

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1492

采动诱发应力主轴偏转对断层稳定性影响分析

卢志国^{1,2,3}, 鞠文君^{1,2}, 赵毅鑫³, 王 浩^{3,4}, 郑建伟^{1,2}, 刘爱卿^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013;
3. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 4. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 为探究上、下盘不同开采顺序对断层稳定性影响, 基于压力拱理论提出应力偏转概念, 运用 FLAC^{3D} 数值方法, 模拟工作面分别从断层上盘和下盘向断层推进的过程, 分析接触面应力状态和演化规律, 验证采动诱发应力偏转, 并与断层损伤变量及其增速进行对比分析。研究表明, 工作面自上、下盘不同方向靠近断层, 顶板主应力起始偏转位置分别为距离断层 120 m 和 40 m 处, 相差 80 m, 且下盘最大偏转角是上盘工作面的 1.68 倍; 断层损伤变量的启滑点分别距断层 130 m 和 40 m, 下盘工作面相对上盘工作面提前 90 m, 二者良好的对应关系表明应力偏转与断层滑移失稳显著相关。采动诱发应力偏转产生附加应力概念可以很好解释上、下盘工作面断层稳定性差异, 为断层保护煤柱留设及工作面过断层防灾措施制定提供新思路。

关 键 词: 开采扰动; 应力偏转; 附加应力; 断层滑移

中图分类号: TD 313

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)11-4459-08

Analysis of the mining induced stress rotation influence on fault stability

LU Zhi-guo^{1,2,3}, JU Wen-jun^{1,2}, ZHAO Yi-xin³, WANG Hao^{3,4}, ZHENG Jian-wei^{1,2}, LIU Ai-qing^{1,2}

(1. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

3. School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

4. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: To explore the influence of different mining sequences on the fault stability, this paper put forward the hypothesis of stress rotation based on pressure arch theory. Firstly, a numerical model was set up to simulate the process of working face passing through the fault from the hanging wall and footwall to the fault. And then it analyzed the stress state and evolution law of contact surface, and verified the stress rotation induced by mining. Finally, comparative analysis of the fault damage variables and their growth rates was carried in this paper. The results show that during the propulsion process of working face from different directions of hanging wall and footwall of fault, the distance between start position of principal stress rotation in roof and fault is 120 m and 40 m, respectively. The maximum value of principal stress deflection angle when the working face located at footwall is 1.68 times than the value when located at hanging wall. The starting slip points of fault damage variables are 130 m and 40 m from fault, respectively. The fine correspondence between them indicates that stress rotation is significantly related to fault slip instability. The caption of additional stress induced by stress rotation can well explain the difference of fault stability due to different mining sequences, and provide new ideas for the design of fault coal pillar and disaster prevention measures.

Keyword: mining disturbance; stress rotation; additional stress; fault slip

1 引 言

地下岩层受构造应力作用而破断, 并且沿破裂

面发生显著位移形成断层, 在断层附近进行采掘作业时, 由于破断面阻隔应力传递, 在工作面前方形成应力集中, 与构造应力相互叠加形成的耦合应力

收稿日期: 2018-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0801401, No. 2016YFC0600708, No. 2017YFC0804205); 国家自然科学基金面上项目(No. 51774185); 中央高校基本科研业务费项目(No. 2009QM01)。

This work was supported by the National Key R&D Projects (2016YFC0801401, 2016YFC0600708, 2017YFC0804205), the National Natural Science Foundation of China(51774185) and the Fundamental Research Funds for the Central University (2009QM01).

第一作者简介: 卢志国, 男, 1992 年生, 博士研究生, 主要从事矿井动力灾害及其防治等方面的研究工作。E-mail: cumtblzg@163.com

通讯作者: 赵毅鑫, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事岩石力学与采矿工程方面的研究工作。E-mail: zhaoyx@cumt.edu.cn

