

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.09.010

下保护层开采数值模拟与突水危险性评价

王登科^{1,2}, 魏建平^{1,2}, 温志辉^{1,2}, 王云刚^{1,2}

(1. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000;
2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了确定断层附近防隔水煤(岩)柱的合理宽度, 解决煤炭安全生产问题, 以山西省某矿下保护层开采为工程研究对象, 用 FLAC^{3D} 数值模拟软件进行了数值仿真计算, 充分考虑了断层的产状和落差, 再现了回采工作面在推进过程中的顶底板采动裂隙的发展情况, 并结合经验公式法确定了防隔水煤(岩)柱的合理宽度。同时还利用数值计算结果, 对该矿六采区下保护层开采作了突水危险性评价。研究表明: 断层不但是影响保护层开采底板扰动破坏程度的重要因素, 也是确定防隔水煤(岩)柱宽度的关键所在。在对矿井突水危险性评价中, 应该考虑采动对底板扰动破坏的影响。

关键词: 下保护层; 开采; 断层; 防隔水煤(岩)柱; 数值模拟; 突水危险性

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)09-064-07

Numerical simulation and water inrush risk evaluation for lower protective seam mining

WANG Dengke^{1,2}, WEI Jianping^{1,2}, WEN Zhihui^{1,2}, WANG Yungang^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo, Henan 454000, China;
2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: In order to determine the safe width of fault waterproof coal (rock) pillar and solve the safety mining problem, the lower protective seam mining of a coal mine in Shanxi Province is taken as an engineering research object. Taking faults' occurrence and throw into account, numerical tests with FLAC^{3D} numerical simulation software are conducted to investigate the development of mining-induced fractures in coal seam roof and floor, and the reasonable width of waterproof coal (rock) pillar is determined through combining numerical simulation with empirical formula method. In addition, the risk evaluation of coal seam floor water inrush of No. 6 mining area in this coal mine is finished using the result of numerical simulation. It is shown that fault is not only an important factor affecting the disturbance failure extent of coal seam floor in protective seam mining, but a key factor determining the safe width of waterproof coal (rock) pillar. In the risk evaluation of coal mine water inrush, the effect from mining-induced disturbance failure of coal seam floor should be considered.

Key words: lower protective seam; mining; fault; waterproof coal (rock) pillar; numerical simulation; risk of water inrush

收稿日期: 2013-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51104059); 国家重点基础研究发展计划(2012CB723103); 教育部“创新团队发展计划”(IRT1235); 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地开放课题(WS2012B07); 河南理工大学博士基金资助项目(B2011-062)

作者简介: 王登科(1980-), 男, 河南理工大学副教授, 博士, 主要从事煤矿瓦斯灾害防治与矿山岩石力学方面的研究工作, (E-mail) wdk@hpu.edu.cn.

矿井突水是因井巷、工作面与含水层、被淹巷道、地表水体或含水的裂隙带、溶洞、洞穴、陷落柱、顶板冒落带、构造破碎带等接近或沟通而突然产生的出水事故,是中国矿井生产的五大灾害之一^[1-3]。矿井突水的发生常常会带来冲垮工作面、淹没设备、增加矿井排水负担、威胁矿工生命安全等不良后果,给国家造成严重人员伤亡及财产损失。根据各矿区的统计资料,煤矿突水事故80%与断层的存在有关,断层阻隔水煤(岩)柱的可靠性问题在很大程度上制约着煤矿安全生产,并成为矿井安全的关键。因此,根据现有的矿井水文地质资料,如何确定最合理的阻隔水煤(岩)柱宽度,既能保证矿井安全开采,又不浪费煤炭资源,对中国受突水威胁矿井具有十分重要的现实意义。

目前,中国煤矿阻隔水煤(岩)柱的留设主要是依据经验公式或力学解析分析进行设计的,但是岩体结构非常复杂,基于力学理论的解析分析很难得到准确结果。随着计算机软硬件的迅猛发展,数值模拟手段以其复杂条件下良好的适应性以及“记忆”功能,给这一过程提供了很好的解决途径,在矿业工程等相关领域得到了广泛的应用。在矿井阻隔水煤(岩)柱留设方面,国内外学者利用数值模拟开展了很多相关研究,取得了很多有益的研究成果^[4-12]。尽管国内外专家学者在这方面做了很多研究工作,但是对于断层的模拟还只是停留在将之简化成一个面或一条线来考虑,而忽略了断层本身厚度及其落差的真实存在。

