

涂覆聚甲基丙烯酸甲酯的磁性膜外磁场作用下的往复滑动摩擦行为研究

李绿洲 蒋继乐 卫荣汉 李俊鹏 田煜 丁建宁

Tribological behavior of reciprocating motion between ferromagnetic films coated with polymethylmethacrylate films under magnetic field

Li Lü-Zhou Jiang Ji-Le Wei Rong-Han Li Jun-Peng Tian Yu Ding Jian-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 018103 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.018103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单晶硅纳米切削中 C--C 键断裂对金刚石刀具磨损的影响

Effect of C--C bond breakage on diamond tool wear in nanometric cutting of silicon

物理学报.2015, 64(19): 198104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198104>

计入固液界面作用的润滑热力学模型与分析

Thermodynamic analysis of lubrication considering solid-liquid interface interaction

物理学报.2015, 64(16): 168101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168101>

磁头/磁盘间润滑剂转移机理及影响因素

Lubricant transfer mechanism and process between slider and disk

物理学报.2014, 63(12): 128104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.128104>

二维 Frenkel-Kontorova 模型中六角对称结构的摩擦现象

Friction phenomena in two-dimensional Frenkel-Kontorova model with hexagonal symmetry lattice

物理学报.2013, 62(6): 068104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.068104>

纳米级润滑膜分子排列取向的拉曼光谱表征技术

Molecular alignment of nano-thin film using Raman spectroscopy

物理学报.2011, 60(9): 098109 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.098109>

涂覆聚甲基丙烯酸甲酯的磁性膜外磁场作用下的 往复滑动摩擦行为研究*

李绿洲¹⁾²⁾ 蒋继乐¹⁾³⁾ 卫荣汉⁴⁾ 李俊鹏⁴⁾ 田煜^{1)†} 丁建宁^{2)‡}

1)(清华大学, 摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

2)(江苏大学, 微纳米科学技术研究中心, 镇江 212013)

3)(中国计量科学研究院, 力学与声学计量科学研究所, 北京 100029)

4)(新竹清华, 纳米与生医系统实验室, 台湾)

(2015年5月24日收到; 2015年9月22日收到修改稿)

磁性材料被广泛应用于磁记录和磁润滑等领域, 聚甲基丙烯酸甲酯因其良好的介电性, 能够用作磁性材料的表面涂层. 本文对外磁场作用下, 外加载荷和磁场强度对往复滑动的聚甲基丙烯酸甲酯/磁性薄膜双膜系摩擦性能的影响开展了研究. 实验结果表明: 聚甲基丙烯酸甲酯/磁性双膜体系的摩擦性能随载荷和磁场强度改变而变化; 但在干摩擦和硅油润滑两种模式下, 磁场对其摩擦学性能的影响规律不同. 理论分析了磁场作用下磁场诱发的磁力与摩擦副物理性质变化对摩擦力和摩擦系数的影响, 与实验结果符合良好. 研究结果为磁性薄膜的界面介质设计与控制提供了依据.

关键词: 磁性膜/聚甲基丙烯酸甲酯双膜系, 磁场, 干摩擦, 硅油润滑

PACS: 81.40.Pq, 83.60.Np

DOI: 10.7498/aps.65.018103

1 引言

降低摩擦磨损一直是提高设备使用寿命和装备可靠性的重要途径. 磁性控制作为一种新颖、高效且可实现的摩擦控制手段, 从提出到如今的短短半个世纪里, 以此为基础衍生的磁性润滑^[1]和磁流体润滑^[2]等迅速成为摩擦学领域的热门研究方向. 磁性材料的物理性质会随磁场场强变化做出响应, 从而影响其摩擦性能. 前苏联在20世纪40年代首次通过磁化的实验方法成功提高了冶金金属的切割质量, 引领起全球对磁场作用下磁性材料的摩擦性能研究的关注^[3]. 铁磁材料磨损率和摩擦系数会受外加磁场作用发生改变^[4–6], 并且这种变化又易受载荷与摩擦副相对运动速度的影响^[7,8]. 有研

究详细解析了铁磁材料受磁场作用下的摩擦力组成^[9], 从力学角度解释了磁场作用下铁磁材料的摩擦行为. 在摩擦过程中, 铁磁材料表面易氧化, 表面形成硬度较高的 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 的混合氧化膜, 被认为是铁磁材料在磁场环境下摩擦系数改变的主要原因^[10].

