

# 不同开采参数条件下保护层开采卸压效果研究

Study on Pressure Relief Effect of Protective Layer Mining Under Different Mining Parameters

刘宇飞, 杨瑞, 高红兵, 李世杰, 宁权(西北矿业亭南煤业有限责任公司, 陕西 咸阳 713600)

**摘要:**为探究不同开采参数条件下的保护层卸压效果,系统性分析了开采高度、层间距、工作面长度对被保护煤层的垂直应力分布规律以及底板卸压程度的影响,通过计算卸压系数进行了量化表征。结果表明:开采高度的增加与层间距的降低将导致卸压效果的提升。保护层的卸压量随着工作面长度的增加而逐渐降低,卸压范围随工作面长度增加而增长。对底板的卸压程度进行分析,表明开采高度与工作面长度的增加有利于提升底板的卸压效果。层间距的影响则存在两级分化特征,当层间距小于20 m时,底板卸压的临界深逐渐增加,层间距大于20 m时,底板卸压的临界深度逐渐降低,并逐渐达到稳定。

**关键词:**保护层开采; 冲击地压; 数值模拟; 煤层卸压

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)05-0036-05

**Abstract:** Protective layer mining is an effective technical measure to prevent and control rock burst of coal seam groups. In order to explore the relief effect of protective layer under different mining parameters, the influences of mining height, layer spacing and working face length on vertical stress distribution and floor relief degree of protected coal seam were systematically analyzed, and quantified by calculating the relief coefficient. The results show that the increase of mining height and the decrease of layer spacing will lead to the improvement of pressure relief effect. The pressure relief of the protective layer decreases gradually with the increase of the length of the working face, and the pressure relief range increases with the increase of the length of the working face. The analysis of the pressure relief degree of the floor shows that the increase of mining height and working face length is conducive to improving the pressure relief effect of the floor. When the layer spacing is less than 20 m, the critical depth of floor pressure relief gradually increases, while when the layer spacing is greater than 20 m, the critical depth of floor pressure relief gradually decreases and gradually reaches stability.

**Key words:** protective layer mining; rock burst; numerical simulation; coal seam relief

## 1 前言

保护层开采技术是针对煤层群开采条件实施的卸压防冲措施。首先开挖的煤层称为保护层,被消除或削弱冲击危险性的煤层称为被保护层。经实践证明,保护层开采可以有效降低被保护煤层的应力集中程度,充分释放原岩状态中的弹性能,是煤层群条件下防治冲击地压最为有效,最经济的区域性措施之一<sup>[1-4]</sup>。

保护层开采打破了下伏岩层的原岩应力平衡,促使下伏岩层的高应力状态重新调整。我国学者刘天泉<sup>[5-6]</sup>对煤层开采引起的岩层变形分布规律进行了系统性的分析,总结出了“横三区、竖三带”的岩

层分布理论,为保护层开采条件下的煤岩结构演化分析提供了基础参考。沈荣喜等<sup>[7]</sup>进一步分析表明,保护层开采会促使应力峰值向煤层深部转移,以此降低了被保护层的应力峰值。窦林名等<sup>[8-9]</sup>以济三矿为工程案例,探究了保护层开采条件下的煤岩体膨胀变形与破坏特点。刘征等<sup>[10]</sup>采用相似模拟试验方法,探究了保护层开采过程中底板煤岩体应力的动态变化过程,表明在采动过程中,底板煤岩体的垂直应力沿煤层走向方向表现为“W”形的分布特征。

上述研究中,学者们针对保护层开采条件下的应力分布规律进行了重点研究,为保护层开采的技

[作者简介] 刘宇飞(1993—),男,汉,山西晋中人,本科学历,从事煤矿冲击地压防治工作。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51504095);山东能源集团有限公司科技创新资助项目(C130B2022000179)。

[引用格式] 刘宇飞,杨瑞,高红兵,等.不同开采参数条件下保护层开采卸压效果研究[J].中国矿山工程,2024,53(5):36-40.

