

微机电系统磨损特性研究进展

张文明, 孟 光

(上海交通大学 振动、冲击、噪声国家重点实验室, 上海 200030)

摘要: 对微机电系统, 尤其是微旋转机械的磨损研究现状进行评述, 介绍 MEMS 及微旋转机械中的各种磨损问题, 分析材料和不同工况(表面粗糙度、环境以及载荷)等条件对 MEMS 及微旋转机械磨损性能的影响, 介绍不同形式的磨损模型、分析方法与检测仪器, 并对相关领域的研究进展进行展望

关键词: 微机电系统(MEMS); 磨损性能; 表面改性

中图分类号: TP202; TH117.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2005)05-0489-06

微机电系统(MEMS)是科技发展的前沿, 在生物、医学、航天及航空工业等领域具有广泛的应用价值。微旋转机械是 MEMS 中主要的驱动装置和动力源, 具有广阔的应用前景。

同宏观机械系统一样, MEMS 中也存在着磨损失效问题, 磨损无疑限制并危及着 MEMS 的性能和可靠性^[1~3]。对于 MEMS 来说, 由于其尺度效应而使表面积增大, 接触面更平滑, 且与宏观磨损机理明显不同。

目前, 对微尺度、低表面粗糙度和轻载作用下 MEMS 及微旋转机械的磨损机理研究和分析模型的建立还很少涉及。微尺度下 MEMS 及微旋转机械的磨损研究正成为磨损分析的一个新分支。

1 微机电系统磨损问题

磨损影响 MEMS 中微旋转机械的性能, 使微机构丧失功能而导致完全失效^[1,2,4~6]。因此, 最大限度降低磨损乃至实现无磨损条件, 是保证微旋转机械及 MEMS 功能和寿命的关键。

在静电微电机中, 微转子和轮毂之间的间隙较小, 在转子高速运转时, 转子和轴承轮毂频繁接触, 且转子内壁的粗糙度较大, 容易形成磨粒而产生磨粒磨损, 且在静电作用下, 转子和极板之间时常出现粘着磨损和氧化腐蚀。ATT 贝尔实验室研究了微电机的磨损情况, 发现在 2 500 r/min 高转速下, 可以明显地看到轮毂剧烈的磨损和变形^[7]。磨损缩短了微电机的寿命, 限制了其性能的发挥。

图 1 所示为某发动机的磨损失效形貌 SEM 照片

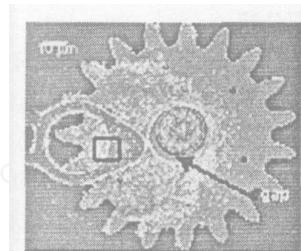


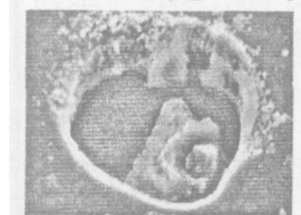
Fig 1 SEM image of a failed microengine

图 1 微发动机磨损失效 SEM 照片

片。可见在齿轮上出现磨屑, 特别是缝隙中的磨屑较多^[8]。图 2 示出了微发动机齿轮、枢轴和凸缘的磨损



(a) Wear of the gear and flange



(b) Wear of the hub

Fig 2 Wear of gear, flange and hub of a microengine

图 2 微发动机齿轮及枢轴和凸缘的磨损形貌 SEM 照片

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(10325209)。

收稿日期: 2004-11-26; 修回日期: 2005-03-17/联系人孟光, email: gmeng@sjtu.edu.cn

作者简介: 孟光, 男, 1961 年生, “长江学者奖励计划”特聘教授, 博士生导师, 目前主要从事 MEMS 动力学、振动与控制等方面的研究。

表面形貌 SEM 照片^[9]。图 3 总结了微电机各元件的

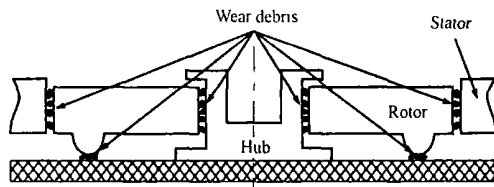


Fig 3 Wear issues of micromotors

图 3 微电机磨损问题

磨损问题 MEMS 磨损问题的另一方面主要表现为, 宏观润滑技术在微系统中的不适用性, 在接触过程中, 磨损和粘附也会影响旋转微电机装置的可靠性^[10, 11]。