一般地,在开采正断层上盘煤层时更容易发生突水^[13],笔者根据工程实例,就下保护层开采条件下,利用数值模拟软件FLAC^{3D},同时考虑断层厚度和断层落差的真实存在,对断层进行较为真实的模拟,分析断层对矿井阻隔水煤(岩)柱安全宽度留设的影响和探讨下保护层开采底板突水危险性,以期对断层突水机制有进一步认识及对煤矿安全生产有进一步提高。

1 工程概况

山西某矿设计生产能力为 150×10^4 t/a,目前矿井生产能力在 120×10^4 t/a左右,2010年产量为 138×10^4 t,矿井相对瓦斯涌出量为 $14.35 \text{ m}^3/\text{t}$,绝对瓦斯涌出量为 $34.53 \text{ m}^3/\text{min}$,瓦斯涌出量呈现增加趋势。该矿曾于2000年发生过瓦斯爆炸事故,瓦斯灾害威胁着矿山的安全生产。目前该矿主采2号煤层,实测最大瓦斯含量为 $7.2 \text{ m}^3/\text{t}$,最大瓦斯压力为 0.72 MPa ,瓦斯参数接近煤与瓦斯突出临界值。

进入深部开采以来,由于矿压较大,出现了煤炮、喷孔、夹钻、卡钻和吸钻等煤与瓦斯突出等动力特征,严重威胁矿井的正常安全生产和接替工作。2号煤层煤层透气性较低,透气性系数为 $0.137 \text{ 1 m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$,钻孔瓦斯流量衰减系数 0.006 5 d ,属可以抽采煤层;本煤层区域瓦斯预抽效果较差,矿井尝试采用卸压松动爆破、水力冲孔等卸压增透措施,但由于2号煤层较硬(坚固性系数在 0.63 以上),卸压增透效果均不太理想。

矿井进入深部开采后,为了消除高应力和高瓦斯条件对矿井安全造成的威胁,矿井需要对下组煤层区域预抽及保护层开采技术进行研究。该矿下部的5号煤层和6号煤层距离上部2号煤层 30 m 左右,特别是6号煤层平均厚度 1.25 m ,具备很好的保护层开采条件,如图1所示。

岩柱性状 (1:500)	标志层 编号	岩层厚度/m 最小~最大 平均值	岩层名称
	K ₆	$\frac{0 \sim 13.29}{3.89}$	中粒砂岩
		$\frac{0 \sim 13.17}{4.02}$	泥岩
	1#	$\frac{0 \sim 1.10}{0.63}$	1#煤层
		$\frac{0.2 \sim 14.4}{4.74}$	泥岩
	2#	$\frac{0.65 \sim 4.27}{2.75}$	2#煤层
		$\frac{8.41 \sim 24.12}{15.08}$	细粒砂岩
	K ₇	$\frac{0 \sim 21.9}{4.82}$	中粒砂岩
		$\frac{1.21 \sim 9.6}{4.7}$	泥岩
	5#	$\frac{0 \sim 1.97}{0.41}$	5#煤层
		$\frac{2.38 \sim 11.64}{5.19}$	泥炭
	6#	$\frac{0 \sim 2.52}{1.25}$	6#煤层
		$\frac{4.37 \sim 15.84}{8.51}$	泥岩

图1 煤系地层柱状图

由于矿井地质条件较为复杂,断层发育较多,6号煤层下部存在K₅、K₄和K₂石灰岩,底板水压较大,深部发育的奥灰水压更大,深部开采时对2号煤

层有一定的影响,2号煤层开采过程中出现多次小型突水现象。若将6号煤层作为保护层开采,理论上可以实现对上部2号煤层的保护作用,卸除了瓦斯压力和岩体应力,煤层透气性系数得到大大提高,对防治煤岩动力灾害和瓦斯治理提供有力保障。但是在6号煤层的开采过程中,板卸压后是否会沟通下部灰岩水,诱发突水现象等需要进行详细的论证分析。

