

基于曲率分析与分形维数的断层三维复杂度计算模型

晏俊生 刘再斌 范涛 杨辉 刘文明 杜文刚 安林 刘晨光 王晓辉

引用本文:

晏俊生, 刘再斌, 范涛, 等. 基于曲率分析与分形维数的断层三维复杂度计算模型[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 54–63.

YAN Junsheng, LIU Zaibin, FAN Tao, et al. A calculational model for 3D fault complexity based on curvature analysis and fractal dimensions[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(12): 54–63.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.04.0237>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分形维数的巷道围岩裂隙演化规律研究

Research on the evolution law of roadway surrounding rock fissure based on fractal dimension

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 167–174 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.021>

基于主成分分析和最近邻算法的断层识别研究

Fault recognition based on principal component analysis and k-nearest neighbor algorithm

煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 15–23 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.003>

基于SSA优化的GA-BP神经网络煤层底板突水预测模型与应用

Prediction model of water inrush from coal floor based on GA-BP neural network optimized by SSA and its application

煤田地质与勘探. 2021, 49(6): 175–185 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.021>

基于空间统计的采煤工作面内断层识别方法

A method for identifying faults within mining faces based on spatial statistics

煤田地质与勘探. 2023, 51(10): 19–26 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.03.0145>

基于优化SPFA算法的矿井突水救援模型

Mine water inrush rescue model based on optimized SPFA algorithm

煤田地质与勘探. 2019, 47(6): 78–83 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.013>

智能开采工作面三维地质模型构建及误差分析

3D geological model construction and error analysis of intelligent mining working face

煤田地质与勘探. 2021, 49(2): 93–101,109 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.02.012>



移动阅读

晏俊生, 刘再斌, 范涛, 等. 基于曲率分析与分形维数的断层三维复杂度计算模型[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(12): 54–63. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0237

YAN Junsheng, LIU Zaibin, FAN Tao, et al. A calculational model for 3D fault complexity based on curvature analysis and fractal dimensions[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(12): 54–63. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0237

基于曲率分析与分形维数的断层三维复杂度计算模型

晏俊生^{1,2,3,4}, 刘再斌^{1,2,3,4,*}, 范涛^{1,2,3,4}, 杨辉^{2,3,4}, 刘文明^{1,2,3,4}, 杜文刚^{2,3,4},
安林^{1,2,3,4}, 刘晨光^{2,3,4}, 王晓辉^{1,2,3,4}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 西安煤科透明地质科技有限公司, 陕西 西安 712000; 3. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 4. 煤炭智能开采与岩层控制全国重点实验室, 北京 100013)

摘要:【目的和方法】断层是煤矿隐蔽致灾因素中威胁最大的地质构造因素之一, 其三维量化评价一直是个难题。针对现有量化指标无法全面反映断层形态及缺乏三维空间断层耦合分析的不足, 提出了一种基于曲率分析与分形维数的断层三维复杂度计算模型。该模型利用 Delaunay 算法改进了传统分形维数的测量体形态, 有效减少了断层在三维分形维数计算中存在的无效值, 同时引入断层面曲率来修正断层参数量, 从而保留了断层自身结构特征。为验证模型的有效性, 选取陕西某煤矿实际揭露的断层, 进行地质构造复杂程度定性评价, 并对工作面、巷道历史突水点空间分布数据开展模型应用及验证。【结果和结论】对比发现, 模型识别出煤矿井田三维空间内, 共有 75 个剖分区间具有非零统计值; 计算得出的断层三维分形维数、2 种融合断层面曲率(高斯曲率和平均曲率)的断层三维复杂度的均值, 分别为 0.939 4、1.136 2、1.219 9, 与单一的分形维数相比, 融合曲率的复杂度指标在揭示断层走向差异及分布集中区方面表现出明显优势。将断层三维复杂度、样本点与各突水点间的距离作为 2 个相关性指标计算皮尔逊相关系数, 结果可分为工作面及巷道突水点两类, 其平均值按断层三维分形维数、融合断层面高斯曲率以及平均曲率的断层三维复杂度排序, 前者为 0.784 3、0.838 6 以及 0.907 2, 后者为 0.771 8、0.832 4、0.890 3。数据结果表明, 断层复杂度与工作面突水点的相关性均大于其与巷道突水点的相关性, 即在研究区内, 断层对工作面的生产活动影响更大。同时, 无论融合何种断层面曲率, 相关系数均在 0.77 以上, 即提出的断层三维复杂度与矿井水害条件有强相关关系。另一方面, 结合该煤矿构造复杂程度定性评价结果为总体较低, 且主要受断层影响, 而该煤矿的断层复杂度在 1 左右, 极少区域在 2 以上, 反映了该煤矿断层分布虽在部分区域较为集中, 但总体的断层复杂程度较低。这与该煤矿已有的构造复杂程度定性分析相符合, 研究成果为三维断层复杂度计算提供了一种新的模型构建思路。

关键词: 断层复杂度; 三维量化分析; 曲率分析; Delaunay 算法; 皮尔逊系数; 突水点
中图分类号: TD163; P628 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)12-0054-10

A calculational model for 3D fault complexity based on curvature analysis and fractal dimensions

YAN Junsheng^{1,2,3,4}, LIU Zaibin^{1,2,3,4,*}, FAN Tao^{1,2,3,4}, YANG Hui^{2,3,4}, LIU Wenming^{1,2,3,4}, DU Wengang^{2,3,4},
AN Lin^{1,2,3,4}, LIU Chenguang^{2,3,4}, WANG Xiaohui^{1,2,3,4}

(1. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Xi'an Transparent Geology Technology Co., Ltd., Xi'an 712000, China; 3. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 4. National Key Laboratory of Intelligent Coal Mining and Rock Stratum Control, Beijing 100013, China)

收稿日期: 2024-04-08; 接收日期: 2024-07-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42374176); 国家重点研发计划课题(2022YFC3005601); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2024JC-YBMS-236)

