

软磁盘、硬盘的表面形貌和微摩擦特性*

路新春, 王吉会, 温诗铸

清华大学 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084

文 摘 利用原子力/摩擦力显微镜, 对市售的 5 种软磁盘及一种硬盘的表面形貌、1~100 nN 载荷下的微摩擦性能及表面粘着性能进行了研究。结果表明: 软磁盘主要由块状的磁粉颗粒组成; 硬磁盘由环状磁道组成。硬盘的微摩擦力、表面粘着力、摩擦因子大于同样条件下的软磁盘。129 mm (5.25 英吋) 软磁盘的微摩擦力、表面粘着力、摩擦因子大于同一品牌的 86 mm (3.5 英吋) 的软磁盘; 探针与磁记录介质在大于 20 nN 载荷下的接触为塑性接触。

关键词 软磁盘; 硬盘; 表面形貌; 原子力/摩擦力显微镜; 微观摩擦学

分类号 TH 117.1

电子计算机的升级换代, 要求磁记录材料向着高记录密度、高可靠性的方向发展。Bhushan^[1]预计在今后的十年内磁记录介质的消耗量将增加 5 倍, 磁记录密度将提高一个数量级。要提高材料的磁记录密度, 磁头与磁记录介质间的浮动间隙要尽量减小。现已达到 50 nm 甚至更低, 与磁记录介质的表面粗糙度相当。在磁记录过程中, 磁头与磁记录介质间经历起动、高速旋转和停止等不同的接触状态, 不可避免地产生静态、动态的摩擦或磨损, 从而引起磁记录设备的损坏、磁记录信息的丢失。从可靠性出发, 对软磁盘要求磨损率小于一个原子层/(10~100 km); 硬磁盘要求磨损率为零即零磨损或无磨损的摩擦^[2]。因此磁记录介质的表面形貌和微摩擦特性已成为提高磁记录密度的决定性因素。

随着原子力/摩擦力显微镜的研制成功^[3]及其图象分析与测量软件的不断改进^[4], 使得能够真正从纳米尺度上评价材料的表面形貌, 测量极轻载荷

下(1~100 nN)材料的摩擦学特性^[5]。从而为提高磁记录设备和介质的性能提供科学依据。

1 实验方法

实验选用市售的 4 种 86 mm (3.5 英吋) (软盘 1~4)、1 种 86 mm (5.25 英吋) (软盘 5) 软盘(其中软盘 2、5 为同一品牌)及 1 种 120MB 硬盘, 在 CSPM-930 a 原子力/摩擦力显微镜上进行纳米级表面形貌评定及摩擦力测量, 探针为弹性常数为 0.38 N/m 的 Si₃N₄。

1) 表面形貌 用恒力模式(参考电流 $I_{ref} = 0.20$ nA, 扫描速度为 $2 \mu\text{m/s}$) 在不同的扫描范围内, 沿 X 方向由 V 通道采集观察软盘和硬盘的表面形貌; 利用三维表面形貌的粗糙度评定方法, 及信号—实际高度转换关系计算出算术平均偏差 R_a , 均方根偏差 R_q , 平均峰间距 S_m , 单峰间距 S , 均方根波长 λ_q , 算术平均波长 λ_s , 详见文[4]。

2) 分形维数 对 AFM/FM 图象(180×180 点), 利用自行编制开发的图象处理软件, 计算出功率谱 $S(f_x, f_y)$ 、不同码尺 l 下图象数所占据的盒数 N 、不同等高面上每一小岛(封闭曲线)的周长 P 和面积 A , 然后在双对数坐标上, 由各自直线的斜率根据分形几何理论求分形维数 D 。

