

# 巨厚坚硬顶板工作面的底板破坏规律

白峰青<sup>1,2</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 刘猛<sup>2</sup>

(1. 河北省资源勘测重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 资源学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:**针对郭庄矿开采9<sup>#</sup>煤时受巨厚坚硬顶板和底板奥灰水双重威胁的情况,利用现场钻孔注水试验手段与数值模拟的方法对9<sup>#</sup>煤底板进行破坏深度探测及破坏规律的研究.现场钻孔注水试验结果表明,工作面煤层底板监测钻孔控制深度内的底板岩层均发生了不同程度的破坏,最大破坏深度介于18.80~21.00 m,9<sup>#</sup>煤与下伏奥灰层间距不足20 m;数值模拟结果表明,坚硬顶板条件下,强制放顶比充填开采对煤层底板产生的破坏程度大.

**关键词:**巨厚坚硬顶板;注水试验;数值模拟;底板破坏

**中图分类号:**TD823.85 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)03-0038-06

## Analysis of failure law of the working face floor under thick - hard roof

BAI Fengqing<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, LIU Meng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Hebei Provincial Resource Surveying, Handan 056038, China;

2. School of Resources, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** Based on special case that the 9<sup>#</sup> coal mining is under double threat of the thick - hard roof and Ordovician limestone water inrush from floor, a survey and research on the 9<sup>#</sup> coal floor failure law is conducted with on - site water injection test and numerical simulation. On - site water injection test indicates that different degrees of damage occurred within the scope of monitoring of working face coal seam floor and the max failure depth is up to 18.80 ~ 21.00 m; and the distance between 9<sup>#</sup> coal and Ordovician limestone aquifer is less than 20 m; Simulation results show that, as for the degree of damage of coal seam floor under thick - hard roof, forced carving is more destructive than filling mining.

**Key words:** thick - hard roof; water injection test; numerical simulation; failure of seam floor

郭庄矿开采9<sup>#</sup>煤时受巨厚坚硬顶板与奥灰水的双重胁迫,其涉及巨厚坚硬顶板控制和煤层底板奥灰水的防治问题.其核心和难点问题是要解决既要通过对巨厚坚硬顶板的有效控制,消除可能形成冲击地压对矿井安全的影响,又要避免或最大限度地降低煤层底板突水,实现矿井的安全生产.

目前,经过多年的现场监测和室内研究,对于非坚硬顶板的煤层开采底板变形破坏特征及影响因素已经有了进一步认识.但对于巨厚坚硬顶板条件下煤层底板变形和破坏特征及对底板奥灰突水的影响关系的研究较少<sup>[1,2]</sup>.因此,探索巨厚坚硬顶板与奥灰水双重胁迫下煤层底板变形破坏特征,

不仅可以极大地丰富煤层底板突水预测理论及内涵,而且对于类似条件下的矿井防治水技术路线的制定具有重要意义.

### 1 工作面开采条件

综采工作面南北走向长约1 000 m,倾斜宽度80 m.工作面为单斜构造,煤层走向N8°~N60°,倾向E-SE,倾角6°~12°,9<sup>#</sup>煤厚2.96~6.71 m,煤层底板标高+3~-35 m.顶板(老顶)为燕山期岩浆侵入体(闪长岩),呈岩床式覆盖,厚度19.49~28.23 m,平均24.25 m;底板以粉砂岩为主,含少量碳质.9<sup>#</sup>煤下距本溪灰岩(厚度3.93 m)12.6~

18.5 m,距奥灰顶界面 29.6 ~ 40.19 m,平均 33.27 m,开采期间奥灰水位标高在在 -9.00 ~ +41.22 m.

9<sup>#</sup>煤开采过程中,坚硬的火成岩顶板不易垮落,围岩应力场将随着开采活动的进行,出现集中-释放的过程,并重新分布,避开坚硬顶板向四周及底板岩层转移,巷道严重的底鼓现象就是很好的证明.围岩应力的变化,造成煤层底板岩层的变形破坏,减小底板有效隔水层的厚度,增加底板突水的几率<sup>[1,2]</sup>.为了减小矿山压力对煤层底板的破坏影响,郭庄矿采取了充填式开采,但充填率为 80%左右,且充填过程存在一定的滞后性,采煤活动仍会对底板破坏产生一定的影响.

