

文章编号: 1671-251X(2023)05-0139-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022090037

卸荷作用下煤岩异性结构面失稳机制研究

陈曦¹, 刘广建¹, 滕杰田², 张恒³, 朱亚威³, 季宪军³

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 招金有色金属业有限公司, 浙江 绍兴 312000;
3. 南阳理工学院 土木工程学院, 河南 南阳 473306)

摘要: 目前针对岩体结构面滑移失稳方面的研究未考虑开挖过程中的卸荷效应, 且对煤岩异性结构面的研究较少。为了探究触发煤岩异性结构面滑移的条件及其影响因素, 通过建立异性结构面力学模型, 理论推导了卸荷作用下异性结构面解锁滑移的判据, 采用通用离散单元法程序(UDEC)建立平滑结构面数值模型, 以验证理论分析异性结构面解锁滑移触发条件的准确性, 分析异性结构面解锁滑移的影响因素。研究结果表明: 煤岩异性结构面解锁滑移与结构面倾角、内摩擦角及水平应力与轴向应力的比值有关; 当水平应力等于轴向应力时, 异性结构面始终处于稳定闭锁状态, 不会发生解锁滑移; 水平应力和轴向应力增大、内摩擦角减小均会增大异性结构面解锁滑移难度; 对于下行解锁滑移, 当结构面倾角小于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$ (φ_f 为内摩擦角)时, 其增大会增大解锁滑移难度, 大于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$ 时其增大会减小解锁滑移难度; 对于上行解锁滑移, 当结构面倾角小于 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时, 其增大会增大解锁滑移难度, 大于 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时其增大会减小解锁滑移难度; 对于异性结构面稳定闭锁状态, 结构面倾角不大于 30° 时, 若轴向应力大于抗压强度, 则煤岩组合体发生脆性破坏。

关键词: 冲击地压; 煤岩结构面; 异性结构面; 解锁滑移; 稳定闭锁; 卸荷作用

中图分类号: TD315

文献标志码: A

Study on instability mechanism of anisotropic structural planes of coal and rock under unloading

CHEN Xi¹, LIU Guangjian¹, TENG Jietian², ZHANG Heng³, ZHU Yawei³, JI Xianjun³

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China;

2. Zhaojin Nonferrous Mining Industry Co., Ltd., Shaoxing 312000, China;

3. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473306, China)

Abstract: Currently, the research on the slip instability of rock mass structural planes has not considered the unloading effect during heading. There is relatively little research on the anisotropic structural planes of coal and rock. In order to explore the conditions and influencing factors that trigger the slip of anisotropic structural planes of coal and rock, a mechanical model of anisotropic structural planes is established. A criterion for unlocking slip of anisotropic structural planes under unloading is theoretically derived. A smooth structural plane numerical model is established using universal distinct element code (UDEC) to verify the accuracy of theoretical analysis of the triggering conditions for unlocking the slip of anisotropic structural planes. The influencing factors of unlocking slip of anisotropic structural planes are analyzed. The research results indicate that unlocking slip of anisotropic structural planes of coal and rock is related to the inclination angle of structural planes, internal friction angle, and the ratio of horizontal stress to axial stress. When the horizontal stress is equal to the axial stress, the anisotropic structural plane is always in a locked state without slipping. Increase of axial pressure and

收稿日期: 2022-09-11; 修回日期: 2023-05-19; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42107177); 浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E040002)。

作者简介: 陈曦(1998—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下工程, E-mail: chenxisxwlyx@126.com。通信作者:

刘广建(1990—), 男, 河南信阳人, 副教授, 博士, 研究方向为冲击地压灾害防治, E-mail: liuguangjian5@163.com。

引用格式: 陈曦, 刘广建, 滕杰田, 等. 卸荷作用下煤岩异性结构面失稳机制研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(5): 139-146.

CHEN Xi, LIU Guangjian, TENG Jietian, et al. Study on instability mechanism of anisotropic structural planes of coal and rock under unloading[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(5): 139-146.



扫码移动阅读

horizontal pressure and decrease of internal friction angle will increase the difficulty of unlocking slip on anisotropic structural planes. For downward unlocking slip, when the inclination angle of the structural plane is less than $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$ (φ_f is internal friction action), its increase will increase the difficulty of unlocking slip. When it is more than $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$, its increase will reduce the difficulty of unlocking slip. For upward unlocking slip, when the inclination angle of the structural plane is less than $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$, its increase will increase the difficulty of unlocking slip. When it is more than $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$, its increase will reduce the difficulty of unlocking slip. For the locked state of structural plane, when the inclination angle of the structural plane is no more than 30° , if the axial stress is greater than the compressive strength, the brittle failure will occur in coal rock combination.