第一作者: 晏俊生, 1997 年生, 男, 四川南充人, 硕士研究生。E-mail: 1210267993@qq.com

*通信作者: 刘再斌, 1982 年生, 男, 江苏徐州人, 博士, 研究员, 博士生导师。E-mail: liuzaibin@cctegxian.com

© Editorial Office of Coal Geology & Exploration. OA under CC BY-NC-ND

Abstract: [Objective and Methods] Faults are identified as one of the most threatening geological structural factors among hidden disaster-causing factors in coal mines. However, the 3D quantitative assessment of them remains challenging. Considering that existing quantitative indicators fail to fully reflect fault morphologies and there is a lack of 3D methods, this study proposed a calculational model for 3D fault complexity based on curvature analysis and fractal dimensions. This model improved the morphologies of traditional measurement volumes of fractal dimensions by employing the Delaunay tetrahedralization algorithm, thus effectively reducing the invalid values in calculating the 3D fractal dimensions of faults. Moreover, the model modified fault parameters by introducing fault plane curvatures, thereby retaining the structural characteristics of faults. To validate its effectiveness, this model was applied to the faults revealed in a coal mine in Shaanxi Province. Using this model, this study conducted a qualitative assessment of the complexity of geological structures and examined the data on the spatial distributions of the historical water inrush points in the mining face and roadways. **[Results and Conclusions]** Using this model, 75 partitioning intervals with nonzero statistics were identified in the mine field. Calculations revealed that the average 3D fractal dimension of faults and 3D fault complexity values integrated with Gaussian and mean curvatures were 0.939 4, 1.136 2, and 1.219 9, respectively. Compared to a single fractal dimension, the fault complexity integrated with curvatures enjoyed significant advantages in revealing the differences in fault strikes and fault concentration zones. Based on the Pearson correlation coefficients calculated using the 3D fault complexity and the distance between sample points and water inrush points as two correlation indicators, water inrush points can be categorized into two types: those in the mining face and those in roadways. For water inrush points in the mining face, the average coefficients of their correlations with 3D fractal dimension of faults and 3D fault complexity integrated with Gaussian and mean curvatures were 0.784 3, 0.838 6, and 0.907 2, respectively, while these average coefficients were 0.771 8, 0.832 4, and 0.890 3, respectively, for water inrush points in roadways. These data indicate that fault complexity is highly correlated with water inrush points in the mining face compared to water burst points in roadways. In other words, the production activities in the mining face within the study area are more significantly affected by faults. Additionally, the Pearson correlation coefficients all exceeded 0.77 regardless of the curvature integrated, suggesting a strong correlation between the 3D fault complexity and the water hazard conditions of coal mines. The qualitative assessment reveals that the overall structural complexity of the coal mine is relatively low and is primarily affected by faults. The fault complexity values of the coal mine were determined at around 1, exceeding 2 in very few zones. This result implies the overall low fault complexity of the coal mine despite local fault concentration, aligning with the qualitative assessment results. The above methods validate the effectiveness of the proposed model, which provides a new modeling approach for the calculation of 3D fault complexity.

Keywords: fault complexity; 3D quantitative analysis; curvature analysis; Delaunay tetrahedralization algorithm; Pearson correlation coefficient; water inrush point

地质构造是控制地层、煤岩层空间形态的根本因素,是多数煤矿事故发生的隐蔽致灾因素成因来源^[1-4]。随着我国煤矿开采的强度不断增加,开采范围和深度持续增大,煤矿开采所面临的地质构造条件也变得愈加复杂^[5-6],煤矿事故的多样性与不可预见性愈发突出^[7],诸如瓦斯突出、水害威胁及冲击地压等事故常造成重大的人员伤亡以及财产损失^[8-10]。而在煤矿矿井建设与生产过程中,断层是威胁安全生产最大的地质构造因素之一,其对矿井灾害具有直接的地质控制作用^[11-12]。因此,对处于矿井地质空间的断层进行复杂度评价是矿井地质构造评价工作的重要内容。

当前,断层复杂度的评价方法已逐步从传统的定性分析转向更为科学的定量评估。这些方法大致可划分为三类:参数比值法、线性加权和法及非线性模型法。(1) 参数比值法通过计算断层形态参数的比值来融合其不同特征,如 B. B. 鲁基诺夫提出的“断层复杂系数”及后续学者的改进版本^[13-15]。尽管该方法能在一定程度上量化断层复杂度,但受限于特征参数的选择范围,其

全面性有待提升,仅能作为评价体系中的一个辅助指标。(2) 线性加权和法则在全面考虑断层特征的基础上,通过引入多种确权方法(如层次分析法、熵权法、博弈论等)来确定各特征的权重,进而构建综合评价函数^[16-18]。该方法能够多角度地反映断层复杂度的全貌,然而,复杂的指标选取与权重确定过程降低了其在实际应用中的便捷性和泛化能力。(3) 非线性模型法,特别是基于神经网络的评价模型,通过自动优化特征参数权重,免除了人工确权的主观性,展现出良好的迁移性和适应性^[19-22]。然而,该方法对数据质量的高要求以及潜在的过拟合问题,仍需进一步研究与优化。

值得注意的是,上述方法在评价断层复杂度时,大多仅依赖于断层的原始数据,而忽视了其空间结构特征的重要性。同时,现有评价模型多侧重于二维层面的分析,缺乏对断层三维空间复杂度的全面考量。基于此,笔者提出融合形态分析与分形维数计算的断层复杂度评价模型,将断层面特征与改进的分形维数结合,实现断层复杂度的三维量化。以陕西某煤矿为例进行实验

验证,通过空间关联分析与历史数据对比,模型准确性得到确认,为煤矿安全提供技术支持。

1 断层面曲率分析

断层的主要组成要素包括断层面、断盘、断层线及断层带等。在这些要素中,断层面及其造成的破碎带常导致煤矿巷道采掘前方出现软弱结构面^[23]。如图 1 所示,这些软弱结构面常作为煤矿事故发生的诱因,一方面,由于该结构面组分大多为泥质岩类,强度较小,易成为应力重新分布的集中区,一旦揭露,有利于煤与瓦斯突出灾害的发生^[24]。另一方面,在采掘扰动下,断层面及其造成的破碎带极易演化成为导水通道^[25],为煤矿突水事故的发生提供了充水条件。

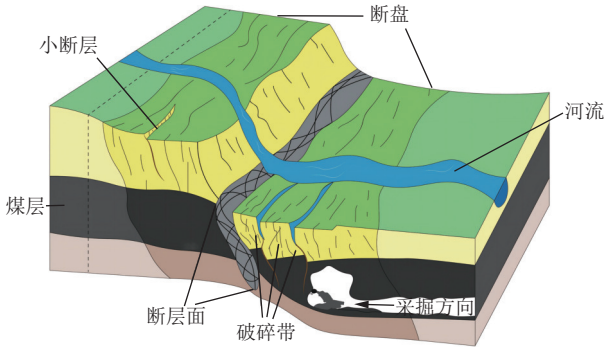


图 1 断层主要组成要素(以正断层为例)

Fig.1 Principal components of a fault (a case study of a normal fault)

与此同时,由于复杂的地质作用,断层面通常是不规则的空间曲面,其弯曲程度不仅影响着煤层的形态和走向,还导致了煤层连续性降低,使得巷道的布置和支护变得更加困难,增加了煤矿开采风险。因此,对断层面的弯曲程度计算是本文的研究重点之一。

