

【特约稿】

磁性液体润滑技术的进展简述

杨金霖, 黄巍

(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 与传统润滑剂相比, 磁性液体因其具有特殊的可控润滑效应, 一直是国内外学者研究的热点。概述了磁性液体的组成及其所具有的基本特性, 着重从理论和实验两方面回顾了国内外学者在磁性液体润滑技术方面所取得的研究成果及最新进展。在理论方面, 分析了润滑边界条件、磁场强度及磁性颗粒等因素对于磁性液体压力分布和承载能力的影响。在实验方面, 探讨了采用不同手段改变其粘度进而对最终润滑性能的影响, 突出了磁性液体作为一种新型功能化润滑剂在润滑性能和承载能力上的优势。此外, 受永磁铁空间布局的限制, 引入了磁性表面织构配合磁性液体润滑的前沿思想, 重点阐述了磁液润滑下磁性表面织构的工作机理, 通过实验发现了其在高速下具有减摩促润滑性能, 并对其未来广阔的应用前景进行了展望。

关键词: 磁性液体; 润滑剂; 润滑理论; 磁场; 摩擦; 磁性表面织构

中图分类号: TQ586.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0061-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.010

Progress of Magnetic Fluids Lubrication Technology

YANG Jin-lin, HUANG Wei

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Compared with traditional lubricants, magnetic liquid has been a research focus of scholars at home and abroad due to its special controllable lubrication effect. Composition and basic characteristics of magnetic fluid were introduced. Research achievements and recent progress made by scholars at home and abroad regarding magnetic fluid lubrication technology in terms of theory and experiment. In terms of theory, effects of boundary conditions, magnetic field intensity and magnetic particle on pressure distribution and load capacity of magnetic fluid were analyzed. In terms of experiment, effects of changing viscosity in different ways on final lubricating property were discussed. Advantages of magnetic liquid as a new functional lubricant in lubricating property and load capacity were highlighted. In addition, in order to resolve the restriction of permanent magnet space layout, a new perspective of magnetic surface texture in harmony with magnetic fluid lubrication was introduced. Working mechanism of the magnetic surface texture was illustrated emphatically. Experiment showed that the technology could reduce friction and improve lubricating property at high velocity. Besides, promising application prospect of this technology was expected.

KEY WORDS: magnetic fluid; lubricant; lubrication theory; magnetic field; friction; magnet arrayed surface

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-05

Received: 2017-01-20; Revised: 2017-03-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51475241)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(51475241)

作者简介: 杨金霖 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为摩擦学。

Biography: YANG Jin-lin(1990—), Male, Master, Research focus: tribology.

通讯作者: 黄巍 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学及表面技术。

Corresponding author: HUANG Wei(1979—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: tribology and surface technology.

磁性液体 (Magnetic Fluid) 又名磁流体, 是由纳米级的磁性颗粒通过表面活性剂包覆, 均匀分散于基载液中所形成的稳定固-液两相超顺磁性胶状液体^[1]。磁性液体中的磁性颗粒可以看作是带有 $10^4 \mu_B$ (Bohr magneton) 磁力矩, 并在布朗运动作用下保持悬浮的纳米级永磁体粒子^[2]。在外加磁场中, 颗粒的磁矩转向外场方向, 从而引起磁性液体宏观上的磁化现象。常见的磁性颗粒有 Fe_3O_4 ^[3]、 Ni-Fe ^[4]、 Co ^[5] 及 $\varepsilon\text{-Fe}_3\text{N}$ ^[6] 等。基载液对磁性液体的性能也有重要影响, 众多种类的基载液相继被用来研制磁性液体, 如煤油、烃类、水等^[7], 离子液体因其可忽略的蒸汽压和不可燃性等优点, 也正被尝试作为磁性液体的基载液^[8]。表面活性剂通过与磁性颗粒作用, 在其表面形成一层紧密的活性剂分子层, 可以有效防止磁性颗粒在范德华力和磁力作用下发生团聚, 提高其在基载液中的分散稳定性^[9]。目前常用的表面活性剂有油酸类、月桂酸类和肉豆蔻酸类等^[10]。

磁性液体的应用前景取决于自身所具有的特性。磁性液体首先是流体, 它的运动遵循流体动力学的规律。其次它又是磁性物质, 它的行为可以受到磁场的控制, 其磁性能服从电磁学的规律。磁性液体在被磁化的同时, 又能保持一定的流动性, 通过改变外加磁场强度和方位, 就可以将它定向、定位, 这种可控性使得磁性液体应用前景十分广阔。

基于磁性液体的可控性衍生出许多成功的应用, 其中最为著名的是磁性液体动密封。20 世纪 60 年代, 在美国宇航局成功地将作为宇航服活动部分的真空密封材料后, 磁性液体密封技术日渐成熟。此后经过近 30 年的发展, 磁性液体旋转密封装置已在工业中广泛应用, 如 X 射线仪、高真空热处理炉等。而在防尘方面, 最典型的应用就是对计算机硬盘驱动器的密封, 此技术从源头上确保了磁头和盘片的洁净^[11,12]。

润滑是磁性液体的另一个成功应用。从润滑剂的性能需求及润滑理论的角度看, 磁性液体作为润滑剂有如下优势: 1) 施加外磁场可使其聚集并持久保持在所需的润滑部位, 润滑剂用量少且可靠^[13], 可以实现定域润滑, 同时避免了润滑剂的飞溅, 防止对外界造成污染; 2) 利用外加磁场可提高其表观粘度, 进而能够提升油膜的承载能力^[14]; 3) 磁性颗粒的平均直径在 10 nm 左右, 颗粒可起到近似微型滚珠的作用, 从而降低摩擦^[15]; 4) 外磁场作用下的磁性液体, 即使在两平行且相对静止的摩擦副间亦能产生支撑力^[16,17]。

