

文章编号: 1001-1986(2017)06-0123-06

基于损伤变量的煤层底板采动破坏深度计算

刘启蒙¹, 刘 瑜², 张缓缓³

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 3. 江西煤田地质局 224 队, 江西 新余 336600)

摘要: 传统采动破坏深度计算中认为底板结构完整, 未考虑实际岩体损伤。以淮南潘北矿 11113 工作面 A 组煤开采为背景, 利用 FLAC^{3D} 对完整与损伤底板采动应力变化特征进行了分析, 推导并计算了底板岩层损伤变量与底板破坏深度。此外, 为验证该方法的有效性, 对比分析了计算结果与测量结果。结果表明: 采动应力的最大值出现在煤壁前后方, 底板完整时为 14.8 MPa, 底板损伤时为 17.5 MPa; 底板岩层损伤变量 D 为 0.574, 基于损伤变量计算得出的底板最大破坏深度为 16.15 m, 对比并行电法探测结果 16.00 m, 该方法的计算准确率高。研究结果为快速准确确定底板采动破坏深度提供了一个新思路。

关键词: 岩体损伤; 破坏深度; 数值模型; 电法勘探技术

中图分类号: TD745 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.020

Floor failure-depth calculation under mining based on damage variable

LIU Qimeng¹, LIU Yu², ZHANG Huanhuan³

(1. School of earth and environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangxi Provincial Bureau of Coal Geology 224 Geological Team, Xinyu 336600, China)

Abstract: In the traditional calculation of mining failure depth, it is considered that the floor structure is intact and the actual rock mass damage is not taken into account. Taking the Panbei mine working face 11113 as the background, the integrity and damage of floor mining stress changes were analyzed by FLAC^{3D}. The damage variable of floor rock and the failure depth of bottom plate were deduced and calculated. In order to verify the effectiveness of the method, the calculation results were compared and analyzed with measurement results. The results show that the maximum value of the mining stress appears in the front and rear of the coal wall. When the floor is intact, it is 14.8 MPa, and it is 17.5 MPa when the floor is damaged. The damage variable of the floor rock is 0.574. Based on the damage variable, the maximum failure depth of the floor is 16.15 m. Comparing the results of parallel electrical prospecting of 16.00 m, the method is accurate in calculation. The research results can provide a new idea for determining the failure-depth of the floor mining rapidly and accurately.

Keywords: rock mass damage; failure depth; numerical model; electrical prospecting technique

随着我国东部煤炭资源开采深度的不断增加, 矿山防治水工作面临越来越大的挑战^[1-2], 而底板突水灾害是影响两淮煤炭基地深部煤层安全开采的主要因素之一^[3]。为准确评价底板突水危险性, 突水系数^[4]、单位涌水量—突水系数法^[5]、脆弱性指数法^[6]

等被提出并运用。上述方法为矿山防治水措施的制定提供了理论依据, 但依赖于煤层开采底板破坏深度的确定^[7]。在以往的研究中, 大多学者认为底板结构完整, 关于底板实际存在的损伤特征研究较少^[8-9]。煤层底板未开采前由于地应力的影响,

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41472235); 安徽省高等学校省级自然科学研究重大项目(KJ2014ZD11)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(41472235); Provincial Natural Science Research Major Project of Anhui Colleges (KJ2014ZD11)

第一作者简介: 刘启蒙(1972—), 男, 山东沂南人, 博士后, 教授, 从事水文地质工程地质及矿井防治水方面的研究工作。

E-mail: qmliu_1972@126.com

引用格式: 刘启蒙, 刘瑜, 张缓缓. 基于损伤变量的煤层底板采动破坏深度计算[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 123–128.

LIU Qimeng, LIU Yu, ZHANG Huanhuan. Floor failure-depth calculation under mining based on damage variable[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 123–128.

