

文章编号:1008-8245(2007)03-0023-04

SEM 图像分形维数的影响因素研究

石 英 全书海 李志俊 张立炎
(武汉理工大学,湖北 武汉 430063)

摘 要:以玻璃纤维、碳纤维纸和两种机加工表面样本的扫描电子显微镜图像为对象,运用盒维法研究了不同的放大倍数和采集过程中受到的噪声干扰对分形维数的影响。研究结果表明,随着放大倍数增大或随着椒盐噪声密度和高斯随机噪声方差的减小,分形维数下降。放大倍数和噪声对分形维数都有较大影响。在扫描电子显微镜图像分形维数的计算中,可以依据试样的结构特征选择合适的放大倍数,进行去噪处理后再计算图像的分形维数。

关键词:分形维数;SEM 图像;放大倍数;噪声

中图分类号:TP13

文献标识码:A

Effect on Fractal Dimension of SEM Images

Shi Ying Quan Shuhai Li Zhijun Zhang Liyan
(Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430063)

Abstract: Effect of magnification and noise on fractal dimension is studied by using box-counting method to scanning electron microscope (SEM) images of glass fiber, carbon paper and two samples of processed surfaces. It is found that fractal dimension decreases as magnification increases or salt-pepper noise density and Gaussian noise variance decreases. Fractal dimension is clearly affected by both magnification and noise. Magnification can be selected according to structural property and images can be processed by noise removal filter if necessary during fractal dimension calculation of SEM images.

Key words: fractal dimension; SEM images; magnification; noise

0 引 言

分形理论自70年代创立以来,引起国内外学者的极大关注,在许多学科领域都得到了广泛的应用。近年来,在材料界面的研究中也屡见不鲜^[1-2]。分形理论在材料的微观形貌与宏观性能参数之间搭起了一座桥梁,利用分形维数可以定量地描述材料的微观形貌,而分形维数与宏观性能存在一定的关系。另一方面,图像技术的应用也促进了对材料微观结构的研究,扫描电子显微镜(SEM)作为研究材料微观结构的手段,既有效

又方便,被广泛应用于提取和分析材料微观形貌上。目前,许多研究者主要致力于计算SEM图像的分形维数,以及探索分形维数与材料特征量如孔隙率、渗透率等的关系。要想通过分形维数准确地预测材料的特征量,首先一定要获取比较准确的分形维数。然而,在采集试样SEM图像时,可以选择不同的放大倍数,而且图像的采集容易引入噪声。那么放大倍数和噪声是否影响有效的、准确的分形维数的获取,测量分形维数应该如何选择SEM图像的放大倍数,这将是本文研究的主要内容。

收稿日期:2007-03-16

作者简介:石英(1975—),女,湖北阳新人,讲师,博士生。

1 分形维数的定义和测定方法

分形维数的定义来自 Hausdorff 维数的定义。设 X 是 n 维空间中的一个集合,用边长为 ε 的 n 维体积元覆盖着整个集合,设含有该集合元素的体积元的数目为 $N(\varepsilon)$,则其数学表达式为^[3]:

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D} \quad (1)$$

对于上式两边取自然对数,在进行简单运算后,可得下式:

$$D = \ln N(\varepsilon) / \ln(1/\varepsilon) \quad (2)$$

式中的 D 就称为 Hausdorff 维数,它可以是整数,也可以是分数。

对于严格自相似的分形集,很容易测定出其 Hausdorff 维数。然而对于自然界中大量存在的统计自相似的分形体, Hausdorff 维数难以测定。因此产生了许多维数的定义,其中盒维数,又称计盒维数(Box Dimension, Box-counting)是由相同形状集的覆盖确定的,计算起来比 Hausdorff 维数容易,所以应用最广泛。计盒维数与 Hausdorff 维数的测定不同之处在于:盒维法使用不同的边长的小方格去覆盖集合。同样可以使用式(2)测定分形维