异常区是矿山动力灾害^[1-2]和矿井水灾^[3-4]的高发区域。目前,国内外学者针对断层附近矿山压力分布及其显现规律开展大量研究工作。就研究方法而言,姜耀东等^[5]建立 3 种冲击地压模型,并以煤矿开采为背景提炼出 4 个亟需解决的科学问题;李振雷等^[6]构建断层滑移和闭锁力学模型;曹安业等^[7]分析孤岛工作面临近断层时煤柱受力状态,并利用震动波 CT 技术对采掘现场进行动态实时预警;Potvin 等^[8]以现场微震事件为基础反演断层滑移过程;孙运江等^[9]利用现场微震监测等手段研究深部工作面受隐伏断层等构造影响时,可能出现底板突水的问题,并采用数值模拟方法进行验证;焦振华^[10]、吕进国等^[11]运用精细化建模技术构建三维数值模型分析采动影响下断层正、剪应力演化规律及损伤活化特征,并与相似模型进行对照以验证其合理性;Wang^[12]、王爱文^[13]等搭建工作面过断层相似模拟试验台,研究工作面连续揭露多条断层时矿压显现规律,并辅以声发射手段^[14]研究开采扰动对断层构造区域应力场分布及覆岩运移规律;宋义敏等^[15]制作煤岩体组合试样研究断层黏滑动态失稳过程,发现断层高低速滑移交错相间的波动性。就研究角度而言,王存文等^[16]从构造应力角度分析断层区域冲击事故高发原因,认为避免应力叠加是有效防治措施;Suorinen 等^[17]分析剪应力作用下保护煤柱稳定性;徐长杰等^[18]从应力偏转角度研究松动区内应力分布;王浩等^[19]基于应力偏量和能量释放率提出煤岩冲击判据;Sainoki 等^[20]动态模拟断层滑移过程,从能量释放角度分析断层活化滑移。大量研究发现,开采方法尤其是上下盘开采顺序不同对断层稳定性影响显著^[21-23],指出下盘工作面较上盘工作面更易导致断层活化失稳,但以往研究多为模拟结果展示或现场调研比较,对造成这种差异的原因分析较少。

本文基于压力拱理论提出采动诱发应力偏转产生附加应力概念,采用 FLAC^{3D} 数值模拟手段分析工作面分别由断层上、下盘不同方向靠近断层过程中,接触面应力演化规律,验证采动诱发应力偏转,并与断层损伤变量及其增速进行对比分析,从应力偏转产生附加应力角度阐释不同开采顺序下断层稳定性差异。

2 工程概况

山西正利煤矿年产原煤 1.50 Mt,井田呈不规则四边形,南北走向长约 5.0 km,东西倾向宽约 3.2 km,含煤地层为二叠系下统山西组(4 层)和石炭系上统太原组(10 层),可采煤层 4 层,现阶段主采煤

层为 4[#]煤层,采用走向长壁采煤法,平均采厚为 3.9 m,平均倾角为 9°,开采深度为 645~720 m。当前主采面为 14⁻¹103 工作面,东侧为 14⁻¹102 工作面采空区,西侧为 14⁻¹104 工作面,如图 1 所示。

14⁻¹103 工作面,南北走向长为 1 589 m,东西倾向宽为 180 m,运输巷掘进中先后揭露 F36、F37 和 F38 三条断层,断层产状参数详见表 1,逆断层 F36 和 F37 形成过程中,岩层相互挤压形成地垒构造,工作面推进经历“下盘-上盘-下盘”过程,如图 1 所示。

表 1 14⁻¹103 工作面主要断层产状表
Table 1 Parameters of three faults around 14⁻¹103
workface

断层名称	走向 /(°)	倾向 /(°)	倾角 /(°)	落差 /m
F36	250	340	65	2.0
F37	250	340	43	2.3
F38	232	322	56	2.0

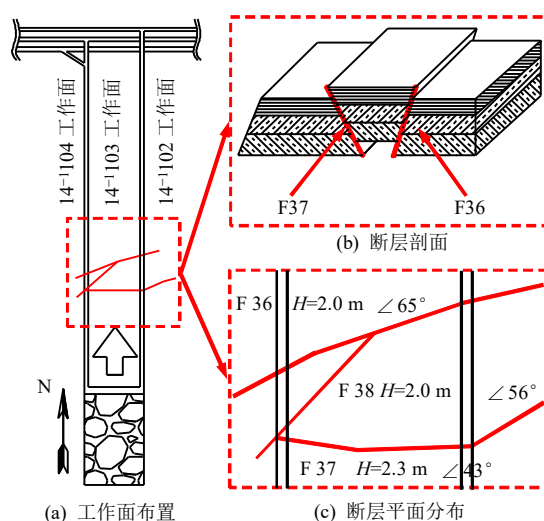


图 1 14⁻¹103 工作面平面图
Fig.1 Layout of 14⁻¹103 workface

14⁻¹103 工作面自南向北回采,在距离开切眼 300~500 m 范围内,工作面依次通过 F37 和 F36 断层,此阶段巷道破坏严重,两帮剧烈收缩,底板臃起。尤其当工作面过 F37 断层时,采动诱发断层活化释放能量对周围岩体扰动作用加剧工作面前方巷道围岩破坏,对比分析工作面通过两断层时巷道变形破坏情况发现,虽然断层 F36 受到采动影响时间更长,但工作面过 F37 断层时,巷道变形较 F36 更剧烈。

其原因可归纳为:①巷道剧烈变形带处于断层构造应力异常区,采动诱发断层滑移失稳对巷道稳

定性影响显著,构造应力与采动应力耦合作用加剧巷道破坏;②上、下盘开采顺序对断层稳定性影响显著,过 F37 断层时,工作面位于断层下盘,较工作面位于上盘更易诱发断层活化,相反过 F36 断层时,工作面位于断层上盘,因此,巷道变形较缓和。工作面不同推进方向对断层稳定性影响方式不同,导致巷道变形产生差异。

