第 23 卷 第 6 期
2003 年 11 月

摩 擦 学 学 报
TRIBOLOGY

Vol 23, No 6
Nov, 2003

磨损表面形貌的三维分形维数计算

蒋书文[1], 姜 斌[1], 李 燕[1], 邓 宏[1], 郑昌琼[2], 尹光福[2]

(1. 电子科技大学 微电子与固体电子学院, 四川 成都 610054; 2. 四川大学 无机材料系, 四川 成都 610065)

摘要: 基于分形理论和磨损表面扫描电子显微分析, 采用盒子维方法计算了磨损表面的三维分形维数. 结果表明, 在计算尺度范围内, 采用与尺度无关的分形维数表征磨损表面形貌特征是可行的; 实际磨损表面的三维分形维数同其表面粗糙度密切相关, 表面粗糙度越大, 分形维数越大; 同表面粗糙度相比, 分形维数计算值较稳定.

关键词: 磨损表面; 形貌; 分形维数; 表面粗糙度

中图分类号: R161.14 文章标识码: A 文章编号: 1004-0595(2003)06-0533-04

磨损表面形貌具有复杂、粗糙和随机的特征. 通常可采用表面粗糙度评定表面形貌特征, 但表面粗糙度是尺度相关的评定参数, 因此, 寻找与尺度无关的表面形貌评定参数对摩擦学研究具有重要意义. 1977 年, 法国数学家 Mandelbrot 等提出的分形几何理论[1, 2]为研究不规则表面提供了新的途径. 20 世纪 80 年代以后相继建立了基于表面分形特征的摩擦接触模型, 用分形维数描述磨损表面特征[3, 4]. 但是, 以往的理论一直侧重于对二维截面或磨粒轮廓的研究[5~9], 而对三维表面形貌的分形分析较少, 且认为三维表面的分形维数 $D_s = D + 1$ (D 为二维轮廓的分形维数). 这种描述适用于各向同性的表面结构, 但实际磨损表面大多呈现各向异性. 因此, 有必要求出适合磨损表面的三维分形维数, 而不宜仅依靠二维轮廓的分形维数来计算磨损表面的 D_s.

本文作者基于分形理论和磨损表面扫描电子显微分析(SEM), 对磨损表面三维形貌进行了分形研究, 提出了计算磨损表面三维分形维数的简便可行方法, 并应用该方法对实际磨损表面进行了计算以及分析.

1 计算方法

当扫描电子显微镜的聚焦电子束扫描三维表面时, 从样品表面会反射出低能二次电子, 采用相应的接收探头捕获低能二次电子相关信息并进行适当技术处理, 即可得到 SEM 灰度照片. 样品表面形貌影响二次电子的反射强度, 从而导致不同的图像明暗变化即灰度差异. 因此获得的三维磨损表面 SEM 图像的强度分布是其真实形貌的直接反映. 若将像素的灰度值视作平面高度, 则图像的灰度表面反映高低不同的三维曲面的形貌[10], 即图像的 "粗糙度" 反应真实表面的粗糙度. 因此, 可以由表面形貌 SEM 照片图像数据来计算磨损表面形貌的分形维数.

我们采用盒子维法计算三维表面图像的分形维数[11]. 基于测度维数的定义, 集合 A 的分形维数 D 可以定义为:

$$D = \log N / \log(1/r). \tag{1}$$

式中: N 表示用 "尺子" r 量度 A 时的量度结果. 用不同的尺子度量 A, 可得到不同的结果 N, 由此可计算出分形维数 D.

