

采保护层底板卸压演变、瓦斯下降变化等研究较少。因此,本文以贵州省织金县某矿煤层群为研究对象,从理论上分析近距离保护层开采底板岩层的卸压规律和裂隙发育特征,综合理论公式和经验公式计算破坏深度,通过模拟分析受采动影响后底板卸压演变、应力分布等变化,并通过工程实践验证近距离煤层群保护层开采防突效果,结果对近距离煤层群瓦斯治理具有重要的现实指导意义。

2 保护层开采破坏深度分析

2.1 工程概况

该矿设计生产能力45万t/a,井田内共含可采煤及大部可采煤层10层,5号煤层煤厚1.54m,平均埋深331m,开采工作面1505m,平均走向长度145m,倾斜长度750m,9号煤层煤厚1.92m,平均埋深348m,顶底板以泥质粉砂岩、砂质泥岩、泥岩为主,将5号煤层作为保护层优先开采,之后开采处于保护区域的9号煤层,煤层间距最大为17m,综合柱状图如图1所示。

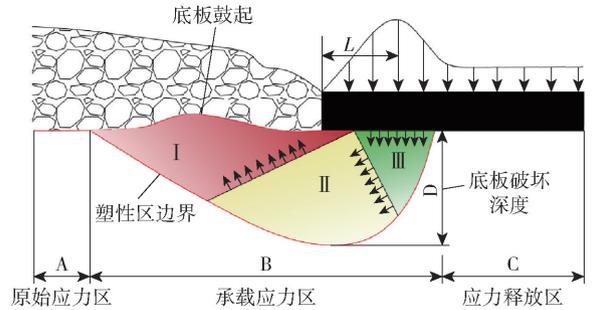
组	厚度/m	埋深/m	柱状	岩层名称
龙	16.99	317.73	泥质粉砂岩 粉砂质泥岩	泥质粉砂岩 粉砂质泥岩
	1.11	318.84	含泥灰岩	含泥灰岩
	6.95	325.79	砂质泥岩	砂质泥岩
潭	107	326.86	4号煤层	4号煤层
	3.39	330.25	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩
	1.54	331.79	5号煤层	5号煤层
	8.7	340.79	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩
	1.60	342.09	8号煤层	8号煤层
组	4.73	346.92	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩
	1.92	348.74	9号煤层	9号煤层
	3.90	352.64	泥质粉砂岩	泥质粉砂岩
	2.82	355.46	含泥灰岩	含泥灰岩

图1 综合柱状图

2.2 保护层开采防突机理分析

保护层开采后,采空区底板岩体趋向于发生应力松弛、向采空区膨胀和裂隙发育,工作面周围应力平衡被破坏导致采空区底板变形、断裂和移动等,造

成底板岩层的应力场和断裂场重新分布,沿工作面走向,底板岩层按应力水平可分为3个区域,即原始应力区(A)、承载应力区(B)、应力释放区(C)^[11],具体如图2所示。



I—主动极限区; II—过渡区; III—被动极限区

图2 底板的应力区和塑性变形示意图

根据底板岩层塑性破坏理论,当底板超前支承应力达到或超过岩体弹性极限时,底板岩体就会发生塑性变形,形成三个塑性区,即主动极限区(I)、过渡区(II)和被动极限区(III)。I区的岩体压缩并传递应力。当承载应力达到其极限载荷,引起岩体完全破坏时,承载应力区周围的塑性区会固结成单一区域。同时,II区的岩体滑向III区,应力传递,导致采空区的底板鼓起。

断裂充分发育的被动极限区(III)膨胀变形最为严重。且随着工作面的推进,底板塑性区继续移动。被动极限区(III)逐渐向应力释放区过渡,受保护煤层因应力解除而趋于膨胀,除原生裂隙外,还诱发次生裂隙。因此,煤体渗透率呈指数增长,为保护煤层卸压瓦斯抽采提供了有利条件^[12]。

2.3 破坏深度理论计算

保护层开采后,地应力由采空区上方顶板向煤壁侧向承载应力区转移,此外,采空区底板内部发育应力释放区,其一般深度在50~60m,甚至可以超过100m。随着底板深度的增加,应力释放速率逐渐减小。采空区底板裂隙深度一般在15~25m,因此,裂隙带的深度比应力释放带的深度要浅。

