

DOI: 10.11779/CJGE201405008

三轴应力下致密砂岩裂纹展布规律及表征方法

杨永明¹, 鞠杨², 毛灵涛²

(1. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 利用三轴试验机和 CT 扫描设备, 开展了多组不同围压作用下的致密砂岩三轴压缩试验及 CT 扫描试验, 得到了不同三轴应力条件下砂岩破坏裂纹的 CT 图像; 利用图像处理技术和统计学原理提取了裂纹展布的几何形态。引入裂纹的宽度、长度、面积和分形维数等几何参数描述了破坏裂纹的空间形貌, 分析了不同围压条件下岩石破坏裂纹面积、长度、宽度和分形维数的分布特征, 揭示了围压应力对上述裂纹几何特征的影响规律。研究表明: 围压应力对破坏裂纹的面积、长度、宽度和分形等几何特征有显著的影响, 低围压条件下, 裂纹的面积、长度和宽度都较小, 随着围压的增加裂纹的面积、长度和宽度也增大, 且概率密度分布函数有了明显的差异; 破坏裂纹的分形维数随着围压的增大呈指数递减趋势, 低围压条件下裂纹的分形维数大, 说明裂纹形态复杂, 曲线边界粗糙, 产生的小裂纹较多, 且相互交错分布, 形成的裂纹网络结构占据了整个试件二维横截面图。随着围压的增大, 破坏裂纹的分形维数减小, 说明裂纹形态趋于规则, 小裂纹减少, 形成了近似直线的光滑主裂纹。

关键词: 致密砂岩; 破坏裂纹; 展布规律; 几何形态; CT 扫描

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)05-0864-09

作者简介: 杨永明(1979-), 男, 山西岚县人, 博士后, 讲师, 主要从事工程力学、岩土工程数值计算方法等方面的研究工作。E-mail: yym113@163.com。

Growth distribution laws and characterization methods of cracks of compact sandstone subjected to triaxial stress

YANG Yong-ming¹, JU Yang², MAO Ling-tao²

(1. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. State Key laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: A series of triaxial compressive tests and CT scanning tests on tight sand are carried out using the triaxial testing machine and CT scanning machine. The CT images of fractured cracks subjected to diverse triaxial stresses are obtained. The image processing technique and statistic principles are employed to extract geometric morphology of crack growth. The geometrical parameters are proposed to describe the growth morphology of fractured cracks, i.e., area, length, width and fractal dimension. The distribution characters of geometric parameters are analyzed. The effects of confined pressure on distribution characters of the above geometric parameters are exposed. The results show that the confined pressure has significant effects on the geometrical features of fractured cracks, such as area, length, width and fractal dimension. The area, length and width are all smaller when the confined pressure is smaller. With the increase of the confined pressure, the values of geometrical parameters rise also. The diverse confined pressures lead to different probability density distribution functions of geometrical parameters. The fractal dimensions of fractured cracks accord with the exponential decline law when the confined pressure rises. The fractal dimensions of cracks subjected to low confined pressure are larger than the ones subjected to high confined pressure. When the confined pressure is lower, the cracks with larger fractal dimensions exhibit complex geometric morphology and rough boundary curves. The crack networks with more small cracks occupy the whole cross section of specimens. When the confined pressure is higher, the cracks with less fractal dimensions become more regular and smooth. The main cracks approximating straight line appear and the small cracks disappear.

Key words: compact sandstone; fractured crack; growth distribution law; geometric morphology; CT scanning

0 引言

煤层气、致密砂岩气、页岩油气等非常规油气资源开采的核心技术是对低渗透储层岩石进行压裂, 产

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(51125017); 国家自然科学基金项目(51374213); 教育部博士点基金项目(201300231200200); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM13KF)

收稿日期: 2013-07-30

生裂隙网络。然而, 目前人们对原岩应力场作用下岩石破裂裂纹的形成机制和扩展模式等机理认识不清, 导致现场压裂效果和油气产量难以达到预期目标。其中一个重要的因素是人们对地应力作用下岩石破坏裂纹的空间形态和展布规律缺乏深入的认识, 没有建立起科学有效的数学表征方法。因此, 开展深部岩石地应力条件下破坏裂纹的空间形态展布规律及其定量表征方法, 对于在低渗透非常规油气资源开采中描述和评价岩石破坏裂纹的形态、压裂效果及有效地实施压裂技术具有十分重要的科学意义和工程应用价值^[1-4]。

国内外学者为揭示岩石破裂裂纹的形成和扩展机理开展了大量研究工作, 早在 20 世纪 50 年代就建立和发展了许多岩石裂纹扩展的理论模型^[5-7]。随后试验和数值方法被应用到岩石破坏裂纹问题的研究中, Warpinski 等^[8]采用试验方法研究了层状储层对裂隙垂向延伸的影响; 黄辅琼等^[9]根据岩心裂纹和破裂试验中试件裂纹的定量观测结果, 介绍了裂纹参数的统计方法, 建立了计算钻井岩心裂纹体积密度和裂纹孔隙度的数学表达式; Sato 等^[10]利用 DDM 方法研究了岩石裂纹扩展的规律, 分析了已有裂纹对裂纹扩展的影响机理。Wong 等^[11]对带有不同倾角、长度、间距的预制裂纹和切缝岩样在剪切荷载下的裂纹扩展过程进行了试验观测; 任建喜等^[12]基于 CT 扫描试验分析了花岗岩和砂岩等在卸载和三轴压缩条件下损伤、裂纹的萌生、发展和宏观裂纹的形成特征等; 李廷春等^[13]利用 CT 扫描技术和模型材料研究了岩石裂隙在三轴加载作用下的扩展规律; 梁正召等^[14]采用细观损伤数值模拟方法, 研究了单轴压缩下含预制三维表面裂纹的岩石试样的破坏过程, 探讨了三维裂纹扩展规律。赵延林等^[15-16]利用相似材料开展了单轴压缩和双轴压缩条件下类岩石材料预制裂纹的破断试验, 研究了裂纹对岩石力学性能的影响规律; 杨圣奇等^[17]在研究了不同围压下断续预制裂隙大理岩体积应变-轴向应变全程曲线, 分析了围压对断续预制裂隙大理岩扩容特性的影响规律。为了描述裂缝的形态, 人们专门针对裂缝系统提出了分维描述法^[18-20]。上述研究为帮助人们理解岩石破坏裂纹扩展机理起到了很好的作用。