现场观测结果表明,工作面自下盘靠近断层时,构造附近区域巷硐变形较上盘工作面更剧烈,本文从采动诱发应力主轴偏转产生附加应力角度探究工作面不同推进方向诱发断层活化失稳机制及构造区域内巷硐变形破坏特征。

3 断层活化机制

矿山采掘作业导致断层构造附近区域主应力方向发生偏转^[24],在围岩系统中产生附加应力,若工作面自下盘靠近断层,距离断层较近时,附加应力方向与断层倾向相近,当工作面位于断层某一特定位置,二者距离恰当时,附加应力恰好与断层面平行,如图 2 所示,此时断层上微结构单元受到剪应力达到最大值,而有效正应力相对减小,节点间摩擦力最小,断层微结构单元稳定性最差。

由库仑破坏准则可知,断层活化失稳的实质为外载荷对结构单元的剪切作用大于其抗剪强度,两盘沿剪切面发生相对滑移。当采动诱发应力偏转产生的附加应力平行断层面时,沿断层面剪应力急剧增加,极易发生滑移失稳。

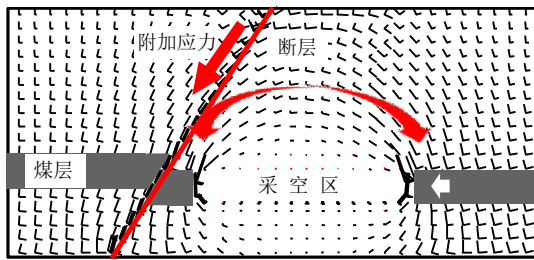
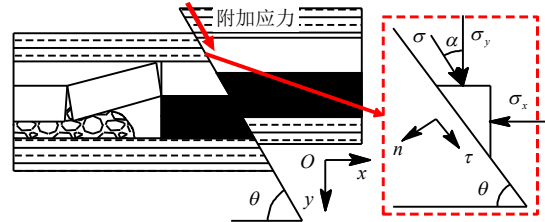


图 2 采动引起应力偏转产生附加应力
Fig.2 Mining induced stress rotation

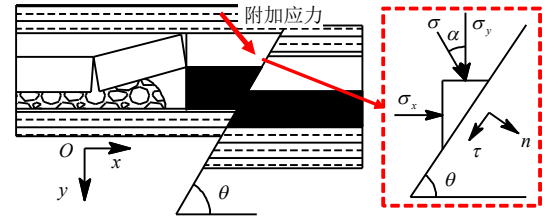
3.1 附加应力作用下断层受力分析

不考虑断层带厚度,垂直断层走向作剖面,取位于上盘且与下盘紧密接触单位走向长度微结构单元作为研究对象,对其进行受力分析,简化力学模型,如图 3 所示。图中 n 、 τ 分别为沿断层面法线及切线正方向, α 为应力附加应力与 y 方向夹角, θ 为断层倾角, σ_x 为单元体水平载荷,包括岩块间水平推力与上下岩层间摩擦力等, σ_y 为单元体垂直载

荷,包括自重及覆岩载荷等, σ 为采动引起应力偏转而产生的附加应力。取沿断层向下为切向正方向,垂直断层面指向下盘为法向正方向。



(a) 工作面位于断层上盘



(b) 工作面位于断层下

图 3 附加应力断层微结构单元受力分析
Fig.3 Stress analysis of fault under the action of additional stress

对上盘工作面进行受力分析,如图 3(a)所示。由静力平衡方程计算得到未受开采扰动前,断层面上微结构单元法向及切向应力 σ_n' 和 σ_τ' 分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n' &= \sigma_x \sin \theta + \sigma_y \cos \theta \\ \sigma_\tau' &= \sigma_x \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

构造区域受开采扰动,应力主轴发生偏转,附加应力对断层岩块产生剪力作用,附加剪力作用下微结构单元法向及切向应力分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= (\sigma_x + \sigma \cos \alpha) \sin \theta + (\sigma_y + \sigma \sin \alpha) \cos \theta \\ \sigma_\tau &= (\sigma_x + \sigma \cos \alpha) \cos \theta + (\sigma_y + \sigma \sin \alpha) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_n 、 σ_τ 分别为受开采扰动,附加剪力作用下节点法向及切向应力。

比较扰动前后单元体正、剪应力演化规律,分别求其差值:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_n &= \sigma \sin(\alpha + \theta) \\ \Delta \sigma_\tau &= \sigma \cos(\alpha - \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma_n$ 、 $\Delta \sigma_\tau$ 分别为节点法向及切向应力增量。

