

红庆河二号矿井上保护层开采可行性研究

张新平¹, 兰天伟², 张建强¹, 刘乐¹, 杨从涛¹, 刘永豪²

1. 内蒙古伊泰广联煤化有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200

2. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010

DOI: 10.61369/SSSD.2026080025

摘 要 : 以红庆河二号矿井为工程背景, 为明确红庆河二号矿井3-1煤层作为上保护层的开采可行性, 本研究立足实际地质条件, 通过理论分析与FLAC^{3D}数值模拟, 系统研究了确保开采安全的关键条件及其作用下被保护层的位移、应力、变形规律。结果表明: 当3-1煤层作为保护层开采时, 确定该煤层工作面回采后底板破坏深度为45.12m, 破坏深度大于两煤层之间的层间距, 确保下部煤层应力沿着破坏裂隙涌向上保护层工作面。同时采用FLAC^{3D}软件进一步分析保护层的可行性, 3-1煤层开采后采场顶底板岩体应力状态发生改变, 每个位置的岩体相应经历先上升后下降, 最后由于岩体垮落失稳而使得应力上升并趋于稳定。综上所述, 红庆河二号矿井上部3-1煤层的开采对4-1煤层具有良好的卸压作用, 上保护层开采进行矿井卸压防治具有一定的可行性。

关 键 词 : 保护层开采; 数值模拟; 应力变化; 位移演化; 卸压效果

Feasibility Study on Overlying Protective Coal Seam Mining in Hongqinghe No.2 Coal Mine

Zhang Xinping¹, Lan Tianwei², Zhang Jianqiang¹, Liu Le¹, Yang Congtao¹, Liu Yonghao²

1. Inner Mongolia Yitai Guanglian Coal Chemical Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017200

2. Ordos Research Institute, Liaoning Technical University, Ordos, Inner Mongolia 017010

Abstract : Taking Hongqinghe No.2 Coal Mine as the engineering background, to clarify the mining feasibility of the 3-1 coal seam as the overlying protective coal seam in this mine, this study, based on the actual geological conditions, systematically investigates the key safety guarantee conditions for mining and the laws of displacement, stress, and deformation of the protected coal seam under their influence through theoretical analysis and FLAC3D numerical simulation. The results show that when the 3-1 coal seam is mined as a protective coal seam, the floor failure depth of the coal seam working face after mining is determined to be 45.12 m, which is greater than the interlayer spacing between the two coal seams. This ensures that the stress of the lower coal seam is released upward to the working face of the overlying protective coal seam along the failure fractures. Meanwhile, FLAC3D software is used to further analyze the feasibility of the protective coal seam. After the mining of the 3-1 coal seam, the stress state of the surrounding rock in the roof and floor of the stope changes: the rock mass at each position experiences a process of first increasing, then decreasing, and finally increasing again and tending to stabilize due to rock mass collapse and instability. In summary, the mining of the upper 3-1 coal seam in Hongqinghe No.2 Coal Mine exerts a good pressure relief effect on the 4-1 coal seam, indicating that the application of overlying protective coal seam mining for mine pressure relief and prevention is technically feasible.

Keywords : protective coal seam mining; numerical simulation; stress change; displacement evolution; pressure relief effect

随着我国对于煤炭资源的需求日益增加, 煤矿企业进入高强开采阶段, 冲击地压事故发生的频度激增^[1-4], 动力灾害不仅仅发生在深部开采工程, 浅部开采时灾害发生频度也呈现上升趋势^[5-8]。

现行的《冲击地压测定、监测与防治方法第12部分: 开采保护层防治方法》^[9]表明, 利用保护层开采施工工艺可以有效的降低冲击地压的危险性, 其本质是利用保护层开采的卸压效果, 使得上、下煤层应力在时空上向深部煤岩体转移, 释放采掘区域所积聚的能量。

项目信息:

鄂尔多斯市科技“突围”工程“揭榜挂帅”重大项目 (JB20251447);

鄂尔多斯市标志性创新团队项目 (TD20240005);

鄂尔多斯市重点研发计划项目 (YF20250274)。

作者简介: 张新平 (1978-), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 学士, 主要从事煤炭开采方面的研究工作, E-mail: zhu202108@163.com。

保护层开采,首先就是要从时间上确定其卸压效果,其次是依据保护层的开采观测被保护层的应力变化、裂隙发育程度等参数变化^[10-11]。吴向前等^[12]采用相似材料模拟实验,结合现场实验分析上保护层开采后对下煤层的卸压作用,确定被保护层最大应力释放率为19.2%,表明上保护层的开采起到了良好的卸压作用。文献^[13-14]采用数值模拟软件研究保护层开采后其被保护层三向应力的演化规律,确定最大主应力的分布状态沿工作面走向方向成“四带”分布特征。因此,在前人学者相关研究的基础上,为明晰红庆河煤矿保护层开采后下伏煤岩体的卸压效果,本文通过理论计算分析上部煤层开采后对下部煤层的卸压有效范围,对保护层开采后下部被保护层顶底板的应力及位移演化过程,采用了FLAC^{3D}数值模拟方法进行分析,综上,确定红庆河上保护层开采的可行性。

