半煤岩下保护层覆岩运移规律与卸压效应

刘彦伟[1,2],杨二阳[1],韩红凯[1,2],石钊旗[1],左伟芹[1,2],李若男[1],张凤杰[1,2]
(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院,河南 焦作 454000;2. 河南省煤矿安全与职业危害防治国际联合实验室,河南 焦作 454003)

摘要: 探究厚硬关键层影响下半煤岩保护层不同采高采动卸压效应,对半煤岩保护层确定合理采高,以控制排矸量、保障卸压效果及实现高效生产等具有重要意义. 以金岭煤业172105半煤岩下保护层开采为例,通过物理相似模拟和FLAC^{3D}数值模拟,探明了半煤岩下保护层不同采高下关键层运移规律及对被保护层的卸压效应. 结果表明:采高为0.8 m时,层间关键层未发生破断,上覆岩层整体平稳弯曲下沉,被保护层卸压不充分;采高大于1.15 m时,层间关键层发生破断,裂隙带发育至二$_1$煤顶板砂岩关键层底部,被保护层卸压显著. 发现采高和厚硬灰岩关键层是金岭煤业半煤岩下保护层卸压效应的关键控制因素,构建了考虑采高和关键层影响的被保护层应力及膨胀变形量预测模型,明确了被保护层卸压程度与关键层和采高之间的定量关系. 发现层间灰岩关键层厚度为8.0 m,采高为1.15 m时膨胀变形量可达到3.0‰;采高提高至1.9 m时,灰岩关键层发生破断,被保护层应力降低了41.6%~70.2%,被保护层最大膨胀变形量增大至23.3‰,取得了显著的卸压效果. 研究结果指导了金岭煤业172105半煤岩保护层合理采高的确定和被保护层的高效卸压.

关键词: 半煤岩下保护层;采高;覆岩运移;关键层破断;卸压效应
中图分类号: TD 712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)01-0001-13

Movement patterns and pressure relief effects of overlying rock in the protection layer beneath semi-coal seams

LIU Yanwei[1,2], YANG Eryang[1], HAN Hongkai[1,2], SHI Zhaoqi[1], ZUO Weiqin[1,2], LI Ruonan[1], ZHANG Fengjie[1,2]
(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Coal Mine Safety and Occupational Hazards Prevention and Control, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: Investigating the destressing effects of different mining heights in lower protective layer of semi-coal rock under the influence of thick and hard key strata is of great significance for determining a reasonable mining height, controlling gangue discharge, ensuring effective pressure relief, and achieving efficient production. Taking the 172105 lower protective layer of semi-coal rock in Jinling Coal Mine as an example, both physical similarity simulation and FLAC^{3D} numerical model-

收稿日期: 2025-07-03 **修回日期:** 2025-10-18 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250253
基金项目: 国家自然科学基金项目(52174173);中国博士后科学基金项目(2025M771781);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(252102321097)
第一作者: 刘彦伟(1975—),男,河南省新郑市人,教授,博士生导师.
通信作者: 韩红凯(1991—),男,河南省辉县市人,副教授,硕士生导师. E-mail: hhk@hpu.edu.cn
引用格式: 刘彦伟,杨二阳,韩红凯,等.半煤岩下保护层覆岩运移规律与卸压效应[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):1-13.
LIU Yanwei, YANG Eryang, HAN Hongkai, et al. Movement patterns and pressure relief effects of overlying rock in the protection layer beneath semi-coal seams[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 1-13.

ing were employed to reveal the fracture and movement patterns of key strata at varying mining heights, as well as their destressing effects on the protected seam. The results indicate that when the mining height is 0.8 m, the interlayer key stratum does not fracture; the overlying strata bend and subside smoothly as a whole, and the protected seam experiences insufficient destressing. When the mining height exceeds 1.15 m, the interlayer key stratum fractures, with the fracture zone developing upward to the bottom of the key sandstone stratum above seam No. 2_{-1}, resulting in significant destressing of the protected seam. It is found that when the thickness of the interlayer limestone key stratum is 8.0 m and the mining height is 1.15 m, the swelling deformation reaches 3.0‰; when the mining height increases to 1.9 m, the limestone key stratum fractures, the stress in the protected seam is reduced by 41.6%—70.2%, and the maximum swelling deformation of the protected seam increases to 23.3‰, achieving a significant pressure-relief effect. These results guide the determination of a reasonable mining height for the half-coal-half-rock protective seam at working face 172105 of Jinling Coal Mine and ensure efficient pressure relief of the protected seam.

Key words: lower protective layer of semi-coal rock; mining height; overburden migration; the fracture of key strata; pressure relief effect

煤与瓦斯突出是威胁煤矿安全高效开采的主要灾害之一[1-4]. 长期的研究和实践表明,开采保护层是防治煤与瓦斯突出、冲击地压等动力灾害的有效手段[5-6],但单一主采突出煤层开采条件下,无常规煤层保护层可采,可选择不可采或局部可采的薄煤层、岩石作为保护层,如《河南省煤矿瓦斯防治管理办法》(矿安豫联〔2023〕1号)[7]要求:“不具备开采保护层条件的,可以把井田范围内未列入开采范围的不可采薄煤层或软岩作为保护层进行开采”. 薄煤层或岩石保护层采高偏小,会制约保护层开采效率,典型厚硬关键层影响下还会造成采动裂隙发育程度低、被保护层卸压不充分等问题. 增大保护层采高可破解上述问题,但会引起排矸量大、能耗高、煤质差、洗选成本高等问题. 因此,研究半煤岩下保护层覆岩运移规律与卸压效应,对半煤岩或岩石保护层合理采高确定,实现瓦斯高效治理具有重要意义.

保护层开采的卸压效应受到多种地质采矿因素的影响,如保护层采高、层间岩层赋存条件等[8-10]. 文献[11-12]通过理论分析和现场试验发现极薄保护层开采后顶板岩层垮落规律与常规采高开采存在明显不同. 文献[13]通过观察不同采高煤层引起的塑性区变化,发现采高对煤层底板的变形程度和破坏深度影响较小. 文献[14]根据实测采场上覆岩层移动曲线,提出了在不同采高下工作面采动后可能形成顶板的切落和台阶下沉. 文献[15-16]指出,垮落带和裂隙带高度受采高和关键层结构共同控制,并在关键层作用下随采高台阶式增加,而非连续近线性变化. 文献[17-18]发现随着上覆亚关键层的破断,离层空间向上发育,呈现台阶式发育过程,对于走向倾斜式煤层开采,覆岩变形整体呈现“非对称性汤匙状”. 可见,采高和关键层结构对煤岩层卸压效应有控制性作用,但二者如何协同控制卸压效应还未厘清.

《防治煤与瓦斯突出细则》[19]指出被保护层的理论保护范围可根据卸压角确定,但未给出与采高、关键层赋存特征等因素的定量关系确定方法. 部分研究还发现下保护层开采的卸压效果主要受保护层采高和煤层层间距控制,同时提出了考虑保护层采高与层间硬岩含量系数的当量相对层间距[20-21],为卸压瓦斯抽采设计提供了指导,但其模型未结合关键层的运移规律. 文献[22-23]研究发现若层间存在巨厚关键层,会显著削弱被保护层的卸压效果,其卸压范围也会受到影响. 文献[24-25]指出覆岩应力的变化程度主要取决于关键层的破断运动,提出了基于关键层运移及承载结构特征的采动应力场演化预测模型. 文献[26-28]研究明确了保护层采高对卸压效果的影响规律,发现被保护煤层膨胀变形率随保护层采高增加呈线性增加趋势,确定了能达到实际卸压效果的最小采高. 文献[29]发现薄煤层保护层开采过程中,被保护煤层的应力和膨胀变形呈现先增大后趋于稳定的变化规律. 上述成果阐述了保护层保护效果与采高、层间距、硬岩含量等因素的关系,但目前对于半煤岩下保护层开采,尚未建立采高与关键层破断运动协同作用下对被保护层卸压效应预测模型,造成估算的卸压保护效果与现场实际偏差较大,难以确定合理采高.

