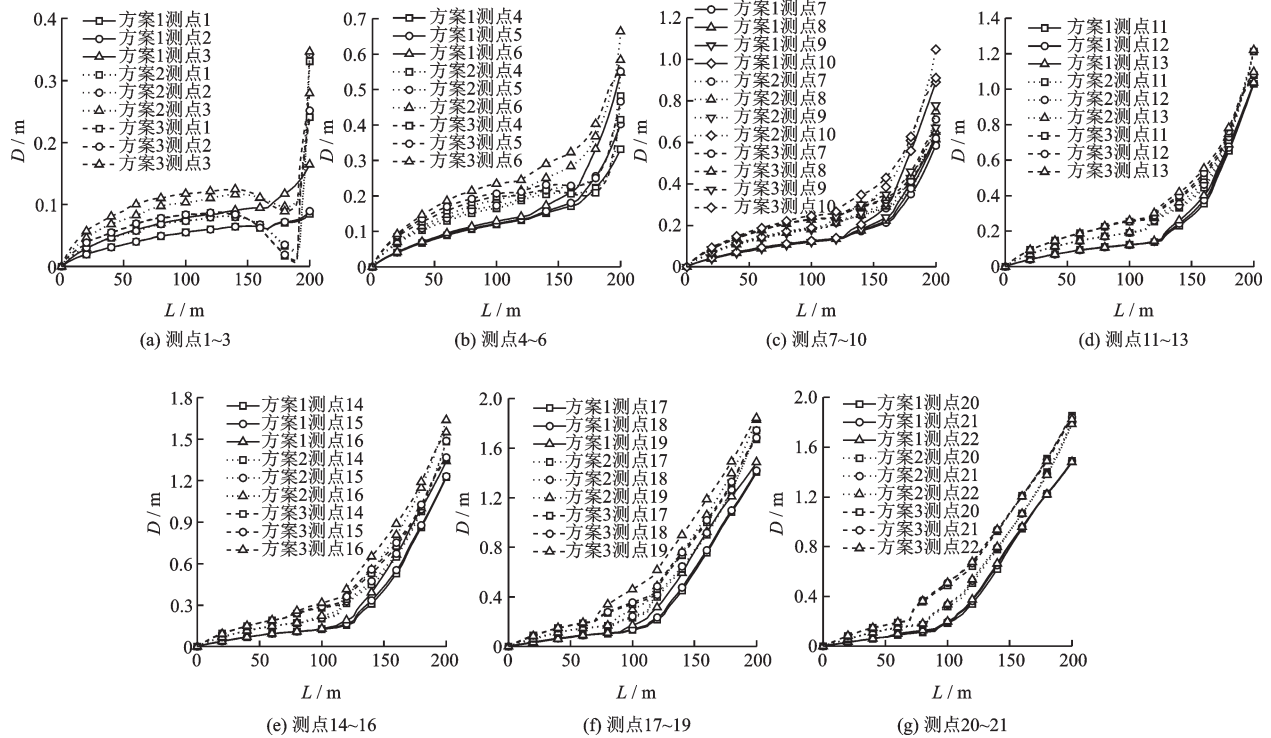


图6 不同方案测点1~22的D—L曲线

Fig.6 D-L curves of monitored nodes 1~22 in different schemes

## 5 结论

(1)当工作面与断层的距离减少时,煤层下方测点的滑移量呈缓慢增加-缓慢减少-急剧增加的趋势;煤层上方测点的滑移量呈缓慢增加-迅速增加的趋势。同一岩层中测点的滑移量相差不大。

(2)高位岩层将先于低位岩层发生明显滑移,断层滑移基本是由上至下发展的,且高位岩层的滑移程度比低位岩层的大。

(3)当工作面与断层距离相同时,若开采间隔较小,即工作面推进较快,则煤层上方测点的滑移量较小。当工作面与断层距离小于等于100 m时,采空区上方附近岩层发生明显滑移,应该加强支护。

## 参考文献:

[1] Cai W, Dou L M, Li Zh L, et al. Mechanical initiation and propagation mechanism of a thrust fault: A case study of the Yima section of the Xiashi-Yima thrust[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(5): 1927-1945.

[2] Cai W, Dou L M, He J, et al. Mechanical genesis of Henan Yima thrust nappe structure[J]. Journal of Central South University, 2014, 21(7): 2857-2865.

[3] 蔡武. 断层型冲击矿压的动静载叠加诱发原理及其监测预警研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.  
Cai W. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2015. (in Chinese)

[4] 张平松, 鲁海峰, 韩必武, 等. 采动条件下断层构造的变形特征实测与分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(2): 351-356.

