

摩擦表面定域润滑研究进展及发展趋势

胡瑞^{1,2}, 陈威¹, 许春霞^{1,3}, YANG Yue²

(1.南昌工程学院 江西省精密驱动与控制重点实验室, 南昌 330099; 2.谢菲尔德大学 机械工程系, 谢菲尔德 S1 3JD, 英国; 3.南昌大学 先进制造学院, 南昌 330031)

摘要: 面向环境保护和资源节约使用的呼声, 应用少量润滑剂实现摩擦表面定域可控润滑的研究越来越受到关注。基于润滑剂定域润滑效应, 从定域润滑的形成机制、润滑层结构、润滑种类、润滑效果和定域与微观-宏观域关联等角度进行探索研究。概述了近年来国内外关于定域润滑的研究进展, 从润滑约束角度概述了外力约束型、空间封闭约束型、表面形貌约束型和表面物化约束型等不同形式的定域润滑, 同时对其成因及润滑机理进行了阐述, 并对不同约束方式之间的耦合润滑效果研究, 得出不同定域因素间会产生影响, 且作用效果相似的约束方式之间耦合影响会明显增强。此外, 系统性地阐述了定域润滑在数学模型理论研究、实验研究、仿真分析等方面研究的发展概况, 并分析了定域润滑在摩擦过程中的润滑效应及其优势与不足。最后分析了目前定域润滑研究中存在的问题和拓展方向, 并提出其可在多种影响因素耦合方面重点研究的建议。

关键词: 定域润滑; 局域润滑; 摩擦表面; 密封润滑; 磁流体

中图分类号: TH117 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)11-0153-11

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.11.013

Research Progress and Development Trend on the Localized Lubrication of Friction Surface

HU Rui^{1,2}, CHEN Wei¹, XU Chun-xia^{1,3}, YANG Yue²

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Precision Drive and Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. The Department of Mechanical Engineering, The University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, UK; 3. Advanced Manufacturing School, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT: In response to calls for environmental protection and the economical use of resources, research into the application of small amounts of lubricant to achieve controlled lubrication of friction surfaces in a defined area has received increasing attention. This paper is based on the lubrication effect of fixed domain lubricant, from the formation mechanism of fixed domain lubrication, lubrication layer structure, lubrication type, lubrication effect and the correlation between fixed

收稿日期: 2021-11-12; 修订日期: 2022-05-09

Received: 2021-11-12; Revised: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51765044); 2019 年国家留学基金委公派留学项目 (201908360023); 江西省自然科学基金项目 (20212BAB204038); 江西省教育厅科技项目 (GJJ180934、GJJ180960)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51765044); the State Scholarship Found Project of China Scholarship Council in 2019 (201908360023); Natural Science Foundation of Jiangxi Province in China (20212BAB204038); Science and Technology Project Founded by the Education Department of Jiangxi Province in China (GJJ180934, GJJ180960)

作者简介: 胡瑞 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为微纳/仿生机械设计、摩擦学理论及其工业应用。

Biography: HU Rui (1979-), Male, Doctor, Associate professor, Reseach focus: micro-nano/bionic mechanical design, tribological theory and its industrial applications.

引文格式: 胡瑞, 陈威, 许春霞, 等. 摩擦表面定域润滑研究进展及发展趋势[J]. 表面技术, 2022, 51(11): 153-163.

HU Rui, CHEN Wei, XU Chun-xia, et al. Research Progress and Development Trend on the Localized Lubrication of Friction Surface[J]. Surface Technology, 2022, 51(11): 153-163.

domain and micro-macro domain. This paper explores the formation mechanism, lubrication layer structure, lubrication type, lubrication effect and micro-macro domain correlation of fixed domain lubrication, analyses the performance of fixed domain lubrication in various aspects and its application, outlines the research progress on fixed domain lubrication at home and abroad in recent years, outlines different forms of fixed domain lubrication such as external force constrained, space closed constrained, surface morphology constrained and surface materialization constrained from the perspective of lubrication constraint, at the same time, the causes and lubrication mechanism are explained. The external force constraint type can achieve external control of lubrication effect; the space closed constraint type has mature technology, low cost, stable and widely used; the surface morphology constraint type forms a more accurate space of the fixed domain, does not affect the part outside the lubrication area. The surface materialisation constraint type has a good effect on the surface protection of the friction substrate, and is suitable for a variety of materials, and can reconfigure the molecular arrangement at the microscopic level, which has a broad research prospect. In this paper, the effect of coupling lubrication between different constraint types is investigated, and it is concluded that the effect of coupling between different fixed-domain factors can be influenced, and the effect of coupling between constraint types with similar effects can be significantly enhanced. The influence of single and multiple factors on lubrication performance and optimum parameters is demonstrated by analysing the corresponding experiments. In addition, this paper systematically illustrates the development overview of the research on fixed-domain lubrication in terms of mathematical model theory research, experimental research and simulation analysis, explores the influencing factors of fixed-domain lubrication from different research approaches, and analyses the lubrication effect of fixed-domain lubrication in friction processes and its advantages and shortcomings from practical applications, especially illustrates the coupling analysis of fixed-domain lubrication from macroscopic to microscopic levels, proposes the fixed-domain lubrication. The analysis at the microscopic level points out that molecular arrangement and molecular forces also have some influence on fixed-domain lubrication; finally, the problems and feasible directions for expansion in the current research on fixed-domain lubrication are analysed, and suggestions for its focus on the coupling of multiple influencing factors are put forward. The study not only contributes to the study of the mechanism of fixed-domain lubrication, but also facilitates the expansion and improvement of the theory in the field of full-domain lubrication, which has a wide range of promising applications in reducing friction and wear and improving lubrication effect, and is of great help in reducing resource use and environmental pollution.

KEY WORDS: fixed domain lubrication; localized lubrication; friction surface; sealed lubrication; magnetic fluids

润滑是为了改善摩擦副的摩擦状态,以降低摩擦副表面之间的摩擦磨损的措施,一般通过将润滑剂加入摩擦副之中实现。在加入流体润滑剂后,摩擦表面会形成润滑膜界面,在避免摩擦副直接接触的同时还能有散热、除锈、减震、降噪等作用^[1]。润滑剂在润滑过程中可以有效减小摩擦副表面的损耗,降低摩擦因数,改善设备的摩擦性能。然而,润滑剂的损耗会造成设备摩擦增大且能耗增加,严重时会造成设备损坏乃至发生危害人身安全的重大生产安全事故。针对上述问题,生产实践中通常采用密封并持续补充润滑剂的方式来解决润滑问题^[2],这种方式虽然在一定程度上防止了润滑剂的损耗,但根据密封精度的不同,润滑剂的泄露还是存在,仍然会造成一定的资源浪费。而使用定域润滑措施可以有效减小润滑剂的损耗,同时可延长设备使用年限和降低能源消耗,这在能源日益紧缺的今天具有重要意义。

随着社会的不断发展,能源问题日益凸显,如何降低设备运行中的能源损耗,提高能源利用率已成科学研究的当务之急。本文主要从磁控下磁流体润滑、机械密封结构和微织构形态方面对定域润滑现象进

行研究,将润滑现象聚焦于润滑剂的定域分布,着重研究润滑剂的定域约束与不同定域因素协同作用的问题,就目前定域润滑研究进行了系统性地梳理。

1 定域润滑的形成

定域润滑是指将润滑剂使用一定方法吸附在摩擦副限定区域表面的润滑技术。将润滑剂约束在摩擦区域内,可以有效减少润滑剂的损耗,避免形成干摩擦;同时将润滑剂约束在一定区域内还能提升润滑性能,使得摩擦区域的动压力、油膜承载力和抗磨减摩性能都有所增加。因此,本文阐述的定域润滑技术及其润滑机理,不仅有助于定域润滑机制的研究,也有利于全域润滑领域的理论拓展和完善。