为此，本文以金岭煤业172105半煤岩下保护层开采为工程背景，开展厚硬关键层影响下半煤岩下保护层不同采高采动卸压效应的相似模拟及数值模拟试验研究，构建关键层和采高协同作用下半煤岩下保护层开采卸压效应预测模型，拟查明半煤岩下保护层开采层间关键层破断运动特征、应力和变形等卸压规律，指导金岭煤业半煤岩下保护层开采合理采高的确定与卸压瓦斯的高效抽采.

1　典型采高半煤岩下保护层采动卸压效应物理相似模拟试验

1.1　工程背景

河南省金岭煤业主采的$二_1$煤层为突出煤层，煤层厚度为0.18～15.90 m，平均厚度为4.5 m，实测煤层最大原始瓦斯含量为14.16 m^3/t，最大原始瓦斯压力为1.18 MPa，透气性系数为0.001 5～0.002 0 $m^2/(MPa^2·d)$，防突难度大. $一_7$煤层厚度为0～0.88 m，平均厚度为0.55 m，属于薄煤层，无突出危险性，$一_7$煤层保护层直接顶板为L_7灰岩，厚度为4.8～8.0 m，上距$二_1$煤层约20.0 m，煤岩层柱状图及关键层判识结果如图1所示.

矿井前期选择$一_7$煤层层位作为$二_1$煤层的下保护层开采，采高约0.8 m，采用炮采严重制约了保护层开采效率；172105工作面$一_7$煤层保护层直接顶板为坚硬L_7灰岩关键层，厚度大，达到8.0 m，导致采动裂隙发育程度低、被保护层卸压不充分，造成$二_1$煤层卸压瓦斯抽采效率偏低. 为了提高保护层开采效率和卸压保护效果，亟需考虑层间关键层破断运动特征，查明半煤岩下保护层不同采高采动卸压效应，以优化$一_7$煤层下保护层开采设计.

1.2　试验方案

按照区域地质条件和工作面柱状图，开展了2个典型采高0.8 m（原采高）和1.9 m（拟采用）半煤岩下保护层采动卸压效应的二维物理相似模拟对比试验. 以实体尺寸为基本依据，采高0.8 m物理相似模拟模型铺装尺寸为4.0 m×0.3 m×1.9 m（长×宽×高），工作面回采长度设置为100 cm，从右至左依次开采. 采高1.9 m物理相似模拟模型铺装尺寸为2.0 m×0.2 m×1.6 m（长×宽×高），工作面回采长度设置为160 cm，从左至右依次开采. 2个典型采高模型均采用单次回采5 cm. 在采高0.8 m和1.9 m模型顶部加载模拟埋深对应的荷载，按照应力相似比计算加载的应力约为0.1 MPa，设定几何相似比为1∶100，容重相似比为1∶1.5，时间相似比为1∶10.

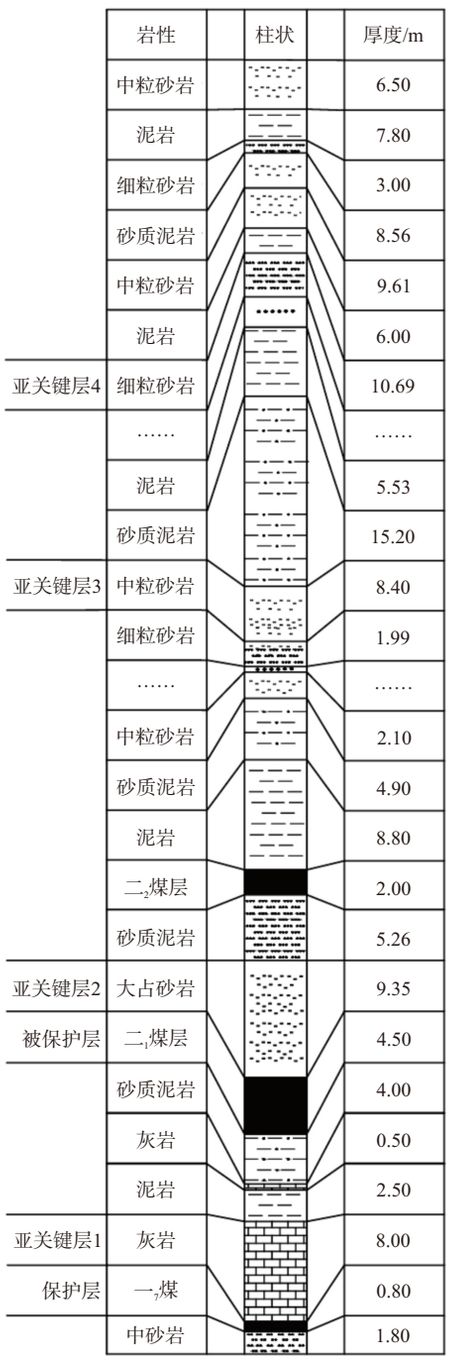


图1　金岭煤业172105工作面钻孔局部柱状图

Fig. 1　Borehole columnar section of working face 172105, Jinling Coal Mine

为简化试验，暂不考虑地层倾角对卸压效果的影响，模拟试验的部分材料配比见表1. 为监测下保护层开采覆岩卸压变形情况，在保护层、被保护层及多个岩层处布置应力传感器及位移测点，测点行列间距均为15 cm，模型铺设及测点布置如图2～图3所示.

表 1 部分煤岩层相似材料配比

Table 1 Coal rock similar material ratio

序号	岩性	层厚/m	配比号	m(沙子)/kg	m(碳酸钙)/kg	m(石膏)/kg	m(水)/kg
1	中粒砂岩	2.10	355	33.40	5.60	5.60	4.50
2	二$_2$煤	2.00	573	19.20	2.70	1.20	2.30
3	大占砂岩	9.35	437	158.60	11.90	27.80	19.80
4	二$_1$煤	4.50	573	43.20	6.00	2.60	5.20
5	细粒砂岩	5.00	437	82.20	6.20	14.40	10.30
6	砂质泥岩	4.00	555	70.40	7.00	7.00	8.40
7	泥岩	2.50	755	50.10	3.60	3.60	5.70
8	石灰岩	8.00	355	127.20	21.20	21.20	17.00
9	半煤岩保护层	0.80/1.90	573	7.68/18.24	1.07/2.55	0.46/1.10	0.93/2.20

