

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

D40-润滑密封与耐磨材料分会
D40-Lubricating, sealing and
wear-resistant materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D40. 润滑密封与耐磨材料分会**分会主席：周峰、伏喜胜、宋克兴、姚萍屏****D40 -01****高端装备润滑涂层材料与技术**

周峰，于波，吴杨，于强亮

中国科学院兰州化学物理研究所

在航空航天、海洋工程和轨道交通等高端装备领域，机械部件面临极端温度、腐蚀、高负荷与磨损等苛刻条件。为此需要长期稳定的润滑以避免发生严重的磨损或卡咬。润滑油脂会因热降解、化学腐蚀、机械剪切等多重破坏机制的协同作用，性能急剧劣化，难以满足服役需求。而固体润滑涂层具有优异的综合性能，不仅具有卓越的稳定性、出色的环境耐受性，更能实现长效的服役寿命。针对典型的应用工况，通过分子设计、表面修饰、大分子接枝与交联、功能组分复配、固液复合等策略，我们发展了一系列润滑防护涂层材料，揭示了各因素与涂层性能的内在关系，阐明了苛刻环境下涂层的润滑延寿机制，为高端装备润滑防护涂层的制备提供实验依据和理论指导。其中多项技术获得了工程应用，解决了装备的润滑防护难题。

D40 -02**烃类基础油的摩擦化学活性**

欧阳楚可，田煜*

清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室

在传统认知中，不含杂原子的分子（如烃类）缺乏摩擦化学活性。烃类通常被视为“基础油”，主要作为添加剂的溶剂、摩擦热传导介质及黏度提供者，而不被视为摩擦化学反应物。本课题组在研究发现，多种烃类液体在摩擦作用下具有显著的摩擦化学活性。特定工况下，烃类的摩擦化学反应活性甚至可高于二烷基二硫代磷酸锌（ZDDP）等含硫、磷、金属的添加剂。纯烃类液体 PAO8 可在数秒内形成抗磨摩擦膜，而 ZDDP 通常需要数分钟。PAO8 的活化能(E_a)测量值约为 40 kJ/mol，显著低于 ZDDP 的 77 kJ/mol（报道于 Science, 2015）；其活化体积为数 $\text{\AA}^3$ 与烃类链段体积相符。PAO8 生成的摩擦膜使得其磨损率降低了两个数量级，从 $10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ 降至 $10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ 。在特定工况下，纯烃类油的抗磨性优于成品油或含 ZDDP 等添加剂的烃类油。烃类的摩擦化学反应机理与金属催化和自由基反应有关。经摩擦晶粒细化的钢摩擦副表面可以催化烃类油生成摩擦膜，而碳-碳键断裂及碳自由基的生成应为摩擦化学反应的关键步骤。不含杂原子的分子的摩擦化学活性的揭示，可望为开发环保型润滑油提供新的设计思路。

D40 -03**电磁轨道发射枢轨摩擦副表面层时空演化机制及表面防护研究**

姚萍屏

中南大学

电磁轨道发射技术是实现超高速电磁发射的首选方案，在军事装备和高速推进等领域展现出巨大的潜力。其中，枢轨摩擦副作为电磁轨道发射系统的核心部件，在极端电-磁-热-力强耦合条件下面临了严重的载流摩擦磨损问题，直接影响系统的发射效率与使用寿命。以 CuCrZr 轨道/7075 Al 电枢为摩擦副材料，通过开展极端条件下发射实验，研究了枢轨摩擦副材料载流摩擦磨损的时空演化机制，探索了摩擦副表面层的物理力学性能演变机理，通过表面防护设计改进的枢轨摩擦副能有效改善摩擦副的载流摩擦磨损状态。研究结果如下：（1）实际发射轨道表面的磨损机制沿着发射方向由机械磨损为主转变为电气磨损为主。根据发射时电枢在轨道对应速度位置上的轨道表面及电枢表面的磨损状态，形成了枢轨摩擦

副表面层的时空演化机制及其对应模态。(2) 轨道表面沉积层与轨道基体界面存在扩散行为, 沉积层与基体之间由于扩散程度不同导致的界面状态及沉积层中 Cu/Al 金属间化合物组成状态随着轨道不同位置发生变化, 揭示了摩擦副表面层的纳米压痕硬度、弹性模量、沉积层与基体的界面结合强度及枢轨接触电阻等典型物理力学性能的演变机理。(3) 基于枢轨摩擦副材料表面层的时空演化机制, 阐述了枢轨表面的防护机制, 并开展了枢轨摩擦副表面防护的设计、制备及载流摩擦环境下的模拟与实验测试研究: 轨道表面处理能有效减小轨道的最大磨损深度; 电枢表面处理后熔融损伤占比及质量损失较未处理均得到有效降低。该研究可为电磁轨道发射高精度动力学模型的建立及高性能枢轨摩擦副材料的开发提供理论依据与有效指导。

D40 -04

滑动电接触磨损理论建模研究

王文中^{1*}, 隋义瑾², 张海波¹

1. 北京理工大学 机械与车辆学院
2. 大连海事大学 轮机工程学院

随着航天、高铁等技术的快速发展, 导电滑环、电磁弹射和电磁传感器等关键装置的研发受到了广泛关注。其中导电材料等是其基础材料之一, 热力电磁多物理场环境是其典型服役环境。这些装置表现出的摩擦磨损特性不仅仅是机械、电等载荷的简单叠加, 而是热-力-电多个物理场互相耦合的结果。本文基于半解析法建立了充分考虑导电斑点不规则形状和斑点间相互作用的粗糙表面收缩电阻求解模型, 提出了电流分配算法求解未知的电流密度分布; 进而推导了关于热、力、电载荷激励的频率响应函数, 提出了基于半解析法的粗糙表面多场耦合滑动接触问题高效求解方法。基于能量耗散原理建立了多场耦合滑动电接触磨损模型, 研究了滑动电接触磨损演化以及电流、法向力、滑动速度等工况条件对滑动电接触磨损的影响。

D40 -05

仿生摩擦学

郭志光^{1,2*}

1. 湖北大学 材料科学与工程学院
2. 中国科学院兰州化学物理研究所

大自然中的植物和生物经过几亿年的进化, 在这一过程中通过不断的进化, 演化和优化, 其结构和功能为了适应环境而不断地发生着演变, 有些生物体为了适应其生存环境, 表面已逐步形成各种规则的粗糙结构, 且呈现出优异的功能, 如超滑、自修复、耐磨和超润湿等。这些性能对于摩擦学的发展提供了研究基础和仿生思路。但是仿生摩擦学发展至今, 虽然取得了长足的进步, 如超滑表面在实验室重现, 且其润滑机理基本确定; 仿生荷叶性能的超润湿表面也在近 20 年得到高速的发展等。但是与自然相比, 我们所构造的仿生摩擦学材料依然存在着一定差距, 如生命自修复性, 原子级别的上摩擦机理还有待进一步探讨。作者基于 20 多年的仿生摩擦学研究经验, 并结合当前世界仿生摩擦学领域的前沿动态, 深入剖析了全球及中国在该领域面临的机遇与挑战。同时, 作者期望通过分享自己的观点与见解, 为未来 10 年仿生摩擦学的发展提供有益参考, 并贡献自身力量。

D40 -06

燃气涡轮发动机海洋环境热障涂层

赵泓旭^{1,2}, 张小锋^{1*}, 吕伯文^{1*}, 毛杰¹, 刘敏¹

1. 广东省科学院新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室, 广东 广州 510650
2. 中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙 410083

燃气涡轮发动机是大型舰船、舰载机、近海电厂及海洋平台的核心能源动力装备，需在高湿热、高盐分的海洋环境中长时稳定服役。随着涡轮进口温度的不断提高，热障涂层成为热端部件不可或缺的表面防护手段。长期以来，我国热障涂层研究主要聚焦于高温服役性能，面向海洋应用的相关研究十分欠缺。由于海洋服役环境与陆基环境显著不同，针对陆基环境发展的现有热障涂层材料体系与制备工艺不能完全适用。传统 YSZ 热障涂层在海洋环境中结构、性能退化和陶瓷层相变、烧结等问题严重影响了燃气涡轮发动机的性能和寿命，发展适应海洋环境的新型热障涂层及其制备技术迫在眉睫。本报告概述了广东省科学院新材料研究所近年来在热障涂层适海性应用方面取得的成果。基于等离子喷涂物理气相沉积 (PS-PVD) 技术制备的羽柱状高应变容限结构热障涂层，阐明了模拟海洋高湿热、高盐分条件下热障涂层多尺度界面/结构退化机制。在此基础上开发了新型高抗腐蚀稳定性热障涂层材料体系，发展了梯度应变容限阻渗结构调控技术以及表面原位镀铝改性技术，并自主搭建了模拟海洋环境多功能试验平台，为海洋环境热障涂层应用提供了基础与指导。

D40 -07

含刺激响应微胶囊复合材料的合成与摩擦学性能研究

王廷梅^{*}，保亮，王成坤，唐张张，王齐华

中国科学院兰州化学物理研究所

开发低摩擦系数、低磨损率和高承载力的聚合物润滑材料在航天航空和先进工程机械等领域中具有重要意义。微胶囊是 1 种新型的智能固油复合润滑材料，利用聚合物或无机壳将润滑油包覆在壳内部，可以实现润滑油在运行过程中按需释放和智能释放。本研究以 PFOTES/ Fe_3O_4 粒子稳定的水包油乳液为模板，采用溶剂挥发法制备负载 PAO10 的磁性 PAO10@PSF/ Fe_3O_4 微胶囊(MMC)，并将其嵌入环氧树脂 (EP) 中制备自润滑复合材料(EP/MMCs)。在摩擦过程中不仅形成了润滑油膜，还利用胶囊内部润滑油与壳层 Fe_3O_4 纳米颗粒实现了固液协同润滑效应，当微胶囊质量分数为 20% 时，EP/MMCs 的摩擦系数和磨损率分别为 0.06 和 $3.5 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ ，与纯环氧树脂相比，EP/MMCs 磨损率分别降低了 91.2% 和 92.9%。此外，由于 Fe_3O_4 纳米颗粒的光热转换效应，该复合材料在近红外光刺激下可实现不同摩擦系数之间的可逆切换。更重要的是，利用纳米填料的磁响应可以调节不同位置的摩擦学性能。这种材料不但有望被应用于智能润滑和密封等领域中，还为润滑复合材料的设计提供了研究思路。

D40 -08

东风马赫动力混动专用发动机关键技术研究

管永超

东风汽车集团有限公司研发总院

国内乘用车新能源汽车渗透率即将突破 50%，预测 PHEV 和 REEV 混动车在 NEV 中占比将达到 40%~50%，同时出口车型中，PHEV 和 REEV 混合动力车型增速远高于 BEV 车型。当前国内混动专用发动机热效率已经达到行业领先水平，高效燃烧系统、低压冷却 EGR、低摩擦、高效热管理等先进技术已经量产。东风马赫动力混动发动机聚焦高效化、电动化和智能化研发，打造混动专用发动机技术平台，研发了长冲程快速燃烧技术、智能化热管理技术、超低减摩技术、高效 VGT 增压技术等关键技术，实现混动高效发动机和氢气发动机热效率 $\geq 45\%$ 。面向低碳零碳燃料，东风将继续研究马赫混动发动机技术，开发低碳零碳混动发动机，聚焦氢气发动机燃烧技术、曲轴箱通风技术、润滑技术攻关，推进氢气发动机示范运营。

D40 -09

航空轴承表面抗损伤设计

张传伟^{*}，王黎钦，古乐

哈尔滨工业大学

极端复杂工况下航空轴承经常发生表面失效,严重影响其使用寿命和可靠性。而轴承表面失效与轴承动力学、热响应、表界面润滑和摩擦等行为密切相关。本文主要从极端复杂工况轴承动态响应、表界面力-热-材料耦合作用等方面,阐明高接触压力、瞬时高温和高滑动速度耦合效应下的轴承典型失效机制,并提出轴承典型失效预测方法和判据。首先,利用轴承六自由度完全动力学模型,分析高速/变速、重载、冲击和振动等复杂条件下轴承的接触和运动行为,获取轴承时变接触压力、保持架转速和滚道滑动速度。在此基础上,研究轴承润滑状态和表面疲劳和胶合失效机制:采用 CDM 和 CZM 集成模型,分析轴承接触表面的疲劳萌生和扩展行为,并考虑沿晶和穿晶损伤演化的影响,对表面起源的点蚀失效和次表面起源的剥落失效进行预测;基于摩擦诱导的绝热剪切失稳理论,分析高温高剪切作用下轴承表面胶合失效机理,讨论摩擦功和塑性变形能产生的近表层材料热软化效应。基于绝热剪切过程中热软化率和加工硬化率平衡,提出轴承表面胶合失效的定量判据。

D40 -10

共价有机框架材料:新型高性能润滑油添加剂的设计与摩擦学性能

凡明锦*, 文平, 董瑞

宝鸡文理学院

随着现代工业装备向着大推力、高扭矩、高承载、长寿命方向的发展,传统润滑油添加剂(如硫磷型化合物)面临高温失效、法规限制及多功能不足等的瓶颈,开发兼具优异润滑性能、结构可编程和环境友好的新型润滑油添加剂已成为摩擦学研究的关键挑战。共价有机框架材料(COFs)作为一类新兴的晶态多孔纳米材料,凭借精准可控的分子骨架、超高的比表面积、丰富的活性位点及出色的力学强度,在润滑油添加剂设计与润滑性能改善中展现出独特的优势。针对交通运输、航空航天等领域对高性能润滑材料的迫切需求,本团队围绕 COFs 纳米材料的结构设计、界面作用机制及摩擦学性能优化等开展了系统性研究。主要进展如下:(1)基于溶剂热法制备出三嗪基共价有机框架纳米片,并首次应用于润滑油添加剂,发现配位作用能高效地增强 COFs 所成润滑膜的稳定性;(2)设计并制备出多羰基共价有机框架纳米材料,发展了配位作用、氢键作用及离子- π 相互作用协同调控摩擦学行为的机制,为解决高极性润滑油与添加剂之间竞争吸附成膜提供了思路;(3)开发出酰亚胺基三嗪共价有机框架纳米材料,通过供-受体调控能带间隙实现摩擦副表面 Z-型异质结润滑膜的建立,为半导体材料加工中的润滑提供新的思路。

D40 -11

高端装备橡塑动密封技术的创新发展与应用

彭旭东

浙江工业大学 高端装备摩擦学与流体密封技术研究所

简述了高端装备橡塑动密封技术的主要用途、密封机理和发展历程,剖析了特种高端装备和新能源领域高端装备橡塑动密封的常见典型失效案例,从我国重点/重大工程与战略需求出发,着重叙述了典型特种高端装备橡塑密封研究与开发中应注意的创新途径,结合实际案例提出了个人的几点肤浅认识,展示了经典应用成功案例。

D40 -12

高端装备运动机构用自润滑纤维织物复合材料研究进展

杨明明, 张招柱*, 姜葳, 袁军亚, 李佩隆, 刘维民

中国科学院兰州化学物理研究所

随着航空装备和技术的高速发展,装备的服役寿命和极限使役性能不断提升和突破,轴承在其中扮演的角色也越来越突出。自润滑关节轴承是 1 种球面滑动轴承,主要由两个带球面的内外圈和外圈内表

面的自润滑衬垫材料组成, 该类轴承能够承受轴向载荷、径向载荷和复合载荷的作用, 同时可以在一定的角度内做摆动运动。自润滑关节轴承的结构特点赋予其结构紧凑、耐冲击、重量小、免维护、可靠性高和长寿命等优点。目前, 在国内外先进航空型号起落架、旋翼系统, 航空发动机难维护部位及无油脂润滑部位广泛使用。自润滑纤维织物复合材料在关节轴承中扮演着润滑剂的角色, 它将关节轴承中两个金属球面之间的摩擦转变为内圈外球面对复合材料的摩擦, 其性能直接决定着自润滑关节轴承的服役稳定性和服役寿命。中国科学院兰州化学物理研究所复合润滑材料课题组经过 30 年的持续攻关, 突破了纤维织物坯布组织结构设计、功能纳米材料设计制备等多项关键技术, 成功研制了系列高温重载、低速轻载及高速轻载自润滑纤维织物复合材料, 其中高温重载纤维织物复合材料耐温性达到 300 °C, 动载荷最高 250 MPa, 低速重载纤维织物复合材料动载荷达到 400 MPa, 使用寿命达到 10 万次以上, 高速轻载纤维织物复合材料轴承载荷谱考核寿命达到 1 500 h 以上。

D40 -13

面向高端装备的润滑防护材料关键技术研究进展

胡文敬, 张兆钧, 许健, 李久盛*

中国科学院上海高等研究院

我国先进制造业和高端装备的快速发展, 对高端润滑防护材料的国产化提出了越来越高的要求。立足于合成基础油、高性能添加剂等核心原材料, 实验室开展了一系列高端装备润滑材料关键技术的研发工作, 本报告将对其中主要的工作进展进行介绍, 供行业同仁参考。1、以煤制 α -烯烃为原料, 采用自主开发的茂金属催化体系, 实现了低黏度 PAO 基础油的工业化制备, 并形成了系列知识产权成果。与企业合作实现了低黏度茂金属 PAO 基础油的工业化生产, 填补了国内这一高端润滑油基础油技术与产品的空白; 2、介绍实验室近年来在润滑油添加剂领域开展的工作, 主要包括聚醚胺类、硼化酰胺类、硫化烯烃和含氮杂环类添加剂的结构设计、合成及作用机理探索, 系统研究了添加剂与基础油的复配规律, 并对石墨烯、氧化石墨烯等新型润滑材料的结构与性能进行了探索, 为高端润滑油的国产化提供了科学与实验基础; 3、以价格廉价的混合 α -烯烃为原料, 通过开发新型固体酸绿色催化技术, 绿色制备了两种不同黏度等级的高品质烷基萘 V 类基础油, 并对其性能进行了全面的评价。与企业合作启动百吨级工业化中试示范, 为这一高性能合成基础油的国产化提供了技术支撑; 4、面向国内高端装备的润滑需求, 设计开发了一系列全合成润滑油核心配方并实现了成果转化和工业应用, 推动了高端润滑油国产化进程。

D40 -14

唾液蛋白吸附膜的润滑机制及其在口腔修复材料中的应用

郑靖*, 唐悦, 雷磊, 周仲荣

西南交通大学 机械工程学院摩擦学研究所

唾液润滑对口腔生理学功能至关重要。唾液的润滑功能在很大程度上依赖唾液蛋白在口腔软/硬组织表面通过选择性物理吸附自组装形成的纳米蛋白膜, 但唾液蛋白吸附膜的润滑机制目前尚不明确。本研究采用体外试验, 开展了唾液蛋白吸附膜的润滑机制及其在口腔修复材料中的应用研究。首先, 研究从界面水角度探究了牙齿表面负电性和钙释放特性对唾液蛋白吸附膜润滑行为的影响机制。结果显示, 牙釉质表面负电性通过抑制界面水层, 保证唾液蛋白自组装吸附形成具有双层膜结构的吸附膜, 双层膜结构有利于唾液蛋白水合, 使唾液蛋白吸附膜具有良好的承载、能量耗散和抗剪切能力; 牙釉质表面钙释放则能增加唾液蛋白的吸附位点, 形成的吸附膜兼具刚性和黏弹性, 润滑性能优异。进而受唾液蛋白吸附膜润滑机制的启迪, 采用 Ca^{2+} 作为增润剂、EGCG 作为抑菌剂, 设计制备了人工唾液组合物。基于 Ca^{2+} 对唾液膜润滑行为和细菌活性的影响规律, 研究得到 Ca^{2+} 最佳添加浓度为 6 mmol/L, 亚感知浓度 (0.046 ~ 0.08 mmol/L) 的 EGCG 与 6 mmol/L Ca^{2+} 联用可以在促进唾液蛋白润滑的同时有效抑菌。同时, 受唾液对牙釉质润滑保护的启迪, 采用钙释放和强负电无机填料制备了牙科树脂基复合材料 (RBC), 旨在通过

强化唾液润滑来提高 RBC 的耐磨性能。结果显示, RBC 表面钙释放能促进唾液蛋白的静电吸附, 唾液蛋白吸附膜的润滑性能与钙释放水平呈正相关; 增强 RBC 表面负电性既能抑制界面水、促进唾液蛋白的静电吸引, 又能形成更多的钙桥以连接唾液蛋白。因此, 引入钙释放/强负电无机填料能够促进唾液蛋白吸附与润滑, 是改善 RBC 耐磨性的有效途径。

D40 -15

先进核反应堆润滑材料

王鹏

中国科学院兰州化学物理研究所 润滑材料全国重点实验室

核能作为安全、清洁且高效的低碳能源, 是实现能源与电力可持续发展的重要途径。中国核能发展遵循“压水堆—快堆—聚变堆”三步走战略稳步推进, 而核环境下材料的摩擦、磨损与润滑问题, 是制约商用第三代核反应堆建设、四代堆创新发展及未来聚变核能系统验证的关键技术瓶颈。核反应堆一回路机械部件及材料在服役过程中需承受循环应力、摩擦磨损, 并面临高温、腐蚀及强辐射等极端环境的综合作用, 其可靠性直接影响反应堆安全运行。本研究聚焦核环境下结构材料的摩擦磨损机制与润滑需求, 系统综述了领域内核心挑战, 重点分析了先进核用固体润滑涂层及薄膜的辐照损伤机理, 总结了抗辐照设计与性能优化的研究进展。研究表明, 辐照诱导的材料结构演变与界面失效是制约润滑性能的关键因素, 而多尺度协同设计有望提升材料的耐辐照稳定性。

D40 -16

纳米润滑添加剂应用研究进展

张晟卯*, 张玉娟, 韩坤, 张治军

河南大学

目前纳米材料作为润滑油脂添加剂, 可以有效提升其摩擦学性能, 已为业界所广泛认可, 但是其大规模的工业化应用依然面临许多困难。其中, 关于纳米添加剂的制备工艺、材料组成以及性能和应用等研究进展迅速, 大量相关成果不断被报道。本文从纳米添加剂的制备与摩擦学机制、与传统添加剂的配伍规律、适应特殊摩擦副材料和适应极端苛刻环境等多个方面, 对纳米添加剂的研究进展进行了全面地综述。评述了纳米添加剂所具备的突出功能和应用前景, 并从规模化制备、性能优化和机理研究三个方面指出了在纳米添加剂相关研发领域未来可能出现的新热点。

D40 -17

极端工况下的橡塑动密封摩擦学行为、机理与应用

沈明学*, 王治强, 季德惠

华东交通大学

橡塑密封是防止内部密封介质外泄、抵御外部污染物入侵的“重要屏障”, 其摩擦学性能作为关键性指标甚至直接决定了整套装置的服役寿命。为此, 迫切需要开展极端工况橡塑动密封的摩擦学行为、机理与应用研究。本文详细介绍了课题组近十年来关于极端服役工况下橡塑动密封的摩擦学行为、机理与应用的相关工作, 包括橡塑/金属三体和两体磨粒磨损、宽温域环境橡塑材料性能衰退与加速寿命评估、复杂接触状态下弹性体高频微幅微动损伤及其判据准则以及橡塑密封体系防尘抑漏设计等方面的研究进展。旨在为极端工况橡塑动密封可靠服役与延寿提供理论参考。

D40 -18

基于纤维表界面改性的润滑和密封材料的研究

刘旭庆*

西北工业大学

面向航空航天领域极端工况自润滑轴承长寿命服役的迫切需求,本研究聚焦于解决其核心材料在高压、高温及摩擦耦合作用下界面性能退化机理不明、多尺度耦合复杂、服役寿命可靠性不足等关键瓶颈问题。创新性地以“纤维表界面改性”为核心技术路线,系统开展了织物基高性能聚合物基润滑材料与结构的设计、制备与评价研究。通过精准调控纤维-基体及纤维-润滑剂界面特性,显著提升了材料体系的界面结合强度、载荷传递效率和热传导能力。在此基础上,成功开发出具有连续导热网络结构的长寿命、高导热自润滑轴承衬垫,并制备出关键性能(如耐磨性、密封性、高温稳定性)显著提升的高性能复合密封材料与织物润滑材料。本研究揭示了纤维表界面特性对密封材料及织物润滑材料极端环境性能退化的关键影响机制,为发展兼具耐高温、高承载、长寿命特性的先进聚合物基自润滑轴承衬垫、密封材料及织物润滑材料体系,提供了基于界面工程的新思路 and 重要技术支撑。

