

突出煤层保护层开采保护范围数值模拟研究

秦俊宾

郑煤集团工程技术研究院瓦斯防治研究所, 河南 郑州

Email: 15738517090@139.com

收稿日期: 2020年8月21日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月10日

摘要

开采保护层是有效预防突出的技术之一。本文以澄槽煤矿为例, 运用FLAC^{3D}数值模拟软件和现场考察相结合的方式, 研究确定了保护层开采后被保护层的有效保护范围, 并对保护效果进行了分析。研究结果表明, 22521保护层工作面开采时, 对被保护层22041工作面沿走向的卸压角为60°, 沿倾向的卸压角分别为69°和90°, 3#、4#钻孔测试的瓦斯含量分别为4.18 m³/t、5.33 m³/t, 7#和8#钻孔测试的瓦斯含量分别为5.47 m³/t和4.46 m³/t, 9#、10#和11#钻孔测试的瓦斯含量分别为5.53 m³/t、4.62 m³/t和4.09 m³/t, 卸压保护效果显著, 有效消除了被保护层22041工作面的突出危险性。

关键词

保护层开采, 数值模拟, 卸压角, 保护效果

Numerical Simulation Research on Mining Protection Range of Outburst Coal Seam

Junbin Qin

Zhengzhou Coal Group Engineering Technology Research Institute Gas Control Institute, Zhengzhou Henan

Email: 15738517090@139.com

Received: Aug. 21st, 2020; accepted: Sep. 3rd, 2020; published: Sep. 10th, 2020

Abstract

Mining protective layer is one of the effective techniques to prevent outburst. In this paper, taking Dengcao Coal Mine as an example, the combination of FLAC^{3D} numerical simulation software and on-site inspection was used to study and determine the effective protection range of the protected layer after mining, and the protection effect was analyzed. The research results show that when the working surface of the 22521 protective layer is mined, the pressure relief angle of the 22041

working surface of the protected layer is 60° , and the inclined pressure relief angles are 69° and 90° . The gas content of the 3# and 4# drilling tests were $4.18 \text{ m}^3/\text{t}$ and $5.33 \text{ m}^3/\text{t}$, the gas content of the 7# and 8# drilling tests were $5.47 \text{ m}^3/\text{t}$, and $4.46 \text{ m}^3/\text{t}$, and the gas content of the 9#, 10# and 11# drilling tests were $5.53 \text{ m}^3/\text{t}$, $4.62 \text{ m}^3/\text{t}$, and $4.09 \text{ m}^3/\text{t}$, respectively. The pressure relief protection effect is significant, effectively eliminating the prominent danger of the working surface of the protected layer 22041.

Keywords

Mining of Protective Layer, Numerical Simulation, Pressure Relief Angle, Protection Effect

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国很多煤矿的煤系地层条件复杂,煤层瓦斯含量较高、透气性较差,煤与瓦斯突出问题严重,对煤矿的安全生产影响巨大。为此,国内外学者对煤层保护层开采后被保护层的卸压效果、裂隙分布以及增透效果进行了大量的研究,李胜伟等[1]采用 UEDC 模拟软件分析了平煤十矿保护层开采时煤岩层的体积应变,计算了采场增透率的空间分布特征,揭示了卸压范围与增透区域基本一致。贺爱萍等[2]采用相似材料模拟实验分析了长平煤矿保护层开采被保护层裂隙分布与增透效果,表明被保护层覆岩裂隙有效发育,卸压区域增大,具有较好增透效果。以上研究对保护层开采煤层防突处理具有指导意义,但不能定量描述保护层开采对被保护层保护范围[3]。《煤矿安全规程》[4]第二百零四条、《防治煤与瓦斯突出细则》[5]第六十一条规定“具备开采保护层条件的突出危险区,必须开采保护层”。因此结合蹬槽煤矿的工程实际,运用 FLAC^{3D} 软件进行下保护层开采的数值模拟[6] [7] [8] [9],并结合现场试验,定量描述被保护煤层的保护范围和保护效果[10] [11] [12],为被保护层工作面设计提供依据。