由式 (3) 可知,当附加应力平行断层时,微结构单元剪应力增量到达最大值,等于附加应力。对于上盘工作面,这种情况显然不存在;当附加应力垂直断层时,正应力增量取得最大值,此时,断

层面上微结构单元有效摩擦增大, 抗剪强度增加, 损伤破坏得到缓解。

对于下盘工作面靠近断层, 同理可得开采前后为单元体受力状态并求其差值:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n' &= \sigma_x \sin \theta + \sigma_y \cos \theta \\ \sigma_\tau' &= \sigma_x \cos \theta + \sigma_y \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= (\sigma_x + \sigma \cos \alpha) \sin \theta + (\sigma_y + \sigma \sin \alpha) \cos \theta \\ \sigma_\tau &= (\sigma_x + \sigma \cos \alpha) \cos \theta + (\sigma_y + \sigma \sin \alpha) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_n &= \sigma \sin(\alpha + \theta) \\ \Delta \sigma_\tau &= \sigma \cos(\alpha - \theta) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

当附加应力与断层相垂直时, 正应力增量最大, 此时剪应力增量为 0, 对于下盘工作面不存在这种情况; 随着工作面向断层推进, 附加应力倾角逐渐接近断层倾角, 当附加应力平行于断层时, 剪应力增量取得最大值, 等于附加应力, 此时正应力增量为 0, 有效摩擦最低, 断层微结构单元损伤破坏危险性最大。

3.2 断层滑移失稳判据

数值模拟中接触面采用 M-C 强度准则, 采用库仑应力增量 ΔCFS 作为断层微结构单元损伤破坏判据:

$$\Delta CFS = \Delta \sigma_\tau - \mu \Delta \sigma_n \quad (7)$$

式中: μ 为考虑孔隙水压变化的单元间摩擦系数, 当断层面节点库仑应力增量 $\Delta CFS > 0$ 时, 表明节点剪应力增大, 有效正应力相对减小, 微结构单元向损伤破坏状态靠拢; 反之, $\Delta CFS < 0$ 时, 表明节点有效正应力增加, 剪应力相对减小, 微结构单元损伤破坏得到延缓。据此可以判断单个微断层单元的稳定性, 然而, 断层滑移失稳是一个极其复杂的过程, 欲实现整体滑移目标事件, 必须以相当比例子事件(接触面微结构单元损伤滑移)发生为前提条件。

断层宏观破坏的实质是子事件在数量上积累的结果。为对断层滑移目标事件进行定量分析, 基于损伤力学原理建立损伤变量概念, 指出损伤变量 $D=0$ 时, 断层未受到采动影响, 随着 D 增大趋向于 1, 断层损伤滑移危险性逐渐增大。

$$D = \frac{S_D}{S} \quad (8)$$

式中: S_D 为接触面上发生损伤破坏的节点数量; S 为接触面上所有节点数量。

工程实践中并不会出现 $D=0$ 的情况, 地层在应力作用下, 两盘相互挤压或拉伸, 而产生相对位

移形成断层, 在构造应力及采掘作业形成的采动应力场耦合作用下, 发生活化失稳是断层微结构单元损伤破坏的宏观表现。

4 采动诱发应力偏转

4.1 建立数值模型

基于山西正利煤矿地质条件, 并以该矿 14⁻¹ 103 工作面过断层为工程背景建立两个完全的数值模型, 模拟工作面分别自断层上盘和下盘不同方向靠近断层过程中围岩应力状态, 在煤层顶板与断层面交界处布置监测点, 实时监测回采过程中顶板应力演化规律, 以下盘工作面为例展示, 如图 4 所示。

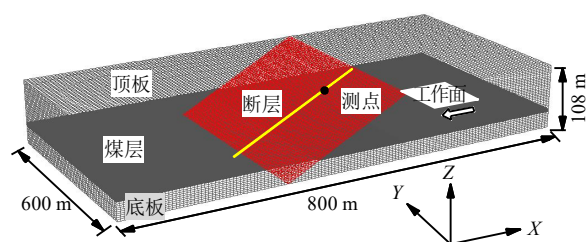


图 4 数值计算模型

Fig.4 Numerical simulation model

模型尺寸为 800 m × 600 m × 108 m (长 × 宽 × 高), 包含 369 750 个单元、390 078 个节点, X 方向为工作面推进方向, Y 方向为工作面布置方向, 工作面斜长为 100 m, 两侧各留 250 m 边界。顶部施加 13 MPa 均布载荷, 模拟上覆岩层重力, 底部限制垂直位移, 水平方向施加梯形分布载荷, 为竖直方向的 1.2 倍。在模型上下盘之间添加 interface 接触面以模拟断层, 计算分析采用 Mohr-Coulomb 准则。断层面主要参数为: 法向刚度为 1 GPa、内摩擦角为 28°、黏聚力为 0.9 MPa。各岩层参数详见表 2。