术实施提供了理论支撑。由于我国的矿井分布范围较广,煤田构造与开采方式各异,由此导致保护层技术的开采参数存在差异性,并直接影响了技术设计的可靠性。为此,以亭南煤矿的保护层开采为案例,系统性分析了不同开采参数条件下的保护层开采卸压规律,重点探究了开采高度、层间距、工作面长度参数对于被保护煤层卸压效果的影响,以期保护层开采技术的理论设计提供参考依据。

## 2 工程概况

亭南煤矿现计划开采4号煤层,埋深约为650 m,煤层厚度5.2~18.6 m,普氏硬度系数 $f=4.5$ 。煤层较稳定,由轴部区域向南北部区域逐渐变薄,煤层厚度变化较大,煤层含有1~2层夹矸,夹矸厚度0.1~0.3 m。根据《亭南煤矿2409掘进工作面冲击危险性评价》报告,采用综合指数法评价了2409回风巷掘进工作面的冲击地压危险性,综合指数评价结果为0.71,综合判定2409回风巷外段掘进期间具有中等冲击危险性。由此需提前设计煤层卸压技术措施,保障矿井的安全生产工作。计划采用保护层开采技术,将上方3号煤层设计为保护层,4号煤层设计为被保护层。煤层顶底板岩性特征见表1。

表1 煤层顶底板岩性特征

层序	岩性	厚度/m	抗压强度/MPa
基本顶	细砂岩	$\frac{12.63}{0 \sim 25.25}$	32.4
直接顶	中砂岩	$\frac{1.48}{0.45 \sim 2.5}$	28.5
直接底	砂质泥岩	$\frac{8.69}{0 \sim 17.38}$	19.4
基本底	粉砂岩	$\frac{8.21}{2.37 \sim 14.26}$	25.8

## 3 保护层卸压效果判据

保护层开采是缓解煤层压力,治理冲击地压的有效技术之一。为合理判定保护层开采条件下的煤层卸压程度,为卸压效果提供可靠判据,Malyshv探究了保护层开采前后的覆岩应力分布状态,并以此提出了相应的保护层卸压判定准则如式(1)所示<sup>[11]</sup>。

$$|\sigma_z| \leq (\cos^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha) \gamma H_0 \quad (1)$$

式中, $|\sigma_z|$ 为煤层垂直应力,MPa; $\alpha$ 为煤层倾角; $\lambda$

为侧压系数; $\gamma$ 为岩层容重, $\text{kN/m}^3$ ; $H_0$ 为初始条件下冲击地压临界深度,m。

初始条件下冲击地压临界深度的计算可由式(2)进行表示<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} H_0 = \frac{\sigma_c}{\gamma g(m-1)} \left[ \frac{\lambda_r}{E} \left( 1 + \frac{E}{\lambda_r} \right)^{\frac{m-1}{2}} - \left( 1 + \frac{\lambda_r}{E} \right) \right] \\ m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda_r$ 为软化模量; $g$ 为重力加速度, $\text{m/s}^2$ ; $E$ 为弹性模量,MPa; $\varphi$ 为内摩擦角。

根据亭南煤矿的地质条件,计算得到初始条件下冲击地压临界深度为656 m,由此计算得出式(1)判据中的煤层垂直应力为16.5 MPa。亭南煤矿4号煤层埋深约为650 m,初始自重应力约为16.1 MPa。由此可知,亭南煤矿4号煤层自重应力接近于极限保护层卸压判据,存在发生冲击地压事故的可能性,有必要采取卸压技术对地层应力进行调节与治理。

在经验性判据中,涂敏等<sup>[13]</sup>认为保护层开采卸压后的煤层应力集中系数低于51%属于可靠范围,吴仁伦等<sup>[14]</sup>认为应力集中系数应低于57%属于可靠范围。为充分保障保护层开采的卸压效果,亭南煤矿设定保护层开采卸压后的煤层应力集中系数低于50%作为充分卸压的判定指标。考虑到应力集中系数与应力的变化存在直接关系,设定如式(3)所示的卸压系数作为卸压效果的判据:

$$C = \frac{\sigma'_z}{|\sigma_z|} \quad (3)$$

式中, $C$ 为卸压系数; $\sigma'_z$ 为保护层开采后的煤层垂直应力。式(3)中的卸压系数越大即代表卸压程度越小,相反的,系数越小即代表卸压程度越大。

