

甘肃北山芨芨采石场岩体节理特征研究

杨春和, 梅 涛, 王贵宾, 殷黎明, 包宏涛

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 芨芨采石场是我国高放废物处置库甘肃北山预选区有利候选地段之一。采用综合节理测量法在芨芨采石场进行详细的节理调查, 共获得 13 012 条节理数据。根据芨芨采石场内的断层将该区域初步划分为 3 个岩体结构均质区和 2 个断层影响区。基于圆形窗口法原理编制计算程序, 分析断层两侧节理的平均迹长和迹线中点面密度的变化, 确定断层对节理分布的影响范围, 准确划分岩体结构均质区的大小, 并得出各均质区节理的平均迹长和迹线中点面密度; 采用节理玫瑰花图和节理极点图法, 得出各均质区节理的优势组, 对各优势组的产状进行统计分析。芨芨采石场的岩体节理以陡倾角的剪节理为主, 节理倾向和倾角符合正态分布; 统计分析各优势组的节理间距, 得出各优势组节理间距符合负指数分布。按照 ISRM 提出的《岩体不连续面定量描述的建议方法》(1978), 采石场各结构均质区的节理间距都属于宽间距, 表明岩体完整性较好。本次研究得到芨芨采石场岩体节理基本特征的量化参数, 为岩体力学和渗流特性的深入研究提供必要的数据库。

关键词: 岩石力学; 高放废物处置库; 芨芨采石场; 岩体节理; 迹线中点面密度; 平均迹长; 节理间距

中图分类号: TU 45; TL 942+.211

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 3849 - 06

STUDY ON ROCKMASS JOINT CHARACTERISTICS OF JIJI QUARRY IN BEISHAN, GANSU PROVINCE

YANG Chunhe, MEI Tao, WANG Guibin, YIN Liming, BAO Hongtao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Jiji quarry is one of the candidates in Beishan area, Gansu province—the preselected area for Chinese high-level radioactive waste repository. Data of 13 012 joints of granite are mapped by comprehensive joint survey method in Jiji quarry. According to the two faults, Jiji quarry is roughly divided into three regions where the structure of rockmass is homogenous and two regions which are influenced by the two faults. Based on the theory of the circular sampling window, the computing program is developed and is used to analyze the diversity of the mean joint trace length and joint trace midpoint density in the both sides of the faults. The boundaries of the rockmass structure homogenous region are determined according to the influential range of the faults; and the mean trace length and trace midpoint density of each rockmass structure homogenous region is calculated. The optimal joint sets of each rockmass structure homogenous region are obtained by rose diagram method and equal-area upper hemisphere projection method. The probability distributions of joint dip and dip angle can be effectively fitted by normal function; and the joint dip angles are mostly steep. The joint spacing of each set of joint is calculated and can be effectively fitted by negative exponential function. According to “suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock mass” (ISRM, 1978), the joint spacing of each rockmass

收稿日期: 2007 - 03 - 07; **修回日期:** 2007 - 04 - 02

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 国家自然科学基金资助项目(50374064, 50334060)

作者简介: 杨春和(1962 -), 男, 1983 年毕业于南方冶金学院矿业系采矿工程专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学方面的研究工作。E-mail: chyang@whrsm.ac.cn

structure homogenous region is wide. In this study, attention is focused on the rockmass joint characteristics, such as orientation, trace length, trace midpoint density and spacing. The quantitative parameters which can be used to describe the rockmass joint characteristics are obtained. They are essential for further research of the mechanical and seepage characteristics of rockmass.

Key words: rock mechanics; high-level radioactive waste repository; Jiji quarry; rockmass joint; trace midpoint density; mean trace length; joint spacing

1 引言

在稳定的地质环境中，岩体作为高放废物的地质隔离体系，其力学和渗流特性决定能否安全、有效地处置高放废物。岩体力学和渗流特性的确定与描述是高放废物深埋处置可行性研究中关键的基础数据，而岩体节理特征是影响岩体力学与渗流特性的重要因素。

根据甘肃北山地壳稳定性研究，芨芨采石场区域是我国高放废物深地质处置甘肃北山预选区内有利地段之一^[1]。本次研究在芨芨采石场区域 3 km×6 km 范围内展开详细的现场节理调查。采用综合测量法，不删除节线，共测得 13 012 条节理的基本几何特征数据，采用数理统计和概率论的方法对芨芨采石场岩体节理参数进行量化的描述和分析^[2]。