1.1 定域润滑的发展历程

定域润滑的概念最早出现在 1885 年出现的机械密封上^[3],这一时期研究主要使用机械结构将润滑剂密封在摩擦区域,防止其飞溅损耗,被广泛应用于生产生活当中。随着机械密封研究的不断深入,性能更

好的机械密封也逐渐被开发出来,机械密封具有密封性能好、使用寿命长、功率消耗少等优点,但其滑动环和 O 形圈在使用过程中易失效,并且其工作过程中密封端面内的润滑机理尚未明确,还需要开展进一步的研究^[4]。而随着润滑材料学研究的不断进步,使用新型磁流体润滑剂、油凝胶等代替传统润滑剂也逐渐成为定域润滑领域研究的热点^[5]。相较于传统润滑剂,磁流体可以在磁场作用下形成自密封,将润滑剂限定在定域表面,无需使用机械结构,能有效防止润滑剂损耗^[6]。而油凝胶可以将润滑剂容纳在凝胶结构当中,在温度的影响下发生相变,实现对摩擦区域的自适应润滑^[7]。与此同时,微织构形态也被应用到定域润滑研究中,微织构形态可以容纳被挤走的润滑剂,不断补充摩擦副表面的润滑剂,特殊形态的微织构结构还会形成表面引导效应,控制润滑剂的覆盖范围,有效延长润滑剂使用时间,降低润滑剂损耗。随着摩擦学研究的不断深入,还有很多其他定域润滑现象不断发现并应用。

1.2 定域润滑的形成条件

定域润滑得以形成,主要是由外界对摩擦区域和润滑剂施加约束,这一约束形成既可以是外力约束,如磁力^[8]、电场力^[9]、分子之间的吸附力^[10]等,也可以是空间约束如接触式机械密封或非接触式机械密封等^[11],还可以是表面形貌约束如不同微织构形态等^[12]。

因此,可以认为形成定域润滑的基本条件在于摩擦副表面之间的润滑剂及其产生润滑定域效应的约束条件。通过不同形式的约束将润滑剂吸附在摩擦副之间,这可避免摩擦副表面之间形成混合润滑或干摩擦工况,以保障摩擦副表面之间时刻维持着提供润滑的润滑层。

1.3 定域润滑的结构分析

在形成定域润滑效应后,摩擦副表面之间不会直接接触,且可以长时间维持有良好润滑的接触状态;同时,润滑剂在约束状况下的损耗也会减少,以维持更长时间的理想状态;对应状态下,此时宏观状态下的直接表现就是摩擦阻力降低,摩擦副表面间的摩擦磨损特征值减小。

根据不同的约束方式,其润滑层的结构也有所不同:(1)利用外力约束方式,将润滑剂在外力作用下约束在摩擦副表面,形成定域内稳定的润滑剂层;(2)利用空间封闭约束方式,将润滑剂封闭在摩擦域附近,使得润滑剂无法脱离润滑摩擦域,形成动态稳定的定域润滑剂层;(3)利用表面形貌约束方式,将润滑剂通过表面形貌留存在摩擦表面内,形成表面形貌定域范围内的润滑剂层;(4)利用表面物化约束方式,将不同性质的摩擦材料加入润滑区域,通过摩擦过程中物理覆盖、化学反应固定和产生纳米级薄膜等方式,在自身理化特性的作用下形成特殊的定域润

滑层,达到改善摩擦性能的目的。

2 定域润滑类型

不同的定域润滑类型的形成原理和定域技术条件都有所不同,其具体的润滑效果也不同,分析不同形态定域类型的具体原理可以对优化定域形态和多定域因素耦合优化有着重要意义。

2.1 外力约束型

外力约束型是借由在润滑剂上使用一定的特殊理化性能的材料,如磁性颗粒、熔融盐润滑剂等,借由其理化特性产生的外力使得润滑剂吸附在摩擦副表面,达到防止润滑剂流散的效果。外力约束型主要是通过润滑剂自身与外界场(如磁场、电场、温度场等)相互作用而产生的约束力来约束润滑剂本身,以达到固定在润滑表面的效果;同时仅仅通过改变外界场就能对润滑剂的固定效果进行改变,可以实现对润滑的控制。

外力约束型主要表现于使用磁力的磁流体润滑中,由于磁流体在磁场下的特殊效应,使得其首先应用于密封领域,但研究中也发现磁流体在润滑中也有较好的效果,其原因在于磁流体会受到磁场影响(如图 1 所示),吸附在摩擦副表面,避免流散。磁流体的定域效应与外磁场强度紧密相关,在磁场强度较大时磁流体黏度也较大,在定域内吸附在摩擦副表面^[13]。施加磁场时,磁性纳米颗粒沿磁场方向排列取向,随着磁场强度的增加,相互作用和排列变得更强,在 1 400 Gs 的磁场强度下,以硅油为基底的铁磁流体的黏度比可以达到 166^[14]。磁流体在磁场作用下的定域效应不仅能够增加定域效果,还能增强油膜的承载力,提高润滑效果。

外力约束型也表现在使用电场力上,文献[9]开展了 4 种离子在表面电势的影响下对润滑定域的影响。

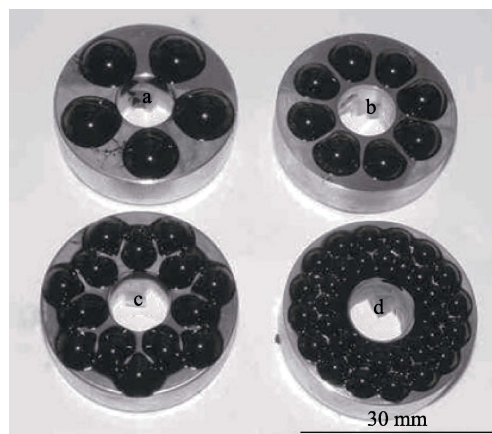


图 1 磁流体在不同定域磁场下的特性^[8]
Fig.1 Properties of magnetic fluids in different fixed-domain magnetic fields^[8]

响研究,结果表明,在定域范围电势影响下,含 FAP 阴离子的 3 种离子液体,负电位下的摩擦因数低于正电位下的摩擦因数;烷基链的长度对润滑性能的影响也非常显著,但当烷基链长度进一步减少到 C_2 时,离子便于重新定向,可以在摩擦副的定域表面平行排布,润滑性能进一步提升。离子液体作为润滑剂还会产生静电吸附的效果,在静电力的作用下形成具有自愈合和自湿润功能的 ILCA_s-GO 沉积膜,可以有效分离摩擦副表面并提供充足的润滑,从而减少材料磨损^[15]。

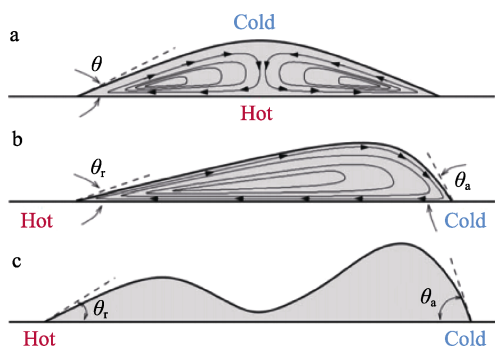


图2 温度驱动下固体表面液体的变化^[16]

Fig.2 Temperature-driven changes in liquid on a solid surface^[16]

