



煤层底板复合岩层微观缝隙结构复杂程度定量辨识

王心义 陈博 田世元 邹宇 张波

引用本文:

王心义, 陈博, 田世元, 等. 煤层底板复合岩层微观缝隙结构复杂程度定量辨识[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 53–63.
WANG Xinyi, CHEN Bo, TIAN Shiyuan. Quantitative identification of complexity of microscopic fracture structure of coal seam floor composite rock layer[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 53–63.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0450>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于AHP-熵权法耦合方法的地质构造复杂程度定量评价

Quantitative evaluation of geological structure complexity based on AHP-entropy weight coupling method

煤炭科学技术. 2022, 50(11): 140–149 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d6376e67-2df6-4c15-b1fa-7229cd0eede9>

煤层底板水文地质结构划分及阻隔水能力定量评价方法研究

Study on quantitative evaluation method of hydrogeological structure and water-blocking capacity of coal seam floor

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 187–194 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/1a917ba3-2abb-43c4-a68b-af80cdabcd61>

复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井方法研究

Study on horizontal completion with composite tubular string in coal reservoir with complex coal structure

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 189–197 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1659>

基于熵权法-云模型保水开采生态环境评价研究

Study on ecological environment assessment of water conservation mining based on entropy weight method and cloud model

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 291–298 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f09c6c57-2768-4b38-8d21-1ed8f604fee5>

高地温对不同变质程度煤自燃微观结构影响试验研究

Experimental investigation on microstructure influence of high temperature on spontaneous combustion of coal with different ranks

煤炭科学技术. 2019(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cceea8b6-0141-4943-83bd-c8f60c3be247>

复合弱结构失稳变形及冲击倾向性变化特征分析

Analysis on instability deformation and burst liability of composite weak structures

煤炭科学技术. 2021, 49(9): 32–37 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b4b5018a-8d38-4bfl-bcde-2e38b804e0ba>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王心义, 陈 博, 田世元, 等. 煤层底板复合岩层微观缝隙结构复杂程度定量辨识[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 53–63.

WANG Xinyi, CHEN Bo, TIAN Shiyuan, *et al.* Quantitative identification of complexity of microscopic fracture structure of coal seam floor composite rock layer[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 53–63.

煤层底板复合岩层微观缝隙结构复杂程度定量辨识

王心义^{1,3}, 陈 博^{1,2}, 田世元¹, 邹 宇⁴, 张 波⁵

(1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省焦作市中站区农业农村局, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产与
清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454100; 4. 广东省水文局江门水文分局, 广东 江门 529000;
5. 中国平煤神马集团能源化工研究院, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 采动条件下煤层底板复合岩层微观缝隙结构影响着下伏高水压含水层地下水的导升和渗流, 其复杂程度对于煤层底板水害预测预警具有重要意义。以平顶山煤田东部 3 个相邻矿井提取的 57 组岩样为对象, 基于 SEM 图像采集和 N_2 吸附试验的综合信息, 选取岩层面积缝隙率、等效缝隙直径、缝隙面积分维值、比表面积、缝隙体积及其分维值为主控因子, 利用熵权-TOPSIS 数学模型定量评价了已₁₆₋₁₇煤层至寒武灰岩顶界面之间复合岩层微观缝隙结构的复杂程度。结果表明: 已₁₆₋₁₇煤层底板复合岩层微观缝隙结构极简单、简单、中等、复杂、极复杂等级占比分别为 25.00%、21.43%、39.29%、7.14%、7.14%, 研究地段复合岩层的微观缝隙结构相对不复杂; 4 个岩段相比, 岩层微观缝隙结构复杂程度量化均值排序为 $L_1 \sim L_2$ 灰岩段 $> L_5 \sim L_7$ 灰岩段 $>$ 砂岩段 $>$ 铝土质泥岩段, 岩层微观缝隙结构复杂程度较好地反映了岩层缝隙发育程度。研究考虑了多因素对复合岩层的耦合影响, 实现了复合岩层垂直段微观缝隙结构的定量分级分区判别, 对精准刻画煤层底板复合岩层的含隔水层性能和科学指导煤层底板水害防治具有重要的意义。

关键词: 复合岩层; 微观缝隙结构; 复杂程度; 熵权-TOPSIS 模型; 定量辨识

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0053-11

Quantitative identification of complexity of microscopic fracture structure of coal seam floor composite rock layer

WANG Xinyi^{1,3}, CHEN Bo^{1,2}, TIAN Shiyuan¹, ZOU Yu⁴, ZHANG Bo⁵

(1. Institute of Resources & Environment, Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Henan Jiaozuo zhongzhan Agriculture and Rural Affairs Bureau, Jiaozuo 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China; 4. Jiangmen Branch Bureau of Hydrology, Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Jiangmen 529000, China; 5. Institute of Energy and Chemical Industry, China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: Under mining conditions, the micro crack structure of the composite strata of the coal seam floor affects the uplift and seepage of the groundwater in the underlying high water pressure aquifer, and its complexity is of great significance for the prediction and early warning of the water disaster in the coal seam floor. In this paper, a total of 57 groups of rock samples extracted from three adjacent mines in the east of Pingdingshan Coalfield are taken as the object. Based on the comprehensive information of SEM image acquisition and N_2 adsorption test, the fissure ratio of rock stratum area, equivalent crack diameter of rock stratum, fractal dimension value of fissure area, specific surface area, crevice volume and its fractal dimension are the main controlling factors. Using entropy weighted TOPSIS mathematical model, the complexity of the micro fracture structure of the composite rock stratum between the J_{16-17} coal seam and the Cambrian limestone top interface is quantitatively evaluated. The results show that the micro crack structure of the composite strata in the floor of the

收稿日期: 2023-02-02

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0450

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972254); 河南省创新型科技人才队伍建设工程资助项目(CXTD2016053); 河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF200103)

作者简介: 王心义(1963—), 男, 河南睢县人, 教授, 博士生导师。E-mail: wangxy@hpu.edu.cn

通讯作者: 陈 博(1995—), 男, 河南巩义人, 硕士。E-mail: 825266050@qq.com

J₁₆₋₁₇ coal seam is very simple, simple, medium, complex and extremely complex, accounting for 25.00%, 21.43%, 39.29%, 7.14% and 7.14% respectively. The micro crack structure of the composite strata in the study section is relatively uncomplicated; Compared with the four rock sections, the order of the quantitative mean value of the complexity of the rock stratum micro fracture structure is: L₁-L₂ limestone section>L₅-L₇ limestone section>sandstone section>bauxite mudstone section. The complexity of the rock stratum micro fracture structure better reflects the development of the rock stratum fracture. The paper considers the coupling effect of multiple factors on the composite rock stratum, realizes the quantitative classification and zoning discrimination of the micro crack structure in the vertical section of the composite rock stratum, which is of great significance for accurately describing the aquifer performance of the composite rock stratum in the coal seam floor and scientifically guiding the prevention and control of the water hazard in the coal seam floor.

