

安全科学与工程



移动扫码阅读

蒋长宝, 付银兰, 王光洪. 水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 62-71.

JIANG Changbao, FU Yinlan, WANG Guangqi. Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 62-71.

水力压裂煤裂隙网络表征与造缝性能评估试验研究

蒋长宝¹, 付银兰¹, 王光洪²

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 兖矿能源集团股份有限公司, 山东 邹城 273500)

摘要:煤裂隙网络的准确表征可以有效评估深部煤层经水力压裂后的压裂效果, 为了定量评估煤层经水力压裂后的复杂程度, 利用自制的真三轴试验系统进行了煤的水力压裂试验, 结合 CT 扫描, 重建了具有拓扑结构的孔裂隙网络, 用分形理论和拓扑学定量表征了断裂网络的复杂程度。探究了在真三轴应力条件下, 中间主应力对裂隙网络复杂程度的影响。结果表明: 压裂后煤样的二维分形维数变化率 K 为 1.03%~7.10%, 三维分形维数的变化率为 3.50%~9.18%, 经过水力压裂后煤样的二维和三维分形维数均显著增大。基于分形理论和拓扑学的方法能有效表征水力压裂的裂缝结构和造缝能力。压裂后煤样的二维拓扑参数为 1.18~1.52, 与压裂前后煤样的二维分形维数变化率呈正相关关系, 二维分形维数变化率的增加速率随着拓扑参数的增大逐渐减小。重构的内部结构和裂缝分布表明, 压裂后的三维分形维数比二维分形维数更具优势, 压裂后煤样的三维拓扑参数为 1.82~1.93, 随着三维分形维数变化率的增加而增大, 三维分形维数变化率的增加速率随着拓扑参数的增大而增大。中间主应力对煤层的造缝能力存在积极影响。水力压裂前后的分形维数和拓扑参数都随着中间主应力的增大而增大, 即随着中间主应力的增大而增大, 产生的裂缝网络更复杂, 连通性更好, 水力压裂的造缝能力更强。

关键词:煤裂隙; 水力压裂; 裂隙发育; 分形理论; 拓扑结构; 裂隙网络

中图分类号: TD231.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)06-0062-10

Experimental study on characterization hydraulic fracturing coal fracture network and evolution of fracture forming performance

JIANG Changbao¹, FU Yinlan¹, WANG Guangqi²

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Yankuang Energy Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China)

Abstract: The accurate characterization of coal fracture network can effectively evaluate the fracturing effect of the deep coal seam after hydraulic fracturing. In order to quantitatively evaluate the complexity of coal seam after hydraulic fracturing, the hydraulic fracturing test of coal was carried out by using the self-made true triaxial test system, combined with CT scan, the pore network and fracture network with topological structure are reconstructed, and the complexity of the fracture network is quantitatively characterized by fractal theory and topology. The effect of the intermediate principal stress on the complexity of the fracture networks under the condition of true triaxial stress is explored. The results showed that the change rate of the two-dimensional fractal dimension (K) are 1.03% ~ 7.10%, and the change rate of three-dimensional fractal dimension are 3.50% ~ 9.18%, the two-dimensional and three-dimensional fractal dimensions of coal samples after hydraulic fracturing increase significantly. The method based on fractal theory and topology can effectively characterize the fracture structure and fracture forming ability of hydraulic fracturing. The two-dimensional topological parameter of coal samples after fracturing are 1.18 ~ 1.52, which is positively correlated with the change rate of two-dimensional fractal dimension. Increasing rate of change rate of two-dimensional fractal dimension decreases with the increase of topological parameters. The reconstructed internal

收稿日期: 2022-05-06 责任编辑: 朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1469

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074044, 51674048)

作者简介: 蒋长宝 (1982—), 男, 江苏兴化人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: jcb@cqu.edu.cn

通讯作者: 王光洪 (1983—), 男, 重庆荣昌人, 工程师。E-mail: 157864392@qq.com

structure and fracture distribution showed that the three-dimensional fractal dimension after fracturing is more advantaged than the two-dimensional fractal dimension. The three-dimensional topological parameters of coal samples after fracturing are 1.82-1.93, increased with the increase of the change rate of three-dimensional fractal dimension. The intermediate principal stress has a positive effect on the seam forming ability of coal seam. The fractal dimension and topological parameters increase with the increase of intermediate principal stress before and after hydraulic fracturing. In other words, Increased with the intermediate principal stress, the resulting fracture network is more complex, the connectivity is better, and the fracture forming ability of hydraulic fracturing is stronger.

Key words: coal fracture; hydraulic fracturing; fracture development; fractal theory; topology structure; fracture network

0 引言

中国煤炭储量丰富,很多煤层赋存条件复杂,具有瓦斯含量高、渗透性低、瓦斯吸附能力强和埋深大的特点^[1]。瓦斯作为煤炭伴生物,既是一种清洁能源,也是煤与瓦斯突出的重要影响要素。煤与瓦斯突出灾害严重威胁矿井工作人员的生命安全,制约着矿井的生产安全^[2]。为了降低煤与瓦斯突出风险性,将煤层中的瓦斯抽采出来加以利用,很多煤层需要提高其渗透性,实现瓦斯高效抽采,业界常通过致裂的方式提高煤层的渗透性。其中超临界二氧化碳致裂^[3]与温度致裂^[4-5]等技术由于施工成本等问题,不适合大规模开采。水力压裂技术由于扰动范围大,相对增渗效果好,商业化应用程度高的特点^[6],被广泛用于煤层的增透。

煤层经水力压裂后扩大或产生新的气体流通通道,可以极大改善煤层的渗透性。一些监测手段如微震监测和声发射监测等通常由于成本较高,受外界施工等噪音的影响较大^[7],很难有效的表征水力压裂技术的压裂效果。为了表征压裂效果,国内外学者多从理论着手,通过对比实际压裂情况,利用压裂后的裂隙参数及裂隙网络的复杂程度来表征水力压裂技术的增产效果^[8-10],常用的表征方法主要有裂隙密度^[11]、拓扑^[12]、基于波速的各向异性参数^[13]和分形维数^[14]等,其中分形模型常用来评估水力压裂的造缝能力。早在1995年,就有学者表明分形维数是定量表征煤块裂隙分布与贯通的重要参数^[15],之后,学者们陆续将分形维数应用于岩石领域^[16-17],在图像处理上,李廷芥^[18-19]和LIU等^[20]用扫描电镜图像分析确定了表征岩石孔隙分形特点的分形维数。随着技术的进一步发展,人们为了直观观察水力裂缝的扩展过程与分布位置,将快速发展的计算机科学融入理论,合理利用计算机软件进行参数设计,研究可视化条件下水力裂缝的延伸及位置分布,如JIANG^[21]和HE等^[22]基于真三轴应力条件下的水力压裂试验,通过CT扫描三维重建技术,重建岩芯内部裂隙分布的CT扫描图像,直观得出水力裂缝的分布位置,研究了水力压裂的裂缝的几何形状和传播规律。虽然多数学者^[21-22]将裂缝的分布进行三维重构,但是只是定性的得到裂缝网络的分布位置,不能定量的表达水力压裂技术的造缝性能,也不能明确水力压裂技术的增透效果。为了直观得出水力压裂技术的压裂效果和裂缝分布状态,有学者将模型重构和分形维数结合起来,如LIU^[23-24]和谢和平团队等^[25]将分形理论与计算机断层图像相结合,描述了介质中裂隙的生长和分布规律。

