

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.08.029

基于数值模拟的厚黄土煤炭 开采区冒裂带高度研究^①

董震雨¹, 王双明¹, 侯恩科²

1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学 地质与环境工程学院, 西安 710054

摘要: 陕北黄土高原煤矿区覆盖着厚黄土层且水资源短缺, 为了指导其安全生产和水资源保护, 以黄陵二号矿为例, 应用多种方法研究冒裂带发育高度, 以期得出较优的预测方法, 并得出黄陵矿区适合的裂采比。研究主要利用有限差分软件(FLAC3D)进行数值模拟, 由于厚黄土自重影响基岩开采沉陷, 计算中使用了厚黄土有效载荷对应的等效开采宽度。研究还应用了经验公式计算法和实际钻探测量法, 对比实际钻探测量数据, 数值模拟结果与其较为一致, 而经验公式计算结果则小得多。因此在黄陵厚黄土层煤矿区, 经验公式并不适用, 而数值模拟则较为准确。通过综合分析计算结果, 得出黄陵二号矿适合的裂采比为 28, 并应用裂采比对黄陵二号矿首采区顶板突水危险性进行了分区预测, 为其水害的预防和控制提供了参考。

关键词: 黄土高原; 厚黄土层; 冒裂带; FLAC3D; 经验公式; 突水危险性; 分区预测

中图分类号: TD167

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)08-0186-07

煤炭资源的开采, 导致上覆岩体中冒裂带的形成, 一旦导通含水层, 就会导致地下水下泄涌入矿井, 产生水害, 这是制约煤炭安全开采的一个重要因素。此外地下水的下泄还会致使矿区内地表水位下降乃至泉水、湖淖干涸, 河流基流量减退甚至是断流等水资源流失衰减的问题, 随之而来的是地表生态环境的恶化和地质灾害的发生。有效地减少水资源的破坏是保护其地表生态环境的重要措施, 因此保水采煤势在必行, 而冒裂带高度的预测对于保水采煤具有重要的指导意义。

陕西黄土高原地区属于半干旱气候, 水资源贫乏, 生态环境脆弱, 其上覆黄土层厚度为 60~300 m, 占煤层埋深的 30%~70%, 对煤层顶板开采塌陷有很大的影响, 因此对于黄土高原地区矿区的冒裂带高度研究需要考虑到黄土层的有效载荷。黄陵二号煤矿位于黄土高原南部, 于 2012 年发生过两次井下突水事故^[1], 对煤矿生产造成了一些不良影响, 而目前没有综合研究给出一个合适的裂采比来进行冒裂带高度的预测, 指导保水采煤的进行。笔者在资料收集和野外调查的基础上, 以黄陵二号矿为例对厚黄土覆盖矿区顶板冒裂带高度进行了研究。

1 矿井地质概况与水文地质条件

黄陵二号煤矿地层平缓, 走向北东东, 倾向北北西, 倾角为 1~5°, 且构造简单, 活动微弱, 断层不发育, 地表覆盖黄土层。井田地层由老至新有: 三叠系上统永坪组(T_{3y})、瓦窑堡组(T_{3w}); 侏罗系下统富县组(J_{1f})厚 5~20 m、中统延安组(J_{2y})厚 50~120 m、直罗组(J_{2z})厚约 140 m、安定组(J_{2a})厚约 25 m; 白

① 收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2011JC016); 鄂尔多斯盆地地下水与生态环境关系研究科研平台建设(201311076)。作者简介: 董震雨(1985-), 男, 河南许昌人, 在读博士研究生, 主要从事水文地质工程地质方面的研究。

系下统宜君组(K_{1y})厚约 13 m、洛河组(K_{1L})厚约 177 m、环河华池组(K_{1h})厚 152 m; 新近系上新统(N_2)厚 26 m; 第四系中、上更新统(Q_{2+3})厚 50~200 m; 全新统(Q_4)厚约 7 m 等地层. 主要开采煤层为 2 号煤层, 其厚度变化较小, 形态较为规则, 保存完整, 全井田大部分可采, 属厚度稳定的中厚—厚煤层, 一般厚度在 1.30~6.75 m 之间, 平均可采厚度为 3.5 m, 采用综合机械长壁式采煤法, 全部垮落法管理顶板.