## 2 煤层底板破坏特征

目前,研究煤层顶底板变形破坏程度的手段和技术主要包括:煤层底板注水试验法、应力应变法、地球物理探测法、岩层移动钻孔探测法、钻孔超声成像探测法、孔间无线电电波透视法等<sup>[1-4]</sup>.依据郭庄矿现场条件,采用底板现场钻孔注水试验法,分析在采动条件下底板的变形情况,并以工作面的地质资料为基础,建立计算模型,利用数值模拟软件,分析工作面底板变形破坏规律及主要影响因素,为后续工作面的安全开采提供参考依据.

### 2.1 底板破坏深度

根据现场条件,采用了钻孔注水试验的手段进行此次底板破坏深度的监测.依据类似条件下工作面底板破坏深度探测结果及理论分析,工作面底板发生变形破坏最大的部位可能发生在顶板初次来压部位、构造(断层)发育部位、停采线附近等部位.结合综采工作面的实际情况,现场监测孔布置在断层分布较多或交叉部位以及停采线附近(见图1),因现场施工、工作面调整等原因钻孔位置也进行了适当改变.现场钻孔设计布置2组试验孔,每组4个钻孔,孔间距0.5~1.0 m,呈集中状态布置,总体控制深度11~21 m,控制钻孔施工参数见表1.



图1 注水试验钻孔布置示意图

观测时间从回采开始前开始,直至回采结束.依据现场情况,采用间断注水和间断观测,注水时间15~60 min.回采前观测间隔为每10~15 d观测一次.开始回采后,每2~3 d观测一次,当工作面推进距注水试验孔40 m至推过注水孔40 m的过程中,每天观测1~2次,观测的同时记录采煤机推进的距离(提前在巷道中标定),以此类推至采煤结束.

表1 注水钻孔施工参数

位置	编号	垂直深度/m		钻孔倾角/(°)		钻孔方位角/(°)	
		设计	实际	设计	实际	设计	实际
第一组	1 <sup>#</sup>	12	11.22	46	20	112	325
	2 <sup>#</sup>	18	16.18	56	-37	112	320
	3 <sup>#</sup>	15	18.80	52	-51	112	320
	4 <sup>#</sup>	21	14.24	60	29	112	320
第二组	5 <sup>#</sup>	21	21.28	54	54	270	302
	6 <sup>#</sup>	19	16.52	48	47	270	300
	7 <sup>#</sup>	17	14.55	43	42	270	294
	8 <sup>#</sup>	15	12.74	37	37	270	296

由监测结果可知:

1)第一组钻孔结果分析(见图2):1<sup>#</sup>前期注水量较小说明在底板下相应范围内原生裂隙发育较差且连通性较差,采动条件下煤层底板经历了压缩和膨胀的交替变化过程,裂隙扩展,单位注水量呈“阶梯式”增长;2<sup>#</sup>,4<sup>#</sup>孔前期注水量稍大说明在底板下相应范围内原生裂隙发育且连通性较好,并且随着工作面的推进,裂隙扩展,导致单位注水量在波动中上升;3<sup>#</sup>孔前期注水量变化不大说明在此深度范围内原生裂隙发育较差且连通性较差,随着采动影响,使底板裂隙扩展,引起注水量的变化.在试验过程中,工作面距钻孔18 m时,工作面底板开始出水,表明此深度范围内,煤层底板受采动影响发生明显的破坏.

2)第二组钻孔结果分析(见图3):6<sup>#</sup>孔单位注水量变化不大说明在此深度范围内原生裂隙发育较差且连通性较差.随着工作面与钻孔距离越近,单位注水量仍处于平缓趋势,表明此深度范围内,煤层底板受采动影响很小,底板未受明显破坏;7<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>孔前期注水量变化不大说明在此深度范围内原生裂隙发育较差且连通性较差,但后期受采动影响,使底板裂隙扩展,引起注水量的变化.表明此深度范围内,煤层底板受采动影响发生破坏.