根据矿区工作面的实际情况,假设工作面前方煤岩体在地应力作用下对底板应力的重新分布没有影响,将下伏岩层作为连续弹性材料处理,底板破坏深度如图3所示。利用Wischik对塑性转移过程中岩土层极限承载力的综合计算方法,得到底板岩体的开采破坏深度^[13-14],得到在煤岩体边缘支承压力作用下的底板岩体内极限塑性破坏区的最大破坏深度。

底板煤岩体的塑性区域边界如图3所示,并且由

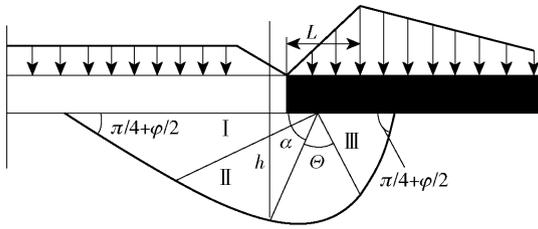


图3 支撑压力形成的底板破坏深度

岩土极限承载的综合计算公式1,可得到煤岩体在支撑压力作用下的边缘极限塑性破坏的最大深度。

$$D_{max} = \frac{L \cos \phi}{2 \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} e^{\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)} \tan \phi \quad (1)$$

式中, D_{max} 为底板最大破坏深度, m; L 为极限平衡区长度, 取 10 m; ϕ 为内摩擦角, 取 35° ;

底板岩体破坏深度随 θ 角的不同而发生改变, 当 $dh/d\theta=0$ 时可以求出底板破坏区的最大深度, 将实际工程地质条件代入式(1)计算, 得 $D_{max} = 18.5$ m, 即 5 号煤层开采后底板的最大破坏深度为 18.5 m。

2.4 破坏深度经验公式计算

由于底板受采动影响, 其破坏深度在一定程度上与工作面倾斜长度和埋深有关, 结合保护层现场工程地质、顶底板特征、水文地质等条件, 以及综合《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》和《三下采煤规程》中的经验公式, 运用数理统计方法得到底板破坏深度关系式^[15]

$$D_{max} = 0.0318H + 4.08 \ln \frac{l}{35} + 0.153d + 1.279 \quad (2)$$

式中, H 为 5 号煤层埋深, 取 331 m; l 为工作面斜长, 取 145 m; d 为工作面采高, 取 1.54 m。

经式(2)计算, 5 号煤层开采后底板的最大破坏深度为 17.8 m, 结合理论公式计算结果的采动破坏深度 18.5 m, 综合考虑煤矿实际工程条件将底板破坏深度考虑为 17.8 m, 大于 5 号煤层与 9 号煤层的层间距 17 m, 导致下煤层岩层发生破坏, 即 9 号煤层在保护层开采卸压范围内。

3 数值模拟分析

5 号煤层作为 9 号煤层的上保护层进行开采, 为明确保护层开采后的具体影响情况, 以贵州某矿 5 号、9 号煤层为工程地质条件, 利用数值模拟软件, 建立模型模拟保护层在推进不同位置时底板的应力分布及塑性区变化情况。

3.1 数值模型

结合该矿实际情况, 模型的几何尺寸长 × 宽 × 高为 160 m × 220 m × 100 m, 数值模型如图 4 所示, 由于煤层实际埋深平均为 331 m, 在模型中的埋深为 151 m, 为模拟上覆岩层的自重作用, 取覆岩平均容重为 2.5×10^4 N/m³, 通过公式 3 计算得出在模型上部边界施加 4.5 MPa 的垂直补偿应力作为顶部应力边界。模型采用力学参数见表 1。