二号煤矿矿区地下主要含水岩层及其特征如下:

1) 白垩系下统洛河组砂岩裂隙孔隙地下水(K_{1L}): 基本全区分布, 厚 0~276.21 m, 平均 177.05 m, 主要为中粒砂岩, 水位埋深 1.13~153.37 m, 单位涌水量 0.007 11~2.904 6 L/s·m, 渗透系数 0.008 28~8.458 6 m/d, 属富水性中等—强的地层;

2) 侏罗系中统直罗组下段砂岩裂隙孔隙地下水(J_{2z}^1): 全区分布, 厚 23.54~100.90 m, 平均 71.19 m. 顶部为细砂岩, 中下部主要为中、粗粒长石石英砂岩, 底部含砾, 水位埋深 9.15~157.81 m, 单位涌水量 0.000 61~0.005 68 L/s·m, 渗透系数 0.000 73~0.007 51 m/d, 富水性弱;

3) 三叠系上统永坪组和瓦窑堡组砂岩裂隙地下水($T_{3Y}-T_{3W}$): 含煤地层的基底岩层, 主要为灰色、灰绿色泥岩及粉砂岩, 夹细粒砂岩, 单位涌水量 0~0.187 L/s·m, 富水性随埋深增加而递减, 富水性弱.

相对隔水层如下: 侏罗系中统直罗组上段相对隔水层(J_{2z}^2); 侏罗系中统延安组上部相对隔水层(J_{2y}^+); 侏罗系中统延安组下部与富县组相对隔水层(J_{2y}^1 , J_{1f}).

2 数值模拟计算模型的建立

以黄陵二号矿 107 工作面为例来进行数值模拟, 其煤层的直接顶、直接底为侏罗系的砂岩和泥岩互层, 地层平缓, 其上覆黄土层厚约 100 m. 107 工作面煤层平均开采厚度为 3.5 m, 工作面开采宽度为 260 m.

2.1 屈服模型的选择

FLAC3D 软件包含 12 种材料模型^[2-4], 针对不同的岩石力学条件使用对应的屈服模型. 地表土层是一种弹塑性材料, 使用 Mohr-Coulomb 准则来描述, 岩石是一种脆性材料, 在煤层开采后覆岩会发生破坏变形, 使用 Hoek-Brown 强度准则进行数值模拟分析.

2.2 岩体物理力学参数的选取

综合分析黄陵矿区二号矿普查报告、详查报告中的物理力学参数, 对各个岩层及地表土层的物理力学参数进行取值(表 1、表 2).

表 1 松散层的物理力学性质

松散层名称	厚度/ m	容质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模/ MPa	泊松比/ μ	抗拉强度/ MPa	摩擦角/ °	内聚力/ MPa
黄土	83	1 702	42.17	0.28	0.001 8	22.07	0.048
粘土	20	1 845	50.17	0.24	0.002 3	21.10	0.054

表 2 煤层覆岩的物理力学性质

岩石名称	厚度/ m	容质量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模/ MPa	泊松比/ μ	抗拉强度/ MPa	内摩擦角/ °	内聚力/ MPa
洛河组砂岩	80	2 410	28 600	0.17	1.78	43	2.7
泥岩	40	2 420	14 000	0.22	1.2	35	0.36
中细粒砂岩	100	2 500	15 470	0.17	1.4	40	1.2
泥岩砂岩互层	54	2 180	26 840	0.16	0.97	38.5	0.5
2 号煤	3.5	1 350	600	0.29	0.24	38.4	0.61
泥岩砂岩互层	10	2 220	27 900	0.18	0.97	38	0.7
泥岩夹砂岩	20	2 270	27 850	0.20	1.62	37	0.5