如图 1 所示, 对大小为 $M \times M$ 的图像, 假设可以用大小为 $e \times e \times e'$ 的网格覆盖整个图像, 且 $e' = e \times G/M$, G 为整个图像的灰度级数, u_e 和 b_e 分别是区域 $e \times e$ 内图像的最大和最小灰度, 计算 u_e 和 b_e 之间包含至少一个灰度级数的网格个数, 记为 N, 则 N 的数值随 e 的取值不同而不同, 尺子 $r = e/M$, 而 M 为常数, 网格尺寸 e 即是测量图像灰度级数的尺度. 因此可以利用 e 与 N 的关系计算图像灰度数据的分形维数. 由式(1)经简单数学推导得到:

$$N = (e/M)^{-D},$$

$$\text{即 } \log N = -D\log e + C \tag{2}$$

式中: D 为图像的盒子维数, $C = D\log M$ 为常数. 由不同 e 值经计算可得到不同 N 值. 由式(2)可知, 对 e、N 作双对数图, 采用最小二乘法拟合的直线斜率即

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39870232).

收稿日期: 2003-01-20, 修回日期: 2003-05-20/ 联系人蒋书文, e-mail: Jiangsw@uestc.edu.cn.

作者简介: 蒋书文, 男, 1969 年生, 博士, 目前主要从事电子薄膜材料及生物材料研究.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

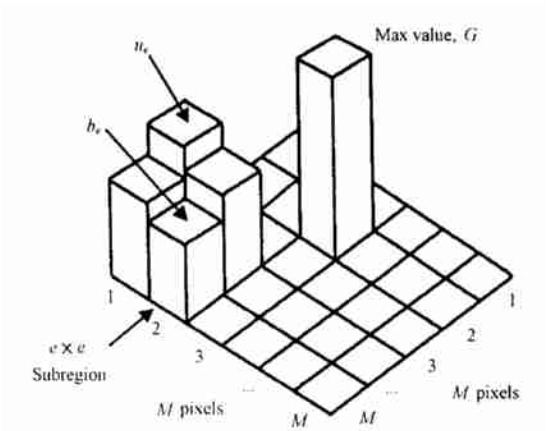


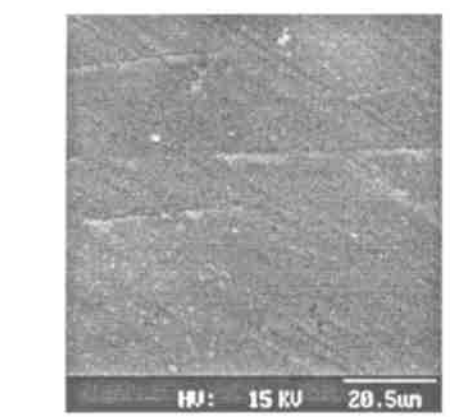
Fig 1 Box counting method for calculating fractal dimension

图 1 盒子维方法计算分形维数示意图

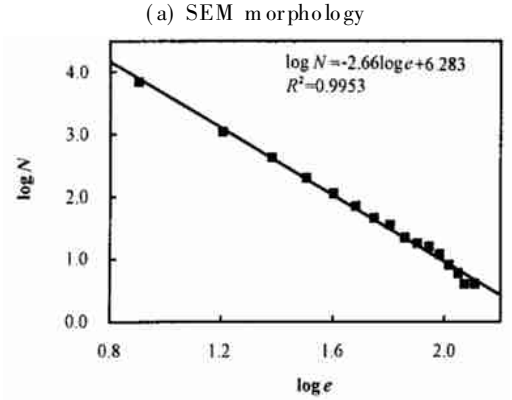
为 $-D$.

应该指出的是, 自然界的表面并不是理想的分形表面, 磨损表面也只是在某一尺度范围 $[e_{min}, e_{max}]$ 内表现出分形特征, 并且在这一尺度范围内才能实现分形维数的正确估计. 为了提高分形维数计算结果的可靠性, 在计算过程中 e 的取值满足 $\sqrt[3]{M} \leq e \leq M/2$[11].

