

罗生虎,伍永平,王红伟,等.大倾角煤层长壁开采底板非对称破坏形态与滑移特征[J].煤炭学报,2018,43(8):2155-2161. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0144

LUO Shenghu, WU Yongping, WANG Hongwei, et al. Asymmetric failure pattern and slip characteristics of floor of longwall face in steeply dipping seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2155-2161. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2018.0144

大倾角煤层长壁开采底板非对称破坏形态与滑移特征

罗生虎^{1,2}, 伍永平^{2,3}, 王红伟^{2,3}, 解盘石^{2,3}

(1. 西安科技大学 理学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:底板破坏滑移是大倾角煤层开采亟待解决的关键问题之一,以2130煤矿25221大倾角综采工作面为研究背景,采用理论分析、数值计算和现场监测相结合的研究方法,系统研究了底板的破坏和滑移特征。结果表明,在采动应力和支架载荷作用下底板的力学性状发生改变,由层状连续介质状态演化为具有“结构体+结构面”的块裂介质状态;底板沿工作面倾向的破坏形态呈现为下大上小的非对称反拱,其最大破坏深度位于工作面倾向下部区域,且其破坏深度和范围随着煤层倾角的增大而减小;支架载荷对底板破坏影响有限,主要涉及采场直接底岩层;在底板重力倾向分量及支架和相邻块体载荷作用下,当滑移体存在临空面、滑移体所受主动力与滑移面相交、且主动力合力与滑移面法线方向的夹角大于滑移面的摩擦角时出现底板滑移,且底板岩体结构失稳滑移的概率随着煤层倾角的增大、支架倾斜幅度和范围的增大、直接底破碎程度的增大而增大。

关键词:大倾角煤层;长壁开采;底板;破坏滑移

中图分类号:TD823.42

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)08-2155-07

Asymmetric failure pattern and slip characteristics of floor of longwall face in steeply dipping seam mining

LUO Shenghu^{1,2}, WU Yongping^{2,3}, WANG Hongwei^{2,3}, XIE Panshi^{2,3}

(1. School of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The floor failure and slip is one of the key technologies to be resolved in steeply dipping seam mining. Based on geological conditions and characteristics of strata behaviors of No. 25221 working face in 2130 Coal Mine, the mechanism of floor failure and slip is investigated by theoretical analysis, numerical simulation and field monitoring. The results show that the floor developed from continuum state to block-fractured state under cyclic loading and unloading. The failure pattern of the floor presents an asymmetric inverse arch along inclined direction of working face, the maximum damage depth is located at the lower part of the working face, and the floor damage depth and range decrease with the increase of the dip angle of the coal seam. And the impact of the support load on the failure of the floor is limited, which mainly involved immediate floor. If the included angle between the resultant force of active force acting on the sliding body and the normal direction of slip surface is larger than the frictional angle of the slip surface, floor slip

收稿日期:2018-01-25 修回日期:2018-07-10 责任编辑:毕永华

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51634007);国家自然科学基金面上资助项目(51774230);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2017JQ5091)

作者简介:罗生虎(1983—),男,新疆哈密人,讲师,博士。Tel:029-85583136, E-mail:luoshh06@qq.com

通讯作者:伍永平(1962—),男,陕西汉中人,教授,博士。Tel:029-85583143, E-mail:wuyyp@xust.edu.cn

will be appear. And with the increases of coal seam dip, fragmentation degree of immediate floor and range and scope of inclination of support, the slip probability of floor increases.

Key words: steeply dipping seam; longwall face; floor; failure and slip

大倾角煤层是指埋藏倾角为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层, 是国内外采矿界公认的难采煤层^[1]。大倾角煤层安全高效开采的关键在于“支架-围岩”系统的稳定性控制, 其中对底板的稳定性控制是“支架-围岩”系统稳定性控制的基础^[2-3]。

底板破坏滑移是大倾角煤层开采较为常见的一种围岩灾害现象。在缓倾斜煤层开采中, 底板岩层在其自身重力作用下减缓了底板的变形程度, 有利于底板的稳定, 一般不会出现底板滑移现象。但在大倾角煤层开采中, 随着煤层倾角的增大, 底板岩层自身重力中促使其稳定的分量减小, 而导致其出现非稳态运动的分量增大, 底板岩层运动的幅度和剧烈程度加大, 底板破坏滑移的可能性急剧增加, 且滑移区还会向上扩大和蔓延, 造成底板的大范围失稳并引发工作面“支架-围岩”系统失稳, 导致围岩灾变^[4-5]。底板破坏滑移是一个随时间和空间发展的过程, 这一过程受地质和开采两大方面诸多因素的影响, 包括工作面长度、煤层倾角、底板力学性状、回采工艺、矿山压力、支架力学行为等, 且底板破坏滑移的概率随着煤层倾角的增大、底板分层厚度的减小、靠近煤层底板岩层软弱夹层的增多而增大^[1,6]。底板的破坏是滑移的前提, 但并不是所有破坏了的底板都会出现滑移, 有些也仅限于局部范围的破坏, 且底板岩层中出现滑移的岩层为靠近煤层的伪底及直接底, 深部底板岩层的移动特征不明显^[7-8]。已有的研究成果提高了对底板破坏滑移的认知程度, 并为该领域进一步的研究奠定了基础, 但仍未达到解决实际工程问题的目的, 且鲜见针对大倾角煤层综采过程中由采动应力和支架载荷交互影响下底板破坏滑移机理方面的研究。