2 结构均质区划分

在研究区域内节理分布特征时，确定结构相似的结构均质区是首要问题。然而，找出结构相似结构区是很困难的，因为岩体节理性质受到很多因素的影响，如岩性、区域构造、节理产状、迹长、大小、间距、密度、张开度、填充物和起伏度等^[3, 4]。从芨芨采石场区域的地质条件来看，出露岩体除很少部分为变质岩顶盖，其余均为花岗岩，不能单一从岩性角度划分结构均质区。区域内发育 2 条贯穿性断层，其对岩体节理分布具有控制作用。因此，可以通过判断断层的控制和影响范围进行采石场区域岩体结构均质区的划分。

在断层的两边选取节理发育的露头作为合适的窗口，用圆形窗口法估计断层周围岩体的节理迹线中点面密度和平均迹长的变化趋势。每 10 m 为一个区间，在每个区间内找 4~5 个露头，计算节理迹线中点面密度和节理平均迹长。通过节理迹线中点面密度和节理平均迹长的变化，判断断层对其两旁岩

体的节理迹线中点面密度和节理平均迹长的影响主要在 100 m 范围内，将断层两旁 100 m 范围内划分为断层影响区，详见杨春和等^[5]的研究。因此可将采石场区域划分为 3 个结构均质区(I, II 和 III 区)和 2 个断层影响区(IV 和 V 区)(如图 1 所示)。

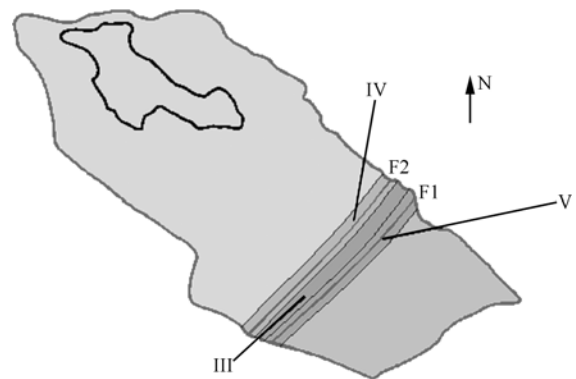


图 1 芨芨采石场区域岩体结构均质区

Fig.1 Rockmass structure homogenous regions in Jiji quarry

3 节理迹线中点面密度和平均迹长

许多学者^[5~8]对圆形窗口法用于岩体节理迹线中点面密度和平均迹长分析进行了研究。基于圆形窗口法原理，利用 MATLAB 编制计算程序，按照统一的数据格式 {L₀, L₁, L₂, L₃} 读入野外测量数据，生成采样露头的节理迹线分布图，然后以不同半径和位置的圆形取样窗口计算露头节理数据，判断各圆形窗口内贯穿型、相交型、包容型节理数量，根据如下表达式计算各圆形窗口中节理的平均迹线长度和迹线中点密度的大小，最后确定出每个露头节理的平均迹线长度和迹线中点面密度(详见杨春和等^[5, 7]的研究):

$$\nu = \frac{\pi(N + N_2 - N_0)}{2(N - N_2 + N_0)}c \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{N - N_2 - N_0}{2\pi c^2} \quad (2)$$

式中: ν 为节理平均迹长; c 为圆形取样窗口的半径; λ 为节理迹线中点面密度; N_0 为包容型迹线期望条

数; N_2 为贯穿型迹线期望条数; N 为总迹线条数, $N = N_0 + N_1 + N_2$, N_1 为相交型迹线期望条数。

在各个分区中, 选择节理条数大于 30(以避免迹线中点不均匀, 使计算结果更合理), 且分布比较均匀的露头, 确定每个露头的节理迹线中点面密度 λ 和平均迹长 ν 。II 区节理迹线中点面密度和平均迹长计算结果分别如图 2 和 3 所示。