Zhang P S, Lu H F, Han B W, et al. Monitoring and analysis of deformation characteristics of fault structure under mining condition[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(2): 351-356. (in Chinese)

[5] 孙健. 断层附近工作面顶板围岩运动规律及其稳定性控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.

Sun J. Study on working face roof rock movement law and its stability control near fault[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese)

[6] 王学滨, 郭长升, 邓超群. 正、逆断层下盘开采断层及其附近煤层应力时空分布的数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1993-2000.

Wang X B, Guo Ch Sh, Deng Ch Q. Numerical simula-

tion of spatiotemporal distributions of stresses on the fault and coal seam in the vicinity of the fault for mining in the footwall of the normal and reverse fault[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(5): 1993-2000. (in Chinese)

- [7] 陈学华, 吕鹏飞, 宋卫华, 等. 综放开采过断层冲击地压危险分析及防治技术[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(5): 81-87.

Chen X H, Lyu P F, Song W H, et al. Analysis and control technology of danger of rock burst when fully mechanized caving passing through fault[J]. *China Safety Science Journal*, 2016, 26(5): 81-87. (in Chinese)

- [8] Goge D, Sinapius M, Fullekrug U, et al. Detection and description of non-linear phenomena in experimental modal analysis via linearity plots[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2005, 40(1): 27-48.

- [9] Zang C, Schwingshackl C W, Ewins D J. The influence of nonlinearity on uncertainty and variability for dynamic models[C]//*Proceedings of the 1st International Conference on Uncertainty in Structural Dynamics*. Sheffield: ICUSD, 2007.

- [10] 王学滨, 郭翔, 芦伟男, 等. 单层采动诱发长壁开采水平岩层开裂、冒落过程模拟——基于连续-非连续方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(1): 1-6.

Wang X B, Guo X, Lu W N, et al. Modeling of cracking and caving of horizontal strata induced by the excavation of a single stratum in long-wall mining-based on a continuum-discontinuum method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(1):

1-6. (in Chinese)

- [11] 王学滨, 陈忠元, 郭瑞, 等. 预设V形缺口的单向拉伸岩样变形-开裂过程模拟——基于连续-非连续方法[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(2): 209-215.

Wang X B, Chen Zh Y, Guo R, et al. Modeling of deformation-cracking processes of rock specimens with V-shaped notches in uniaxial tension-based on a continuum-discontinuum method[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(2): 209-215. (in Chinese)

- [12] Lollino P, Andriani G F. Role of brittle behaviour of soft calcarenites under low confinement: Laboratory observations and numerical investigation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(7): 1863-1882.

- [13] Liu Ch, Li H M, Jiang D J. Numerical simulation study on the relationship between mining heights and shield resistance in longwall panel[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, 27(2): 293-297.

- [14] 李志华, 窦林名, 陈国祥, 等. 采动影响下断层冲击矿压危险性研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(4): 490-495.

Li Zh H, Dou L M, Chen G X, et al. The risk of fault induced rockburst during mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(4): 490-495. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)



(上接第 803 页)

- [53] 孔金娣. 医疗类建筑改扩建下的防火疏散设计研究——以彰武县中医院为例[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.

Kong J D. Study on the design of fire evacuation in medical buildings under reconstruction and expansion - Taking Zhangwu Hospital of Traditional Chinese Medicine as an Example[D]. Fuxin: Building Liaoning Technical University, 2020. (in Chinese)

- [54] 卫生健康委办公厅、住房城乡建设部办公厅. 新型冠状病毒肺炎应急救治设施设计导则[EB/OL].[2020-02-08]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/11/content\\_5477301.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/11/content_5477301.htm).

- [55] 卫生健康委办公厅、发展改革委办公厅. 综合医院“平疫结合”可转换病区建筑技术导则(试行)[EB/OL].[2020-07-30]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/18/content\\_5535492.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-08/18/content_5535492.htm).

- [56] 谢颢, 叶高阳, 谢沛霖. “常态化防控”下综合医院门急

诊楼建筑布局[J]. *华中建筑*, 2020, 38(12): 63-65.

- [57] 陈永建. 传染病专科医院建筑功能空间设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.

Chen Y J. Research on functional space design of buildings in infectious disease hospital[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020. (in Chinese)

- [58] 屋盖结构风荷载标准: JGJ/T481—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

Standard for wind loads on roof structures: JGJ/T481—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)

- [59] 玻璃幕墙工程技术规范: JGJ 102—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

Technical code for glass curtain wall engineering: JGJ 102—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)