

文章编号：1006-6616(2001)02-0123-07

# 岩体节理表面形貌的各向异性研究

周宏伟<sup>1</sup>，谢和平<sup>1</sup>，M A Kwasniewski<sup>2</sup>，杨长义<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学北京校区岩石力学与分形研究所，北京 100083；

2. 波兰西里西亚工业大学；3. 台湾淡江大学。)

**摘要：**本文根据激光表面仪测量的节理表面形貌数据，通过将高度分布转化为斜率分布、并对斜率分布采用频谱分析的方法，研究了节理表面形貌的各向异性特征。一般的统计参数只能给出节理表面剖面某种性质的平均测度，很难捕捉节理表面的各向异性性质。而功率谱密度全面反映了节理表面形貌中大尺度上的起伏和小尺度上的涨落，具有一般统计参数不可比拟的优越性，通过定义累计功率谱密度指数  $psd^*$  的方法，定量地表征了岩体节理表面的各向异性。

**关键词：**岩体节理；表面形貌；各向异性；频谱分析；累计功率谱密度指数

中图分类号：TU452

文献标识码：A

## 0 引言

岩体节理力学行为与节理表面形貌密切相关，尤其是节理力学行为的各向异性很大程度上取决于节理表面形貌的各向异性。众所周知，岩体节理表面通常是粗糙不平的，同时也具有明显的各向异性特征，所谓各向异性是指表面形貌特征或参数随方向变化、表现出很强的方向性。过去几十年间，人们对节理表面形貌进行了卓有成效的研究，提出了很多形貌描述的定量方法<sup>[1~6]</sup>，几乎涉及了节理表面形貌的方方面面。尤为值得一提的是分形几何的方法，在节理形貌描述和形貌参数的尺度效应研究方面起到了积极的推动作用<sup>[7~13]</sup>。但到目前为止，节理表面各向异性的研究与描述方面却没有满意的方法，仅有的一些研究成果与其说是对各向异性描述的研究<sup>[14,15]</sup>，还不如说是对观测数据顺序的统计描述，与真正意义上的各向异性尚有一定的差距。通过对同一节理表面上36条剖线的分析计算表明，无论是经典几何参数、地质统计学参数还是分形几何参数都不足以描述节理表面的各向异性<sup>[16]</sup>，其中最主要的原因就是这些参数只能给出节理表面剖面某种性质的平均测度，将各种尺度上的信息作平均化处理，很难捕捉节理表面的各向异性特征。因此，我们必须提出新的方法和参数来描述节理表面的各向异性性质。

本文利用岩体节理表面形貌的测试数据，通过频谱分析方法，全面刻画了节理表面剖面

收稿日期：2001-03-18

基金项目：国家自然科学基金（编号：50074032）；波国际合作项目（编号：263-04）

作者简介：周宏伟（1965—），男，博士，副教授，从事工程力学与岩土力学的研究工作。

高度分布中大尺度上的起伏和小尺度上的涨落，并提出了累计功率谱密度指数  $psd^*$  的概念。通过这一参数定量地表征了岩体节理表面的各向异性。

### 1 岩体节理表面形貌测试

样本来自波兰 Myslowice 矿，岩性为砂岩，样本尺寸为  $180 \times 180 \times 118\text{mm}$ ，用间接拉伸法（即巴西法）产生断裂表面。然后将断裂粗糙表面置于激光表面仪下（图 1）进行各向异性测试。激光表面仪（laser profilometer）为非接触式测量仪器，仪器量程为  $30\text{mm}$ ，精度为  $7\mu\text{m}$ ，测试的最小间距为  $7.5\mu\text{m}$ 。