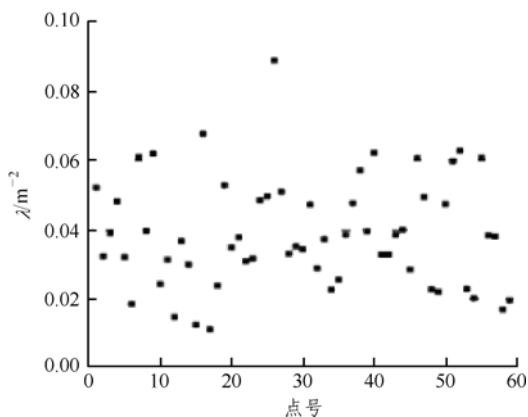


图 2 II 区节理迹线中点面密度分布图

Fig.2 Distribution of joint trace midpoint density for region II

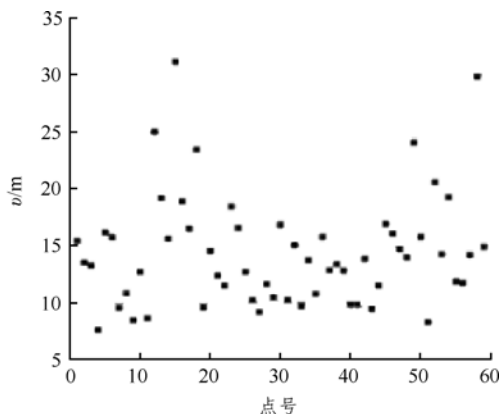


图 3 II 区节理平均迹长分布图

Fig.3 Distribution of joint mean trace length for region II

由图 2, 3 可知, II 区节理迹线中点面密度 λ 主要位于 $0.02 \sim 0.06 \text{ m}^{-2}$ 的范围内, 平均迹长 ν 主要位于 $9 \sim 16 \text{ m}$ 之间。II 区节理迹线中点面密度和平均迹长平均值分别为 $\bar{\lambda} = 0.0387 \text{ m}^{-2}$, $\bar{\nu} = 14.398 \text{ m}$ 。

芨芨采石场各结构均质区节理平均迹长 $\bar{\nu}$ 和迹线中点面密度的平均值 $\bar{\lambda}$ 如表 1 所示。由表 1 可以看出, 由于 IV 和 V 区距离断层较近, 受断层影响明显, 节理迹线中点面密度平均值较其他各区明显偏大; 各区的节理平均迹长平均值相差不大, 但 V 区明显偏小。

表 1 各结构均质区节理迹线中点面密度和平均迹长平均值

Table 1 Average values of joint trace midpoint density and mean trace length for each structure homogenous region

区号	$\bar{\nu} / \text{m}$	$\bar{\lambda} / \text{m}^{-2}$
I	14.834	0.034 0
II	14.398	0.038 7
III	15.167	0.034 0
IV	15.667	0.040 8
V	12.184	0.041 4

4 节理优势组和产状数学模型

岩体节理是岩石在特定的地质环境和构造应力场作用下的产物, 在特定的应力条件下, 节理的空间分布具有统计规律。在对节理数据建立数学模型之前, 首先对节理进行优势组划分, 然后分析各优势组的统计规律^[9~11]。

节理优势组划分有多种方法, 如节理玫瑰花图法、等面积赤平投影法等。由 II 区节理倾向玫瑰花图、极点分布图和节理极点等密度图(分别如图 4~6 所示), 得出 II 区有 4 组节理发育, 分别为: $63.43^\circ / 78.46^\circ$, $110.56^\circ / 74.34^\circ$, $234.46^\circ / 74.93^\circ$ 和 $320.19^\circ / 67.05^\circ$ 。采用同样的方法划分芨芨采石场各区节理的优势组, 由于 IV 和 V 区包含 2 条断层, 受到断层构造作用的干扰, 节理空间方位分布缺乏规律, 优势组不明显。I, II 和 III 区节理的优势组产状如表 2 所示。

