

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.18

断裂构造分形及其在矿山突水评价中的应用

周 阳¹, 陈江峰¹, 肖新成², 熊法政¹

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000;

2. 河南省新郑煤电有限责任公司, 河南 郑州 451184)

摘要: 断裂构造对围岩稳定、采场布置、瓦斯突出和矿井突水等都有显著的影响, 本文利用分形理论计算了赵家寨煤矿中部采区煤层底板断裂分维, 对断裂构造分形维数特征进行分析, 并结合脆弱性指数法对底板突水危险性进行了评价。结果表明: 研究区断裂构造分形维数分布在 0.611 ~ 1.585 之间, 煤层底板构造复杂程度为中等; 随着分形维数的增大, 矿井最大涌水量也将随之增加。断裂构造分形维数是断裂规模、弯曲程度、数量、同向间距的综合体现; 分形维数不仅可以反映构造活动的强度和分布特征, 还能在一定程度上反应主构造趋势。基于分形理论的脆弱性指数法评价底板突水结果与区内水文地质条件一致, 为矿井水害防治提供科学依据。

关键词: 断裂构造; 分形特征; 脆弱性指数法; 矿井水害

中图分类号: P641.5

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0115-06

Fractal analysis of fault structures and its application in the assessment of water burst

ZHOU Yang¹, CHEN Jiangfeng¹, XIAO Xincheng², XIONG Fazheng¹

(1. *Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;*

2. *Henan Xinzheng Coal and Electricity Limited Liability Company, Zhengzhou, Henan 451184, China*)

Abstract: Fault structure has significant effect on the stability of surrounding rock, the layout of the stope, the gas outburst and the water inrush. The fractal theory was used to compute the fractal dimension of faults of the coal seam floor in the middle mining area of Zhaojiazhai Coal Mine, analysis of fractal dimensions of the faults structures and water inrush risk of the coal seam floor is evaluated by the combination of the vulnerability index method. The results show that: the fractal dimensions of the study area are between 0.611 – 1.585, the complexity of the faults structure of coal seam floor is medium. With the increase of fault fractal dimension, maximum mine inflow will increase. The fractal dimension is the comprehensive reflection of the fault size, curve, number, and same direction spacing. Fractal dimension can not only reflect the intensity and the overall distribution of faults structures, but also reflect the trend of main structures in a certain extent. The vulnerability index method based on fractal theory is used to evaluate the coal floor water burst, results consisted with the hydrogeological conditions, which provide a scientific basis for mine water disaster prevention and control.

Keywords: fault structure; fractal feature; vulnerability index method; mine water disaster

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-04-12

基金项目: 河南省国土资源重大改革创新问题研究项目(2014YGT09)

第一作者: 周 阳(1989-), 男, 河南开封人, 在读硕士, 从事矿井水文地质方面的科研工作。E-mail: zhouyangpu314@163.com

0 引言

断裂构造对围岩稳定、地应力、开采条件、采场布置、瓦斯突出和矿井突水等都有显著的影响^[1-2]。对断裂构造的研究,不仅可以合理部署采掘生产、提高采煤机械化程度,而且可以防止和减少受断裂构造控制的各种矿井地质灾害^[3]。1975 年著名数学家 B. B. Mandelbrot 提出了分形 (Fractal) 理论,该理论揭示了事物部分与整体之间的内在联系,为研究复杂现象提供了新的思路和方法^[4]。许多学者研究表明断裂构造具有自相似结构,其几何图像都具有特定的分形维数^[5-6]。前人对断裂构造复杂程度进行过划分^[7-8]、分析了断裂构造分形维数值与矿井突水的关系^[9],取得了一些成果。但如何将突水这一矿井地质灾害同构造复杂程度结合起来,从而解释构造对突水的影响以及做出相应的评价对矿井安全生产具有重要的意义。本文利用分形理论对赵家寨煤矿中部采区的断裂构造分形特征进行研究,并浅析分形理论在断裂构造研究及矿井突水评价中的应用,以期能够为煤矿安全生产提供参考。

