

上保护层开采双工作面卸压数值模拟

丁海洋¹, 罗文柯^{2,3*}, 万芳芳², 施式亮², 汤铸², 鲁义², 李贺²

(1.安徽神源煤化工有限公司 邹庄煤矿,安徽 淮北 235123;2.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;
3.湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘要:为了研究上保护层双工作面开采后被保护层的卸压保护情况,结合祁南煤矿8₂采区上保护层顶底板岩层物理力学参数和地质特征,采用FLAC^{3D}软件模拟了上保护层双工作面6₁₂₃与6₁₂₅推进过程中应力场和变形场的演化特征,获得了被保护层7₂₂₅与7₂₂₇工作面最大主应力和变形随上保护层双工作面推进的变化特征;并根据《防突细则》中应力卸压与变形保护准则,确定其走向方向与倾斜方向的卸压范围.结果表明:上保护层6₁₂₃与6₁₂₅双工作面上(下)边界的卸压角分别为71.3°(77.4°)、75.8°(73.4°);沿走向方向的卸压角均为64.5°;数值模拟值与《防突细则》理论参考值基本一致,且均在实测的有效卸压范围内,采用数值模拟方法研究上保护层双工作面的卸压保护范围是可行的.

关键词:保护层;被保护层;双工作面;数值模拟;卸压

中图分类号:TD712 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2021)02-0054-11

Numerical Simulation of Pressure Relief at Double Working Face in Upper Protective Layer Mining

DING Haiyang¹, LUO Wenke^{2,3}, WAN Fangfang², SHI Shiliang², TANG Zhu², LU Yi², LI He²

(1. Zouzhuang Coal Mine, Anhui Shenyuan Coal Chemical Co. Ltd., HuaiBei 235123, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the pressure relief protection situation of protected layer after mining in double working face of the protective layer, combining with the physical and mechanical parameters and geological characteristics of the slate layer at the top and bottom of the upper protective layer in the 8₂ mining area of Qinan Coal Mine, this paper uses FLAC^{3D} software to simulate the evolution characteristics of the stress field and deformation field in the process of advancing the 6₁₂₃ and 6₁₂₅ double working faces of the upper protective layer, and obtains the maximum principal stress of the 7₂₂₅ and 7₂₂₇ working faces of the protected layer. According to the principle of stress relief and deformation protection in the outburst prevention regulation, the pressure relief range of the strike direction and incline direction is determined. Results show that the pressure relief angles of the upper (lower) boundary of 6₁₂₃ and 6₁₂₅ double working faces are 71.3°(77.4°) and 75.8°(73.4°) respectively, and the pressure relief angle along the strike direction is 64.5°; the theoretical reference values of the outburst prevention regulations are basically consistent with the numerical simulation values, and they are all within the effective pressure relief range of the actual measurement. So it is feasible to use numerical simulation method to study the pressure relief and protection of the double working faces of the upper protective layer, and the result is safe.

收稿日期:2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774135;51904103);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2123)

*通信作者, E-mail:281323093@qq.com

Keywords: protective layer; protected layer; double working face; numerical simulation; pressure relief

作为我国基础能源的煤炭在我国一次能源消费总量中长期占有相当大的比重^[1]。随着我国浅部煤炭资源开采的逐渐枯竭^[2,3],矿井开采以 20~50 m/a 的速度向深部延伸^[4,5]。由于深部煤层瓦斯压力和地应力的增大^[6,7],煤与瓦斯突出风险随之增高^[8]。保护层开采是目前突出煤层防治成本最低、卸压效果最好的技术措施。大量国内外学者们在理论与实践应用指导下,对煤与瓦斯突出机理^[9]、突出危险性预测指标^[10,11]、效果检验^[12,13]、防突措施^[14-16]、瓦斯卸压抽采^[17,18]等方面投入大量研究工作,并取得丰富成果。尤其在数值模拟方面,朱栋等^[19]通过数值模拟获得上保护层开采时围岩应力演化规律;2009年,胡国忠等^[20]通过对急倾斜伪斜上保护层保护范围的三维数值模拟研究获得了走向与倾斜方向的卸压范围;2013年,陈思等^[21]在对下保护层开采的应力分布特征、煤层透气性变化规律和煤层变形量进行数值模拟分析基础上,首次在潘三矿保护层开采试验研究中进行保护范围和卸压增透效果的验证;2013年,梁海汀等^[22]揭示了关键层在不同位置下被保护层的卸压效果、位移以及膨胀率的变化;2016年,李圣伟等^[23]研究得到了保护层开采不同距离的增透率图谱;2018年,张哲^[24]建立了保护层开采的卸压范围与瓦斯运移数值模型。这些研究成果对于煤矿保护层开采的实践应用具有一定的指导作用。然而,目前对于上保护层双工作面开采后被保护层的卸压保护情况研究甚少。

本文基于被保护层开采工作面尽可能与保护层工作面等尺寸的要求,采用 FLAC^{3D} 软件并结合祁南煤矿地质条件和实际开采情况,建立上保护层双工作面开采的三维立体模型。采用数值模拟方法对比分析祁南煤矿上保护层 6₁23 和 6₁25 工作面依次开采后,7₂ 煤层的垂直应力、膨胀变形量、被保护范围等变化情况,进一步探讨上保护层 6₁ 煤双工作面开采后被保护层 7₂ 煤卸压保护情况。

1 工程背景

8₂ 采区位于淮北矿业股份有限公司祁南煤矿西南部,东北部以 17₈ 与 14-15₃ 两孔连线为界,与 8₁ 采区、8₄ 采区相邻;西部及南部以 9 煤层露头线为界,与 101 采区、102 采区相邻;东部(深部)以 F₉ 断层、16₄ 与补 19₅ 两孔连线及 6₁ 煤层-550 m 底板等高线为界,与 8₃ 采区、8₉ 采区相邻。8₂ 采区上限为 9 煤层露头线,煤层底板标高约为-300~-320 m,下限为 6₁ 煤层-550 m 底板等高线。采区整体形状不规则,中北部较宽,南部较窄,南北长约 4.5 km,东西宽约 0.5~1.6 km,面积约 4.4 km²。6₁25 工作面位于 8₂ 采区左翼 6 煤组第三区段,右侧以 8₂ 采区上山保护煤柱为界,左侧以-380 m 防砂煤柱为界,上部为 6₁23 工作面,下部为 6₁27 工作面,6₁25 工作面标高为-380.7~-431.5 m,高差 50.8 m。6₁25 工作面位于井田西部,西风井东部,地面标高为+22.6 m。研究区域主要煤层综合柱状图如图 1 所示。