一、工程背景

红庆河二号矿井为原红庆河煤矿重进改建矿井,属于冲击地压矿井,经辽宁大学完成的冲击倾向性鉴定,确定3-1煤层具有强冲击倾向性;4-1煤层具有弱冲击倾向性。3-1煤层埋深621.42m~869.15m,平均820.09m,煤层厚度3.07m~8.72m,平均6.86m;4-1煤层埋深693.22m~910.43m,平均869.89m;煤层厚度2.60m~6.92m,平均4.72m,两煤层间距25.45m~78.15m,平均43.21m。

因此,从煤矿冲击地压防治的角度来看,应该优先开采具有弱冲击倾向性的4-1煤层,即采用上行开采的施工工艺。但是,依据《冲击地压测定、监测与防治方法、第12部分:开采保护层防治方法》(GB/T25217.12-2019)^[9]规定“在冲击地压矿井开采煤层群时,应根据煤层间距、煤层厚度、煤层及顶底板的冲击倾向性等情况,综合考虑保护层开采的可行性”。因此,综合考虑3-1、4-1煤层地质、自然发火、冲击倾向性等条件,确定上保护层开采的可行性。

二、上保护层开采可行性理论分析

(一) 保护层开采后的底板破坏深度

上部煤层开采时受采动应力的影响,回采工作面前方煤体产生超前支撑压力,在工作面后方出现一定范围的塑性破坏区,如图1所示。

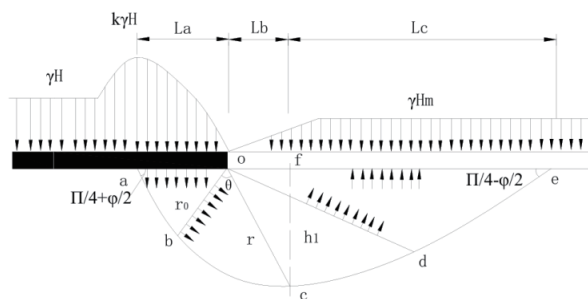


图1 底板塑性破坏区示意图

根据滑移线场理论^[15-16],由式(1)计算得出底板最大破坏深度 $h_{1\max}$ 。

$$h_{1\max} = \frac{L_a \cos \varphi_0}{2 \cos(\pi/4 + \varphi_0/2)} e^{\frac{(\pi/4 + \varphi_0/2) \tan \varphi_0}{\cos(\pi/4 + \varphi_0/2)}} \quad (1)$$

式中: φ_0 为底板岩体内摩擦角,红庆河二号矿井3-1煤层底板岩体的内摩擦角,在综合考虑其以泥岩和砂质泥岩为主的岩性

特征后,取值为 44° 。

式(1)中的 L_a 主要根据以下三种计算方法确定。

(1) Mohr-Coulomb 破坏准则

$$L_a = \frac{M}{2K_m \tan \varphi_m} \ln \frac{k\gamma H + C_m \cot \varphi_m}{K_m C_m \cot \varphi_m} \quad (2)$$

$$K_m = (1 + \sin \varphi_m) / (1 - \sin \varphi_m) \quad (3)$$

式中:煤层埋深 H 为820.09m,开采厚度 M 为6.85m,煤层内摩擦角 φ_m 与内聚力 C_m 分别取 20° 和0.45MPa,岩层平均容重为 γ , kN/m^3 ,同时考虑工作面超前支撑压力集中系数 K_m 的影响。

经计算,3-1煤层工作面前方煤壁屈服宽度为12.13m。

(2) 经验公式

$$L_a = 0.015H = 0.015 \times 820.09 = 12.30\text{m} \quad (4)$$

(3) 塑性区长度计算公式

$$L_a = \frac{M}{F} \ln(10\gamma H) \quad (5)$$

$$F = \frac{K_m - 1}{\sqrt{K_m}} + \left(\frac{K_m - 1}{\sqrt{K_m}} \right)^2 \lg^{-1} \sqrt{K_m} \quad (6)$$

$$L_a = \frac{m}{F} \ln(10\gamma H) = 29.58\text{m} \quad (7)$$

取三种理论计算方法平均值, $L_a=18.00\text{m}$ 计算得最大破坏深度 $h_{1\max}=45.12\text{m}$ 。矿井两煤层平均层间距为43.21m<45.12m,因此,3-1煤层的开采对4-1煤层形成了卸压作用。

