基于岩石节理分形特性的岩体稳定性智能辨识

申 延,李夕兵,刘志祥

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 调查国内大量矿山地质资料,分析其矿岩节理裂隙数据,采用分形理论揭示岩体节理间距和产状分布的分形特性。采用混沌算法优化神经网络,建立矿岩稳定性与其岩石单轴抗压强度、单轴抗拉强度、内摩擦角、内聚力、弹性模量、岩体节理间距分形维数和节理产状分形维数的智能辨识模型,寻求岩体判别新方法。研究表明,岩体节理间距分形维数和产状分布分形维数可反映岩体节理空间分布的整体信息;节理间距分形维数越小,岩体完整性越好;产状分布分形维数越低,节理分散程度越小;即二者分形维数越小,岩体稳定性越好。智能辨识模型可以根据矿岩力学参数、岩体节理分形特征,预测不同地质条件下的岩体质量,为工程支护设计及施工提供依据。

关键词 节理岩体;分形维数;神经网络;智能辨识

中图分类号 TD32 **文献标识码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.26.005

Intelligent Identification of Rock Mass Stability Based on the Fractal Characteristics of Rock Joints

SHEN Yan, LI Xibing, LIU Zhixiang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The fracture data of ore and rock joints are analyzed on the basis of plentiful interior mines geological survey information. And fractal characteristics of spacing and orientation distribution of rock mass joints are showed by using the fractal theory. In order to find the new methods for rock mass discrimination, an intelligent identification model, which embodies the relations among rock mass stability and uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, internal friction angle, cohesion force, elastic module, fractal dimension of rock joints spacing, and fractal dimension of occurrence distribution, is established by using the neural network based on chaos optimization algorithm. Fractal dimensions of rock joints spacing and occurrence distribution that embody the all-distributing information of rock mass are showed as follows: The lower the fractal dimension value of joints spacing is, the better the rock mass integrity is. And the lower the fractal dimension value of orientation distribution is, the smaller the joints dispersion degree is. It means that the lower the both of fractal dimension values are, the better the stability of rock mass will be. According to rock mechanics parameters and joints fractal characters, rock mass stability under different geological conditions could be predicted; and a basis for engineering supporting design and construction could be provided by using the intelligent identification model.

Keywords jointed rock mass; fractal dimension; neural network; intelligent identification

0 引言

岩石力学和岩体工程中最基本研究课题之一即为岩体质量评价,岩体质量的优劣是岩体稳定性的科学判定依据。目前工程应用中常用的岩体质量评价方法主要有岩石质量指标(RQD)分级法、岩体质量系数分级法、工程岩体分级标准法、岩体地质力学分类体系 RMR 法、巴顿岩体质量指标 Q 分类法等,随着新理论的发展与应用,有些学者运用神经网络、灰色聚类法、物元分析等方法研究工程岩体的分类[1]。

收稿日期:2011-07-14;**修回日期**:2011-08-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004);国家自然科学基金、上海宝钢集团公司联合资助项目(51074177)

作者简介:申延,研究方向为岩石力学与采矿技术,电子信箱:hedinshen@csu.edu.cn;李夕兵(通信作者,中国科协所属全国学会个人会员登记号:S330730015M,S032200319M),教授,研究方向为岩石动力学与矿山工程灾害控制,电子信箱:xbli@mail.csu.edu.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于岩体内部存在大量随机不规则结构面,使得常规理论对复杂结构面分布难以定量描述。法国数学家 Mandelbrot 通过对许多形状复杂的不规则物体进行仔细观察和综合分析后,提出了分形概念,首创了分形理论[2]。分形理论的基础是由 Hausdroff 提出的分形维数,分形维数定量描述了分形结构自相似程度、不规则程度或破碎程度。岩体结构面分布的分形维数是岩体强度、形成环境等工程地质特征的综合反映[3-4]。近 20 年来,分形理论在岩土工程中得到广泛应用,在解决工程问题方面已逐渐完善。1993 年,张继春、徐小荷[5]以实测数据发现节理间距分形特性。1998 年,谢和平等[6]提出岩石节理是影响工程岩体稳定性的主要因素之一,总结了分形理论用于岩石节理力学行为研究的进展。2000 年后,岩土工程分形特性得到大量细化研究,陈建平等[7]研究发现岩体节理产状空间分布的几何特征,总结出岩体节理几点分形维数分布的基本规律。分形理论在岩石工程应用的研究进展体现包括:地下空间岩体稳定性不仅与自身力学特性有关;节理发育程度也是其重要影响因素之一。

