

录音带的表面形貌和微摩擦特性研究*

王吉会 路新春 温诗铸

(清华大学摩擦学国家重点实验室,北京 100084)

摘要 利用原子力/摩擦力显微镜研究了进口 Sony, TDK 和国产 Nature, Top, ZZZ 录音带的表面形貌及纳米级载荷下的微摩擦性能. 实验结果表明:3种国产带的粗糙度和粒度与进口 Sony 和 TDK 带相当; Sony 带的微摩擦力大于同样载荷下 Nature 带,且其摩擦系数也略大于 Nature 带. 微摩擦力与表面形貌斜率间有较好的对应关系;摩擦力随载荷、表面形貌斜率及表面粘着力增加而增大.

关键词 录音带 表面形貌 微观摩擦学 原子力/摩擦力显微镜

录像带、录音带、磁盘等磁记录介质以其价格低、记录密度高、易携带等优点,在工业部门及家庭中得到广泛的应用. Bhushan^[1]预计在今后的10年内磁记录介质的消耗量将增加5倍,磁记录密度提高一个量级. 要提高磁记录材料的记录密度,从仪器构造上,就是减小磁头与磁记录介质间的浮动间隙,但这就不可避免地导致磁头和磁介质的摩擦磨损,从而引起磁记录设备的损坏、磁记录信息的丢失.

磁记录系统的磁头/磁记录介质在磁记录过程中经历起动、高速旋转及停止等不同的接触状态,磁头的垂直作用力为 10^{-8} N量级,且磁粉颗粒处在纳米级,由于这些特点使得它成为纳米摩擦学中研究最多、应用背景最强的研究领域^[2]. 随着原子力/摩擦力显微镜(AFM/FFM)的研制成功^[3],使得能够真正评价极轻载荷下($10^{-7} \sim 10^{-9}$ N)薄膜材料的摩擦学特性^[4],对推动微观摩擦学的发展及开发高密度的磁记录介质有重要的作用. 本工作以市售的5种录音带为研究对象,用原子力/摩擦力显微镜观察评定了其表面形貌特征,测定了极轻载荷下的摩擦特性,并分析讨论了横向力图与摩擦力图、微摩擦力与表面形貌、形貌斜率及表面粘着力的对应关系.

1 实验方法

实验选用市售的60 min Sony, TDK 和国产 ZZZ, Top 及 Nature 录音带. 用 CSPM-930 a 原子力/摩擦力显微镜 评定录音带的纳米级表面形貌,并测量微观摩擦力,针尖为弹性常数 0.38N/m 的 Si_3N_4 .

表面形貌 用恒力模式($I_{\text{ref}} = -0.20 \text{ nA}$, $\text{Delay} = 200$)在不同的扫描范围内,沿 X 方向由 V 通道采集观察录音带的表面形貌,扫描速度为 $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$;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

1997-09-23 收稿,1998-01-23 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:59575032)、清华大学摩擦学实验室开放基金、中国博士后科学基金资助项目

S_m , 单峰间距 S , 均方根波长 λ_q , 算术平均波长 λ_a , 具体算法详见文献[5].

分形维数 对 AFM/FFM 图象(180×180 点), 利用自行编制开发的图象处理软件, 计算出不同小正方体边长 a (格数) 下图象占据的盒数 $N(a)$ 、功率谱 $S(f_x, f_y)$ 、不同码尺 e (nm) 下轮廓曲线的长度 $L(e)$ (nm), 不同等高面上每一小岛(封闭曲线)的周长 P (nm) 和面积 A (nm²), 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 $I_{ref}-V_z$ 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 (Delay = 200), 沿 Y 方向由 V&I 通道同时采集观察录音带的表面形貌及其对应的横向力图象, 扫描速度为 2×10^{-6} m/s; 通过改变 I_{ref} , 测量出一系列不同极轻载荷下的横向力图象. 为测量摩擦力信号, 采用正、反 Y 向同时扫描的方法采集横向力图象 $f_Y(I, J)$ 和 $f_{-Y}(I, J)$, 由 $f(I, J) = [f_Y(I, J) - f_{-Y}(I, J)]/2$ 得出摩擦力信号图象, 进而求平均计算出某一载荷下的摩擦力信号值 f .