(二) 保护层开采后的卸压有效范围

依据《保护层开采技术规范》AQ1050-2008^[17],保护层与被保护层之间的有效垂距,依据下式确定:

$$S_{\perp} = S' \beta_1 \beta_2 \quad (8)$$

式中: $S_{\perp}'$ 为上保护层的理论有效垂距,m。它与工作面长度 L 和开采深度 H 有关,当 $L > 0.3H$ 时,则取 $L=0.3H$,但 L 不得大于250m; β_1 为保护层开采的影响系数,当 $M \leq M_0$ 时, $\beta_1=M/M_0$,当 $M > M_0$ 时, $\beta_1=1$; M 为保护层的开采厚度; M_0 为保护层的最小有效厚度; β_2 为层间坚硬(砂岩、石灰岩)含量系数,以 η 表示在层间岩石中所占的百分比,当 $\eta \geq 50\%$ 时, $\beta_2=1-0.4\eta/100$ 当 $\eta < 50\%$ 时, $\beta_2=1$ 。

经计算的最大垂直有效卸压范围 $S_{\perp}$ 为49.42m,大于两煤层平均层间距为43.21m,保护层开采效果优良。

三、上保护层开采可行性数值模拟分析

(一) 模型建立与边界条件设定

为研究3-1煤层开采后顶底板岩层变形破坏过程以及变形破坏规律,以红庆河二号矿井地层开采条件为基础建立数值模拟计算模型,揭示采动条件下顶底板岩层变形破坏的力学机制。

设计数值模拟实验模型走向长600m,倾向长500m,高200m。试验基于走向开采模型开展,其走向推进长度为400m,沿煤层走向和倾向各留设100m边界保护煤柱。在上部施加外部荷载以等效到地面的自重应力,四周及下部设定为固定边界,如图2所示。

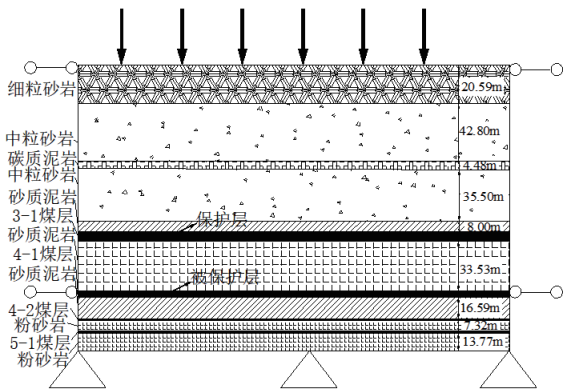


图2 红庆河二号矿井保护层开采力学模型示意图

(二) 网络离散与参数赋值

图3为模型网格划分图,为能够最大限度的模拟煤层回采时对顶底板煤岩体的影响,在模型地应力初始平衡和开挖计算时采用摩尔-库伦准则,可以很好的模拟煤岩体材料的弹塑性变化。将网格进行精细化划分,长宽高依次为600m×500m×200m,模型单元总计613342个,节点1085214个。煤岩层的物理力学参数如表1所示。

表1 煤岩物理力学参数

煤岩层名称	密度/(Kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	内聚力/MPa	内摩擦角/°	抗拉强度/MPa
煤	1500	1.67	1.26	2.2	35	0.52
砂质泥岩	2700	4.57	3.57	5.5	35	0.78
碳质泥岩	2500	4.27	3.49	3.4	36	0.66
粉砂岩	3500	7.69	5.04	4.5	45	1.40
细粒砂岩	2600	8.93	6.30	5.2	38	1.48
中粒砂岩	3000	6.67	5.00	4.9	38	1.50
中粒砾岩	2900	6.88	4.52	5.1	45	2.90

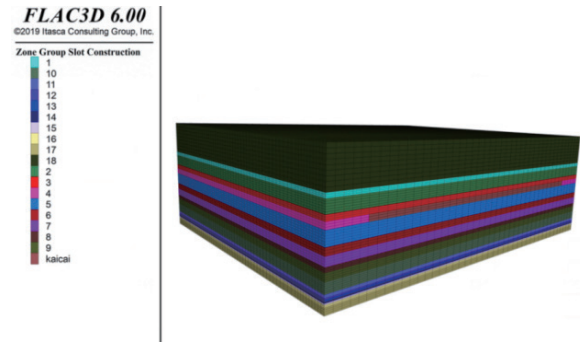


图3 模型网格划分图

(三) 保护层顶底板煤岩体数值模拟研究

1. 保护层煤岩体应力演化规律

不同开采程度下3-1煤层顶底板应力演化规律如图4所示,随着保护层的开采,工作面底板三向平衡应力被破坏,重新分布为四个区域,首先是原始应力区,该区域应力状态基本保持不变;其次是支撑应力区,此区域因承受上方岩层的重量而应力增加;接着是卸压区,该区域直接受到开采活动影响,应力显著降低;最后是应力逐渐恢复区,位于卸压区之外,随着开采影响的减弱,应力水平逐渐回升至接近原始状态。底板岩层受两侧应力挤压,底鼓量不断变大,使得底板应力得到释放,这就保证了被保护层4-1煤层具有充分的卸压空间。