为避免磁性材料被氧化, 聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)因其良好的介电性常被用于与磁性材料共同构成复合磁性材料, 实现信息记录、传感和探测等^[11,12]. 虽然PMMA等有机材料作为一种广泛应用的优良涂层, 由其构成的复合系统的摩擦性能的研究已有不少报道^[13–16], 但有机涂层/磁性材料系统在磁场下的摩擦性能却尚未有具体研究, 而PMMA/磁性薄膜双膜系就是一种典型且易实现的研究对象. 采用干摩擦和硅油膜润滑两种实验方

* 国家自然科学基金(批准号: 51175281)和两岸清华合作自主研究课题(批准号: 20111081205)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tianyu@mail.tsinghua.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: dingjianning@tsinghua.org.cn

式, 调控载荷和磁场, 研究其对 PMMA/磁性薄膜双膜系摩擦性能的影响. 分析了磁场对摩擦行为的影响, 揭示了磁场作用下 PMMA/磁性薄膜体系的摩擦机理. 研究作为磁性薄膜设计、工作状态的磁场控制和解决磁性薄膜界面问题提供了依据.

2 实验

图 1(a) 为连续平面磁膜/PMMA 摩擦副的样品示意图, 样品面积 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$. 磁膜厚度为 300 nm , 选用的磁性材料包括 Fe, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, Co 及 $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ 四种. 为防止磁膜氧化及磨损, 在磁膜上涂覆了 $150\text{--}200\text{ nm}$ 厚的 PMMA 膜保护层, 表面粗糙度均在 $0.3\text{--}0.4\text{ nm}$ 之内. 图 1(b) 为平面磁膜样品照片, 先采用电子束蒸镀方法将磁性材料镀在玻璃基板上, 再将 PMMA 旋涂至磁膜表面. 图 1(c) 为摩擦测试实验示意图, 摩擦副是以两片完全相同并覆盖有 PMMA 的磁膜面对面接触所组成. 进行摩擦及润滑测试时, 上板固定, 下板可做水平方向的往复匀速运动. 以一法向负载 ($6\text{--}12\text{ N}$) 将两片磁膜压紧贴合, 同时施加一垂直于磁膜平面大小为 $0\text{--}210\text{ mT}$ 的均匀磁场 H 使磁膜磁化, 并在玻璃基板上连接应力传感器至多功能微摩擦磨损试验机 (UMT-2), 测量使磁膜以给定的剪切率相互往复运动时所需克服之力判定两磁膜间的侧向力, 研究磁膜磁化前后摩擦行为的差异.

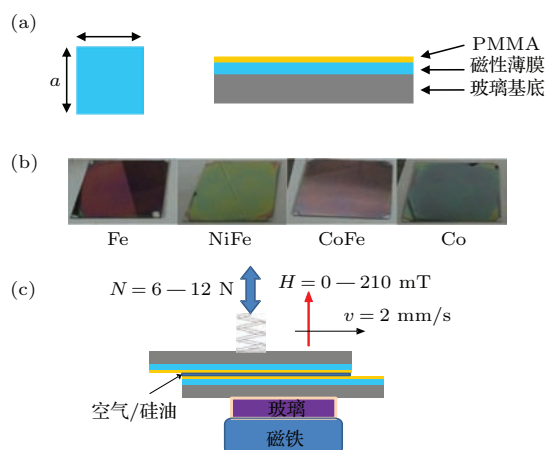


图 1 (网刊彩色) (a) 磁膜 / PMMA 摩擦副的样品示意图; (b) 玻璃衬底上沉积磁膜/PMMA 的光学照片; (c) 外磁场作用下极板对模型运动示意图

Fig. 1. (color online) (a) Sample diagram of the magnetic/PMMA double membrane; (b) optical photograph of the magnetic/PMMA double membrane based on glass; (c) the model of plate-plate motion under external magnetic field.

3 结果与讨论

3.1 干摩擦下磁场对磁性膜/PMMA 双层膜系往复滑动摩擦行为的影响

在摩擦测试之前, 先对摩擦样品进行硬度测试, 以便在无磁场影响时能先对不同材料磁膜间的摩擦进行解释. 图 2 为磁膜样品的维氏硬度测试结果, 其中柱状图的值为多次测试的平均值, 小短线为标准偏差. 以材料而言, 本实验所使用的四种材料的硬度由大到小依次为 Fe, CoFe, Co, NiFe, 但由于每一种样品都覆盖有一层 PMMA, 其样品表面的硬度特性会有所不同, 且 PMMA 的厚度误差也会影响样品的表面硬度. 由图 2 所示结果可知, 样品表面硬度由大到小依次为 PMMA/Co, PMMA/CoFe, PMMA/NiFe, PMMA/Fe.

