

文章编号: 1001-4888(2008)02-0118-07

扫描电镜下断口表面的三维重建 及分形维数的测量^{*}

王怀文¹, 周宏伟¹, 谢和平^{1, 2}, 左建平¹, 李艳杰¹

(1. 中国矿业大学(北京) 岩石力学与分形研究所, 北京 100083; 2. 四川大学, 成都 610065)

摘要: 基于数字散斑相关方法, 利用扫描电镜立体对技术和计算机视觉方法实现了物体表面的三维重建, 讨论了影响其精度的原因, 并且利用分形理论对表面的三维形貌进行了定量分析, 由立方体覆盖法得到了三维形貌的分形维数。作为应用的实例, 将该方法应用到岩石断口的三维重建中, 得到了重建后的高度云图和分形维数。结果表明, 利用扫描电镜立体对技术对断口表面进行三维重构并进行分形维数的计算是一种行之有效的断口定量分析方法。这为研究材料断裂的微观机理、断裂过程和断裂性质等问题提供了一种途径。

关键词: 扫描电镜; 三维重建; 分形维数; 数字相关方法

中图分类号: O348

文献标识码: A

0 引言

三维重建是计算机视觉领域中的一个重要研究方向, 主要是由两幅或者多幅两维图像恢复物体的三维几何形貌。目前由两个普通摄像机分别获取的两维图像进行三维重建的技术已经比较成熟^[1], 扫描电镜下的三维重建也在 20 世纪 90 年代开始起步并得到发展^[2, 3]。由于 SEM 具有分辨率高、景深大和可以直接观察试样等特点, 特别适合于对断口进行分析研究, 从而使显微断口 SEM 成像技术成为一种广泛用于研究断裂的方法。但是, 扫描电镜的成像技术是将立体的景物经过透视投影在二维平面上, 损失了景物的深度信息, 这给断口图像的平面分析带来很大的局限性。为了得到断口图像完整的三维信息, 在 SEM 下进行断口的三维重建具有较大的实用性。

定量的断口分析可以为揭示断裂微观机理、断裂过程和断裂性质等问题提供可靠的依据, 从而更好地研究材料和零部件的失效。断口表面定量分析所借助的一个重要工具是分形理论。自从 20 世纪 80 年代分形应用于断口分析以来, 这项研究引起了众多材料工作者的注意。尽管目前测量分形维数的方法有多种, 但是大部分方法属于间接法, 因而探索分形维数直接测量的方法显得比较重要。

本文利用计算机立体视觉的研究成果, 基于数字相关方法, 实现了利用扫描电镜立体对图像对岩石断口表面的三维重建, 并根据张亚衡和周宏伟等提出的改进立方体覆盖法^[4]进行了分形维数的直接测量, 为断口的进一步定量分析及断裂机理的研究奠定了基础。

1 基本原理

1.1 三维重建

三维重建是利用空间同一点在不同立体角下的两幅图像中的视差来计算其高程的。进行三维重建

^{*} 收稿日期: 2007-03-10; 修订日期: 2008-03-04

基金项目: 本文工作得到国家自然科学基金(NO. 50674092, NO. 50221402, NO. 50490272); 国家 973 项目(2002CB412701)和教育部新世纪优秀人才基金(NCET-04-0491)资助

通讯作者: 王怀文(1975—), 男, 博士, 天津商业大学副教授, 主要从事现代光测方法与材料性能测试方面的研究工作。E-mail: wanghw@tjcu.edu.cn

首先必须确知空间点在两像面上的像点坐标,此两像点称为匹配像点。在两幅图像中找到匹配像点的坐标的过程称为匹配。立体匹配的本质就是给定一幅图像中的一点,寻找此点在另一幅图像中的对应点,使得这两点为空间同一物体点在不同图像面上的投影。而数字散斑相关方法的基本思想就是,通过匹配物体变形前图像中的子区与变形后图像中的子区之间的一一对应关系,来获得描述物体变形的信息^[5]。可以看出,立体匹配和数字散斑相关方法之间具有很强的联系,数字散斑相关方法所能解决的问题正好是立体匹配中所需要解决的问题。因此可以将数字散斑相关方法应用到三维重建中的立体匹配中。

