

# 深部隐伏裂隙带位置对工作面底板突水的影响

王国举<sup>1,2</sup>, 赵立松<sup>1,2</sup>, 周泽<sup>3\*</sup>, 卢钢<sup>1,2</sup>, 刘钰鑫<sup>4</sup>

(1. 河北煤炭科学研究院有限公司, 河北 邢台 054000; 2. 河北省矿井微震重点实验室, 河北 邢台 054000;  
3. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵州 贵阳 550001; 4. 冀中能源集团有限责任公司邢东矿, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 采场底板的隐伏构造是引发工作面突水灾害的关键因素。本文以邢东矿 2126 工作面为案例, 深入研究在深部开采过程中, 底板采动破坏特征与隐伏裂隙带之间的相互作用机制。通过构建力学模型, 并借助数值软件, 模拟采动过程中隐伏裂隙带在不同空间位置上的采动应力演化特征, 以及底板的破坏特征, 并对比与分析。研究结果表明: 隐伏裂隙带空间位置及形态是底板发生突水的关键因素; 隐伏裂隙带与煤层垂距在 80 m 范围内时, 隐伏裂隙带应力释放速度较快, 隐伏裂隙带易受煤层开采影响; 当其垂距增加至 120 m 时, 隐伏裂隙带受工作面开采扰动较小; 但在隐伏裂隙带与煤层垂直在 120 m 时, 工作面推过裂隙带之后, 隐伏裂隙带应力值开始调整释放, 和底板应力降低区域沟通, 条件具备的情况下, 易发生滞后突水。

**关键词:** 深部开采; 底板破坏; 底板突水

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)02-0029-06

## On the Influence of the Location of Deep Concealed Fracture Zone on Water Inrush from Floor of Working Face

WANG Guoju<sup>1,2</sup>, ZHAO Lisong<sup>1,2</sup>, ZHOU Ze<sup>3</sup>, LU Gang<sup>1,2</sup>, LIU Yuxing<sup>4</sup>

(1. Hebei Coal Science Research Institute Co., Ltd., Xingtai 054000, China;

2. Mine Microseismic Key Laboratory of Hebei Province, Xingtai 054000, China;

3. School of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550001, China;

4. Xingdong Coal Mine, Jizhong Energy Group Corporation Ltd., Xingtai 054000, China)

**Abstract:** The concealed structure of stope floor is an important factor causing water inrush in working face. Taking 2125 working face of Xingdong Coal Mine as an example, this paper studies the interaction between floor mining failure characteristics and hidden fracture zones in deep mining process, establishes a mechanical model, simulates and compares the evolution characteristics of mining stress and floor failure characteristics in different spatial locations of hidden fracture zones in mining process with numerical software. Results show that the spatial location and shape of the concealed fracture zone are the key factors of water inrush. When the vertical distance between the concealed fracture zone and coal seam is within 80 m, the stress release speed of the concealed fracture zone is faster, and the concealed fracture zone is easy to be affected by coal seam mining. When the vertical distance increases to 120 m, the hidden fracture zone is less disturbed by the mining face. However, when the concealed fracture zone is perpendicular to the coal seam at 120 m, after the working face pushes through the fracture zone, the stress value of the concealed fracture zone begins to adjust and release, and communicates with the stress reduction area of the floor. When conditions are available, lagging water inrush is easy to occur, so the floor rock strata should be reinforced by grouting in time.

**Keywords:** deep mining; floor failure; inrush

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 邢台市重点研发计划资助项目(2023ZC319); 贵州省科技支撑计划资助项目(黔科合支撑[2021]一般 347); 贵州省普通高等学校青年科技人才成长资助项目(黔教合 KY 字[2021]258); 贵州理工学院高层次人才科研启动经费资助项目(XJGC20190931)