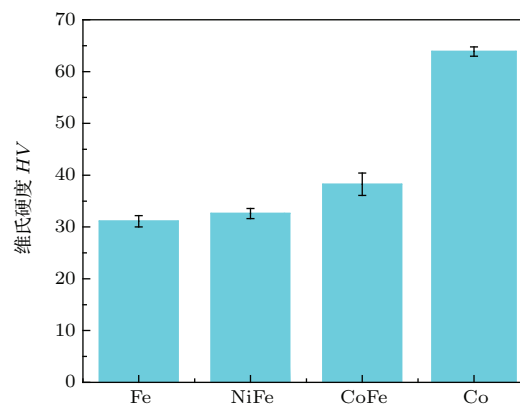


图 2 (网刊彩色) 样品表面维氏硬度测试结果

Fig. 2. (color online) Test results of Vickers hardness of the sample surface.

首先考察不同磁性膜覆盖 PMMA 的摩擦行为. 下面分别对 PMMA/Fe, PMMA/NiFe, PMMA/CoFe, PMMA/Co 四个双层膜样品进行摩擦实验, 施加的法向负载是 6 N , 摩擦副下板的往复运动速度分别为 2 mm/s , 施加的均匀磁场为 400 mT . 磁场的施加方式可由图 3 说明, 图 3(a) 表示在无磁场的环境下, 磁场内部的磁偶极子为散乱排列, 虽然因磁薄膜的平面内形状各向异性, 大多数偶极子会转为水平方向排列 (除了位于边界处的磁偶极子), 但其排列并不整齐, 且由俯视图来看磁偶极子^[17]方向各不同, 相互抵消, 磁偶极子总矢量合为零. 若是直接施加垂直于薄膜平面的磁场, 其造成磁偶极子的排列效果并不理想. 因此在进行摩擦测试之前, 先施加一个大小为 400 mT 沿薄膜平面方向的磁场, 使磁偶极子均往同一方向排列 (见

图3(b)). 然后再施加一个大小同为400 mT垂直于薄膜平面的磁场, 这时磁偶极子容易统一转成垂直于薄膜平面的方向(见图3(c)), 进而达到均匀磁化的效果.

图4为干摩擦测试的结果. 由图4可以看出, 在无外加磁场时, 4个样品摩擦副的摩擦系数由大到小依次为PMMA/CoFe, PMMA/Co, PMMA/NiFe, PMMA/Fe, 此趋势与样品表面硬度大小趋势相同(见图2). 由于磁性薄膜磁化后, 双层膜在滑动过程中存在垂直于薄膜平面方向和薄膜平面内沿着摩擦副相对运动方向的磁性力. 为

此, 可定义磁场作用下所施加的载荷为名义载荷, 所测量到的侧向力为名义摩擦力, 名义摩擦力与名义载荷的比值称为名义摩擦系数. 当施加一磁场强度 $H = 400$ mT 的垂直磁场时, 发现4个样品的名义摩擦系数都明显增加. 并且磁场对摩擦系数的增加会因磁膜材料的不同而有所不同, 其摩擦系数的增加量分别是0.09, 0.05, 0.03和0.01, 即摩擦系数增量由大到小依次为PMMA/Fe, PMMA/NiFe, PMMA/CoFe, PMMA/Co. 可以认为造成此结果的原因应与材料的磁化程度有关.

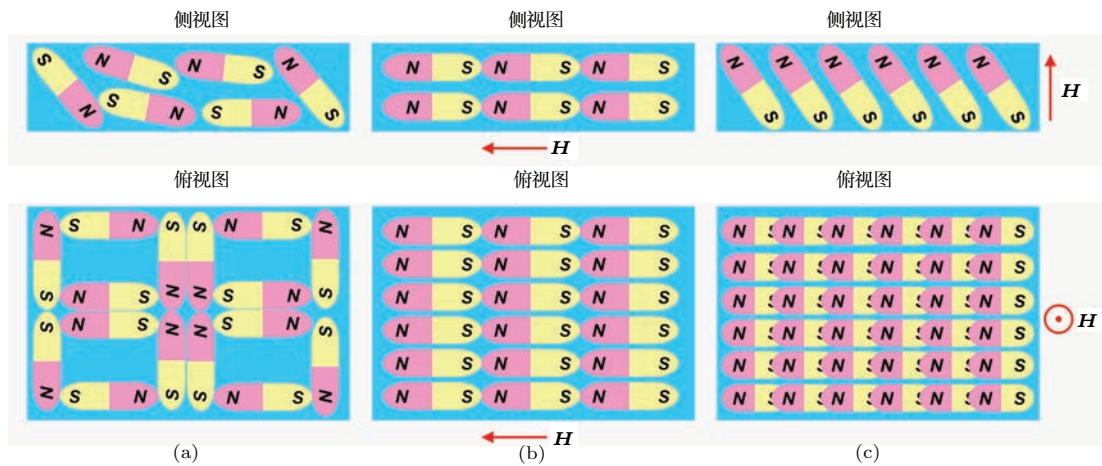


图3 (网刊彩色) 磁膜内磁偶极子排列示意图 (a) 无磁场; (b) 施加水平方向磁场; (c) 施加水平方向磁场后再施加垂直于薄膜平面方向的磁场

Fig. 3. (color online) The pareto diagram of magnetic dipole in magnetic film: (a) Without magnetic field; (b) with magnetic field which is horizontal; (c) with magnetic field which is horizontal first and then to be vertical.