1 磁性液体润滑技术

近年来, 国内外学者在磁性液体润滑技术方面开展了许多卓有成效的工作, 也取得了显著的研究成

果, 本文拟从磁性液体润滑技术的理论及实验两方面予以简要介绍。

1.1 磁性液体润滑的理论研究

在润滑理论方面, 考虑磁性液体的特殊组成, 以非牛顿流体建立的磁性液体润滑膜逐渐被采用^[18], 且也做了相应的修正。Sorge^[19]引入了气穴边界条件, 解决了轴颈轴承在全膜润滑建模时圆周压力分布不连续的问题。Chandra 等^[20]进一步考虑了实际工况中磁化矢量方向和磁场矢量方向不平行的情况, 研究表明轴承承载能力相比于非磁性液体润滑时有大幅提升。张松等^[21]提出了对磁场的修正方法, 在考虑滑动轴承轴向磁彻体力后, 轴承的承载能力得到显著提高。Shah 等^[22-25]引入多孔材料表面参数及磁性颗粒旋转因素, 考虑了润滑区域固-液界面滑移速度 (slip velocity) 等条件, 研究了不同形式的滑动轴承和各种挤压膜的性能。其所获得的计算结果表明上述因素对磁性液体润滑油膜的压力分布、承载能力等均有重要影响。Shah 等^[26,27]还进一步模拟了不同结构多孔材料台阶轴承 (step bearing) 和球、多孔盘配对轴承系统的油膜承载力。与此同时, Osman 等^[28]也探究了轴颈轴承的油膜承载能力, 他们的研究成果表明采用磁性液体作为润滑剂既能提高轴承油膜的承载能力, 又可以减小表面摩擦力。

在磁场因素方面, 相比于无磁场, 施加磁场能提高油膜的承载能力。国内学者池长青等^[29]钻研发现, 对于低屈服应力或单纯拟塑性的磁性液体来说, 当施加 0.12 MA/m 的均匀磁场时, 在低剪切速率下, 磁性液体润滑膜的承载能力相比无磁场时提高了 35%, 在高剪切速率下, 承载能力提高了 25%。Shah 和 Bhat^[30]运用 Neuringer-Rosensweig 模型、Jenkins 模型和 Shliomis 模型来分析对比了磁性液体润滑下长轴颈轴承的性能, 研究表明施加非均匀磁场能比均匀磁场产生更高的油膜承载能力, 并认为此现象是由于非均匀磁场影响磁性液体的磁化引起的。Patel 等^[31]使用 Jenkins 模型, 考虑了磁场强度、滑移速度和表面粗糙度等因素, 研究了基于弯环板挤压膜的性能, 结果表明以上因素对于挤压膜性能影响较大。图 1 中 μ^* 与磁场强度相关, 随着磁场强度的增加, 挤压膜的承载能力得到了提升。Hsu 等^[32,33]分别在短轴颈轴承中心和长轴颈轴承外某处放置能产生磁场的线圈, 发现适当的磁场和表面粗糙度能提高磁性液体润滑下轴颈轴承的油膜承载能力。此外, Tipei^[34]、Shah^[35]和国内胡国祥等^[36]探究均表明增加磁场强度可以提高磁性液体承载能力。Osman 等人^[28]采用修正后的雷诺方程对非牛顿流体磁液进行了模拟计算, 也得到类似的结果。

在流体动压润滑方面, 广泛认可的观点为两平行板间的挤压膜承载能力微乎其微, 且轴承的一个表面

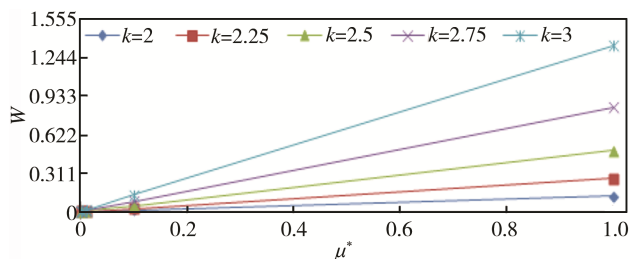


图 1 无量纲承载压力随 μ^* 和 k 的变化^[31]
Fig.1 Variation of carrying capacity with respect to μ^* and k ^[31]

为多孔材料会使承载能力降低。但 Shah 等^[22]采用 Jenkins 模型模拟两平板间油膜承载能力发现磁性液体油膜具有一定的承载能力,且不受表面孔隙率的影响。Prajapati^[37]使用修正的雷诺方程研究了兩平行板间磁性液体挤压膜的性能,发现在无流动情况下,摩擦表面间的磁性液体同样存在承载能力,即具有所谓“静支撑能力”。Patel 等^[31]的研究发现选择合适的曲率参数和表面粗糙度,即使无润滑液流动,磁性液体轴承系统依然能够提供一定负载,此情况在传统润滑剂轴承系统中不可能出现。国内学者池长青^[29, 38]研究均匀磁场中平板滑块和轴颈轴承磁性液体润滑膜的承载能力时发现,相比于普通润滑剂,在低速条件下磁性液体具有更好的承载性能。