## 4 不同开采参数条件下保护层卸压效果分析

保护层开采的卸压效果与开采高度、层间距、工作面长度等因素直接相关,为探究不同开采参数条件下的保护层卸压效果,采用数值模拟软件进行分析。利用FLAC<sup>3D</sup>软件建立如图1所示的数值模拟模型。模型的长度为1200 m,宽度为520 m,高度为700 m。固定模型的四周边界与底部边界,在模型上方施加16 MPa的地应力。采用摩尔-库伦准则进行计算。模型中的保护层为3号煤层,被保护层为4

号煤层。保护层每次开挖 5 m, 共计开挖长度为 1 000 m, 左右两侧各留设 100 m 的边界煤柱。根据亭南煤矿的实际地质条件, 简化设置数值模拟参数见表 2。

### 4.1 开采高度对被保护层卸压效果的影响

为探究开采高度影响下的被保护层卸压效果, 建立采高为 2, 4, 6, 8 m 的开采模型, 数值模拟计算得到采场的垂直应力分布特征如图 2(a) 所示, 对比

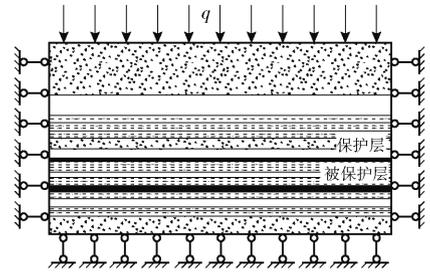
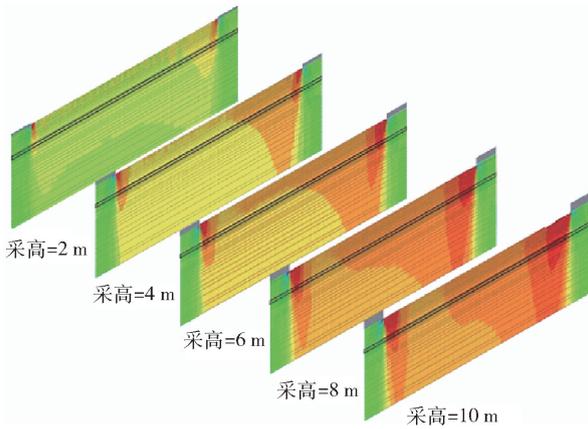


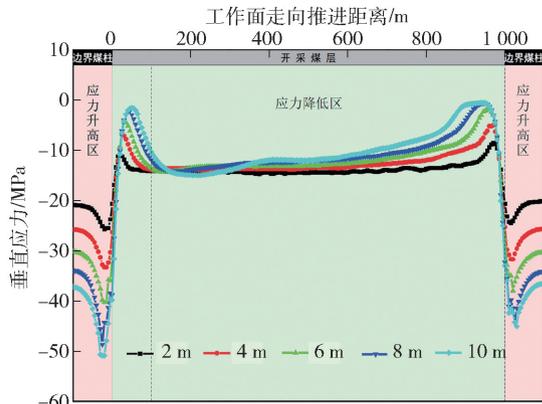
图 1 数值模拟模型

表 2 数值模拟岩性参数

岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	泊松比
细砂岩	32.4	2.4	10.3	36	8.4	6.4	0.21
砂质泥岩	19.4	1.5	8.4	30	6.3	4.5	0.24
中砂岩	28.5	2.3	14.2	35	7.5	7.4	0.22
粉砂岩	25.8	2.6	13.5	34	8.4	6.4	0.22
煤	8.7	1.1	5.5	24	2.5	2.6	0.25



