

文章编号:0253-9993(2012)06-0931-05

AMD 蚀化砂岩细观力学效应

姜立春¹, 温 勇², 吴爱祥³

(1. 华南理工大学 安全科学与工程研究所, 广东 广州 510640; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 3. 北京科技大学 土木与环境学院, 北京 100083)

摘 要:通过 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液蚀化下砂岩细观结构及力学试验, 分析砂岩细观结构及力学性质变化规律; 运用分形理论描述砂岩细观结构分布特征, 得到 AMD 蚀化下砂岩表面 SEM 图像的分形维数(D); 基于砂岩弹性模量的变化, 引入 AMD 蚀化下砂岩化学损伤变量(w), 建立 w 与 D 之间的关系。结果表明: AMD 蚀化下砂岩细观结构分布具有分形特征, w 与 D 存在较好的线性关系。pH=1.25 时, $w=0.78D-1.62$; pH=3.38 时, $w=0.97D-2.04$, 相关系数均在 0.98 以上。研究结果从细观层次揭示了 AMD 蚀化砂岩力学效应。

关键词:AMD; 砂岩; 细观结构; 力学效应; 分形维数

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A

Mesoscopic mechanical effect on sandstone corroded by acid mine drainage

JIANG Li-chun¹, WEN Yong², WU Ai-xiang³

(1. Institute of Safety Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Through meso-tests and mechanical tests of sandstone corroded by AMD solution with pH values of 1.25 and 3.38, the change rules of meso-structure and mechanics characteristic of sandstone were analyzed. Fractal theory was applied to describe the distribution of the meso-structure and fractal dimensions (D) of SEM image of sandstone by AMD were obtained. A chemical damage variable (w) was introduced based on the variety of elastic modulus, and the relationship between w and D was established. The results show that it has fractal characteristics, there is linear correlation between w and D , while pH value of AMD solution is 1.25, $w=0.78D-1.62$, while pH value is 3.38, $w=0.97D-2.04$. The linear coefficient between w and D is higher than 0.98. The mechanical effect of sandstone by AMD is revealed on meso-level.

Key words: acid mine drainage; sandstone; meso-structure; mechanical effect; fractal dimension

矿山酸性排泄水 (Acid Mine Drainage, AMD) 蚀化是以含硫化物为开采对象露天矿山的一种特殊破坏方式, 它通过改变边坡岩体的细观结构及组成, 影响岩体的宏观力学特性, 长期的累积效应为外荷载触发滑坡创造有利条件^[1-4]。近年来, 水岩化学作用已经引起国内外学者的高度关注^[2-13]。冯夏庭、崔强等^[5-6]通过试验研究了岩石破裂过程的化学-应力耦合效应; Vandiviere 等^[7]从微观角度分析了 AMD 蚀

化石灰石的作用机理; Sracek 等^[8]基于室内模拟方法研究了 AMD 作用对边坡岩体局部力学性质的影响; 姜立春等^[2,9-11]通过室内外试验及数值分析方法, 探讨了 AMD 蚀化边坡岩体的宏观力学效应; 杨慧等^[12]通过分析化学溶液对岩石中裂纹的腐蚀作用, 建立了水岩化学作用下等效裂纹扩展细观力学模型; 李鹏等^[13]从水化学作用对砂岩细观结构的影响效应出发, 基于孔隙率的变化得到了岩石化学损伤变量表达

收稿日期: 2011-01-17 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51174093); 国家自然科学基金重点资助项目 (50934002); “十二五” 国家科技支撑计划资助项目 (2012BAB0802)

作者简介: 姜立春 (1968—), 男, 安徽全椒人, 副教授, 博士。Tel: 020-87111039, E-mail: ginger@scut.edu.cn

式。

AMD 蚀化下岩石细观结构(孔隙、裂隙等)的变化是导致其宏观力学性质改变的内在原因。上述研究主要集中在化学腐蚀下岩石宏观力学效应方面,从细观层次开展岩石力学效应的研究尚较缺乏。因此,加强该领域的研究对于揭示 AMD 蚀化作用机理,防止由此诱发边坡失稳灾害事故具有重要意义。