前人的研究仅从岩石节理分形理论单方面对岩体质量进行探讨,本文在对多个矿山地质资料进行调研的基础上,统计各矿山岩体节理裂隙数据,采用分形理论计算各矿山岩体节理间距分形维数和产状分布分形维数,研究岩体节理裂隙分形特性与其稳定性关系。在此基础上,根据大量矿山的现场数据,结合岩体力学参数建立岩体稳定性分类的神经网络智能辨识模型,作为岩体质量评判新方法。

1　岩体节理裂隙的分形特性

研究表明,岩体节理的间距分布、空间分布均符合分形规律[8-9],具有统计上的自相似特性。岩体节理的长度维数和盒维数符合如下分形关系[10]:

$$N=Cr^{-D} \tag{1}$$

其中,D 为分形维数;C 为常数;对于长度维数而言,N 表示长度大于 r 的节理数量;对于盒维数而言,N 表示尺度为 r 的非空覆盖盒子数。

将式(1)取对数,得到分形维数:

$$D=\frac{\ln C-\ln N}{\ln r} \tag{2}$$

1.1　节理间距分布的分形特性

对山东新城金矿深部巷道(-630—-580m)岩体节理裂隙进行工程地质调查,图 1 为该矿深部上盘和下盘围岩的节理间距统计数据。

对节理间距长度 r 和长度大于 r 的节理数量 N 取对数后,运用最小二乘拟合法进行统计回归分析,结果如图 2 所示。图中红、蓝线分别为该矿上盘和下盘岩体的分形维数计算拟合曲线,直线斜率负值即为上、下盘岩体节理间距的分形维数。围岩上、下盘节理平均间距为 0.3034 和 0.4784m,计算得到围岩上、下盘节理间距分形维数分别为 1.67 和 1.44。

同理,对其他矿山围岩的节理间距分形维数进行计算

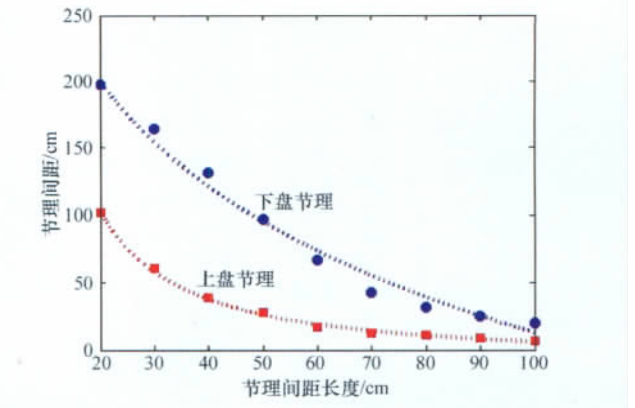


图 1　节理间距统计

Fig. 1　Statistics schema of rock joints spacing

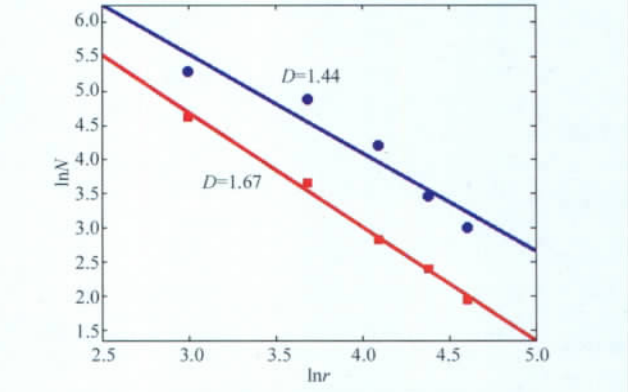


图 2　节理间距分形维数拟合曲线

Fig. 2　Calculating schema of fractal dimension of rock joints

(表 1),结果显示,节理间距长度维数越大,节理平均间距越小,节理越发育;反之,节理间距长度维数越小,节理平均间距越大,岩石完整性越好。但节理平均间距不能反映节理间距的统计分布情况,而分形维数则可反映这一情况,即分形维数越大,节理间距小的部分所占比例越大。