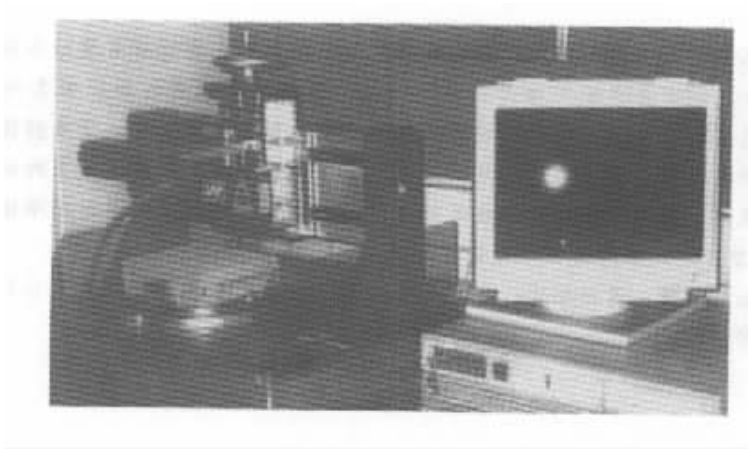


图 1 激光表面仪示意图

Fig.1 Photo of laser profilometer

本次量测采用的测量间距为  $0.15\text{mm}$ ，测量长度为  $153.6\text{mm}$ ，这样每条剖面可得 1025 个数据点。 $\theta$  角每转动  $15^\circ$  测试一次（图 2），共测试了 12 条剖面（ $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ），量测结果分别见图 3a 和图 4a。

### 2 岩体节理表面各向异性的频谱分析

频谱分析是将时间分布或位置分布参量转化到频率域上，分析各频率段具有的能量份额，具体到节理表面高度的频谱分析，实际上就是分析低阶粗糙度和高阶粗糙度各自所占的频带，从而进一步寻求表征节理表面形貌各向异性的定量指标。

将图 3a 所示的结果视为一高度组成的序列，研究表明<sup>[16]</sup>，岩体节理表面高度分布是非平稳的（non-stationary）和非正态的，而频谱分析只有对平稳的序列才有意义。因此，在对高度序列进行频谱分析之前，必须首先将高度分布组成的非