然而,分形维数只能定量表述相同裂缝密度条件下的裂缝分布特征,不能描述裂隙网络的连通性,拓扑学主要是研究几何结构连续性和连通性的一个数学分支。通过拓扑学对水力裂缝网络的描述,可以极大地弥补分形理论不能表征裂缝连通性的不足。CT扫描的优势在于揭示了岩石孔隙的内在拓扑结构,如孔隙分布,孔隙的连通性等^[26-27],孔隙固有的拓扑网络结构将极大地影响流体在岩石中的流动行为^[28],由于拓扑不能表征裂缝的分布位置和数量,仅使用拓扑或分形维数来描述水力裂缝网络的造缝能力和水力压裂的增透效果是不准确的^[22]。因此,同时考虑分形维数和拓扑结构来表征断裂网络的复杂结构,借用三维重构直观表征水力裂缝的空间展布变得很有必要。

基于拓扑学和分形理论定量的评估了煤水力压裂的造缝能力及复杂裂缝网络的三维可视化分形特征。为了研究中间主应力和水平应力比对煤层裂缝网络结构的影响,笔者进行了真三轴水力压裂试验,并对压裂前后的试件进行了CT扫描,对比分析水力裂缝的扩展形态,结合Avizo三维重构软件,基于最大球算法,重构了具有拓扑结构的孔裂隙网络^[29],重点讨论水平应力比,中间主应力对裂缝结构的影响。以为水力压裂增透效果评估提供理论基础的参考。

基于拓扑学和分形理论定量的评估了煤水力压裂的造缝能力及复杂裂缝网络的三维可视化分形特征。为了研究中间主应力和水平应力比对煤层裂缝网络结构的影响,笔者进行了真三轴水力压裂试验,并对压裂前后的试件进行了CT扫描,对比分析水力裂缝的扩展形态,结合Avizo三维重构软件,基于最大球算法,重构了具有拓扑结构的孔裂隙网络^[29],重点讨论水平应力比,中间主应力对裂缝结构的影响。以为水力压裂增透效果评估提供理论基础的参考。

1 试验方案及结果分析

1.1 试件制备

试验所用煤样取自贵州省毕节市某煤矿。煤样为无烟煤,煤样的物理力学性质见表1。为了达到试

验条件,对取自现场的煤块进行标准化加工。通过切割、打磨和岩心钻孔,将煤块加工成尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的标准立方体试件,在每个样品中心钻取深度为50 mm,直径为10 mm的模拟井筒,采用长度为65 mm,外径为10 mm,内径为9.8 mm的高强度钢管模拟裸眼井套管,利用橡胶圈将套管与试验压头密封,试验所用最终样品如图1所示。

表1 试样的物理力学性质

Table 1 Physical properties of samples

孔隙率/ %	天然密度/ (g·m ⁻³)	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	单轴抗压强度/ MPa
6.021	1.756	1.743	5.49	10.43

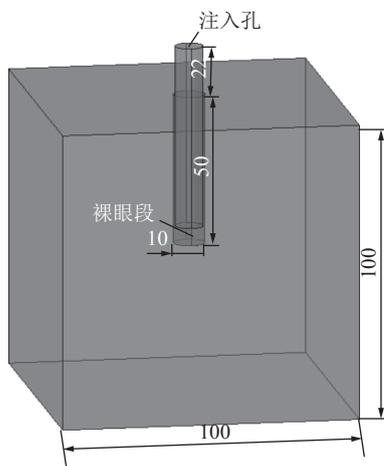


图1 井筒密封示意

Fig.1 Schematic of wellbore sealing

1.2 试验设备

试验在重庆大学自主研发的多功能真三轴流固耦合试验系统(TTG)^[30]进行,试验装置如图2所示。多功能真三轴流固耦合试验系统主要由框架式机架、真三轴压力室、加载系统、内密封渗流系统、控制和数据测量、采集系统及声发射监测系统等组成。此设备能在真三轴应力条件下完成水力压裂、气液的自由控制与监测以及声发射监测等试验。

1.3 试验方案

试验设计主要考虑真三向应力对煤压裂后裂缝网络的结构和形态的影响。井筒方向设计为平行于层理面,为了便于试验进行,简化了地应力条件,同时,为了模拟水平井压裂,所有试件井筒方向修正为平行层理方向,修改后的地应力设计如图3所示。中国深部煤层开采已经达到800~1 000 m^[31],我国学者根据开采深度将800~1 200 m定义为深矿井,

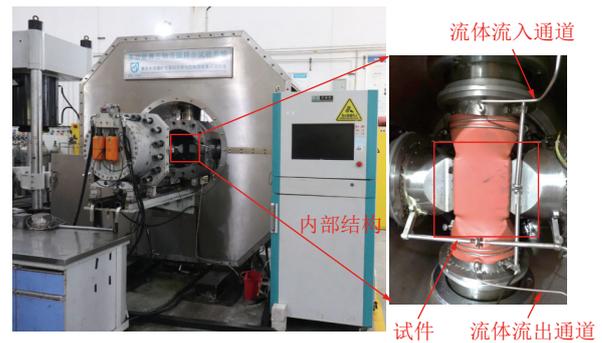


图2 TTG 实验设备^[30]

Fig.2 TTG apparatus^[30]

1 200~1 600 m为特深矿井,假设垂直地应力梯度约为25 MPa/km,则本次试验应力范围为20~40 MPa,具体试验参数见表2。此外,考虑到实验仪器的构造和实验的便利性,定义Y方向模拟垂向应力(最大主应力)记为方向应力 σ_n ,X方向和Z方向施加中间主应力和最小主应力,分别记为切向应力 σ_{t1} 和 σ_{t2} 。压裂液采用清水。