因此,节理间距的分形维数直接反映了节理间距分布形式,较之节理间距平均值更能反映岩体裂隙的发育情况,对岩体稳定性研究有重要意义。

1.2　节理产状分布的分形特性

对山东三山岛金矿-165m 巷道节理产状调查,将节理产状极点投射到以节理倾向为横坐标,节理倾角为纵坐标形成的节理产状散点图上(图 3)。

通过划分不同尺度等面积小方格对节理产状散点图进行覆盖,设分布图尺寸为 360×360,分别取小方格尺度为 40,30,20,15,12,划分等面积方格数为 81,144,324,576,900,进行盒维数计算,发现对尺度 r' 和在该尺度下覆盖极点的方格数 N' 取对数进行回归分析,存在显著的线性关系。对调查数据进行回归分析,图 4 为该阶段上盘围岩、下盘围岩的节理产状分布分形维计算,根据曲线的斜率负值得出节理产状分形维数分别为 0.83、0.69。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

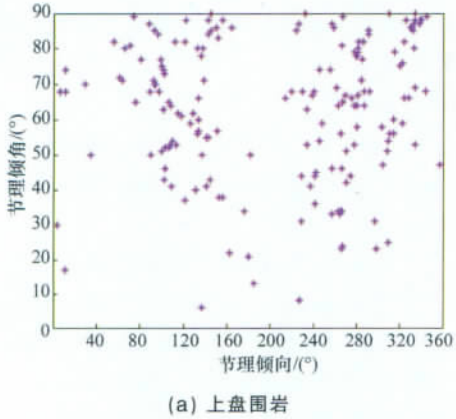
表 1　部分智能辨识模型训练与验证数据

Table 1　Partial data of intelligent identification model in training and validation

矿山名称	岩体序号	岩石类别	岩石单轴抗压强度/MPa	岩石单轴抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	弹性模量/GPa	岩体节理间距分形维数	节理产状分形维数	岩体实际质量判定	智能辨识模型输出
新城金矿	1	黑云母花岗岩	65.10	7.21	47	17.1	35.92	1.44	0.66	III	III
	2	绢英岩化花岗岩	54.62	4.26	49	11.36	50.68	1.41	0.65	III	III
	3	绢英岩化花岗质碎裂岩	46.59	4.11	45	16.39	26.62	1.67	0.78	IV	IV
	4	绢英岩质碎裂岩	59.60	6.58	42	15.67	38.98	1.23	0.53	II	II
三山岛金矿	5	黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩	95.80	6.67	43	13.18	25.13	1.65	0.83	IV	IV
	6	绢英岩化花岗质破碎岩	92.31	8.17	47	22.57	41.22	1.43	0.69	III	III
	7	花岗岩	130.00	11.86	47	20.75	56.16	1.08	0.42	I	I
安庆铜矿	8	矽卡岩	62.28	7.31	46	14.96	62.30	1.22	0.54	II	II
	9	闪长岩	60.24	7.03	50	16.13	39.46	1.33	0.58	III	III
马路坪矿	10	红页岩	33.74	1.56	35	5.87	14.74	1.70	0.88	IV	IV
	11	红页岩	44.89	2.75	40	15.92	13.66	1.74	0.84	IV	IV
冬瓜山铜矿	12	黄龙组大理岩	50.38	3.40	40	11.23	12.80	1.75	0.84	IV	IV
	13	栖霞组大理岩	74.04	8.96	45	12.00	22.31	1.47	0.76	III	III
黄沙坪铅锌矿	14	矽卡岩	73.71	8.92	40	30.50	12.64	1.33	0.58	II	II
	15	花岗斑岩	67.80	7.03	37	28.3	8.88	1.51	0.70	III	III
	16	灰岩	43.3	11.49	40	24.9	11.00	1.46	0.74	III	III
					⋮						
焦家金矿*	68*	绢英岩化花岗岩	66.73*	5.88*	42*	18.21*	36.23*	1.47*	0.71*	III*	III*
	69*	绢英岩化花岗岩	55.78*	5.41*	52*	12.13*	49.72*	1.41*	0.68*	III*	III*
	70*	绢英岩化花岗质碎裂岩	42.56*	6.17*	42*	15.78*	25.78*	1.67*	0.87*	IV*	IV*

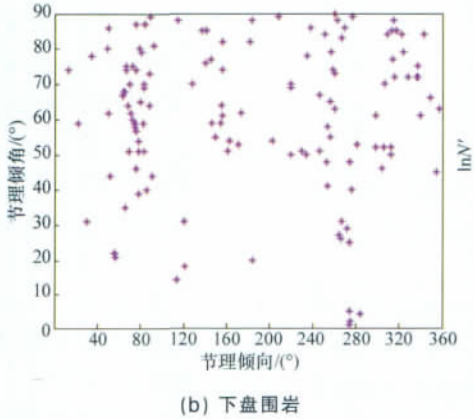
注:* 表示该数据为智能辨识模型验证数据。

Note: *, show the validation data for intelligent identification model.