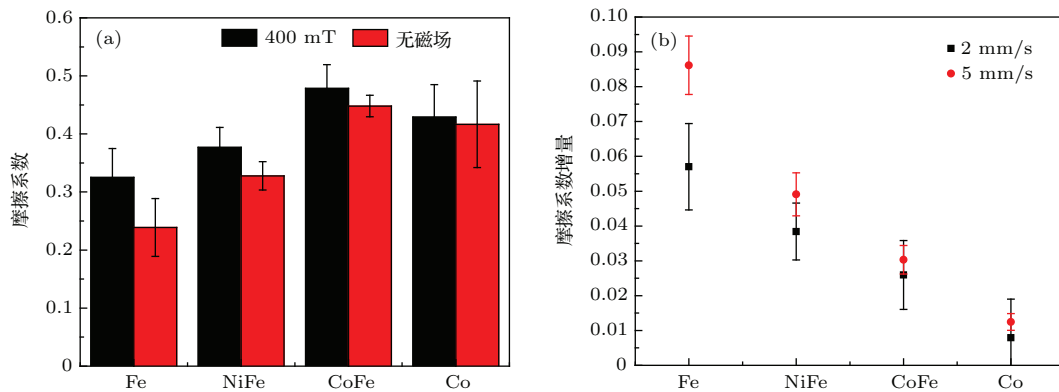


图4 (网刊彩色) 干摩擦情况下 (a) 摩擦系数和 (b) 施加磁场后摩擦系数的增量

Fig. 4. (color online) Under the condition of dry friction, (a) coefficient of friction (COF) and (b) increment of COF between with and without magnetic field.

进行磁膜间吸引力的测试, 测试方法如图5(a)所示, 施加大小为400 mT垂直磁场将磁膜摩擦副磁化之后, 固定下极板, 并对上极板施以一向上的

正向力, 使上极板以1 mm/s速率匀速与下板分离, 测定使磁膜分离所需的正向力大小, 以确定磁膜间吸引力与材料的关系. 由图5(b)测试结果可知,

磁吸力由大到小依次为PMMA/Fe, PMMA/NiFe, PMMA/CoFe, PMMA/Co. 此关系与不同磁膜材料磁化后所造成的摩擦系数(见图4(b))的改变趋势一致. 但值得注意的是, 摩擦测试中所施加的名义载荷是6 N, 比测量到的磁膜之间的磁吸力大了3个数量级. 从而可以得出结论, 磁吸力对实际载荷的直接贡献很小, 也就是说摩擦力的增加并不是直接来源于实际载荷的增加. 考虑在薄膜平面内, 摩擦副相对运动会引起水平磁吸力. 但由于薄膜受磁场水平方向磁化的影响很小, 在极板相对静止且分离时, 以测量垂直磁吸力的方法未能检测出过小的水平磁力, 因此水平磁力可忽略不计. 摩擦力测试结果显示, 摩擦力在N量级. 从图6(b)可看到, 施加磁场后, 对应6, 8, 10和12 N载荷, 摩擦副之间的摩擦系数分别增加了25.9%, 11.6%, 6.1%和0.8%. 为此可以判断水平面内摩擦副之间的磁吸力也不可能造成摩擦系数有如此大的变化.