D40 -19**基于摩擦信息学的电接触界面形貌数字化表征**

张执南*、周芳芳、尹念、武子帅

上海交通大学

电接触作为电连接器中实现可靠电流传输的核心组件,其性能直接影响电气系统的效率与服役寿命。由于电接触界面是载流功能的唯一载体,从表面微观形貌特征出发揭示其性能变化机理至关重要。表面微观形貌特征主要包括微凸体的曲率半径、水平分布和高度分布。目前,粗糙表面表征主要依赖统计学方法和分形理论,但二者均难以有效表征实际参与接触的微凸体特征。本研究提出基于函数拟合的空间频率法表征粗糙表面,通过截止频率(N)、频谱指数(β)和增益因子(A)等特征参数描微观形貌,有效刻画了微凸体特征,并结合载流模拟验证了该方法相较于传统统计学方法在性能预测方面的优越性。进一步地,利用机器学习算法实现了从粗糙表面形貌到特征参数的智能提取与高精度预测。研究表明,基于函数拟合的空间频率法在电接触载流性能评估、表面精确表征及状态监测等领域具有显著潜力,为电接触界面的多尺度机理研究提供了新思路。

D40 -20**高性能绿色润滑添加剂的设计与分子构效关系研究**

李津津*

清华大学

本研究设计了一系列无磷、无硫的二酯类绿色润滑油添加剂。以苹果酸二辛酯为代表,其作为低黏油 PAO2 的添加剂时,可以将摩擦系数降低 50%,磨损体积降低 87%,其性能优于 ZDDP、油酸等添加剂。该类添加剂优异的性能主要归因于其可以在摩擦副表面生成一层具有低模量、低剪切、低黏附的类石墨结构摩擦膜。该类添加剂优异的性能需要在金属摩擦副表面实现,这主要归因于金属对于小分子的催化作用。金属摩擦副在摩擦过程中会形成单原子态,嵌入在类石墨摩擦膜中,从而促进与小分子的持续传质作用;短链羧酸对应的二酯类化合物可以更好地生成类石墨结构的摩擦膜,从而实现更低的摩擦系数和磨损,这主要是因为该类分子中的酯基可以更好地利用其孤电子对效应稳定摩擦产生的自由基,降低 C-C 键的解离能,从而引发摩擦化学反应,生成类石墨结构。

D40 -21**固液界面摩擦阻力与调控**

曾志翔*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

船舶航行过程中,其能源消耗主要用于驱动螺旋桨产生推力,从而克服船体与水之间的阻力,推进船舶前进。研究团队在仿生滑移界面设计与减阻应用方面做了系统的研究工作。研究了固-液界面分子间相互作用对流体阻力的影响,发现亲疏水异质表面,比单一亲水或疏水表面,固-液界面流体阻力更低。阐明了亲疏水分子异质性降低界面流体阻力的作用机制,亲水分子插入:①降低疏水分子间的链缠结,分子由刚性向类液态转变;②降低固-液-气三相线移动过程中的能垒;亲水分子作用“牵引”液体移动,从而降低流体阻力。提出了界面流体阻力的分子调控策略:通过“瓶刷”分子自组装、静电诱导分子重排等方式,实现分子形态与分布的调控,提升界面滑移特性与减阻性能。发现并证实了基于表面微结构形成的“微涡流”减阻效应;提出了多场耦合微结构设计思路,大面积制备了具有仿生微结构的舰体表面材料;发展了微结构与柔性层耦合减阻技术,在水压和水流作用下微结构和柔性层形成自适应微结构,从而在高雷诺数范围实现 10%以上稳定减阻。

D40 -22

非晶及高熵合金的摩擦学性能研究

王海丰*

西北工业大学

高端装备关键运动部件长寿命、高可靠性的服役需求对相关材料在极端工况及交变载荷下的高比强度、耐磨损、低摩擦等性能提出了更严苛的需求。传统结构材料的服役性能已接近理论极限,难以满足严苛技术要求。非晶及高熵合金独特的强化机制使其力学性能组合打破极限,作为高性能结构材料引起了广泛的关注,探究其在潜在应用工况下的摩擦磨损性能及磨损机制对其发展应用具有重要意义。基于此,报告人系统研究了多种非晶/高熵合金的摩擦学性能,发现了三类分别在重载、低温、高温条件下具有优异抗磨减摩性能的非晶/高熵合金材料,并通过纳米摩擦学与宏观摩擦学研究揭示了该类合金的抗磨损与自润滑机理。本研究通过明晰非晶及高熵合金中“成分设计-微观组织-摩擦学性能”多尺度关联机制,发展出熵效应调控、非晶-晶体复合结构设计、原位润滑相构筑等策略,可为服役于严苛环境的新一代耐磨润滑材料设计提供一定借鉴。

D40 -23

水基全合成金属加工液关键组分的创制、作用机制及应用

蔡美荣^{1,2*}、刘骁²、周峰¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所
2. 烟台先进材料与绿色制造山东省实验室

水基金属加工液凭借其冷却性能优异、清洁效果好、难燃、导热系数高、来源广范等优点已经成为高端装备关键零部件制造过程中不可或缺的配套材料。然而,目前高性能水基金属加工液产品仍主要依赖进口。因此,为满足高端装备零部件加工过程中的润滑需求,避免“卡脖子”问题,本研究通过合理的分子结构设计,合成了多种离子型水基润滑添加剂,包括极压润滑添加剂、增黏减摩抗磨添加剂以及具有良好生物降解性能的氨基酸基绿色润滑添加剂。通过浸没腐蚀试验、黏度测试和 SRV 摩擦试验分别对添加剂的抗腐蚀性能、运动黏度和摩擦学性能进行了表征,采用 ECR、QCM、SEM、NR、ToF-SIMS 和 XPS 分析对添加剂的润滑机理进行了考察。研究表明,极压润滑添加剂不仅可使水的摩擦系数和磨损体积分别降低约 75%和 90%,还能将水的 SRV 失效载荷提高至 1 300 N, PB 和 PD 分别达到 3 090 N 和 4 905 N。增黏减摩抗磨添加剂不仅能大幅度提高水基润滑液的摩擦学性能,还能使其黏度增加两个数量级以上。此外,所制备的氨基酸基绿色润滑添加剂可使水的摩擦系数和磨损体积分别降低约 70%和 92%,同时在 28 d 降解周期内,氨基酸基添加剂可达到 90%以上的降解率。机理研究结果表明,界面处生成的摩擦化学反应膜和分子吸附膜协同作用,赋予水基润滑液优异的摩擦学性能。利用已发展的添加剂为核心组份,开发了多款高性能生物稳定性全合成水基金属加工液产品,已获得规模化应用。

D40 -24

流体动压润滑下乳化液迁移特性及界面影响机理研究

韩素立*

青岛理工大学

乳化液在轧制及金属加工领域有广泛的应用，应用工况中包含流体动压润滑过程。采用面接触测量设备探究了不同浓度乳化液的迁移特性、成膜规律、油水两相的竞争润湿行为及乳化液的摩擦特性。主要研究内容包括：(1) 选用自制(乳化液 A)和商用(乳化液 B)两种乳化液，对其性质进行测量，并表征乳化液参数随浓度的变化。结果表明，随水含量的增加，乳化液黏度先上升后下降，发生水包油到油包水的流型转变，转变前后浓度出现黏度峰值，不同乳化液出现峰值浓度不同；乳化液滴粒径大小不一，但随水含量增加，乳化液滴平均粒径逐渐减小。(2) 研究流体动压效应中乳化液 A、B 成膜厚度及乳液池迁移行为，总结分析乳化液润滑共性规律。结果表明：低副接触下乳化液液滴有 3 种行为：I 类液滴粒径大于入口间隙，在接触区前发生破裂，油相通过离水展着方式进入接触区形成油膜，水相从滑块两侧流走；II 类液滴可直接进入接触区，其中粒径接近入口间隙者在接触区内部以同样方式被剪切破裂，粒径较小者可完整通过接触区，且允许通过粒径大小和卷吸速度正相关；III 类液滴直接绕过接触区从滑块两侧逃逸，进入下一次润滑。(3) 设计双色荧光法试验，选用两种荧光探针分别标记油水两相，观察乳化液润滑状态，研究润滑过程中油水竞争润湿行为。结果表明：在充分供油条件下，随卷吸速度的增加，更多乳液被卷吸进入接触区，导致油膜厚度增大。三种表面润湿性不同，导致油膜厚度不同，AF 表面膜厚大于钢块表面大于 FAS 表面；通过观察油水两相竞争吸附行为，油相主要堆积在入口处，而水相主要堆积在乳液池边缘。随速度增大水相主要对油相起运输作用，而油相则随速度增大进入接触区对膜厚起支撑作用。在乳化液环境中，油相分子优先黏附于固体表面形成有效油膜。(4) 探究不同速度工况下乳化液的成膜机理和摩擦特性，得到以下结论：去离子水在润滑过程中的摩擦力随速度增大先降低后升高，从混合润滑转变到流体动压润滑状态。而不同浓度乳化液摩擦力规律相对复杂，其润滑状态不同，随乳化液浓度的增大，出口区混合润滑状态持续时间减小；乳化液油相中的表面活性剂黏附在固体表面，导致油-水界面张力下降，进而使水相将所黏附的油相置换，所以水相可以进入接触区，水相含量达到一定程度会导致摩擦力和膜厚的降低；钢块接触区磨损程度随乳化液浓度的升高而下降。

D40 -25

新能源汽车电驱减速箱润滑关键技术及应用实践

李成*、石啸、张国茹、赵海鹏、雷凌

中国石化润滑油有限公司北京研究院

汽车电动化发展成为汽车工业重要的发展方向，油冷电机润滑技术成为电驱减速箱核心重要技术之一。本报告聚焦电动化油冷电机关注的系统性油冷润滑冷却关键技术，开展技术开发及产品应用实践案例分享，旨在促进行业共同进步。通过创新的材料分析技术及模型建立对油冷电机润滑油与各种接触材料、可能性的混用油品等相对材料之间，进行早期风险识别；从润滑油组分角度，分析润滑油组分结构对电驱效率的综合影响，提出综合性能全面、传动效率极致的润滑冷却方案，相比高黏度油品系统效率超过 1.2%(基于 CLTC 工况)；同时，通过创新的油品寿命模型搭建，在油品应用实践中开展油品使用寿命研究，指导全生命周期油品技术开发。基于行业产品技术开发积累及市场应用推广实践，介绍中国市场在电动汽车润滑油标准体系建设情况，为新能源汽车高质量发展服务润滑力量。

D40 -26

氮化硅陶瓷的润滑减磨策略

乔竹辉*，汤华国，王鲁杰，李彤阳，于源，聂保阔

中国科学院兰州化物物理研究所

氮化硅 (Si_3N_4) 陶瓷因高强高韧耐温耐蚀等制备陶瓷滚珠、陶瓷密封环、陶瓷滚轴等部件的首选材料之一, 而其耐磨性成为这些部件能够长久稳定的关键因素。基于此, 团队通过软金属、难熔金属、Max 相、网络结构设计等策略实现氮化硅陶瓷在不同温度下的减磨和自润滑效果。软金属的引入侧重于中高温的塑形润滑。难熔金属表现出改善磨屑成膜减少室温下的磨粒磨损。Max 相则通过改善材料力学性能角度提高耐磨性。网络机构的设计可通过改善氧化通道, 主动氧化形成润滑效果。不同策略之间机制不同, 为氮化硅陶瓷的润滑减摩提供一定参考。

D40 -27

磨损失效过程耐磨钢应变能变化与失效判据

山泉^{1*}, 黄沁源¹, 王春建², 李祖来¹

1. 昆明理工大学 材料学院
2. 云南省分析测试中心

本研究聚焦耐磨钢滑动磨损过程中的应变能演化规律, 提出以晶格应变能密度作为材料失效的微观判据。通过 X 射线衍射分析发现, 材料初始态晶格应变能受制备工艺影响, 而失效态应变能趋近恒定值 (约 1.42 J/cm^3)。基于此建立耐磨钢设计三原则: 提升硬度/韧性、降低初始应变能、增强应变能吸收能力 (如 TRIP 效应与第二相强化)。优化后的 M400 钢验证了理论模型, 其应变能阈值显著提高, 微观组织调控有效延缓磨损失效。研究为从能量视角解析材料失效机制提供了新方法。

D40 -28

航空关节轴承用耐高温自润滑织物衬垫设计及摩擦学性能研究

袁军亚

中国科学院兰州化学物理研究所

航空和武器装备飞行速度的快速提升对自润滑关节轴承的高温服役性能提出了更高的要求, 作为其关键部件, 自润滑织物衬垫材料的高温摩擦磨损性能直接决定了轴承的高温服役寿命及运行稳定性。本项目瞄准自润滑织物衬垫高温工况稳定运行的需求, 根据织物衬垫材料结构组成特征, 采用单宁酸辅助共沉积技术在织物表面预沉积单宁酸/陶瓷纳米颗粒/聚乙烯亚胺涂层, 完成织物表面复合功能界面相的构筑。复合功能界面相在增加织物表面反应基团、粗糙度的同时, 完成陶瓷纳米颗粒在织物表面的均匀沉积, 实现衬垫材料界面修饰和纳米增强的一体化。通过本项目研究, 掌握复合功能界面相的设计制备及性能调控技术, 明确复合功能界面相的结构组成与织物衬垫界面粘接性能、热性能、转移膜结构的关联机制, 揭示其提升自润滑织物衬垫高温摩擦学性能的协同作用机理, 为解决高温工况下自润滑织物衬垫的润滑失效及拓展其应用领域提供技术支持和理论参考。

D40 -29

深井提升高速重载安全制动关键技术研究

王大刚^{1*}, 葛世荣², 张德坤¹

1. 中国矿业大学
2. 中国矿业大学 (北京)

矿井提升机是井工矿井连接地面和井下的咽喉设备。随着深部资源的开采需要, 大型、高速、重载是深井提升装备的研发方向。深井高速重载提升过程中大惯量、大摆动和大振动特性易导致高速重载制动过程中制动力矩大、制动平稳性差和制动安全可靠差等难题, 进而造成制动冲击、滑绳事故和过卷事故。为此, 本文考察了深井高速重载大惯量提升机安全制动控制方法, 研发了高摩擦性能的制动闸瓦材料, 提出了同步多通道恒减速智能制动可靠性保障技术, 形成的深井提升高速重载安全制动关键技术对保障深井提升系统高速重载安全可靠运行具有重要理论和实际意义。

D40 -30

基于微弧氧化的铝合金表面耐磨涂层设计与性能研究

赵盖*

南京航空航天大学

铝合金由于具有高强度比而被大量应用于航空航天等领域，但耐磨性和耐腐蚀性能不足严重限制其广泛应用。为了提高其耐磨性和耐蚀性，表面功能涂层的设计尤为重要，微弧氧化因具有原位可设计、硬度高、膜层厚等优势而被广泛应用于铝合金表面耐磨处理，普通氧化使其表面生成氧化铝陶瓷相，为了调控其摩擦磨损性能，在电解液中可加入纳米颗粒和固体润滑剂原位生成氧化铝复合薄膜。还可以在微弧氧化后构筑有机耐磨涂层，或者利用光固化 3D 打印的方式构筑具有表面织构的有机耐磨涂层。通过系统研究表面涂层微观结构、表面硬度、耐磨性和耐蚀性，优化设计微弧氧化电参数、电解液成分、改性剂种类和表面织构类型等特征参数。

D40 -31

木质基自润滑材料的结构调控及其摩擦学性能研究

宋浩杰，陕志强，贾晓华*

陕西科技大学

随着科学技术的发展，兼具经济和环境效益的可持续、可回收和可降解的聚合基体逐渐收到重视。尤其是源可再生资源的木质基复合材料在摩擦学领域的发展为制备新一代纸基自润滑材料提供了思考。基于此，为解决木质材料在摩擦过程中表现出的低硬度、高摩擦系数、低的机械强度和差的热稳定性等缺陷，开发出轻质高强，高耐磨的多功能木质基自润滑先进复合材料。本文从微观尺度出发，采用深共晶溶剂（DES）封装处理废弃木粉，实现木质素-纤维素（LC）的溶解和原位重组，获得了具有优异耐磨性能的木质基体材料。而后使用 LC 辅助原位剥离鳞片石墨，利用木质素分子和石墨层之间的非共价和 π - π 相互作用以及微观尺度的摩擦力和机械剪切应力促进了石墨烯纳米片的原位剥离，进一步增强了 LC 基体的自润滑性能和整体强度，同时构建的导热网络提升了摩擦热在基体中的传递和摩擦能量耗散。

D40 -32

光固化 3D 打印聚酰亚胺自润滑复合材料

王晓龙*，郭玉雄，吴涛

中国科学院兰州化学物理研究所

3D 打印聚酰亚胺集聚酰亚胺优异综合性能与 3D 打印复杂结构成形特点于一体，在高端装备、微电子、精密构件等方面具有良好的应用潜力。目前，相关研究主要集中在基于熔融沉积工艺（FDM）的 3D 打印聚酰亚胺方面，而精度高、应用广泛的光固化 3D 打印聚酰亚胺研究因受限于基础树脂缺乏而相对较少。近年来，我们通过在聚酰亚胺分子链端和侧基引入不饱和双键的策略成功制备了具有良好光敏性能的聚酰亚胺齐聚物，并以此为基础发展了性能优异的光固化 3D 打印聚酰亚胺墨水，实现了高性能聚酰亚胺的高精度光固化 3D 打印成形，并针对其作为运动零部件润滑性能不足的缺点，分别通过引入固体和液体润滑剂的方式实现了具有自润滑特性的光固化 3D 打印聚酰亚胺复合材料，借助 3D 打印层层制造的优势，光固化 3D 打印聚酰亚胺自润滑复合材料在复杂结构零部件制造方面展现出良好应用潜能。

D40 -33

陶瓷/钢铁基耐磨复合材料的微观组织、力学性能及磨损性能研究

张飞，李祖来*，韦贺，山泉，吴迪，杨林

昆明理工大学

针对陶瓷/钢铁基耐磨复合材料在磨损条件下易出现硬度高而界面处易断裂、脆性大等问题，对其钢铁基体和复合界面区域的研究非常重要。首先通过软件对钢铁基体在热处理过程中的温度场进行计算和实验研究。与空冷相比，交替循环淬火后钢硬度和冲击韧性分别从 245 HV 增加到 464 HV 和 28 J/cm² 增加到 50 J/cm²，钢铁基体的强度达到 1 180 MPa 以上，冲击磨损性能提高近 2.5 倍。其次，通过高通量第一性原理计算 WC 陶瓷颗粒增强钢铁基时复合区域的物相组织的界面结构、界面能，计算并实验测试钢铁耐磨复合材料的界面、基体等不同区域的硬度和模量，并对摩擦磨损性能进行研究。通过钢铁基体与 WC 陶瓷颗粒制备的耐磨复合材料，在界面处主要形成 Fe₃W₃C、Fe₆W₆C 等碳化物，微观组织对钢铁基复合材料摩擦系数、磨损率有显著影响，研究可为陶瓷/钢铁基耐磨复合材料的开发应用提供参考依据。

D40 -34

长耐久电子水泵滑动轴承配副材料摩擦学与振动特性研究

周先辉*

南阳理工学院

数字化转型与绿色低碳政策背景下，智能液冷散热技术对液冷系统关键零部件的工作寿命提出了长耐久要求。外转子湿式结构电子水泵滑动轴承长期浸泡在防冻液中工作，轴颈磨损及由此导致的转子系统振动加剧和异响成为泵的主要失效形式。为改善滑动轴承配副材料的性能，采用销-盘端面摩擦磨损试验方法研究了短切碳纤维改性聚苯硫醚(SCF/PPS)-4Cr13 不锈钢配副、SCF/PPS-SiC 配副和酚醛石墨-4Cr13 不锈钢配副的摩擦学行为，考察了配副在干摩擦、浸乙二醇型防冻液条件下的摩擦学性能、摩擦磨损机理和摩擦振动特性。结果表明：(1)干摩擦条件下，SCF/PPS 复合材料与 4Cr13 配副时的平均摩擦系数 0.255，与 SiC 配副时的平均摩擦系数降至 0.141，酚醛石墨-4Cr13 不锈钢配副平均摩擦系数最小，为 0.123。SCF/PPS 复合材料对偶件中，4Cr13 不锈钢磨损面磨粒磨损严重，SiC 磨损率约为 4Cr13 的三分之一。酚醛石墨-4Cr13 不锈钢配副具有较低的磨损率，石墨复合材料磨损面主要体现为层状疲劳磨损，对偶件磨损面附着了一层较厚的摩擦转移膜，主要为轻微的磨粒磨损和氧化磨损。(2)防冻液环境下，三类摩擦配副平均摩擦系数和磨损率显著降低。SCF/PPS 复合材料与 4Cr13 配副时磨损率最低，但对偶件磨损率最大，磨粒磨损严重，摩擦系数随载荷的增大上升快。SCF/PPS 复合材料与 SiC 配副时的摩擦系数和对偶件磨损率最小，摩擦面呈现研磨特征，高载荷下 SiC 表面生成氧化物薄膜，磨损面呈脆性脱落。与 SCF/PPS 相比，酚醛石墨与 4Cr13 不锈钢配副时的磨损率相对较低且随载荷增加的增速较慢，表现出较好的耐磨性能，磨损面主要为黏着磨损和疲劳磨损。(3)三类摩擦副在干摩擦条件下，SCF/PPS 与 4Cr13 不锈钢配副或 SiC 配副时，摩擦振动时域有效值较大，摩擦面间硬质磨粒产生的摩擦力脉动冲击使振动谱线分频成分增加，谱线峰值上升。防冻液工况下，SCF/PPS-4Cr13 不锈钢配副振动有效值随载荷的增加增速较大，SCF/PPS-SiC 配副轻载时具有较低的摩擦振动有效值，酚醛石墨-4Cr13 不锈钢配副在较高载荷时的摩擦振动谱谐波成分少，谱线峰值低，摩擦过程平稳。基于材料摩擦学行为和摩擦振动研究可知，与 4Cr13 不锈钢相比，SiC 有效改善了 SCF/PPS 复合材料对对偶件的磨损，轻载时的摩擦振动有效值低；酚醛石墨复合材料有效提升了配副材料的减摩耐磨性能，载荷较大时配副摩擦振动平稳。SCF/PPS-SiC 配副和酚醛石墨-4Cr13 不锈钢配副可作为不同条件下长耐久电子水泵滑动轴承的优选配副材料。

D40 -35

基于机械催化的摩擦表面作用机理研究及性能调控

乔旦

中国科学院兰州化学物理研究所

在不同的运动机构中，摩擦界面间润滑膜的形成是减小摩擦、降低磨损的关键，然而摩擦膜的组成和形成机制尚未明确。因此，基于调控润滑剂摩擦化学反应以提升润滑体系摩擦学性能的思想，从润滑剂分子在基底表面的吸附行为出发，系统研究了不同官能团结构的模型润滑剂分子在界面的吸附行为，

并研究探讨了吸附能与表面能对润滑剂分子摩擦化学反应与润滑性能的影响；而后，对润滑剂分子在摩擦试验过程中的摩擦化学反应机理与反应动力学进行深入研究，从摩擦催化的角度考察了摩擦试验前后分子结构的变化与摩擦过程中温度、金属催化与剪切应力对润滑剂摩擦化学反应速率的影响。同时，多元化设计具有催化效果的二维纳米材料添加剂应用于液体润滑剂中，通过调控滑动界面的摩擦化学反应形成具有优异润滑性能的摩擦膜，进而实现润滑体系性能的优化，本工作为摩擦化学反应机理的研究提供了 1 种新的研究视角。

