

孙疃矿底板破坏的数值模拟及现场实测

李文敏, 陈晶晶, 黄东兴, 杨志雄

(广东宏大爆破有限公司 大宝山项目部, 广东 韶关 512000)

摘要:结合淮北孙疃煤矿的工程地质条件,利用 FLAC^{3D}数值模拟软件的流固耦合功能,对孙疃煤矿 1028 工作面进行数值模拟,数值模拟分析得到底板最大破坏深度为 24 m,承压水导升高度为 12 m,工作面不会发生突水事故.同时布置钻孔在孙疃矿 1028 工作面上回风巷上,以对煤层底板进行现场电阻率 CT 探测,探测结果分析得到煤层底板的最大破坏深度为 17 m,底板仍然具有完整隔水层,不会发生突水.将得到的实测结果与数值模拟结果进行对比,得出数值模拟结果与现场实测相近.

关键词:流固耦合;数值模拟;底板实测;电阻率 CT 探测

中图分类号:TD821 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-5876(2014)01-0053-05

The numerical simulation and field measurement of the floor damage in Suntuan Coal Mine

LI Wenmin, CHEN Jingjing, HUANG Dongxing, YANG Zhixiong

(The Dabaoshan Project Department, Guangdong Grand Blasting Co. Ltd., Shaoguan 512000, China)

Abstract: Combined with the engineering geological conditions of Suntuan Coal Mine in Huaibei, and by using FLAC^{3D} numerical simulation software of fluid - structure interaction function, the numerical simulation is carried out on the Suntuan Coal Mine 1028 working face, the numerical simulation analysis for floor maximum damage depth is 24 m, confined water guide to rise height is 12 m, and working face water inrush accidents will not occur. Meanwhile, the borehole on Suntuan Coal Mine 1028 working face return air lane is arranged, to conduct site resistivity CT detection of coal floor. By analyzing the detection results, it concludes that the largest coal floor damage depth is 17 m, the floor is still full of water - resisting layer, and water inrush will not occur. The test results are compared with the numerical simulation results, and the results of numerical simulation and field measurement are much close.

Key words: fluid - structure interaction; numerical simulation; backplane measured; the resistivity CT detection

淮北矿业集团的孙疃煤矿 1028 工作面开采煤层为 10[#]煤层,厚度为 0.8 ~ 4.5 m,平均厚度 $H = 3.4$ m.煤层倾角 17°,普氏系数 $f = 2$,煤的分类为焦煤及肥煤,可采指数为 61%,煤层的变异系数为 18%,煤层地质构造简单且稳定,煤层顶底板主要为泥岩、粉砂岩,有些局域顶底板均为细砂岩;煤层距离下部的承压含水层 51.69 ~ 68.31 m,平均 58.38 m,根据地面钻孔观测资料,含水层为强富

含水性,平均承压水水压为 4 MPa^[1].

根据工作面现在推进到的位置,与工作面附近钻孔所涉及的岩层层位,选择距离实验测试现场最近的孙疃矿井 20-3 钻孔柱状(表 1),作为数值模拟所需的各岩层的标准地质资料^[2].为了便于数值计算,将柱状图内岩层厚度不足 1 m 的岩层合并到其上或者其下的岩层内,这对数值模拟结果的影响是可以接受的^[3].