1.1 断层面三维重构

三维断层面重构是本文进行断层面弯曲程度计算的前提。如图 2 所示,基于前人研究^[26],本文综合考虑断层数据的稀疏性以及断层面三维重构的光滑程度,采用线性判别法(linear discriminant analysis, LDA)与 Kriging 插值算法相结合的方式重构断层面。具体过程如下。

(1) 对三维地震得到的断层离散点进行中心化处理,将数据平移至坐标系中央,假设共有 N 个离散点, X 分量中心化公式为:

$$\begin{pmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ \vdots \\ X'_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{pmatrix} - X_{\text{center}} \quad (1)$$

X'_N 表示中心化后的值。断层离散点坐标的 Y 分量、

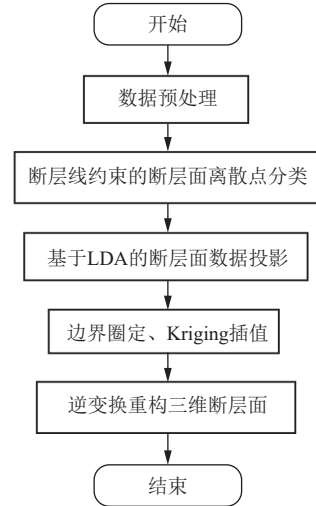


图 2 断层面三维重构算法

Fig.2 Algorithm for reconstructing a 3D fault plane

Z 分量与 X 分量的中心化过程一致。

(2) 基于断层线约束对离散点进行有监督分类,将分类后的离散点云作为断层面三维重构的数据样本,假设共有 K 类,表示如下:

$$Q = \{(x'_i, L_i) \mid x'_i \in R^3, L_i \in \{C_1, C_2, \dots, C_K\}\} \quad (2)$$

(3) LDA 降维算法的核心思想为:最大化类间均值,最小化类内方差^[27]。因此,通过 LDA 算法对分类后的断层面数据进行降维,能够保留组间数据之间的相似信息,以及最大化各组数据之间的差异信息。基于 LDA 算法的断层面数据降维流程如下。

① 计算每一类别中样本点的均值,公式如下:

$$m_k = \frac{\sum_{x'_i \in Q_k} x'_i}{N_k} \quad (3)$$

② 为了充分保留组内数据之间的相似信息,计算断层面分类数据类内散度矩阵 S_w 。

$$S_w = \sum_{k=1}^K \left(\frac{\sum_{x'_i \in Q_k} x'_i x'^T_i}{N_k} - m_k m_k^T \right) \quad (4)$$

③ 最大化组间数据差异,计算断层面分类数据类间散度矩阵 S_b 。

$$S_b = \sum_{i,j \in [1,K] \text{ \& } i \neq j} [(m_i - m_j)(m_i - m_j)^T] \quad (5)$$

④ 建立特征方程求解矩阵 $S_w^{-1} S_b$ 的特征值,并根据特征值从大到小取 2 个特征值 λ_1, λ_2 与对应的特征向量 w_1, w_2 ,将 w_1, w_2 组成变换矩阵 W 对数据进行投影,特征值求解及数据投影如下:

$$|\lambda E - S_w^{-1} S_b| = 0 \quad (6)$$

$$(x'_1, x'_2, \dots, x'_N) = W^T (x'_1, x'_2, \dots, x'_N) \quad (7)$$

(4) 利用凸包算法圈定待插值区域边界, 然后基于 Kriging 插值算法对投影后的断层离散点进行插值, 并将边界外的插值点剔除。

(5) 假设经 Kriging 算法插值后得到的点数据为 $(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_f)$, 利用逆变换将插值点集映射回原空间坐标系, 即可得到加密后的三维断层面离散点, 并通过三角网重构断层面。

1.2 断层面曲率计算

断层面曲率可以很好地反映断层面弯曲程度, 在三维空间中, 曲率可分为主曲率、高斯曲率及平均曲率 3 种主要类型^[28-29]。假设曲面方程为 $F(x, y, z) = 0$, 3 种曲率计算见表 1。

λ_1 、 λ_2 由下式求解:

$$\det[H_2(\lambda)] = \alpha_0 + \alpha_1\lambda + \alpha_2\lambda^2 \quad (8)$$

$$\text{方程参数: } \begin{cases} \alpha_0 = \det H_1 \\ \alpha_1 = \det(F_{\text{Hess}}) - \text{tr}[\text{adj}(H_1)] \\ \alpha_2 = -\nabla F \cdot \nabla F^T \\ H_1 = \begin{pmatrix} F_{\text{Hess}} & \nabla F^T \\ \nabla F & 0 \end{pmatrix} \\ H_2(\lambda) = \begin{pmatrix} F_{\text{Hess}} - \lambda E & \nabla F^T \\ \nabla F & 0 \end{pmatrix} \end{cases}。$$

2 三维复杂度计算模型构建

1967 年, 分形理论首次被 B. Mandelbrot^[30] 提出, 用于定量描述自然界中复杂、不规则但具有空间自相似性特征的物体。当前, 分形理论已成功应用于构造复杂性的定量评价中, 且相关研究表明, 分形维数越大,

表 1 曲率类型及计算方法

类型	说明	计算公式
主曲率	曲面上的点不同方向曲率最大值和最小值称为主曲率 k_1 、 k_2	$k_1 = -\frac{\lambda_1}{ \nabla F }$ $k_2 = -\frac{\lambda_2}{ \nabla F }$
平均曲率	主曲率平均数, 反映曲面凹凸程度	$k_{\text{mean}} = \frac{k_1 + k_2}{2}$
高斯曲率	主曲率乘积, 反映曲面不同方向的弯曲程度是否相同	$k_{\text{Gauss}} = k_1 k_2$

则构造复杂度也越大^[31-35]。其主要类型有容量维数、信息维数及盒子维数^[36]等。其中, 盒子维数 D_b ^[37] 在构造复杂度量化评价方面应用最为广泛。如图 3 所示, 本文以三维盒维法为基础, 通过融合 Delaunay 四面体剖分算法, 对断层面三维重建并将断层面曲率分析结果作为构造统计量的修正系数, 从而构建断层三维复杂度计算模型。