2 模型建立

2.1 模型尺寸与边界条件

祁南煤矿上保护层双工作面开采三维模型尺寸为 300.00 m×416.57 m×236.25 m,采用自下往上分层建模方法,定义煤岩层共计 26 层(组),煤(岩)层倾角 10°。模型单元格为八节点六面体,全模型共划分为 359 550 个网格单元,生成网格节点 378 572 个。模型四周及底部采用位移边界,顶部采用应力边界,由于 6₁ 煤实际埋深为 430 m,本模型中 6₁ 煤层距离模型顶部约 100 m,因此考虑模型顶部补偿 320 m 荷载(2.5×320÷100=8 MPa)。

2.2 本构模型与力学参数

采用 FLAC^{3D} 中的摩尔-库仑模型,其中区段窄煤柱采用应变硬化/应变软化模型。根据祁南煤矿的地质资料,结合该煤矿柱状图和实际开采情况,确定数值模拟中各煤(岩)层、回采工作面的空间及层位关系,根据力学实验确定各煤层、岩层的力学参数,如表 1 所示。

地层时代			层厚/m 平均厚度/m	岩性柱状 (1:200)	岩性描述	
系	统	组				
二 叠 系	下 石 盒 统	下 子 组	粉砂岩	4.7~7.7 6.2		土黄色, 块状, 裂隙发育, 含有紫红色磷铁质, 具水平层理
			泥岩	2.5~17.9 10.2		黑灰色, 具紫斑状, 致密块状, 具滑面, 含有少量植化碎片
			粉砂岩	3.0~16.7 9.8		深灰色, 细粉砂质, 块状, 含少量植化碎片, 具水平层理
			细砂岩	2.6~7.5 5.0		浅灰色, 以石英长石为骨架成分, 砂质胶结, 裂隙较发育, 含有菱铁质结核, 具水平层理, 含植化碎片
			泥岩	5.9~32.5 19.6		深灰色, 致密块状, 具滑面, 水平层理, 含有少量植化碎片
			6 ₁ 煤	1.5~2.0 1.7		黑色, 油脂光泽, 黑褐色条痕易脆呈粉末或鳞片状, 宏观为亮~半亮型煤
			泥岩	0~8.8 4.4		灰~深灰色, 含粉砂质, 致密, 碎块状, 富含植化碎片, 遇水易膨胀、泥化
			细粉砂岩	0~6.4 3.2		深灰色, 细粉砂质, 块状, 含少量植化碎片, 具水平层理
			6 ₂ 煤	1.3~1.7 1.5		黑色, 块状, 次为粉末状, 油脂光泽, 属半亮型煤
			泥岩	2~4.8 3.4		深灰色, 块状, 致密, 富含植化碎片
			粉砂岩	0~4.4 2.2		灰色, 块状, 致密, 含有泥质成分, 水平层理
			6 ₃ 煤	1.0~1.6 1.3		黑色, 块状, 玻璃光泽, 亮~半亮型煤
			泥岩	0~4.5 2.3		深灰色, 块状, 致密, 富含植化碎片
			粉砂岩	0~7.6 3.8		灰色, 块状, 致密, 含有泥质成分, 水平层理
			煤线	0~0.4 0.2		黑色粉末状, 弱玻璃光泽, 半亮型煤
			泥岩	2.1~4.7 3.4		深灰色块状, 上部含炭质较高, 下部含植化碎片
			中粒砂岩	14.3~20.6 17.4		灰白色, 厚层, 块状, 具水平层理
			7 ₁ 煤	0~1.9 0.9		黑色, 粉末状, 次为碎块状, 半亮型煤, 夹有炭质泥岩
泥岩	3.0~7.0 5.0		深灰色块状, 上部含炭质较高, 下部含植化碎片			
7 ₂ 煤	0.72~6.85 2.99		黑色, 粉末状, 次为碎块状, 半亮型煤, 夹有炭质泥岩。次为一层泥岩或炭质泥岩夹矸			

图1 祁南煤矿82采区主采煤层综合柱状图

表1 祁南煤矿围岩力学参数

岩石类别	容重/(kg/m ³)	弹模/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	膨胀角/(°)	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2 550	19.0	0.25	1.80	1.30	6	39.2
粉砂质泥岩	2 500	5.3	0.27	1.00	0.80	10	33.1
泥质粉砂岩	2 450	18.0	0.25	1.50	1.20	6	39.2
砂质泥岩	2 450	5.3	0.27	1.10	0.60	10	33.1
泥岩	2 350	4.5	0.18	0.70	0.33	10	31.0
6 ₁ 号煤	1 400	2.8	0.21	0.55	0.20	10	30.0
7 ₂ 号煤	1 450	2.8	0.21	0.50	0.20	10	29.0
细砂岩	2 550	21.0	0.23	2.60	1.60	5	41.2

考虑6₁25工作面回采时,区段窄煤柱经受二次采动影响被压缩,煤柱发生塑性破坏,该区段窄煤柱采用FLAC^{3D}中应变软化本构模型,煤柱力学参数如表2所示。

表2 煤体应变软化参数

岩石类别	coh / MPa	膨胀角/(°)	table(c, f)	由线性线段近似表示的黏聚力(c)和内摩擦角(f)的点			
6 ₁ 煤	0.55	30	ftab	(0, 30)	(0.005, 29)	(0.036, 28)	(0.100, 28)
			ctab	(0, 0.550)	(0.005, 0.550)	(0.042, 0.032)	(0.100, 0.023)

2.3 模拟方案

采场布置:该模型中定义 Y 方向为走向方向,工作面回采沿着 Y 轴正方向进行, X 方向为倾向方向.根据祁南煤矿开采实际,6₁23和6₁25工作面的倾斜长度(考虑煤层倾角 10°)均为140 m,走向回采长度按照最大180 m考虑.

开挖方案:沿着 Y 轴正方向开挖,每步开挖10 m,自动迭代至平衡,6₁23工作面开挖完毕并达到平衡后进行6₁25工作面的开挖,6₁23和6₁25工作面单次回采步距相同.

考察方案:为了全面分析上保护层双工作面开采过程中的围岩应力场、岩层变形移动等随工作面推进的动态演变情况,结合上保护层双工作面在模型的布置位置,制定了上保护层双工作面开采剖面考察方案,如图2所示.