存在一定的初始损伤，当存在断层等构造时其损伤十分明显^[10-11]；开采阶段在矿山压力、采动应力与构造应力的影响下，底板岩层的损伤程度进一步增加^[12-14]。在底板破坏深度的计算中若不考虑初始损伤强度，可能导致其计算结果与实际破坏深度之间存在较大误差，从而降低突水危险性评价结果的准确性，危及矿山生产安全。岩石损伤变量是分析岩体破坏特征的重要参数^[15-17]，而损伤变量确定需要的开采过程中围岩的应力、应变等参数在实际研究中获取难度较大且较为繁琐^[18]。通过利用数学计算软件建立数值模型模拟煤层开挖过程，可以很好地获取煤层开采过程中围岩的应力、应变及破坏特征与变化规律^[19]。

本文以淮南潘北矿 11113 工作面为地质原型，建立了完整底板与损伤底板两种情况下的 A 组煤采动 FLAC^{3D} 数值模型，对两种情况下采动过程中围岩的应力、应变特征进行了监测。基于数值模拟与

力学理论，推导并计算了底板岩层损伤变量与底板破坏深度。为验证该方法的有效性，对比了计算结果与并行电法对采动底板破坏深度的探测结果。研究结果对底板采动破坏规律及底板突水危险性评价具有实践意义。

1 工程概况

11113 工作面位于潘北矿东一采区，为研究区 A 组煤首采工作面。工作面走向长 870.0 m，倾斜长 180.0 m，风巷标高-390.7~-373.8 m，顺槽标高-406.3~-390.8 m。煤层厚度平均 5.0 m。工作面顶底板主要由泥岩、砂质泥岩、细砂岩与中砂岩组成，如图 1 所示。工作面总体形态为一近东西走向的单斜构造，巷道及工作面周边 50 m 范围内揭露 DF9、DF9-1、DF30、NF173 四条断层，详情如表 1 所示。C₃¹ 组灰岩承压含水层为工作面直接充水含水层，据钻孔揭露，该含水层距开采煤层 14.12~26.52 m，平均 20.19 m。

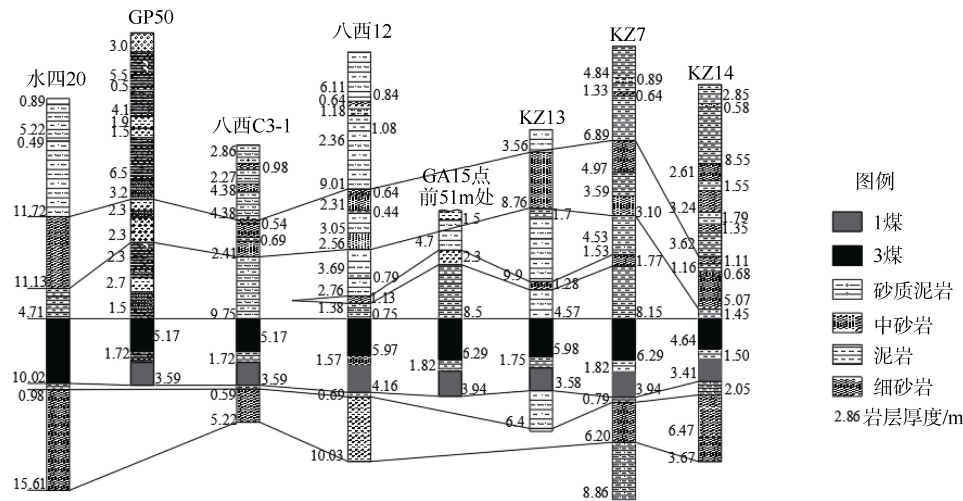


图 1 11113 工作面 A 组煤煤岩层对比图

Fig.1 Correlation chart of coal and rock of working face 11113

表 1 工作面巷道及周边断层发育情况

Table 1 Faults developmental state in the panel roadway

断层名	倾向	倾角/(°)	落差/m	性质	控制情况	可靠性
DF9	N	70.1	10.2	正断层	实见、三维	可靠
DF9-1	N-NW	70.0	3.0	正断层	实见、三维	可靠
DF30	NW	70.1	4.2	正断层	实见、三维	可靠
NF173	N-NW	46.2~55.3	2.1	正断层	三维	可靠

2 开采底板应力特征数值模拟

2.1 模型建立

根据研究区工作面地质资料，结合断层带工程地质条件，以开采煤层为特征煤层，利用 FLAC^{3D} 建立数值模型，其长×宽×高为 300 m×200 m×100 m。为反映断层的影响，分别建立了完整底板模型与

断层损伤底板模型，如图 2 所示。其中，断层损伤底板模型中的断层是以对工作面影响最大的 DF9 断层为背景建立的。模型顶部施加垂向补偿应力，水平方向上施加因泊松效应产生的侧向应力。底部边界采用全约束边界条件；左右边界、前后边界采用约束边界条件；模型上边界为自由边界。

