

摩擦力和摩擦振动的分形行为研究

朱 华, 葛世荣

(中国矿业大学 材料科学与工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在不同的摩擦磨损试验机上提取了摩擦磨损过程中摩擦力和摩擦振动的时间序列信号, 采用关联维数方法研究了摩擦力和摩擦振动的分形行为。结果表明: 摩擦力和摩擦振动信号具有分形特征; 随着摩擦磨损过程的进行, 信号分形维数的变化出现规律性的递增或递减; 对于“收敛”或磨合磨损过程, 不同阶段摩擦信号的分形维数趋于增大; 对于“发散”的摩擦磨损过程, 不同阶段的摩擦信号的关联维数趋于减小。摩擦力和摩擦振动的分形维数的变化规律同摩擦磨损过程中表面形貌分形维数的变化规律相似。

关键词: 摩擦磨损性能; 摩擦力; 摩擦振动; 分形行为

中图分类号: TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)05-0433-05

摩擦力和摩擦振动是摩擦磨损过程中产生的现象。摩擦力和摩擦振动信号蕴涵着大量能够反映摩擦学系统特征和状态的信息。由于摩擦学系统的复杂性及其行为的相互依赖性^[1], 为了探讨摩擦力和摩擦振动信号是否也与摩擦表面、磨损产物一样具有分形行为^[2-5], 我们在通过试验提取摩擦力和摩擦振动信号的基础上, 运用关联维数方法对摩擦力和摩擦振动信号进行了分形表征, 进而研究了其分形维数同摩擦磨损过程的相关性和变化规律。

1 实验部分

试验一在自制的销-盘摩擦磨损试验机上进行, 图 1 示出了该试验机的原理图, 其中力传感器沿水平方向固定安装于试验机基座, 振动加速度传感器通过磁铁固定于销试件上方。Φ4 mm 的销试件材质为铜锌合金, 其接触表面粗糙度 $R_a = 0.17 \mu\text{m}$; Φ100 mm 的盘试件材质为 45# 钢, 其淬火硬度为 50HRC, 表面粗糙度 $R_a = 0.15 \mu\text{m}$ 。试验条件为: 平均相对运动速度 0.39 m/s, 名义接触载荷 0.78 MPa, 干摩擦。采集不同摩擦阶段的摩擦力和摩擦振动信号数据, 得到来自力传感器和振动加速度传感器的摩擦力和摩擦振动模拟信号; 摩擦力和摩擦振动模拟信号分别经电桥和电荷放大器放大后由 A/D 转换器转化为离散数字信号并以数据文件形式存入计算机。

试验二在自制的端面摩擦磨损试验机上进行, 采

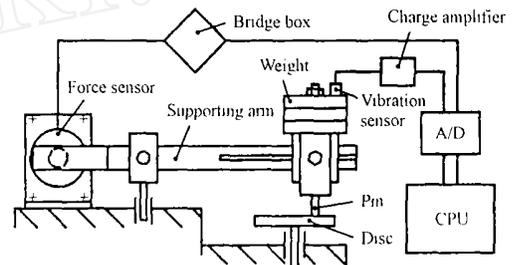


Fig 1 Schematic diagram of pin-on-disc tester

图 1 销-盘摩擦磨损试验机原理图

用止推圈摩擦副, 上试件为尺寸 $\Phi 9 \text{ mm} \times \Phi 2 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ (外径 \times 内径 \times 高) 的倒置杯状试样; 下试件为 $\Phi 10 \text{ mm} \times \Phi 6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的圆环状试样; 上、下试件材质均为 45# 钢, 硬度分别为 52HRC 和 17HRC, 表面粗糙度 R_a 为 $0.09 \mu\text{m}$ 和 $4.05 \mu\text{m}$, 平均相对运动速度为 0.58 m/s, 试件名义接触压力为 0.28 MPa, 采用 68# 机油润滑。采集不同摩擦阶段的摩擦振动信号数据, 传感器的安装及信号采集方法同试验一。试验机原理图略。

2 结果与分形表征

2.1 摩擦信号

在销-盘式摩擦磨损试验机上进行的试验历时

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50225519); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2002116); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目