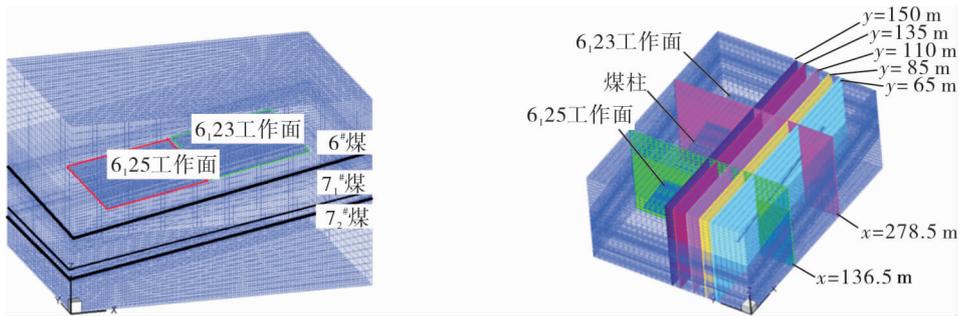


图2 上保护层6₁23和6₁25双工作面布置模型与卸压范围效果考察剖面

3 结果分析

3.1 应力演化分析

3.1.1 6₁23和6₁25工作面依次回采过程中走向方向围岩垂直应力分布

上保护层双工作面依次回采过程中,开采走向方向围岩垂直应力分布如图3所示,回采对7₂煤走向方向垂直应力的影响如图4所示.

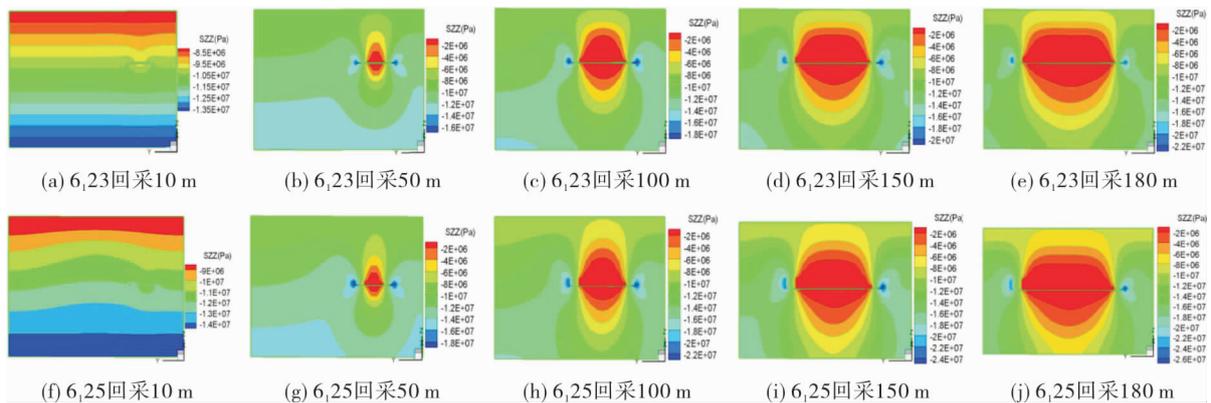


图3 上保护层双工作面依次回采过程中走向方向垂直应力分布

由图3和图4可知:

1) 当上保护层双工作面分别自切眼向前推进10 m时,6₁23和6₁25工作面采空区下方7₂煤在走向方向上围岩受采动影响较小,应力降低不明显.

2) 当双工作面分别自切眼向前推进50 m时,6₁23采空区下方7₂煤层的垂直应力由初始11.7降至9.0 MPa,工作面前方煤壁和切眼后方煤壁的垂直应力由10升至17 MPa;6₁25采空区下方7₂煤层垂直应力由13.5降至10.2 MPa,工作面前方煤壁和切眼后方煤壁的垂直应力升至18 MPa.

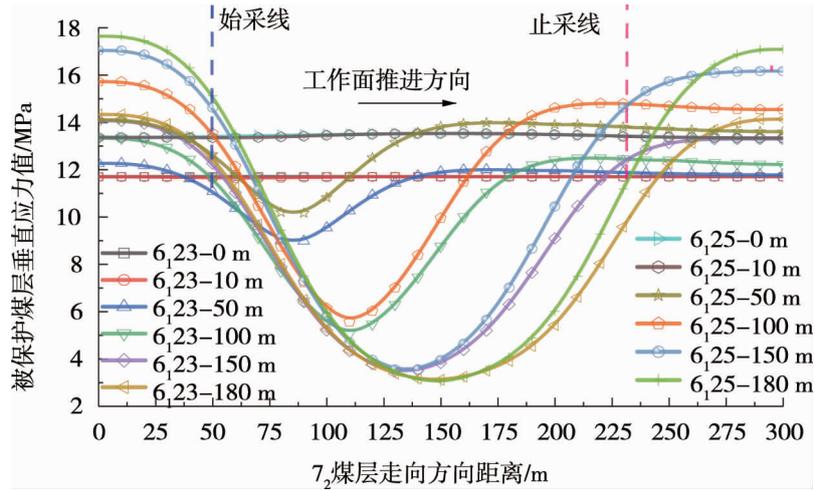


图4 上保护层双工作面依次回采对7₂煤走向方向垂直应力的影响

3)当双工作面分别自切眼向前推进100 m时,6₁₂₃采空区下方7₂煤层的垂直应力降至5.07 MPa,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁应力集中升至20 MPa;6₁₂₅采空区下方7₂煤层垂直应力降至5.57 MPa,卸压范围较回采50 m时有明显扩大,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁垂直应力升至22 MPa.

4)当双工作面分别自切眼向前推进150 m时,6₁₂₃采空区下方7₂煤层的垂直应力降至3.48 MPa,竖直方向上卸压范围较回采100 m时略有扩大,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁集中应力值约为20 MPa,升高不明显;6₁₂₅采空区下方7₂煤层垂直应力降至3.56 MPa,竖直方向上卸压范围较回采100 m时略有扩大,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁垂直应力升至24 MPa.

5)当双工作面分别自切眼向前推进180 m时,6₁₂₃采空区下方7₂煤层的垂直应力降至3.12 MPa,竖直方向上卸压范围较回采150 m时扩大不明显,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁应力集中升至22 MPa;6₁₂₅采空区下方7₂煤层垂直应力降至3.03 MPa,竖直方向上卸压范围较回采150 m时扩大也不明显,工作面前方煤壁和开切眼后方煤壁垂直应力升至26 MPa.

3.1.2 6₁₂₃和6₁₂₅工作面依次回采过程中倾斜方向围岩垂直应力分布

上保护层双工作面依次回采过程中,开采倾斜方向围岩垂直应力分布如图5所示,回采对7₂煤倾向方向垂直应力的影响如图6所示.

由图5和图6可知:

1)当上保护层双工作面分别自切眼向前推进10 m时,6₁₂₃和6₁₂₅工作面在倾向方向上围岩受采动影响较小,应力降低不明显,但6₁₂₅工作面开采对6₁₂₃采空区上下部煤岩体垂直应力产生了影响,6₁₂₃采空区下方7₂煤层的垂直应力降至9.08 MPa,当6₁₂₅工作面接续开采时,应力集中主要分布在6₁₂₅运输巷侧煤壁、6₁₂₃与6₁₂₅工作面间区段保护煤柱、6₁₂₃回风巷侧煤壁,应力峰值达到22 MPa.