(a) 上盘围岩

(a) Surrounding rock of handing side



(b) 下盘围岩

(b) Surrounding rock of heading side

图 3　节理产状极点分布图

Fig. 3　Pole distribution schema of rock joints occurrence

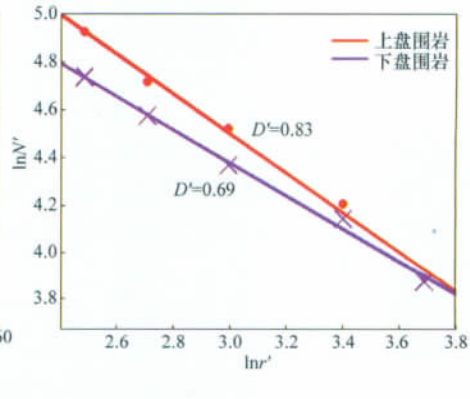


图 4　节理产状分布分形维数拟合曲线

Fig. 4　Calculating schema of fractal dimension of rock joints occurrence distribution

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同理，对其他矿山围岩的节理产状分形维数进行计算(表 1),结果表明,节理产状分形维数越小,节理产状分布越集中;分形维数越大,节理产状分布越分散。

节理产状分形维数大小可衡量节理产状分布分散程度,节理产状分布分散程度较大,表明岩体遭受了多次构造地质作用[7]。因此,节理产状分形维数可较为精确地描述节理空间分布特性,对岩体稳定性研究具有一定参考作用。

2　岩体稳定性智能辨识

2.1　岩体稳定性的神经网络智能辨识模型

人工神经网络(Neural Network,NN)是对人脑若干基本特性的抽象和模拟,具有大规模并行处理、分布式信息存储、学习功能强大等优点[11]。神经网络的学习过程是一种从输入空间到输出空间的非线性映射函数的形成过程[12],学习样本间的内在规律性及包含的知识结构等都通过输入数据与输出数据之间的非线性映射关系得到体现。通过这种输入输出间的非线性映射关系,可以使用神经网络方法建立岩体稳定性智能辨识模型。

岩体稳定性的评判与岩体力学参数(包括岩石单轴抗压强度、单轴抗拉强度、内摩擦角、内聚力、弹性模量)、节理间距分形维数、节理产状分形维数有关,因此用神经网络建立岩体稳定性与其影响因素的预测模型,用以进行岩体稳定性智能辨识。

2.2　智能辨识模型的建立

BP(Back Propagation)神经网络训练与学习算法实质是一种非线性优化问题,采用梯度最速下降法,优点是可以实现快速训练学习与误差反向传播处理,但同时存在陷入局部极小与收敛慢的问题。将 BP 算法应用于大规模样本训练时,必须寻找快速、全局收敛的学习算法[13]。混沌优化在全局寻优过程中具有高效的搜索效率,因此将梯度下降法与混沌优化方法相结合,可以实现神经网络迅速训练与避免陷入局部极小。混沌优化主要是对神经网络的权值与阈值的优化[14],因此本文采取文献[14]神经网络训练方法进行训练,建立岩体稳定性智能辨识模型。

对国内多个矿山地质资料进行统计,用式(2)计算岩体节理间距分形维数以及节理产状分形维数。设岩体稳定性的特征参数为:$\boldsymbol{A}=[A_1\ A_2\ A_3\ A_4\ A_5\ A_6\ A_7]^T$,其中 A_1,A_2,A_3,A_4,A_5,A_6,A_7 分别为岩石单轴抗压强度、岩石单轴抗拉强度、内摩擦角、内聚力、弹性模量、岩体节理间距分形维数、节理产状分形维数;$\boldsymbol{A}$ 为神经网络的输入,A_1—A_7 为 $k\times1$ 数组,k 为每个特征参数连续数据个数,y 为输出。表 1 中岩体实际质量判定采用 CSIR 岩体分级标准,运用指标加权方法,考虑裂隙产状修正,给出工程围岩分类,共将岩体分为 5 级。对智能模型输出进行岩体分类,$y=[1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 为 I 类岩体，稳定性非常好,岩体不用进行支护;$y=[0\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$ 为 II 类岩体，稳定性好,岩体基本不用支护或局部采用锚杆支护;$y=[0\ 0\ 1\ 0\ 0]^T$ 为 III 类岩体,稳定性一般,开采后需要采取支护措施;$y=[0\ 0\ 0\ 1\ 0]^T$ 为 IV 类岩体，稳定性差，开采后需要及时采取高强度支护措施(如锚杆与金属网联合支护后喷射混凝土);$y=[0\ 0\ 0\ 0\ 1]^T$ 为 V 类岩体,稳定性非常差。

