

大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制

伍永平^{1,2},解盘石^{1,2},俞东风^{1,2},王红伟^{1,2},罗生虎^{2,3},高喜才^{1,2},
郎 丁^{1,2},胡博胜^{1,2},闫壮壮^{1,2},王 同^{1,2}

(1. 西安科技大学 能源学院,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实验室,陕西 西安 710054;3. 西安科技大学 理学院,陕西 西安 710054)

摘 要:大倾角煤层开采过程中,重力-倾角效应是导致细观层状煤岩体单元体主应力偏转和层间接触面应力非均衡传递,介观层状采动模型优势破裂面方向偏移,宏观层状关键层区域迁移、岩体结构异化的主要因素。研究表明,在倾角 35° 以上煤层采场中重力-倾角效应影响尤为明显:①煤岩组合界面倾角 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,非均衡传力特性逐渐凸显,界面附近煤岩体内应力传递方向发生偏转,且偏转量随倾角增加逐渐增大;煤体破坏由压剪破坏转化为近平行于界面的滑移剪切破坏,煤岩体的强度和弹性模量也随之减小。②改变了采场围岩采动应力路径演变规律,在采动应力驱动下顶板的损伤变形与破坏运动存在明显的区域性和时序性。③诱发了大倾角采场顶板结构跨层迁移转化、底板非对称破坏滑移、区段煤柱或煤壁局部-整体破坏,以上围岩失稳存在多尺度链式时空关联性,特别是引发围岩灾变的采场关键岩块位置多变,形成采场围岩承载结构异化和泛化特征。理论与实践表明,重力-倾角效应作用下大倾角煤层岩层控制具有显著的多维度和多尺度特点,突破传统开采方法与技术瓶颈,研发全新型成套装备是实现该类煤层安全高效开采的有效途径。

关键词:大倾角煤层;重力-倾角效应;非均衡应力传递;承载结构泛化;多尺度岩层控制

中图分类号:TD823;TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2023)01-0100-14

Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal seam

WU Yongping^{1,2}, XIE Panshi^{1,2}, YUN Dongfeng^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2}, LUO Shenghu^{2,3}, GAO Xicai^{1,2},
LANG Ding^{1,2}, HU Bosheng^{1,2}, YAN Zhuangzhuang^{1,2}, WANG Tong^{1,2}

(1. School of Energy Engineering, 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. College of Sciences, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Gravity-dip effect is a main factor leading to the deflection and non-equilibrium transfer of stress in the meso-layered coal-rock mass and the interlayer contact area, the directional offset of dominant fracture in the mesoscopic layered mining model, regional migration of key strata and the variation of rock structure in the macro-layered in the mining of steeply dipping coal seam. The research result shows that the gravity-dip effects are particularly obvious in the coal seam with dip angle above 35° including ① the characteristics of non-equilibrium stress transmission

收稿日期:2022-05-03 修回日期:2022-06-21 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0648

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(52174126);陕西省自然科学基金基础研究计划-陕煤联合基金资助项目(2021JLM-10)

作者简介:伍永平(1962—),男,陕西汉中,教授,博士生导师,博士。E-mail:wuyup@xust.edu.cn

通讯作者:胡博胜(1991—),男,陕西西安人,讲师。E-mail:903107623@qq.com

引用格式:伍永平,解盘石,俞东风,等.大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J].煤炭学报,2023,48(1):100-113.

WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, et al. Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 100-113.



移动阅读

at the interface of coal-rock combined body are obviously and the stress transmission near the interface is deflected and the amount of deflection increases gradually. The failure of coal mass is transformed from compression-shear to shear slip nearly parallel to the interface, and the strength and elastic modulus of coal-rock mass also decrease accordingly. ② The evolution law of the mining stress path in the stope has been changed, and the damage deformation and failure movement of the roof driven by the stress have obvious regional and time sequence. ③ It leads to the migration and transformation of roof structure, the asymmetric failure of floor slipping, and the partial-total failure of the coal pillar or coal wall in the section in the steeply dipping coal seam. The instability of the surrounding rock above has a multi-scale chain spatiotemporal correlation and the key rock blocks in the stope that cause surrounding rock catastrophes are changeable, which results in the dissimilation and generalization of the bearing structure of the surrounding rock in the stope. Multi-dimension and multi-scale are the essential characteristics of strata control in the steeply dipping coal seam under the action of gravity-dip effect. Breaking through the bottleneck of traditional mining methods and technologies, and developing new complete sets of equipment are effective ways to achieve the safe and efficient mining of steeply dipping coal seam.

Key words: steeply dipping coal seam; gravity-dip effect; non-equilibrium stress transmission; bearing structure generalization; multi-dimensional strata control

以煤为主是我国长期不变的基本国情,煤炭在我国能源结构和国民经济中仍将扮演重要的压舱石角色^[1]。中国煤炭资源储量虽仅位列世界第 4,同时作为世界最大的煤炭生产国、消费国、进口国,决定着我国的煤炭资源开发必须兼顾赋存条件简单与复杂煤层,即“易采”与“难采”并行。长期以来,赋存倾角是衡量煤层复杂难采程度的重要指标之一,大于 35°的大倾角煤层便是典型的复杂难采煤层^[2]。

采矿活动引发邻近层状岩体力学行为变化,并造成采矿工程状态变化。其中,层状岩体是由岩块和层间结构面组成的地质体,倾角(方位)作为结构面特征的重要参数,是影响倾斜层状煤岩体采动力学行为的主控因素^[3-4]。20 世纪 80 年代,我国学者便开始关注不同倾角影响下工作面矿压显现规律与岩层控制问题,历经 40 余年研究,揭示了煤层倾角对顶板结构形式^[5-8]、采动应力分布演化^[9-11]、覆岩承载结构包络形态的影响^[12-15],并指导了岩层控制实践^[16-28],提升了以大倾角煤层为代表的难采煤层机械化开采水平。以上研究实践,实质是煤岩体采动过程中“煤层倾角-岩体结构与应力环境-力学行为-工程状态”间的因果关系,及其在岩层控制实践中的有效利用。

但需要正视,现有研究仍存在应力传递路径难量化、各尺度层级研究缺乏有效衔接 2 个显著问题。具体体现在:① 倾角的改变造成自重应力场内煤岩层单元体受力的大小和方向发生改变,同时影响着层状岩体结构形式,决定了岩体优势破裂面发生破坏的难易程度。受制于层间接触面产状与性质差异,层间载

荷传递路径也将呈现出显著的非连续性,倾角影响下单元体经历的应力路径趋于复杂,难以精确描述。而以往对倾角效应的探讨主要集中于试件尺度,学者们主要针对煤岩(CR)组合体、岩-煤-岩(RCR)组合体、煤-岩-煤(CRC)组合体开展了大量试验,探讨了煤岩组合体变形和破坏规律^[29-35]。这种在限定加卸荷路径下的实验研究不能准确反映真实加卸荷路径下层状采动煤岩体力学行为的演化过程。② 以研究对象的尺度划分,从细观单元尺度的煤岩体强度变形特征,到试件、模型尺度的岩体破裂形式,再到宏观采动尺度的岩体结构变异,倾角对层状煤岩体细观力学行为响应的影响贯穿始终。而现有的研究多局限试件尺度下倾角效应的探讨,缺乏对模型和工程尺度层状岩体力学行为研究及其关联性分析。

笔者团队认为:要在以上问题实现突破,就必须进一步揭示自重应力场内层状煤岩体力学行为响应随煤层倾角变化而变化的客观规律。为便于表述,将这一客观规律的显性影响定义为层状煤岩体的“重力-倾角”效应。在大倾角煤层开采过程中,这一效应主导着不同尺度煤岩体采动力学行为,具体体现在:细观单元尺度上导致单元体主应力偏转和层间接触处应力非均衡传递^[36-37];试件、模型尺度上导致煤岩体优势破裂面方向偏移,趋于复合型破坏;工程尺度上引起采场围岩采动应力在不同岩体与层面间的连续-非连续传递,关键层跃层迁移^[38],广域倾斜空间岩体结构异化、泛化^[39-41],诱发“支架-围岩”系统多维失稳、“飞矸”动力灾害^[42-45],岩层控制难度剧增。

可以看出,重力-倾角效应很大程度上制约着大倾角煤层开采方法选择、关键技术突破和成套装备研发进程。本文聚焦不同尺度下重力-倾角效应对采动煤岩力学行为的影响,探讨煤岩单元体变形破坏特征,顶板采动应力路径演化规律,采场承载结构异化、泛化特征,提出大倾角煤层多尺度围岩协同控制技术,可为大倾角煤层开采方法与工艺革新、岩层控制实践提供理论支撑与技术借鉴。

1 倾角效应下煤岩体力学行为

不同结构煤岩体力学特性具有显著的各向异性及倾角效应^[46-51],从微(细)观尺度上分析煤岩组合单元体层间接触处应力传递、主应力偏转及非均衡变形与破坏等力学响应特征,是揭示采动应力驱动下层状煤岩体变形破坏规律和结构失稳机理的理论基础。