D4 -36

超低磨损聚乙烯（ULWPE）的耐磨机制及老化性能研究：下一代人工关节承载材料的潜力评估

张亚丽^{1*}，李新乐²，崔文¹，王炜¹，刘瑞娟¹，辛世煊²，靳忠民¹

1. 西南交通大学

2. 中石油石油化工研究院

高耐磨医用聚乙烯是人工关节“卡脖子”的材料，国产关节聚乙烯内衬部件的材料均依赖进口。同时，聚乙烯磨损及磨屑引发的无菌松动是导致人工关节提前失效的首要原因，是制约人工关节行业发展的技术瓶颈。为应对此挑战，中国石油石油化工研究院自主研发了 1 种新型超低磨损聚乙烯（ULWPE）。初步研究已证实 ULWPE 具有优良的生物相容性和优于超高分子量聚乙烯（UHMWPE）的耐磨性能，展现出作为下一代人工关节承载材料的巨大潜力。本研究旨在通过多尺度的结构-性能关联分析和模拟体内老化环境下的性能评估，深入揭示 ULWPE 的耐磨机制及其长期服役稳定性，为其在人工关节领域的临床应用提供科学依据。首先，本研究对三种不同分子量的 ULWPE、两种高密度聚乙烯（HDPE）和两种 UHMWPE 进行了系统的结构表征、机械/物理性能表征和磨损行为测试，研究了不同类型聚乙烯宏微观结构对其机械性能和耐磨性能的影响规律，并通过统计分析揭示了影响聚乙烯耐磨性能的关键结构参数，为 ULWPE 后续临床应用提供系统全面的试验数据支撑和理论依据。研究表明，ULWPE 具有低分子量、窄分子量分布以及独特的长支链结构，主体拓扑结构可能为“Y”型；ULWPE 虽结晶度略低，但片晶厚度显著高于 HDPE 和 UHMWPE，且非等温结晶速率更快，中间相含量和缠结密度更高；高缠结度的 ULWPE 表现出优异的冲击强度和断裂功；ULWPE 整体耐磨性优异，且随分子量增加而提高，其中 ULWPE-700 在不同载荷下均表现出最佳的耐磨性。相关性分析指出，ULWPE 材料优异耐磨性的物理解释源于其长支链带来的非晶区的缠结和高的系带分子比率。由于结晶度和高缠结带来的强度和韧性的良好匹配关系，使得 ULWPE 具有优异的耐磨性。结晶度和缠结度是影响聚合物耐磨性最重要的两个结构参数。适当的结晶度（0.5~0.7）下，尽可能增加分子链间的物理缠结或化学交联，可以使其强度和韧性达到最优匹配，从而最大限度的增加聚合物的耐磨性。其次，为评估 ULWPE 在模拟体内环境下的长期服役性能，本研究按照 ASTM F2003-02 标准制备了不同老化时间下的 ULWPE-700 和 UHMWPE 1050 样品，以 CoCrMo 作为配副材料，对比分析了氧化对聚乙烯结构、物理机械性能和磨损行为及磨粒特征的影响。结果显示，在相同老化条件下，ULWPE 的氧化指数和氧化度均低于 UHMWPE，结晶度和片晶厚度更高，表明其具有更优异的抗氧化性能和结晶性能；氧化导致两种材料的硬度均有所下降，但在相同老化条件下，ULWPE 仍表现出更高的硬度，以及更低的接触角和更高的表面能，这有利于在生理润滑环境下形成更稳定的润滑膜；ULWPE 的磨损率显著低于 UHMWPE，ULWPE 产生的磨粒数量更少、尺寸更大、纤维状磨粒更少，ULWPE 和 UHMWPE 的主要磨损机制均为黏着磨损、疲劳磨损和磨粒磨损，且以黏着磨损为主。综上所述，本研究通过多尺度分析，系统阐明了 ULWPE 优异耐磨性的结构基础，并证实了其在氧化老化条件下仍具有优于传统 UHMWPE 的抗氧化性和耐磨性。ULWPE 兼具优异的强度、韧性和抗氧化能力，有望延长人工关节的使用寿命，为 ULWPE 的临床应用提供了重要的理论和实验依据。

D40 -37

高导热玄武岩/聚四氟乙烯混编织物的构筑及其耐磨延寿性能研究

祝创*

东华大学

自润滑织物复合材料在解决关节轴承摩擦磨损问题中具有关键作用,其摩擦学性能的调控主要依赖于材料导热特性的优化。传统方法通过树脂基体添加功能填料虽可提升摩擦热传导效率,但往往导致力学性能显著下降。本研究创新性地提出 1 种聚合物辅助金属沉积技术,通过在玄武岩纤维表面构建银镀层,并引入自粘附性左旋多巴/聚乙烯亚胺共聚物作为界面过渡层,实现了银镀层与纤维基体的强界面结合。实验表明:该复合材料的银镀层具有粗糙、连续且致密的微观结构特征,使其导热系数达到 0.63 W/(m K) ,较传统材料提升达 950%;同时拉伸强度提升至 240.8 MPa ,增幅达 91%。这种协同增强效应显著改善了复合材料的摩擦学性能,同时赋予其卓越的耐磨特性。本研究发展的界面工程策略为开发高性能长寿命自润滑织物复合材料提供了新的技术途径。

D40 -38

通过微弧氧化和石蜡密封提高 2A12 铝合金的摩擦学和腐蚀特性

郭志远, 赵盖*

南京航空航天大学

2A12 铝合金因其出色的强度重量比和良好的机加工性能而被广泛应用于航空航天、汽车和海洋工程领域。然而,它在恶劣条件下的耐磨性和耐腐蚀性不足,需要改进。本研究将微弧氧化(MAO)与石蜡密封相结合,以提高 2A12 铝合金的耐腐蚀性和摩擦学性能。结果表明,MAO 工艺能显著提高硬度和摩擦学性能,但氧化层中的孔隙可能会加速腐蚀环境中的腐蚀。石蜡密封可有效填充这些孔隙,减少腐蚀介质的渗透,显著提高耐腐蚀性。此外,摩擦测试表明,石蜡封孔后的混合涂层具有更低的摩擦系数和磨损率。分子动力学模拟(MD)进一步揭示了石蜡在孔隙中的分布及其对耐磨性和耐腐蚀性的影响。这项研究表明,MAO 与石蜡封孔相结合是提高 2A12 铝合金腐蚀和摩擦学性能的有效方法,为其应用提供了新的启示。

D40 -39

等离子熔覆复合耐磨板的磨损特性和工业化应用

王庆良^{1*}、王元宗²

1. 中国矿业大学

2. 济南海纳等离子科技有限公司

等离子体熔覆技术已从修复应用发展到增材制造领域,增材制造赋予了熔覆板高的耐磨性、耐腐蚀性、耐热性和抗氧化性,在传统耐磨材料的设计和制造没有突破的情况下,无疑为提高耐磨部件的使用寿命提供了有效的解决方案。本研究以 Q235 钢为基体,通过优化等离子熔覆工艺,获得无裂纹等离子熔覆复合耐磨板。熔覆层和基体钢之间形成了宽度约 $10\sim 12 \mu\text{m}$ 冶金熔合区,熔合区组织较致密,未发现明显的气孔和热应力引起的微裂纹。熔覆层的平衡组织为初生碳化物、共晶和莱氏体组织,相组成为 $\alpha\text{-Fe}$ 、 $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ 碳化物和少量 $\gamma\text{-Fe}$ 相。 $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ 碳化物为六方结构,形态主要为初级长棒状、共晶片状和二次粒状碳化物。 $\alpha\text{-Fe}$ 铁氧体区为位错亚结构, $(\text{CrFe})_7\text{C}_3$ 碳化物内存在位错缠结和层错亚结构。在同一水平摩擦系数条件下,覆板的相对耐磨性约为 HD450 和 NM450 耐磨钢的 3~4 倍,摩擦副材料的磨损损失处于同一水平,完全满足刮板输送机中间槽的设计和应用要求。刮板输送机中部槽的工业应用表明,过煤量 834 万吨后等离子熔覆层的磨损深度平均 20 mm, HD450 和 JFE 耐磨板的磨损深度平均为 40 mm 和 50 mm,可以推荐等离子熔覆复合耐磨板用于刮板输送机中部槽和煤矿各类耐磨衬板的生产和制造。

D40 -40

抗磨耐蚀高硼铁基合金的研究进展

马胜强*, 罗洋, 吕萍, 刘雨生, 邢建东

西安交通大学

高硼铁基耐磨耐蚀合金是近年来开发的一类新型耐磨合金，在耐磨耐蚀部件、玻璃模具、新型工具材料开发方面，具有重要的应用和广阔的市场前景。本报告从高硼铁基合金的冶金学组织、硬质相硼化物控制、基体组织析出强韧化等角度对其在耐磨、耐蚀过程中的组织控制和服役行为进行概述。研究发现，硬质相 Fe_2B 的初化、晶体取向和尺寸细化、形态改善均对合金的耐磨性和耐蚀性产生重要影响，表现出抗磨和耐蚀独特效应。此外，基体组织及其硬韧性的有效控制、硼化物/基体界面微观特征结构的设计与调控，可以实现整体合金抗磨性的协同提升以及不同工况条件下耐蚀性的针对性调控。因此，高硼铁基耐磨耐蚀合金的组相调控和成分设计对稳定硼化物类型、控制组织形态，将成为未来研究的重点方向。

D40 -41

聚酰亚胺诱导取向超滑体系的研究

高新蕾^{1*}，吴莉²

1. 湖北大学
2. 武汉工程大学

发现了 1 种“诱导取向超滑”体系，在该体系中，聚酰亚胺既作为摩擦副元件与某些特定材料配副（ GCr_{15} 钢或 Si_3N_4 ），又作为诱导有机液态分子类润滑剂取向的材料；液晶（或某些特定有机液态化合物）既作为润滑剂，又作为具有分子取向能力而导致超滑的摩擦学因素。系统考察了该体系的摩擦取向行为及超滑机制：通过摩擦在聚酰亚胺上留下划痕形成沟槽，使有机液态化合物和聚酰亚胺之间形成一定的锚定力，有机液态化合物在自然状态中朝着摩擦方向即顺着槽排列，且这种分子取向延伸至对偶件表面，当聚酰亚胺与有机分子间的预倾角较小时（接近平行于摩擦表面），该摩擦体系实现超滑行为。同时，利用摩擦学定量构效关系模型研究了该润滑系统中所使用的润滑剂的摩擦学定量构效关系，发现特定分子结构的润滑剂有利于该体系获得超滑状态，为筛选适配聚酰亚胺作为摩擦副元件的摩擦体系的润滑剂提供依据。

D40-42

核壳材料结构调控与智能润滑

王金清^{*}，杨亚文，王娜，王宏刚，杨生荣

中国科学院兰州化学物理研究所

核壳材料通过“结构主动调控”与“功能协同强化”的双重作用机制，结合智能响应策略，为解决传统润滑材料在多环境、多工况与多场景等方面的应用瓶颈提供了智能解决方案。基于聚四氟乙烯（PTFE）、二硫化钼（ MoS_2 ）、MXene 等为代表的核壳材料结构设计，通过改变核壳比和选择不同的功能材料，开展摩擦学性能的“按需调控”以及结合智能响应机制以实现润滑效果的自主可控等相关研究，将促进新型润滑材料的快速发展。针对苛刻工况下聚四氟乙烯（PTFE）承载力弱、耐磨性不足的问题，我们通过构建以 PTFE 为核、酚醛树脂（PR）或聚丙烯酸酯（PACR）为壳的核壳结构（如 PTFE@PR 、 PTFE@PACR ），利用刚性外壳分散高载荷应力，内核通过剪切滑移动态降低摩擦，实现复合材料在载荷、速度及接触形式变化下的苛刻工况自适应性。为解决传统润滑添加剂在环氧树脂中分散性差及环境敏感问题，利用表面功能化设计制备的 $\text{SiO}_2\text{@PTFE}$ 、MXene@PTFE、 $\text{MoS}_2\text{@PMMA}$ 及 $\text{MoS}_2\text{@PDA@POSS}$ 等核壳微粒，通过壳层含氧官能团增强界面氢键结合，显著提升环氧涂层的强韧化效应，并发挥湿度屏蔽等智能自适应润滑特性，确保了高湿度环境下的长效稳定润滑。针对水基润滑添加剂分散稳定性差、响应单一等挑战，通过结构-功能协同设计制备的具有亲水外壳的 $\text{SiO}_2\text{@PTFE}$ 和 GO@PTFE 核壳材料突破了 PTFE 的水基分散瓶颈；同时核壳型无溶剂纳米流体润滑材料则融合了纳米核的高承载/润滑性能与有机壳的类液态流动性及自修复特性，成为高性能液体润滑剂的理想选择。未来研究将聚焦精准结构调控、多功能集成及绿色制备工艺，推动核壳材料在高端装备与可持续发展中的规模化应用，为智能润滑领域提供关键技术支撑。

D40 -43

轴向柱塞泵多摩擦副油膜耦合动力学特性研究

叶绍干*

厦门大学

为探究轴向柱塞泵振动特性与油膜耦合作用的内在关联机制，构建了轴向柱塞泵各关键组件动力学模型，并与滑靴副及配流副的油膜润滑模型耦合形成完整的耦合动力学分析框架。采用显隐结合法与控制容积法联合求解该模型，系统分析了不同工况下柱塞泵的振动响应以及滑靴副与配流副的油膜润滑行为，并通过实验振动验证模型的准确性。研究结果表明：在振动特性方面，耦合模型的预测结果与实验数据具有较高的吻合性；在油膜特性方面，转速升高有助于增厚油膜，而压力增大则使油膜变薄，油膜压力分布与柱塞腔压力呈同步周期性变化趋势，且油膜泄漏量随压力和转速的增加而显著上升，尤其在高压区表现出更大的增长幅度。研究结果为轴向柱塞泵结构优化、理论拓展以及实际工程应用提供重要的理论支持。

D40 -44

激光诱导图案阵列与化学涂层复合织构表面对润滑剂的驱动特性及应用

刘成龙¹，张天锐¹，郭峰¹，李兴林^{2*}，王华³

1. 青岛理工大学

2. 杭州轴承试验研究中心有限公司

3. 南京工业大学

运行于极端工况下的滚动轴承等零部件，极易发生因润滑失效而导致的表面损伤甚至失效。例如：高速轴承因润滑油的泄露、爬移等问题，服役性能远达不到设计要求。而高端装备对轴承的高速化和高稳定性要求不断提高，因此，突破轴承传统设计提升其服役性能和寿命具有重大意义。研究者通过不同的新型设计方法，在轴承滚道实现了集油增强的效果，抑制了轴承内圈润滑油的流失。本研究中将复合织构加工到润滑轨道两侧，利用复合织构形成的润湿性梯度，不同图案阵列及疏油涂层组成的复合织构表面对润滑剂具有显著的驱动作用，达到了集油的润滑增效作用。本文利用复合织构阵列对推力轴承润滑滚道进行了集油设计，采用多点接触光弹流润滑油膜试验机验证了该设计对多点接触中气穴、膜厚和摩擦力的改善作用。结果表明：该复合织构具有较高的液滴驱动效率，表现出良好的液滴驱动能力，能够很好地抑制气穴区对润滑特性的影响，提高轴承的润滑效率和服役寿命。

D40 -45

离子吸附与水合润滑

韩天翼*，张晨辉，雒建斌

清华大学

离子具有优异的水合润滑性能，在微观和宏观尺度上均能实现超滑，其超滑机理归因于：带电固体表面吸附的水合层既具有很高的承载能力又具有极低的剪切强度。本次报告包括三部分内容。第一，水合离子宏观超滑现象：通过酸跑合增强表面负电荷密度，实现了强水合离子在 500 MPa 平均接触压力下的稳定超滑；第二，水合润滑新模型：阐明了界面离子浓度影响水合离子结构的规律，揭示了水合离子结构调控滑动摩擦能垒的机理，建立了水合离子浓度与结构主导的水合润滑新模型；第三，离子吸附特性决定水合超滑行为：发现了离子类型、离子浓度、表面电荷密度对离子吸附的影响规律，阐明了离子覆盖率是决定水合超滑行为的关键。本研究为拓展水合润滑起源、丰富水基超滑理论提供了新思想，也为水合离子超滑的实际应用提供了理论基础和科学依据。

D40 -46

Al₂O₃-Y₂O₃ 体系多晶/非晶防护涂层的增韧机制及其腐蚀-摩擦行为研究

安宇龙*, 赵晓琴

中国科学院兰州化学物理研究所

面对高承载条件下机械零部件的摩擦磨损, 在航天发动机、飞行器、海洋船舶、管道运输等部件上沉积耐磨涂层可有效提高其服役寿命及可靠性。Al₂O₃ 陶瓷由于制备成本低、硬度高、导热性好等优点在表面工程领域被广泛应用。而采用大气等离子喷涂(APS)工艺制备的 Al₂O₃ 涂层存在韧性差、孔隙率高、层间结合力差等缺点, 限制了其在生产中的应用。本研究利用 APS 工艺制备了 Al₂O₃-Y₂O₃ 体系涂层, 探究了微米/纳米初始粉料对涂层物相及结构的影响。在 Al₂O₃ 涂层中加入 Y₂O₃ 作为增韧相, 系统探究了 Y₂O₃ 含量对 Al₂O₃-Y₂O₃ 涂层微观结构及摩擦学性能的影响。此外, 有研究表明, 通过 APS 制备的定向凝固 Al₂O₃ 基复合陶瓷相界面结合紧密, 具有优异的高温结构稳定性和良好的耐磨能力。故以纳米结构强韧化涂层为思路, 采用商用的纳米 Al₂O₃、Y₂O₃ 为原料, 利用喷雾造粒的方法制备了 Al₂O₃-Y₂O₃ 纳米粉体, 通过高温烧结得到了 Al₂O₃-YAG 粉体。利用 APS 技术冷却速度快的特点制备了 Al₂O₃-YAG 共晶涂层。同时, 还系统研究了 Al₂O₃-YAG 共晶涂层在 0.5 mol/L HCl 溶液环境中的时效腐蚀行为。结果表明, Al₂O₃-YAG 共晶涂层以非晶相为主相, 有效抑制了晶界优先腐蚀倾向。Al₂O₃-YAG 共晶涂层在 HCl 溶液中表现出极低的摩擦系数。这归因于摩擦界面处形成固体润滑膜和流体动力润滑膜的协同润滑效应。该研究阐明了非晶结构对耐磨防腐性能的提升机制, 为在合金上构建高性能防护涂层提供了理论依据与技术参考。

D40 -47

Effect of magnetron sputtering Nb coating on fretting corrosion resistance of biomedical Ti₆Al₄V alloy for hip implant

Zhangyue Qin, Yali Zhang, Xiaogang Zhang, Zhongmin Jin*

Southwest Jiaotong University

Ti₆Al₄V alloy is extensively used in the fabrication of femoral stems for artificial hip joints. However, its relatively low surface hardness and inadequate wear resistance present significant limitations. Fretting corrosion often occurs at the interface between the femoral stem and the femoral head—referred to as the head-neck interface—which can result in hypersensitivity reactions and prosthesis loosening. Consequently, enhancing the surface properties of Ti₆Al₄V alloy to improve its resistance to fretting corrosion is of critical importance. By utilizing magnetron sputtering coating technology, a Nb coating was prepared on the surface of the Ti₆Al₄V substrate, and the basic properties of the Nb coating were thoroughly investigated. The Nb coating exhibited a dense structure, uniform elemental distribution, low surface roughness, good film quality, high adhesion strength between the coating and the substrate, and enhanced the microhardness of the Ti₆Al₄V alloy surface. Subsequently, fretting corrosion experiments were conducted to comprehensively analyze the influence of the Nb coating on the fretting corrosion characteristics of the Ti₆Al₄V substrate. The Nb coating significantly improved the fretting corrosion resistance of the Ti₆Al₄V alloy. Specifically, the introduction of the Nb coating reduced the tangential force, friction coefficient, total fretting energy, and frictional dissipation energy at the contact interface during the fretting process, thereby improving the fretting running characteristic of the Ti₆Al₄V alloy. Simultaneously, the Nb coating reduced the wear depth and wear volume of the Ti₆Al₄V alloy surface, altered the fretting damage features and mechanisms of the Ti₆Al₄V substrate surface, and enhanced the wear resistance of the material surface. Additionally, the Nb coating increased the open circuit potential and corrosion potential of the Ti₆Al₄V substrate, decreased the variation in open circuit potential (OCP) and corrosion current, thereby enhancing the corrosion resistance of the material surface.

D40 -48

聚合物复合材料-金属配副摩擦界面物理化学作用研究

齐慧敏*, 李贵涛, 张嘎

中国科学院兰州化学物理研究所

聚合物复合材料由于其自润滑性、化学稳定性及结构可设计性在机械装备领域得到广泛应用。摩擦过程中, 由于界面闪温和应力作用, 聚合物复合材料-金属配副的界面作用极其复杂, 对转移膜的形成具有重要影响。摩擦学的理论与实践表明聚合物复合材料在摩擦界面能够生成承载能力高且具有润滑作用的转移膜, 显著提高了聚合物复合材料的摩擦学性能。基于此, 本工作系统考察了聚合物基体的分子结构、金属对偶成分、纳米颗粒及工况环境等对常规聚合物复合材料及多元纳米复合材料摩擦学行为的影响。结果表明聚合物基体中引入增强相, 可显著提高基体材料的强度与耐磨性能。常规复合材料中进一步添加陶瓷纳米颗粒可大幅降低苛刻干摩擦条件下复合材料的摩擦系数与磨损率。基于转移膜的纳米结构及表面化学状态分析阐明了聚合物分子结构、金属对偶成分等与界面摩擦化学的关联性, 揭示了摩擦化学、材料转移及纳米颗粒烧结等对界面物理化学作用的影响规律, 深化了对转移膜形成与作用机制等科学问题的理解, 对指导高性能转移膜的可控构筑提供了理论依据。

D40 -49

基于分子动力学模拟的超低磨损聚乙烯长支链增强增韧机制研究

节茂岩, 张小刚*, 袁倩, 张亚丽, 靳忠民

西南交通大学

超低磨损聚乙烯(ULWPE)因其优异的生物相容性和耐磨性在人工关节聚合物材料中展示出巨大潜力。前期研究表明 ULWPE 兼具优异的强度和韧性是其表现出高耐磨性的原因, 然而由于 ULWPE 长支链 Y 型拓扑结构的微尺度特点, 其高强高韧机制难以在宏观层面直接表征。本研究中采用粗粒化分子动力学模拟, 根据动态流变测试结果, 构建了具有不同支链长度的 ULWPE 体系, 通过模拟熔体平衡、冷却、结晶及机械变形, 探究了长支链特性对材料凝聚态结构和力学性能的影响机制。结果表明, 长支链体系由于支链的空间位阻效应, 冷却结晶为凝聚态结构的结晶度降低, 但在缠结密度和系带链含量上保持了较高水平, 导致材料在机械变形过程中需要克服更广泛的解缠结行为和系带牵连, 表现为明显的应变硬化区域。然而, ULWPE 的强度和韧性指标的提升与材料体系中支链长度的增加不成正相关, 在所研究的体系中, 当支链长度为主链缠结分子量的 1.5 倍时, 材料的强度和韧性最高。支链长度低于该阈值, 分子链的缠结贡献无法抵消支化带来的结晶度损失, 断裂应变提高而断裂强度降低; 支链长度高于该阈值, 链段的强伸展性使得凝聚态结构相对松散, 在外力作用下, 解缠结的能阻降低, 应变硬化机制被削弱。本研究通过构建“支链参数-凝聚态结构-力学性能”的定量构效模型, 揭示了 ULWPE 高强高韧机理的分子尺度本质, 为设计耐损伤聚烯烃材料提供了理论指导。

D40 -50

在宽温域内有效提高 $\text{Ti}_{50}\text{Zr}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Al}_{10}$ 难熔多主元合金的耐磨性: 引入坚固且可变形的 α_2 相

游鑫^{1,2}, 宋俊杰^{1*}, 李涛^{1,2}, 张永胜¹, 胡丽天¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

2. 西北工业大学

难熔多主元合金(RMPEAs)的优异性能常因无法覆盖宽温域耐磨性能而难以充分展现。尽管向 RMPEAs 基体中引入硬质相被视为缓解这一矛盾的常用策略, 但硬质相的脆性及其导致的异质界面往往会在长期磨损条件下引发不稳定失效。本研究通过热压与时效处理, 在 $\text{Ti}_{50}\text{Zr}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Al}_{10}$ RMPEAs 中形成强韧性可变形的 $(\text{Ti}, \text{Zr})_3\text{Al}$ 型 α_2 相, 实现了优异耐磨性能的提升——宽温域内的磨损率和摩擦系数分别降低约 50% 和 20%。基于交变摩擦应力的作用, α_2 相在室温下激活多滑移系; 其优异的承载与变形能力可维持至 600 °C, 从而增强耐磨性。在更高温度(900 °C)下, 优化后的合金磨损率降至最低, 这归因于致密氧化层的保护作用以及热压引入的 Hall-Petch 强化效应。上述发现为难熔多主元合金的高性能耐磨设计提供了

一定参考。

D40 -51

高性能无铜树脂基制动材料的研究现状与发展趋势

郑开魁*, 任志英, 林有希
福州大学

树脂基制动材料因其工艺简单、成本低廉及制动舒适性良好等优势, 已成为目前应用最广泛的汽车制动材料。然而, 在高速重载工况下, 摩擦界面温度升高会导致有机聚合物发生热分解, 进而引发材料制动效率下降乃至失效。铜凭借其优异的导热性, 对提升制动材料的高温摩擦学性能发挥着关键作用。但近年研究表明, 制动过程产生的含铜颗粒对环境 and 人体健康存在危害。因此, 开发高性能无铜制动材料已成为紧迫的研究课题。其中, 如何有效抑制无铜树脂基制动材料的高温热衰退, 是突破其性能瓶颈、实现其在高性能制动领域广泛应用的关键所在。本文系统综述了该领域的研究进展、核心挑战与未来发展趋势, 并指出高性能无铜树脂基制动材料的研发是顺应环保法规的必然方向。尽管在综合性能平衡、噪声抑制与粉尘控制等方面仍面临严峻挑战, 但通过多学科交叉融合与创新, 特别是深入解析摩擦机理、开发新型高性能组分及运用智能化设计手段, 无铜树脂基制动材料有望实现性能突破, 迎来广阔的应用前景。