2 数值模型建立及物理力学参数取值

2.1 三维计算模型的建立

根据该矿井上下对照图、采掘工程平面图及综合柱状图,在数值模型中,对整个矿区的地形、断层、岩层和6号煤层的开采等进行了较为真实的模拟。根据该矿的开采现状,二采区2号煤层已经基本采完,六采区2号煤层才刚刚开始回采。因此本次数值模拟的主要对象确定为六采区,模拟范围为(据1954年北京坐标系): $x=4\ 056\ 529.445$ 至 $4\ 060\ 867.445$,共 $4\ 338\text{ m}$; $y=19\ 566\ 845.818$ 至 $19\ 571\ 708.818$,共 $4\ 863\text{ m}$; z 方向由6号煤层底板标高以下 568 m 至地表。根据2号煤层的采掘工程平面图,基本能确定影响6号煤层开采的主要断层为 F_6 、 F_9 、 F_{10} 、 F_{14} ,所以数值模拟中也主要考虑这几条断层的影响。所建立的数值模型共划分为 $990\ 116$ 个单元及 $169\ 209$ 个结点,其中 F_6 断层共划分了 $11\ 837$ 个单元, F_9 断层共划分了 $26\ 052$ 个单元, F_{10} 共划分了 $24\ 913$ 个单元, F_{14} 共划分了 $9\ 994$ 个单元。所建六采区三维数值模型与网格见图2。

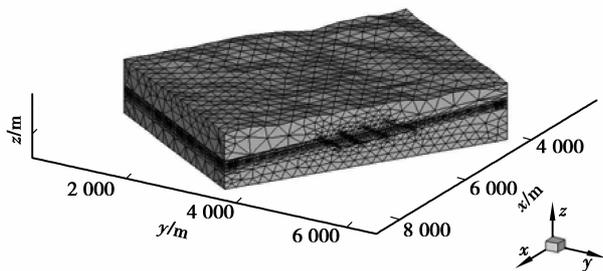


图2 三维数值模型网格图

2.2 物理力学参数取值

在数值计算中,采用摩尔-库伦准则对保护层开采过程进行模拟仿真。数值模型中所模拟的煤岩层及主要断层情况见表1,为简化起见,根据煤系地层综合柱状图对岩层作了相应的合并处理。各煤岩层的位置情况如图3所示,计算中所采用的物理力学参数见表2。

表1 模拟煤岩层及断层简况

煤岩层及断层		断层	
名称	平均厚度/m	名称	落差/m
粉砂岩	50.0	F_6	10
2号煤层顶板	13.5	F_9	11
2号煤层	3.2	F_{10}	15
2号煤层底板	30.8	F_{14}	40
6号煤层	1.1		
6号煤层底板	35.5		
K_2 灰岩含水层	10.0		
泥岩	41.0		
奥灰水层	58.0		
断层	1.0		

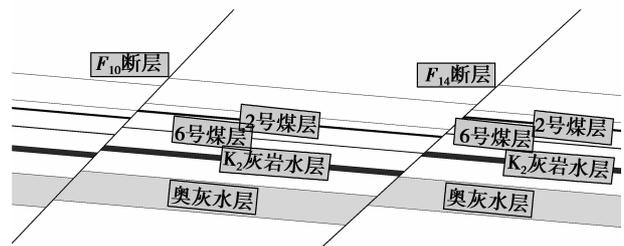


图3 模拟煤岩层及断层的位置情况

表2 数值模型物理力学参数

序号	煤岩层名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模 E/MPa	泊松 比 μ	内聚 力 C/MPa	内摩 擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉 强度/ MPa
1	粉砂岩	2 450	22.0	0.30	10.2	34.00	4.3
2	2号煤层顶板	2 800	30.0	0.23	16.5	42.00	7.5
3	2号煤层	1 400	2.0	0.34	4.5	32.00	1.2
4	2号煤层底板	2 600	25.0	0.28	11.3	35.00	5.2
5	6号煤层	1 400	2.0	0.34	4.5	32.00	1.2
6	6号煤层底板	2 600	26.0	0.26	15.6	37.00	6.5
7	石灰岩 K_2	2 650	30.0	0.24	16.7	40.00	7.3
8	泥岩	2 550	24.0	0.28	12.1	34.00	4.1
9	灰岩	2 700	32.0	0.22	20.6	45.00	8.4
10	断层	2 300	0.5	0.38	1.0	30.00	0.2

由表 1 和图 3 可知,断层 F_{14} 的落差最大,落差越大,煤层距离含水层越近,在采动作用下,采掘空间就越容易发生突水事故。因此,本次数值模拟重点模拟临近 F_{14} 断层的工作面的相关情况。就矿井突水而言,只要能保证靠近 F_{14} 断层工作面的安全开采,就能保证其他工作面的回采安全。