1 研究区概况

赵家寨矿位于新密煤田东南部,行政上隶属于新郑市辛店镇。井田边界南起二₁煤层露头线,北至大槐树断层,东西分别以贾梁断层、欧阳寺断层为边界,矿区面积约 48.613 km²,主体构造为一两翼地层产状平缓,倾角 3°~15°,轴向 NWW~SEE 的宽缓背斜。北翼地层倾向 55°~70°,倾角 6°~15°,断层发育,落差较大。南翼地层倾向 205°~230°,倾角 3°~12°,主要发育次级小断层。断层走向除大槐树断层为近东西向外,其余均为 NW~SE 方向,并以南升北降的正断层为主。本区发育石炭-二叠含煤岩系,二₁煤层厚度 0~21.75 m,平均 5.50 m,煤层厚度有一定变化,属较稳定的中厚~厚煤层。自 2008 年正常生产以来,在开采二₁煤的过程中底板突水现象严重,突水 6 次,其中 4 次与断裂构造有关。突水水源主要为太原组灰岩承压水,最大突水量 1 310 m³/h,严重影响矿井安全生产。本次研究主要针对太原组下段灰岩承压水,研究区位置见图 1。

2 分形研究方法与结果分析

2.1 研究方法

本次研究采用计盒维数法,以研究区二₁煤层底

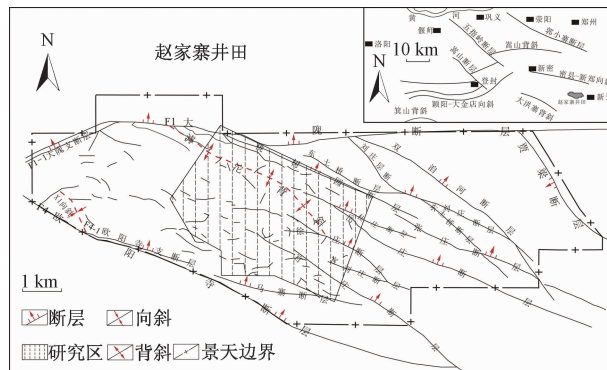


图 1 研究区位置及构造简图

Fig. 1 Location of the study area and its main structures

板等高线图 (1:1 000) 上的断裂构造资料为基础进行计算。用边长为 L 的正方形网格对研究区断裂构造进行统计,取边长 $r = L/2^n$ (其中 n 为整数) 的小正方形网格分别求出相应标度下含有断裂构造迹线的网格数 $N(r)$ 。 $N(r)$ 与 r 之间满足公式:

$$\lg N(r) = -Ds \lg(r) + R^2 \quad (1)$$

式中: Ds ——分形维数值;

R^2 ——相关系数。

(1) 选取边长 $r = 500$ mm (实际边长为 500 m) 的正方形网格覆盖研究区,每个正方形网格作为一个统计样本,对每个网格所圈闭的格子进行编号,记录每个方格的中心坐标 (图 2)。

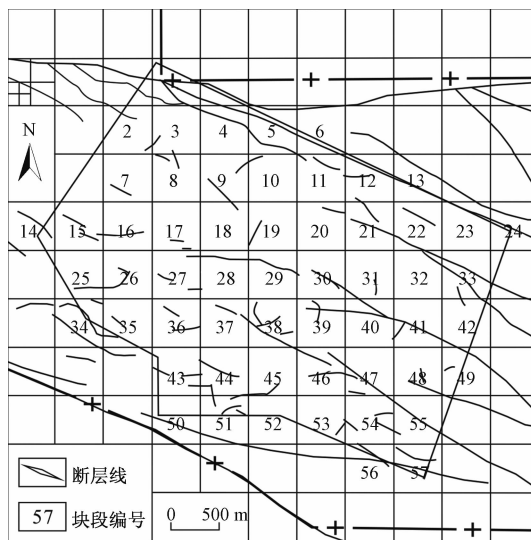


图 2 研究区断裂构造及分区图

Fig. 2 Faults and zoning of the study area

(2) 在每个样本内用 $r_1 = 250$ mm、 $r_2 = 125$ mm、 $r_3 = 62.5$ mm 和 $r_4 = 31.25$ mm 正方形网格分别统计断裂穿过的网格数 $N(r)_1$ 、 $N(r)_2$ 、 $N(r)_3$ 和 $N(r)_4$ 。在 $\lg(r)$ 与 $\lg N(r)$ 坐标系中作回归拟合直线,其斜率