表 2 数值模型岩层参数

Table 2 Properties of various strata in the model

岩性	h / m	ρ / (kg/m ³)	K / GPa	G / GPa	c / MPa	φ / (°)
细砂岩	18	2 700	23.10	14.20	3.60	38
粉砂岩	10	2 500	14.88	10.24	5.00	42
砾岩	20	2 700	28.49	5.85	6.60	40
泥岩	12	2 500	10.20	7.40	2.20	36
中粒砂岩	20	2 600	23.10	9.00	4.40	41
4#煤	3	1 400	1.50	0.80	0.60	18
细砂岩	4	2 700	13.10	14.20	2.60	38
粉砂岩	4	2 500	24.88	10.24	5.00	42
砂质泥岩	14	2 400	10.20	7.40	4.50	40

注: h 、 ρ 、 K 、 G 、 φ 、 c 分别为岩层厚度、密度、体积模量、剪切模量、内摩擦角和黏聚力。

4.2 采动诱发应力偏转

地下矿体采出后, 原本由被采出矿体承载的上覆岩层的重量向采空区两侧转移即工作面前方煤壁和采空区后方垮落矸石成为新的承载点, 致使工作面前方顶板应力方向发生偏转。文献[24]指出, 当工作面临近断层构造时, 不同推进方向将对断层面产生截然相反的作用, 对断层稳定性具有重要影响, 从应力偏转角度可以很好解释不同开采方向断层滑移失稳差异。

采用 FLAC^{3D} 数值软件, 模拟工作面自断层上、下盘不同方向靠近断层, 实时监测回采过程中顶板应力演化过程。为定量分析断层面上主应力偏转情况, 根据主应力偏转表达式 (见下式) 计算断面上的主应力方向, 如图 5 所示。径向为采面距断层距离, 单位为 m; 环向为主应力偏转角度, 单位为°; 主应力向下盘方向偏转为负, 反之向上盘方向偏转为正。

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (9)$$

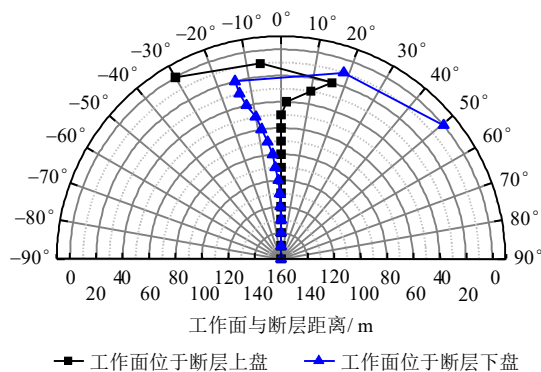


图 5 回采过程中最大主应力方向变化情况
Fig.5 Direction of maximum principal stress in mining process

当工作面位于下盘时, 断层面上主应力发生偏转在时序上早于上盘工作面, 且更为剧烈。工作面在下盘距离断层 120 m 时, 主应力方向开始产生变化, 随着工作面逐渐靠近断层, 当距断层 20 m 时, 偏转角负向增大至 -14.7° , 继续向断层推进, 主应力反向偏转, 当工作面揭露断层时, 主应力偏转角为 50.3° ; 工作面自上盘靠近断层时, 主应力偏转表现出相似的特征, 但方向相反; 在距断层 40 m 时, 断层面上主应力开始发生偏转, 与下盘工作面相同; 在距离断层 20 m 时, 主应力正向偏转至最大值 15.8° 。随工作面继续推移, 主应力反向偏转, 当工作面距断层 0 m 时, 主应力方向为 29.9° 。

对比上下盘工作面断层主应力偏转发现, 上、下盘不同开采顺序主应力偏转方向相反, 工作面位于下盘时主应力起始偏转早于上盘 80 m, 且偏转程度也较上盘明显, 最大偏转角相差 20.4° 。

5 不同推进方向断层稳定性分析

采用 FLAC^{3D} 数值模拟, 实时监测工作面从上下盘不同方向靠近断层时, 接触面节点应力状态, 代入式 (7) 判断单个节点稳定性, 遍历 interface 面上所有节点受力情况, 利用式 (8) 计算断层损伤滑移变量。

5.1 损伤变量对比分析

比较图 6 中两曲线发现, 不同推进方向对断层损伤滑移的影响存在显著差异, 两种模型断层损伤变量明显增长起始点相差 90 m。当工作面位于断层上盘时, 从距离断层 40 m 开始, 损伤变量迅速增长, 与主应力起始偏转点位置相同, 当工作面无限靠近断层 (距离断层 0 m), 损伤变量增至 0.34。对于下盘工作面而言, 当工作面距离断层 130 m 时, 断层开始滑移, 但是起始损伤变量增速缓慢, 直至距离断层 110 m 时出现较明显增长, 之后近似呈直线上升, 距离断层 0 m 时, 断层损伤变量增至 0.66。下盘开采时断层损伤启动早于上盘开采, 且最终损伤变量值约为其 2 倍。