然而, 由于深部低渗透非常规油气资源复杂的地质构造和地应力特征以及缺乏准确的探测手段, 目前, 人们难以准确地了解和认知地应力作用下岩石破裂裂纹的空间形态、展布规律及其影响因素, 同时缺乏有效的数学定量表征方法, 因而难以准确地预测现场压裂效果和进行压裂方案设计, 导致在低渗透非常规油气资源开采中实施压裂以及现场监测均存在较大的盲目性, 造成油气资源开采采收率低, 技术与经济成本巨大。

针对上述情况, 本文利用三轴试验机和 CT 扫描

设备, 开展多组不同围压下致密砂岩的三轴压缩试验及 CT 扫描试验, 基于三轴应力下砂岩破坏裂纹 CT 图像, 利用图像处理技术和统计学原理提取裂纹展布的空间几何形态, 同时引入裂纹的宽度、长度、面积和分形维数等几何参数, 通过描述不同围压应力条件下岩石破坏裂纹宽度、长度、面积和分形维数的分布特征, 分析围压应力对上述裂纹几何特征的影响规律, 揭示三轴应力作用下致密砂岩破坏裂纹的扩展机理。

1 试验概况

1.1 样品制备

采用致密砂岩作为研究对象, 将试件加工成直径为 50 mm, 高度为 100 mm 的圆柱体, 共加工了 30 个样品, 选用其中的 18 个样品, 用于不同围压应力的三轴破坏试验和 CT 扫描试验。为避免试验误差, 样品进行切割打磨, 试件两端面光滑且相互平行, 并与轴线垂直。试验样品如图 1 所示。



图 1 试验样品

Fig. 1 Test specimens

1.2 三轴压缩试验

采用 TAW-2000 电液伺服岩石三轴试验系统开展了三轴压缩试验, 根据真实地应力设计了 6 组不同围压应力: 5, 10, 15, 20, 25, 30 MPa, 对应的试件编号分别为 #1, #2, #3, #4, #5, #6 (每一个围压条件下重复了 3 次试验)。采用位移静态加载方式, 加载速率为 0.2 mm/min。不同围压应力下应力-应变曲线如图 2 所示 (每个围压下选了一个样品的应力-应变曲线作为代表)。

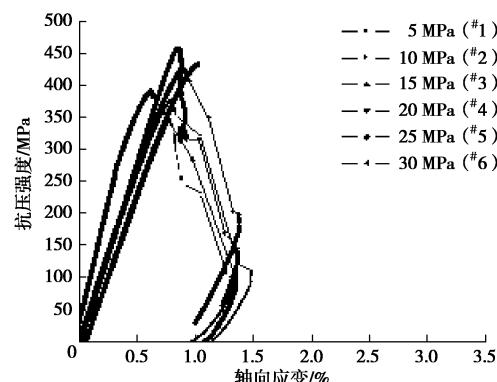


图 2 不同围压下的三轴应力-应变曲线

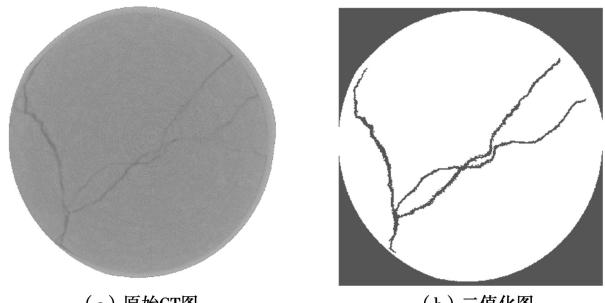
Fig. 2 Triaxial stress-strain curves under different confining pressures

1.3 CT 扫描试验

采用高精度 16 位微焦点 X-射线 CT 扫描设备开展了不同围压应力下破坏裂纹空间形态的扫描试验,每一个样品沿高度自上而下间隔 1 mm 扫描一层,共扫描 100 层。扫描获得的 CT 图像为 1024×1024 像素的灰度图,如图 3 (a) 所示,由于篇幅所限,选用 20 MPa 围压下第 51 层裂纹 CT 图作为代表层。CT 图像中每个像素点的灰度在 0~255 范围内变化,不同灰度值反映了图像各点不同的物质。

为了准确提取裂纹信息,需对裂纹 CT 图片进行处理。首先采用中值滤波算法通过自编程序对图像进行滤波处理,去除原始 CT 扫描图中的伪影和噪声点。在滤波图的基础上,采用图像处理中的阈值分割和边