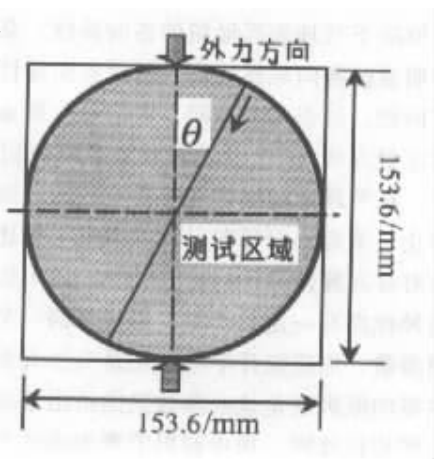


图 2 节理表面各向异性测试示意图（图中箭头代表扫描方向）

Fig.2 Schematic view of anisotropy measurement of rock joint surface

平稳的序列才有意义。因此，在对高度序列进行频谱分析之前，必须首先将高度分布组成的非

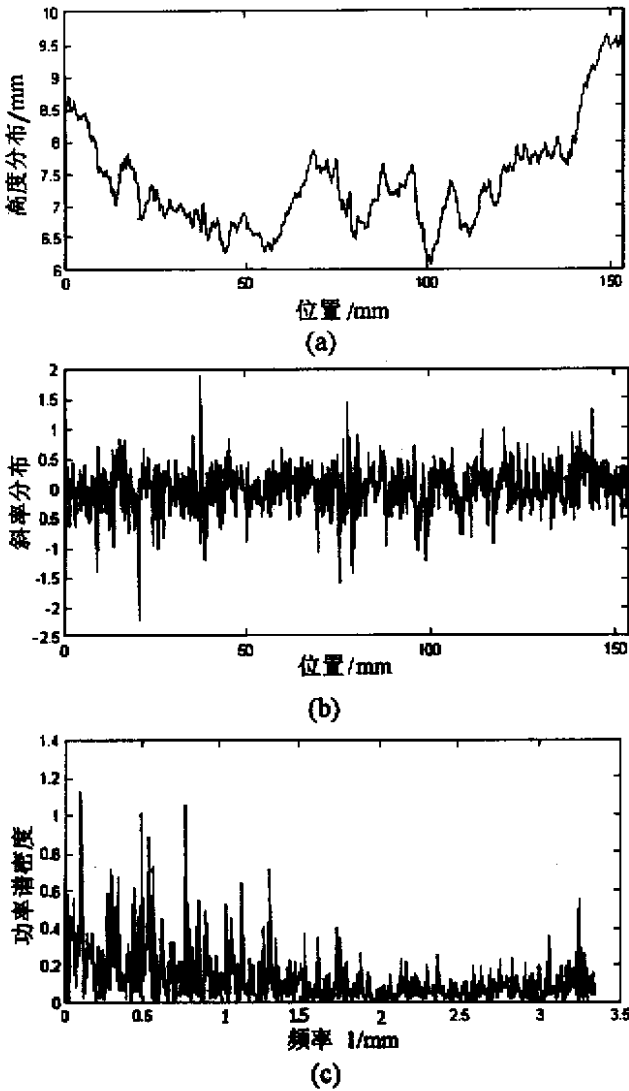


图 3  $\theta = 0^\circ$  的高度分布 (a)、斜率分布 (b) 和功率谱 (c)  
 Fig.3 Height distribution (a), slope distribution (b) and power spectral (c) of the profile with orientation angle  $\theta = 0^\circ$

平稳序列转化为平稳序列。

对于高度组成的序列  $z_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ,  $N$  为剖线上测点总数, 本文中  $N = 1025$ ), 数据点间距为  $\Delta$ , 作如下运算可产生一新序列  $s_i$

$$s_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta}, \quad 1 \leq i \leq N - 1 \quad (1)$$

则新序列  $s_i$  实际上是节理表面剖线的斜率分布, 经过这样的变化可将非平稳序列转化为平稳序列<sup>[16]</sup>。这样我们就将节理表面高度分布的问题转换成了斜率分布的问题 (图 3b), 在此基础上进行的频谱分析才有意义。

本文频谱分析所采用的软件为 Matlab5.2, 其中的频谱分析是以上述理论为基础, 采用

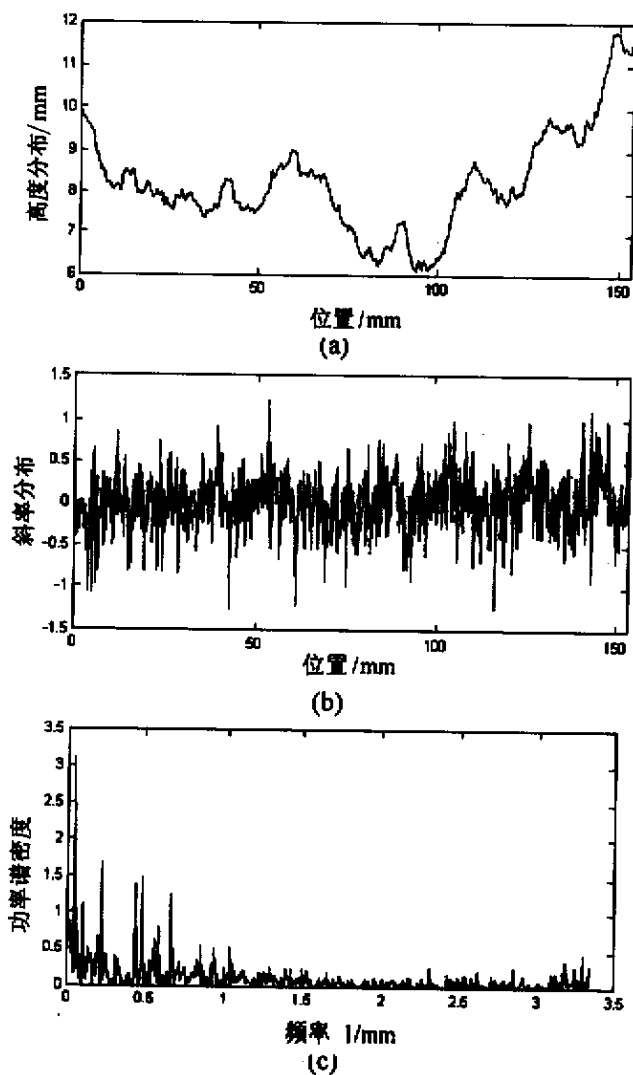


图4  $\theta = 90^\circ$ 的剖面高度分布 (a)、斜率分布 (b) 和功率谱 (c)