$$F = r \times (H - h) \quad (3)$$

其中, F 为上覆岩层载荷, N/m²; r 为覆岩平均容重, N/m³; H 为煤层实际埋深, m; h 为煤层在模型中埋深, m。

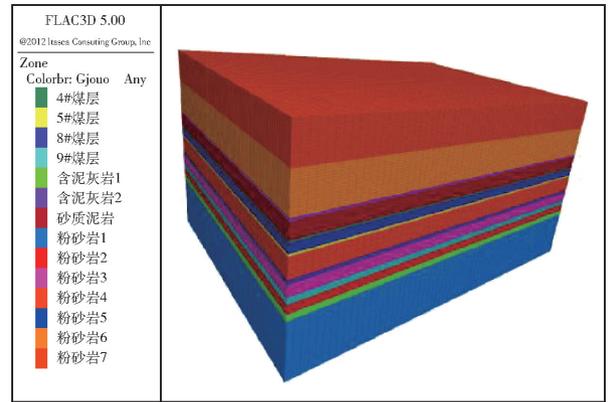


图4 数值模型示意图

表1 计算采用的岩石力学参数

岩层	密度/ kg·m ⁻³	弹性 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	内聚 力/MPa	抗拉 强度/ MPa	内摩 擦角/ (°)
含泥灰岩	2 240	9	17.4	4.3	2.3	26
砂质泥岩	2 110	7.7	16.7	4.5	2.5	24
4 号煤层	1 600	6	14	1.6	1.2	22
泥质粉砂岩	2 100	7.8	15.2	4	2.5	24
5 号煤层	1 600	6	14	1.6	1.2	22
泥质粉砂岩	2 100	7.8	15.2	4	2.5	24
8 号煤层	1 600	6	14	1.6	1.2	22
泥质粉砂岩	2 100	7.8	15.2	4	2.5	24
9 号煤层	1 600	6	14	1.6	1.2	22
泥质粉砂岩	2 100	7.8	15.2	4	2.5	24
含泥灰岩	2 240	9	17.4	4.3	2.3	26
粉砂岩	2 100	7.8	15.2	4	2.5	24

3.2 底板应力分布分析

开采保护层后, 地应力发生变化, 一定范围内煤岩体的原始应力-应变状态也发生改变。导致随工作面推进, 不同推进距离下被保护层垂直应力分布不同。如图 5 所示为工作面推至不同位置时底板垂

直应力分布。保护层回采后,被保护层出现了明显

的卸压情况。

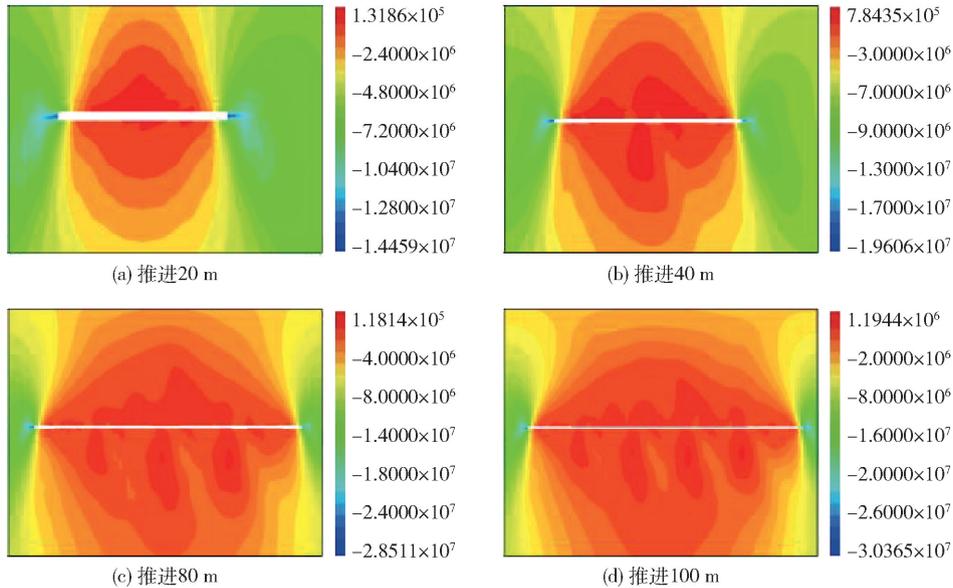


图5 工作面推至不同位置时底板垂直应力分布

由图5(a)可以看出,工作面推进长度为20 m时,采空区顶底板压力较小,此时顶板卸压深度为5 m;由图5(b)可以看出,当工作面推进至40 m时,顶底板卸压区域明显增大,此时底板卸压范围达到25 m,9号煤层已经在卸压范围内;由图5(c)和(d)可以看出,当工作面推进至80 m、100 m时,在垂直方向上底板卸压范围没有持续增长,此时卸压深度范围最大为33 m。综上所述,随着保护层开采工作面的推进,底板的卸压深度会随着推进距离的增加而增加,达到一定值以后会趋于稳定,而5号煤层与9号煤层层间距14.6 m也处于卸压深度内,产生良好的卸压效果。