1 AMD 蚀化室内试验及结果

1.1 制样及试验过程

试验所用岩样为国内某硫铁矿露天边坡体的新鲜砂岩(探矿平硐内,距离边坡面 150 m 处),岩样试件均来自于同一岩体,加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试件(图 1),剔除有缺陷试样,试件共 58 个。岩样成分检测结果表明:岩样主要成分为石英砂岩,部分含有方解石、钠长石、钙长石等;节理间充填物主要为铁质、钙质胶结物泥岩。



图 1 部分试件

Fig. 1 Part of samples

AMD 溶液主要采自边坡采坑底部集水和坡体坡面渗水。经检测,采集的 AMD 溶液 pH 值分别为 1.25, 3.38, 主要离子成分见表 1。

表 1 AMD 溶液主要离子分析结果

Table 1 Main ion compositions of AMD solution

项目	SO_4^{2-}	Fe^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+
采坑集水	3.7×10^3	43.7	137.1	45.4	1.1	4.7
坡面渗水	2.7×10^3	39.9	124.0	42.8	0.8	4.4

将砂岩试件分为 2 组,分别浸泡在 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液中,在保证室温基本不变条件下,以 5 d 为间隔,对蚀化前及蚀化不同天数后的砂岩试件表面形貌进行 SEM 扫描及常规单轴抗压力学试验。测试设备为 INSTRON-1342 型电液伺服控制材料试验机,最大载荷为 250 kN,加载速度为 3 mm/800 s。

经过比选分析,AMD 浸泡 25 d 后,试件节理间的胶结物几乎被溶解,岩石试件的细观特征和力学性能趋于稳定。这里仅对 25 d 浸泡的岩石样本进行分

析。将 AMD 浸泡的 0, 5, 10, 15, 20, 25 d 试件最终的测试结果进行比较。

1.2 AMD 蚀化下砂岩细观结构变化

图 2 和图 3 分别为 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液蚀化不同天数后砂岩试件表面形貌的 SEM 扫描结果。由图可知,未腐蚀的砂岩试件表面细观结构致密,偶见次生孔隙,矿物与矿物之间具有较好的胶结面;经过 AMD 溶液蚀化后的砂岩试件表面细观结构松散,且随着蚀化天数的增加,砂岩试件次生孔隙明显增加,节理间及试件上赋存的胶结物几乎被溶解。

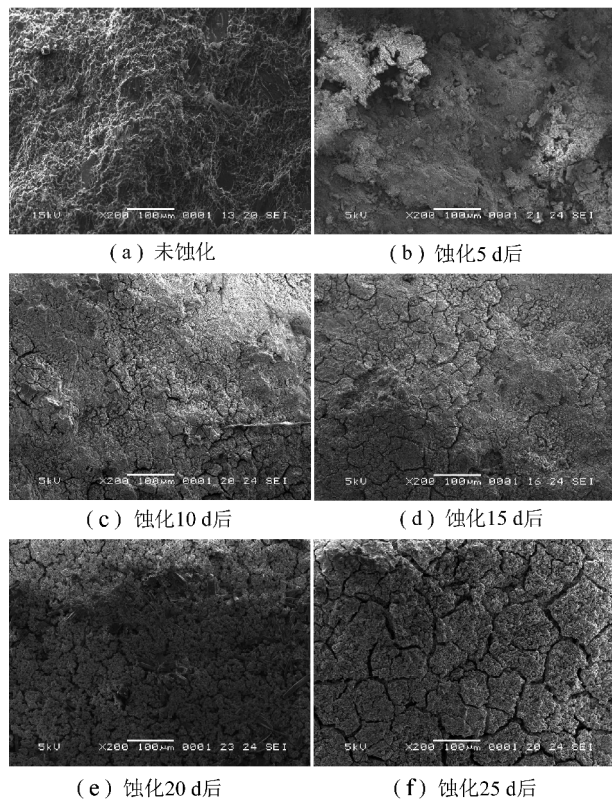


图 2 pH=1.25 的 AMD 蚀化下砂岩的 SEM 图($\times 200$)

