

彭守建, 许江, 张超林, 等. 含瓦斯煤岩剪切破断过程中裂纹演化及其分形特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 801–808. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.3013

Peng Shoujian, Xu Jiang, Zhang Chaolin, et al. Fractal characteristics of crack evolution in gas-bearing coal under shear loading[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 801–808. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.3013

# 含瓦斯煤岩剪切破断过程中裂纹演化及其分形特征

彭守建<sup>1,2</sup>, 许江<sup>1,2</sup>, 张超林<sup>1,2</sup>, 冯丹<sup>1,2</sup>, 聂闻<sup>1</sup>

(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. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030)

**摘 要:** 利用自主研发的含瓦斯煤岩细观剪切试验装置, 开展了含瓦斯煤岩细观剪切试验, 研究了煤岩剪切破断面裂纹的开裂扩展演化规律, 并基于分形理论, 分析了剪切破断面裂纹分布的分形特征。研究表明: 含瓦斯煤岩剪切破断面裂纹的演化过程经历了 5 个阶段, 即裂纹起裂、裂纹稳定扩展、裂纹非稳定扩展、剪切破断及裂纹摩擦阶段; 含瓦斯煤岩剪切破断不同阶段的裂纹分布符合分形特征, 且随着剪切应力水平的提高, 含瓦斯煤岩剪切面裂纹分布的分形维数呈现上升趋势, 通过剪切面裂纹的分形维数可定量描述含瓦斯煤岩随剪切应力状态变化的裂纹演化特征。

**关键词:** 煤岩; 剪切破断; 裂纹演化; 分布特征; 分形维数

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2015)04-0801-08

## Fractal characteristics of crack evolution in gas-bearing coal under shear loading

PENG Shou-jian<sup>1,2</sup>, XU Jiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao-lin<sup>1,2</sup>, FENG Dan<sup>1,2</sup>, NIE Wen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A meso-shear test equipment was employed to carry out shear tests on gas-bearing coal and rock for investigating the production of cracks and their evolution law, as well as the fractal distribution characteristic of cracks. Based on fractal nonlinear theory, the crack distribution on the shear rupture face was studied. The results show that: the surface cracks' evolution of gas-bearing coal and rock experiences five stages including cracks' initiation, steady growth of crack, unsteady growth of crack, shear rupture and friction of materials. The distribution of cracks at the five stages has agreement with the prediction of fractal dimension theory. It is found that the fractal dimension of shear rupture surface cracks shows an increasing trend with the increment of shear stress. The evolution characteristic of cracks under variable shear stresses can be quantitatively described by the fractal dimension of shear rupture surface.

**Key words:** coal rock; shear fracture; crack evolution; distribution characteristic; fractal dimension

深部煤岩体一般处于静水压力状态, 但受到采矿活动扰动后, 煤岩体受力状态将发生改变, 如工作面前方应力分区分布及顶板周期来压等。研究煤岩在剪切荷载条件下的破断过程及其裂隙演化规律, 有助于深入研究深部含瓦斯破断煤岩体的渗透特性及其瓦斯运移规律, 对实现煤与瓦斯高效共采具有十分重

要的意义。

针对岩石类材料在受载后的宏观破断与其内部裂纹演化, 国内外学者进行了大量的试验及理论研究。H. Kawakata 等<sup>[1]</sup>对岩石的初始细观损伤特性进行了研究以及单轴受力损伤扩展的 CT 分析; Y. H. Hatzor 等<sup>[2]</sup>研究了白云石的细观结构与微裂隙

收稿日期: 2014-12-08 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2011CB201203); 国家自然科学基金资助项目(51304255); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552323)

作者简介: 彭守建(1983—), 男, 江西宜春人, 副教授, 博士。E-mail: sjpeng@cqu.edu.cn

起裂的初始应力和试样强度之间的关系;孔园波<sup>[3]</sup>研究了压应力状态下砂岩的微观和宏观破坏机理,提出了一种砂岩内部微裂隙扩展和聚集的断裂模型;Zhao Y H<sup>[4]</sup>利用 SEM 获得了岩石表面微裂纹萌生、扩展和贯通全过程的图像,并建立了损伤变量与裂纹局部分形维数相关联的岩石损伤本构模型;谢和平等<sup>[5-6]</sup>用分形理论系统地研究了岩石微观损伤演化问题,并指出放顶煤开采工程尺度下巷道裂隙的间距和长度分布都符合分形规律;文献[7-11]针对采动裂隙的形成扩展过程及形态特征进行了试验及理论分析;张永波、王志国、李宏艳等<sup>[12-14]</sup>分别在实验室条件下模拟了采动岩体裂隙的形成过程和分布状态,并运用分形几何理论研究了采动岩体裂隙网络的分形特征。

对三轴应力状态下含瓦斯煤岩破断形态分析表明<sup>[15]</sup>,破坏后的含瓦斯煤岩形成了剪切破断面。许江等<sup>[16-17]</sup>对含瓦斯煤剪切破断面裂纹演化的细观特性进行了试验研究,但对其裂纹分布特征缺乏相应的量化分析。因此,本文拟利用自主研发的含瓦斯煤岩细观剪切试验装置,对煤岩剪切破断过程中裂隙演化规律进行试验研究,并基于分形理论,对剪切破断面裂纹分布的分形特征进行分析,为深部采动破断煤岩体中的裂隙演化及其分布特征的量化研究奠定基础。