图 2(a) 示出了采用 OPTON CSM950 型扫描电子显微镜图形工作站获得的磨损表面形貌 SEM 照片, 其大小为 256×256×8 bit. 通过计算机语言编程实现上述算法, 并计算该 SEM 照片的分形维数, 对 log$e$-log$N$ 作图[见图 2(b)], 分形维数 D_s 拟合结果为 2.66, 计算数据具有很好的相关性(R^2= 0.9953), 说明该图像在计算尺度范围内具有较好的分形特征, 采用分形维数表征磨损表面的形貌特征是可行的.



(a) SEM morphology



(b) Fitting graph for log$e$-log$N$

Fig 2 SEM morphology and fractal dimension computing of worn surface

图 2 磨损表面形貌 SEM 照片与分形维数计算

2 实验部分

将尺寸为ϕ24.0 mm×7.8 mm、表面粗糙度 R_a 为 0.2 μm 的 Ti6Al4V 钛合金通过等离子源离子注入方法沉积类金刚石碳(DLC) 梯度薄膜. 用德国产 Optimol-SRV 型微动摩擦磨损试验机测定 Ti6Al4V 钛合金及其表面 DLC 梯度薄膜在干摩擦以及生理盐水(0.9% NaCl) 或 Hank's 溶液(理化性能同体液相近) 润滑下同超高分子量聚乙烯(UHMWPE) 对摩时的摩擦磨损性能; 试验条件为: 面接触、载荷 200 N、滑动距离 2 000 m、温度 310 K[12].

用 OPTON CSM950 型扫描电子显微镜(SEM) 观察 Ti6Al4V 钛合金及其表面 DLC 梯度薄膜磨损表面形貌, 并用图形工作站保存其 SEM 照片.

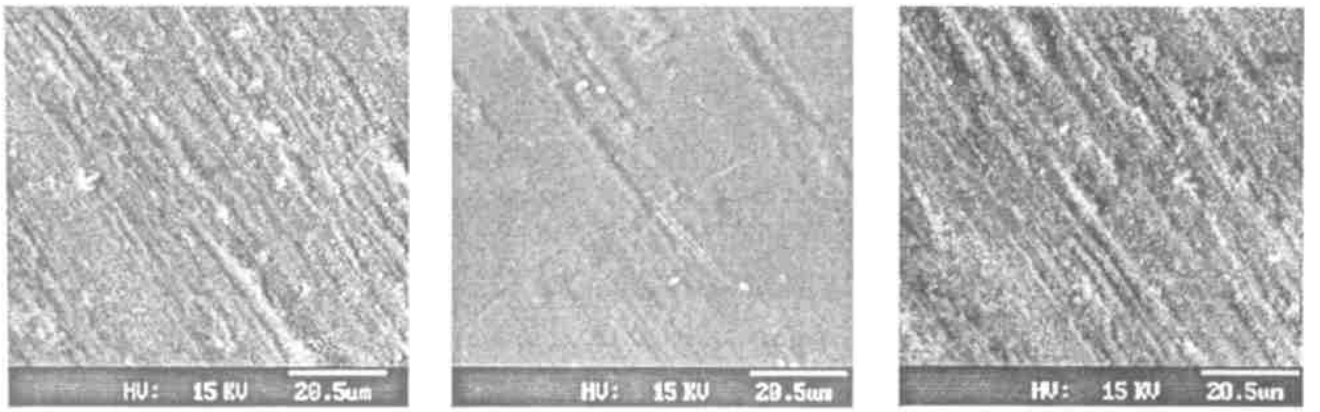
3 结果与分析

图(3 和 4) 分别示出了 2 种材料磨损表面形貌典型 SEM 照片. 采用上述计算方法计算磨损表面 SEM 图像样本的三维分形维数 D_s; 为使计算结果具有可比性, 对所有 SEM 图像进行灰度校正, 使其具有相同的平均强度; 同时采用 TalySurf/5P-120 型表面轮廓仪测定不同试样的表面粗糙度 R_a. 相应的统计分析结果列于表 1, 由多个样本的测量结果确定试件表面 R_a 和 D_s 偏差. 从表 1 可以看出, 磨损表面的表面粗糙度与其分形维数密切相关, 表面粗糙度越大, 则分形维数值越大, 这同相应的文献报道一致[10,11]. 例如, 光滑表面的分形维数为 2, 而越粗糙的表面, 其分形维数越接近 3.