3) 摩擦力测量 首先根据 $I_{ref}-V_z$ 曲线选定进行摩擦试验时与所加载荷相对应的参考电流 I_{ref} , 然后在恒力模式下(扫描速度为 $2 \mu\text{m/s}$), 沿 Y 方向由 V & I 通道同时采集观察软盘的表面形貌及其对应的摩擦力图象; 通过改变 I_{ref} , 测量出一系列不同极轻载荷下的摩擦力图象。为将真实摩擦力从摩擦力信号中分离出来, 采用正、反 Y 向扫描并同时采集摩擦力信号的方法, 即

$$Y \text{ 向: } F_Y(I, J) = f_0(I, J) + f(I, J)$$

$$-Y \text{ 向: } F_{-Y}(I, J) = f_0(I, J) - f(I, J)$$

$$f(I, J) = (F_Y(I, J) - F_{-Y}(I, J)) / 2$$

其中, $F_Y(I, J)$, $f_{-Y}(I, J)$ 分别是正、反 Y 向扫描时

收稿日期: 1998-03-02

第一作者: 男, 1966 年生, 副研究员

* 国家自然科学基金(59575032); 清华大学摩擦学重点实验室开放基金、校青年基金; 中国博士后基金; 国防科工委微机理研究专项青年基金资助项目

的摩擦力信号, $f(I, J)$ 是真实的摩擦力信号, $f_0(I, J)$ 是除摩擦力外由其他因素产生的横向力信号。然后对 $f(I, J)$ 求平均进而计算出真实摩擦力信号的大小 f 。

4) 表面粘着力 首先使探针与样品表面接触 ($I_{ref} = -1.0 \text{ nA}$), 然后在关闭反馈的情况下, 通过改变加在压电陶瓷管上的电压 V_z , 测量探针与样品间逼近并离开过程中四象检测器上下两象限的输出电流 I_t , 即 $V_z - I_t$ 曲线。表面粘着力由将探针拉离样品表面到正常位置所需的电流及探针的弹性系数求得。

2 实验结果

2.1 表面形貌

图 1 是 5 种软盘和 1 种硬盘的表面微观形貌。由图可见, 软盘主要由块状的磁粉颗粒组成, 颗粒间

有间隙存在。其中软盘 3, 4 的颗粒较小; 软盘 2, 5 的颗粒相对较大; 硬盘由约 400 nm 宽的环状磁道组成, 磁道表面光滑, 磁道间由一浅的沟槽隔开。

2.2 表面粗糙度

经计算, 5 种软盘和 1 种硬盘的表面粗糙度参数如表 1。软盘 3, 4 的粗糙度和粒度较小, 而软盘 1, 2 和软盘 5 的粗糙度和粒度相对较大; 硬盘的 R_a , R_q 分别仅有 2.20 nm 和 3.06 nm, 明显小于软盘的粗糙度, 这均与图 1 的观测结果一致。

2.3 分形维数

图 2 是对软盘 2 分别用小岛法和计盒法求分形维数的关系曲线。由图 2 可以看出, 无论是小岛法还是计盒法, 小岛的周长 P 与面积 A 及所占盒数 N 与码尺 l 间均呈良好的线性关系。线性回归后得:

小岛法 $\lg(P/\text{nm}) = 0.5887 \lg(A/\text{nm}^2) + 0.7867$
计盒法 $\lg(N) = 2.1114 \lg(l/\text{nm}) + 5.472$