Key words: rockburst; coal rock structural plane; anisotropic structural plane; unlocking slip; stable locking; unloading effect

0 引言

近年来,随着煤矿开采深度增加,冲击地压灾害频发^[1-4]。煤矿冲击地压灾害的实质是岩体-结构面-煤体组合结构在开采扰动过程中突然发生破坏,而非单一岩体或煤体破坏^[5-8]。因此,研究煤岩组合体的整体变形与破坏规律对于防治冲击地压具有重要意义。

国内外学者在结构面滑移失稳方面开展了诸多研究。李志华等^[9]通过数值模拟软件分析了采动影响下诱发断层滑移失稳的原因,得出结论:当工作面位于断层上盘时,发生断层冲击地压的危险性较低,顶板易形成平衡结构。姜耀东等^[10]对采动影响下断层活化滑移规律进行了数值模拟,结果表明下盘开采相较于上盘开采的活化危险性更高,更易出现断层滑移。A. Sainoki 等^[11]通过数值模拟分析得出断层在采动影响下产生的最大剪切位移与断层倾角、开采深度等因素有关。宋义敏等^[12]通过研究断层冲击地压的失稳瞬态过程,发现断层冲击地压的发生与侧向应力有关,侧向应力越大,则发生断层冲击地压的可能性越大。李振雷等^[13]研究了深部厚煤层断层煤柱型冲击地压机制,指出断层附近采掘时产生断层煤柱,断层滑移和煤柱破坏可诱发冲击矿压。王同旭等^[14]采用数值模拟方法分析了逆断层下盘开采时断层周围应力环境变化特征及断层活化能量释放规律。张宁博等^[15]基于逆冲断层卸载失稳机理,对逆断层试件进行单侧卸载试验,并将断层活化滑移分为线性稳态、非线性稳态、亚失稳和失稳 4 个阶段。于秋鸽^[16]通过建立上下盘开采断层带岩体滑移失稳力学模型,发现上盘开采时,随着断层倾角增大,断层稳定性变差,下盘开采时,若断层倾角小于断层带岩体内摩擦角,断层一定会滑移失稳,随着断层倾角增大,断层稳定性增强。

上述研究大多集中在断层倾角、开采深度等因

素引起的断层滑移,未考虑开挖过程中的卸荷效应。而在实际采矿工程中,煤层开挖本质上是围岩应力卸载过程,因工作面开采引起煤岩体周围应力卸除,从而造成煤岩体局部或整体破坏失稳。另外,目前对于煤岩异性结构面的研究较少。蔡武^[17]提出卸荷能增加断层滑移失稳的可能性,但只进行了定性说明,未具体探讨结构面滑移与应力之间的关系。

本文通过理论分析推导出煤岩异性结构面解锁滑移判别公式,并采用数值模拟方法进行验证,探究卸荷作用下煤岩异性结构面滑移失稳的触发机制及影响因素,为异性结构面滑移型冲击地压防治提供参考。

1 工程背景

以兖煤菏泽能化公司赵楼煤矿 7301 工作面为工程背景,其布置如图 1 所示。煤层平均埋深约 1 000 m。工作面宽度为 230 m。轨道巷长 1 691 m,胶带巷长 1 664 m。7301 工作面为七采区首采面,东部为一、七采区边界,西部为七采区 3 条准备巷,南部为 7303 工作面,北部为三、七采区边界,主要临近一、三采区已采工作面。该工作面与三采区采空区之间存在落差为 50~70 m 的断层,称为 FZ14 逆断层。

7301 工作面安装的正 SCS 微震监测系统在 2019 年 8 月—2020 年 2 月监测到数次大能量事件,最大累计能量达 4.16×10^4 J,推测为断层影响下引起的煤岩组合体失稳滑移。

2 煤岩组合体破坏失稳力学分析

2.1 异性结构面失稳模式

以岩体-结构面-煤体组成结构中的异性结构面为研究主体。常见的断层形式有正断层(上盘相对下行滑移)和逆断层(上盘相对上行滑移),如图 2 所

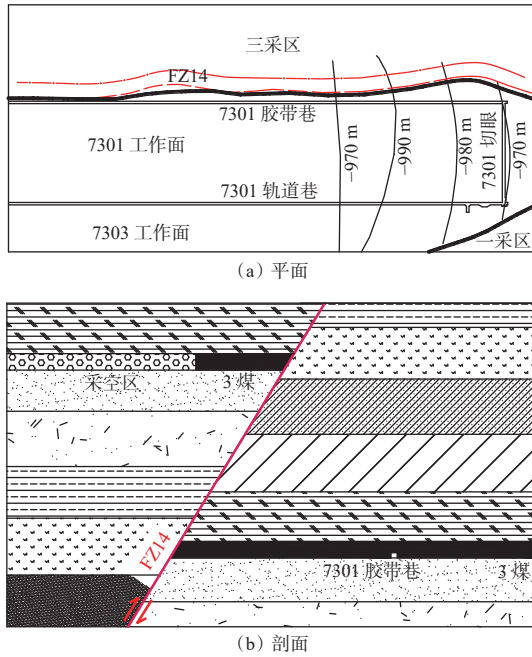


图1 赵楼煤矿7301工作面布置

Fig. 1 7301 working face layout of Zhaolou Coal Mine

示。取结构面处1个微小单元体为研究对象建立结构力学模型,如图3所示。 σ_1 为轴向应力, σ_2 为水平应力, σ 、 τ 分别为结构面上的正应力和剪应力, α 为结构面发生滑移的临界倾角(结构面与水平方向的夹角)。

