

Superlubrication technology--micro exploration and macro prospect towards the era of zero friction

Jinyue Zhu

University of Northwestern Polytechnical, Xi'an, Shaanxi, 710129, China

Abstract

Microscopic Exploration and Macroscopic Prospects of Superlubrication Technology Focus on the research of superlubrication technology. At the microscopic level, it delves into the mechanisms of superlubrication phenomena, the relationship between material microstructure and friction characteristics, etc. On a macroscopic level, it looks ahead to future application scenarios of superlubrication technology, such as reducing friction losses and enhancing equipment performance in aerospace and precision machinery fields. This research is significant for promoting the development of superlubrication technology and expanding its application scope, helping various industries achieve efficient and low-consumption operations.

Keywords

super lubrication technology; micro exploration; macro outlook

超润滑技术——迈向零摩擦时代的微观探索与宏观展望

朱瑾悦

西北工业大学, 中国·陕西 西安 710129

摘要

超润滑技术微观探索与宏观展望聚焦超润滑技术研究。在微观层面, 深入探索超润滑现象产生机制、材料微观结构与摩擦特性关联等。宏观上, 对超润滑技术未来应用场景进行展望, 如在航空航天、精密机械等领域降低摩擦损耗、提升设备性能等。该研究对推动超润滑技术发展、拓展其应用范围有重要意义, 助力各行业实现高效、低耗运行。

关键词

超润滑技术; 微观探索; 宏观展望

1 超润滑的概念与形成机理

超润滑 (Superlubricity) 是指两个接触表面相对滑动时, 摩擦系数进入 10^{-3} 量级 (即 < 0.01), 接近“零摩擦”的状态。该概念由日本科学家平野元久于 1990 年首次提出, 其核心目标是通过微观结构设计或特殊材料特性, 显著降低甚至消除摩擦带来的能量损耗与机械磨损。超润滑站在原子尺度理解摩擦学机理, 是研究控制机械系统摩擦学行为的前提, 因此后续对超润滑技术机理进一步探索仍将是研究领域的热点之一。

非公度接触可带来结构超润滑是有关超润滑技术研究中, 最常用、最核心的机理。当两个晶体表面原子排列的晶格参数不匹配使原子间接触处于“峰-谷”不咬合的状态 (即非公度接触) 时, 界面原子势能分布趋于平坦, 且原子无法同步移动, 只能表现为局部原子的独立位移, 无法大面积

阻碍相对位移, 两层晶体表面间的相对摩擦力会大幅降低。Leven 等人用石墨烯薄片在 h-BN 单晶体上进行了滑动摩擦实验, 结果显示其发生了超润滑现象, 就是因为 h-BN 与石墨的晶格参数不同, 异质界面的存在形成了天然的非公度接触, 导致产生超润滑现象。

除了采用不同晶体结构或者晶格参数的相对摩擦表面实现外, 实验已经证明在同一种晶体中通过接触表面相互旋转也可以实现非公度接触。

2 超润滑技术发展历程

超润滑技术从理论模型到实验验证、材料创新再到动态调控, 始终围绕“非公度接触”机制展开^[1]。主要发展时间点如图 1 所示。

2.1 理论奠基

超润滑研究的发展历程始于 1983 年 Peyrard 与 Aubry 提出的弗伦克尔-康托罗娃模型 (Frenkel-Kontorova 模型)。该模型通过一维原子链与周期势场的相互作用, 首次量化了晶体界面滑动的能量耗散机制, 为理解超润滑奠定了理论基

【作者简介】朱瑾悦 (2005-), 女, 中国陕西西安人, 本科, 从事材料科学与工程研究。

础。1991年,平野元九等人在实验中发现云母与石墨的原子级光滑接触可实现近零摩擦^[2],直接验证了“无公度接触”消除晶格锁定的理论预言,标志着结构超润滑现象的首个实验突破,首次提出了“超润滑”的概念。此后,二维材料的研究逐渐兴起,1993年Martin团队通过分析二硫化钼的层间滑动行为^[3],揭示了二维层状材料的低摩擦特性,但其宏观应用仍受限于当时的技术水平。发展过程中具体的纳米尺度结构超润滑性。

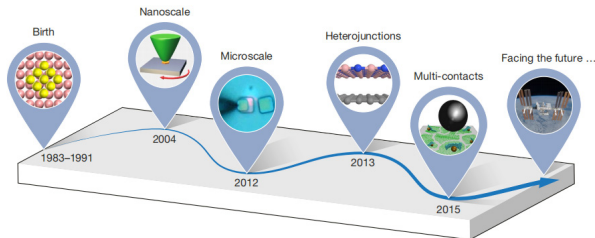


图1 结构超润滑主要里程碑的时间表

2.2 实验突破与材料探索

进入21世纪,原子力显微镜(AFM)技术的进步推动了超润滑研究的实验突破。2004年,Verhoeven团队利用AFM在石墨表面精确调控接触面积与取向,首次在可控条件下实现了超润滑状态^[4]。2010年, Lee等人进一步发现石墨烯层间旋转失配可显著降低摩擦,这一发现不仅深化了对二维材料超润滑机制的理解,还为微机电系统(MEMS)的应用提供了新思路。分子动力学模拟在此阶段发挥了关键作用:2012年, Liu团队通过模拟揭示了界面晶格失配抑制势能起伏的微观机制,为材料设计提供了理论指导。2013年, Zhang等人利用六方氮化硼(h-BN)解决了石墨在潮湿环境中因吸附水分子导致摩擦增大的问题,显著提升了超润滑的环境稳定性,推动了其实用化进程。