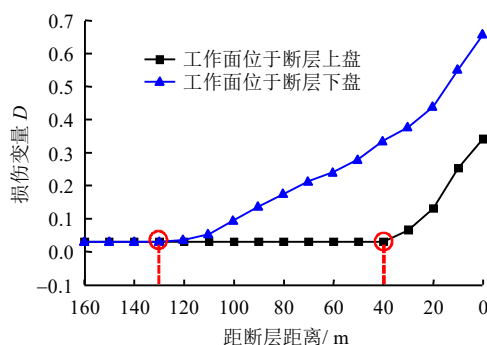


图 6 不同推进方向断层损伤变量对比
Fig.6 Comparison of fault damage variation in different sequences

5.2 损伤变量增速对比

断层损伤滑移变量是开采扰动逐步累加的结果, 必然呈现增长趋势, 对图 6 断层损伤变量随工作面距断层距离变化曲线采用多项式进行拟合, 使其可以经过图 6 中每个节点, 并对该多项式求导得到损伤变量增速以表征工作面推进过程中距断层距离对其稳定性的影响, 如图 7 所示。

在损伤变量增速图中, 上盘工作面断层损伤变

量明显增长起始点依然位于距断层 40 m 处,随着工作面推进,损伤变量增速迅速增大,在距离断层 10 m 处到达最大值 0.12 m^{-1} ;距离断层 130 m 处为下盘工作面损伤变量明显增长起始点,随工作面继续推移,损伤变量增速逐步增长至 0.04 m^{-1} ,之后进入近似匀速增长阶段(距断层 100~70 m),当工作面处于距断层 60~30 m 阶段时,其增速在 $0.03 \sim 0.06 \text{ m}^{-1}$ 范围内波动,此阶段断层可能处于黏滑状态,在距离断层 10 m 时损伤变量增速到达最大值 0.11 m^{-1} 。

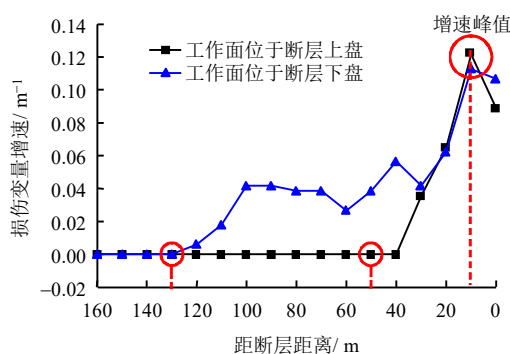


图7 不同推进方向损伤变量增速对比

Fig.7 Increasing rate comparison of fault damage variation in different sequences

对比图6和图7发现,工作面自上下盘不同方向靠近断层时,对其稳定性的影响主要表现为启滑距离的差异,下盘工作面早于上盘工作面 90 m,表明当工作面位于下盘时,开采扰动诱发断层滑移启动较早。究其原因,从空间展布角度分析,断层向下盘方向倾斜,因此下盘工作面前方增压区可以较早波及断层面,导致下盘工作面断层启滑点早于上盘工作面。对于上盘工作面,在与断层距离足够小时,损伤变量出现明显增长后,其增大速率与下盘工作面差距并不大。无论工作面位于断层哪一侧,在逐渐靠近断层过程中,损伤变量增速均逐渐增大,但其峰值均位于距断层 10 m 处,之后有所降低。究其原因,距断层 10 m 时,断层受到采动引起的超前支撑压力峰值扰动,随着工作面继续向断层推移,断层处于煤壁前方减压区,因而增速较小,这一现象与主应力在距断层 20 m 处发生反向偏转相对应。主应力偏转与损伤变量在采面推进过程中的高度对应也表明应力偏转对断层稳定性具有重要影响。从应力偏转角度可以较好解释工作面从下盘靠近断层时更易引起断层活化失稳,诱发断层型冲击地压。

6 支护载荷实测分析

在 14^{-1} 103 工作面推进过程中,对工作面前方运输巷锚杆、锚索载荷进行实时监测,实测发现,工作面过断层时锚索载荷高于锚杆,且过 F37 断层时支护载荷均高于 F36,图8为正利矿 14^{-1} 103 工作面超前巷道锚杆(索)载荷随工作面推进的变化曲线。