(a) 采场垂直应力分布特征



(b) 垂直应力分布曲线

图 2 开采高度条件下被保护层垂直应力分布规律

分析不同开采高度条件下的被保护层垂直应力分布规律, 绘制曲线如图 2(b) 所示。随着保护层开采高度的逐渐增加, 模型的空顶高度随之增长, 采场整体

的垂直应力呈现为上升趋势。不同开采高度条件下的煤层垂直应力分布特征存在差异, 垂直应力的分布存在非对称性, 并且随着采高的增加, 非对称特征更加明显。这种非对称特征与开采顺序相关, 是应力结构调整顺序的作用结果, 在工程中也会受到采空区压实作用的影响。不同开采高度条件下, 被保护层卸压后的垂直应力最大值分别为 -10.9, -6.9, -4.3, -2.0, -1.5 MPa, 计算得到的卸压系数分别为 0.69, 0.43, 0.27, 0.13, 0.09。随着采高的逐渐增加, 末采阶段的垂直应力逐渐降低, 卸压效果随之增加。

为分析开采高度变化条件下的底板卸压效果, 绘制不同底板深度下的卸压系数曲线如图 3 所示。根据曲线可知, 开采高度为 2, 4, 6, 8 m 时, 底板卸压的临界深度分别为 19, 48, 58, 65, 69 m。由此可知, 开采高度的增加有利于提升底板的卸压效果。

### 4.2 层间距对被保护层卸压效果的影响

为探究层间距影响下的被保护层卸压效果, 建立层间距为 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 m 的开采模型, 数值模拟计算得到采场的垂直应力分布特征如图 4(a) 所示, 对比分析不同层间距条件下的被保护层垂直应力分布规律, 绘制曲线如图 4(b) 所示。不同层间距条件下的煤层垂直应力在数值上存在明显差异, 但在分布形式上较为相近。随着保护层与被保护层的层间距逐渐上升, 垂直应力的变化幅度逐渐降低, 在两侧边界区域的垂直应力变化幅度最为明显。不同层间距条件下, 被保护层卸压后的垂直

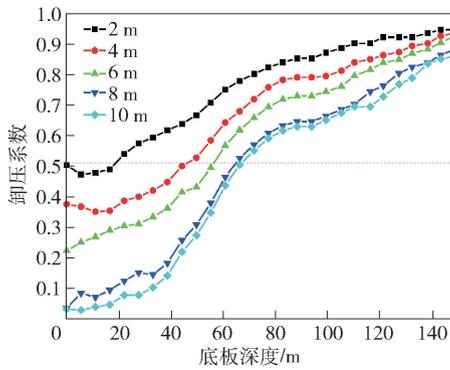


图3 开采高度条件下底板卸压程度

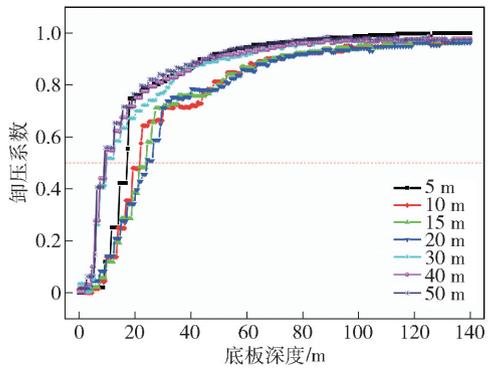
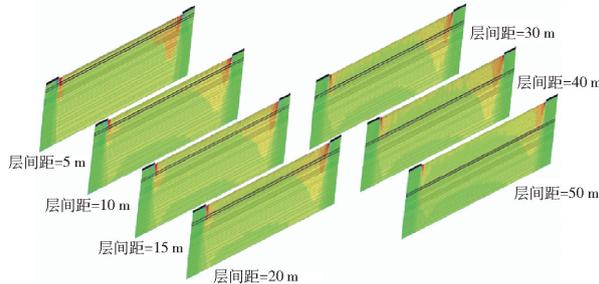
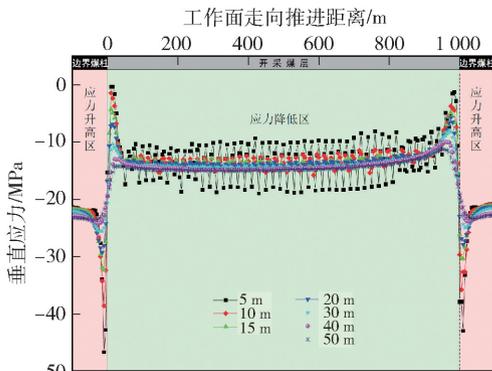