Key words: composite strata; microstructure; complexity; entropy weight-TOPSIS model; quantitative identification

0 引言

我国华北型煤田区主采二叠系和石炭系煤层,开采煤层与下伏奥陶系或寒武系厚层含水层之间分布有薄层灰岩、砂岩和泥岩构成的复合岩层。受构造和采动的双重影响,岩层中的缝隙(节理、层理、孔隙、裂隙、溶隙)较为发育^[1-2]。其中宏观(大中型)缝隙具直接或间接突水危险性,而微观(小微型)缝隙因利于地下水的导升和渗流而增强了突水危险性^[3]。平煤股份公司八矿、十三矿、首山一矿自建成以来,已发生6起底板突水事故,对其进行调查研究,结果表明其突水层位复合岩层微观结构复杂程度尚不知情且隔水能力相对薄弱,因此复合岩层是抵抗高压水和阻滞地下水导生以及防止底板突水的关键,其研究非常必要。深入研究己煤底板岩石的微观结构特征与分布规律,对于认识岩石的微观本质以及煤炭宏观利用有着很大的实用价值。另外,同等地质、水文地质和采掘工程布置条件下,不同埋深、不同岩性的岩层,其微观缝隙结构的差异性较大。一般来说,微观缝隙结构越复杂,说明其岩层导水性和透水性越好。因此,系统分析复合岩层的微观缝隙结构并定量评价其复杂程度对于精准识别煤层底板含水层突水危险性并采取合理防治水对策具有重要价值。

复合岩层是指由不同成分的岩石交替堆积而成的岩石体系。通过对复合岩层微观结构的定量辨识,可以解析出其不同成分的来源、沉积环境及其演化历史,能够更深入理解地球内部和表层的运动与演化规律,在工程建设和矿产资源开发中也举足轻重。在油气地层领域,可为油气勘探开发提供科学依据;在隧道或坑道领域,综合考虑不同成分对围岩稳定性的影响,能够预测和避免地质灾害的发生;在矿产资源开发领域,通过分析不同成分的岩石组成及其相对构造关系,进行矿物资源的有效勘探和开采。总之,通过对复合岩层微观结构的研究,为各种地球

科学领域提供科学依据和技术支持,具有广阔的研究前景和潜在的经济价值。目前,已有国内外众多学者围绕岩层微观缝隙结构展开了系统的研究。TOVEY^[4]首次利用电子显微镜并在二维和三维层面定量分析土壤样品的微观缝隙结构,开辟了定量分析土壤样品微观缝隙结构的新思路。YUDHBIR等^[5]借助扫描电子显微镜和图像分析仪在砂岩颗粒形态和微观结构定量中的应用,探讨了岩石形态和微观结构因素与力学特性的关系。HUI等^[6]通过低温N₂吸附分析和场发射扫描电子显微镜(FESEM)研究了志留系黑色页岩矿物基质与缝隙体积和表面积之间的相关性。KROHN等^[7]开发了基于扫描电子显微镜的自动测量技术,可从断裂表面的扫描电子显微镜(SEM)图像中精确测量砂岩微观结构的分形维数并测量了分形区域的长极限。杨军等^[8]借助Image Pro Plus图像分析软件,准确计算了SEM图像中不规则孔洞的面积、周长、半径和数量,并通过fox分形软件系统对沥青AFM观测图像开展系统分析,利用分形维数观察沥青的微观结构具有很高可行性,是一种新颖可靠的评价方法。郑司建等^[9]基于压汞试验,以准噶尔盆地南缘低煤阶煤样为切入点,建立分形模型,对煤储层的微观缝隙结构特征进行定量描述,结果表明煤储层的渗透性随着分形维数的增加有稍微减小的趋势。SHEN^[10-12]、HORNE^[13]等在提出的分形毛管压力模型的基础上,利用毛管压力数据计算分形维数 D 。实际数据验证了该方法的有效性。李静等^[14]基于CT扫描试验重构三维数字岩心,研究泥页岩储层岩石的微观缝隙结构机制,得出缝隙度和分形维数对岩石的微观结构复杂程度均存在较大影响,缝隙度和分形维数越大,其复杂程度越大。侯健利等^[15]用CT微观驱替试验系统得到岩芯CT图像,并将图像信息转化为三维数据体,在此基础上提取样品的平均体积,接触面积比,形状因子等指标对缝隙尺度下样品的形态进行定量表征。田志^[16]丰富了核磁共振在岩石物理性质评价中的应

用方向,利用微裂缝、粒间小孔、溶蚀大孔的信号能量变化趋势不同,反映不同类型缝隙间的连通性存在差异,对利用核磁共振评价复杂缝隙岩石的缝隙结构和连通性提供了新思路和新方法。杨赫等^[17]基于核磁共振试验测试了注水过程中,不同围压及水压作用下煤体缝隙结构特征,并结合分形几何理论对煤体有效渗流通道结构分形特征进行了分析。邓涛等^[18]以四川盆地上三叠统须家河组不同层段黑色泥岩为例,在低温氮气吸附试验的基础上,采用 Frenkel-Halsey-Hill(FHH)分形模型研究三叠统须家河组不同层段黑色泥岩的缝隙结构和缝隙分形差异特征。

显然,扫描电镜法(SEM)、压汞法、毛细管压力曲线法、铸体光片法、电子计算机断层扫描法(CT)、核磁共振法、三维重构法、氮气吸附法(N₂)等多种方法的应用,为岩层微观缝隙结构的科学检测提供了支持。同时,分形理论也已用于微观缝隙结构的定量化研究中,为微观缝隙结构不均一发育特征的精准表征奠定了基础。然而,受样品测试指标数量不足及测试结果难以统一量化的限制,耦合不同检测方法的测试结果,利用现代数学方法定量化界定岩层微观缝隙结构的的研究相对较少。笔者基于 57 块岩样的 SEM 图像采集和 N₂ 吸附试验结果,遴选面积缝隙率、等效缝隙直径、比表面积、缝隙面积分维值、缝隙体积分维值为主控因子,建立了多因子耦合下的熵权法-TOPSIS 模型,定量识别了不同岩性岩层的微观缝隙结构复杂程度。由于选取的指标因子涵盖了描述岩层微观缝隙结构复杂程度的多种因素,其成果为准确判别复合岩层微观缝隙结构发育特征差异性提供了有力支撑。

1 岩样及检测

1.1 煤层底板复合岩层结构

平顶山煤田东三矿包括十三矿、八矿和首山一矿,目前主采已₁₆₋₁₇煤层。据已有钻探资料,已₁₆₋₁₇煤层与寒武系灰岩之间主要由砂质泥岩、中粒砂岩、薄煤层、薄层灰岩和铝土质泥岩构成,厚度在 81.0 ~ 103.0 m,均值为 90.6 m,如图 1 所示。

为定量判别已₁₆₋₁₇煤层底板复合岩层的微观缝隙结构和隔水性能,专门施工 7 个钻孔,如图 2 所示、提取 57 块岩样进行参数测试,岩样选取总原则是钻孔岩心必须具有典型性和代表性,筛选要考虑的因素是多方面的,如钻孔的位置、钻孔代表性、钻孔代表地区的矿化形式和类型、勘探阶段、岩心种类或性