3.3 底板塑性区分布分析

工作面推进过程中,其顶底板发生张拉屈服,并且随着工作面不断推进,中部拉应力区和两端塑性区的破坏范围与发育深度均在不断扩大^[16],工作面推进不同距离时底板岩体塑性区分布如图6所示。

由图6(a)可以看出,当工作面推进至20 m时,采空区中部塑性区域相对较少,破坏深度在3 m左右;由图6(b)可以看出,当工作面推进至40 m时,采空区中部塑性区域范围增加,且开始链接成片显示,此时底板塑性区域最大破坏深度达到20 m;由图6(c)和图6(d)看出,当工作面推进至80 m和100 m时塑性区演化规律没有明显差异,分别为22.5 m和23 m,底板最大塑性破坏深度无明显增加,水平塑性区域扩大。综上所述,随着5号煤层工作面的推进,塑性破坏区在顶底板垂直方向变化不大,最

大破坏深度有23 m,9号煤层在其破坏范围内。

4 保护层开采效果考察

开采保护层后,被保护层在一定程度上得到了卸压。为进一步验证实际保护效果,将1505运输巷、1503运输巷作为实验场所,对5号煤层开采后区域对下部9号煤层消突效果进行考察。

4.1 施工方案

从5号煤巷打下向测压孔测定9号煤层瓦斯压力。在1505运输巷布置两组(共4个)测压钻孔测定9号煤层瓦斯压力,具体如图7所示。

首先测定9号煤层原始瓦斯压力,待压力稳定后,5煤号工作面回采经过测压地点,继续观察开采保护层后瓦斯压力的变化情况。在1503运输巷布置一组(共4个)测压钻孔,分别考察9号煤层原始瓦斯压力和开采保护层后的9号煤层瓦斯压力。钻孔参数见表2。

4.2 卸压效果考察

安装测定装置后,开始测定瓦斯压力,每天观测并记录各钻孔瓦斯压力值,钻孔压力随时间变化曲线如图8、图9、图10所示。

由图8可知,从9-1、9-2钻孔瓦斯压力测定情况看,在5号煤层回采工作面未推进到测压地点时,测得9号煤层原始瓦斯压力分别是0.42 MPa、0.41 MPa,5号煤层回采工作面推进约220 m并超过测压地点后,下方9号煤层测点测得瓦斯压力开