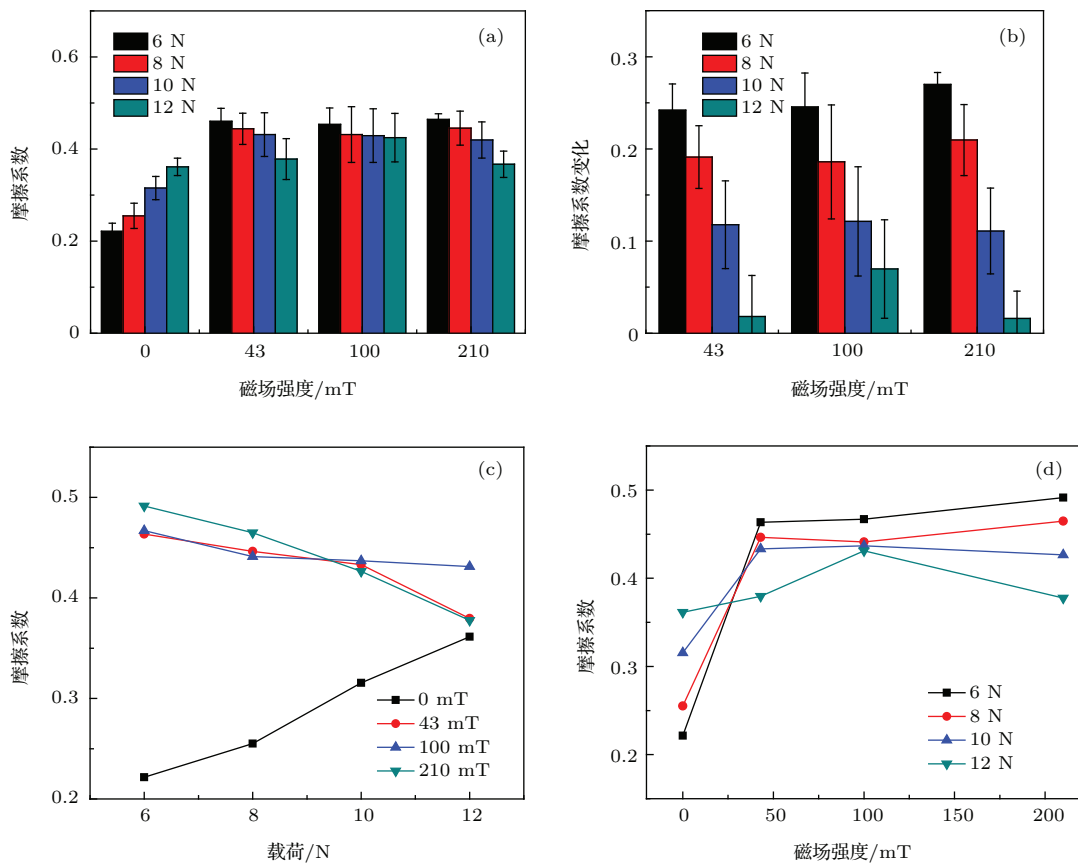


图6 (网刊彩色) 不同名义载荷、不同磁场下Fe膜/PMMA双层膜系往复滑动 (a) 平均名义摩擦系数; (b) 施加磁场后名义摩擦系数较无磁时的增量; (c) 名义摩擦系数随载荷的变化; (d) 名义摩擦系数随磁场的变化

Fig. 6. (color online) Reciprocating sliding motion of magnetic/PMMA double membrane with different normal force or different values of external magnetic field: (a) Nominal coverage COF; (b) the increment of nominal COF between with and without magnetic field; (c) nominal COF varies with the change of normal load; (d) nominal COF varies with the change of magnetic field.

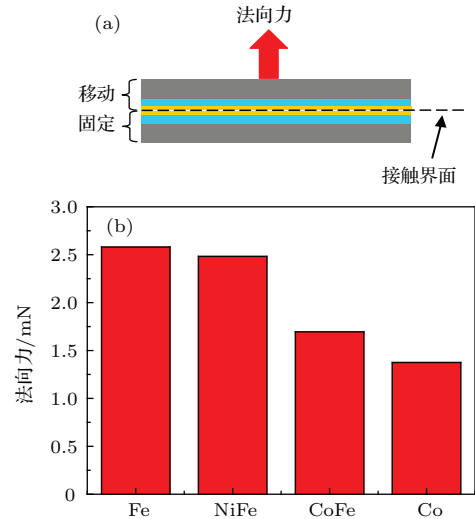


图5 (网刊彩色) (a) 磁膜间吸引力测试示意图; (b) 使磁膜以1 mm/s匀速分离时所需施加的正向力

Fig. 5. (color online) (a) Diagram of attraction between two magnetic films; (b) the value of exert positive force to separate one magnetic film from the other as a speed of 1 mm/s.