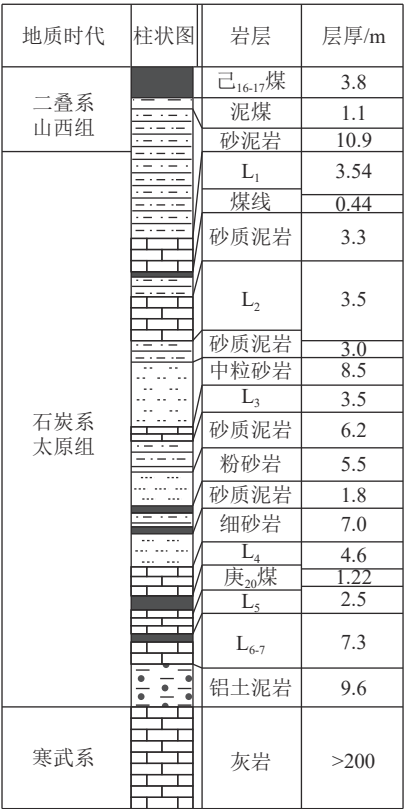


图 1 己₁₆₋₁₇煤底板复合岩层柱状图
Fig.1 Histogram of 16-17 coal floor composite rock formation

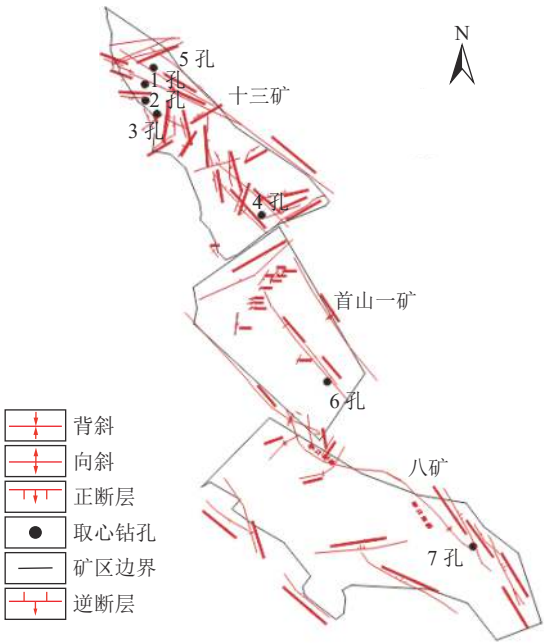


图 2 钻孔位置
Fig.2 Drilling position

质等。为体现区位差异性,明确区位特征,因地制宜开发利用区域资源,根据平煤神马集团煤层开采报告和现场实际取心状况将研究区已组煤层底板到寒武系石灰岩之间的岩层按岩性组分特征划分为 L₁ ~ L₂ 灰岩段、砂岩段(含砂质泥岩)、L₅ ~ L₇ 灰岩段、

铝土质泥岩段。

为便于比对分析不同位置和层段岩样的性质,对 57 块岩样进行编号,其编号规则为:钻孔→岩性→样品。其中岩性按 $L_1 \sim L_2$ 灰岩段→砂岩段→ $L_5 \sim L_7$ 灰岩段→铝土质泥岩段顺序,分别编号为 1、2、3、4。即:1 号钻孔 $L_1 \sim L_2$ 灰岩编号为 1-1,其第 1 个岩样编号为 1-1-1。

1.2 FESEM 图像采集与处理

应用场发射扫描电镜(FESEM)进行图像采集及处理的步骤是:首先,对 57 块样品在 $\times 500$ 、 $\times 1\,000$ 、 $\times 1\,500$ 、 $\times 2\,000$ 倍数下进行图像采集,利用 ImageJ 软件对图像进行校正,统一像素与放大单位的关系。随后,对图像进行预处理,将图像转变为灰度为 8 bit 的图像。最后,在对图像进行阈值分割处理^[19],为避免人为因素造成的阈值选择的偏差,多次操作选择出最优的二值化图像。最终提取二值化图像中的微观参数,计算出面积缝隙率、等效缝隙直径等指标。图像参数处理如图 3 所示。

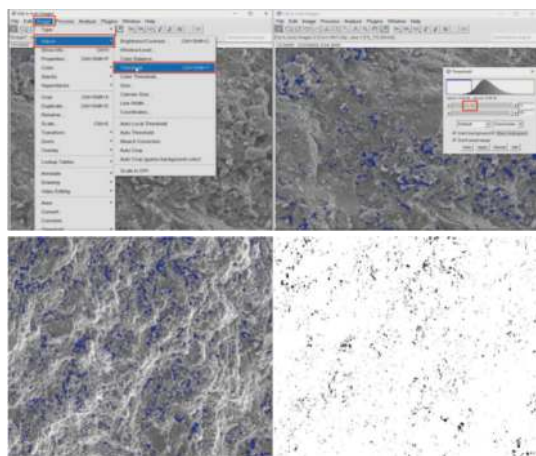


图 3 图像参数处理观测

Fig.3 Observation of image parameter processing

1.3 N_2 吸附试验

N_2 吸附试验是利用比表面积孔径分析仪(图 4)测试岩样对 N_2 的吸附量,从而反映微观缝隙结构的发育情况。其步骤为:①称取 0.5 g 干燥样品,装入比表面积孔径分析仪的脱气系统中进行脱气处理。温度设定为 40 $^{\circ}\text{C}$,真空度低于 6.67×10^{-2} Pa,直至达到恒压后脱气。②脱气后的样品冷却至室温,然后置入高纯氮气中,进气量为 3 mL/g,设定恒温至 77 K (-195°C),在相对压力 P/P_0 为 0.01 ~ 1 之间测定吸附平衡等温线。③在恒温 77 K 下先缓慢升高气体分压,后逐步降低气体分压,待吸附和脱附分支明显分离,形成滞后回线,此时对试验系统中数据进行提取并进行分析计算,从而得到岩石比表面积和缝隙体积。



图 4 比表面积孔径分析仪

Fig.4 Automatic specific surface area and micropore analyzer

2 主控因子确定

表征岩石微观缝隙结构的因素包括数量、张开度、延展长度、发育深度、弯曲度、交叉复合程度等^[20-21],影响地下水运动的因素包括缝隙粗糙度、岩石矿物组分等^[22-23]。鉴于准确获取所有因素参数的难度高和工作量大,目前常用等效参数来刻画岩石微观缝隙结构特征。由于单一仪器设备所获参数难以全面反映微观缝隙结构,笔者基于 FESEM 图像采集^[24]、 N_2 吸附试验所获得的数据,以及分形理论界定的参数,遴选关键指标因子来判识岩石微观结构复杂程度。

2.1 基于 FESEM 图像的指标因子

2.1.1 面积缝隙率

岩石面积缝隙率的大小与微观缝隙发育程度有关。缝隙率越高,缝隙发育越显著^[25],岩层的复杂程度越突出。二维图像的平面缝隙率为缝隙像素所占区域与完整图像区域的比值,即:

$$\Phi = A_p/A \quad (1)$$

式中: A 为完整图像面积, μm^2 ; A_p 为缝隙面积, μm^2 ; Φ 为面积缝隙率, %。

复合岩层的面积缝隙率按下式计算

$$\bar{\Phi} = \sum_{i=1}^n T_i \Phi_i \quad (2)$$

式中: $\bar{\Phi}$ 为岩层复合面积缝隙率, %; Φ_i 为岩石面积缝隙率, %; T_i 为岩石厚度占比。

以 1-1-2 样本为例,利用 ImageJ 软件所提取出的参数“Area”,利用式(1)可求得样本在不同放大倍数下的面积缝隙率,进而可给出其均值。样本 1-1-2 的面积缝隙率见表 1,同理可得到其他岩样的面积缝隙率。