## 1 试验方法及内容

### 1.1 试验方法

试验所用煤样取自山西晋城无烟煤业集团有限责任公司下属赵庄矿 3 号煤层,其煤质为无烟煤。根据现场实测资料,其浅部的原始瓦斯压力为 0.32 MPa,原始瓦斯含量为 7.08 m<sup>3</sup>/t。

煤样制作及试验操作方法参见文献[18]。图 1 为制作好的试验煤样,图 2 为试验用装置。

### 1.2 试验内容

利用含瓦斯煤岩细观剪切试验装置对含瓦斯煤岩剪切破断面裂纹时空演化规律进行试验研究,分别进行了不同瓦斯压力和不同法向应力条件的 2 组试验,瓦斯压力分别为 0、0.5、1.0、2.0 MPa,法向应力分别为 0、2.0、4.0 MPa,应力加载均采用位移控制,加载速率为 0.01 mm/min。

## 2 试验结果

采用上述试验方法对含瓦斯型煤(XM)及原煤(YM)分别进行了不同瓦斯压力及不同法向应力条件下的剪切力学特性试验,试验结果见表 1。

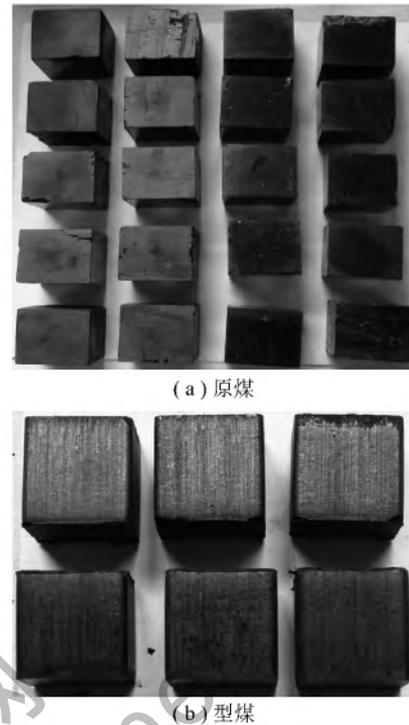


图 1 试验煤样

Fig. 1 Coal samples

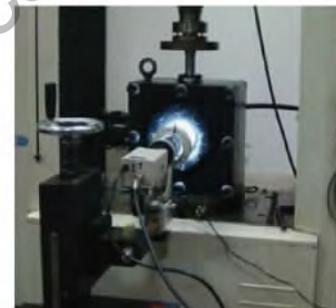


图 2 含瓦斯煤岩细观剪切试验装置

Fig. 2 Meso-shear mechanical test equipment for coal or rock containing gas

### 2.1 瓦斯压力对煤岩剪切力学特性的影响

含瓦斯煤岩在不同瓦斯压力下的剪切力-剪切位移关系曲线如图 3 所示。从图 3 可看出,随着瓦斯压力的增大,含瓦斯煤岩剪切变形曲线的斜率越来越大,且达到剪断时的最大剪切力也越来越大,但不含瓦斯的煤样除外,其达到剪断时的最大剪切力介于瓦斯压力为 1.0 MPa 和 2.0 MPa 的煤样之间。本文分析其原因认为,这是由于试验中的煤样处于瓦斯压力环境中,相当于给煤样试件施加了一定的正应力,而瓦斯压力越大,正应力也就越大,正应力的增加将使含瓦斯煤岩的抗剪强度增加。同时因为煤对瓦斯具有吸附作用,吸附瓦斯后的煤样其内部结构发生了改变,而这也正是含瓦斯煤岩的抗剪强度高于部分含瓦斯煤岩抗剪强度的原因。由此可见,排除瓦斯压力

的正应力效应,其对煤岩抗剪强度的影响实际上是具有弱化作用,瓦斯压力越大,煤岩吸附瓦斯量越多,对

孔裂隙的楔开作用也越强,引起抗剪强度降低,当然,其中机理还有待于后续进一步进行相关试验研究。

表 1 含瓦斯煤岩剪切试验结果

Table 1 Direct shear experimental results of gas-saturated coal specimens

类型	编号	剪切面积/mm <sup>2</sup>	瓦斯压力/MPa	剪切速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	法向应力/MPa	最大剪切力/kN	抗剪强度/MPa
型煤	XM-1	1 668.60	0	0.01	0	0.63	0.38
	XM-2	1 722.21	0.5	0.01	0	0.58	0.34
	XM-3	1 660.26	1.0	0.01	0	0.61	0.37
	XM-4	1 635.48	2.0	0.01	0	0.64	0.39
	XM-5	1 713.92	1.0	0.01	2	2.04	1.19
	XM-6	1 672.72	1.0	0.01	4	2.20	1.32
原煤	YM-1	1 221.09	0	0.01	0	2.99	2.45
	YM-2	1 234.24	0.5	0.01	0	2.49	2.02
	YM-3	1 214.04	1.0	0.01	0	2.64	2.17
	YM-4	1 197.96	2.0	0.01	0	4.69	3.91
	YM-5	1 248.36	1.0	0.01	0	3.72	2.98
	YM-6	1 231.07	1.0	0.01	2	4.80	3.90
	YM-7	1 201.29	1.0	0.01	4	9.71	8.08