据此, 笔者在已有研究工作基础上, 以 2130 煤矿 25221 大倾角大采高综采工作面为研究背景, 在数值计算和现场监测结果分析的基础上, 对底板沿倾向的破坏形态、采场直接底的力学性状演变及其结构变异机理、支架行为对底板破坏和滑移过程的影响等展开研究, 并探讨底板的稳定-失稳准则。

1 工程概况

新疆焦煤集团 2130 煤矿 25221 大倾角大采高综采工作面开采二采区 5 号煤层, 该工作面开采标高为 +2 047 ~ +2 120 m, 工作面设计走向长度 2 098 m, 倾向长度 105 m。工作面煤层倾角 $36^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 平均

44° 。工作面回采范围内煤层向西、向下厚度逐渐变薄, 煤层厚度 3.58 ~ 9.77 m, 平均厚度 5.77 m。煤层结构复杂, 含 3 ~ 5 层夹矸, 煤矸互层 1.4 ~ 2.5 m。煤层软弱松散, 硬度系数 0.3 ~ 0.5。工作面直接顶为灰白色含砾粗砂岩, 厚度 2.32 m, 其上为以石英为主、抗风化能力强但层面发育的灰白色中砂岩, 厚度 16.59 m。工作面直接底为以石英为主、矿质胶结的灰白色粗砂岩, 内含多个软弱夹层。

2 底板围岩力学性状演变过程

2.1 围岩采动应力的非对称分布规律

在大倾角煤层开采中, 受煤层倾角影响, 围岩采动应力场的分布规律及其破坏形态均呈现出非对称特性。煤层开采后在顶底板岩层中分别形成非对称拱形和反拱形应力释放区, 顶板岩层在回风巷一侧形成应力集中区, 底板岩层在运输巷一侧形成应力集中区; 在顶板岩层中, 工作面中上部区域顶板应力释放区范围大于工作面下部区域, 顶板应力分布拱形等值线中心轴向上部区域偏移; 在底板岩层中, 工作面下部区域应力释放区范围大于工作面上部区域, 底板应力分布反拱形等值线中心轴向下部区域偏移; 随着煤层的倾角增大, 顶底板应力释放区范围及应力集中值均逐渐减小, 如图 1 所示。

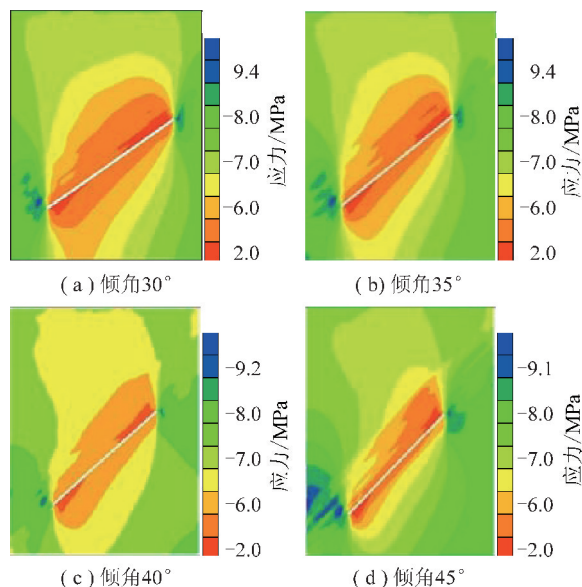


图 1 不同倾角条件下沿倾向垂直应力分布
Fig. 1 Distribution of vertical stress along inclined direction under different dipping angle

2.2 底板岩层的非对称破坏形态

底板的破坏是滑移的前提,只有大量变形而导致破坏后能够形成滑移体与滑移面的底板岩层才会出现滑移。根据已有的现场测试结果可以看出^[9-10],在非对称载荷与约束作用下,底板沿倾向的破坏形态非对称,且其破坏形态与底板沿倾向应力场的分布规律基本一致,均呈现为一个下大上小的非对称反拱形态,工作面倾向下部区域的底板破坏深度和范围均大于工作面倾向上部区域,如图 2 所示。