以 1 号钻孔 $L_1 \sim L_2$ 灰岩段“1-1”为例,其样本 1-1-1 和 1-1-2 厚度比分别为 70.80%、29.20%,利用式(2)计算的“1-1”层位复合面积缝隙率为 2.7701%。同理,可得 7 个钻孔不同层段的复合面积缝隙率。

核密度分析法是通过空间点数据的分布进行连续化模拟,以空间格网中核密度值来反映空间中点的分布。通过 ArcGIS 软件进行空间平滑处理生成连续分布密度栅格图,并依据核密度计算公式为各栅格赋值,点数据中心赋予最高值,指定圆形邻域向外栅格赋值逐渐衰减,并在指定圆形邻域内减少至零,核密度图能有效直观的分析点数据的密集分散区域,其生成二维核密度如图 5 所示。

表 1 1-1-2 样本缝隙
Table 1 1-1-2 sample gap

样品号	SEM图像放大倍数下缝隙率/%				总均值
	×500	×1 000	×1 500	×2 000	
1-1-2	1.88	1.961 5	1.877	2.466	2.046 1

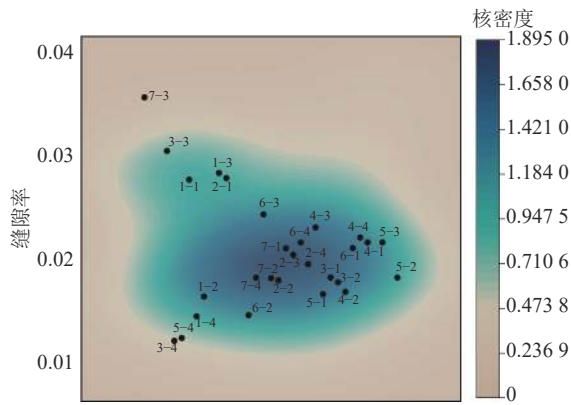


图 5 复合岩层面积缝隙率核密度

Fig.5 Core density of area crack rate of composite rock stratum

由图 5 可知,不同钻孔不同层段的面积缝隙率具有差异性,表现了含煤地层不同岩性岩层微观缝隙发育的不均一性。其中砂岩段面积缝隙率全部位于 1.47%~2.44%,说明了砂岩段相较于其他岩性,其面积缝隙率一致性更高。

2.1.2 等效缝隙直径

扫描电镜下岩石缝隙是不规则的,精准界定它们的尺寸是困难的,因此常用等效缝隙直径来描述缝隙特征。等效缝隙直径越大,岩层内部的孔隙间距越明显,越利于地下水流动。对于二维平面内扫描电镜下的图像,岩石等效缝隙直径^[26]定义如下:

$$d_E = \sqrt{\frac{4A_p}{\pi}} \quad (3)$$

式中: d_E 为岩石等效缝隙直径, μm ; A_p 为缝隙平均面积, μm^2 。

复合岩层由多种岩性的岩石构成,其等效缝隙直径可按下式计算:

$$\bar{d}_E = \sum_{i=1}^n T_i d_{Ei} \quad (4)$$

式中: \bar{d}_E 为复合岩层等效缝隙直径; d_{Ei} 为岩石等效缝隙直径, μm ; T_i 为岩石厚度占比。

以 1-1-2 岩样为例,利用 ImageJ 软件所提取出的参数“Average Size”,其求样本总均值。根据式(3)得出 1-1-2 的等效缝隙直径见表 2,同理可得到其他岩样的等效缝隙直径。

表 2 1-1-2 样本等效缝隙直径
Table 2 1-1-2 sample equivalent fissure diameter

样品号	SEM图像放大倍数下等效缝隙直径/ μm				总均值
	×500	×1 000	×1 500	×2 000	
1-1-2	0.213 5	0.069	0.138	0.170 5	0.147 8

以 1 号钻孔 $L_1 \sim L_2$ 灰岩段“1-1”为例,其样本 1-1-1 和 1-1-2 厚度比分别为 70.80%、29.20%,利用式(4)计算“1-1”层位复合等效缝隙直径为 0.080 9 μm 。同理,可得 7 个钻孔不同层段的复合等效缝隙直径,其二维核密度如图 6 所示。

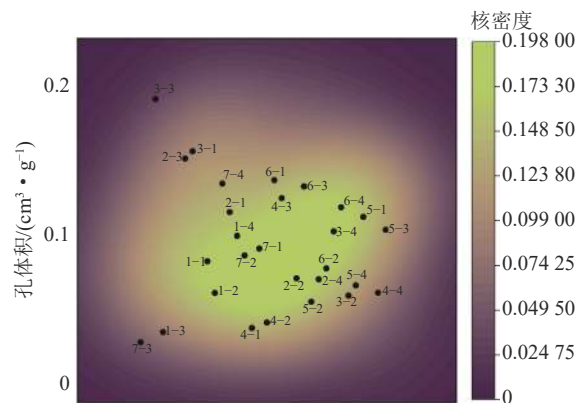


图 6 复合岩层等效缝隙直径核密度

Fig.6 Equivalent crevice diameter nuclear density of composite strata

由图 6 可知,不同钻孔不同层段的复合等效缝隙直径具有差异性,表现了含煤地层不同岩性岩层微观缝隙发育的不均一性。其中 $L_5 \sim L_7$ 灰岩段复合等效缝隙直径均位于 0.072 5~0.095 μm 区间内,说明了 $L_5 \sim L_7$ 灰岩段相较于其他岩性,其复合等效缝隙直径一致性更高。

2.2 基于 N_2 吸附试验的指标因子

以上基于 FESEM 图像提取的指标——面积缝隙率、等效缝隙直径,反映的仅是岩样表面的缝隙特征,而其内部结构特征可用 N_2 吸附试验提取的指标——比表面积和缝隙体积来刻画。

2.2.1 比表面积

比表面积为单位质量岩样的总表面积,比表面积越大,说明测试岩样内部颗粒形状不规则性突出,孔隙不致密性越强,内部缝隙越多^[27]。根据 N_2 吸附试验测试的 57 块岩样比表面积,进一步可得 7 个钻孔各层位的复合比表面积,其二维核密度如图 7 所示。

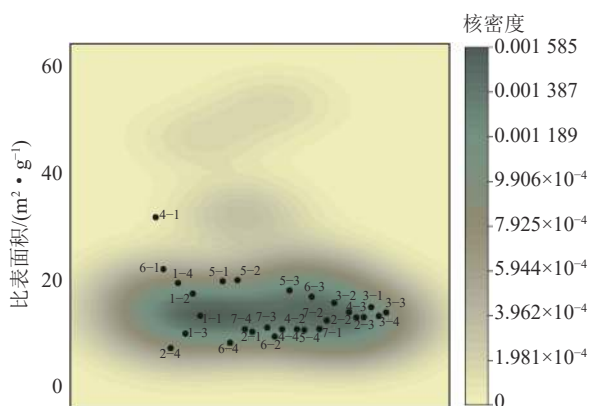


图 7 复合岩层比表面积核密度

Fig.7 Nuclear density of specific surface area of composite strata

由图 7 可知,不同钻孔不同层段的复合比表面积具有差异性,表现了含煤地层不同岩性岩层缝隙数量的不均一性。其中 $L_5 \sim L_7$ 灰岩段复合比表面积均位于 $10.1173 \sim 18.2011 \text{ m}^2/\text{g}$ 区间内,说明了 $L_5 \sim L_7$ 灰岩段相较于其他岩性,其复合比表面积一致性更高。

