

# 应用激光技术和分形理论测量 和描述岩石断裂表面粗糙度\*

王金安 谢和平

(中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

M. A. 科瓦西涅夫斯基

(波兰西里西亚工业大学采矿及地质系)

**摘要** 介绍了激光表面测量仪(Laser-Profilometry)在测量岩石断裂表面形态方面的工作原理及其应用。运用分形理论中对随机过程的增变量(Variance)分析方法,对测量结果进行分形描述,并就分形参数——分形维数 $D$ 、截距 $A$ 所蕴含的几何意义进行了分析和讨论。

**关键词** 粗糙度,激光表面测量,分形维数,截距

## 1 引言

岩石节理及断裂面的存在极大地影响着岩体变形、强度和液气传导特性。岩石断裂表面的粗糙程度对于岩体的力学性质起着重要作用<sup>[1, 2]</sup>。由Barton等人<sup>[3]</sup>提出的节理表面粗糙度系数 $JRC$ (Joint Roughness Coefficient)在岩石力学及工程界影响至深,并被国际岩石力学学会(International Society of Rock Mechanics)推荐和采纳<sup>[4]</sup>。 $JRC$ 值主要通过节理剖面目测并与“标准断面”作比较或通过剪切实验确定。有研究表明<sup>[5]</sup>,对相同节理用上述两种方法得到的 $JRC$ 值互不相符。前者是统计几何方法,而后者还取决于岩石节理面的强度和加载环境等。

近年来,分形几何在许多科学领域得以广泛应用。许多学者应用分形几何描述岩石节理表面粗糙度<sup>[6~8]</sup>,并试图寻求分形维数 $D$ 与 $JRC$ 之间的量化关系<sup>[9~13]</sup>。一般认为,表面越粗糙, $D$ 值越大。但由于岩石节理面几何性质的复杂性,研究者们采用的测量手段不同,以及对分形维数的定义和计算方法不同,所得结果各异。本文将介绍一种无接触激光表面测量技术,并对测量结果进行分形描述和分析。

## 2 激光表面测量技术

目前广泛应用的材料表面测量方法主要有机械式和光学式两大类。此外,还有投影法<sup>[13]</sup>和电感应法<sup>[14]</sup>等。应用光学方法可使岩石断裂表面在不受损伤的情况下,对其表面形态进行高精度的测量,这对进一步通过力学实验研究该岩石节理面粗糙度与其力学性质的关系极为有益。

1995年5月15日收到初稿,1995年7月11日收到修改稿。

\* 国家青年科学基金、国家教委跨世纪优秀人才基金、国家教委博士后研究基金资助项目。

无接触激光表面测量主要是利用三角反射原理: 激光由光源射出后, 到达被测物体表面并形成一微小的光斑。部分激光再按一定的角度从被测物体表面反射到光敏探测器 PSD (Position Sensitive Detector), 见图 1(a)。当被测物体表面与激光源之间的距离发生变化时, 反射光将照在 PSD 的不同位置, 通过光电转换和数字模拟系统转换成与测量距离成比例的电子信号。假设在某测量点, 激光反射角为  $\theta$ , 在水平方向  $x$  间距内所测量到的表面高度  $h_x$ 。