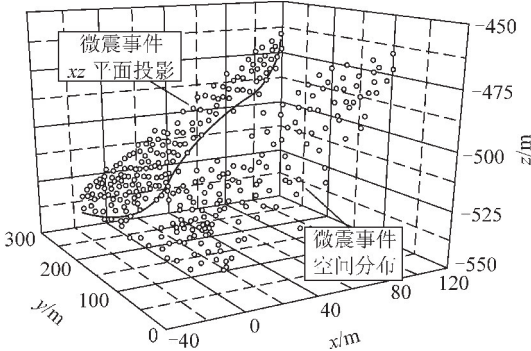


图 2 底板沿倾向破坏实测

Fig. 2 Measurement of floor failure along inclined direction

由于沿倾向底板采动应力场的分布规律和破坏形态均呈现为非对称反拱,且围岩结构存在于围岩裂隙带以外的岩层中^[11],因此结合已有关于顶板围岩拱壳结构的研究思路^[12-13],可将底板围岩结构沿倾向的力学模型构建为图 3 所示的非对称反拱 AOB 。图中, a 为煤层倾角, h 为拱高, L 为跨长 ($L=L_0+L_1+L_2$,其中 L_0 为工作面长度, L_1 和 L_2 分别为上下区段煤柱塑性区宽度)。同时,由于煤层埋深远大于工作面长度在垂直方向的投影,为理论求解方便,将反拱外底板岩层对反拱 AOB 的作用载荷假设为均布载荷 q ,并忽略反拱内底板破断岩块及顶板冒落矸石对反拱 AOB 的作用。

令图 3 所示非对称反拱 AOB 的轴线方程为 $z'(y')$,则由截面法可得其弯矩方程 $M(y')$ 为

$$M(y') = -M_A + F_{Az'}y' - F_{Ay'}z'(y') - \frac{q}{2}y'^2 \quad (1)$$

式中, $F_{Ay'}$ 、 $F_{Az'}$ 和 M_A 为反拱 AOB 拱脚 A 处的约束力和约束力偶。

根据拱的合理轴线理论^[14],当拱的轴线与压力线重合时,拱各截面上的弯矩和剪力都为零,只有轴力,且各截面上的正压力均匀分布。由于岩土类材料具有抗压不抗拉的力学特性,因此可认为煤层开采后底板岩层在自我调节过程中所形成的非对称反拱 AOB 在极限平衡状态下各横截面上只有轴力而无剪

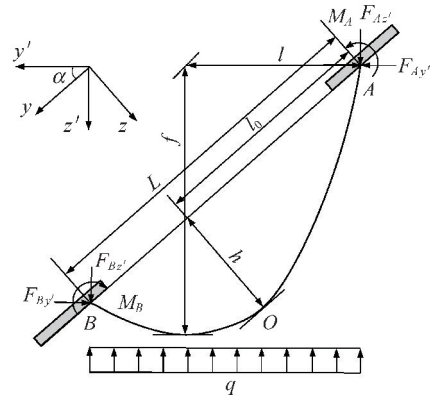


图 3 底板沿倾向非对称反拱力学模型

Fig. 3 Asymmetric inverse arch mechanical model of floor along inclined direction

力和弯矩,则根据拱的合理轴线理论和平衡方程可得拱脚 A 处的约束力 $F_{Ay'}$ 和 $F_{Az'}$ 为

$$F_{Ay'} = \frac{ql^2}{4f} \quad (2)$$

$$F_{Az'} = ql \quad (3)$$

其中, l 和 f 为计算中引入的未知常数。将式 (2)、(3) 代入式 (1) 可得反拱 AOB 的轴线方程为

$$z'(y') = -\frac{f}{l^2}(y'^2 - 2ly') \quad (4)$$

为确保反拱 AOB 的稳定性,拱脚 A 处的约束力 $F_{Ay'}$ 和 $F_{Az'}$ 需满足

$$F_{Ay'} \leq F_{Az'} \tan \varphi \quad (5)$$

式中, φ 为内摩擦角。则根据式 (5) 及下拱脚 B 的坐标位置 ($L \cos \alpha, L \sin \alpha$) 可得未知常数 l 和 f 为

$$l = \frac{L \cos^2 \alpha}{2(\tan \varphi \sin \alpha - \cos \alpha)} \quad (6)$$

$$f = \frac{L \cos^2 \alpha}{4 \tan \varphi (\tan \varphi \sin \alpha - \cos \alpha)} \quad (7)$$

将式 (6)、(7) 代入式 (4) 可得反拱 AOB 的轴线方程为

$$z'(y') = \frac{y'[L + y' \sec \alpha (\tan \varphi \tan \alpha - 1)]}{L \tan \varphi} \quad (8)$$