表面粘着力 首先使探针与样品表面接触 ($I_{ref} = -1.0$ 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与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. 由 V_z-I_t 曲线得出将探针拉离样品表面到正常位置所需的电流 I_{t0} , 通过 $F_{adhesive} = I_{t0} \cdot \alpha \cdot P \cdot K_a$ 计算出表面粘着力, 其中 α 是加在压电陶瓷管上电压 V_z 与反馈电路中参考电流 I_{ref} 间直线关系的斜率, P 为压电陶瓷的压电系数, K_a 为微悬臂的弹性系数.

2 实验结果

2.1 表面形貌

图 1 是 5 种录音带的表面微观形貌. 由图可见, ZZZ 和 Nature 两种录音带主要由棒状的磁粉颗粒组成, 而 Top 录音带呈棒状和块状; Sony 和 TDK 录音带的磁粉颗粒主要呈块状, 但也有少量的颗粒呈棒状. 总体来看, 5 种录音带的表面特征虽有差别, 但差别不大.

2.2 表面粗糙度

经计算, 5 种录音带的表面粗糙度参数如表 1. 由表可以看出, 虽然 5 种录音带的表面粗糙度参数各有不同, 但无论是横向参数 R_a , R_q , 还是纵向参数 S_m , S , λ_{qx} , λ_{ax} , λ_{qy} , λ_{ay} , 国产录音带的粗糙度和粒度均与进口录音带的粗糙度和粒度相当, 与图 1 的观察结果相吻合. 即从表面形貌上, 国产录音带与进口录音带的差别不大.

2.3 分形维数

图 2 是对 Nature 录音带分别用功率谱法和计盒法求分形维数的关系曲线. 由图可以看出, 无论是功率谱法、计盒法, 所占盒数 $N(a)$ 与码尺 a 及功率谱 $S(f)$ 与频率 f 间在双对数坐标上均呈良好的线性关系, 线性回归后得:

$$\log_{10}(S(f)) = -2.48 \log_{10}(f) + 6.7998 \quad (\text{功率谱法, } Y \text{ 向}),$$

$$\log_{10}(S(f)) = -2.14 \log_{10}(f) + 6.5982 \quad (\text{功率谱法, } X \text{ 向}),$$

$$\log_{10}(N(a)) = -2.35 \log_{10}(a) + 5.6971 \quad (\text{计盒法}).$$

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如表 2. 虽然不同方法下分形维数的大小有所差别, 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; 3 种国产录音带的分形维数基本与两种进口录音带的分形维数相近. 由此同样可以说