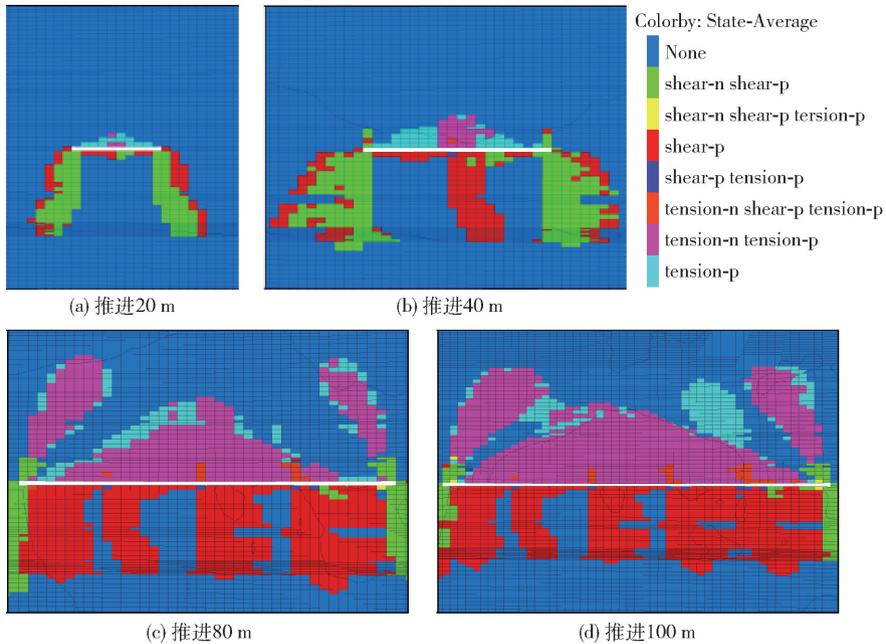


图6 工作面推进不同距离时底板岩体塑性区分布

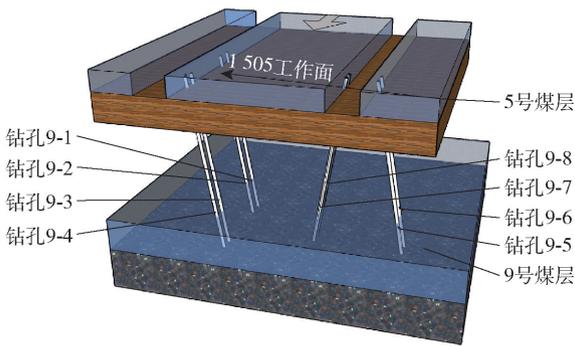


图7 测压钻孔布置示意图

表2 钻孔布置参数

钻孔编号	倾角/(°)	钻孔长度/m	封孔深度/m	观测时间/d
9-1	-45	43.3	20	83
9-2	-42	46.1	20	82
9-3	-40	48	20	81
9-4	-41	47.2	20	80
9-5	-38	52.2	20	36
9-6	-40	47.5	20	36
9-7	-43	43.9	20	35
9-8	-43	44.4	20	35

始下降,最终稳定在 0.18 MPa、0.22 MPa,说明说明 5 煤层作为保护层开采对 9 煤层的瓦斯压力释放作用非常明显,下降范围分别为 57.2% 和 47.3%。

图9可知,由于9-3、9-4号钻孔在1、2号钻孔后方,从瓦斯压力测定情况看,在5号煤层回采工作面未推进到测压地点时,测得9号煤层原始瓦斯压力

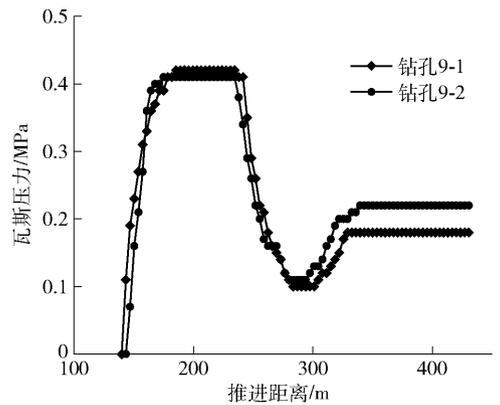


图8 9-1、9-2 钻孔瓦斯压力随时间变化曲线

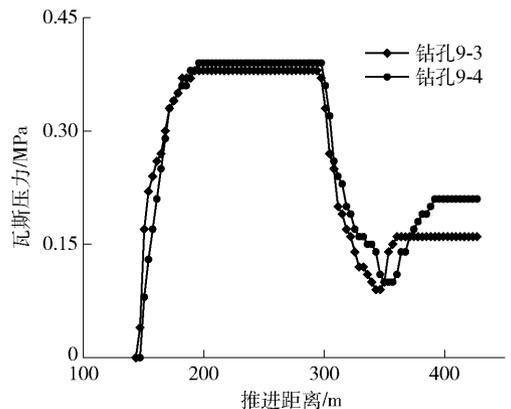


图9 9-3、9-4 钻孔瓦斯压力随时间变化曲线

分别是 0.38 MPa、0.39 MPa,当 5 号煤层回采工作面推进约 300 m 并超过测压地点后,9 号煤层瓦斯压

力开始下降,最终稳定在 0.16 MPa、0.21 MPa,说明说明 5 煤层作为保护层开采对 9 煤层的瓦斯压力释放作用非常明显,分别下降 57.9%、46%。