设 f, g 分别表示不同立体角下所记录的两幅图像的灰度分布,并假设物体表面上的每一点在两幅图像中的灰度值是不变的,即满足立体视觉中的相似性度量假设,则:

$$f(x, y) = g(x^*, y^*) \quad (1)$$

首先在一幅图像中选定一待匹配点,以匹配点为中心的某一大小的子区作为样本子区, (x, y) 为子区内任一点。不同立体角下的另一幅图像的所有可能匹配点构成一个搜索空间,以搜索空间内每一点为中心的子区域称为目标子区, (x^*, y^*) 为目标子区内任一点。为了判断搜索空间内的点与待匹配点是否相对应,可从数学上建立一个衡量图像相似程度的标准,这个标准可选用 $g(x^*, y^*)$ 与 $f(x, y)$ 的互相关系数。相关系数是反映两个图像子区间的相似程度的一个数学上的度量。经常采用的交叉互相关系数为:

$$C = 1 - \frac{\sum [f(x, y) \cdot g(x^*, y^*)]}{\sqrt{\sum f^2(x, y) \cdot \sum g^2(x^*, y^*)}} \quad (2)$$

对于实际情况而言,由于系统噪声、图像的畸变等多方面的因素,一般认为(2)式取极小值时,二者是对应的。这样,通过求相关系数的极值可实现对应点的匹配。

不同立体角下的图像中的对应点立体匹配之后,则可以计算出图像中各点的相对高程。若一图像立体角为 0° ,另一图像立体角为一较小的 θ 角(一般为 $5^\circ \sim 15^\circ$),如图1所示,则高程计算公式如下:

$$h = \frac{d_1 \cos \theta - d_2}{\sin \theta} \quad (3)$$

其中, h 为样品上某点 P_A 和参考点 P_B 之间的高程差; θ 为倾角, d_1 、 d_2 分别为 P_A 和 P_B 两点在两图像上的投影距离。将图像上各点的高程计算出来之后,就完成了物体表面的三维重建。

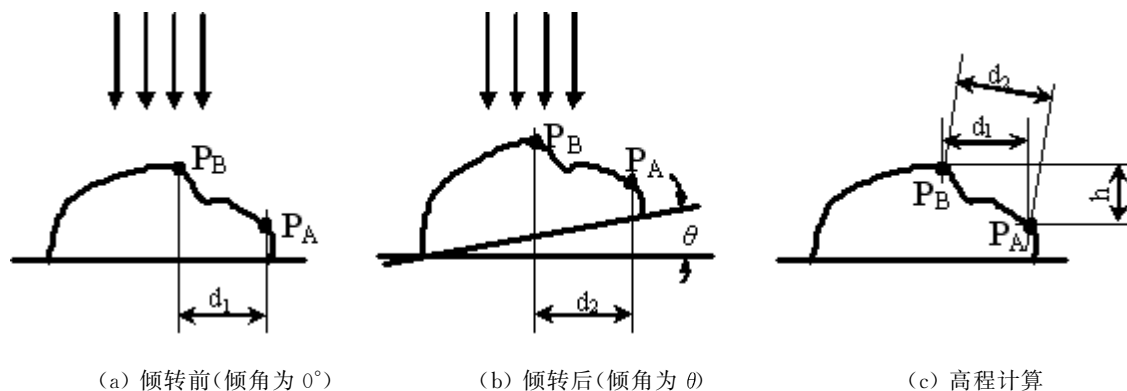


图1 利用 SEM 立体对进行高程计算示意图^[3]

Fig. 1 Sketch of highness calculation by SEM stereo image pairs^[3]

1.2 分形维数的计算

用立方体覆盖法估算的分维是纯几何意义上的分维,就如用二维方形网格去覆盖无规则曲线一样,在计算过程中却没有近似的过程,每个计算步骤都有精确的方法,所以计算出的分维接近真实的分维^[4, 6]。

该方法的操作过程如下:在平面 XOY 上存在一正方形网格,网格中每格的尺寸是 δ ,正方形的 4 个角点处分别对应四个高度 $h(i, j)$ 、 $h(i, j+1)$ 、 $h(i+1, j)$ 和 $h(i+1, j+1)$,其中 $1 \leq i, j \leq n-1$, n 为每

个边的量测点数。用边长为 δ 的立方体对粗糙表面进行覆盖,计算覆盖区域 $\delta \times \delta$ 内的立方体个数,即在第 i, j 个网格内,覆盖粗糙面的立方体个数 $N_{i,j}$ 为:

$$N_{i,j} = \text{INT} \left\{ \frac{1}{\delta} [\max(h(i,j), h(i,j+1), h(i+1,j), h(i+1,j+1))] + 1 \right\} \\ - \text{INT} \left(\frac{1}{\delta} [\min(h(i,j), h(i,j+1), h(i+1,j), h(i+1,j+1))] \right) \quad (4)$$