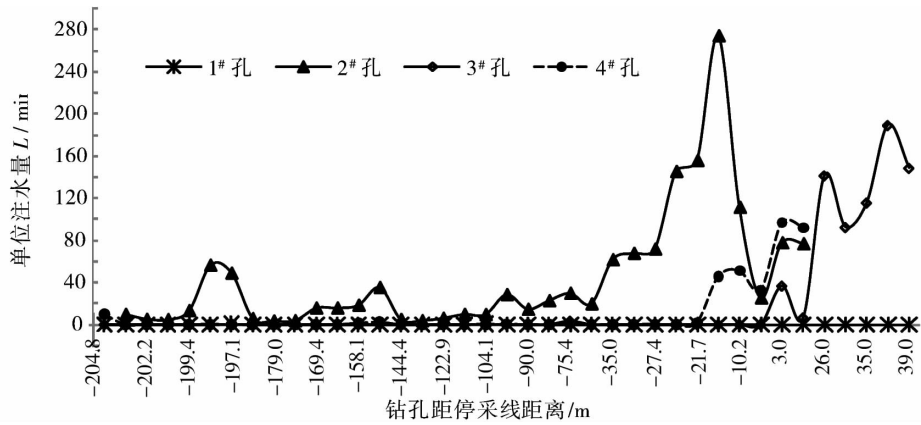


图2 第一组注水钻孔监测数据图

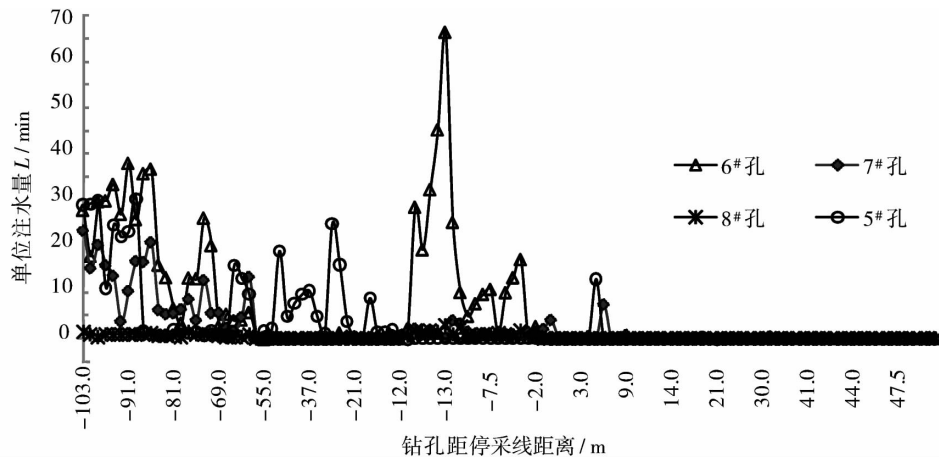


图3 第二组注水钻孔监测数据图

综合以上对监测数据的分析,该工作面煤层底板监测钻孔控制深度内的底板岩层均发生了不同程度的破坏,现场监测点实测底板最大破坏深度介于 18.8 ~ 21.0 m.

### 2.2 数值模拟

有限元计算模型根据 9#煤工作面的岩性组合特征,对计算模型范围内的岩层分层和概化处理,对物理、力学性质相差不大,厚度较小的岩层进行组合,各层属性根据地层的实际属性进行赋值,并反复进行模型识别,使得模拟结果符合实际.模型的上部按至地表的岩体自重,在模型表面施加垂直方向的荷载( $P = h\gamma$ ),其中  $\gamma$  为岩体容重, $h$  为模型表层至地表的距离,在模型上部施加 25 MPa 的均布荷载来模拟第四系松散层及煤层顶板上部岩层.模型侧边界施加水平约束,底边界施加水平及垂直约束.模型左右边界在水平方向上工作面边界宽度取 200 m,以尽量减小模型边界效应的影响.模拟采用二维力学模型进行分析计算,计算模型长度为 1 400 m,厚度为 240 m,采用 4 节点四边

形等参单元,依据模拟开采煤层的情况,进行单元剖分,共划分 8 960 单元,9 273 节点,网格剖分后的模型参见图 4.

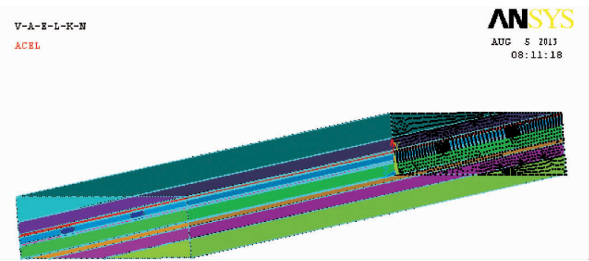


图4 有限元模型示意图

有限元计算模型建立后,首先进行原始应力场的模拟,进而进行开挖模拟.具体模拟方案为(1)在模拟计算时,采用单元的“生死”选项,模拟煤层的开挖与充填;(2)在进行第二次煤层开挖时,将第一次开挖的煤层部分“死”单元重新激活,并将激活的煤层单元属性更改为设定的冒落岩层属性,以便能够更好的模拟采空区内冒落岩石的压实支撑作用;(3)模型在距离左边界 200 m 处第一次开挖,每次开采 5 m,当开挖至 205 m 后,再将其开采