D40 -52

智能自润滑微胶囊复合材料及其可控刺激响应润滑特性研究

于呈呈*
季华实验室

微胶囊刺激响应特性是指外部环境变化引发微胶囊壁材分子渗透性改变或壁材被破坏, 使得微胶囊芯材由内向外达到可控释放过程。针对现有机械、电磁和热触发微胶囊材料存在的不足, 通过优选不同微胶囊壁材材料, PAO 油作为芯材, 采用改性溶剂挥发法制备热刺激响应可控释放微胶囊, 添加到环氧树脂基体中获得智能微胶囊自润滑复合材料。所制备微胶囊表面光滑, 芯材封装完好, 球形度与分散性良好, 平均粒径约 17 μm , 壁厚约 2.5 μm , 微胶囊芯材含量 43%。热刺激响应结果显示: 微胶囊具有 70 $^{\circ}\text{C}$ 热刺激芯材释放响应特性, 热处理时间仅需 2 min 即可实现芯材油相有效释放; 低于此温度, 微胶囊体积略有膨胀, 但芯材并未释放; 高于此温度, 微胶囊热响应速度加快。微胶囊加入将对自润滑复合材料拉伸强度和压缩强度等力学特性产生不利影响。但微胶囊加入可改善其摩擦磨损性能, 随微胶囊含量增加, 复合材料摩擦系数和磨损率均具有大幅度降低。相比于纯树脂基体, 微胶囊含量 10% 自润滑复合材料摩擦系数由 0.65 降低至 0.09, 降低一个数量级, 磨损率由 $1.45 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $1.46 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 降低两个数量级。通过调控微胶囊壁材高分子交联比例, 成功获得热刺激响应温度为 50~70 $^{\circ}\text{C}$ 可控热刺激响应微胶囊, 拓展微胶囊复合材料应用领域与适用范围。

D40 -53

氯苯甲基硅油的润滑机理及宽温域润滑体系构建

白鹏鹏*
清华大学

在航空航天、矿产开采及高端装备制造等领域的快速发展驱动下, 机械装备运动部件(如轴承、齿轮等)的服役条件正朝着大温差、宽温域、高承载的极端化方向演进。传统润滑材料在宽温域工况下面临严峻挑战, 亟需实现高温润滑性能与低温流动特性的协同优化, 以满足复杂工况下运动界面长效润滑需求。建立适应-100~380 $^{\circ}\text{C}$ 极端温域的新型润滑体系, 对提升我国高端装备可靠性、延长服役寿命具有重大战略意义。本研究以构建宽温域润滑体系为目标, 遴选兼具优异黏温特性与黏压响应的氯苯甲基硅

油 (chlorophenylmethyl silicone oil, CPSO) 为研究对象。通过平板流变仪系统表征其宽温域内流变行为, 揭示温度对润滑介质流变学性能的影响规律。结合宽温域摩擦磨损试验, 阐明 CPSO 润滑多材料体系的摩擦学响应机制, 重点解析其在 380 °C 高温环境下的退化机制与润滑失效机理。基于此, 系统研究磷酸酯添加剂、乙基硅油及季戊四醇四乙基己酸酯等组分对 CPSO 润滑性能的协同增强效应, 最终构建以 CPSO 为基础油的宽温域复合润滑体系。研究成果为高端润滑材料的正向设计与工程应用提供了理论支撑, 主要结论如下: (1) 黏温/黏压特性与油膜演变规律研究表明, CPSO 展现出优异的黏温稳定性, 其黏度-温度曲线斜率较传统润滑油较低, 特别是在 300 °C 高温下仍维持较高黏度 1.58 mPa s。通过高压流变学测试发现, 低载荷 (110 N 以下) 条件下 CPSO 油膜厚度与压力呈显著负相关, 归因于分子链的螺旋卷曲构型有效抵消黏增效应; 而在高载荷 (110 N 以上) 时, 分子空间构型较为稳定难以被压缩, 油膜厚度波动率 < 8%, 证实其高压工况下的油膜稳定性。(2) 多材料体系摩擦学机制解析表明, 轴承钢摩擦副下摩擦反应膜的构效关系存在显著材料依赖性: 在典型轴承钢-钢中, 摩擦氧化生成的 Fe_2O_3 膜, 其抗磨性能一般, 磨损率随温度升高增长显著; 而陶瓷-轴承钢配副通过摩擦化学反应形成 FeCl_2 摩擦化学膜, 高温下有效降低摩擦系数和磨损率。CPSO 在全陶瓷配副表面的吸附行为是影响其摩擦行为的主要因素。CPSO 在三种陶瓷下的摩擦学性能 Si_3N_4 优于 Al_2O_3 , 而 ZrO_2 最差, 经过分子动力学模拟结果表明, CPSO 在 Si_3N_4 上的吸附能分别比在 ZrO_2 和 Al_2O_3 陶瓷上的吸附能高出约 54.09 倍和 61.18 倍。CPSO (Si_3N_4) 的带隙仅为 CPSO (ZrO_2) 和 CPSO (Al_2O_3) 的 1.84% 和 1.88%。(3) 极端温域摩擦学行为研究表明, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{M}_{50}$ 体系在 300 °C 时磨损率仅为 $3.99 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N m})$, 较 150 °C 仅增长 10.5%, 归因于 FeCl_2 摩擦化学膜的持续生成及其高温稳定性 (分解温度 > 350 °C)。当温度升至 380 °C 时, CPSO 部分发生热损失, 加之摩擦反应膜破裂, 导致边界润滑失效。低温工况 (-100 °C) 下 CPSO 黏度激增, 致使润滑剂丧失流动性而发生失效, 但摩擦副表面仅有轻微擦伤。该研究揭示了 CPSO 宽温域润滑失效的临界阈值与失效机制。(4) 添加剂润滑改性研究表明, 磷酸酯、乙基硅油 (PDES) 与季戊四醇四乙基己酸酯可显著提升 CPSO 的宽温域润滑性能。实验表明: 添加质量分数为 1% 磷酸三甲苯酯 (TCP) 使 M50 钢盘在 150 °C 下的磨损率由 $5.86 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ 降至 $2.44 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ (降幅 44.14%), XPS 分析表明 TCP 的抗磨机理为摩擦诱导作用下, 通过苯环的 π 电子供体效应吸附在基体表面的磷酸基团在磨斑表面原位生成的 FePO_4 摩擦化学膜, 阻隔摩擦副的直接接触, 然而该膜在 > 300 °C 时发生分解, 导致 300 °C 时抗磨性能失效。在 CPSO 中引入 50% (质量分数) PDES 后, 磨损率进一步降至 $6.04 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ (降幅 54.59%), 其作用机制呈现浓度依赖性: 低浓度 (质量分数 < 30%) 时形成 Si-O 摩擦反应膜; 高浓度 (质量分数 > 40%) 时摩擦反应膜逐渐转变为 Fe-Mo 复合摩擦反应膜, 进一步降低了摩擦系数与磨损量; 通过引入季戊四醇四乙基己酸酯构建三元复合体系, 进一步和 PDES 实现协同优化, 在磨斑表面形成了 Fe、Cr、Mo 的金属化合物、Si-O 反应膜和 FeCl_2 的混合摩擦反应膜, 降低了 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{M}_{50}$ 摩擦副的磨损率, 优化了 CPSO 高温下的减摩抗磨特性。该研究揭示了添加剂与多元润滑体系的响应机制与摩擦反应膜演变规律。

D40 -54

深海环境材料摩擦磨损行为与机理

王建章*, 刘昊

中国科学院兰州化学物理研究所

深海装备许多摩擦部件设计在深海环境下服役, 普遍以高性能聚合物及其复合材料作为润滑材料, 在深海高压环境下存在加速吸水老化与磨损失效的瓶颈问题。本研究依托自主研发建立的深海超高压摩擦磨损试验平台, 系统研究了典型热塑性聚合物在深海压力环境高压海水渗透扩散行为、性能与结构演变规律, 揭示了深海压力作用下摩擦磨损规律与损伤机制。在此基础上, 通过功能填料引入与设计, 在深海环境下开展了转移膜的原位可控构筑, 在提升聚合物减摩抗磨性能的同时, 实现了金属配副腐蚀-磨损耦合损伤的有效调控。基于深海摩擦磨损机理探索, 开发了系列高性能润滑材料与部件, 以轴承、密封元件、齿轮等多种形式在深海装备水下机械系统中取得广泛应用。

D40 -55

基于特种硅油的宽温域润滑材料体系构建及摩擦学行为研究

岳骆, 孟延, 魏鹏, 赵辉, 徐唯, 曹辉, 白鹏鹏, 孟永钢, 田煜*
清华大学

随着航空航天与极地技术的迅猛发展, 对能够在极端高低温条件下稳定运行、同时具备优异减摩抗磨性能的润滑材料提出了更高要求。然而, 目前润滑体系在实现 $-50\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超宽温度范围内高效稳定工作方面仍面临重大挑战。本研究设计并构建了 1 种新型宽温润滑系统, 该系统以氯苯基硅油 (CPSO) 为基础润滑介质, 乙基硅油 (PDES) 为相容性调节剂, 季戊四醇酯 (PET) 为抗磨添加剂, 形成具有温度响应特性的混合润滑体系。研究表明, 该润滑系统在低温条件下主要依靠流体动压润滑机制; 而在高于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中, 可在摩擦作用下形成纳米结构反应膜, 有效提升减摩抗磨性能。在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 润滑剂流动性丧失, 导致润滑失效; 在 $-50\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 系统保持流体润滑状态, 摩擦系数随温度降低而增加。高温测试表明, 在 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 该混合润滑体系使 M50 钢盘的磨损率较单独使用 CPSO 和 PDES 分别降低了 86% 和 61%。表面分析进一步证实, 在高温摩擦过程中形成的主要由金属氧化物与非晶硅氧化物组成的摩擦诱导反应膜, 可有效保护金属表面。综上所述, 该混合润滑体系在 $-50\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内表现出优异的综合摩擦学性能, 为极端环境下润滑技术的研究与工程应用提供了重要理论基础与实验支持。

D40 -56**氧化石墨烯表面区域设计及其润滑增效机理研究: 实验与模拟**

邱峰, 胡献国*
合肥工业大学

功能化改性是改善石墨烯基纳米颗粒分散稳定性及其摩擦学性能的高效策略, 但目前改善机制仍缺乏原子尺度的深入见解, 且区域效应对分散及润滑性能的影响仍未充分揭示。基于此, 本文综合考虑烷基胺分子链长差异 (C4, C8, C12) 和氧化石墨烯 (GO) 纳米片基面边缘区域特性, 通过实验模拟相结合探究了不同链长的烷基胺对 GO 纳米片基面边缘分区改性, 对其在 PAO6 基础油中分散稳定性及摩擦学性能的影响机制。结果表明基面和边缘分区改性均有效提高了 GO 纳米片在基础油中的分散稳定性, 归因于功能化改性显著降低纳米片层间强吸引相互作用, 增强纳米片与基础油间的化学亲和作用以及纳米片自身的空间位阻效应。此外, 基面改性优于边缘改性, 归因于基面改性显著提高空间位阻效应, 而边缘改性有效增强化学亲和作用, 但空间位阻效应是主导纳米片分散稳定性的关键因素。最后, 进一步通过摩擦学实验验证了良好的分散稳定性纳米颗粒进入摩擦界面形成致密均匀的摩擦膜是其发挥优异摩擦性能的关键。研究结果为二维纳米颗粒的团聚动力学行为和分散稳定性机理提供一定的微观尺度见解, 有利于扩展石墨烯基纳米材料在固液复合润滑体系中的实际应用。

D40 -57**长效抗空蚀高熵合金及涂层的设计策略**

侯国梁*
中国科学院兰州化学物理研究所

螺旋桨和水轮机等大型过流部件是船舶、发电机组获取强劲动力的关键核心部件, 因尺寸巨大、形状复杂, 通常只能通过铸造的工艺制备。传统的铸造合金因多为多物相结构, 在空泡溃灭释放的强大冲击载荷 ($\geq 1\text{ GPa}$) 冲击下, 无一例外均会产生不同物相间的严重不协调塑性变形, 最终导致表面产生选择性疲劳剥落并加剧材料整体损坏的程度, 即发生严重空蚀。为了解决上述问题, 报告人近期采用两种理念设计铸造高熵合金 (HEA) 及热喷涂涂层, 在抗空蚀方面显示出了明显不同以往的防护能力。

D40 -58**PEEK/PEI 多层复合材料界面调控与摩擦学性能优化研究**

车清论*, 阮俊飞, 郭红, 郭峰
青岛理工大学

针对航天轴承保持架、天线展开机构等关键部件在超低温真空、高频冲击下的热-力-摩擦耦合失效难题, 本研究中提出基于 3D 打印熔融沉积成型 (FDM) 的层状复合体系创新设计。通过构建 PEEK/PEI 交替层状结构 (层厚比 1:1~1:3), 发现 0.2 mm 层厚可实现最佳应力梯度分布与力学性能。进一步突破异质界面调控瓶颈: (1) 定向渗流网络增强, 在 PEI 相引入 0.3% 碳纳米管 (CNT), 形成定向渗流网络, 层间剪切强度与弯曲强度分别提升 22.8% 和 22.7%。CNT 通过机械啮合强化界面结合, 抑制裂纹扩展, 并通过优化转移膜黏附性显著降低摩擦系数。(2) 跨尺度协同增韧, 提出碳纤维 (CF)/CNT“软-硬”协同策略, 15% CF 与 0.3% CNT 复配形成“软润滑层-硬支撑基底”结构, 在保持高承载能力 (CF 散热) 的同时提升耐磨性。(3) 多级抗磨结构设计, 针对极端载荷界面失效, 引入 $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiC}$ 等纳米颗粒构建“刚-柔”多级界面, 增强转移膜结合强度, 显著降低摩擦表面温度及磨损率。结果表明: 优化后的复合材料在宽温域下兼具高力学保持率 (拉伸/弯曲强度提升 >8.8%) 与卓越摩擦学性能 (磨损率降低 >20%), 为新一代航天聚合物复合材料的长效服役提供理论支撑与技术路径。

D40 -59

发动机气门密封面冷锻压-渗氮复合强化的高温磨损机理研究

赖福强^{*1}, 刘志锋¹, 江高宇¹, 范小成¹, 林有希¹, 孙歌², 薛新¹, 屈蓉², 任志英¹

1. 福州大学

2. 怀集登月气门有限公司

气门是发动机配气机构的关键零部件, 气门与座圈配合对气缸起密封作用, 并控制新鲜空气的吸入与燃气的排出。气门工作条件恶劣, 在高温腐蚀性气氛中承受高压、高速、高频冲击。为增强气门密封面的耐磨性能, 表面处理技术成为主要措施。本研究中提出 1 种复合冷锻压成形 (剧塑性变形) 与渗氮的强化技术应用于奥氏体耐热钢发动机气门密封面, 并对气门密封面进行了材料性能表征和高温冲击磨损性能研究。研究了冷锻压预处理对奥氏体耐热钢气门锥面微观组织和渗氮层性能的影响。结果表明, 冷锻压预处理对奥氏体耐热钢引入了剧烈塑性变形, 使气门锥面呈现细晶和粗晶复合结构、位错密度增加, 并促进了后续时效热处理过程中碳化物的析出, 使锥面截面平均硬度相比未处理气门提高 30.5%。此外, 冷锻压预处理形成的晶粒细化促进了渗氮过程: 经渗氮 1.5 h 后的气门在距表面深度 10 μm 处的硬度较未预处理气门提升 24.6%。利用自行设计搭建的气门高温冲击磨损试验台进行了模拟气门实际工况的高温冲击磨损试验, 研究不同表面处理工艺对气门冲击磨损性能的影响。结果表明, 当冲击次数较小时, 磨损副还处于磨合状态, 冷锻压和复合强化气门由于表面层韧性差, 易剥落, 其磨损面积相比未处理和渗氮气门更大; 当冲击次数不断增加, 其强化效果逐渐显现, 磨损面积显著降低。除氧化磨损外, 未处理气门表现为黏着磨损; 冷锻压气门表现为轻微的疲劳剥落和黏着磨损。在 650 $^{\circ}\text{C}$ 下, 所有渗氮气门均表现为黏着磨损; 当温度提高到 750 $^{\circ}\text{C}$, 未预处理渗氮气门的渗氮层性能下降导致疲劳剥落加剧, 而冷锻压预处理渗氮气门仍表现为黏着磨损伴随轻微疲劳磨损。本研究证明了冷锻压-渗氮复合强化处理是 1 种有效的表面强化技术, 可显著提高气门密封面高温耐磨性能, 具有较好的工程应用推广潜力。

D40 -60

润滑油分子结构的分子动力学模拟和人工智能设计

鲍路瑶*

中国科学院兰州化学物理研究所

传统的润滑油设计是通过物理化学知识和经验直觉进行分子结构设计, 然后合成分子, 最后验证各项性能。这一研发范式周期长、耗资大、成功率低。分子动力学模拟和人工智能为润滑油设计提供了新工具。对于润滑油的基础物性参数, 如黏度、倾点、饱和蒸汽压、热稳定性等可以在分子动力学模拟的典型尺度

(纳秒和纳米尺度)下得到。这是润滑油材料性能参数特有的尺度非依赖性。特别地,分子动力学模拟可以进行大规模高通量计算,因此可以在短时间内获得大量分子结构对应油品的性质。分子动力学模拟结果与实验结果之间存在一个系统误差和可接受的随机误差。系统误差可以通过简单的线性回归进行消除,而直接修正计算结果。因此分子动力学模拟的工程化应用在润滑油领域最有希望率先取得突破。同时,分子动力学模拟可以得到润滑油分子结构对应性质参数的原子尺度机理。高通量分子动力学模拟可以迅速生产大规模高质量的润滑油材料数据,解决人工智能在材料设计领域的的数据稀缺瓶颈。利用人工智能性质预测可进一步探索化学空间,筛选高性能分子结构。报告介绍了分子动力学模拟和人工智能在基础油和添加剂性质计算和分子结构设计方面的应用。

D40 -61

界面水合作用下纳米薄膜润滑宏-微观建模及其润滑性能研究

方燕飞*

华侨大学

低摩擦润滑对精密机械系统性能的提升具有重要的工程应用价值。宏观点接触液体超低摩擦润滑引起研究学者的广泛关注,在实验上开展了许多研究,取得一系列重大进展。研究表明润滑分子在受限纳米间隙下的表面力作用对高性能润滑副实现低摩擦性能起到决定性作用。然而表面力作用下的纳米薄膜液体润滑理论模型研究还有所不足。为此,本论文中首先针对纳米间隙下水基润滑液的表面力作用进行分析,构建水合力、双电层力等特征的表面力作用公式;随后开展水合主导表面力作用边界润滑点接触分析,基于水合表面力作用建立边界润滑接触模型,分析了在不同载荷下的表面接触轮廓和表面力作用压力分布。在宏观尺度下接触,对比磨损前后接触表面,水合表面力作用的边界薄膜接触特性,探索水合承载能力,揭示在特定条件下实现水合润滑其超低摩擦系数的作用机制;其次,针对具有电性的运动副在水基润滑中出现界面双电层效应,建立粗糙表面双电层效应薄膜润滑建立模型,得到接触区的膜厚和压力分布,并结合相关实验验证该模型,数值结果表明:双电层效应有效提高水基润滑性能,增强双电层效应将降低摩擦进入液体超滑状态。最后,开展水合表面力作用涂层点接触液体润滑性能分析,通过耦合水合表面力作用和流体动压方程,考虑涂层基体结构弹性变形和粗糙表面形貌,建立数学模型,通过数值分析得到:表面力效应和流体动压效应可共同承担外部载荷,表面力作用的承载比可以达到 40%以上,而且在软涂层作用下,润滑膜厚会随之增大,涂层性能也影响着液体润滑膜。

D40 -62

通过原位石墨在 CoCrNi 多主元合金中实现优良的机械与润滑性能

李涛^{1,2}, 宋俊杰^{2*}, 王海丰¹, 张永胜², 胡丽天²

1. 西北工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

CoCrNi 多主元合金(MPEAs)机械和物理性能优异,但其耐磨性和润滑性能差强人意,阻碍了其作为先进工程材料的广泛应用。加入石墨获得 MPEAs 基自润滑复合材料被认为可以提高耐磨性。然而,同时制备高强度、大塑性和优异抗摩性能的复合材料具有挑战性。本研究报道了新型 CoCrNi MPEA 基自润滑复合材料的制备,由原位石墨和高硬度硅化物/碳化物作为增强相,通过粉末冶金和反应烧结制备的 20.6vol%Gr@CoCrNi-SiC 复合材料在强度和延性之间表现出最佳的权衡,以及优异的自润滑性和耐磨性,优于报道的使用不同固体润滑剂的复合材料。磨损机理是由于 CoCrNi 面心立方基体与硅化物/碳化物之间的协调变形机制,以及由原位石墨从最初的多晶晶格结构到核壳纳米复合结构(类似于类金刚石碳)的结构转变所支持的稳定润滑效应。这种简单、经济、实用的策略有助于开发具有优良综合性能的 MPEAs 自润滑复合材料。

D40 -63

防老剂 RD 改性氧化石墨烯增强丁腈橡胶摩擦学性能的分子动力学模拟和实验

钱程^{1*}, 聂瑞¹, 刘晓超²

1. 北京航空航天大学宁波创新研究院

2. 北京航空航天大学

为解决橡胶防老剂过早迁移和失效导致橡胶性能低下的问题, 采用分子动力学 (MD) 模拟和实验相结合的方法研究了新型纳米补强防老剂。利用 (2,3-环氧丙氧基) 丙基三甲氧基硅烷 (KH560) 将 1,2-二氢-2,2,4-三甲基喹啉 (防老剂 RD) 接枝到氧化石墨烯 (GO) 表面, 制备了 1 种新型功能纳米填料, 即 RDGO。同时, 通过机械搅拌混合碳纳米管 (CNT) 制备了 5 种丁腈橡胶 (NBR) 复合材料, 以协同增强其热氧老化、力学和摩擦学性能。结果表明, 与其他 4 组相比, NBR/RDGO/CNT 的压缩永久变形分别减少了约 25%、14%、17% 和 8%。利用超景深显微镜和扫描电子显微镜对 NBR 复合材料的磨损表面进行了表征, 发现了 RDGO 和 CNTs 的协同增强机制。MD 模拟从原子角度解释了 NBR 复合材料在 298K、374K 和环己烷溶胀条件下的磨损机制。新型功能化纳米材料 RDGO 和 CNTs 的协同使用使 NBR 复合材料在热氧老化和溶胀失效时也具有优异的力学和摩擦学性能。

D40 -64

碳点基润滑材料的原位制备与摩擦学机制研究

靳广凯¹, 薛盛华¹, 汪甜甜¹, 王逸新¹, 刘淑娟¹, 叶谦¹, 周峰^{1,2*}

1. 西北工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

在摩擦学领域中, 碳点因其极小尺寸和高化学反应活性已经成为研究的热点。然而, 传统方法倾向于首先制备功能化的碳点, 随后将其分散到基础油中得到含碳点的润滑剂。在此期间, 存在着二次添加带来的颗粒团聚问题, 影响碳点的润滑效果。针对以上问题, 在基础油中原位制备含碳点的润滑材料, 有望解决碳点作为纳米添加剂在基础油中的二次分散问题。首先, 得益于脉冲激光的光热效应, 通过直接辐照含杂环芳烃的基础油 PAO, 原位制备了杂原子掺杂型碳点基润滑剂, 避免了碳点在基础油中的二次分散难题, 实现了超过 9 个月的稳定分散。其次, 依赖于声空化过程中的高活性自由基, 以基础油 PEG 作为液体媒介, 杂环芳烃作为目标分子, 通过定向超声原位获得一系列含 CDs 的液体润滑剂, 达到了良好的减摩抗磨效果。最后, 在动态定向超声的辅助下, 借助于声空化现象和笼形效应, 原位制备了碳点基超分子润滑油凝胶, 成功实现了碳点的长期稳定分散和优异的摩擦学性能。

D40 -65

面向密封性能的橡塑材料开发及评价技术

黄乐*

广州机械科学研究院有限公司

液压密封是航空、航天、兵器等重大装备液压系统的关键核心基础件, 液压密封性能欠佳, 将引发装备漏液、失压、失效等问题, 极端情况下还会导致装备失控等灾难性事故。密封材料配方是决定橡塑密封件产品性能的关键因素, 配方开发就是通过配合体系的平衡调配技术解决各体系变化造成材料性能此消彼长的矛盾, 使密封材料具备更好的综合性能。但在实际工程实践中, 时常发生采用性能优异的橡塑材料制备的密封产品, 其密封性能却无法fe足主机装备严苛要求的情况, 出现了材料指标与密封产品性能相脱节的“指标-性能断层”现象。围绕这一问题, 项目采用了将材料性能参数转化为密封力学属性、宏观变形等仿真输入参量的等效理论方法, 构建出材料指标评价与密封功能特性之间的直接映射关系, 建立了直接以密封性能为牵引的材料性能参数评价方法, 从而为材料的优化改进提供指导。

