

录像带的表面形貌和微摩擦特性*

王吉会 路新春 温诗铸

(清华大学)

摘要 利用原子力/摩擦力显微镜研究了 Sony 和国产画王录像带的表面形貌、纳米级载荷下的微摩擦性能. 结果表明: 画王带的粗糙度和粒度均与 Sony 带相当, 但其摩擦系数高于 Sony 带; 摩擦力图与表面形貌、形貌斜率图间有较好的对应关系, 微摩擦力随载荷、表面形貌斜率的增加而线性增大.

关键词 表面形貌 微观摩擦 原子力/摩擦力显微镜

电子计算机的升级换代, 要求磁记录材料向高记录密度、高可靠性方向发展; 因而要求磁头与磁记录介质间的动间隙要尽量小, 现已达到 $< 50\text{nm}$. 与磁介质的表面粗糙度相当^[1]; 另一方面, 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. 从可靠性出发, 对软磁盘要求磨损率小于一个原子层 / $10 \sim 100\text{km}$; 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.

对磁带的表面形貌, 虽可用受抑全反射技术来评定, 但由于受到入射角等因素的限制, 分辨率不高^[3]. 1995 年初, 清华大学与中科院化学研究所共同研制成功原子力/摩擦力显微镜^[4]. 其横向分辨率为 0.2nm 、纵向分辨率 0.05nm ; 并且可以对原子力/摩擦力显微图象进行分析与测量^[5], 使得研究纳米级的表面形貌和纳米摩擦特性成为可能. 现以市售的录像带为对象, 用 AFM / FFM 显微镜观察评定其表面形貌和特性, 及极轻载荷下的摩擦特性. 并初步分析探讨了微摩擦力与表面形貌、形貌斜率间的对应关系.

1 实验方法

实验选用市售的 120min Sony 和画王(Super)录像带. 在 CSPM-930a 原子力/摩擦力显微镜上评定纳米级表面形貌并测量摩擦力. 微悬臂为弹性系数 $0.38\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 的 Si_3N_4 .

表面形貌 用恒力模式(参考电流 $I_{\text{ref}} = -0.20\text{nA}$, 扫描速度控制量 $\text{Delay} = 200$)在不同的扫描范围内, 沿 X 方向由 V 通道采集观察表面形貌; 利用三维表面形貌的粗糙度评定方法计算算术平均偏差 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_a 及相关函数, 算法详见文献[5].

* 国家自然科学基金资助项目 59575032. 清华大学摩擦学重点实验室开放基金、青年教师基金、中国博士后基金、国防科工委微机理研究专项青年基金项目. 1997 年 5 月 4 日收到.

本文联系人: 王吉会, 北京市 100084, 清华大学摩擦学国家重点实验室

分形维数 对 AFM / FFM 图象(180 × 180 点), 利用自行编制开发的图像处理软件, 计算出不同小正方体边长 a (格数)下图像点占据的盒数 $N(a)$ 、功率谱 $S(\xi_x, \xi_y)$ 、不同码尺 $e(\text{nm})$ 下轮廓曲线的长度 $Le(\text{nm})$ 、不同等高面上每一小岛(封闭曲线)的周长 $P(\text{nm})$ 和面积 $A(\text{nm}^2)$, 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。

摩擦力图和摩擦力测量 首先根据参考电流 I_{ref} 与压电陶瓷管的 Z 向电压 V_z 间的关系 ($I_{ref}-V_z$) 曲线选定进行摩擦试验时与载荷对应的参考电流 I_{ref} , 然后在恒力模式下 (Delay = 200), 沿 Y 方向由 V&I 通道同时采集观察录像带的表面形貌及其对应的摩擦力图像; 通过改变 I_{ref} , 测量出极轻载荷下的摩擦力图像, 为准确测量摩擦力信号的大小, 采用正、反 Y 向同时扫描的方法采集摩擦力图像, 由 $f = (\xi_x - \xi_y) / 2$ 得出真实的摩擦力信号图, 进而平均, 计算出摩擦力的信号值。