2.1 基于 Delaunay 算法改进的三维盒维法

基于三维盒维法的分形维数计算方法核心思路大致如下: 根据所需精细化程度将研究区在三维空间上进行初始划分, 利用尺度为 r 的测量体对其进行覆盖, 统计每个分区对应的参数量 $N(r)$ 。通过按一定比例逐级缩小尺度 r 以及更新对应的参数量, 根据下式求解分形维数 D_b , 其中, 三维分形维数计算中测量体大多为长方体盒子, 其尺度为 $r = (l, w, h)$ 。

$$D_b = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln r} \quad (9)$$

由于不可能无限地缩小空间划分尺度 r , 实际上更

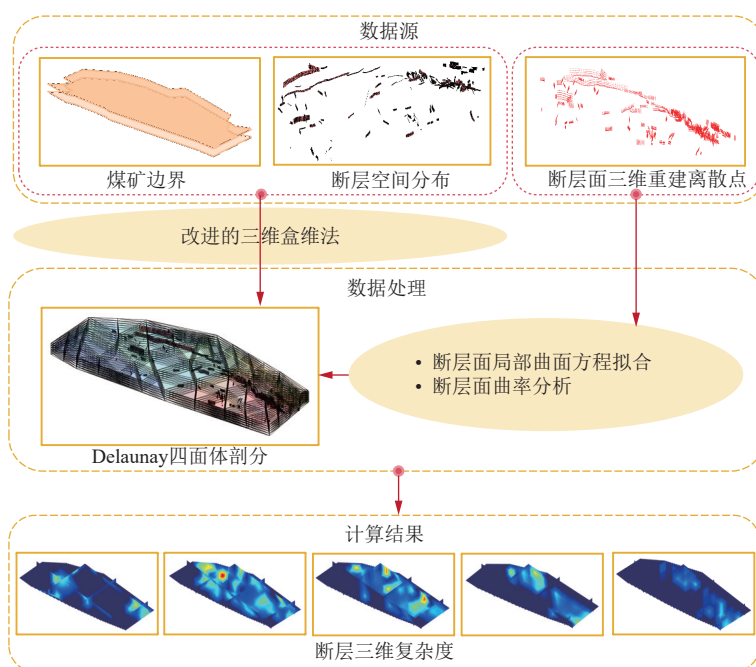


图 3 断层三维复杂度计算模型

Fig.3 A calculational model for 3D fault complexity

多的是利用回归分析对尺度 r 及 $N(r)$ 建立线性拟合方程,从而得到分形维数 D 。

$$\ln N(r) = -D \ln r + A \quad (10)$$

基于上述三维盒维法,本文利用 Delaunay 剖分算法改进上述测量体尺度 r 选取的过程。一方面,由于矿区边界存在不规则的特点,利用规则测量体对研究区进行覆盖时常常存在大量的无效区域,利用 Delaunay 算法能够有效的对研究区进行覆盖;另一方面,由于井田内不同区域的断层存在大量的空间关联关系, Delaunay 剖分能够有效地将该信息保留在统计参数量中。本文结合 Delaunay 剖分算法的详细参数见表 2。

改进后的计算方法通过逐级增加剖分顶点及空间分层数对覆盖测量体进行加密,统计各分区在不同剖分尺度 r 下与覆盖有断层的四面体数目 $N(r)$ 。

2.2 融合断层面曲率的复杂度计算模型

基于 Delaunay 剖分算法改进的断层分形维数具备断层的空间分布特征,但无法反映断层自身的结构复杂

表 2 Delaunay 四面体剖分算法详细参数
Table 2 Detailed parameters of the Delaunay tetrahedralization algorithm

参数	释义
NOL(number of layers)	研究区纵向分层数
NOSV(number of segmentation vertices)	研究区横向剖分顶点数
ST(segmentation threshold)	研究区横向剖分阈值

度。因此,本文将断层面的曲率作为特征因子,修正分形维数计算过程中的断层统计参数,步骤如下:

- (1) 逐级加密参数,基于 Delaunay 剖分算法对研究区进行四面体剖分。
- (2) 按一定步长对四面体进行差分,计算差分后四面体内各区间中点曲率并计算平均值。
- (3) 利用曲率均值修正统计量 $N(r)$ 。

利用修正后的参数量构建本文所提出的断层三维复杂度计算模型,用下式表示,参数统计见表 3。

$$\ln \left[N(r) \exp \left(\sum_{p=1}^P k_p / P \right) \right] = -D \ln r + C \quad (11)$$

表 3 融合断层面曲率的分形维数统计参数

Table 3 Statistical parameters of fractal dimensions integrated with the curvatures of a fault plane

有效区间序号	r_1	r_2	r_3	D_b
1	$N_1(r_1) \exp \left(\sum_{p=1}^{P_1} k_p^1 / P \right)$	$N_1(r_2) \exp \left(\sum_{p=1}^{P_2} k_p^1 / P \right)$	$N_1(r_3) \exp \left(\sum_{p=1}^{P_3} k_p^1 / P \right)$	D_1

3 模型应用及结果分析

3.1 研究区概况及实验数据

研究区位于陕西省澄合矿西部,该煤矿井田东西长约 4.76 km、南北宽 3.00~3.88 km,面积约 16.14 km²,煤层埋藏深度为 151~450 m,顶底板高程为 225~418 m。井田内中小断层较为发育且分布不均匀,并具有成带密集和疏密相间的特点。在井田范围内,发现 3 条落差超过 3.0 m 的断层,在井田边界外围,存在 3 条大断层。同时,据矿井开采资料分析发现,井田内已揭露的断层绝大多数为正断层,仅发育少数几条北东东及东西向展布的逆断层。根据该煤矿的生产情况及隐蔽致灾因素普查报告,随开采强度的逐渐加大,断层已成为影响该煤矿开采的主要构造因素。与此同时,该矿还属于水文地质类型极复杂型矿井,是陕西省受奥灰水水害威胁严重的矿井之一。

如图 4 所示,以研究区采掘工程平面图、三维地震数据及煤矿钻探所揭露的断层数据为基础,将其以离散点形式为基础,通过连线进行三维可视化。此外,为了后续验证本文所构建的断层三维复杂度计算模型的有效性,还获取了研究区历史突水点数据。

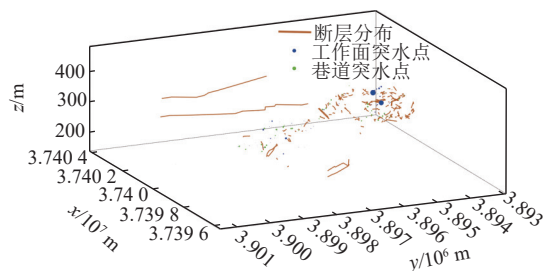


图 4 研究区断层及突水点空间分布

Fig.4 Spatial distributions of faults and water inrush points in the study area

3.2 参数设置及复杂度计算

本文对井田空间的剖分尺度级数共分 3 级,所使用的 Delaunay 四面体剖分算法详细参数设置见表 4。其中,本文按照间隔为 40 m 的原则将研究区井田空间纵向初始划分为 5 层,从高程 400~200 m 依次标记为 I、II、III、IV、V。横向初始设置剖分尺度为 3(去量纲),对应剖分顶点数及阈值分别为 30、0.000 5,每层有效统计区间数为 45,共计 225 个统计区间,各级剖分效果如图 5 所示。