2.2 煤层开采应力变化特征

工作面倾角及地质构造的差异,推进方式不同,均会导致底板采动应力变化特征的明显差异^[20]。图 3 为完整底板条件下,不同推进步距时 11113 工作

面的最大主应力变化分布情况。

由图 3 可知,随着工作面不断推进,垂直应力呈现出明显的应力重新分布现象。推进过程中,采空区上、下方呈现出拱形的应力增高区,且上、下

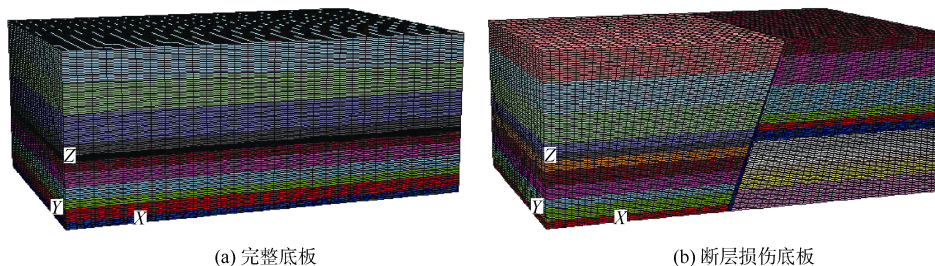


图 2 底板数值模型

Fig.2 Floor numerical model

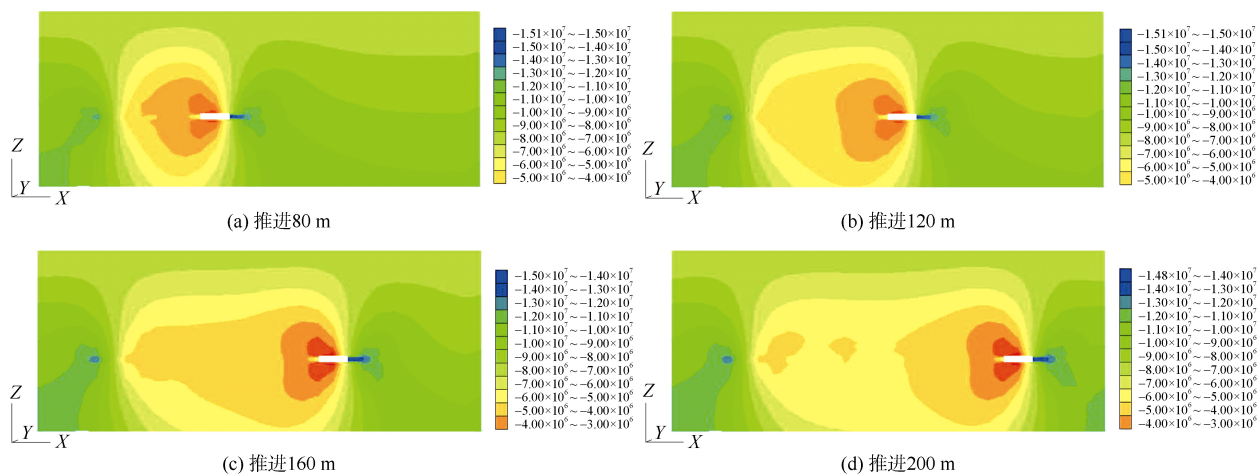


图 3 完整底板条件下采动过程中应力变化

Fig.3 Stress variation during mining with complete floor

方的拱形形状基本是对称的;而在煤壁前方和采空区后方呈现出应力集中的现象。随着煤层的不断向前开挖,采空区底板两侧的应力增高区范围以及垂直应力值均会有所增大。当推进 160 m 时,煤层基本达到充分采动;底板中部下方的应力下降区范围