收稿日期: 2004-01-14; 修回日期: 2004-04-10/联系人朱华, e-mail: hzhu@cumt.edu.cn

作者简介: 朱华, 男, 1960年生, 博士, 副教授, 目前主要从事摩擦学理论与设计研究



80 m in, 每隔 10 m in 分别采集一次摩擦力和摩擦振动信号, 每次采集 4 000 个数据, 采样间距为 2 m s 试验结束时销、盘试件表面粗糙度分别为 $3.25 \mu\text{m}$ 和 $3.31 \mu\text{m}$. 图 2 和图 3 示出了所采集的摩擦力和摩擦

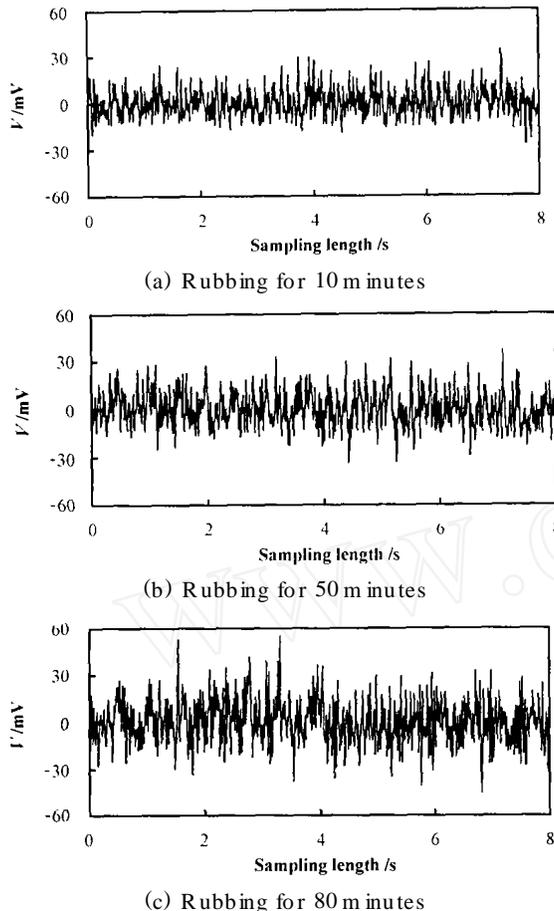


Fig 2 Sequence signals of frictional force

图 2 摩擦力的时间序列信号

振动的部分时间序列信号

在自制的端面摩擦磨损试验机上进行的试验历时 165 m in, 每隔 15 m in 采集一次摩擦振动信号, 采样间隔和每次采集数据同试验一. 试验结束时上、下试件表面粗糙度分别为 $0.76 \mu\text{m}$ 和 $1.92 \mu\text{m}$. 由于篇幅限止, 摩擦振动信号图略

从图 2 和图 3 可以看出, 摩擦力和摩擦振动信号都是随机信号, 并且随摩擦时间的变化而变化. 由于试验一在干摩擦下进行, 且摩擦副的硬度相差较大, 当 2 个较光滑的初始表面接触时, 较软的铜销试件逐渐被磨损, 伴随着磨损物质向钢试件表面的转移, 结果导致摩擦副接触表面粗糙度增大. 期间摩擦力和摩擦振动均逐渐加剧, 信号幅值增大. 图 3 中信号幅值的变化似乎不如图 2 的明显, 这主要是由于 2 种信号