此外,由式(8)可知,计算断层面曲率是建立在断层面曲面方程已知的前提下,因此,本文通过对断层面离

表 4 Delaunay 剖分算法详细参数
Table 4 Detailed parameters of the Delaunay tetrahedralization algorithm

r	NOL	NOSV	ST
3	5	30	0.000 5
2	10	52	0.000 25
1.5	20	116	0.000 125

散点进行局部拟合得到曲面方程,利用该曲面方程计算断层面的主曲率 k_1 、 k_2 ,进而计算断层面的高斯曲率以及平均曲率。经统计,该煤矿井田空间内共有 75 个剖分区间具有非零统计值,经过差分后的样本点(75 个剖分区间)主曲率 k_1 、 k_2 、平均曲率以及高斯曲率均值如图 6 所示,随着剖分四面体不断加密,大多样本点处的曲率随之增大。

经拟合计算得到 75 个样本点处的断层三维分形维数及两种融合断层面曲率的断层三维复杂度,按不同层位计算的 3 种指数均值见表 5。其中,75 个样本点的总平均值分别为 0.939 4、1.136 2、1.219 9。结合图 7,与断层三维分形维数相比,2 种融合断层面曲率的断层三维复杂度均有所增大。

计算得到的 3 种指数中,融合高斯曲率的断层三维复杂度平均值最大,结合分形维数能够描述其空间自相关性,反映了该数值在局部增大效果最为突出,并集中在第 II、III 及 IV 层剖分区间。在该煤矿井田范围内,各方向的断层普遍具有走向差异较大的特点,尤其是矿井主要发育的东西向和南北向断层,同时,结合研究区断层空间分布(图 4)可发现,上述 II、III 及 IV 层剖分区间为包含上述断层走向差异较大的区域。因此,融合断层面高斯曲率的断层三维复杂度能够更好地反映出研究区断层走向差异性。

此外,本文还对样本点在井田边界内进行双线性插值,插值效果如图 8 所示。通过对比可发现,在横向及纵向的断层复杂度刻画上,2 种融合断层面曲率的断层三维复杂度均比断层三维分形维数精细度高,主要表现为 3 种结果在空间上区分较大。且融合断层面平均曲率的断层三维复杂度最为明显,与此同时,该煤矿中揭露的小断层不仅走向差异较大,且分布不均匀,常密集成带。在井田内南北向与东西向两组主要发育的断层具有较明显的密集成带性。因此,融合断层面平均曲率的断层三维复杂度在反映断层空间分布集中区方面效果最好。

3.3 模型有效性验证

在采掘扰动下,正断层易演化成为导水通道,即本论文提出的断层复杂度应与导水条件具备强相关关系。另一方面,研究区还属于水文地质类型极复杂型矿井的

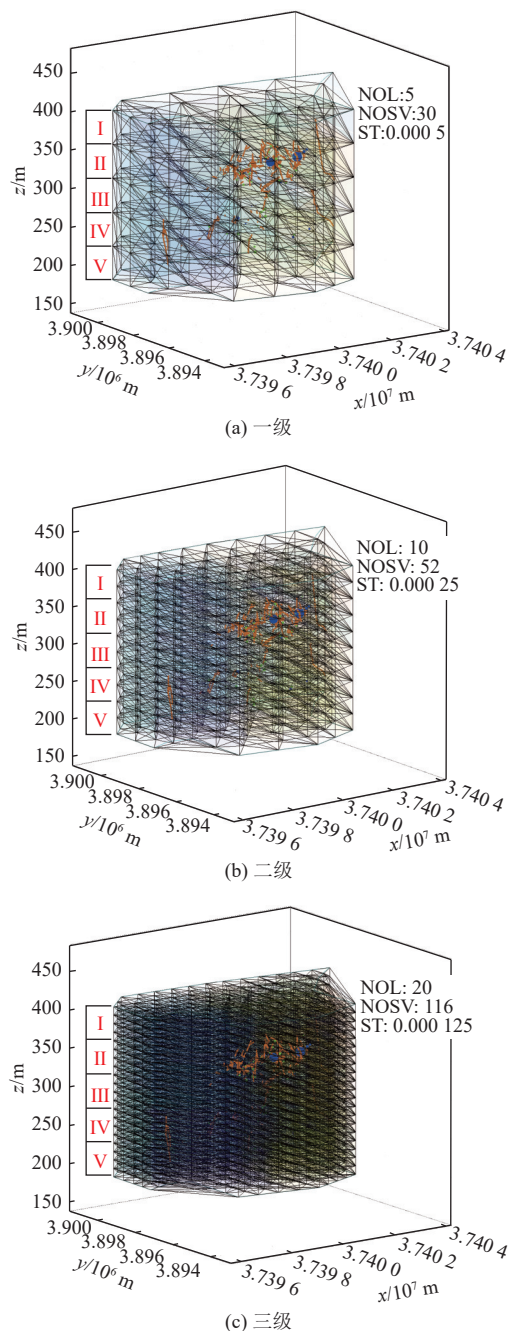


图 5 基于 Delaunay 算法的研究区剖分

Fig.5 Partitioning of the study area based on the Delaunay tetrahedralization algorithm

背景,因此,为验证提出的断层三维复杂度计算模型有效性,本论文将研究区的断层三维分形维数、断层三维复杂度与突水点分布的相关系数大小作为评价模型有效程度的依据之一。

皮尔逊系数是衡量变量间相关性强弱的一种方法,在数据挖掘领域中有广泛应用。为准确反映断层三维复杂度与突水点的相关性,选取合适的指标至关重要,本文选取指标为:样本点断层三维复杂度,样本点分别与 49 个巷道突水点、65 个工作面突水点的距离。