外力约束型还体现在温度场的影响下,液体在固体表面的分布受到与空气间表面张力的影响,其工作原理如图2所示,在外界温度的变化下液体的表面张力产生变化,从而对液体产生驱动作用^[16]。目前上述研究已应用在温度影响下发生相变的“自约束”型凝胶^[17],这种凝胶在高温(240℃以上)下呈液态,低温下则呈凝固状态,可有效地减小摩擦过程中高温造成的润滑剂损失及失效;同时表现出对摩擦过程的自适应效果,当摩擦过程中剪切速率降低,其黏度增加,而剪切速率提高则黏度降低;这一系列过程都可重复实现。将这种材料应用在轴承上减少了高速运转下润滑油的质量损失,提升了轴承材料的储油能力;同时在摩擦热的作用下,凝胶转变为液体,增强了润滑效果,摩擦因数明显下降^[18]。

2.2 空间封闭约束型

空间封闭约束型则是以机械密封为代表,采用泄露率极低的密封封装边界将摩擦副表面及润滑剂封闭起来形成定域范围,使摩擦行为发生在空间约束内。空间封闭约束型主要通过密封技术的方式实现,通过密封的方式将润滑剂封闭在润滑区域,以防止润滑剂逸散,实现更长期的润滑效果。由于空间约束型定域范围较大,虽然很难做到精确控制润滑部位,但是其技术成熟,成本较低,所形成的定域稳定,因此应用较为广泛。

机械密封可以分为接触式密封(如图3所示)和

非接触式密封(如图4所示),2种方式各有优劣。接触式机械密封结构简单,制造方便,维护成本低,其密封性和可靠性良好。接触式机械密封通过运动环和静止环紧密接触而形成密封效果,同时采用O形圈在轴套与壳体上实现二次密封,进一步保证其密封率和润滑液存储^[19]。然而,接触式机械密封还存在一定的问题,由于密封界面直接接触并缺乏良好润滑,在摩擦过程中这些零件不断磨损,从而影响整体的密封性能,同时由于密封界面并不能完全紧密接触,因此还是存在泄露现象和润滑失效^[20]。而非接触式机械密封则是在解决上述问题的基础上发展起来的,是通过在端面动环或静环上开设不同形态的凹槽和孔槽,形成径向收敛楔,使流体运动时产生静压或动压作用,在密封端面之间形成一层稳定连续的流体膜,使得端面之间不存在固相接触的机械密封;由于不存在直接的接触摩擦,非接触式机械密封的摩擦磨损很小,同时利用流体的动压或静压作用,使得非接触式机械密封的泄漏量可控和局域润滑效果良好,理论上可以实现零泄露^[21]。

非接触式机械密封虽然利用了流体静动压力,但与外力约束型润滑中需要存在受到外场力影响的润滑剂组成成分或场力因子(如磁流体中受到外磁场力约束的磁性粒子、离子液体中受到外电场力约束的极性离子、油凝胶中受到温度场力约束的凝胶因子等)不同,非接触式密封中的润滑剂可以不需要存在受外界场影响的成分因子而只需要产生密封作用的流体静压或动压效果因素^[22]。其约束力主要是来源于端面表面构型与流体的运动^[23],约束作用区域在密封空间的外部区域。目前该方面研究热点集中在实现空间封闭的密封油槽结构形态、密封端面的泄漏量和动静环匹配性能等^[22-23]。

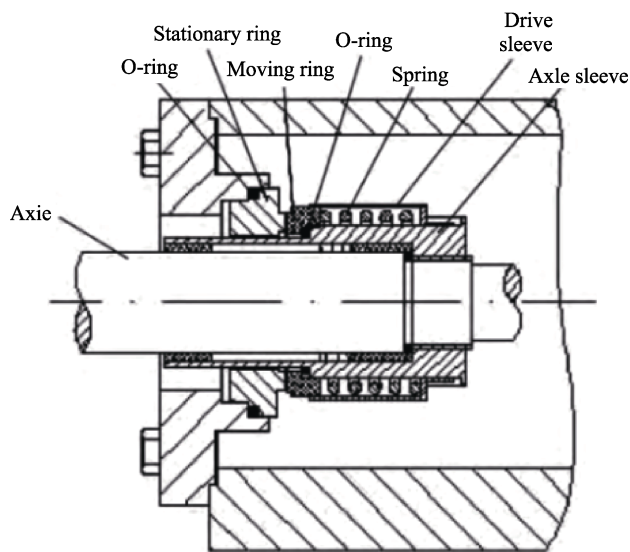


图3 接触式机械密封基本结构^[19]

Fig.3 Basic structure of a contact mechanical seal^[19]



图 4 典型的单向螺旋槽非接触式机械密封的密封端面定域结构^[21]

Fig.4 Typical one-way spiral groove non-contact mechanical seal with a fixed domain structure on the seal end^[21]

2.3 表面形貌约束型

表面形貌约束则是以微织构形态为主,通过改变定域范围内的摩擦副表面形貌,使其拥有更好的摩擦学性能,同时利用微织构形态将润滑剂约束在定域摩擦副表面,避免随摩擦过程甩出,造成损耗^[24]。表面约束型基本是通过改变润滑区域的表面形貌以产生定域效果,并不涉及润滑剂本身与润滑区域以外的空间,也不会润滑表面发生物化反应,因此其适用范围较广,在许多场合都能加以应用。

研究表明,摩擦力不是随物体表面越光滑而越小,在物体表面加工出一些规则的纹路也可以有效减小摩擦力,同时微凹坑型织构可以容纳磨损产生的碎屑,防止碎屑对摩擦副表面造成二次破坏。同时凹坑还能容纳一定量的润滑剂,补充摩擦过程中的油液损耗^[25-26]。此外,微凹坑还会在使用油润滑剂摩擦时发生空化效应,增大油膜刚性,增强油膜承载力,考虑空化时的承载力比不考虑空化时可提高 35~74 倍,同时摩擦力减小了 5.8%~37.3%,摩擦因数可降低 98.3%~98.7%^[27],然而,这种现象在高速轻载的状态下效果比较明显,低速重载时油膜的承载力则会降低^[28]。特殊的微织构结构还可以形成定域范围内的微循环润滑回路,使得润滑剂在摩擦上形成循环,既能提升润滑剂的流体动压力,增强其承载能力,又能有效回收被挤压出摩擦表面定域范围的润滑剂,这通过微循环进行补充,以降低润滑剂损耗率^[29]。定域微织构结构主要影响润滑剂的流体压力和剪切力,文献[30]用尺寸为 2 mm×2 mm、网格数为 256×256 的定域且微织构分布为 4×4 排列进行模拟计算,探究了定域微织构结构对流体压力和剪切力产生的影响,压力和剪切力随着表面织构面密度和深宽比的增大而增大;但随着深宽比的增加,压力增大的幅度呈现逐渐减小的趋势。

表面引导效应也是表面形貌约束的一种方式,其基本原理则是通过表面结构驱动液体移动,具有亲疏水梯度和锥形结构特征的一维丝状材料能实现液体的短距离搬运,使其在局部区域富集。猪笼草的口缘区表面液膜的形成也是基于这一效应^[31],口缘区表面具有几乎平行分布的两级沟槽,且在第二级沟槽内分布着朝向一致、层叠分布的“鸭嘴状”楔形盲孔阵列结构,猪笼草的楔形孔内缘夹角具有梯度渐变特征,

会增强液体向上铺展的能力,形成“梯度泰勒毛细升”现象,加强液体的汇集能力^[32]。而进一步的研究也证实其他表面应用这种结构可以有效增强液体的扩散与汇集能力,形成有效的自润滑^[33]。