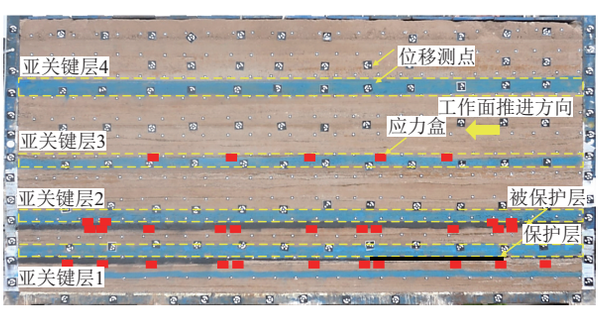


图 2 0.8 m 模型铺设及测点布置

Fig. 2 0.8 m model laying and measuring point layout

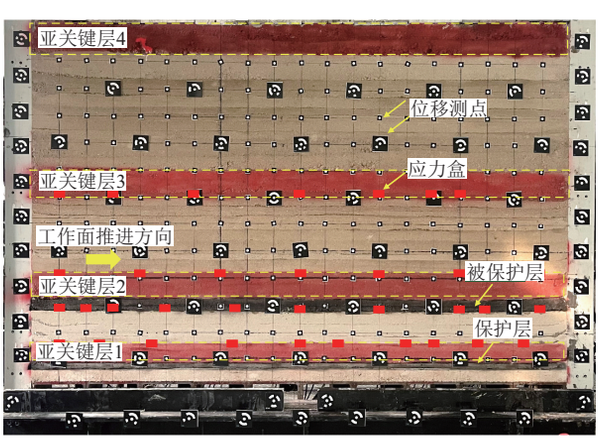


图 3 1.9 m 模型铺设及测点布置

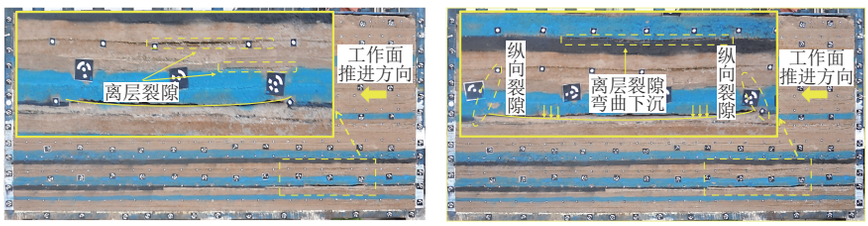
Fig. 3 1.9 m model laying and measuring point layout

1.3 试验结果及讨论

1.3.1 覆岩运移规律及承载结构演化特征

采高为 0.8 m 和 1.9 m 时覆岩运移情况分别如图 4 和图 5 所示. 由图 4a 可知,采高为 0.8 m 条件下,工作面推进至 65 m 时,覆岩在采动作用下产生离层裂隙,同时整体弯曲下沉,层间灰岩关键层(亚关键层 1)未破断,未见纵向裂隙;工作面推进至 100 m 时,离层裂隙最高发育至距一$_7$煤上方二$_1$煤层顶板大占砂岩底部(亚关键层 2),采空区上覆岩层整体持续弯曲下沉,但未发生垮落、破断,如图 4b 所示. 层间关键层在覆岩自重作用下逐渐下沉接触底板,形成“连续介质梁”承载结构,采动裂隙发育程度低,二$_1$煤卸压不充分.

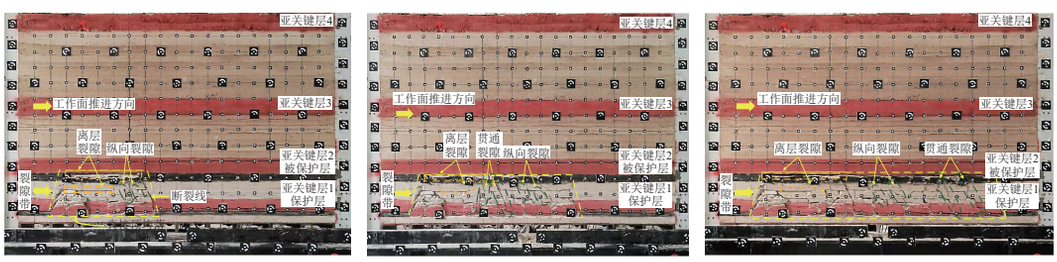
采高为 1.9 m 条件下,由图 5a 可知,工作面推进至 65 m 时,上覆岩层发生周期性破断运移,裂隙发育至二$_1$煤层顶部,裂隙发育高度为 24.5 cm. 采空区中部压实,二$_1$煤层上方亚关键层 2 底部离层裂隙长度进一步扩大,长度约为 48 cm. 岩层破断角约为 55°,破坏区域整体呈梯形状. 当工作面推进 115 m 时,“三带”沿工作面推进方向进一步扩展,如图 5b 所示,由于亚关键层 2 的控制作用,竖向裂隙未继续向上发育,裂隙最大发育高度维持在 24.5 cm,二$_1$煤层顶部离层裂隙长度进一步增大,长度约 64 cm,间隙约 1.4 cm. 随着工作面的不断向前推进,覆岩不断垮落,周期为 15~20 cm,当一$_7$煤层工作面推进 160 m 时,基本顶累计垮落次数为 9 次,“三带”沿工作面推进方向不断向前扩展,如图 5c 所示,由于亚关键层 2 的控制作用,竖向裂隙未继续向上发育,二$_1$煤层顶部离层裂隙由于亚关键层 2 的弯曲下沉,长度和间隙相较于开采 115 m 时减小,呈现两侧高,中间压实基本无裂隙的分布趋势,两侧离层裂隙长度约为 50~55 cm,间隙约为 0.3~0.8 cm. 随着保护层开采,顶板岩层发生周期性破断,大量竖向裂隙发育至大占砂岩关键层底部,二$_1$煤层产生大量竖向贯通裂隙,裂隙发育最大高度不再随回采发生变化;二$_1$煤层与顶板大占砂岩间产生大量离层裂隙,离层裂隙随回采沿大占砂岩关键层底界逐步扩展和迁移,为二$_1$煤卸压瓦斯抽采提供良好的卸压环境.



（a）工作面推进65 m　　（b）工作面推进100 m

图4　采高0.8 m时覆岩运移物理模拟结果

Fig. 4　Physical simulation results for overburden fracturing and migration at the mining height of 0.8 m



（a）工作面推进65 m　　（b）工作面推进115 m　　（c）工作面推进160 m

图5　采高1.9 m时覆岩运移物理模拟结果

Fig. 5　Physical simulation results for overburden fracturing and migration at the mining height of 1.9 m

1.3.2　被保护层应力分布规律

通过预埋在物理模型中的应力盒，监测分析工作面推进过程中覆岩应力演化规律，被保护层应力变化情况如图6所示．保护层工作面回采期间，采高0.8 m时，被保护层应力降低了17%，卸压不充分．采高1.9 m时，被保护层应力降低了44%，卸压保护区内被保护层应力系数平均约为0.65，远小于原岩应力，卸压程度为56%～72%左右，卸压程度明显优于采高0.8 m条件，整体卸压效果显著．

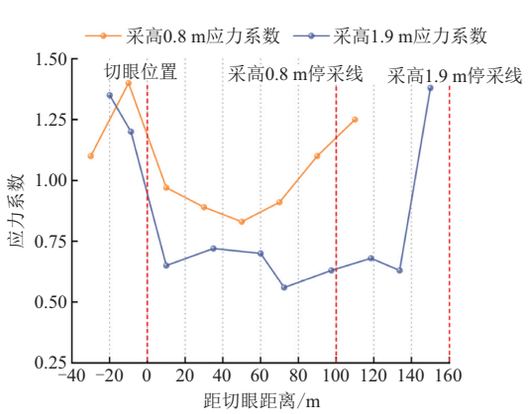


图6　工作面回采结束后被保护层应力分布规律

Fig. 6　The stress distribution law of the protected layer after mining

1.3.3　被保护层膨胀变形量分布规律

保护层开采结束后，覆岩垮落达到稳定状态，通过预留在物理模型上的位移测点对其位移变形进行监测，将被保护层产生的相对位移转化膨胀变形量进行定量分析，膨胀变形量与相对位移的关系如式(1)所示．

$$\xi=\frac{d_{\mathrm{r}}-d_{\mathrm{b}}}{H_{\mathrm{m}}}\times 1000, \tag{1}$$

式中：ξ为被保护层膨胀变形量，‰；d_{r}为被保护层顶板的位移量，m；d_{b}为被保护层底板的位移量，m；H_{m}为被保护层厚度，m．

根据试验监测数据，结合式(1)计算被保护层的膨胀变形量如图7所示．依据《防治煤与瓦斯突出细则》[19]，取卸压角60°划定理论保护范围，卸压保护范围内采高为0.8 m时，膨胀变形量为0.8‰～4.2‰，被保护层卸压不充分．卸压保护范围内采高1.9 m时，被保护层的膨胀变形量为7.5‰～26.1‰，均大于3‰．被保护层卸压效果显著．