2.3 开采方案及防隔水煤(岩)柱设置

为研究下保护层开采过程中顶底板的变形及破坏程度,本次模拟计算开采方案及防隔水煤(岩)柱的设置情况见表 3。所取工作面的走向长度 800 m,倾向长度 240 m,工作面采用走向长壁后退式开采方法,工作面布置情况如图 4 所示。

表 3 数值模拟中工作面开采方案及防隔水煤(岩)柱设置

工作面走向推进/m	防隔水煤(岩)柱宽度设置/m (距离 F_{14} 断层)
100	
200	
400	10、20、30、40、50、60
600	
800	

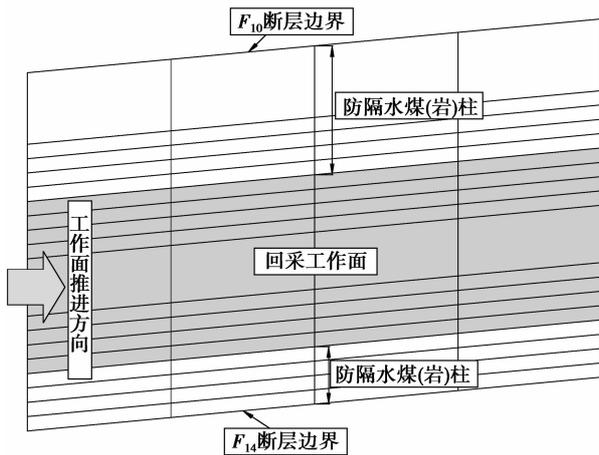
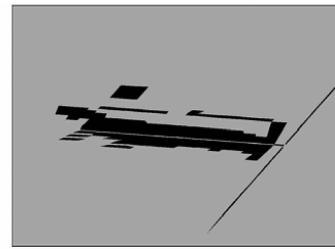


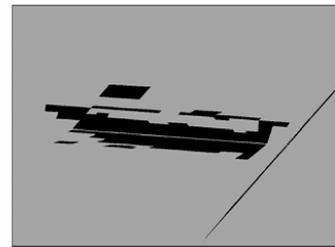
图 4 回采工作面布置图

3 数值模拟结果与分析

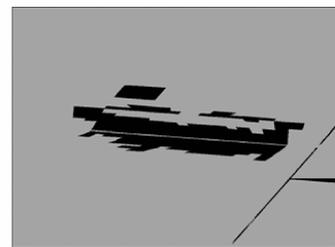
根据数值计算模型,可得到各种计算工况下 6 号煤层开采后顶底板的破坏情况,由于计算方案比较多,限于篇幅,这里只给出工作面推进 800 m 后 6 号煤层顶底板塑性区分布情况(图 5 所示)。



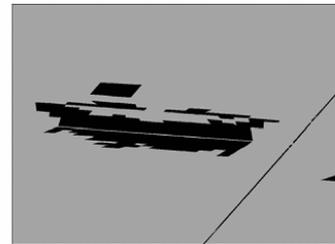
(a)防隔水煤(岩)柱10 m



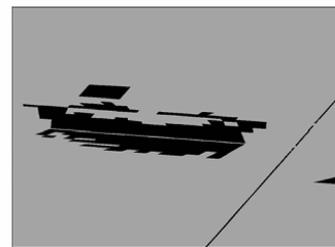
(b)防隔水煤(岩)柱20 m



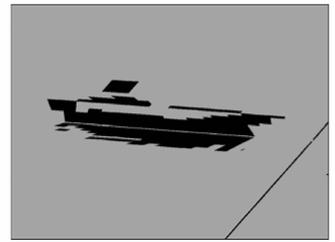
(c)防隔水煤(岩)柱30 m



(d)防隔水煤(岩)柱40 m



(e)防隔水煤(岩)柱50 m



(f)防隔水煤(岩)柱60 m

图 5 工作面推进 800 m 时 6 号煤层顶底板塑性区分布情况

对各种计算工况的塑性区计算结果进行处理后,可以得到6号煤层开采时对底板扰动破坏的深度(见表4)。

表4 6号煤层开采后底板扰动破坏深度 m

煤柱 宽度	不同工作面推进时的底板破坏深度				
	100 m	200 m	400 m	600 m	800 m
10	2.96	11.83	17.75	17.75	20.71
20	2.96	8.87	17.75	17.75	20.71
30	2.96	8.87	17.75	17.75	20.71
40	2.96	8.87	17.75	20.71	20.71
50	5.92	11.83	17.75	17.75	20.71
60	5.92	11.83	14.79	17.75	20.71