表1 1028工作面顶底板柱状数据

| 层序号 | 深度 /m | 伪厚 /m | 真厚 /m | 真厚累计 /m | 岩石名称 |
|-----|----------|----------|----------|------------|-------|
| 124 | 481.0 | 4.75 | 4.50 | 462.31 | 细砂岩 |
| 125 | 482.60 | 1.50 | 1.45 | 463.76 | 粉砂岩 |
| 126 | 486.70 | 3.10 | 2.99 | 466.75 | 中砂岩 |
| 127 | 486.70 | 1.00 | 0.96 | 467.72 | 粉砂岩 |
| 128 | 489.70 | 3.00 | 2.90 | 470.62 | 细砂岩 |
| 129 | 500.55 | 10.85 | 10.48 | 481.10 | 粉砂岩 |
| 130 | 501.28 | 0.73 | 0.68 | 481.78 | 10煤 |
| 131 | 501.37 | 0.09 | 0.08 | 481.86 | 泥岩 |
| 132 | 502.67 | 1.30 | 1.21 | 483.07 | 10煤 |
| 133 | 502.77 | 0.10 | 0.09 | 483.17 | 泥岩 |
| 134 | 503.82 | 1.05 | 0.96 | 484.15 | 10煤 |
| 135 | 505.10 | 1.28 | 1.19 | 485.34 | 泥岩 |
| 136 | 612.10 | 7.00 | 6.58 | 491.88 | 砂泥岩互渗 |
| 137 | 523.20 | 11.10 | 10.36 | 502.24 | 细砂岩 |
| 138 | 531.60 | 8.40 | 7.94 | 510.18 | 中砂岩 |
| 139 | 534.58 | 2.98 | 2.78 | 512.96 | 粉砂岩 |
| 140 | 538.62 | 4.24 | 3.96 | 516.92 | 中砂岩 |
| 141 | 539.12 | 0.30 | 0.28 | 517.20 | 碳质泥岩 |
| 142 | 548.09 | 8.97 | 8.37 | 525.67 | 泥岩 |
| 143 | 557.50 | 9.41 | 8.78 | 534.36 | 粉砂岩 |
| 144 | 567.49 | 9.99 | 9.33 | 543.68 | 泥岩 |
| 145 | 571.29 | 3.80 | 3.55 | 547.23 | 灰岩 |

1 FLAC^{3D}数值计算模型的建立

1.1 建立网格

计算模型中煤层倾角取 17° ,采高 $H=3.4\text{ m}$,工作面长 $L=180\text{ m}$,综采放顶煤.为更符合工作面现场实际,消除数值边界效应,煤层走向以及倾向的端部各加入 60 m 的护巷煤柱.故数值模拟的计算模型的倾向和走向长度都有 300 m .数值模拟中计算模型分为18层,顶板9层,底板8层,煤层1层,模型垂直高度设置为 200 m .具体计算模型如图1.数值模型顶部,施加垂直向下的均布载荷,其大小为顶部至地表的岩体自重.根据“见方跨落”的实践经验:工作面推进长度近似于工作面长度时,矿山压力的显现最为明显,因此数值模拟中工作面开挖长度 $S=180\text{ m}$ 时,终止计算^[4].

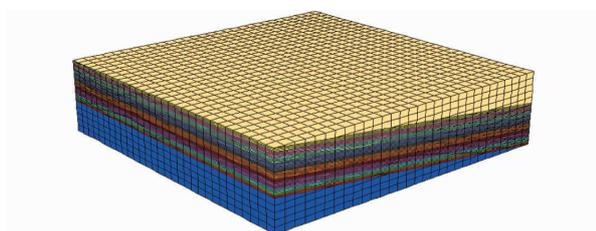


图1 数值计算模型网格图

1.2 边界条件

力学边界:模型的左右前后固定水平移动,允许发生垂直方向移动^[5].模型底部各个方向的位移设置为零.顶部不设置位移限制.模型内部应力设置为顶部的均布载荷加上其下面每层岩层的自重.模型内部水平应力为垂直应力乘以侧压系数 0.75 ^[5].

流体边界:数值模型的除了底部均为不透水边界,底部设置为透水边界,是为了表现下部含水层的富含水性.压力水头边界定在模型内部含水层的顶部,大小按该工作面现场实际而设定为 $P=4\text{ MPa}$.含水层的初始饱和度设为1,含水层以上的各岩层初始饱和度为0,各岩层的渗透系数换算为FLAC^{3D}的迁移系数取 $K=1 \times 10^{-9}\text{ m}^{-2}/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ^[6].

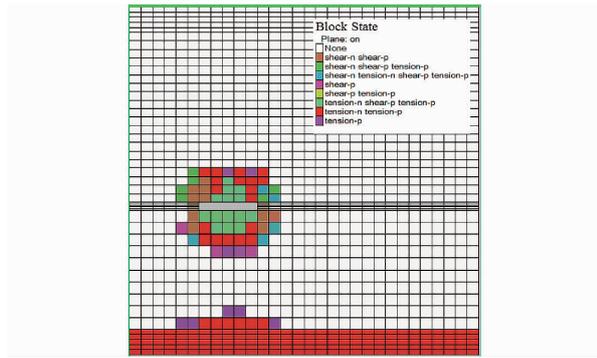
初始计算设定:先对模型进行力学计算,达到初始应力平衡后,再打开流体计算,使模型内部同时达到力学与流体平衡,这样初始计算完成.然后进行开挖计算,每一步开挖之后,开始流-固耦合计算,达到平衡以后,再进行下一步开挖^[7-9].