2 磨损机理和模型分析

2.1 磨损机理分析

磨损是相互接触的物体在相对运动中表层材料不断损伤的过程, 是伴随摩擦而产生的必然结果

引起 MEMS 失效的磨损主要有粘着磨损、磨粒磨损和腐蚀磨损等^[9, 11, 12]。粘着磨损的机理建立在材料表面光滑、微观粗糙的基本上, 当两表面滑动接触时产生断裂或变形破坏等; 磨粒磨损指由于颗粒或突起物使材料产生迁移而造成的磨损, 是 MEMS 中最重要的磨损损伤机制, 分为塑性变形和断裂变形 2 种形式, 磨粒磨损将引起犁沟和切削等损伤而导致材料磨损; 腐蚀磨损是由于化学作用使材料表面发生损伤, 主要有腐蚀和氧化反应 2 种损伤形式。因此, 在 MEMS 接触表面的相互作用下, 表面层将发生擦伤、剥落、吸附、粘着及胶合等破坏形式, 而各种复杂的磨损形式为几种基本形式的组合体现, 随着工况条件的变化, 磨损形式的主次不同, 且磨损形式也相应变化

2.2 磨损模型分析

磨损模型和相应的数学表达式有助于设计者预测 MEMS 材料的耐磨性和使用寿命。但是, 由于 MEMS 材料的磨损是一个非常复杂的动态过程, 因此, 希望用一个磨损模型涵盖所有磨损现象是不可能的。针对各种磨损现象, 学者们建立了不同的磨损模型, 对应的数学公式多达数百种^[13]。其中, 磨损模型的建立主要基于 Archard 定律, 根据此定律, 材料的磨损体积损失可以表示为:

$$V = K \cdot S \cdot \frac{F}{H} \quad (1)$$

式中: V 为体积磨损损失, S 为滑动位移, F 为法向载荷, H 为软材料硬度, K 为磨损系数

根据实验数据提供的材料使用情况和材料特性, 结合磨损机理, 利用半经验半解析的方法分析磨损现象, 从而提出不同的磨损模型。如果摩擦副中一种材料表面硬度比另一种高得多且不计磨屑的影响, 磨损公式可简化为 Archard 公式^[14]。Zhou 等^[15]结合 M-B 分形接触模型提出基于分形参数的磨损模型, 并用于研究材料表面粗糙度对材料表面接触损伤性能的影响, 其结果与试验结果基本吻合

近年来, 基于能量法、疲劳断裂力学和弹塑性等理论所建立的磨损模型得到了相应发展^[14, 16]。Halling^[16]引入疲劳的临界判据对 Archard 模型进行修正, 并考虑表面粗糙度对材料弹塑性变形及应力应变关系的影响。Qiu 等^[14]利用能量法建立磨损分析模型, 考虑磨屑量对接触表面的影响, 并推导出预测冲击磨损寿命的公式, 即

$$\epsilon = \left[\tau_0 + \left(\frac{\varphi}{2} \right)^{1/2} H \right] \varphi^{5/2} \cos^2 \alpha \sin^{1/2} \alpha + \left[\tau_0 - \left(\frac{2\varphi}{1-\varphi} \right)^{1/2} H \right] \varphi \sin^2 \alpha \quad (2)$$