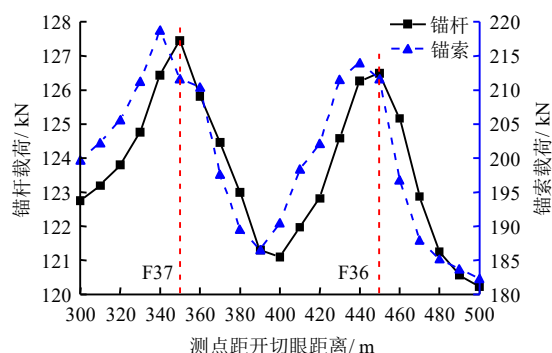


图8 超前巷道支护载荷

Fig.8 Support loads of advance roadway

正利矿 14^{-1} 103 工作面自 F37 下盘靠近断层,锚杆(索)载荷增大,由上凹形曲线可知载荷增速亦呈增长趋势。工作面自开切眼推进 340 m(距 F37 断层 10 m)时,锚索载荷达到最大值 218.8 kN,距开切眼 350 m 时锚杆载荷达到最大值 127.5 kN;继续推进,工作面过断层后支护结构载荷迅速下降,当临近 F36 时,再次迅速攀升,锚索早于锚杆 10 m 到达极值载荷,分别距离开切眼 440 m 和 450 m,工作面临近 F36 时,锚杆、锚索的极值载荷分别为 126.5 kN 和 214.0 kN。断层阻隔应力传递使工作面前方出现应力集中,与构造应力相互耦合叠加形成叠合应力,加剧围岩破坏,增加维护难度,巷道支护物载荷明显增大。

对比工作面两次过断层支护结构载荷发现,过 F36 断层时锚杆、锚索峰值载荷分别较 F37 断层低 1.0 kN 和 4.8 kN。工作面先后通过 F37 和 F36 两断层, F36 附近巷道围岩受到多次采掘扰动,加剧围岩破坏,自稳能力降低,却出现支护结构载荷相对较低现象,表明不同工作面位置对断层稳定性影响显著。采掘作业引起局部应力主轴偏转,当工作面位于断层下盘时,主应力偏转产生顺向断层面的附加应力,增加断层微结构单元剪切作用,有效摩擦相对降低,断层稳定性降低,活化滑移危险增大;反之,上盘工作面导致应力偏转产生指向断层面附加应力,断层微结构单元正应力增加,有效摩擦增

大, 抗剪强度增强, 断层滑移危险性较下盘工作面低。

7 结 论

(1) 当工作面由下盘靠近断层时, 应力偏转产生平行断层面附加应力, 沿断层面剪应力增加, 使其发生滑移失稳的危险性较上盘工作面更高。因此当工作面布置于断层下盘时更应加强监测与支护工作。

(2) 下盘工作面煤层顶板主应力偏转早于上盘工作面 80 m, 且最大偏转角是上盘工作面的 1.68 倍。主应力起始偏转位置与断层起始滑移位置相近, 二者对应关系表明应力偏转与断层滑移失稳显著相关, 从主应力偏转角度可以很好解释上下盘工作面稳定差异。

(3) 工作面自上、下盘不同方向推进时, 断层损伤滑移变量启滑位置相差 90 m, 表明下盘工作面断层滑移启动较早, 当采面距断层足够近时, 损伤变量增速相差不大, 且在距离断层 10 m 处均达到最大值, 与主应力在距断层 20 m 处发生反向偏转相对应。

参 考 文 献

- [1] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 煤岩冲击失稳的机制和实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, LIU Wen-gang, et al. Investigation on the mechanism of coal bumps and relating experiment[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 姜耀东, 潘一山, 姜福兴, 等. 我国煤炭开采中的冲击地压机制和防治[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2): 205—213.
JIANG Yao-dong, PAN Yi-shan, JIANG Fu-xing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(2): 205—213.
- [3] 朱光丽, 张文泉, 张贵彬, 等. 采动诱发断层活化导水试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3163—3172.
ZHU Guang-li, ZHANG Wen-quan, ZHANG Gui-bin, et al. Experimental study on fault activation conducting water inrush[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(11): 3163—3172.
- [4] 张士川, 郭惟嘉, 孙文斌, 等. 深部开采隐伏构造扩展活化及突水试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3111—3120.
ZHANG Shi-chuan, GUO Wei-jia, SUN Wen-bin, et al. Experimental research on extended activation and water inrush of concealed structure in deep mining[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3111—3120.
- [5] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188—2204.
JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin. State of the art: investigation on mechanism forecast and control of coal bumps in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(11): 2188—2204.
- [6] 李振雷, 窦林名, 蔡武, 等. 深部厚煤层断层煤柱型冲击矿压机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 333—342.
LI Zhen-lei, DOU Lin-ming, CAI Wu, et al. Fault-pillar induced rock burst mechanism of thick coal seam in deep mining[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 333—342.
- [7] 曹安业, 王常彬, 窦林名, 等. 临近断层孤岛面开采动力显现机制与震动波CT动态预警[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(3): 411—417.
CAO An-ye, WANG Chang-bin, DOU Lin-ming, et al. Dynamic manifestation mechanism of mining on the island coalface along fault and dynamic pre-warning of seismic waves with seismic tomography[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2017, 34(3): 411—417.
- [8] POTVIN Y, JARUFE J, WESSELOO J. Interpretation of seismic data and numerical modelling of fault reactivation at El Teniente, Reservas Norte sector[J]. *Mining Technology*, 2013, 119(3): 175—181.
- [9] 孙运江, 左建平, 李玉宝, 等. 邢东矿深部带压开采导水裂隙带微震监测及突水机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2335—2342.
SUN Yun-jiang, ZUO Jian-ping, LI Yu-bao, et al. Micro-seismic monitoring on fractured zone and water inrush mechanism analysis of deep mining above aquifer in Xingdong coalmine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 38(8): 2335—2342.
- [10] 焦振华. 采动条件下断层损伤滑移演化规律及其诱冲机制研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2017.
JIAO Zhen-hua. Research on the evolution law of fault slip and mechanism of coal bumps induced by mining[D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2017.
- [11] 吕进国, 姜耀东, 李守国, 等. 巨厚坚硬顶板条件下断层诱冲特征及机制[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1961—1969.