\* 通信作者, E-mail: 675140761@qq.com

在我国华北地区,随着煤层开采深度的持续增加,煤层开采强度越来越大,煤层底板水害威胁日益突出,已严重危害到矿井的安全生产,而绝大部分煤层底板突水事故均发生在地质构造区域.因此,为保证煤层安全回采,必须掌握构造区域煤层开采底板采动应力的传播规律<sup>[1-2]</sup>.为此,专家学者对这方面进行了大量深入的研究,如基于载荷在半无限弹性体中的传递理论,研究工作面底板应力分布演化规律,为承压水上安全采煤提供理论依据;或依据现场结合相似模拟试验得到工作面底板应力随工作面采动的变化规律<sup>[6-9]</sup>;也有采用现场应变实测法对开采过程中的煤层底板进行监测,得到煤层底板破坏范围及深度<sup>[10]</sup>.基于现有的研究基础,本文以邢东矿 2126 工作面为工程背景,采用数值模拟方法研究煤层底板不同隐伏裂隙带位置对工作面底板破坏的影响,分析深部开采过程中底板采动应力演化规律及破坏特征,得到底板采动应力演化与隐伏裂隙带的相互作用规律,揭示深部采动条件下煤层底板破坏带与隐伏裂隙带的贯通机理.

## 1 工程背景

邢东矿是邢台矿区最深的矿井,受奥灰水承压水威胁,煤层底板承受的奥灰水压最大为 14.6 MPa. 2126 工作面是二水平一采区第七个工作面,煤层底板标高在-1 063~-1 160 m,工作面长度为 155 m,工作面推进长度为 500 m,煤层平均厚度为 3.95 m,煤层倾角 3°~13°.2<sup>#</sup>煤层距下伏的奥灰含水层 174 m,奥灰最高水位为 39.46 m,根据底板岩层下三带理论,2<sup>#</sup>煤层底板距离奥灰含水层的真实距离为 134.54 m.依据邢东矿的底板岩层取芯资料显示,岩溶发育以溶孔(直径 1~13 mm)和溶蚀裂隙为主,裂隙为斜交小裂隙和垂直裂隙,在采动影响下,小型构造或裂隙带可能会形成突水通道.根据以往的工作面回采经验,该工作面底板可能存在隐伏垂直裂隙带,同时考虑到煤层开采对底板岩层形成开采扰动,促使煤层底板采动裂隙发育,同时在承压水和开采扰动的双重作用下诱使隐伏垂直裂隙带向上扩展.为保证 2<sup>#</sup>煤层安全回采,本文采用数值模拟对底板岩层在煤矿采动作用下的应力分布进行研究,为 2<sup>#</sup>煤层开采的防治水工作提供一定的参考依据.

## 2 底板隐伏裂隙带对底板突水影响理论分析

为了便于研究分析,详细考察邢东煤矿的地质条件和水文情况,探明采煤工作面与隐伏垂直裂隙带的空间位置关系.根据垂直裂隙带的分布特点和受力状态,将隐伏垂直裂隙带假定为横截面为矩形的条块体,置于无限大岩体中,其力学模型如图 1 所示.

如图 1 所示,在隐伏断层构造区域,由于隐伏裂隙带的存在,使得隔水层厚度降低,导致高压水体与工作面之间的空间距离减少.隐伏裂隙带内岩体的强度比正常的低,当裂隙带发生突水时,突水发生在裂隙带与完整岩层接触的局部区域.依据隐伏裂隙带的受力情况建立力学模型,隐伏裂隙带上端与底板岩层形成一个剪切面,总剪切力  $F$  与抗剪切力达到极限平衡时,作用在裂隙带上端的总剪切力如式(1)所示.

$$F = A(P - W + Q) = ab(P - W + Q). \quad (1)$$

式中: $A$  为横截面面积; $P$  为承压水压力; $W$  为构造上方底板岩层自重; $Q$  为矿山压力显现最大值; $a$  为隐伏裂隙带的端面长度; $b$  为隐伏裂隙带的端面宽度.其中  $W$  的计算如式(2)所示.

$$W = r_g gh. \quad (2)$$

式中: $r_g$  为底板岩层的容重; $g$  为重力加速度; $h$  为裂隙带与上覆煤层之间的垂直距离.

文献[10]拟合了采空区底板垂直应力与  $h$  的关系,并计算出  $Q$  的取值,本文采用文献中的拟合结果进行计算,如式(3)所示.