2 数值模拟结果分析

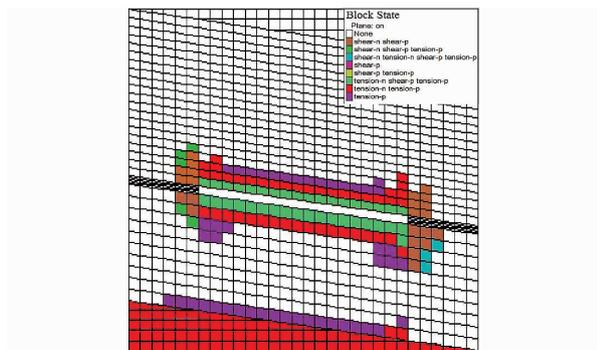
2.1 工作面推进50 m时底板破坏

工作面推进 50 m 时工作面周边塑形区范围如图2.

从图2(a)可以看出,工作面推进 50 m 时,走向方向上底板破坏深度为 24 m ,采空区下方底板岩体随着深度的增加破坏程度减少,底板深度 $0 \sim 12\text{ m}$ 范围内发生比较大的张拉性破坏;其中 $0 \sim 6\text{ m}$ 范围内的底板岩层完全失去隔水能力, $6 \sim 12\text{ m}$ 范围内只工作面两端面下方具有一定的隔水能力.底板深度 $12 \sim 18\text{ m}$ 范围破坏相对较小,底板深度 $18 \sim 24\text{ m}$ 破坏更小.工作面前方煤壁下方岩体 $0 \sim 12\text{ m}$ 发生较大的剪切破坏.承压水导升最高处位于采空区中部下方,由于孔隙水压力作用,使得含水层上方岩层发生张裂破坏高度为 12 m .从图2(b)可以看出,倾斜方向上最大破坏深度发生工作面下端面,同时底板破坏也呈现出层状破坏的形式,底板 $0 \sim 6\text{ m}$ 发生彻底的张拉性破坏, $6 \sim 12\text{ m}$ 张拉破坏程度相对较小.