式中: ϵ 为应变率, τ_0 为剪切应力, α 为冲击角, φ 为载荷指数

Tanner 等^[9]提出 MEMS 驱动器粘着磨损失效预测模型, 即

$$R_f = \frac{9}{2\pi} \cdot \left(\frac{\sigma}{K} \right) \cdot \frac{V}{rF} \cdot \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{1}{Q} \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \quad (3)$$

式中: R_f 为失效时的旋转数, σ 为屈服强度, r 为销半径, Q 为质量因子, ω 为旋转频率, ω_0 为谐振频率。结果表明, 该模型对预测和研究 MEMS 微系统在共振频率范围内失效的效果较好。另外, 可以利用分子动力学模拟方法来研究微观磨损机制^[17]。

因此, 在研究 MEMS 材料的磨损机理和特性时, 可以运用 Archard 基本公式, 根据材料接触的实际情况进行修正, 以得到特殊情况下的磨损模型, 并对 MEMS 及微旋转机械中的磨损现象进行模拟预测

3 微机电系统磨损特性

3.1 试验方法

由于微尺度下只有极小的体积磨损率, 传统的磨损测量方法不适用于微观状态^[18]。对 MEMS 磨损的研究离不开一些专用仪器, 如光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM)、聚焦离子束 (FIB)、原子力显微镜 (AFM)、电子能量损失谱仪 (EELS) 及原子力显微镜 (AFM) 等^[19]。其中, AFM 可以用来研究微尺度下的摩擦磨损、擦痕和边界润滑

等^[20]。

美国 Sandia 国家实验室首次研制了 1 种用于测试硅微系统磨损的专用微电机, 其可以提供较大的力驱动系统^[12]。另外, 还开发出了可靠性测试平台 ShMM eR (Sandia High Volume Measurement of Micromachine Reliability)。

有关 MEMS 中微旋转机械磨损研究的文献报道分为对现有装置进行现场测量和对理想实验测试装置(如销-盘结构)进行测量两类。Gabriel 等^[7]提出多晶硅微汽轮机的现场磨损测量方法, 采用空气喷射驱动使汽轮机的转速达到 10 000 r/min。对于直径为 125 μm 的汽轮机来说, 当转速为 5 000 r/min 时, 其旋转寿命近一百万周次(滑动距离近 400 m)。Williams^[4]针对微型高速旋转枢轴的摩擦磨损问题, 研究构件设计、材料性能和使用工况条件对不同枢轴磨损率的影响, 测定相关参数的磨损率曲线。Mehregany 等^[21]定性研究凸缘微电机和摆动微电机的磨损特性, 通过磨损试验前后的齿轮齿数比来测量磨损, 发现轴承间隙在磨损后会引引起齿轮齿数比下降。在摆动微电机磨损的过程中滚动接触多于滑动, 犁沟效应使得接触界面所产生的磨粒磨损较少。微电机的运转性能和输出功率不仅与摩擦系数有关, 而且磨损对其机械性能和实用效果的影响更大。

3.2 影响因素与防护措施

随着 MEMS 器件特征尺度的减小, 器件的比表面积增大, MEMS 中滑动接触引起的摩擦磨损也与摩擦副材料有关^[22]。硅是 1 种固有“弱”摩擦材料, 易产生较高摩擦系数, 与其它材料相互滑动时易造成不可忽视的磨损率^[23]。微电机主要由硅基材料制成, 研究硅材料抗磨损性能对提高微电机的运行性能意义重大^[1, 24]。Gardos^[25]采用多晶硅/多晶硅的销-平板实验装置测得摩擦系数 μ 值为 0.2~0.6(与环境温度有关), 磨损率为 $9 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-3} \text{ N/s}$, 根据一般标准, 此磨损较严重。

另外, 环境湿度对 MEMS 的磨损性能有很大影响, 是 MEMS 失效的 1 个重要因素^[8, 19]。在多晶硅的 MEMS 表面, 其磨屑为湿度的函数, 随着湿度变化, 硅材料的磨屑形状和磨屑量均发生改变, 当湿度下降时, 磨损所产生的磨屑增多; 在高湿度环境下, 湿度增大, 磨屑形状由片状及粗条状变成细针状, 此时其表面所形成的氢氧化物起到了润滑作用, 能够减少磨损产生的磨屑; 在干燥环境下产生的磨屑更多, 且因环境的氧化作用促使磨屑增加。