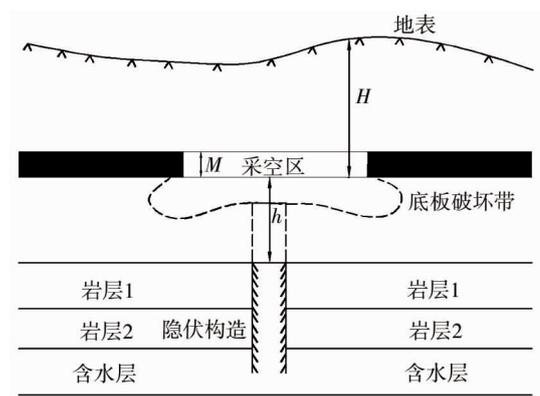


图 1 隐伏构造模型

$$Q = \begin{cases} 2.554 4e^{-0.040 4h} (r_d H + r_g h), & h < 40 \text{ m}; \\ [0.623 5 \ln(h) - 1.519 9] (r_d H + r_g h), & h \geq 40 \text{ m}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_d$ 为顶板岩层的容重; $H$ 为地表至煤层底板的距离.

裂隙带四周岩壁单位长度的剪切力为

$$f = \frac{F}{2a + 2b} = \frac{ab}{2a + 2b} (P - W + Q). \quad (4)$$

$\sigma_2, \sigma_3$ 为力学模型作用在剪切面的正应力.为了简化计算,假设地应力的水平分量各向相等,即 $\sigma_2 = \sigma_3$ ,则剪切面上单位长度的抗剪力为

$$\tau = h(\sigma_2 \tan \theta + c). \quad (5)$$

式中: $\theta$ 为内摩擦角; $c$ 为黏聚力.

地应力的水平分量与垂直分量 $\sigma_v$ 遵循金尼克假说.则

$$\sigma_2 = \frac{\mu}{1 - \mu} \sigma_v = \nu \sigma_v. \quad (6)$$

式中: $\mu$ 为底板岩石的泊松比; $\nu$ 为侧压系数.计算式(6)可得

$$\sigma_2 = \nu \left[ (H - M) r_d + \frac{1}{h} r_g \int_0^h h dh \right] = \nu \left[ (H - M) r_d + \frac{1}{2} h r_g \right]. \quad (7)$$

式中: $M$ 为采高.

将式(7)代入式(5)中可得

$$\tau = \frac{1}{2} h^2 r_g \nu \tan \theta + h \left[ (H - M) r_d + \frac{1}{2} h r_g \right] \nu \tan \theta + hc. \quad (8)$$

当剪切面的剪应力与抗剪力达到平衡时,有 $f = \tau$ ,求解可得承压水水压的极限值为

$$P = \left( \frac{2}{a} + \frac{2}{b} \right) \left[ \frac{1}{2} h^2 r_g \nu \tan \theta + h(H - M) \right] + \left( \frac{2}{a} + \frac{2}{b} \right) (r_g \nu \tan \theta + hc) + r_g gh + Q. \quad (9)$$

根据建立的力学模型,可以分析得到底板发生突水时,承压水的水压与煤层的埋藏深度、煤层采高、岩石的力学性质、隐伏裂隙带的空间位置等多方面因素之间关系密切,其中隐伏裂隙带空间位置是底板破坏发生突水的关键因素.

### 3 数值计算分析

隐伏裂隙带的存在使局部区域应力集中,在采动过程中,应力进一步集中,导致隐伏裂隙带周边岩体破坏加剧.由理论分析可知,隐伏裂隙带与工作面的相互位置是底板破坏发生突水的关键因素.为了进一步考察在工作面推进过程中隐伏裂隙带的破坏情况,以邢东矿2126工作面工程地质条件为背景,对底板在采动过程中的应力变化规律进行数值分析.