缘检测法,利用自编程序提取了裂纹的几何形态,得到了包含裂纹几何形态的二维图。由于裂纹形态复杂,



(a) 原始CT图

(b) 二值化图

图 3 破坏裂纹原始 CT 图和二值化图

Fig. 3 Original CT image and binary image of fractured cracks

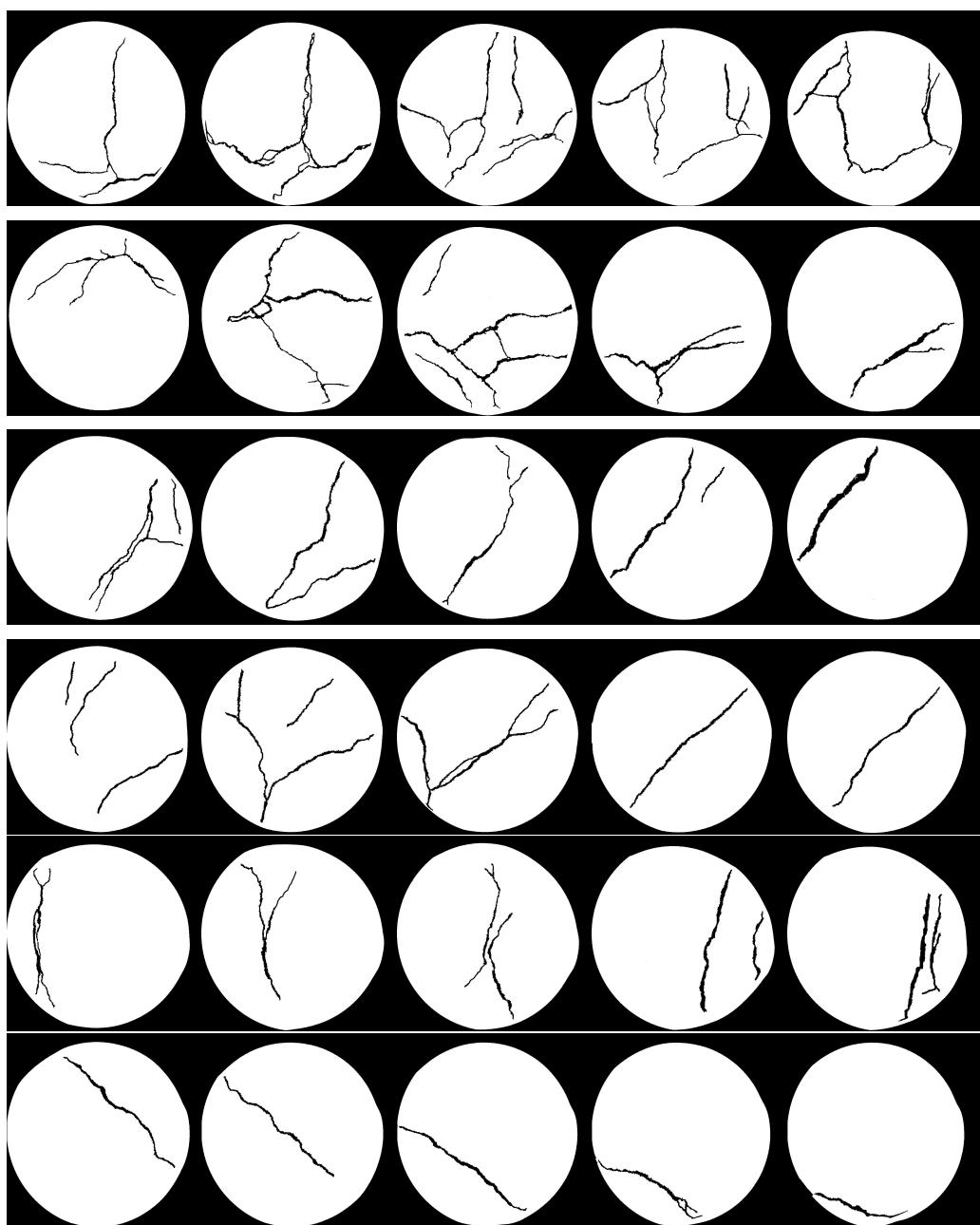


图 4 破坏裂纹二值化图

Fig. 4 Binary images of fractured cracks

在处理之后的图像中裂纹周边还存在一些孤立点, 为不影响后续的分析, 还需要对图片进行优化处理, 最终获得了能准确反映破坏裂纹几何形态和分布特征的二值化图, 如图3(b)所示。

2 破坏裂纹展布规律及表征方法

按照上述图片处理方法, 将6组不同围压应力下18个样品的裂缝扩展CT图片进行了处理, 提取了全部裂纹的几何形态信息。作为代表, 图4给出了6组不同围压应力岩石破坏后的裂纹几何形态图。由于篇幅所限, 每个围压应力下选取了第15, 35, 55, 75, 和95层作为代表层。为了定量分析不同围压应力下裂纹的空间形态特征, 引入面积、长度、宽度和分形等几何参数, 描述了6组围压条件下岩石破坏裂纹宽度、长度、面积和分形维数的分布特征, 分析了围压应力对上述裂纹几何特征的影响规律。

2.1 裂纹面积分布特征

利用自编程序统计并计算了6组围压下18个试件CT扫描图中的裂纹面积, 根据每个试件裂纹面积的最小值和最大值范围, 将裂纹面积分为8个区间, 计算落入每个区间内的裂纹个数, 得到了裂纹面积分布概率密度, 同时给出了分布特征的拟合曲线及拟合方程, 如图5所示。