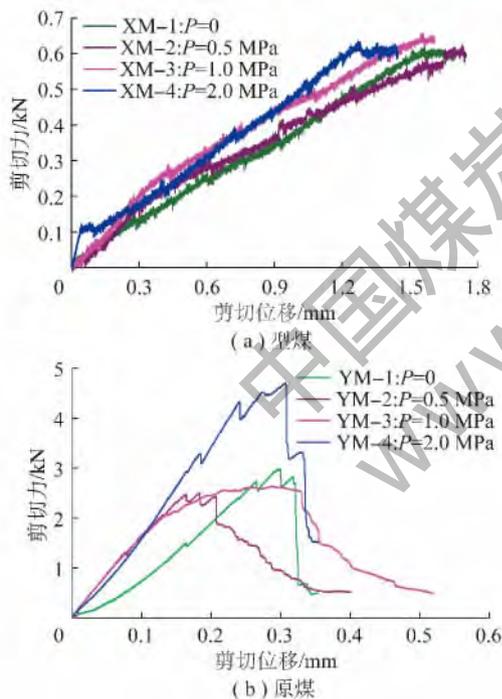


图 3 不同瓦斯压力下含瓦斯煤岩剪切力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 3 Shear loading-displacement curves of coal samples with different gas pressure

此外,对比型煤与原煤来看,型煤剪断破坏后基本已经失去承载能力,而原煤峰后还具有一定的承载能力,且随着瓦斯压力增大,该剪切残余强度也越高。在瓦斯压力相同的情况下,原煤的抗剪强度均高于型煤。这是因为型煤是二次成型试样,煤颗粒之间的黏聚力小于原煤的黏聚力,在剪断瞬间,即失去抗剪能

力,而原煤在瓦斯压力的正应力效应下则还存有一定的承载能力。

图 4 为各瓦斯压力下含瓦斯煤岩剪断时的破坏形态,可以看出,瓦斯压力越大,含瓦斯煤岩剪切面裂纹宽度越小,这也体现了瓦斯压力的正应力效应。同时,在相同瓦斯压力条件下,型煤的剪切面裂纹宽度要大于原煤。

### 2.2 法向应力对煤岩剪切力学特性的影响

含瓦斯煤岩在不同法向应力下的剪切力 - 剪切位移关系曲线如图 5 所示,可以看到,在瓦斯压力及剪切速率恒定的条件下,含瓦斯煤岩剪切变形速率随着法向应力的增大而减小。此外,含瓦斯型煤及原煤的抗剪强度随着法向应力的增加均具有较明显的增大趋势,当法向应力从 0 增加到 2.0 MPa 时,含瓦斯型煤抗剪强度增大幅度约 221.6%,含瓦斯原煤抗剪强度增大幅度约 30.9%;当法向应力从 2.0 MPa 增加到 4.0 MPa 时,含瓦斯型煤抗剪强度增大幅度约 10.9%,含瓦斯原煤抗剪强度增大幅度约 107.2%。

图 6 给出了不同法向应力下含瓦斯煤岩剪断时的破坏形态,可以看出,法向应力越大,含瓦斯煤岩剪切面裂纹宽度越小,因此剪切面颗粒接触的程度也越好,使得剪切面上的摩擦力越大,表现为含瓦斯煤岩抗剪强度随着法向应力的增大而增大。此外,在法向应力的作用下产生有一定的法向位移,且法向应力越大,法向位移也越大,表现为法向应力越大,观测面破坏程度越高。

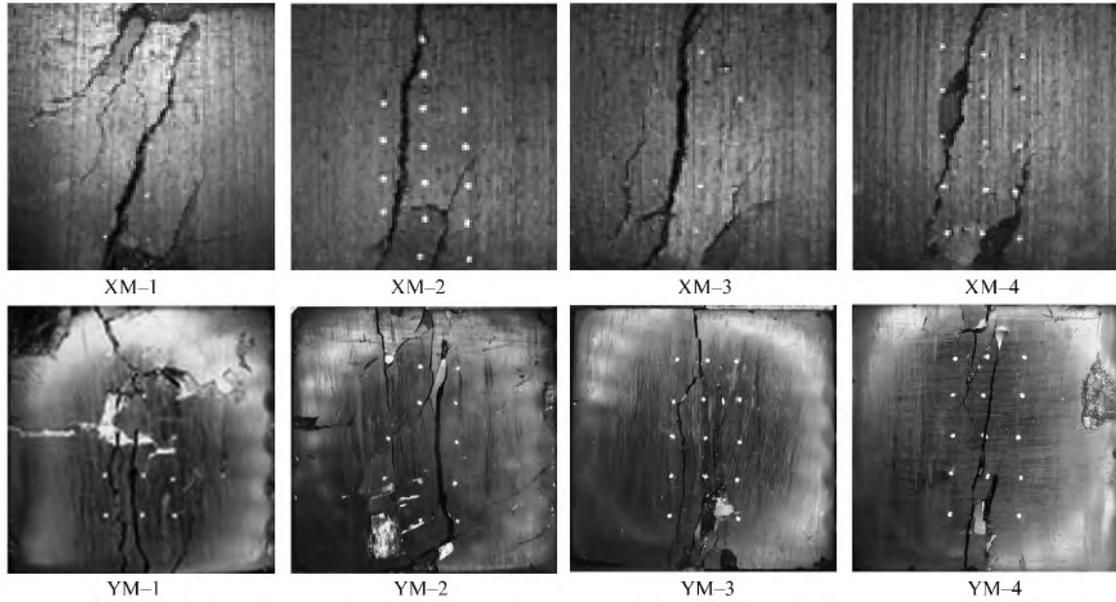


图 4 不同瓦斯压力下含瓦斯煤岩剪切破坏形态

Fig. 4 Failure pattern pictures of coal samples in direct shear test with different gas pressure