#### 3.1 数值模拟思路分析

##### 3.1.1 影响因素分析

在采动过程中,上覆煤岩体的移动、变形、破坏是一个渐进的演变过程,随着工作面向前推进,围岩应力处于持续的发展变化中<sup>[11]</sup>.开采产生的超前支承压力通过岩层传递至底板,底板周围围岩应力发生改变,裂隙带将受到采动支承压力的影响;采过以后,采空区底板产生卸压和底鼓,裂隙带的应力也会产生释放.在采深一定的情况下,裂隙带的变化情况主要取决于2个方面:(1)裂隙带与上覆煤层之间的垂直距离 $h$ ;(2)裂隙带与上覆煤层工作面端头的水平距离 $L$ .

考虑裂隙带的破坏情况和底板破裂区的导通情况,模拟方案示意图如图2所示,

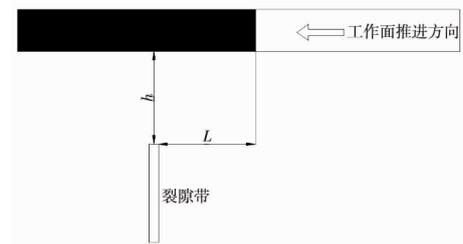


图2 模拟方案

### 3.1.2 模拟方案确定

方案通过改变隐伏裂隙带与工作面的垂直距离,分析随着工作面的推进,在不同垂直距离下隐伏裂隙带顶部以及煤层底板的采动应力变化情况.因此,方案总共建立 3 个不同的垂直距离的计算模型,工作面的开采采用分步开挖方式,并监测工作面推进过程中底板采动应力和隐伏裂隙带顶部围岩垂直应力的变化情况.

### 3.2 数值计算模型的建立

为了研究采动影响下隐伏裂隙带的破坏情况,对工作面推进过程中底板采动应力变化规律进行模拟.以邢东矿 2126 工作面工程地质条件为背景,选用 Mohr-Coulumb 模型,依据建模原则,建立三维数值计算模型,计算模型尺寸为 长度 × 宽度 × 高度 = 400 m × 260 m × 260 m,煤层厚 4 m,煤层上部厚度为 97 m,煤层下部厚度 159 m,总共 260 m,依据地质状况共建层位 16 层,内部镶嵌一个垂直的裂隙带,裂隙带的端面面积为 100 m<sup>2</sup>.考虑到邢东矿 2<sup>#</sup>煤层开采的底板注浆深度为 120 m,模型分别设置底板隐伏裂隙带距离煤层底板 40,80,120 m 的情况,并对不同垂距下的底板应力分布进行分析.模型周围各边界均为水平位移约束,底部为固定位移约束,模型上部施加垂直载荷模拟上部岩层的重量,裂隙带底部施加垂直向上的水压.岩体物理力学参数如表 1 所示.

表 1 岩石物理力学参数

岩层名称	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	体积模量 $K / \text{GPa}$	剪切模量 $G / \text{GPa}$	黏聚力 $c / \text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
砂岩	2 550	4.25	2.66	1.05	29
粉砂岩	2 600	3.80	1.70	17.00	33
粗粒砂岩	2 400	3.99	2.29	0.79	30
细砂岩	2 550	4.27	2.76	1.09	29
铝土质泥岩	2 430	3.83	2.17	0.78	30
2 <sup>#</sup> 煤层	1 700	1.32	1.04	0.30	23
细砂岩	2 550	4.27	2.76	1.09	29
粉砂岩	2 600	3.80	1.70	17.00	33
砂岩	2 550	4.25	2.66	1.05	29
野青灰岩	2 700	4.01	2.82	1.16	29
泥质砂岩	2 450	4.09	2.45	0.87	28
伏青灰岩	2 700	4.29	2.81	1.34	35
泥质砂岩	2 450	4.17	2.51	0.91	30
大青灰岩	2 700	4.31	2.82	1.34	32
砂岩	2 550	4.27	2.76	1.09	29
奥灰	2 700	4.48	2.82	1.36	31
裂隙带	2 000	4.01	2.82	1.16	29

### 3.3 不同垂距下底板采动岩体垂直应力场分布规律分析

随着工作面的不断推进,煤层应力在不断调整,对  $H=40\text{ m}$ ,  $H=80\text{ m}$ ,  $H=120\text{ m}$ ,  $L$  一定的情况下的围岩应力变化情况进行比较和分析研究.计算模型的煤层采动方向一致,模型从右向左开挖.隐伏裂隙带受采动影响的垂直应力分布如图 3~图 7 所示.