2 实验结果

2.1 表面形貌

由图 1 可见, 录像带表面由磁粉颗粒组成; Sony 带的颗粒表面光滑, 呈球状; 而画王带的颗粒形状不规则, 呈块状, 且前者的颗粒也略小。

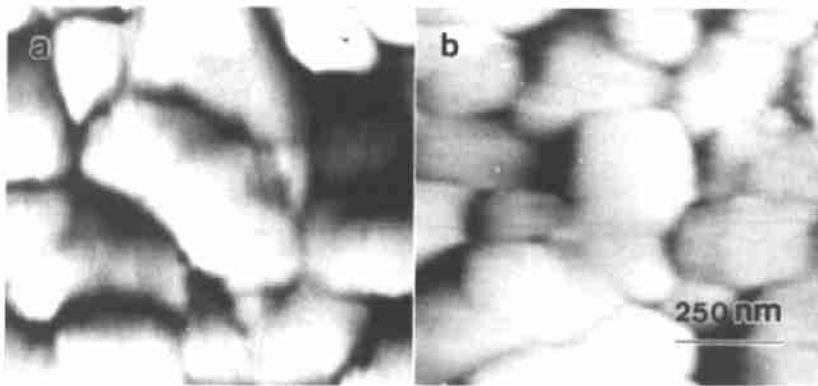


图 1 Super(a)和 Sony(b)录像带的表面形貌

Fig.1 Surface morphology of (a) Super and (b) Sony magnetic video tapes

2.2 表面粗糙度

经计算两种录像带的表面粗糙度参数列于表 1。无论是横向参数 R_a 、 R_q , 还是纵向参数 S_m 、 S 、 λ_{qx} 、 λ_{ax} 、 λ_{qy} 、 λ_{ay} , Sony 带的粗糙度和粒度均略小于画王带, 与图 1 的观察结果相吻合, 说明二种录像带的表面特征基本相当。

表 1 两种录像带的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of two magnetic video tapes

Samples	R_a	R_q	S_m	S	λ_{ax}	λ_{qx}	λ_{ay}	nm
								λ_{qy}
Sony	7.45	9.75	300.5	225.8	825.8	1151.3	1464.7	2003.8
Super	9.47	12.17	370.2	244.5	1096.5	1512.5	1874.7	2620.7

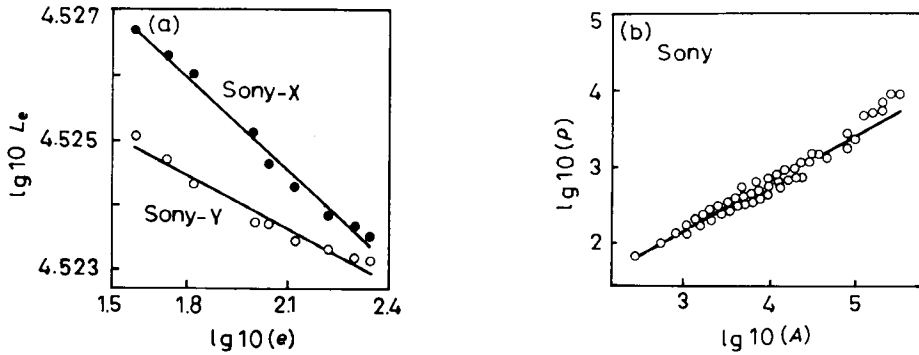


图 2 利用轮廓线法和小岛法求分形维数的关系曲线

Fig.2 Curves for calculating fractal dimension by (a) surface profile and (b) slit island methods

2.3 分形维数

由图 2 可见: 无论是轮廓线法还是小岛法, 轮廓线法长度与码尺及小岛的周长与面积间均呈良好的线性关系, 线性回归后得: $Lg10(L) = -0.0049Lg10(e) + 4.5845$ (Surface profile length, X direction); $Lg10(L) = -0.0028Lg10(e) + 4.5295$ (Surface profile length, Y direction); $Lg10(P) = 0.6235Lg10(A) + 0.2764$ (Slit island method)

经计算由计盒法、功率谱法、轮廓线法和小岛法求得的分形维数列于表 2。虽然用不同方法分形维数有差别, 但除轮廓线法外, 计盒法、功率谱法和小岛法求得的分形维数十分相近; 通过对比发现 Sony 带的分形维数与画王带相比, 基本相等或略小, X 方向的分形维数略大于 Y 方向。同样可以说明, 二者的粗糙度和粒度相当。

表 2 不同计算方法下两种录像带的分形维数

Table 2 Fractal dimension of two magnetic video tapes calculated by different methods

Samples	Surface profile length		Power spectrum		Slit island	Sandbox
	X	Y	X	Y		
Sony	1.005	1.003	1.32	1.23	2.25	2.31
Super	1.006	1.003	1.36	1.29	2.25	2.40

2.4 摩擦力图像和摩擦力曲线

图3是沿Y方向同时采集的Sony带的表面形貌图和摩擦力图.可见二者有较好的对应性,但又略有差异;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.