步距增大到 10,20,50 m,模拟直至开采结束;(4) 在模拟充填开采时,每次模拟开采 5 m,在进行第二次煤层开挖时,将第一次开挖的煤层部分“死”单元重新激活,并将激活的煤层单元属性更改为设定的充填体属性,模拟充填开采情况;(5) 在模拟强制放顶条件下煤层开采时,每次模拟开挖 5 m,每开采 10 m 坚硬顶板进行 1 次强制放顶处理,直至开采结束;(6) 分别模拟顶板自由垮落、充填开采和强制放等顶管理模式的底板应力分布和变形

破坏情况.

在工作面实际开采过程中,巷道掘进前原始设计为 5.0 m × 3.0 m,巷道开挖后变形为 4.5 m × 2.5 m,模型将以巷道变形作为对照进行调参.通过对模型中各岩层力学参数的反复调试,模拟开采后巷道的变形为 4.6 m × 2.5 m,与实际的巷道变形情况接近,得到实际开采条件下各岩层力学参数,参见表 2.再将调试后的参数代入模型中,进行后续的模拟计算.

表 2 井田内各岩层岩体力学参数

序列号	岩层	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	厚度/m
1	粉砂层	8E2	0.23	2 590	3.0	28	50
2	中砂层	1E3	0.25	2 620	2.0	30	50
3	闪长岩	1.2E4	0.27	2 800	7.0	32	25
4	9#煤	40	0.30	1 200	0.3	14	3
5	粉砂岩	1E3	0.26	2 600	4.0	28	12
6	中细砂岩	1E3	0.27	2 650	3.0	30	6
7	泥岩	8E2	0.25	2 300	3.5	28	14
8	奥灰	7E3	0.28	2 700	5.0	29	80
9	充填体	20	0.36	1 800	0.1	20	
10	垮落岩石	10	0.30	2 300	0.3	15	

2.2.1 强制放顶条件模拟

应力:在工作面不同推进长度下,选取距切眼 100 m 处(测点)底板下不同深度垂向应力分布见图 4.模拟结果显示,在进行强制放顶条件下,煤层底板垂向应力变化相对稳定,垂向应力基本维持在 6~7 MPa 左右,直到工作面推进至距测点 55 m 左右时,底板垂向压应力才开始略有增大.当工作面推进至距测点 5~15 m 左右时,底板岩体所垂向压应力逐渐增大,工作面的推进至距测点 0~5 m 左右时垂向压应力上升幅度变大,之后底板岩体垂向应力保持在一个平稳状态,且逐渐接近初始应力状态.说明在煤层顶底板重分布过程中积聚的应变能大部分通过强制放顶得以释放,从而降低了对煤层

底板变形破坏程度.

位移:强制放顶条件下,在工作面推进过程中,各深度的测点都经历了从负向位移到正向位移再到稳定的变化过程,说明在开采过程中底板岩层经历了压缩-膨胀-重新压缩的变化过程,参见图 5.垂向位移变化曲线表明,当工作面推进至距测点 15 m 左右位置时,底板各岩层负向位移量达到最大,此时底板的塑性变形已经达到最大程度,随后由于底板以脆性破坏的形式突然释放此前集中的应力,以达到岩体内部能量的重新平衡.当工作面推过测点,由于采空区范围内底板应力的卸压,底板岩层开始出现底鼓,并且在工作面后方 5 m 左右位置底鼓变形达到最大.