根据以上节理优势分组, 分区间统计各优势组产状的频率分布并拟合其概率密度分布函数。以 II

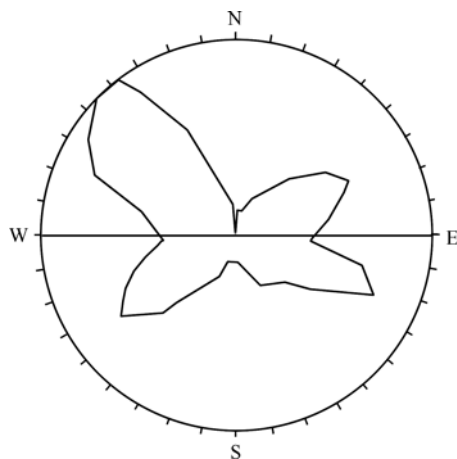


图 4 芨芨采石场 II 区节理倾向玫瑰花图

Fig.4 Dip rose diagram for region II of Jiji quarry

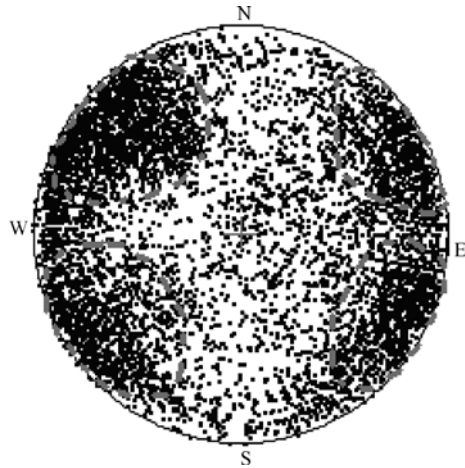


图5 II区节理极点分布图
Fig.5 Distribution of joint polar points for region II

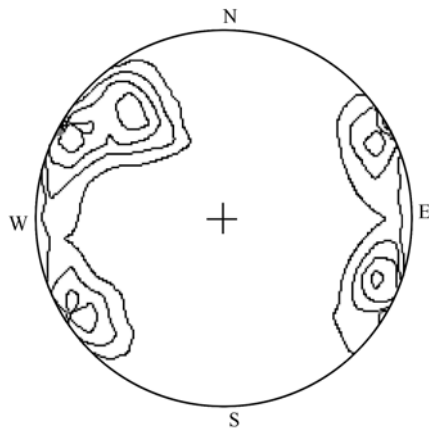


图6 II区节理极点等密度图
Fig.6 Equidensity diagram of joint polar point for region II

表2 各结构均质区节理优势产状

Table 2 Optimal joint sets for each structure homogenous region

区号	优势组	优势产状	
		倾向/(°)	倾角/(°)
I	1	55.82	72.27
	2	139.76	62.40
	3	234.08	65.17
	4	308.66	53.84
II	1	63.43	78.46
	2	110.56	74.34
	3	234.46	74.93
	4	320.19	67.05
III	1	79.43	75.00
	2	315.00	60.00

区 234.46°/74.93° 优势组为例，其倾向的拟合曲线和表达式如图 7 所示。用同样方法统计分析了 I, II 和 III 区的各个优势组，得到正态分布函数能有效拟合节理倾向和倾角的分布。拟合所得各优势组倾向和倾角正态分布的参数如表 3 所示。同时可以看出，各优势组节理倾角主要集中在 60°~75° 范围内，均属于陡倾角。

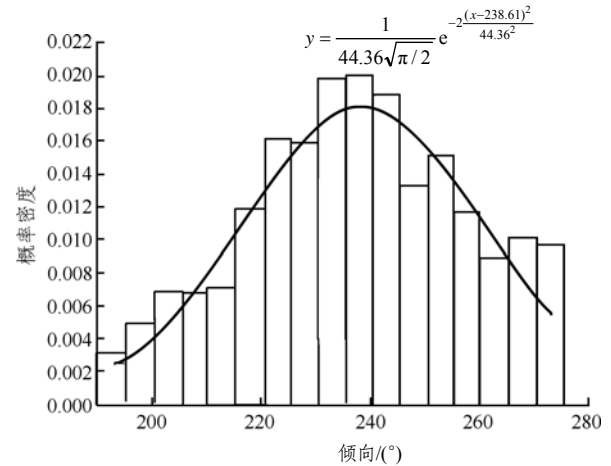


图7 II区 234.46°/74.93° 优势组倾向拟合曲线及表达式
Fig.7 Fitting curve and formula of dip for optimal joint set 234.46°/74.93° in region II

表3 I, II 和 III 区各优势组节理倾向和倾角拟合参数

Table 3 Fitting parameters of dip and dip angle for each optimal joint set in regions I, II and III