随着材料体系的扩展,超润滑研究进入多材料协同与动态调控阶段^[5]。2015年, Koren团队通过纳米压痕实验验证了类金刚石碳(DLC)涂层的超低摩擦性能,其摩擦系数低至0.001,接近理论极限,为工程化应用开辟了道路。与此同时, MoS₂、WS₂等二维材料的层间范德华力与晶格失配协同效应被深入研究,进一步拓宽了材料选择范围。2017年, Leven等人提出“动态超润滑”概念,主张通过电场、应力或温度实时调控界面状态,例如利用电场切换石墨烯层间的公度态与无公度态,首次实现了摩擦的主动控制。2018年, Hod与 Urbakh等人在文献综述中系统总结了超润滑的跨尺度机制,指出原子尺度的晶格失配与电子态调控、介观尺度的表面粗糙度建模及宏观尺度的MEMS设计需协同优化,为技术转化提供了系统性框架。

当前挑战主要集中在环境稳定性、规模化应用与动态调控三个方面。湿度与污染物吸附仍可能破坏超润滑状态,例如石墨在空气中易失效,而h-BN的惰性表面封装技术和超疏水涂层被视为潜在解决方案。在MEMS领域,低摩擦

可能导致振动失控,需平衡界面性能与结构刚度;宏观工程中, DLC涂层在高速高载下的耐久性仍需提升。动态调控方面,电场通过门电压改变二维材料电子态、应力工程诱导基底形变调控界面失配成为研究前沿。未来需融合多尺度模拟(如量子力学、分子动力学与连续介质力学)和原位表征技术(如透射电镜联用摩擦实验),以攻克环境鲁棒性、规模化制造与实时调控难题,推动超润滑在纳米机器人、太空机械等领域的实际应用。

这一历程从理论预言起步,历经实验验证、材料创新与技术整合,最终指向跨学科协同与工程落地的未来图景,其核心突破始终围绕“无公度接触”机制展开,并为低能耗器件设计提供了革命性范式。

3 仿生超润滑防冰涂层材料

WONG等从猪笼草中获得灵感,首次提出并设计了注入液体型多孔光滑表面(Slippery liquid-infused porous surface, SLIPS),它可以借助注入液体的超润滑性,大幅降低冻结后冰层的粘附强度(SLIPS结构如图2所示),近年在防冰材料领域备受瞩目,成为航空航天,发电运电等领域的明星材料。

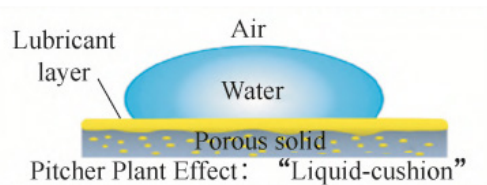


图2 SLIPS结构

SLIPS的超润滑表面的防冰机制可以简单概括为降低结冰粘附力和防止液滴凝结两个方面。粗糙度显著影响冰粘附力,冰附着力越低,除冰所需的能量越少。SLIPS降低冰粘附力可以部分归因于低滚动角产生的液滴的高流动性,直径小于600 μm的水滴在形成冰核之前在重力、风力或者振动作用下脱出表面。有助于降低冰粘附的另一个效应是由于拉普拉斯压力增加而使基底排列的锥形微纳突起结构更好地保留润滑剂,利用液体超润滑现象减少阻力维持更平滑的基底/冰界面,推动水滴定向运输。而防止液滴凝结则是润滑液体注入表面显著增加了过冷能力从而抑制冰成核。

为保证涂层防冰性能, COURBIN等提出了构建超润滑表面的3个原则:①润滑液必须润湿且良好匹配基底;②润滑液和被排斥的液体必须不混溶;③固体基质必须对润滑液具有更高的亲和力。

超润滑涂层根据填入物质主要分为两种类型:油基润滑涂层和水基润滑涂层。油基润滑层主要由具有疏水性的高分子聚合物(如石蜡、硅油、全氟聚醚等)构成,通过对基底进行改性,可以在固体表面上形成油性润滑层,借助多孔结构锁住注入的润滑剂,形成了低剪切界面显著减小阻力。将超润滑石蜡涂层应用于防冰涂层上,石蜡层表面受损在一