磁性液体中,磁性颗粒的存在对于其润滑性能的影响亦是不可忽视的。P. Sinha 等人^[39]在研究磁性液体润滑下的圆柱滚子轴承时,考虑了颗粒旋转,引入了无量纲布朗弛豫时间参数的摄动法,在磁性液体的流动方向加入与之垂直的磁场。分析表明在受压状态下,由于磁性颗粒的存在,空穴点的影响可以忽略不计,随着磁场强度的增加,润滑液承载能力显著上升。且磁性液体受挤压时,此现象更加明显。何世权等^[40]推导出了切向磁场中考虑磁性颗粒旋转因素的雷诺方程,发现磁性颗粒的存在导致磁性液体粘度变化,粘度的变化对磁性液体润滑特性影响显著。Shukla^[41]在切向布置的静磁场中,考虑磁性颗粒的旋转,给出了磁性液体薄膜压力的雷诺方程推广形式,其研究结果同样也指出,磁性颗粒的存在带来了粘度的变化,对润滑影响较大。

综上所述,磁性液体作为一种新型润滑剂,拥有传统润滑液不可比拟的优势。当给予磁性液体外加磁场时,磁性液体的薄膜承载能力得到显著增强,同时随着磁场梯度的变化,油膜的承载能力也将有一定的改变,这使采用磁性液体作为润滑液时,可以实时改变和控制润滑状态。

1.2 磁性液体润滑的实验研究

从理论研究中可知磁性液体在润滑方面性能优

异。与此同时,国内外学者开展大量的实验探索不断验证上述润滑理论。

磁性液体优异的润滑性能已被大家逐渐认可。国内的安琦等人^[42]设计了一款新式磁性液体滑动轴承,其结构如图 2 所示,实验结果表明磁性液体滑动轴承在高速下能形成良好的全油膜润滑,相比于传统滑动轴承具有低摩擦和高承载的特性。同时,全膜润滑意味着其摩擦磨损小、发热量少、使用寿命长。Shojiro Miyake^[43]利用改进的推力轴承进行磁性液体润滑实验,发现在低速状态下边界润滑油膜能减小摩擦系数,并且在有、无磁场施加的磨损试验中,试样的最大磨损质量比相差约 6 倍,在高速状态下的流体动压膜能大幅度减小摩擦力。李洪帅等人^[44]探究表明,液态石蜡基磁性液体比石蜡油具有更加优异的减摩抗磨性能和更高的油膜承载力。黄巍等^[45-46]对以 Fe_3O_4 作为颗粒的磁性液体摩擦学性能进行测试发现,特定颗粒浓度的磁液相比于基液,承载能力高并且抗磨性能好。对磁场作用下磁性液体静支撑力方面的实验表明,磁性液体的承载能力与其饱和磁化强度成正比。在 14 个磁铁、载荷 400 N 和转速 250 r/min 的条件下,相比于基载液,磁性液体能提供低而稳定的摩擦系数(见图 3)。王立军等^[47]利用四球摩擦磨损试验机研究了磁液中的颗粒及外磁场对其润滑能力的影响,具体实验条件为:载荷 392 N、转速 1450 r/min、测试

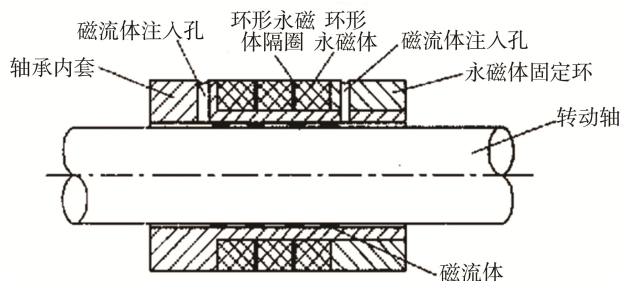


图 2 磁流体滑动轴承结构示意图^[42]
Fig.2 Magnetic fluid sliding bearing mechanism diagram^[42]

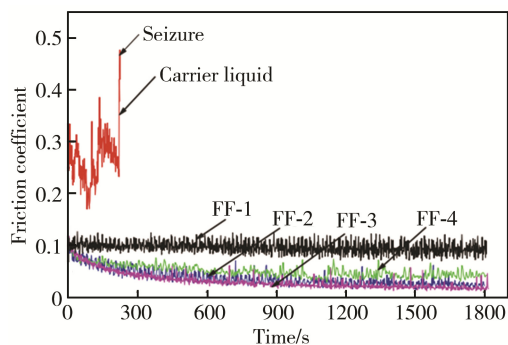


图 3 基载液和不同浓度磁液在相同转速、载荷及磁场中的摩擦系数^[46]

Fig.3 Friction coefficient of magnetic liquid with different concentration and carrier liquid in the same speed, load and magnetic field^[46]

时间 60 min。实验进一步证实了磁性颗粒的加入能提高润滑油的最大承载力,增强磁性液体的减阻和抗磨性能(如图 4 所示),同时发现磁性颗粒对磨损表面有修复的能力。

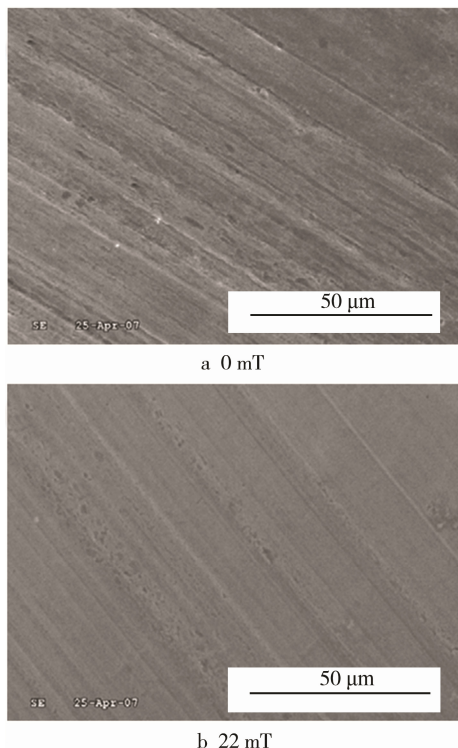


图 4 6%的 $\text{Mn}_{0.78}\text{Zn}_{0.22}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 纳米颗粒磁液润滑时不同磁场强度下钢表面磨损的 SEM 形貌图^[47]