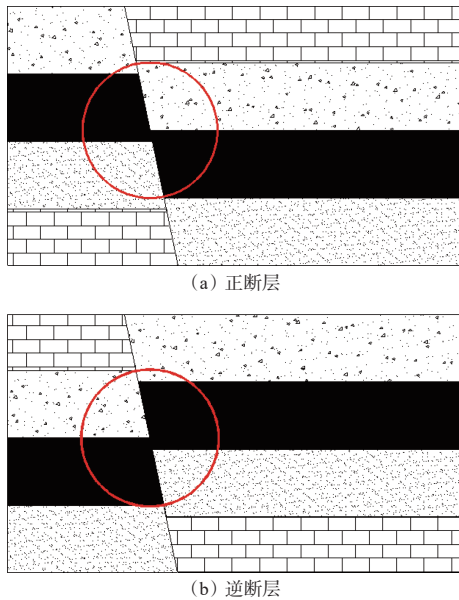


图2 常见的断层形式

Fig. 2 Common fracture types

当异性结构面处于临界状态时,对其进行受力分析,可得

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 \alpha \quad (1)$$

$$\tau = \sigma_2 \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_1 \sin \alpha \cos \alpha \quad (2)$$

根据 Coulomb 摩擦定律,任意结构面的极限剪

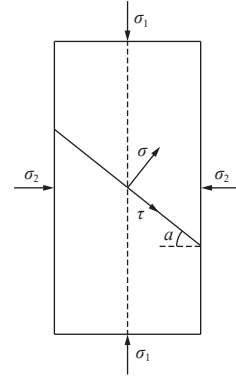


图3 异性结构面微小单元体结构力学模型

Fig. 3 Structural mechanical model of tiny unit body of structural plane

切强度可表示为

$$\tau_{\max} = \sigma \tan \varphi_f + c \quad (3)$$

式中: φ_f 为结构面内摩擦角; c 为结构面黏聚力。

$c = 0$ 时,结构面产生滑移的必要条件为

$$|\tau_{\max} / \sigma| > \tan \varphi_f \quad (4)$$

即

$$\left| \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) \sin 2\alpha}{\sigma_1 + \sigma_2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\alpha} \right| > \tan \varphi_f \quad (5)$$

由此可得异性结构面滑移判据:

$$F_{A,\theta} = \frac{(\Delta - 1) \sin 2\theta}{1 + \Delta + (1 - \Delta) \cos 2\theta} \quad (6)$$

式中: Δ 为水平应力 σ_2 与轴向应力 σ_1 的比值; θ 为任意结构面倾角。

根据摩擦自锁理论,当 $F_{A,\theta} > \tan \varphi_f$ 时,异性结构面的剪应力超过其极限剪切强度,异性结构面会发生向上滑移现象,称为上行解锁滑移;当 $F_{A,\theta} < -\tan \varphi_f$ 时,异性结构面的剪应力超过其极限剪切强度,异性结构面会发生向下滑移现象,称为下行解锁滑移;当 $-\tan \varphi_f \leq F_{A,\theta} \leq \tan \varphi_f$ 时,异性结构面的剪应力不大于其极限剪切强度,异性结构面保持相对稳定,称为稳定闭锁。

2.2 结构面解锁模式分析

假设 $\varphi_f = 20^\circ$,根据式(6)可得 $F_{A,\theta}$ 随 Δ 、 θ 变化曲线,如图4所示。

从图4可看出,结构面滑移失稳与结构面倾角 θ 、内摩擦角 φ_f 及 Δ 有关,具体结论如下:

1) $\Delta = 0$ 时,根据式(6)可得 $F_{A,\theta} = -\tan \theta$,此时水平应力 $\sigma_2 = 0$,异性结构面发生下行解锁滑移的必要条件为 $\tan \theta < -\tan \varphi_f$ 。

2) 当 $\Delta = 1$ 时,根据式(6)可得 $F_{A,\theta} = 0$,无论内摩擦角 φ_f 与结构面倾角 θ 如何变化,结构面始终稳定闭锁。其中当 $\theta \leq 30^\circ$ 时^[18-21],若轴向应力大于抗压强