2. 工程概况

蹬槽煤矿属于煤与瓦斯突出危险的矿井,且具有煤层群赋存特征,可采煤层为二 1、一 5、一 3 煤层。其中,二 1 煤层平均煤厚 4.99 m,为蹬槽煤矿的主要开采煤层;一 5、一 3 煤层属于局部开采煤层,均位于二 1 煤层下部,一 5、一 3 煤层分别上距二 1 煤层 42.1 m 和 52.86 m。该矿井现矿井浅部资源基本回采结束,仅剩部分斜井井筒煤柱,扩大区根据现有已经形成的采区进行划分,以 F6 断层为界,将划分为 2 个采区,21 和 22 采区,其中,扩大区西翼 22 采区为首采区。22521 保护层工作面布置在 22 采区,标高为-126.8~-203.7,走向长 249 m,倾斜长 120 m,煤层倾角平均为 30° ,煤层厚度为 0.6~1.2 m,平均煤厚为 0.8 m。22041 被保护层工作面位于 22 采区上部,设计走向长度为 350 m,倾向长度 143 m,工作面由西向东进行回采。22041 工作面二 1 煤层为较稳定煤层,煤层厚度为 0.5~5 m,平均煤厚为 3.3 m,煤层结构单一,不含夹矸,回采率按 93%计算,可采储量为 21.5 万 t。整体上煤层发育存在中西部厚东部薄、北部厚南部薄的特点。煤层倾向为 $345^\circ\sim 355^\circ$,煤层倾角为 $28^\circ\sim 30^\circ$,平均倾角为 29° ,该煤层结构简单。

蹬槽煤矿本次试验区域为 22 采区的一 5 煤层的 22521 下保护层工作面与二 1 煤层的 22041 被保护层工作面,煤层间距为 42.1 m。

3. 数值模拟建立及结果分析

3.1. 建立数值分析模型

以磴槽煤矿 22521 工作面试验区煤岩层赋存情况作为模拟实验背景原型，为分析突出煤层保护层开采后的被保护层保护范围，此次实验研究选用 FLAC^{3D} 数值模拟软件。

结合试验工作面的埋深，构建模型边界条件，如图 1 所示。模型的上部采用应力边界条件，应力为 15 MPa；四周采用滚动边界条件，应力为 13 MPa；下部边界采用固定边界条件。

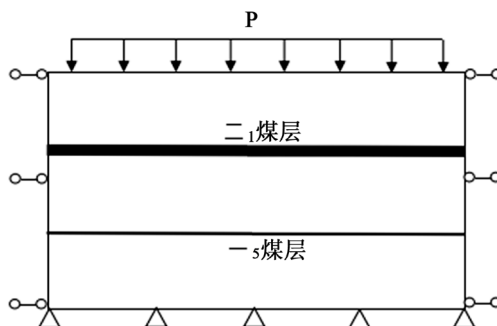


Figure 1. Model boundary conditions

图 1. 模型边界条件

结合煤系地层综合柱状图，利用 FLAC^{3D} 数值模拟软件，构建煤岩层走向、倾向开挖数值计算模型，如图 2、图 3 所示。走向开挖模型尺寸为 320 m × 300 m × 71.9 m。倾向开挖模型尺寸为 300 m × 262 m × 236 m。模拟开采的工作面与保护层工作面基本一致，总开挖长度设为 100 m，倾向长度设为 120 m，采高设为 0.8 m。工作面每推进 2 m，设定的迭代次数为 250 次。

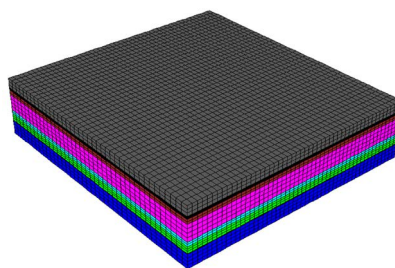


Figure 2. Towards excavation model

图 2. 走向开挖模型

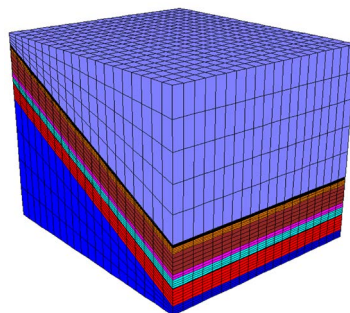


Figure 3. Inclined excavation model

图 3. 倾向开挖模型

3.2. 模拟结果分析

3.2.1. 走向卸压角模拟结果分析

图 4~8 是 22521 保护层工作面推进至不同位置(20 m、40 m、60 m、80 m 和 100 m)时, 走向应力变化分布图, 用于分析随着工作面的推进保护层应力场分布规律。