2.3 厚黄土层的有效载荷与等效开采宽度的量化关系

现有文献一般将松散沙层或软黏土层的荷载影响简化为其自重荷载^[5], 然而西部地区的结构性黄土由

冒落带、裂隙带和弯曲下沉带. 模拟结果表明, 采空区上方岩层内主要受拉张应力作用为拉张破坏区; 采空区上部为拉张裂隙区, 受拉区的范围随着掘进面的推进而前进, 原受压的部位被拉伸, 产生单向或双向裂隙; 位于拉张裂隙区之上和支撑压力区的岩层为塑性变形区, 其上部岩层与地表黄土层为未破坏区. 其中拉张裂隙区的范围被作为判定冒裂带高度的主要依据. 根据最大主应力和中间主应力等值线图得出, 107 工作面在采高 3.5 m 时, 冒裂带的高度为 109 m.

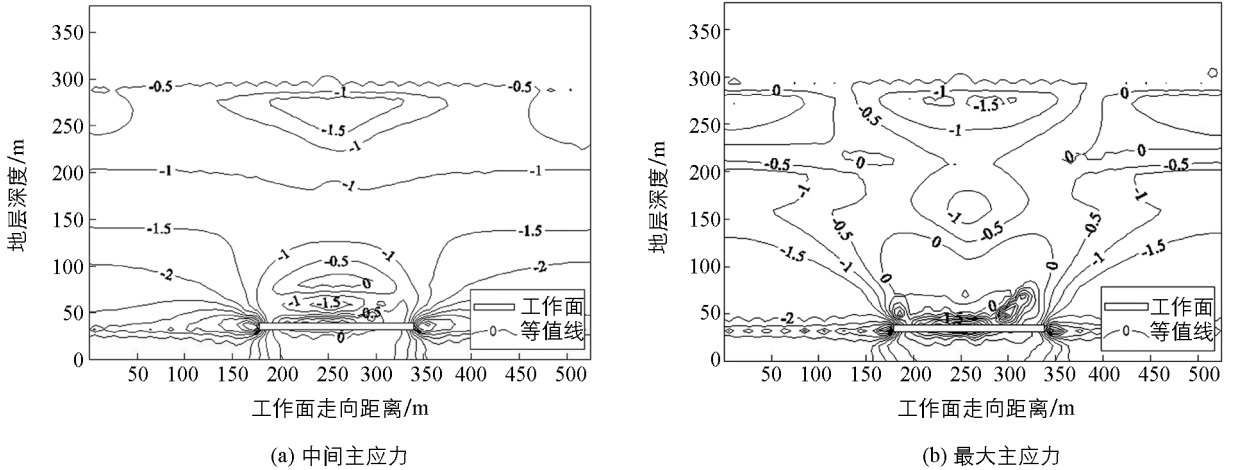


图 2 工作面走向断面中间主应力与最大主应力等值线图

3.2 塑性区分布结果分析

工作面走向推进至 160 m 时, 走向断面的塑性区分布如图 3 所示. 由于工作面的采动, 煤层顶板出现了不同程度的破坏, 岩层属于脆性材料, 其屈服后, 进入塑性状态, 其完整性遭到严重破坏: 一方面岩层自有的裂隙被进一步地延伸和拓展; 另一方面又有新的裂隙产生, 这些裂隙相互导通构成了裂隙通道. 因此, 预测冒裂带高度的主要判断依据之一是塑性破坏区的范围. 根据塑性区分布图, 边界条件制约的上部、左右边界未出现塑性变化区, 工作面采空区上方的岩层受到应力破坏产生塑性变形, 根据工作面采空区上方出现的塑性变形区, 得出覆岩内塑性区分布的最大高度为 83 m.

综上, 107 工作面采厚 3.5 m 时冒裂带高度最大值为 109 m, 最小值为 83 m, 平均高度值为 96 m, 裂采比为 27.4.