Fig.4 SEM morphologies of the worn steel surfaces lubricated with 6% $\text{Mn}_{0.78}\text{Zn}_{0.22}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparticle under different magnetic induction^[47]

根据润滑理论可知,润滑剂的粘度与其承载能力有着密不可分的关系。润滑油中分布的纳米颗粒能增大油膜粘度和厚度,进而改善油品的润滑性能和承载能力,这使得磁性液体与传统的润滑油有着显著的区别。王立军^[48]对 MS-800 四球机油杯进行改进,使其周围磁场可调,实验发现随着磁感应强度的增加, Fe_3O_4 基磁性液体的综合承载能力呈非线性增加,最大综合承载能力可提高到原来的 1.3 倍。在磁感应强度恒定时,磁性液体的粘度和承载能力随着其中 Fe_3O_4 颗粒含量增加而分别变大和增强,承载能力提高的原因主要是磁性液体粘度的增加。赵猛等^[49]对磁场作用下磁性液体粘度特性进行了探究,发现磁性液体粘度随着磁场施加时间的延长而变大,随着磁场强度的增加而提高。王建梅等^[50]研究表明使用磁性液体作为润滑剂,能提高轧机油膜轴承的油膜粘度和承载能力,并且磁场导致的粘度升高在一定程度上能弥补温度升高引起的粘度下降。E. Uhlmann 等^[13]采用流变仪研究了多种磁性液体的流变性能,发现在低剪切速率下,磁液粘度随磁场强度增加而变大,粘度最大相差约 3 倍;在高剪切速率下,随磁场强度增强,

粘度提高程度减缓,出现“剪切稀化”现象。朱润生等人^[51]通过外加电场来产生磁场,研究了处于边界润滑状态下钢-钢摩擦副在加有添加剂的磁性液体中的摩擦学特性,发现加有添加剂的磁性液体在不同方向的直流电流作用下,其摩擦系数变化幅度最大可达 23%。K. Shahrivar 等^[52]研究了等粘度弹性润滑状态下点接触式磁性液体润滑性能,发现施加磁场能使表面更易分离,降低 Couette 摩擦力,进而减小摩擦系数。

通过对磁性液体施加外磁场,磁性液体的粘度和承载能力增加,能够提供良好的润滑性能,同时由于磁性液体可以被定位以及定向,磁性液体在轴承密封上有着广泛应用。与磁性液体密封原理相同,磁性液体在润滑状态下,也能提供一定的密封性能。沈阳工业大学的孙维明等^[53]设计了往复运动轴磁性液体密封实验装置,在极靴中增加了能储存磁性液体的环形槽,使得装置能通过极靴不断补充磁性液体,并将这一实验装置应用于油井井口密封,发现有效密封时间比原结构提高 50%。周剑锋等^[54]研究了在螺旋槽机械密封条件下磁场强度对磁性液体薄膜润滑性能的影响,实验表明磁性液体的膜厚和膜承载摩擦转矩随着电磁铁回路电流的增加而分别变厚和增大,当施加一个合适的闭合力时,通过调节影响磁场强度和分布的电流强度,能够控制密封环的密封性能。P. Kuzhir^[55]在轴颈轴承中首次引入静负载和磁场共同作用下的磁性液体自由边界条件,联立了雷诺方程和自由边界方程,采用关于轴偏心率的扰动技术,探究发现在低速或高磁场强度条件下,由于磁场的存在,侧面自由边界磁液油膜更加平坦,阻碍了磁性液体的泄露;而在高速或低磁场强度条件下,磁场在整个润滑膜上提供了超真空压力,不仅消除了空穴区域,而且阻止了空气渗透,因此磁性液体作为润滑剂能减少油膜中的气泡和轴向拉伸。赵丕智等^[56]将磁性液体应用于滑动轴承润滑中,对磁性液体润滑的三垫浅腔轴颈轴承进行了研究,发现在轴承两端的磁场作用下,这种轴承没有端泄,因而不需要像普通动压轴承那样不断供油或浸泡在油池之中。磁性液体的润滑和密封性能兼具使得磁性液体在使用中用量减少,同时可以简化轴承结构。此外,磁场作用下的磁性液体能有效抑制润滑剂爬移。柯和继等^[57]在温度场下研究了磁场强度对于磁性液体爬移的影响,实验表明在一定磁场强度下,磁性液体被定位在摩擦区域,磁场抑制了贫油现象出现,得到了稳定的摩擦系数。

2 磁性液体润滑新思路

目前,对磁性液体润滑的研究和应用大部分集中在轴承润滑领域。而在轴承润滑应用中,研究人员都要为产生外加磁场的永磁铁设计特定空间,这在很大

程度上制约了磁液润滑应用的推广。研究如何在微小机械的有限空间内设计加工永磁体以产生高效的磁场,对磁性液体在微细机械领域的润滑应用将具有重要意义。

鉴于表面织构^[58]的研制思路,王晓雷等^[59]提出了基于磁性液体润滑下磁性表面织构的设计方案(如图 5 所示),即在摩擦副表面设计加工微小永磁体单元阵列,使得该表面能够产生周期性梯度磁场。按照上文相关理论分析,磁场的作用使磁性液体聚集成磁性微小液滴,其具有支撑力且该支撑力与摩擦表面滑移速度无关。同时,该磁场力又能够将磁液吸附于摩擦副表面形成持久的润滑,从而有望获得良好的润滑效果。图 6 为加工有微小磁体阵列的试件表面涂覆磁液后的实物照片。由图可见,表面周期性磁场的存在使得磁液聚集成微凸体阵列,该形貌与设计预想是吻合的。