表面粗糙度使实际接触面积发生变化而对磨损

产生一定的影响, 多晶硅微电机的表面粗糙度约为 60 nm^[26, 27]。微电机转子内壁的表面粗糙度会引起初始磨损, 导致转子和轴承的磨损失效^[28], 而可以通过降低氧化温度的方法来减小多晶硅表面粗糙度^[27]。

载荷对 MEMS 的磨损性能也有一定影响, MEMS 中的载荷为微牛顿量级。Bhushan^[29]对 MEMS 中载荷与材料磨损性能关系进行了研究, 利用原子力显微镜分析了各种载荷作用下未处理及经硅涂层处理的 MEMS 器件在各种环境下的摩擦磨损特性。结果表明, 随着载荷增加, 接触表面的磨损增加。另外, Gupta 等^[30]还研究了离子注入对硅材料磨损性能的影响, 发现耐磨性与掺杂和膜厚变化有关。

微观磨损研究主要针对其磨损表面特性^[20]。定性研究表明, 可识别的磨损仅存在于重载情况下。Beerschwinger 等^[1, 24]采用修正宏观试验对 MEMS 兼容材料(DLC、 SiO_2 和 Si_3N_4 等)的微尺度磨损行为进行研究, 并初步探讨薄膜的磨损机制, 其试验结果见表 1。可以看出: 相对其它几种材料, 多晶硅的磨损较为严重, DLC 薄膜磨损较小; 可能存在 2 种磨损机制, 即严重断裂和严重变形, 其中 DLC、 SiO_2 、 Si_3N_4 和 SCS 的磨损机制为严重断裂, 而多晶硅的磨损机制为严重变形, 磨损颗粒尺寸反映磨损程度。研究发现, 虽然磨损率和接触压力之间不是线性关系, 但是接触载荷对多晶硅磨损的影响比在宏观下大得多。研究表明, 可以采用宏观磨损模型推测微尺度下材料的磨损特性。

减少磨损对提高 MEMS 及微旋转机械器件的可靠性具有重要意义。解决静电微电机磨损的一种方法是使用光滑环状的转子, 用滚动接触代替中心的滑动接触, 使转子与轴之间不存在滑动; 另一种方法是采用支撑结构, 即在转子与基底之间增加环形轴衬或圆形轴衬^[31]。在微电机中, 采用 SAMs 薄膜润滑可以减小启动摩擦和静摩擦, 显著降低磨损^[32]。Deng 等^[33]研究了十八烷基三氯硅烷(OTS)的磨损性能。另外, 采用全氟聚醚(PFPE)润滑剂和自组装单分子层润滑剂, Z-15 和 Z-DOL 等多种 PFPE 润滑剂都可以降低微电机的磨损^[34]。

MEMS 中各构件的摩擦磨损性能主要取决于所用材料的性能, 材料性能对于减小 MEMS 及微旋转机械的磨损、提高可靠性和寿命非常重要。图 4 给出了材料弹性模量和断裂强度之间的关系, 其中, σ_f/E 是衡量材料耐磨性能的指标, 其值越小, 表明材料的耐磨性能越高。从图 4 可以看出, 金刚石、氮化硅(Si_3N_4)和碳化硅(SiC)等材料的 σ_f/E 值相对较小,

表 1 不同处理表面薄膜的磨损实验结果^[1,24]Table 1 Process parameter and thickness of deposited coatings on microstructures and substrates
(surface roughness measured before and after wear)