同时, 计算了6组围压条件下所有裂纹面积的平均值和均方差, 计算公式为

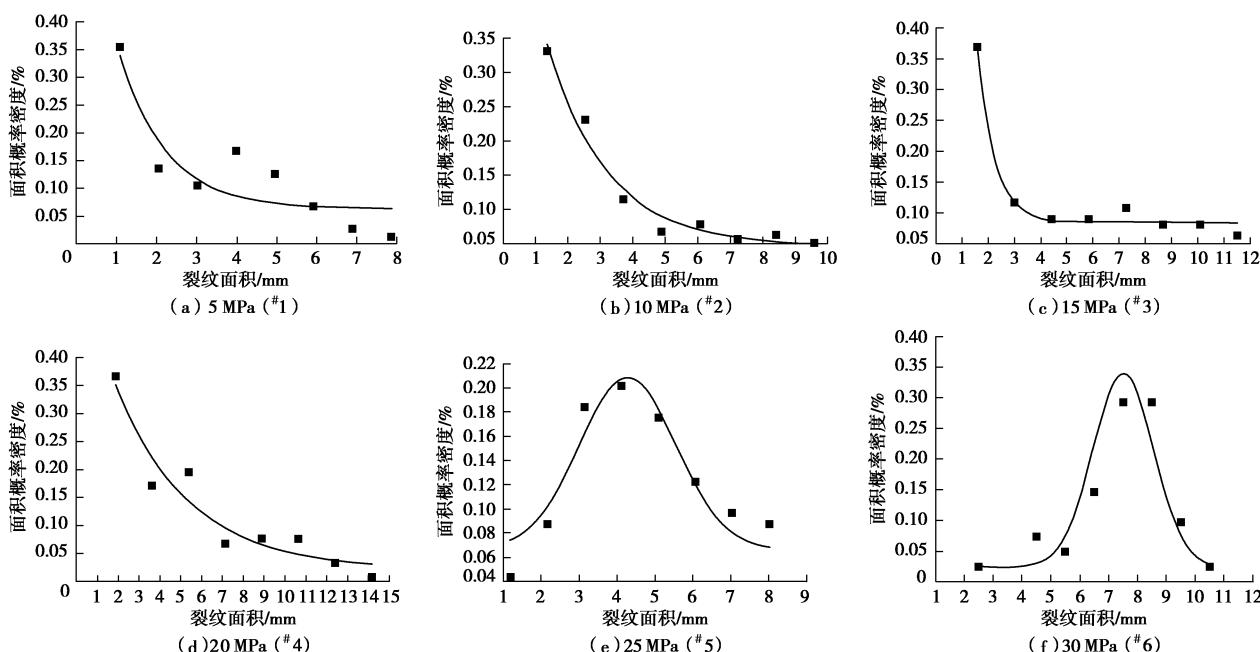


图5 破坏裂纹面积概率密度分布

Fig. 5 Probability density of fractured crack area

$$\left. \begin{aligned} \mu_A &= \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N}, \\ \sigma_A &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)^2}{N}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, μ_A 表示裂纹面积均值, σ_A 为裂纹面积均方差。图6给出了面积平均值和均方差随围压的变化关系。

不同围压条件下破坏裂纹面积的分布特征具有明显差异。当围压 ≤ 20 MPa时, 裂纹面积的概率密度近似服从指数分布, 表达式可统一表示为

$$y = A e^{-x/t} + B, \quad (2)$$

式中, A , B 和 t 为待定参数, 根据本文的试验结果, 当围压为 5 MPa 时, 可取 $A=0.69$, $B=0.06$, $t=1.18$; 当围压为 10 MPa 时, 可取 $A=0.61$, $B=0.05$, $t=1.87$; 当围压为 15 MPa 时, 可取 $A=3.16$, $B=0.08$, $t=0.66$; 当围压为 20 MPa 时, 可取 $A=0.56$, $B=0.02$, $t=3.54$ 。

当围压为 20~30 MPa 时, 裂纹面积的概率密度分布近似服从高斯函数, 可表示为

$$y = y_0 + \frac{A}{W\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{W^2}}, \quad (3)$$

式中, y_0 , A , W 和 x_c 为待定参数, 本文试验条件下: 围压为 25 MPa 时, $y_0=0.07$, $A=0.46$, $W=2.56$ 和 $x_c=4.27$; 当围压为 30 MPa 时, $y_0=0.02$, $A=0.83$, $W=2.09$ 和 $x_c=7.5$ 。

从图5, 6中可直观看出, 随着围压的增大, 破坏裂纹面积概率密度分布由指数分布转变为高斯分布,

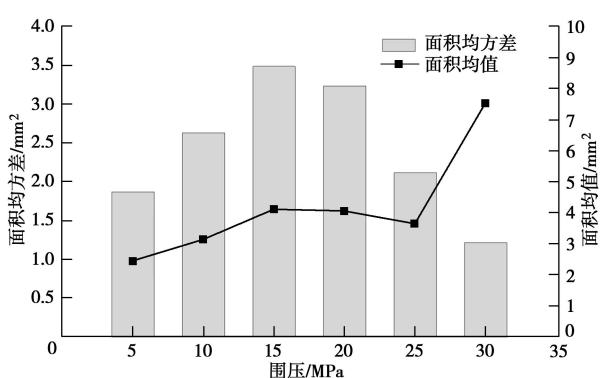


图 6 破坏裂纹面积的均值和均方差

Fig. 6 Mean value and standard deviation of crack area

当围压为 5 MPa 时, 面积在 2 mm^2 以下的裂纹数占 49%, 在 $2 \sim 4 \text{ mm}^2$ 之间的占 28%, 4 mm^2 以上的仅占了 23%, 裂纹的平均值为 2.45 mm^2 。由此可见, 5 MPa 围压应力条件下破坏裂纹主要以小面积裂纹为主, 裂纹面积大部分低于 2 mm^2 。当围压为 10 MPa 时, 面积小于 2.53 mm^2 的裂纹数占裂纹总数的 56%, 在 $2.53 \sim 4.88 \text{ mm}^2$ 之间的占 19%, 裂纹的平均值为 3.15 mm^2 。相比围压为 5 MPa 时, 占总裂纹数比重较大的裂纹的面积有所增大, 但破坏裂纹仍以小面积裂纹为主。当围压增大到 15 MPa 时, 比例占 50% 左右的裂纹的面积上限值增加到了 3 mm^2 , 而 $3 \sim 5.83 \text{ mm}^2$ 之间的裂纹数占到了 18%, 平均值为 4.12 mm^2 。当围压为 20 MPa 时, 占总数 50% 左右的裂纹的面积上限值则为 3.62 mm^2 , $3.62 \sim 7.13 \text{ mm}^2$ 之间的裂纹数占 27%, 平均值为 4.05 mm^2 。当围压继续增加到 25 MPa 时, 小于 3.14 mm^2 的裂纹仅占了 13%, $3.14 \sim 6.06 \text{ mm}^2$ 的裂纹的个数占总数的 68%, 平均值为 3.66 mm^2 ; 当

围压达到 30 MPa 时, 仅处于 $5.5 \sim 8.5 \text{ mm}^2$ 之间的裂纹就占据了总数的 73%, 小于 5.5 mm^2 的仅占了 14%, 平均值为 7.53 mm^2 。

由此可见, 当围压较小时 ($\leq 10 \text{ MPa}$), 破坏裂纹主要以小面积裂纹为主, 裂纹面积的平均值较小, 且每个裂纹的面积都在平均值附近徘徊, 离散性不大 (均方差相对较小)。而随着围压的增大 (不超过 20 MPa 时), 较大面积裂纹的个数有所增加, 裂纹面积的平均值增大, 且面积的均方差变大, 说明同时存在大面积和小面积的裂纹, 但仍以小面积裂纹为主。在同一围压条件下 ($\leq 20 \text{ MPa}$), 裂纹面积的概率密度均呈指数递减的分布趋势, 说明破坏裂纹的面积越大, 所占的数量比重则越少。当围压达到 $25 \sim 30 \text{ MPa}$ 时, 破坏裂纹面积的概率密度服从高斯分布, 大面积裂纹个数占据裂纹总数的 60% 以上, 且相比低围压时 ($\leq 20 \text{ MPa}$), 裂纹面积的平均值增大, 且离散性较小, 说明高围压条件下产生了面积较大的裂纹, 而没有了小面积裂纹。