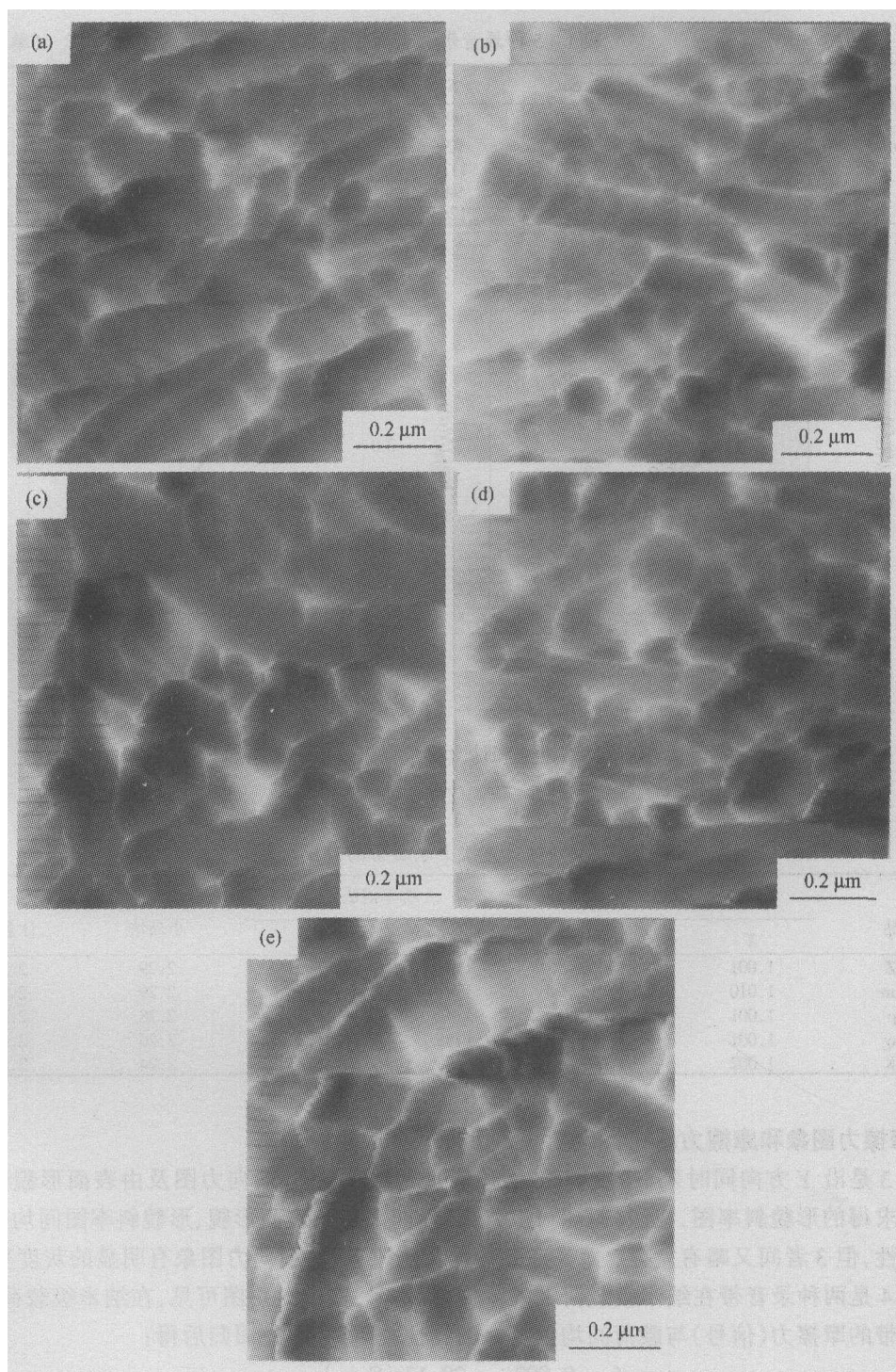


图1 5种录音带的表面形貌 ($1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$)
(a) ZZZ; (b) Nature; (c) Top; (d) Sony; (e) TDK

明,国产录音带的粗糙度和粒度与进口录音象带相当.

表1 5种录音带的表面粗糙度

(单位: mm)

样品	Ra	Rq	Sm	S	λ_{ax}	λ_{qx}	λ_{ay}	λ_{qy}
ZZZ	3.5	4.4	329	99	863	1328	1234	1694
Nature	4.6	5.9	286	93	1034	1538	1507	2021
Top	2.7	3.5	329	112	983	1493	1303	1830
Sony	2.7	3.6	294	94	932	1586	1396	1917
TDK	4.5	5.8	387	126	793	1211	1183	1661