同时, DLC 梯度薄膜材料磨损表面分形维数均比相同试验条件下 Ti6Al4V 合金磨损表面的分形维数小, 且前者的表面粗糙度也较小, 这说明同 Ti6Al4V 合金基体相比, 其表面的 DLC 梯度薄膜的抗磨性能更好.

另一方面, 磨损表面的表面粗糙度 R_a 的测量值比较分散, 相应的分形维数计算值则较稳定. 据此可以推测, 用某一尺度测量表面粗糙度时, 采用与尺度无关的分形维数可能得到确定值, 这正是采用三维分

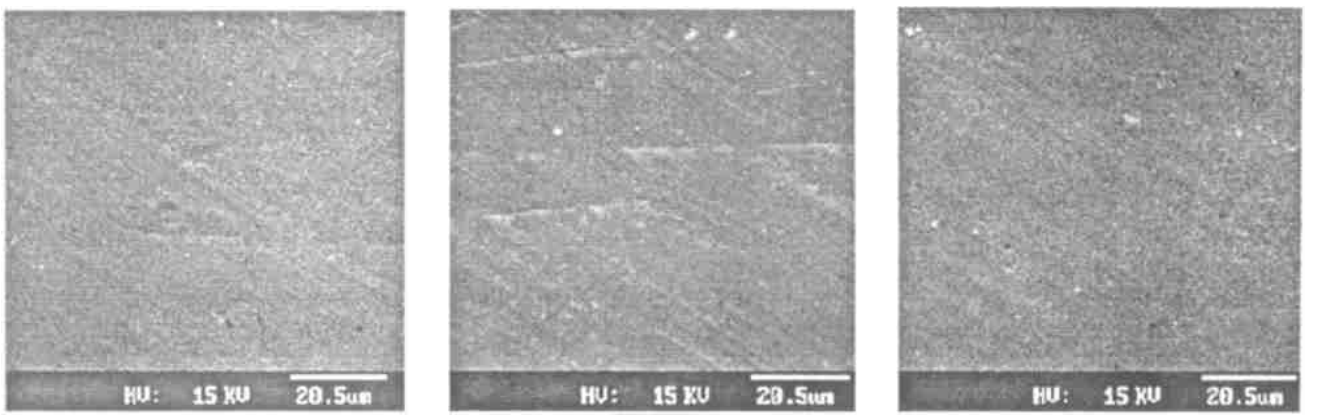
© 1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) Dry sliding　(b) Lubricated with Hank´s solution　(c) Lubricated with 0.9% NaCl solution

Fig 3　SEM morphologies of the worn surfaces of Ti6Al4V alloy under dry and lubricated sliding against UHMWPE

图 3　干摩擦和不同润滑条件下同 UHMWPE 对摩 2 000 m 后 Ti6Al4V 合金磨损表面形貌 SEM 照片



(a) Dry sliding　(b) Lubricated with Hank´s solution　(c) Lubricated with 0.9% NaCl solution

Fig 4　SEM morphologies of the worn surfaces of DLC gradient film under different lubricated conditions

图 4　不同润滑条件下经 2 000 m 摩擦后 DLC 梯度薄膜材料典型磨损表面形貌 SEM 照片

表 **1**　磨损表面粗糙度及其 **SEM** 照片的分形维数

Table 1　Roughness and fractal dimension of SEM images of worn surfaces

Materials	Lubricants	R_a/ μm	D_s
DLC film	Dry sliding	0.38±0.16	2.575±0.040
	Hank´s solution	0.37±0.04	2.560±0.030
	0.9% NaCl solution	0.41±0.07	2.650±0.040
Ti6Al4V	Dry sliding	2.25±0.89	2.857±0.080
	Hank´s solution	0.82±0.26	2.699±0.060
	0.9% NaCl solution	1.85±0.60	2.842±0.060

形维数作为表面形貌评价参数的优势所在.