1.1 煤岩体三维力学模型

倾斜层状煤岩体由不同力学特性的岩块(A)与煤块(B)组成,如图1所示。假设煤岩组合块体受 σ_x 、 σ_y 和 σ_z 三向静水压力状态,据此进行倾斜煤岩组合受力分析(图1),推导不同倾角下的煤岩体应力分量为

$$\begin{cases} \sigma'_x = P_x \\ \sigma'_y = P_y \cos^2 \alpha + P_z \sin^2 \alpha \\ \sigma'_z = P_y \sin^2 \alpha + P_z \cos^2 \alpha \\ \tau'_{yz} = (P_z - P_y) \sin \alpha \cos \alpha \\ \tau'_{xy} = \tau'_{xz} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_x 、 P_y 和 P_z 为3个方向载荷大小,方向平行于坐标轴; α 为交界面倾角。

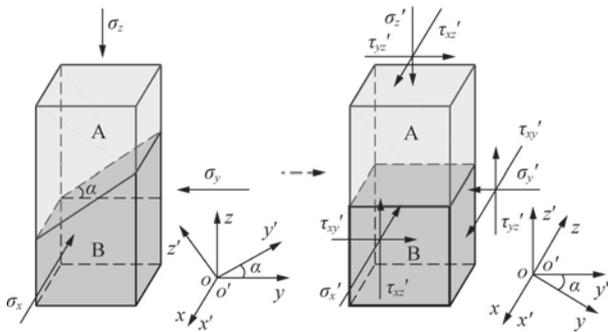


图1 倾斜煤岩组合体受力分析

Fig.1 Stress analysis of inclined coal-rock combination

以层状岩体破坏理论^[3]为基础,考虑煤岩体交界层面之间的黏结作用,假设弹性模量 $E_A > E_B$ 、泊松比 $\mu_A > \mu_B$,则煤岩体分别受应力分量 σ'_x 、 σ'_y 和 σ'_z 以及 τ'_{xy} 加载下在交界面附近产生应力增量。根据力学叠加原理可得

$$\begin{cases} \sigma'_{xA} = \sigma'_x + k_3 \sigma'_x - k_2 \sigma'_y - k_1 \sigma'_z \\ \sigma'_{yA} = \sigma'_y - k_2 \sigma'_x + k_3 \sigma'_y - k_1 \sigma'_z \\ \sigma'_{zA} = \sigma'_z \\ \tau'_{yzA} = \tau'_{yz} \\ \tau'_{xyA} = \tau'_{xzA} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma'_{xB} = \sigma'_x - k_3 \sigma'_x + k_2 \sigma'_y + k_1 \sigma'_z \\ \sigma'_{yB} = \sigma'_y + k_2 \sigma'_x - k_3 \sigma'_y + k_1 \sigma'_z \\ \sigma'_{zB} = \sigma'_z \\ \tau'_{yzB} = \tau'_{yz} \\ \tau'_{xyB} = \tau'_{xzA} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} k_1 = \frac{E_A \mu_B - E_B \mu_A}{E_A (1 - \mu_B) + E_B (1 - \mu_A)} \\ k_2 = \frac{2E_A E_B (\mu_B - \mu_A)}{(E_A + E_B)^2 - (E_A \mu_B + E_B \mu_A)^2} \\ k_3 = \frac{E_A^2 (1 - \mu_B^2) - E_B^2 (1 - \mu_A^2)}{(E_A + E_B)^2 - (E_A \mu_B + E_B \mu_A)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, k_1 为界面法向应力分量作用时在煤岩体交界面 x' 和 y' 方向产生的应力增量系数; k_2 为界面内切向应力分量作用时在垂直此切向方向产生的应力增量系数; k_3 为界面内切向应力分量作用时在此切向产生的应力增量系数。

煤岩体交界面应力分量可以看出,系数 k 只与煤、岩单体的物理力学性质有关,决定着煤岩体交界面处应力增量的大小,而应力分量 σ'_x 、 σ'_y 和 σ'_z 约束形式决定着应力增量产生的方向,不同倾角下煤岩体组约束形式的叠加引起主应力状态改变,而交界面上侧岩体与下侧煤体因主应力偏转、受力不均匀而产生宏观变形和破坏。

1.2 三向压缩状态下煤岩体主应力偏转特征

理论与模拟分析表明,随界面倾角改变,交界面两侧煤岩体主应力状态改变的差异性明显,且随倾角增大,煤岩体主应力偏转和层间接触应力非均衡传递特征将更加明显。由图2可知,交界面附近煤岩体主应力偏转状态具有显著的倾角效应。随倾角增大,煤岩体主应力偏转和层间接触应力非均衡传递特征更加明显。当倾角从 30° 增加至 60° ,在界面切向应力分量 σ'_y 作用下,交界面上侧岩体的应力传递主要从岩体中部向煤体两侧传递,即沿交界面向左下侧传递与穿过交界面向右下侧传递。交界面上部岩体的主应力方向呈现顺时针偏转的趋势,最大偏转角为 6.77° ;而交界面下部煤体偏转趋势相反,最大偏转角为 10.79° 。

1.3 煤岩体非均衡变形与破坏特征

随着层面倾角的增大,煤岩体强度、弹性模量参

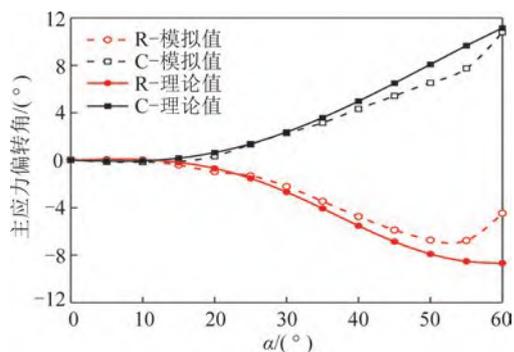


图 2 不同倾角煤岩体主应力偏转状态

Fig.2 Deflection of principal stress of coal-rock mass with different angles

数均有明显的下降趋势,如图 3 所示,煤岩体破坏的方式逐渐由压剪破坏转变为沿界面方向的剪切滑移破坏为主。当界面倾角在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时,其对于组合体内部应力传递及变形破坏影响较小,煤岩体内的应力传递整体仍沿垂直方向传递,煤岩体内部应力差异不大,此时煤体主要受压变形,裂纹主要由煤体下端向界面方向发育,煤岩体内煤以压剪破坏为主。而当界面倾角增大到 30° 以上时,界面间的非均衡传力特性逐渐凸显,界面间应力在界面附近煤岩体内应力传递方向发生偏转且偏转量逐渐增大,将首先在界面及附近煤体内产生微裂隙,并逐渐向煤体下端发展,宏观

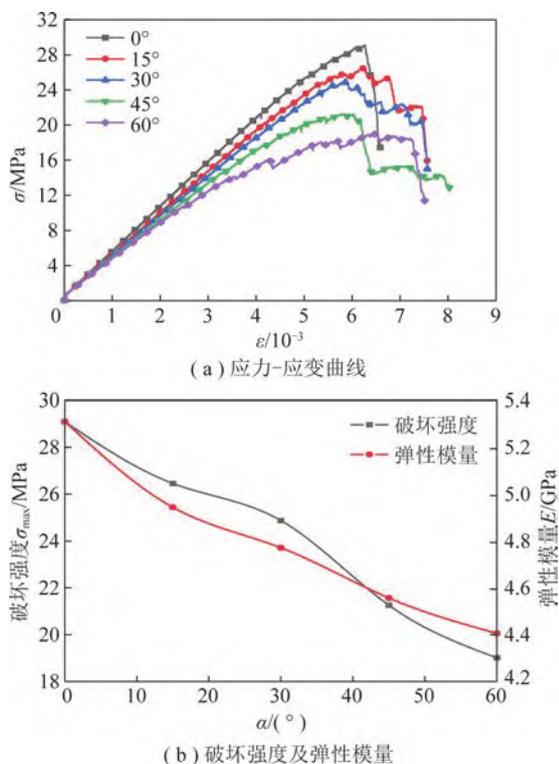


图 3 不同界面倾角煤岩体的应力-应变及强度特征

Fig.3 Stress-strain and strength characteristics of coal-rock mass with different interface angles

裂隙发育方向逐渐向平行于界面方向发展;煤体破坏由压剪破坏,转为沿界面滑移剪切破坏。

2 大倾角采场顶板采动应力传递时空演化规律

微(细)观尺度上煤-岩界面上应力传递和变形破坏等力学行为的倾角效应明显。为进一步揭示工程尺度倾斜层状煤岩体采动力学行为的重力-倾角效应,对数值仿真模拟结果进行弹塑性理论映射分析,研究自重应力场下顶板采动应力传递时空演化的倾角效应。

2.1 顶板采动应力环境

不同煤层倾角条件下,采动影响范围内基本顶岩层所处的力学环境表明(图 4),在采空区上方的顶板应力释放区内,基本顶岩层由原岩应力状态的三向受压演变为单、双向受拉,部分区域甚至为三向受拉状态,应力大幅降低,方向发生明显偏转。在采场四周的支承压力峰值区,即应力集中区内,顶板三向应力状态亦发生明显改变,主应力增幅较大,方向偏转程度较明显。

随着煤层倾角的增大,应力集中区域内基本顶的主应力方向偏转角度随之增大。自采空区中心至采空区四周,主应力呈先增大后减小的演化趋势,其中第 1 主应力的变化幅度最大,第 3 主应力次之。在数值上,第 1 主应力先增大、后减小,第 2 主应力持续减小,第 3 主应力稍有增大。第 2、第 3 主应力所在平面与水平面之间的夹角随着煤层倾角增大而增大。