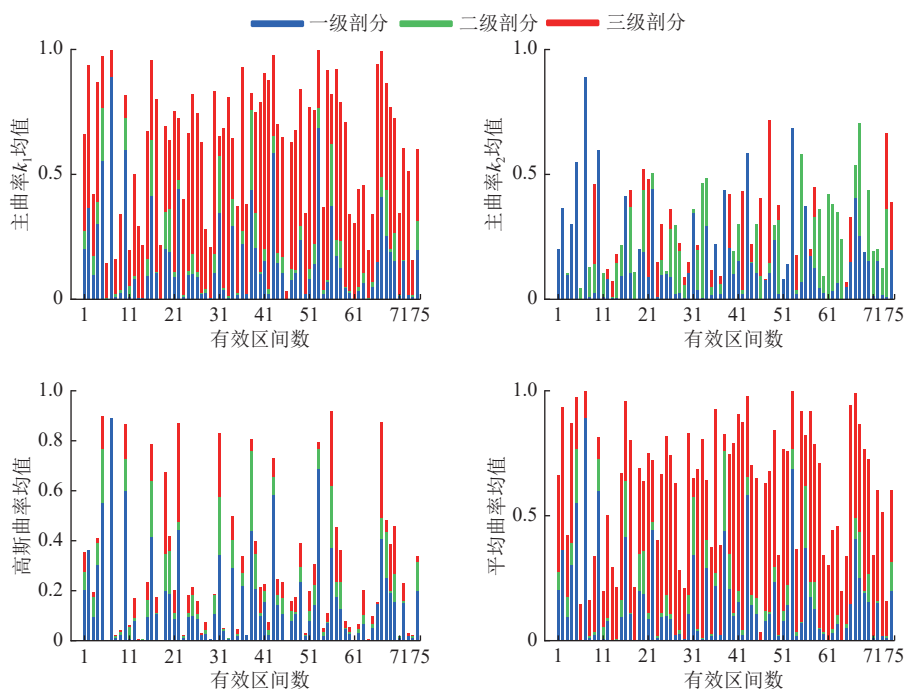


图 6 各级剖分样本点曲率统计

Fig.6 Curvature statistics of sample points at various partitioning levels

表 5 研究区断层三维分形维数及复杂度分层平均值

Table 5 Averages of the 3D fractal dimensions and complexity at various partitioning layers for faults in the study area

剖分层	有效区间数	断层三维分形维数均值	断层三维复杂度均值(高斯曲率)	断层三维复杂度均值(平均曲率)
I	11	0.892 8	0.984 1	0.954 0
II	16	0.837 8	1.468 4	1.562 7
III	21	0.947 7	1.019 4	1.130 9
IV	16	0.958 8	1.034 6	1.146 4
V	11	1.090 1	1.175 7	1.264 3
All	75	0.939 4	1.136 2	1.219 9

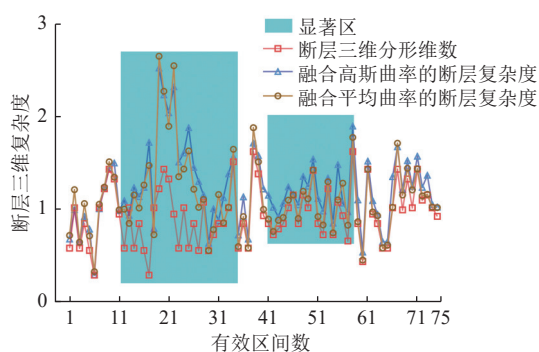


图 7 断层复杂度计算结果对比及差异显著区

Fig.7 Comparison of calculated fault complexity and zones with significant differences in fault complexity

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

如图 9 所示,经过计算,无论是在巷道,还是在工作面,本文计算得到的 3 种断层复杂度指数与突水点的相关系数均值在 0.77 以上,与此同时,融合断层面曲率的

断层三维复杂度与突水点的相关系数均值在 0.83 以上,较断层三维分形维数相关性更高,其中,融合平均曲率的断层三维复杂度与突水点的相关系数均值达到了 0.90 左右。以上数据反映了本论文提出的断层三维复杂度与研究区水害条件具有强相关关系。与此同时,3 种指数与工作面突水点的相关系数均大于与巷道突水点的相关系数,表明断层对工作面影响更大。

此外,根据该煤矿以往的构造定性评价结果分析,该煤矿地质构造复杂程度总体较低,且主要受断层发育程度影响,因此,评价因素主要以描述断层的相关指标为主。本文提出的 3 种断层复杂度评价结果中,其断层复杂度的平均值在 1 左右,极少数区域在 2 以上,从一个侧面反映了该煤矿构造复杂程度较低,进一步验证了本模型的有效性。

4 结论

(1) 通过融合 Delaunay 剖分算法与三维分形维数

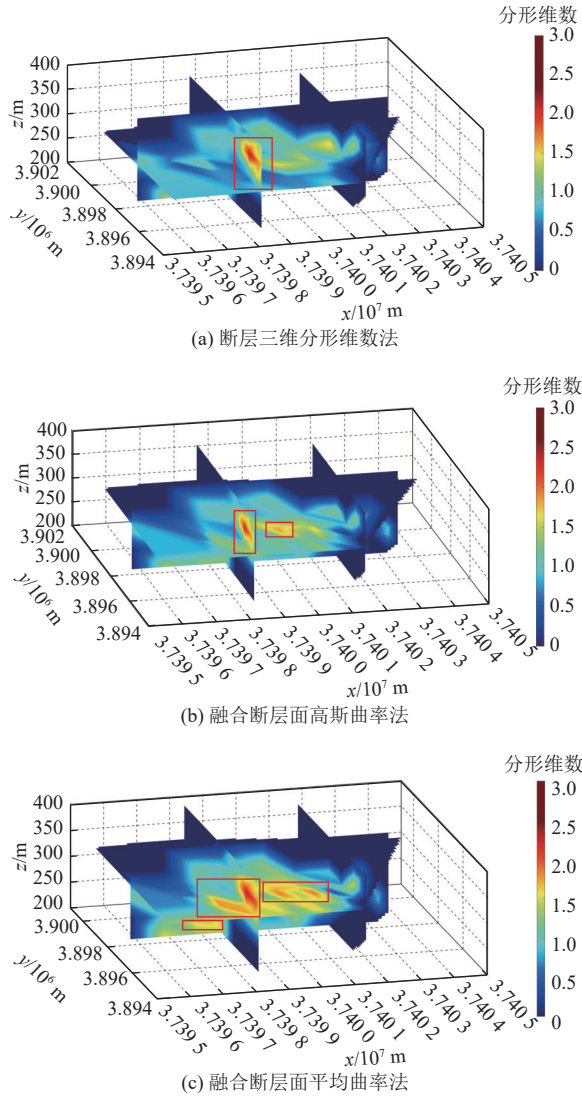


图 8 不同插值方法效果对比

Fig.8 Comparison of the performance of different interpolation methods

计算,将断层面曲率作为修正参数,构建了断层复杂度评价模型。该模型有效覆盖了研究区,精准地反映了断层在三维空间中的复杂变化特性,包括走向差异性和集中分布等特征。

(2) 与传统方法不同,本文提出的模型能够提供三维空间上的断层复杂度数值,并通过插值间隔控制分辨率。尤为重要的是,相关性分析表明,融合断层面曲率的复杂度指数与矿井水害发生存在强相关关系,为煤矿水害的三维空间分布预测提供了重要的量化参数。