D40 -66

氨燃料环境下船用发动机润滑适配性挑战与应对探讨

王靖宇, 陆奕权, 郑婷, 鞠媛媛, 黄海鹏*

中国石化润滑油有限公司上海研究院

氨燃料作为零碳能源在航运业应用潜力显著, 作为实现零碳排放的重要途径而受到国内外发动机厂商的青睐。润滑油是保障发动机正常运行的“血液”, 然而传统发动机油与氨燃料的适配性尚需要深入的研究, 如传统的离线检测手段难以表征油品与氨的反应状态, 通过氨-润滑油在线试验研究表明氨燃料会与 ZDDP 类添加剂发生反应, 影响摩擦化学膜结构, 降低油品抗磨性能。同时氨易腐蚀铜等金属, 对油品的抗腐蚀性能提出了更高要求。中国石化长城润滑油致力于航运业绿色转型升级需求, 开展氨燃料模拟环境下船用发动机油润滑体系研究, 应对氨燃料对船用发动机润滑及腐蚀性影响的挑战。

D40 -67**层状陶瓷多元素亚晶格有序构筑方法及其自润滑性能调控**

杜乘风*, 薛雅青, 王传超, 余泓

西北工业大学

MAX 相陶瓷是一类具有层状结构特征的金属碳化物, 具有良好的力学和抗氧化性能, 在苛刻工况固体润滑与防护领域具有重要的应用前景。最近的研究发现, MAX 相晶格中过渡金属元素组成的增加将导致元素在亚晶格尺度出现化学有序排布, 进而引起材料内部键合乃至宏观理化性质的变化。但是, 迄今为止这一有序亚晶格仍局限于少数双金属组合, 缺乏有效的多元素设计理论和构筑手段。本研究创新地提出了 1 种有序亚晶格的固溶构筑策略, 在 $(\text{Cr}_x\text{Mo}_y\text{Ti}_z)_4\text{AlC}_3$ 五元 MAX 相体系中实现了多元素、可变组成面外有序亚晶格的可控构筑。同时, 采用电子显微观察、实验测试和第一性原理模拟相结合的手段, 深入研究了金属元素种类和比例因素对面外有序结构演变的影响规律。在此基础上, 探究了系列具有面外有序亚晶格结构的五元 MAX 相材料在室温~800 °C 宽温域范围内自润滑性能, 揭示了这一亚晶格有序结构调控 MAX 相陶瓷自润滑性能的具体机制。

D40 -68**宏观尺度固体超润滑材料设计若干进展**

吉利*, 李畔畔, 朱东翔, 李红轩, 陈建敏

中国科学院兰州化学物理研究所

超润滑是摩擦学研究的前沿课题。从理论角度, 指发生相对运动的物体间摩擦力接近为零的现象; 从工程角度, 指材料摩擦系数较传统润滑降低 1~2 个数量级, 达到 0.001 量级及以下。超润滑材料及技术的突破有望推动工业技术文明的变革性进步, 但目前在宏观超润滑性能获得等方面仍存在诸多挑战。本报告从高硬氢钝化、非公度结构超润滑、分子滚动 3 种超润滑原理出发, 分别针对非晶碳薄膜、二维层状和纳米球/卷三类主要的超润滑材料体系所存在的环境适应性、大尺度获得和滚动机理验证等方面的不足, 提供了碳薄膜中程有序结构和摩擦配副界面结构调控、二维层状材料异质复合、低温石墨片自卷曲滚动润滑等一系列研究创新思路, 介绍相关的研究进展情况。

D40 -69**海水中不同载荷下 TA2 合金微动腐蚀磨损行为研究**

柳勇*

中国船舶集团有限公司第七一九研究所

TA2 工业纯钛密度约 4.5 g/cm³ (仅为钢的 57%), 在轻量化的同时具有较高的抗拉强度 (400~550 MPa), 在氧化性环境和氯化物环境中表现出优异的抗点蚀和应力腐蚀开裂性能, 在船舶和海洋工程中被广泛应

用于船体紧固件、换热器管道、泵、阀门、海水淡化装置和深海探测器等关键部位。TA2 在用作换热器管道等近似紧密配合的部件时，常因海水腐蚀和流致振动导致的微动腐蚀磨损而失效。本文采用原位电化学方法研究了浸没在人工海水中的 TA2 合金在不同载荷下的微动腐蚀磨损行为，分析摩擦腐蚀过程的电化学响应及微观结构演变，对其在海洋装备中的应用具有重要意义。结果表明，随外加载荷从 10 N 增至 50 N，TA2 磨损率从 $2.73 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 降至 $3.57 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。在腐蚀磨损过程中，腐蚀电位随载荷增加而负移，腐蚀电流密度显著增大。磨损机制表现为塑性变形、磨粒磨损、黏着磨损和剥落。同时，在磨痕内部的点蚀随着施加载荷的增加而减少，由机械磨损导致的裂纹显著增加。低负载时，材料损失由腐蚀加速的磨损主导，随着载荷的增加，机械磨损成为材料损失的主要原因，点蚀坑未能完全发展便被机械作用去除，协同作用减弱。

D40 -70

CeO₂-LaOF 抛光浆料在 CMP 中的协同作用：分散行为和抛光活性

李英朋，占稳*

中国机械总院集团海西（福建）分院有限公司

化学机械抛光 (CMP) 是实现材料表面平坦化的关键技术。目前，CeO₂ 纳米颗粒被广泛用于 CMP 中的磨料，其在浆料中的分散性和表面 Ce³⁺ 含量直接影响 CMP 性能。本研究采用响应曲面实验设计方法对浆料的三个关键因素进行了理论优化。在多目标优化条件下，浆料的 zeta 电位和 24 h 悬浮率分别达到了 -52.73 mV 和 96.33%。同时，磨料在浆料中的多分散指数 (P.I.) 低至 0.046，表明其呈单分散分布。微观结构分析表明，La³⁺ 在 CeO₂ 表面的吸附和磨料分散性的改善显著增加了 CeO₂ 表面氧空位 (OV) 的含量，并促进了 Ce³⁺ 的生成。同时，DFT 计算表明，与 CeO₂(111) 表面相比，PO₄³⁻ 在 La-CeO₂ 界面上的吸附动力学势垒得到降低，这有利于 PO₄³⁻ 附着，从而提高了磨料的分散稳定性。因此，该抛光浆料表现出优异的抛光性能，在单晶硅 CMP 中获得了 0.704 2 nm 的表面粗糙度(R_a)和 187.23 nm/min 的材料去除率(MRR)。这项工作对 CMP 抛光浆料中各组分的相互作用提供了启发性的见解。

D40 -71

硫化成型工艺对橡胶密封服役性能影响的数值分析研究：由材料属性到制品性能

张兆想^{1*}，郭飞²，贾晓红²

1. 福州大学

2. 清华大学

橡胶密封良好的服役性能与使用寿命是机械设备稳定运行的基本保障，这不仅取决于密封件的原料配方、设计水平，还与制造过程紧密相关。硫化是橡胶密封成型过程中的最后一道工序，对密封件服役性能及形状尺寸精度起决定性作用。但目前橡胶行业多采用经验式硫化成型方法，缺乏科学设计依据。针对这一制约橡胶密封质量提升的薄弱环节，开展了橡胶密封硫化成型过程数值仿真方法研究，为橡胶密封件的高性能、高精度硫化成型提供理论工具和技术支持。研究了硫化程度对橡胶试样摩擦学与力学性能的影响规律，并建立了定量关联关系；提出了橡胶材料非均匀分布的接触力学特性有限元仿真方法，实现了从材料属性到成型密封制品服役性能的全过程仿真，建立了硫化工艺参数与橡胶密封关键性能指标的关联关系，为橡胶密封硫化工艺参数确定提供科学依据。建立了模具边界约束下考虑传热效应膨胀收缩以及分子链交联收缩的应力-应变关系模型，并基于热-化学耦合仿真模型，形成了橡胶密封硫化到开模全流程热-力-化学耦合的瞬态分析方法，定量预测了密封件成型生产中的形变，揭示了模腔尺寸与密封件尺寸动态变化规律的内在关联。

D40 -72

基于高功率脉冲磁控溅射的二硫化钼薄膜摩擦学性能研究

张斌*

HiPIMS 技术的高等离子体离化率特点能够使沉积的薄膜具有更好的结合力和致密性。可以利用这一点来优化传统磁控溅射二硫化钼薄膜的低硬度和低结合力问题，并为薄膜的微纳结构调控提供手段。研究通过二硫化钼薄膜的过渡层工艺改进、HiPIMS 等离子体调控二硫化钼薄膜结构、掺杂二硫化钼薄膜改性的方法，探索薄膜的性能演化规律，以期获得摩擦磨损性能和承载性能的提升。通过调控 HiPIMS 脉冲频率制备系列二硫化钼薄膜并将其与中频磁控溅射薄膜对比；纳米晶二硫化钼晶体间间隙非晶相的存在提高了薄膜的力学性能，薄膜硬度可达 4.6 GPa；实验条件下，HiPIMS 制备薄膜在 30 N 大载荷下也能够实现稳定摩擦且具有优秀的耐磨性；同时实现了薄膜在高真空气氛下 10 N 载荷百万次的长摩擦寿命。在后续薄膜掺杂的工作中，贵金属微掺杂使得二硫化钼薄膜 S/Mo 比明显提高，薄膜内部晶化二硫化钼成分增加；高功率脉冲技术使掺杂元素均匀弥散在薄膜内部，从而保证少量掺杂元素便能够获得薄膜性能提升；薄膜在摩擦过程中摩擦界面的有序度明显提高，降低了摩擦系数和磨损率，10 N 负载下磨损率可达 $3.3 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N m})$ ，往复摩擦寿命超过 30 万次，显著提升了薄膜的摩擦学性能。

D40 -73

功能化聚合物润滑材料设计构筑及性能调控

杨增辉^{*}，张新瑞，王齐华，王廷梅

中国科学院兰州化学物理研究所

聚合物润滑与密封材料具有轻质、高强、耐介质、可设计性强等特点，广泛应用于航空、航天、海洋等领域的密封与传动系统，是保障高端装备可靠服役的关键材料，制约着我国未来高端装备的发展和升级换代。但随着高端装备向极端设计、智能化以及绿色化发展，高性能聚合物润滑材料如何强韧一体化设计、可再生循环利用以及自适应智能润滑面临新的挑战，限制了未来航空航天领域长寿命、绿色化、可持续应用。针对以上问题，研究团队系统开展了聚合物润滑材料的强韧一体化分子设计、动态可逆共价网络构筑以及多刺激响应润滑调控等研究工作。为未来高端装备中聚合物润滑材料的设计提供了新的研究思路。

D40 -74

载流摩擦新型铜基复合材料制备及其磨损机理

国秀花^{*}，宋克兴

河南科技大学

铜基材料因兼具高传导性、高热稳定性和良好的耐磨性，作为特殊工况下的关键材料被广泛应用于武器装备、航空航天、高速铁路等载流摩擦学领域。然而，对于国家重大工程领域高温苛刻条件下使用的高强高导、耐磨损和耐烧蚀铜基材料的需求却日益迫切，尤其是载流摩擦领域用高性能铜基材料，已成为制约我国重点领域战略安全的“卡脖子”关键材料之一。面对载流摩擦工况下高性能化和多功能化的挑战，多元多尺度强化相混杂增强铜基复合材料显现出巨大的发展空间。其中，陶瓷颗粒+润滑相混杂可达到铜基复合材料力学性能和耐磨性能协同提升的目的。石墨烯(GNPs)、碳纳米管(CNTs)、石墨(Gr)等在摩擦过程中起到载荷传递和自润滑作用，是摩擦条件下铜基复合材料的理想润滑相。本研究针对载流摩擦领域对铜基材料的需求现状，基于多元多尺度强化相设计理念，开发了载流摩擦领域用碳材料双相增强铜基复合材料，并对铜基复合材料的载流摩擦性能和耐烧蚀性能进行了对比研究和探讨。

D40 -75

有限长线接触弹流润滑问题中的膜厚公式推导

王静^{*}，杜恒瑞，Ton Lubrecht

东华大学

针对圆柱滚子轴承与滚动的接触，建立了有限长线接触弹流润滑问题的数学模型并进行无量纲化。采用多重网格方法求解压力，多重网格积分法求解固体弹性变形，研究了初始冲击高度、润滑油初始膜厚对油膜压力、膜厚变化的影响，并推导出有限长线接触弹流润滑问题的中心膜厚和最小膜厚公式。

D40 -76

微纳磁性表面织构对磁流体润滑的智能调控

胡星浩^{*}，程彦琦，田闻轩，齐秀佳，孟旭

西北工业大学

磁控智能润滑具有无接触、高度可逆性及快速响应等优点，对高端智能装备的发展有着重要意义，但是实现能够产生高磁场强度及灵活磁场方向的智能润滑表面仍然存在挑战。为了解决这一挑战，我们通过湿法刻蚀制备了微型金字塔形貌表面织构，磁控溅射沉积高磁导率镍铁合金薄膜，研究了在外加磁场作用下微纳磁性表面织构对磁流体摩擦润滑性能的调控。结果表明，外加磁场作用下的金字塔织构尖端能够显著放大磁场强度约 10~30 倍，使磁流体在摩擦接触区域的黏度和承载能力显著增强，从而提升了润滑稳定性和抗磨损能力。此方法有望为高端智能装备中的磁流体润滑调控提供新的设计思路及技术途径。

D40 -77

燃油介质下聚合物复合材料摩擦原位催化转移膜的形成与作用

王超^{*}，孟庆舵，宋富智，邵明超，王廷梅，王齐华

中国科学院兰州化学物理研究所

燃油介质中各摩擦副普遍存在因燃油黏度低，油膜承载能力差，燃油冲刷下转移膜形成难等导致的润滑与磨损问题。鉴于此，本研究基于摩擦原位催化诱导转移膜形成机制，设计合成了 1 种 Ni 掺杂 Co_3O_4 的新型纳米颗粒改性聚醚醚酮复合材料，研究了航空燃油 RP-3 润滑介质下复合材料的摩擦磨损性能。结果表明，Ni 掺杂 Co_3O_4 的新型纳米颗粒凭借其催化作用，有效促进燃油分子发生脱氢反应，碳链的随机断裂和产生的自由基在钢表面发生分子重聚，原位形成类富勒烯碳基转移膜，相比商业化碳纤维改性 PEEK 复合材料，摩擦系数降低 30%，体积磨损率降低 40%。本研究通过 FIB-TEM、AFM、ToF-SIMS、GC-MS 等深入分析了摩擦化学反应及碳转移膜的形成过程，揭示了燃油润滑条件下转移膜的形成和作用机理，为推动燃油润滑条件下聚合物复合材料设计提供了研究思路。

D40 -78

齿轮表面织构化设计及其摩擦学性能研究

戴庆文^{*}，马云龙，黄巍，王晓雷

南京航空航天大学

表面织构作为 1 种可以显著提高表面摩擦学性能的技术，得到了国内外研究人员的广泛关注。为利用表面织构提升航空齿轮副服役性能，本研究采用三维等温线接触弹流润滑模型，分析了齿轮副表面在齿顶、分度圆和齿根 3 个典型啮合位置下不同几何参数圆凹坑织构的弹流润滑性能，预测了在各啮合点的最优圆凹坑几何参数，并分析了织构形状对润滑性能的影响。数值计算结果表明：特定参数下表面织构可增加齿面的局部膜厚，提高齿面润滑性能。圆形织构在 3 个典型啮合位置的最优深径比为 0.06，而最优的面积率则在齿根处和分度圆处较小，分别为 5%和 12%。而在不同织构形状的分析上，圆形织构就最优的润滑性能上表现最佳，矩形织构次之，而椭圆织构较差，其原因可归结于织构收敛楔的大小和形状所带来的附加流体动压效应对齿轮弹性变形的影响，这会改变接触面的油膜厚度，圆形和矩形织构拥有较宽的收敛楔，使得接触面的平均油膜厚度要更大。随后，通过标准 FZG 齿轮试验台验证了织构化齿轮表面的摩擦学性能。综合分析散热性、减振性及耐磨性能后，得出以下结论：在小齿轮表面进行织

构化处理, 形成非织构化大齿轮/织构化小齿轮的齿轮副, 展现出最优综合使用性能。该配置方案可使大齿轮温度降低 12.5%, 小齿轮温度降低 13.4%, 润滑油温降低 28.3%; 垂直振动减少 12.5%, 水平振动减少 14.2%。在油润滑条件下, 织构化小齿轮试验组实现磨损率降低 24.8%; 在干摩擦条件下, 小齿轮表面织构化处理可有效抑制磨损, 磨损率降低幅度近 30%。

D40 -79

基于软质环氧树脂涂层的固-油复合超润滑研究

刘小强*

江西理工大学

油润滑由于维护便利性高, 经济性好等优点, 是目前工程应用中最常用的润滑方式。然而, 大多数粘性基础油实现超润滑仍然具有挑战性。固-油协同被证实是实现油基超润滑的有效手段, 但目前相关研究主要基于无机涂层构建的固-油协同超润滑体系, 适用的油品类型有限。本文作者利用环氧树脂 (EP) 涂层和不同类型的基础油构建了固-油协同润滑体系。非极性油 (石蜡、150N、PAO10) 和极性油 (PEG200、TMTC、OH PDMS、m-PEG550、1,4-丁二醇、1,5-戊二醇) 与 EP 涂层组成的固-油协同润滑体系均能在空气环境条件下实现宏观超润滑。同时, EP 涂层的固-油协同润滑体系实现超润滑没有出现明显的磨合阶段, 摩擦副未出现明显的磨损。TEM-EDS、TOF-SIMS、显微红外光谱结果表明钢球表面形成了一层羟基化转移膜, 即使在不含羟基的非极性油中摩擦的钢球表面形成的转移膜中仍然含有大量的羟基。EP 涂层促进了钢球的表面羟基化, 这可能是基础油实现 EP 涂层表面超润滑的一个关键因素。且含有羟基的极性油与 EP 涂层复合的摩擦系数可低至 0.001。

D40 -80

纳米铜/有机钼添加剂辅助聚合物基摩擦副协同实现油基超滑的机制研究

高传平*, 张晟卯, 张平余, 张治军

河南大学

作为一项前沿技术, 油基超滑为降低油润滑装备的摩擦能耗、延长使用寿命提供了全新思路; 润滑油仍是目前用量最大、用途最广的润滑材料, 但润滑油较高的黏度是实现油基超滑的主要障碍。因此, 开辟油基超滑新途径具有重要的学术意义和工程价值。本文中以纳米铜/有机钼为润滑剂、聚合物聚醚醚酮 (PEEK) 和/或聚四氟乙烯 (PTFE) 为摩擦副构建固-液耦合润滑系统, 旨在结合前者的摩擦催化特性与后者的易成膜优势实现油基超滑。结果显示, 油溶性纳米铜 (DDP-Cu NPs) 既有优异的减摩抗磨性能, 又能发挥摩擦催化作用, 促使摩擦界面非晶碳及石墨烯基高性能摩擦膜的原位生成; 同时, DDP-Cu NPs 的滚动效应能大大缩短油基超滑的跑合期, 甚至实现全程超滑; 另外, DDP-Cu NPs 与有机钼 (MoDDC) 间的协同作用能进一步提升油基超滑系统的承载能力; 最后, DDP-Cu NPs 能与 PTFE 摩擦界面生成的羧基发生螯合, 从而巩固摩擦界面摩擦膜的锚定作用。另一方面, 油基超滑实现过程中, 聚合物摩擦副 (即 PEEK、PTFE 及其复合材料) 则是摩擦界面原位形成碳基摩擦膜的重要碳源保障。本研究突破了目前润滑油黏度对油基超滑实现的障碍, 发展了 1 种新型油基超滑体系的构建方法, 研究结果可为油基超滑系统摩擦副材料的拓展及新型体系的高端构筑提供崭新的设计思路 and 基础实验数据。

D40 -81

不同维度填料对低温氟醚橡胶耐磨性能的影响

王建军*, 王阳, 孙伟

广州机械科学研究院有限公司

采用试验设计 (DOE) 探究了不同维度填料 (包括热裂解炭黑、矿物炭黑、二硫化钼、钛酸钾晶须及碳纳米管) 及其组合与用量对低温氟醚橡胶性能 (特别是耐磨性) 的影响, 系统制备并表征了复合材

料的力学性能、压缩永久变形性能以及耐磨性能。结果表明,不同填料的补强效果各异,其中碳纳米管对复材的力学性能提升最明显,但对耐磨性能的改善有限,且会导致压缩永久变形显著增大;不同维度填料存在协同效应,二硫化钼/钛酸钾晶须/热裂解炭黑的组合赋予了复合材料优异的力学强度和耐磨性,同时成功的将压缩永久变形维持在较低水平,实现了对复材综合性能的协同优化。本研究为开发具备一定耐磨需求的高性能低温氟醚橡胶密封材料提供了重要依据。

D40 -82

检测技术在润滑密封与耐磨材料领域的应用

王静*

斯坦德检测集团股份有限公司

斯坦德工业贸易致力于工业产品检测与研发,业务从最初的橡塑高分子材料检测扩展至材料、部件、成品的装配制造质量评估、新能源建设与技术看务、消费品和产商品政府抽检和水利工程质量评估等多个领域。其中工业事业部服务领域涵盖工业制造(基础工业、高端制造业、交通运输业)、军工(航空航天、低空经济、船舶、兵器)、建筑材料与工程、电力设施配套(含风力发电)等领域,涉及高分子材料、复合材料、金属、涂料、建筑材料、教体产品、电子电器、消费品等,测试服务包含材料理化性能、环境可靠性、防火阻燃、寿命评估、疲劳耐久、研发分析、非标检测等方向,着重于打造从检测到研发的一体化服务平台。在润滑密封与耐磨材料领域,可提供耐磨系数、磨损量、线膨胀性系数、收缩率、硬度、拉伸强度、断裂韧性、SEM、TEM 等各种物理、可靠性验证检测,旨在为企业提共研发与质控相结合的个性化技术解决方案。

D40 -83

三聚氰胺长链醇酯衍生物作为摩擦改进剂的高温摩擦学性能研究

胡文敬,张敬春,李久盛*

中国科学院上海高等研究院

随着环保法规的日益严格,发动机燃油经济性的提升已成为必然要求。为了最大化发动机运行时的燃油经济性,低黏度润滑油技术得到了广泛发展。然而,黏度的降低会导致油膜厚度随之变薄,甚至在某些工况下出现油膜不连续的情况。在这种情况下,低黏度发动机油更容易使发动机部件处于混合润滑或边界润滑状态,此时大部分油膜会被挤出接触界面,从而削弱了润滑效果。为此,摩擦改性剂被引入到摩擦界面,形成密集排列的吸附膜或摩擦化学膜,确保其在低黏度润滑油环境下仍能保持良好的润滑性能。针对目前有机钼摩擦改进剂中存在的硫、磷元素和灰分含量较高,以及有机摩擦改进剂在高温下性能有限等问题,本研究基于氮、氧原子孤对电子与金属表面空 d 轨道间的配位化学作用机制,设计合成了一类新型环保有机摩擦改进剂。这类添加剂以富氮三嗪环为极性核心、长链醇酯为多支链形成三嗪衍生物。球-盘往复摩擦实验结果表明,与基础油相比,仅在基础油中添加质量分数 0.5%三聚氰胺长链醇酯即可有效降低油品的摩擦系数。且该添加剂在高温下仍能保持稳定的减摩性能,在 200 °C 的高温环境下,其摩擦系数相对于基础油降幅仍可达 28%。通过对该有机摩擦改进剂的结构和性能构效关系深入分析,发现其富含氮原子的刚性三嗪环结构、胺基及长链酯基之间的协同吸附作用,能够使添加剂分子牢固附着于金属表面,形成稳定的吸附层。进一步研究表明,高温摩擦环境下,添加剂会发生摩擦化学反应,生成碳基保护膜。这种由吸附作用与碳基材料共同形成的润滑膜能有效钝化金属表面,从而显著提升这类化合物作为润滑添加剂的减摩性能。

D40 -84

特殊服役环境下的微动磨损研究

彭金方,贺继樊,任岩平,刘建华,李浩,朱旻昊*

西南交通大学

面向轨道交通、航空航天、半导体制造业等领域高端装备关键部件实际服役环境及微动损伤研究需

求, 研制的试验系统实现了高温气氛环境、高洁净度环境、氢气环境、磁场环境、高精度和长寿命等特殊工况的实验模拟; 研制的试验系统实现了多种运动模式 (如往复滑动、切向微动、冲击磨损和冲击复合微动), 经第三方测试校准, 试验机具有高精度运动控制 (精度优于 $\pm 1\mu\text{m}$)、界面响应在线监测等功能。通过研究不同特殊环境下关键部件材料的微动磨损行为, 分析了温度、载荷和位移等条件对摩擦系数时变特性、运行工况、磨损形貌特征、磨屑运动行为和主要损伤机制的影响, 揭示了相应材料在服役环境下的损伤机理。从机械设计到材料匹配选型以及表面工程方法等不同维度提出了微动摩擦学的防护思路, 以期为后续抗微动磨损设计提供理论指导。