2.2 顶板主应力大小渐变演化规律

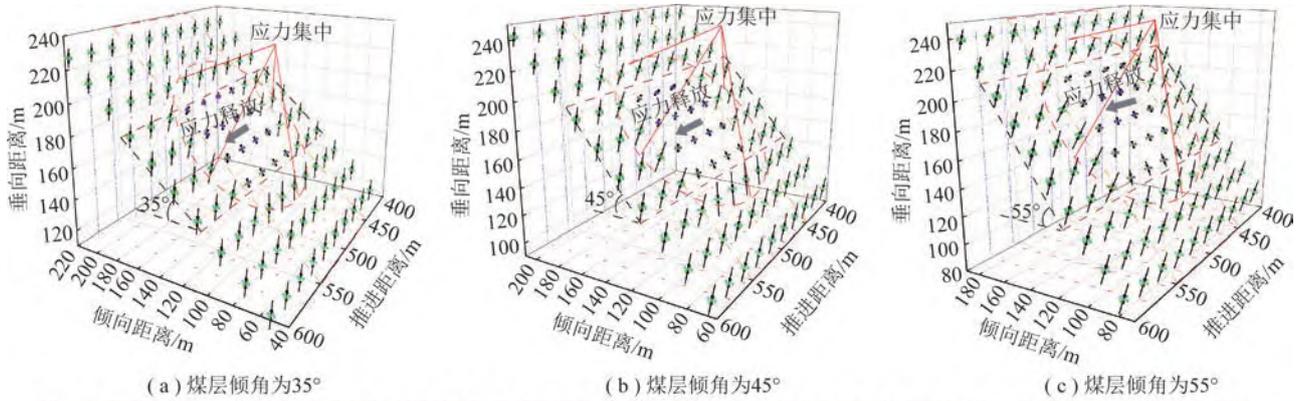
不同煤层倾角条件下工作面倾向中部第 1 主应力的大小渐变演化规律表明(图 5),在原岩应力状态下,第 1 主应力在 x 轴方向分量为 0, z 轴的分量远大于 x 轴分量。由 oxy 和 oyz 平面的投影可以看出,第 1 主应力从原岩应力位置至采空区中点的连线呈对称分布。采动影响下,第 1 主应力开始向 y 轴偏转, y 轴方向分量增大。在应力增高区域内,第 1 主应力在 x 、 y 、 z 轴的分量均增大。在应力降低区域内,第 1 主应力在 x 、 z 轴的分量呈递减趋势,但 y 轴分量却呈先增大后减小的趋势,直至到达采空区中心点位置处,3 个方向的分量均降至 0。随着煤层倾角的增大,原岩应力状态下的第 1 主应力大小持续减小。受采动影响,在应力增高、降低区,第 1 主应力呈现出增—减—增的演化趋势。

2.3 顶板主应力方向偏转演化规律

不同煤层倾角条件下工作面倾向中部第 1 主应力的方向偏转演化规律表明(图 6),原岩应力状态下,受煤层倾角影响,第 1 主应力与 x 轴(水平方向)

的夹角为 $95^\circ \sim 106^\circ$, 与 z 轴(垂向)的夹角为 $5^\circ \sim 16^\circ$, 与 y 轴(走向)的夹角为 90° , 表明第 1 主应力分布在垂直于走向的平面内, 并与竖直方向稍有偏差。采动影响下, 第 1 主应力与 x 轴的夹角沿走向关于采空区中点对称, 由原岩应力区至采空区中点呈现出先

增大后减小的趋势; 与 y 轴的夹角在采空区中点两侧呈对称分布, 即在采空区中点前侧区域, 第 1 主应力方向与 y 轴的夹角由 90° 开始呈现先增大后减小的趋势, 在采空区后侧, 夹角由 90° 开始呈现先减小后增大的趋势, 两者变化的绝对值相同。



注: 红色长虚线与黄色长虚线交汇的矩形区域为采空区正上方的基本顶; 黑、红色矢量为第1主应力压、拉状态, 绿、蓝色矢量为第2主应力压、拉状态, 青、粉色矢量为第3主应力压、拉状态, 矢量长度代表应力的大小, 矢量方向代表应力的方向。

图 4 基本顶三向应力演化特征

Fig.4 Three-dimensional stress evolution characteristics of the main roof

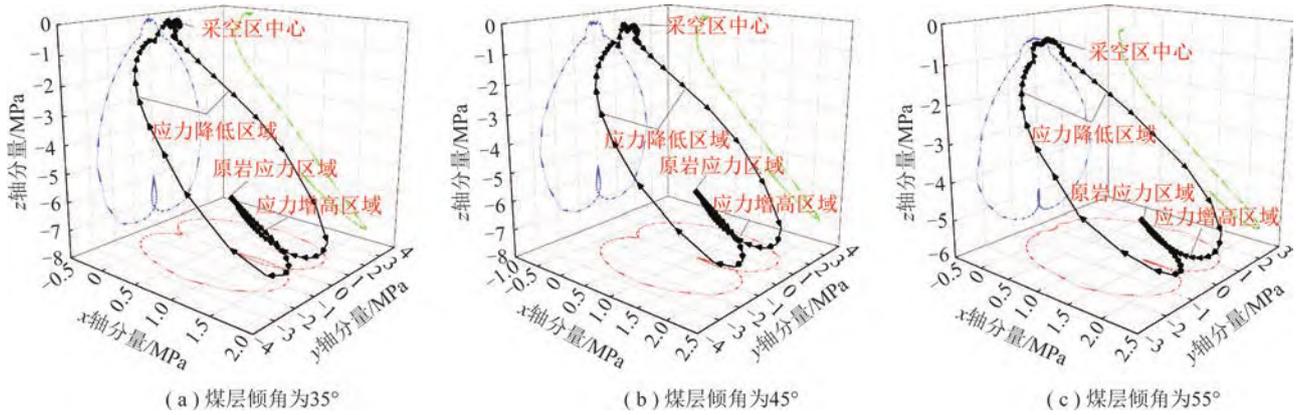


图 5 基本顶第 1 主应力大小渐变演化规律

Fig.5 Evolution characteristics of the magnitude of first principal stress of the main roof

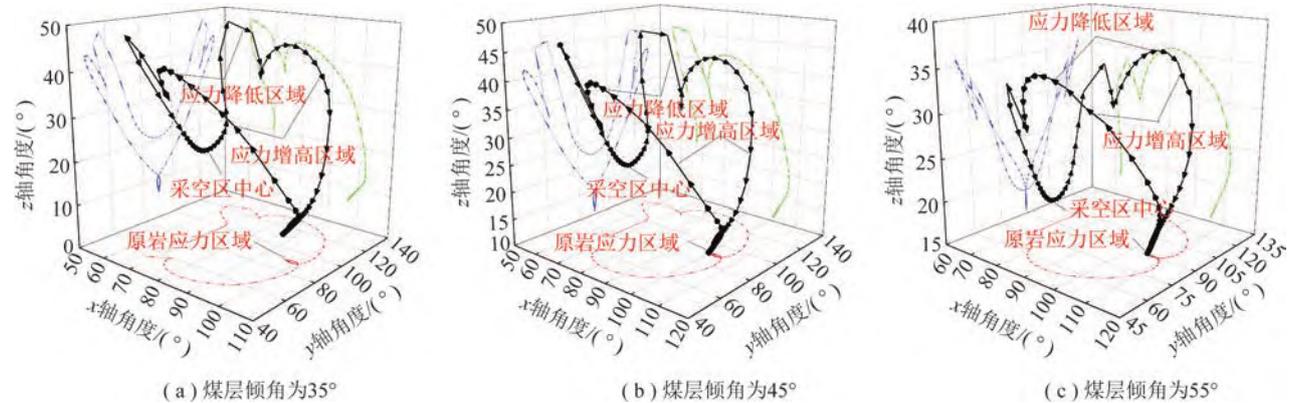


图 6 基本顶第 1 主应力方向偏转演化规律

Fig.6 Evolution characteristics of the first principal stress direction of the main roof

随着煤层倾角的增大,原岩应力状态下,第 1 主应力方向与 x 、 z 轴之间夹角持续增大,与 y 轴之间夹角保持不变。采动影响下,在应力增高区,第 1 主应力与 x 轴之间夹角不断增大,与 y 轴之间夹角先减小后增大,与 z 轴之间夹角不断减小。当煤层倾角分别为 35° 、 45° 、 55° 时,第 1 主应力与 x 轴之间夹角分别为 102.07° 、 106.5° 、 111.2° ,与 y 轴之间夹角分别为 48.5° 、 49.8° 、 54.4° ,与 z 轴之间夹角分别为 43.1° 、 41.4° 、 35.6° 。

在大倾角煤层开采过程中,倾角效应改变了围岩采动应力的演变规律,造成采场空间不同区域围岩所处的应力环境与受载历程等存在差异,顶板的损伤变形与破坏运动的区域性和时序性特征明显,并随煤层倾角的增大而愈发严重。