初步的实验结果表明,该类磁性表面的微小磁体直径对其最终润滑特性具有重要影响。特别是在高速条件下,直径为 400、500 μm 的试样摩擦系数较低,体现良好的润滑特性^[61]。同时,其微小磁体的薄膜厚

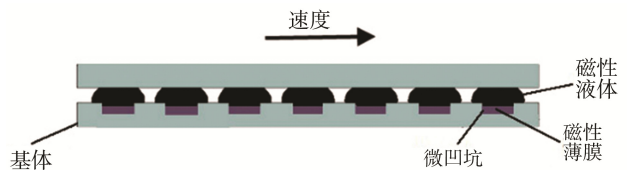
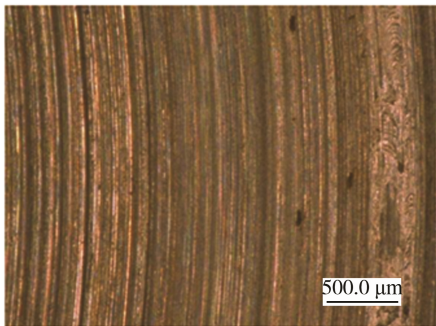
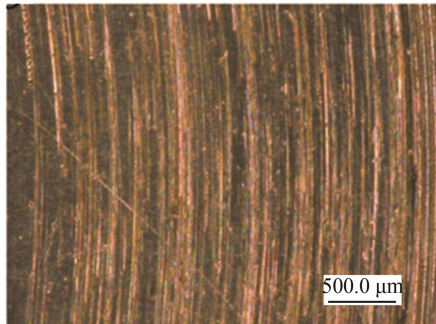


图 5 基于微小磁体阵列的磁性液体润滑想象图^[59]

Fig.5 Design diagram of magnetic fluid lubrication with magnetic surface textures^[59]



a 与普通表面配对的环形滑块表面



b 与磁性表面配对的环形滑块表面^[66]

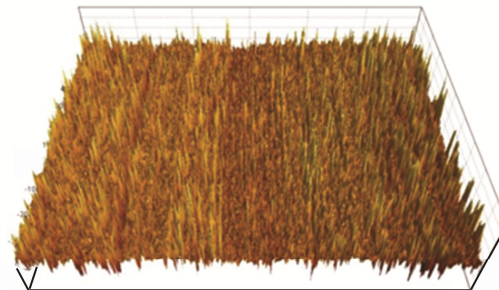
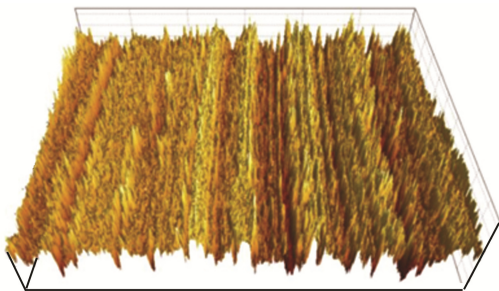


图 7 环形滑块表面的光学显微镜和三维形貌图像

Fig.7 Optical microscope images and 3D profiles of the ring's surfaces: a) opppsite specimen matching with nomal surface, b) opppsite specimen matching with magnetic surface^[66]

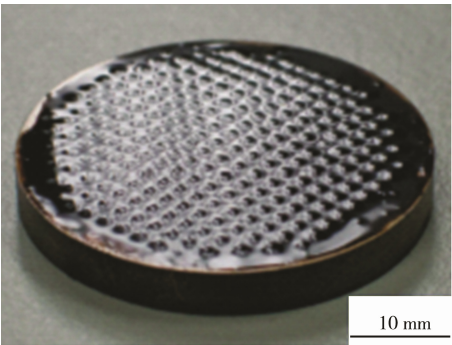


图 6 磁性结构表面涂覆磁液后图片^[60]

Fig.6 Image of the final specimen covered with magnetic fluid^[60]

度对润滑特性也具有重要的影响。在低速运动的时候,相对于无磁表面,该磁性功能表面的摩擦系数均较高,且随着薄膜厚度的增加,摩擦系数逐渐升高。当在高速运动时,由于离心力的作用,无磁试件表面的润滑液被甩离摩擦界面,其摩擦系数随速度增加逐渐升高。由于该磁性功能表面存在微小磁体阵列,磁液润滑剂能够被持久地吸附于摩擦界面,同时由于转动速度的提高使润滑液发生“剪切稀化”,两者共同作用使磁性功能表面在高速运动时展现出优异的减摩特性,且该减摩特性随着微小磁体厚度的增加越发明显。如图 7 所示,在磨损试验中,由于润滑油的损耗和油膜的破裂,与普通表面配对的环形滑块表面有较深的犁沟型磨痕;而与磁性表面配对的环形滑块表面磨痕较为平整光滑^[62-66],原因是磁性表面的微小磁体阵列使润滑剂固定在摩擦区域。