2.2.2 缝隙体积

缝隙体积分维是描述岩石缝隙结构特性的一个重要参数,反映了岩样缝隙内在多孔介质形状的不规则性。缝隙体积为单位质量岩样的缝隙体积,其值越大,说明测试岩样内部缝隙空间越大^[28]。根据 N_2 吸附试验测试的 57 块岩样缝隙体积,进一步可得 7 个钻孔各层位的复合缝隙体积,其二维核密度见图 8。

由图 8 可知,不同钻孔不同层段的复合缝隙体积具有差异性,表现了含煤地层不同岩性岩层缝隙体积的不均一性。其中砂岩段复合缝隙体积全部位于 $1.47\% \sim 2.44\%$ 区间内,说明了砂岩段相较于其他岩性,其复合缝隙体积一致性更高。

2.3 基于分形理论的指标因子

受仪器、岩样及环境等多种因素的影响,现有测试仪器难以达及整个岩样内部,亦即所测试参数一般都是在岩样表面或浅表层进行的。一般来说,岩石缝隙走向和倾向具有连续性和延展性,亦即缝隙

发育表现较强的自相似特点。分形理论的分维值可以较好地表征参数的自相似性,分维值越大,说明参数在岩样表面和内部的一致性越强。总之,分形理论分维值可以有效刻画参数“由表及里”的关联性。

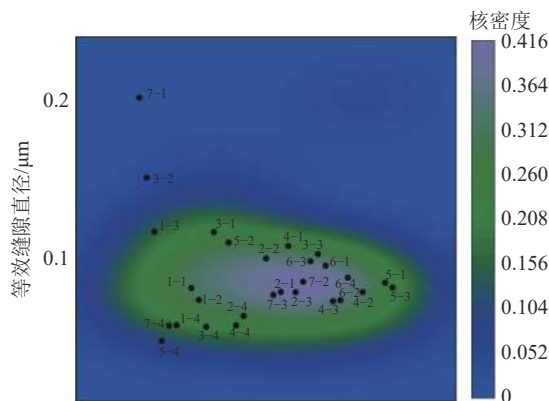


图 8 复合岩层缝隙体积核密度

Fig.8 Volume nuclear density of crevice in composite strata

2.3.1 缝隙面积分维值

针对制取的岩样,采用“小岛法”分形模型^[29],绘制 FESEM 图像上岩石缝隙周长(Y)和缝隙面积(X)的拟合曲线,其幂函数方程为:

$$Y = (1/n)X^{D/2} \quad (5)$$

式中: D 为岩石面积分形维数; n 为分形系数; Y 为缝隙周长, μm ; X 为缝隙面积, μm^2 。

复合岩层的面积分维值按下式计算:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n T_i \times D_i \quad (6)$$

式中: \bar{D} 为复合岩层缝隙面积分维值; D_i 为岩石缝隙面积分维值; T_i 为岩石厚度占比。

以样本 7-2-2 为例,倍镜 $\times 500$ 下岩石缝隙周长和缝隙面积关系如图 9 所示,拟合的幂函数方程为 $Y = 1.2546X^{0.7323}$ 。显然,缝隙面积分维值 $D = 1.4645$ 、分形系数 $n = 0.8$ 。不同倍数下 7-2-2 样本的缝隙面积分维值见表 3,同理可得到其他岩样的缝隙分维值。

以 7 号钻孔砂岩段“7-2”为例,其样本 7-2-1 和 7-2-2 厚度比分别为 77.31%、22.69%,利用式(6)计算“7-2”层位复合面积分维值为 1.2655。同理,可得 7 个钻孔不同层位的缝隙面积分维值,其分布情况如图 10 所示。显然,不同钻孔不同层段的复合缝隙面积分维值具有差异性。

2.3.2 缝隙体积分维值

根据 Hausdorff 理论^[30],建立煤层岩石中缝隙半径 r 与体积 S 之间的分形模型^[31]:

$$\ln S = (3 - D) \ln r + K \quad (7)$$

其中, $K = (D - 3) \ln r_{\max}$ 为常量。

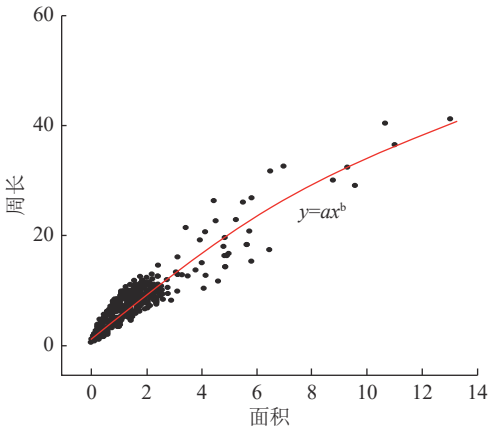


图 9 面积-周长法不同拟合方程及方差
Fig.9 Different fitting equations and variance of area perimeter method

表 3 7-2-2 样本缝隙面积分维值
Table 3 7-2-2 sample of fractal dimension of sample gap area

样品号	SEM图像放大倍数下分形维数				总均值
	×500	×1 000	×1 500	×2 000	
7-2-2	1.464 5	1.456	1.412 5	1.343 1	1.419 0

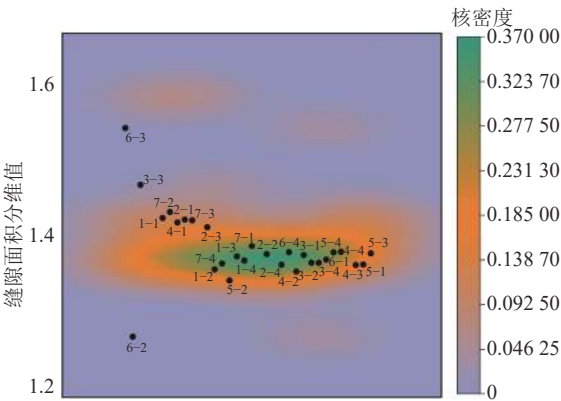


图 10 复合岩层缝隙面积分维值核密度
Fig.10 Fractal dimension value nuclear density of crevice area in composite strata

以样本“5-1-1”为例,其 $\ln S - \ln r$ 散点图如图 11 所示。显然,其缝隙体积分维数 $D=1.429\ 2$ 、 $r_{\max}=12.767\ 8$ 。线性相关系数平均在 0.85 以上,相关性较好。说明了 Hausdorff 理论分形模型求取的缝隙体积分维值可靠性较高。