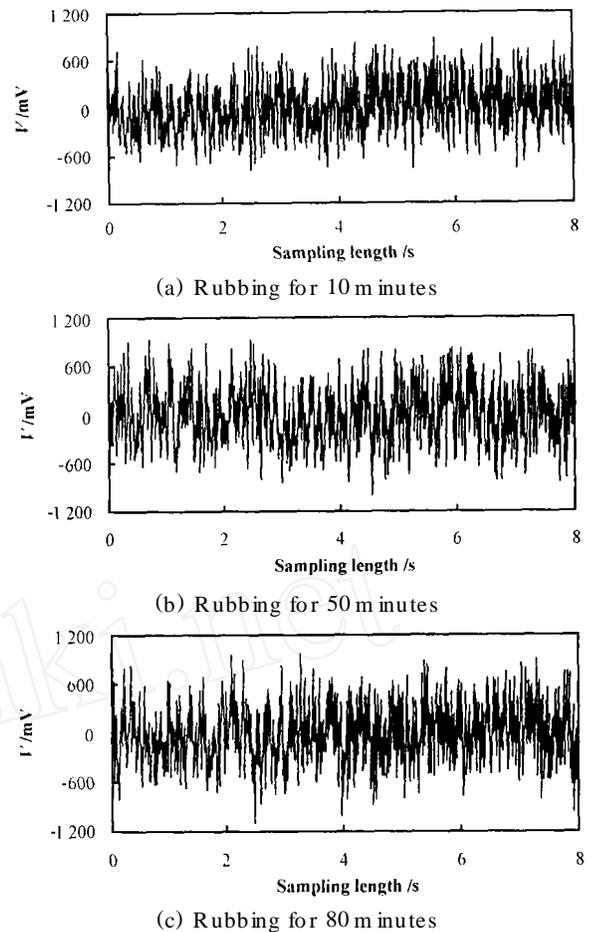


Fig 3 Sequence signals of frictional vibration

图 3 摩擦振动的时间序列信号

幅值的量级不同所致; 当然, 这种差异还与试件表面磨损对摩擦力和摩擦振动的影响差异, 两种信号相应的传感器、放大器及处理系统差异, 以及信号变化的灵敏度差异等相关

2.2 关联维数

关联维数对系统的时间过程行为反应敏感, 能够较好地反映动力系统的动态结构. 为了将试验得到的单变量时间序列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots$ 中隐含的系统信息显露出来, 使其能够反映高维系统的动力特性, 必须将上述单变量时间序列扩展到高维相空间中, 即重构时间序列相空间^[6]. 对时间序列采用时间差法重构相空间, 可以构造出高维相空间中一批矢量:

$$\vec{y}_i = (x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}), i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

式中: m 为相空间的嵌入维数, τ 为延迟时间, N 为矢量个数

通过计算任意两矢量 \vec{y}_i 与 \vec{y}_j 之间的距离 $r_{ij} = |\vec{y}_i - \vec{y}_j|$, 并与任意给出的正数 ϵ 比较, 可以求得距离 $r_{ij} < \epsilon$ 的矢量(关联矢量)的数目 $N_1(\epsilon)$, 进而得到关

联函数或累积距离分布函数 $C(\epsilon)^{[7]}$:

$$C(\epsilon) = N_1(\epsilon) / N(\epsilon) \tag{2}$$

式中: $N(\epsilon)$ 为总的距离数目. 适当调整 ϵ 的取值大小, 可使得在某一段 ϵ 区间内:

$$C(\epsilon) = \epsilon^\nu \tag{3}$$

同分维的定义对比可知式 (3) 中的指数 ν 是一种维数, 它是关联维数 D 的高度逼近. 据此可得到关联维数的计算公式:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \ln C(\epsilon) / \ln \epsilon \tag{4}$$

式中: $C(\epsilon)$ 可以表示为:

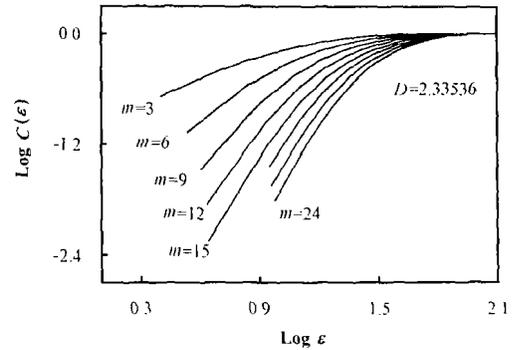
$$\begin{aligned} C(\epsilon) &= \frac{1}{N(\epsilon)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(\epsilon - |\vec{y}_i - \vec{y}_j|) \\ &= \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \theta(\epsilon - r_{ij}) \end{aligned} \tag{5}$$