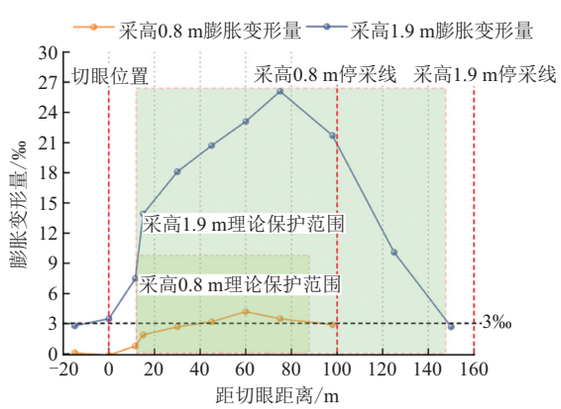


图7　被保护层膨胀变形量

Fig. 7　Expansion deformation of protected layer

2 不同采高下层间关键层破断和塑性区发育情况

物理相似模拟结果表明，层间关键层在0.8 m采高时未发生破断，采高1.9 m时发生了破断，2种情况的卸压效应差异显著，但采高差异较大，无法确定关键层发生破断的临界采高．为此，采用FLAC^{3D}三维数值模拟软件，研究保护层开采引起的塑性区发育情况，明确采高变化对层间关键层破断的影响．

2.1 模型建立

基于金岭煤业172105保护层工作面采动地质条件建立了数值模型，尺寸为300.0 m×210.0 m×187.5 m（长×宽×高），如图8所示．为消除沿边界效应，工作面走向、倾向左右两侧各留50 m和30 m煤柱，左右边界固定x方向位移；前后边界固定y方向位移；底部边界固定z方向位移；上边界为自由边界，未模拟的岩层转化为均匀载荷，在模型顶部加载应力为16.05 MPa，模型边界载荷施加及开采方式如图9所示．模型中煤岩本构关系采用莫尔-库伦准则，接触面的本构模型选为库伦滑移模型．根据金岭煤业煤岩物理力学参数，模型物理力学参数见表2．为研究不同采高层间关键层破断情况和塑性区发育情况，设计5种采高，即保护层采高分别为0.8，1.15，1.5，1.9，2.3 m，回采长度均为200 m．

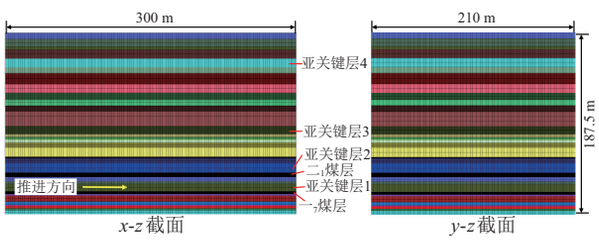


图8 FLAC^{3D}三维数值模型

Fig. 8 FLAC^{3D} three-dimensional numerical model

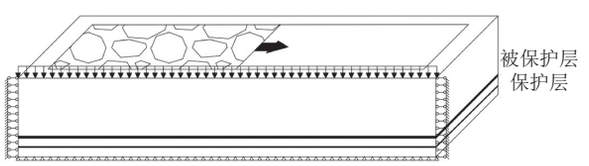


图9 计算模型示意

Fig. 9 Calculation model diagram

表2 煤岩体力学参数

Table 2 Mechanical parameters of coal rock mass

岩性	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
中砂岩	2 600	7.5	4.9	8.9	42	5.8
细砂岩	2 650	6.4	3.6	4.9	40	4.6
砂质泥岩	2 400	3.9	2.1	4.5	40	2.6
泥岩	2 400	3.3	1.8	3.7	34	1.5
石灰岩	2 600	9.8	8.6	10.4	45	7.8
二$_1$煤	1 410	1.5	0.9	2.1	30	1.1
一$_7$煤	1 410	1.5	0.9	2.1	30	1.1

2.2 模拟结果分析

保护层工作面在不同采高下的关键层破断情况和塑性区发育高度如图10所示，塑性区整体形状较为对称．由图10a可知，采高0.8 m时，由于采高较小，且层间灰岩关键层未破断，上覆岩层未发生塑性破坏，仍保持原本结构状态，底板在采动影响下产生的破坏较小，可知关键层对覆岩运移有控制作用．

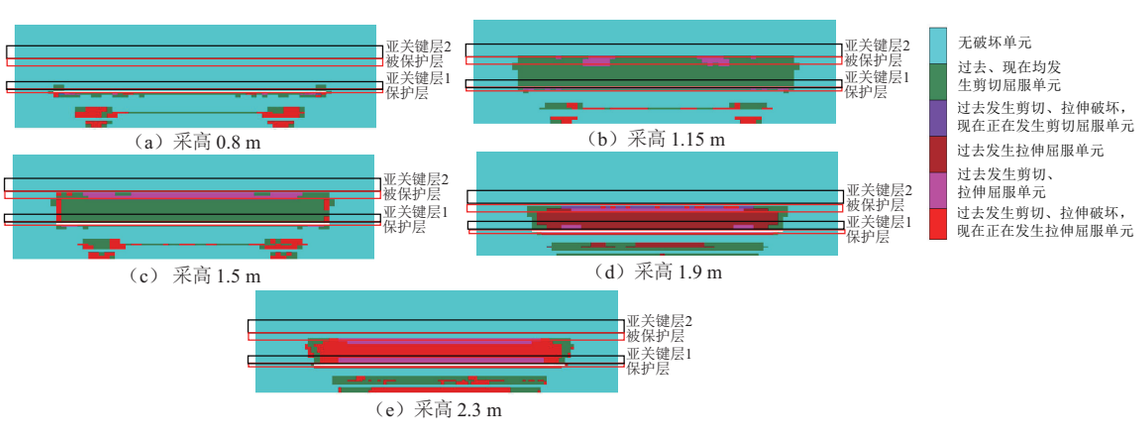


图10 不同采高下关键层破断和塑性区发育情况

Fig. 10 Development of key stratum fracture and plastic zones under different mining heights

由图 10b～10e 可知，采高为 1.15，1.5，1.9，2.3 m 时，采动影响扩大，采空区顶底板煤岩体产生塑性破坏，一$_7$煤层上方石灰岩关键层发生破断垮落，塑性区高度均发育至二$_1$煤层顶板砂岩关键层底部后趋于稳定，二$_1$煤层内部出现较多塑形破坏；同时一$_7$煤层底板破坏程度进一步加深扩大，塑性破坏区逐渐呈现上边长、下边短的“倒台阶”分布．随着采高增大，拉伸破坏区域逐步增加，上覆岩层离层现象更加明显，塑性区范围随回采横向扩展．采高处于 1.15～2.3 m 时，由于层间关键层破断而亚关键层 2 未破断，塑性区发育高度未发生明显变化，水平方向塑性区范围显著增大．