Fig. 2 SEM images of sandstone corroded by AMD solution with pH value of 1.25($\times 200$)

1.3 AMD 蚀化下砂岩力学性质变化

图 4 和图 5 分别为 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液蚀化下砂岩试件单轴抗压强度、弹性模量与蚀化时间的关系曲线。由图可知,随着蚀化时间增加,砂岩试件弹性模量、单轴抗压强度持续降低,经过 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液蚀化 25 d 后,弹性模量分别降低 58.61%, 42.46%, 单轴抗压强度分别降低 67.48%, 48.61%。

2 AMD 蚀化下砂岩细观结构分形分析

由于岩石的多相性和不均匀性,利用传统的几何学方法难以定量描述岩石细观结构特征。研究表

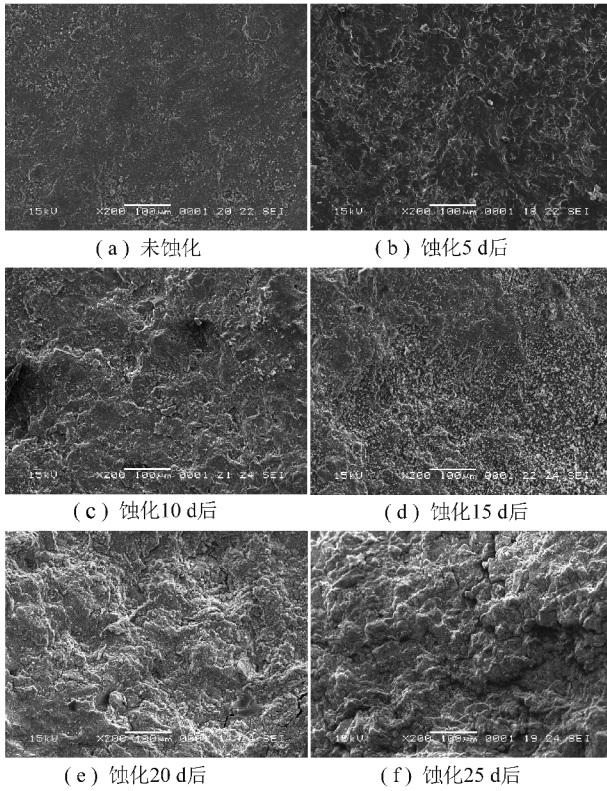


图3 pH=3.38 的 AMD 蚀化下砂岩的 SEM 图($\times 200$)

Fig. 3 SEM images of sandstone corroded by AMD solution with pH value of 3.38 ($\times 200$)

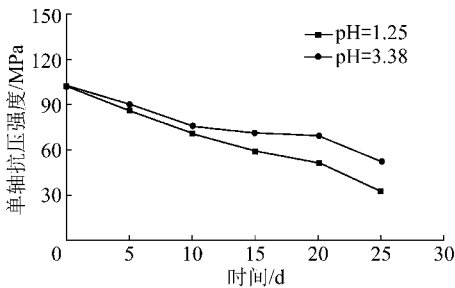


图4 AMD 蚀化下砂岩单轴抗压强度与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between uniaxial compression strength and time of sandstone corroded by AMD

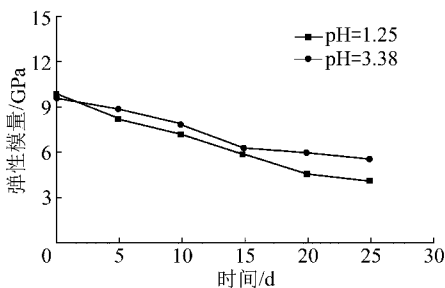


图5 AMD 蚀化下砂岩弹性模量与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between elastic modulus and time of sandstone corroded by AMD