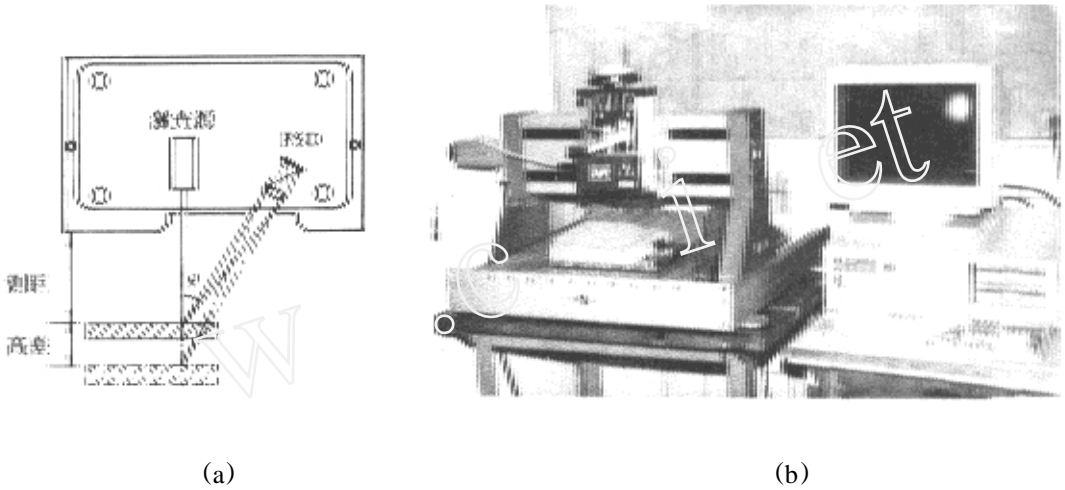


图 1 激光表面测量原理及仪器

Fig 1 A schematic laser profilometry and the instrument

$$h_x = \int_0^x \frac{\theta}{2} dx = \int_{i=0}^{i=x/d} \frac{\theta}{2} d \quad (1)$$

式中:  $d$  是激光束的直径, 反射角  $\theta$  根据激光反射到 PSD 的位置而定。激光束直径越小, 测量分辨率和精度越高, 但需要更多的测点覆盖同样的测量范围。

根据上述原理, 研制出激光表面测量仪(图 1(b)), 波兰西里西亚工业大学岩石力学实验室<sup>[15, 16]</sup>。该仪器由激光发射-接收器、机械驱动装置和光电转换和数字模拟系统组成。激光器(LM 30, 由德国 LAP GmbH, Lüneburg 公司制造)光束直径 0.5mm, 分辨率 7.5  $\mu\text{m}$ , 发射频率 1.5 kHz, 测量精度  $\pm 0.007\text{mm}$ , 高差量测范围 30mm。该仪器可对平面最大尺寸 300mm  $\times$  400mm (X~ Y) 的试件自动地进行单剖面或全表面测量。图 2 是应用该激光仪测量的砂岩拉断剖面 and 表面, 图中  $\Delta r$  是扫描间距。

### 3 岩石断裂面的分形描述

岩石断裂表面形态受材料微观结构、断裂机制和环境等多种因素影响<sup>[17- 19]</sup>。从地质统计力学角度, 岩石断裂面有两个最基本的特征:

(1) 随机特征: 岩石断裂粗糙面在扩展空间的变化表现出很大的随机性, 没有任何适度方程能描述它的具体几何形状;

(2) 结构相关特征: 粗糙面的变化与扩展空间的位置并非完全独立, 其相关关系在一定程度上取决于断裂扩展的距离。

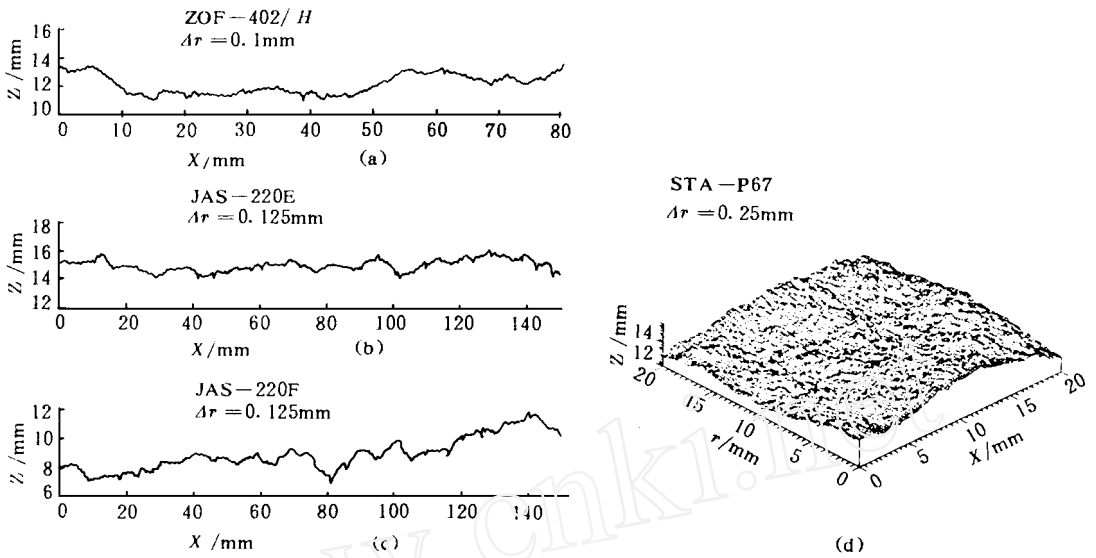


图 2 激光测量的砂岩拉破断剖面 and 表面 (Δr —— 扫描间距)