根据表4中的数据,可以得到6号煤层底板扰动破坏深度随防隔水煤(岩)柱宽度的变化规律,如图6所示。

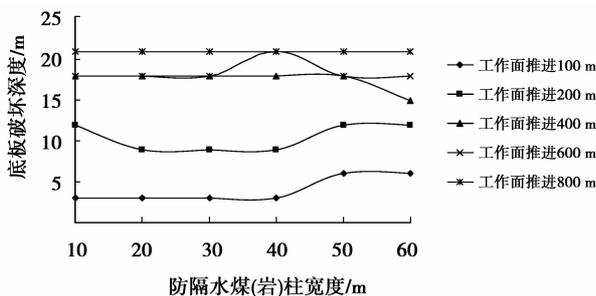


图6 6号煤层底板扰动破坏深度随防隔水煤(岩)柱宽度的变化趋势

由图6可知,受断层的影响,6号煤层底板扰动破坏深度随防隔水煤(岩)柱宽度的变化有所波动,总体上看,在煤柱为20~30 m时,煤层底板扰动破坏深度最小。

为检验数值模拟结果的准确性,可以利用经验公式来核实防隔水煤(岩)柱的宽度。根据中国煤矿防治水规定^[14],含水或导水断层隔水煤(岩)柱的留设可以按式(1)进行计算:

$$L = 0.5KM \sqrt{\frac{3p}{K_p}} \geq 20 \text{ m}, \quad (1)$$

式中: L 为防隔水煤(岩)柱宽度,m; K 为安全系数,一般取2~5; M 为煤层厚度或采高,m; p 为水头压力,MPa; K_p 为煤的抗拉强度,MPa。

根据矿井实测资料可知,6号煤层底板所受最

大水压为3.864 MPa,由式(1)可以计算得出防隔水煤(岩)柱的宽度在4.66~11.65 m之间,取20 m,与数值模拟结果(20~30 m)吻合。因此,结合数值模拟和经验公式的结果,可以确定6号煤层开采时的防隔水煤(岩)柱宽度为20 m。

4 煤层底板突水危险性评价

根据矿井资料,该矿水害威胁主要来自 K_2 灰岩含水层(太灰水)和奥陶系灰岩含水层(奥灰水)。为合理评价6号煤层底板突水危险性,基于数值计算结果,采用有效隔水层突水系数法对6号煤层底板突水危险性进行评价。

有效隔水层突水系数法的计算方法特点^[15]:充分考虑了矿山压力对隔水层的扰动破坏,同时还考虑了岩性、构造等地质因素。其含义是每米有效隔水层所承受的水压值,当超过临界水压值时就易发生突水。计算公式为

$$T_s = P/(M - C_p), \quad (2)$$

式中: P 为防隔水煤(岩)柱所承受的静水压力,MPa; T_s 为突水系数,MPa/m; M 为底板隔水层厚度,m; C_p 为矿压扰动破坏厚度,m。

参考水文勘查孔及以往煤田钻孔资料,计算 K_2 灰岩含水层突水系数的隔水层厚度取35.5 m,计算奥陶系灰岩含水层突水系数的隔水层厚度取76.5 m。同时根据河北、河南、山东一些矿区多年的开采经验,区域临界突水系数一般介于0.060~0.150 MPa/m之间^[16]。考虑到矿区地质条件,故正常块段临界突水系数取0.10 MPa/m;在断层破碎带取0.06 MPa/m。

4.1 K_2 灰岩含水层突水危险性评价

参照矿井太灰水等水位线图,可得出 K_2 灰岩顶板标高在134.5~314.5 m之间;由矿井资料可知 K_2 灰岩水位标高为452.78 m。于是可得到6号煤层底板承受 K_2 灰岩水压在1.027 8~2.827 8 MPa之间。根据数值模拟结果,当工作面推进距离分别为100、200、400、600和800 m,防隔水煤(岩)柱宽度为100 m时的底板破坏厚度在2.96~20.71 m之间,考虑到安全性,本次计算6号煤层底板破坏厚度取工作面推进距离为800 m、防隔水煤(岩)柱宽度为20 m时的20.71 m。利用式(2)计算得出 K_2 灰岩含水层突水系数在0.069~0.191 MPa/m之间,显然,部分区域的突水系数已经超过临界突水系数0.10 MPa/m。