D40 -85

空间轴承多孔保持架材料润滑机理研究

朱朋哲*, 冯翔宇, 王文中

北京理工大学

多孔聚酰亚胺是 1 种高性能自润滑材料, 广泛应用于空间轴承保持架中作为储油介质。本论文中研究了含油多孔保持架材料在滑动接触载荷下的瞬态渗流行为, 探索了压力和离心力对渗流过程的影响, 分析了多孔介质内部流场的形成过程, 提出了多孔聚酰亚胺材料在滑动接触载荷下的供油机理。在此基础上, 基于完整的 N-S 方程提出了润滑油流出状态的判据, 综合考虑了孔径、转速、回转半径、油密度、表面张力及接触角的影响。建立了有限元模型验证孔隙尺度下判据的准确性, 开展了多孔聚酰亚胺离心供油试验验证了宏观尺度下判据的准确性。提出了多孔聚酰亚胺材料离心供油状态相图, 为空间轴承保持架结构设计提供指导。上述研究为深入理解空间轴承保持架材料的连续供油润滑机理提供了理论基础。

D40 -86

高聚物复合涂层减阻特性实验研究

谢络*, 周宽达, 江浪, 文俊, 胡海豹

西北工业大学

鱼类经历了亿万年的进化, 不仅具有完美的流体动力外形, 同时还具有高超的减阻本领, 水下巡游效率令人惊叹。已有研究表明, 鱼类通过在体表实时分泌高分子黏液实现高效减阻, 有学者测试显示 5% 的太平洋梭鱼黏液就可以实现 65.9% 的减阻率。受此启发, 结合仿生高聚物的显著减阻性能和减阻涂层的工程化应用优势, 制备了仿生高聚物复合涂层, 通过扫描电镜、接触角测试仪等对涂层表面特性进行了表征; 在低速循环水槽测试中获得了显著的减阻效果, 最大减阻率超过 20%, 并结合流场显示实验解释了涂层减阻机理。研究结果可以为水下装备减阻涂层研发提供支撑。

D40 -87

超滑移阶梯式螺旋槽液膜密封性能及其机理探究

胡琼*, 李毅, 莫文杰, 张梓绚, 陈雅静

江苏海洋大学

为提高液膜密封端面间的开启力, 抑制空化失稳现象发生, 本文设计了 1 种新型超滑移阶梯式螺旋槽 (SS-S) 液膜密封结构。通过 CFD 数值仿真和对比研究方法, 探讨槽底超滑移设计+阶梯结构对液膜密封性能的影响, 并结合微流场分析密封机理。研究表明: SS-S 在多种工况下均展现出最优异的密封性能, 适用于宽范围的转速、载荷和运行膜厚条件。其开漏比和空化率均优于无滑移螺旋槽 (NS-N)、超滑移螺旋槽 (SS-N) 和无滑移阶梯式螺旋槽 (NS-S), 且空化分布特征独具一格; 在高速低载中膜厚工况下, 当平均槽深为 $5\mu\text{m}$ 时, SS-S 的开启力和开漏比最大, 空化率最小, 之后随着平均槽深的增大, 开漏比趋于平稳, 变化幅度不超过 0.85%; 阶梯级数为 2 时, SS-S 能够获得最大的开漏比和最小的空化率, 展现出显著的协同效应; 阶梯延展方向为周向时, 开启力最大。通过观测微流场, 发现 SS-S 协同超

滑移和阶梯结构是通过增强台阶效应和流道收缩效应，显著提高了液膜的动压效应，增大了液膜压力，同时保持液膜流动的有序性，并大幅提高了槽区流速。在转速为 6000 r/min、进出口无压差且运行膜厚为 3 μm 时，与 NS-N 相比，SS-N 和 NS-S 的压力峰值分别提升了 2.19% 和 7.5%，而 SS-S 的压力峰值则提升了 22.19%。

D40 -88

高浓度溶液及类离子液体超滑新体系研究

梁红玉^{*}，卜永锋

江苏大学

润滑材料，因可通过降低摩擦磨损（即，改善机器性能/延长寿命）来实现节能减排，而成为摩擦学领域的研究重点；其中，超润滑材料具有近乎理想润滑性能（ $\mu < 0.01$ ），成为摩擦研究的热点。相较于固体超润滑材料所需的苛刻条件（如真空/惰性气体、尺度限制、非公度接触及表面绝对刚性等），液体超润滑材料在普通大气氛围下、宏观尺度上、常规平整表面即可实现相对稳定的超润滑。液体超润滑体系众多（如典型酸基/醇基、水合碱金属离子、离子液体及固/液耦合材料等），但皆具以下共性：（1）因分子离子间弱相互作用而赋予的超低剪切阻力滑移界面；（2）液体材料与摩擦副间强相互作用形成的吸附膜/摩擦化学膜/转移膜等。因此，基于上述两点认识，我们构建了高浓度水溶液（如 ZnCl_2 浓溶液、 MgO/LiTFSI 及石墨烯/浓 KOH ）和类离子液基（如 $\text{ChCl/MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 ChCl /三乙醇胺、非等径添加剂 CDs/ChCl+Gly 及非等径添加剂 $\text{PMMA/ZnCl}_2+\text{EG}$ ）新型宏观液体超滑系统。这些研究深化认识了液体超润滑新体系中低剪切滑移界面的形成机制，为推进液体超滑材料的应用奠定了基础。

D40 -89

基于“油池-通道”结构的环氧复合材料摩擦学性能研究

王孟丹，潘炳力^{*}，吕盈莹

河南科技大学 化学化工学院

本研究开发了 1 种基于聚四氟乙烯/多孔聚乳酸/聚多巴胺/油菜花粉（硅藻土）/石蜡三元骨架（ $\text{PTFE/PPLA/PDA/POL(DE)PW}$ ）的新型储油输油策略，用于显著提升环氧树脂（EP）的摩擦学性能。该研究创新性地构建了以多孔聚乳酸（PPLA）为输油通道、硅藻土（DE）或花粉（POL）为储油池的生物质“油池-通道”结构。将这种生物质“油池-通道”结构引入环氧树脂基体后，可获得兼具自润滑和自修复功能的双性能环氧复合材料。实验与理论计算证实，这种智能“油池-通道”系统具有高储油量、高保油性以及润滑油的按需释放/再吸收特性。与纯环氧树脂相比，新型复合材料的摩擦系数和比磨损率分别降低了 85.46% 和 94.25%。

D40 -90

基于磨合过程优化设计的耐磨表面微观结构构筑及实验验证

曹辉^{*}，魏鹏，岳骆，白鹏鹏，孟永钢，田煜

清华大学

磨损是机械传动界面常见的现象。异常磨损会导致零部件的功能退化甚至失效，故表面抗磨设计或抗磨损技术成为当前高端装备设计中的主要考虑的环节。对此，本研究中提出 1 种人为优化设计的磨合预处理方法诱导摩擦副表面形成低磨损的润滑接触状态。首先，采用 PAO40 基础油对 AISI 52100 steel 和 40CrNiMoA 配副表面进行预磨合处理，其次，采用减摩添加剂和抗磨添加剂同时存在的润滑油开展高温磨合实验。最终，开展纯基础油润滑下摩擦试验验证，对比磨合表面和未磨合表面的磨损情况，结果显示，经过人为设计磨合工艺的表面相比未磨合表面磨损率可降低 1 个数量级。进一步采用 SEM 和 XPS 对磨合位置的表面形貌及成分进行表征，引入混合润滑计算分析模型对比磨合后表面与未磨合表面的润滑状态，

结果表明, 经过磨合后, 磨痕处表面形成一层摩擦化学反应膜, 并且流体动压效应显著增强, 流体承载比增大 50% 以上, 两者协同效应改善了接触区的润滑性和抗磨性。

D40 -91

功能型碳点的设计制备及其摩擦学性能研究

薛盛华¹, 叶谦^{1*}, 周峰²

1. 西北工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所润滑材料全国重点实验室

摩擦学性能在提升机械系统效率与延长其使用寿命中具有关键作用, 直接影响能耗水平、材料磨损程度及系统运行的稳定性。在接触界面使用润滑油脂仍是当前减少摩擦与延缓部件失效的主要手段, 传统润滑剂在高温、高压等极端工况下常表现出导热性差、润滑失效及基础油泄漏等问题, 亟需开发在苛刻环境下依然具备稳定性能的高效润滑材料与功能添加剂。碳点因其纳米尺度、高比表面积、良好热稳定性与低毒性等特性, 在润滑添加剂领域受到广泛关注。然而, 碳点在低极性基础油中的溶解性较差, 限制了其实际应用。本研究基于儿茶酚自组装策略, 结合[4+2]可逆加成反应, 构建出表面结构可调的功能化碳点, 并通过超分子自组装方式实现其在多种合成润滑油中的稳定限域分散。所得复合润滑凝胶材料不仅展现出优异的热可逆性与剪切响应特性, 还兼具良好的减摩抗磨性能与高剪切黏度。通过分子动力学模拟, 进一步揭示剪切过程中润滑油分子与添加剂之间的动态相互作用及凝胶体系中的分子扩散行为, 从分子尺度阐明其润滑机制。该研究为功能化碳点在高性能润滑体系中的应用提供了新路径, 也为极端工况下智能润滑材料的设计与开发奠定了理论基础。

D40 -92

聚苯乙烯衍生的功能化炭纳米球的设计及其摩擦学性能研究

王逸新¹, 汪甜甜¹, 薛盛华¹, 靳广凯¹, 袁浩航^{1,2}, 刘淑娟¹, 叶谦^{1*}, 周峰^{1,2}

1. 西北工业大学

2. 中国科学院兰州化学物理研究所

摩擦和磨损是造成能量和材料损失的主要因素, 开发创新性的润滑材料和技术是减少摩擦和磨损直接且高效的方法。其中纳米颗粒作为润滑油添加剂, 可以与摩擦表面相互作用, 形成保护层, 有效提高零件的减摩抗磨性能。然而, 由于无机纳米颗粒具有较高的化学惰性, 其在基础油中的团聚是一个亟待解决的问题。针对以上问题, 本研究中采用聚合物为前驱体, 通过控制反应条件和调节炭化温度, 保留聚合物中部分亲油且稳定的有机官能团, 制备碳基衍生物, 并且通过物理或化学方法将异种原子引入到纳米材料的骨架中, 调节电子结构并改变其固有性质, 提升了纳米材料的结构强度, 使其更适于严苛工况条件下的润滑, 其分散稳定性可持续 10 d 以上; 其次结合表面包覆和内部掺杂的策略, 制备具有核壳结构的炭纳米球。其作为润滑添加剂将摩擦系数进一步降低到 0.106 (38%), 相比于基础油, 抗载性能提高了 1.7 倍。

D40 -93

电动汽车差速器关键零件耐磨涂层工况适应性研究

周辉, 张蒙祺, 孙瑞雪, 莫继良*

西南交通大学

电动汽车在起步、急加速、能量回收(正、反转交替)过程中, 差速器承担更大的瞬时扭矩, 其零部件磨损失效概率较燃油汽车显著升高。面对这一现实问题, 创新应用表面涂层技术是提升电动汽车差速器部件耐磨性的关键路径。然而, 同时现有涂层抗磨损评价方法与零件实际承载状态存在差异, 因而较难准确评估不同类型涂层对差速器零件所面对的特殊工况的适应性。为此, 针对差速器磨损最为严重的行星齿轮轴, 建立轴-环摩擦磨损试验装置, 并通过有限元接触仿真确定基准试验载荷, 还原零件实际接触和相对

运动状态；在不同润滑条件和载荷水平下开展镀镍涂层和类金刚石涂层（DLC）磨损试验，评估其抗磨损性能及适用工况。结果表明，由于镀镍涂层相对硬度较低，在各次试验中均存在不同程度的磨损，但即使在恶劣工况（高载荷、少润滑）下涂层仍未被完全去除，仍保持连续性保护能力；DLC 涂层硬度更高，使其在多数工况下磨损量近似为零，呈现出优良的抗磨损能力，但在高载荷、少润滑条件下涂层的局部损伤会迅速扩大，并在短时间内涂层完全消失而基体材料暴露，使零件表面发生胶合等严重磨损。因此，在高负载、强冲击条件下可考虑使用镀镍涂层，避免由于涂层完全失效而导致零件表面剧烈磨损；而工况较为稳定时可使用 DLC 涂层，充分发挥其高硬度优势。本文研究结果可为差速器零部件表面涂层设计提供一定的科学依据。

D40 -94

基于晶体约束制备具有高孔隙率和优异力学性能的分级多孔水凝胶

袁浩航，王逸新，汪甜甜，薛盛华，靳广凯，叶谦，刘淑娟*，麻拴红
西北工业大学

具有超高孔隙率的水凝胶材料因其高效物质扩散特性备受关注，然而在维持孔隙率的同时实现高力学性能仍是领域内亟待突破的难题，尤其限制了其在人工关节软骨等高承载弹性支架中的应用。本研究基于晶体约束的多溶剂模板策略，成功制备了兼具分级多孔结构与优异机械性能的聚乙烯醇水凝胶（P-exogel）。动态模板移除过程中，结晶诱导的孔壁网络抗溶胀效应显著提升了材料力学性能。所获 P-exogel 展现出 81.69% 的超高孔隙率及分级互穿孔隙网络，并具有超快表面润湿性（润湿时间 < 10 ms）。力学测试表明，该材料具备突破性机械性能：拉伸强度达 2.47 ± 0.53 MPa，延伸率 > 400%，韧性高达 5.61 ± 1.65 MJ·m⁻³，且弹性恢复性能优异。预制裂纹拉伸试验进一步证实其断裂强度（ 18.73 ± 2.52 kJ m⁻²）显著优于现有同类材料及商用产品。动态载荷-卸荷试验表明，P-exogel 独特的网络微结构赋予其高效可逆的液体吸收/释放能力。上述力学性能与功能特性的协同作用，充分验证了其在高承载弹性支架领域的应用潜力。

D40 -95

跨尺度结构调控 TiB₂/Ti₃AlC₂ 复合陶瓷实现宽温域高强度与自润滑协同

李洞亭，刘畅*
四川大学

发动机、燃气轮机等高端装备制造领域中关键作动部件常在高温、高载/变载等极端条件下服役，这推动固体润滑材料向高温下（>600 °C）高力学和摩擦学性能发起挑战。在此工况下，开发兼具宽温域高强度、低摩擦系数与高耐磨性的固体润滑材料极具挑战性。以 Ti₃AlC₂ 为代表的 MAX 相金属陶瓷因其独特的层状结构和弱层间相互作用展现出优异的断裂韧性和固体润滑特性，但其固有的强度与耐磨性不足限制了其作为高温固体润滑材料的广泛应用。基于此，本研究中针对在 Ti₃AlC₂ 金属陶瓷层间弱键合的关键瓶颈，提出 1 种原位构筑纳米 TiB₂ 异质结构的强化策略。通过放电等离子烧结技术制备出致密的 TiB₂/Ti₃AlC₂ 复合陶瓷，利用原位合成的方法促进形成共格界面，显著提升界面结合强度。第二相强化与晶粒细化协同作用使材料在高温下兼具高强度（800 °C：抗弯强度 610 ± 29 MPa，抗压强度 1368 ± 47 MPa）、高硬度 812 ± 29 HV_s，高耐磨兼顾润滑特性（800 °C 和高于 2 GPa 载荷下，摩擦系数 < 0.4，磨损率处于 10^{-6} mm³/(N·m)），相比于传统金属和陶瓷材料展现出性能优势。归因于 TiB₂ 纳米颗粒的引入有效致密化并强化 Ti₃AlC₂ 基体，确保了复合陶瓷优异的力学性能；同时 TiB₂ 在高温摩擦过程中迅速氧化，形成连续光滑的含固体润滑剂 B₂O₃ 的摩擦膜，从而实现了高温下的优异固体润滑效果。该工作不仅为高温固体润滑应用提供了一个极具潜力的材料体系，更通过阐明界面强化与摩擦化学成膜的双重作用机制，为设计高性能 MAX 基高温固体润滑金属陶瓷提供了新的有效策略。

D40 -96

汽车制动磨损源可吸入颗粒物排放特性及其减排方法

魏龙*

山东科技大学

近年来,随着汽车尾气排放标准的日趋严格以及电动车销量的快速增长,汽车的非尾气颗粒物排放占汽车颗粒物排放的比重越来越大。作为非尾气排放中的主要污染源之一,汽车制动时所产生的可吸入颗粒物受到了越来越多的关注。在新推出的欧 7 排放标准中规定,到 2035 年以前 M1、N1 类汽车的可吸入颗粒物排放要降到 7 mg/km 以下,因此,如何降低制动磨损源可吸入颗粒物排放已成为汽车制动系统发展亟需解决的关键问题。本项目针对市面上常见的低金属、半金属和无石棉有机材料,采用销盘式摩擦磨损试验台及配套密封舱,研究市区行驶工况下可吸入颗粒物的排放特性,并探索其减排方法。研究发现,可吸入颗粒物数量浓度为 85-430 #/cm³,质量浓度为 180~720 mg/m³,制动速度对可吸入颗粒排放的影响大于制动压力。同时,可吸入颗粒物呈现出片状及多面体结构,成分上主要由铁、碳组成。在减排方法方面,研究发现提升制动盘硬度,降低制动片中金属纤维含量均可显著降低可吸入颗粒物排放。研究结果可为预测汽车非尾气颗粒物排放,研制低颗粒物排放制动器提供理论支持。

D40 -97

银基功能涂层的载流摩擦磨损及其微观组织演变研究

陈德馨^{1*}, 苏东艺²

1. 暨南大学

2. 广州今泰科技股份有限公司

金属银由于其优异的导电、导热性能与化学稳定性,且具备相比于金的经济性、相比于铜的空气稳定性等优点,但纯银导电涂层存在硬度与弹性模量欠佳、耐刮擦与耐磨蚀能力不足等问题,限制了其在高端装备中的广泛应用。因此本论文通过开发 1 种制备高强耐磨银涂层的新方法,在紫铜粗糙表面获得沉积均匀、低电阻率、高硬度和良好界面结合的银涂层。在摩擦过程引入适当的电流,可有效改善涂层的电蚀与载流摩擦学行为,磨损类型主要为粘着磨损和低周疲劳磨损。优异的摩擦学性能主要归因于摩擦产生的严重塑性变形和电流引起的焦耳热的电塑性效应大大增加了形核密度和形核速率,在摩擦和电流协同作用下加速了晶粒细化过程,促使纳米晶结构层在银基涂层表面的快速形成有效缓解了剪切应力和应变的向下渗透。PAO 基础油润滑下,电流的热效应易积累引起涂层的软化导致更严重的塑性变形。导电润滑脂下的磨痕深度、磨痕宽度和平均接触电阻有所降低。磨痕表面并无连续润滑膜层或氧化膜层形成,导电机理仍通过接触斑点进行;载流润滑摩擦后磨痕横截面的呈现出微-纳尺寸层片状结构,该结构可以很好吸收应力应变从而获得良好的耐磨性能。引入纳米金刚石(NanoDiamonds, NDs)作为增强相制备银基复合涂层材料,NDs 均匀镶嵌于 Ag 单质中,并进一步提升复合涂层的硬度与耐磨性能。这是由于 NDs 促进晶粒细化并对复合涂层组织进行强化,同时硬质颗粒传递载荷,NDs 有效抑制银涂层内银晶粒在载流摩擦过程中的剧烈塑性变形。

D40 -98

双连相 Cu/PTFE 自润滑材料界面改性及其性能影响研究

傅丽华*, 杜三明, 张永振, 花铝东

河南科技大学

聚四氟乙烯(PTFE)作为典型的自润滑材料,存在承载能力弱、导热性差、耐磨性不理想等问题,本文在 PTFE 自润滑材料中引入了三维网状铜骨架材料制备了双连续相 Cu/PTFE 自润滑复合材料,但由于 PTFE 高度不粘性,使得其与铜骨架之间存在严重的界面结合弱、界面热阻高等问题,进而影响其减摩耐磨性能。因此,本文中采用聚多巴胺(PDA)和 PDA+金属纳米粒子(PDA+MNPS, M=Ag/Cu)对双连续相 Cu/PTFE 自润滑材料进行界面改性,并研究了不同界面改性层对双连续相 Cu/PTFE 自润滑材料导热性能、界面结合性能和摩擦学性能的影响。结果表明:相比未改性双连续相 Cu/PTFE 自润滑材料,PDA 改性层

不仅可与 Cu 金属相发生化学键合也可与 PTFE 聚合物相发生化学键合,从而可提高复合材料界面结合能力;在 PDA 改性层中添加 MNPs 颗粒后, MNPs 促进了 PDA 和 PTFE 涂层之间的化学交联反应,进一步提高了双连续相 Cu/PTFE 自润滑材料的界面结合性能,同时 MNPs 在界面改性层中形成了导热通道,使得复合材料的导热性和热稳定性也显著提升;在摩擦磨损方面, PDA+MNPS 改性双连续相 Cu/PTFE 自润滑材料归因于优异的力学性能、良好的摩擦热耗散和转移膜形成能力,使得 PDA+AgNPS 与 PDA+CuNPS 改性后其耐磨性较未改性复合材料分别提升了 28.1%、45.8%。

D40 -99

骨关节炎治疗用刺激响应型仿生润滑载体

刘建喜*, 田乐杰, 刘维民
西北工业大学

骨关节炎(OA)是1种常见的慢性退行性关节疾病,影响全球数亿人的健康。协同疗法可以提供长效的关节润滑而不会剪切变稀并可抑制口服药物治疗引起的潜在毒性,是OA治疗的新兴策略。协同疗法的核心是关节内注射由多孔药物载体作为核以及界面软物质润滑层作为壳的润滑药物递送载体。传统药物载体存在比表面积小、孔径尺寸大、难以实现高的负载量和长效药物释放的问题。金属有机框架(MOFs)材料是1种由金属离子或离子簇与有机配体通过配位键自组装而成的纳米多孔材料,其具有大的表面积,可设计的孔径尺寸和结构以及可调的表面功能性,已被作为递送载体用于骨关节炎的抗炎药物递送。然而,如何赋予MOFs药物载体良好的水润滑性能以及刺激响应性药物释放存在很大挑战。我们提出了1种刺激响应型水凝胶功能化的MOFs润滑载体,可实现水介质下的润滑增强和药物控释,为构筑软硬纳米多孔复合材料用于骨关节炎的协同治疗提供了设计思路和理论依据。

D40 -100

基于可逆分子相互作用的仿生润滑涂层设计

项力*, 曾宏波, 陈云飞
东南大学机械工程学院, 江苏省微纳生物医疗器械设计与制造重点实验室, 江苏 南京 211189

分子间相互作用是决定材料物理化学性质及功能的核心因素。近年来,在生物机械摩擦学领域,研究者们致力于表征这些相互作用,尤其是非共价键在软材料与生物界面的关键作用。本次报告将介绍本研究团队利用纳米力学工具应用于量化聚合物/生物聚合物材料及生物系统中分子间相互作用的最新研究进展,重点关注海洋贻贝的湿黏附机制。贻贝黏附蛋白富含乙酰儿茶酚氨基酸(如L-3,4-二羟基苯丙氨酸,DOPA),在实现贻贝与水下多种基底表面的快速、牢固黏附中发挥关键作用。然而,DOPA化学并非影响贻贝湿黏附的唯一因素。我们近期研究系统揭示了贻贝水下黏附中分子间与表面相互作用机制,包括生物聚合物-金属配位、阳离子- π 、阴离子- π 作用以及疏水环境中的氢键作用。这些发现为多功能软材料的设计提供了理论基础。例如,传统观点认为贻贝角质层机械性能来源于铁离子和DOPA的螯合。然而,我们发现钒离子和DOPA的多配体交联特才是决定其超强机械性能的关键因素。基于这些机制,我们开发了一系列自修复、高承载、超润滑的微纳涂层材料,这些材料在生物医学工程和生物摩擦学领域展现了广泛应用前景。这些研究不仅为仿生材料设计准则提供了新见解,还为基于可调分子相互作用的多功能软材料的设计开辟了新途径。