4 矿区冒裂带高度的经验公式计算

107 工作面上覆岩层为砂岩与泥岩互层, 为中硬岩层, 采高取 3.5 m, 根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[18] 中硬岩层的计算公式, 得出冒落带和裂隙带的高度如下:

冒落带:

$$H_c = \frac{100 \sum m}{4.7 \sum m + 19} \pm 2.2 = \frac{100 \times 3.5}{4.7 \times 3.5 + 19} \pm 2.2 = 9.87 \pm 2.2$$

裂隙带:

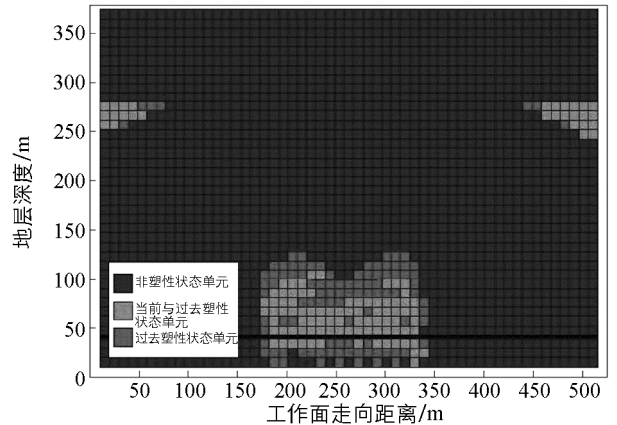


图 3 工作面塑性区分布图

$$H_f = \frac{100 \sum m}{1.6 \sum m + 3.6} \pm 5.6 = \frac{100 \times 3.5}{1.6 \times 3.5 + 3.6} \pm 5.6 = 38.04 \pm 5.6$$

计算得出冒裂带高度最大值为 55.71 m, 最小值为 40.11 m, 平均冒裂带高度为 47.91 m, 裂采比为 13.7.

按照《矿井水文地质工程地质勘探规范》^[19]中硬岩层的计算公式, 工作面冒裂带高度 H_f 为

$$H_f = \frac{100M}{3.3n + 3.8} \pm 5.1 = \frac{100 \times 3.5}{3.3 \times 1 + 3.8} \pm 5.1 = 49.29 \pm 5.1$$

冒裂带高度最大值为 54.39 m, 最小值为 44.19 m, 平均冒裂带高度为 49.29 m, 裂采比为 14.1.

5 矿区冒裂带高度的钻孔观测数据

黄陵二号煤矿为了准确测定 206 工作面开采 2 号煤层的冒裂带高度及其分布特征和变化规律, 对 206 工作面冒裂带高度进行了实际探测. 206 工作面采用后退式走向长壁一次采全高的开采方式, 工作面宽度为 230 m, 平均采高为 4 m, 实际探测得出 206 工作面冒裂带高度为 98 m, 裂采比为 24.5.

6 冒裂带高度的综合分析

将数值模拟数据、《规程》《规范》计算数据及钻探测量数据列入表 3 进行对比分析.

表 3 黄陵二号矿冒裂带高度对比表

工作面	方法	冒裂带高度/m	采高/m	裂采比
107	数值模拟	96	3.5	27.4
107	《规程》	47.91	3.5	13.7
107	《规范》	49.29	3.5	14.1
206	钻孔观测	98	4	24.5

由表 3 对比分析数值模拟数据、《规程》、《规范》计算数据和钻孔实测数据可知, 《规程》、《规范》中经验公式对冒裂带高度的计算值与数值模拟数值和钻孔实测数值均偏小很多, 显然《规程》、《规范》中以采高为唯一影响因子的经验公式对于黄陵二号矿冒裂带发育高度的预测已不适用; 在采高为 3.5 m 时, 数值模拟分析冒裂带高度为 96 m, 裂采比为 27.4, 钻孔观测分析采高 4 m 时, 冒裂带高度为 98 m, 裂采比为 24.5, 数值模拟与钻孔观测采高相差 0.5 m, 冒裂带高度结果相差 2 m. 由裂采比来看, 数值模拟和钻孔观测所得的裂采比均不超过 28. 综上分析表明, 为了预测黄陵二号矿区开采冒裂带高度的发育, 应用裂采比 28 是可行的.