3　关键层影响下半煤岩下保护层不同采高卸压效应的理论模型构建

3.1　半煤岩下保护层开采卸压效应预测方程

本文前期考虑采高、采场形状与尺寸以及覆岩不同层位关键层破断运动特征等因素，将弯曲下沉带不同层位关键层简化为多层叠合无限长弹性地基板，实体煤侧裂隙带不同层位关键层简化为多层叠合半无限长弹性地基板，采空区侧裂隙带不同层位破断关键层简化为多层叠合“砌体梁”，建立了基于采动覆岩关键层“板-梁”结构的应力场演化预测模型[25]，如图 11 所示．采动覆岩实体煤侧不同层位关键层和采空区侧弯曲下沉带不同层位未破断关键层的采动应力分布方程见式(2)，采空区侧不同层位破断关键层下的采动应力分布方程见式(3)，相关参数含义见文献[25]．

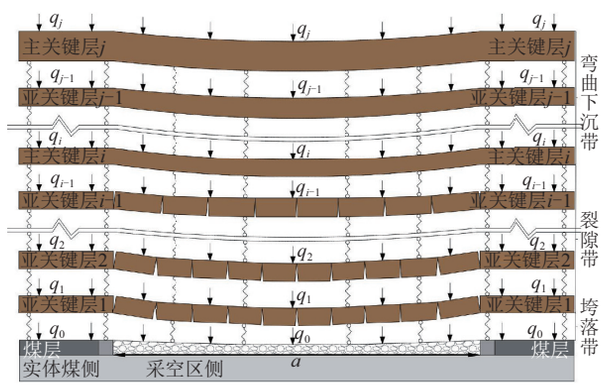


图 11　采动覆岩承载结构简化模型

Fig. 11　Simplified model of the bearing structure of overlying strata in mining-induced activities

$$\begin{cases}\sigma_1(x,y)=k_1w_1(x,y)+q_1+\cdots+q_j,\\ \sigma_2(x,y)=k_2[w_2(x,y)-w_1(x,y)]+q_2+\cdots+q_j,\\ \cdots\\ \sigma_{i-1}(x,y)=k_{i-1}[w_{i-1}(x,y)-w_{i-2}(x,y)]+q_{i-1}+\cdots+q_j,\\ \sigma_i(x,y)=k_i[w_i(x,y)-w_{i-1}(x,y)]+q_i+\cdots+q_j,\\ \cdots\\ \sigma_{j-1}(x,y)=k_{j-1}[w_{j-1}(x,y)-w_{j-2}(x,y)]+q_{j-1}+q_j,\\ \sigma_j(x,y)=k_j[w_j(x,y)-w_{j-1}(x,y)]+q_j.\end{cases}\quad (x,y)\in\Omega_1 \tag{2}$$

$$\begin{cases}\sigma_{n1}(x,y)=\begin{cases}\dfrac{q_1}{l_1}\min(x,y)+\sigma_{n2}(x,y)\ (0<\min(x,y)\leqslant l_1),\\ q_1+\sigma_{n2}(x,y)\quad \begin{pmatrix}l_1<x<a/2\\ l_1<y<b/2\end{pmatrix},\end{cases}\\ \cdots\\ \sigma_{ni-1}(x,y)=\begin{cases}\dfrac{q_{i-1}}{l_{i-1}}\min(x,y)+\sigma_{ni}(x,y)\quad \left(0<\min(x,y)\leqslant l_{i-1}\right),\\ q_{i-1}+\sigma_{ni}(x,y)\quad \begin{pmatrix}l_{i-1}<x<a/2\\ l_{i-1}<y<b/2\end{pmatrix},\end{cases}\\ \sigma_{ni}(x,y)=k_{ni}w_{ni}(x,y),\\ \sigma_{ni+1}(x,y)=k_{i+1}[w_{ni+1}(x,y)-w_{ni}(x,y)]+q_{i+1}+\cdots+q_j,\\ \cdots\\ \sigma_{nj-1}(x,y)=k_{j-1}[w_{nj-1}(x,y)-w_{nj-2}(x,y)]+q_{j-1}+q_j,\\ \sigma_{nj}(x,y)=k_j[w_{nj}(x,y)-w_{nj-1}(x,y)]+q_j,\end{cases}\quad (x,y)\in\Omega_2 \tag{3}$$

式中：$\sigma_1(x,y)$，$\sigma_2(x,y)$，…，$\sigma_j(x,y)$分别为实体煤侧不同层位关键层下的采动应力分布，MPa；k_1，k_2，…，k_j分别为不同层位关键层的地基系数，N/m^3；$w_1(x,y)$，$w_2(x,y)$，…，$w_j(x,y)$分别为实体

煤侧不同层位关键层挠度,m;$q_1,q_2,\cdots,q_j$分别为不同层位关键层的载荷,MPa;$\sigma_{n1}(x,y),\sigma_{n2}(x,y),\cdots,\sigma_{nj}(x,y)$分别为采空区侧裂隙带不同层位破断关键层下的采动应力分布,MPa;a为采空区长度,m;b为采空区宽度,m;l_1为关键层一破断块体长度,m;l_{i-1}为裂隙带不同层位关键层破断块体的长度,m;$\min(x,y)$为采空区任意一点距采空区边界的最小距离,m;$k_{ni},k_{i+1},\cdots,k_j$分别为采空区侧亚关键层的基地系数,N/m^3;$w_{ni}(x,y),w_{ni+1}(x,y),\cdots,w_{nj}(x,y)$分别为采空区侧弯曲下沉带不同层位关键层的挠度;$\Omega_1$为实体煤侧区域;$\Omega_2$为采空区侧区域.

在此基础上,提出了基于采动覆岩关键层"板-梁"结构的半煤岩下保护层开采被保护层应力和变形预测方程.假设被保护层处于关键层m和关键层$m+1$之间,则被保护层的应力分布方程和膨胀变形量方程分别为式(4)和式(5).

$$\sigma_b(x,y)=\sigma_{m+1}(x,y)+q_b, \tag{4}$$

$$B(x,y)=\frac{\sigma_0(x,y)-\sigma_b(x,y)}{K_b\times h_b}\times 1\,000, \tag{5}$$

式中:$\sigma_b(x,y)$为被保护层的应力分布,MPa;$\sigma_{m+1}(x,y)$为关键层$m+1$下的应力分布,MPa;q_b为被保护层至关键层$m+1$岩层的载荷,MPa;$B(x,y)$为被保护层膨胀变形量,‰;σ_0为被保护层的原岩应力;K_b为变形系数;h_b为被保护层的厚度.

3.2 关键层影响下半煤岩下保护层开采被保护层应力和变形分布规律

根据第1节、第2节研究结果和关键层理论[30],随着半煤岩下保护层采高变化,关键层破断情况会随之改变,当下保护层采高为0.8 m时,层间灰岩关键层(亚关键层1)未发生破断,即上覆岩层均处于弯曲下沉带中,则将关键层简化为多层叠合无限长弹性地基板;采高为1.15,1.5,1.9,2.3 m时,层间关键层(亚关键层1)发生破断,二$_1$煤层顶板大占砂岩(亚关键层2)未发生破断,则将层间关键层采空区侧简化为"砌体梁",实体煤侧简化为半无限长弹性地基板,其余关键层简化为多层叠合无限长弹性地基板进行计算.结合金岭煤业采动地质条件,地层共存在5层关键层,见表3.根据所建立的关键层影响下半煤岩下保护层卸压效应预测方程,预测了采高分别为0.8,1.15,1.5,1.9,2.3 m时,被保护层应力和变形规律,计算参数见表4和表5.