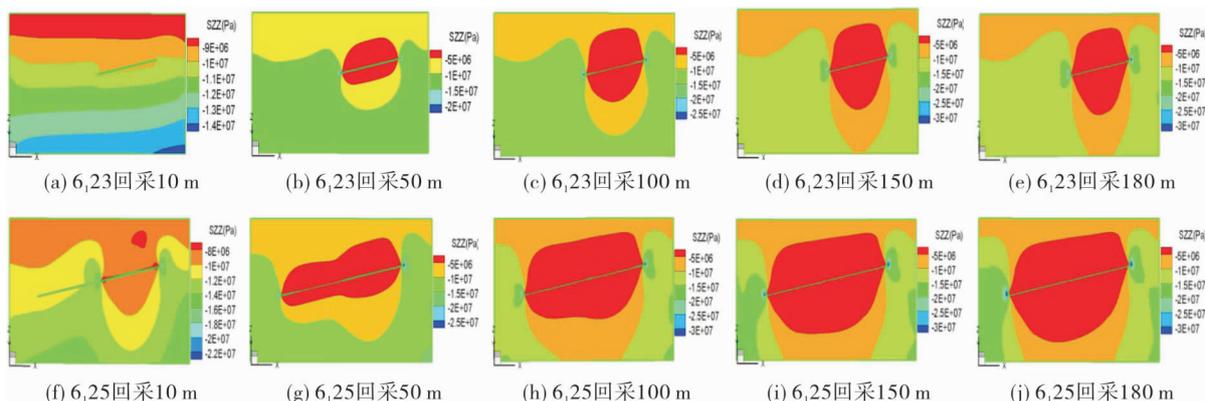


图5 上保护层双工作面依次回采过程中倾向方向垂直应力分布

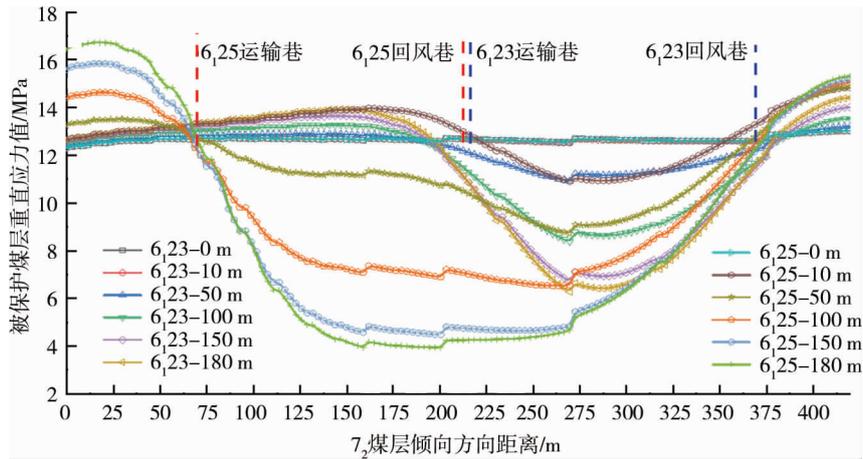


图6 上保护层双工作面依次回采对 7_2 煤倾向方向垂直应力的影响

2)当双工作面分别自切眼向前推进50 m时,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力由初始值降至10.9 MPa,6₁23运输巷与回风巷两侧煤壁均出现了应力集中,垂直应力升至22 MPa;6₁25采空区下方 7_2 煤层垂直应力降至11.1 MPa,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至8.7 MPa,6₁23与6₁25工作面间区段保护煤柱内部应力集中消失,卸压区域连成一体,呈倾倒的“葫芦型”;其中,6₁25工作面形成的卸压区域小于6₁23工作面的卸压区,应力集中区域分布在6₁25运输巷侧煤壁、6₁23回风巷侧煤壁,垂直应力升至28 MPa.

3)当双工作面分别自切眼向前推进100 m时,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至8.34 MPa,竖直方向上卸压范围较回采50 m时明显扩大.6₁23运输巷与回风巷两侧煤壁均出现应力集中,垂直应力升至28 MPa;6₁25采空区下方 7_2 煤层垂直应力降至7.05 MPa,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至6.51 MPa,“葫芦型”卸压连体区域中,由于6₁25工作面在竖直方向上(采场上部、下部)不断扩大,6₁25与6₁23工作面分别形成的卸压范围差异逐步缩小,6₁25运输巷侧煤壁、6₁23回风巷侧煤壁内的应力集中升至32 MPa.

4)当双工作面分别自切眼向前推进150 m时,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至6.69 MPa,竖直方向上卸压范围较回采100 m时略有扩大,6₁23运输巷与回风巷两侧煤壁应力集中至30 MPa;6₁25采空区下方 7_2 煤层垂直应力降至4.55 MPa,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至4.62 MPa,“葫芦型”卸压连体区域在竖直方向上略有扩大;6₁25运输巷侧煤壁、6₁23回风巷侧煤壁内的应力集中升至34 MPa.

5)当双工作面分别自切眼向前推进180 m时,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至6.25 MPa,竖直方向上卸压范围较回采150 m时无明显差别,6₁23运输巷、6₁23回风巷两侧煤壁应力集中至32 MPa;6₁25采空区下方 7_2 号煤层垂直应力降至3.92 MPa,6₁23采空区下方 7_2 煤层的垂直应力降至4.22 MPa,双工作面形成的卸压连体区域在竖直方向上较回采150 m时无明显差别;6₁25运输巷侧煤壁与6₁23回风巷侧煤壁内的应力集中维持在34 MPa.

3.2 位移演化分析

3.2.1 6₁23和6₁25工作面回采过程中走向方向围岩垂直位移演化特征

上保护层双工作面回采过程中,开采走向方向围岩垂直位移演化形态特征如图7所示,回采对 7_2 煤走向方向膨胀变形量的影响如图8所示.

由图7和图8可知:

1)当上保护层双工作面分别自切眼向前推进10 m时,6₁23与6₁25工作面走向方向采场上覆岩层产生竖向变形,顶板最大变形量分别为0.16和0.18 m,下部岩层变形量均极小.