图5 层间距条件下底板卸压程度

应力最大值分别为 -0.4, -1.5, -4.3, -6.9, -10.4, 13.0, 14.0 MPa, 计算得到的卸压系数分别为 0.025, 0.09, 0.27, 0.43, 0.65, 0.81, 0.88。随着层间距的逐渐增加,卸压效果随之降低。



(a) 采场垂直应力分布特征



(b) 垂直应力分布曲线

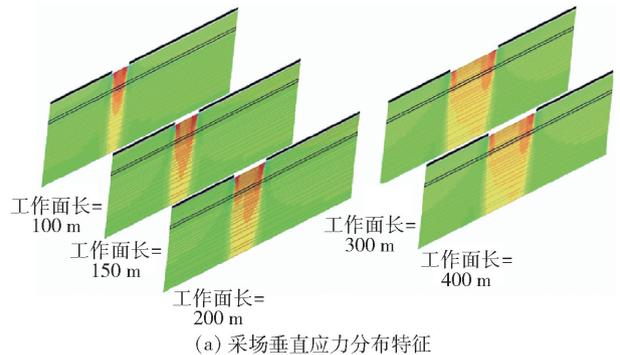
图4 层间距条件下被保护层垂直应力分布规律

为分析层间距变化条件下的底板卸压效果,绘制不同底板深度下的卸压系数曲线如图5所示。根据曲线可知,层间距小于20 m时,底板卸压的临界深逐渐增加,层间距大于20 m时,底板卸压的临界深度逐渐降低,并逐渐达到稳定。

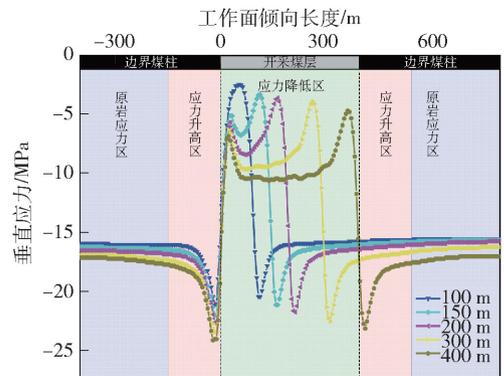
### 4.3 工作面长度对被保护层卸压效果的影响

为探究工作面长度影响下的被保护层卸压效果,建立工作面长度为100,150,200,300,400 m的开采模型,数值模拟计算得到采场的垂直应力分布

特征如图6(a)所示,需要特别指出的是,工作面长度条件下的采场应力分布特征为数值模型宽度方向,即煤层倾向方向的云图。对比分析不同工作面长度条件下的被保护层垂直应力分布规律,绘制曲线如图6(b)所示。不同工作面长度条件下的煤层垂直应力在数值上存在明显差异。保护层的卸压量随着工作面长度的增加而逐渐降低,卸压范围随工作面长度增加而增长。不同工作面长度条件下,被保护层卸压后的垂直应力最大值分别为 -2.4, -3.3, -3.6, -3.9, -4.7 MPa, 计算得到的卸压系数分别为 0.15, 0.21, 0.23, 0.24, 0.30。



(a) 采场垂直应力分布特征



(b) 垂直应力分布曲线

图6 工作面长度条件下被保护层垂直应力分布规律

为分析工作面长度变化条件下的底板卸压效果,绘制不同底板深度下的卸压系数曲线如图7所示。根据曲线可知,不同工作面长度条件下,卸压系数随深度的演化趋势大体相同,仅在数值以及增长幅度上存在差异性。工作面长度为100,150,200,300,400 m条件下时,底板卸压的临界深度分别为49,46,43,39,36 m。由此可知,随着工作面长度的增加,底板的卸压临界深度逐渐降低。