2.2 裂纹长度分布特征

采用同样的方法对 6 组围压下每个试件所有裂纹的长度进行了统计分析 (裂纹长度相当于将裂纹拉直后的总长, 通过统计计算裂纹占用的像素点个数即可获得)。图 7 给出了裂纹长度分布概率密度曲线。利用相同的公式计算了 6 组围压条件下所有裂纹长度的平均值和均方差, 图 8 给出了长度平均值和均方差随围压的变化关系。

从图 7、8 中可看出, 当围压为 5 MPa 时, 裂纹长度的概率密度分布呈下降趋势近似服从线性函数, 裂纹长度的平均值为 29.4 mm , 长度小于 30 mm 的裂

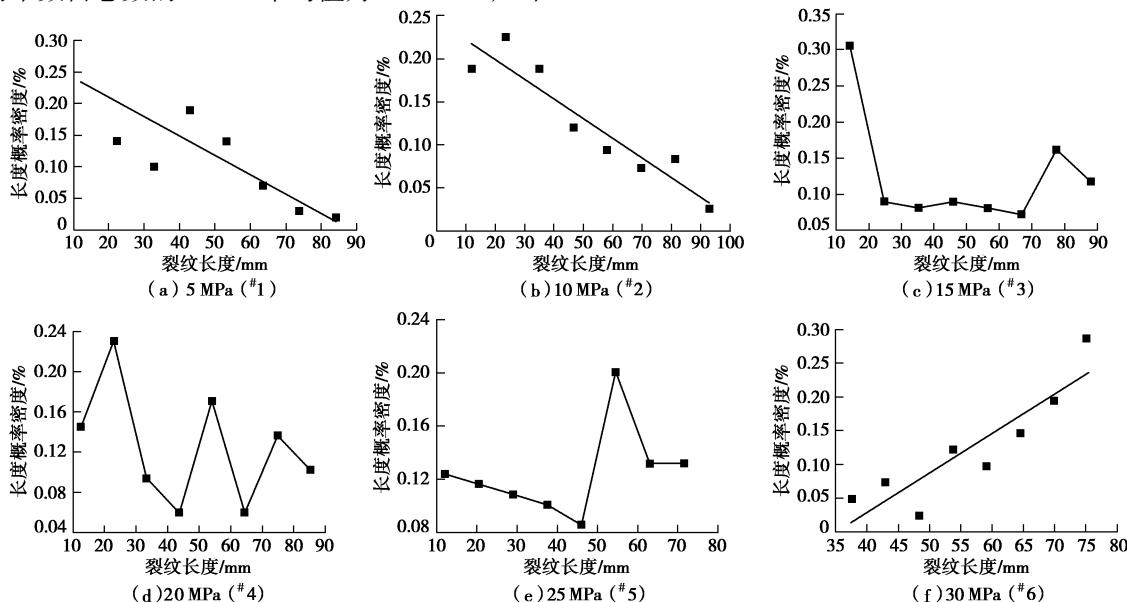


图 7 破坏裂纹长度概率密度分布

Fig. 7 Pobability density of fractured crack length

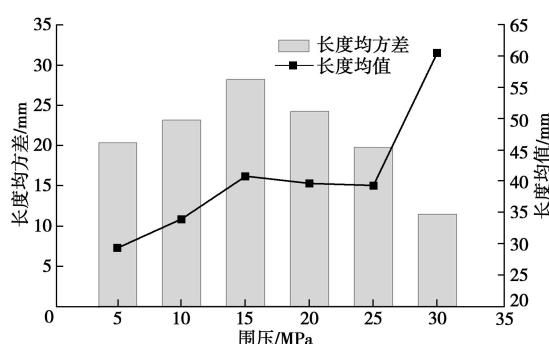


图 8 破坏裂纹长度的均值和均方差

Fig. 8 Mean value and standard deviation of crack length

纹占了总裂纹数的 54%，超过了总数的一半，而长度大于 60 mm 的裂纹仅占了 10.2%；当围压为 10 MPa 时，裂纹长度的概率密度近似服从线性分布并呈递减趋势，平均值为 33.9 mm，小于 30 mm 的裂纹比例为 53%，大于 60 mm 的比例为 16%。由此说明在低围压条件下 (≤ 10 MPa)，破坏裂纹主要以短裂纹为主。当围压为 15 MPa 和 20 MPa 时，裂纹长度概率密度分布曲线总体上仍呈递减趋势，但已找不到较好的拟合公式。裂纹长度的平均值分别为 40.9, 39.7 mm，长度小于 30 mm 的裂纹占总裂纹数的均为 44%，大于 60 mm 的裂纹比例为 25%~32%，为相比低围压时，短裂纹数量有所减少，长裂纹的数量有所增加。当围压达到 25~30 MPa 时，随着围压的增大，占据裂纹总数比重较大的裂纹的长度明显增长，围压为 25 MPa 时长度的概率密度也没有很好的拟合公式，但数据点连接曲线的峰值点位于了 55 mm 附近，长度超过 55 mm 的裂纹占据了 60%，平均值为 39.4 mm。而当围

压为 30 MPa 时，概率密度分布呈直线上升趋势，较好地满足线性分布，长裂纹占据了裂纹总数相当大的比重，超过 60 mm 长的裂纹数达到了 64%，且小于 30 mm 的裂纹几乎没有，裂纹长度的平均值达到了 60.5 mm。

由此可见，围压对裂纹长度分布特征有显著的影响，当围压低于 10 MPa 时，破坏裂纹长度概率密度近似满足线性分布，并呈下降趋势。裂纹长度的平均值较小，均方差也相对较小，说明低围压条件下 (≤ 10 MPa)，试件破裂时主要以短裂纹为主，长裂纹较少。当围压为 10~20 MPa 时，破坏裂纹长度的概率密度基本都呈递减趋势，没有较好的分布曲线拟合公式。相比低围压时，裂纹长度的平均值增大，均方差也增大，说明同时存在长裂纹和短裂纹，短裂纹数量有所减少，长裂纹的数量相对增加，但仍以短裂纹为主。当围压超过 20 MPa 时，裂纹长度概率密度则出现了递增的趋势，裂纹长度的平均值增大，均方差减小，说明随着围压的增大，长裂纹数量明显增加，短裂纹逐渐消失，当围压达到 30 MPa 时，裂纹长度概率密度呈线性增长趋势，平均值达到了 60.5 mm，破坏裂纹主要以长裂纹为主，而没有了短裂纹。