为了进一步探究磁场如何影响双层膜系的摩擦行为, 选择PMMA/Fe膜系, 改变载荷(6, 8, 10, 12 N)和磁场强度(43, 100, 210, 400 mT)考察其摩擦行为. 图6是不同名义载荷、不同磁场下PMMA/Fe双层膜系的往复滑动行为. 可以看出, 无外加磁场作用下, 摩擦系数随着载荷的增加而增加. 施加了磁场后, 摩擦系数发生了明显的变化: 一是摩擦系数随着名义载荷的增加而下降, 趋势与无磁场时相反; 二是磁场的施加, 提高了摩擦系数, 但其摩擦系数随磁场的变化并不是线性增加的. 当外加磁场从0增大到43 mT时, 对应6, 8, 10和12 N的载荷, 摩擦系数的增幅分别是0.24, 0.19, 0.12和0.02. 但随着磁场强度的进一步增大, 摩擦系数并没有明显变化. 这与文献[10]中报道的Fe磁性薄膜在磁场作用下磁化, 随外加磁场增大, 摩擦副系数减小的研究结果不尽相同. 磁场力的测试结果显示, 相对于载荷和侧向力, 磁场对实际载荷的增加和侧向力的贡献相对很小, 但43 mT磁场下, 摩擦力或摩擦系数就有了明显的增加. 在未施加磁场时, 对于PMMA/Fe体系, 随着载荷增加, 摩擦副实际接触面积增加, 从而摩擦系数随之增加. 而施加磁场时, 随着载荷增加, 摩擦副摩擦系数却随之减小, 可以认为施加磁场后, 磁性薄膜受磁吸引力啮合作用连带摩擦副接触表面形貌发生变化, 导致干摩擦状态下体系直接接触, 实际接触面积增大, 但此时载荷增大则会抑制啮合, 即阻碍实际接触面积增大, 从而降低摩擦系数. 为进一步研究磁场作用时载荷对摩擦体系微结构的影响, 对非磁性润滑介质硅油润滑下磁场对磁性膜/PMMA双层膜系往复滑动摩擦行为的影响进行实验研究.

3.2 硅油润滑条件下, 磁场对磁性膜/PMMA双层膜系往复滑动摩擦行为的影响

使用的液体为黏度100 cSt的硅油, 每次测试所加入的硅油为5 μ L, 其液膜之名义厚度为2 μ m. 测试时施加的法向负载为6 N, 摩擦副下板的往复速度为2 mm/s, 频率为1 Hz, 施加的均匀磁场为400 mT. 图7显示在有硅油润滑下, 磁性薄膜之间的摩擦系数在一定的磁场作用下同样随外加载荷增大而下降, 可以用流体润滑的雷诺方程有效解释. 但随着外加磁场的增强, 与干摩擦不同, 摩擦系数没有出现饱和现象, 而是持续增大. 可以认为

在以硅油为介质的润滑条件下, 载荷增大致使剪切力和摩擦力增大, 磁膜间啮合不易被载荷影响, 所以摩擦系数随磁场增大而持续增长. 硅油润滑下摩擦系数亦会随相对速度的增加而增加, 与图4(b)所示干摩擦的变化趋势一致, 此外, 硅油润滑下摩擦系数的变化则与负载大小成反比(图7(a)), 由这两个结果可以推测此时的润滑模式为弹性流体润滑, 这可以解释为何磁膜间产生吸引力时会造成摩擦系数降低.

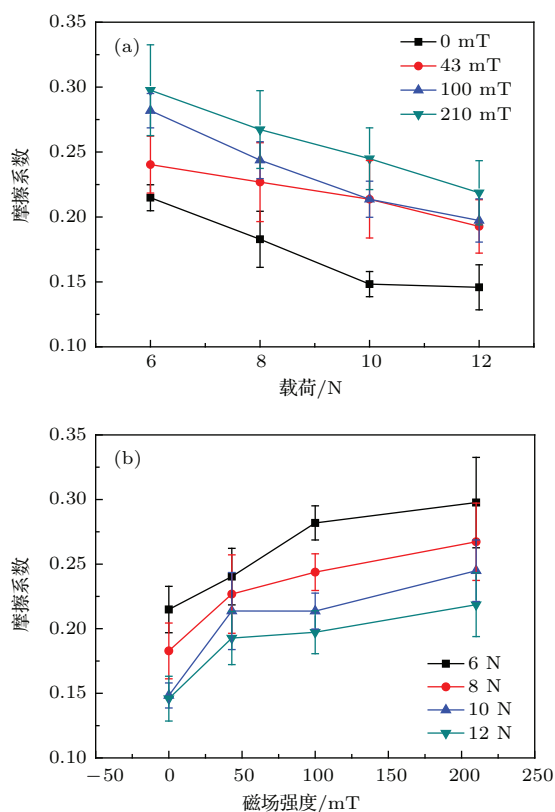


图7 (网刊彩色) 硅油润滑下摩擦系数随(a)载荷和(b)磁场强度的变化

Fig. 7. (color online) COF varies with the change of (a) normal force or (b) magnetic field when the films are lubricated by silicon oil.