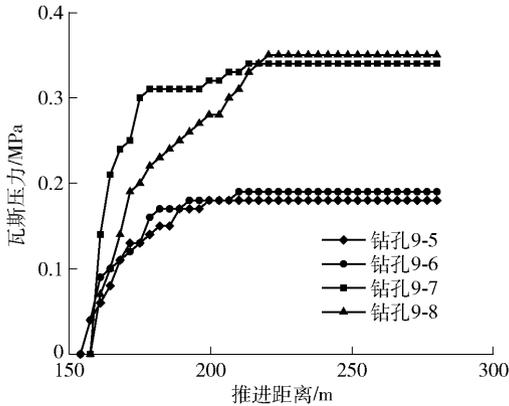


图 10 9-5、9-6、9-7、9-8 钻孔瓦斯压力随时间变化曲线

由图 10 可知,从 9-7、9-8 号钻孔瓦斯压力测定情况看,测得 9 煤层原始瓦斯压力为 0.34 MPa、0.35 MPa;从 9-5、9-6 钻孔瓦斯压力测定情况看,测得 9 号煤层残余瓦斯压力为 0.18 MPa、0.19 MPa。

5 号煤回采后保护范围之外测得 9 号煤层原始瓦斯含量为 7.13 ~ 8.2 m³/t;5 号煤层回采后保护范围内的 9 号煤层瓦斯含量降低为 5.19 ~ 6.45 m³/t。综上所述,说明 5 号煤层作为保护层开采对 9 号煤层的瓦斯压力释放作用非常明显,瓦斯压力下降在 46% 以上。

5 结论

(1) 综合理论公式和经验公式计算结果,并出于安全考虑取底板破坏深度最大是 17.8 ~ 18.5 m,而 5 号、9 号煤层的垂直层间距为 17 m,则 9 号煤层在 5 号煤层开采的卸压保护范围内。

(2) 由数值模拟可知,底板卸压区域呈现倒三角形,垂直卸压范围最大 33 m,综合分析煤层底板垂直应力图和底板煤岩体塑性区分布图,得煤层底板最大破坏深度为 23 m,与计算结果相符合。

(3) 通过对 5 号煤层工作面推进过程中对测压孔的瓦斯压力变化观察,开采后 9 号煤层瓦斯压力下降 46% ~ 57.9%,说明 5 号煤层开采后区域有效保护范围内 9 号煤层的突出危险性已消除,卸压效果良好。

[参考文献]

[1] 晏涛,易四海,夏向学. 缓倾斜近距离煤层群开采流固耦合相似模拟覆岩位移规律研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 130 - 134.

[2] 马文伟,付巍,薛彦平. 近距离煤层群开采工作面瓦斯涌出量预测方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(7): 104 - 109.

[3] 秦汝祥,杨珂,程健. 上保护层开采卸压保护范围研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(11): 81 - 87.

[4] 徐刚,王磊,金洪伟,等. 上保护层开采对下部特厚煤层移动变形规律及保护效果考察研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(6): 36 - 41.

[5] 杨贺,邱黎明,汪皓,等. 远距离下保护层开采上覆煤层层采动应力场数值模拟研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 37 - 41.

[6] 王伟,程远平,袁亮,等. 深部近距离上保护层底板裂隙演化及卸压瓦斯抽采时效性[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 138 - 148.

[7] 周银波,黄继磊,王思琪,等. 下伏被保护层双重采动影响下覆岩瓦斯富集规律[J]. 工矿自动化, 2020, 46(4): 23 - 27 + 33.

[8] 程志恒,陈亮,邹全乐,等. 近距离煤层群煤与瓦斯高效共采技术体系研究—以山西吕梁沙曲矿区为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 122 - 137.

[9] 薛东杰,周宏伟,孔琳,等. 采动条件下被保护层瓦斯卸压增透机理研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1910 - 1916.

[10] 江丽丽,杨增强,翟春佳,等. 上保护层不合理布置对被保护层应力叠加影响效应研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(2): 29 - 34.

[11] Yin Wei, Miao Xiexing, Zhang Jixiong, et al. Mechanical analysis of effective pressure relief protection range of upper protective seam mining [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 537 - 543.

[12] Jiao Y. Lagging effect of mining-induced fractures development in coal seam floor under pressure. Safety Coal Mines 2015; 46(10): 207 - 9.

[13] 李海涛,闫大鹤,浦仕江,等. 近距离煤层群保护层开采底板卸压瓦斯抽采技术研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(7): 78 - 82.

[14] 孙卓越,孟宪志,郝登云,等. 带压开采工作面长度对底板破坏深度的影响[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(7): 22 - 27.

[15] 董书宁,王皓,张文忠. 华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2216 - 2226.

[16] 张子良,徐万振,董检平. 带压开采煤层底板破坏深度数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 31 - 33.