也基本达到最大。当整个过程达到稳定时,应力的最大值在煤壁前后方,最大数值达到 14.8 MPa;最小值始终是在采空区底板下方位置。

图 4 为断层损伤底板条件下,不同推进步距时 11113 工作面的最大应力变化分布情况。

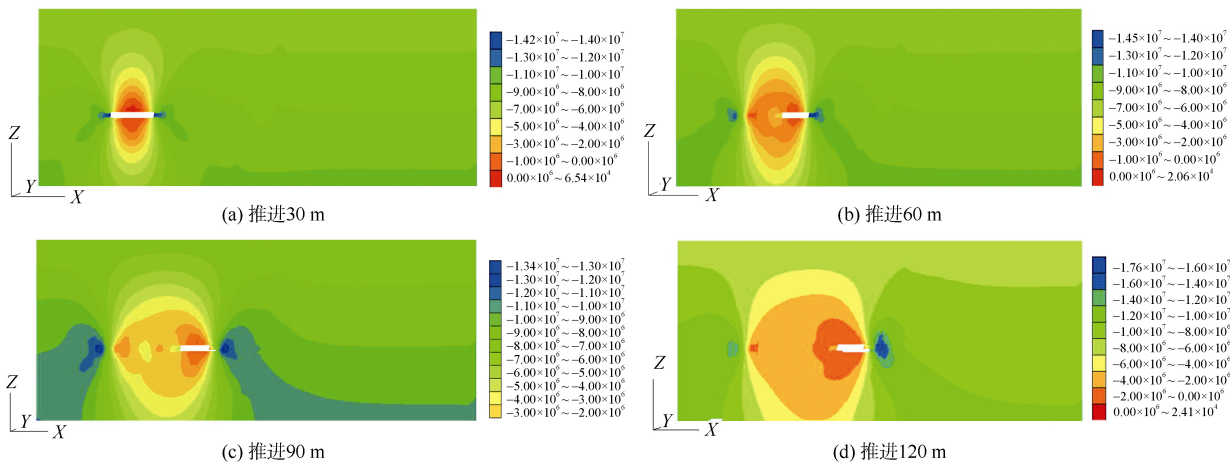


图 4 损伤底板条件下采动过程中应力变化

Fig.4 Stress variation during mining with damaged floor

同完整底板模拟结果相似,随着工作面推进,煤层顶板和底板岩层垂直应力呈现出明显的重新分布现象。从图 4 中垂直应力变化图可以得出,煤层采动底板的应力重分布体现出了一定的规律性,在每一步的开挖中,在采空区正下方位置处应力值最小,在两头出现集中的现象。这也导致了底板两侧位置产生变形破坏,形成压、剪破坏区;当整个过程达到稳定时,应力的最大值在煤壁前后方,最大数值达到 17.5 MPa;最小值始终是在采空区底板下方位置。

对比分析两种情况下的模拟结果,随工作面不断推进,采空区底板中部上、下方的位置会逐渐出现拉应力,且拉应力是不断增大的,进而会产生拉裂破坏。应力的最大值出现在煤壁前后方,底板完整时应力值相对较小,可达 14.8 MPa;底板损伤时应力值较大,煤开采时应力达到 17.6 MPa,应力最小值始终是出现在采空区底板下方的位置。两种情况下的应力值差距较大,因此在计算煤层底板破坏深度时考虑底板的损伤是有必要的。

3 基于采场损伤的煤层底板破坏深度计算

3.1 损伤变量的计算

根据岩石物理力学测试结果,可将煤层底板岩体损伤进行量化。假定底板岩石微元强度服从 Weibull 分布,根据等效应力假定,由此可推出损伤变量 D 的表达式:

$$D = \int_0^{F^*} P(y) dy = 1 - \exp \left[- \left(\frac{F^*}{F_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

表 2 11113 工作面 3 煤底板岩层应力-应变和损伤变量
Table 2 Stress-strain and damage of 3 coal floor in working face 11113

3煤底板岩层	岩层厚度/m	模拟应变值/ 10^{-3} m	σ_c /MPa	σ_3 /MPa	损伤变量 D
泥岩	7	5.92	10.6	3.59	0.729
1煤	3	18.84	5.08	2.89	0.501
细砂岩	20	9.8	7.34	2.77	0.185
泥岩	19	4.4	10.5	3.42	0.978

3.2 利用损伤变量计算破坏深度

考虑地应力、构造应力及损伤、岩体裂纹两壁所产生的摩擦阻力,结合损伤变量计算结果,推导

$$h_1 = 59.88 \ln \frac{K_{\max} \left[\frac{1}{\sqrt{3}(1-D)} [(\sin 2\alpha + \cos 2\alpha \tan \varphi) - \tan \varphi] + \frac{2\nu}{B_n(1-\nu)} \right]}{\frac{1-2\nu}{\sqrt{3}(1-D)(1-\nu)} \times \sin 2\alpha - \frac{2}{\sqrt{3}(1-D)} \tan \varphi + \frac{\nu}{(1-\nu)aB_n}} \quad (8)$$