段时间后仍可恢复疏水性, 保证其包裹元件的性能。

水性超润滑涂层, 其润滑剂主要水、离子液, 由于离子效应, 能够通过水的吸附、冷凝以及冰的融化实现自我修复与补充, 同时有效地减少冰粘附力, 兼顾环保与经济。通过使用高吸水性和亲水性聚合物对基底进行改性, 可以在固体表面上形成水性润滑层。CHEN 等将聚二甲基硅氧烷 (PDMS) - 聚乙二醇 (PEG) 两亲性共聚物通过旋涂混合到聚合物涂层中。两亲性共聚物中的 PEG 组分能够与水分子形成强氢键, 形成界面不可结冰水, 起到自润滑界面液层的作用, 该涂层具有约 50 kPa 的低冰粘附强度。使用水或类水液体作为润滑剂的超润滑涂层, 适用于包括粗糙表面在内的大部分表面, 但其温度低于 $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时防冰失效, 冰粘强度难以达到除冰所需的阈值工程需求, 且存在大风大雨等动态载荷下润滑剂容易流失导致性能下降的问题。

4 总结展望

超润滑研究正是从基础理论向工程应用过渡的重要时期。目前, 固体超润滑的研究热点集中在对超润滑理论机制的探索。固体超润滑技术迈向实际应用还有很多限制因素, 如: 需要苛刻的环境条件 (真空、惰性气体等) 和复杂的加工工艺等; 需要超光洁、完美无缺陷的晶体表面, 难以在宏观尺度下实现, 成本昂贵难以产业化生产; 微观 - 宏观尺度下的摩擦学机制有较大差异, 甚至完全不同, 致使微观尺度下获得的超润滑机理在宏观下失效, 这对宏观生产也有较大的限制性, 有关超润滑微观 - 宏观联系的理论仍需更新完善。

相比之下, 液体超润滑因为生产环境要求较低、工艺流程简单、原料廉价等经济学优势, 使其有望比固体超润滑更早实现工程应用。然而, 液体超润滑由于界面复杂性、动态特性、电磁敏感性、溶液 / 介质敏感性和除冰性能等, 其机理研究和后续优化要比固体超润滑难得多。例如, 尽管在纳米尺度, 水合层润滑被证实是一种非常有效的液体超润滑除冰实现方式, 但这一机制难以突破的低温失效和润滑剂流失问题使其难以适用于指导实现宏观尺度下的液体超润滑材料。

目前学界基本公认超润滑, 在原子尺度理解摩擦学机理是控制机械系统摩擦学行为的前提, 因此后续对摩擦学机理的进一步探索仍将是超润滑技术研究领域的热点之一。同时, 目前的研究在一定程度上忽略了表面化学、物理效应对

摩擦能耗散 (直接影响摩擦力) 的影响。对于固体超润滑, 解决苛刻环境依赖性、完美表面依赖性、低载荷耐受性和微观 - 宏观摩擦学机理不一致等问题, 是将固体超润滑推向工程应用不得不越过的障碍。对于液体超润滑, 其更加复杂的润滑机理, 对不同界面、介质、环境、工况等条件下的超润滑机理的研究和材料性能的优化仍将是未来几年的工作重点。另外, 超润滑技术对材料结构设计做出的新贡献、提出的新要求也将在其获得工程应用前推动产生很多新的研究方向。

参考文献

- [1] Hod, O., Meyer, E., Zheng, Q. et al. Structural superlubricity and ultralow friction across the length scales. *Nature* 563, 485-492 (2018).
- [2] Hirano M, Kuzumasa S. *Physical Review B*, 1990, 41, 11837.
- [3] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. *Science*, 306, 2004, 666-669.
- [4] Tomlinson G A. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1929, 7(46), 905.
- [5] LIU Xingguang, ZHANG Kaifeng, ZHOU Hui, FENG Xingguo, ZHENG Yugang. Development status of superlubrication technology[J]. *Materials Herald*, 2021, 35(9): 9150-9156.
- [6] Jiao Weiwei, Hou Chunli, Zou Min, et al. Research status and development direction of superlubrication technology[J]. *Materials Herald*, 2021, 35(S1): 476-480.
- [7] Filippov, A. E., Dienwiebel, M., Frenken, J. W. M., Klafter, J. & Urbakh, M. Torque and twist against superlubricity. *Phys. Rev. Lett.* 100, 046102 (2008).
- [8] Leven I, Krepel D, Shemesh O, et al. Robust Superlubricity in Graphene/h-BN Heterojunctions[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013, 4(1): 115-120.
- [9] Trambly de Laissardiere, G., Mayou, D. & Magaud, L. Localization of Dirac electrons in rotated graphene bilayers. *Nano Lett.* 10, 804-808 (2010).
- [10] Yiming S, Davide M, Oded H, et al. Robust microscale superlubricity in graphite/hexagonal boron nitride layered heterojunctions[J]. *Nature Materials*, 2018, 17(10): 894-899.