其中 INT 为取整函数。则覆盖整个粗糙表面所需的立方体总数 N 为:

$$N(\delta) = \sum_{i,j=1}^{n-1} N_{i,j} \quad (5)$$

改变观测尺度再次覆盖,再计算覆盖整个粗糙表面所需的立方体总数,若粗糙表面具有分形性质,按分形理论,立方体总数 $N(\delta)$ 与尺度 δ 之间应存在如下关系:

$$N(\delta) \sim \delta^{-D} \quad (6)$$

$$N_0(\delta) \sim \delta_0^{-D} \quad (7)$$

$$N/N_0 \sim (\delta/\delta_0)^{-D} \quad (8)$$

$$\log(N/N_0) \sim [-D \log(\delta/\delta_0)] \quad (9)$$

式中 D 为断口表面分形维数。

由此可知,只要绘出关于 N/N_0 与 δ/δ_0 的双对数曲线,求直线部分斜率的相反数即可得到所求分形维数。

2 实验

2.1 实验设备

本实验中采用的实验设备为中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的 JSM-5410LV 型 SEM,如图 2 所示。其载物台为一五轴联动系统,试件在试件室内可做 x, y, z 三个方向的平移以及绕 x 轴和 z 轴的转动。该扫描电镜在低真空下的分辨率可达到 5.5nm,放大倍数范围为 $35 \times \sim 200000 \times$ 。其图像的存储类型为 8bit 的 bmp 标准格式,大小可选为 660×495 像素或者 1920×1440 像素。



图 2 JSM-5410LV 型扫描电子显微镜

Fig. 2 JSM-5410LV scanning electron microscope

2.2 实验过程

(1) 调整 SEM,使其处于待机状态,将一表面经过喷金处理的岩石断口试件放入 SEM 的样品室内,使试件处于水平位置。

(2) 启动 SEM 抽真空装置,开始抽真空。大约十几分钟后指示灯亮,表明真空状态已准备好。

(3) 调节 SEM 工作距离, 本实验中工作距离取为 43mm。在低倍下观察, 以选择一合适的观察区域。然后逐步增大放大倍数, 以获得更多的表面细节, 本实验中放大倍数取为 $350\times$ 。

(4) 对所观察区域聚焦, 并调节灰度和对比度, 使图像具有较好的衬度和较多的灰度层次, 记下视场内某一显著表面特征的位置, 采集立体角为 0° 时的 SEM 图像, 记为 350-0。将试件倾斜 7° , 并调整 SEM 的 x 轴和 y 轴, 利用前面记下的显著表面特征, 保持视场相同, 采集 SEM 图像, 记为 350-7。重复前面的步骤, 采集立体角为 9° 时的 SEM 图像, 记为 350-9。

3 实验结果

3.1 位移场的计算

由于扫描电镜的电子束扫描方向与样品台的倾转轴不垂直而引起各点的位移与竖直方向之间有一个大约 17.2° 的夹角, 为了消除这个夹角的影响, 使位移只发生在竖直方向上, 本文中将图像进行了旋转处理, 旋转角度为 17.2° , 旋转后的图像如图 3 所示。