式中 K_{\max} 为矿山压力最大集中系数; α 为岩石裂纹方位角; φ 为岩石内摩擦角; B_n 为无量纲系数;

式中 F^* 为微元破坏 Weibull 分布的分布量; m 、 F_0 为模型参数。

从式(1)可知,确定微元强度是计算损伤变量的前提。根据与岩石强度有关的函数表达式(2),假设岩石微元体破坏服从莫尔库仑强度判据:

$$F^* = f(\sigma^*) \quad (2)$$

$$\sigma_1^* - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3^* = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

式中 σ^* 为有效应力, c 为内聚力, φ 为内摩擦角。

参数 m 、 F_0 可以通过以下方法进行确定。

$$F_0 = F_c m^{1/m} \quad (4)$$

$$m = 1 / \ln [E \varepsilon_c / (\sigma_c - 2\nu \sigma_3)] \quad (5)$$

式中 F_c 为峰值下的 F^* ; E 为弹性模量; ε_c 为峰值下的应变; σ_c 为峰值下的应力; ν 为泊松比。

联立式(1)—式(5)可得到

$$D_n = 1 - \frac{\sigma_1 - 2\nu \sigma_3}{E \varepsilon} \quad (6)$$

采场底板岩体的损伤变量可根据各个岩层的损伤变量通过加权平均计算求出,其计算公式为

$$D' = \frac{h_1 D_1 + h_2 D_2 + \dots + h_n D_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (7)$$

在分析物理力学试验与数值模拟结果的基础上,利用计算公式(6)得到 11113 工作面 3 煤底板岩层应力-应变和损伤变量,如表 2 所示。将计算得到的各岩层损伤变量和厚度代入式(7)即可得到 A 组煤底板岩层的损伤变量,即 $D=0.574$ 。

了计算底板采动破坏深度的公式(8),推导过程过于繁琐,故在文中略去。

a 为岩石裂纹面的半迹长。

A 组煤开采平均深度 $H=458$ m。根据工作面内

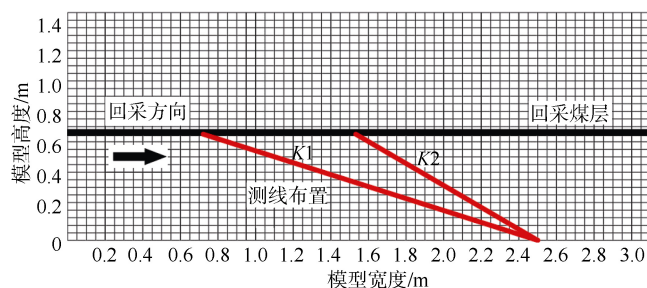
钻孔资料及矿山压力观测资料综合分析, 矿山压力集中系数 $K_{\max}=3$; 通过加权平均获得 3 煤顶覆岩层的平均容重为 $2.53 \times 10^4 \text{ N/m}^3$; 11113 工作面 3 煤底板岩体的内摩擦角平均值为 36° ; 泊松比取平均值 0.2; 岩石裂纹面的半迹长为 0.1 m, $B_n=0.4$; 裂纹的优势方位角为 14.9° ; 3 煤底板岩体的损伤变量 $D=0.574$ 。将以上数据带入式(8), 得到 11113 工作面底板岩体的最大破坏深度为 16.15 m。

4 破坏深度探测与验证

相似材料模拟试验是煤层开采地质问题研究的有效手段之一, 依据相似原理, 将煤层及其上覆岩土层按照一定相似条件进行配比, 根据时间和几何等相似定理开挖, 可用于观测模型底板各岩层由于开挖引

起的变形、移动、破坏情况, 从而推断实际的底板破坏深度^[21-22]。为确定 11113 工作面顶板采动破坏深度, 建立相似材料模型, 如图 5 所示。为了获取更加准确的破坏深度, 并行电法被用于探测模型开挖过程中底板的破坏深度。破坏发育区域裂隙发育会导致电阻率值变大, 有助于确定破坏发育区域; 底板破坏发育区域下方岩层在采动过程中, 未受到相关影响, 岩性结构完整, 其电阻不会发生明显变化^[23]。