Fig 2 Laser scanned extension fracture profiles and surface of sandstones (Δr —— scanning interval)

岩石断裂面的上述特征可用随机过程加以描述。考虑一个单变量方程  $z(x)$  满足以上两个基本特征, 变量  $z(x)$  是断裂面粗糙点的高度, 它随在断面上的位置  $x$  不同呈随机变化。该随机函数的增变量  $V(r)$  定义为两点间增量平方均值, 即

$$V(r) = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} [Z(x_i+r) - Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

式中:  $V(r)$  —— 增变量;

$r$  —— 两样本点间距;

$N$  —— 总样本点数;

$j$  ——  $r$  间距内子样本点数;

$Z(x_i)$  —— 在  $x_i$  点处断面粗糙点的高度。

公式(2)是平稳和同性的, 即增变量  $V(r)$  仅随样本点间距  $r$  变化。增变量反映分形特征<sup>[20]</sup>:

$$V(x) = \frac{|Z(x_2) - Z(x_1)|^2}{|x_2 - x_1|^{2H}} \quad (3)$$

这里, 括号 代表大样本  $Z(x)$  的平均值。理论证明<sup>[21]</sup>, 分形维数  $D = 2 - H$ 。将式(2)用显函方式写成<sup>[16]</sup>:

$$V(r) = A r^\beta \quad (4)$$

式中:  $A$  是一个系数, 在  $V(r)$  与  $r$  的对数关系图中,  $A$  是曲线在  $V(r)$  轴上的截距;  $\beta$  是该对数曲线的斜率 ( $\beta = 2H$ )。由此可计算出岩石断裂面的分形维数:

$$D = 2 - \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

图 3 展示了图 2(a) 所示的岩石断裂面增变量图和对应的双对数曲线。由图 3(a) 可见,

增变量  $V$  随点间距  $r$  增加, 到某  $r$  值后,  $V$  变平缓或出现峰值, 继而呈下降趋势。

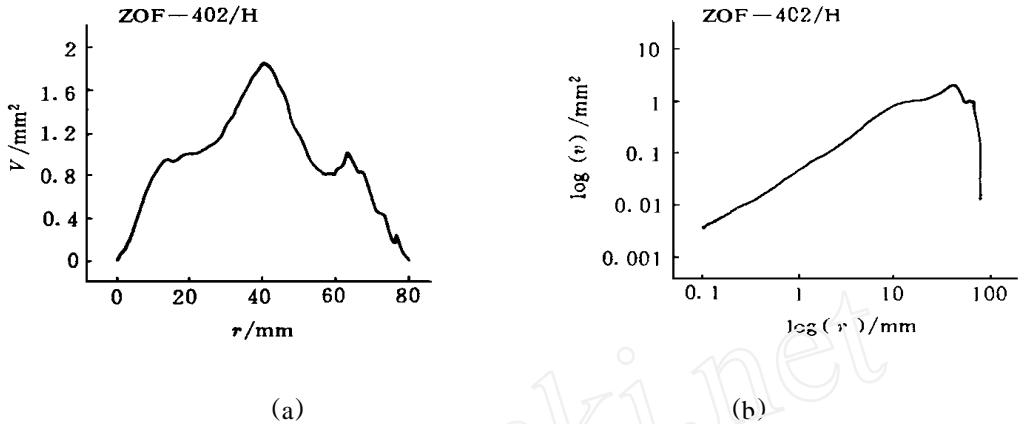


图 3 图 2(a) 所示的岩石断裂面的增变量图和相应的双对数曲线

Fig. 3 Variogram and the log-log plot for fracture profile as shown in Fig. 2(a)

这表明岩石断裂面在几何结构上的不平稳随机特性, 粗糙点增变量与点间距的相关性仅在有限的范围内成立。在图 3(b) 所示的对数关系曲线中, 线性段表明  $3V$  与  $r$  之间的相关性。根据式(4)和(5), 岩石断裂面的分形维数可由对数关系曲线的线性部分计算出。表 1 给出了图 2 所示的 3 个砂岩断裂剖面的分形维数  $D$  和截距  $A$ 。这些分形参数的确定及所表征的几何含义在下节讨论。