2)当双工作面分别自切眼向前推进50 m时,6₁23工作面采空区上部岩层竖向变形增至0.24 m,采空

区下部岩层产生底鼓变形,7₂煤层的膨胀变形量最大达到3‰;6₁₂₅工作面采空区上部岩层竖向变形增至1.4 m,采空区下部岩层产生底鼓变形,7₂煤层的膨胀变形量最大达到2.7‰;7₂₅与7₂₇工作面煤层膨胀变形量在走向范围内多处于2‰~3‰水平。

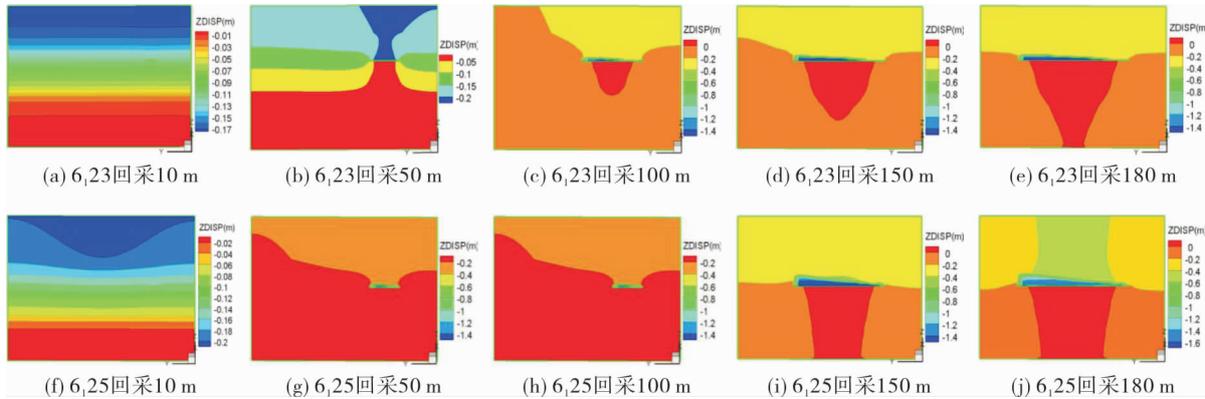


图7 上保护层双工作面依次回采过程中走向方向垂直位移分布

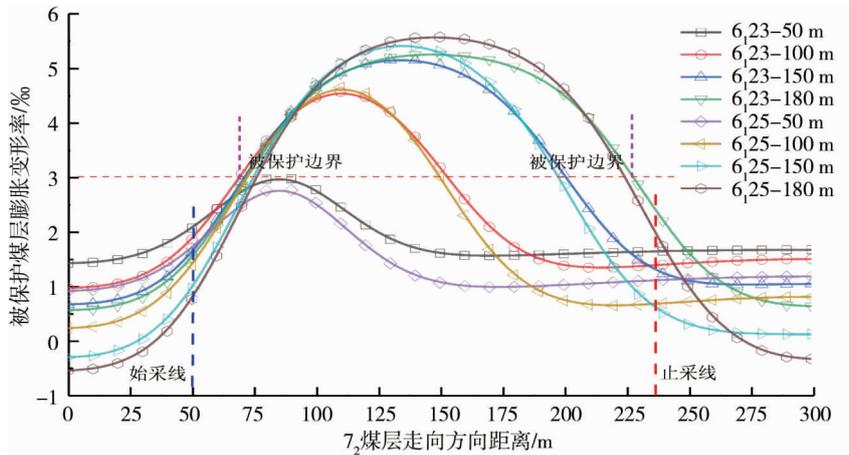


图8 上保护层双工作面依次回采对7₂号煤走向方向膨胀变形量的影响

3)当双工作面分别自切眼向前推进100 m时,6₁₂₃工作面采空区上部岩层竖向变形增至1.4 m,6₁₂₃采空区下部7₂煤层的膨胀变形量最大达到4.5‰;6₁₂₅工作面采空区上部岩层竖向变形增至1.5 m,7₂煤层的膨胀变形量最大达到4.6‰.7₂₅与7₂₇工作面煤层膨胀变形量在走向范围内多处于3‰~5‰水平;此外,6₁₂₃和6₁₂₅工作面回采时,上覆岩层变形移动范围随工作面推进继续向上发展。

4)当双工作面分别自切眼向前推进150 m时,6₁₂₃工作面采空区上部岩层竖向变形增至1.5 m,7₂号煤层的膨胀变形量最大达到5.1‰;6₁₂₅工作面采空区上部岩层竖向变形增至1.6 m,其下部7₂煤层的膨胀变形量最大达到5.36‰;6₁₂₅回采工作面的前方煤壁下部7₂煤层压缩变形率为0.4‰;7₂₅和7₂₇工作面煤层膨胀变形量在走向范围内多处于3‰~6‰水平。

5)当双工作面分别自切眼向前推进180 m时,6₁₂₃采空区上部岩层竖向变形维持在1.5 m,下部7₂煤层的膨胀变形量最大达到5.25‰.6₁₂₅工作面采空区上部岩层竖向变形维持在1.6 m,下部7₂煤层的膨胀变形量最大达到5.58‰;6₁₂₅回采工作面的前方煤壁和开切眼后方煤壁下部,7₂煤层压缩变形继续增加,煤层压缩率分别达到0.6‰和0.3‰;7₂₅与7₂₇工作面煤层膨胀变形量在走向范围内多处于4‰~6‰水平。

3.2.2 6₁₂₃和6₁₂₅工作面回采过程中倾向方向围岩垂直位移分布

祁南煤矿上保护层双工作面开采倾向方向围岩垂直位移演化形态特征如图9所示。

由图9可知:上保护层双工作面开采倾向方向围岩变形移动与走向方向基本一致,双工作面推进10 m

后,倾向方向采场上覆岩层产生竖向变形,顶板最大变形量达 0.16 和 0.18 m,下部岩层变形量极小;双工作面推进 50 m 后,采空区上部岩层竖向变形分别增至 0.24 和 1.40 m,上覆岩层变形移动范围随工作面推进向上继续发展,下部岩层产生底鼓变形;双工作面推进 100 m 后,采空区上部岩层竖向变形增至 1.4 和 1.5 m,且靠近回风巷侧上覆岩层的变形移动较运输巷侧略大;双工作面推进 150m 后,采空区上部岩层竖向变形增至 1.5 和 1.6 m;双工作面推进 180 m 后,采空区上部岩层竖向变形维持在 1.5 和 1.6 m,上覆岩层变形移动范围不再随工作面推进向上继续发展。