区号	优势组	倾向拟合参数		倾角拟合参数	
		$\theta/(°)$	$\sigma_{\theta}/(°)$	$\theta/(°)$	$\sigma_{\theta}/(°)$
I	1	55.82	25.86	72.27	17.25
	2	139.76	58.08	62.40	18.91
	3	234.08	45.23	65.17	16.91
	4	312.04	31.01	61.87	15.80
II	1	63.86	45.61	74.49	31.36
	2	114.38	46.14	75.41	26.45
	3	238.61	44.36	74.74	26.03
	4	310.63	42.57	70.40	33.86
III	1	79.60	69.89	75.00	21.00
	2	311.14	46.33	69.31	30.57

5 节理间距统计分析

节理间距定义为同一组节理两相邻节理之间的垂直距离，它的大小往往反映了岩体的完整性和块体的大小，是岩体质量的重要指标。研究节理间距

时, 需要定义测线在空间中的位置, 从而确定视间距与真实间距之间的关系(见图 8), 所以节理真实间距为

$$d_0 = d \sin \alpha \quad (3)$$

式中: d 为测线上测得的视间距, d_0 为节理真实间距, α 为测线与节理迹线夹角。

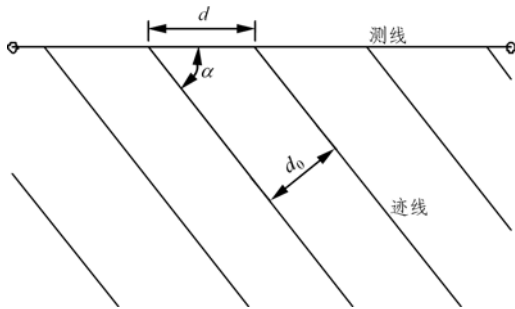


图 8 节理真实间距与视间距示意图

Fig.8 Sketch of actual and apparent joint spacing

统计芨芨采石场各区优势组节理间距平均值和标准差, 拟合各优势组节理间距概率密度分布函数, II 区 234.46°/74.93° 优势组间距的拟合曲线和拟合公式如图 9 所示。采石场 I, II 和 III 区各优势组节理的间距平均值和标准差很接近(如表 4 所示), 其分布可以用负指数函数有效拟合, 其拟合参数如表 4 所示。芨芨采石场 I, II 和 III 区各优势组间距均为 60~200 cm, 按照 ISRM 提出的《岩体不连续面定量描述的建议方法》(1978), 采石场各区内节理间距均属于宽间距, 说明岩体完整性较好^[12~14]。

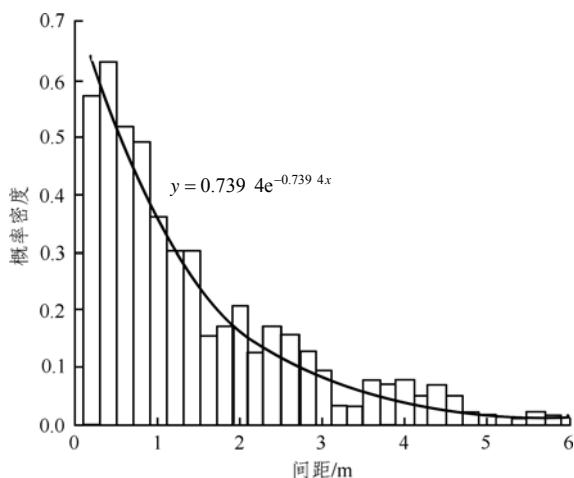


图 9 II 区 234.46°/74.93° 优势组间距拟合曲线及公式

Fig.9 Fitting curve and formula of spacing for optimal joint set 234.46°/74.93° in region II

表 4 采石场 I, II 和 III 区各优势组节理间距统计结果及拟合参数

Table 4 Statistical results of joint spacing and fitting parameters for each optimal joint set in regions I, II and III

区号	优势组	优势产状	平均间距/m	标准差/m	拟合参数λ
I	1	55.82°/72.27°	1.217	1.118	0.826 2
	2	139.76°/62.40°	1.497	1.454	0.671 4
	3	234.08°/65.17°	1.591	1.762	0.627 6
	4	308.66°/53.84°	1.334	1.358	0.754 6
II	1	63.43°/78.46°	1.236	1.297	0.936 3
	2	110.56°/74.34°	1.319	1.398	0.846 9
	3	234.46°/74.93°	1.620	1.698	0.739 4
	4	320.19°/67.05°	1.424	1.424	0.787 7
III	1	79.43°/75.00°	0.827	0.843	1.221 1
	2	315.00°/60.00°	0.967	0.992	1.046 2