4　结论

a.　基于盒子维方法和磨损表面形貌 SEM 照片, 可以采用与尺度无关的分形维数来表征磨损表面形貌特征.

b.　磨损表面的表面粗糙度与其三维分形维数密切相关, 表面粗糙度越大, 则分形维数越大.

c.　同尺度相关的表面粗糙度测量值较分散, 而与尺度无关的分形维数的计算值较稳定.

参考文献:

[1] Mandelbrot B B. Fractals: Form, Chance and Dimension[M]. CA: Freeman, 1977.

[2] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. CA: Freeman, 1982.

[3] Gangepain J, Roques-Carmes C. Fractal approach to two di-

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

men-sional and three dimensional surface roughness[J]. Wear, 1986, 109: 119-126.

[4] He L (贺林), Zhu J (朱均). Fractal model for contact of rough surfaces (粗糙表面接触分形模型的提出与发展)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1996, 16(4): 375-384.

[5] Majudar A, Tien C L. Fractal characterization and simulation of rough surfaces[J]. Wear, 1990, 136: 313-324.

[6] Ge S R (葛世荣). The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces (粗糙表面的分形特征与分形表达研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 1997, 17 (1): 73-80.

[7] Suryaprakash G, Bharat B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces[J]. Wear, 1995, 180: 17-34.

[8] Zhang M Q, Song L, Zeng H M, *et al*. Predictability of wear status provided by fractal dimensions of wear particles[J]. Journal of Materials Science Letters, 1996, 15: 1 288-1 290.

[9] Zhang H L (张怀亮), Bu Y Y (卜英勇), Qiu X Y (邱显焱). The fractal dimension of profile of spherical and cutting wear debris (球形磨粒和切削磨粒轮廓分形维数研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2002, 22 (4): 304-307.

[10] Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes[J]. IEEE PAMI, 1984, PAMI-6 (6): 661-674.

[11] Ajay K B, Jibitesh M. On calculation of fractal dimension of images[J]. Pattern Recognition Letters, 2001, 22: 631-637.

[12] Jiang S W (蒋书文), Yin G F (尹光福), Zheng C Q (郑昌琼), *et al*. Friction and wear behavior of DLC gradient film on Ti6Al4V alloy substrate in sliding against ultra-high molecular weight polyethylene (钛合金表面类金刚石碳梯度薄膜的摩擦磨损性能研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2001, 21 (3): 167-171.

Calculation of Fractal Dimension of Worn Surface

JIANG Shu-wen[1], JIANG Bin[1], LI Yan[1], DENG Hong, ZHENG Chang-qiong[2], YIN Guang-fu[2]

(*1. School of Microelectronics and Solid-state Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;*

2. Department of Inorganic Materials, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Box-counting method is applied to compute the three-dimensional fractal dimensions of the worn surfaces of Ti6Al4V and plasma source ion implanted diamond-like-carbon film thereon, making use of fractal theory and scaning electron microscopic analysis of the worn surfaces. It has been found that it is feasible to characterize the worn surface morphologies using the fractal dimensions within the computing scale. The statistic computing results show that the fractal dimensions of the real worn surfaces are closely related to the surface roughness, i. e., the larger the surface roughness, the bigger the fractal dimension. Moreover, the computed fractal dimensions independent on the scale are more stable than the surface roughness dependent on the scale.

Key words: worn surface; morphology; fractal dimension; surface roughness

Author: JIANG Shu-wen, male, born in 1969, Ph.D., e-mail: jiangsw@uestc.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net