表 1 岩石断裂剖面(图 2)的  $D$  和  $A$  值

Table 1  $D$  and  $A$  values for rock fracture profiles(Fig. 2)

| 断裂面            | $D$      | $A (\times 10^{-4})$ |
|----------------|----------|----------------------|
| (a) ZOF-402/II | 1.39094  | 8.39                 |
| (b) JA S-220E  | 1.443825 | 1.76                 |
| (c) JA S-220F  | 1.408815 | 4.08                 |

## 4 分析和讨论

度量学中, 某集合在度量空间的维数蕴含该集合几何性质的信息。分形维数是描述集合充填度量空间的程度<sup>[21]</sup>, 它是以很小的尺规对集合不规则程度的一种度量。一般说来, 形状或分布越不规整, 分形维数就越大。分形几何中有许多计算分形维数的方法, 如网格法<sup>[7]</sup>, 尺规法<sup>[9, 10]</sup>, 频谱法<sup>[6, 22]</sup>, 统计自相似模型<sup>[17]</sup>以及本文采用的增变量方法等。采用何种方法, 基于对被测物体或对象几何性质的基本假设。同一岩石断裂表面, 运用不同的分维定义和测量、计算方法, 可能得到不同的分维结果<sup>[7]</sup>。

M aerz<sup>[13]</sup>对 Barton“标准节理面”测量及分形计算后发现, 同一节理面的不同部分分形维数相差甚远, 说明 Barton 节理面存在几何结构异性特征。许多研究者指出<sup>[6-8]</sup>自然界中

的岩石断裂表面不是严格自相似分形 (self-similar fractal), 在许多情况下具有自仿射分形 (self-affine fractal) 性质。Brown 和 Scholz<sup>[6]</sup>对自然节理面的系统分形研究后指出: “自然界中岩石节理面在任何尺度上都不具有自相似分形性质”, 没有一个分形维数能描述整个节理面。Huang 等<sup>[8]</sup>认为所确定的分形维数仅代表该尺度上的分形特征。

如前所述, 分形维数是对分形体“几何不规则程度”或许多自然现象“紊乱度”的描述。然而, 有趣的是, 若将岩石力学中岩石断裂表面的分形维数  $D = 1.00286^{[13]}$  与摩擦学中磁带表面分形维数  $D = 1.7^{[22]}$  作比较, 人们不禁要问, 哪个表面更粗糙? 分形维数描述岩石节理表面粗糙度, 与传统的“粗糙”概念有何联系? 对于这个问题, 有许多不同观点。

Lee 等人<sup>[10]</sup>和 Xie<sup>[17]</sup>的研究表明, 岩石节理面的  $JRC$  值越大, 分形维数越高, 岩石节理的抗剪强度与分形维数成正比。Huang 等人<sup>[8]</sup>认为分形维数在某种程度上反映了岩石节理粗糙面间的咬合程度。Zhou 等人<sup>[23]</sup>将分形维数与接触力学中传统的“准接触面积曲线”概念相联系。Miller 等人<sup>[7]</sup>的实验结果却发现“计算的分形维数可能, 而且往往是与人们目测的结果相反”, 即: 目测者认为较“粗糙”的节理面分形维数较低, 但对数曲线在纵轴上的截距往往与目测结果趋于吻合, 认为分形维数  $D$  本身不足以反映岩石节理面的粗糙程度。鉴于上述研究观点的异同, 下面就增变量方法确定的分形参数进行分析和探讨。