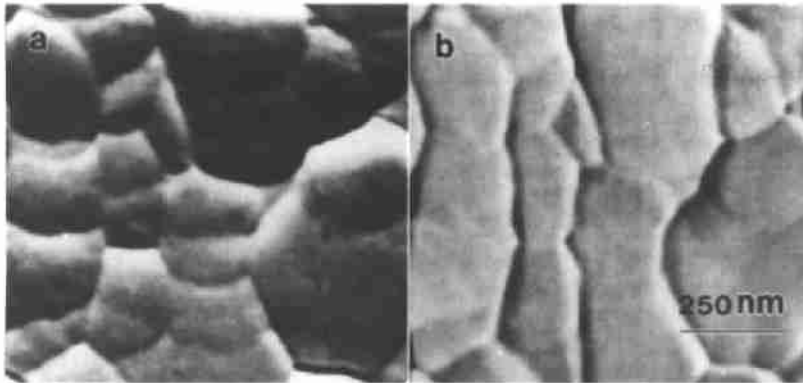


图3 表面形貌图与摩擦力图的对应关系

Fig.3 Relationship between (a) surface morphology and (b) friction force image along Y direction for Sony video tape

由图4可见:在纳米级载荷下,两种录像带的摩擦力(信号)与载荷间呈线性关系;经线性回归后得: $f = 0.03824p + 0.5347$ (Sony); $f = 0.0614p + 10.041$ (Super)

由于真实摩擦力的标定涉及的因素较多,且误差较大,不妨将摩擦力信号看成是真实摩擦力的等同量.将它与载荷直线的斜率作为微摩擦条件下摩擦系数的表征参量;其实,摩擦力信号与真实摩擦力间仅差一个常数.因此由上式可以看出,微摩擦条件下,不仅Sony带的摩擦力小于同样载荷下的画王带,而且前者的摩擦系数(0.038)约只有后者(0.061)的一半.表明在极轻载荷下,Sony录像带的微摩擦学性能较优.

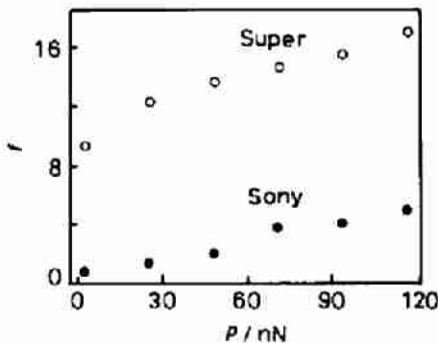


图4 两种录像带的摩擦力(f -载荷(p)曲线
Fig.4 Dependence of friction force signal f of two magnetic video tapes on load p

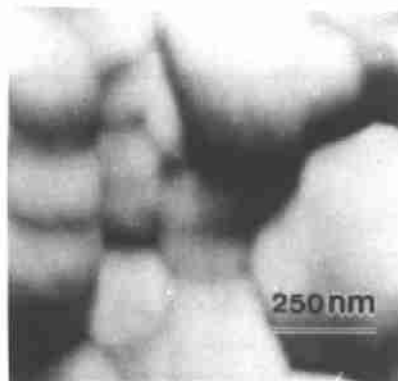


图5 与图3a对应的形貌斜率图
Fig.5 Slope of surface profile of Fig.3a

3 讨 论

3.1 形貌斜率图

从图 3 来看, 三维表面形貌和摩擦力图间虽有相似之处, 但又有区别. 对三维表面形貌图沿 Y 方向求微分, 计算出相应的形貌斜率图(图 5). 将图 5 与图 3a、b 对比, 发现表面形貌、形貌斜率与摩擦力图之间均有较好的对应关系. 原因可能是与原子力 / 摩擦力显微镜的扫描方式和特征有关. 在扫描过程中, 探针每步的移动量为 $0.1 \sim 10\text{nm}$, 而每步间形貌及其斜率都在变化. 故从表面上看, 摩擦力图与形貌和形貌斜率图间均有对应关系. 但从细节看, 形貌斜率图与摩擦力图的对应性比与形貌图更紧密.