3 总结及展望

基于磁性液体的可控性,其作为润滑剂在润滑和密封装置中的应用研究已有相当的深度和广度,但是磁性液体的潜力还远未发挥出来,其在润滑领域的应用还有待于进一步的拓展。结合当前的研究结果,今后磁性液体润滑工作可重点在以下几方面:1)拓宽磁性液体的种类,研发满足各类工况的低价位磁性液体;2)开展复杂工况中的磁性液体润滑模拟计算;3)面向空间等极端工况,继续深入开展磁性液体润滑技术的基础应用研究。

参考文献:

- [1] 孙克, 黄锡成, 罗河烈. 磁性液体和它的应用[J]. 物理, 1979, 8(3): 260—265.
SUN Ke, HUANG Xi-cheng, LUO He-lie. Magnetic Liquid and Its Application[J]. Physical, 1979, 8(3): 260—265.
- [2] HUKU B, LUECKE M. Magnetic Properties of Colloidal Suspensions of Interacting Magnetic Particles[J]. Cheminform, 2005, 36(27): 1731—1768(38).
- [3] ODENBACH S. Ferrofluids-Magnetically Controlled Suspensions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003, 217(1—3): 171—178.
- [4] LAMBRICK D B, MASON N, HOON S R, et al. Preparation and Properties of Ni-Fe Magnetic Fluids[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1987, 65(2—3): 257—260.
- [5] HAI N H, LEMOINE R, REMBOLDT S, et al. Iron and Cobalt-based Magnetic Fluids Produced by Inert Gas Condensation[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 293(1): 75—79.
- [6] HUANG W, WANG X L. Preparation and Properties of ϵ -Fe₃N-based Magnetic Fluid[J]. Nanoscale Research Letters, 2008, 3(7): 260—264.
- [7] BERKOVSKY B M, MEDVEDEV V F, KRAKOV M S. Magnetic Fluids: Engineering Applications[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [8] HUANG W, WANG X L. Study on the Properties and Stability of Ionic Liquid-based Ferrofluids[J]. Colloid and Polymer Science, 2012, 290(16): 1695—1702.
- [9] ROSENSWEIG R E. Ferrohydrodynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [10] 王小军, 罗新. 三表面活性剂磁流体的制备及性能研究[J]. 江西化工, 2004(3): 128—131.
WANG Xiao-jun, LUO Xin. Preparation and Study of Tri-surfactant Magneto-fluid[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2004(3): 128—131.
- [11] 滕荣厚. 浅谈磁性液体[J]. 粉末冶金工业, 2001(6): 48—49.
TENG Rong-hou. Discussion on Magnetic Liquid[J]. Power Metallurgy Industry, 2001(6): 48—49.
- [12] AHMAD N, SINGH J P. Magnetic Fluid Lubrication of Porous-pivoted Slider Bearings with Slip Velocity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2007, 221(5): 609—613.
- [13] UHLMANN E, SPUR G, BAYAT N, et al. Application of Magnetic Fluids in Tribotechnical Systems[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252(1): 336—340.
- [14] 李健, 汤云峰. 磁性液体应用于滑动摩擦的润滑理论及实验研究[J]. 电工材料, 2004(3): 29—34.
LI Jian, TANG Yun-feng. Lubrication Theoretical and Experimental Study of Magnetic Fluid Applied to Sliding Friction[J]. Electrical Engineering Materials, 2004(3): 29—34.
- [15] XU T, ZHAO J Z, XU K, et al. Study on the Tribological Properties of Ultradispersed Diamond Containing Soot as an Oil Additive[J]. Tribology Transactions, 1997, 40(1): 178—182.
- [16] 滕荣厚. 浅谈磁性液体(续)[J]. 粉末冶金工业, 2001, 11(6): 42—43.
TENG Rong-hou. Discussion on Magnetic Liquid(Continued)[J]. Powder Metallurgy Industry, 2001, 11(6): 42—43.
- [17] 王利军, 郭楚文, 杨志伊, 等. Fe₃O₄ 磁流体润滑摩擦因数试验研究[J]. 润滑与密封, 2006(7): 142—143.
WANG Li-jun, GUO Chu-wen, YANG Zhi-yi, et al. Experiment Research on Friction Coefficient of Fe₃O₄ Ferrofluid[J]. Lubrication Engineering, 2006(7): 142—143.
- [18] NADA G S, OSMAN T A. Static Performance of Finite Hydrodynamic Journal Bearings Lubricated by Magnetic Fluids with Couple Stresses[J]. Tribology Letters, 2007, 27(3): 261—268.
- [19] SORGE F. A Numerical Approach to Finite Journal Bearings Lubricated with Ferrofluid[J]. Journal of Tribology, 1987, 109(1): 77—82.
- [20] CHANDRA P, SINHA P, KUMAR D. Ferrofluid Lubrication of a Journal Bearing Considering Cavitation[J]. Tribology Transactions, 1992, 35(1): 163—169.
- [21] 张松, 杨叔子, 虞烈, 等. 铁磁性流体润滑滑动轴承性能的计算和分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1994, 22(7): 102—105.
ZHANG Song, YANG Shu-zi, YU Lie, et al. The Performance Calculation and Analysis for the Ferrofluid Journal Bearing[J]. Huazhong Univ of Sci&Tech, 1994, 22(7): 102—105.
- [22] SHAH R C, BHAT M V. Anisotropic Permeable Porous Facing and Slip Velocity on Squeeze Film in an Axially Undefined Journal Bearing with Ferrofluid Lubricant[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 279(2): 224—230.
- [23] SHAH R C, BHAT M V. Ferrofluid Lubrication in Porous Inclined Slider Bearing with Velocity Slip[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(12): 2495—2502.