式中: θ 是 Heaviside 单位函数

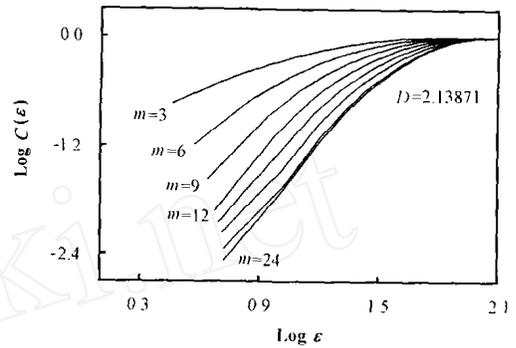
2.3 分形表征

利用关联维数方法对上述摩擦力和摩擦振动信号进行分形表征. 为此, 给定 m 值, 绘制 $\ln C(\epsilon) - \ln \epsilon$ 曲线; 除斜率为 0 或 m 的直线外, 考察其间的最佳拟合直线, 则该直线的斜率就是关联维数 D . 由于计算工作量大, 在计算关联维数时只采用信号的前 1 000 个数据, 产生矢量的时间延时 $\tau = 2 \text{ ms}$. 当嵌入维数 m 由低到高变化时, 分形维数将由小变大; 当双对数曲线趋于平行时, 即当 D 趋于饱和时 (表征中规定 D 的变化小于 10%), 相应的分形维数即被视作摩擦力或摩擦振动信号的分形维数. 图 4~ 图 7 示出了试验一的摩擦信号分形表征结果; 图 8 示出了试验二的摩擦振动信号分形表征结果.

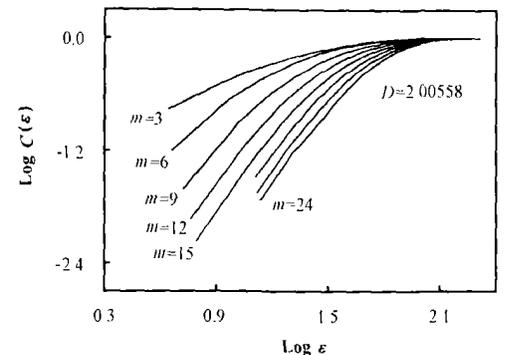
从以上分形表征结果可以看出, 摩擦力和摩擦振动的时间序列信号具有分形特征, 并且信号分形维数的变化随着摩擦过程的进行表现出递增或递减规律. 试验一为“发散”的摩擦磨损过程, 2 个较光滑的初始表面 ($R_a = 0.17 \mu\text{m}$ 和 $0.15 \mu\text{m}$) 在干摩擦条件下接触滑动; 随着摩擦过程的进行, 较软的铜销试件逐渐被磨损并且向钢试件表面转移, 从而导致摩擦副接触表面粗糙度增大; 期间摩擦力和摩擦振动均逐渐加剧, 信号幅值逐渐增大. 换言之, 在不同的摩擦阶段, 摩擦力和摩擦振动信号的关联维数趋于减小 (参见图 4~ 图 7). 试验二为“收敛”或磨合的摩擦磨损过程, 较硬并且很光滑 ($R_a = 0.09 \mu\text{m}$) 的上试件同较软并且相当粗糙 ($R_a = 4.05 \mu\text{m}$) 的下试件在润滑条件下接触滑动. 随着摩擦过程的进行, 粗糙表面越来越光滑 (试验结束时 $R_a = 1.92 \mu\text{m}$), 光滑表面的粗糙度则明显增大 ($R_a = 0.76 \mu\text{m}$); 期间摩擦振动逐渐变弱, 信号幅