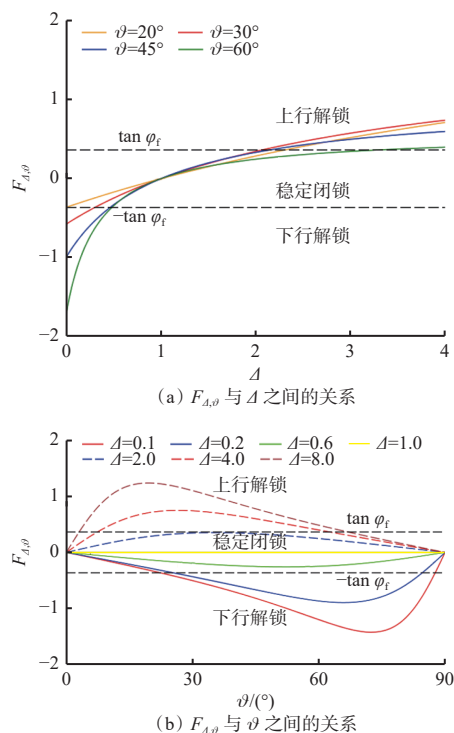


图 4 结构面解锁与闭锁数值化结果

Fig. 4 Numerical results of structural plane unlocking and locking

度,煤岩组合体发生脆性破坏。

3) 当 $0 < A < 1$ 时,无论结构面倾角 θ 如何变化,结构面始终处于稳定闭锁和下行解锁滑移范围内,不会发生上行解锁滑移。此时若 $F_{A,\theta} < -\tan \varphi_f$, 即 $0 < A < \frac{\sin 2\theta - 2\tan \varphi_f \cos^2 \theta}{\sin 2\theta + 2\tan \varphi_f \sin^2 \theta}$, 结构面发生下行解锁滑移,且解锁滑移难度随 A 增大而增大。

4) 当 $A > 1$ 时,无论结构面倾角 θ 如何变化,结构面始终处于稳定闭锁和上行解锁滑移范围内,不会发生下行解锁滑移。此时若 $F_{A,\theta} > \tan \varphi_f$, 即 $A > \frac{\sin 2\theta + 2\tan \varphi_f \cos^2 \theta}{\sin 2\theta - 2\tan \varphi_f \sin^2 \theta}$, 结构面发生上行解锁滑移,且解锁滑移难度随 A 增大而减小。

5) 当 $A \rightarrow +\infty$ 时, $F_{A,\theta} \rightarrow \cot \theta$, 此时主应力为水平应力,且水平应力远大于轴向应力,结构面上行解锁滑移的必要条件为 $\cot \theta > \tan \varphi_f$ 。

6) 当 A 和 θ 一定时,内摩擦角 φ_f 越小,结构面发生解锁滑移的可能性越大。

3 数值模型建立

为了验证理论分析异性结构面解锁滑移触发条件的正确性,根据赵楼煤矿 7301 工作面煤岩赋存特征,采用 UDEC (Universal Distinct Element Code, 通用离散单元法程序) 建立平滑结构面滑移数值模型,如图 5 所示。模型尺寸为 100 mm × 200 mm (宽 × 高),上部为岩体,下部为煤体,二者接触面为异性结构面。

为了消除块体破碎对异性结构面滑移的影响,不对模型进行节理裂隙分割,确保模型仅有 1 条倾斜的滑移结构面,结构面中间部分区域可产生滑动。滑移区域与水平方向夹角为 45°, 端点坐标分别为 (30, 128) 和 (70, 74)。模型块体选取线弹性本构模型,结构面为库伦本构模型,参数见表 1、表 2。在模型两侧施加水平荷载来模拟水平应力,底部边界固定,上边界可自由变化,施加垂直荷载模拟轴向应力。模拟过程: ① 设置初始垂直荷载和水平荷载,并运行至静力平衡。② 保持水平荷载不变,先通过位移加载方式控制轴向加载速度,再通过匀速减小模型两侧水平荷载的方法模拟水平应力卸载过程,直至完全卸载。

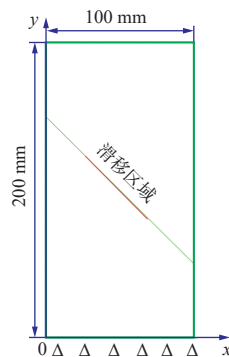


图 5 异性结构面滑移数值模型

Fig. 5 Numerical model of structural plane slipping

表 1 模型块体参数

Table 1 Block parameters of the model

岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
岩	2 850	50	30
煤	1 600	30	20

表 2 模型结构面参数

Table 2 Structural plane parameters of the model

接触面	法向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
非滑移区域	2 000	2 000	1.0	45
滑移区域	2 000	2 000	0	16

4 数值模拟结果分析

4.1 解锁模式下异性结构面滑移机制

4.1.1 异性结构面下行解锁滑移

由理论分析可知,当异性结构面满足 $F_{A,\theta} < -\tan \varphi_f$ 时,若水平应力 σ_2 与轴向应力 σ_1 之间的数值关系 A 满足下行解锁滑移要求,即可使结构面解锁,使其发生下行滑移,此时主应力为轴向应力。本文将分析不同因素影响下的轴向应力变化规律。