虽然弹性流体润滑能够解释一定的实验结果, 但我们也发现干摩擦时施加磁场后摩擦系数与磁场强度无关, 而非磁性润滑的结果则是摩擦系数随磁场强度增大而增大. 实验结果已知纵向磁性力要远小于法向载荷, 显示此时影响摩擦系数的原因不再单纯只是磁膜间的吸引力, 或许磁膜磁化时的磁致伸缩效应或是其他因素也同时影响了摩擦系数, 确切的原因还有待更多的实验来辅助澄清.

磁场作用下的摩擦机理主要有氧化摩擦机理、三体磨损机理和位错运动机理等. 许多研究表明

磁场可以促进氧化,而本工作已通过PMMA涂层防止磁性材料氧化,所以氧化摩擦机理并不能很好地解释本系统的摩擦机理.三体磨损机理认为在磁场的吸引作用下,铁磁性磨屑聚集在材料接触表面,经过反复研磨,磨屑表面变得圆滑、细腻.摩擦面吸附了大量细而光滑的氧化物磨屑,起到了隔离作用,阻止了与对磨面的直接接触,从而减少黏着、微切削作用,并缓冲局部应力.我们认为磁性膜/PMMA双层膜系在摩擦过程中磁性膜层并没有明显的磨损,未产生大量的磨屑,因此并不支持磨屑起到类固体润滑剂作用的猜想.

磁场作用下,金属材料在摩擦磨损过程中,其表面或亚表面的许多微观行为如电子、位错、应力、空位运动、原子扩散、表面能和金相结构均会发生一定的变化.研究表明,外加磁场不仅可以改善铁磁性材料的摩擦学性能,对顺磁性和抗磁性材料也发生影响^[18].Muju等^[19,20]测得磁场造成金属内应力明显下降而塑性增加,并根据内应力在塑性变形中的作用,认为磁场中材料内应力的变化可使位错速度增加而迅速聚集在一起,材料类似于经受某种冷加工而变形硬化,使材料的耐磨性提高.Mansori等^[21,22]及Zaidi和Senouci^[23]在非铁磁性材料与铁磁性材料的研究中发现,随着磁场强度的增加,磨损量都增加,磁场使位错在表面堆积,导致材料脆性增加,容易失效形成较多的碎屑,细而圆滑的磨屑可起类固体润滑剂的作用,从而减少磨损量.我们认为磁场作用造成了磁性膜/PMMA双层膜系内应力下降,而塑性增加使位错速度增加而迅速聚集在一起,令其形成了表面硬化的效果,耐磨性提高,摩擦过程中磨屑量减少,类固体润滑作用下降,以致于摩擦系数上升.然而磁性膜/PMMA双层膜系的接触面内部微观结构在磁场作用下的变化仍需要相应实验进一步探究,确切的原因还有待于进一步的考证.

4 结 论

本文首先对不同PMMA/磁性膜双层膜系进行研究.干摩擦情况下,发现无磁场时,不同材料的摩擦系数由大到小依次为PMMA/Co, PMMA/CoFe, PMMA/NiFe, PMMA/Fe,与样品的表面硬度变化趋势一致;但磁场作用下,不同材料摩擦系数之间的关系发生了变化,由大到小

依次为PMMA/Fe, PMMA/NiFe, PMMA/CoFe, PMMA/Co,与摩擦副间的垂直磁吸力的大小关系一致,说明磁膜的磁化程度直接影响了摩擦系数的变化.但垂直磁吸力与所施加的载荷相差3个数量级,从而磁场对实际载荷的直接贡献很小.为此,针对PMMA/Fe,通过改变施加载荷和磁场强度,进一步研究磁场对摩擦行为的影响.无外加磁场时,摩擦系数随载荷增加而增加,但施加一外加磁场后,摩擦系数随外加载荷的增加而下降.另一方面,在一定载荷下,磁场的施加提高了摩擦系数,但随着磁场强度的进一步增大,摩擦系数并没有明显变化.与干摩擦不同,硅油润滑下的摩擦系数均随载荷的增加而下降,且一定载荷下,摩擦系数随磁场的增加单调增加.PMMA/磁性膜双层膜体系在外加磁场下的摩擦行为的变化,是由磁场引起的,但影响摩擦系数的不仅仅是摩擦副间的磁吸力,而可能是磁膜磁化时的磁致伸缩效应、由内应力引起的体系变形硬化或其他物理效应.该机理还有待进一步研究.