明^[14],岩石孔隙、裂纹在损伤演化过程中具有分形特征。分形理论为 AMD 蚀化下砂岩细观结构分析提

供了一种有效途径。

维数是分形理论中最基本的概念之一,目前已经有许多维数的定义,如盒维数、Hausdorff 维数、自相似维数、容量维数及信息维数等。Sarkar 等^[15]在前人的基础上提出了差分盒维数算法,该方法简单快速、精确,已成为了应用最广泛的维数之一。其主要思想是将 $M \times M$ 大小的图像分割成 $L \times L$ 的子块,令 $a = L/M$ 。

将图像视为一个三维空间中的一个表面 $[x, y, f(x, y)]$,其中 $f(x, y)$ 为图像 (x, y) 位置处的灰度值, X, Y 平面被分割成许多 $L \times L$ 的网格,在每个网格上是一系列 $L \times L \times h$ 的盒子, h 为单个盒子的高度,设总的灰度级为 G ,则 $h/G = L/M = a$ 。设在第 (i, j) 网格中图像灰度的最小值和最大值分别落在第 k 和第 l 个盒子内,则有:

$$n_a(i, j) = l - k + 1 \quad (1)$$

式中, $n_a(i, j)$ 为覆盖第 (i, j) 网格中图像所需的盒子数。

对所有格子 $n_a(i, j)$ 求和,可得

$$N(a) = \sum_{i,j} n_a(i, j) \quad (2)$$

式中, $N(a)$ 为覆盖整个图像所需的盒子数。

对应于不同的网格尺寸 L ,可得到不同的 a 值和 $N(a)$,采用最小二乘法对 $\ln N(a)$ 和 $\ln(1/a)$ 进行线性拟合,直线斜率即为分形维数值 D ,即

$$D = - \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\ln N(a)}{\ln a} \quad (3)$$

以 Matlab 为图像数据处理平台,基于差分盒维数算法,对 AMD 蚀化不同天数后的砂岩表面 SEM 图像进行分形研究,结果如图 6 所示。

由图 6 可知, $\ln N(a)$ 与 $\ln a$ 都具有较强的线性关系,验证了 AMD 蚀化不同天数后的砂岩细观结构具有分形特征。根据式(3)可计算 AMD 蚀化不同天数后砂岩表面 SEM 图像的分形维数,结果见表 2。

由表 2 可知,随着 AMD 蚀化天数的增加, D 逐渐增大,经过 pH 值为 1.25, 3.38 的 AMD 溶液蚀化 25 d 后, D 由蚀化前的 2.12, 2.11 分别增至 2.85, 2.56,较好地描述 AMD 蚀化下砂岩细观结构损伤演化特征。

3 砂岩化学损伤变量与分形维数的关系

3.1 砂岩化学损伤变量定义

对于损伤变量可以有多种定义,由于材料的损伤是引起其细观结构和某些宏观物理性能变化的原因,因此,可从细观和宏观两方面选择度量损伤的基

准^[16-17]。

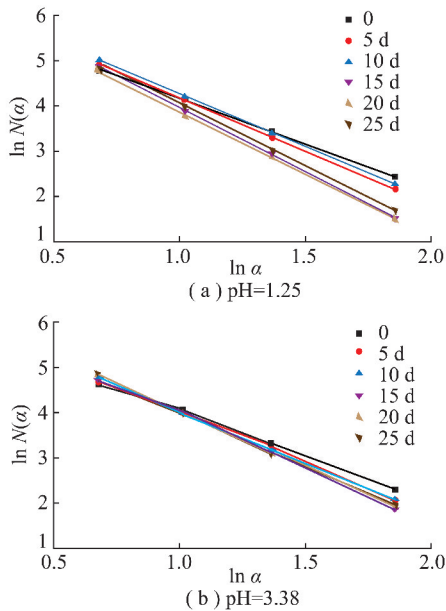


图 6 AMD 蚀化下砂岩 $\ln N(a)$ 与 $\ln a$ 拟合结果

Fig. 6 Fitting results between $\ln N(a)$ and $\ln a$ of sandstone corroded by AMD