同理,可得到 57 块样本的缝隙体积分维值,进一步可得 7 个钻孔各层位的复合缝隙体积分维值,其分布情况如图 12 所示。

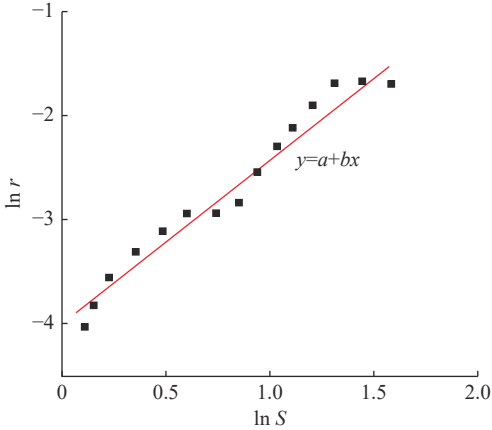


图 11 岩样 5-1-1 $\ln S - \ln r$ 散点图
Fig.11 $\ln S - \ln r$ scatter diagram of 5-1-1 rock sample

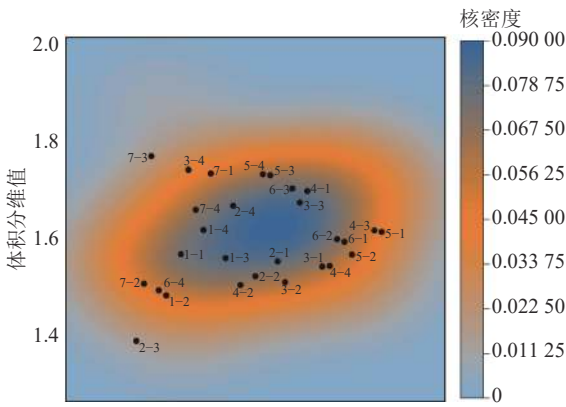


图 12 复合岩层体积分维值核密度
Fig.12 Volume fractal dimension value nuclear density of composite strata

3 复杂程度判别

参考文献 [32],利用熵权理论及数据本身的客观属性计算客观权重,基于 TOPSIS 理论定量评价复合岩层缝隙微观结构复杂程度。

3.1 权重确定

针对 7 个钻孔 4 个岩段的 6 个指标因子值(表 6),可计算其熵值 $E_j^{[33]}$:

$$E_j = (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6) = (0.910\ 4, 0.973\ 6, 0.950\ 9, 0.935\ 5, 0.982\ 5)$$

E_j 处理后进一步计算^[33]得到指标的差异系数 G_j :

$$G_j = (G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6) = (0.089\ 6, 0.026\ 4, 0.049\ 1, 0.044\ 1, 0.064\ 5, 0.017\ 5)$$

然后可求得 6 个指标因子的权重 W_j :

$$W_j = (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6) = (0.308\ 0, 0.090\ 6, 0.168\ 6, 0.151\ 5, 0.221\ 4, 0.060\ 0)$$

3.2 复杂程度定义

首先基于客观权重可得到的加权标准化矩阵 Y :

$$Y = (y_{ij})_{m \times n} \tag{8}$$

其中, $y_{ij} = r_{ij} \times w_j$, w_j 为 6 个因子的权重; n 为评价对象个数, m 为每个对象的指标个数。

进一步处理得到理想解和负理想解^[34]:

$$Z_j^- = (Z_1^-, Z_2^-, Z_3^-, Z_4^-, Z_5^-, Z_6^-) = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

依据正理想解和负理想解可计算欧氏距离 D_i^+ 、 D_i^- :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - z_j^+)^2} (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - z_j^-)^2} (i = 1, 2, \dots, m) \tag{9}$$

其中, D_i^+ 为最优距离; D_i^- 为最劣距离。

最后可求得^[32] 复合岩层微观缝隙结构的复杂程度贴近值 C_i :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \tag{10}$$

式中, $0 \leq C_i \leq 1$, $C_i \rightarrow 1$ 表明评价对象复杂程度越高。

利用式(10)求得的 7 个钻孔 4 个岩段复合岩层微观缝隙结构的复杂程度贴近值, 计算结果见表 4。

7 个钻孔 4 个岩段微观缝隙结构复杂程度等级定义见表 4 和图 13 所示。复杂程度等级越高, 其岩样内部缝隙越发育。

显然, 7 个钻孔 4 个岩段中, 复合岩层微观缝隙结构的极简单、简单、中等、复杂、极复杂等级占比分别为 25.00%、21.43%、39.29%、7.14%、7.14%。中等程度以下占比 85.72%, 表明研究地段已₁₆₋₁₇ 煤层与寒武系灰岩之间复合岩层的微观缝隙结构不太复杂, 但均质性不一。

3.3 讨 论

为便于量化对比, 将极简单、简单、中等、复杂、极复杂分别赋值为 1、2、3、4、5, 具体见表 5, 则

表 4 复合岩层缝隙结构复杂程度

Table 4 Complexity of crevice structure in composite strata

编号(钻孔-层位)	复杂程度	
	贴近值	定义
1-1	0.221 8	中等
1-2	0.148 1	极简单
1-3	0.243 2	中等
1-4	0.150 9	极简单
2-1	0.231 1	中等
2-2	0.211 0	中等
2-3	0.222 2	中等
2-4	0.129 8	极简单
3-1	0.189 2	简单
3-2	0.181 8	简单
3-3	0.275 6	复杂
3-4	0.100 1	极简单
4-1	0.241 2	中等
4-2	0.138 1	极简单
4-3	0.213 1	中等
4-4	0.1350	极简单
5-1	0.3710	极复杂
5-2	0.196 5	简单
5-3	0.271 2	复杂
5-4	0.212 2	中等
6-1	0.247 4	中等
6-2	0.141 1	极简单
6-3	0.256 5	中等
6-4	0.202 4	简单
7-1	0.378 5	极复杂
7-2	0.181 3	简单
7-3	0.222 6	中等
7-4	0.177 8	简单

不同钻孔不同层位微观缝隙结构复杂程度的量化值见表 6、表 7。

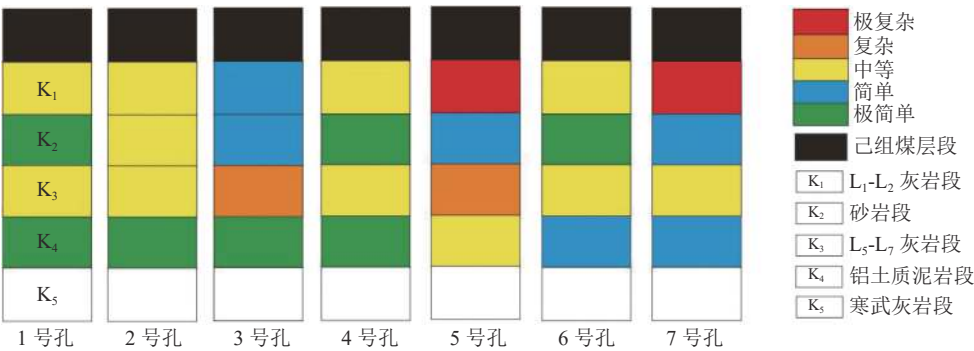


图 13 钻孔复合岩层微观缝隙结构复杂程度对比

Fig.13 Comparison of complexity of micro-fissure structure in borehole composite strata

表 5 钻孔复合岩层复杂程度分级阈值

Table 5 Classification threshold of complex degree of borehole composite strata

阈值	极简单(I)	简单(II)	中等(III)	复杂(IV)	极复杂(V)
定义	I<0.155	0.155≤II<0.205	0.205≤III<0.265	0.265≤IV<0.315	V≥0.315