异性结构面下行解锁滑移位移云图如图 6 所示。模拟过程中规定朝 x 轴正方向移动则位移为正值, 否则位移为负值。可看出上下 2 个块体之间产生明显错动, 下部块体反向水平位移大于上部块体, 上部块体沿结构面发生下行解锁滑移。

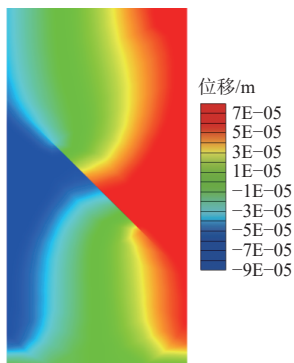


图 6 异性结构面下行解锁滑移位移云图

Fig. 6 Displacement nephogram of downward unlocking slip of structural plane

在结构面黏聚力为 0 的情况下, 水平应力、内摩擦角和结构面倾角对异性结构面下行解锁滑移的影响如图 7 所示。

由图 7(a)可看出, 当内摩擦角为 16° 、结构面倾角为 45° 时, 随着水平应力不断增大, 轴向应力呈线性增大趋势, 而 Δ 模拟值基本保持不变, 即滑移触发条件 Δ 基本不受水平应力变化影响。

由图 7(b)可看出, 当水平应力为 10 MPa、结构面倾角为 45° 时, 随着内摩擦角增大, 轴向应力呈指数增大趋势, Δ 模拟值小于 1 且呈线性减小趋势, 说明结构面下行解锁滑移难度减小。

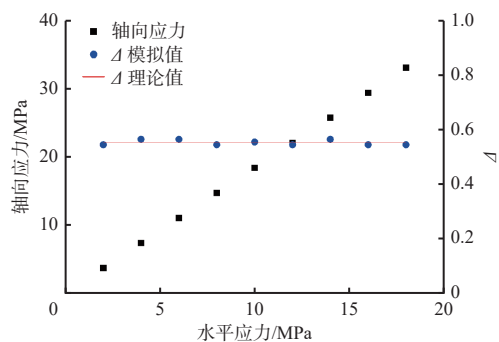
由图 7(c)可看出, 当水平应力为 10 MPa、内摩擦角为 16° 时, 若结构面倾角小于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$, 则随着结构面倾角增大, 轴向应力呈指数减小趋势, Δ 模拟值小于 1 且呈指数增大趋势, 说明结构面下行解锁滑移难度增大; 若结构面倾角大于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$, 则随着结构面倾角增大, 轴向应力增大, Δ 模拟值减小且小于 1, 说明结构面下行解锁滑移难度减小。

在水平应力、内摩擦角、结构面倾角影响下, Δ 模拟值和 Δ 理论值基本相同, 验证了异性结构面下行解锁滑移理论触发条件的准确性。

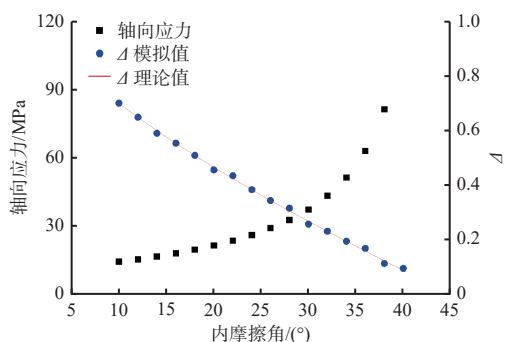
4.1.2 异性结构面上行解锁滑移

由理论分析结果可知, 当异性结构面满足 $F_{\Delta, \theta} > \tan \varphi_f$ 时, 若 Δ 满足上行解锁滑移要求, 即可使结构面解锁, 使其发生上行滑移。此时主应力为水平应力。本文将分析不同因素影响下的水平应力变化规律。

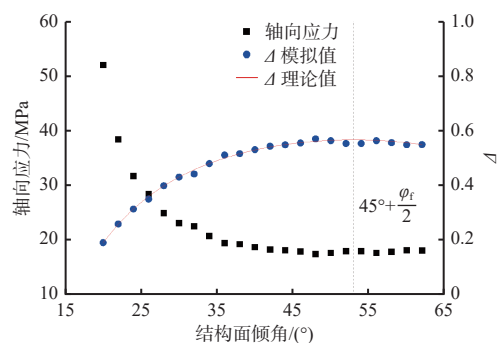
异性结构面上行解锁滑移位移云图如图 8 所



(a) 水平应力 (内摩擦角为 16° , 结构面倾角为 45°)



(b) 内摩擦角 (水平应力为 10 MPa, 结构面倾角为 45°)



(c) 结构面倾角 (水平应力为 10 MPa, 内摩擦角为 16°)

图 7 不同因素对结构面下行解锁滑移的影响

Fig. 7 Influences of different factors on downward unlocking slip of structural plane