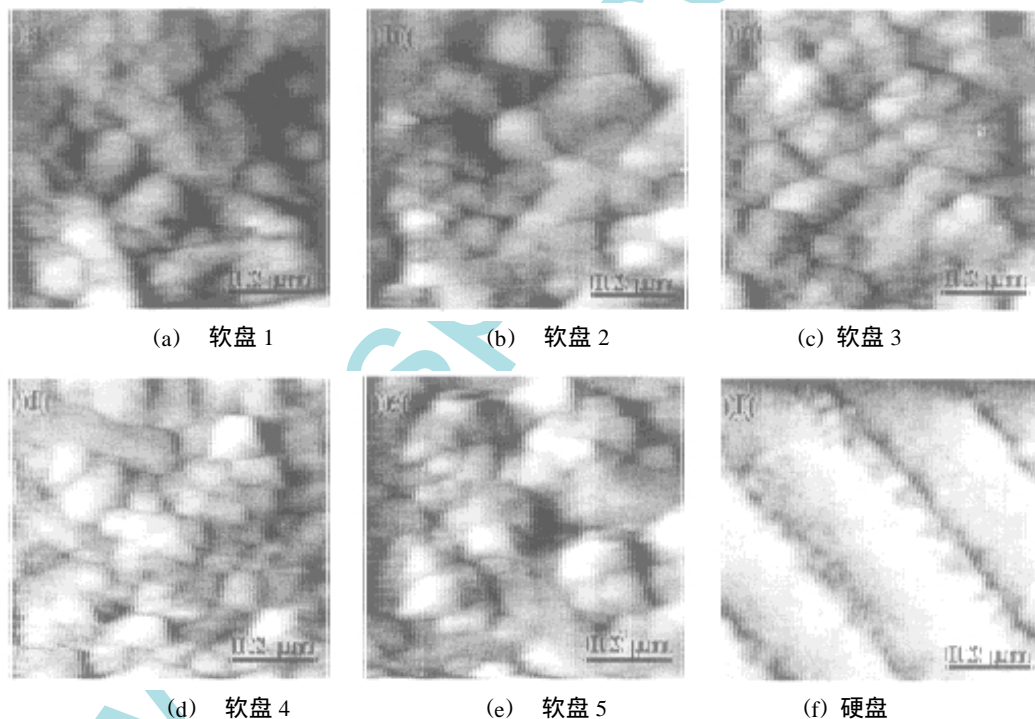


图 1 软盘和硬盘的表面形貌

表 1 软磁盘和硬盘的表面粗糙度

样品名称	R_a/nm	R_q/nm	S_m/nm	S/nm	λ_x/nm	λ_y/nm	λ_z/nm	λ_w/nm
软盘 1	8.81	11.41	525.0	250.0	1055.0	1490.0	1690.0	2308.3
软盘 2	7.89	10.28	441.7	270.0	1476.7	2085.0	1940.0	2706.0
软盘 3	4.85	6.24	375.0	231.7	1033.3	1453.4	1646.7	2200.0
软盘 4	3.11	4.04	411.7	193.3	1141.7	1845.0	1636.7	2258.3
软盘 5	9.73	12.43	455.0	260.0	1483.3	2188.3	2031.7	2808.0
硬 盘	2.24	3.06						

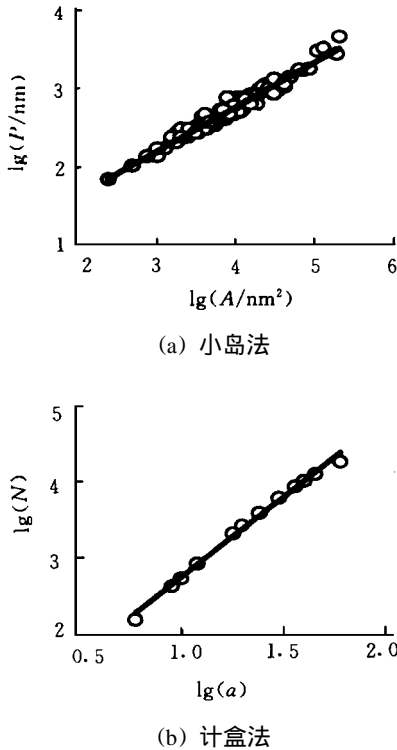


图2 对软盘2用小岛法和计盒法求分形维数的关系曲线

由计盒法(Sandbox)、功率谱法(PSD)和小岛法(SM)求得的5种软磁盘的分形维数见表2。结合表1可以说明,粗糙度越小,分形维数相应也越大^[5];但由于分形维数不仅与表面形貌的高度参数有关,而且与形貌的形状参数也密不可分,因此分形维数与表面粗糙度的这种反比关系并不完全成立。

表2 不同计算方法下软磁盘的分形维数D

样品名称	D		
	小岛法	计盒法	功率谱法
软盘1	2.226	2.122	2.210
软盘2	2.177	2.111	2.267
软盘3	2.256	2.147	2.347
软盘4	2.270	2.169	2.408
软盘5	2.200	2.100	2.283

2.4 摩擦力图和微摩擦特性

图3是沿Y方向同时采集的软盘2的表面形貌图和摩擦力图。通过对比可以看出,摩擦力图与表面形貌间有较好的对应性,但二者间又略有差异。值得注意的是在磁粉颗粒的边界处,摩擦力图有明显的灰度变化。