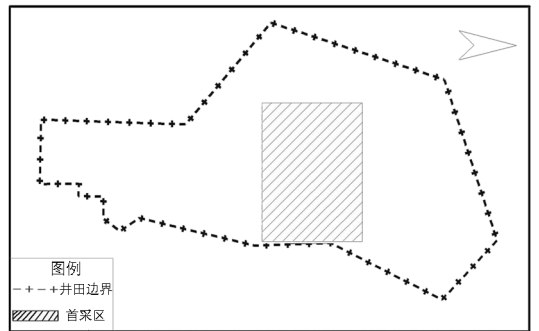


图 4 黄陵二号矿首采区位置图

7 黄陵二号矿首采区涌水危险性预测

黄陵二号矿区煤层顶板主要含水层为洛河组砂岩富含水层与直罗组下段含水层, 若冒裂带沟通洛河组砂岩和直罗组下段砂岩含水层, 会导致矿井涌水, 威胁到矿井安全. 黄陵二号煤矿首采区位于整个煤田位置如图 4, 根据首采区的具体情况, 利用首采区钻孔资料, 用煤层厚度与裂采比 28 预计冒裂带高度, 根据冒裂带高度是否打通白垩系下统洛河组砂岩含水层和侏罗系中统直罗组下段砂岩含水层, 对黄陵二号矿首采区进行水害预测, 预测结果如图 5 和图 6.

从图 5 中可以明显看出, 二号矿首采区全区范围导水裂隙带都未进入洛河组砂岩含水层, 且距离含水层较远, 首采区全区不会发生洛河组砂岩含水层水害. 图 6 中首采区除了东南小部分区域导水裂隙带未进入直罗组下段砂岩含水层外其余大部分都已沟通, 中北部导水裂隙带穿过含水层较高, 所以首采区东南部

小区域无水害危险,大部分为水害低度危险区,中北部为水害中度危险区。

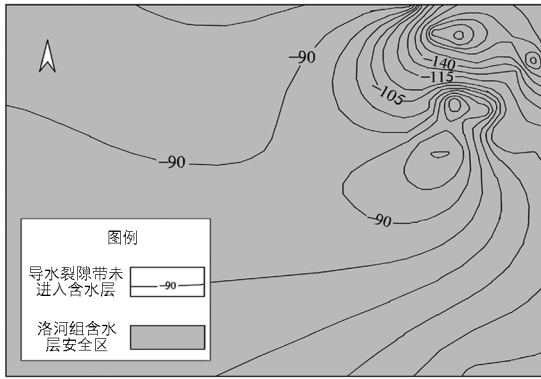


图 5 首采区洛河组含水层预测

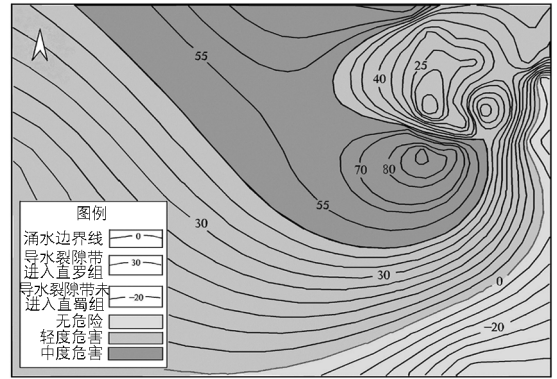


图 6 首采区直罗组下段含水层预测

8 结 论

1) 对于黄陵二号煤矿,通过《规程》、《规范》中的经验公式计算得出的冒裂带高度较数值模拟计算结果、钻孔实测高度均小得多,因此在厚黄土覆盖煤矿区,《规程》、《规范》中预测冒裂带高度的经验公式并不适用;

2) 对于厚黄土覆盖的条件,采用了厚黄土层有效载荷对应的等效采宽,数值模拟计算得出的冒裂带高度与钻孔实测数据较为接近,因此对于厚黄土覆盖煤矿区数值模拟方法是较为准确的冒裂带高度预测方法;

3) 通过综合分析数值模拟、经验公式和钻探测量等方法的结果,得出黄陵二号矿区预测冒裂带高度合适的裂采比为 28;