(a)工作面走向

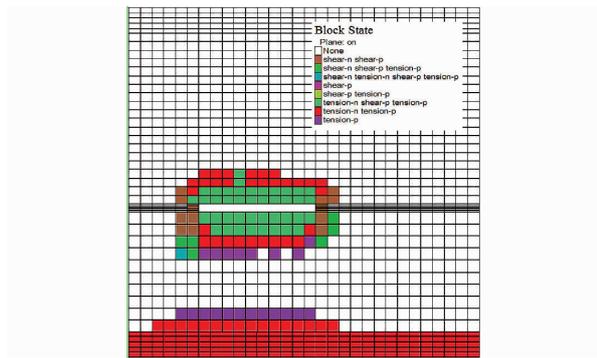


(b)工作面倾向

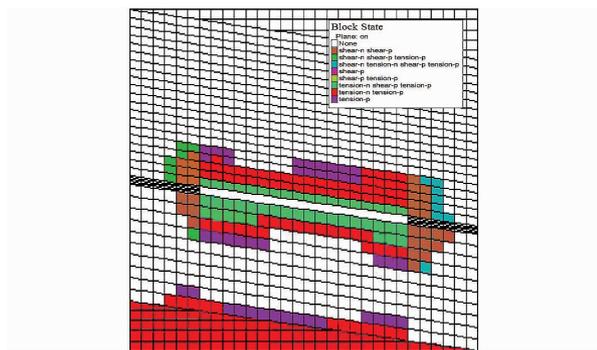
图 2 工作面推进 50 m 时工作面周边塑性区范围

2.2 工作面推进 100 m 时底板破坏

工作面推进 100 m 时工作面周边塑性区范围如图 3。



(a)工作面走向



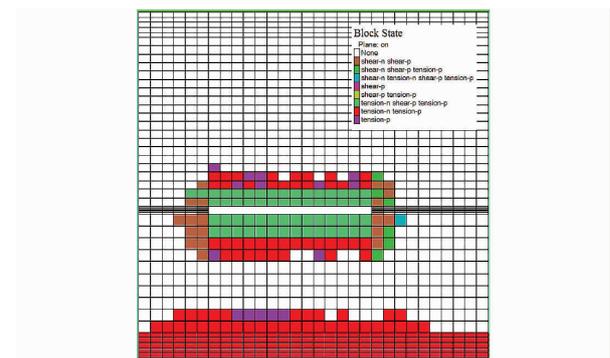
(b)工作面倾向

图 3 工作面推进 100 m 时工作面周边塑性区范围

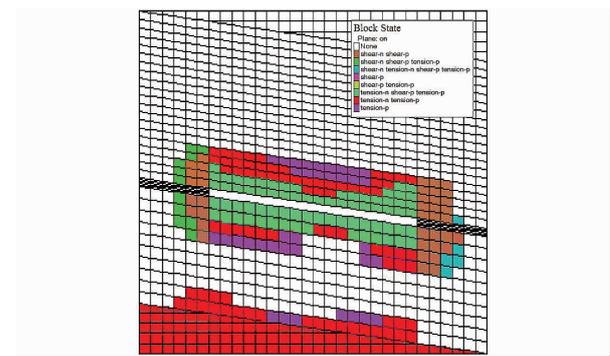
从图 3(a)可以看出,工作面推进 100 m 时,采空区下方底板破坏范围增大了,破坏程度有加深,破坏深度为 24 m。从图 3(b)可以看出,工作面推进 100 m 时,下端面煤体下方底板岩体破坏程度很深,因为挤压而发生的剪切破坏达到距离煤壁 20 m 深处,承压水导升高度虽未发生变化,但由于工作面推进底板卸压范围的增加,导致承压水导升范围发生增加。

2.3 工作面推进 140 m 时底板破坏

工作面推进 140 m 时工作面周边塑性区范围如图 4。



(a)工作面走向



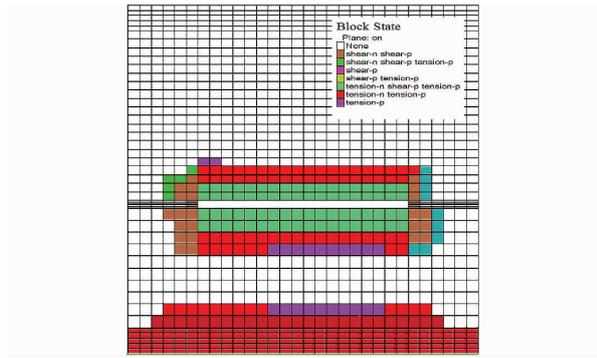
(b)工作面倾向

图 4 工作面推进 140 m 时工作面周边塑性区范围

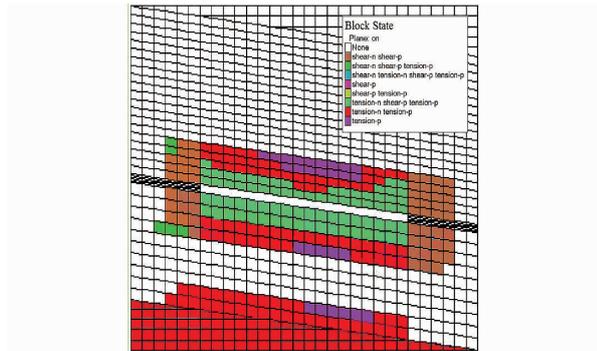
从图 4(a)可以看出,工作面推进 140 m 时,采空区下方 0 ~ 12 m 的底板发生完全的张拉性破坏,彻底失去隔水能力。12 ~ 24 m 的底板发生较为强烈的破坏,但仍然具有一定的隔水能力,底板破坏深度为 24 m。从图 4(b)可以看出倾斜方向上,工作面中部底板破坏程度及深度相对加深,工作面下端面破坏深度及破坏程度最大。

2.4 工作面推进 180 m 时底板破坏

工作面推进 180 m 时工作面周边塑性区范围如图 5。



(a) 工作面走向



(b) 工作面倾向

图 5 工作面推进 180 m 时工作面周边塑性区范围

从图 5(a)可以看出,采空区下方 0 ~ 12 m 底板发生完全的张拉性破坏,失去隔水能力;12 ~ 18 m 发生较为大的张拉性破坏,隔水能力已经很弱;12 ~ 18 m 距离煤壁较近的底板岩层破坏程度大于采空区中部下方底板岩层.从图 5(b)可以看出工作面上下端面破坏深度一样,但下端面底板破坏程度更深,下端面下方的承压水导升破坏带张拉性破坏程度要大于上端面,因此可以推断下端面发生突水可能性更大.