由式 (8) 可得反拱 AOB 任意位置 ($y', z'(y')$) 处到煤层的垂直距离 $g(y')$ 可表示为

$$g(y') = [z'(y') - y' \tan \alpha] \sin \alpha \quad (9)$$

对 $g(y')$ 求一阶导并令其等于 0,可得拱顶 O 点处的纵坐标 y'_o 为

$$y'_o = \frac{L \cos \alpha}{2} \quad (10)$$

根据式 (8)、(10),并结合坐标旋转公式可得反拱 AOB 的拱高 h 及拱顶到上拱脚 A 的距离 l_0 为

$$h = \frac{L(1 + \cos 2\alpha - \tan \varphi \sin 2\alpha)}{8 \tan \varphi} \quad (11)$$

$$l_0 = \frac{L[\tan \varphi(3 + \cos 2\alpha) + \sin 2\alpha]}{8 \tan \varphi} \quad (12)$$

图4为不同煤层倾角条件下底板沿倾向非对称反拱的基本形态,由图4可以看出,底板非对称反拱结构的拱高在倾向中下部区域,且其拱高随着煤层倾角的增大而减小。由于底板采动应力场的分布规律与其破坏形态基本一致,且围岩结构存在于围岩裂隙带以外的岩层中^[11],因此可由式(8)及图4近似判断出底板的破坏形态,并由式(11),(12)近似确定底板的最大破坏深度及其位置。根据2130煤矿25221工作面的具体情况,将煤层倾角取为 44° ,工作面长度取为105 m,上下区段煤柱塑性区宽度分别取为8 m和6 m,摩擦系数取为0.4,代入式(11),(12)可得反拱AOB的拱高 h 为23.62 m,拱顶 O 点到上拱脚 A 的距离 l_0 为82.31 m。可以看出,本文的理论计算结果与已有的数值计算和现场测试^[8-9]结果一致,验证了本文理论模型的合理性。

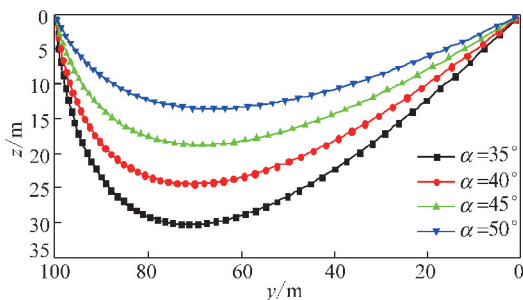


图4 底板沿倾向非对称反拱轴线

Fig. 4 Axis of asymmetric inverse arch of floor along inclined direction

2.3 支架对底板的破坏特征

支架作为顶底板岩层的传力媒介,始终处于与底板相互作用、相互制约的动态系统中。受顶板运移、矸石冲击和架间推挤等因素影响,采动过程中支架沿工作面倾向的下滑和转动无法避免,造成支架对底板的载荷复杂多变,这里将单一支架对底板作用的力学模型构建为支架对半平面的作用,如图5所示。图中, a 为支架底座宽度, $q(y)$ 和 $p(y)$ 为支架对底板的法向和切向载荷。

在支架工作阻力不变的前提下,在以下3种临界情况下分析支架对底板的破坏特征。

(1)当支架倾斜幅度较大,支架与底板的接触方式为线接触时,在平面情况下,支架对底板的法向和切向载荷可简化为集中载荷 Q 和 P ,即

$$Q = q_0 a, P = Q \tan \varphi_1 \quad (13)$$

式中, q_0 为常量; φ_1 为支架与底板间的摩擦角。

(2)当支架倾斜,且支架底座倾向上边界处于脱

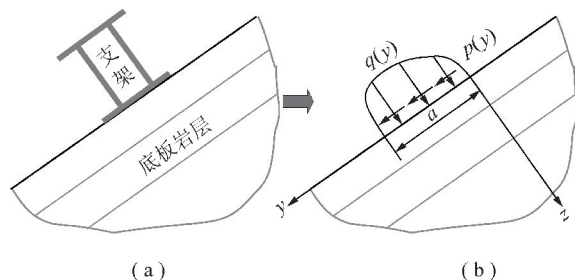


图5 支架-底板力学模型

Fig. 5 Mechanical model of support and floor

离底板的临界状态时,支架与底板的接触方式为面接触,在平面情况下,支架对底板的法向和切向载荷可简化为三角形载荷,即

$$q(y) = 2q_0 \frac{y}{a}, p(y) = q(y) \tan \varphi_1 \quad (14)$$

(3)当“支架-围岩”系统保持稳定,支架无下滑和转动行为时,支架与底板的接触方式仍为面接触,在平面情况下,支架对底板的法向和切向载荷可简化为均布载荷,即

$$q(y) = q_0, p(y) = q_0 \tan \varphi_1 \quad (15)$$

根据弹性理论^[15],在法向集中载荷 Q 和切向集中载荷 P 作用下,底板任意位置 (y, z) 处的应力分量可表示为

$$\sigma_y = -\frac{2Qy^2z}{\pi(y^2 + z^2)^2} - \frac{2Py^3}{\pi(y^2 + z^2)^2} \quad (16)$$