表3 覆岩关键层分布

Table 3 Distribution of key strata of overlying strata

编号	层厚/m	岩性	关键层位置	"三带"分布				
				采高0.8 m	采高1.15 m	采高1.5 m	采高1.9 m	采高2.3 m
1	46.00	中砂岩	主关键层5		弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带
2	10.69	中砂岩	亚关键层4		弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带
3	8.40	中砂岩	亚关键层3	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带
4	9.35	大占砂岩	亚关键层2		弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带	弯曲下沉带
5	8.00	石灰岩	亚关键层1		裂隙带	裂隙带	裂隙带	裂隙带

表4 覆岩关键层计算参数

Table 4 Calculation parameters of key strata of overburden rock

关键层位置	弹性地基系数/(MN·m^{-3})	厚度/m	弹性模量/GPa	载荷/MPa
主关键层5	35.70	46.00	10.18	4.15
亚关键层4	41.20	10.69	10.18	7.57
亚关键层3	71.30	8.40	10.18	2.28
亚关键层2	21.08	9.35	76.41	3.57
亚关键层1	32.44	8.00	79.80	0.54

表5 其他计算参数

Table 5 Other calculation parameters of Jinling Coal Mine

σ_0/MPa	K_b/(MN·m^{-3})	a/m	b/m	l_1/m	h_b/m
17.8	0.18	680	150	18.8	4.5

3.3 采高对半煤岩下保护层开采卸压效应的影响

不同半煤岩下保护层采高下被保护应力分布如图12所示,采高增大,被保护层卸压程度及影响范围随之不断增大.采高分别为0.8,1.15,1.5,

1.9，2.3 m 时，应力分别为 10.9～15.3，10.6～14.3，6.1～11.7，5.3～10.4，4.1～9.0 MPa，降低了约 14.0%～38.8%，20.0%～40.0%，34.3%～65.7%，41.6%～70.2% 和 49.4%～77.0%，卸压愈发充分．半煤岩下保护层采高大于 1.15 m 时，被保护层应力得到有效释放，加之其处于裂隙带中，随着采高增大，卸压效果逐渐理想；保护层工作面采高为 0.8 m 时，被保护层处于弯曲下沉带，未被裂隙贯通，被保护层的卸压程度明显降低．

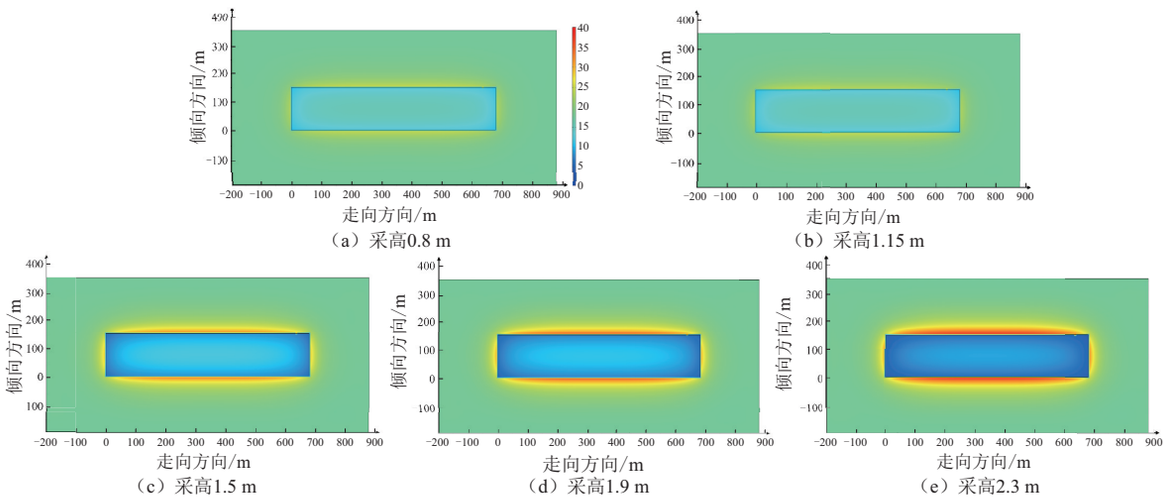


图 12　不同采高时被保护应力分布

Fig. 12　Distribution of protected stress at different mining heights

不同采高时被保护层膨胀变形量如图 13 所示，采高分别为 1.5，1.9，2.3 m 时，保护范围内被保护层最大膨胀变形量分别为 15.1‰，23.8‰，25.0‰，远大于 3.0‰；而采高为 0.8 m 时，被保护层部分区域膨胀变形量未超过 3.0‰．经计算得出，采高为 1.15 m，被保护层膨胀变形量均大于 3.0‰．

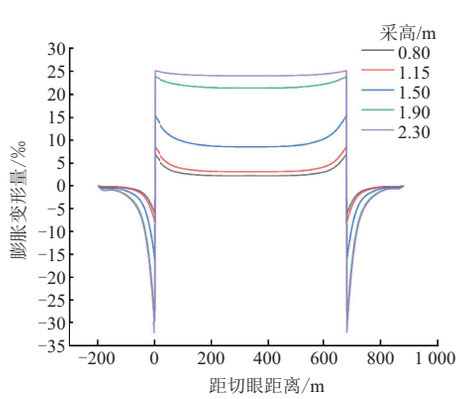


图 13　不同采高时被保护层膨胀变形量

Fig. 13　Expansion rate of protected layer at different mining heights

4　现场验证与应用

4.1　金岭煤业半煤岩下保护层开采合理采高确定

根据前述研究成果，对于 172105 工作面，若下保护层采高为 0.8 m，由于采高偏小，加之基本顶为厚硬灰岩关键层，厚度达到 8.0 m，顶板上方第 1 层灰岩关键层不会破断，呈整体稳定下沉特征，无纵向裂隙产生，存在部分离层裂隙，被保护层卸压效果一般．采高大于 1.15 m 时，顶板灰岩关键层发生破断，出现纵向裂隙，最高发育至二$_1$煤顶板砂岩关键层底部．

但理论预测表明，采高为 1.15 m 被保护层膨胀变形量均大于 3.0‰，达到《防治煤与瓦斯突出细则》[19]要求的临界值．采高提高至 1.9 m 时，灰岩关键层发生破断，被保护层应力降低了 41.6%～70.2%，被保护层最大膨胀变形量增大至 23.8‰，卸压效果更为显著．同时鉴于一$_7$煤层顶板为厚硬灰岩、底板为中粒砂岩，岩石坚固性系数 f 值平均可达到 9，表明顶底板岩石极其坚固，要求配备重型采煤机（尺寸相对较大）以有效切割硬岩，普通小采高采煤机难以满足要求．综合卸压效果、回采效率、设备能力及尺寸选型，金岭煤业 172105 半煤岩下保护层采高 1.9 m 左右．

4.2　采空区覆岩垮落特征

现场考察了金岭煤业 172203 和 172105 下保护层工作面采高分别为 0.8 m 和 1.9 m 时的覆岩运移规律．发现 172203 薄煤层下保护层工作面采高为 0.8 m 时，采空区顶板整体平稳弯曲下沉，未发生垮落破断，如图 14 所示．172105 半煤岩下保护层工作面采高为 1.9 m 左右时，在采动影响下层间关键层发生破断，如图 15 所示．