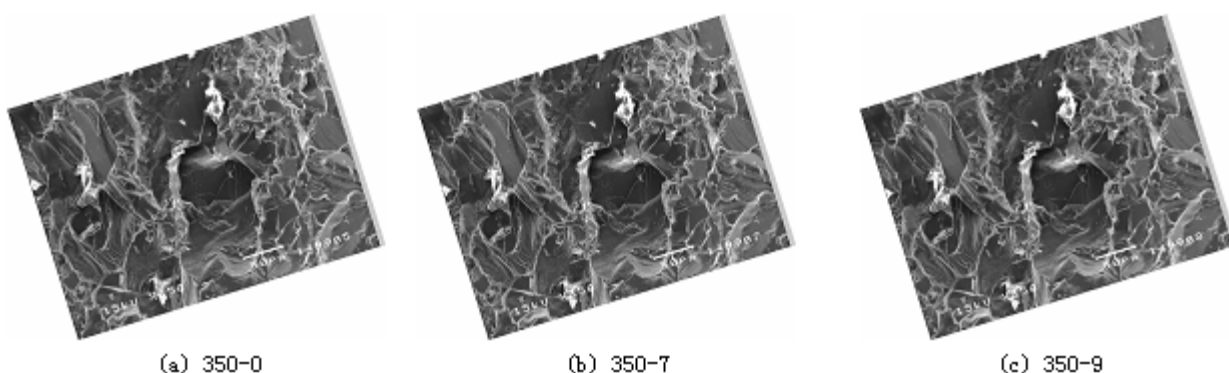


图 3 旋转后不同立体角下的图像

Fig. 3 Images with different solid angle after revolution

物体上两点在立体对图像上投影距离的不同称为视差。从前面的分析可以看到, 为了能够进行三维重建必须得到物体上两点在立体对图像上的投影距离。此投影距离可以通过计算立体对之间位移场的方式来得到。只要得到了所感兴趣区域的位移场, 则任一点与参考点之间在图像上的投影距离可以通过位移的改变来得到。本文中以倾角为 0° 的图像为参考图像, 在参考图像中取 $x(600, 1600)$, $y(500, 1200)$ 的区域为研究对象, 则不同立体角所对应的立体对之间的位移场如图 4 所示。

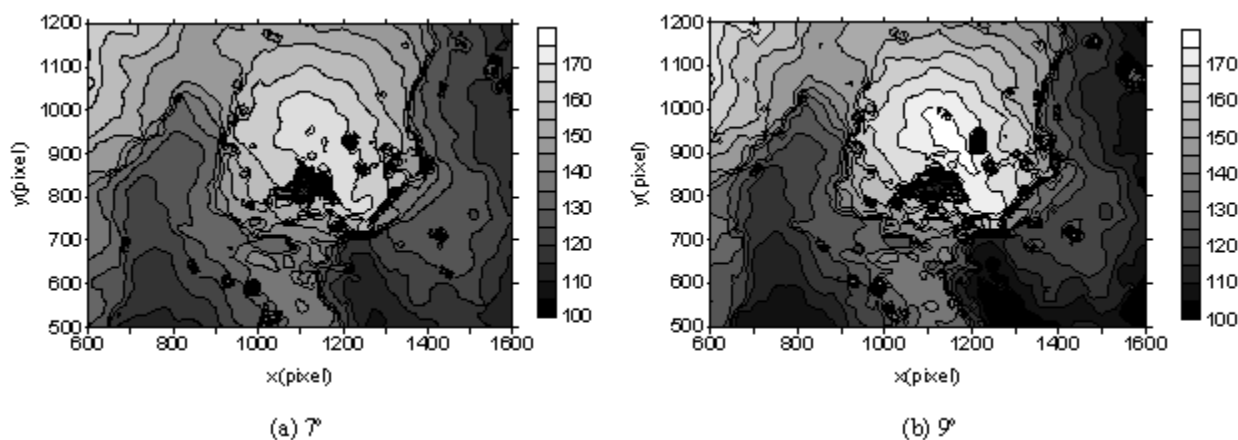


图 4 不同立体角下的位移场

Fig. 4 Displacement fields under different solid angle

3.2 三维重建

以点(600,500)为参考点,通过计算图像中不同点相对于参考点的位移差,即可得到不同点相对于参考点之间的投影距离改变量。则可由高程计算公式(4)计算出所选区域内各点的相对高程,将各点的相对高程绘制在等高线图上,得到如图 5 所示的等高线。