实验结果表明: 当模型开挖 170 m 位置时, 顶板破坏深度达到最大值。底板下方 0~16 cm 范围内出现局部高阻区域(图 6a 虚线所圈定的范围), 视电阻率值达到 $600 \sim 850 \Omega \cdot \text{m}$, 高于背景值近 $400 \Omega \cdot \text{m}$ 。综合分析电法探测结果与观察结果, 确定底板破坏的发育影响深度值为 16.00 m, 如图 6 所示。



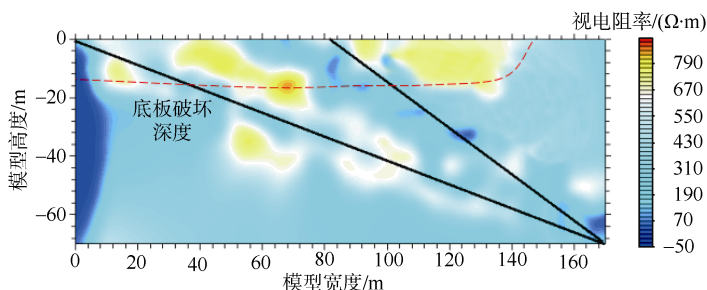
(a) 相似材料模型



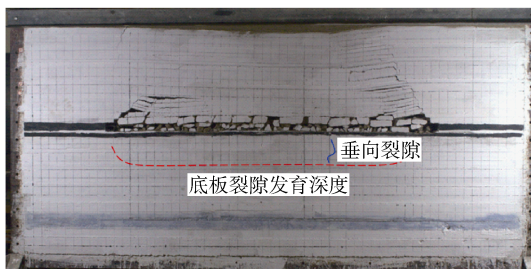
(b) 观测系统布置示意图照片

图 5 相似材料模型及其观测系统布置示意图照片

Fig.5 Diagram and photo of the model and observation system



(a) 模型视电阻率值分布



(b) 模型底板采动破坏裂隙分布

图 6 相似材料模型底板采动破坏深度

Fig.6 Mining failure depth of coal seam floor in similar material model

对比基于损伤变量的底板采动破坏深度计算结果 16.15 m 与相似材料模型底板采动破坏深度 16.00 m, 两者的结果较为接近。由此可以说明, 基于损伤变量的底板采动破坏深度计算结果的准确率较高, 该方法能够满足实际工程运用的需求。因此, 利用数值模拟结合岩石力学参数计算底板岩层损伤变量, 进而确定底板破坏深度的方法具有一定的合理性。

5 结论

a. 利用 FLAC^{3D} 数值模拟得到采动应力的最大

值出现在煤壁前后方, 底板完整时为 14.8 MPa, 底板损伤时为 17.5 MPa, 表明底板的损伤对采动应力的影响显著, 在计算底板破坏深度时应予考虑。

b. 推导了底板岩层损伤变量与底板破坏深度的计算公式, 利用数值模型、室内试验、理论计算确定了底板岩层损伤变量 $D=0.574$ 与破坏深度 16.15 m。

c. 综合分析并行电法探测结果与观察结果, 确定底板岩层的最大破坏深度为 16.00 m。计算结果与探测结果接近, 其准确率较高, 能够满足工程运用的需求。研究结果对确定底板损伤变量和底板采动