Coating/ substrate	Process	Deposition temperature/	Thickness/nm	Surface roughness/nm	
				Before wear	After wear
DLC	LPCVD	150~200	700	1.8	1.1
Polysilicon	LPCVD	620	1500	4.9	12.5
n ⁺ polysilicon	P implantation 10 ²¹ ions/cm ³	620	1500	7.9	14.8
Silicon (100)	p wafer	-	-	2.5	3.8
Silicon dioxide	Wet hydrogen	1050	500	3.7	6.3
Silicon nitride	PECVD	270~380	700	2.9	5.9

其耐磨性能较强。试验表明, Si₃N₄ 和类金刚石碳膜(DLC) 等的磨损率较低, 适用于MEMS 材料^[26,35], 因此, 可以通过材料弹性模量和断裂强度之间的关系

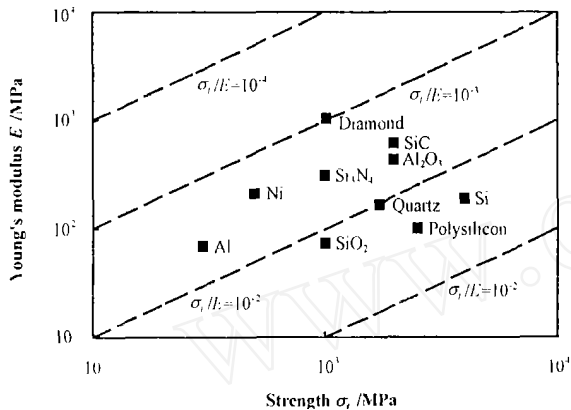


Fig 4 Materials selection chart with Young's modulus plotted against fracture strength

图 4 材料弹性模量和断裂强度之间的关系曲线

来初选合适的MEMS 材料 Williams^[4] 提供并推荐MEMS 材料的磨损率约在 $10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 数量级较为合适。邓昭等^[3]总结了MEMS 表面的改性与润滑, 其中超薄膜润滑被认为MEMS 中最理想的润滑手段, LB 膜和自组装分子膜(SAMs) 能够降低表面能, 减小摩擦系数和增加耐磨性能。张俊彦等^[36]制备了SAMs 薄膜, 发现在微观条件下其具有良好的摩擦磨损性能, 用于MEMS 中可以提高其在各种复杂环境下的稳定性和寿命。另外, 对材料表面改性可以提高耐磨性能, 如采用化学气相沉积W 涂层和脉冲激光沉积涂层等表面改性技术来提高硅材料的耐磨性^[37]。另外, 还可以采用硬涂层和含碳润滑材料来提高其耐磨性^[12,22]。目前, 由于材料滑动表面的磨损较为严重, 一般MEMS 能够保证微系统正常运行几百万次循环^[11]。

因此, 减少MEMS 及微旋转机械的磨损方法

有: 改变磨损区接触表面的几何结构和减少表面接触面积; 减少冲击和摩擦力作用; 采用LB 膜及自组装单分子膜(SAMs) 等超薄膜润滑; 采用材料改性以提高其耐磨性能; 使MEMS 器件在适当的湿度环境下工作; 对磨损的部位进行加固处理, 及时清除磨损碎片以减少磨屑的进一步产生。

4 结束语

由于磨损现象本身固有的复杂性, 且随着新材料、新工艺和新产品的出现, MEMS 中磨损问题的研究将会成为新的挑战。为了使微旋转机械的动力源得到充分利用, 研究高性能、低能耗和长寿命的微旋转机械是今后发展的趋势, 其磨损问题也就是 1 个有待解决的难题。随着微纳米技术的进一步发展, MEMS 及微旋转机械应在以下几个方面进一步研究:

(1) 采用新材料研制新型高转矩、高转速及较高稳定性的微旋转机械, 以实现微旋转机械长距离、长时间和重负载运动;

(2) 针对不同MEMS 及微旋转机械中出现的磨损现象, 分析其主要的影响因素及机理, 建立合适的磨损模型;

(3) 在微观情况下, 采取表面涂层、表面改性和超薄膜润滑等方法提高MEMS 材料的减摩耐磨性能;

(4) 在MEMS 及微旋转机械研制过程中, 充分考虑MEMS 磨损失效机理, 采用新的测试方法和检测系统、有效的润滑剂和润滑方法。

参考文献:

- [1] Beerschwinger U, Mathieson D, Reuben R L, et al. Study of wear on MEMS contact morphologies [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1994, 4(3): 95-105.
- [2] 路新春, 温铸诗, 雒建斌. 微摩擦磨损研究的新进展[J]. 摩擦学报, 1995, 15(2): 177-183.