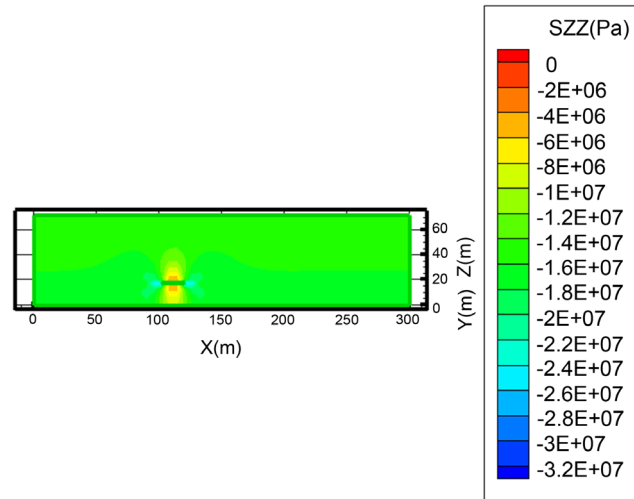


Figure 4. Stress change of surrounding rock around mined-out area after 20 m mining
图 4. 开采 20 m 后采空区周边围岩应力变化

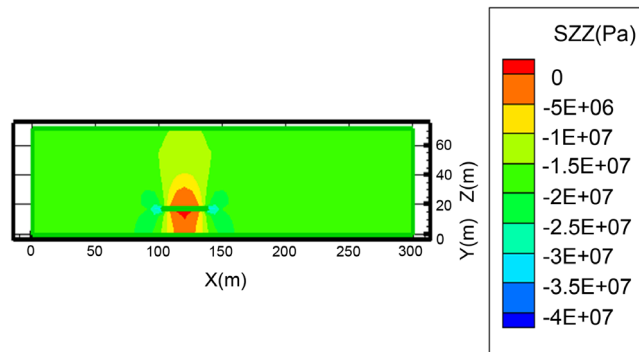


Figure 5. Stress change of surrounding rock around mined-out area after 40 m mining
图 5. 开采 40 m 后采空区周边围岩应力变化

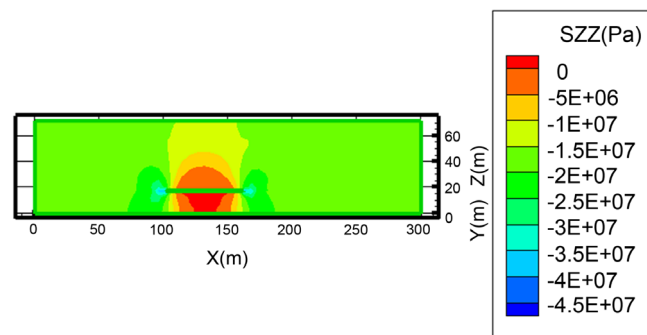


Figure 6. Stress change of surrounding rock around mined-out area after 60 m mining
图 6. 开采 60 m 后采空区周边围岩应力变化

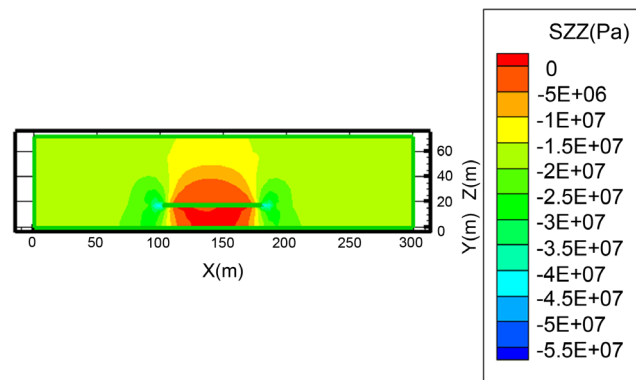


Figure 7. Stress change of surrounding rock around mined-out area after 80 m mining
图 7. 开采 80 m 后采空区周边围岩应力变化