用于表 1 中部分矿山工程实际数据和 CSIR 工程岩体实际质量判定(均来自各矿山地质资料及岩石力学报告)训练神经网络,建立岩体稳定性智能辨识模型。

焦家金矿工程岩体数据未用于建立神经网络模型,采用智能辨识模型对焦家金矿岩体质量进行判定，输出结果 y 分别为:$[0.0286\ 0.1581\ 0.5986\ 0.2046\ 0.0101]^T$、$[0.0765\ 0.1287\ 0.5610\ 0.1846\ 0.04918]^T$、$[0.0053\ 0.1082\ 0.2167\ 0.5452\ 0.1246]^T$,由此可判断,它们分别属于 III、III 和 IV 类岩体。智能辨识结果与实际相符。

因此本文模型能够根据岩石力学参数、节理间距分形维数和节理产状分形维数,对不同岩体质量进行判定与预测。

3　工程应用

山东寺庄金矿位于胶东半岛西北部莱州市境内,隶属于焦家金矿。为实现企业规模生产,配合选产改扩建工程,寺庄矿区准备开发-220m 中段以上矿体。地质探明-220m 中段及以上的 7# 矿体为低贫厚大矿体,但未进行开采,随着近年来金价上涨，若对该矿体采用低成本高效开采方法进行开采,经济效益显著。开采前有必要对其围岩及矿体稳定性进行分析和预测,以便及时做好巷道支护工作。在该矿区对几处重要巷道的岩石节理裂隙情况及岩石种类进行调查。矿体产于黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩;上盘围岩为黄铁绢英岩化碎裂岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩;下盘围岩为黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩、黄铁绢英岩化花岗岩,绢英岩化花岗质碎裂岩。同时取样测试寺庄金矿上下盘和矿体岩石力学参数,用式(2)计算寺庄金矿 7# 矿体节理的间距分形维数和产状分布分形维数(表 2)。采用前面建立的岩体稳定性智能辨识模型对寺庄矿区岩体稳定性进行预测,智能辨识结果见表 3。

表 2　寺庄矿区岩石力学参数及节理分形维数数据

Table 2　Data of rock mechanics parameters and fractal dimension of rock joints in Sizhuang mines

岩石类别	单轴抗压强度/MPa	单轴抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏结力/MPa	弹性模量/GPa	节理间距分形维数	节理产状分布分形维数
黄铁绢英岩化碎裂岩	40.3	4.25	34.38	18.42	13.60	1.67	0.86
黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩	54.1	7.71	36.34	21.70	28.48	1.44	0.77
绢英岩化花岗质碎裂岩	62.0	10.79	38.38	30.24	21.72	1.47	0.67
黄铁绢英岩化花岗岩	140.0	14.07	35.90	37.09	38.82	1.26	0.47

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　智能辨识结果

Table 3　Results of intelligent identification

岩石类别	黄铁绢英岩化碎裂岩	黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩	绢英岩化花岗质碎裂岩	黄铁绢英岩化花岗岩
智能辨识矩阵	[0.0015 0.2439 0.2672 0.4733 0.0141]^T	[0.0831 0.2569 0.4854 0.0661 0.1085]^T	[0.2422 0.0673 0.3163 0.1189 0.2553]^T	[0.2541 0.4257 0.0373 0.0624 0.2205]^T
智能辨识稳定性评判	IV	III	III	II

由表 3 得知,上盘围岩稳定性介于差与一般之间,因此巷道上盘地段采用锚杆支护,岩石破碎程度大的地段进行支护后喷射混凝土。而下盘围岩稳定性介于一般与好之间,巷道下盘局部地段采用锚杆支护。矿体稳定性一般,川脉巷道采取锚杆支护即可。此分析结果与目前寺庄矿区坑探巷道支护方式完全符合。