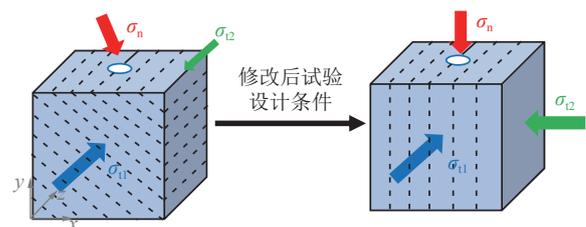


图3 修改后水力压裂试验设计

Fig.3 Modification of experimental design

表2 真三轴水力压裂试验参数

Table 2 True triaxial hydraulic fracturing test parameters

试件 编号	($\sigma_{t1}/\sigma_n/\sigma_{t2}$)/ MPa	垂向应力 差异系数	水平应力 差异系数	水平 应力比	注入速度/ (mL·min ⁻¹)
C1	25/40/20	1	0.25	1.25	
C2	30/40/20	1	0.50	1.50	60
C3	35/40/20	1	0.75	1.75	

注:垂向地应力差异系数 $k_v = (\sigma_n - \sigma_{t2})/\sigma_{t2}$;水平应力差异系数 $k_H = (\sigma_{t1} - \sigma_{t2})/\sigma_{t2}$ 。

按照标准的实验步骤装好试件。在试验测试期间,为了避免三轴应力的不平衡加载,以力控制2 kN/s的速度同步施加三向压力,将三轴应力加载至20 MPa,之后以2 kN/s的速度分别将三向应力施加到设计值,保持三向应力的稳定;然后以位移控制水压大小,逐渐施加水压至煤岩试件压裂后停止试验。注入速度取值时考虑煤样的大小以及煤岩天然裂隙造成压裂液的流失,设置为60 mL/min。

2 模型重构与造缝性能评估

2.1 三维模型重构

为了准确获取煤块内部水力裂缝的空间分布,判断天然裂缝结构对水力裂缝连通能力的影响,通过 CT 对试验前后的试件进行扫描,利用 Mimics 软件,对试件内部的裂缝进行三维可视化表征,断层图像中的裂缝、煤基质和矿物成分可以用不同的灰度值来表示^[32]。首先,对实际煤样的原始 CT 图像进行图像处理,以样本 C2 为例,图 4 展示了压裂前煤样 CT 扫描切片的 3 个视图。由图 4 可以看出,煤块内

部观察到少量微裂隙,样品较为完整,钻孔对煤块的影响可以忽略不记。图 5 展示了 C2 煤样压裂后的代表性 CT 扫描图,从切片图中可以看出,由于井筒底部水压形成憋压,水力裂缝从下井筒底部开始起裂,随着压裂液的注入,裂缝沿着两边开始扩展延伸,发生分叉、转向等现象,直至试件发生破坏。图 4 和图 5 中的灰色部分为煤基质,白色部分由高密度矿物质组成。图 6 展示了 C2 煤样压裂前后的照片,从压裂前和压裂后的照片可以明显看出,水力压裂后产生了明显的水力裂缝。