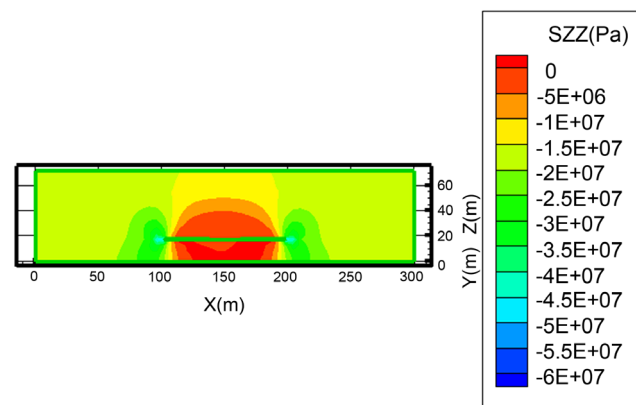


Figure 8. Stress change of surrounding rock around mined-out area after 100 m mining
图 8. 开采 100 m 后采空区周边围岩应力变化

由图 4~8 可知, 当煤层开采 20 m 时, 应力降低区域非常窄, 表明此时的卸压效果不明显, 当煤层开采 40 m、60 m 时, 卸压区域范围逐渐增大, 部分区域垂直应力接近 0; 当煤层开采 80 m、100 m 时, 卸压区域范围进一步增大, 切眼后方及工作面煤壁前部出现应力集中; 随着采空区范围的扩大, 采空区顶板岩层冒落, 并逐渐被压实, 采空区后部出现应力恢复情况。

为准确反映 22521 保护层工作面开采过程中, 被保护层 22041 工作面顶底板膨胀变形量随保护层推进的变化情况, 以保护层 22521 工作面开采 100 m 为例。运用 FLAC^{3D} 中 hist 命令, 进行数据采集, 运用数据处理软件对数据进行处理, 得到被保护层顶底板变化量随着保护层开采的曲线, 如图 9 所示。

根据煤层变形卸压保护准则, 若被保护层的相对膨胀变形量大于 3‰, 说明被保护层的保护效果较好。由图 9 可知, 保护层工作面推进小于 25 m 时, 顶底板膨胀变形量小于 3‰, 膨胀程度较小; 保护层工作面推进至 25 m 时, 相对膨胀变形量达到了 3‰; 保护层工作面推进大于 25 m 时, 顶底板膨胀变形量大于 3‰, 膨胀程度较大。且在工作面推进至 100 m 时, 被保护层 22041 工作面达到顶底板最大变形量 3.5 cm, 故最大相对膨胀变形量为顶底板最大变形量与被保护层 22041 工作面煤厚的比值, 经计算为 10.61‰。

因此, 可确定被保护层 22041 工作面走向 25 m 的位置为数值模拟卸压边界。结合保护层与被保护层之间的间距为 42.1 m, 可得 22521 保护层工作面开采时, 对被保护层 22041 工作面沿走向的卸压角约为 60°。

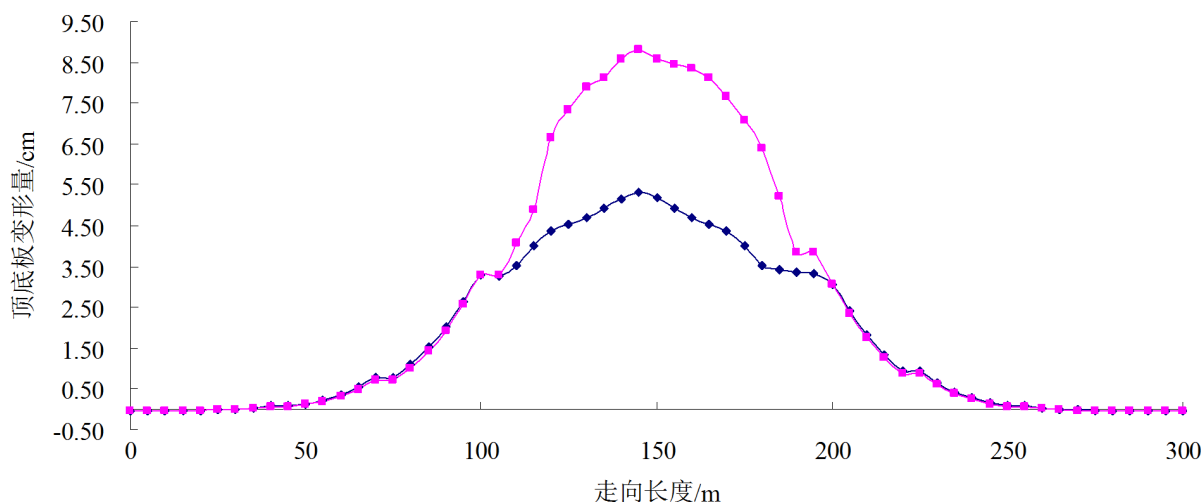


Figure 9. Deformation of the top and bottom of the protected layer after mining 100 m
图 9. 开采 100 m 后被保护层顶底板变形情况