Fig.4 Height distribution (a), slope distribution (b) and power spectral (c) of the profile with orientation angle  $\theta = 90^\circ$

的基本方法为 Welch 发展的非参数化方法, 估计功率谱的方法是求出样本的离散 Fourier 变换, 然后将结果幅值平方, 以保证估计是渐进无偏的, 从而保证了估计结果十分接近功率谱密度的真值。

限于篇幅, 本文只给出两个相互垂直方向上的结果。图 3 给出了  $\theta = 0^\circ$  的剖面高度分布、斜率分布和功率谱, 图 4 给出了  $\theta = 90^\circ$  的剖面高度分布、斜率分布和功率谱。

由图 3 和图 4 可见, 斜率分布中含有多种频率成分, 从一定程度上也说明了节理表面剖面线形貌的复杂性, 总的来看, 频谱高密度区域普遍集中在低频部分, 即频率  $f < 1\text{mm}^{-1}$  的部分。由于节理的力学行为主要取决于节理表面形貌的波形 (shape) 部分, 即频谱域中低频

部分，因此可根据低频信号作为研究表面各向异性的参数。比较图 3 和图 4，可见其功率谱密度曲线在  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  方向上的区别是十分明显的，我们需要寻找某一参数来定量描述这种差异。由于图 3c 和图 4c 中的频谱图比较复杂，不便进行分析，因此将图 3c 和图 4c 中功率谱密度坐标转化为累计的功率谱密度，用一单一的曲线来表示（图 5）。

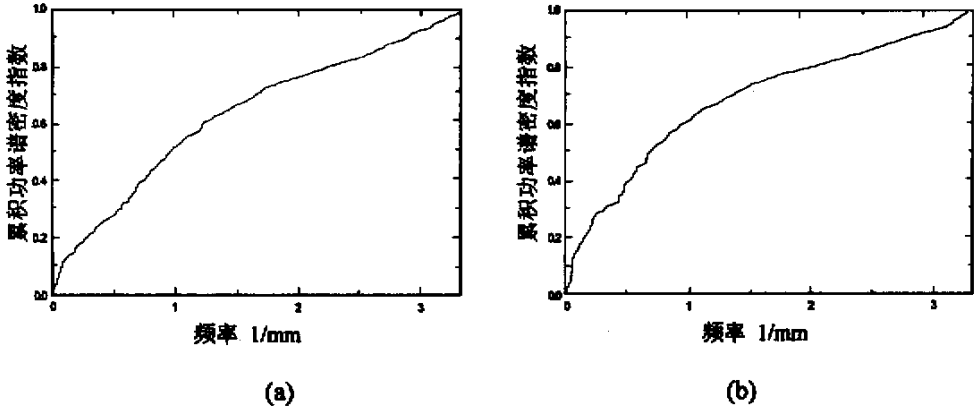


图 5 功率谱密度在整个频率范围内所占的比例

Fig.5 Ratio of accumulated power spectral density to whole spectral density  
(a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 90^\circ$