- [24] SHAH R C, BHAT M V. Effect of Slip Velocity in a Porous Secant-shaped Slider Bearing with a Ferrofluid Lubricant[J]. *Journal of Physics*, 2003, 12(1): 1—8.
- [25] SHAH R C, BHAT M V. Ferrofluid Squeeze Film between Curved Annular Plates Including Rotation of Magnetic Particles[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2005, 51(4): 317—324.
- [26] SHAH R C, PATEL N I. Impact of Various and Arbitrary Porous Structure in the Study of Squeeze Step Bearing Lubricated with Magnetic Fluid Considering Variable Magnetic Field[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2015, 229(5): 646—659.
- [27] SHAH R C, KATARIA R C. On the Squeeze Film Characteristics between a Sphere and a Flat Porous Plate Using Ferrofluid[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(3): 2473—2484.
- [28] OSMAN T A, NADA G S, SAFAR Z S. Different Magnetic Models in the Design of Hydrodynamic Journal Bearings Lubricated with Non-Newtonian Ferrofluid[J]. *Tribology Letters*, 2003, 14(3): 211—223.
- [29] 池长青. 均匀磁场中铁磁流体润滑的轴颈轴承[J]. *航空动力学报*, 2000, 15(2): 174—178.
CHI Chang-qing. Performance of Ferrofluid Lubricated Journal Bearing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2000, 15(2): 174—178.
- [30] SHAH R C, BHAT M V. Ferrofluid Squeeze Film in a Long Journal Bearing[J]. *Tribology International*, 2004, 37(6): 441—446.
- [31] PATEL J R, DEHERI G M. Combined Effect of Slip Velocity and Roughness on the Jenkins Model Based Ferrofluid Lubrication of a Curved Rough Annular Squeeze Film[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(2): 855—865.
- [32] HSU T C, CHEN J H, CHIANG H L, et al. Lubrication Performance of Short Journal Bearings Considering the Effects of Surface Roughness and Magnetic Field[J]. *Tribology International*, 2013, 61: 169—175.
- [33] HSU T C, CHEN J H, CHIANG H L, et al. Combined Effects of Magnetic Field and Surface Roughness on Long Journal Bearing Lubricated with Ferrofluid[J]. *Journal of Marine Science and Technology (Taiwan)*, 2014, 22(2): 154—162.
- [34] TIPEI N. Theory of Lubrication with Ferrofluids: Application to Short Bearings[J]. *Journal of Lubrication Technology*, 1982, 104(4): 510—515.
- [35] SHAH R C, TRIPATHI S R, BHAT M V. Magnetic Fluid Based Squeeze Film between Porous Annular Curved Plates with the Effect of Rotational Inertia[J]. *Journal of Physics*, 2002, 58(3): 545—550.
- [36] 胡国祥. 磁流体润滑滑动轴承承载能力计算与分析[J]. *润滑与密封*, 1996(5): 12—15.
HU Guo-xiang. Calculation and Analysis of Capacity for Sliding Bearing Lubricated with Ferrofluid[J]. *Lubrication Engineering*, 1996(5): 12—15.
- [37] PRAJAPATI B L. Magnetic-fluid-based Porous Squeeze Films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1995, 149(1—2): 97—100.
- [38] 池长青. 均匀磁场中铁磁流体润滑的平板滑块的性能[J]. *北京航空航天大学学报*, 2001, 27(1): 93—96.
CHI Chang-qing. On Performance of Ferrofluid-lubricated Plane Slider in Uniform Magnetic Field[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 27(1): 93—96.
- [39] SINHA P, CHANDRA P, KANPUR D, et al. Ferrofluid Lubrication of Cylindrical Rollers with Cavitation[J]. *Acta Mechanica*, 1993, 98(1—4): 27—38.
- [40] 何世权, 杨逢瑜, 杨瑞. 滑动轴承磁流体薄膜和润滑特性的研究[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(1): 126—128.
HE Shi-quan, YANG Feng-yu, YANG Rui. Research on Lubrication Characteristic of Thin Film and Glide Bearings Affected by Magnetic Fluid[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(1): 126—128.
- [41] SHUKLA J B, KUMAR D A. Theory for Ferromagnetic Lubrication[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, 65(2—3): 375—378.
- [42] 安琦, 孙林, 楼豪生, 等. 磁流体润滑滑动轴承的研制和性能研究[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(4): 461—463.
AN Qi, SUN Lin, LOU Hao-sheng, et al. Development of Journal Bearing Lubricated with Ferrofluid and Experimental Study on Its Properties[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2004, 23(4): 461—463.
- [43] MIYAKE S, TAKAHASHI S. Sliding Bearing Lubricated with Ferromagnetic Fluid[J]. *ASLE Transactions*, 1985, 28(4): 461—466.
- [44] 李洪帅, 李学慧, 董桂馥, 等. 磁性液体摩擦学性能研究[J]. *润滑与密封*, 2009, 34(11): 9—12.
LI Hong-shuai, LI Xue-hui, DONG Gui-fu, et al. Investigation on the Tribological Behavior of Ferrofluids[J]. *Lubrication Engineering*, 2009, 34(11): 9—12.
- [45] 黄巍, 沈聪, 王晓雷. 磁性液体润滑特性研究[C]// 中国航空学会第十四届机械动力传输学术讨论会论文集. 无锡: [出版者不详], 2009: 104—110.
HUANG Wei, SHEN Cong, WANG Xiao-lei. Study on the Characteristics of Magnetic Liquid Lubrication[C]// *Proceedings of the 14th Symposium on Mechanical Power Transmission of China Aeronautical Society*. Wuxi: [s. n.], 2009: 104—110.
- [46] HUANG W, SHEN C, LIAO S J, et al. Study on the Ferrofluid Lubrication with an External Magnetic Field [J]. *Tribology Letters*, 2011, 41(1): 145—151.
- [47] WANG L J, GUO C W, RYUICHIRO Y, et al. Tribological Properties of Mn-Zn-Fe Magnetic Fluids under Magnetic Field[J]. *Tribology International*, 2009, 42(6): 792—797.
- [48] 王利军, 郭楚文, 杨志伊, 等. 磁场作用下的 Fe_3O_4 磁流体承载能力的试验研究[J]. *润滑与密封*, 2006(5): 22—24.
WANG Li-jun, GUO Chu-wen, YANG Zhi-yi, et al. Ex-