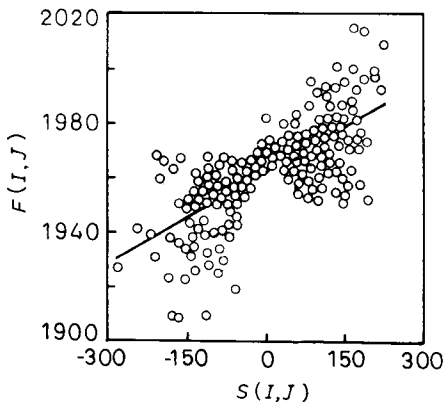


图 6 摩擦力信号 $F(I, J)$ 与形貌斜率信号 $S(I, J)$ 的对应关系

Fig.6 Variation of friction force $F(I, J)$ with the slope of surface profile $S(I, J)$

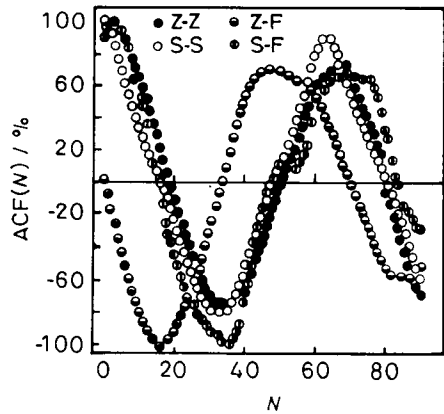


图 7 摩擦力与表面形貌、形貌斜率间的相关函数

Fig.7 Covariance functions among surface profile, slope of surface profile and friction force

3.2 摩擦力与形貌斜率的关系

为进一步验证微摩擦过程中摩擦力与形貌斜率的关系, 对摩擦力图(120nN)及形貌斜率图按其信号大小作图(图 6). 可以看出摩擦力与形貌斜率信号间近乎呈线性关系, 与 Bhushan 等的 $\mu = \mu_0 + \text{tg}\theta$ 结论一致. 其中 μ 是局部摩擦系数, μ_0 是平面上的摩擦系数, $\text{tg}\theta$ 是局部的形貌斜率值^[6]. 图 7 是表面形貌、形貌斜率和摩擦力图间的自相关函数和互相关函数. 摩擦力与形貌斜率图的互相关函数的最大值出现在零附近, 且与形貌斜率自相关函数的变化规律一致; 而摩擦力与表面形貌互相关函数的最大值距零较远. 所有这些均表明摩擦力与形貌斜率间的确存在对应关系.

4 结 论

1. 画王录像带的粗糙度和粒度与 Sony 录像带相当,但其摩擦系数高于 Sony 录像带,约为 Sony 录像带的两倍.

2. 摩擦力图与表面形貌图、形貌斜率图间有较好的对应关系;微摩擦力随载荷及表面形貌斜率的增加而线性增大.

参 考 文 献

1. B.Bhushan. *Tribology and mechanics of magnetic storage device*, (New York: Springer-Verlag New York Inc. 1990) p.1
2. R.Kaneko. *Wear*, **168**(1-2), 1(1993)
3. 袁弋非, 陈大融, 孔宪梅. *仪器仪表学报(增刊)*, **16**(1), 153(1996)
4. 路新春, 温诗铸, 孟永刚, 黄 平. *科学通报*. **41**(19), 1753(1996)
5. 王吉会, 路新春, 温诗铸. *摩擦学进展*, **1**(4), 49(1996)
6. B.Bhushan, Ji-ai. Ruan. *J. Tribology*, **116**(4), 389(1994)

SURFACE MORPHOLOGY AND MICROTRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF MAGNETIC VIDEO TAPES

WANG Jihui LU Xin chun WEN Shizhu
(Tsinghua University)

ABSTRACT The surface morphology and microtribological behavior of Sony and Super magnetic video tapes were investigated by atomic force / friction force microscope. The results show that the surface roughness and grain size of Super video tape were almost the same as that of Sony video tape, but the friction coefficient of Super video tape was higher than that of Sony tape. There were relationships among surface profile, slope of surface profile and friction force image. The friction force was in linear with the nano-scale load and the slope of surface profile.

KEY WORDS surface morphology microtribology atomic force / friction force microscope

Correspondent: WANG Jihui, State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084