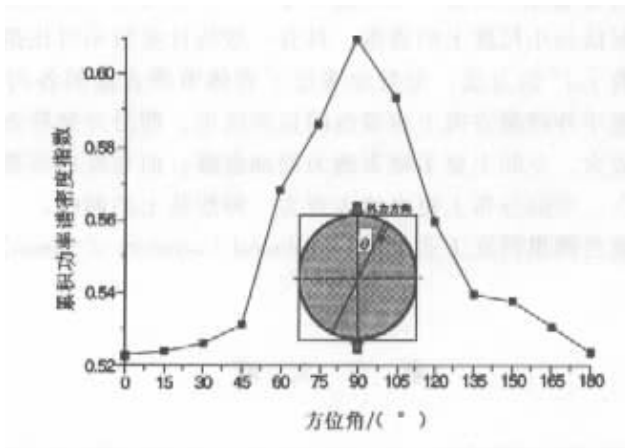


图 6 累计功率谱密度指数  $psd^*$  随方位角的变化

Fig.6 Variety of the index for accumulated power spectral density with orientation angle

图 5 显示了累计功率谱密度在各频率段所占的份额。 $\theta = 90^\circ$  时累计功率谱密度在低频部分所占的比例较大，而  $\theta = 0^\circ$  时累计功率谱密度的分布却相对较均匀，因此特定义以下参数来描述这种趋势：

$$psd^* = \frac{\sum_{f=0}^1 psd}{\sum_{f=0}^{10/3} psd} \tag{2}$$

式中  $psd^*$  称为累计功率谱密度指数。将上述结果按照式（2）绘制于图 6 中。

可见，累计功率谱密度指数  $psd^*$  随方位角  $\theta$  的增加而逐渐增大，当  $\theta < 45^\circ$  时增幅并不

明显,只有当  $\theta > 45^\circ$  后,  $psd^*$  才明显增大,到  $\theta = 90^\circ$  时,  $psd^*$  达到最大。 $\theta > 90^\circ$  后,累计功率谱密度指数  $psd^*$  又逐渐减小。说明在沿外载荷方向上 ( $\theta = 0^\circ$ ) 和垂直于外载荷方向上 ( $\theta = 90^\circ$ ) 累计功率谱密度指数  $psd^*$  表现出明显的区别。当  $\theta = 0^\circ$  时,剖面斜率分布中高频信号所占的份额相对较大 ( $psd^* = 0.523$ ),在空间分布上则更多地表现为局部的涨落 (fluctuation),即高阶粗糙度;当  $\theta = 90^\circ$  时,剖面斜率分布中低频信号所占的份额最大 ( $psd^* = 0.61$ ),意味着该剖面中以低阶的形状参量为,在空间上更多地表现为形状上的起伏,这与脆性断裂的规律是吻合的,通过比较图 3a 和图 4a 也可发现这一规律。这样通过定义累计功率谱密度指数  $psd^*$  就定量地表征节理表面的各向异性特征。

### 3 主要结论

节理表面形貌的一般统计参数虽然简单、直观地反映了节理表面形貌的某些性质,但由于这些参数将各种尺度上的信息作平均化处理,而平均化处理的方式很难提供粗糙度的全面信息,所以在描述节理表面的各向异性时显得无能为力。在所有统计参数中,节理粗糙度系数 JRC 之所以得到大家的公认和推崇,其根本原因就在于 JRC 提供了节理高度分布的全面信息,但由于进行量化时视觉上比较缺乏客观性和唯一性<sup>[1]</sup>,因此,在实际应用上会碰到很大的困难。

本文沿用了 JRC 的学术思想,并试图改进 JRC 在量化方面存在的不足,全面反映节理表面形貌各阶次的粗糙度信息,从而进一步表征节理表面的各向异性。由上述分析可见,将节理表面剖面形貌的空间分布转化到频率域上进行分析,所得的功率谱密度全面反映了节理表面形貌中大尺度上的起伏和小尺度上的涨落,具有一般统计参数不可比拟的优越性。通过定义累计功率谱密度指数  $psd^*$  的方法,定量地表征了岩体节理表面的各向异性,该指数在平行于外载荷方向和垂直于外载荷方向上表现出明显的区别,即沿外载荷方向上,节理剖面中高频信号所占的份额较大,空间上更多地表现为局部涨落;而与外载荷垂直方向上,却是低频信号所占的份额较大,空间分布上更多地表现为一种形状上的起伏。