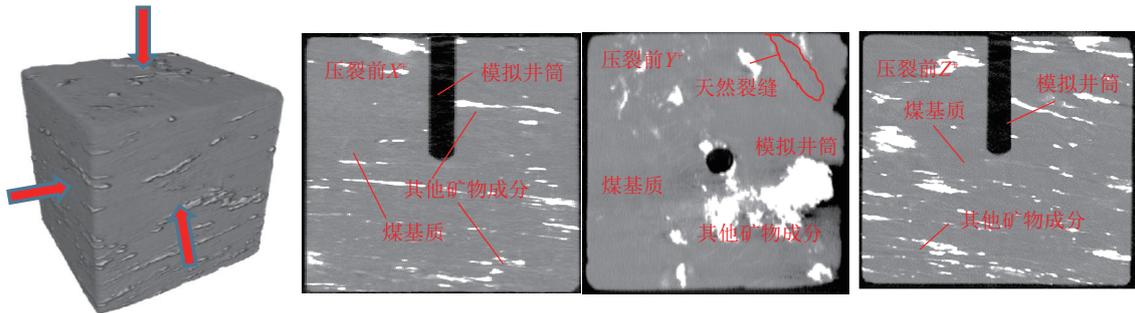


图 4 C2 煤样压裂前的 CT 扫描

Fig.4 Scanning slice image before fracture of C2 specimen

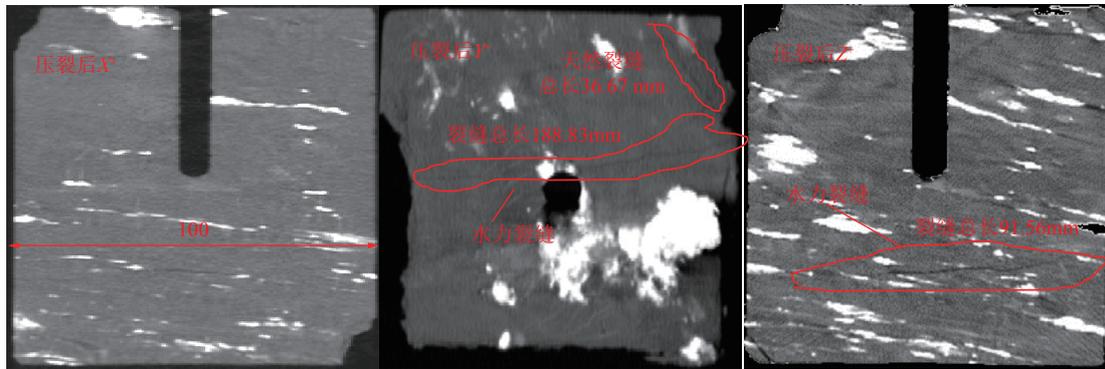


图 5 C2 煤样压裂后 CT 扫描

Fig.5 Scanning slice image after fracture of C2 specimen

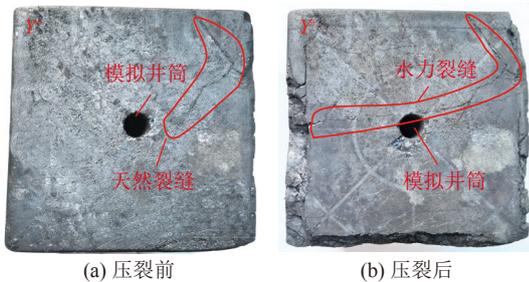


图 6 C2 煤样压裂前后裂缝变化

Fig.6 Crack changes of C2 sample before and after fracturing

图 7 展示了 C1、C2 和 C3 煤样压裂前后的三维重构模型。在重构的模型中,天然裂缝用深蓝色表示,水力裂缝用红色表示,井筒用白色表示。三维重

建的裂缝与样品表面的裂缝比较吻合,样品表面无法观察到的裂缝可以通过模型重构的方式直观反映出来。从图 7 可以看出,在压裂前,试件 C1 和 C3 不含明显的天然裂缝,C2 煤样中含有 1 条天然裂缝。压裂后,3 个煤样试件中的三维裂缝均贯穿了试件。其中,C1 试件的裂缝从井筒壁开始扩展,最终形成弧形裂缝;C2 试件的主裂缝横穿试件,向天然裂缝方向扩展,形成横向贯穿裂缝;C3 试件由多条裂缝组成,形成了复杂的网状结构。表 3 根据图 7 列出了裂缝的相关参数,由表 3 可知,压裂后裂缝的数量明显增多,说明煤样水力压裂后,产生了新的裂缝,改善了煤层的渗透性。

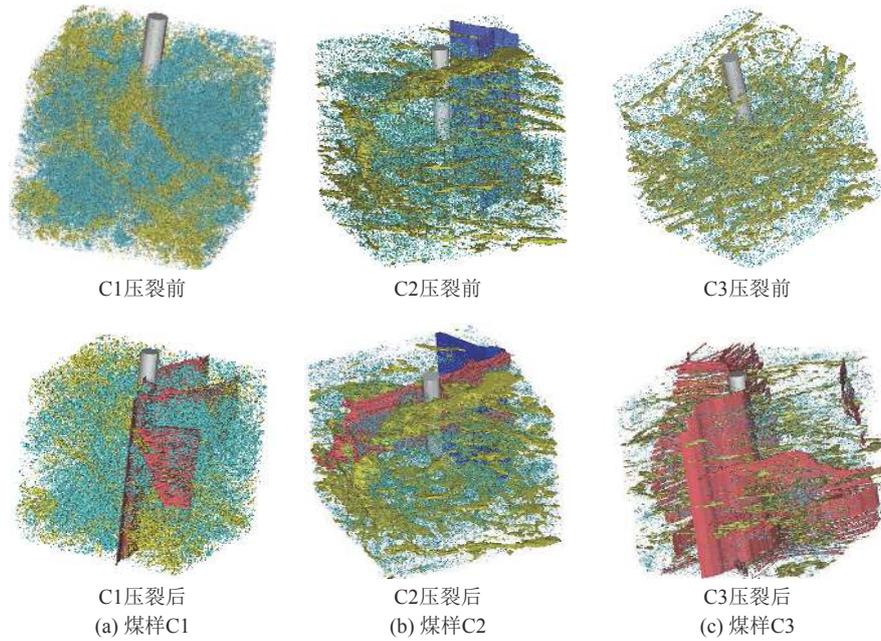


图7 煤样 C1、C2 和 C3 压裂前后的三维重构模型

Fig.7 3D reconstruction model of C1、C2 and C3 specimen before and after hydraulic fracturing

表3 煤样裂缝的相关参数

Table 3 Relevant parameters of coal cracks

试件编号	压裂前裂缝数量	压裂后裂缝数量	压裂后裂缝形态
C1	0	7	主裂缝为弧形裂缝
C2	1	7	主裂缝为横向贯穿裂缝
C3	0	8	网状裂缝网络

2.2 造缝性能评估

2.2.1 二维分形维数计算

煤的孔隙结构具有良好的分形特征,压裂后的煤块的裂缝网络同样具有较好的分形特征。分形维数的计算方法有很多,如相似维数,容量维数等,盒维数由于计算简单且适用于表征裂缝的空间分布常

被用于计算岩石粗糙表面的分形维数^[33-37],该方法用边长为 a 的格子去覆盖盒子表面,计算含有裂隙的盒子数 $N(a)$,通过盒维数法获得的粗糙断裂表面的分形维数,计算如下^[34]:

$$d = -\lim_{a \rightarrow 0} \frac{\lg N(a)}{\lg a} \quad (1)$$

图8显示了水力压裂前和压裂后煤样的宏观裂隙图像。考虑到宏观图片裂缝相对清晰,且通过宏观图片计算出来的分形维数为煤样表面的整体分形维数,天然裂缝的存在不会导致分形维数的变化量发生改变,故研究选取宏观图片计算煤样的分形维数。通过对试件的表面进行拍摄,经过调整图像对比度,亮度等处理后,得到表面灰度图像,最后对图

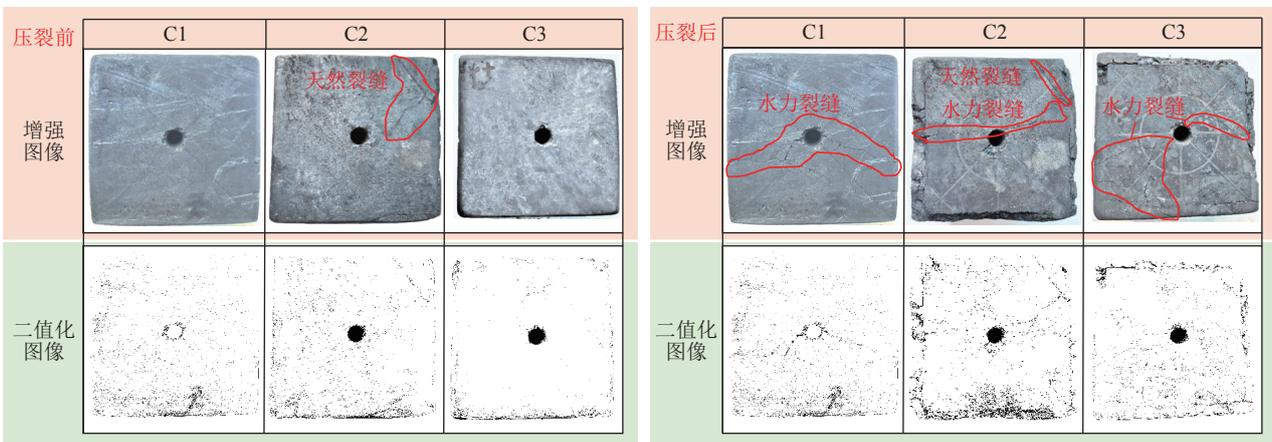


图8 水力压裂前、后煤样的宏观裂隙图像

Fig.8 Image of macroscopic fracture of coal sample before and after hydraulic

像进行阈值分割得到二值化图像,用于计算分析煤的表面分形特征。

基于分形理论的二维计算方法,可以计算不同应力条件下,水力压裂前后试件同一表面的宏观图像分形维数,如图 9 所示。在 Matlab 中运用最小二乘法对 $\lg N(a)$ 和 $\lg a$ 进行回归分析,通过拟合得到回归直线的斜率即为裂隙的分形维数。在压裂前,压裂试验试件同一试件相同表面的分形维数变化率 K 由式 (2) 定义,即:

$$K = \frac{D_a - D_b}{D_a} \quad (2)$$

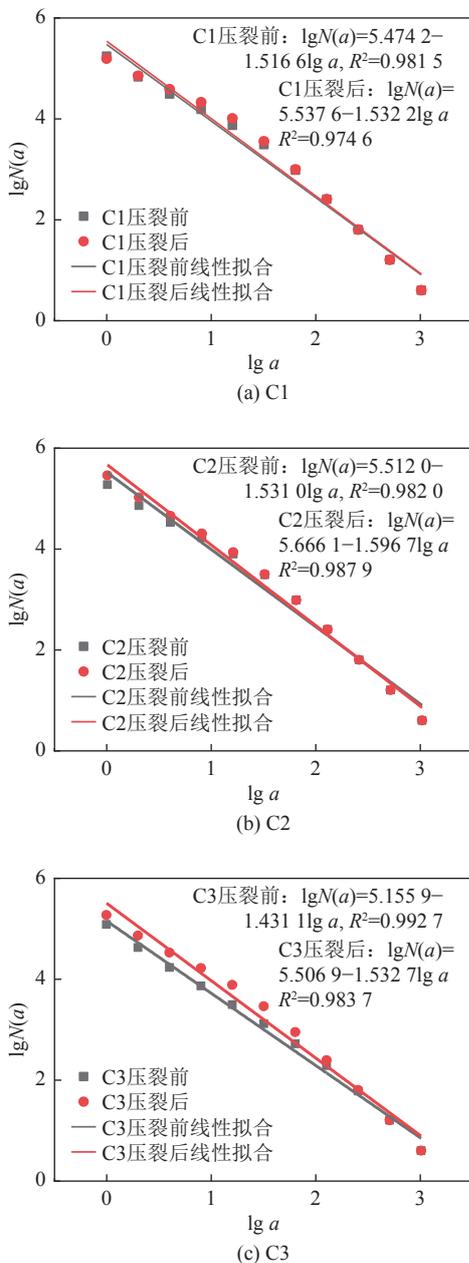


图 9 水力压裂前后煤样的宏观裂隙分形维数线性拟合
 Fig.9 Linear fitting of two-dimensional fractures before and after hydraulic

式中: D_b 为压裂前试件的表面分形维数; D_a 为压裂后试件的表面分形维数。

由图 9 和图 10 可以看出,压裂前,由于煤样的非均质性影响,试件表面的分形维数各不相同(分形维数分别是 1.516 6, 1.531 0, 1.431 1),水力压裂后,煤样受拉伸应力的影响,产生明显的水力裂缝,导致压裂后煤样表面的分形维数普遍增大(分形维数分别是 1.532 2, 1.596 7, 1.532 7),分形维数的变化率呈上升趋势,由 1.03% 变化为 7.10%,随着中间主应力的增加,分形维数变化率的增幅分别是 317% 和 589%。在最大主应力与最小主应力相同的条件下,分形维数的变化率随中间主应力的增大而增大,由此可见,中间主应力对水力裂缝的造缝性能存在明显的影响。

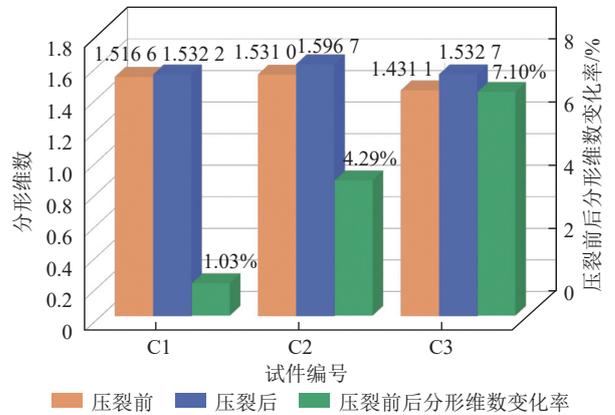


图 10 水力压裂前后煤样的分形维数
 Fig.10 Fractal dimension before and after hydraulic

2.2.2 三维分形维数计算

根据 CT 重构模型可知,煤样在空间中的裂缝分布展现了煤样表面无法观察到的部分,煤样表面的分形维数无法准确的表征水力裂缝的内部特征,由此引入三维分形维数,根据分形理论可知,除了表面的裂隙结构,煤块内部的裂缝网络也符合分形理论的规律。三维分形维数常用的计算方法是立方盒法,其算法类似于二维分形维数,即将三维网络的表面网格化,用边长为 a 的立方体覆盖三维裂缝网络,计算含有裂隙的盒子数 $N(a)$,其计算原理如图 11 所示。最后,通过式 (1) 得到三维分形维数。

不同分形维数的粗糙壁裂缝的测量有助于研究其在岩石断裂过程中的形成机理(如水力压裂),并评价缝网的复杂结构对渗透率的影响。研究结合 CT 扫描及 Avizo 重构软件。通过重构软件自带的三维分形维数计算模块,经过阈值分割,降噪,分形计算等步骤,基于式 (1) 计算出不同应力条件下裂缝网络的分形维数,表 4 展示了水力压裂前后煤样的三维

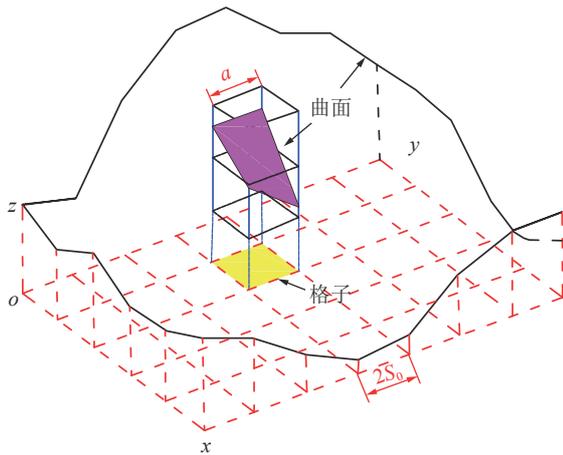


图 11 立方盒法计算原理^[34]