D40 -101

超高分子量聚乙烯缠结度与摩擦性能关系研究

魏鹏, 曹辉, 白鹏鹏, 田煜*

超高分子量聚乙烯（UHMWPE）因其优异的耐磨性、耐腐蚀性和自润滑性能，成为混合输送管道潜在的理想材料。然而，目前其微观结构与摩擦性能之间的关系尚不明确，制约了对其耐磨机理的深入理解。本研究选取了四种不同类型的 UHMWPE 样品（GUR 400Fine、GUR 4012、GUR 4130 和 GUR 4150），系统测试了其摩擦学性能。结果显示，GUR 4130 的摩擦系数（COF）和磨损率在温度升高的条件下呈下降趋势，而其结晶度在缠结密度增加的情况下保持稳定，该现象通过动态力学分析（DMA）得到了验证。此外，尽管 GUR 400Fine 与 GUR 4012 具有相近的分子量，但由于 GUR 400Fine 缠结密度较低，其摩擦系数和磨损率分别为 GUR 4012 的 1.12 倍和 1.37 倍，表明缠结结构在摩擦性能中起着关键作用。进一步分析发现，分子量越大，链缠结密度越高，材料表现出的耐磨性能越优异。综上所述，合理调控分子链缠结结构，可通过简便的加工手段显著提升 UHMWPE 的摩擦学性能，为其在复杂输送环境中的应用提供了理论依据和实践路径。

D40 -102

高熵陶瓷晶体-非晶纳米复合材料的摩擦驱动表面偏析能够减少磨损

任怡¹，邵喜博¹，刘建喜¹，杜乘风¹，吴戈²，王龙^{1*}，杨军³

1. 西北工业大学

2. 西安交通大学

3. 中国科学院兰州化学物理研究所

高熵陶瓷薄膜比传统金属薄膜具有更高的硬度，但固有的脆性极大地限制了其更广泛的应用。晶体-非晶纳米复合材料具有更高的强度、更好的韧性和均匀变形的能力。在这项研究中，基于热力学原理设计了 (AlCrZrMoV-Ti-B-C)N_x 纳米复合结构薄膜，该薄膜通过反应磁控溅射制备，结构表现为在 C 基非晶基体中嵌入了细小的 (AlCrZrMoV)N 陶瓷晶粒（2~8 nm）。纳米复合薄膜显示出更高的硬度和优异的力学性能（高 H/E 和 H^3/E 值）。划痕试验表明，纳米复合薄膜具有最高的弹性恢复和抵抗划伤能力，与高熵合金膜相比，该薄膜的微观摩擦系数（0.05）和磨损量最低。在干滑动条件下的磨损体积比相应的高熵合金低两个数量级。硬度的提高是其优异耐磨性的关键因素。此外，晶体-非晶双相结构通过非晶相限制塑性流动来延缓开裂和脆性损伤。在接触界面，摩擦诱导 C-Me 键断裂，激活自由碳在亚表层的扩散，形成类石墨（sp² 无定形碳）摩擦膜。其能充当接触应力的耗散介质，从而防止相互作用表面的进一步磨损。这项研究为耐磨材料的设计提供了新的见解。通过精确设计纳米复合材料的微观结构，利用摩擦诱导微观结构演变得到了具有特定结构和性能的变形层。

D40 -103

铝基复合材料制动盘 SiC 颗粒粒径对制动性能的多维度调控规律

廖彩淇¹，段爱玲¹，李婉芯¹，王权¹，王志伟^{1,2}，莫继良^{1,2*}

1. 西南交通大学 机械工程学院

2. 西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室

制动系统轻量化技术是实现我国轨道交通车辆增速降能的关键。SiC 颗粒增强铝基复合材料在保持低密度的同时，兼具优异的耐磨性与散热性能，被视为实现制动盘轻量化极具潜力的候选材料。然而，SiC 颗粒粒径对制动性能的影响机理不明。为此，基于多模式制动性能模拟试验台，对不同粒径 SiC 颗粒（10、20、40 μm）增强铝基复合材料制动盘开展制动性能试验，并系统分析了 SiC 颗粒粒径对制动盘摩擦磨损、摩擦热、应力及振动行为等的影响规律。进一步，结合微观表征与理论分析揭示了粒径对制动性能的调控机制。研究表明：小粒径 SiC 颗粒通过提高比表面积增强界面机械互锁，提高界面摩擦系数，同时其表面粗糙度低，减弱了对闸片的犁削作用，闸片磨耗率较低。然而，小粒径 SiC 颗粒制动盘的温升速率快，更容易引发制动盘的热疲劳。大粒径 SiC 颗粒制动盘比表面积小，摩擦系数低，对闸片的机械切削作用强，

磨耗率高,但其热疲劳性能得到改善,温升速率变缓。 SiC 颗粒粒径通过调控界面应力分布及摩擦磨损行为,协同影响制动盘的摩擦热与界面磨损机制,进而改变制动系统的动态响应特性。本研究为制动盘的多维度性能协同优化设计提供了理论依据,助力 SiC 颗粒增强铝基复合制动盘的工程化应用进程。

D40 -104

氧驱动结构非晶化改善 NbMoWTaTi 合金中温耐磨性退化

杜银,王海丰*

西北工业大学

虽然原位调整表面/亚表面组织是提高难熔多主元素合金 (RMPEA) 性能的有效方法,但随着温度的升高,结构的不稳定性导致其无法解决 RMPEA 从室温到中温的耐磨性退化问题。本研究发现了 1 种通过氧诱导结构扰动在 NbMoWTaTi 化学短程有序微观结构中实现均匀局部非晶化的方法,该方法可用于形成由非晶氧化物和超细纳米氧化物组成的复合氧化物结构,具有优异的室温至中温耐磨性。均匀的局部非晶化源于均匀分散的 Ti-O 团簇,导致晶格缺陷和局部应变的积累。由于其高屈服强度/刚度和优异的变形能力,在 500~650 °C 下自发形成的复合氧化物结构使 NbMoWTaTi 合金具有优异的中温耐磨性。同时,在 25~500 °C 时,通过预制复合氧化物结构,NbMoWTaTi 合金的磨损率降低了 1~2 个数量级。本研究实现了宽温度范围内耐磨表面结构设计的突破,为高温耐磨合金的设计提供了 1 种新的策略。

D40 -105

双阴离子型表面活性剂协同界面锚定增强石墨乳润滑剂分散稳定性的研究

侯冉冉,张方林,赵都,魏琴琴*,周小状,罗国强,沈强

武汉理工大学

本研究针对高温高压下超细金属丝拉制(直径<40 μm)中石墨乳润滑剂分散稳定性不足的问题,开发了 1 种基于复合表面活性剂协同作用的高效分散体系。为突破单一分散剂难以抑制石墨颗粒重聚集的技术瓶颈,创新性地构建了由十二烷基苯磺酸钠和木质素磺酸钠组成的双阴离子型表面活性剂体系,通过界面锚定的方式增强石墨颗粒的分散稳定性。实验表明该体系具有显著协同效应(协同参数 $\beta=-2.34$, CMC=1.01 mmol/L),不同疏水尾链结构和亲水头基结构结合使静电斥力增强(Zeta 电位 -43.4 mV),石墨悬浮液分散稳定性提升至 60 d。应用该润滑剂成功拉制出直径 36.5 μm 的超细钨丝,其摩擦系数低至 0.062,抗拉强度高达 6 060 MPa,且圈径提升至 45.24 mm。结合分子动力学模拟与密度泛函理论计算,揭示了空间位阻、静电斥力、 π - π 堆积和氢键的协同作用通过界面锚定显著提高了石墨/表面活性剂/水三相界面的界面形成能,从而有效提升了石墨乳润滑剂的分散稳定性,为极端工况下润滑剂体系的稳定分散与性能优化提供了理论支撑。

D40 -106

热处理工艺对 GCr15 轴承钢摩擦磨损行为的影响

李林龙,薛伟海*,吴彼,杨丽琪,段德莉,李曙

中国科学院金属研究所

滚动体与滚道间的摩擦磨损行为是影响精密机床轴承服役性能的重要因素。当今的高端精密机床轴承,普遍采用陶瓷滚动体,内外圈为常用的 GCr15 轴承钢,热处理工艺对 GCr15 轴承钢摩擦磨损行为的影响很少报道。本文中采用球/盘旋转试验机,在两种润滑条件下(脂润滑,油润滑),考察了热处理工艺对 GCr15 轴承钢与 Si_3N_4 陶瓷球间滑动摩擦磨损性能的影响。结果表明:两种润滑条件下,碳化物均匀热处理工艺的 GCr15 轴承钢磨损量均小于碳化物不均匀热处理工艺的 GCr15 轴承钢。同时,采用球棒式滚动接触疲劳试验机,在脂润滑条件下,考察了热处理工艺对 GCr15 轴承钢与 Si_3N_4 陶瓷球间的滚动接触疲劳性能的影响。结果表明:碳化物均匀热处理工艺的 GCr15 轴承钢接触疲劳寿命反而小于碳化物不均匀热处理工艺

的 GCr15 轴承钢。结合磨痕的形貌和能谱分析表征, 讨论了热处理工艺对 GCr15 轴承钢摩擦磨损行为的影响机理。

D40 -107

温度和 Si 含量对定向凝固 Fe-Cr-B-Si 合金高温摩擦磨损性能的影响

罗洋, 马胜强*, 刘雨生, 吕萍, 刘智多, 邢建东

西安交通大学

热轧钢带生产线的关键零部件热轧轧辊在服役过程中需长时间承受氧化磨损作用, 其中保护性氧化层的抗剥落性能直接关乎部件的服役寿命。本工作研究了定向凝固 Fe-Cr-B-Si 合金择优生长面在不同温度下的摩擦磨损行为与界面特性。结果表明, 当磨损温度较低 (300 °C 和 500 °C) 时, 界面氧化反应速率较低, 磨损行为主要受控于金属基体的热软化效应, 主要磨损机制为轻微的磨粒磨损。较高磨损温度 (700 °C) 下, 磨损行为受控于界面的氧化反应, 所有合金均呈轻微磨损。同时, Si 含量的增加显著细化了合金组织, 提高了合金的氧化磨损性能。定向合金/GCr15 摩擦副的高温摩擦磨损过程中形成了取向 M2B 机械咬合摩擦氧化层-富 Si 氧化物内钉扎的特殊界面膜结构, 该结构具有良好的粘附性和耐磨性, 合金的磨损机理主要为氧化磨损、取向界面氧化膜的钉扎及其与取向 M2B 硼化物的咬合作用。

D40 -108

液态金属复合油凝胶的设计制备与摩擦学性能

汪甜甜, 叶谦, 周峰*

西北工业大学材料学院

纳米添加剂在基础油中的分散稳定性是制约其润滑性能稳定发挥的关键因素。本研究针对镓基液态金属 (GLM) 纳米添加剂分散稳定性与润滑性能协同优化的难题, 提出两种超分子凝胶构建策略。首先, 通过超声分散与多巴胺正丁烯酰胺 (DBA) 自组装修饰 GLM 纳米液滴, 引入乙烯基反应位点, 结合脲基凝胶因子自由基聚合反应, 构建功能化超分子凝胶复合体系 (Gelator@GLM)。该体系实现 GLM 纳米液滴在基础油中的长期分散稳定, 摩擦系数与磨损体积较基础油分别降低 41.18% 和 92.13%。进一步开发离子液体 (ILs) 化学强化策略, 将超声诱导自由基聚合的 GLM 纳米液滴、乙烯基 ILs 与脲基凝胶因子共聚, 制备离子凝胶型超分子油凝胶 (GLM@IGel)。ILs 的静电相互作用与 GLM 的物理交联显著提高凝胶交联密度, 使摩擦系数与磨损体积较基础油分别降低 49.48% 和 90.32%, 并赋予体系 550 N 的高承载能力。研究表明, 两类体系的润滑性能提升源于 GLM 纳米液滴与凝胶网络的协同作用: GLM 纳米液滴填充修补磨损界面, 摩擦过程中形成物理/化学双保护膜。研究系统阐明了“纳米颗粒-超分子凝胶”协同润滑的普适机制, 为高性能润滑材料的设计提供理论依据。

D40 -109

高钒高速钢中 Al 添加对强度-韧性-耐磨性三元关系的协调作用研究

陶稀鹏*, 崔传勇, 王新广, 周亦胃, 孙晓峰

中国科学院金属研究所

针对冶金矿山设备对高强韧、超硬耐磨材料的迫切需求, 本研究通过 Al 微合金化设计, 系统探究了不同 Al 含 (0%~2.4%, 质量分数) 对 1 种高钒高速钢微观组织演变及力学/耐磨性能的影响规律。结果表明, 适量 Al 添加 (0.8%) 可显著优化合金综合性能: NM168-0.8Al 合金的室温抗压强度达 2900 MPa, 压缩应变量提升至 9%, 2 h 磨损失重量仅 0.25 mg, 较未添加 Al 的基准合金 (NM168-0Al), 其抗压强度、压缩延伸率分别提高 7.4% 和 12.5%, 同时磨损损失量降低 50%, 实现了强韧性与耐磨性的协同优化。微观机制分析表明, 微量 Al (0.8%) 通过降低 C 原子活度, 调控初生 VC 及共晶 M_7C_3 碳化物的析出动力学, 促进碳化物细小弥散分布。细化的碳化物不仅通过晶界钉扎效应抑制晶粒长大, 提升位错运动阻力, 同时诱导回火过程中低层错能纳米级 VC 相的共格析出, 进一步增强位错交互作用与协同变形能力。然而, 过量 Al 添加 ($\geq 1.6\%$) 导致马氏体含量降低并破坏基体连续性, 削弱位错运动抗力; 当 Al 质量分数增至 2.4%

时, 粗大碳化物聚集及内氧化现象加剧, 成为裂纹萌生与扩展的优先路径, 显著恶化材料的耐磨性能。本研究揭示了 Al 微合金化通过“碳化物弥散化→晶粒细化→纳米 VC 共格析出”的协同作用机制, 为高钒高速钢的强韧化-耐磨性协同设计提供了理论依据与工艺优化方向。

D40 -110

锆铌合金对聚乙烯人工关节配副的磨损性能及机制研究

刘瑞娟¹, 张亚丽^{1*}, 史文², 熊芹¹, 杨抒¹, 张小刚¹, 靳忠民¹

1. 西南交通大学 摩擦学研究所

2. 嘉思特医疗器材(天津)股份有限公司, 天津市骨植入物界面功能化与个性研究企业重点实验室

聚乙烯磨损产生的磨屑引发骨溶解是导致假体置换失败的主要原因, 而配副材料对聚乙烯的磨损有着重要影响。锆铌合金因其优异的生物相容性和表面氧化形成的陶瓷层所带来的高硬度、低摩擦等特性, 成为潜在的新型关节材料。本研究旨在深入探究锆铌合金对聚乙烯的磨损性能及磨损机制, 为其在人工关节领域的应用提供理论基础。研究选用锆铌合金(Zr-2.5Nb)和聚乙烯为研究对象, 利用销盘试验机和髌关节模拟机进行多向运动磨损测试, 并以氧化锆增韧氧化铝(ZTA)和钴铬钼(CoCrMo)作为对照组, 分析不同磨损周期下人工关节材料的磨损行为, 并结合磨屑分析探求其磨损机制, 全面评估材料对人工髌关节假体的适配性。销盘磨损结果显示, Zr-2.5Nb-UHMWPE 和 ZTA-UHMWPE 配副 2 MPa 下的磨损量比 CoCrMo-UHMWPE 减少约 47%, 且两者之间无显著差异。髌关节模拟机实验结果表明, 经 500 万次循环测试后, Zr-2.5Nb 表面无明显磨损, 而 HXLPE 髌臼表现出多向划痕、点蚀和抛光迹象。HXLPE 磨屑主要为微米级, 尺寸主要分布在 0.4 μm 以下, 具有不同形状和尺寸的特征, 主要为圆形、椭圆形和少量纤维状。综上所述, 氧化锆铌合金与聚乙烯配副具有良好的耐磨性, HXLPE 的磨损机制主要涉及黏着磨损和磨粒磨损。研究结果为新型锆铌合金人工关节假体的开发和设计提供了重要的生物摩擦学数据和理论指导。

D40 -111

多功能氨基酸基绿色水基润滑添加剂的设计合成及性能研究

刘骁¹, 蔡美荣^{1,2*}, 周峰²

1. 烟台先进材料与绿色制造山东省实验室

2. 中国科学院兰州化学物理研究所 润滑材料全国重点实验室

水基润滑液凭借冷却性能优异、难燃、导热系数高、来源广等优点, 已被广泛应用于金属加工领域和液压传动领域。添加剂是保证水基润滑液使用性能的关键组分, 可以显著提高润滑液的物理化学性能, 弥补和改善其润滑性不足、抗腐蚀性能差、抗微生物污染能力差和黏度低等问题, 是水基润滑液的灵魂。本研究合成了系列氨基酸基离子液体(AAs-LS 和 AAs-LGA), 并将其用作多功能水基润滑添加剂。通过 TGA、腐蚀试验和摩擦磨损试验分别对氨基酸基润滑添加剂的热稳定性、抗腐蚀性能和润滑性能进行了表征, 并采用多种技术手段分析了添加剂在界面处的作用机理。研究表明: 两个系列的氨基酸基离子液体添加剂均具有良好的热稳定性, 且可以显著抑制铸铁在水中的腐蚀。与去离子水相比, 当 AAs-LS 和 AAs-LGA 的添加量为 0.5 wt% 时, 水基润滑液的摩擦系数和磨损体积能分别降低约 70% 和 85% 以上, 展示出优异的减摩抗磨性能。此外, AAs-LGA 系列添加剂还具有优异的生物降解性能, 28 天的生物降解率可达到 90% 以上。机理分析结果表明, 氨基酸基离子液体能在界面处形成物理/化学吸附膜, 与摩擦过程中生成的摩擦化学反应膜协同作用, 有效地阻止了滑动摩擦副之间的直接接触, 进而赋予水基润滑液优异的摩擦学性能。该系列润滑添加剂制备简单, 安全无毒且绿色环保, 有望作为水基金属加工液和难燃液压液的关键润滑添加剂使用。

D40 -112

基于水化作用的高性能水基润滑体系构建及其摩擦学机制研究

刘梦瑶, 姚盈盈, 文平, 董瑞, 凡明锦*

水基润滑液凭借优异的环保性、冷却性和自清洁性成为可持续润滑技术发展的重要组成部分。同时,具有多功能特点的水基润滑体系的构建及其相互作用的研究成为热点研究方向。本工作通过创新性的分子设计构建了新型离子液体水基润滑体系,其具有优异的抗腐蚀性能和长期稳定性等,以及出色的减摩抗磨性能(摩擦系数降低超 80%)和润滑稳定性(400 N 的高载荷)。这些显著提升的性能主要归因于离子液体水基润滑体系和工程金属表面之间的多重相互作用(氢键、竞争吸附、静电相互作用、摩擦化学反应)密不可分。结合分子动力学模拟数据进一步说明了离子液体在金属界面上的自组装行为与其分子结构、形成的水化层(数量、致密性和分布)、纵向密度和扩散系数密切相关。此外,明确了体系组成与竞争吸附、抗腐蚀性能和增强界面润滑性能之间的构效关系,实现了对离子液体水基润滑体系的摩擦学作用机制宏观和微观的深入了解。本工作作为水合润滑作用机制的研究提供了实验参考和理论基础,为水基润滑体系在实际工况中的应用提供了理论指导。

墙报

D40 -P01

爆米花状 CeO_2 修饰 Cr_2AlC 对 CF/PTFE 织物复合材料摩擦学性能的影响

张悦, 杨明明*, 张招柱, 廖超颖, 陈昊, 储凡杰

中国科学院兰州化学物理研究所

在本研究中,通过简单高效的共沉淀法将 CeO_2 纳米花均匀生长在 Cr_2AlC 颗粒表面,从而制备出了 $\text{Cr}_2\text{AlC}@\text{CeO}_2$ 杂化物。 CeO_2 纳米颗粒在应力作用下 Ce^{3+} 和 Ce^{4+} 氧化态之间可以交替转变,形成一个保护层来修复受损表面,并在纳米尺度上减少摩擦和磨损。利用 $\text{Cr}_2\text{AlC}@\text{CeO}_2$ 杂化物增强碳纤维与聚四氟乙烯纤维混纺织物(CF/PTFE 织物)酚醛复合材料的摩擦学性能,摩擦试验表明,当填料质量分数达到 4.0% 时,织物复合材料的磨损率为 $2.79 \times 10^{-14} \text{ m}^3 (\text{N m})^{-1}$,比纯复合材料的磨损率降低 59%,摩擦系数降低 39%。这种增强是由于在相应的表面上形成了一层厚度在 85 nm 到 113 nm 之间的自适应摩擦膜。对磨损表面和摩擦膜的分析表明, Cr_2AlC 和 CeO_2 具有协同增强作用。由于 Cr_2AlC 优异的承载能力和 CeO_2 优异的润滑性能, $\text{Cr}_2\text{AlC}@\text{CeO}_2$ 增强织物复合材料表现出最佳的耐磨性。

D40 -P02

Ag 纳米粒子均匀负载于凹凸棒石纳米片上,协同提高 BF/PTFE 酚醛树脂织物复合材料的摩擦学性能

陈昊, 张招柱*, 何要辉, 廖超颖, 张悦, 杨明明, 储凡杰, 袁军亚

中国科学院兰州化学物理研究所

织物复合材料在重载的严苛条件下容易受损。凹凸棒石作为 1 种一维粘土矿物,由于其摩擦化学特征和滚动效应被用于织物复合材料的增强填料来克服这种缺陷。凹凸棒石纳米片作为 1 种新型的二维材料,既有粘土的特性又能够发挥二维材料易层间滑移的特性抵消一部分剪切力,因此,本工作合成了 1 种尺寸均一的纳米片(AT-NS),将其首次应用于摩擦领域,并在 AT-NS 表面负载 AgNPs 来构筑 AT-NS/Ag 杂化体,实现了杂化填料中 0 维材料与二维材料之间的协同效应。二维 AT-NS 的层间滑移抵消了一部分剪切力,并且 AT-NS 以及其释放出的银纳米粒子参与转移膜的形成。对于复合材料的摩擦学性能测试表明,添加质量分数为 2.0% 的 AT-NS/Ag1 复合材料在 87.4 MPa 下的磨损率和摩擦系数分别降低了 89.59% 和 9.5%。

D40 -P03

3D 功能化聚合物自润滑复合材料构筑及摩擦学性能研究

张楠*, 杨增辉, 张新瑞, 王齐华, 王廷梅

中国科学院兰州化学物理研究所

通过结构设计将聚合物多种性能结合起来,从而实现聚合物复合材料多功能化并调控摩擦学性能是聚合物复合材料摩擦学发展的重要方向。为解决聚合物材料导热性差导致摩擦热聚集,功能填料分散性差,

摩擦性能调控及磨损监测难等关键问题，本研究发展了一系列基于三维石墨烯结构的多功能自润滑复合材料材料，并探究了导热、复合材料结构等对摩擦的影响。通过模板法、表面改性和金属离子诱导交联设计制备了具有“宏观网络/微观有序”的石墨烯三维结构，通过浸渍聚合物形成“双网络”结构，并借助相变材料复配和动态共价键引入，实现了多功能设计。“双网络”结构设计解决了功能填料的分散性问题，同时在较低的添加量下改善了减摩抗磨和导热性能，借助“光热效应”，实现摩擦系数实时可控。通过聚合物结构设计不仅赋予润滑材料循环利用可回收的能力，还可实现润滑材料再设计，磨损自报告等智能化设计。该研究将对多功能聚合物自润滑复合材料的智能化设计与制造提供新的思路。

D40 -P04

高强韧聚氨酯润滑材料的设计制备及性能调控

李宋^{*}，王晓月，张新瑞，王廷梅，王齐华

中国科学院兰州化学物理研究所

聚氨酯作为 1 种性能优异的聚合物材料，已被广泛应用于航空航天、石油化工、交通、国防等领域，其出色的性能成为解决众多工程问题的理想选择之一。但是，现有改性技术对聚氨酯材料性能的提高往往以牺牲韧性为代价，致使强度、韧性、耐磨性之间的矛盾难以得到有效的改善和权衡。因此，亟需开发 1 种科学合理的改性策略，阐明材料强度、韧性、润滑性能之间的匹配机制，实现聚氨酯“高强-高韧-高润滑”一体化设计。研究工作提出了 1 种“外柔-里硬-内刚”的设计理念，将软链段、硬链段与刚性链段三种元素有机结合，以提升材料的综合性能。在这一设计中，聚氨酯预聚体作为软链段，提高了材料的延展性（ $1813.9 \pm 76.0\%$ ），通过氢键缔合形成的硬畴作为硬链段增强了材料的韧性（ $420.4 \pm 22.3 \text{ MJ m}^{-3}$ ），聚酰亚胺分子链段作为刚性链段提供了高强度特性（ $70.1 \pm 2.6 \text{ MPa}$ ）。由于刚性链段的稳定性和氢键的可逆解离与重组，材料展现了卓越的抗撕裂性与抗蠕变性。在水润滑条件下，韧性最好的材料展现出最好的耐磨性，这是由于高韧性可以有效地耗散外界施加的能量，展现最佳的耐磨性。研究工作揭示了软、硬、刚性链段的协同作用，验证了强度、韧性与润滑特性协同提高的可行性。