2. 保护层煤岩体位移变形规律

保护层开采之初(工作面推进100m),受采动影响,三向应力平衡状态遭到破坏,煤岩体破裂,由于挤压作用煤岩体发生膨胀变形,不同区域发生一定范围的移动,采空区下方煤岩体出现底鼓现象,工作面底板向上位移近100mm。采空区上方受自重应力作用,煤岩体向采空区移动。采空区底鼓区域增大,上覆岩层影响范围及卸压程度也随之增加。保护层开采完成后,采空区上方位移转变为“梯形”分布,中部垂直位移最大并向四周逐渐减小,各个区域均产生了较为明显的位移量。

(四) 被保护层煤岩体卸压效果数值模拟研究

1. 被保护层煤岩体应力演化规律

上保护层不同开采程度下4-1煤层顶板应力变化及煤层应力变化率,初始应力为22.95MPa,当3-1煤层推进至50m时,开切眼侧的支撑应力效应导致其应力值增至25.81MPa,净增2.86MPa。与此同时,采空区应力则大幅下降至13.12MPa,形成了典型的“V”形卸压区,应力变化幅度达44.31%。随着上保护层不断开采,卸压状态由“V”向“U”形过渡,煤层应力仍对称分布。表明4-1煤层具有良好的卸压效果,应力变化率先增大后减小并趋于稳定。煤层开采至300m之后,采空区煤层应力稳定在2MPa左右,3-1煤层的开采确保了4-1煤层具有良好的卸压效果。

2. 被保护层煤岩体位移演化规律

上保护层不同开采程度下4-1煤层顶底板位移及变化率,上保护层开采后,被保护层顶底板均发生移动,开切眼外侧0m~100m及停采线外侧500m~600m范围内为负值,其原因是前方超前支承压力对被保护层产生挤压作用。随着上保护层不

断推进,采空区范围逐渐扩大,采空区范围内4-1煤层顶底板位移逐渐增大,顶底板位移变化率先增大后减小并趋于稳定,煤层开采至350m之后,采空区范围内4-1煤层顶底板位移处于稳定状态。

四、结论

以红庆河二号矿井保护层开采为研究背景,通过理论分析确定上保护层开采后底板卸压的有效范围;同时,结合FLAC^{3D}数值模拟软件分析研究保护层开采后的卸压效果,综合分析上保护层开采的可行性。主要结论如下:

(1) 基于保护层开采防治理论,当3-1煤层作为保护层开采时,该煤层工作面回采后底板破坏深度为45.12m,卸压范围为49.42m,大于两煤层之间的层间距。因此,3-1煤层的开采对4-1煤层形成了卸压作用,应力将沿着破坏裂隙涌向上保护层工作面。

(2) 数值模拟分析结果表明,3-1煤层开采后采场顶底板岩体应力状态发生改变,岩体应力表现为先上升后下降,最后由于岩体垮落失稳而使得应力上升并趋于稳定,保证了3-1煤层的开采对4-1煤层具有良好的卸压作用。

(3) 根据保护层开采可行性理论研究和数值模拟分析结果,确定红庆河二号矿井采用上保护层开采的施工工艺是可行的,满足保护层开采卸压防治要求,保障矿井安全高效生产。

参考文献

- [1] 潘一山,齐庆新.防治煤矿冲击地压细则解读[M].北京:煤炭工业出版社,2018.
- [2] 柴敬,兰浩,马晨阳,张丁丁,等.保护层开采下伏煤层应力释放与卸压程度识别[J/OL].煤炭学报.
- [3] 李岗伟,王一帆,李峰辉.深部近距离厚煤层上行开采可行性研究[J].煤炭工程,2021,53(11):6-10.
- [4] 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.
- [5] 刘旭东,张玉良,田向辉.基于微震监测的近直立特厚煤层冲击危险区域划分[J].煤炭工程,2020,52(1):70-74.
- [6] 李明好.下保护层开采卸压范围及卸压效果的研究[D].淮南:安徽理工大学,2005.
- [7] 姜福兴,刘焯,刘军,等.冲击地压煤层局部保护层开采的减压机理研究[J].岩土工程学报,2019,41(2):368-375.
- [8] 张传玖,薛雅荣,杨伟,等.浅埋深坚硬顶板工作面冲击地压微震时空前兆信息特征[J].煤炭工程,2022,54(2):98-104.
- [9] GB/T25217.12-2019,冲击地压测定、监测与防治方法.第12部分:开采保护层防治方法[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2019.
- [10] 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(04):468-474.