参考文献

- [1] El Mansori M, Paulmier D, Ginzler J, Horvath M 1999 *Wear* **225–229** 1011
- [2] Wang L J, Guo C W, Ryuichiro Y, Yue W 2009 *Tribol. Int.* **42** 792
- [3] Muju M K, Ghosh A 1980 *Wear* **58** 137
- [4] Yetim A F, Kovaci H, Aslan M, Celick A 2013 *Wear* **301** 636
- [5] Han H, Gao Y, Zhang Y, Du S M, Liu H 2015 *Wear* **328–329** 422
- [6] Zaidi H, Pan L, Paulmier D, Robert F 1995 *Wear* **181–183** 799
- [7] Bhushan B, Ge S 2003 *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **34** 938
- [8] Zaïdi H, Amirat M, Frêne J, Mathia T, Paulmier D 2007 *Wear* **263** 1518
- [9] Jiang J, Tian Y, Meng Y 2011 *Wear* **271** 2991
- [10] Wei Y, Zhang Y, Chen Y, Du S M 2013 *Tribol. Int.* **57** 162
- [11] Lee S W, Lee J W, Jeong S H, Park I W, Kim Y M, Jin J I 2004 *Synthetic Metals* **142** 243
- [12] Li H Q, Yu J S, Huang W, Shi W, Huang J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 038505
- [13] Geringer J, Atmani F, Forest B 2009 *Wear* **267** 763
- [14] Junior W S, Emmmler T, Abetz C, Handge U A, dos Santos J F, Amancio-Filho S T, Abetz V 2014 *Polymer* **55** 5146
- [15] Nuño N, Groppetti R, Senin N 2006 *Clin. Biomech.* **21** 956

- [16] Himel C, Arigit S, Nillohit M, Dipa R, Partha P C 2013 *Mater. Lett.* **93** 137
- [17] King G W, van Vleck J H 1939 *Phys. Rev.* **55** 1165
- [18] Paulmier D, Mansori M E 1997 *Wear* **203–204** 148
- [19] Muju M K, Radhakrishna A 1980 *Wear* **58** 49
- [20] Muju M K, Ghosh A 1977 *Wear* **41** 103
- [21] Mansori M E, Schmitt M, Paulmier D 1998 *Surf. Coat. Technol.* **108–109** 479
- [22] Mansori M E, Paulmier D 1999 *Appl. Surf. Sci.* **144–145** 233
- [23] Zaidi H, Senouci A 1999 *Surf. Coat. Technol.* **120–121** 653

Tribological behavior of reciprocating motion between ferromagnetic films coated with polymethylmethacrylate films under magnetic field*

Li Lü-Zhou¹⁾²⁾ Jiang Ji-Le¹⁾³⁾ Wei Rong-Han⁴⁾ Li Jun-Peng⁴⁾
Tian Yu^{1)†} Ding Jian-Ning^{2)‡}

1) (State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Micro/Nano Science and Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

3) (Division of Mechanics and Acoustics, National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

4) (NanoEngineering and BioMedical Systems Lab, “National” Tsinghua University, Taiwan, China)

(Received 24 May 2015; revised manuscript received 22 September 2015)

Abstract

Magnetic thin films are widely used in magnetic recording and magnetorheology, and also in magnetic lubrication such as ferromagnetic fluids. Polymethylmethacrylate (PMMA) is used as a coating material on the surface of the magnetic material in an electromagnetic system because of its good dielectric properties. In this study, the tribological behavior of reciprocating motion between ferromagnetic films coated with PMMA films under a magnetic field is evaluated. The system of ferromagnetic films coated with PMMA films based on glass is called ferromagnetic/PMMA double membrane in this paper. Two pieces of membranes in each tribological experiment are absolutely the same. Two kinds of experimental conditions, that is, under dry friction and silicone oil lubrication, are used to investigate the influences of load and magnetic field strength on the friction performance of ferromagnetic/PMMA double membranes. Experimental results show that the magnetic field directly affects the friction performance of a ferromagnetic /PMMA double-film system, and the performance changes with the normal load and intensity of the magnetic field. However, the influence of magnetic field on the tribological property in the dry friction mode is different from that in the silicone oil lubrication mode. The influences of magnetic force and the changes of the physical properties of the friction pair on friction and friction coefficient, which are both induced by the magnetic field, are analyzed. The theoretical analysis results are in good agreement with the experimental date. This work provides a basis for designing and controlling magnetic film interface media.

Keywords: ferromagnetic/polymethylmethacrylate double membrane, magnetic field, dry friction, silicone oil lubrication

PACS: 81.40.Pq, 83.60.Np

DOI: 10.7498/aps.65.018103

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51175281) and the Autonomous Research Topic between Cross-strait Tsinghua University, China (Grant No. 20111081205).

† Corresponding author. E-mail: tianyu@mail.tsinghua.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: dingjianning@tsinghua.org.cn