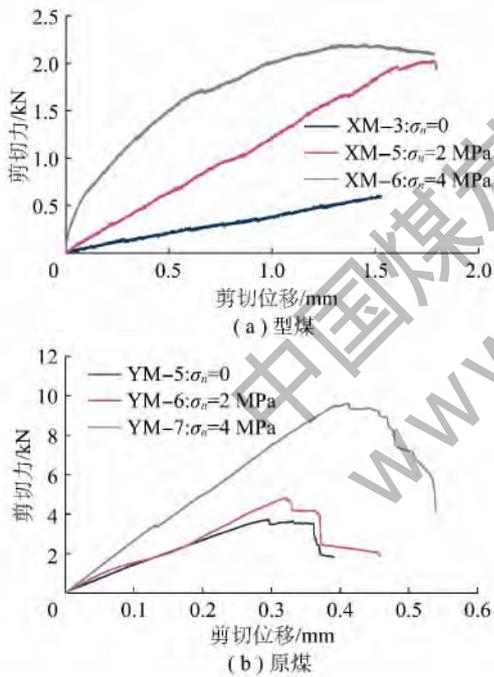


图 5 不同法向应力下含瓦斯煤岩剪切力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 5 Shear loading-displacement curves of coal samples with different normal stresses

### 2.3 含瓦斯煤剪切裂纹时空演化规律

图 7 显示了部分含瓦斯煤岩剪切过程中观测面裂纹随时间的演化规律,从图上来看,大部分煤岩裂纹首先出现在剪切面两端部,随着剪切应力的增加,裂纹向中部扩展,当剪切应力达到一定程度时,裂纹贯通形成破坏面。值得说明的是,由于型煤强度较低,XM-2、XM-3 及 XM-4 三个试样在吸附及预加

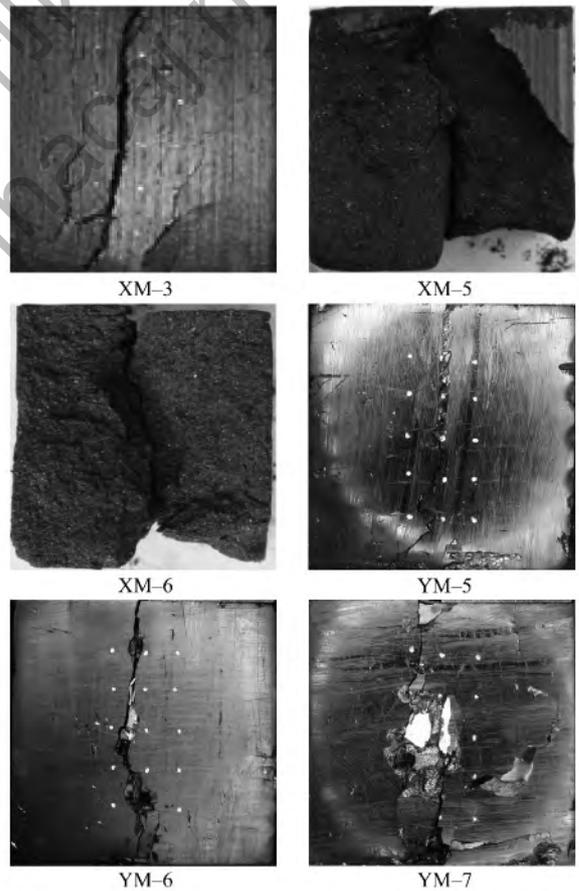


图 6 不同法向应力下含瓦斯煤岩剪切破坏形态

Fig. 6 Failure pattern pictures of coal samples in direct shear test with different normal stresses

应力过程中,在剪切面中部已形成一定的裂纹,因此,相当于对预制裂纹试样的剪切,其裂纹扩展是从已有裂纹的端部开始向两端发展,贯通后形成破坏。此

外,由于煤样试件非均匀性的影响,微破裂在试样中部的分布并非完全对称,而是在试样左侧的发展较快,造成了较明显的微破裂局部化现象,剪切破裂面扩展呈现偏离中部的趋势,与切向夹角为 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