4) 黄陵二号煤矿首采区东南部小区域无水害危险,大部分为水害低度危险区,中北部为水害中度危险区。

参考文献:

- [1] 张 朋. 黄陵二号煤矿井下突水事故分析: 煤矿水害防治技术研究——陕西省煤炭学会学术年会论文集 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [2] 彭文斌. FLAC3D 实用教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 3—26.
- [3] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3dimensions (Version3. 1) User's Guide [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2006.
- [4] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制的关键层理论 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [5] 任伟中, 白世伟, 孙桂凤, 等. 厚覆盖岩层条件下地下采矿的地表及围岩变形破坏特性模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3935—3941.
- [6] 卢全中, 彭建兵. 黄土体工程地质的研究体系及若干问题探讨 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 404—409.
- [7] 汤伏全. 西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型 [J]. 煤炭学报, 2011(S1): 74—78.
- [8] 汤伏全, 原 涛, 汪桂生. 渭北矿区厚黄土层采动变形数值模拟研究 [J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(1): 53—58.
- [9] 王贵荣. 厚黄土薄基岩地区开采沉陷规律探讨 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 443—445.
- [10] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [11] 余学义, 张恩强. 开采损害学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004: 10—15.
- [12] 靳俊恒, 孟祥瑞, 高召宁. 1262(1)工作面导水裂隙带发育高度的数值模拟研究 [J]. 煤炭工程, 2010(11): 68—70.
- [13] 梁泽鹏, 姚多喜, 董 旭. 基于 FLAC3D 的“两带”高度预测数值模拟 [J]. 中州煤炭, 2013(2): 14—16.

- [14] 刘 涛, 徐东晶, 付 青. 大跨度深埋煤层导水裂隙带高度数值模拟研究 [J]. 矿产研究与开发, 2013(3): 67—70.
- [15] 李学良. 基于 FLAC3D 的采动区覆岩破坏高度数值模拟研究 [J]. 煤炭技术, 2012, 31(10): 83—85.
- [16] 梁世伟. 榆阳煤矿 2301 工作面导水裂隙带高度的数值模拟 [J]. 中国安全生产科学技术, 2013(3): 46—50.
- [17] 刘增辉, 杨本水. 利用数值模拟方法确定导水裂隙带发育高度 [J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(5): 16—19.
- [18] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [19] 国家矿产储量管理局. 矿井水文地质工程地质勘探规范: GB1217-97 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.

The Study on the Height of Caving Zone and Fissure Zone in Thick Loess Layer Mining Areas Based on Numerical Simulation

DONG Zhen-yu¹, WANG Shuang-ming¹, HOU En-ke²

1. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: In northern Shaanxi loess plateau, the mining areas are covered with thick loess and faced with water shortages. In order to guide the safe production and water resources protection in the mine of north-ern shannxi, it provide a case study of Huangling No. 2 coal mine. Multi-methods are applied to this re-search to study the height of caving zone and fissure zone. It is expected to find the optimum method and to get the feasible ratio of the caving zone and fissure zone height and the mining height in Huangling mine. A numerical simulation is made by using the finite difference program (FLAC3D). In numerical simulation, the calculation use the equivalent mining width corresponding to equivalent load of thick loess layer for considering the effects of thick loess gravity load on action of bedrock subsidence. And empirical formula and drilling measurement are adopted. Compared with drilling measurement data, the result of numerical simulation is close to the drilling data, and the results of empirical formula are much smaller. So in thick loess covered areas, the empirical formula is not applicable but the numerical simulation works well. With a comprehensive analysis of all results, it is founded that the feasible ratio of the caving zone and fissure zone height and the mining height is 28 in Huangling No. 2 mine. By using 28 a partitioning prediction of roof water inrush risk is made in north-central area of Huangling No. 2 coal mine, which provides reference for prevention and control of roof water inrush.

Key words: loess plateau; thick loess layer; caving zone and fissure zone; FLAC3D; experience formula; water inrush risk; partitioning prediction

责任编辑 汤振金