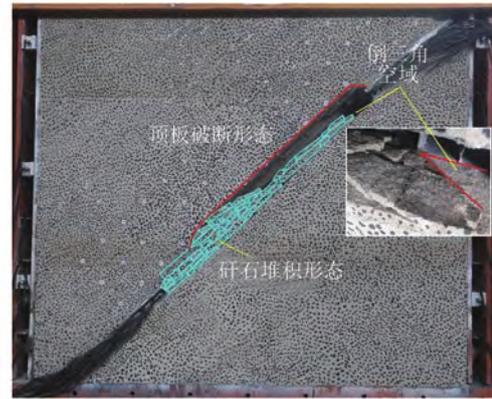
3 大倾角采场“关键层”区域迁移、结构异化和泛化

综上所述可以看出,重力-倾角效应下,大倾角采场空间煤岩体应力演化呈现出显著的区域性和时序性,应力传递在不同岩体与层面间存在连续-非连续性,导致“关键层”区域迁移转化,围岩结构异化和泛化,进而诱发更为复杂的围岩动力灾害。采用三维物理相似模拟实验、多元数值计算和采空区三维激光探测等,从模型尺度和工程尺度探究大倾角采场顶板垮落矸石充填、“关键层”区域迁移、底板破坏滑移等规律,揭示大倾角采场围岩链式结构特征及结构异化和泛化致灾机理,为该类型煤层岩层控制提供理论支撑。

3.1 采场围岩变形破坏时空规律

采空区垮落矸石具有显著的非均匀充填特征。在深部采空区易形成“下部填实、中部填满、上部悬空”的非均匀充填形态,倾斜中上部区域支架后方易形成“倒三角空域”,沿采空区倾向自下而上,不同区域矸石充填体的物理力学特性存在明显差异,其对顶板的支撑约束作用具有非均匀性,导致倾向不同区域顶板垮落高度不同,“关键层”区域跨层迁移。随着工作面推进,采空区矸石充填的非均匀状态趋于稳定,顶板垮落形态的非对称性趋于稳定,如图 7 所示。

大倾角俯伪斜开采,在顶板垮落矸石非均匀充填约束下,基本顶最大变形位于倾斜中上部,采场三维空间逐渐演化成“上宽下窄”形态,呈现出明显的非对称“O-X”破断特征,且“O”、“X”破断均具有时序性。不同层位顶板“O”形破断轮廓不断减小、各层周期性破断线沿伪斜方向呈不规则“月牙”状,且随着



(a) 初采



(b) 正常开采

图 7 采空区垮落矸石非均匀充填特征

Fig.7 Non-uniform filling characteristics of caving gangue in goaf 层位升高,“月牙”状破断线数量减少,如图 8 所示。顶板非对称“O-X”型破断导致“关键层”区域沿工作面倾斜方向发生跨层迁移,以工作面中部区域基本顶为基准,分别向下部区域直接顶和上部区域基本顶上位岩层迁移。以“关键层”破断后岩块为主体形成的“岩体结构”在走向上呈“三铰拱”或“类三铰拱”形态,在倾向上呈多级梯阶结构,表现为工作面中下部区域堆砌和中上部区域的反向堆砌 2 种形态,走向与倾向岩体结构相互作用形成采场三维非对称多级梯阶状壳体结构,如图 9 所示。

其中,低位梯阶位于工作面倾斜下部的直接顶,高位梯阶位于工作面倾斜中、上部的基本顶及其上位岩层中。低位梯阶结构失稳直接影响工作面“支架-围岩”系统稳定性,并向上发展诱发高位梯阶结构失稳。高位梯阶结构易发生拉伸破坏、压剪破坏等复合型失稳,引发采场大范围围岩运动,易诱发采场冲击灾害,是工作面岩层控制的关键。综合力学和几何方法,构建顶板倾向非对称应力拱力学模型和走向对称拱力学模型,并确定了顶板倾向非对称拱和走向对称拱的合理轴线,实现对大倾角采场顶板“关键层”区域三维曲面的定量表征。

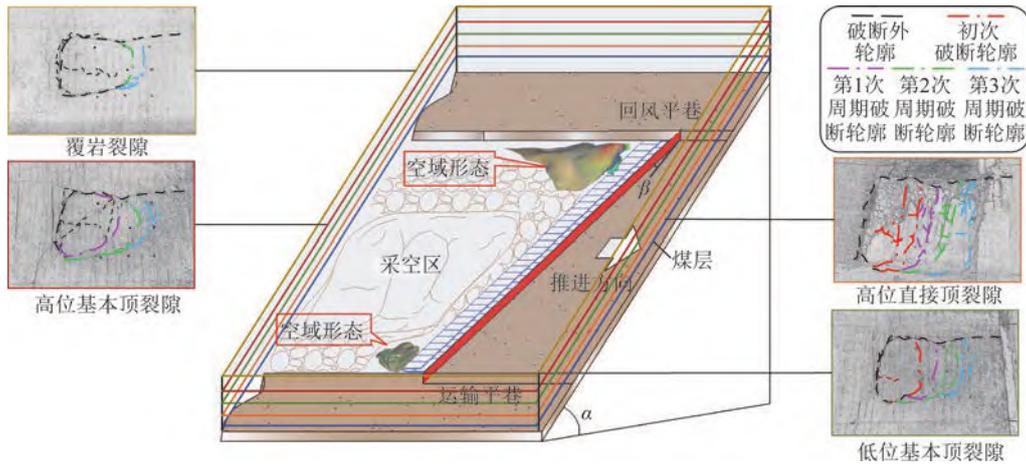


图8 伪俯斜采场覆岩“O-X”破断形态特征

Fig.8 Characteristics of “O-X” fracture morphology of overburden in pitching oblique area

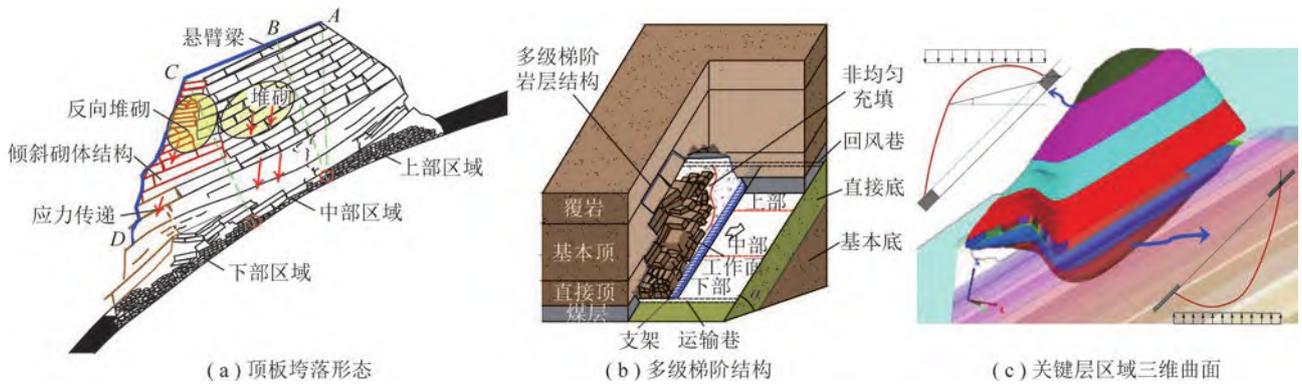


图9 覆岩三维多级梯阶状壳体结构及曲面形态

Fig.9 Multilevel ladder shell structure and surface shape of overburden

大倾角采场底板变形破坏一般呈现非对称反拱形态,与其反拱形应力形态具有类似特征,然而,重力-倾角效应对底板破坏的影响与对顶板的影响有所不同,一般来说,层状底板在重力倾向分力挤压作用和底板应力释放过程中,首先在弱面发生挤压破坏,随即在倾向挤压下底板岩块失稳并发生向下滑移,在这个过程中,底板破坏岩块自身重力首先起到抵消层状倾向挤压的作用,底板失稳后,又是诱发底板临空面岩块下滑的主要因素。物理模拟实验表明,当倾角大于45°时,倾斜不同区域底板破坏形成的滑移体形态存在差异,一般存在“挤出-平移”、“挤出-下压”、“挤出-上推”滑移3种破坏模式,如图10所示(图10中, F_1 、 F_2 为底板结构体对底板滑移体的挤压作用力,kN; F_3 为顶板对底板滑移体的作用力,kN)。通过建立底板非对称反拱力学模型,给出底板非对称反拱的合理轴线,可实现对大倾角底板滑移区域的定量表征。

3.2 采场围岩空间结构异化和泛化

相较于近水平或缓倾斜煤层,大倾角煤层采场

围岩承载结构稳定性影响因素众多,主要由多梯阶砌体结构、底板反拱结构、区段煤柱、层间岩层等组成。而顶板、底板破坏滑移沿倾向分布范围广泛,起控制作用的关键岩块位置多变,已从近水平煤层的单一因素引发围岩灾变转变为多因素耦合致灾,导致了大倾角煤层围岩承载结构具有泛化特征。具体表现为,大倾角煤层采场承载结构倾斜剖面上形成了类似链式的围岩结构。根据构成元素的不同,可以划分为单一煤层“顶板-煤柱-底板(R-P-F)”链式结构和近距离煤层群“煤柱-间隔岩层-煤柱(P-S-P)”链式结构(图11)。采场围岩链式结构与外部开采环境相互作用,内部结构单元(R、P、S、F)间通过强弱链相互关联,在重力-倾角效应的影响下,煤柱或间隔岩层多以弱链形式存在,其中,强链控制围岩空间大面积动力失稳,弱链控制围岩局部破坏。采动过程中围岩结构单元间强弱链相互转换,形成大倾角煤层开采围岩链式灾害孕育、发展、演变动态过程。