的绝对值即为该样本的分形维数 D_s ,同时求得相关系数 R^2 。研究区分形维数值分布 0.611 ~ 1.585,平均 1.111,最小相关系数 0.916。

(3)绘制研究区断裂构造分形维数等值线图(图 3)。

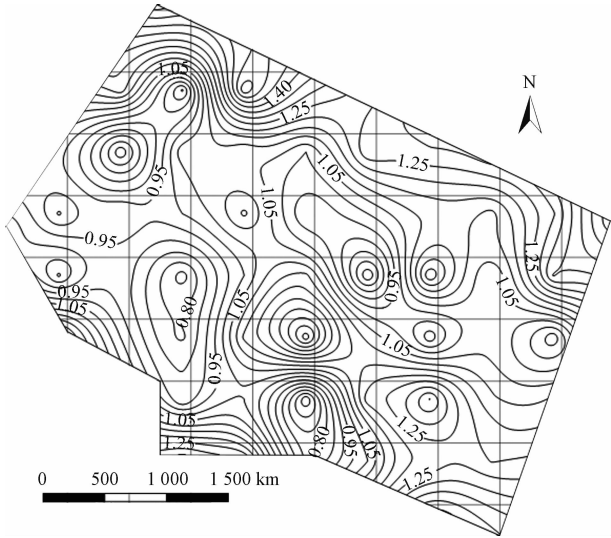


图 3 研究区断裂分形维数等值线图
Fig.3 Contour of fractal dimension of the faults in the study area

2.2 断裂构造的分形维数趋势分析

研究区中的断裂构造总体上呈北西向带状展布(图 1、图 2),这一特征与断裂分形维数等值线图的高值区(>1.05)相对应,说明断层分形维数等值线图能较好地反映研究区内断层构造的总体分布特征。高值集中区等值线近似椭圆状,其长轴方向近 NW,这与井田主构造方向一致,在一定程度上反应了井田主构造趋势。沿着北西向,分形维数较高区,断层的规模(延伸长度)和弯曲程度较大,空间充填能力较强;垂直于北西方向,断裂的数量较大和同向断裂间距较小区,分形维数也较高。所以可知,影响研究区断裂构造分形维数的是数量、同向断裂间距、规模、弯曲程度等因素。

2.3 断裂分形维数与最大突水量关系

研究区太原组灰岩水和奥灰水水量大、富水性强,尤其是太原组下段灰岩水,单位涌水量(q)达到 5.25 L/s·m,极强富水。根据瞬变电磁资料分析,富水区主要分布在研究区东部,沿漳沱背斜轴向向北西方向延伸,区内东南部官庄断层、官刘庄断层、徐庄断层附近也都被富水区覆盖,富水区范围较大(含水层富水性分布见图 4c)。区内岩溶不发育,不存在岩溶通道和陷落柱,但断层导水能力强,太原组各层灰岩水与奥灰岩溶水富水区范围相似,水力联系密切,垂向上富

水区范围在太原组下段灰岩附近达到最大。

矿井自 2008 年正常生产以来底板突水 6 次,其中 4 次与断层裂隙相关,最大突水量 1 310 m³/h(表 1)。矿井突水是一个涉及到水文地质、工程地质、构造、岩石力学、开采条件等诸多因素的复杂问题^[10]。同样矿井最大突水量也是受许多因素影响,其中断裂构造应该是一个重要的影响因素。

表 1 研究区突水点及其断裂分形维数
Table 1 Fractal dimension of faults structures in water inrush points

编号	突水时间	最大突水量 /(m ³ /h)	断裂分形 维数	突水地点
1	2008-02-06	367	1.25	11 回风上山(下段)
2	2008-12-07	18	1.05	11 运输上山(上段)
3	2011-04-13	78.31	1.15	12205 下付巷
4	2014-09-24	1 310	1.4	12201 下付巷

由表 1 可以得出,随着分形维数的增大,矿井最大突水量也相应增大。研究区东西两侧还尚未开采,其最大分形维数为 1.58,该地区一旦发生突水事故,对矿井生产影响较大。