- Lu X C, Wen S Z, Luo J B. The new advance of micro friction and wear[J]. Tribology, 1995, 15(2): 177-183
- [3] 邓昭, 饶文琦, 任天辉, 等. 微机电系统的微观摩擦学研究进展[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 494-498
- Deng Z, Rao W Q, Ren T H, *et al* Progress of micro-tribology on micro-electro-mechanical systems[J]. Tribology, 2001, 21(6): 494-498
- [4] William J A. Friction and wear of rotating pivot in MEMS and other small scale devices[J]. Wear, 2001, 251: 965-972
- [5] Tai Y C, Muller R S. Frictional study of IC-processed micromotors[J]. Sensors and Actuators, 1990, A 21-23: 180-183
- [6] Deng K, Ramanathan G P, Mehregany M. Micromotor dynamics in lubricating fluids[J]. J Micromech Microeng, 1994, 4: 266-269
- [7] Gabriel K J, Behi F, Mahadeva R. In-situ friction and wear measurements in polysilicon mechanisms[J]. Sensors and Actuators, 1990, A 21-23: 184-188
- [8] Tanner D M, Walraven J A, Irwin L W, *et al* The effect of humidity on the reliability of a surface micromachined microengine[C]. In: 1999 IEEE International Reliability Physics Symposium, March 21-25, San Diego CA, 189-197.
- [9] Tanner D M, Miller W M, Peterson K A, *et al* Frequency dependence of the lifetime of a surface micromachined microengine driving a load[J]. Microelectronics Reliability, 1999, 39: 401-414
- [10] Henck S A. Lubrication of digital micromirror devices[J]. Tribol Lett, 1997, 3: 239-247
- [11] Merlijn van Spengen W. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43: 1 049-1 060
- [12] Rymuza Z, Misiaik M, Kuhn L, *et al* Control tribological and mechanical properties of MEMS surfaces Part 2: nanomechanical behavior of self-lubricating ultrathin films[J]. Microsys Technol, 1999, 5: 181-188
- [13] Meng H C, Ludema K C. Wear models and predictive equations: their form and content[J]. Wear, 1995, 181-183: 443-457.
- [14] Qiu X, Plesha M E. Theory of dry wear based on energy[J]. Journal of Tribology, 1991, 113(3): 442-453
- [15] Zhou G Y, Lew M C, Blackmore D. Fractal geometry model for wear prediction[J]. Wear, 1993, 170: 1-14
- [16] Halling J. Toward a mechanical wear equation[J]. Journal of Tribology, 1983, 105: 212-220
- [17] 胡元中, 王慧, 郭炎. 超薄油膜润滑的分子动力学模拟 I 刚性分子模型[J]. 摩擦学学报, 1995, 15(2): 138-144
- Hu Y Z, Wang H, Guo Y. Molecular dynamics simulation of ultra thin film lubrication I Rigid molecule model[J]. Tribology, 1995, 15(2): 138-144
- [18] Komvopoulos K. Surface engineering and microtribology for microelectromechanical systems[J]. Wear, 1996, 200: 305-327.
- [19] Walraven J A, Headley T J, Campbell A N, *et al* Failure analysis of worn surface micromachined microengines[J]. Part of the SPIE Conference on MEMS Reliability for Critical and Space Applications, Santa Clara, California, 1999, 3880: 30-39
- [20] Bhushan B. Handbook of micro/nanotribology[M]. 1999, 2nd ed, CRC, Boca Raton, FL.
- [21] Mehregany M, Senturia S D, Lang J H. Measurements of wear in polysilicon micromotors[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 1992, 39(5): 1 136-1 143
- [22] Rymuza Z. Control tribological and mechanical properties of MEMS surface Part 1: critical review[J]. Microsystem Technologies, 1999, 5: 173-180