通过对含瓦斯煤岩裂纹扩展过程的动态细观观

测,图 8 标识出了部分含瓦斯煤岩细观裂纹的起裂部位、扩展方向、分叉部位及裂纹尖端形态。

含瓦斯煤岩内部细观裂纹不断演化的过程即引起宏观上的剪切变形,从图 3 及图 5 中可以看出,含瓦斯煤岩剪切变形过程均具有较明显的阶段性。因

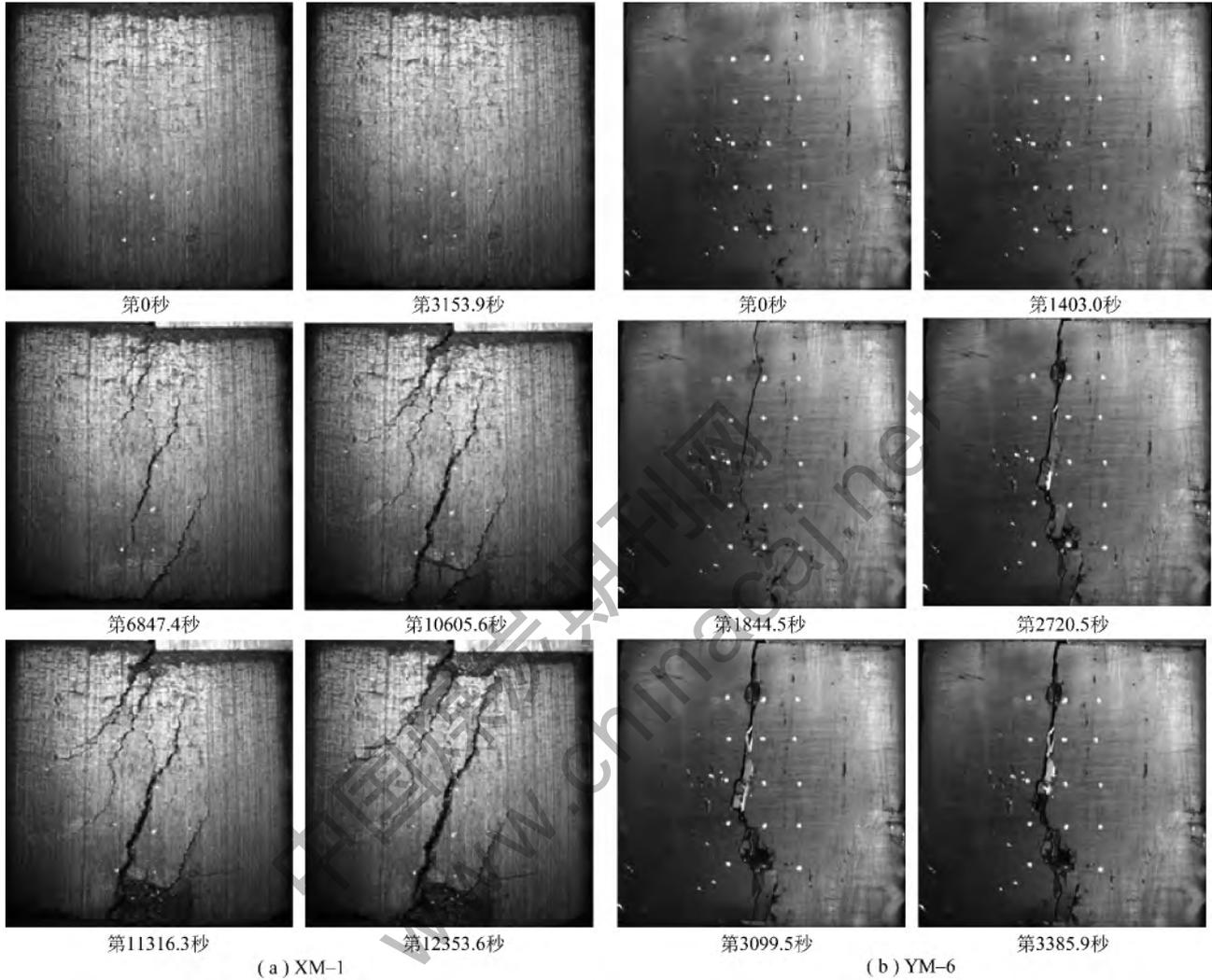


图 7 含瓦斯煤岩剪切裂纹演化过程

Fig. 7 Formation process of crack in coal containing gas samples

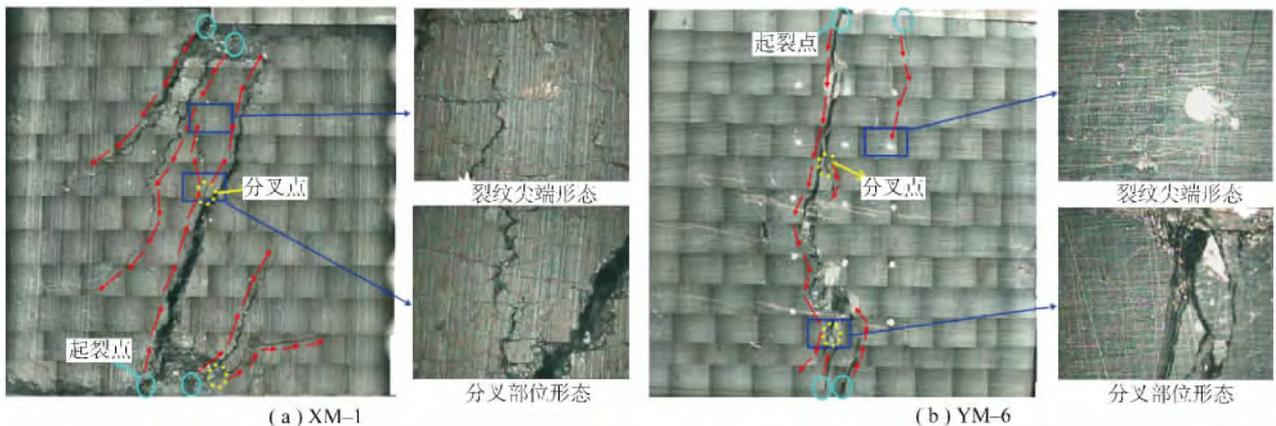


图 8 含瓦斯煤岩剪切裂纹扩展形态

Fig. 8 Pattern of meso-cracks expand in coal samples

此,本文相对应地将裂纹演化过程概括为裂纹起裂前阶段(I)、裂纹稳定扩展阶段(II)、裂纹非稳定扩展阶段(III)、剪切断裂(IV)及裂纹摩擦阶段(V)等5个阶段<sup>[19]</sup>。从剪切应力-剪切位移关系曲线来看,型煤试样剪断后的摩擦阶段不明显,而原煤试样基本都具有较完整的上述5个阶段的演化规律。

### 3 含瓦斯煤剪切裂隙演化的分形特征

#### 3.1 分形维数

分形理论认为,所有的分形对象都具有一个重要的特征,即可以通过一个特征数,也就是分维数来测定其不平整程度或复杂程度<sup>[20]</sup>。分形理论自20世纪70年代由Mandelbrot创立以来,至今已经发展出了十多种不同的维数,包括拓扑维、Hausdorff维、自