示。可看出上下 2 个块体产生明显错动, 与图 6 不同的是, 图 8 中下部块体的正向水平位移明显大于上部块体, 说明上部块体沿结构面发生上行滑移。

在结构面黏聚力为 0 的情况下, 轴向应力、内摩擦角和结构面倾角对结构面上行解锁滑移的影响如图 9 所示。

由图 9(a)可看出, 当内摩擦角为 16° 、结构面倾角为 45° 时, 随着轴向应力不断增大, 水平应力呈线性增大趋势, 而 Δ 模拟值几乎保持不变, 即滑移触发条件 Δ 基本不受轴向应力影响。

由图 9(b)可看出, 当轴向应力为 10 MPa、结构面倾角为 45° 时, 随着内摩擦角增大, 水平应力和 Δ 模拟值呈指数增大趋势且 Δ 模拟值大于 1, 说明结构面上行解锁滑移难度减小。

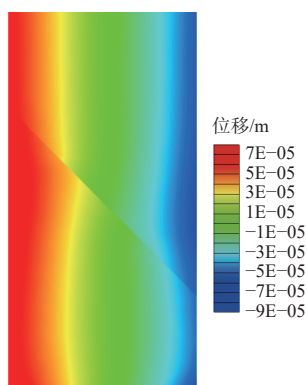
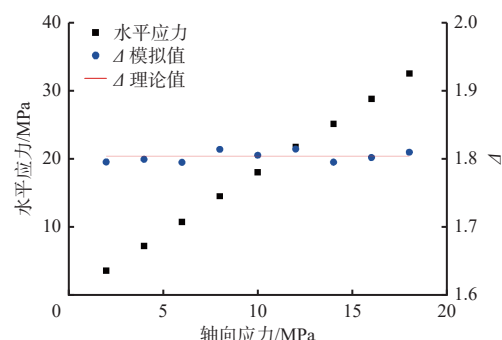
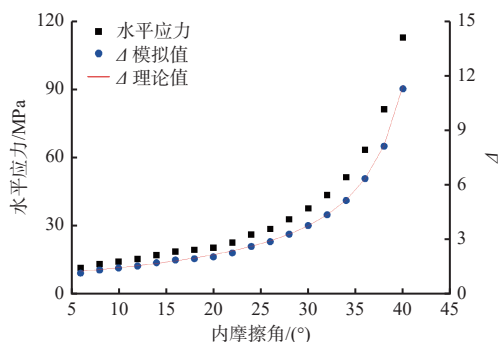


图 8 异性结构面上行解锁滑移位移云图

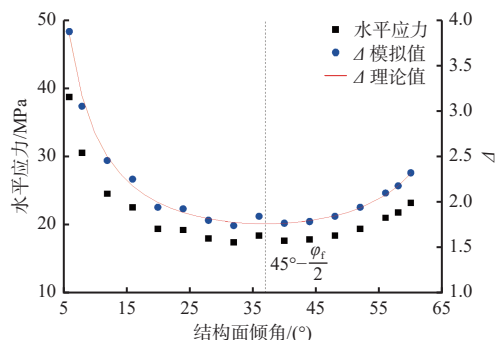
Fig. 8 Slip displacement nephogram of upward unlocking of structural plane



(a) 轴向应力 (内摩擦角为 16°, 结构面倾角为 45°)



(b) 内摩擦角 (轴向应力为 10 MPa, 结构面倾角为 45°)



(c) 结构面倾角 (轴向应力为 10 MPa, 内摩擦角为 16°)

图 9 不同影响因素对结构面上行解锁滑移的影响

Fig. 9 Influences of different factors on upward unlocking slip of structural plane

由图 9(c) 可看出, 当轴向应力为 10 MPa、内摩擦角为 16° 时, 随着结构面倾角增大, 轴向应力关于

$45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 呈对称的凹型函数变化趋势, Δ 模拟值变化趋势与之相同。当结构面倾角小于 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时, 随着结构面倾角增大, 水平应力和 Δ 模拟值减小且 Δ 模拟值大于 1, 说明结构面上行解锁滑移难度增大; 而当结构面倾角超过 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时, 随着结构面倾角增大, 水平应力和 Δ 模拟值增大且 Δ 模拟值大于 1, 说明结构面上行解锁滑移难度减小。

在轴向应力、内摩擦角、结构面倾角影响下, Δ 模拟值和理论值基本相同, 验证了结构面上行解锁滑移理论触发条件的准确性。

4.2 闭锁模式下异性结构面裂隙演化规律

根据煤岩组合体破坏失稳力学分析可知, 当异性结构面倾角 $\theta \leq 30^\circ$ 且结构面处于稳定闭锁状态时, 若轴向应力大于抗压强度, 煤岩组合体会发生脆性破坏。选取结构面倾角为 25° 的煤岩组合体, 通过两侧加卸水平应力、上部始终施加 20 MPa 轴向应力的方式进行数值模拟, 研究该情况下异性结构面失稳破坏情况。