表 6 复合岩层缝隙结构复杂程度量化值

Table 6 Quantitative value of complex degree of crevice structure in composite strata

钻孔编号	钻孔量化值
1-1	3
1-2	1
1-3	3
1-4	1
均值	2
2-1	3
2-2	3
2-3	3
2-4	1
均值	2.5
3-1	2
3-2	2
3-3	4
3-4	1
均值	2.25
4-1	3
4-2	1
4-3	3
4-4	1
均值	2
5-1	5
5-2	2
5-3	4
5-4	3
均值	3.5
6-1	3
6-2	1
6-3	3
6-4	2
均值	2.25
7-1	5
7-2	2
7-3	3
7-4	2
均值	3

表 7 层位量化均值

Table 7 Quantitative value of horizon

钻孔编号							层位量化均值
1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	3.43(1层)
1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2	1.71(2层)
1-3	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3	3.29(3层)
1-4	2-4	3-4	4-4	5-4	6-4	7-4	1.57(4层)

由表 6、表 7 可以看出,7 个钻孔的复合岩层微观缝隙结构复杂程度量化平均值在 2-3.5 区间范围内,以 5 号钻孔为最高,1 号和 4 号钻孔为最低。由图 1b 可以看出:1 号钻孔和 4 号钻孔周围没有断层经过,取心岩段的完整性较好,其量化平均值也最小,为 2;3 号钻孔和 6 号钻孔分别靠近张沟向斜和白石山背斜,其量化平均值为 2.25;2 号钻孔在任庄正断层面上,其量化平均值为 2.5;7 号钻孔位于白石沟正断层和李口向斜复合部位,其量化平均值为 3;5 号钻孔位置地质构造相对复杂,经过襄邾二号正断层、张庄正断层、西长桥向斜,现场取心的破碎程度也较大,所以量化平均值最大,为 3.5。总之,复合岩层微观缝隙结构复杂程度与岩层破碎程度密切相关。

4 个岩段相比,岩层微观缝隙结构复杂程度量化平均值自大至小的顺序,依次为 L₁~L₂ 灰岩段、L₅~L₇ 灰岩段、砂岩段、铝土质泥岩段,亦即灰岩>砂岩>泥岩。实际上,同等岩性、水动力和地质构造条件下,灰岩层内部缝隙较发育,泥岩层内部缝隙不发育,而砂岩层内部缝隙发育程度弱于灰岩、强于泥岩,因此岩层微观缝隙结构复杂程度较好地反映了岩层缝隙发育程度。另外,L₁~L₂ 位于 L₅~L₇ 灰岩上部,前者承受的上部岩层压力小于后者,同等条件下,L₁~L₂ 灰岩缝隙发育程度强于 L₅~L₇ 灰岩。

总之,利用熵权法-TOPSIS 模型,基于多指标因子的岩层微观缝隙结构复杂程度定量评价,精准刻画了不同岩性岩层缝隙发育程度,为岩层含隔水层性能科学判识奠定了基础。

4 结 论

1)在系统分析 3 个矿井已₁₆₋₁₇ 煤层底板复合岩层微观结构复杂程度多重影响因素的基础上,选择

复合岩层面积缝隙率、等效缝隙直径、缝隙面积分维值、比表面积、缝隙体积分维值为评价的指标因子,为判识煤层底板复合岩层微观缝隙结构复杂程度提供了保证。

2)基于熵权法-TOPSIS模型,定量识别了已_{16~17}煤层底板复合岩层的微观缝隙结构复杂程度,7个钻孔4个岩段中,微观缝隙结构极简单、简单、中等、复杂、极复杂等级占比分别为25.00%、21.43%、39.29%、7.14%、7.14%,研究地段复合岩层的微观缝隙结构相对不复杂。

3)4个岩段相比,岩层微观缝隙结构复杂程度量化均值排序为: $L_1 \sim L_2$ 灰岩段 $>L_5 \sim L_7$ 灰岩段 $>$ 砂岩段 $>$ 铝土质泥岩段,直观地表征了平顶山煤田已组煤底板复合岩层缝隙结构的发育特征,对精准刻画复合岩层的含隔水层性能具有重要地指导意义。

4)熵权理论确定的指标因子权重降低了人为因素的干扰水平,TOPSIS理论实现了多指标因子作用下的复合岩层微观缝隙结构复杂程度定量评价,为精准刻画煤层底板不同岩性岩层缝隙发育程度和含隔水层性能提供了可借鉴的方法。

参考文献(References):

- [1] 陈金平,朱家辰,阴祥诚,等.基于PHREEQC反向模拟-聚类分析方法的矿井突水水源判别[J].煤炭技术,2020,39(11):75-78.
CHEN Jinping, ZHU Jiachen, YIN Xiangcheng, *et al.* Discrimination of mine water inrush source based on PHREEQC reverse simulation-cluster analysis method[J]. Coal Technology, 2020, 39(11): 75-78.
- [2] 朱宗奎,徐智敏,孙亚军.寒武系上段隔水性及在马陵山矿带压开采中的应用[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):226-231.
ZHU Zongkui, XU Zhimin, SUN Yajun. Water isolation of the upper Cambrian and its application in pressure mining of Malingshan Mine[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(2): 226-231.
- [3] 曾一凡,刘晓秀,武强,等.双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J].煤炭学报,2023,48(2):538-550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and Technical Conception of Coal-Water-Thermal Positive Synergistic Co-extraction under the Dual Carbon Background[J]. Journal of China coal society, 2023, 48(2): 538-550.
- [4] TOVEY N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1973, 11(4): 50-57.
- [5] YUDHBIR, RAHIM A. Image analysis applied to geotechnical engineering[C]//Digital Image Processing: Techniques & Applications in Civil Engineering, 1993.
- [6] HUI T, LEI P, XIAO X, *et al.* A preliminary study on the pore characterization of lower silurian black shales in the Chuandong Thrust Fold Belt, southwestern China using low pressure N_2 adsorption and FE-SEM methods[J]. Marine & Petroleum Geology, 2013, 48: 8-19.
- [7] KROHN C, THOMPSON A. Fractal sandstone pores: Automated measurements using scanning-electron-microscope images[J]. Physical Review B, 1986, 33(9): 6366-6374.
- [8] 杨军,王潇婷,龚明辉,等.沥青原子力显微镜微观图像的特征分析[J].石油学报(石油加工),2015,31(5):1110-1115.
YANG Jun, WANG Xiaoting, GONG Minghui, *et al.* Characteristic analysis of microscopic images of asphalt atomic force microscope[J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2015, 31(5): 1110-1115.
- [9] 郑司建,王小垚,周三栋.准噶尔盆地南缘低煤阶煤储层孔隙分形特征[J].煤炭技术,2017,36(7):133-135.
ZHENG Sijian, WANG Xiaoyao, ZHOU Sandong. Pore fractal characteristics of low-rank coal reservoirs in the southern margin of Junggar Basin[J]. Coal Technology, 2017, 36(7): 133-135.
- [10] SHEN P, LI K. A New Method for Determining the Fractal Dimensions of Pore Structures and Its Application[J]. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 1994, 1(1): 6-9.
- [11] SHEN P, LI K, JIA F. Quantitative description for the heterogeneity of pore structure by using mercury capillary pressure curves[J]. International Meeting on Petroleum Engineering, 1995, 11(1): 14-17.
- [12] MOULU J C, VIZIKA O, KALAYDJIAN F, *et al.* A new model for three-phase relative permeabilities based on a fractal representation of the porous medium[J]. Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1997, 10(1): 5-8.
- [13] LI K, Horne R N. Fractal characterization of the geysers rock[J]. Transactions Geothermal Resources Council, 2003, 1(01): 3-4.
- [14] 李静,刘晨,刘惠民,等.基于数字岩心的页岩储层岩石微观损伤机制研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(6):1103-1113.
LI Jing, LIU Chen, LIU Huimin, *et al.* Study on meso-damage mechanism of shale reservoir based on digital core[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1103-1113.
- [15] 侯健,邱茂鑫,陆努,等.采用CT技术研究岩心剩余油微观赋存状态[J].石油学报,2014,35(2):319-325.
HOU Jian, QIU Maoxin, LU Nu, *et al.* The microscopic occurrence state of core remaining oil is studied by CT technique[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(2): 319-325.
- [16] 田志.多尺度孔隙岩石的核磁共振扩散耦合现象及其探测方法[J].地球物理学报,2021,64(3):1119-1130.
TIAN Zhi. Nuclear magnetic resonance diffusion coupling phenomenon of multi-scale porous rocks and its detection method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 1119-1130.
- [17] 杨赫,程卫民,刘震,等.注水媒体有效渗流通道结构分形特征核磁共振试验研究[J].岩土力学,2020,41(4):1279-1286.
YANG he, CHENG Weimin, LIU Zhen, *et al.* NMR Experiment-