相似维、盒子维、信息维、关联维等<sup>[21]</sup>。本文将采用Kolomogrov容量维即盒维数来量化分析含瓦斯煤岩剪切裂隙演化特征。

容量维又可称为盒维数(Box-counting Dimension)是Hausdorff的一种具体表现。设 $(X, d)$ 为一距离空间, $A \in \xi(X)$ 对每一个 $\varepsilon > 0$ ,设 $N(A, \varepsilon)$ 表示用来覆盖 $A$ 的半径为 $\varepsilon$ 的最小闭球数,如果下式存在:

$$D_f = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(A, \varepsilon)}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (1)$$

式中 $D_f$ 为 $A$ 的Kolomogrov容量维。

图9显示了用容量维来求裂纹分维数的具体示意。通过选用不同边长小正方形来覆盖损伤区,数出包含有裂纹数的小正方形数量,就可以获得在不同 $\varepsilon$ 下的 $N(A, \varepsilon)$ 值,然后利用上式求出容量维。

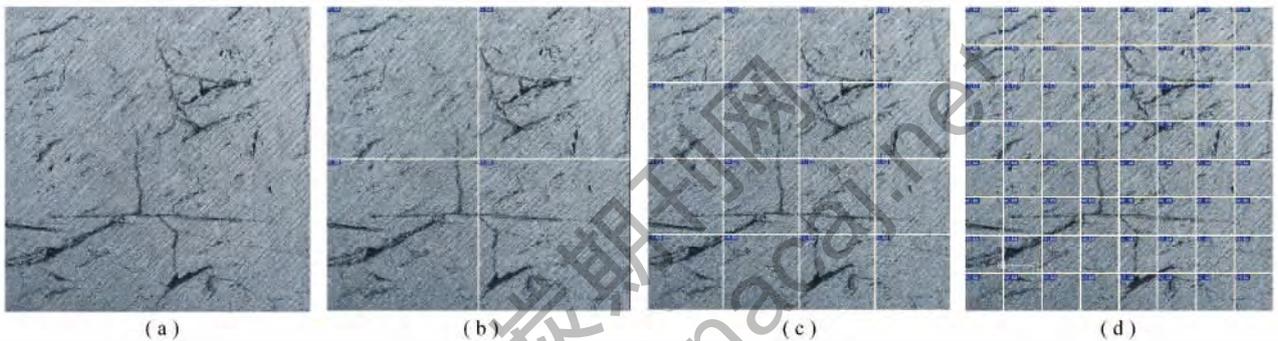


图9 容量维计算示意

Fig. 9 Figure of capacity dimension

#### 3.2 煤岩剪切破断面裂纹演化的分形特征

在剪切应力作用下,含瓦斯煤岩剪切面裂纹开裂扩展反映了其内部损伤演化的过程,对进一步研究含瓦斯煤岩剪切行为及其断裂机理具有重要的作用,因此应加强裂纹演化的量化研究。从试验观测结果来看,含瓦斯煤岩剪切过程中剪切面的裂纹开裂扩展及

其形态都是不规则的、大小不等、方向不一的;从分形理论分析,具有自相似性,属于分形结构。

以部分型煤及原煤试件为例,采用分形维数计算方法对各剪切应力水平下的剪切面裂纹进行分形维数计算,其计算结果见表2,分形维数与剪切应力水平关系拟合曲线如图10所示。

表2 含瓦斯煤岩剪切面裂纹分形维数

Table 2 Fractal dimension of crannies in shear surface of coal containing gas

煤样	剪切应力水平						拟合方程
	10%	30%	50%	70%	90%	100%	
XM-2	1.072	1.135	1.174	1.260	1.307	1.336	$D_f = 0.296(\tau/\tau_n) + 1.041$ ( $R^2 = 0.9927$ )
XM-3	1.088	1.136	1.215	1.262	1.307	1.357	$D_f = 0.293(\tau/\tau_n) + 1.057$ ( $R^2 = 0.9914$ )
YM-5	1.022	1.055	1.085	1.119	1.148	1.174	$D_f = 0.164(\tau/\tau_n) + 1.005$ ( $R^2 = 0.9964$ )
YM-6	1.069	1.076	1.096	1.108	1.115	1.123	$D_f = 0.061(\tau/\tau_n) + 1.062$ ( $R^2 = 0.9805$ )

基于含瓦斯煤岩剪切裂纹演化具有阶段性特征,选取了不同阶段剪切应力水平(即剪切应力与最大剪切应力之比 $\tau/\tau_n$ )下的裂纹演化图像,利用CF-2000P偏光分析软件提取了其裂纹形态,如图11所

示。

从表2中的线性拟合方程可知,含瓦斯煤岩剪切面裂纹分形维数与剪切应力水平之间满足如下关系:

$$D_f = a(\tau/\tau_n) + b \quad (2)$$

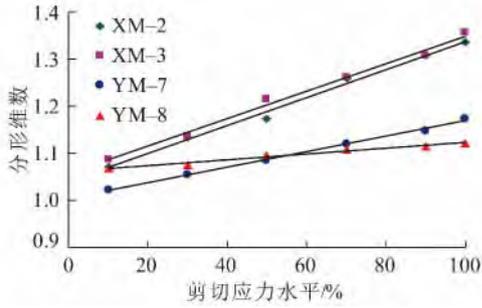


图 10 含瓦斯煤岩剪切应力水平与分形维数之间的关系

Fig. 10 Relationship between fracture dimensions and shear stress level of coal containing gas