图4是软盘2,5和硬盘的摩擦力(信号)—载荷曲线。由图4可见,在极轻载荷下,软磁盘和硬盘的摩擦力(信号)与载荷间均呈良好的线性关系;经线

性回归后得:

对软盘2, 有 $f = 0.0411(p/nN) + 0.526$

对软盘5, 有 $f = 0.0615(p/nN) + 2.748$

对硬盘, 有 $f = 0.1105(p/nN) + 15.433$

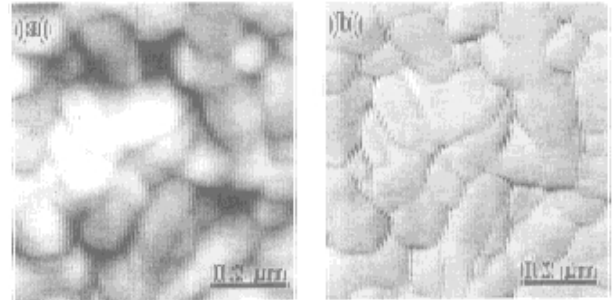


图3 软盘2的表面形貌图和摩擦力图

如将摩擦力信号与载荷直线的斜率做为材料微摩擦条件下摩擦因子的表征量^[6],由上式可以看出,微摩擦条件下,硬盘与软磁盘相比,不仅硬盘的摩擦力大于同样载荷下的软磁盘,而且硬盘的摩擦因子也大于软磁盘;对软磁盘而言,软盘5的摩擦力大于同样载荷下的软盘2,并且软盘5的摩擦因子也大于软盘2。

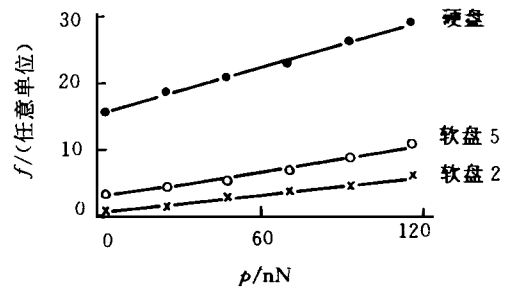


图4 软磁盘和硬盘的摩擦力-载荷曲线

3 讨论

3.1 表面粘着力

为了解释软磁盘和硬盘微摩擦特性间的差异,测量了软磁盘和硬盘的 $V_z - I_t$ 曲线。经计算,软盘2,5和硬盘的表面粘着力分别为8.1 nN, 17.3 nN, 26.5 nN。即硬盘的表面粘着力大于软磁盘;软盘5的表面粘着力大于软盘2。由摩擦学原理^[7]有

$$f = \mu(L_{ap} + F_{ad})$$

其中, f 是摩擦力, μ 是摩擦因子, L_{ap} 是外加载荷, F_{ad} 是表面粘着力。因此由各自的表面粘着力和摩擦因子的大小,就可解释同样载荷下硬盘的微摩擦力大于软磁盘,软盘5的微摩擦力大于软盘2的结果,即表面粘着力的结果与图4的实验结论是相一致的。

3.2 微观接触状态

材料的摩擦学性能与摩擦副的接触状态密不可分。对微摩擦过程, Mate^[8]曾对粗糙峰处一个单原子的接触状态进行了分析,对铜(硬度为 0.2 GPa)原子,使其发生塑性变形需要 0.006 nN 的力;对金刚石(硬度为 100 GPa)需要的 3 nN 的力。

对于实际的探针/样品摩擦副, Si₃N₄ 探针的曲率半径为 50 nm, 当施加的压力 10 nN 时, 根据弹性理论, 接触压力约为 1 GPa; 而一般样品的硬度在 10⁻¹ ~ 10¹ GPa 量级, 因此对硬度小于 1 GPa 的样品, 当施加的压力大于 10 nN 时, 探针与样品的接触为塑性接触。另一方面, 从摩擦力-载荷曲线的特征看, 当接触时是弹性接触时, $f \sim p^{2/3}$ (对球形针尖); $f \sim p^{1/2}$ (对锥形针尖, 如云母/Si₃N₄ 针尖在小于 10 nN 的摩擦特征^[9])。当接触为塑性接触时, $f \sim p$ (如云母/Si₃N₄ 针尖在 10 nN ~ 80 nN 范围内的摩擦特征^[9])。