2.4 表面物化约束型

表面物化型约束则是利用物理或化学特性,通过改变材料的理化性能来改善摩擦副定域面的摩擦性能,主要是在润滑剂中加入添加剂或利用其本身的理化性质,通常会与润滑表面材料产生不可逆的理化反应来达到更好的润滑效果。其基本方式有 3 种:

一是通过物理方法,在材料表面定域范围内覆盖摩擦性能较好的摩擦层,如在润滑剂中加入微纳米润滑材料,通过在定域范围覆盖润滑衬垫的方式,将摩擦性能更好的材料覆盖在摩擦副表面,改善其摩擦学性能,与润滑剂协同作用达到更好的润滑效果。文献[34]在润滑剂中加入微纳米润滑材料,使得微纳米润滑材料在摩擦副定域表面经物理性摩擦反应形成定域摩擦层,主要包括向摩擦副表面迁移的沉积层、弥散在超光滑摩擦表面的滚动摩擦层、扩散嵌入摩擦副表面的嵌入渗透层等,这些定域摩擦层不仅可以提升摩擦副表面的润滑能力,还能保护材料不被磨损,抗磨性能和润滑性能都有提升。

二是通过化学方式,使润滑剂与摩擦材料发生化学反应,从而固化在摩擦副表面定域上,使润滑剂长期存在,不易随摩擦的发生而被甩出或逸散。这一方式在钻井液润滑剂中常有应用,文献[35]在钻井润滑剂上采用二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP)极性吸附润滑剂,极压润滑剂就是通过其极性吸附功能,其在极压条件下以化学键组合的方式吸附于金属表面,将润滑剂约束在定域摩擦副表面,防止其润滑失效。与此类似的还有可以吸附在金属表面的含氮杂环化合物,利用氮原子的孤对电子与金属原子的空 d 轨道络合或者与金属表面的正电荷位点结合,形成以氧化亚铁(FeO)、有机氮化物和含氮金属配合物等为主要成分的络合吸附保护膜,使得金属摩擦副定域范围内摩擦因数和磨损量都减小^[36]。

三是润滑剂中的添加剂在摩擦过程中形成的纳米薄膜,文献[37]中提到的二烷基二硫代磷酸锌和无灰二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP 和 DDP)抗磨添加剂会产生薄膜。上述这种薄膜在摩擦过程中会呈现熔融状态,其表现出一定的流变特性,可以重新配置膜上分子,在定域范围内从纳米级上维持局部有序,且显著提升其抗磨润滑性能。

3 定域润滑研究

3.1 定域润滑理论研究

目前还未建立一个完善的定域润滑理论,但就现

有研究而言,大多数理论研究集中于流体润滑理论和表面形貌结构模型的建立。定域润滑理论依托于传统的流体润滑理论,同时结合摩擦副表面形貌研究,将理论研究集中于微观层面,对宏观上无法解释的润滑现象构建新的理论说明。

流体润滑理论研究主要是使用 Reynolds 方程^[38],在其三维形式下建立油膜压力分布方程,并根据不同条件建立适当的方程以研究油膜在不同摩擦条件下的润滑状态。文献[39]基于雷诺方程和根据适当的边界条件建立了磁流体动压方程,为磁流体动压润滑理论奠定了基础。文献[40]表明采用 Bingham 模型更能反映动压轴承上润滑剂流变行为为不连续的实际情况,研究指出, Bingham 模型不需要对推导进行区域近似和数值正则化,上述结果表明其适用于任意几何形状的润滑膜及润滑行为研究。

摩擦副表面形貌研究主要在建立定域表面形貌的结构方程上,并考虑摩擦副表面的粗糙度对其摩擦性能的影响。文献[41]根据典型表面织构(如图5所示)建立了相应的数学模型,其中变量包括织构半径、深度、织构的面积密度;同时求解了基于此模型列出的雷诺方程,并将其应用在干气密封、推力轴承、活塞环、软弹性流体动力润滑等设备的织构化求解上。文献[42]则利用数值分析方法研究了摩擦表面粗糙度对微织构润滑的影响。结果表明:表面粗糙度对液膜压力和流体动压润滑性能具有一定的影响且不可忽略,但对微织构最佳深度的影响较小。这表明了研究中需要考虑摩擦表面粗糙度的必要性。

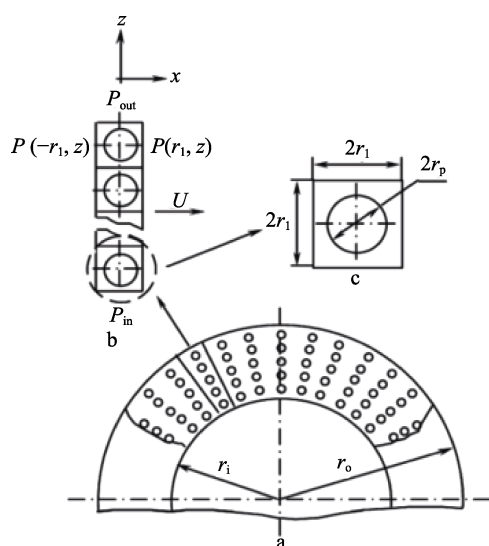


图5 典型的表面定域织构设计参数^[41]

Fig.5 Typical design parameters for a surface-definite weave^[41]

3.2 实验研究

目前关于定域润滑的实验研究集中在单一定域润滑因素或将2种定域润滑因素耦合实验上。文献[43]

就微织构形状对金属摩擦副的影响进行了研究,其针对单一定域因素——微织构进行了研究。研究表明,在金属摩擦副的情况下径向沟槽状的微织构减摩效果最好。相似地,文献[44]则就磁场作用下的磁流体摩擦特性这一单一定域因素进行了实验研究,研究表明磁流体定域润滑能有效减小摩擦,并且减摩效果与磁场强度有关;与恒定磁场相比,交变的磁场可以减小磁力对摩擦因数的影响。

在2种润滑因素耦合研究上,文献[45]将微织构与机械密封结构相结合,结果表明,面积为15%且深度为5 μm的微织构非常适用于机械装置的密封结构;同时微织构结构的导向角为45°时,油膜泄露率最小。文献[46]将磁流体与机械密封结构相耦合,结果表明,高转速下动压效应较为明显,液膜厚度随之减小;膜厚随介质压力的增大而减小,当介质压力超过0.3 MPa时,油膜破裂而润滑失效;油膜破裂的临界厚度随磁场强度的增大而减小。文献[47]对固体润滑剂与微织构结构的润滑效果进行了耦合研究,采用微织构结构与纳米二硫化钼(MoS₂)、聚四氟乙烯(PTFE)自润滑衬垫进行耦合,其相对材料干摩擦时的摩擦因数降低了29.7%,且可以有效提高摩擦副表面间的润滑特性。

3.3 仿真分析

随着计算机技术的发展,使用计算机软件仿真模拟,已经是研究中常用的辅助技术。在定域摩擦方面,可以根据不同的模拟条件建立不同模型进行仿真模拟计算,以验证其对润滑性能优劣程度的影响。

文献[48]中对表面纹理进行了数值模拟研究,其模型求解除考虑表面粗糙度外,也结合了空化算法。通过带纹理表面与不带纹理摩擦副表面摩擦性能的结果对比发现,其纹理密度和纵横比的影响较大:当织构的密度值高于0.1、纵横比高于0.04时,摩擦阻力最小;当织构的纵横比低于0.04时,其从混合润滑状态到流体润滑状态过度较慢。此外,表面织构的密度也会影响密封表面泄漏量,纹理密度值越大,越易导致较高的泄露量。文献[49]通过对不同形状的微织构纹理进行仿真对比分析,发现各向异性型纹理相比于各向同性型纹理在润滑过程中可以产生更高的剪切压力峰值,使得润滑剂可以提供更大的承载面积,从而促进润滑边界膜的产生,润滑效果最佳;而中间型纹理虽然能够维持最高的压力峰值,但摩擦过程中由于无法稳定地保持容纳足够的润滑剂,会出现干摩擦的情况,导致润滑效果不理想。文献[50]通过对密度变化的表面定域微织构进行模拟分析,对比了不同表面纹理的润滑效果,在考虑空化效应的情况下,发现微织构的宽度和深度会增大空化的体积分数;研究结合空化效应改善润滑性能,得到摩擦因数在深度比为0.6~0.7和宽度比为0.7~0.8时达到最小的