(3) 将模型计算结果与煤矿现有的地质构造复杂程度定性分析结果进行对比,验证了模型的有效性和可靠性。随着三维地质模型构建技术的不断发展,将进一步整合更多地质信息,如断层面局部倾角和断层交切处拓扑关系,以持续优化断层复杂度计算模型,为地质工程领域提供更加全面、精确的技术支持。

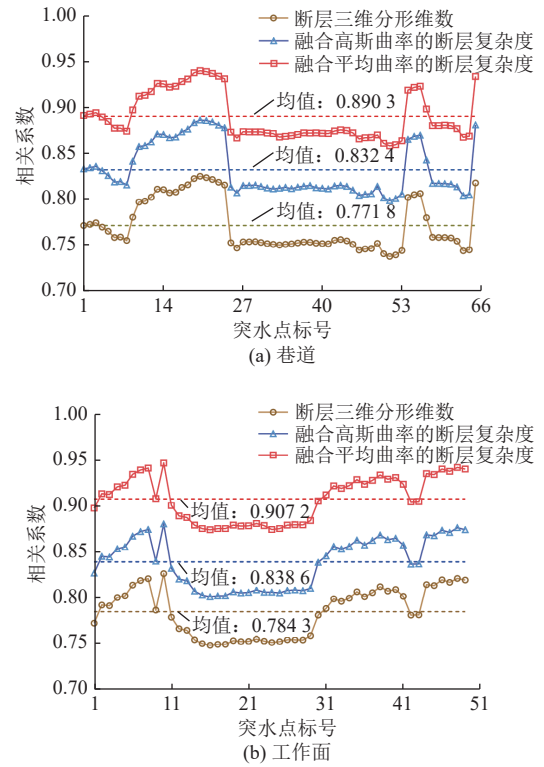


图 9 断层复杂度与突水点相关系数

Fig.9 Coefficients of correlation between fault complexity and water inrush points

符号注释:

A 为线性拟合得到的常量; $\text{adj}(\mathbf{H}_1)$ 为矩阵 $\mathbf{H}_1$ 的伴随矩阵; C_k 为样本点所属的不同类别; $\det(\mathbf{H}_1)$ 为矩阵 $\mathbf{H}_1$ 的行列式值; D_1 为序号为 1 的分形维数; $\mathbf{E}$ 为单位矩阵; $\mathbf{F}_{\text{Hess}}$ 为曲面方程 F 的 Hessian 矩阵; ∇F 为曲面方程 F 的梯度向量; h 为盒子维数计算中盒子的高, m ; i 为每一类别中样本点的序号; k_p 为第 p 个区间内的曲率值; K 为样本的类别数; L_i 为 x_i' 所属的样本类别; l 为盒子维数计算中盒子的长, m ; m_k 为第 k 个类别中样本点空间坐标的均值; m_i 与 m_j 为两类样本集合的样本点空间坐标均值; n 为样本点个数; N 为断层离散点的总数量; N_k 为第 k 个类别中的样本数; p 为区间序号; P 为按一定步长对四面体覆盖区间进行差分后包含的区间数; P_1, P_2, P_3 分别为 r_1, r_2, r_3 条件下包含的区间数; Q 为监督分类后的样本点集合; Q_k 为第 k 个样本点集合; r_1, r_2, r_3 分别为逐次递增的 3 个剖分尺度; $\mathbf{R}^3$ 为实数域中的 3 维向量; $\text{tr}(\mathbf{H}_2)$ 为矩阵 $\mathbf{H}_2$ 的迹; w 为盒子维数计算中盒子的宽, m ; w_1, w_2 分别为与 λ_1, λ_2 相对应的两特征向量; x_i' 为每一样本类别中样本的空间坐标; x_N' 为初始的样本点空间坐标; x_N' 为数据投影后的样本点空间坐标; X_{center} 为所有点坐标 X 分量的平均值, m ; X_N 为原始点坐标的 X 分量值, m ; x_N' 为原始点坐标 X 分量中心化后的值, m ; λ 为矩阵 $\mathbf{S}_w^{-1}\mathbf{S}_b$ 的特征值; λ_1, λ_2 为 $\mathbf{S}_w^{-1}\mathbf{S}_b$ 特征值从大到小的前 2 个特征值。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 齐庆新, 潘一山, 李海涛, 等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1567–1584.
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1567–1584.
- [2] 曾一凡, 武强, 赵苏启, 等. 我国煤矿水害事故特征、成因与防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 1–14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1–14.
- [3] 张建国, 邱黎明, 王满, 等. 深部煤层不同类型隐伏构造致灾规律研究[J/OL]. 煤炭科学技术, 2023, 51(增刊 2): 50–59.
ZHANG Jianguo, QIU Liming, WANG Man, et al. Study on disaster-causing law of different types of hidden structures in deep coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(Sup.2): 50–59.
- [4] 毛德兵, 尹希文, 张会军. 我国煤矿顶板灾害防治与监测监控技术[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 105–108.
MAO Debing, YIN Xiwen, ZHANG Huijun. Technology of prevention roof disasters and monitoring and controlling in China coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 105–108.
- [5] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11–22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11–22.
- [6] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 1–7.
- [7] 国家矿山安全监察局事故调查和统计司. 开展煤矿隐蔽致灾因素普查治理工作 坚决防范遏制煤矿重特大事故——煤矿隐蔽致灾因素普查治理工作专题总结[J]. 中国煤炭, 2022, 48(增刊 2): 1–8.
Accident Investigation and Statistics Department of National Mine Safety Administration. Carrying out the general survey and treatment of hidden disaster-causing factors and resolutely preventing and containing major accidents in coal mines—Special topic summary of the general survey and treatment of hidden disaster-causing factors in coal mines[J]. China Coal, 2022, 48(Sup.2): 1–8.
- [8] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1–6.
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1–6.
- [9] 康红普, 张镇, 黄志增. 我国煤矿顶板灾害的特点及防控技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(10): 24–33.
KANG Hongpu, ZHANG Zhen, HUANG Zhizeng. Characteristics of roof disasters and controlling techniques of coal mine in China[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(10): 24–33.
- [10] 赵军利, 王文元, 杨威. 基于地质构造角度的煤与瓦斯突出机理研究进展[J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 197–204.
ZHAO Junli, WANG Wenyuan, YANG Wei. Research progress of coal and gas outburst mechanism based on geological structure[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(10): 197–204.
- [11] 刘泽威, 刘其声, 刘洋. 煤层底板隐伏断层分类及突水防治措施[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 141–146.
LIU Zewei, LIU Qisheng, LIU Yang. Classification of hidden faults in coal seam floor and measures for water inrush prevention[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 141–146.
- [12] 李鹏, 蔡美峰, 郭奇峰, 等. 煤矿断层错动型冲击地压研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 1–17.
LI Peng, CAI Meifeng, GUO Qifeng, et al. Research situations and development tendencies of fault slip rockburst in coal mine[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 1–17.
- [13] B. B. 鲁基诺夫, 袁崇孚. 为确定煤层突出危险性对构造条件的综合评定[J]. 中州煤炭, 1992(3): 47.
- [14] 曹代勇, 周云霞, 魏迎春. 矿井地质构造定量评价信息系统的开发及应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 379–382.
CAO Daiyong, ZHOU Yunxia, WEI Yingchun. Development of the quantitative evaluation information system of mining geology structure[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 379–382.
- [15] 王建国, 王海凤, 刘见宝. 矿井断层复杂程度系数的几何方法评价[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(5): 115–117.
WANG Jianguo, WANG Haifeng, LIU Jianbao. Assessment on geometric method for complexity degree coefficient of mine fault[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(5): 115–117.
- [16] 施龙青, 刘捷, 邱梅, 等. 断层量化在突水危险性评价中的应用[J]. 中国科技论文, 2020, 15(1): 100–104.
SHI Longqing, LIU Jie, QIU Mei, et al. Application of fault quantification in risk assessment of water inrush[J]. China Sciencepaper, 2020, 15(1): 100–104.
- [17] YANG Binbin, YUAN Junhong, DUAN Lihong, et al. Using GIS and fractal theory to evaluate degree of fault complexity and water yield[J]. Mine Water and the Environment, 2019, 38(2): 261–267.
- [18] 郭强, 成文举, 杨廷军, 等. 基于博弈论组合赋权的断层定量评价模型及应用[J]. 煤矿安全, 2023, 54(6): 199–206.
GUO Qiang, CHENG Wenju, YANG Tingjun, et al. Fault quantitative evaluation model and application based on game theory combination weighting[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 199–206.
- [19] 夏玉成, 胡明星, 陈练武. 矿井构造的 GMDH-BP 评价预测方法及其应用[J]. 煤炭学报, 1997, 22(5): 466–470.
XIA Yucheng, HU Mingxing, CHEN Lianwu. GMDH-BP method and its application in evaluation and prediction of mine structure[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 466–470.
- [20] 汪吉林, 姜波. 模糊人工神经网络在矿井构造评价中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 609–612.