3.2.2. 倾向卸压角模拟结果分析

图 10 是 22521 保护层工作面开采后，倾向采空区周边围岩应力变化。

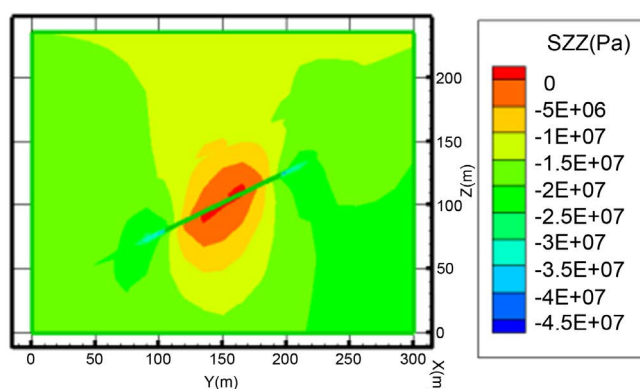


Figure 10. Change of surrounding rock stress in goaf
图 10. 倾向采空区围岩应力变化情况

运用 FLAC^{3D} 中 hist 命令，进行数据采集，运用数据处理软件对数据进行处理，22521 保护层工作面开采后，倾向被保护层顶板、底板应力变化曲线，如图 11 所示。可知，被保护层 22041 工作面顶底板最大变形量为 3.39 cm，故最大相对膨胀变形量为顶底板最大变形量与被保护层 22041 工作面煤厚的比值，经计算为 10.27‰。

结合煤层变形卸压保护准则与倾向被保护层顶底板变形图可知，被保护层沿工作面下顺槽倾向 16 m 位置相对膨胀变形量达到了 3‰，上顺槽倾向 5 m 位置相对膨胀变形量达到了 3‰，结合保护层与被保护层之间的间距为 42.1 m，可得 22521 保护层工作面开采时，对被保护层沿倾向的卸压角分别约为 69° 和 90°。

4. 卸压角现场考察

4.1. 考察钻孔设计

由于煤层倾角较大，保护层开采后，被保护层工作面下付巷外错距离和上付巷内错距离是不一致；

然而，在走向上，被保护层工作面始采线、停采线内错距离是一致的。基于此，为了现场实测保护范围，利用 22051 底抽巷与 22041 西底抽巷所布置的测点 1 和测点 2 对倾向上的保护范围进行分别测定，同时，利用 22041 底抽巷施工的 3#、4#和 5#钻孔对走向上的保护范围进行测定，即倾向保护范围测定施工 2 组钻孔，走向保护范围测定施工 1 组钻孔。