煤岩组合体应力-时间曲线如图 10 所示。可看出该曲线分为 4 个阶段: OA 阶段, 应力不断增大, 在 A 点达到最大值; AB 阶段, 应力趋于稳定; BC 阶段, 卸水平应力, 应力骤降; C 点以后, 受施加的 20 MPa 轴向压力作用, 应力开始增大, 因组合体内产生裂隙, 使应力处于波动状态。

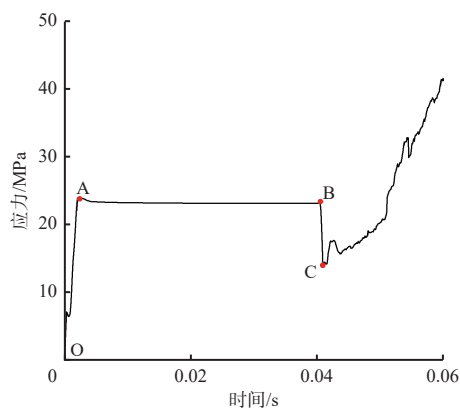


图 10 结构面倾角为 25° 时煤岩组合体应力-时间曲线

Fig. 10 Stress-time curves of coal-rock combination at 25° of structural plane angle

煤岩组合体裂隙演化规律如图 11 所示。可看出裂纹存在阶段性特征。0.040 48 s 时下部煤体出现少量剪切裂纹, 上部岩体没有产生裂纹。0.040 87 s 时卸载完毕, 组合体裂纹现象与 0.040 48 s 时没有差别, 说明卸载对组合体裂隙演化没有影响。0.043 96 s 时煤体出现大量剪切裂纹和拉伸裂纹, 此时煤体已完全破坏, 而岩体中产生的裂纹远少于煤体。0.053 65 s

时煤体完全破坏,岩体裂纹继续发展,直至煤岩组合体完全破坏。

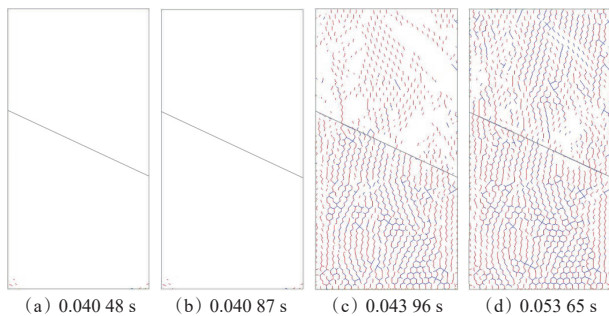


图 11 结构面倾角为 25° 时煤岩组合体裂隙演化规律

Fig. 11 Fracture evolution pattern of coal-rock combination at 25° of structural plane angle

结合图 10、图 11 可看出,异性结构面倾角为 25° 时,煤岩组合体没有发生滑移,而是发生了脆性破坏,在一定程度上验证了理论分析的正确性。

5 结论

1) 基于结构面力学模型推导了异性结构面滑移理论判据,进而得出异性结构面上行解锁滑移条件为 $F_{A,\theta} > \tan \varphi_f$, 下行解锁滑移条件为 $F_{A,\theta} < -\tan \varphi_f$, 稳定闭锁条件为 $-\tan \varphi_f \leq F_{A,\theta} \leq \tan \varphi_f$ 。

2) 通过数值模拟分析了水平应力、轴向应力、内摩擦角和结构面倾角对异性结构面解锁滑移的影响。水平应力、轴向应力增大均会增大异性结构面解锁滑移难度;内摩擦角增大会减小异性结构面解锁滑移的难度;对于上行解锁滑移,当结构面倾角小于 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时,其增大可增大解锁滑移难度,大于 $45^\circ - \frac{\varphi_f}{2}$ 时其增大会减小解锁滑移难度;对于下行解锁滑移,当结构面倾角小于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$ 时,其增大可增大解锁滑移难度,大于 $45^\circ + \frac{\varphi_f}{2}$ 时其增大会减小解锁滑移难度。

3) 在结构面稳定闭锁模式下,研究了结构面倾角为 25° 时的煤岩组合体应力-时间曲线和裂隙演化规律,一定程度上验证了当异性结构面倾角小于 30° 时,若轴向应力大于抗压强度,则煤岩组合体会发生脆性破坏的理论分析结果。