结论。

从仿真结果可以看出,不同的定域因素之间会有所影响,特别是基于相似成因的定域因素之间相互干扰的影响则会更大。微织构结构和机械密封结构就是一个很好的例子,在定域表面构造微织构结构会对机械密封结构的密封性产生影响。因此,协调不同定域因素间的匹配影响,对定域润滑研究至关重要。

4 定域润滑的效果

定域润滑技术在实际应用上的效果主要表现在以下方面:摩擦因数减小、油膜承载力增加、摩擦副

表面抗磨性能得到提升。

摩擦因数减小主要是通过改善润滑环境,提升摩擦副表面之间的润滑性能来实现。如文献[51]中提到,在磁场作用下纳米磁性颗粒对摩擦副起到支撑作用,就是通过外力约束方式避免摩擦副直接接触,以改善摩擦副表面之间的润滑性能,其定域润滑下的磨损情况如图 6 所示:相比于干摩擦与常规油润滑,磁场作用下的磁流体定域润滑试样几乎没有磨损;相似地,通过微织构结构形成微型流体动压轴承,其产生的动压润滑膜可以防止摩擦副直接接触^[52];还有表面物化约束中通过物理或化学的方式在摩擦副表面形成低摩擦力的摩擦层,降低摩擦因数。

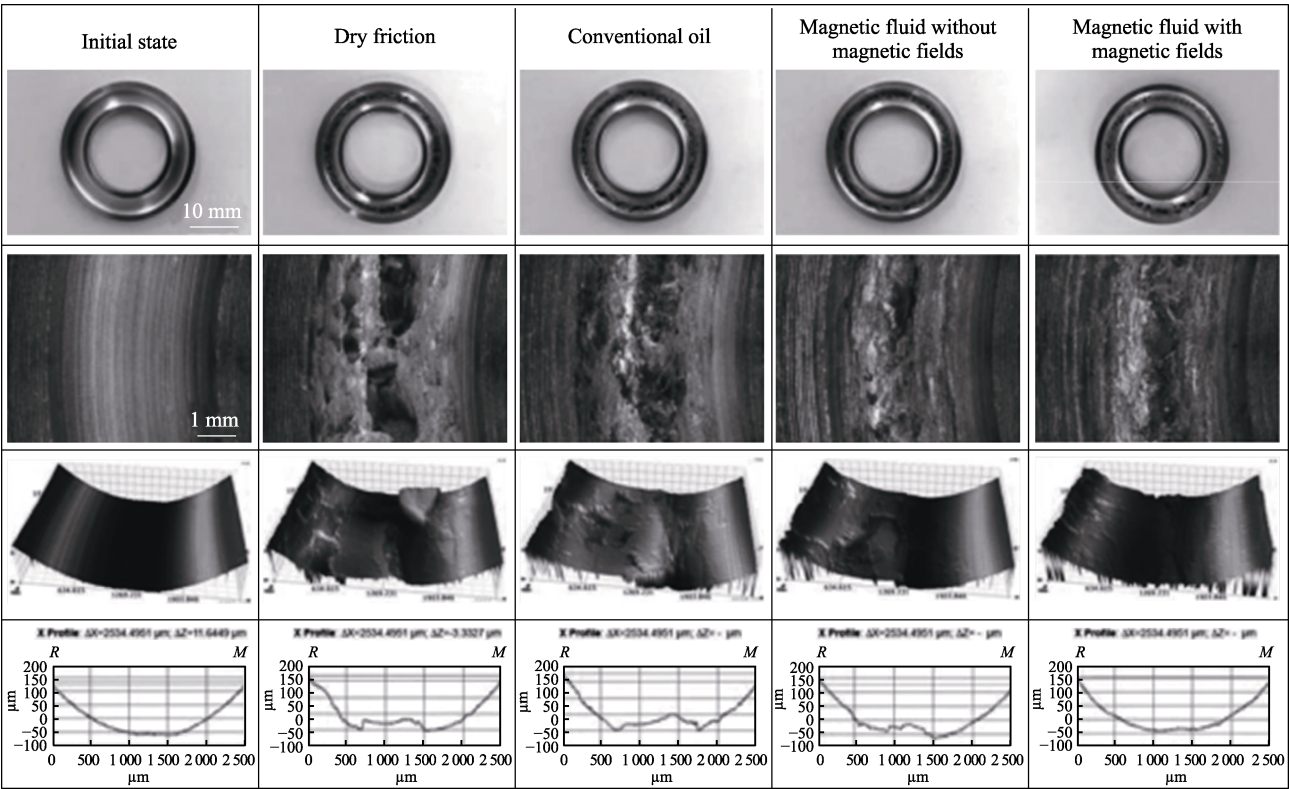


图 6 定域润滑作用下的磨损对比^[51]
Fig.6 Comparison of wear under the action of fixed domain lubrication^[51]

油膜承载力增加则是通过提升油膜本身性能为主。如在润滑剂中加入磁性微粒,在外加磁场的作用下润滑剂黏度提高,油膜承载力也相应提高^[53]。最为明显的则是通过空间约束的方式增大油膜承载力和通过加强密封性能使密封内部可承受的流体动压力增加,因此油膜承载力也相应增加^[54]。表面形貌约束中,也可以通过空化效应在油膜内产生空泡而提升油膜的承载力^[55]。

抗磨性能的增强则主要体现在表面形貌约束和表面物化约束中。表面形貌约束主要通过容纳摩擦过程中产生的碎屑,防止其造成二次磨损,改善摩擦副的抗磨性能^[56];并且在进行织构化处理时,织构处会增加许多强化质点,增强了织构处的硬度^[57];而表面

物化型约束中形成的各种摩擦层保护摩擦副表面,防止摩擦副之间直接接触,也提升了摩擦副表面的抗磨性能。

5 定域与微观-宏观耦合润滑

大多数定域润滑的润滑机理都是基于微观域上的研究。目前宏观润滑效应上仍是趋于传统润滑机理的耦合关联研究,其中往往会忽视微观层面的润滑机理因素。因此从定域方面对润滑现象进行研究可以有效解释微观层面的润滑机理,也是在宏观润滑领域判断润滑效果优劣的一种新的评价理论和方法,其对润滑领域的理论研究具有较重要的拓展作用。

定域润滑技术及其效应除了在宏观润滑性能上有直接改善外,其在微观域上也有一定的影响。文献[58]在磁流体润滑下,通过在摩擦副表面构筑微观磁性纹理,使得磁性纹理周围聚集较多的磁性润滑剂,从而保持微观定域内的低摩擦因数;相比普通纹理,微观磁性纹理在磁场作用下产生“反摩擦”的效果,进而在宏观层面上产生更高的屈服应力,表现出更好的润滑性能。上述现象在微织构结构中也有类似效果,微织构结构可以有效容纳磨损时产生的碎屑,以防止其造成二次磨损,这些碎屑在微织构结构的凹坑中也会起到滚动摩擦的效果,与微织构结构的宏观润滑相结合,可以达到更好的润滑效果^[59]。微观与宏观耦合润滑作用还体现在固体润滑剂的使用上,在宏观上固体润滑剂填充摩擦副表面之间的空隙,避免其直接接触,降低摩擦因数的同时磨损也减少;微观上固体润滑剂与摩擦副表面之间也会产生摩擦反应膜,这可对摩擦副表面实现进一步保护^[60]。在纳米微观层面,定域范围内的分子排布和分子力对定域润滑也有一定影响,与宏观移动方向相同排布的分子序列和同向的分子力均会对润滑效果产生影响^[61]。