3 底板破坏实测

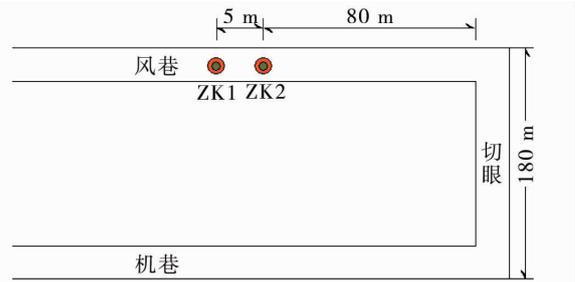
3.1 钻孔 CT 探测系统布置

为获得合理有效底板破坏结果,结合 1028 工作面实际地质条件,本次探测以 1028 工作面风巷为钻孔实施地点,共布置 2 个底板钻孔,两孔水平间距 5 m.图 7 中 ZK1 主要探测深部裂隙发育规律,ZK2 主要探测浅部裂隙发育规律^[10,11].施工测试钻孔平面布置图和剖面布置图如图 6 所示.

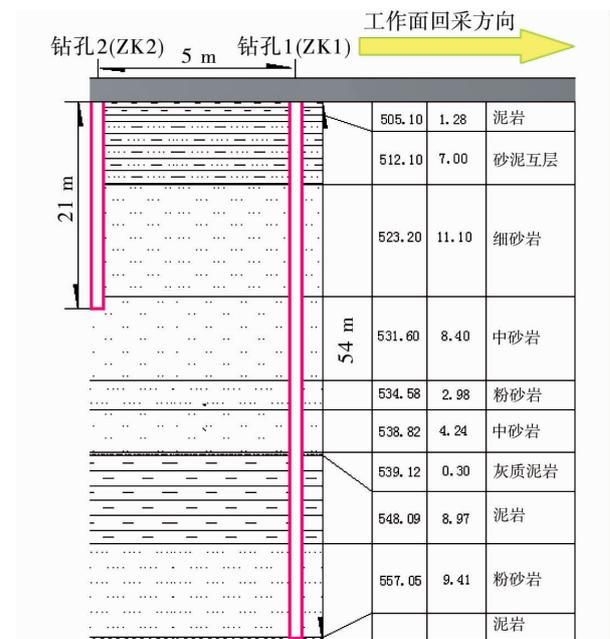
3.2 震波检层探测结果

如图 7 所示,依据工作面回采进度,工作面距 ZK2 为 75 m(点在工作面前方为正,反之为负)实

施现场钻孔第一次数据采集,后续结合工作面回采进度情况,共实施 3 次测试,分别为工作面距 ZK2 点 31, 0, -25 m.



(a) 施工平面布置图



(b) 施工剖面布置图

图 6 钻孔施工图

电阻率 CT 探测结果:通过数据反演,获得 ZK1 和 ZK2 之间电阻率 CT 图像,对比不同测试时间 CT 图像(图 8)中的电阻率值,可以解释底板破坏深度及其发育规律.

1028 工作面底板钻孔检测,震波检层和直流电阻率 CT 测试结果如下:

1) 底板破坏分为 4 个等级:底板 0 ~ 10 m 发生塑性程度破坏较深,10 ~ 19 m 发生塑性破坏程度相对较浅,19 m 以下煤层底板未发生破坏.

2) 底板破坏带深度为 19 m,岩层中垂向裂隙和横向裂隙发育明显.