数。

下面介绍盒维法的算法实现。

- (1) 读入二值图像文件,得图像的宽 W 和高 H ,均以像素为单位;
- (2) 比较 W 和 H ,得出 $\min(H, W)$;
- (3) 取分形盒子的初始边长 ε_1 为 2 个像素;
- (4) 按照选取的盒子边长分割图像为 $\text{int}[W/2] * \text{int}[H/2]$ 个子图;
- (5) 统计整个图中含有黑色像素的盒子数 N_n ;
- (6) 如果盒子边长 $\varepsilon_n \leq \min(H, W)/2$,使 ε_n 增加 1 个像素,返回步骤(4),否则进入下一步;
- (7) 根据(2)式计算分形维数 D 。

2 放大倍数对分形维数的影响

利用扫描电子显微镜分别采集了不同放大倍数下的玻璃光纤图像(见图 1)、PTFE 处理过的 TGP-H-060 型碳纤维纸图像(见图 2)和两种机加工(磨削和铣)表面样本图像(见图 3),首先将它们转换成 BMP 图像格式(见图 1)。

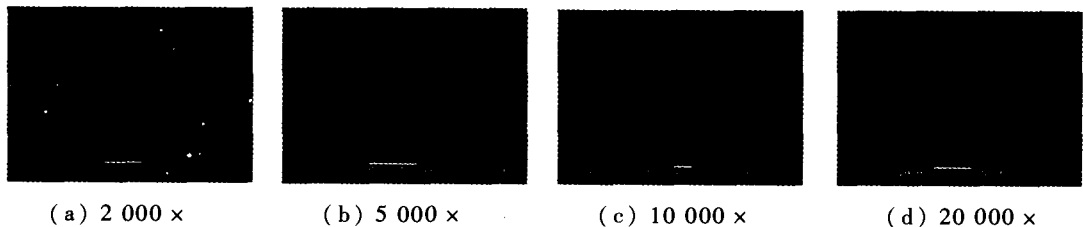


图 1 玻璃光纤的 BMP 图像

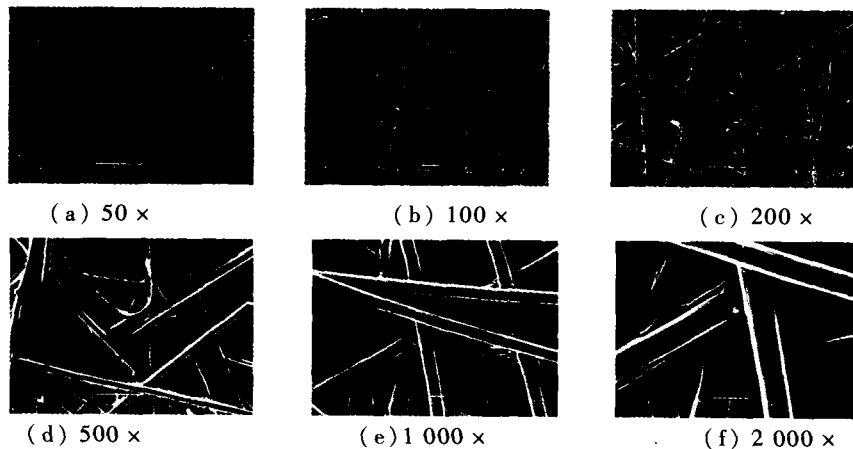


图 2 碳纤维纸试样的 BMP 图像

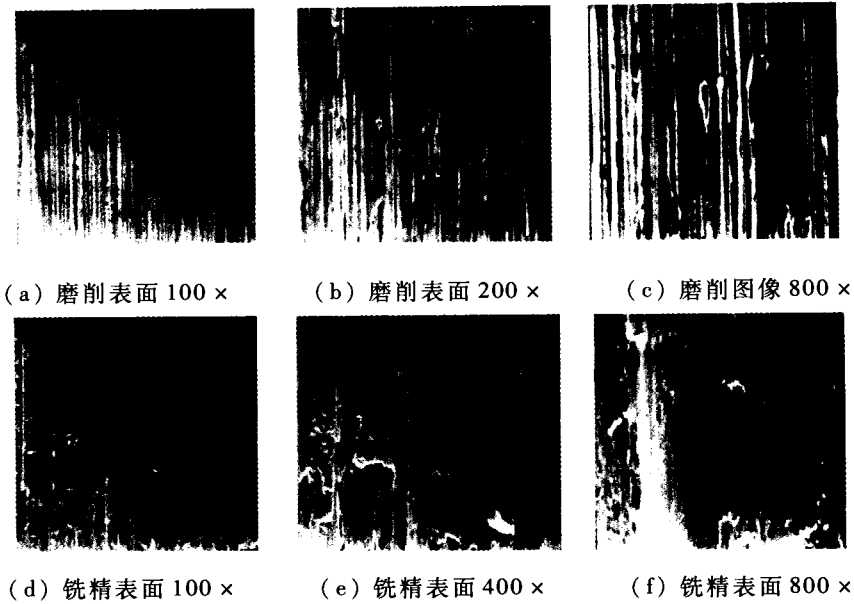


图3 不同放大倍数的两种机加工表面样本图像

对上述不同放大倍数的 SEM 图像使用盒维法进行测定,具体的计算结果如表 1 所示。

表 1 放大倍数对分形维数的影响

	放大倍数	盒维数
玻璃纤维	2 000	1.9097
	5 000	1.9079
	10 000	1.9040
	20 000	1.8990
磨削表面	100	1.8398
	200	1.8156
	800	1.7876
铣精表面	100	1.7977