2.4 煤层底板构造复杂程度分区

从表 1 中可以得到,当断裂分形维数为 1.05 时,煤层底板发生突水,实测最大突水量为 18 m³/h;当分形维数值为 1.25 时,最大突水量明显增大为 367 m³/h;但当分形维数值为 1.4 时,矿井最大突水量达到 1 310 m³/h,比分形维数为 1.25 时多出将近 1 000 m³/h水。因此根据矿井实际情况,并参照 DZ/T0215-2002《煤、泥炭地质勘查规范》,把分形维数 1.05,1.25 和 1.4 作为断裂构造复杂程度的 3 个分界点,将研究区煤层底板构造复杂程度分为 4 类:简单: $D_s < 1.05$;中等复杂: $1.05 < D_s \leq 1.25$;复杂: $1.25 < D_s \leq 1.4$;极复杂: $D_s > 1.4$ (表 2)。

表 2 煤层底板构造复杂程度等级划分
Table 2 Classification of faults structures complexity of coal seam floor

等级	简单	中等复杂	复杂	极复杂
分形维数	< 1.05	$1.05 < D_s \leq 1.25$	$1.25 < D_s \leq 1.4$	$D_s > 1.4$
比例	47%	23%	14%	16%

从表 2 中可以得出,构造简单区域和构造中等复杂区域占了 70%;构造复杂区域和极复杂区域占了 30%,此外全区断裂分形维数的平均值为 1.111。因此研究区煤层底板构造复杂程度为中等复杂。

3 分形在突水评价中的应用

水害一直是威胁我国煤矿安全生产的主要灾害之

一,采掘活动受到各种水害威胁,尤其是矿井范围内的断层突水更为严重,约占整个突水事故的 80%^[11-13]。断裂构造分形维数是断层数量、规模、同向间距、弯曲程度的综合体现,利用断裂构造分形维数作为影响底板突水的一个主控因素,使评价结果更趋于合理。本文利用基于层次分析和 GIS 信息融合的脆弱性指数法。

3.1 层次结构模型

根据对研究区构造、水文地质条件和采矿扰动破坏等条件的分析,确定区内二₁煤层底板突水的主要控制因素和其层次结构模型见图 4。

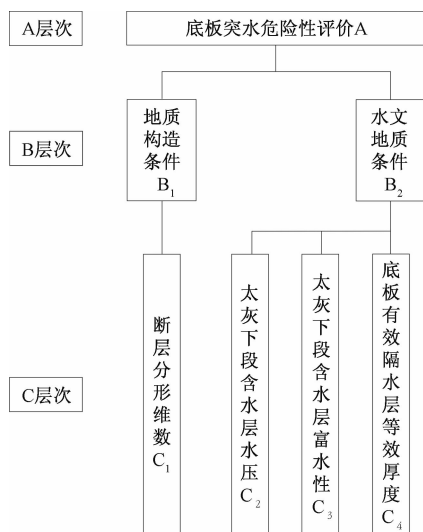


图 4 AHP 层次结构模型

Fig. 4 AHP evaluation model

3.2 建立判断矩阵

通过对研究区二₁煤层底板突水因素的分析,运用“专家打分”并结合矿上实际生产经验对影响突水的主控因素进行评分,构建中间层 B 的判断矩阵 B_i 及方案层 C 的判断矩阵 C_i (表 3、表 4)。

表 3 判断矩阵 $A \sim B_i (i=1 \sim 2)$

Table 3 Matrix $A \sim B_i (i=1 \sim 2)$

A	B_1	B_2	$W(A/B_i)$
B_1	1	1/3	0.25
B_2	3	1	0.75

$\lambda_{\max} = 2, CI = 0, CR$ 不存在

表 4 判断矩阵 $B_2 \sim C_i (i=1 \sim 3)$

Table 4 Matrix $B_2 \sim C_i (i=1 \sim 3)$

B_2	C_2	C_3	C_4	$W(B_2/C_i)$
C_2	1	2	1	0.411 1
C_3	1/2	1	1	0.261 1
C_4	1	1	1	0.327 8

$\lambda_{\max} = 3.053 7, CI_{22} = 0.026 8, CR_{22} = 0.046 3 < 0.1$, 通过一致性检验

在上述层次单排序的基础上,构建层次总排序(A层~C层)的一致性检验(因 B_1 层次只有一个主控因素 C_1 ,故 CI_{11} 不存在、 $CR_{11} = 0$)。