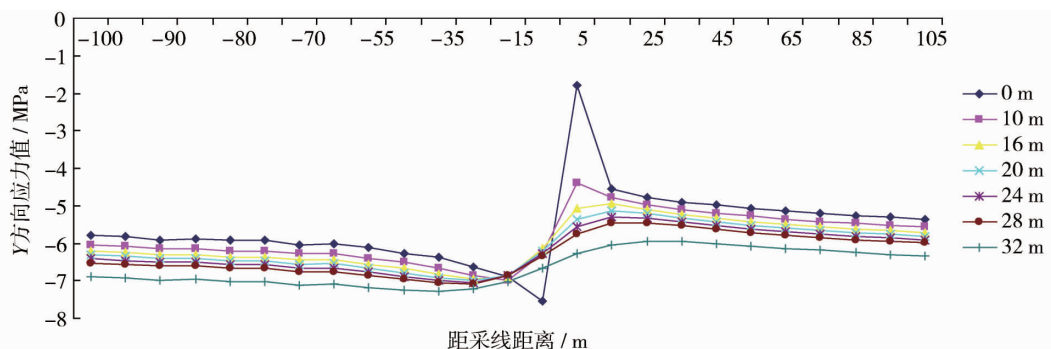


图 5 强制放顶条件下不同深度底板岩体垂向应力变化曲线图

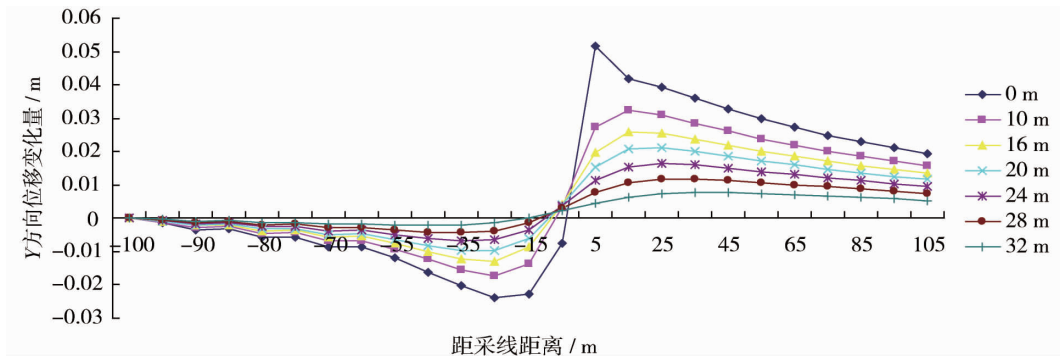


图 6 强制放顶条件下不同深度底板岩层垂向位移变化曲线图

### 2.2.2 完全充填开采条件模拟

**应力:**在不同的工作面开采长度下,距切眼 100 m 处底板下不同深度应力分布见图 6.从图中可以看出,充填开采时垂向应力变化相当平缓,主要是因为充填体对工作面开采周围的应力分布有显著的影响,顶底板的压力会通过充填体转移到其它围岩,降低了对底板岩层的破坏程度.

**位移:**选取与进行应力分析相同的测点,底板岩层不同深度位移变化特征见图 7.从图中可以看出,底板岩层经历了压缩 - 膨胀 - 压缩的变化过程,各测点的垂向位移变化过程基本相似,只是变化的幅度不同.在距底板下 10 m 范围内的位移多数小于 2 cm,表明充填开采条件下对底板的扰动较小,煤层底板变形破坏深度应小于 10 m.