- al study on fractal characteristics of effective seepage channel structure of water injection Coal[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1279–1286.
- [18] 白海波, 缪协兴. 晚古生代煤田水文地质特征与防治水理论及技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(1): 1–10.
BAI Haibo, MIAO Xiexing. Hydrogeological characteristics and water prevention theory and technology of late Paleozoic coalfield[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(1): 1–10.
- [19] 姜涛, 徐维, 苏壮壮. 利用小岛法对砂岩SEM图像进行渗透率计算分析[J]. *华北科技学院学报*, 2018, 15(5): 54–59.
JIANG Tao, XU Wei, SU Zhuangzhuang. The permeability of sandstone SEM image is calculated and analyzed by island method[J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2018, 15(5): 54–59.
- [20] 付世豪, 侯冰, 夏阳, 等. 多岩性组合层状储层一体化压裂裂缝扩展试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(S1): 377–384.
FU Shihao, HOU Bing, XIA Yang, *et al.* Experimental study on integrated fracturing fracture propagation of multi-lithologic layered reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(S1): 377–384.
- [21] 杨涛, 张杰, 林海飞, 等. 隔水土层孔隙水压畸变与顶板突水灾变的时空响应特征模拟研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(2): 317–325.
YANG Tao, ZHANG Jie, LIN Haifei, *et al.* Simulation study on spatio-temporal response characteristics of pore water pressure distortion and roof water inrush in waterproof soil layer[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2021, 38(2): 317–325.
- [22] 吕帅锋, 王生维, 刘洪太, 等. 煤储层天然裂隙系统对水力压裂裂缝扩展形态的影响分析[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(7): 2590–2601.
LYU Shuaifeng, WANG Shengwei, LIU Hongtai, *et al.* Analysis of the influence of natural fracture system of coal reservoir on fracture propagation pattern of hydraulic fracturing[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2590–2601.
- [23] 申艳军, 王旭, 赵春虎, 等. 榆神府矿区富油煤多尺度孔隙结构特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(3): 33–41.
SHEN Yanjun, WANG Xu, ZHAO Chunhu, *et al.* Multi-scale pore structure characteristics of oil-rich coal in Yushenfu mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(3): 33–41.
- [24] 鲍园, 安超. 基于FE-SEM的微生物降解煤岩孔隙演化特征[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 4105–4112.
BAO Yuan, AN Chao. Pore evolution characteristics of microbial degradation of coal and rock based on FE-SEM[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 4105–4112.
- [25] 陈恋, 袁梅, 许石青, 等. 数字图像技术结合小岛法在煤分形特征中的应用[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(3): 77–83.
CHEN Lian, YUAN Mei, XU Shiqing, *et al.* Application of digital image technology combined with island method in coal fractal characteristics[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(3): 77–83.
- [26] 周枫滨. 约束高强混凝土微观孔结构试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 56–60.
ZHOU Fengbin. Experimental study on microscopic pore structure of confined high-strength concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 56–60.
- [27] 李小彦, 邵玉宝, 朱裕振, 等. 基于低温液氮吸附法的煤岩孔隙分形特征[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(1): 65–70.
LI Xiaoyan, SHAO Yubao, ZHU Yuzhen, *et al.* Fractal characteristics of coal and rock pores based on low temperature liquid nitrogen adsorption[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 65–70.
- [28] 张吉振. 煤系页岩孔隙结构表征及其对页岩气赋存的影响研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019: 116–120.
ZHANG Jizhen. Characterization of pore structure of coal measures shale and its influence on shale gas occurrence[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019: 116–120.
- [29] 王晓琦, 金旭, 李建明, 等. 聚焦离子束扫描电镜在石油地质研究中的综合应用[J]. *电子显微学报*, 2019, 38(3): 303–319.
WANG Xiaoqi, JIN Xu, LI Jianming, *et al.* Comprehensive application of focused ion beam scanning electron microscope in petroleum geological research[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2019, 38(3): 303–319.
- [30] 饶峰, 柯枫. 拓扑Hausdorff维数的一种计算方法及其应用[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(4): 496–502.
RAO Feng, KE Feng. A method for calculating topological Hausdorff dimension and its application[J]. *Journal of Sichuan Normal University(Natural Science)*, 2017, 40(4): 496–502.
- [31] 任君豪, 王心义, 王麒, 等. 基于多方法的煤层底板突水危险性评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 89–97.
REN Junhao, WANG Xinyi, WANG Qi, *et al.* Risk assessment of water inrush from coal seam floor based on multi-method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 89–97.
- [32] 王心义, 赵伟, 刘小满, 等. 基于熵权-模糊可变集理论的煤矿井突水水源识别[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2433–2439.
WANG Xinyi, ZHAO Wei, LIU Xiaoman, *et al.* Identification of water inrush source in coal mine based on entropy weight-fuzzy variable set theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2433–2439.
- [33] 李绍红, 王少阳, 吴礼舟. 基于MCS-TOPSIS耦合模型的岩体质量分类研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1053–1062.
LI Shaohong, WANG Shaoyang, WU Lizhou. Study on rock mass quality classification based on MCS-TOPSIS coupling model[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1053–1062.
- [34] 陈静. 江苏省地市开放型经济发展水平研究: 基于熵权法的TOPSIS综合评价模型[J]. *南京工程学院学报(社会科学版)*, 2019, 19(3): 40–45.
CHEN Jing. Study on the development level of open economy of prefectures and cities in Jiangsu Province- TOPSIS comprehensive evaluation model based on entropy weight method[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Social Science Edition)*, 2019, 19(3): 40–45.