$$\sigma_z = -\frac{2Qz^3}{\pi(y^2 + z^2)^2} - \frac{2Pyz^2}{\pi(y^2 + z^2)^2} \quad (17)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{2Qyz^2}{\pi(y^2 + z^2)^2} - \frac{2Py^2z}{\pi(y^2 + z^2)^2} \quad (18)$$

根据叠加原理,容易得出(2),(3)两种情况下底板任意位置 (y, z) 处应力分量的解析解,限于篇幅,这里不再一一赘述。

由于一般情况下岩石的抗拉强度<抗剪强度<抗压强度,且支架对底板的载荷包含法向和切向两部分,因此支架载荷对底板的破坏方式主要以剪切破坏为主。将以上计算得出的应力分量带入最大切应力计算公式即可得到底板任意位置 (y, z) 处的最大切应力 τ_{\max} ,即

$$\left. \begin{matrix} \tau_{\max} \\ \tau_{\min} \end{matrix} \right\} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{yz}^2} \quad (19)$$

当底板任意位置 (y, z) 处的最大切应力 τ_{\max} 大于其许用应力 $[\tau]$ 时,即 $\tau_{\max} > [\tau]$,该点发生剪切破坏。结合2130煤矿25221工作面的支架选型及支架对底板比压,取 $a = 1.7$ m, $q_0 = 1\ 800$ kN/m, $\varphi_1 = 45^\circ$,由式(19)即可计算得出上述3种情况下底板最大切应力 τ_{\max} 的分布规律。

图 6 所示为上述 3 种支架载荷作用下底板最大切应力 τ_{\max} 的等值线图,可以看出,受支架切向载荷影响,底板最大切应力 τ_{\max} 分布的非对称特征明显,应力集中区位于支架底座倾向下方的底板岩层中;随着支架倾斜幅度的增大,底板集中应力值及范围逐渐增大;由于支架对底板的作用载荷有限,深部底板中的应力值较小,支架对底板破坏的影响范围主要集中于采场直接底,且直接底越薄、支架倾斜幅度越大,支架对直接底的破坏程度将会越严重。

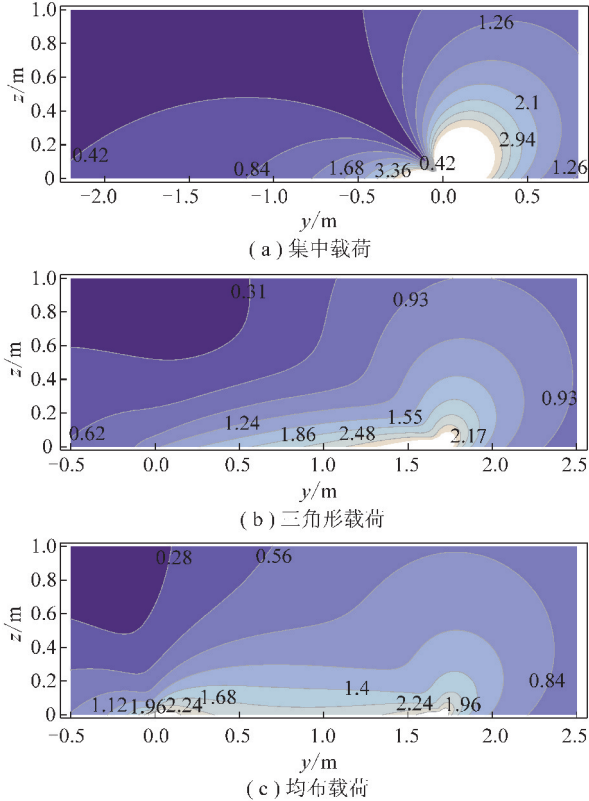


图 6 不同支架载荷情况下 τ_{\max} 等值线(单位:MPa)

Fig. 6 Contour map of τ_{\max} under different support loads(unit:MPa)

3 直接底岩体结构失稳滑移特征

在采动应力及支架载荷作用下,采场直接底由层状连续介质状态演化为具有“结构体+结构面”的块裂介质状态,具备了滑移的条件。在支架载荷和底板重力倾向分量等因素交互影响下,直接底岩体中的结构体逐步演变为滑移体,结构面将单独或合并成为滑移面,滑移体沿滑移面滑移,形成底板滑移现象。