- perimental Research on Load Capacity of Fe_3O_4 Ferrofluid in Magnetic Field[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(5): 22—24.
- [49] 赵猛, 邹继斌, 胡建辉. 磁场作用下磁流体粘度特性的研究[J]. *机械工程材料*, 2006, 30(8): 64—65.
ZHAO Meng, ZOU Ji-bin, HU Jian-hui. Viscosity of Magnetic Fluid in Magnetic Field[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2006, 30(8): 64—65.
- [50] WANG J M, KANG J F, ZHANG Y J, et al. Viscosity Monitoring and Control on Oil-film Bearing Lubrication with Ferrofluids[J]. *Tribology International*, 2014, 75(5): 61—68.
- [51] 朱润生, 张建斌, 王之珊. 滑动摩擦主动控制的试验研究[J]. *摩擦学学报*, 1999, 19(4): 311—315.
ZHU Run-sheng, ZHANG Jian-bin, WANG Zhi-shan. Experimental Investigation on the Active Control of Sliding Friction[J]. *Tribology*, 1999, 19(4): 311—315.
- [52] SHAHRIVAR K, VICENTE J D. Ferrofluid Lubrication of Compliant Polymeric Contacts: Effect of Non-homogeneous Magnetic Fields[J]. *Tribology Letters*, 2014, 56(2): 281—292.
- [53] 孙维民, 石明浩, 赵骞, 等. 往复运动轴磁性液体密封实验装置的研制与应用[J]. *物理与工程*, 2012, 33(6): 11—13.
SUN Wei-min, SHI Ming-hao, ZHAO Qian, et al. Development and Application of Experiment Apparatus of Magnetic Liquid Sealing about Reciprocating Shaft[J]. *Physics Experimentation*, 2012, 33(6): 11—13.
- [54] ZHOU J F, FAN H L, SHAO C L. Experimental Study on the Hydrodynamic Lubrication Characteristics of Magnetofluid Film in a Spiral Groove Mechanical Seal[J]. *Tribology International*, 2016, 95: 192—198.
- [55] KUZHIR P. Free Boundary of Lubricant Film in Ferrofluid Journal Bearings[J]. *Tribology International*, 2008, 41(4): 256—268.
- [56] 赵丕智, 王之珊, 李秀琴. 铁磁流体润滑的轴颈轴承研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 1992(4): 1—8.
ZHAO Pi-zhi, WANG Zhi-shan, LI Xiu-qin. Research on the Ferrofluid Lubricated Three-shallow-pocket Journal Bearings[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1992(4): 1—8.
- [57] KE H J, HUANG W, WANG X L. Controlling Lubricant Migration Using Ferrofluids[J]. *Tribology International*, 2016, 93: 318—323.
- [58] 王晓雷, 王静秋, 韩文非. 边界润滑条件下表面微细结构减摩特性的研究[J]. *润滑与密封*, 2007, 32(12): 36—39.
WANG Xiao-lei, WANG Jing-qiu, HAN Wen-fei. Effect of Surface on Friction Reduction under Boundary Lubrication[J]. *Lubrication Engineering*, 2007, 32(12): 36—39.
- [59] SHEN C, HUANG W, MA G L, et al. A Novel Surface Texture for Magnetic Fluid Lubrication[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 204(4): 433—439.
- [60] HUANG W, WU W B, WANG X L. Tribological Properties of Magnetic Surface Lubricated by Ferrofluids[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2012, 59(3): 994—1000.
- [61] LIAO S J, HUANG W, WANG X L. Micro-magnetic Field Arrayed Surface for Ferrofluids Lubrication[J]. *Journal of Tribology*, 2012, 134(1): 021701—021707.
- [62] HUANG W, SHEN C, WANG X L. Study on Static Supporting Capacity and Tribological Performance of Ferrofluids[J]. *Tribology Transactions*, 2009, 52(5): 717—723.
- [63] 廖思捷, 黄巍, 王晓雷. 磁性表面结构润滑特性的研究[C]// 2010 年全国青年摩擦学会议论文集. 杭州: [出版者不详], 2010.
LIAO Si-jie, HUANG Wei, WANG Xiao-lei. Study on Lubrication Performance of Magnetic Texture[C]// Proceedings of the 2010 National Youth Tribology Conference. Hangzhou: [s.n.], 2010.
- [64] HUANG W, LIAO S J, WANG X L. Wettability and Friction Coefficient of Micro-magnet Arrayed Surface[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(7): 3062—3067.
- [65] HUANG W, WANG J Q, WANG X L. Study on the Frictional Properties of Micro-magnet Arrayed Surface Lubricated with Ferrofluids[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, 227(5): 406—412.
- [66] CHEN W, HUANG W, WANG X L. Effects of Magnetic Arrayed Films on Lubrication Transition Properties of Magnetic Fluid[J]. *Tribology International*, 2014, 72(4): 172—178.