工程实例研究结果显示,采用智能辨识模型可以方便快速地判定与预测岩体稳定性,有效制定支护方案。

4　结论

(1) 分形具有跨越不同尺度的对称性,它可以较好地描述岩体节理裂隙的自相似程度。节理间距分形维数和节理产状分布分形维数是岩体稳定性评价的重要指标。采用间距分形维数评价节理裂隙发育情况比采用平均节理间距方法更合理,采用产状分布分形维数评价节理产状分布集中程度更科学,因为它们反映了节理裂隙的整体分布信息。

(2) 通过对国内大量矿山节理裂隙资料的调研,综合分析了节理裂隙分布分形特性。研究结果显示:节理间距分形维数越小,岩体节理裂隙越不发育;节理产状分布分形维数越小,节理产状分布越集中。因此,二者分形维数越低,岩石质量越高,岩体稳定性越好。

(3) 在国内大量矿山节理数据和岩石力学参数的综合分析基础上,建立了岩体质量及其力学参数、节理间距分形维数、节理产状分形维数的神经网络智能辨识模型。工程应用结果显示,利用该模型可方便、准确地预测岩体稳定性,为工程岩体支护及施工设计提供依据。

参考文献(References)

[1] 刘艳章, 盛建龙, 葛修润, 等. 基于岩体结构面分布分形维的岩体质量评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 971–975.
Liu Yanzhang, Sheng Jianlong, Ge Xiurun, *et al. Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 971–975.

[2] 刘亚俊, 叶邦彦, 夏伟. 分形理论及其在材料非线性力学行为研究中的应用[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(3): 104–107.
Liu Yajun, Ye Bangyan, Xia Wei. *Materials Science and Engineering*, 2001, 19(3): 104–107.

[3] 易顺民, 唐辉明, 龙昱. 基于分形理论的岩体工程分类初探[J]. 地质科技情报, 1994, 13(1):101–106.
Yi Shunmin, Tang Huiming, Long Yu. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 13(1):101–106.

[4] Poulton M M, Moitabal N, Farmer I W. Scal invariant behavior of massive and fragmented rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(3): 219–221.

[5] 张继春, 徐小荷. 岩体断裂几何形状的分形研究 [J]. 中国有色金属学报, 1993, 3(4): 11–15.
Zhang Jichun, Xu Xiaohe. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1993, 3(4): 11–15.

[6] 谢和平, 周宏伟. 基于分形理论的岩石节理力学行为研究 [J]. 中国科学基金, 1998, 12(4): 247–252.
Xie Heping, Zhou Hongwei. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 1998, 12(4): 247–252.

[7] 陈剑平, 王清, 谷宪民, 等. 岩体节理产状极点分布的分形维 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 3(26):503–508.
Chen Jianping, Wang Qing, Gu Xianmin, *et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 3(26):503–508.

[8] Boadu F K, Long L T. The fractal character of fracture spacing and RQD [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*, 1994, 31(2):127–134.

[9] Ghosh A, Daemen J J K. Fractal characteristics of rock discontinuities[J]. *Engineering Geology*, 1993, 34:1–9.

[10] 王谦源. 分形分布节理的模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 3 (18): 271–274.
Wang Qianyuan. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 3(18): 271–274.

[11] Kobayashi M, Hattori M, Yamazaki H. Multidirectional associative memory with a hidden layer[J]. *Systems and Computers in Japan*, 2002, 33(6): 1–9.

[12] 何国光, 周坚强. 基于前向神经网络的知识获取 [J]. 吉首大学学报: 自然科学版, 2002, 23(6): 62–65.
He Guoguang, Zhou Jianqiang. *Journal of Jishou University: Natural Science Edition*, 2002, 23(6): 62–65.

[13] 桂卫华, 胡志坤, 彭小奇. 前馈网络的混沌梯度搜索耦合学习算法及应用[J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(6): 629–631.
Gui Weihua, Hu Zhikun, Peng Xiaoqi. *Journal of Central South University of Technology*, 2002, 33(6): 629–631.

[14] 刘志祥, 李夕兵. 尾砂分形级配与胶结强度的知识库研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1789–1793.
Liu Zhixiang, Li Xibing. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(10): 1789–1793.

(责任编辑　刘志远)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net