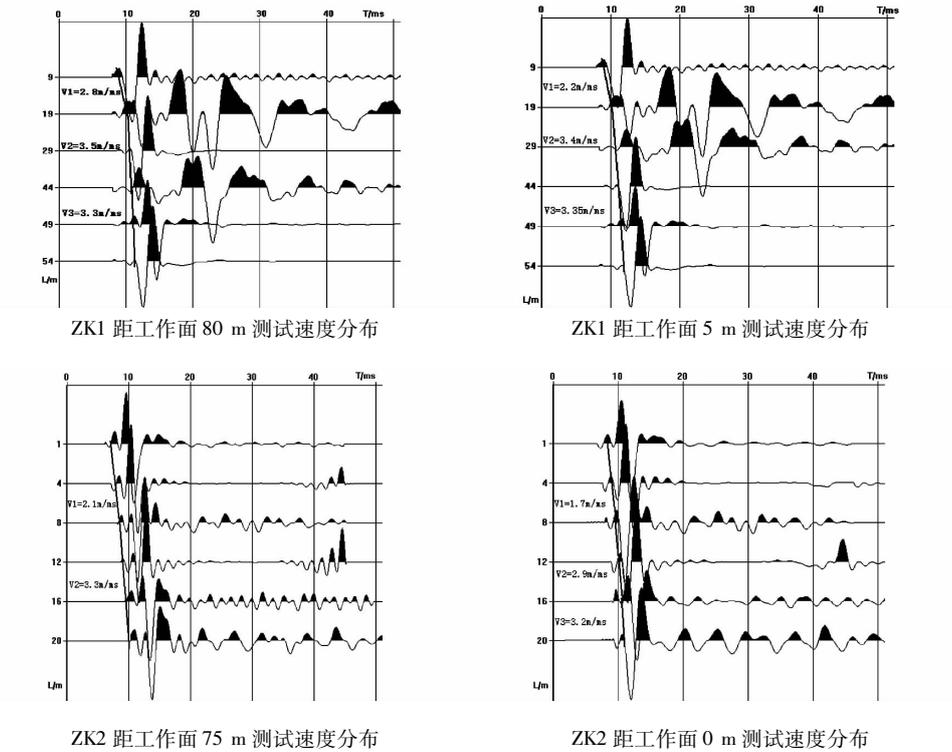


图 7 震波探测图

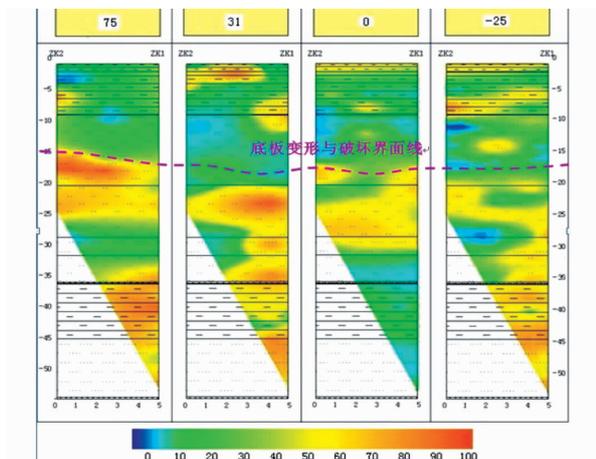


图 8 4 次测试电阻率分布对比解释图

4 结论

- 1) 底板的最大破坏深度为 24 m, 承压水导升高度为 12 m, 且工作面不会发生底板突水。
- 2) 底板的破坏程度分为 4 个等级: 0 ~ 12 m 发生较为强烈的张拉破坏; 12 ~ 18 m 破坏相对较小; 18 ~ 24 m 张拉破坏更小; 24 m 以下岩层不发生破坏。
- 3) 底板的破坏深度为 17 m。
- 4) 数值模拟与现场实测结论相近。

参考文献:

[1] 高召宁, 孟祥瑞. 采动条件下煤层底板变形破坏特征研

究[J]. 矿业安全与环保, 2010, 6(37): 17 - 20.

[2] 虎维岳, 朱开鹏, 黄选明. 非均布高压水对采煤工作面底板隔水层破坏特性及其突水条件研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(7): 1110 - 1114.

[3] 李凯, 茅献彪, 李明, 等. 含水层水压对底板断层突水危险性的影响[J]. 力学季刊, 2011, 32(2): 262 - 265.

[4] 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): 45 - 47.

[5] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.

[6] 李洪兵, 谷新建, 宋嘉栋, 等. 郑家坡铁矿隔水矿柱厚度的确定[J]. 矿业工程研究. 2013, 28(1): 34 - 38.

[7] Zhang J C, Mao B, Roegiers J C, et al. Experimental determination of stress - permeability relationship [J]. Pacific Rock 2000 Girard Liebman, 2012, 21(3): 817 - 822.

[8] Sonley M, Homand F, Pepa S, et al. Damage - induced permeability changes in granite: a case example at the URL in Canada [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, (38): 97 - 310.

[9] Roif Malmken, Kollmeier M. Finite element simulation for rock salt with dilatancy boundary coupled to fluid generation[M]. Computer Metallurgy and Applied Engineering, 2001.

[10] Li L, Holt R M. Simulation of flow in sandstone with fluid coupled particle model [C]//Rock Mechanics in the National Interest. Swats Zeitingers Lessee, 2001.

[11] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(s1): 2016 - 2622.