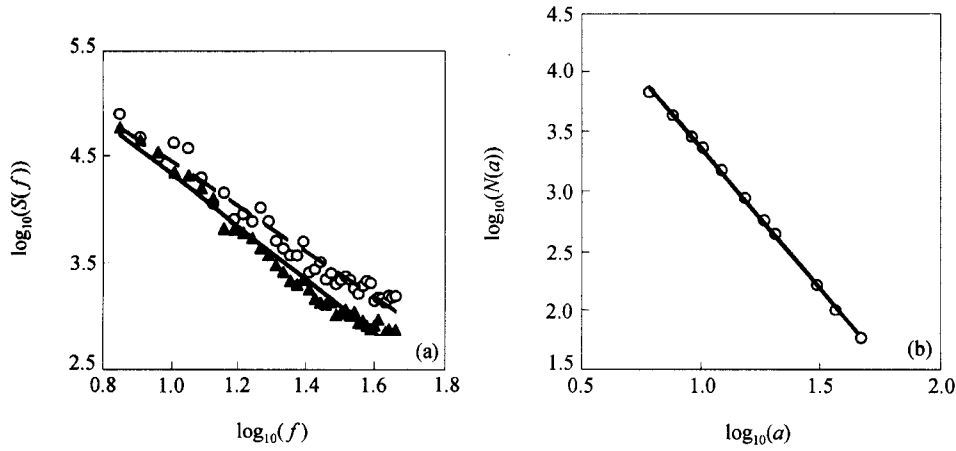


图2 利用功率谱法和计盒法求分形维数的关系曲线

(a) 功率谱法. ○—Nature-x, ▲—Nature-y; (b) 计盒法. ○—Nature

表2 不同计算方法下录音带的分形维数

样品	轮廓线法		功率谱法		小岛法	计盒法
	X	Y	X	Y		
ZZZ	1.001	1.002	1.41	1.34	2.29	2.23
Nature	1.010	1.015	1.43	1.26	2.29	2.35
Top	1.001	1.002	1.42	1.28	2.28	2.33
Sony	1.001	1.001	1.35	1.33	2.26	2.36
TDK	1.002	1.003	1.28	1.23	2.24	2.32

2.4 摩擦力图象和摩擦力曲线

图3是沿Y方向同时采集的Nature录音带的表面形貌图、横向力图及由表面形貌图沿Y向微分求得的形貌斜率图. 通过对比可以看出,横向力图与表面形貌、形貌斜率图间均有较好的对应性,但三者间又略有差异;尤其在磁粉颗粒的边界处,横向力图象有明显的灰度变化.

图4是两种录音带在纳米级载荷下的摩擦力(信号)曲线. 由图可见,在纳米级载荷下,两种录音带的摩擦力(信号)与载荷间均呈良好的线性关系;经线性回归后得:

$$f = 0.092p + 20.13 \text{ (Sony)},$$

$$f = 0.077p + 1.83 \text{ (Nature)}.$$

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系数的相对表征参量^[3],

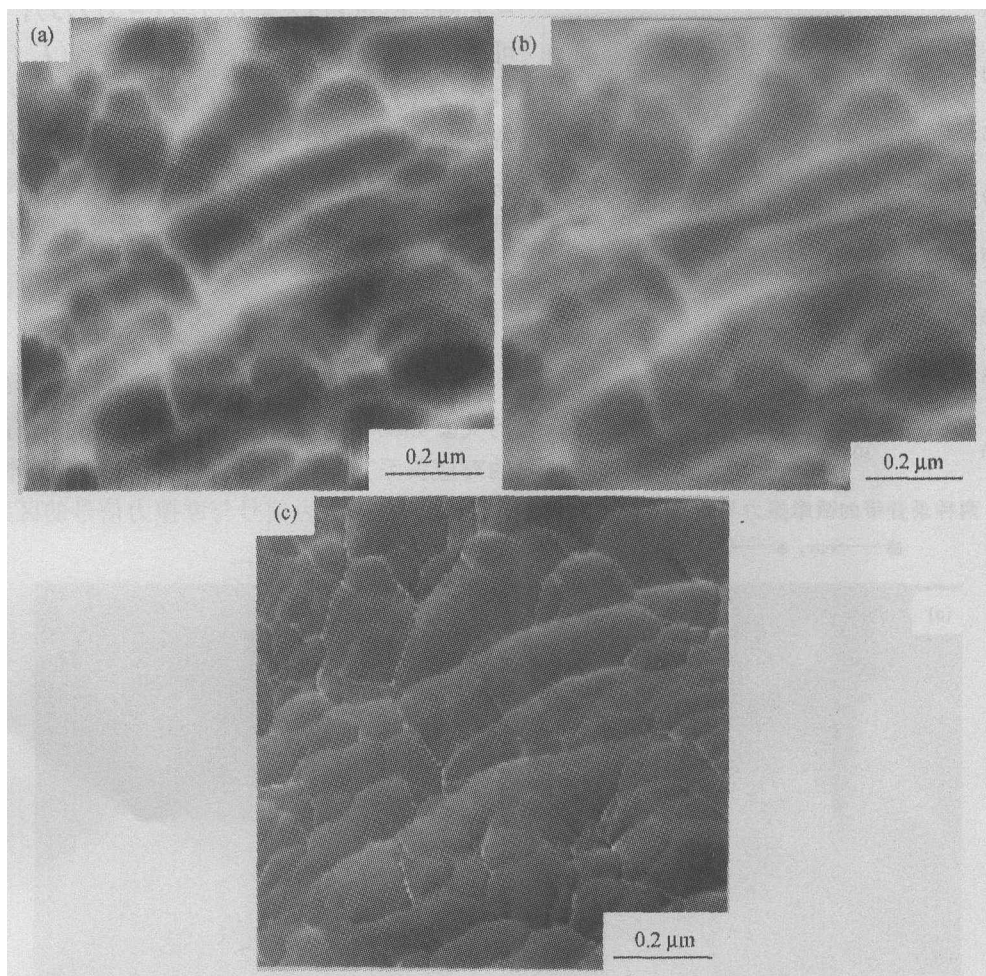


图3 表面形貌、表面形貌斜率及横向力图象间的对应关系(1 $\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$)

(a) 表面形貌图; (b) 形貌斜率图; (c) 横向力图

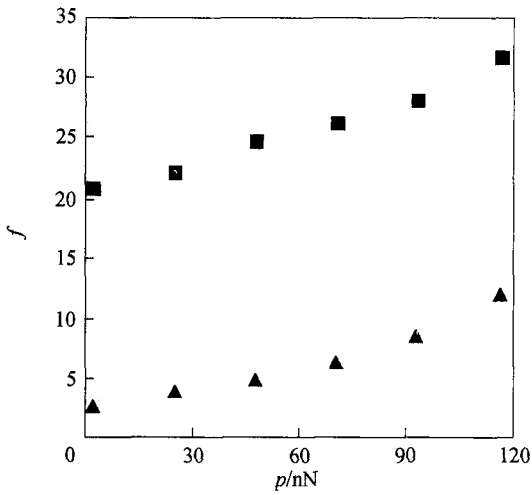
由上式可以看出,微摩擦条件下,不仅 Sony 录音带的摩擦力大于同样载荷下的 Nature 录音带,而且 Sony 录音带的摩擦系数也大于 Nature 录音带. 表明在极轻载荷下, Nature 录音带的微摩擦学性能优于 Sony 录音带.

3 讨论

3.1 横向力图与摩擦力图

从 AFM/FFM 显微镜的原理上讲,当探针相对于样品沿 Y 向扫描时,四象限检测器左右象限的输出电流的大小就反映摩擦力信号,但由于激光光斑不对称、光束调节不准及仪器误差等原因,左右象限的输出电流反映的是包括摩擦力信号在内的横向力的大小. 为将摩擦力信号从横向力信号中分离出来,我们采用正、反 Y 向扫描,并同时采集横向力信号的方法,

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



- Y向: $F_{-Y}(I, J) = f_0(I, J) - f(I, J)$,
 可以认为 $f(I, J) = [F_Y(I, J) - F_{-Y}(I, J)]/2$,
 其中 $F_Y(I, J)$, $F_{-Y}(I, J)$ 分别是正、反 Y 向扫描时的横向力信号, $f(I, J)$ 是摩擦力信号, $f_0(I, J)$ 是除摩擦力外由其他因素产生的横向力信号. 于是某一载荷下的平均摩擦力信号的大小 f 为

$$f = \frac{1}{180 \times 180} \sum_{I, J=1}^{180} f(I, J),$$

正、反 Y 向扫描时的横向力图及摩擦力图的关系如图 5 所示. 由图可见, 三者之间有较好的对应关系, 但细节又略有不同, 其实这种差异

图 4 两种录音带的微摩擦力与载荷间的关系曲线正好反映了横向力信号与摩擦力信号的区别.