6 结 论

在中国高放废物处置库甘肃北山预选区芨芨采石场进行详细的节理调查, 获得大量节理数据, 研究了采石场区域节理几何分布特征。

(1) 首先根据断层的控制和影响作用, 将采石场区域分为 3 个结构均质区和 2 个断层影响区, 然后对断层两侧节理平均迹长和迹线中点面密度变化进行分析, 确定结构均质区的大小。

(2) 采用圆形窗口法, 开发程序计算出芨芨采石场各个分区的节理平均迹长和迹线中点面密度。

(3) 采用玫瑰花图和等面积赤平投影法, 对各均质区进行节理优势组划分。采石场区域节理主要为陡倾角, 倾角集中在 60°~75° 之间。对各优势组产状统计分析, 得出正态分布函数能有效拟合节理倾向和倾角的分布。

(4) 对各均质区各优势组产状间距统计分析, 采石场各结构均质区的节理间距都属于宽间距, 岩体完整性较好, 同时得出节理间距的负指数分布函数及参数。

本次研究得到了芨芨采石场岩体节理基本特征的定量化参数, 为岩体力学和渗流特性的深入研究提供了必要的参数。

参考文献(References):

[1] 王 驹, 徐国庆, 金远新, 等. 甘肃北山地区区域地壳稳定性研究[M]. 北京: 地质出版社, 2000.(WANG Ju, XU Guoqing, JIN Yuanxin,

- et al. Earth crust stability research of Beishan, Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.(in Chinese)
- [2] 王贵宾, 殷黎明, 梅涛, 等. 中国高放废物处置库甘肃北山预选区及茂采石场岩体节理调查和研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.(WANG Guibin, YIN Liming, MEI Tao, et al. Survey and research report of rock mass joint for Jiji quarry—high level radioactive waste geological disposal in Beishan, Gansu Province, China[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [3] MILLER S M. A statistical method to evaluate homogeneity of structural populations[J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15(2): 317 - 328.
- [4] 陈剑平, 肖树芳, 王清. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1995.(CHEN Jianping, XIAO Shufang, WANG Qing. Computer simulation theory of 3D random discontinuities network[M]. Changchun: Northeast Normal University Press, 1995.(in Chinese))
- [5] 杨春和, 包宏涛, 王贵宾, 等. 岩体节理平均迹长和迹线中点面密度估计[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 475 - 2 480. (YANG Chunhe, BAO Hongtao, WANG Guibin, et al. Estimation of mean trace length and trace midpoint density of rock mass joints[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 475 - 2 480.(in Chinese))
- [6] ZHANG L, EINSTEIN H H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1998, 31(4): 217 - 235.
- [7] 王贵宾, 杨春和, 包宏涛, 等. 岩体节理平均迹长估计[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2 589 - 2 592.(WANG Guibin, YANG Chunhe, BAO Hongtao, et al. Mean trace length estimation of rock mass joint[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(12): 2 589 - 2 592.(in Chinese))
- [8] MAULDON M. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1998, 31(4): 201 - 216.
- [9] KULATILAKE P H S W, CHEN J, TENG J, et al. Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the Three Gorges dam site in China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1996, 33(6): 255 - 277.
- [10] 徐光黎, 唐辉明, 潘别桐, 等. 岩体结构模型与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.(XU Guangli, TANG Huiming, PAN Bietong, et al. Structural model of rock mass and its application[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.(in Chinese))
- [11] 周继彬, 曾佐勋, 李志勇. 构造地质学软件包——StruKit的设计与开发[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003.(ZHOU Jibin, ZENG Zuoxun, LI Zhiyong. Design and development of structural geology software package—StruKit[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003.(in Chinese))
- [12] International Society for Rock Mechanics Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(6): 319 - 368.
- [13] PRIEST S D, HUDSON J A. Discontinuity spacing in rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1976, 13(5): 135 - 148.
- [14] PRIEST S D, HUDSON J A. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstract*, 1981, 18(3): 183 - 197.