2.3 裂纹宽度分布特征

对 6 组围压下每个试件所有裂纹的宽度（指的是每条裂纹的平均宽度）进行了统计分析。图 9 给出了裂纹宽度分布概率密度曲线。图 10 给出了裂纹宽度的平均值和均方差分布图。

从图 9 中可知，6 组不同围压条件下破坏裂纹宽度概率密度都近似服从高斯分布，表达式如式 (3) 所

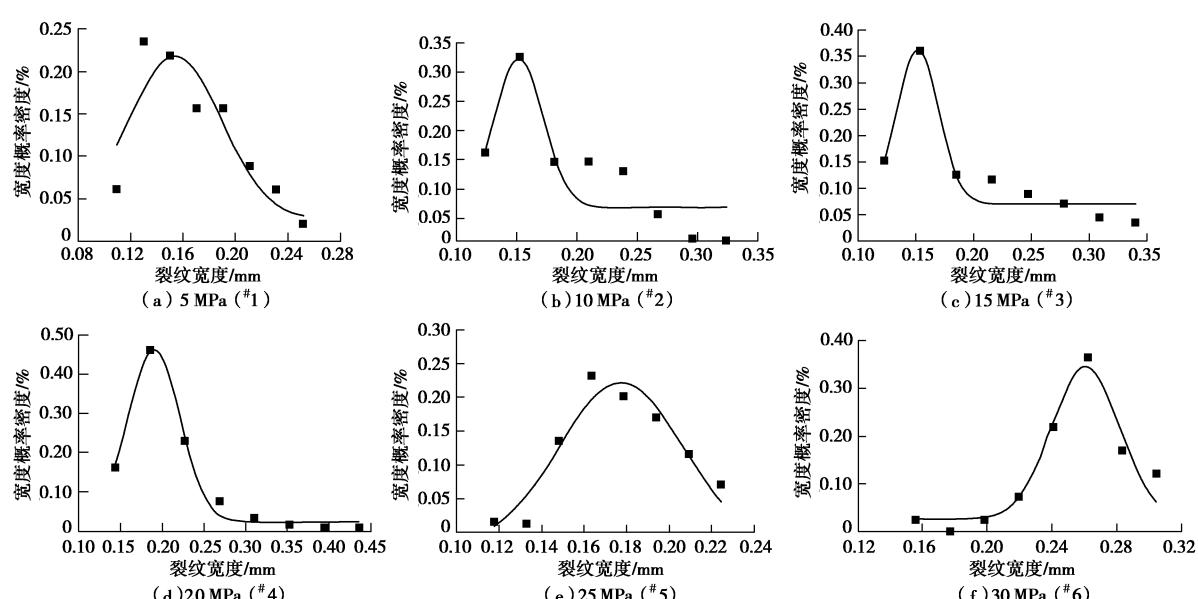


图 9 破坏裂纹宽度概率密度分布

Fig. 9 Probability density of fractured crack width

表1 不同围压下裂纹的分形维数

Table 1 Fractal dimensions of fractured cracks subjected to different confined pressures

| 裂纹图代表层 | 5 MPa | 10 MPa | 15 MPa | 20 MPa | 25 MPa | 30 MPa |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 第 15 层 | 1.598 | 1.581 | 1.580 | 1.577 | 1.578 | 1.563 |
| 第 35 层 | 1.619 | 1.598 | 1.573 | 1.581 | 1.593 | 1.562 |
| 第 55 层 | 1.641 | 1.620 | 1.579 | 1.568 | 1.561 | 1.582 |
| 第 75 层 | 1.640 | 1.584 | 1.583 | 1.577 | 1.564 | 1.561 |
| 第 95 层 | 1.651 | 1.578 | 1.594 | 1.587 | 1.570 | 1.579 |
| 平均值 | 1.630 | 1.592 | 1.582 | 1.578 | 1.573 | 1.569 |

示, 根据试验结果, 拟合公式中的参数选取如下: 围压为 5 MPa 时, $y_0=0.026$, $A=0.017$, $W=0.071$, $x_c=0.154$; 围压为 10 MPa 时, $y_0=0.069$, $A=0.013$, $W=0.04$, $x_c=0.151$; 围压为 15 MPa 时, $y_0=0.072$, $A=0.013$, $W=0.036$, $x_c=0.152$; 围压为 20 MPa 时, $y_0=0.024$, $A=0.034$, $W=0.062$, $x_c=0.189$; 围压为 25 MPa 时, $y_0=-0.019$, $A=0.018$, $W=0.058$, $x_c=0.177$; 围压为 30 MPa 时, $y_0=0.026$, $A=0.017$, $W=0.042$, $x_c=0.26$ 。

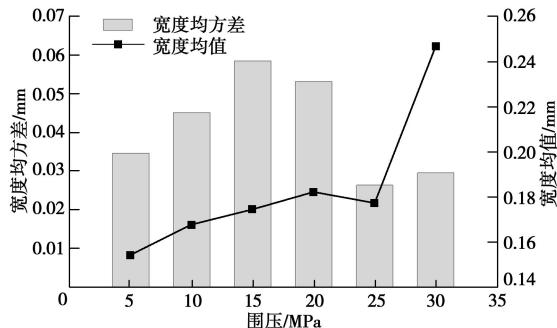


图 10 破坏裂纹宽度的均值和均方差

Fig. 10 Mean value and standard deviation of crack width

经分析可知, 围压应力对破坏裂纹宽度的分布特征有一定影响, 随着围压的增加, 裂纹宽度的平均值逐渐在增大, 分别为 0.154, 0.168, 0.175, 0.182, 0.177, 0.247 mm, 而均方差先增加后减少。6 组围压条件下, 裂纹宽度的概率密度均近似满足高斯分布, 随着围压的增加, 拟合曲线的峰值点对应的 x 值增大, 说明在每个围压下占据破坏裂纹总数较大比重的裂纹的宽度在增加, 从而导致裂纹宽度的平均值随着围压的增加而增大。在较低围压时, 裂纹宽度的均方差较小, 说明裂纹宽度的离散性不大, 主要以宽度小的裂纹为主。当围压增大时, 均方差也随之增大, 说明裂纹宽度的分布离散性变大, 既存在宽的裂纹, 也存在窄的裂纹。当围压继续增大时, 裂纹宽度的均方差又变小, 说明高围压条件下裂纹宽度增加, 且宽裂纹占据较大比重, 而窄裂纹减少。