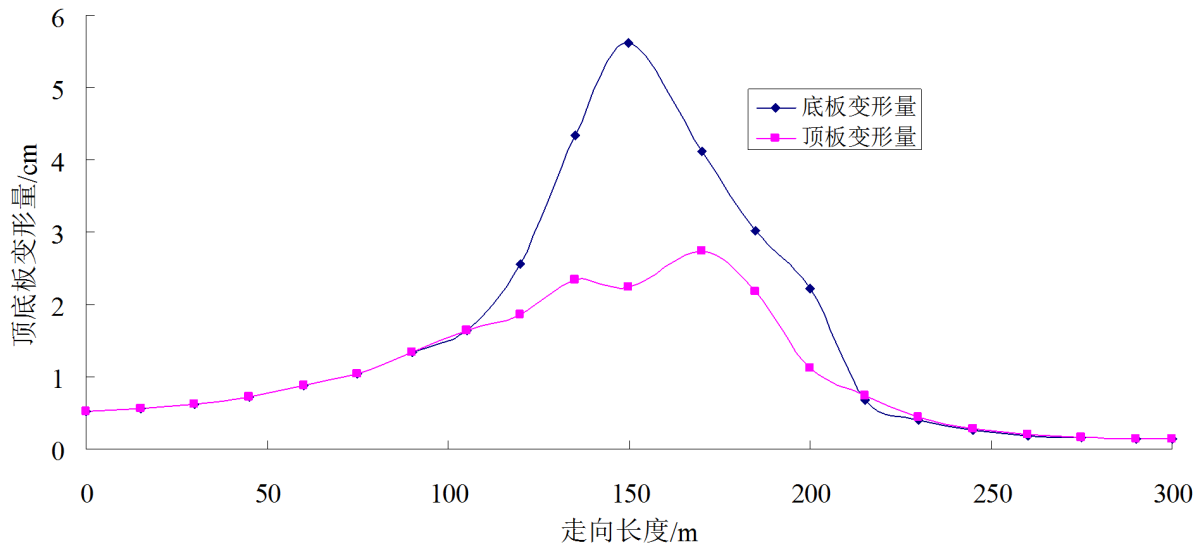


Figure 11. Deformation of the top and bottom plates of the protective layer
图 11. 倾向被保护层顶板、底板变形情况

保护范围测定具体施工地点测点 1 (钻孔剖面见图 12) 的 6#、7#、8#钻孔和测点 2 (钻孔剖面见图 13) 的 9#、10#、11#钻孔测量倾向保护范围，钻孔终孔位置分别位于理论倾向保护边界以里、理论倾向保护边界及理论倾向保护边界以外。同时，3#、4#、5#钻孔的终孔位置分别位于理论倾向保护边界以里、理论倾向保护边界及理论倾向保护边界以外。

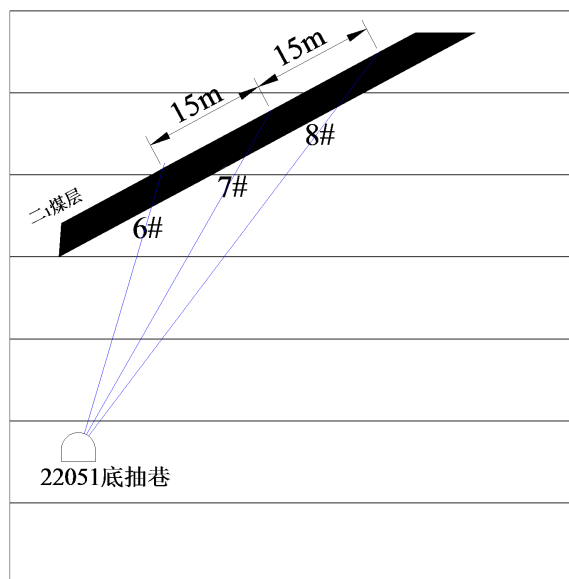


Figure 12. Survey point 1 borehole profile
图 12. 测点 1 钻孔剖面

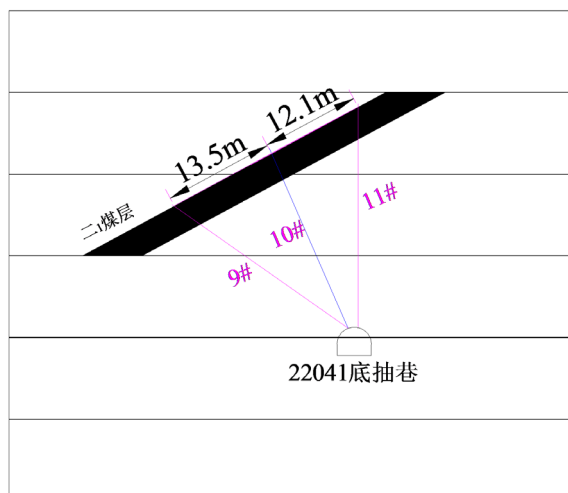


Figure 13. Survey point 2 borehole profile

图 13. 测点 2 钻孔剖面

4.2. 考察结果分析

4.2.1. 走向方向卸压角确定

瓦斯含量测试结果见表 1。走向保护范围测点中 3#、4#和 5#钻孔测试的瓦斯含量分别为 $4.18 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $5.33 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $7.15 \text{ m}^3/\text{t}$ 。3#、4#的瓦斯含量均低于河南省“双六标准”中的 $6 \text{ m}^3/\text{t}$ ，3#、4#钻孔终孔位置分别位于理论保护范围以里及理论倾向保护边界上，因此，考虑到一定的富裕系数，获得走向卸压角为 60° 。