图 14 采高 0.8 m 时一$_7$煤工作面现场照片

Fig. 14 Field photos of No. 17 coal face at the mining height of 0.8 m

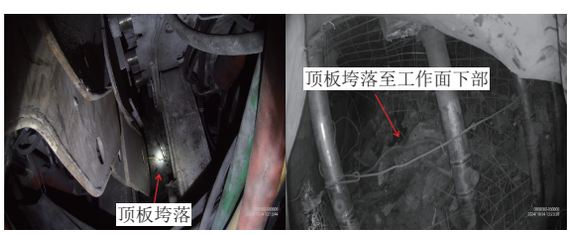


图 15 采高 1.9 m 时一$_7$煤工作面现场照片

Fig. 15 Field photos of No. 17 coal face at the mining height of 1.9 m

一$_7$煤下保护层工作面上方约 10 m 左右位置存在一个抽放巷，用于抽采被保护层卸压瓦斯. 172203 下保护层工作面采高为 0.8 m 时，抽放巷出现一定变形，但并未出现明显冒顶、失稳现象，现场如图 16 所示.



图 16 采高 0.8 m 时抽放巷变形照片

Fig. 16 Deformation photos of gas extraction roadway at the mining height of 0.8 m

同时监测了巷帮移近量以及顶板变形情况，发现顶底板最大移近量为 0.46 m，平均移近量为 0.38 m；巷帮最大移近量为 0.85 m，平均移近量为 0.38 m. 而 172105 下保护层工作面采高为 1.9 m 左右时，底板巷变形严重，出现明显冒顶垮落等情况，由于垮落严重，矿井对底板巷进入采空区后的区域及时进行封闭，并禁止人员进入，如图 17 所示. 从侧面印证了下保护层采高为 0.8 m 时，采空区顶板整体平稳弯曲下沉，未发生垮落破断；下保护层采高为 1.9 m 左右时，在采动影响下层间灰岩关键层发生了破断.



图 17 采高 1.9 m 时抽放巷变形照片

Fig. 17 Deformation photos of gas extraction roadway at the mining height of 1.9 m

4.3 被保护层卸压效应

金岭煤业 172203 保护层工作面采高为 0.8 m，矿井跟踪考察了被保护层工作面原始瓦斯压力为 0.84～0.96 MPa，残余瓦斯压力为 0.12～0.54 MPa，卸压保护效果一般. 为提高被保护层卸压保护效果，在 172105 保护层工作面开展了现场试验，将采高调整为 1.9 m 左右，目前工作面已回采 120 m. 从 172105 下抽放巷等施工穿层钻孔测定了瓦斯参数变化，被保护层原始瓦斯压力为 0.45～0.83 MPa，残余瓦斯压力为 0.10～0.22 MPa，均小于 0.60 MPa，明显低于 172203 工作面采高为 0.8 m 时被保护层残余瓦斯压力，膨胀变形量增大至 23.30‰，取得了显著的卸压保护效果.

综上所述，通过开展 0.8 m 和 1.9 m 采高的物理相似模拟试验，阐明了 2 种采高下保护层开采覆岩关键层破断规律与卸压效应. 在此基础上进一步开展了多个采高的数值模拟试验，进一步明确了采高变化对保护层和被保护层层间关键层破断情况和裂隙发育的影响. 进而构建了关键层影响下半煤岩下保护层不同采高卸压效应的理论模型，揭示了采高对半煤岩下保护层开采卸压效应的影响规律，指导了金岭煤业半煤岩保护层合理采高的确定.

5 结 论

1）查明了半煤岩下保护层不同采高条件下覆

岩运移规律及卸压效应，发现采高和关键层赋存条件对覆岩破断及卸压变形影响显著．采高 0.8 m 时，层间关键层未破断，上覆岩层整体弯曲下沉，被保护层卸压不充分．而采高为 1.15，1.5，1.9 和 2.3 m 时，层间关键层破断，裂隙带发育至二$_1$煤层上方大占砂岩底部．随着采高增大，应力降幅增加，被保护层卸压效果愈显著．

2）构建了采高和关键层影响下的半煤岩下保护层开采卸压效应预测方程，明确了被保护层卸压程度与关键层和采高之间的定量关系．发现不同采高和层间关键层共同作用下，顶板破断情况与卸压程度存在明显差异，采高对被保护层卸压有促进作用．金岭煤业顶板存在厚硬灰岩关键层是阻碍半煤岩下保护层卸压效应的关键控制因素．

3）预测得出金岭煤业 172105 工作面层间灰岩关键层厚度 8.0 m 和采高 1.9 m 时，被保护层应力降低了 41.6%～70.2%，最大膨胀变形量达到 23.8‰，采高为 1.15 m 满足膨胀变形量大于 3.0‰的要求，结合卸压效果、开采效率、破岩能力，经设备选型，金岭煤业半煤岩下保护层采高取 1.9 m 左右．

4）在金岭煤业进行了现场验证及应用．薄煤层下保护层采高为 0.8 m 时，层间灰岩关键层未破断，整体平稳弯曲下沉，卸压不充分．而采高为 1.9 m 左右时，灰岩关键层发生破断，被保护层膨胀变形量增大至 23.3‰，取得了显著的卸压保护效果．

参考文献：

[1] 周　斌，杨兆龙，李树刚，等．真三维应力状态下不同地应力条件对煤与瓦斯突出两相流动力学特征的影响[J]．中国矿业大学学报，2025，54(5)：1053-1065.
ZHOU Bin，YANG Zhaolong，LI Shugang，et al. Effects of different geo-stress on two-phase flow dynamics of coal-gas outbursts in true triaxial stress state[J]. Journal of China University of Mining & Technology，2025，54(5)：1053-1065.

[2] 张建国，王　满，张东明，等．采动应力作用下煤与瓦斯突出过程中孔隙压力与温度变化规律研究[J/OL]．煤炭学报，1-9[2025-10-15]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1377.
ZHANG Jianguo，WANG Man，ZHANG Dongming，et al. Study on changes in pore pressure and temperature during coal and gas outburst stimulated by mining-induced stress[J/OL]. Journal of China Coal Society，1-9[2025-10-15]. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1377.

[3] 张俊文，白旭阳，董续凯，等．煤岩动力灾害结构场孕育演化及调控技术[J]．煤炭科学技术，2025，53(1)：82-95.
ZHANG Junwen，BAI Xuyang，DONG Xukai，et al. Structural field breeding and evolution and control technology of coal-rock dynamic disasters[J]. Coal Science and Technology，2025，53(1)：82-95.

[4] 唐巨鹏，张众华，潘一山，等．煤厚异常区对煤与瓦斯突出影响规律研究[J]．煤炭学报，2025，50(6)：2988-2999.
TANG Jupeng，ZHANG Zhonghua，PAN Yishan，et al. Influence law of abnormal coal thickness zone on coal and gas outburst[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(6)：2988-2999.

[5] ZHU L，YAO Q L，XIA Z，et al. Study on the movement characteristics of the overlying stratum and surrounding rock control in ultraclose coal seams：A case study[J]. Energy Science & Engineering，2020，8(4)：1231-1246.

[6] WANG K，DU F. Coal-gas compound dynamic disasters in China：A review[J]. Process Safety and Environmental Protection，2020，133：1-17.