Fig.11 Calculation method of cubic box^[34]

表 4 压裂前后煤样的三维分形维数

Table 4 Three-dimensional fractal dimension of coal samples before and after hydraulic

试件编号	D_a	D_b	$K/\%$	水平应力比
C1	2.167 72	2.243 69	3.50	1.25
C2	2.206 16	2.310 75	4.74	1.5
C3	2.155 92	2.353 86	9.18	1.75

分形维数,其中 K 为压裂前后煤样三维分形维数的变化率,可由式 (2) 计算得到。

由表 4 可以看出,由 Avizo 软件自带的分形维数模块计算出来的压裂前 (D_b) 的三维分形维数为 2.155 92~2.206 16, 普遍小于压裂后 (D_a) 煤样的三维分形维数 (压裂后煤样的体分形维数为 2.243 69~2.353 86)。压裂前后分形维数的变化率 (K) 介于 3.50%~9.18%, 这表明裂缝网络的结构因断裂的产生而增加,即水力压裂技术可以产生复杂的裂缝网络,提高煤层的渗透性。从图 12 可以看出,中间主应力与分形维数的变化率呈正相关关系,增加的速率变大,分形维数变化率的增幅分别是 354.3% 和 944.7%, 其分形维数变化率的增幅比二维分形维数变化率的增幅大。由此可见,通过三维分形维数表征裂缝网络的复杂程度比二维分形维数更具优势,中间主应力对水力裂缝的网络复杂程度存在明显影响,且随着中间主应力的增大而增大。

2.2.3 拓扑结构与分形维数

岩石特有的孔隙结构是一种内在的拓扑结构,裂缝的产生沟通了裂缝与孔隙结构之间的连通性,这种连通性将极大的影响其渗流特性。拓扑维数不仅能描述岩石的几何特征^[12],还能表征裂缝的连通性。为了说明分形维数不能准确的表征裂缝网络结

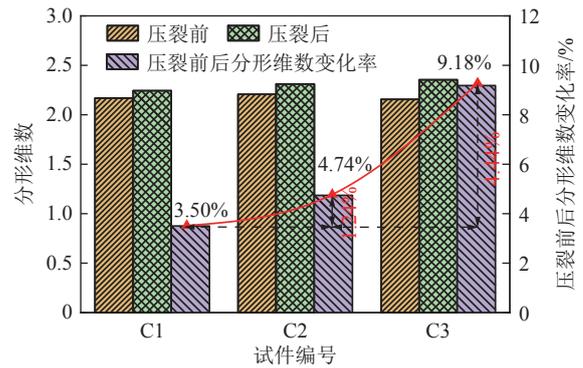
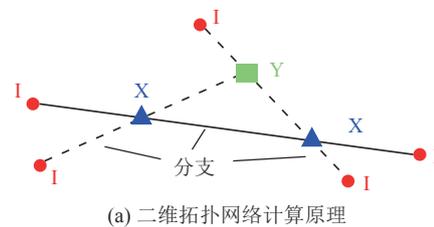


图 12 压裂前后煤样的三维分形维数

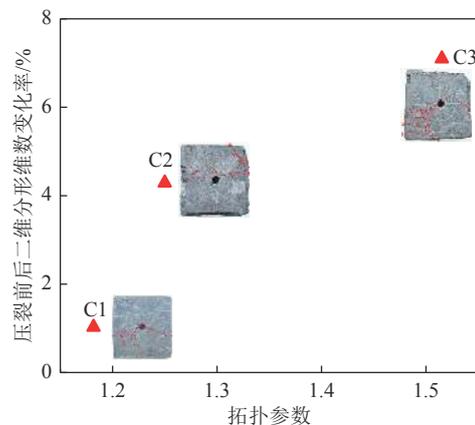
Fig.12 Three-dimensional fractures before and after hydraulic

构的连通性,HE 等^[22]进行了多个裂缝平面组合模型的连通性计算,结果表明,当裂缝网络具有相同的分形维数时,通过连通性来综合评价水力压裂技术的造缝能力变得至关重要。

断裂网络主要由分支和节点构成,可用于表征分支的方向和长度等几何特征,在二维平面中,断裂是由一系列的线、节点和分支组成,不同节点和分支的数量可作为用于表征断裂网络连通性的拓扑参数。根据拓扑学可知^[12],每个 Y 型节点贡献 3 个分支,每个 X 型节点贡献 4 分支,每个 I 型节点贡献 1 个分支 (图 13a),因此,分支数及每个分支的平均连接数



(a) 二维拓扑网络计算原理



(b) 不同应力条件下二维分形维数变化率与拓扑参数的分布

图 13 二维拓扑网络计算原理图和不同应力条件下二维分形维数变化率与拓扑参数的分布

Fig.13 Fracture networks in two-dimensional and distribution of 2D fractures and topological parameters of fractures under different stress

可以分别由式 (3) 和式 (4) 计算:

$$N_a = \frac{1}{2} (N_I + 3N_Y + 4N_X) \quad (3)$$

$$N_b = \frac{3N_Y + 4N_X}{N_a} = \frac{6N_Y + 8N_X}{N_I + 3N_Y + 4N_X} \quad (4)$$

式中: N_I 为 I 型节点数量; N_Y 为 Y 型节点数量; N_X 为 X 型节点数量; N_a 表示分支数; N_b 为每个分支平

均连接数。

由式 (4) 可知, 假设裂缝网络以 I 型节点为主时, N_b 趋于 0, 裂缝的连通性较小, 当裂缝网络以 X 型和 Y 型节点为主时, N_b 无限接近 2, 对应的裂缝网络则有更大的连通性。研究结合图 14, 得到不同应力状态下压裂后煤样表面的拓扑参数节点, 见表 5。