(a) Rubbing for 10 m minutes



(b) Rubbing for 50 m minutes



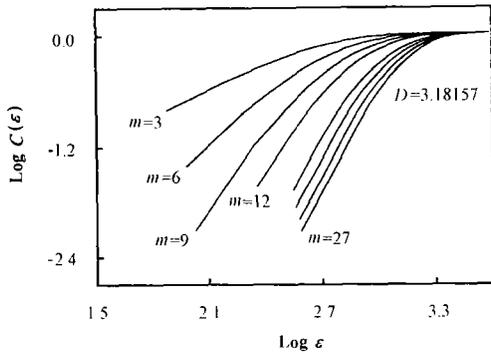
(c) Rubbing for 80 m minutes

Fig 4 Log-log plots of the $C(\epsilon)$ of frictional force

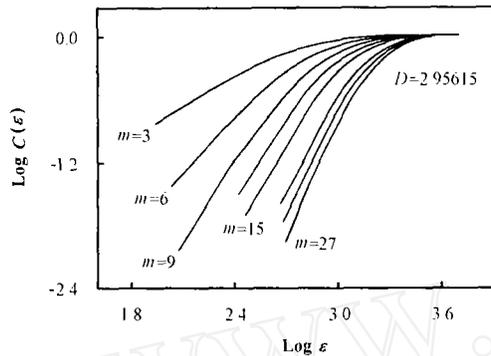
图 4 摩擦力信号的关联函数双对数图

值逐渐减小. 换言之, 不同摩擦阶段的摩擦振动信号的关联维数趋于增大 (见图 8).

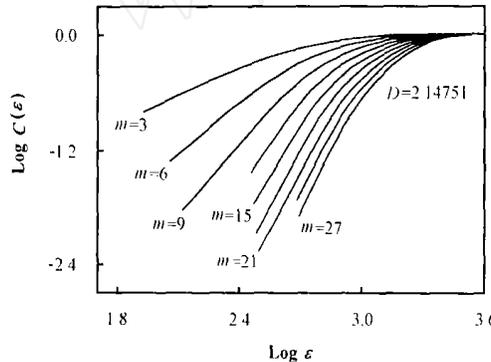
摩擦力和摩擦振动的分形表征结果表明, 摩擦磨损过程中摩擦力和摩擦振动信号的分形维数的变化规律同表面分形维数的变化规律相似^[3], 这说明摩擦学系统的行为具有共同的本质特征. 然而, 摩擦信号的分形维数变化不像摩擦表面形貌分形维数变化那样表现出一致递增或一致递减的规律性^[8]. 我们认为, 这与所提取的摩擦信号的真伪程度有关. 换言之, 摩擦力或摩擦振动信号易受噪声干扰的影响, 信号质量的好坏依赖于信号采集和处理技术的优劣, 利用不同的信号采集与处理系统将得到信噪比不同的电信



(a) Robbing for 10 minutes



(b) Robbing for 50 minutes



(c) Robbing for 80 minutes

Fig 5 Log-log plots of the $C(\epsilon)$ of frictional vibration

图 5 摩擦振动信号的关联函数双对数图

号. 因此, 如何获得真实的、能客观反映摩擦学系统状态的摩擦力和摩擦振动信号, 是摩擦信号分形特性和分形变化规律研究的关键, 这有待于进一步研究

3 结论

a 同磨损表面形貌和磨损产物相似, 摩擦力和摩擦振动信号亦具有分形特性; 摩擦信号的分形特性反映了复杂系统行为的本性和共性

b 对于“发散”的摩擦磨损过程, 不同阶段的摩擦力和摩擦振动信号的关联维数趋于减小; 对于“收敛”或磨合磨损过程, 不同阶段的摩擦振动信号的关

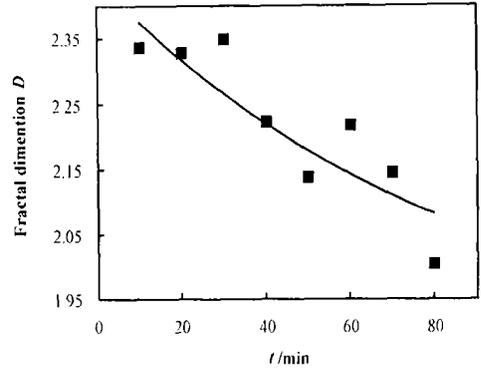


Fig 6 Fractal dimensions of frictional force

图 6 摩擦力信号的分形维数(试验一)