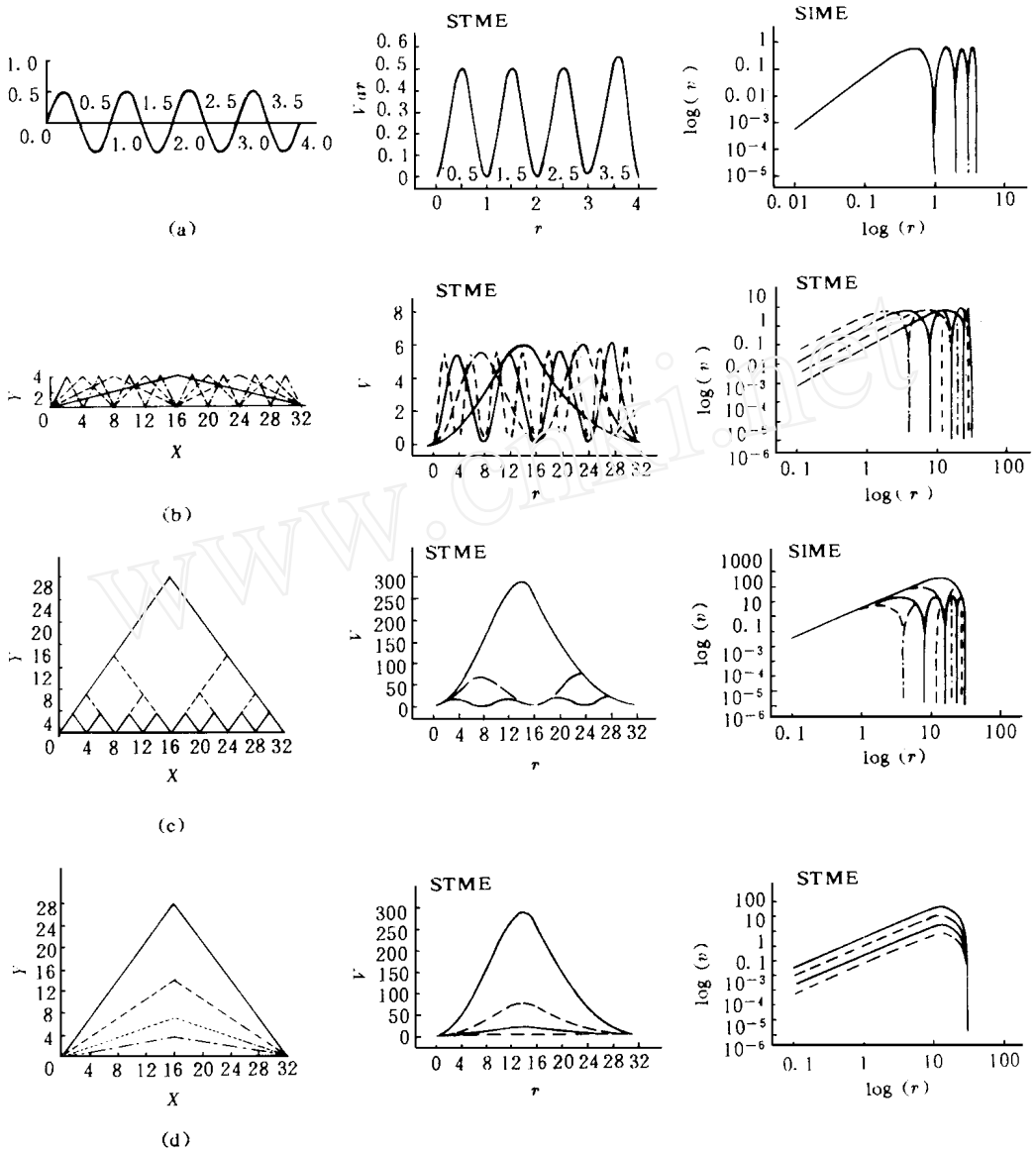
先比较图 2(b), 2(c) 两个砂岩拉破裂剖面。图 2(c) 看上去比图 2(b) 表面更“粗糙”, 而表 1 给出的计算结果却是图 2(c) 断裂面的分维  $D$  低于图 2(b) 所示断裂剖面的  $D$  值。但注意到图 2(c) 所示的“粗糙”断裂面的截距  $A$  明显大于图 2(b) 所示断面的  $A$  值。这里  $D$  和  $A$  值是依据增变量对数关系曲线的线性段 (有限间距  $r$ ) 确定的, 曲线峰值以外的非线性部分被舍去。这样做, 取舍了哪些几何结构特征值得研究。