式中  $D_f$  为分形维数;  $a$  和  $b$  为与含瓦斯煤岩材料性质有关的拟合参数。

从式(2)及图 10 中可以看出,随着剪切应力水平的提高,其分形维数呈现线性上升趋势,即含瓦斯煤岩剪切面的微裂纹数量逐渐增加。拟合直线斜率大小则表征着含瓦斯煤岩随剪切荷载增加其内部裂纹开裂扩展的快慢程度。由于含瓦斯煤岩剪切面的破裂形态在一定程度上反映了其内部的损伤情况,因此,剪切面裂纹的分形维数可以定量地反映含瓦斯煤岩随剪切应力状态变化的裂纹演化规律。

此外,裂纹的形成过程伴随着能量耗散,它是一个从微断裂成核、扩展、相互作用、连通的损伤断裂演化过程。因此,不同剪切应力水平下裂纹演化形态的分形维数在一定程度上也是剪切荷载作用下含瓦斯煤岩内部能量耗散的量度。

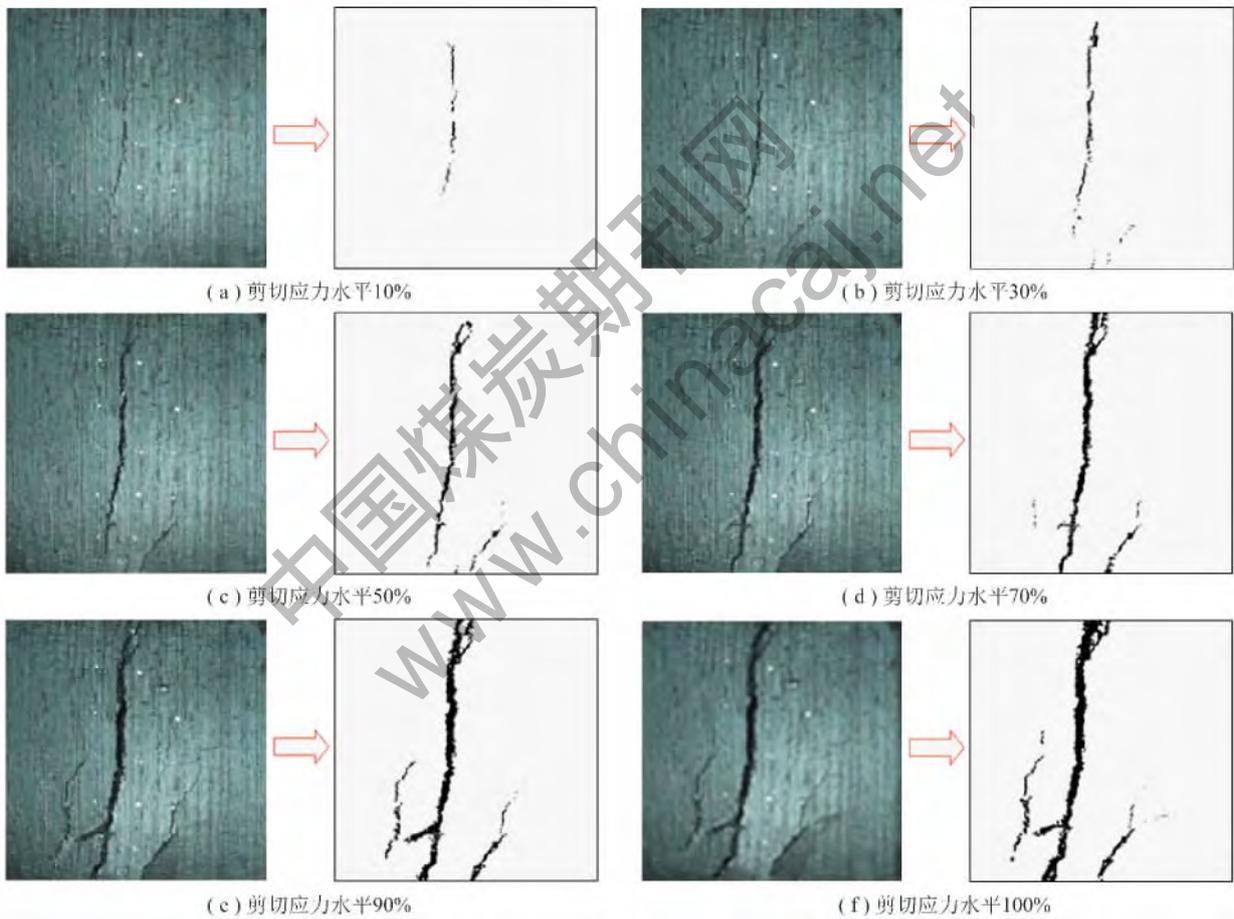


图 11 不同剪切应力水平下煤样剪切面裂纹的分布特征

Fig. 11 Distribution characteristics of cracks in shear surface under different shear stress level

### 4 结 论

(1) 含瓦斯煤岩剪切破断面裂纹的形成过程具有较明显的阶段性,可概括为裂纹起裂阶段(I)、裂纹稳定扩展阶段(II)、裂纹非稳定扩展阶段(III)、剪切破断(IV)及裂纹摩擦阶段(V)等5个阶段。

(2) 对含瓦斯煤岩剪切破断过程中不同剪切应

力水平下裂纹的分形特征研究发现,随着剪切应力水平的提高,含瓦斯煤岩剪切面裂纹的分形维数呈现上升趋势,且剪切面裂纹分形维数与剪切应力水平之间呈线性关系,剪切面裂纹的分形维数定量反映了含瓦斯煤岩随剪切应力状态变化的损伤演化特征。