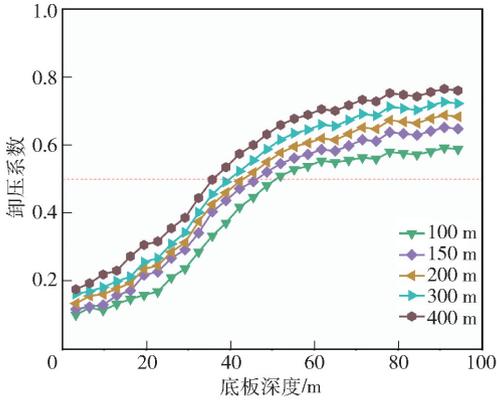


图7 工作面长度条件下底板卸压程度

## 5 结论

(1)引入卸压系数 $C$ 作为保护层开采后的卸压效果判据,即保护层开采前的原始地层应力与保护层开采后的地层应力的比值。设定卸压系数 $C = 0.5$ 作为判定保护层充分卸压的判定指标。

(2)采用数值模拟方法分析了开采高度、层间距、工作面长度影响下的被保护层卸压效果。随着采高的逐渐增加,末采阶段的垂直应力逐渐降低,卸压效果随之增加。随着层间距的逐渐增加,卸压效果随之降低。保护层的卸压量随着工作面长度的增加而逐渐降低,卸压范围随工作面长度增加而增长。

(3)对底板的卸压程度进行分析,表明开采高度与工作面长度的增加有利于提升底板的卸压效果。层间距小于20 m时,底板卸压的临界深逐渐增

加,层间距大于20 m时,底板卸压的临界深度逐渐降低,并逐渐达到稳定。

### [参考文献]

- [1] 姜耀东,赵毅鑫.我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2188-2204.
- [2] 齐庆新,李一哲,赵善坤,等.我国煤矿冲击地压发展70年:理论与技术体系的建立与思考[J].煤炭科学技术,2019,47(9):1-40.
- [3] 黄兴.近距离煤层群保护层开采底板卸压及效果考察[J].中国矿山工程,2022,51(4):45-50.
- [4] 段启兵.某煤矿保护层开采卸压瓦斯抽采研究[J].中国矿山工程,2021,50(2):74-75+80.
- [5] 刘天泉.用垮落法上行开采的可能性[J].煤炭学报,1981(1):18-29.
- [6] 刘天泉,申宝宏,张金才.长壁工作面顶底板应力和位移的试验研究[J].煤炭科学技术,1990(12):34-37+58.
- [7] 沈荣喜,王恩元,刘贞堂,等.近距离下保护层开采防冲机理及技术研究[J].煤炭学报,2011,36(S1):63-67.
- [8] 吴向前,窦林名,吕长国,等.上解放层开采对下煤层卸压作用研究[J].煤炭科学技术,2012,40(3):28-31+61.
- [9] 吕长国,窦林名,徐长厚,等.上解放层开采解放作用机理数值模拟研究[J].煤矿开采,2011,16(2):12-15+82.
- [10] 刘征.急倾斜煤层上保护层开采保护范围物理相似模拟试验研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [11] IOH 马雷舍夫, A T 艾鲁尼, IOI 胡金,等.煤与瓦斯突出预测方法和防治措施[M].北京:煤炭工业出版社,2004.
- [12] 路凯旋,徐连满.我国矿井冲击地压临界深度研究[J].煤炭技术,2020,39(5):31-33.
- [13] 涂敏,袁亮,缪协兴,等.保护层卸压开采煤层变形与增透效应研究[J].煤炭科学技术,2013,41(1):40-43+47.
- [14] 吴仁伦.煤层群开采瓦斯卸压抽采“三带”范围的理论研究[D].徐州:中国矿业大学,2011.