■—Sony, ▲—Nature,

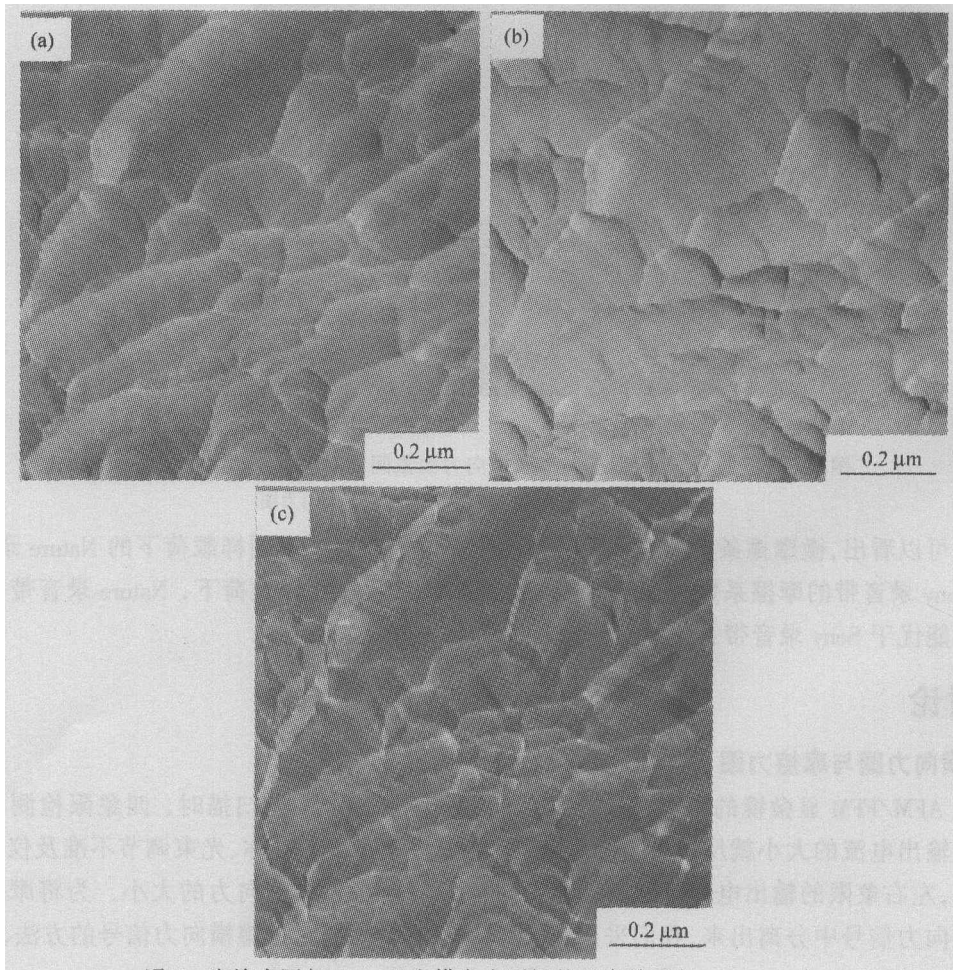


图 5 摩擦力图与 X, -Y 向横向力图间的对应关系(1 μm × 1 μm)
 (a) Y 向横向力图; (b) -Y 向横向力图; (c) 摩擦力图

3.2 微摩擦力与表面形貌、形貌斜率

关于微摩擦力与表面形貌、形貌斜率的关系, Mate^[6]从 Van der Waals 力出发,认为微摩擦力与表面形貌有关,形貌图中峰处摩擦力小,而谷处摩擦力大. 但 Bhushan^[7]等的观点正好相反,认为微摩擦力与形貌斜率相关,而不是表面形貌. 如仅从图 3 看,微摩擦力似乎与表面形貌、形貌斜率均有关.