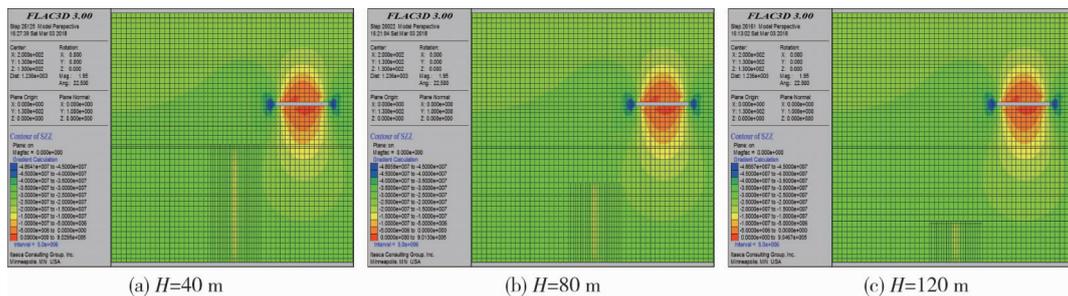


图 3  $L=40\text{ m}$  时的垂直应力云图

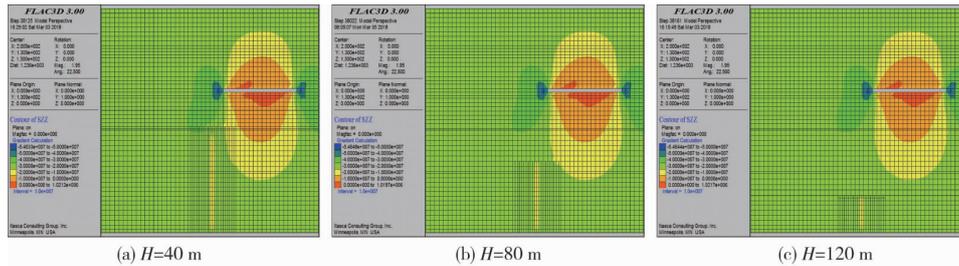


图 4  $L=10\text{ m}$  时的垂直应力云图

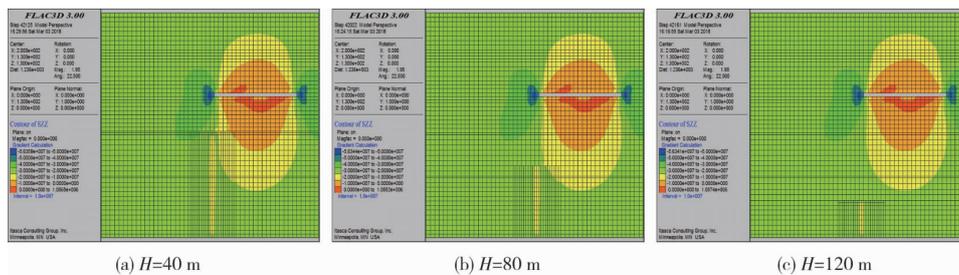


图 5  $L=0\text{ m}$  时的垂直应力云图

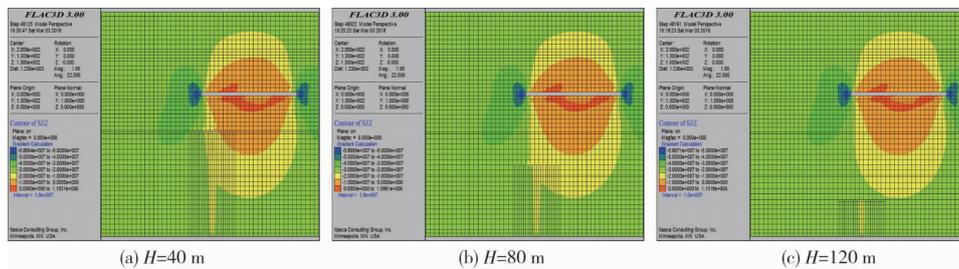


图 6  $L=-10\text{ m}$  时的垂直应力云图

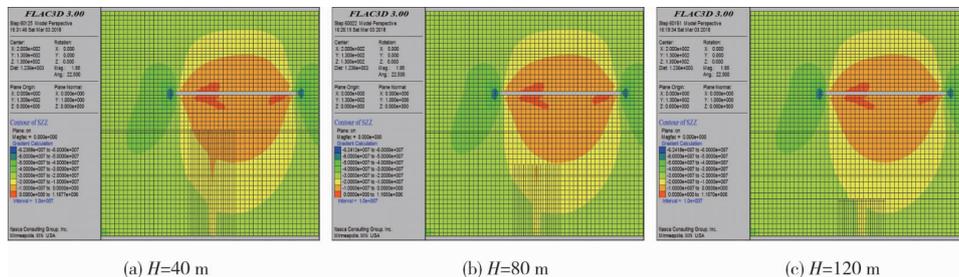


图 7  $L=-40\text{ m}$  时的垂直应力云图

分析图 3~图 7 可以得到以下结论:

1) 从图 3~图 7 中可以发现:工作面在推进过程中,底板受采动应力的影响发生破坏,当工作面逐渐推进至裂隙带,回采引起的应力分布范围逐渐增大,回采引起的应力降低区域和裂隙带的应力区域开始产生沟通,并且随着工作面的不断推进,沟通范围越来越大。