6 总结与展望

定域润滑是一种统合了多种因素的润滑技术,不同因素之间的耦合作用往往会达到更好的润滑效果,对工程实际中的很多润滑问题可以提供更好的解决方案。定域润滑可以分成外力约束型、空间约束型、表面形貌约束型和表面物化约束型4种,通过研究其摩擦性能和摩擦学机理将其耦合配置,可以达到更好的润滑效果。因此需要研究多种定域约束耦合下影响润滑性能的关键因素,并协调相似定域因素成因之间的相互影响,以期达到最佳的润滑效果。由于定域润滑技术是集中于局部区域或微观域的润滑技术,其润滑机理大多作用在微观域上,通过研究微观领域内的润滑机理可以有效解释宏观状态下的各种润滑现象,对定域润滑理论的构建有很大帮助。定域润滑研究可以将润滑剂和润滑现象集中在关键部位,实现少量润滑剂定域可控润滑,提高润滑剂使用效率,避免资源浪费。

然而,目前定域润滑技术仍不完善,需要对其进行更深入的研究。目前定域润滑技术可以从以下几个方面进行深入研究:

1) 定域润滑研究目前还没有一个统一的理论,不同因素之间的理论解释往往相差甚远,但其在润滑领域的具体表现却有共通之处,因此可以对定域润滑理论进行进一步研究和完善。

2) 定域润滑研究目前在多领域的摩擦学研究中均有体现,但不同领域间结合研究还较少,往往只是单个或2个定域因素结合研究,2个以上的定域因素耦合研究鲜有报道,而部分定域因素如微织构,在与

其他因素协同作用时存在最优参数值,其对定域润滑效应影响明显。因此对多因素协同作用需进行更深入地研究。

参考文献:

- [1] 阮少军, 费逸伟, 吴楠, 等. 润滑剂润滑机理分析[J]. 化工时刊, 2017, 31(8): 38-42.
RUAN Shao-jun, FEI Yi-wei, WU Nan, et al. Analysis Of lubrication Mechanism about Lubricant[J]. Chemical Industry Times, 2017, 31(8): 38-42.
- [2] AYADI K, BRUNETIÈRE N, TOURNERIE B, et al. Experimental and Numerical Study of the Lubrication Regimes of a Liquid Mechanical Seal[J]. Tribology International, 2015, 92: 96-108.
- [3] 王秀英, 李思远, 戴庆文, 等. 织构化机械密封的润滑与泄漏特性协调优化研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(8): 1-8.
WANG Xiu-ying, LI Si-yuan, DAI Qing-wen, et al. Research Progress in Coordinated Optimization of Lubrication and Leakage for Textured Mechanical Seals[J]. Surface Technology, 2019, 48(8): 1-8.
- [4] WANG Bing-qing, MENG Xiang-kai, PENG Xu-dong, et al. Experimental Investigations on the Effect of Rod Surface Roughness on Lubrication Characteristics of a Hydraulic O-Ring Seal[J]. Tribology International, 2021, 156: 106791.
- [5] HU Rui, XU Chun-xia. Influence of Magnetic Fluids' Cohesion Force and Squeeze Dynamic Effect on the Lubrication Performance of Journal Bearing[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(9): 168781401773267.
- [6] TRIVEDI K, PAREKH K, UPADHYAY R V. Nanolubricant: Magnetic Nanoparticle Based[J]. Materials Research Express, 2017, 4(11): 114003.
- [7] YU Qiang-liang, FAN Ming-jin, LI Dong-mei, et al. Thermoreversible Gel Lubricants through Universal Supramolecular Assembly of a Nonionic Surfactant in a Variety of Base Lubricating Liquids[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(18): 15783-15794.
- [8] HUANG Wei, SHEN Cong, LIAO Si-jie, et al. Study on the Ferrofluid Lubrication with an External Magnetic Field[J]. Tribology Letters, 2011, 41(1): 145-151.
- [9] LI Hua, RUTLAND M W, ATKIN R. Ionic Liquid Lubrication: Influence of Ion Structure, Surface Potential and Sliding Velocity[J]. Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP, 2013, 15(35): 14616-14623.
- [10] APÓSTOLO R F G, TSAGKAROPOULOU G, CAMP P J. Molecular Adsorption, Self-Assembly, and Friction in Lubricants[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 277: 606-612.
- [11] 孙电锋, 孙见君, 於秋萍, 等. 非接触式机械密封动力学研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5238-5246.
SUN Dian-feng, SUN Jian-jun, YU Qiu-ping, et al.