破坏深度具有实际意义。

参考文献

- [1] 王启云. 矿井防治水工作研究[J]. 煤炭技术, 2010, 29(1): 127-128.
WANG Qiyun. Research on prevention and treatment of mine water[J]. Coal Technology, 2010, 29(1): 127-128.
- [2] 乔伟, 李文平, 赵成喜. 煤底板突水评价突水系数-单位涌水量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2466-2474.
QIAO Wei, LI Wenping, ZHAO Chengxi. Water inrush coefficient-unit inflow method for water inrush evaluation for coal mine floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2466-2474.
- [3] 张蕊, 姜振泉, 李秀晗. 大采深厚煤层底板采动破坏深度[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 67-72.
ZHANG Rui, JIANG Zhenquan, LI Xiuhuan. Study on the failure depth of thick seam floor in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 67-72.
- [4] 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.
LIU Qisheng. A discussion on water inrush coefficient[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(4): 34-37.
- [5] LI Wenping, LIU Yu, QIAN Wei, et al. An improved vulnerability assessment model for floor water bursting from a confined aquifer based on the water inrush coefficient method[J]. Mine Water & the Environment, 2017.
DOI 10.1007/s10230-017-0463-3.
- [6] 武强, 张波, 赵文德. 煤层底板突水评价的新型实用方法—基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 21-26.
WU Qiang, ZHANG Bo, ZHAO Wende. A new practical methodology of coal seam floor water burst evaluation: The comparison study among ANN the weight of evidence and the logistic regression vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 21-26.
- [7] 李鹏飞, 刘启蒙, 陈秀艳. 近厚松散层开采煤层底板采动破坏研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(4): 69-70.
LI Pengfei, LIU Qimeng, CHEN Xiuyan. Study on mining destruction of coal seam floor near thick loose layer[J]. Coal Technology, 2017, 36(4): 69-70.
- [8] 张忠文. 青东煤矿 10 煤层底板岩体结构特征及突水危险性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [9] 施龙青, 韩进, 高延法. 采场损伤底板破坏深度研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(增刊 1): 1-4.
SHI Longqing, HAN Jin, GAO Yanfa. Study on failure depth of stope damage floor[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(S1): 1-4.
- [10] 武昱东, 琚宜文, 侯泉林. 断层分层信息维及其在深部煤炭开采地质条件预测中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1323-1330.
WU Yudong, JU Yiwen, HOU Quanlin. Application of fault's information dimensions among different coal seams in the prediction of deep coal resources exploitation[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1323-1330.
- [11] 贾晓亮, 崔洪庆, 张子敏. 断层端部地应力影响因素数值分析[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 38(4): 47-51.
JIA Xiaoliang, CUI Hongqing, ZHANG Zimin. Numerical simulation of geostatic stress influencing factor at the end of fault[J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38 (4): 47-51.
- [12] 李兴高, 高延法. 采场底板岩层破坏与损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 35-39.
LI Xinggao, GAO Yanfa. Damage analysis of floor strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 35-39.
- [13] 陆银龙, 王连国. 含断层煤层底板损伤破坏演化数值模拟及微震监测研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(1): 38-44.
LU Yinlong, WANG Lianguo. Modeling and micro seismic monitoring of damage and failure evolution of faulty coal seam floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(1): 38-44.
- [14] 张培森, 颜伟, 张文泉, 等. 固液耦合模式下含断层缺陷煤层回采诱发底板损伤及断层活化突水机制研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 877-889.
ZHANG Peisen, YAN Wei, ZHANG Wenquan, et al. Mechanism of water inrush due to damage of floor and fault activation induced by mining coal seam with fault defects under fluid-solid coupling mode[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 877-889.
- [15] 金解放, 李夕兵, 殷志强, 等. 循环冲击下波阻抗定义岩石损伤变量的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1385-1393.
JIN Jiefang, LI Xibing, YIN Zhiqiang, et al. A method for defining rock damage variable by wave impedance under cyclic impact loadings[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1385-1393.
- [16] 于海祥, 武建华, 李强. 一维损伤变量的合理定义方法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(11): 1261-1266.
YU Haiyang, WU Jianhua, LI Qiang. A rational method for defining damage variables in one dimension[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(11): 1261-1266.
- [17] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
ZHANG Quansheng, YANG Gengshe, REN Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30-34.
- [18] 刘红岩, 李俊峰. 非贯通节理岩体损伤变量计算方法研究[J]. 岩土力学, 2016(增刊 1): 95-100.
LIU Hongyan, LI Junfeng. A method for calculating damage variable of rock mass with non-persistent joints[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S1): 95-100.