其中,单层煤多区段开采时,顶板、底板通过

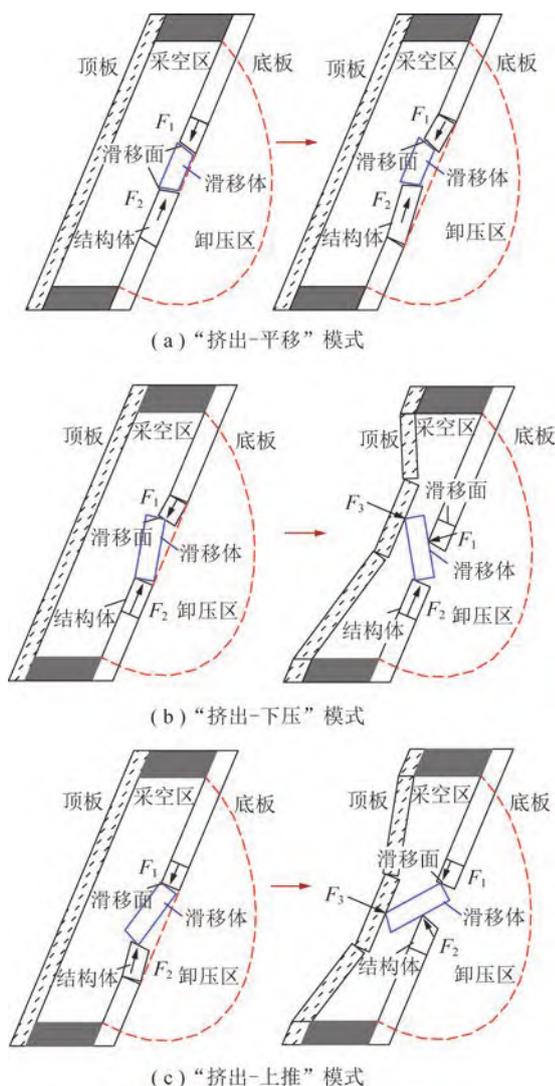


图 10 底板破坏滑移模式

Fig.10 Failure and slip modes of floor

区段煤柱间应力传递形成强、弱链,区段煤柱失稳引发相邻“R-P-F”链式失稳,诱发高位梯阶结构失稳,导致工作面支护推垮性灾变。近距离煤层群开采时,间隔岩层区域出现应力集中,发生局部渐进破坏,导致“P-S-P”链式失稳,相邻煤层回采空间连通,诱发低位梯阶结构失稳,形成采场复合动力灾害。

4 大倾角采场多维多尺度岩层控制

综上,重力-倾角效应影响下,一方面大倾角煤层采场围岩失稳致灾呈现出显著的尺度效应,如顶底板局部破坏导致围岩宏观结构的演化现象,煤柱的局部失稳引发覆岩大范围破坏与运移现象,煤壁的局部失稳诱发煤岩失稳及飞矸动力灾害等;另一方面,大倾角煤层采场围岩稳定性控制具有显著的多维特点,如,煤壁-支架-采空区矸石支撑体系维持着工作面

走向系统的稳定性,覆岩-顶板-支架-底板支撑体系维持着工作面垂向系统的稳定性,煤柱-支架群-煤柱支撑体系维持着工作面倾向系统的稳定性。可以看出,上述 3 个系统的稳定性控制同时具有时空协同、主动被动特点,即大倾角煤层采场岩层控制是多维度、多尺度的,如图 12 所示。

4.1 采场围岩多维协同控制

在采场尺度岩层控制方面,一是对于大倾角、急倾斜特厚煤层开采,如东峡煤矿 37220-2 综放工作面,煤层倾角 $34^{\circ}\sim 58^{\circ}$,厚度平均 9.8 m,为了消除采用大段高采场倾向大尺度采空区失稳所致的动力灾害,融合了厚煤层走向长壁和水平分段短壁开采技术,发明了大倾角特厚煤层高段走向壁式综放采煤法,消除了大段高开采跨层拱效应,避免了采空区顶板冒落和动压威胁,如图 13(a)所示。二是针对大倾角中厚煤层开采,如枣泉煤矿 120210 综放工作面,煤层倾角平均 34.5° ,厚度平均 8.15 m,为了缓解倾角变化引起采场顶板、底板受非对称载荷效应,发明了大倾角煤层变角度综采/放工作面伪仰斜变倾角布置方法,有效解决了支架倾倒、咬架,使设备处于合理的位态,保证变角度段工作面“支架-围岩”系统的稳定性(图 13(b))。三是对于急倾斜中厚煤层开采,如绿水洞煤矿倾角 60° 以上煤层,发明了急倾斜煤层临界伪俯斜和斜向长壁工作面布置方法,可有效解决工作面倾角大、煤壁片帮频发难题,缓解采空区非均匀充填所致支架非对称受载特征,降低长壁采场围岩的倾角效应及煤壁片帮失稳,如图 13(c)所示。

在局部尺度围岩控制方面,一是为了降低围岩结构中弱链煤柱非受控失稳所致的巷道破坏难题,如 2130 煤矿 25221 大采高工作面,煤层倾角 $38^{\circ}\sim 46^{\circ}$,采高 4.5 m,采用柔性支护方法对回风巷进行支护,利用上区段垮落矸石保护区段巷道,工作面采过后煤柱及巷道围岩破坏并充填下区段采空区,2 个区段贯通形成大工作面,从而解决了工作面倾斜上部区域内“顶板-支架-底板”系统的失稳问题,实现了区段煤柱-巷道稳定与破坏协同控制,大幅降低了倾斜采煤空间围岩非均衡运动及受载程度。二是针对顶板与装备非对称受载及其调控难题,采用“工作面中部基本顶深孔预裂+两巷顶板中深孔切顶+采空区基本顶深孔探测”的坚硬顶板倾向-走向综合弱化技术,以及顶板倾向分区控制方法和工作面“楔形”布置方式,降低了工作面下部采场高度,增加了倾斜下部的充填长度,保证了工作面支护系统受载均衡性,消除了顶板大范围冲击灾害隐患,提高了坚硬顶板安全控制系统可靠性,如图 14 所示。