4.2.2. 倾向方向卸压角确定

瓦斯含量测试结果见表 1。倾向保护范围测点中 6#、7#和 8#钻孔测试的瓦斯含量分别为 $7.32 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $5.47 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $4.46 \text{ m}^3/\text{t}$ 。7#、8#的瓦斯含量均低于河南省“双六标准”中的 $6 \text{ m}^3/\text{t}$ ，7#、8#钻孔终孔位置分别位于理论倾向保护边界上及理论保护范围以里，因此，考虑到一定的富裕系数，获得倾向卸压角为 69° 。

倾向保护范围测点中 9#、10#和 11#钻孔测试的瓦斯含量分别为 $5.53 \text{ m}^3/\text{t}$ 、 $4.62 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $4.09 \text{ m}^3/\text{t}$ ，均小于低于河南省“双六标准”中的 $6 \text{ m}^3/\text{t}$ ，10#、11#钻孔终孔位置分别位于理论倾向保护边界上及理论保护范围以里，因此，考虑到一定的富裕系数，获得倾向卸压角为 90° 。

Table 1. Test results of residual gas content in the protection scope

表 1. 保护范围残余瓦斯含量测试结果

序号	开孔位置	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	见煤深度/m	孔长/m	瓦斯含量/ (m^3/t)
3#	距底 3.5 m	75	0	28.0	30.4	4.18
4#	距底 3.5 m	75	176	31.5	33.75	5.33
5#	距底 3.5 m	74	176	30.75	34.25	7.15
6#	中心线以南 0.7 m	73	176	57.76	62.32	7.32
7#	中心线以南 1.0 m	60	176	24.32	28.88	5.47
8#	中心线以南 1.3 m	53	176	26.25	31.5	4.46
9#	距底 3.35 m	35	177	22.21	26.48	5.53
10#	距底 3.48 m	66	177	19.87	23.97	4.62
11#	距底 3.5 m	90	177	23.18	27.56	4.09

5. 保护层开采被保护层范围确定

5.1. 沿倾向保护范围

通过数值模拟及现场实测可确定，22521 工作面煤层倾角为 30° ，沿倾向上的卸压角为 69° 和 90° ，一 5 煤层和二 1 煤层间距为 42.1 m，相对于保护层工作面，被保护层工作面外错下付巷距离为 $42.1 \times \cos(180^\circ - 69^\circ - 30^\circ) = 6.59 \text{ m}$ 和内错上付巷距离为 $42.1 \times \cos 60^\circ = 21.05 \text{ m}$ ，故最终取 22041 工作面外错 22521 下付巷 6.6 m 和内错 22521 上付巷 21 m，为保护层 22521 工作面对被保护层 22041 工作面的倾向保护范围。如图 14 所示。

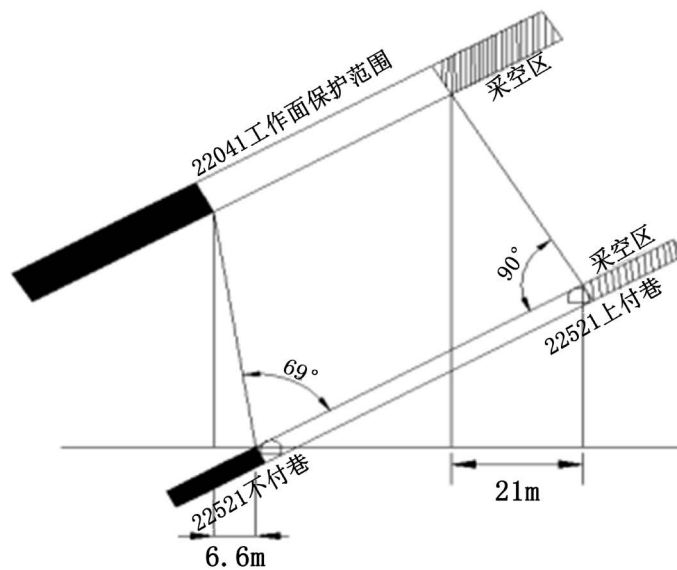


Figure 14. The protective range of the working surface of the protective layer along the inclined direction
图 14. 保护层工作面沿倾斜方向的保护范围

5.2. 沿走向保护范围

通过数值模拟及现场实测可确定，沿走向上的卸压角为 60° ，一 5 煤层和二 1 煤层间距为 42.1 m，因此，可确定被保护层工作面始采线、停采线应内错 $42.1 \times \cot 60^\circ = 24.31 \text{ m}$ ，故最终取被保护层工作面内错一 5 煤层始采线与停采线各 25 m，为保护层工作面对被保护层工作面的走向保护范围，如图 15 所示。