- Earth Sciences, 2015, 73(7): 3745–3761.
- [16] MELCHIORRE C, MATTEUCCI M, AZZONI A, et al. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation[J]. Geomorphology, 2008, 94(3): 379–400.
- [17] PAWLAK Z. Rough sets-theoretical aspects of reasoning about data[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991: 56–63.
- [18] 刘吉平, 刘汉青, 曾忠平, 等. 基于粗糙集理论滑坡影响因子评价研究——以三峡库区青干河流域为例[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 118–122.
- LIU Jiping, LIU Hanqing, ZENG Zhongping, et al. Assessment of impact factors for landslides based on rough sets theory: A case study on the Qingganhe River of the Three Gorges area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 118–122.
- [19] 程温鸣, 彭令, 牛瑞卿. 基于粗糙集理论的滑坡易发性评价——以三峡库区秭归县境内为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1083–1090.
- CHENG Wenming, PENG Ling, NIU Ruiqing. Landslide susceptibility assessment based on rough set theory: Taking Zigui County territory in Three Gorges Reservoir for example[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 1083–1090.
- [20] 于宪煜, 胡友健, 牛瑞卿. 基于 RS-SVM 模型的滑坡易发性评价因子选择方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(3): 23–28+2.
- YU Xianyu, HU Youjian, NIU Ruiqing. Research on the method to select landslide susceptibility evaluation factors based on RS-SVM Model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2016, 32(3): 23–28+2.
- [21] PENG L, NIU R, HUANG B, et al. Landslide susceptibility mapping based on rough set theory and support vector machines: A case of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2014, 204: 287–301.
- [22] NEFESLIOGLU H A, GOKCEOGLU C, SONMEZ H. An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps[J]. Engineering Geology, 2008, 97(3): 171–191.
- [23] 韩祯祥, 张琦. 粗糙集理论及其应用[J]. 信息与控制, 1998, 27(1): 37–45.
- HAN Zhenxiang, ZHANG Qi. Rough sets theory and application[J]. Information and Control, 1998, 27(1): 37–45.
- [24] 王文辉, 周东华. 基于遗传算法的一种粗糙集知识约简算法[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(8): 91–93.
- WANG Wenhui, ZHOU Donghua. An algorithm for knowledge reduction in rough sets based on genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(8): 91–93.
- [25] 陶志, 许宝栋, 汪定伟, 等. 基于遗传算法的粗糙集知识约简方法[J]. 系统工程, 2003, 21(4): 116–122.
- TAO Zhi, XU Baodong, WANG Dingwei, et al. Rough set knowledge reduction approach based on GA[J]. Systems Engineering, 2003, 21(4): 116–122.
- [26] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [27] 李亚丽. 基于粗糙集与遗传算法的岩爆倾向性预测方法研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 527–533.
- LI Yali. Prediction method for rockburst tendency based on rough sets and genetic algorithm[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 527–533.
- [28] TANG R, YAN E, CAI J, et al. Back analysis of initial ground stress based on back-propagating neural network[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 5839–5856.
- [29] KULATILAKE P, QIONG W, HUDAVERDI T, et al. Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 298–311.
- [30] ALTHUWAYNEE O F, PRADHAN B, AHMAD N. Landslide susceptibility mapping using decision-tree based Chi-squared automatic interaction detection(CHAID) and Logistic regression (LR) integration[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2014, 20(1): 012032, 1–8.
- [31] WU X, NIU R, REN F, et al. Landslide susceptibility mapping using rough sets and back-propagation neural networks in the Three Gorges, China[J]. Environmental earth sciences, 2013, 70(3): 1307–1318.
- [32] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861–874.

(责任编辑 张宏)

(上接第 128 页)

- [19] 唐鑫, 姜振泉, 雷娟, 等. 深部开采煤层底板采动变形破坏规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2013(4): 8–10.
- TANG Xin, JIANG Zhenquan, LEI Juan, et al. Study on floor deformation and failure law of deep mining coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013(4): 8–10.
- [20] 朱术云, 曹丁涛, 周海洋. 采动底板岩性及组合结构对破坏深度的制约作用[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 90–96.
- ZHU Shuyun, CAO Dingtao, ZHOU Haiyang. Restrictive function of lithology and its composite structure on deformation and failure depth of mining coal seam floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 90–96.
- [21] 黎良杰, 钱鸣高. 采场底板突水相似材料模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 1997, (1): 33–36.
- LI Liangjie, QIAN Minggao. Similar material simulation of water inrush from stope floor[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(1): 33–36.
- [22] 李海梅, 关英斌, 杨大兵. 邯邢地区煤层底板应力分布的相似材料模拟分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(6): 24–25.
- LI Haimei, GUAN Yingbin, YANG Dabing. Handan Xingtai area coal seam floor stress distribution of similar material simulation and analysis[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(6): 24–25.
- [23] 张平松, 刘盛东, 舒玉峰. 煤层开采覆岩破坏发育规律动态测试分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 217–222.
- ZHANG Pingsong, LIU Shengdong, SHU Yufeng. Analysis on dynamic testing results of distortion and collapsing of the top rock by geophysical method during mining of coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 217–222.

(责任编辑 晋香兰)