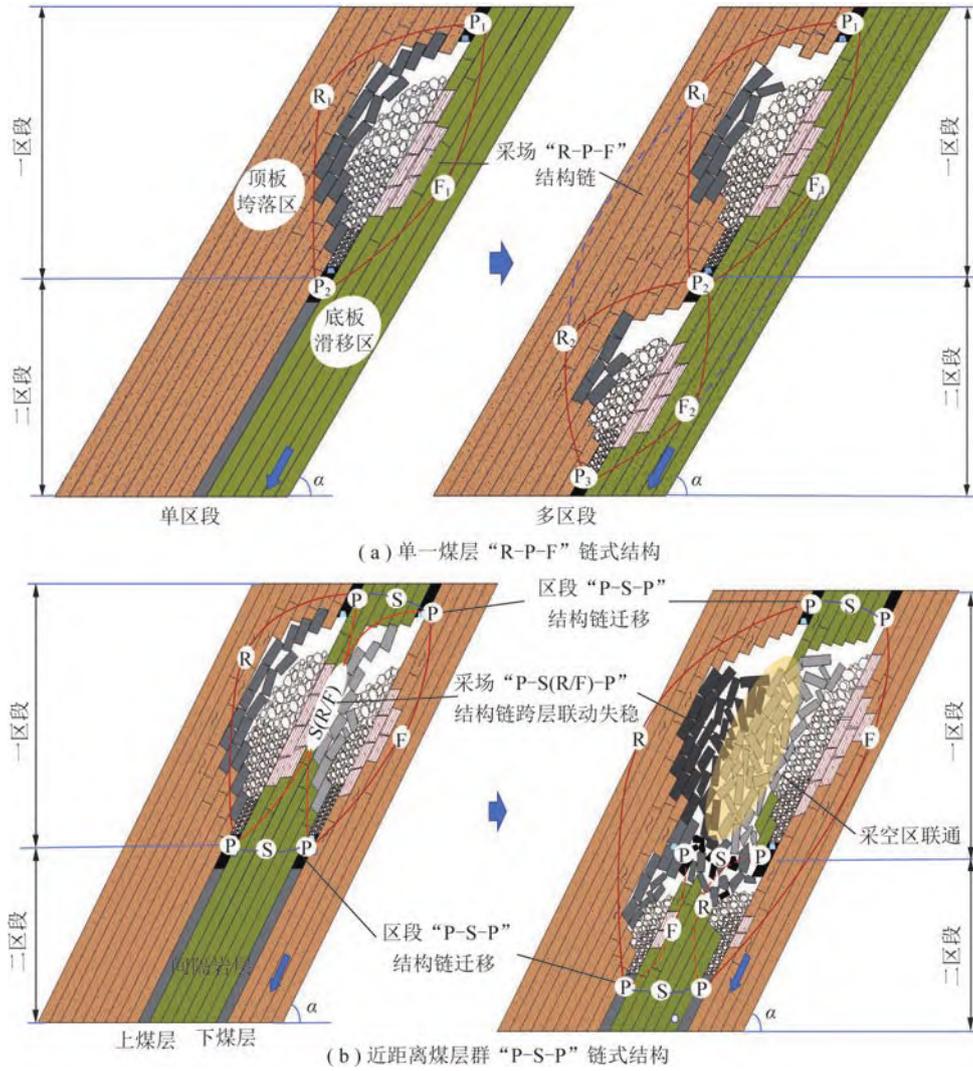


图 11 采场围岩泛化承载结构

Fig.11 Generalized bearing structure of surrounding rock

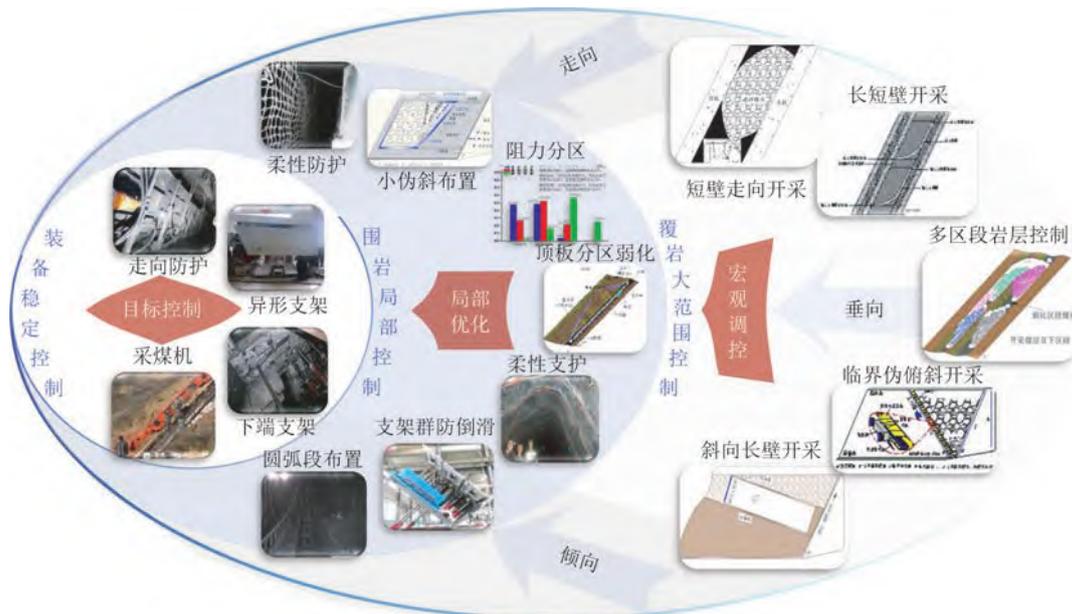


图 12 大倾角多维多尺度岩层控制体系

Fig.12 Strata control of mining steeply dipping coal seams in multi-dimensional and scale

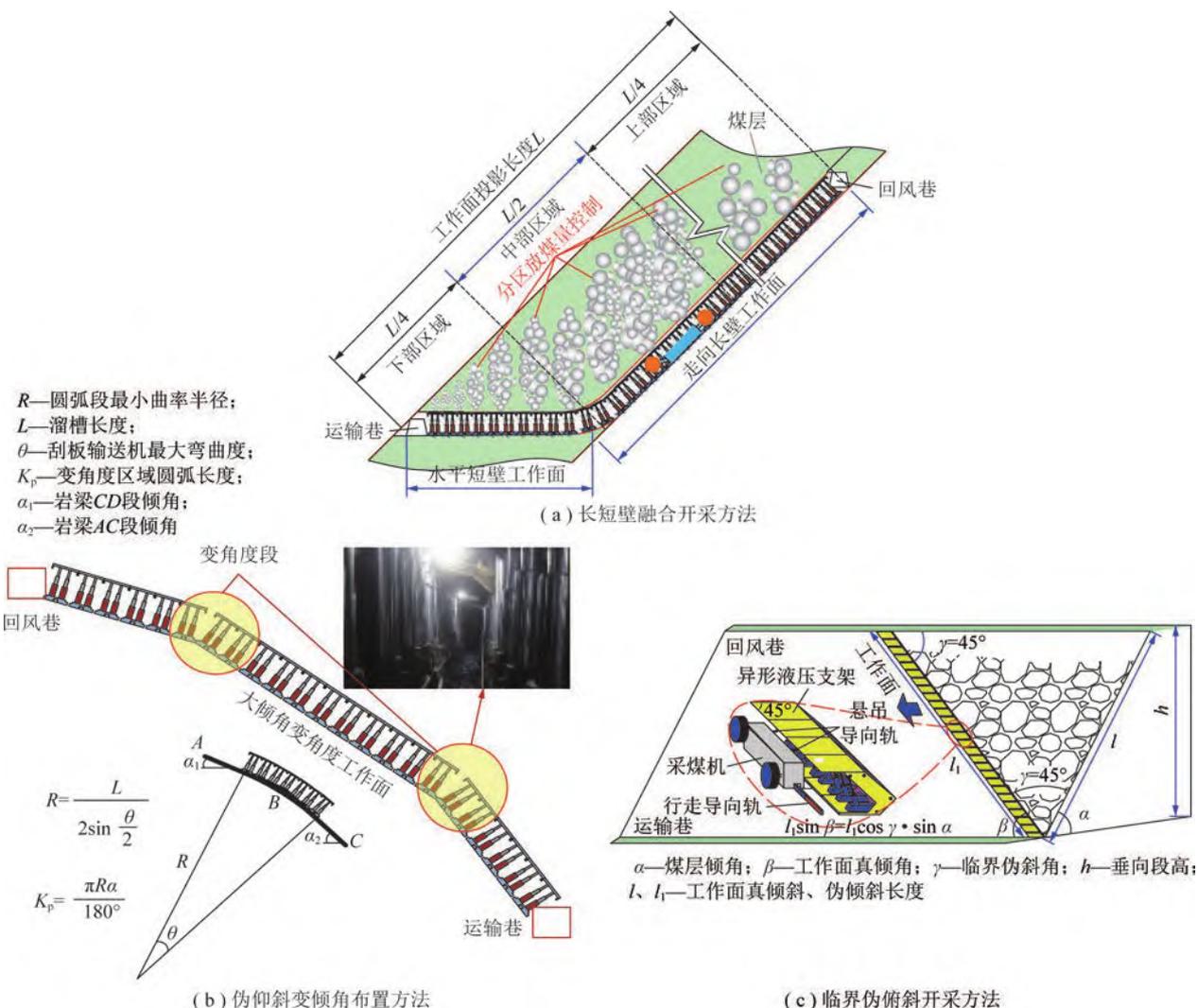


图 13 大范围岩层控制方法

Fig.13 Control methods for large-scale strata

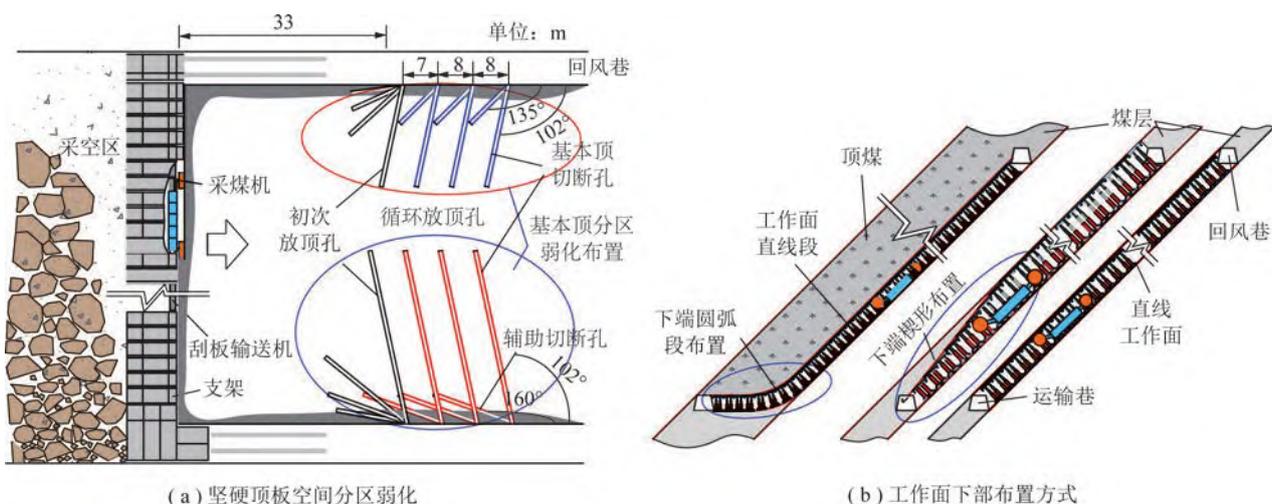


图 14 中尺度围岩协同控制技术

Fig.14 Cooperative control technologies for the mesoscale surrounding rock

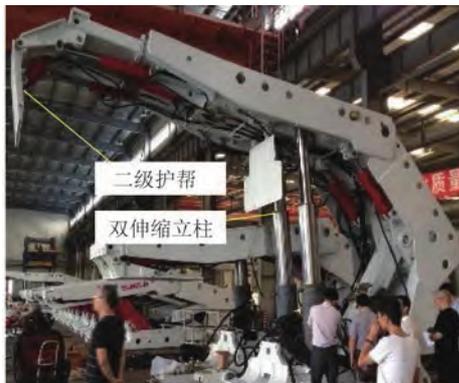
4.2 围岩与装备多维协同控制

基于“设计—实验—试用—反馈—优化”方法,

在采煤空间采场尺度和局部围岩控制的协同作用下,充分发挥工作面装备主动控制能力,确定了合理工作

阻力与比压、走向-倾向-垂向稳定协调能力、全方位空间防护性能的支架设计原则,多级制动强牵引、多维防护的采煤机设计原则,以及高强度连接、自防滑能力、大功率的输送机设计原则。