(3) 探讨了含瓦斯煤岩剪切破断过程中的裂纹演化,即瓦斯运移通道的形成过程,对裂隙演化与瓦

斯运移耦合作用机理则还需做进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Kawa Kata H, Cho A, Yanagidani T, et al. The observations of faulting in westerly granite under triaxial compression by X-ray CT scan [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34:151 - 162.
- [2] Hatzor Y H, Zur A, Mimran Y. Microstructure effects on microcracking and brittle failure of dolomites [J]. *Tectonophysics*, 1997, 281(3):141 - 161.
- [3] 孔园波. 砂岩试样裂隙扩展和宏观断裂的模型探讨 [J]. *中国矿业大学学报*, 1991, 20(4):93 - 98.  
Kong Yuanbo. A model concerning micro-crack propagation and macroscopic failure of sandstone specimens [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1991, 20(4):93 - 98.
- [4] Zhao Y H. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(3):349 - 366.
- [5] Xie H P, Gao F. The mechanics of cracks and a statistical strength for rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2000, 37(3):477 - 488.
- [6] 谢和平, 陈忠辉, 王家臣. 放顶煤开采巷道裂隙的分形研究 [J]. *煤炭学报*, 1998, 23(3):252 - 257.  
Xie Heping, Chen Zhonghui, Wang Jiachen. Fractal study on crack distribution in tunnels for sub-level caving mining [J]. *Journal of China Coal Society*, 1998, 23(3):252 - 257.
- [7] Yasitli N E, Unver B. 3D numerical modeling of longwall mining with top-coal caving [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 2005, 42(2):219 - 235.
- [8] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩层结构的形态与受力分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1995, 14(2):97 - 106.  
Qian Minggao, Miao Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(2):97 - 106.
- [9] 李树刚, 石平五, 钱鸣高. 覆岩采动裂隙椭圆抛带动态分布特征研究 [J]. *矿山压力与顶板管理*, 1999, 16(3/4):44 - 46.
- [10] 许家林, 钱鸣高. 岩层采动裂隙分布在绿色开采中的应用 [J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(2):141 - 149.  
Xu Jialin, Qian Minggao. Study and application of mining-induced fracture distribution in green mining [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2004, 33(2):141 - 149.
- [11] 黄炳香, 刘长友, 许家林. 采动覆岩破裂裂隙的贯通度研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(1):45 - 49.  
Huang Bingxiang, Liu Changyou, Xu Jialin. Research on through degree of overlying strata fracture fissure induced by mining [J]. *Journal of China University of Mining & Technology* 2010, 39(1):45 - 49.
- [12] 张永波, 靳新铭, 刘秀英. 采动岩体裂隙分形相关规律的实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(20):3426 - 3429.  
Zhang Yongbo, Jin Zhongming, Liu Xiuying. Testing study on fractal correlation law of cracks in mined rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2004, 23(20):3426 - 3429.
- [13] 王志国, 周宏伟, 谢和平. 深部开采上覆岩层采动裂隙网络演化的分形特征研究 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(8):2403 - 2408.  
Wang Zhiguo, Zhou Hongwei, Xie Heping. Research on fractal characterization of mined crack network evolution in overburden rock stratum under deep mining [J]. *Rock and Soil Mechanics* 2009, 30(8):2403 - 2408.
- [14] 李宏艳, 王维华, 齐庆新, 等. 基于分形理论的采动裂隙时空演化规律研究 [J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6):1023 - 1030.  
Li Hongyan, Wang Weihua, Qi Qingxin, et al. Study on fissure development rule of overlying strata influenced by mining based on fractal theory [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6):1023 - 1030.
- [15] 彭守建, 许江, 尹光志, 等. 煤岩破断与瓦斯运移耦合作用机理的试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(12):2024 - 2028.  
Peng Shoujian, Xu Jiang, Yin Guangzhi, et al. Experimental study on the coupling mechanism between coal fracture and gas migration [J]. *Journal of China Coal Society* 2011, 36(12):2024 - 2028.
- [16] 许江, 谭皓月, 王雷, 等. 不同法向应力下含瓦斯煤剪切破坏细观演化过程研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(6):1192 - 1197.  
Xu Jiang, Tan Haoyue, Wang Lei, et al. Meso-evolution process of gas-containing coal shear failure under different normal stresses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2012, 31(6):1192 - 1197.
- [17] 许江, 梁永庆, 刘东, 等. 不同瓦斯压力条件下原煤剪切破裂细观特征试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12):2431 - 2437.  
Xu Jiang, Liang Yongqing, Liu Dong, et al. Experimental study of crack's meso-characteristics of raw coal subjected to direct shear load under different gas pressures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2012, 31(12):2431 - 2437.
- [18] 许江, 彭守建, 尹光志, 等. 含瓦斯煤岩细观剪切实验装置的研制及应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(4):677 - 685.  
Xu Jiang, Peng Shoujian, Yin Guangzhi, et al. Development and application of meso-shear test equipment for coal or rock containing gas [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(4):677 - 685.
- [19] Peng Shoujian, Xu Jiang, Yin Guangzhi, et al. Spatial-temporal evolution of gas migration pathways in coal during shear loading [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(6):769 - 773.
- [20] Xie H. Fractal in rock mechanics [M]. Netherland: Balkema A. A. Rotterdam/Brookfield, 1993:243 - 434.
- [21] 谢和平. 分形 - 岩石力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
Xie Heping. Theory of fractal and rock mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2005.