2) 当工作面在裂隙带上方推进时,对工作面前方一定深度范围的底板围岩形成应力扰动;随着开采范围的增大,开采对底板围岩深度扰动加大.当开采范围继续增大,工作面与裂隙带距离越近,工作面底板的采动应力对裂隙带波动的影响越明显,使得底板的开采扰动应力明显向裂隙带靠拢.工作面与隐伏裂隙带的位置越近,采动应力对裂隙带扰动越明显.如  $L=-10\text{ m}, H=40\text{ m}$  时裂隙带顶部的垂直应力为  $17.2\text{ MPa}$ ;  $H=80\text{ m}$  时裂隙带顶部的垂直应力为  $19.4\text{ MPa}$ ;  $H=120\text{ m}$  时裂隙带顶部的垂直应力值为  $23.8\text{ MPa}$ (如图 8 所示).随着垂距的增大,裂隙带顶部的垂直应力越大,说明受采动扰动应力的影响越小,距离底板越近,垂直应力得到释放,垂直应力越小。

### 3.4 不同垂距下裂隙顶部的垂直应力变化

裂隙带顶部垂直应力变化可以较为直观反映在采动作用下底板隐伏裂隙带的应力集中情况,在工作面推进过程中,隐伏裂隙带顶部垂直应力的变化如图 9 所示。

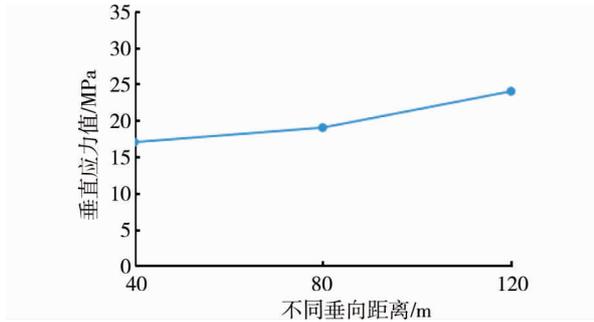
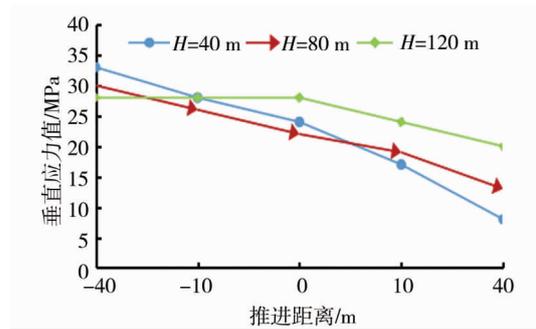
图8 不同垂距在  $L = -10$  m 时裂隙顶部的垂直应力