[7] 国家矿山安全监察局河南局，河南省工业和信息化厅．河南省煤矿瓦斯防治管理办法[EB/OL]．(2023-02-14)[2025-09-01]. https://hn.chinamine-safety.gov.cn/sitesources/hnsafety/page_pc/xw/tzgg/article5b5de2aac9ad4418be19e9c35327c2b7.html.
Henan Bureau of the National Mine Safety Administration Provincial，Department of Industry and Information Technology of Henan Province. Measures for the prevention and control of gas in coal mines in henan province [EB/OL]. (2023-02-14) [2025-09-01]. https://hn.chinamine-safety.gov.cn/sitesources/hnsafety/page_pc/xw/tzgg/article5b5de2aac9ad4418be19e9c35327c2b7.html.

[8] 王　坤，孟祥瑞，程　详，等．软岩保护层开采采动卸压效果的预测及应用[J]．中国安全生产科学技术，2023，19(10)：66-73.
WANG Kun，MENG Xiangrui，CHENG Xiang，et al. Prediction and application of mining pressure relief effect in soft rock protective layer mining[J]. Journal of Safety Science and Technology，2023，19(10)：66-73.

[9] 张创业，王晓川，吕有厂，等．下保护层开采扰动卸压效应及瓦斯与煤自燃协同治理技术[J]．矿业安全与环保，2024，51(3)：65-71.

ZHANG Chuangye, WANG Xiaochuan, LYU Youchang, et al. Pressure relief effect of mining disturbance in the lower protective layer and collaborative control technology of gas and coal spontaneous combustion[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3):65-71.

[10] 贺爱萍，付 华，霍丙杰，等.下保护层开采参数与保护效果定量关系研究[J].煤炭科学技术，2019，47(11):103-109.
HE Aiping, FU Hua, HUO Bingjie, et al.Study on quantitative relationship between mining parameters of lower protective layer and protection effect[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 103-109.

[11] LIU H B, XIAO X C, SHU Z H. Elimination of coal and gas outburst dynamic disasters in Dengfeng coalfield through gas extraction based on extremely thin protective coal seam mining[J]. Advances in Civil Engineering,2021,22:8675060.

[12] LIU H B,LIU H,CHENG Y P.The elimination of coal and gas outburst disasters by ultrathin protective seam drilling combined with stress-relief gas drainage in Xinggong coalfield[J].Journal of Natural Gas Science and Engineering,2014,21:837-844.

[13] CHEN Y,ZHU S Y,WANG Z G,et al.Deformation and failure of floor in mine with soft coal,soft floor, hard roof and varying thicknesses of coal seam[J].Engineering Failure Analysis,2020,115:104653

[14] 钱鸣高.采场上覆岩层的平衡条件[J].中国矿业大学学报,1981(2):34-43.
QIAN Minggao. The equilibrium conditions of overlying strata in the stope[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1981(2):34-43.

[15] 王晓振，许家林，韩红凯，等.顶板导水裂隙高度随采厚的台阶式发育特征[J].煤炭学报，2019，44(12):3740-3749.
WANG Xiaozhen, XU Jialin, HAN Hongkai, et al. Stepped development characteristic of water flowing fracture height with variation of mining thickness[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12):3740-3749.

[16] 马月连，赵文静，王文博，等.煤层开采采厚效应的相似模拟研究[J].煤炭技术，2019，38(3):34-37.
MA Yuelian, ZHAO Wenjing, WANG Wenbo, et al. Study on similarity simulation of mining thickness effect in coal seam mining[J]. Coal Technology, 2019,38(3):34-37.

[17] 赵鹏翔，常泽晨，李树刚，等.倾斜厚煤层开采卸压瓦斯运储区能量耗散结构时变机理研究[J].中国矿业大学学报，2025，54(1):202-214.
ZHAO Pengxiang, CHANG Zechen, LI Shugang, et al. Study on time-varying mechanism of energy dissipation structure in depressed-pressure gas transport and storage area of inclined thick coal seam ming[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1):202-214.

[18] 赵鹏翔，裴文博，李树刚，等.巨厚煤层下分层开采邻近采空区破断岩体分形继发性演化机理[J].中国矿业大学学报，2024，53(4):696-709.
ZHAO Pengxiang, PEI Wenbo, LI Shugang, et al. Fractal secondary evolution mechanism of fractured rock mass in adjacent goaf areas under extremely thick coal seam lower slice mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(4):696-709.

[19] 国家安全生产监督管理总局.防治煤与瓦斯突出细则[M].北京:煤炭工业出版社，2019.
State Administration of Work Safety. Detailed rules for the prevention and control of coal and gas outbursts [M].Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2019.

[20] 王中华，曹建军.深部远距离煤层群卸压主控因素及首采层优选方法研究[J].煤炭科学技术，2021，49(8):154-161.
WANG Zhonghua, CAO Jianjun. Study on main control factors of pressure relief of deep and long-distance coal seams group and optimization method of initial mining[J].Coal Science and Technology,2021, 49(8):154-161.

[21] 刘洪永，程远平，赵长春，等.保护层的分类及判定方法研究[J].采矿与安全工程学报，2010，27(4):468-474.
LIU Hongyong,CHENG Yuanping,ZHAO Changchun, et al.Classification and judgment method of the protective layers[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2010, 27(4):468-474.

[22] 徐 超，程远平，王 亮，等.巨厚关键层对远程下保护层开采卸压效果的影响[J].煤矿安全，2012，43(8):26-29.
XU Chao,CHENG Yuanping,WANG Liang,et al. The influence of extremely thick key layer on pressure-relief effect of remote lower protective seam mining[J].Safety in Coal Mines,2012,43(8):26-29.

[23] 袁艳梅，乔 伟，欧 聪，等.上覆坚硬厚顶板煤岩卸压增透数值模拟及应用研究[J].矿业安全与环保，2024，51(2):67-73.
YUAN Yanmei, QIAO Wei, OU Cong, et al. Nu-

merical and application study on pressure relief and antireflection of overlying hard thick roof coal-rock [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2):67-73.

[24] HAN H K, HU Z Q, LIU Y W, et al. Mining stress formation and distribution: Predictive model based on overburden key strata structure[J]. Energy Science & Engineering, 2024, 12(4):1551-1568.

[25] 韩红凯，史　灿，许家林，等. 基于采动覆岩关键层“板-梁”结构的应力场预测模型研究[J]. 采矿与安全工程学报，2024，41(6):1190-1201.
HAN Hongkai, SHI Can, XU Jialin, et al. Mining-induced stress field prediction model based on the ‘slab-beam’ structure of overburden key strata[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(6):1190-1201.

[26] CHENG X, ZHAO G M, LI Y M, et al. Key technologies and engineering practices for soft-rock protective seam mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(6):889-899.

[27] SHI Z S, YE D L, QIN B, et al. Mining height effect and application of upper protected layer mining pressure relief[J]. Sustainability, 2022, 14(6):10119.

[28] 谢小平，刘洪洋，梁敏富. 半煤岩工作面保护层开采的卸压机理及回采设备选型[J]. 煤炭科学技术，2019，47(3):168-174.
XIE Xiaoping, LIU Hongyang, LIANG Minfu. Study on mechanism of pressure relief and selection of key equipment for protective layer of semi-coal rock working face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):168-174.

[29] LIU A X, TU S H, WANG F T, et al. Numerical simulation of pressure relief rule of upper and lower protected coal-seam in thin-protective-seam mining [J]. Disaster Advances, 2013, 6(5):6-25.

[30] 许家林，朱卫兵，王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报，2012，37(5):762-769.
XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5):762-769.

（责任编辑　沈　菊　仝　腾）