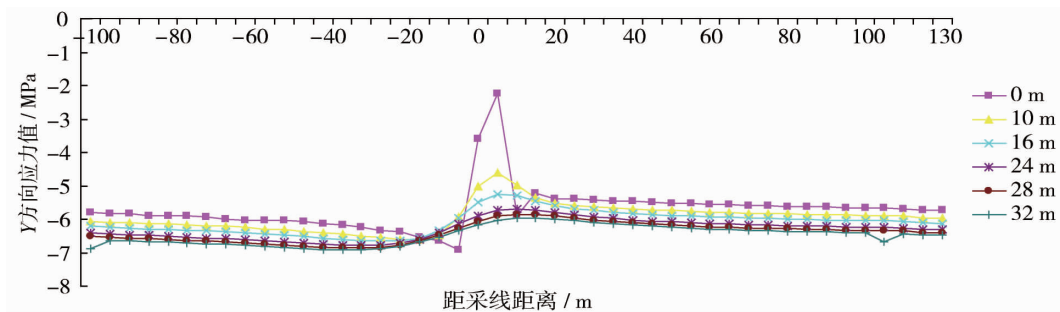


图 7 充填开采不同深度底板垂向应力水平变化曲线图

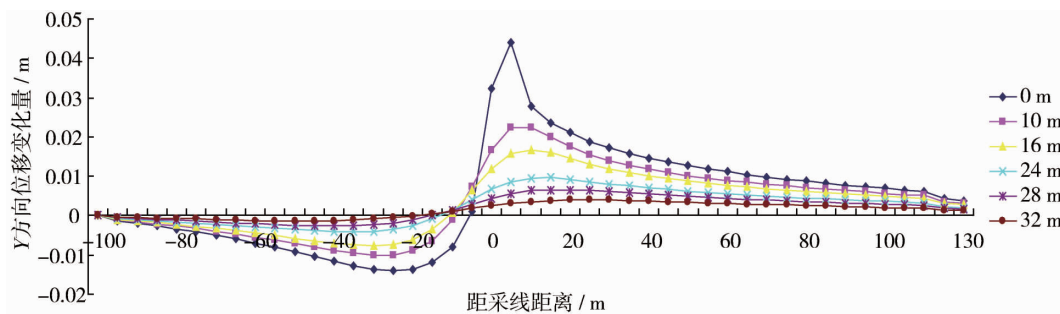


图 8 充填开采不同深度底板岩层垂向位移变化曲线图

## 3 巨厚坚硬顶板煤层底板破坏特征

坚硬顶板能够积聚大量的弹性能,顶板初次来压和周期步距与坚硬顶板岩层的强度和厚度相关,顶板岩层的强度和厚度越大,顶板悬空面积越大,顶板来压越强烈.随着工作面的推进,采空区内坚硬顶板积聚的弹性能越多,对底板岩层的变形破坏

影响越大.依据岩体力学理论和数值模拟分析,与自由垮落顶板管理相比,坚硬顶板的存在使底板应力和位移变化量明显增大,对煤层底板产生很大的扰动和破坏,从而导致煤层底板阻水能力降低,增大了底板奥灰突水风险.实测数据表明,在相同开采条件下,坚硬顶板存在时的底板破坏深度比普通顶板大 6 m 左右.开采过程中,巷道煤层底板底鼓

明显,其表现特征类似于大采深的情况.数值模拟模拟结果显示,影响煤层底板破坏的影响因素包括煤层埋藏深度、工作面宽度、煤层厚度、煤层顶底板岩性组合、顶板管理方式、地质构造发育情况以及、底板承受的水压等.

坚硬顶板积聚的能量转移到开采煤层围岩和底板,致使底板隔水层承受外力增大,底板岩层中裂隙扩张,甚至在一定深度发生贯通,使得煤层与奥灰含水层的层间距不断减小,煤层底板隔水层抗渗透、抗水压能力下降,且在开采过程中,明显的底鼓现象证明了下伏奥灰水有突破隔水层的危险.

## 4 结论

1)在9#煤底板以下11.22~18.80 m内发生了不同程度的破坏,最大破坏深度介于18.80~21.00 m,比普通顶板大6~10 m.

2)完全充填开采条件下,底板变形程度最小,最大破坏深度约10 m.底板出现最大破裂深度的位置一般在采空区内部靠近煤壁附近的位置.

3)现状条件下底板破坏深度已经达到本溪组灰岩,底板有效隔水层厚度不足20 m,开采-100水平煤层时,底板隔水层承受水压增大,发生底板奥灰突水的风险性增大.

4)由于目前采用的充填方式只能达到80%,尽管采取了充填开采和强制放顶相结合的顶板管

理模式,底板破坏深度仍比普通顶板条件下大.为了最大限度地降低突水风险,应采取充填率更高的充填技术手段.

## 参考文献:

- [1] 孟召平,高延法,卢爱红.矿井突水危险性评价理论与方法[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 于小鸽.采场损伤底板破坏深度研究[D].青岛:山东科技大学,2011.
- [3] 王秋生,姜玉海.底板破坏深度动态监测技术的应用[J].煤矿安全,2011,42(12):90-92.
- [4] 武龙飞,瞿群迪,朱村矿承压水上膏体充填开采底板破坏规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2008.
- [5] 张蕊,姜振泉.采动条件下厚煤层底板破坏规律动态监测及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(5):626-630.
- [6] 段宏飞,姜振泉.煤矿底板采动变形及带压开采突水评判方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2012.
- [7] 孙变变,汪华君.煤层底板破坏流固耦合数值模拟[J].煤田地质与勘探,2013,41(3):55-58.
- [8] 张蕊,姜振泉,于宗仁.煤层底板采动破坏特征综合测试及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2013,30(4):531-537.
- [9] 刘鹏亮.邢东矿充填巷式开采数值模拟与现场实测研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2007.