- [23] Wang W Y, Wang Y L, Bao H F, *et al* Friction and wear properties in MEMS[J]. Sensors and Actuators, 2002, A 97-98: 486-491.
- [24] Beerschwinger U, Albrecht T, Mathieson D, *et al* Wear at microscopic scales and light loads for MEMS applications[J]. Wear, 1995, 181-183: 426-435
- [25] Gardos M N. Tribological behavior of polycrystalline and single-crystal silicon[J]. Tribol Lett, 1996, 2: 355-373
- [26] Madou M. Fundamentals of microfabrication[M]. Boca Raton, CRC Press, 1997.
- [27] Deng K, Mehregany M, Dewa A S. A simple fabrication process for polysilicon side-drive micromotors[J]. J Microelectromechanical Systems, 1994, 3(4): 126-133
- [28] Mehregany M, Senturia S D, Lang J H, *et al* Micromotor fabrication[C]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1992, 39(9): 2 060-2 070
- [29] Bhushan B. Tribology on the macroscale to nano scale of microelectromechanical system materials: A review[J]. Journal of Engineering Tribology, 2001, 215(1): 1-18
- [30] Gupta B K, Chevallier J, Bhushan B. Tribology of ion bombarded silicon for micromechanical applications[J]. J Tribol, 1993, 112: 392-399
- [31] Corda J. Cylindrical linear stepper motor[C]. IEE colloquium on stepper motors and their control, 1994 8/1-8/4
- [32] Roya M. Self-assembled monolayers as anti-stiction coatings for MEMS: characteristics and recent developments[J]. Sensors and Actuators A, 2000, 82: 219-223
- [33] Deng K, Collins R J, Mehregany M, *et al* Performance impact of monolayer coating of polysilicon micromotors[C]. MEMS'95, IEEE, 1995 368-373
- [34] Zhao Z, Bhushan B. Effect of bonded-lubricant films on the tribological performance of magnetic thin-film rigid disks[J]. Wear, 1996, 202: 50-59
- [35] Bart S F, Mehregany M, Tavrow L S, *et al* Electric micromotor dynamics[J]. IEEE Transactions on electron devices, 1992, 39(3): 566-575
- [36] 张俊彦, 杨生荣, 薛群基. 硅烷自组装膜及硅烷/二氧化钛复合膜的XPS表征与摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(4): 241-243
- Zhang J Y, Yang S R, Xue Q J. XPS characterization and

tribological behaviors of organicsilicone self-assembled film and organicsilicone/ TiO_2 composite film [J]. Tribology, 2000, 20(4): 241-243

polysilicon and SiC films for MEMS applications[J]. Wear, 1998, 217(2): 251-261.

[37] Sundararajan S, Bhushan B. Micro/nanotribological studies of

Progress of Wear Properties on Micro-Electro-Mechanical Systems

ZHANG Wen-ming, MENG Guang

(State Key Laboratory of Vibration, Shock and Noise, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Current state and progress of studies of wear on micro-electromechanical systems (MEMS), particular in micro rotating machines, are summarized in detail. Various wear behavior of MEMS and micro rotating machines are introduced and effects of material properties, roughness, environments, loadings and working conditions on wear are briefed. Many kinds of wear models, analysis methods, testing method and experiment instruments are discussed. Furthermore, prospect is also provided concerning further work in MEMS and micro rotating machines.

Key words: MEMS; wear behavior; surface modification

Author: MENG Guang, male, born in 1961, Ph.D., Professor, e-mail: gmeng@sjtu.edu.cn