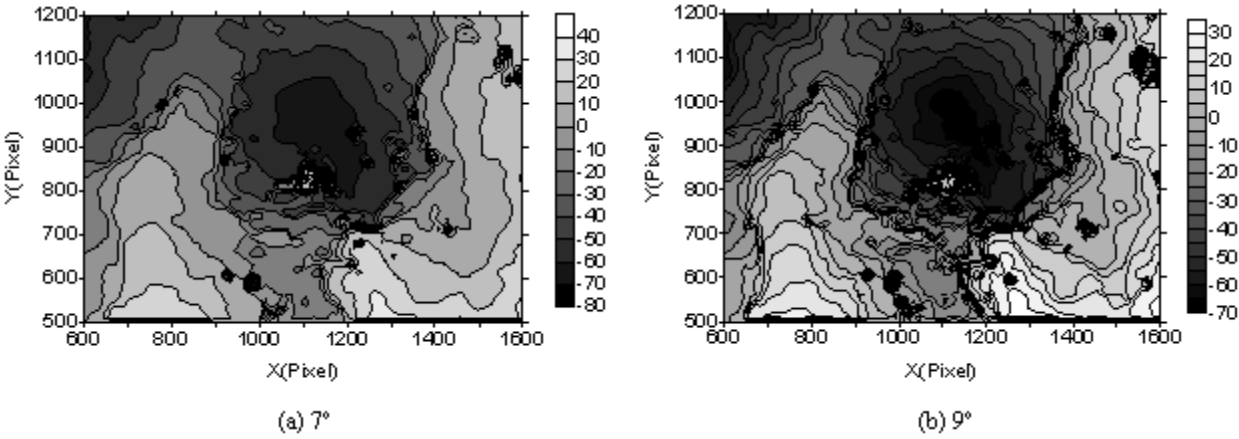


图 5 利用不同立体角下的立体对进行三维重建的等高线图
Fig. 5 Contour map constructed by SEM stereo image pairs with different solid angle

3.3 三维重建测量精度讨论

由视差原理知,高程 $h=(d_1\cos\theta-d_2)/\sin\theta$,其中 d_1 和 d_2 的精度与数字相关方法的位移测量精度有关,数字相关方法位移测量精度越高,深度测量值 h 的精度亦越高;倾斜角度 θ 值是由仪器倾斜钮的刻度读出,其测量精度取决于样品台倾斜钮的精度,也就是说,仪器样品台倾斜钮的精度越高,样品台倾斜角度 θ 值测量精度亦越高,因而深度测量值 h 的精度越高;倾斜角度 θ 值的取值也会影响结果的精度,一般在 $3^\circ\sim 15^\circ$ 之间,且当试样表面光滑时取较小值,试样表面粗糙时取较大值;扫描电镜的热噪声等对结果有一定的影响,仪器的成像质量越高,深度测量值 h 的精度就越高;另外,人为测量误差也会影响 h 值的测量精度,比如不同人对相同倾斜角度 θ 值的读数有所不同。

3.4 断口表面分形维数的计算

本文利用重建过程得到的高度数据,将立方体覆盖法的过程编制程序,建立 $N(\delta)$ 与 δ 之间的关系。以最大观测尺度为 δ_0 ,以其所对应的覆盖粗糙表面所需的立方体数目为 N_0 。实验数据如表 1 所示,反映 $N(\delta)$ 与 δ 关系的双对数曲线见图 6。

表 1 不同倾角 θ 下的 $N(\delta)$ 与 δ

Tab. 1 $N(\delta)$ and δ under different obliquity θ
(a) 7°

$\delta(\mu\text{m})$	0.9653	1.9305	3.8610	7.7220	15.4440	30.8880	61.7761
$N(\delta)$	64576	15309	3445	738	175	42	7

(b) 9°

$\delta(\mu\text{m})$	0.9653	1.9305	3.8610	7.7220	15.4440	30.8880	61.7761
$N(\delta)$	65870	15471	3470	752	171	42	7

由图 6 可知,当倾斜角度分别为 $7^\circ, 9^\circ$ 时分形维数比较接近,分别为 2.1726, 2.1783。为减小误差,取前两个分维的平均值为断口的分形维数,得出 D 为 2.1755,介于 2 与 3 之间,从理论上是合理的,这也证明断口表面确实是一分形结构。