2.4 裂纹形态的分形特征

为了分析破坏裂纹的粗糙程度, 探讨围压应力对裂纹形貌特征的影响, 引入分形, 计算了 6 组围压下裂纹形态的几何分形维数。计盒维数作为一种计算分

形维数的方法, 能很好地描述和刻画裂纹形貌的不规则特性, 本文采用计盒维数法来计算破坏裂纹的分形维数。

简单来说, 计盒维数的计算方法是将图像划分为边长是 δ 的网格, 然后计算出覆盖图像 F 中的网格数目 N_{δ_k} , 由式 (4) 可计算出分形维数 D_B [21]:

$$D_B = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\ln N_{\delta_k}(F)}{-\ln \delta_k}, \quad (4)$$

式中, N_{δ_k} 为与图像 F 相交的网格个数, 当 $\delta_k \rightarrow 0$ 时, $\ln N_{\delta_k} / \ln(1/\delta_k) \rightarrow D_B$ 。

选取每组围压下第 15 层、35 层、55 层、75 层、和 95 层的 CT 图作为代表层, 通过自编程序计算出所有代表层裂纹的分形盒维数, 然后对每组围压下裂纹的分形盒维数取平均值, 即可求出 6 组围压条件下每个试件破坏裂纹的分形盒维数, 计算结果如表 1 所示。

裂纹分形维数随围压变化的关系曲线如图 11 所示, 较好地满足指数分布, 拟合公式如下:

$$D_B = Ae^{-P/t} + B, \quad (5)$$

式中, D_B 表示破坏裂纹分形维数, P 表示围压应力。待定参数分别取 $A=0.1471$, $B=1.5714$, $t=5.3788$ 。

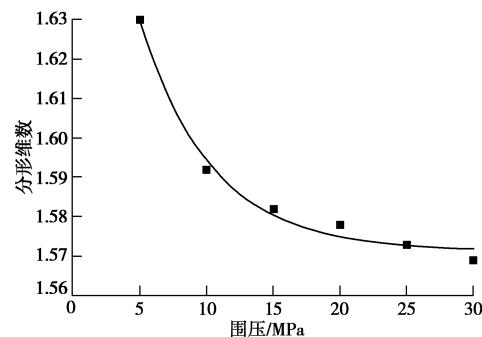


图 11 破坏裂纹分形维数与围压的关系

Fig. 11 Relationship between fractal of fractured cracks and confined pressure

破坏裂纹的分形维数随着围压增大而减小, 呈指数递减趋势。当围压较低时 (≤ 10 MPa), 砂岩的破坏形式主要以劈裂破坏为主, 裂纹的分形维数较大, 说明低围压条件下破坏裂纹的形态复杂, 裂纹曲线边界粗糙, 产生的小裂纹较多, 裂纹相互交错分布, 形成的裂纹网络结构占据了整个试件二维横截面图。随

着围压的增大, 试件的破坏形式变成了剪切破坏, 分形维数降低, 说明破坏裂纹形态趋于规则, 裂纹曲线由粗糙变为相对光滑, 小裂纹减少, 在二维横截面图像中形成了几条长而直的光滑裂纹。当围压继续增大时 (>20 MPa), 试样的破坏形式仍以剪切破坏为主, 破坏裂纹的分形维数继续减小, 裂纹更加光滑, 小裂纹基本消失, 最终形成了 1 或 2 条近似直线的裂纹分布在二维横截面图中。

3 结 论

本文利用三轴试验机和 CT 扫描设备, 开展了多组不同围压作用下的三轴压缩试验及裂纹形态 CT 扫描试验, 分析了三轴围压作用下岩石裂纹展布空间形态特征, 引入裂纹的宽度、长度、面积和分形维数等参数, 描述了不同围压条件下岩石破坏裂纹宽度、长度、面积和分形维数的分布特征, 分析了围压应力对上述裂纹几何特征的影响规律。得到以下 4 点结论。

(1) 不同围压条件下破坏裂纹面积的分布特征具有明显差异。当围压较小时 (≤ 10 MPa), 破坏裂纹面积服从指数分布, 主要以小面积裂纹为主, 裂纹面积的平均值较小; 随着围压的增大 (不超过 20 MPa 时), 裂纹面积分布特征没有改变, 但较大面积裂纹的个数有所增加, 同时存在大面积和小面积的裂纹, 但仍以小面积裂纹为主。当围压达到 25~30 MPa 时, 破坏裂纹面积服从高斯分布, 相比低围压时 (≤ 20 MPa), 裂纹面积的平均值增大, 且离散性较小。高围压条件下主要以大面积裂纹为主, 而没有了小面积裂纹。

(2) 围压对裂纹长度分布特征有显著的影响, 当围压应力低于 10 MPa 时, 破坏裂纹长度呈下降趋势近似满足线性分布, 试件破裂时主要以短裂纹为主, 长裂纹较少。随着围压的增大, 短裂纹数量减少, 长裂纹的数量相对增加, 但仍以短裂纹为主。当围压应力达到 30 MPa 时, 线性递减分布特征变成了线性递增的分布特征, 主要以长裂纹为主, 而没有了短裂纹。

(3) 围压对破坏裂纹宽度的分布特征有一定的影响。6 组围压条件下裂纹宽度的概率密度均近似满足高斯分布, 随着围压的增加, 每个围压下占据破坏裂纹总数较大比重的裂纹的宽度在增加。围压较低时, 主要以宽度小的裂纹为主。随着围压的增大, 裂纹宽度的平均值变大, 分布离散性也变大, 说明既存在宽的裂纹, 也存在窄的裂纹, 且较宽裂纹数的比重增加。围压继续增大时, 裂纹宽度明显增加, 宽裂纹占据比重更大, 而窄裂纹减少。