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\sum_{i=1}^2 CI_{2i} W(A/B_i)}{\sum_{i=1}^2 RI_{2i} W(A/B_i)} = 0.046 3 < 0.1 \quad (2)$$

验证结果通过一致性检验,主控因素断裂分形维数值、 L_1-4 灰岩含水层水压、 L_1-4 灰岩含水层富水性和底板有效隔水层等效厚度的权重分别为 0.250 0、0.308 4、0.195 8 和 0.245 8。

3.3 建立主控因素归一化专题图

由于各个主控因素量化值量纲是不统一的。因此,这里需要对各个主控因素量化值进行归一化处理,使标准统一化。运用 GIS 的统计和函数计算功能,将各个主控因素的量化值进行归一化处理,建立各主控因素归一化专题图(图 5)。

3.4 建立脆弱性评价模型

利用 GIS 对影响区内煤层底板太原组 L_1-4 灰岩含水层突水的各个主要控制因素归一化专题图进行信息融合,并建立区内煤层底板 L_1-4 灰岩含水层的突水脆弱性评价模型。使用脆弱性指数(Vulnerability Index, VI)作为区内煤层底板突水危险性的评价指标。VI 模型为:

$$VI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot f_i(x, y) \quad (3)$$

式中: W_i ——主控因素权重;

f_i ——主控因素归一化值;

(x, y) ——地理坐标;

n ——主控因素个数。

将各个主控因素的权重代入上式,可以得到研究区二₁煤层底板突水危险性评价模型:

$$VI = \sum_{i=1}^4 W_i \cdot f_i(x, y) = 0.250 0 f_1(x, y) + 0.308 4 f_2(x, y) + 0.195 8 f_3(x, y) + 0.245 8 f_4(x, y)$$

3.5 突水危险性分区

运用自然分级法(Natural Breaks)对底板脆弱性指数进行处理,得到五级分级结果,各级阈值分别为 0.375、0.445、0.525、0.575。脆弱性指数越大,突水的可能性也就越大。本文根据分级阈值将研究区二₁煤层底板突水危险性划分为五种类型区域(表 5)。根据分级结果,绘制研究区二₁煤层底板突水危险脆弱性指数法评价分区图(图 6)。