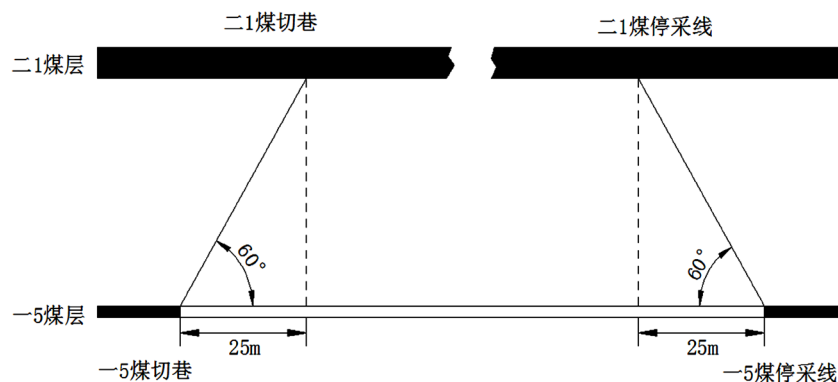


Figure 15. Influence range of start mining line and stop mining line in working face of protective layer
图 15. 保护层工作面始采线、停采线影响范围

6. 结论

(1) 通过现场测试及分析计算, 确定走向上卸压角为 60° , 倾向上的卸压角为 69° 和 90° , 这与数值模拟得出的卸压角基本一致。

(2) 保护层开采后, 3#~4#、7#~8#、9#~11#钻孔测试的瓦斯含量均低于河南省“双六标准”中的 $6 \text{ m}^3/\text{t}$, 表明在保护层卸压保护范围内, 被保护层 22401 工作面无突出危险性。

(3) 保护层 22521 工作面对被保护层 22041 工作面的倾向保护范围为 22041 工作面外错 22521 下付巷 6.6 m 和内错 22521 上付巷 21 m; 走向保护范围为被保护层 22041 工作面内错始采线和停采线各 25 m。

致 谢

感谢我的工作单位郑煤集团工程技术研究院瓦斯防治研究所, 给予我负责本次蹬槽煤矿保护层开采现场试验机会。

感谢河南理工大学李辉副教授, 提供现场试验技术、数值模拟及数据处理等指导性意见。

感谢蹬槽煤矿提供试验场所, 感谢蹬槽煤矿工人积极配合与付出。

感谢参考文献中的所有作者, 是你们的文章为我的研究提供了很好的出发点。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51774120); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室开放课题资助项目(WS2019A08); 河南省高校科技创新人才项目(20HASTIT018); 河南省科技攻关项目(182102210055)。

参考文献

- [1] 李圣伟, 高明忠, 谢晶, 谭强, 邱治强. 保护层开采卸压增透效应及其定量表征方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S1): 1-7.
- [2] 贺爱萍, 付华, 霍丙杰, 路洋波. 保护层开采被保护层裂隙分布与增透效果相似材料模拟[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1174-1181.
- [3] 陈宝. 基于 ANSYS 的急倾斜煤层开采数值模拟研究[J]. 江西煤炭科技, 2016(4): 64-66.
- [4] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程 2016[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [5] 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2019.
- [6] 鲁明星. 良庄煤矿上保护层开采卸压机理与保护范围数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2015(4): 7-11.
- [7] 王宏图, 洪松, 胡国忠, 李晓红, 袁志刚, 范晓刚. 急倾斜下保护层倾向保护范围数值模拟及验证[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(6): 629-632+652.
- [8] 杨军伟, 艾德春, 邱燕, 汤铸. 近距离煤层群上保护层保护范围的数值模拟[J]. 中国煤炭, 2016, 42(9): 36-40.
- [9] 赵鹏涛, 陈滔, 黄渊跃. 一平硐煤矿上保护层保护范围模拟与实验研究[J]. 能源与环境, 2018(1): 15-18.
- [10] 肖光华, 郑云良, 黄维新, 黄金海, 吴波, 王永红. 低透气性煤层群保护层开采保护范围及效果考察研究[J]. 江西煤炭科技, 2019(4): 20-26.
- [11] 张磊. 保护层开采保护范围的确定及影响因素分析[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 205-210.
- [12] 韩泉胜, 丁江海, 李思乾. 远距离煤层开采保护范围确定及效果分析[J]. 能源技术与管理, 2019, 44(4): 86-88.