根据直接底破断后所形成岩体结构的基础特征,可将底板滑移体分为 2 类。第 1 类如图 7(a) 中的 ② 号块体,当 ① 号支架转动(形成临空面)时,② 号块体在其自重倾向分量及周围块体和支架载荷作用下存在向 ① 号支架下方已成空间运移的可能。第 2 类如

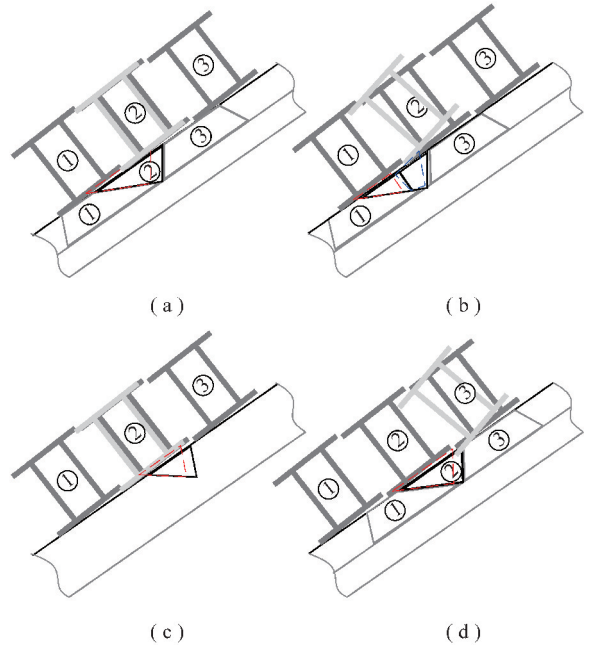


图 7 底板失稳滑移示意图

Fig. 7 Schematic diagram of floor slip along tendency

图 7(a) 中的 ③ 号块体,只有第 1 类块体(② 号块体)先滑移后(形成临空面),③ 号块体才能滑移。第 2 类块体的滑移常表现为底板滑移的向上蔓延和扩展,因此对第 1 类滑移体的防控是保证底板稳定的关键。同时,由于结构体的刚度远大于结构面的刚度,且块裂介质岩体的破坏方式为结构体沿结构面的滑移^[16],因此在以下力学分析中将滑移体视作刚体。

3.1 第 1 类滑移体力学分析

根据图 7(a) 所示底板块裂介质岩体的结构特征,第 1 类滑移体在一般状态下的受力情况如图 8 所示(其它状态下的受力情况可在图 8 的基础上进行简化),主动力有支架载荷 F_S 、滑移体上方块体载荷 F_A 和滑移体自重 G_F ,约束力为滑移体下方块体作用载荷 F_F 。图 8 中, φ_0 和 φ_1 分别为滑移体与块体及支架间的摩擦角, β_1 和 β_2 分别为滑移体结构面间的夹角。

将滑移体所受主动力向任意 O 点简化,根据平行四边形法则,主动力 F_S 和 G_F 的合力 F_{SF} 可表示为

$$F_{SF} = \sqrt{F_S^2 + G_F^2 + 2F_S G_F \cos(\alpha - \varphi_1)} \quad (20)$$

根据余弦法则, F_{SF} 与 F_S 之间的夹角 γ_1 可表示为

$$\gamma_1 = \arccos \frac{F_{SF}^2 + F_S^2}{2F_{SF}F_S} \quad (21)$$

同理,主动力 G_F 和 F_A 的合力 F_{FA} 及 F_{FA} 与 G_F 之间的夹角 γ_2 可表示为

$$F_{FA} = \sqrt{F_A^2 + G_F^2 + 2F_A G_F \cos(\alpha + \beta_2 + \varphi_0)} \quad (22)$$

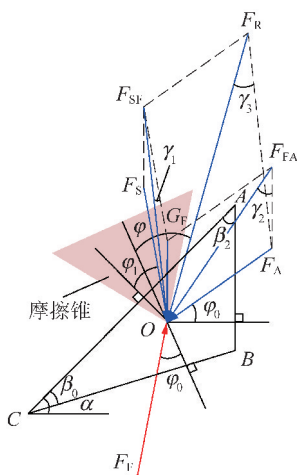


图 8 第 1 类滑移体力学模型

Fig. 8 Mechanical model of the first kind sliding body

$$\gamma_2 = \arccos \frac{F_{FA}^2 + G_F^2}{2F_{FA}G_F} \quad (23)$$

则图 8 所示第 1 类滑移体所受主动力的合力 F_R 及 F_R 与 F_{SF} 之间的夹角 γ_3 可表示为

$$F_R = \sqrt{F_{SF}^2 + F_A^2 - 2F_{SF}F_A \cos(\gamma_1 + \varphi_1 + \varphi_0 + \beta_2)} \quad (24)$$