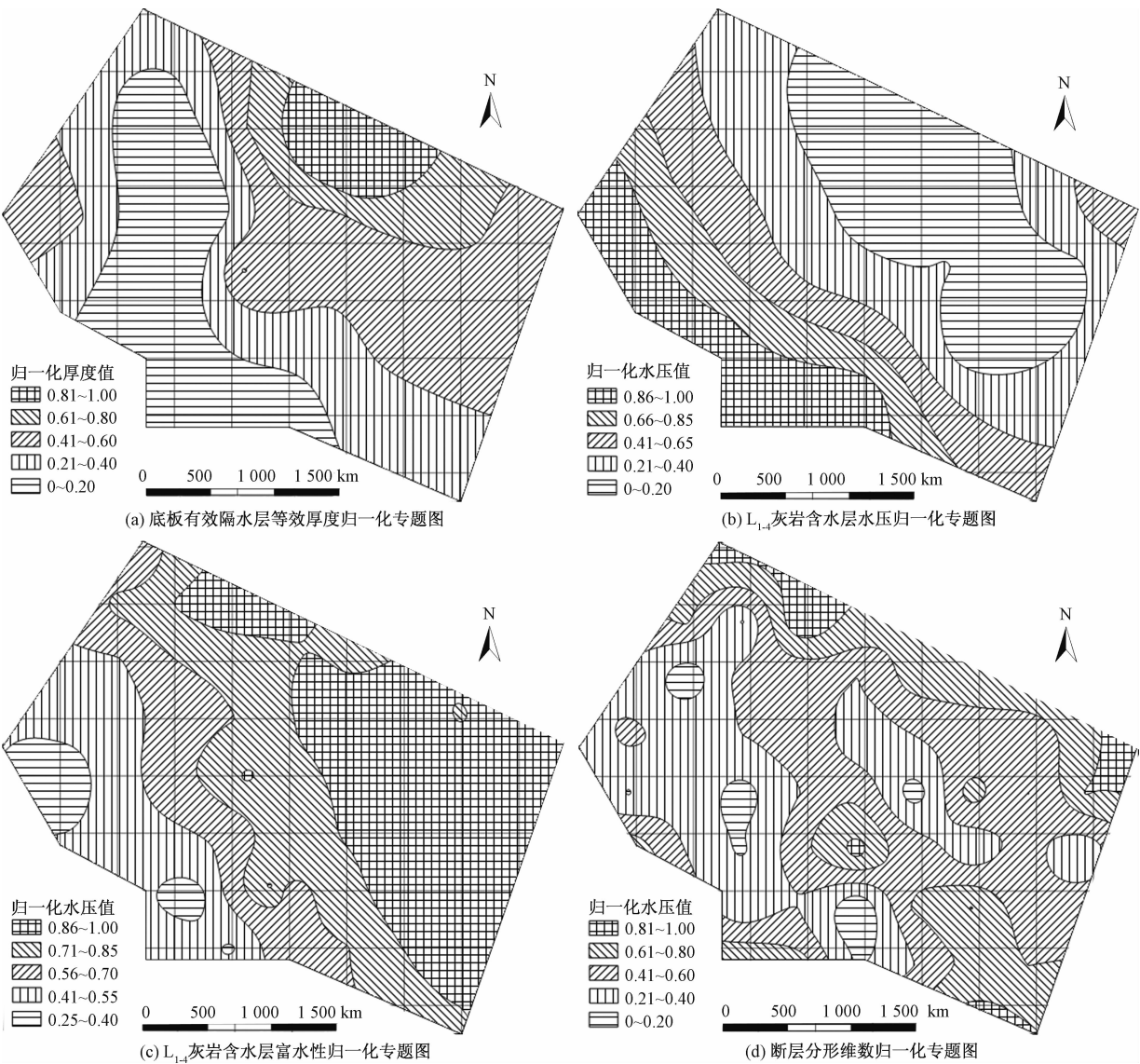


图 5 底板突水主控因素的归一化专题图

Fig.5 The normalized thematic maps of main factors

表 5 研究区煤层底板突水类型区域划分
Table 5 Regional division of water inrush types in the study area

底板类型区域	脆弱性指数 (VI) 值
安全区	[0.318,0.375)
较安全区	[0.375,0.445)
过渡区	[0.445,0.525)
较危险区	[0.525,0.575)
危险区	[0.575,0.734)

3.6 结果分析

由图 6 和图 3 可以看出断裂构造分形维数与底板突水危险性具有一定的关系,分形维数较大的地区,底板突水危险性往往较高,这表明断裂构造对底板突水具有明显的控制作用。在研究区北东部和东南部突水

危险性大与煤层底板有效隔水层等效厚度薄、富水性强、断裂分形维数值高有关,此区域导水构造较为发育,太原组下部灰岩含水层与奥灰岩溶水联系密切,水量丰富、不易疏干,评价结果与实际情况相符;安全区主要分布在水压较小、煤层底板有效隔水层等效厚度较大、富水性差以及断裂构造相对不发育区域;部分过渡区和较安全区虽然富水性较强,但煤层底板断裂构造不发育、有效隔水层等效厚度较大。基于分形理论的脆弱性指数法综合考虑了各主控因素对煤层底板突水的影响,评价结果具有较高的准确性。但值得提出的是本文中水压值和富水性参数都是用的目前采区的资料,因此不能用以往的突水点来检验突水分区结果,这是本文的不足之处。