表 2 AMD 蚀化下砂岩的分形维数

Table 2 Fractal dimensions of sandstone corroded by AMD

蚀化天数/d	分形维数 D	
	pH=1.25	pH=3.38
0	2.12	2.11
5	2.26	2.20
10	2.40	2.27
15	2.63	2.45
20	2.76	2.49
25	2.85	2.56

宏观损伤变量是从唯象学角度反映损伤对材料宏观性质的影响。由力学试验结果可知,AMD 蚀化后砂岩试件弹性模量、单轴抗压强度等力学参数明显下降。由于砂岩的弹性模量在 AMD 蚀化过程中容易分析和测量,因此,从弹性模量的变化现象入手,定义化学损伤变量为:

$$w = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (4)$$

式中, E_1 为 AMD 蚀化后砂岩的弹性模量; E_0 为未受 AMD 蚀化砂岩的弹性模量。

3.2 砂岩化学损伤变量与分形维数关系

AMD 蚀化下砂岩细观结构的变化是导致其宏观力学效应的内在原因,即砂岩弹性模量、单轴抗压强度等力学参数的劣化与其细观结构的变化存在必然联系。根据试验结果,建立 w 与 D 之间的关系,如图 7 所示。

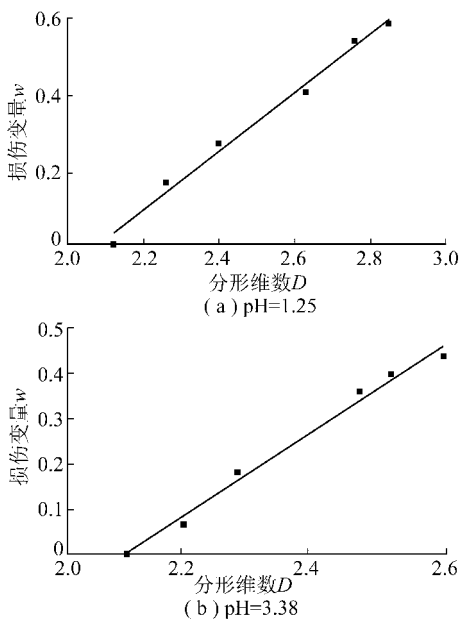


图 7 砂岩化学损伤变量与分形维数关系

Fig. 7 Relationship between chemical damage variable and fractal dimension of sandstone corroded by AMD

由线性回归方法得到 pH=1.25 的 AMD 蚀化不同天数后 w 与 D 之间关系为(相关系数为 0.987):

$$w = 0.78D - 1.62 \quad (5)$$

同理,可得到 pH=3.38 的 AMD 蚀化不同天数后 w 与 D 之间关系为(相关系数为 0.989):

$$w = 0.97D - 2.04 \quad (6)$$

由图 6 可知,随着 D 的增大, w 也随之增大,两者之间存在很好的线性相关性,相关系数均在 0.98 以上,这表明 D 的大小不仅反映 AMD 蚀化下砂岩细观结构的变化,而且还能定量反映砂岩的力学损伤程度,其变化趋势能够表征砂岩的损伤演化过程。 D 的增大是由于 AMD 蚀化引起砂岩孔隙、微裂纹不断变化, w 的增大则是由于砂岩力学参数的劣化,通过建立 w 与 D 之间的关系,从细观层次揭示了 AMD 蚀化砂岩力学效应。

4 结 论

(1)AMD 蚀化试验结果表明,蚀化后的砂岩表面次生孔隙增加,节理间及试件上赋存的微量胶结物大部分被溶解;经过 pH 值为 1.25,3.38 的 AMD 溶液蚀化 25 d 后,砂岩的弹性模量分别降低 58.61%,42.46%,单轴抗压强度分别降低 67.48%,48.61%。

(2)细观结构分形分析表明,AMD 蚀化下砂岩细观结构分布具有分形特征,经过 pH 值为 1.25,3.38 的 AMD 溶液蚀化 25 d 后,砂岩表面 SEM 图像的分形维数(D)由蚀化前的 2.12,2.11 分别增至 2.85,2.56。 D 随着 AMD 蚀化天数的增加而增大,较好地