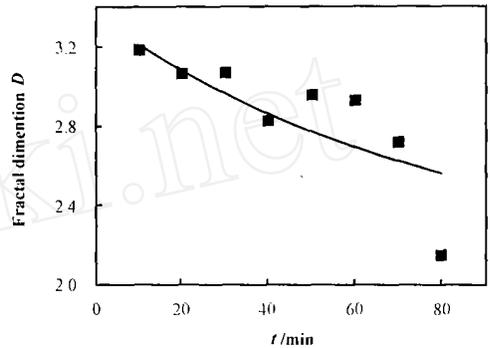


Fig 7 Fractal dimensions of frictional vibration

图 7 摩擦振动信号的分形维数(试验一)

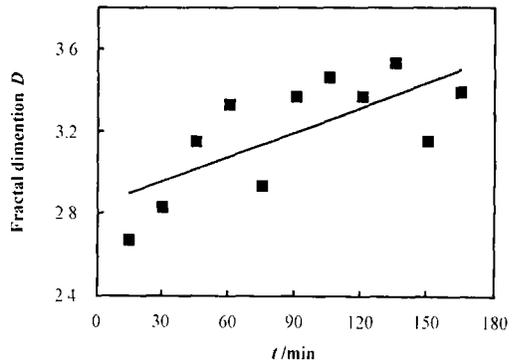


Fig 8 Fractal dimensions of frictional vibration

图 8 摩擦振动信号的分形维数(试验二)

联维数趋于增大; 摩擦力和摩擦振动的分形维数变化规律同摩擦磨损过程中表面形貌分形维数的变化规律相似

参考文献:

[1] 葛世荣, 朱华. 摩擦学复杂系统及其问题的量化研究方法[J]. 摩擦学学报, 2002, 22 (5): 405-408

Ge Shirong, Zhu Hua. Complicate tribological system and quantitative study methods of their problems [J]. Tribology, 2002, 22 (5): 405-408



- [2] 葛世荣, Tonder K. 粗糙表面的分形特征与分形表达研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17 (1): 73-80
Ge Shirong, Tonder K. The fractal behavior and fractal characterization of rough surfaces[J]. Tribology, 1997, 17 (1): 73-80
- [3] Zhu H, Ge S R, Chen G A. Study on the characterization of the surface topography of friction pairs during wear process with fractal theory[J]. Science in China A, 2001, 44 (sup): 259-262
- [4] Ganti S, Bhushan B. Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces[J]. Wear, 1995, 180: 17-34
- [5] Stachowiak G W, Hamblin M G. Application of fractals to the description of shape of the particles found in tribological systems[C]. Proc 4th Int Tribology Conference, Perth, December, 1994, 1: 181-190
- [6] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors[J]. Physical Review Letters, 1983, 50 (5): 346-362
- [7] David L, Joseph M. Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing[J]. Mechanical System and Signal Processing, 1996, 10 (3): 241-264
- [8] Zhu H, Ge S R, Huang X L. Experimental study on the characterization of worn surface topography with characteristic roughness parameter[J]. Wear, 2003, 255 (1-6): 309-314

Study on the Fractal Behaviors of Frictional Forces and Vibrations

ZHU Hua, GE Shi-rong

(College of material Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The friction and wear tests of a Cu-Zn alloy/SA E52100 steel pair and a quenched SA E52100 steel/tempered 5210 steel pair were conducted on a pin-on-disc test rig and an end-surface friction and wear tester under dry sliding and oil-lubricated sliding, respectively. The sequence signals of the frictional forces and vibrations were collected. The fractal behaviors of the frictional force and vibration signals were studied making use of correlation dimension. The results showed that the sequence signals of the frictional forces and vibrations had fractal characteristics, and the fractal dimensions of the signals varied with the test duration. The correlation dimension increased gradually for the "converging" (or running-in) friction and wear process, while it decreased gradually for the "diverging" friction and wear process. Moreover, the fractal dimensions of the frictional forces and vibrations varied in the same changing law as that of the worn surface morphology.

Key words: friction and wear behavior; frictional force; frictional vibration; fractal behavior

Author: ZHU Hua, male, born in 1960, Ph. D., Associate Professor, e-mail: hzhu@cumt.edu.cn