- Progress of Study on Dynamics of Non-Contacting Mechanical Seals[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(12): 5238-5246.
- [12] WANG Li-li, ZHAO Xing-tang, GUO Shao-hui, et al. Tribological Properties of Surface Microtexture Friction Pairs under Different Lubrication Conditions[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(10): 16878140 1988156.
- [13] PATEL J R, DEHERI G. Viscosity Variation Effect on the Magnetic Fluid Lubrication of a Short Bearing[J]. Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, 2019, 13(2): 56-66.
- [14] WANG Sheng-hai, YANG Chun-cheng, BIAN Xiu-fang. Magnetoviscous Properties of Fe_3O_4 Silicon Oil Based Ferrofluid[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(20): 3361-3365.
- [15] GAN Chao-liang, LIANG Ting, LI Wen, et al. Hydroxyl-Terminated Ionic Liquids Functionalized Graphene Oxide with Good Dispersion and Lubrication Function[J]. Tribology International, 2020, 148: 106350.
- [16] GRÜTZMACHER P G, JALIKOP S V, GACHOT C, et al. Thermocapillary Lubricant Migration on Textured Surfaces - a Review of Theoretical and Experimental Insights[J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2021, 9(1): 013001.
- [17] WANG Yu-rong, YU Qiang-liang, BAI Yan-yan, et al. Self-Constraint Gel Lubricants with High Phase Transition Temperature[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(11): 15801-15810.
- [18] 王玉荣, 蔡美荣, 邢喜民, 等. 含浸凝胶自润滑轴承材料的制备及性能研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(4): 792-802.
- WANG Yu-rong, CAI Mei-rong, XING Xi-min, et al. Preparation and Performance of Gel-Impregnated Bearing Self-Lubricating Material[J]. Tribology, 2022, 42(4): 792-802.
- [19] ZHANG Jie, XIE Jing-xuan. Investigation of Static and Dynamic Seal Performances of a Rubber O-Ring[J]. Journal of Tribology, 2018, 140(4): 042202.
- [20] 於秋萍, 孙见君, 涂桥安, 等. 接触式机械密封基本性能研究进展[J]. 流体机械, 2015, 43(2): 41-47.
- YU Qiu-ping, SUN Jian-jun, TU Qiao-an, et al. Research Progress in Basic Properties of Contacting Mechanical Seal[J]. Fluid Machinery, 2015, 43(2): 41-47.
- [21] 王玉明, 刘伟, 刘莹. 非接触式机械密封基础研究现状与展望[J]. 液压气动与密封, 2011, 31(2): 29-33.
- WANG Yu-ming, LIU Wei, LIU Ying. Current Research and Developing Trends on Non-Contacting Mechanical Seals[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2011, 31(2): 29-33.
- [22] 霍凤伟, 张健, 张成建, 等. 在非接触式机械密封端面开设曲面浅槽新方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(8): 271-278.
- HUO Feng-wei, ZHANG Jian, ZHANG Cheng-jian, et al. New Methods for Making Shallow Grooves with Curved Surface on the End Faces of Non-Contact Mechanical Seals[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(8): 271-278.
- [23] 王金刚, 赵文凯. 非接触密封流体膜的数值模拟研究[J]. 液压与气动, 2020(5): 119-125.
- WANG Jin-gang, ZHAO Wen-kai. Numerical Simulation Research of Non-Contact Sealing Fluid Film[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(5): 119-125.
- [24] VISHNOI M, KUMAR P, MURTAZA Q. Surface Texturing Techniques to Enhance Tribological Performance: A Review[J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 27: 101463.
- [25] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, et al. The Effect of Laser Surface Texturing on Transitions in Lubrication Regimes during Unidirectional Sliding Contact[J]. Tribology International, 2005, 38(3): 219-225.
- [26] SCHRECK S, ZUM GAHR K H. Laser-Assisted Structuring of Ceramic and Steel Surfaces for Improving Tribological Properties[J]. Applied Surface Science, 2005, 247(1-4): 616-622.
- [27] 方勋, 严志军, 王剑豪, 等. 考虑空化效应的表面微凸体结构摩擦副润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45(12): 32-41, 51.
- FANG Xun, YAN Zhi-jun, WANG Jian-hao, et al. Effect of Micro-Convex Texture on Lubrication Performance of Friction Pair Considering Cavitation Phenomenon[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(12): 32-41, 51.
- [28] 禄晓敏, 王权岱, 肖继明, 等. 结构化表面空化效应影响润滑性能的 CFD 分析[J]. 润滑与密封, 2016, 41(5): 70-75.
- LU Xiao-min, WANG Quan-dai, XIAO Ji-ming, et al. CFD-Analysis on the Effect of Cavitation of Textured Surface on Hydrodynamic Lubrication[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(5): 70-75.
- [29] 卢艳, 刘佐民. 微循环表面网状形态对其润滑特性影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 357-362.
- LU Yan, LIU Zuo-min. Lubrication Performance of the Grid-Patterned Microcirculation Surface[J]. Tribology, 2013, 33(4): 357-362.
- [30] 孙士青, 孙娜, 王晓力. 粗糙表面上微结构对流量因子的影响[J]. 润滑与密封, 2020, 45(1): 11-15.
- SUN Shi-qing, SUN Na, WANG Xiao-li. Influence of Micro-Texture on Flow Factors on Rough Surface[J]. Lubrication Engineering, 2020, 45(1): 11-15.
- [31] 陈华伟, 张鹏飞, 张力文, 等. 猪笼草口缘区表面液体单方向连续搬运机制[J]. 中国科学基金, 2016, 30(3): 217-219.
- CHEN Hua-wei, ZHANG Peng-fei, ZHANG Li-wen, et al. Continuous Directional Water Transport on the Peristome Surface of Nepenthes Alata[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016, 30(3): 217-219.
- [32] CHEN Hua-wei, ZHANG Peng-fei, ZHANG Li-wen, et al. Continuous Directional Water Transport on the Peristome Surface of Nepenthes Alata[J]. Nature, 2016, 532(7597): 85-89.
- [33] CHEN Hua-wei, ZHANG Li-wen, ZHANG Peng-fei, et al. Bioinspired Surfaces: A Novel Bioinspired Continuous

- Unidirectional Liquid Spreading Surface Structure from the Peristome Surface of *Nepenthes Alata*[J]. *Small*, 2017, 13(4): 1601.
- [34] 张博, 徐宾士, 许一, 等. 润滑剂中微纳米润滑材料的研究现状[J]. *摩擦学学报*, 2011, 31(2): 194-204.
ZHANG Bo, XU Bin-shi, XU Yi, et al. Research Status of Micro-and Nano-Materials in Lubricating Additives[J]. *Tribology*, 2011, 31(2): 194-204.
- [35] 李公让, 王承俊. 极性吸附钻井液润滑剂的研究进展与发展趋势[J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(5): 541-549.
LI Gong-rang, WANG Cheng-jun. Research Progress Made and Development Trend of Drilling Fluid Lubricants with Polar Adsorption Ability[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5): 541-549.
- [36] 欧阳平, 张贤明, 张渊博, 等. 新型无硫磷含氮润滑材料的制备及其对钢-钢摩擦副摩擦学性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2012, 30(5): 689-693.
OUYANG Ping, ZHANG Xian-ming, ZHANG Yuan-bo, et al. Preparation for the New Nitrogen-Containing Lubricating Material without Phosphorus/Sulphur and Its Effect on the Tribological Properties of Steel-Steel Friction Pairs[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2012, 30(5): 689-693.
- [37] DORGHAM A, AZAM A, PARSAEIAN P, et al. Nanoscale Viscosity of Triboreactive Interfaces[J]. *Nano Energy*, 2021, 79: 105447.
- [38] 温诗铸. 润滑理论研究的进展与思考[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(6): 497-503.
WEN Shi-zhu. Study on Lubrication Theory-Progress and Thinking-over[J]. *Tribology*, 2007, 27(6): 497-503.
- [39] PATEL N S, VAKHARIA D P, DEHERI G M. A Study on the Performance of a Magnetic-Fluid-Based Hydrodynamic Short Journal Bearing[J]. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 2012: 603460.
- [40] LAMPAERT S G E, VAN OSTAYEN R A J. Lubrication Theory for Bingham Plastics[J]. *Tribology International*, 2020, 147: 106160.
- [41] ETSION I. Modeling of Surface Texturing in Hydrodynamic Lubrication[J]. *Friction*, 2013, 1(3): 195-209.
- [42] 曹宏涛, 王伟, 纪敬虎. 考虑粗糙度影响的微凹坑结构化机械密封润滑性能的数值模拟[J]. *流体机械*, 2017, 45(5): 16-20.
CAO Hong-tao, WANG Wei, JI Jing-hu. Numerical Analysis of the Textured Rough Mechanical Seal with Micro-Dimples[J]. *Fluid Machinery*, 2017, 45(5): 16-20.
- [43] 王丽丽, 郭少辉, 魏聿梁, 等. 表面微织构对 45#钢摩擦副表面摩擦学性能影响的实验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(12): 149-154.
WANG Li-li, GUO Shao-hui, WEI Yu-liang, et al. Experimental Study on the Influence of Surface Microtexture on the Tribological Properties of 45# Steel Friction Pairs[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(12): 149-154.
- [44] LIU Hong-bin, LI Ji-shun, XUE Yu-jun, et al. Study on the Friction Characteristics of Different Lubrication Modes under Alternating Magnetic Field[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 455: 490-494.
- [45] SHI Li-ping, WEI Wei, WANG Tao, et al. Experimental Investigation of the Effect of Typical Surface Texture Patterns on Mechanical Seal Performance[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(5): 227.
- [46] 孟咸年, 郝梁, 凌昊, 等. 磁流体端面动压润滑特性的试验研究[J]. *润滑与密封*, 2019, 44(12): 37-41, 45.
MENG Xian-nian, HAO Liang, LING Hao, et al. Experimental Study on Hydro-Dynamical End Surface Lubricating Characteristics of Magnetic Fluid[J]. *Lubrication Engineering*, 2019, 44(12): 37-41, 45.
- [47] 华希俊, 朱翊航, 王皓, 等. GCr15 钢微织构表面固体润滑性能研究[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(9): 12-17.
HUA Xi-jun, ZHU Yi-hang, WANG Hao, et al. Research on Solid Lubrication Properties of Micro-Textured GCr15 Steel[J]. *Lubrication Engineering*, 2020, 45(9): 12-17.
- [48] BRUNETIÈRE N, TOURNERIE B. Numerical Analysis of a Surface-Textured Mechanical Seal Operating in Mixed Lubrication Regime[J]. *Tribology International*, 2012, 49: 80-89.
- [49] AZAM A, DORGHAM A, KHAEMBA D N, et al. Understanding the Role of Surface Textures in Improving the Performance of Boundary Additives, Part II: Numerical Simulations[J]. *Tribology International*, 2020, 152: 106252.
- [50] MAO Yang, ZENG Liang-cai, LU Yan. Modeling and Optimization of Cavitation on a Textured Cylinder Surface Coupled with the Wedge Effect[J]. *Tribology International*, 2016, 104: 212-224.
- [51] 熊乐, 胡瑞, 许春霞, 等. 磁流体润滑特性及其在轴承中的应用研究进展[J]. *轴承*, 2020(7): 61-67.
XIONG Le, HU Rui, XU Chun-xia, et al. Research Progress on Lubricating Characteristics of Magnetic Fluid and Its Application in Bearings[J]. *Bearing*, 2020(7): 61-67.
- [52] 徐鲁帅, 王赞磊, 张帆, 等. 螺旋槽机械密封瞬态启动过程润滑特性[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(16): 1891-1900.
XU Lu-shuai, WANG Yun-lei, ZHANG Fan, et al. Lubrication Characteristics of Spiral Groove Mechanical Seals during Transient Start-up[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(16): 1891-1900.
- [53] ZIN V, AGRESTI F, BARISON S, et al. Effect of External Magnetic Field on Tribological Properties of Goethite (a-FeOOH) Based Nanofluids[J]. *Tribology International*, 2018, 127: 341-350.
- [54] HAO Mu-ming, WANG Yun-lei, LI Zhen-tao, et al. Effects of Surface Topography on Hydrodynamic Performance of Liquid Film Seals Considering Cavitation[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2018, 70(6): 984-992.
- [55] 张瑜, 陈国定, 王琳, 等. 空化与惯性效应耦合作用下的非对称表面微织构滑块承载力分析[J]. *西北工业大学学报*, 2017, 35(6): 1026-1032.
ZHANG Yu, CHEN Guo-ding, WANG Lin, et al. Analysis of Bearing Load-Carrying Capacity with Asymmetric Surface Textures under Coupling Effects of Cavitation and Inertia Effect[J]. *Journal of Northwestern Polytech-*