矿井突水危险性区域划分^[17]:

1)非突水危险区。处在灰岩含水层水位以上的

区域,不存在底板灰岩的突水危险性。

2)突水威胁区。处在灰岩含水层水位以下,正常地段底板隔水层能承受的水压值大于实际水压值(突水系数 $T_s < 0.1$ MPa/m)。但在断层附近或其他薄弱地段存在突水可能的区域。

3)突水危险区。处在灰岩含水层水位以下,正常地段底板隔水层承受的水压值小于或等于实际水压值的区域($T_s \geq 0.1$ MPa/m)。

由于6号煤层为带压开采煤层,所以对6号煤层来说,整个煤层都是有突水危险性的。当突水系数为 0.10 MPa/m 时,6号煤层底板标高为 304.88 m。因此可知,6号煤层底板标高小于 304.88 m 的区域为 K_2 太灰水突水危险区,底板标高大于 304.88 m 的区域为 K_2 太灰水突水威胁区,如图7所示。

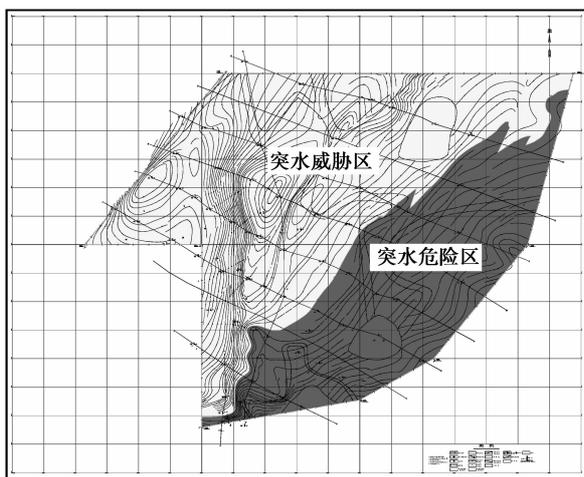


图7 太灰水突水危险性分区情况

由图7可以看出,6号煤层在开采时,突水危险区是比较大的,因此要重视矿井突水的防治工作,在开采前必须要采取充分有效的防水治水措施,才能保证6号煤层的安全开采。

4.2 奥陶系灰岩含水层突水危险性评价

参照奥灰水等水位线图,得出奥陶系灰岩顶板标高在 $93.5 \sim 273.5$ m 之间。根据矿井资料可知奥陶系灰岩最大水位标高为 523.75 m。于是,得到6号煤层底板承受奥陶系灰岩水压在 $1.7375 \sim 3.5375$ MPa 之间。

同样利用式(2)可计算得出奥陶系灰岩含水层突水系数在 $0.031 \sim 0.063$ MPa/m 之间,整个六采区的突水系数均未超过临界突水系数 0.10 MPa/m。因此,6号煤层可采范围内都为奥灰水突水威胁区。

通过上述分析可知,在原始底板水压条件下,矿

井的突水危险区范围将近一半井田面积大小,所以在开采前必须采取有效的防治水措施。该矿多年来一直致力于矿井防治水工作,并取得了比较好的效果,通过加大抽排力度,矿井的太灰水水位基本稳定在 340 m 左右。再次利用式(2)计算可得出采取措施后 K_2 灰岩含水层突水系数在 $0 \sim 0.115$ MPa/m 之间。于是可知6号层底板标高小于 192.1 m 的区域为突水危险区, 192.1 m 以上的区域为突水威胁区。六采区6号煤层底板标高在 $200 \sim 350$ 之间,所以采取有效措施后,已经消除了六采区的突水危险区。

5 结论

通过对下保护层开采断层防隔水煤(岩)柱安全宽度仿真分析与突水危险性评价研究,可得到如下认识:

1)利用数值模拟方法来确定安全防隔水煤(岩)柱的宽度是比较准确、可信的。

2)断层的存在对安全防隔水煤(岩)柱的宽度及顶底板破坏深度有着重要影响,在开采实际中应尽量避开断层等影响区。如果无法回避,则应该合理处理断层与开采之间的关系,使之对开采的影响降至最小。