为详细研究它们间的关系,从图 3(a)中沿 Y 向任取一条线,同时在图 3(b), (c)中取与此条线相对应的形貌斜率线和摩擦力线,如图 6. 并对图 3(a)~(c)按各自信号的大小分别以表面形貌和形貌斜率信号为横坐标,摩擦力信号大小为纵坐标作图,如图 7 所示. 由图 6 和图 7 可以看出,摩擦力信号与形貌斜率信号有较好的线性对应关系;而与表面形貌信号虽有一定的对应性,但数据的分散性大,对应性较差;形貌斜率越大,摩擦力也越大. 当探针从谷底向峰顶移动即上升过程中,形貌斜率为正,摩擦力增大;从峰顶向谷底移动即下降过程中,形貌斜率为负,摩擦力减小,与宏观摩擦学中的机械啮合理论(ratchet theory)一致. 结合微摩擦力与表面形貌、形貌斜率间的相关函数^[4],可以充分证明微摩擦力与形貌斜率间有较强的对应关系.

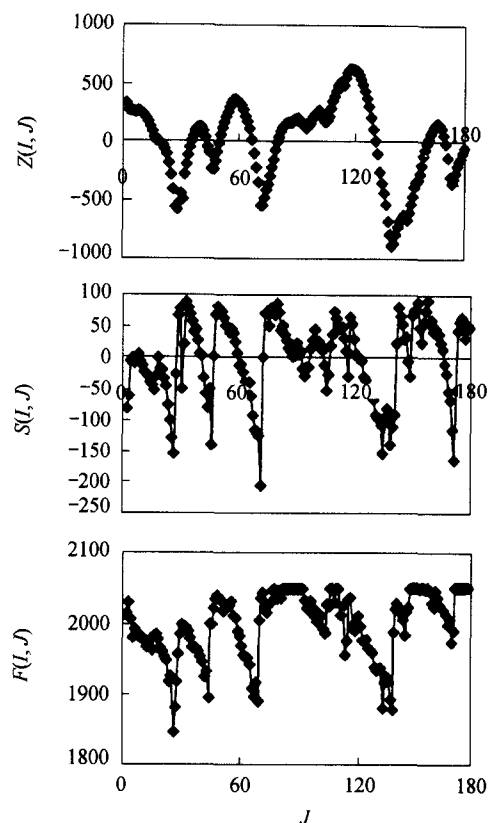


图 6 表面形貌 $Z(I, J)$ 、形貌斜率 $S(I, J)$ 及摩擦力 $F(I, J)$ 间的对应关系曲线

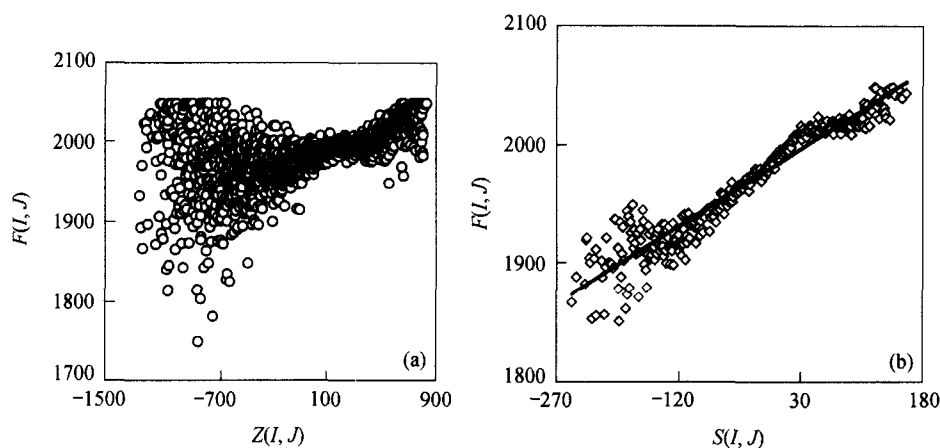


图 7 摩擦力信号 $F(I, J)$ 与表面形貌信号 $Z(I, J)$ 、形貌斜率信号 $S(I, J)$ 间的关系曲线

(a) 表面形貌; (b) 形貌斜率

3.3 微摩擦力与表面粘着力

由摩擦学原理可知^[8]:

$$f = \mu(L_{\text{applied}} + F_{\text{adhesive}}),$$

其中 f 是摩擦力, μ 是摩擦系数, L_{applied} 是外加载荷, F_{adhesive} 是表面粘着力.