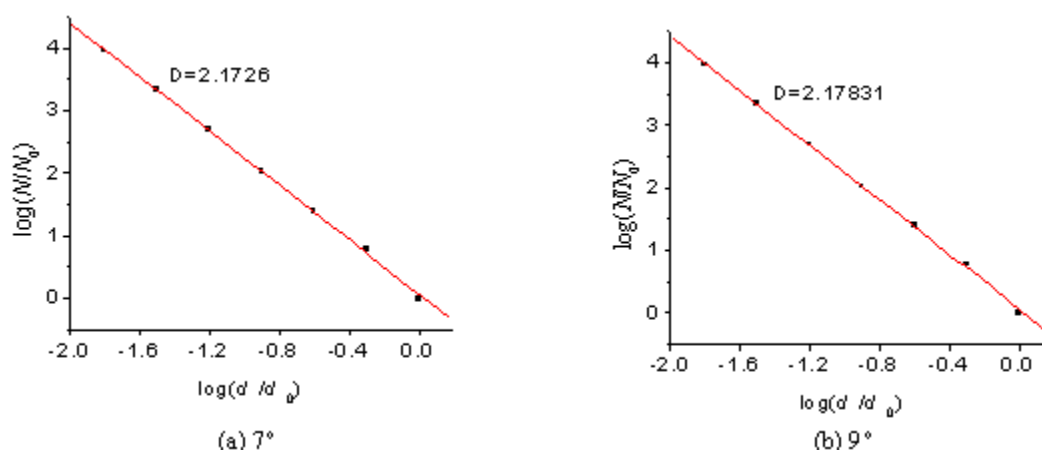


图6 不同倾角下的对数曲线图

Fig. 6 Logarithm curves under different obliquity

4 讨论与结论

通过比较图5(a)和(b)可以看出,利用视差原理进行三维重建,结果能较好地反映断口表面的真实起伏情况,是合理的。通过比较图5中不同立体角下的立体对进行三维重建的等高线图可以看出,不同立体角下的重建结果略有不同。其原因在于对于不同的表面,往往会存在一个最佳的立体角。一般来说,光滑试样的立体角为 $7^{\circ}\sim 15^{\circ}$,而粗糙试样的立体角为 $3^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 。此立体角确定平移度(平面位移),它是此垂直位置高于或低于某特定数值面的量度。立体角太大即在记载特征间具有过度的位移(平移度),则立体图像太深。如果立体角太小则位移不足,那么此立体图像就不是一个真实的三维表示。

本文基于数字相关方法,利用SEM立体对技术和计算机视觉方法实现了三维表面重建。利用相关原理算出了试件在不同立体角下的位移场,运用视差原理对岩石断口表面形貌进行了三维重建,并且对三维重建过程中的误差进行了分析,最后利用分形理论对断口的三维形貌进行了定量分析,由立方体覆盖法得出了断口形貌的分形维数。结果表明,利用SEM立体对技术对断口表面进行三维重构和测量是一种行之有效的断口定量分析的途径。

致谢: 感谢中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室的鞠杨教授、彭瑞东博士和刘红彬老师在本文实验工作中的帮助和支持。

参考文献:

- [1] 马颂德,张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998(Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision-Computation Theory and Arithmetic Foundation. Beijing: Science Press, 1998(in Chinese))
- [2] Friel J J, Pande C S. A direct determination of fractal dimension of fracture surfaces using scanning electron microscopy and stereoscopy [J]. J. Mater. Res., 1993, 8(1): 100—104.
- [3] 朱平,陈丙森. 基于特征的扫描电镜立体对三维重建[J]. 电子显微学报, 1997, 16(1): 49—56 (Zhu Ping, Chen Bingsen. Feature-based 3D Topography Reconstruction using SEM Stereo Image Pairs. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 1997, 16(1): 49—56 (in Chinese))
- [4] 张亚衡,周宏伟,谢和平. 粗糙表面分维估算的改进立方体覆盖法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3192—3196 (Zhang Yaheng, Zhou Hongwei, Xie Heping. Improved Cubic Covering Method for Fractal Dimensions of a Fracture Surface of Rock. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3192—3196 (in Chinese))
- [5] 王怀文,亢一澜,谢和平. 数字散斑相关方法与应用研究进展[J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195—203 (Wang Huaiwen, Kang Yilan, Xie Heping. Advance in Digital Speckle Correlation Method and Its Application. Advances in Mechanics, 2005, 35(2): 195—203 (in Chinese))

- [6] 周宏伟, 谢和平, KWASNIEWSKIMA. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法[J]. 摩擦学报, 2002, 20(6): 455—459(Zhou Hongwei, Xie Heping, Kwasniewski MA. Fractal Dimension of Rough Surface Estimated by the Cubic Covering Method. Tribology, 2002, 20(6): 455—459(in Chinese))

3D Reconstruction and Fractal Dimension Measurement of a Fracture Surface under SEM

WANG Huai-wen¹, ZHOU Hong-wei¹, XIE He-ping^{1,2}, ZUO Jian-ping¹, LI Yan-jie¹

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

2. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the digital speckle correlation method, a 3D reconstruction technique of a surface is achieved by combining SEM(scanning electron microscope) stereo image pairs with computer vision theory. The factors that affect result's precision in this process are discussed. A quantitative analysis of the obtained 3D surface can be carried out by employing fractal theory. Fractal dimension of the reconstructed 3D surface is measured by an improved cubic covering method. As an illustration of the technique, a rock fracture surface 3D reconstruction was carried, and contour and the fractal dimension of the reconstructed 3D surface were obtained. Results indicate that the proposed 3D reconstruction by combining SEM stereo image pairs with computer vision theory is an effective method to quantitatively analyze fracture surface. Thus, it will provide an approach to study microscopic fracture mechanism, fracture progress and fracture characters of materials.

Keywords: SEM; 3D reconstruction; fractal dimension; digital correlation method