3)在有水害的矿井进行突水危险性评价时,应充分考虑保护层开采所引起的底板破裂的影响。如果不考虑开采所导致的裂隙带深度的影响,则得到的计算结果将会失真。同时,突水危险性评价完成后,应该划分出非突水危险区、突水威胁区和突水危险区,并在矿井的采掘工程平面图中进行标注,以指导煤矿井下安全开采。

参考文献:

- [1] 张金才,张玉卓,刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京:地质出版社,1997.
- [2] 彭苏萍,王金安. 承压水体上安全采煤[M]. 北京:煤炭工业出版社,2001.
- [3] 赵阳升,胡耀青. 承压水上采煤理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2004.
- [4] 尹尚先. 陷落柱防水煤柱留设对围岩变形影响的数值模拟[J]. 煤炭学报,2006,31(2):179-182.
YIN Shangxian. Numerical simulation of influence of water barrier pillars for subsided column on rock failure in mining process [J]. Journal of China Coal Society, 2006,31(2):179-182.
- [5] 王宏图,洪松,胡国忠,等. 急倾斜下保护层保护范围数值模拟机验证[J]. 重庆大学学报,2009,32(6):

- 629-632.
WANG Hongtu, HONG Song, HU Guozhong, et al. Simulation and validation of mining below protective layers in a steeply dipping coal bed [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(6): 629-632.
- [6] 催芳鹏, 武强, 胡瑞林, 等. 断层防水煤(岩)柱安全宽度的计算与评价[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 517-520.
CUI Fangpeng, WU Qiang, HU Ruiling, et al. Calculation and evaluation on the safe width of fault waterproof of coal (rock) pillar [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2009, 28(4): 517-520.
- [7] 刘志军, 胡耀青. 承压水上采煤断层突水的固流耦合研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(10): 1046-1050.
LIU Zhijun, HU Yaoqing. Solid-liquid coupling study on water inrush through faults in coal mining above confined aquifer [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(10): 1046-1050.
- [8] 杨天鸿, 唐春安, 刘红元, 等. 承压水底板突水失稳过程的数值模型初探[J]. 地质力学学报, 2003, 9(3): 281-288.
YANG Tianhong, TANG Chun'an, LIU Hongyuan, et al. Numerical model of the instability-failure process of the coal seam floor due to confined water inrush [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(3): 281-288.
- [9] 卜万奎, 茅献彪. 断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 386-394.
BU Wankui, MAO Xianbiao. Research on effect of fault dip on fault activation and water inrush of coal floor [J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 386-394.
- [10] Hu G Z, Wang H T, Li X H, et al. Numerical simulation of protection range in exploiting the upper protective layer with a bow pseudo-incline technique [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(1): 58-64.
- [11] Yao B H, Bai H B, Zhang B Y. Numerical simulation on the risk of roof water inrush in Wuyang Coal Mine [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 22(2): 273-277.
- [12] Zhu Q H, Feng M M, Mao X B. Numerical analysis of water inrush from working-face floor during mining [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2008, 18(9): 159-163.
- [13] 武强, 潘国营, 管恩太, 等. 焦作矿区突水灾害研究综述[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(4): 44-49.
WU Qiang, PAN Guoying, GUAN Entai, et al. A study summary of water-bursting hazards in Jiaozuo mining region [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995, 6(4): 44-49.
- [14] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [15] 石怀虎, 白维灿, 程英好. 岩溶充水矿区煤层底板突水危险性评价方法探讨: 以山东新驿井田为例[J]. 中国煤田地质, 2007, 19(Sup2): 38-40, 56.
SHI Huaihu, BAI Weican, CHENG Yinghao. A discussion on coal seam floor water bursting hazard appraisal method in karstic water filling mining areas: a case study of Xinyi minefield, Shandong [J]. Coal Geology of China, 2007, 19(Sup2): 38-40, 56.
- [16] 刘其声. 关于突水系数的讨论[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(4): 34-37, 42.
LIU Qisheng. A discussion on water inrush coefficient [J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4): 34-37, 42.
- [17] 张平卿. 浅谈底板灰岩水的突水危险性分区[J]. 中州煤炭, 2009(10): 102-103.
ZHANG Pingqing. A discussion on limestone water inrush risk zoning in coal seam floor [J]. Zhongzhou Coal, 2009(10): 102-103.

(编辑 张 苹)