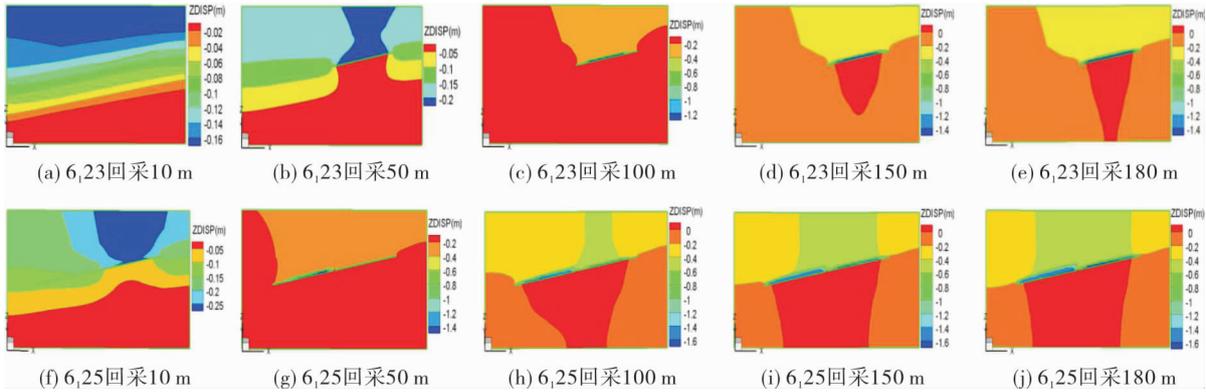


图 9 上保护层双工作面依次回采过程中倾向方向垂直位移分布

上保护层双工作面依次回采对 7₂ 煤倾向方向膨胀变形量的影响如图 10 所示。

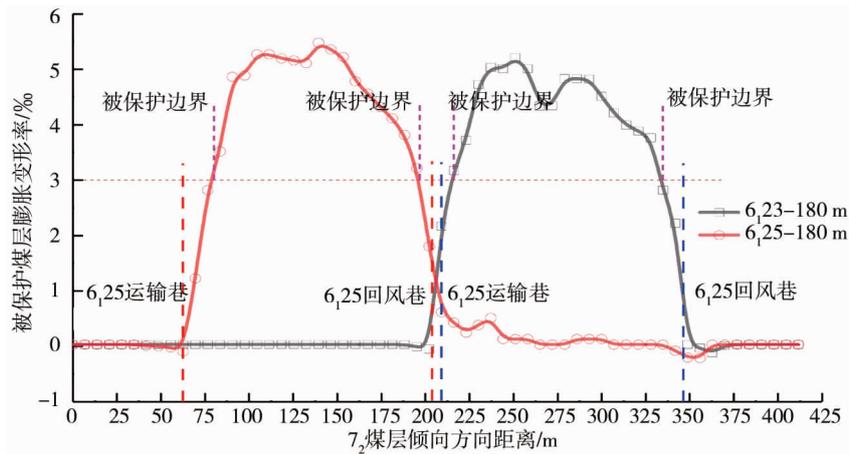


图 10 上保护层双工作面依次回采对 7₂ 号煤倾向方向膨胀变形量的影响

由图 10 可知:上保护层双工作面开采后(回采 180 m)被保护煤层(7₂25,7₂27)倾向方向均产生不同程度膨胀变形,随着回采工作面的推进,采空区中心区域被冒落矸石逐步压实,继而限制采空区下部被保护煤层的膨胀变形,最大膨胀变形出现在采空区下伏煤层的两侧,6₁23 与 6₁25 采空区下部 7₂ 煤层的最大膨胀变形量分别为 5.25‰和 5.58‰。同时,在倾向方向上,6₁23 回采工作面左右两侧、回风巷侧及 6₁25 回采工作面运输巷侧煤壁下部 7₂ 煤层均产生较小的压缩变形。

4 被保护层保护范围划定

4.1 走向方向

按照煤层膨胀变形量大于 3‰即视为充分卸压区,对祁南煤矿上保护层双工作面开采走向卸压保护范围进行划定.6₁25 回采工作面开采完后,7₂27 回采工作面走向方向煤层膨胀变形量大于 3‰的范围为 86 ~ 216 m,6₁ 煤与 7₂ 煤层间垂距取 55 m,可得出 6₁25 工作面开采后 7₂27 工作面走向方向的卸压保护范围:开切眼(始采线)垂直投影往里 26 m 处,走向下部卸压角为 64.5°,停(止)采线垂直投影往里 26 m 处,走向下部卸压角为 64.5°,如图 11 所示。

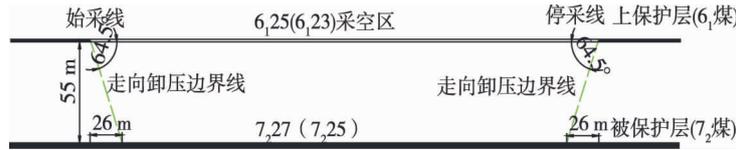


图 11 上保护层工作面采后被保护层工作面走向卸压保护范围

4.2 倾斜方向卸压角确定

按照煤层膨胀变形量大于 3‰即视为充分卸压区,对祁南煤矿上保护层双工作面开采倾向卸压保护范围进行划定.6₁23 回采工作面开采完后,7₂25 回采工作面走向方向煤层膨胀变形量大于 3‰的范围为 222 ~ 330 m,6₁ 煤与 7₂ 煤层间垂距取 55 m,可得出 6₁23 工作面开采后 7₂25 工作面倾向方向的卸压保护范围:6₁23 运输巷垂直投影往里 12.24 m 处,倾向下部卸压角为 77.4°,6₁23 回风巷垂直投影往里 18.62 m 处,走向下部卸压角为 71.3°.6₁25 回采工作面开采完后,7₂27 回采工作面走向方向煤层膨胀变形量大于 3‰的范围为 84~193 m,6₁ 号煤与 7₂ 号煤层间垂距取 55 m,可得出 6₁25 工作面开采后 7₂27 工作面倾向方向的卸压保护范围:6₁25 运输巷垂直投影往里 16.05 m 处,倾向下部卸压角为 73.4°,6₁25 回风巷垂直投影往里 13.8 m 处,走向上部卸压角为 75.8°,如图 12 所示.

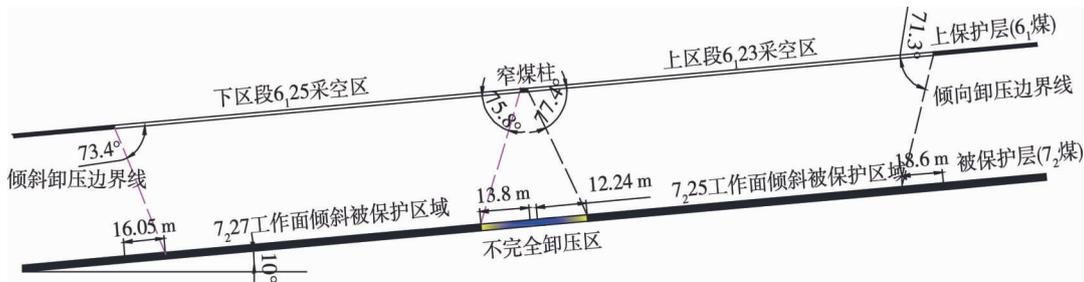


图 12 上保护层工作面采后被保护层工作面倾向卸压保护范围

5 上保护层双工作面开采卸压保护范围考察

5.1 倾斜方向卸压范围考察

倾斜方向以 7₂25 下部卸压角为考察对象,在 8₂ 采区 7₂ 煤底板南翼轨道大巷选择 g40 点向 g39 点前进 22.7 m 的位置为倾向边界卸压角观测孔钻场,在该钻场分别施工 4 个倾向方向保护范围的观测钻孔,即以原参考卸压角 75°为基准,其余 3 个钻孔分别与基准孔外偏 5°,内偏 5°和数值模拟卸压角 77.4°,钻孔编号分别为 KYQ₇-1(内偏 5°,δ₄₁ = 70°)、KYQ₇-2(基准 δ₄₂ = 75°)、KYQ₇-3(模拟值 δ₄₃ = 77.4°)、KYQ₇-4(外偏 5°,δ₄₄ = 80°),见图 13.