$$\gamma_3 = \arccos \frac{F_R^2 + F_{SF}^2}{2F_R F_{SF}} \quad (25)$$

根据摩擦学原理,当作用于物体的全部主动力的合力的作用线在摩擦角之内时,形成自锁现象。则其对应的稳定性条件为

$$\gamma_1 + \gamma_3 + \varphi_1 - \beta_1 \leq \varphi_0 \quad (26)$$

同理,当滑移体上方块体能够自稳时,即上方块体对滑移体的作用载荷 F_A 可忽略不计时,如图 7(a) 中的第 1 类滑移体,其对应的稳定性条件为

$$\gamma_1 + \varphi_1 - \beta_1 \leq \varphi_0 \quad (27)$$

当直接底整体或局部破碎程度较严重,所形成的第 1 类滑移体尺寸较小,且滑移临空面上无支架作用载荷 F_S 时,如图 7(b) 中的第 1 类滑移体,其对应的稳定性条件为

$$\gamma_2 + \alpha - \beta_1 \leq \varphi_0 \quad (28)$$

当直接底较厚,或其力学性状较好时,直接底仅在局部形成尺寸相对较小的第 1 类滑移体,且滑移临空面上无支架作用载荷 F_S ,如图 7(c) 中的第 1 类滑移体,其对应的稳定性条件为

$$\alpha - \beta_1 \leq \varphi_0 \quad (29)$$

当支架倾斜,且支架底座与底板的接触线(点)位于块体结构面时,支架对底板作用载荷的主方向沿着劈开裂缝发展的方向,如图 7(d) 中的第 1 类滑移体,极易诱发底板岩体结构的失稳滑移。

对比上述几种情况可以看出,当直接底破碎程度较严重或支架倾斜,且支架底座与底板的接触线(点)位于块体结构面时,直接底围岩结构在支架载荷和底板重力倾向分量作用下易出现失稳滑移。煤层倾角、支架力学行为和直接底的力学性质与结构特征与底板的失稳滑移密切相关,底板失稳滑移的概率随着煤层倾角的增大、支架倾斜幅度和范围的增大、直接底破碎程度的增大而增大。

3.2 第 2 类滑移体力学分析

根据图 7(a) 所示直接底破碎岩块的结构特征,第 1 类滑移体上方的第 2 类滑移体在一般状态下的受力情况如图 9 所示,主动力有支架作用载荷 F_S 、滑移体上方块体作用载荷 F_{up} 和滑移体自重 G_F ,约束力有滑移体下方第 1 类滑移体作用载荷 F'_A 、直接底层岩体作用载荷 F_{down} 和层间黏结力 F_C 。图 9 中, φ_2 为第 2 类滑移体与底板下层岩体间的摩擦角。

根据平衡条件可得第 1 类滑移体对第 2 类滑移体的作用载荷 F'_A 可表示为

$$F'_A = [G_F \sin \alpha + F_S \sin \varphi_1 + F_{up} \cos(\varphi_0 - \beta_3) - F_{down} \sin \varphi_2 - F_C] / \sin(\beta_2 + \varphi_0) \quad (30)$$

由式(30)可以看出,第 2 类滑移体的自稳条件为 $F'_A \leq 0$;当采场直接底较薄,且破碎程度较严重时,层间黏结力 F_C 可忽略,第 2 类滑移体的失稳滑移概率将随着煤层倾角 α 的增大而急剧增大。

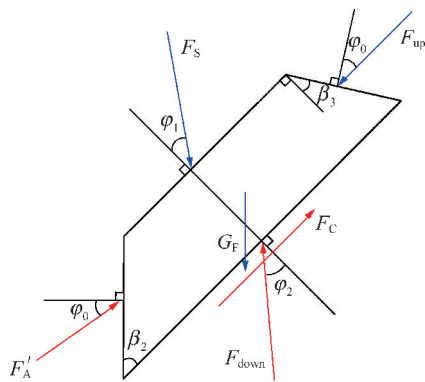


图 9 第 2 类滑移体力学模型

Fig. 9 Mechanical model of the second kind sliding body

同时,由式(30)可得极限情况下第 1 类滑移体 AB 面所承载荷 F_A 的极值 F_{Amax} 可表示为

$$F_{Amax} = (\gamma l_1 h_1 \sin \alpha + F_S \sin \varphi_2 - F_C - F_{down} \sin \varphi_2) / \sin(\beta_2 + \varphi_0) \quad (31)$$

其中, γ 为直接底重度; h_1 为直接底厚度; l_1 为第一类滑移体距上区段煤柱距离。可以看出,第一类滑移体 AB 面所承载荷 F_A 介于 0 到 F_{Amax} 之间,同时结合图 9 可以看出,当第 2 类滑移体不能自稳,且其结构面