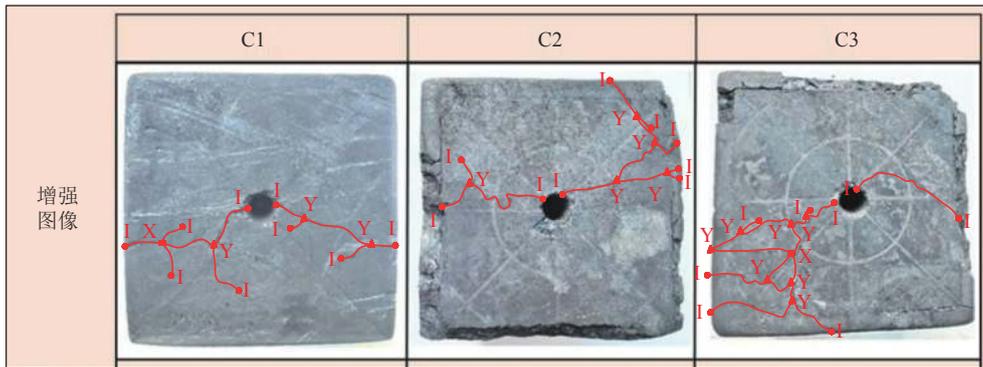


图 14 压裂后煤样的宏观表面拓扑结构

Fig.14 Fracture networks in two-dimensional after hydraulic

表 5 压裂前后煤样的二维拓扑参数

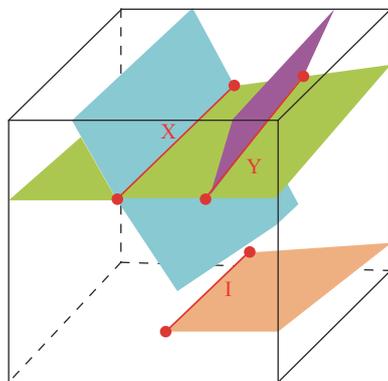
Table 5 Two dimensional topological parameters of coal samples be-fore and after hydraulic fracturing

试件编号	节点数量			N_a	N_b
	N_I	N_X	N_Y		
C1	9	1	3	11	1.18
C2	9	0	5	12	1.25
C3	8	1	7	16.5	1.52

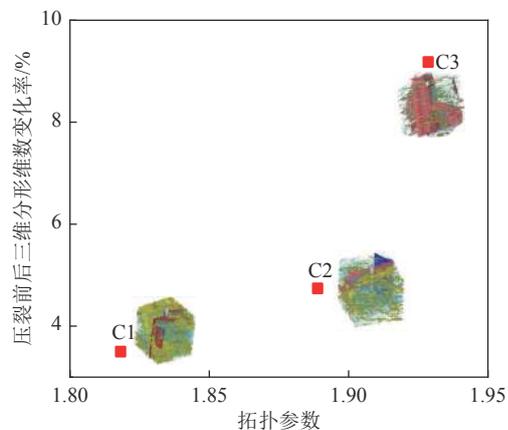
由表 5 可知, 在三向应力不等的条件下, 每个分支的连接数 (N_b) 为 1.18~1.52, 随着中间主应力的增

大而增大, 裂缝网络的连通性增大。根据图 13b 可知, 压裂前后煤样的二维分形维数变化率与拓扑参数呈正相关关系, 且分形维数变化率的增加速率随着拓扑参数的增大逐渐减小, 即随着中间主应力增大, 煤块通过水力压裂产生的裂缝网络更复杂, 煤块的连通性越好, 造缝能力越强。

同理, 在三维空间中, 任何断裂系统都由许多有限的平面组成, 不同分支的数量可以用于表征三维裂缝的连通性, 根据空间拓扑结构参数的计算原理图 15a), 得到不同应力状态下压裂后煤样的三维拓扑参数节点, 见表 6。



(a) 三维拓扑网络计算原理



(b) 不同应力条件下三维分形维数变化率与拓扑参数的分布

图 15 三维拓扑网络计算原理图和不同应力条件下三维分形维数变化率与拓扑参数的分布

Fig.15 Fracture networks in three-dimensional and distribution of 3D fractures and topological parameters of fractures under different stress

表6 压裂前后煤样的三维拓扑参数

Table 6 Three-dimensional topological parameters of coal samples before and after hydraulic

试件编号	节点数量			N_a	N_b
	N_l	N_x	N_y		
C1	1	1	2	5.5	1.82
C2	1	1	3	7	1.86
C3	1	3	5	14	1.93

由表6和图15可知,每个分支的连接数(N_b)为1.82~1.93,这表明在不同应力条件下,压裂后煤样的空间网络具有不同的连通性,随着中间主应力的增大,裂缝网络的连通性增大。根据图15b可知,压裂前后煤样的三维分形维数变化率与拓扑参数呈正相关关系,与二维平面不同的是,三维分形维数变化率的增加速率随着拓扑参数的增大而增大。由此可知,无论是在平面状态还是三维空间中,中间主应力对水力裂缝的网络复杂程度都存在明显影响,即随着中间主应力增大,煤块通过水力压裂产生的裂缝网络更复杂,煤块的连通性越好,造缝能力越强。

3 结 论

1) 煤样经过水力压裂后的二维和三维分形维数均显著增大。

2) 中间主应力对煤层的造缝能力存在影响。水力压裂前后煤样宏观表面的二维分形维数的变化率和三维分形维数的变化率都随着中间主应力的增大而增大。

3) 基于分形理论和拓扑学的方法能有效表征断裂网络的造缝能力。对于压裂后煤样的宏观表面拓扑结构,在三向应力不等条件下,拓扑参数为1.18~1.52,随着中间主应力的增大而增大,裂缝网络的连通性增大,产生的裂缝网络更复杂。对于压裂后煤样的空间拓扑结构, N_b 为1.82~1.93,随着中间主应力的增加而增大,产生的裂缝网络更复杂。

参考文献(References):

[1] 何利文. 煤矿回采工作面瓦斯涌出非线性特性分析及预测仿真理论研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
HE liwen. Study on nonlinear characteristic analysis and prediction simulation theory of gas emission in coal mining face[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[2] 蒋长宝, 余塘, 段敏克, 等. 瓦斯压力和应力对裂隙影响下的渗透率模型研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 115-121.
JIANG Changbao, YU Tang, DUAN Minke, et al. Study on permeability model under the influence of gas pressure and stress on

fracture[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 115-121.

[3] CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, ZHAI Hong, et al. CO₂ gas fracturing: a novel reservoir stimulation technology in low permeability gassy coal seams[J]. Fuel, 2017, 203: 197-207.

[4] QIN Lei, ZHAI Cheng, XU Jizhao, et al. Evolution of the pore structure in coal subjected to freeze-thaw using liquid nitrogen to enhance coalbed methane extraction[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175: 129-139.

[5] 张凤婕, 吴宇, 茅献彪, 等. 煤层气注热开采的热-流-固耦合作用分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 505-510.
ZHANG Fengjie, WU Yu, MAO Xianbiao, et al. Coupled thermo-hydrological-mechanical analysis of exploiting coal methane by heat injection[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 505-510.

[6] LI Quanshu, XING Huilin, LIU Jianjun, et al. A review on hydraulic fracturing of unconventional reservoir[J]. Petroleum, 2015, 1(1): 8-15.