图 8 分别是 Sony 和 Nature 录音带的 V_z - I_t 曲线. 经计算 Sony 和 Nature 录音带的表面粘着力分别为 14.8 和 6.8 nN, Sony 录音带的表面粘着力大于 Nature 录音带. 并结合各自的相对摩擦系数, 就可对图 4 中 Sony 录音带的微摩擦力远大于同样载荷下 Nature 带的摩擦力的实验结果做出解释, 即同样载荷下, 材料的表面粘着力越大, 微摩擦力也就越大.

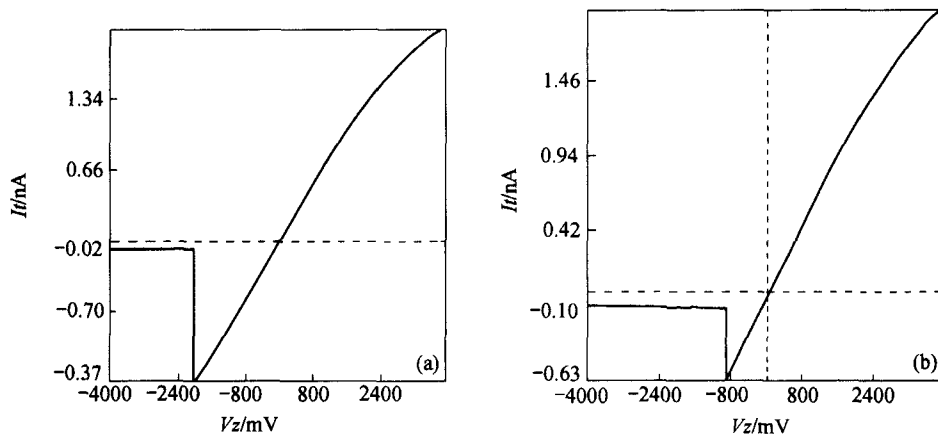


图 8 Sony、Nature 录音带的 V_z - I_t 曲线
(a) Sony; (b) Nature

4 结论

(1) 3 种国产录音带的粗糙度和粒度与进口 Sony 和 TDK 录音带相当; Sony 录音带的微摩擦力大于同样载荷下 Nature 带的摩擦力, 且其摩擦系数也略大于 Nature 带.

(2) 微摩擦力与表面形貌斜率间有较好的对应关系; 摩擦力随载荷、表面形貌斜率及表面粘着力的增加而增大.

参 考 文 献

- 1 Bhushan B. Tribology and mechanics of magnetic storage device. New York: Springer-Verlag Inc, 1990. 1
- 2 薛群基, 张 军. 微观摩擦学进展. 摩擦学学报, 1994, 14(4): 360
- 3 路新春, 温诗铸, 孟永刚, 等. 激光检测摩擦力显微镜的研制. 科学通报, 1996, 41(19): 1753
- 4 王吉会, 路新春, 温诗铸. 录象带的表面形貌和微摩擦特性. 材料研究学报, 1997, 11(4): 351
- 5 王吉会, 路新春, 温诗铸, 等. 扫描探针显微图象的分析与测量. 摩擦学进展, 1996, 1(4): 49
- 6 Mate C M. Nanotribology of lubricated carbon overcoats on magnetic disks studied by friction force microscope. Surf Coat Technol, 1993, 62: 373
- 7 Bhushan B. Handbook of micro/nano tribology. Boca Raton: CRC Press, 1995, 461
- 8 温诗铸. 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社, 1990. 386