表面形态学将自然表面划分成: 形状、波度和粗糙度 3 种结构级别。为阐明起见, 构造正弦周期曲线, 等高、等角及等波长三角形系列 (图 4, 左), 观察它们的增变量变化模式。由图 4(中) 可见, 增变量波峰与原几何剖面的起伏周期相对应。对于自然节理面, 增变量图展示了表面统计意义上的周期波动特征。在对数关系图中 (图 4, 右), 置于增变量第一个波峰前, 存在  $v$  与  $r$  的线性关系。对数关系图中的线性-非线性转折点, 正是表面结构粗糙度与波度的分界线。在不同尺度范围计算分形维数, 揭示了不同的几何结构特征。本研究在对数线性段确定的分形维数, 是对依附在节理波形表面粗糙点不规则程度的描述。有研究者对结构面进行双度分形<sup>[24]</sup>, 旨在不同尺度上对粗糙度和波度分别加以描述。

应当指出, 图 4 所示的各种规则剖面不是分形曲线。确切地讲, 它们属欧里几何范畴, 其维数均等于 1。然而, 如果把欧里几何作为分形几何中的特例 ( $D = 1$ ), 研究表明<sup>[16]</sup>, 对图 4 中几何图形应用增变量分形方法。在对数关系线性段的斜率  $\beta > 2$ , 即  $D = 2 - \beta/2 > 1$ , 说明增变量分形方法对欧里几何曲线也是适应的。研究还发现, 图 4 中峰波较多的几何剖面, 它的“分形维数”难趋近于 1, 从某种侧面说明  $D$  值对不规则几何性态的相关性。

尽管图 4 中各种形状曲线的“分形维数”均等于 1, 但由它们构造的岩石节理在力学性质上会截然不同。仅用分形维数难以描述它们的区别所在。由图 4(右) 的对数关系曲线可见, 曲线在纵轴上的截距  $A$  与几何剖面波形坡度有密切关系, 波形的坡度越陡, 纵轴截距  $A$  值越大。不难理解, 图 2(c) 岩石断裂面之所以看上去比图 2(b) 断裂面“粗糙”, 并非它的分形维数高, 而是它有较大的  $A$  值 (表 1)。由于岩石节理的力学性质, 如抗剪强度, 剪胀等, 受节理表面波形的坡度影响很大<sup>[25]</sup>, 本研究认为, 截距  $A$  是分形描述岩石断裂表面形

态, 并用于研究岩石节理力学性质的一个非常重要的参数。



(a) 正弦线 (b) 等高三角形 (c) 等角三角形 (d) 等波长三角形  
图 4 各种规则几何剖面(左)、增变量图(中)和对数关系曲线(右)

Fig 4 Various regular profiles(left), variogram s(m iddle) and their log-log plots(right)

## 5 结论

应用激光表面测量技术, 可对岩石断裂表面在无损伤的情况下, 精确测量其表面形态。应用增变量方法对岩石断裂面的分形描述表明, 增变量图总体上展示了断裂表面波度

变化特征。根据增变量对数关系曲线线性段斜率计算的分形维数 $D$ 是对表面波形上粗糙点不规则程度的描述,具有代表性和确定性。此外,增变量对数曲线在纵轴上的截距 $A$ ,与表面波形坡度密切相关,是分形描述岩石断裂表面形态、研究其与节理力学性质关系的重要参数。