由图 4 可见, 对载荷在 20 nN 以上的 Si₃N₄/磁记录介质体系, 无论是软磁盘还是硬盘摩擦力与载荷均呈良好的线性关系, 并考虑到软磁盘的硬度为 0.25 ~ 0.70 GPa^[10], 因此就可以充分地说明在 20 nN 以上的载荷下, Si₃N₄ 与磁记录介质的接触为塑性接触。

3.3 微摩擦性能与实际摩擦副的关系

材料的摩擦性能、使用寿命等都是相对于一定的摩擦副而言的。经 AFM/FM 测定的微观摩擦性能, 其摩擦副为曲率半径很小的锥形 Si₃N₄ 针尖和磁记录介质。虽然选择曲率半径很小的针尖是 AFM 获得高分辨率所必需的, 但实际磁头/磁记录系统中的磁头并不是锥形的, 而是呈条状的, 表面非常光滑, 且磁头/磁记录介质间还有润滑介质, 因此这种微摩擦性能虽然能够反映不同磁记录介质的微摩擦特性的差异, 但并不是真实磁头/磁记录介质体系的摩擦状态。要想真正评价磁记录介质的使用性能, 确定其使用寿命, 必须建立一套与磁记录系统的实际工况相匹配的实验体系, 只有这样才能从真正意义上对磁记录介质的摩擦润滑性能做出评价。

4 结论

1) 软磁盘主要由块状的磁粉组成; 硬盘由约 400 nm 宽的环状磁道组成。

2) 硬盘的微摩擦力、表面粘着力、摩擦因子大于同样条件下的软磁盘; 129 mm 软盘微摩擦力、

表面粘着力、摩擦因子大于同样条件下的 86 mm 软盘。摩擦力与载荷间呈线性关系。

3) 探针与磁记录介质在大于 20 nN 载荷下的接触为塑性接触。

参 考 文 献

- 1 Bhushan B. Micro/nanotribology and its applications to magnetic storage devices and MEMS. Tribology International, 1995, 28(2): 85 ~ 96
- 2 Kaneko R. Microtribology today and tomorrow. Wear, 1993, 168(1-2): 1 ~ 5
- 3 路新春, 温诗铸, 孟永钢, 等. 激光检测摩擦力显微镜的研制. 科学通报, 1996, 41(19): 1753 ~ 1755
- 4 王吉会, 路新春, 钱林茂, 等. 原子力/摩擦力显微图象的分析与测量. 摩擦学报, 1998, 18(1): 60 ~ 65
- 5 索双富, 葛世荣, 强颖怀, 等. 磨削加工表面形貌的分形研究. 中国机械工程, 1996, 7(1): 41 ~ 42
- 6 王吉会, 路新春, 温诗铸. 录象带的表面形貌和微摩擦特性研究. 材料研究学报, 1997, 11(4): 351 ~ 356
- 7 温诗铸. 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社, 1990 386
- 8 Bhushan B. Handbook of micro/nano tribology. Boca Raton: CRC Press, 1995 168
- 9 Hu J, Xiao X-D, Ogletre D F, et al. Atomic scale friction and wear of mica. Surface science, 1995, 327: 358 ~ 370
- 10 Bhushan B. Handbook of micro/nano tribology. Boca Raton: CRC Press, 1995 453

Surface morphology and microtribological behavior of floppy disk and hard disks

LU Xinchun, WANG Jihui, WEN Shizhu
State Key Laboratory of Tribology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The surface morphology, surface adhesive and microtribological behavior of five different floppy disks and hard disk, were investigated by atomic force/friction force microscope. The results show that the floppy disk consists of block magnetic particles, and the hard disk consists of circular magnetic channels. The friction force at a given load, friction factor and surface adhesion of 129 mm (5.25 in) disk are larger than that of 86 mm (3.5 in) disk, but smaller than that of hard disk. The contact mode between cantilever and magnetic storage media is the plastic regime when the load is greater than 20 nN.

Key words floppy disk; hard disk; surface morphology; atomic force and friction force microscope (AFM/FM); microtribology