沿工作面垂向维度,针对新疆 2130 煤矿 25221 大采高工作面和绿水洞煤矿 3132 伪俯斜工作面,研发了防顶板冲击、支撑能力强、防陷底的大倾角煤层大采高液压支架(ZY7000/22/45Q)(图 15(a)),以及适应伪俯斜布置的平行四边形顶梁和错位立柱的异形液压支架(ZJ3600/15/36 D),完善了顶板-支架-底板系统协同控制技术体系,有效解决了工作面在垂向上装备过载失稳、底座陷底等稳定性控制难题。



(a) 强支护液压支架



(b) 立体式端头防护系统



(c) 大行程双侧底调装置

图 15 适应多维协同控制的装备和装置

Fig.15 Equipment and devices suitable for multi-dimensional surrounding rocks with coordinated control

沿工作面走向维度,研发了高煤壁多级护帮装置、抬底装置以及异形防矸石冲击顶梁及多维挡矸装置,形成了完整的走向煤壁-输送机-支架-矸石协同控制系统,解决了走向上煤壁片帮、支架与输送机钻底等装备稳定性控制难题(图 15(a),(b))。沿工作面倾向维度,设计了支架活动双侧调架梁和调架千斤顶、顶梁和掩护梁上设双侧活动侧护板(图 15(c)),增大了支架底座宽度(1.75 m),调整受载与约束状态,提高了液压支架的防倒、防滑可靠性;提高了刮板输送机连接结构件及与支架和采煤机连接件的强度,大幅降低了输送机下滑造成结构件及连接件破坏;采煤机设置了液压和机械两级防滑、防跑装置,更加可靠;形成了防装备下滑、防支架倾倒、防采煤机跑车的三机(支架-刮板输送机-采煤机)系统协同控制装备与技术,实现了架间、三机的协调稳定控制,解决了装备倾向稳定性控制系列难题。

5 结 论

(1) 重力-倾角效应是指在原岩应力场内采动引起的层状煤岩体物理力学性状和行为随地层倾角的变化而改变的现象。其是导致细观单元体主应力偏转和层间接触处应力非均衡传递,介观层状模型优势破裂面方向偏移和宏观层状关键层区域迁移、岩体结构异化等的主要影响因素。

(2) 重力-倾角效应具有显著的多尺度特点,其改变了煤岩组合界面间的非均衡传力特性、界面附近煤岩体内应力传递方向、裂隙发展的特征、煤体破坏形式;改变了围岩采动应力路径演变规律,采场空间不同区域顶板的应力环境与受载历程存在差异,顶板的损伤变形与破坏运动等力学性状与行为存在明显的区域性和时序性特征;使大倾角煤层采场顶板结构多发生区域跨层迁移转化、底板非对称破坏滑移、区段煤柱或煤壁夹持效应;导致采场关键岩块位置多变,存在多因素耦合引发围岩灾变倾向。

(3) 科学合理利用重力-倾角效应进行岩层控制,是实现大倾角煤层安全高效开采的关键,从不同尺度和维度岩层协同控制入手,以降维度、减尺度为目标,突破传统开采方法与技术瓶颈,研发颠覆性开采技术,改造或创新开采装备,可实现装备与围岩的协同控制。

参考文献 (References):

- [1] 中央经济工作会议在北京举行习近平李克强作重要讲话栗战书汪洋王沪宁赵乐际韩正出席会议[EB/OL]. http://www.news.cn/politics/leaders/2021-12/10/c_1128152219.htm, 2021-

- 12-10.
- [2] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 24-34.
WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, et al. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 24-34.
- [3] 鲜学福, 谭学术. 层状岩体破坏机理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- [4] 蔡美峰. 岩石力学与工程(第2版)[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 伍永平, 解盘石, 任世广. 大倾角煤层开采围岩空间非对称结构特征分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 182-184.
WU Yongping, XIE Panshi, REN Shiguang. Analysis of asymmetric structure around coal face of steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 182-184.
- [6] 解盘石, 伍永平, 王红伟, 等. 大倾角煤层长壁采场倾斜砌体结构与支架稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1275-1280.
XIE Panshi, WU Yongping, WANG Hongwei, et al. Stability analysis of incline masonry structure and support around long wall mining face area in steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1275-1280.
- [7] 王金安, 张基伟, 高小明, 等. 大倾角厚煤层长壁综放开采基本顶破断模式及演化过程(II)——周期破断[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1737-1745.
WANG Jin'an, ZHANG Jiwei, GAO Xiaoming, et al. Fracture mode and evolution of main roof stratum above fullymechanized top coal caving longwall coalface in steeply inclined thick coal seam (II): Periodic fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8): 1737-1745.
- [8] 屠洪盛, 屠世浩, 陈芳, 等. 基于薄板理论的急倾斜工作面顶板初次变形破断特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 49-54, 59.
TU Hongsheng, TU Shihao, CHEN Fang, et al. Study on the deformation and fracture feature of steep inclined coal seam roof based on the theory of thin plates [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 49-54, 59.
- [9] 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.
- [10] 王红伟, 伍永平, 解盘石, 等. 大倾角煤层开采覆岩应力场形成及演化特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(8): 1020-1024.
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Formation and evolution characteristics of rock stress field in steeply dipping seam mining [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2013, 32(8): 1020-1024.
- [11] 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[J]. 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.
- [12] WANG Hongwei, WU Yongping, LIU Maofu, et al. Roof-breaking mechanism and stress-evolution characteristics in partial back-fill mining of steeply inclined seams [J], Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2006-2035.
- [13] 王红伟, 伍永平, 曹沛沛, 等. 大倾角煤层开采大型三维可加载相似模拟实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1505-1511.
WANG Hongwei, WU Yongping, CAO Peipei, et al. Large scale loadable 3D-simulation tests on mining steeply dipping seam [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1505-1511.
- [14] 解盘石. 大倾角煤层长壁开采覆岩结构及其稳定性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
XIE Panshi. Response of overburden structure and its stability around the longwall mining face area in steeply dipping seam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [15] 解盘石, 伍永平, 罗生虎, 等. 大倾角大采高采场倾向梯阶结构演化及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 953-959.
XIE Panshi, WU Yongping, LUO Shenghu, et al. Structural evolution of ladder roof and its stability analyses for a fully-mechanized working face with a large mining height in steeply inclined coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(5): 953-959.
- [16] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统稳定性及动力学模型[J]. 煤炭学报, 2004, 29(5): 527-531.
WU Yongping. Dynamic model and stability of system “roof-support-floor” in steeply dipping seam mining [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(5): 527-531.
- [17] 袁永, 屠世浩, 窦凤金, 等. 大倾角综放面支架失稳机理及控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 430-434.
YUAN Yong, TU Shihao, DOU Fengjin, et al. Support instability mechanism of fully mechanized top coal caving face with steep coal seams and its control [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 430-434.
- [18] 黄志增, 任艳芳, 张会军. 大倾角松软特厚煤层综放开采关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1878-1882.
HUANG Zhizeng, REN Yanfang, ZHANG Huijun. Study on key technology of fully mechanized top coal caving in extra-thick soft coal seam with great dip angle [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1878-1882.
- [19] 章之燕. 大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 705-709.
ZHANG Zhiyan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 705-709.
- [20] 解盘石, 伍永平, 王红伟, 等. 大倾角煤层大采高综采围岩运移与支架相互作用规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 14-19.
XIE Panshi, WU Yongping, WANG Hongwei, et al. Interaction characteristics between strata movement and support system