(4) 破坏裂纹的分形维数随着围压增大而减小,

呈指数递减趋势。低围压条件下 (≤ 10 MPa), 砂岩主要以劈裂破坏为主, 破坏裂纹的分形维数较大, 裂纹的形态复杂, 曲线边界粗糙, 产生的小裂纹较多, 且相互交错分布, 形成的裂纹网络结构占据了整个试件二维横截面图。随着围压的增大, 砂岩的破坏形式变为剪切破坏, 破坏裂纹的分形维数降低, 形态趋于规则, 裂纹曲线由粗糙转变为相对光滑, 小裂纹减少。当围压继续增大时 (>20 MPa), 仍以剪切破坏为主, 破坏裂纹的分形维数继续减小, 裂纹更加光滑, 小裂纹基本消失, 最终形成了 1 或 2 条近似直线的主裂纹。

参 考 文 献:

- [1] 张群, 冯三利, 杨锡禄. 试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 230~235. (ZHANG Qun, FENG San-li, YANG Xi-lu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane resource in China[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 230~235. (in Chinese))
- [2] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257~264. (DAI Jin-xing, NI Yun-yan, WU Xiao-qi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257~264. (in Chinese))
- [3] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641~653. (ZOU Cai-neng, DONG Da-zhong, WANG She-jiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641~653. (in Chinese))
- [4] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14~26. (ZOU Cai-neng, YANG Zhi, CUI Jing-wei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14~26. (in Chinese))
- [5] GREEN A E, SNEDDON I N. The distribution of stress in the neighbourhood of a flat elliptical crack in an elastic solid[J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1950, 46(1): 159~163.
- [6] PERKINS T K, KERN L R. Widths of hydraulic fractures[J]. Journal of Petroleum Technology, 1961, 13(9): 937~949.
- [7] NORDREN R P. Propagation of a vertical hydraulic fracture[J].

- SPE Journal, 1972, **12**(4): 306 - 314.
- [8] WARPINSKI N, CLARK J, SCHMIDT R, et al. Laboratory investigation on the effect of in-situ stress on hydraulic fracture containment[J]. SPE Journal, 1982, **22**(3): 55 - 66.
- [9] 黄辅琼, 欧阳健, 肖承文. 储层岩心裂缝与试件裂缝定量描述方法研究[J]. 测井技术信息, 1997, **21**(5): 356 - 360. (HUANG Fu-qiong, OU-YANG Jian, XIAO Cheng-wen. A quantitative description method for cores and tested samples fractures[J]. Well Logging Technology Information, 1997, **21**(5): 356 - 360. (in Chinese))
- [10] SATO A, HIRAKAWA Y, SUGAWARA K. Mixed mode crack propagation of homogenized cracks by the two-dimensional DDM analysis[J]. Construction and Building Materials, 2001, **15**(5/6): 247 - 261.
- [11] WONG R H C, WANG S W. Experiment and numerical study on the effect of material property, normal stress and the position of joint on the progressive failure under direct shear[C]// NARMS-TAC, Mining and Tunneling Innovation and Opportunity. Toronto: 2002: 1009 - 1016.
- [12] 任建喜, 冯晓光, 刘慧. 三轴压缩单一裂隙砂岩细观损伤破坏特性 CT 分析[J]. 西安科技大学学报, 2009, **29**(3): 300 - 304. (REN Jian-xi, FENG Xiao-guang, LIU Hui. CT analysis microscopic damage and failure characteristics of sandstone with single crack under triaxial compression[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, **29**(3): 300 - 304. (in Chinese))
- [13] 李廷春, 吕海波. 三轴压缩载荷作用下单裂隙扩展的 CT 实时扫描试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(2): 289 - 296. (LI Ting-chun, LÜ Hai-bo. CT real-time scanning tests on single crack propagation under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(2): 289 - 296. (in Chinese))
- [14] 梁正召, 李连崇, 唐世斌, 等. 岩石三维表面裂纹扩展机理数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1615 - 1622. (LIANG Zheng-zhao, LI Lian-chong, TANG Shi-bin, et al. 3D numerical simulation of growth of surface crack of rock specimens[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(10): 1615 - 1622. (in Chinese))
- [15] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 类岩石材料有序多裂纹体单轴压缩破断试验与翼形断裂数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wen-jun, et al. Fracture experiment of ordered multi-crack body in rock-like material under uniaxial compression and numerical simulation of wing cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2097 - 2109. (in Chinese))
- [16] 赵延林, 万文, 王卫军, 等. 类岩石裂纹压剪流变断裂与亚临界扩展试验及破坏机制[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (ZHAO Yan-lin, WAN Wen, WANG Wei-jun, et al. Compressive-shear rheological fracture of rock-like cracks and subcritical crack propagation test and fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 1050 - 1059. (in Chinese))
- [17] 杨圣奇, 刘相如. 不同围压下断续预制裂隙大理岩扩容特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (YANG Sheng-qi, LIU Xiang-ru. Experimental investigation on dilatancy behavior of marble with pre-existing fissures under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(12): 2188 - 2197. (in Chinese))
- [18] 谢和平, 陈至达. 岩石类材料裂纹分叉非规则性几何的分形效应[J]. 力学学报, 1989, **21**(5): 613 - 618. (XIE He-ping, CHEN Zhi-da. The fractal effect of irregular geometry on crack bifurcation of rock materials[J]. Acta Mechanica Sinica, 1989, **21**(5): 613 - 618. (in Chinese))
- [19] LAUBACH S, MARRETT R, OLSON J. New directions in fracture characterization[J]. The Leading Edge, 2000, **19**(7): 704 - 711.
- [20] OUAHED E, KOUIDER A, TIAB D, et al. Application of artificial intelligence to characterize naturally fractured zones in Hassi Messaoud Oil Field, Algeria[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2005, **49**(3/4): 122 - 141.
- [21] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (XIE He-ping, XUE Xiu-qian. The mathematical foundation and method of Fractal application[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))