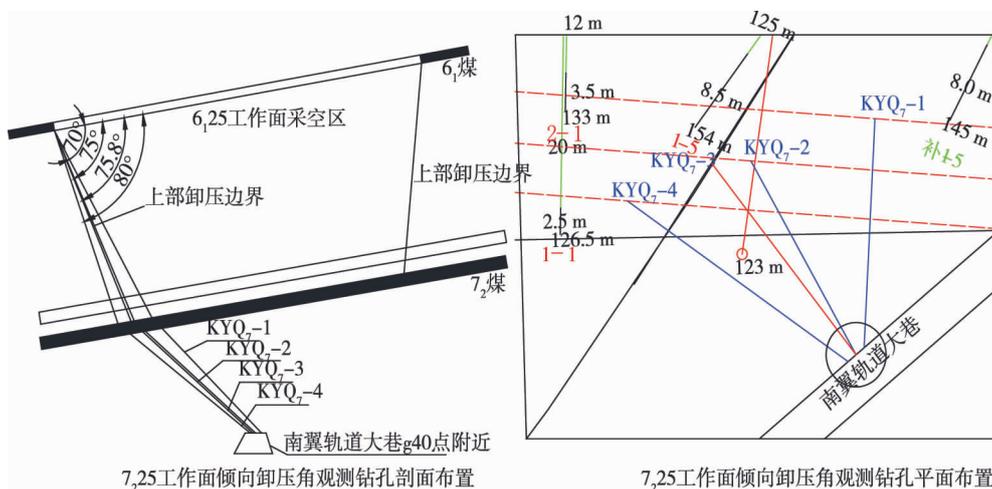


图 13 7₂25 工作面卸压倾斜方向下部卸压角实测钻孔布置

图 14 是倾斜方向卸压范围的实测数据,可以看出:自 2015 年 1 月 6 日安装测压表后,各测压钻孔的瓦斯压力逐渐升高,至 2015 年 1 月 20 日之后,钻孔 KYQ₇-1, KYQ₇-2, KYQ₇-3 和 KYQ₇-4 的瓦斯压力分别稳定在 0.4 , 0.2 , 0.3 和 0.4 MPa. 当工作面推进近 200 m 接近各测压钻孔时, KYQ₇-1, KYQ₇-2 和 KYQ₇-3 钻孔的瓦斯压力相继下降至 0 MPa, KYQ₇-4 瓦斯压力由原来的 0.4 MPa 降低到 0.2 MPa. 说明在倾斜方向卸压范围的实测值超出理论参考值,即外偏 5° 的 KYQ₇-4 钻孔范围.

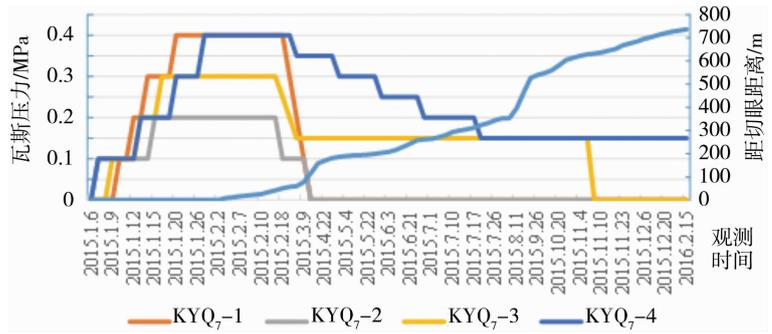


图 14 7₂₅ 工作面卸压倾斜方向下部各卸压角瓦斯压力实测结果

5.2 走向方向卸压范围考察

在 8₂ 采区 7 煤底板南翼轨道大巷选择从 g18 点向 g26 点方向前进 32.13 m 为开口位置开设钻场,在该钻场分别施工 4 个走向方向保护范围的观测钻孔,钻孔编号分别为 KYZ₇-1 (内偏 5°, $\delta_{s1} = 55^\circ$)、KYZ₇-2 (理论 $\delta_{s2} = 60^\circ$)、KYZ₇-3 (模拟值 $\delta_{s3} = 64.5^\circ$) 和 KYZ₇-4 (外偏 5°, $\delta_{s4} = 65^\circ$), 见图 15.

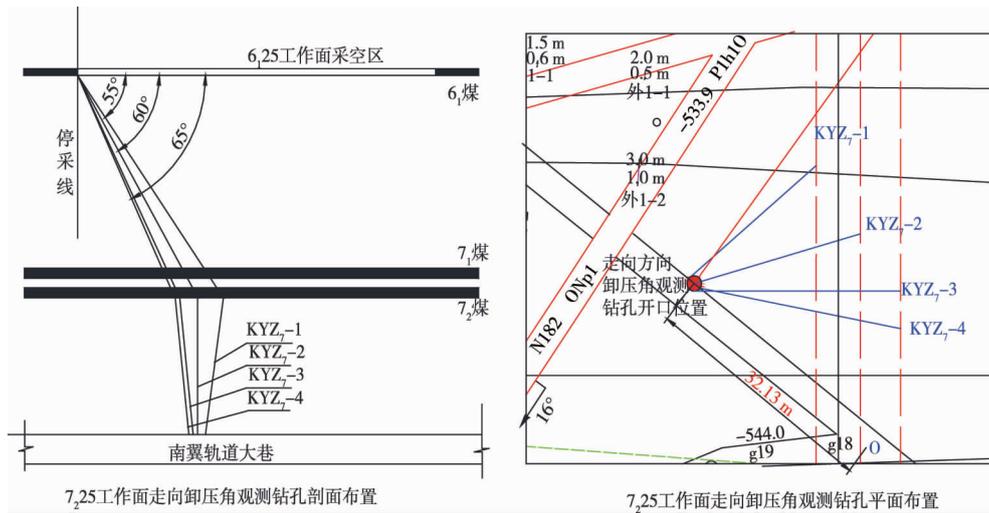


图 15 7₂₅ 工作面卸压走向方向下部卸压角实测钻孔布置

走向方向卸压范围实测钻孔施工始于 2015 年 1 月 6 日, 实测数据如图 16 所示.