- WANG Jilin, JIANG Bo. Using fuzzy artificial neural network to evaluate the mine structure[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 34(5): 609–612.
- [21] 朱宝龙, 夏玉成. 人工神经网络在矿井构造定量评价中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(6): 15–17.
- ZHU Baolong, XIA Yucheng. Quantitative evaluation of mining structure based on the artificial neural network[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(6): 15–17.
- [22] 薛喜成, 吕自豪, 倚江星, 等. 基于 IGA-BP 的矿井构造复杂程度评价[J]. *煤矿安全*, 2023, 54(3): 193–203.
- XUE Xicheng, LYU Zihao, JI Jiangxing, HUO Gaopu. Evaluation of mine structure complexity based on IGA-BP model[J]. *Safety in Coal Mines*, 2023, 54(3): 193–203.
- [23] 童仁剑, 郑士田, 吴燕军, 等. 地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(6): 196–203.
- TONG Renjian, ZHENG Shitian, WU Yanjun, et al. Key technology of advance pre-grouting of ground directional holes to shield roadway passing fault and broken zone[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 196–203.
- [24] 张子敏, 张玉贵. 大平煤矿特大型煤与瓦斯突出瓦斯地质分析[J]. *煤炭学报*, 2005, 30(2): 137–140.
- ZHANG Zimin, ZHANG Yugui. Investigation into coal-gas outburst occurred in Daping Coalmine, by using theories of gas-geology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(2): 137–140.
- [25] 张鹏, 朱学军, 孙文斌, 等. 采动诱发充填断层活化滞后突水机制研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(3): 136–143.
- ZHANG Peng, ZHU Xuejun, SUN Wenbin, et al. Study on mechanism of delayed water inrush caused by mining-induced filling fault activation[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(3): 136–143.
- [26] WU Qiang, XU Hua, ZOU Xukai, et al. A 3D modeling approach to complex faults with multi-source data[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 77: 126–137.
- [27] 刘光伟, 宋佳琛, 白润才, 等. 基于 Morphing 方法的断层面重构[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(2): 69–77.
- LIU Guangwei, SONG Jiachen, BAI Runcai, et al. Fault surface reconstruction based on Morphing method[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(2): 69–77.
- [28] YAN Jun, ZHANG Benyu, YAN Shuicheng, et al. A scalable supervised algorithm for dimensionality reduction on streaming data[J]. *Information Sciences*, 2006, 176(14): 2042–2065.
- [29] ROMANET P, SATO D S, ANDO R. Curvature, a mechanical link between the geometrical complexities of a fault: Application to bends, kinks and rough faults[J]. *Geophysical Journal International*, 2020, 223(1): 211–232.
- [30] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension[J]. *Science*, 1967, 156(3775): 636–638.
- [31] KOENDERINK J J, VAN DOORN A J. Surface shape and curvature scales[J]. *Image and Vision Computing*, 1992, 10(8): 557–564.
- [32] Le Méhauté A. *Fractal Geometries Theory and Applications*[M]. CRC Press, 1991.
- [33] 张满仓, 兰天伟, 贾伟东, 等. 断裂构造分形几何特征对冲击地压的控制作用研究[J]. *煤炭工程*, 2023, 55(5): 103–110.
- ZHANG Mancang, LAN Tianwei, JIA Weidong, et al. Effect of fractal geometric characteristics of fracture structure on rock burst control[J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(5): 103–110.
- [34] PARMAR K S, BHARDWAJ R. Water quality index and fractal dimension analysis of water parameters[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 10(1): 151–164.
- [35] LIU Yongjie, LI Xuelong, LIU Shumin, et al. Study on influence of fault structure on coal mine gas occurrence regularity based on the fractal theory: A case study of Panxi Mine in China[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022, 44(2): 4917–4927.
- [36] ZHANG Gaizhuo, GUO Junzhong, XU Bin, et al. Quantitative analysis and evaluation of coal mine geological structures based on fractal theory[J]. *Energies*, 2021, 14(7): 1925.
- [37] FOROUTAN-POUR K, DUTILLEUL P, SMITH D L. Advances in the implementation of the box-counting method of fractal dimension estimation[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 1999, 105(2/3): 195–210.

(责任编辑 聂爱兰)