	400	1.7989
	800	1.7853
碳纤维纸	50	1.9327
	100	1.9319
	200	1.9276
	500	1.9202
	1000	1.9125
	2000	1.9044

从计算结果中可以看出,对不同材料表面和加工表面,分形维数都是随着放大倍数的变化而变化,因此放大倍数对 SEM 图像的分形维数计算有影响;随着放大倍数的增加,分形维数下降,这与 Baveye^[4]的研究结论是一致的;个别数据不符合这个规律,可以认为是由误差造成的。

下面以碳纤维纸为例。对于放大倍数为 1000

和 2000 的碳纤维纸图像,计算出其分形维数分别为 1.9125 和 1.9044,结合表 1 的数据,结果表明碳纤维扁平状结构影响作用随着放大倍数的增加而增强。此外,还表明碳纤维纸不是具有很强分形特征(即在很宽的标度范围内都具有自相似特性)结构的实体,只是在有限范围内呈现出分形特性;随着放大倍数从 50 增加到 2 000,试样的盒维数取值在 1.9044 ~ 1.9327 之间,当放大倍数大于 500 时,分形维数变化较大。说明放大倍数 500 是利用 SEM 图像计算分形维数的门限值。在高放大倍数(即放大倍数大于 500)情况下,必须考虑应用分形图像的限制性条件,此时获取的图像数据会引起一些问题。首先,高放大倍数 SEM 图像包含的对象特征太少,仅由少量孔隙和固体骨架组成,这样的图像无法表征整个试样的结构特征。由于,高放大倍数 SEM 图像中孔隙和固体骨架区域的对比度下降,对该图像进行可靠的分割,获取有效的二值图非常困难,因此在此基础上计算出的分形维数是不可靠的。

3 噪声对分形维数的影响

图像噪声主要可分为两类^[5]:一类是电子噪声,即在阻性器件中由于电子随机热运动而造成的噪声,一般用零均值高斯白噪声作为其模型,它具有一个高斯函数形状的直方图分布以及平坦的功率谱;另一类是颗粒噪声(或称为椒盐噪声),