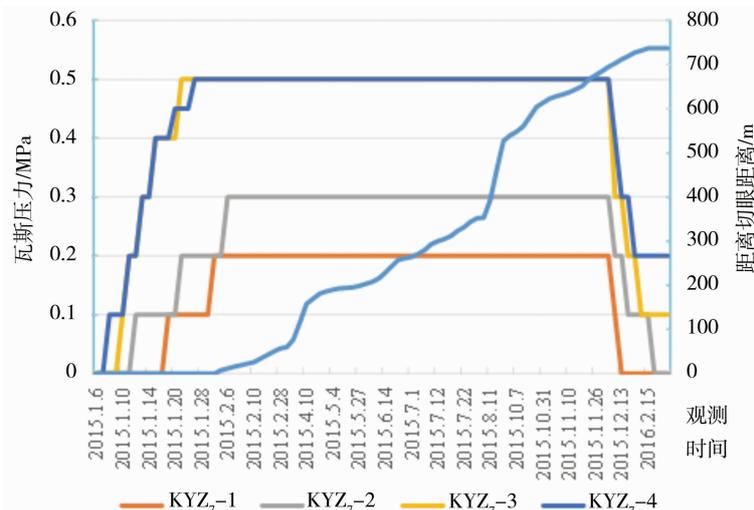


图 16 7₂₅ 工作面卸压走向方向下部卸压角实测结果

由图 16 可以看出:测试钻孔 KYZ₇-1, KYZ₇-2, KYZ₇-3 和 KYZ₇-4 的原始瓦斯压力分别稳定在 0.2, 0.3, 0.5 和 0.5 MPa, 随工作面不断推进靠近测定钻孔, 各钻孔的瓦斯压力逐渐释放, 压力值开始减少: KYZ₇-1 与 KYZ₇-2 钻孔的瓦斯压力在距切眼方向 695 m 位置时急剧衰减至 0 MPa, 数值模拟参考点 KYZ₇-3 钻孔在距切眼 703 m 位置开始下降至 0.1 MPa, 降幅为 80%; 外侧偏离 5° 边界线上的 KYZ₇-4 钻孔的瓦斯压力也在靠近停采线处(距切眼 712 m)开始下降至 0.2 MPa, 降幅为 60%. 说明靠近理论参考外偏 5° 的卸压角边界线也在其保护层开采的有效卸压范围之内。

6 结论

1) 随着上保护层双工作面推进, 采空区下方被保护煤层的垂直应力逐渐降低, 回采工作面前方的垂直应力逐渐增大; 采空区上部岩层竖向变形增大, 下部岩层底鼓变形增大, 其中, 采空区下伏煤层两侧的膨胀变形最大。

2) 祁南煤矿 7₂25 工作面卸压保护范围实测结果显示, 上保护层双工作面走向与倾斜方向的下部卸压角分别为 65° 和 80°, 与模拟值(走向卸压角 64.5°、倾向卸压角 77.4°) 基本一致, 说明用数值模拟方法研究上保护层双工作面的卸压保护范围具有可行性。

参考文献:

- [1] 李成伟. 资源枯竭型煤炭企业战略转型研究——以萍乡矿业集团为例[D]. 南昌: 江西师范大学, 2015.
- [2] Gao H D, An B F, Han Z, et al. The Sustainable Development of Aged Coal Mine Achieved by Recovering Pillar-Blocked Coal Resources[J]. *Energies*, 2020, 13(15), 3912.
- [3] 孙宏达. 煤炭资源枯竭矿井煤层气(瓦斯)资源分布规律及资源评价方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [4] 罗文柯. 上覆巨厚火成岩下煤与瓦斯突出灾害危险性评估与防治对策[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2017: 1-9.
- [5] 李君利, 卿恩东, 余庆利. 永川煤矿-600 m 水平热害及治理方案[J]. *煤炭工程*, 2009, 12(8): 10-11.
- [6] 张东明, 张祥, 饶孜, 等. 瓦斯压力对卸荷原煤力学特性及能量特征的影响[J]. *安全与环境学报*, 19(1): 203-209.
- [7] 吴财芳, 王肖, 刘小磊, 等. 滇东老厂矿区多煤层条件下地应力特征及其影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 118-124.
- [8] 毕业武, 梁冰. 保护层开采上下被保护煤层卸压效应研究[J]. *煤*, 2011, 20(5): 10-12.
- [9] 苗法田, 孙东玲, 胡千庭. 煤与瓦斯突出冲击波的形成机理[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(3): 367-372.
- [10] Wu F S, Liu S W. Outburst Hazard Prediction Based on the Monitoring Data in Heading Face[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 2482: 786-790.
- [11] 王佳信, 周宗红, 张继华, 等. 煤与瓦斯突出危险性预测的 SaS-PNN 模型及应用[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(7): 1112-1118.
- [12] 李成成, 郭寿松. 基于瓦斯涌出特征的突出预警技术在新元矿的应用[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(3): 118-121.
- [13] 周金龙, 董洪凯, 李国强. 顺层定向长钻孔预抽煤层瓦斯区域防突措施效果检验方法研究[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(6): 69-72.
- [14] 于琦, 何瑛, 杨军伟. 开采保护层区域防突措施在煤矿中的应用[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(1): 204-205.
- [15] Cao J J. Practice of outburst prevention by pre-driving rock roadway unloading pressure of coal roadway strip in Fengcheng mining area[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 208(1), 012121.
- [16] Wang B. Comprehensive prevention and control of coal and gas outburst in south second well of Liziya coal mine[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 558(2), 022020.
- [17] 王关亮. 立体抽采瓦斯技术的研究与应用[J]. *矿业工程研究*, 2018, 33(1): 19-22.
- [18] 孙福龙, 王魁军, 梁忠秋. 底板抽采巷瓦斯抽采效果评价[J]. *煤炭科学技术*, 2014, 42(s1): 105-106.
- [19] 朱栋, 范育青, 陶祥令. 保护层开采过程中围岩应力演化规律研究[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(34): 10129-10135.
- [20] 胡国忠, 王宏图, 范晓刚, 等. 急倾斜俯伪斜上保护层保护范围的三维数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(s1): 2845-2852.
- [21] 陈思, 石必明, 穆朝民, 等. 保护层开采过程中增透效果及卸压范围研究[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(4): 45-49.
- [22] 梁海汀, 涂敏, 付宝杰. 单一关键层位置对保护层开采效果的影响[J]. *煤矿安全*, 2013, 44(2): 43-46.
- [23] 李圣伟, 高明忠, 谢晶, 等. 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.
- [24] 张哲. 保护层开采卸压瓦斯运移及抽采技术[J]. *煤炭工程*, 2018, 50(8): 61-64.