- around large mining height fully-mechanized face in steeply inclined seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(1):14-19.
- [21] 伍永平,郎丁,解盘石.大倾角软煤综放工作面煤壁片帮机理及致灾机制[J].*煤炭学报*,2016,41(8):1878-1884.
WU Yongping, LANG Ding, XIE Panshi. Mechanism of disaster due to rib spalling at fully-mechanized top coal caving face in soft steeply dipping seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016,41(8):1878-1884.
- [22] 俞东风,刘志远,伍永平,等.三软煤层大倾角综放面倒架原因分析及扶架技术研究[J].*煤炭技术*,2014,33(5):31-33.
YUN Dongfeng, LIU Zhiyuan, WU Yongping, et al. Research on cause analysis of hydraulic powered support toppled down and rehabilitation technology in large inclination full mechanized coal caving face in three soft seam[J]. *Coal Technology*, 2014, 33(5):31-33.
- [23] 俞东风,谷斌,伍永平,等.大倾角煤层长壁综采支架典型应用实例及改进研究[J].*煤炭科学技术*,2017,45(1):60-67.
YUN Dongfeng, GU Bin, WU Yongping, et al. support applied to fully-mechanized longwall coal mining face in steep dipping seam [J]. *Coal Science and Technology*, 2017,45(1):60-67.
- [24] 伍永平,郎丁,王艺霖.大倾角软煤综放工作面“顶煤-支架”关系区化特征[J].*西安科技大学学报*,2017,37(3):312-318.
WU Yongping, LANG Ding, WANG Yilin. Regional interaction behavior of “top coal-support” on fully-mechanized caving face in soft steeply dipping seam[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2017,37(3):312-318.
- [25] 伍永平,郎丁,解盘石,等.大倾角软煤综放工作面倾斜方向顶煤区划破坏特征[J].*采矿与安全工程学报*,2018,35(3):553-560.
WU Yongping, LANG Ding, XIE Panshi, et al. Regional fracture of top-coal along the inclined direction of fully-mechanized caving face in soft steep dipping seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018,35(3):553-560.
- [26] 杨科,池小楼,刘帅.大倾角煤层综采工作面液压支架失稳机理与控制[J].*煤炭学报*,2018,43(7):1821-1828.
YANG Ke, CHI Xiaolou, LIU Shuai. Instability mechanism and control of hydraulic support in fully mechanized longwall mining with large dip[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018,43(7):1821-1828.
- [27] 杨科,池小楼,刘钦节,等.大倾角煤层综采工作面再生顶板与支架失稳机理[J].*煤炭学报*,2020,45(9):3045-3053.
YANGKe,CHI Xiaolou,LIU Qinjie, et al. Cataclastic regenerated roof and instability mechanism of support in fully mechanized mining face of steeply dipping seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020,45(9):3045-3053.
- [28] LANG Ding, WU Xiaobo, WU Yongping, et al. Boundary distribution of top-coal limit-equilibrium zone in fully mechanized caving in steeply dipping coal seams[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021,12(1):2561-2589.
- [29] 曾纪全,杨宗才.岩体抗剪强度参数的结构面倾角效应[J].*岩石力学与工程学报*,2004,23(20):3418-3425.
ZENG Jiquan, YANG Zongcai. Dip effect of structural plane on shearing strength parameters of rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004,23(20):3418-3425.
- [30] 王辉,李勇,曹树刚,等.基于巴西劈裂实验的层状页岩断裂特征试验研究[J].*采矿与安全工程学报*,2020,37(3):604-612.
WANG Hui, LI Yong, CAO Shugang, et al. Experimental study on fracture characteristics of layered shale under Brazilian splitting tests[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3):604-612.
- [31] 黄书岭,丁秀丽,邬爱清,等.层状岩体多节理本构模型与试验验证[J].*岩石力学与工程学报*,2012,31(8):1627-1635.
HUANG Shuling, DING Xiuli, WU Aiqing, et al. Study of multi-joint constitutive model of layered rockmass and experimental verification[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012,31(8):1627-1635.
- [32] 王伟,赵毅鑫,高艺瑞,等.层理和预制裂纹方向对煤断裂力学性质影响规律试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2022,41(3):433-445.
WANG Wei, ZHAO Yixin, GAO Yirui, et al. Experimental research of influences of bedding and pre-crack directions on fracture characteristics of coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022,41(3):433-445.
- [33] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014,47(4):1411-1478.
- [34] SAADAT M, TAHERI A. Modelling micro-cracking behaviour of pre-cracked granite using grain-based distinct element model[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(11):4669-4692.
- [35] 曹吉胜,戴前伟,周岩,等.考虑界面倾角及分形特性的组合煤岩体强度及破坏机制分析[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2018,49(1):175-182.
CAO Jisheng, DAI Qianwei, ZHOU Yan, et al. Failure mechanism and strength of coal-rock combination bodies considering dip angles and fractal characteristics of interface[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018,49(1):175-182.
- [36] 罗生虎,田程阳,伍永平,等.大倾角煤层长壁开采顶板受载与变形破坏倾角效应[J].*煤炭学报*,2021,50(6):1041-1050.
LUO Shenghu, TIAN Chengyang, WU Yongping, et al. Obliquity effect of asymmetric deformation and failure of roof in longwall mining of steeply inclined seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021,50(6):1041-1050.
- [37] 罗生虎,王同,田程阳,等.大倾角煤层长壁开采顶板应力传递路径倾角效应[J].*煤炭学报*,2022,47(2):623-633.
LUO Shenghu, WANG Tong, TIAN Chengyang, et al. Angle effect of the roof stress transmission path in longwall mining of steeply dipping coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2):623-633.
- [38] 王红伟,伍永平,解盘石,等.大倾角煤层开采“关键域”岩体结构稳定性分析[J].*采矿与安全工程学报*,2017,34(2):287-294.
WANG Hongwei, WU Yongping, XIE Panshi, et al. Analysis of rock structure stability in mining at the critical zone of the steeply dipping seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*,

- 2017,34(2):287-294.
- [39] 伍永平,黄甫靖宇,解盘石,等. 基于大范围岩层控制技术的大倾角煤层区段煤柱失稳机理[J]. 煤炭学报,2018,43(11):3062-3071.
WU Yongping, HUANGFU Jingyu, XIE Panshi, et al. Mechanism of instability of section coal pillar in steeply dipping seam based on large-scale strata control technology[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11):3062-3071.
- [40] 解盘石,张颖异,LUO Yi,等. 基于开采损害预计的大倾角多区段采场顶板运移规律实验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(6):1188-1195.
XIE Panshi, ZHANG Yingyi, LUO Yi, et al. Roof deformation of multi-section mining with steeply dipping coal seam based on mining damage prediction[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6):1188-1195.
- [41] 王红伟,焦建强,伍永平,等. 急倾斜厚煤层短壁综放采场承载结构泛化特征[J]. 煤炭科学技术,2021,49(11):56-64.
WANG Hongwei, JIAO Jiangang, WU Yongping, et al. Generalization characteristics of bearing structure in short wall fully-mechanized top-coal caving mining face of steeply inclined thick seam[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(11):56-64.
- [42] 伍永平,胡博胜,解盘石,等. 大倾角工作面飞矸冲击损害及其控制[J]. 煤炭学报,2018,43(10):2694-2702.
WU Yongping, HU Bosheng, XIE Panshi, et al. Impact damage of flying gangue in steeply dipping seams and its control[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10):2694-2702.
- [43] 刘明,伍永平,耿霜,等. 大倾角煤层开采飞矸威胁等级评估[J]. 煤炭学报,2020,45(11):3688-3695.
LIU Ming, WU Yongping, GENG Shuang, et al. Threat level assessment of flying gangue in steep coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11):3688-3695.
- [44] WU Yongping, HU Bosheng, LANG Ding, et al. Risk assessment approach for rockfall hazards in steeply dipping coal seams[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 138:1-17
- [45] HU Bosheng, WU Yongping, WANG Hongwei, et al. Risk mitigation for rockfall hazards in steeply dipping coal seam: A case study in Xinjiang, northwestern China[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2021, 12(1):988-1014.
- [46] 苗磊刚,牛园园,石必明. 煤-岩-煤组合体冲击荷载作用下力学特性研究[J]. 采矿与安全工程学报,2018,35(6):1217-1224.
MIAO Leigang, NIU Yuanyuan, SHI Biming. Study on mechanical properties of coal-rock-coal composites under impact loading[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6):1217-1224.
- [47] 张泽天,刘建锋,王璐,等. 组合方式对煤岩组合体力学特性和破坏特征影响的试验研究[J]. 煤炭学报,2012,37(10):1677-1681.
ZHANG Zetian, LIU Jianfeng, WANG Lu, et al. Effects of combination mode on mechanical properties and failure characteristics of the coal-rock combinations[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(10):1677-1681.
- [48] 左建平,陈岩,张俊文,等. 不同围压作用下煤-岩组合体破坏行为及强度特征[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2706-2713.
ZUO Jianping, CHEN Yan, ZHANG Junwen, et al. Failure behavior and strength characteristics of coal-rock combined body under different confining pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11):2706-2713.
- [49] 郭东明,左建平,张毅,等. 不同倾角组合煤岩体的强度与破坏机制研究[J]. 岩土力学,2011,32(5):1333-1339.
GUO Dongming, ZUO Jianping, ZHANG Yi, et al. Research on strength and failure mechanism of deep coal-rock combination bodies of different inclined angles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5):1333-1339.
- [50] 窦林名,田京城,陆菜平,等. 组合煤岩冲击破坏电磁辐射规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3541-3544.
DOU Linming, TIAN Jingcheng, LU Caiping, et al. Research on electromagnetic radiation rules of composed coal-rock burst failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19):3541-3544.
- [51] 宋录生,赵善坤,刘军,等. “顶板-煤层”结构体冲击倾向性演化规律及力学特性试验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(S1):23-30.
SONG Lusheng, ZHAO Shankun, LIU Jun, et al. Experimental research on rules of rock burst tendency evolution and mechanical properties of “roof-coal” structure body [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):23-30.