- nical University, 2017, 35(6): 1026-1032.
- [56] LI Dan, YANG Xue-feng, LU Chong-yang, et al. Tribological Characteristics of a Cemented Carbide Friction Surface with Chevron Pattern Micro-Texture Based on Different Texture Density[J]. Tribology International, 2020, 142: 106016.
- [57] 常秋英, 齐焯, 王斌, 等. 激光表面织构对 45 钢干摩擦性能的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 148-154.
- CHANG Qiu-ying, QI Ye, WANG Bin, et al. Tribological Influence of Laser Surface Textures on 45 Steel under Dry Sliding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 148-154.
- [58] MICHALEC M, SVOBODA P, KRUPKA I, et al. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field - a Review[J]. Tribology in Industry, 2018, 40(4): 515-528.
- [59] WANG Li-li, GUO Shao-hui, WEI Yu-liang, et al. Optimization Research on the Lubrication Characteristics for Friction Pairs Surface of Journal Bearings with Micro Texture[J]. Meccanica, 2019, 54(8): 1135-1148.
- [60] ROSENKRANZ A, COSTA H L, BAYKARA M Z, et al. Synergetic Effects of Surface Texturing and Solid Lubricants to Tailor Friction and Wear - a Review[J]. Tribology International, 2021, 155: 106792.
- [61] ZHANG Shao-hua, QIAO Yi-jun, LIU Yu-hong, et al. Molecular Behaviors in Thin Film Lubrication—Part One: Film Formation for Different Polarities of Molecules[J]. Friction, 2019, 7(4): 372-387.

责任编辑: 万长清

(上接第 125 页)

- [64] YIN Xiang-yu, ZHANG Yue, WANG Dao-ai, et al. Integration of Self-Lubrication and Near-Infrared Photothermogenesis for Excellent Anti-Icing/Deicing Performance[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(27): 4237-4245.
- [65] GUO Qiang, WANG Tao. Preparation and Characterization of Sodium Sulfate/Silica Composite as a Shape-Stabilized Phase Change Material by Sol-Gel Method[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(3): 360-364.
- [66] GUO Qiang, WANG Tao. Preparation and Characterization of Sodium Sulfate/Silica Composite as a Shape-Stabilized Phase Change Material by Sol-Gel Method[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2014, 22(3): 360-364.
- [67] ZHU Kong-ying, LI Xiao-hui, SU Jun-feng, et al. Improvement of Anti-Icing Properties of Low Surface Energy Coatings by Introducing Phase-Change Microcapsules[J]. Polymer Engineering & Science, 2018, 58(6): 973-979.
- [68] LISTON L C, FARNAM Y, KRAFCIK M, et al. Binary Mixtures of Fatty Acid Methyl Esters as Phase Change Materials for Low Temperature Applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 501-507.
- [69] YING Tie-jin, SU Dang, BAI Jia-wei. Organic Phase Change Compound Materials for Non-Freezing Cold Chain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 309-314.

责任编辑: 万长清

(上接第 137 页)

- [55] VRBEK K, LAMUT J, MAROLT M, et al. Changes in Hydrogen Content During Steelmaking[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(1): 295-299.
- [56] GAULT B, MOODY M P, CAIRNEY J M, et al. Atom Probe Microscopy[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [57] 周强, 谢中, 王祝盈, 等. 铜铅合金的扫描开尔文探针显微镜研究[J]. 电子显微学报, 2006, 25(4): 348-352.
- ZHOU Qiang, XIE Zhong, WANG Zhu-ying, et al. Scanning Kelvin Probe Microscope Study of Copper-Lead Alloy[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2006, 25(4): 348-352.
- [58] WALKER A V. Materials Analysis Using Secondary Ion Mass Spectrometry: Challenges and Opportunities[J]. Microscopy & Microanalysis, 2017, 23(S1): 1042-1043.
- [59] OVEJERO-GARCÍA J. Hydrogen Microprint Technique in the Study of Hydrogen in Steels[J]. Journal of Materials Science, 1985, 20(7): 2623-2629.
- [60] PEREZ T E, GARCIA J O. Direct observation of Hydrogen Evolution in the Electron Microscope Scale[J]. Scripta Metallurgica, 1982, 16(2): 161-164.
- [61] WEI F G, TSUZAKI K. Quantitative Analysis on Hydrogen Trapping of TiC Particles in Steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2006, 37(2): 331-353.
- [62] FUJISHIRO T, HARA T. Hydrogen Induced Cracking by "In-Situ HIC Observation Method"[J]. Zairyo-to-Kankyo, 1991, 40: 595-600.
- [63] OGAWA Y, HOSOI H, TSUZAKI K, et al. Hydrogen, as an Alloying Element, Enables a Greater Strength-Ductility Balance in an Fe-Cr-Ni-Based, Stable Austenitic Stainless Steel[J]. Acta Materialia, 2020, 199: 181-192.
- [64] 商红武, 安茂忠, 杨培霞. 电镀过程中氢脆的产生及其抑制措施[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(12): 4-7.
- SHANG Hong-wu, AN Mao-zhong, YANG Pei-xia. Hydrogen Embrittlement and its Suppression Methods During Electroplating[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(12): 4-7.