夹角 β_2 小于其摩擦角 φ_0 时,第 2 类滑移体有向第 1 类滑移体下方滑、窜的运动趋势,会对第 1 类滑移体形成抬、挤的力学效应,更易造成第 1 类滑移体的失稳滑移。

4 结 论

(1)受煤层倾角影响,底板在非对称载荷与约束作用下的破坏形态沿工作面倾向呈现为下大上小的非对称反拱,其最大破坏深度位于工作面倾向下部区域。随着煤层倾角的增大,底板的破坏深度和范围均逐渐减小,非对称特性亦更加明显。

(2)支架作为顶底板岩层的传力媒介,始终处于与底板相互作用、相互制约的动态系统中。支架对底板破坏的影响范围较小,主要涉及采场的直接底岩层,且直接底越薄、支架倾斜幅度越大,支架对直接底的破坏程度将会越严重。

(3)当滑移体存在临空面、滑移体所受主动力合力与滑移面向交、主动力合力与滑移面法向方向的夹角大于滑移面的摩擦角时,出现底板滑移;且直接底块裂介质岩体失稳滑移的概率随着煤层倾角的增大、直接底破碎程度的增大、支架倾斜幅度和范围的增大而增大。

参考文献 (References):

[1] 伍永平, 俞东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[2] 伍永平, 刘孔智, 俞东风, 等. 大倾角煤层安全高效开采技术研究进展 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1611-1618.
WU Yongping, LIU Kongzhi, YUN Dongfeng, et al. Research progress on the safe and efficient mining technology of steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1611-1618.

[3] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 253-260.

[4] 胡文, 李维光, 黄建功, 等. 大倾角煤层底板岩层运动规律与采面底板分类 [J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, 19(1): 81-83.
HU Wen, LI Weiguang, HUANG Jianguo, et al. Floor movement regularity and classification in high inclined seam [J]. Ground Pressure and Strata Control, 2002, 19(1): 81-83.

[5] 尹光志, 李小双, 郭文兵. 大倾角煤层工作面采场围岩矿压分布规律光弹性模量拟模型试验及现场实测研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3336-3343.
YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, GUO Wenbing. Photoelastic experimental and field measurement study of ground pressure of surround-

ing rock of large dip angle working coalface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3336-3343.

[6] 伍永平, 郭峰. 大倾角大采高工作面底板破坏滑移特征分析 [J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 160-162.
WU Yongping, GUO Feng. Analysis on floor failure and slip characteristics of large inclined and height face [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 160-162.

[7] 石平五, 刘晋安, 周宏伟. 大倾角煤层底板破坏滑移机理 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1993, 10(3/4): 115-119.
SHI Pingwu, LIU Jinan, ZHOU Hongwei. Mechanism of the breakage and sliding of the floor rock of highly inclined coal seam [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1993, 10(3/4): 115-119.

[8] 闫少宏, 张勇. 大倾角软岩底板破坏滑移机理 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995(1): 19-25.
YAN Shaohong, ZHANG Yong. Failure mechanism of soft rock floor under large dip angle [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995(1): 19-25.

[9] 孙建, 王连国, 唐芙蓉, 等. 倾斜煤层底板破坏特征的微震监测 [J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1589-1595.
SUN Jian, WANG Lianguo, TANG Furong, et al. Microseismic monitoring on the failure characteristics of an inclined coal seam floor [J]. Rock and Solid Mechanics, 2011, 32(5): 1589-1595.

[10] 孙建. 沿煤层倾斜方向底板“三区”破坏特征分析 [J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 115-121.
SUN Jian. Failure characteristics of floor “three-zone” along the inclined direction of coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 115-121.

[11] 谢广祥. 综放工作面及其围岩宏观应力壳力学特征 [J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 309-313.
XIE Guangxiang. Mechanical characteristics of fully mechanized top-coal caving face and surrounding rock stress shell [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(3): 309-313.

[12] 伍永平, 王红伟, 解盘石. 大倾角煤层长壁开采围岩宏观应力拱壳分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 559-564.
WU Yongping, WANG Hongwei, XIE Panshi. Analysis of surrounding rock macro stress arch-shell of longwall face in steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 559-564.

[13] 罗生虎, 伍永平, 刘孔智, 等. 大倾角煤层长壁开采空间应力拱壳形态研究. 煤炭学报, 2016, 41(12): 2993-2998.
LUO Shenghu, WU Yongping, LIU Kongzhi, et al. Study on the shape of the space stress arch shell in steeply dipping coal seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(12): 2993-2998.

[14] 魏德冈. 拱的非线性理论及其应用 [M]. 北京: 科技出版社, 2004.

[15] 王龙甫. 弹性理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.

[16] 孙广忠. 岩体结构力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.