描述了 AMD 蚀化下砂岩细观结构损伤演化特征。

(3) 砂岩化学损伤变量 (w) 与 D 存在较好的线性关系。pH = 1.25 时, $w = 0.78D - 1.62$; pH = 3.38 时, $w = 0.97D - 2.04$, 相关系数均在 0.98 以上。通过建立 w 与 D 之间的关系, 从细观层次揭示了 AMD 蚀化砂岩力学效应。

参考文献:

- [1] 孙玉科, 杨志法, 丁恩保, 等. 中国露天矿边坡稳定性研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1999.
Sun Yuke, Yang Zhifa, Ding Enbao, et al. Open pit slope stability research in China [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1999.
- [2] 姜立春. 深凹露天矿高陡边坡失稳安全环境分析及工程控制研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
Jiang Lichun. Study on safety environment of high-deep concave slope in open pit & engineering control [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [3] Ata Akcil, Soner Koldas. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies [J]. Journal of Cleaner Production, 2006 (14): 1139-1145.
- [4] 徐则民, 黄润秋, 杨立中. 斜坡水-岩化学作用问题 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2778-2787.
Xu Zemin, Huang Runqiu, Yang Lizhong. Some problems on chemical water-rock interaction in slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2778-2787.
- [5] 冯夏庭, 丁梧秀, 姚华彦, 等. 岩石破裂过程的化学-应力耦合效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Feng Xiating, Ding Wuxiu, Yao Huayan, et al. Coupled chemical-stress effect on rock fracturing press [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [6] 崔强, 冯夏庭. 化学腐蚀下砂岩孔隙结构变化的机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1209-1216.
Cui Qiang, Feng Xiating. Mechanism study of porosity structure change of sandstone under chemical corrosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1209-1216.
- [7] Vandiviere M M, Evangelou V P. Comparative testing between conventional and microencapsulation approaches in controlling pyrite oxidation [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 64(1-3): 161-176.
- [8] Sracek O, Choquette M, Gelinas P, et al. Geochemical characterization of acid mine drainage from a waste rock pile, Mine Doyon, Quebec, Canada [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 69(1-2): 45-71.
- [9] Jiang Lichun, Chen Jiasheng, Wu Aixiang. Erosion characteristic of slope sandstone soaking in acid mine drainage [J]. J. Cent. South Univ. Technol., 2007, 14(2): 236-243.
- [10] 姜立春, 温勇. AMD 蚀化下砂岩的损伤本构模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2011, 42(11): 3502-3506.
Jiang Lichun, Wen Yong. Damage constitutive model of sandstone during corrosion by AMD [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(11): 3502-3506.
- [11] 姜立春, 杜卫卫. 受酸腐蚀岩体强度分布特征研究 [J]. 昆明理工大学学报 (理工版), 2010, 35(4): 6-10.
Jiang Lichun, Du Weiwei. Distribution characteristics of rock mass strength subjected to acid attack [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2010, 35(4): 6-10.
- [12] 杨慧, 曹平, 江学良. 水-岩化学作用等效裂纹扩展细观力学模型 [J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2104-2110.
Yang Hui, Cao Ping, Jiang Xueliang. Micromechanical model for equivalent crack propagation under chemical corrosion of water-rock interaction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2104-2110.
- [13] 李鹏, 刘建, 李国和, 等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 380-386.
Li Peng, Liu Jian, Li Guohe, et al. Experimental study for shear strength characteristics of sandstone under water-rock interaction effects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 380-386.
- [14] 谢和平. 分形-岩石力学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Xie Heping. Fractal and rock mechanics introduction [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [15] Sarkar N, Chauhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 24(1): 115-120.
- [16] 杨更社, 张长庆. 岩体损伤及检测 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
Yang Gengshe, Zhang Changqing. Damage of rock mass and measurement [M]. Xi'an: Shaanxi Technology and Science Press, 1998.
- [17] 张全胜, 杨更社, 任建喜. 岩石损伤变量及本构方程的新探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 30-34.
Zhang Quansheng, Yang Gengshe, Ren Jianxi. New study of damage variable and constitutive equation of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 30-34.