4) 在实际工程中,可通过及时支护、加强支护方法,有效控制围岩应力状态,以降低煤岩组合结构发生滑移失稳的概率;在布置巷道时应避免煤岩结构面倾角异常位置;需综合考虑岩体-结构面-煤体组合结构在采动过程中的变化规律,以更好地理解煤岩组合体的失稳机制,更加科学地指导巷道、隧道等岩土工程中动力灾害事故的预测及防治。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,周宏伟,薛东杰,等.煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J].煤炭学报,2012,37(4):535-542.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [2] 袁亮,姜耀东,何学秋,等.煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展[J].煤炭学报,2018,43(2):306-318.
YUAN Liang, JIANG Yaodong, HE Xueqiu, et al. Research progress of precise risk accurate identification and monitoring early warning on typical dynamic disasters in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 306-318.
- [3] 袁亮.煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J].煤炭学报,2019,44(1):1-9.
YUAN Liang. Scientific problem and countermeasure for precision mining of coal and associated resources[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [4] 齐庆新,潘一山,李海涛,等.煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1567-1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [5] 窦林名,赵从国,杨思光,等.煤矿开采冲击矿压灾害防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
DOU Linming, ZHAO Congguo, YANG Siguang, et al. Prevention and control of rock burst in coalmine[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2006.
- [6] CAI Wu, DOU Linming, CAO Anye, et al. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: a case study of Yima Mining Area, Henan, China[J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 109: 140-149.
- [7] 窦林名,何江,曹安业,等.煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J].煤炭学报,2015,40(7):1469-1476.
DOU Linming, HE Jiang, CAO Anye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.
- [8] 窦林名,周坤友,宋士康,等.煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J].工程地质学报,2021,29(4):917-932.
DOU Linming, ZHOU Kunyou, SONG Shikang, et al. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 917-932.
- [9] 李志华,窦林名,曹安业,等.采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J].煤炭学报,2011,36(增刊1):68-73.

- LI Zhihua, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanism of fault slip induced rockburst during mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(S1): 68-73.
- [10] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(1): 1-5.
- JIANG Yaodong, WANG Tao, ZHAO Yixin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(1): 1-5.
- [11] SAINOKI A, MITRI H S. Dynamic behaviour of mining induced fault slip[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 66: 19-29.
- [12] 宋义敏, 马少鹏, 杨小彬, 等. 断层冲击地压失稳瞬态过程的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(4): 812-817.
- SONG Yimin, MA Shaopeng, YANG Xiaobin, et al. Experimental investigation on in investigation on instability transient process of fault rockburst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(4): 812-817.
- [13] 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 Zhenlei, DOU Linming, 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.
- [14] 王同旭, 曹明辉. 采动影响下断层渐进破坏过程及能量释放规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(5): 992-1001.
- WANG Tongxu, CAO Minghui. Progressive failure process and energy release law of fault induced by coal exteaction[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2022, 39(5): 992-1001.
- [15] 张宁博, 赵善坤, 赵阳, 等. 逆冲断层卸载失稳机理研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1671-1680.
- ZHANG Ningbo, ZHAO Shankun, ZHAO Yang, et al. Mechanism of thrust fault rupture causing by unloading effect[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1671-1680.
- [16] 于秋鸽. 上下盘开采断层滑移失稳诱发地表异常沉降机理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(1): 41-50.
- YU Qiuge. Mechanism of abnormal subsidence induced by fault slipping instability during mining on hanging-wall and foot-wall[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(1): 41-50.
- [17] 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 Wu. Fault rockburst induced by static and dynamic loads superposition and its monitoring and warning[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [18] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1287-1296.
- ZUO Jianping, XIE Heping, MENG Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1287-1296.
- [19] 沈文兵, 余伟健, 潘豹. 不同倾角煤岩组合岩石力学试验及破坏特征[J]. *矿业工程研究*, 2021, 36(1): 1-8.
- SHEN Wenbing, YU Weijian, PAN Bao. Rock mechanics test and failure characteristics of coal-rock combination with different dip angles[J]. *Mineral Engineering Research*, 2021, 36(1): 1-8.
- [20] 肖福坤, 邢乐, 侯志远, 等. 倾角影响下煤岩组合体的力学及声发射能量特性[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2021, 31(4): 399-404.
- XIAO Fukun, XING Le, HOU Zhiyuan, et al. Mechanics and acoustic emission energy characteristics of coal-rock combined body under influence of dip angle[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2021, 31(4): 399-404.
- [21] 杨永杰, 马德鹏. 煤样三轴卸荷破坏的能量演化特征试验分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 1208-1216.
- YANG Yongjie, MA Depeng. Experimental research on energy evolution properties of coal sample failure under triaxial unloading testing[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1208-1216.
- ZHENG Sanlong, FAN Jiuyuan, WANG Gang, et al. Research and application of gas stereoscopic drainage technology in horizontal slicing working face of steeply and ultra-thick coal seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(6): 69-74.
- [21] 王华. 坚硬顶板综采面采空区瓦斯抽采技术优化及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- WANG Hua. The optimization and applied research of goaf gas extraction technology about hard roof comprehensive mechanized coal mininig face[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

(上接第 95 页)

- [19] 冀超辉, 崔洪庆. 特厚急倾斜煤层瓦斯抽采关键技术与实践[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(6): 99-103.
- JI Chaohui, CUI Hongqing. Key technology and practice of gas extraction in steep extra-thick coal seam[J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2021, 48(6): 99-103.
- [20] 郑三龙, 范酒源, 王刚, 等. 急倾斜特厚煤层水平分层开采工作面瓦斯立体化抽采工艺技术研究与应用[J]. *矿业安全与环保*, 2020, 47(6): 69-74.