图9 不同垂距在不同推进距离时裂隙顶部的垂直应力值

分析图8~图9可以得到以下结论:

1) 当  $H = 40$  m 时,裂隙带周边的应力变化受开采扰动影响明显,当工作面推过后,该处应力值仍然有减小的趋势且产生尖角现象(如图8和图9所示),裂隙带和底板破坏区已经沟通.随着推进距离的不断增大,应力释放情况呈线性分布,从 33.2 MPa 减小到 8 MPa,且工作面推过裂隙带上方时,应力释放速度加快.

2) 当  $H = 80$  m 时,裂隙带周边的应力变化受开采扰动影响较明显,随着推进距离的不断增大,应力释放情况呈线性分布,较  $H$  为 40 m 时的应力释放速度慢.

3) 当  $H = 120$  m 时,裂隙带周边的应力在水平距离  $L$  为 0~40 m 的过程中不发生变化,当工作面推过裂隙带上方时,围岩应力开始释放,较  $H$  为 40, 80 m 时应力释放速度慢.

从上述情况来看,当  $H$  为 40, 80 m 时,应力释放速度较快,易和裂隙带上部应力沟通,为工作面前方导水通道形成提供条件,如果岩溶含水层富水并形成水头压力,就极有可能产生渗流突水现象.而当  $H = 120$  m 时,在工作面未推进至裂隙带时,围岩应力值未发生变化,推过裂隙带之后,应力值开始调整释放,和底板应力降低区域沟通,条件具备的情况下,易发生滞后突水.因此,邢东矿应及时对底板采取相适应的安全措施(如注浆处理),防止底板滞后突水的发生.

## 4 结论

1) 底板发生突水时的承压水的水压受埋藏深度、煤层采高、岩石的力学性质、隐伏裂隙带的空间位置等多因素影响,其中隐伏裂隙带的空间位置是底板破坏发生突水的关键因素.

2) 隐伏裂隙带与煤层垂距在 80 m 范围内时,隐伏裂隙带应力释放速度较快,隐伏裂隙带易受煤层开采影响;当其垂距增加至 120 m 时,隐伏裂隙带受工作面开采扰动较小.

3) 当隐伏裂隙带与煤层垂距在 120 m 时,在工作面推过裂隙带之后,应力开始调整释放,和底板应力降低区域沟通,条件具备的情况下,易发生滞后突水,因此,应及时对底板采取相适应的安全措施,防止底板滞后突水的发生.

## 参考文献:

- [1] 魏宏民.近距离承压水上开采底板破坏特征及注浆加固研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [2] 刘士亮.采动底板突水前兆信息演化特征与预测技术研究[D].青岛:山东科技大学,2016.
- [3] 张华磊,王连国.采动底板附加应力计算及其应用研究[J].采矿与安全工程学报,2011,28(2):288-292.
- [4] 王连国,韩猛,王占盛,等.采场底板应力分布与破坏规律研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(3):317-322.
- [5] 孙建.沿煤层倾斜方向底板“三区”破坏特征分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(1):115-121.
- [6] 张金才,刘天泉.岩体渗流与煤层底板突水[M].北京:地质出版社,1997:17-19.
- [7] 弓培林,胡耀青,赵阳升,等.带压开采底板变形破坏规律的三维相似模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4396-4402.
- [8] 姜耀东,吕玉凯,赵毅鑫,等.承压水上开采工作面底板破坏规律相似模拟试验[J].岩石力学与工程学报,2011,30(8):1571-1578.
- [9] 段宏飞.采动过程中煤层底板破坏特征及破坏深度分析[J].煤炭科学技术,2014,42(5):17-20.
- [10] 张士川,郭惟嘉,孙文斌,等.深部开采隐伏构造扩展活化及突水试验研究[J].岩土力学,2015,36(11):3111-3120.
- [11] 王国举.跨采动压巷道支护技术及应用研究[D].湘潭:湖南科技大学,2014.