[7] ALEXANDRINE Gesret, MARK Noble, NICOLAS Desassis, et al. Microseismic monitoring-consequences of velocity model uncertainties on event location uncertainties[C]. //Paper presented at the 75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, United Kingdom, 2013.

[8] CRAIG L Cipolla, WENG Xiaowei, MARK Gavin Mack, et al. Integrating microseismic mapping and complex fracture modeling to characterize fracture complexity [C]. //Paper presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA, 2011: 1-22.

[9] ANISH Singh Chaudhary. Shale oil production performance from a stimulated reservoir volume[D]. Texas A&M University, 2011.

[10] PAVEL Zuloaga-Molerol, YU Wei, XU Yifei, et al. Simulation study of CO₂-EOR in tight oil reservoirs with complex fracture geometries[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-11.

[11] 高金栋, 周立发, 冯乔, 等. 储层构造裂缝识别及预测研究进展[J]. 地质科技情报, 2018, 37(4): 158-166.
GAO Jindong, ZHOU Lifa, FENG Qiao, et al. Research progress of reservoir structural fracture identification and prediction[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(4): 158-166.

[12] DAVID J. Sanderson, CASEY W. Nixon. The use of topology in fracture network characterization[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 72: 55-66.

[13] CARDONA R, JENNER E, DAVIS T L. Fracture network characterization from P- and S-wave data at Weyburn field, Canada[J]. Seg Expanded Abstracts, 2003(1): 370.

[14] 赵海燕, 宫伟力. 基于图像分割的煤岩割理CT图像各向异性特征[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(6): 14-18.
ZHAO Haiyan, GONG Weili. Anisotropic characteristics of coal and rock cleat CT image based on image segmentation[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(6): 14-18.

[15] 康天合, 赵阳升, 靳钟铭. 煤体裂隙尺度分布的分形研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(4): 393-398.
KANG Tianhe, ZHAO Yangsheng, JIN Zhongming. Fractal study on scale distribution of coal fractures[J]. Journal of China Coal

- Society*, 1995, 20(4): 393–398.
- [16] FU Xuehai, QIN Yong, ZHANG Wanhong, *et al.* Fractal classification and natural classification of coal pore structure based on migration of coal bed methane[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 66–71.
- [17] CAO Taotao, SONG Zhiguang, WANG Sibao, *et al.* Characterization of pore structure and fractal dimension of Paleozoic shales from the northeastern Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 35: 882–895.
- [18] XIA Yuxuan, CAI Jianchao, WEI Wei, *et al.* A new method for calculating fractal dimensions of porous media based on pore size distribution[J]. *Fractals*, 2018, 26(1): 1850006.
- [19] 李廷芥, 王耀辉, 张梅英, 等. 岩石裂纹的分形特性及岩爆机理研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 6–10.
LI Tingjie, WANG Yaohui, ZHANG Meiyong, *et al.* Fractal properties of crack in rock and mechanism of rock-burst[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(1): 6–10.
- [20] LIU Xianfeng, NIE Baisheng. Fractal characteristics of coal samples utilizing image analysis and gas adsorption[J]. *Fuel*, 2016, 182: 314–322.
- [21] JIANG Changbao, NIU Bingwei, YIN Guangzhi, *et al.* CT-based 3D re-construction of the geometry and propagation of hydraulic fracturing in shale[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 179: 899–911.
- [22] HE Qiang, HE Bo, LI Fengxia, *et al.* Fractal characterization of complex hydraulic fractures in oil shale via topology[J]. *Energies*, 2021, 14(4): 1123–1141.
- [23] LIU Peng, JU Yang, GAO Feng, *et al.* CT identification and fractal characterization of 3D propagation and distribution of hydrofracturing cracks in low-permeability heterogeneous rocks[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 2018, 123(3) : 2156–2173.
- [24] LIU Peng, JU Yang, PATHEGAMA G Ranjith, *et al.* Experimental investigation of the effects of heterogeneity and geostress difference on the 3D growth and distribution of hydrofracturing cracks in unconventional reservoir rocks[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 35: 541–554.
- [25] JU Yang, HUANG Yaohui, SU Sun, *et al.* Three-dimensional numerical reconstruction method for irregular structures of granular geo-materials[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2018, 4: 327–341.
- [26] PENG Ruidong, YANG Yancong, JU Yang, *et al.* Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(31): 3346–3357.
- [27] DUAN Minke, JIANG Changbao, GAN Quan, *et al.* Study on permeability anisotropy of bedded coal under true triaxial stress and its application[J]. *Transport in Porous Media*, 2020, 131: 1007–1035.
- [28] JU Yang, ZHENG Jiangtao, MARCELO Epstein, *et al.* 3D numerical reconstruction of well-connected porous structure of rock using fractal algorithms[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2014, 279: 212–226.
- [29] ANWAR S Al-Kharusi, MARTIN J Blunt. Network extraction from sandstone and carbonate pore space images[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56(4): 219–231.
- [30] LI Minghui, YIN Guangzhi, XU Jiang, *et al.* A novel true triaxial apparatus to study the geomechanical and fluid flow aspects of energy exploitations in geological formations[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 4647–4659.
- [31] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of deep mining response and disaster prevention and control[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716–725.
- [32] JIANG Changbao, LIU Xiaodong, WANG Wengsong, *et al.* Three-dimensional visualization of the evolution of pores and fractures in reservoir rocks under triaxial stress[J]. *Powder Technology*, 2021, 378: 585–592.
- [33] AI Ting, ZHANG Ru, ZHOU Hongwei, *et al.* Box-counting methods to directly estimate the fractal dimension of a rock surface[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 314: 610–621.
- [34] WU Mingyang, WANG Wensong, SHI Di, *et al.* Improved box-counting methods to directly estimate the fractal dimension of a rough surface[J]. *Measurement*, 2021, 177: 109303.
- [35] CHINMAYA Panigrahy, AYAN Seal, NIHAR Kumar Mahato, *et al.* Differential box counting methods for estimating fractal dimension of gray-scale images: a survey[J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2019, 126: 178–202.
- [36] 莫海涛, 郝世俊, 赵江鹏. 煤矿区地面大直径钻孔成孔关键技术与装备[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(5): 190–197.
MO Haitao, HAO Shijun, ZHAO Jiangpeng. Key technology and equipment of hole-forming for surface large diameter borehole in coal mine area[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(5) : 190–197.
- [37] 李波波, 王斌, 杨康, 等. 煤岩孔裂隙结构分形特征及渗透率模型研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 226–231.
LI Bobo, WANG Bin, YANG Kang, *et al.* Study on fractal characteristics of coal and rock pore fissure structure and permeability model[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 226–231.