它是由感光片不正确的曝光产生的。为了研究噪声对 SEM 图像表面分形维数的影响,分别选择玻璃光纤图像(见图 1(b))、PTFE 处理过的 TGP-H-060 型碳纤维纸图像(见图 2(c))、磨削加工表面样本图像(见图 3(b))和铣表面样本图像(见图 3(e)),人为地加入不同密度的椒盐噪声和零均值不同方差的高斯随机噪声。二值化后用盒维法测定其分形维数,计算结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 椒盐噪声对分形维数的影响

密度	盒维数			
	玻璃光纤	碳纤维纸	磨削表面	铣精表面
1%	1.7414	1.9279	1.8336	1.7792
5%	1.7575	1.9287	1.8592	1.8111
10%	1.8116	1.9298	1.8613	1.8423
50%	1.8777	1.9337	1.9005	1.9004

表 3 高斯随机噪声对分形维数的影响

方差	盒维数			
	玻璃光纤	碳纤维纸	磨削表面	铣精表面
0.0001	1.8775	1.9283	1.8082	1.7332
0.001	1.8819	1.9284	1.8242	1.7905
0.01	1.8849	1.9289	1.8694	1.8927
0.1	1.8840	1.9313	1.9003	1.9057

从表 2 和表 3 中可以看出,分形维数随着图像叠加的椒盐噪声密度的增加而增加,随着叠加的高斯随机噪声方差的增加而增加;个别数据不符合这个规律,可以认为是由误差造成。由此可知,当 SEM 图像上存在噪声时,无论是高斯随机噪声还是椒盐噪声,通过盒维法算得的分形维数都会发生变化。以碳纤维纸为例,通过对叠加噪声前后的二值图数据进行分析发现,在叠加噪声后的图像中,原来白色区域上叠加了分散的黑点,而黑色区域上叠加了分散的白点,而且这些点比较分散,不会形成连接成大块区域的情况。因此,当用大于 2 个像素的盒子去覆盖图像时,在白色区域上包含黑色像素的盒子数增多,而在黑色区域上,由于叠加的白点是分散的,没有形成 2×2 的白色区域块,包含黑色像素的盒子数目不会减少。综合起来,叠加噪声后,包含黑色像素的盒子

总数增加,从而分形维数增加。而且,随着椒盐噪声密度或高斯随机噪声方差的增加,图像上噪声点增多,导致包含黑色像素的盒子数增加,所以分形维数增加。由此可见,计算结果是合理的。

此外,当椒盐噪声的密度从 0.01 变化到 0.5 时,四幅图像分形维数变化从 0.3% 到 6.31%;而当高斯随机噪声方差从 0.0001 变化到 0.1 时,分形维数变化从 0.15% 到 9.03%。对碳纤维纸图像而言,两种噪声影响都不大,而对其它的三幅图像影响较大。总的看来,噪声对 SEM 图像分形维数的影响不能忽略,应通过滤波处理后再进行分形维数的计算。

4 结束语

(1) 随着放大倍数的增加,分形维数下降。高放大倍数 SEM 图像包含的对象特征太少,无法表征整个试样的结构特征,所以由高放大倍数 SEM 图像计算出的分形维数不可靠;

(2) 分形维数随着图像叠加的椒盐噪声密度的增加而增加,随着图像叠加的高斯随机噪声方差的增加而增加;

(3) 对比分析试验数据发现,放大倍数和噪声对分形维数影响都比较大。因此,在 SEM 图像分形维数计算中,应该依据试样的结构特征选择合适的放大倍数,进行去噪处理后再计算图像的分形维数。

参考文献

- [1] 袁长良. 表面微观形貌的分形特征及模拟[J]. 中国机械工程, 1997(8): 78-80
- [2] 王鲁. 功能梯度材料表面分形维数数的研究[J]. 材料工程, 2001(11): 25-27
- [3] 张济忠. 分形[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [4] Baveye P, Boast C W, Ogawa S, et al. Influence of image resolution and thresholding on the apparent mass fractal characteristic of preferential flow patterns in field soils [J]. Water Resour. Res., 1998, 34: 2783-2796
- [5] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001