- LÜ Jin-guo, JIANG Yao-dong, LI Shou-guo, et al. Characteristics and mechanism research of coal bumps induced by faults based on extra thick and hard roof[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(10): 1961—1969.
- [12] WANG H, JIANG Y, XUE S, et al. Influence of fault slip on mining-induced pressure and optimization of roadway support design in fault-influenced zone[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2016, 8(5): 660—671.
- [13] 王爱文, 潘一山, 李忠华, 等. 断层作用下深部开采诱发冲击地压相似试验研[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2486—2492.
- WANG Ai-wen, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, et al. Similar experimental study of rockburst induced by mining deep coal seam under fault action[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 34(9): 2486—2492.
- [14] 赵善坤. 采动影响下逆冲断层“活化”特征试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(2): 354—360.
- ZHAO Shan-kun. Experiments on the characteristics of thrust fault activation influenced by mining operation[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2016, 33(2): 354—360.
- [15] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层黏滑动态变形过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(1): 171—179.
- SONG Yi-min, MA Shao-peng, YANG Xiao-bin, et al. Experimental study on the displacement evolution of fault in stick-slip process[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2012, 55(1): 171—179.
- [16] 王存文, 姜福兴, 刘金海. 构造对冲击地压的控制作用及案例分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊 2): 263—268.
- WANG Cun-wen, JIANG Fu-xing, LIU Jin-hai. Analysis on control action of geologic structure on rock burst and typical cases[J]. **Journal of China Coal Society**, 2012, 37(Suppl.2): 263—268.
- [17] SUORINENI F T, MGUMBWA J J, KAISER P K, et al. Mining of orebodies under shear loading Part 2 - failure modes and mechanisms[J]. **Mining Technology**, 2014, 123(4): 240—249.
- [18] 徐长节, 梁禄钊, 陈其志, 等. 考虑松动区内应力分布形式的松动土压力研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1927—1934.
- XU Chang-jie, LIANG Lu-ju, CHEN Qi-zhi, et al. Research on loosening earth pressure considering the patterns of stress distribution in loosening zone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 1927—1934.
- [19] 王浩, 赵毅鑫, 牟宗龙, 等. 矿震扰动下采区煤柱应力偏量集中区诱冲机制及防治方法[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1202—1210.
- WANG Hao, ZHAO Yi-xin, MU Zong-long, et al. The mechanism of rockburst in district coal pillar with high deviatoric stress and mining tremors impact and its prevention methods[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2017, 46(6): 1202—1210.
- [20] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2014, 66(1): 19—29.
- [21] 代进, 蒋金泉. 上下盘开采顺序对断层煤柱采动应力的影响[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(1): 35—41.
- DAI Jin, JIANG Jin-quan. Influence of mining sequence of hanging wall and foot wall on mining-induced stress of fault coal pillar[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2016, 33(1): 35—41.
- [22] 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 Zhi-hua, DOU Lin-ming, CHEN Guo-xiang, et al. The risk of fault induced rockburst during mining[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2010, 39(4): 490—495.
- [23] 王涛, 姜耀东, 赵毅鑫, 等. 断层活化与煤岩冲击失稳规律的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(2): 180—186.
- WANG Tao, JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, et al. Experimental research on fault reactivation and relating coal bumps[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2014, 31(2): 180—186.
- [24] 赵毅鑫, 卢志国, 朱广沛, 等. 考虑主应力偏转的采动诱发断层活化机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(1): 73—80.
- ZHAO Yi-xin, LU Zhi-guo, ZHU Guang-pei, et al. Fault reactive induced by the principal stress rotation for the underground coal mining[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2018, 47(1): 73—80.