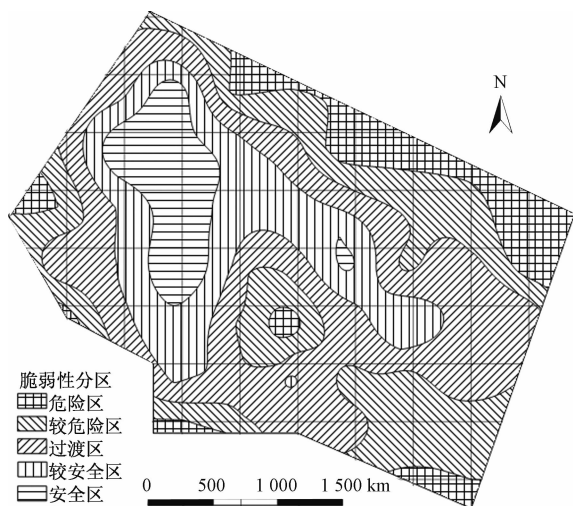
图 6 二₁煤底板突水危险脆弱性指数法评价分区图

Fig. 6 Risk assessment zoning map of water inrush

根据突水危险性分区结果,在过渡区、较危险区和危险区回采时,在断层不发育的正常块段,由于水压较高、有效隔水层等效厚度较薄,可采用疏水降压和注浆加固底板等措施;在断层发育块段,大隗树导水断层直接连接太原组含水层和二₁煤层,则应严格按照煤矿防治水规定留设防隔水煤柱。其它断层未连接含水层和煤层,但是断层使煤层底板结构破碎、有效隔水层等效厚度减小,这时一方面疏水降压,另一方面注浆封堵断层的导水通道、合理留设防隔水煤柱。

4 结论

(1)研究区断裂分形维数分布在 0.611 ~ 1.585 之间,平均值为 1.111;以断裂分形维数为基本特征量,将煤层底板岩体构造复杂程度划分为:简单、中等、复杂和极复杂 4 类。研究区北东部和东南部构造复杂,对安全生产影响较大;但就整体而言,煤层底板构造复杂程度为中等。

(2)分形维数是断裂构造规模、弯曲程度、数量、同向间距的综合体现。分形维数不仅可以反映断裂构造活动的强度和总体分布特征,还能在一定程度上反应井田主构造趋势。随着断层分形维数的增大,矿井最大突水量也将随之增加。

(3)本文运用脆弱性指数法综合考虑了断裂构造分形维数、有效隔水层等效厚度、含水层水压和富水性等主控因素,对研究区二₁煤层底板突水危险性进行评价,评价结果与区内水文地质条件一致,为矿井水害防治提供科学依据。

参考文献:

- [1] 李沛涛,武强,崔芳朋,等. 煤层底板突水定量预测评价研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(10): 121-124.
LI Peitao, WU Qiang, CUI Fangpeng, et al. Study on quantitative prediction evaluation of water inrush from seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(10): 121-124.
- [2] 阎海鹏,尹万蕾,潘一山,等. 北京房山大安山煤矿深部地应力数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 119-126.
YAN Haipeng, YIN Wanlei, PAN Yishan, et al. The concentration region numerical simulation analysis and prediction research in Daanshan coal mine deep stress [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 119-126.
- [3] 李建林,张洪云,冯有利,等. 煤矿断层构造复杂程度的非线性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, 22(4): 69-73.
LI Jianlin, ZHANG Hongyun, FENG Youli, et al. Nonlinear analysis of complexity of faults structures in coal mines [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, 22(4): 69-73.
- [4] Li J, Feng Q, Guo Q. Fractal study of sustainable proportions of natural and artificial oases [J]. Environmental Geology, 2008, 55(7): 1389-1396.
- [5] 陈江峰,胡诚. 煤中断裂分布的分形特征[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(1): 7-9.
CHEN Jiangfeng, HU Cheng. Fractal characteristics of fracture distribution in coal [J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(1): 7-9.
- [6] 平田隆幸. 新的地震观与分数维[J]. 内陆地震, 1988, 2(2): 221-226.
Takayuki Hirata. The new concept of earthquake and fractal dimension [J]. Inland Earthquake, 1988, 2(2): 221-226.
- [7] 王俊,姚多喜. 基于分形理论的杨柳矿 10 煤底板岩体结构类型划分[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(7): 7-9.
WANG Jun, YAO Duoxi. Yangliu coal mine No. 10 coal floor rock mass structure type division based on fractal theory [J]. Coal Geology of China, 2009, 21(7): 7-9.
- [8] 张鹏翔,李绍泉. 林华煤矿煤与瓦斯突出构造控制及其分形特征[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(10): 94-97.