## 参 考 文 献

- 1 Barton N. Review of a new shear strength criterion for rock joints Eng. Geol., 1973, 7: 287~ 322
- 2 Byerlee J D. Friction of rocks Pure Appl Geophys., 1978, 116: 615~ 626
- 3 Barton N & Choubey V. The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice Rock Mechanics, 1977, 10(2): 1~ 54
- 4 Brown E T. Rock characterization testing & monitoring- ISRM suggested methods Pergamon Press, 1981
- 5 Wakabayashi N. & Fukushima I Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength. In: ISRM Symp. Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe: 1992
- 6 Brown S R & Scholz C H. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces J. Geophys. Res., 1985, 90(12): 575~ 585
- 7 Miller S M, McWilliam S P C and Kerker J C. Ambiguities in estimations of rock fracture surfaces In: Rock Mech. Contributions and Challenges: Proc. 31th U. S. Symp. Rock Mech. (Ustrulid W A & Johnson G A eds.), Balkema, Rotterdam: 1990, 471~ 478
- 8 Huang S L, Oelfke S M and Speck R C. Application of fractal characterization and modelling to rock joint profiles Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1992, 29(2): 89~ 98
- 9 Turk N, Grieg M J, Deaman W R, et al Characterization of rock joint surface by fractal dimension. In: Rock Mech. Proc. 28th U. S. Symp. (Famer I W et al eds.), Balkema, Boston: 1987, 1223~ 1236
- 10 Lee Y H, Barr D J and Haas C J. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profile Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1990, 127: 453~ 464
- 11 Muralha J. Fractal dimension of joint roughness surface In: ISRM Symp. Fractured and Jointed Rock Masses Lake Tahoe: 1992
- 12 Xie H P & Pariseau W G. Fractal estimation of joint roughness coefficients Sci. in China(B), 1993, 37(12): 1516~ 1524
- 13 Maerz N H & Franklin J A. Roughness scale effect and fractal dimension In: Scale Effect in Rock Masses: Proc. 1st Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses(A. Pinto da Cunha ed.), Balkema, Rotterdam: 1990, 121~ 126
- 14 Milne D, Gemain P, Grant D, et al Systematic rock mass characterization for underground mine design. In: Int. Cong. on Rock Mech., 1991, 1: 293~ 298
- 15 Kwasniewski M A & Wang J A. Application of laser profilometry and fractal analysis to measurement and characterization of morphological features of rock fracture surfaces In: Geotechnique et Environnement, 4eme Colloque Franco-Polonais, Nancy: 1993, 163~ 176
- 16 Wang J A. Morphology and mechanical behavior of rock joints [Ph. D. Thesis], Poland: Faculty of Mining and Geology, Silesian Tech. Univ., Gliwice: 1994
- 17 Xie H P. Fractal in Rock Mechanics Balkema, Rotterdam: 1993
- 18 Bahat, D. Tectono-fractography. Springer-verlag, Berlin, Heidelberg: 1991
- 19 Atkinson B K. Fracture Mechanics of Rock. Academic Press, Harcourt Brace, Jovanovich Publishers, London: 1987
- 20 Voss R F. Random fractal forgeries In: Fundamental Algorithms for Computer Graphics(R. A. Earnshaw ed.), 1985, 805~ 835

- 21 Falconer K J. Fractal Geometry mathematical Foundations and Application. England: John Wiley & Sons, 1990
- 22 Majumdar A & Bhushan B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces. *J. Tribology Trans ASME*, 1990, 122: 205~ 216
- 23 Zhou G Y, Leu M C and Blackmore D. Fractal geometry model for wear prediction. *Wear*, 1993, 170: 1~ 14
- 24 Korvin K. Fractal Models in the Earth Sciences. Elsevier, Amsterdam, 1992
- 25 Patton P C. Multiple modes of shear failure in rock and related material [Ph. D. Thesis]. Univ. of Illinois, Urbana, 1966

## APPLICATION OF LASER TECHNIQUE AND FRACTAL THEORY TO THE MEASUREMENT AND CHARACTERIZATION ON ROUGHNESS OF ROCK FRACTURE SURFACES

Wang Jin an<sup>1</sup> Xie Heping<sup>1</sup> KwASNIEWSKI M. A.<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Beijing Graduate School, China University of Mining & Technology, Beijing 100083)

(<sup>2</sup> Faculty of Mining and Geology, Silesian Technical University, Poland)

**Abstract** A laser profilometry is introduced to measure the morphology of rock fracture surfaces. On the basis of fractal geometry, the variogram method for random process analysis is used to characterize the roughness of rock fracture surfaces. The fractal parameters—fractal dimension  $D$  and the intercept  $A$ , have been analysed in order to make a better understanding of their geometric properties.

**Key words** roughness, laser profilometry, fractal dimension, the intercept

### 关于《岩石力学与工程学报》调价与增加印张的启事

为了方便订户,进一步扩大学报的发行量,自今年下半年起,《岩石力学与工程学报》交邮局发行,邮发代号为 38-315。现已开始明年的学报预订工作,请广大读者直接到各地邮局订阅。

接邮局通知,按工商局与新闻出版部门的物价规定,《岩石力学与工程学报》现在的订价太低,而邮局按物价规定的合理价格收取管理费。经研究决定,自明年第 1 期开始,《岩石力学与工程学报》的单价调整为 8 元人民币,全年订价 48 元人民币。相应地,学报内芯由现在的 6 印张 96 页增加为 7 印张 112 页。如此调整后的学报订价在全国同类杂志中仍属偏低。有关学报调价与增加印张的事宜已报告新闻出版主管部门。

《岩石力学与工程学报》编辑部