本文实验完成于波兰西里西亚工业大学 (Technical University of Silesia) 岩石力学实验室,谨此致谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Maerz N H, Franklin J A, Bennett C P. Joint roughness measurement using shadow profilometry [ J ]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1990, 27: 329 ~ 343.
- [ 2 ] Kulatilake P H S W, Shou G, Huang T H et al. New peak shear strength criteria for anisotropic rock joints [ J ]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1995, 32 ( 7 ): 673 ~ 697.
- [ 3 ] Tse R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficient [ J ]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1979, 16: 303 ~ 307.
- [ 4 ] Hsiung S M, Ghosh A, Ahola M P et al. Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination [ J ]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1993, 30 ( 7 ): 825 ~ 829.
- [ 5 ] Liu H, Sterling R L. A study of profile characterization for rock joints [ J ]. Rock Mech. Rock Engng, 1994, 27 ( 4 ): 189 ~ 208.
- [ 6 ] 周宏伟, 谢和平, Kwasniewski M A. 岩体节理表面形态描述的研究进展 [ J ]. 自然科学进展 ( 已接收 ).
- [ 7 ] 谢和平. 岩石节理的分形描述 [ J ]. 岩土工程学报, 1995, 17 ( 1 ): 18 ~ 23.

- [ 8 ] Xie H, Wang J A, Xie W H. Fractal effect of surface roughness on the mechanical behavior of rock joints [ J ]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1997, 8 ( 2 ): 221 ~ 252.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 谢和平, 王金安. 岩石节理 ( 断裂 ) 表面的多重分形性质 [ J ]. *力学学报*, 1998, 30 ( 3 ): 314 ~ 320.
- [ 11 ] Xie H, Wang J A, Kwasniewski M A. Multifractal characterization of rock fracture surfaces [ J ]. *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 1999, 36 : 19 ~ 27.
- [ 12 ] Xie H, Wang J A. Direct fractal measurement of fracture surfaces [ J ]. *Int. J. Solids & Structures*, 1999, 36 : 3073 ~ 3084.
- [ 13 ] 周宏伟, 谢和平, Kwasniewski M A. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法 [ J ]. *摩擦学学报*, 2000, 20 ( 6 ): 455 ~ 459.
- [ 14 ] Yang Z Y, Lo S C. An index for describing the anisotropy of joint surface [ J ]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34 : 1031 ~ 1044.
- [ 15 ] Rasouli V, Harrison J P. Scale effect, anisotropy and directionality of discontinuity surface roughness [ A ]. In : DGGT ed, *Proc of Eurock 2000*. Essen : Gluckauf Verlag GmbH, 2000, 751 ~ 756.
- [ 16 ] 周宏伟. 岩体节理表面形貌的各向异性与尺度效应 [ D ]. 中国矿业大学北京校区博士后出站报告, 2000.

## ON ANISOTROPY OF SURFACE TOPOGRAPHY OF ROCK JOINT

ZHOU Hong-wei<sup>1</sup>, XIE He-ping<sup>1</sup>, Kwasniewski M A<sup>2</sup>, YANG Zon-yee<sup>3</sup>

( 1. *Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

2. *Technical University of Silesia, Poland;* 3. *Tamkang University, Taiwan.* )

**Abstract** : Based on data of surface topography of rock joint measured by laser profilometer, by transferring the height distribution into the slope distribution and taking spectral analysis of slope distribution, the anisotropic behavior of surface topography of rock joint is discussed in this paper. The general statistical parameters can supply the average measurement of certain behavior of individual profiles, but can not catch the behavior of anisotropy. However, the power spectral density can characterize both the shape of a profile at the large scale and the fluctuation at the small scale, therefore it is superior to the general statistical parameters. In this paper, a parameter called index for the accumulated power spectral density is defined to characterize quantitatively the anisotropy of surface topography of rock joint.

**Key words** : rock joint ; surface topography ; anisotropy ; spectral characterization ; index for the accumulated power spectral density