D40 -P05

基于石墨烯气凝胶的各向异性摩擦学调控研究

杨亚文，高煌，李章朋，王金清^{*}

中国科学院兰州化学物理研究所

针对装备制造领域对智能可控摩擦界面的迫切需求，为突破传统各向同性材料及沟槽阵列等表面处理技术所面临的性能衰减、可靠性不足等问题，我们基于定向冷冻铸造与真空浸渍协同技术开展了各项异性石墨烯气凝胶/环氧树脂（GA/EP）复合材料的设计制备和性能研究工作。结果表明，复合材料的热传导性能、弹性模量和摩擦学性能均与其微观取向结构高度相关，且表现出方向一致性。GA/EP 复合材料顶部（T）呈现接触界面高度取向的三维导热网络结构，具有高弹性模量和最优润滑性能，摩擦系数低至 0.06；平行石墨烯冰晶生长的横向方向（LA）滑动过程中摩擦应力稳定在 20~40 atm，形成连续润滑界面，摩擦系数可稳定在 0.09；垂直的径向方向（LR），连续滑动破坏石墨烯取向，导致摩擦界面无序化，摩擦应力骤增至 50,000~100,000 atm，摩擦系数急剧升高，与 LA 方向差异达 226%，并引发石墨烯片迁移和 EP 分子链断裂，加剧磨损。分子动力学模拟和实验结果相吻合，证实 LA 方向的定向石墨烯片通过减少 GA/EP 与滑块间的相互作用能，形成剪切友好界面；而 LR 方向因石墨烯片排列破坏，界面阻力激增。该研究揭示的“结构定向化-摩擦可切换”关联规律在机器人机械臂抓取-传递-释放系列操作、精密传动等应用场合展现出独特优势，可满足对动态摩擦系数的差异化需求，推动智能精密装备向自适应、长寿命方向的快速发展。

上述研究工作得到了国家自然科学基金、中国科学院战略性先导科技专项以及甘肃省科技重大专项等课题以及中国科学院兰州化学物理研究所润滑材料全国重点实验室的支持。

D40 -P06

通过纳米 Al_2O_3 增强实现 NbTiTa 中熵合金自润滑复合材料在高温下的优异耐磨性

于凯旋，程军^{*}，杨军

中国科学院兰州化学物理研究所

难熔高熵/中熵合金 (RHEAs/RMEAs) 因其优异的高温力学性能和热稳定性, 近年来在极端服役环境下的应用潜力受到广泛关注。然而, 在高温氧化和摩擦耦合条件下, 合金中多主元素之间氧化敏感性的差异易诱发界面失稳, 严重制约了其在高温摩擦系统中的耐磨性能。本研究提出了 1 种设计高温耐磨自润滑复合材料的新策略, 基于 NbTiTa 合金, 复合引入 Al_2O_3 陶瓷颗粒、Ag 软金属和 $\text{CaF}_2/\text{BaF}_2$ 共晶润滑剂, 制备出 1 种具有多尺度界面结构的自润滑复合材料。样品采用机械合金化和热压烧结技术制备, 系统分析其组织演化、界面结构调控及高温摩擦行为。研究发现, 该复合材料在 600°C 和 800°C 的干滑动条件下表现出极低的磨损率 ($10^{-7}\sim 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$), 优于多数现有高温润滑材料。其卓越耐磨性能归因于高温摩擦过程中在表层原位形成的 1 种约 $2.1 \mu\text{m}$ 厚的摩擦釉质层, 由无定形 NbTiTa 氧化物相、纳米晶 Ag 相和润滑相共同构成, 显微硬度达 $15.8 \pm 1.6 \text{ GPa}$, 具备优异的抗塑性变形能力。更重要的是, 在高剪切条件下, NbTiTa 合金与刚性 Al_2O_3 之间的应变不相容诱发了相界从非相干结构向非晶化结构的转变, 有效缓解了摩擦应力集中, 延缓裂纹萌生。此非晶界面作为应变能耗散区, 提升了材料的摩擦韧性。同时, Al_2O_3 颗粒周围生成的三维非晶-晶界网络结构阻止了裂纹扩展路径, 抑制滑移位错传播, 进一步增强材料在高温摩擦环境下的结构稳定性。本工作不仅展示了多尺度界面调控在提升高温摩擦性能方面的显著优势, 也为难熔高熵合金体系自润滑材料的设计与工程应用提供了新的策略与理论依据。

D40 -P07

机械力诱导可逆相转变的动态共价油凝胶用于自适应润滑

谢翱, 蔡美荣, 周峰*

中国科学院兰州化学物理研究所

本研究开发了一类具有机械力诱导可逆相转变能力的油凝胶, 实现了适应交变工况的高性能润滑。通过质子化硫辛酸 (TA) 的热促进开环聚合和非共价交联形成了动态共价网络, 发展了 1 种具有高度通用性的油捕获策略。聚 (TA) 油凝胶具有避免润滑剂泄漏和高黏滞阻力的自适应状态转换能力, 这体现在它们能够适应设备启停, 在溶胶或凝胶状态间迅速转换。二硫键的力响应特性赋予了聚 (TA) 油凝胶对剪切力的适应能力。在力的作用下, 二硫键主链断裂导致凝胶网络被部分破坏, 使剪切区域的凝胶转变为低黏度的溶胶状态, 以降低黏滞阻力。同时二硫键被破坏, 伴随着硫自由基的产生, 一旦撤去机械力, 硫自由基可以迅速成键以重建凝胶网络, 实现从溶胶到凝胶的相转变, 使润滑剂失去流动性, 以避免爬移、泄漏。在极端和交变的摩擦条件下, 聚 (TA) 油凝胶表现出优异的摩擦学性能和出色的润滑稳定性, 进一步证实其对于恶劣、可变工况的适应性。通过与商用航空润滑脂的系统对比, 聚 (TA) 油凝胶具有在多种测试条件下最为均衡的润滑性能和最优的长期润滑表现。具有可逆相转变能力的自适应油凝胶为开发具有动态性能的油凝胶功能材料提供了思路, 也为开发智能润滑材料提供了新的策略。

D40 -P08

离子液体润滑界面自组装及其表面力和摩擦力

吴新虎*

中国科学院兰州化学物理研究所

离子液体具有优异的热稳定性和摩擦学特性, 可作为绿色高效润滑基础油和添加剂。然而离子液体制备过程繁琐、成本高昂制约其工业化生产应用。原位生成离子液体 (iIL) 是绿色、简单、大规模制备离子液体新方法。本文重点报道 1 种新型高性能 iIL, 采用小角中子散射 (SANS) 表征其在氘代正十二烷烃中自组装颗粒的形貌及大小, 结果表明 iIL 较大的颗粒是由较小的纳米微团组成: iIL 亲水的头部官能团聚集形成核, 疏水的尾部链形成壳, 组成粒径约为 7.9 nm 的微团, 微团聚集形成较大的颗粒。X-射线反射 (XRR) 结果表明 iIL 在纳米尺度光滑的云母表面形成厚度约为 $2 \sim 1000 \text{ nm}$ 的吸附薄膜。表面力仪 (SFA) 测试结果表明 iIL 在正十二烷烃中于云母表面形成强韧的自组装膜, 这种吸附膜在较长的距离范围内表现出排斥力 ($60 \sim 80 \text{ nm}$), 并显著降低正十二烷烃基础油的摩擦系数 (从 0.71 降至 0.038)。上述采用大科学装置及高精密度表面力仪研究离子液体润滑界面自组装将为新型高性能液体润滑剂的设计制备提供基础理论和技术支撑。

D40 -P09**磷酸酯胺盐离子液体作为钢/铜摩擦副润滑剂的摩擦学性能研究**

胡帅, 张朝阳, 孙瑜辰, 于强亮*

中国科学院兰州化学物理研究所

铜合金由于其卓越的理化性能和机械特性, 在工程领域得到广泛应用, 然而在实际应用中由于零部件之间的摩擦往往发生磨损现象, 进而影响铜合金机械部件的性能和寿命, 为提高铜合金机械部件之间在运行过程中的润滑性能, 合成了四种磷酸酯胺盐离子液体 (P4-12、P8-12、P4N1116、P8N1116), 将其作为基础油 150SN 的添加剂, 探究其作为钢/铜摩擦副润滑剂的摩擦学性能, 并与 150SN 进行对比。利用同步热分析仪测试热分解温度, 发现添加四种离子液体均可以提高 150SN 的热稳定性。利用 SRV-IV 微动摩擦磨损试验机和非接触三维表面轮廓仪评价其摩擦学性能, 结果表明在室温和高温下添加离子液体可以显著提高 150SN 的减摩抗磨性能, 其中具有较长烷基链阳离子和较短烷基链阴离子的 P4N1116 在室温和高温下的磨损体积分别减少了 92.8% 和 58.8%, 摩擦学性能最为优异。采用扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散 X 射线光谱仪 (EDS)、X 射线光电子能谱仪 (XPS) 分析磨斑形貌及磨斑表面元素组成来探究润滑机理, 结果发现相比于 150SN, 添加离子液体后的磨斑缩小且变得平滑, 根据 EDS、XPS 的分析结果来看, 在摩擦过程中, 离子液体中的阴阳离子通过吸附作用形成的物理吸附膜以及活性元素与铜盘发生反应生成的摩擦化学反应膜有效的保护了摩擦副表面, 进而减少了磨损, 提高了 150SN 的润滑效果, 表现出所合成离子液体优异的摩擦学性能, 对于铜合金机械部件的润滑添加剂研究具有重要意义。

D40 -P10**甲基纤维素官能化镓基液态金属纳米粒子作为水基润滑剂添加剂的摩擦学性能研究**

崔雅斐, 程军*, 杨军

中国科学院兰州化学物理研究所

目前, 工业生产中使用最广泛的润滑剂是润滑油。与油相比, 水基润滑剂环保, 导热性好, 广泛应用于钻井设备、舰轴轴承和金属工具加工等领域。然而, 现有的水基润滑剂在润滑性和耐用性方面存在局限性, 因此迫切需要开发高性能添加剂。纳米粒子可以形成保护膜, 并在摩擦过程中将滑动摩擦转化为滚动摩擦, 从而大大减少摩擦和磨损。镓基液态金属纳米粒子 (GLM-NPs) 是 1 种新型的高性能润滑剂添加剂, 然而未改性的液态金属纳米颗粒存在易氧化、稳定性差等问题。这项工作制备了 1 种新型非均相液态金属纳米颗粒, 添加质量分数 2% 的甲基纤维素凝胶使用定向超声法改性的得到甲基纤维素改性的液态金属纳米颗粒 (GLM-NPs/MC)。改性后液态金属纳米颗粒粒径约为 270nm, 具有清晰的核壳结构, 将液态金属纳米颗粒稳定悬浮在水中的时间从 2 h 提高到 72 h。作为水基润滑剂添加剂, 它表现出良好的摩擦学性能, 使 304 钢盘的摩擦系数和磨损率分别降低了约 59% 和 40%。GLM-NPs/MC 的高分散性和良好稳定性使其缓慢进入磨损表面, 形成富含 Ga 的摩擦膜。此外, 还研究了 GLM NPs/MC 含量对水润滑性能的影响, 优化添加剂质量分数为 0.6%。本研究为基于镓基液态金属的润滑应用纳米复合材料的设计提供了见解。

D40 -P11**烧结工艺对 ZrO_2 基自润滑复合陶瓷的影响及晶粒生长动力学研究**

武靖伟, 魏万鑫, 樊恒中*, 苏云峰

中国科学院兰州化学物理研究所

发展宽温域润滑材料是提升航空航天装备技术的核心。其中, ZrO_2 陶瓷具有优异的耐高温性、高韧性和耐磨性能, 但其受使用温度的局限性。选用 $SrSO_4$ 颗粒、Ag 粉和 $Ag+ZrO_2$ 混合粉体为原材料制备 ZrO_2 基自润滑复合陶瓷, 制备高性能的复合陶瓷关键在于烧结温度和烧结时间。本研究采用振荡压力烧结法 (OPS) 进行陶瓷烧结, 分析其在烧结过程中界面所发生的化学反应和晶粒生长过程。研究发现: 烧结颈的存在一定程度上阻碍了晶界的迁移, 抑制了晶粒的进一步长大, 随着烧结温度的升高和烧结时间的延长, 复合陶瓷的平均晶粒尺寸均呈上升趋势, 烧结时间较烧结温度对晶粒尺寸的增长影响更为显著。在烧结温度范围内界面生成物的形成顺序为 $SrO \rightarrow Zr(SO_4)_2 \rightarrow SrZrO_3 \rightarrow Ag_2S \rightarrow Ag_2O \rightarrow SrSO_4 \rightarrow SrS$, 界面主要物相为

SrSO_4 和 ZrO_2 , 同时存在少量的 Ag_2S 相。构建 Beck 模型、Hillert 模型、Sellers 简化模型和 Sellers-Anelli 模型 4 种动力学模型以研究烧结过程中晶粒的生长过程, 对比发现 Sellers 简化模型最适合预测 ZrO_2 基自润滑复合陶瓷中的晶粒生长。本工作为深化宽温域 ZrO_2 基自润滑复合陶瓷的制备提供试验依据, 为开发宽温域 ZrO_2 基自润滑复合陶瓷提供有力的数据支撑和理论指导。

D40 -P12

Mo 调控高熵碳化物陶瓷设计、制备与性能研究

郑先德, 陈洪祥, 樊恒中*, 张永胜

中国科学院兰州化学物理研究所

碳化物高熵陶瓷以高硬度、高强度和高弹性模量、更好的热稳定性和抗氧化等优异性能而备受研究者的青睐。然而目前多集中于等金属摩尔比和非碳化学计量偏差的研究, 对其非等金属摩尔比的研究鲜有报道。基于新型高熵设计的理念, 本工作针对高熵碳化物陶瓷材料对其进行非等摩尔比调控展开研究, 以过渡金属碳化物和石墨为原料, 通过调控 Mo 含量设计并制备出一类具有自润滑性和单相结构的新型高熵 HEC-Mo_{1-x} ($0 \leq x < 1$)。研究发现高熵 HEC-Mo_{1-x} 的相关性能随着 Mo 含量的增加而呈现规律性变化, 其中 $\text{HEC-Mo}_{0.2}$ 综合力学性能最好, $\text{HEC-Mo}_{0.8}$ 综合摩擦性能最好, 平均摩擦系数和磨损率分别达到 0.32 ± 0.02 和 $5.783 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 有望拓展高熵陶瓷材料在高温润滑领域的应用和丰富高温润滑材料体系。

D40 -P13

四元层状硼化物 $\text{Ti}_4\text{MoSiB}_2$: 结构功能一体化高温自润滑材料

李红斌, 苏云峰*, 张永胜

中国科学院兰州化学物理研究所

四元 MAB 相陶瓷作为新型三元层状过渡金属化合物, 近年来在高温力学和摩擦学领域展现出广泛的应用潜力。其与 MAX 相陶瓷类似的纳米层状结构赋予其优异的耐高温、抗氧化、高强度和高损伤容限等性能, 尤其适用于极端环境下的高温固体润滑材料。MAB 相陶瓷的多层结构不仅能够有效抑制裂纹扩展, 提升材料的断裂韧性, 还具备较好的热稳定性, 在高温条件下表现出稳定的力学性能。受 Mo_5SiB_2 相金属合金化的启发, 利用 Ti 和 Mo 合金化时独特的晶体学位点合成了面外化学有序 MAB 相 (o-MAB) 陶瓷— $\text{Ti}_4\text{MoSiB}_2$, 并对其宽温域的机械和摩擦学进行了系统研究。研究发现其热膨胀系数在各个晶向表现出显著的各向异性, 这种特性对于高温下的断裂机制有重要影响。同时, MAB 相材料的摩擦学性能也呈现出出色的减摩和耐磨特性, 尤其是在高温环境下, MAB 相陶瓷能够通过表面摩擦化学反应生成氧化物层实现负磨损。层状结构的 o-MAB 相材料不仅具有可机械加工、良好导电导热性能、较高的损伤容限等特性, 还具有优异的高温力学和减摩抗磨性能, 在高温结构元件, 润滑部件等领域具有良好的应用前景。未来研究将重点聚焦于通过结构设计与组分优化, 进一步提高材料的韧性和抗氧化性, 以实现更广泛的高温固体润滑和极端环境应用。

D40 -P14

固液协同智能润滑材料诱导长效低摩擦和磨损抵抗

邵明超, 王超*

中国科学院兰州化学物理研究所

开发具有持久低摩擦和极耐磨性的新一代智能润滑材料是工业 4.0 领域发展中迫切需要的, 但仍然是一项艰巨的挑战。受天然材料的启发, 复合材料将通过独特的结构元素重构, 结合互补材料之间的潜力和相互作用提供新的可能性。在这里, 通过多孔聚酰亚胺 (PPI) 上沉积固体润滑膜 DLC 并随后浸渍油 (称为 OCPPI-DLC), 成功制备了 1 种新型固液协同智能润滑材料。OCPPI-DLC 可以响应外界刺激持续向接触界面供油, 并在刺激消除后重新吸收油。这种自适应的供油-吸油与 DLC 较低的磨损相结合, 导致在交变工作条件下具有较低的摩擦系数和极低的磨损, 再加上多孔结构中储存的大量润滑介质, OCPPI-DLC 表现出优异的长期稳定运行。该工作不仅提供了 1 种高性能的固液协同智能润滑材料, 也为先进制造和航空航天领域提供了更多的可能性。

D40 -P15

探索在电气化条件下 MXene 作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究

孙瑜辰^{1,2}, 张朝阳^{1,3}, Mohamed Kamal Ahmed Ali^{1,2}, 于强亮^{*1,2,3}

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

2. 中国科学院大学

3. 烟台先进材料与绿色制造山东省实验室

纳米材料作为润滑剂已有很多应用, 其中 MXene 具有良好的摩擦电性能, 且其独特的 Schwoebel-Ehrlich 阻隔/效应不受层间间距相互作用的影响, 是润滑添加剂的首选, 有望很好地适应模拟载流环境。为了提高 MXene 的分散性, 我们通过在 MXene 表面接枝磷酸基团, 形成 MXene@TDPA, 并通过扫描电镜、EDS、傅立叶变换红外光谱和拉曼测试分析表明改性成功。同时探讨了 MXene 用作添加剂时的理化性能和摩擦学性能, 经过测试, MXene 基润滑油显示出良好的运动黏度, 对铁、铜等金属具有耐腐蚀性。且 MXene 在高重载 (750 N)、高速 (80 Hz) 和高温 (200 °C) 条件下用作润滑剂时具有优异的摩擦学特性, 并提出载荷是影响纳米颗粒 MXene 和改性样品 MXene@TDPA 作用的重要因素。通过对磨损表面进行形貌分析, 提出 PAO 6 基础油、MXene、MXene@TDPA 和参考油的主要磨损机理分别是极度黏着磨损、轻度黏着磨损/微磨损和严重磨损。上述结果表明, MXene 及其改性产物有望用作载流环境中减少摩擦和磨损。

D40 -P16

软-纳米复合全氟聚醚凝胶润滑材料空间限域效应及性能研究

白艳艳, 蔡美荣*

中国科学院兰州化学物理研究所

面对空间航天事业的发展, 对润滑材料提出了更高的要求。其中, 全氟聚醚润滑油 (PFPE) 作为空间可靠润滑材料之一, 由于其独特的 C-F 结构, 面临巨大的挑战与机遇。利用超分子凝胶润滑剂结构特性, 另辟蹊径的构筑了纳米颗粒复合全氟聚醚型超分子凝胶润滑剂。全氟聚醚型超分子凝胶润滑剂自组装的三维网络结构, 不仅可以阻止 PFPE 的爬移迁移行为, 还可以阻止纳米颗粒的自聚集, 实现了二硫化钼 (MoS₂) 纳米颗粒在 PFPE 中的长期分散稳定, 为纳米颗粒在 PFPE 特殊润滑材料的应用提供了新技术。同时, 纳米颗粒复合超分子凝胶润滑剂表现出优异的触变性和热可逆性。无干扰状态下, 黏弹性的凝胶态复合材料可发挥密封的作用, 避免润滑油泄露或爬移, 防止润滑材料流失或污染零部件。在剪切力或摩擦热的作用下, 黏弹性类固体凝胶复合材料转变为具有流动性的溶胶态, 发挥润滑剂的作用, 其中 MoS₂ 作为润滑添加剂显著提高了润滑材料的减摩与抗磨性能, 为未来空天任务的长期性提供技术与材料储备。

D40 -P17

不同 Inconel 718 掺杂含量 Ag 基薄膜的结构和高温摩擦学性能研究

庞心如, 张弘, 陈博通, 张贝贝, 王鹏*

中科院兰州化学物理研究所

Ag 具有立方晶体结构, 剪切强度低, 易发生晶间滑移, 表现出良好的润滑性能, 但由于其硬度低, 高温条件下扩散系数高, 使得 Ag 耐磨性较差, 从而限制了其在高温条件下的应用。而 Inconel 718 合金是 1 种 Nb 改性沉淀强化的 Ni-Cr-Fe 基高温合金, 具有良好的高温强度、高的抗氧化和耐腐蚀性能、优异的抗疲劳和抗蠕变性能。针对 Ag 存在的问题, 本文采用直流磁控溅射技术, 在硅基底及 W₁₈Cr₄V 基底表面成功制备了掺杂不同 Inconel 718 高温合金含量的 Ag 基薄膜, 系统研究了其微观结构、力学性能及摩擦学性能。结果表明, Inconel 718 合金掺杂的 Ag 基薄膜结构稳定, 能有效地提高 Ag 基薄膜的硬度和弹性恢复率, 且随着 718 含量的增加薄膜的硬度越大, 弹性变形能力也越强, 硬度和弹性恢复率最高可达至 3.59 GPa 和 20%; 当 Inconel 718 掺杂含量为 3% 及 6% (质量分数) 时, Ag 基薄膜在大气高温 600 °C 条件下实现有效的减摩润滑作用, 摩擦系数低至 0.1~0.2, 其磨损率分别为 $1.73 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、 $6.96 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 相较于纯 Ag 膜降低了一个数量级。此外, 本文研究了 Ag 基薄膜的润滑与失效机理, 分析发现在温度和氧气的协同作用下, 掺杂 Inconel 718 后的 Ag 基薄膜通过元素扩散使得 Ag 从薄膜内部在表面积聚形成 Ag

颗粒, Ag 颗粒与摩擦副接触, 形成转移膜提供润滑作用, 实现了在高温条件下的低摩擦系数, 同时在载荷的作用下, Ag 从应力影响区向非应力区扩散, 软金属 Ag 的扩散和消散行为导致涂层内部出现孔洞等缺陷, 导致了复合薄膜的润滑失效。

D40 -P18

记忆合金复合 WS_2 和 MoS_2 薄膜的摩擦学性能研究

何军*, 孙嘉奕

中国科学院兰州化学物理研究所

随着空间科学技术快速发展, 高精密空间飞行器及其运动部件要求更低的能量损耗、更长久的服役寿命和更高的运行可靠性, 因此亟需开发具有低摩擦、长寿命、智能化特点的新型固体润滑薄膜。形状记忆合金 (Shape Memory Alloys, SMAs) 是 1 种由两种或两种以上金属元素组成的智能材料, 具有典型形状记忆效应和超弹性。利用脉冲磁控共溅射方法将 TiNi 和 TiNb、CuAlNi 和 TiAlCr 等 SMAs 与 WS_2/MoS_2 复合, 制备新型智能固体润滑薄膜, 通过优化记忆合金-润滑组分异质结构, 改善摩擦磨损过程中薄膜内部组织演变过程, 能够提升其空间摩擦学性能。其中, $\beta\text{-TiNb}$ SMA 掺杂的 WS_2 薄膜表现出载荷自适应宏观超润滑性能。当载荷从 1N 增加到 9 N 时, TiNb1.5- WS_2 薄膜的摩擦系数从 0.0056 逐渐增加到 0.0104, 即可以通过载荷实现摩擦系数的主动调控。研究发现, 不同与其他 SMAs, $\beta\text{-TiNb}$ SMA 与 WS_2 的晶格失配度仅为 3%, 因此, 除了掺入 WS_2 层间的 TiNb 之外, 部分 TiNb 能够保持自身的晶体完整性, 在摩擦过程中, $\beta\text{-TiNb}$ SMA 纳米晶体的存在有助于在摩擦过程中将 WS_2 的塑性变形转化为自身的弹性变形, 实现了载荷响应的宏观超润滑性。但是由于这类结构容易失效, 超润滑的寿命仅有 5.0×10^4 r。 $\beta\text{-TiNb}$ SMA 掺杂的 MoS_2 薄膜在真空-大气交变环境中具有优异的摩擦学性能。当 $\beta\text{-TiNb}$ 的掺杂量为 10% (质量分数) 时, 复合薄膜在大气中的摩擦系数为 0.065, 摩擦寿命为 4.2×10^5 r; 真空中的摩擦系数仅为 0.010, 摩擦寿命为 7.2×10^5 r。同时, 该薄膜在大气-真空循环条件下重复使用 10 次, 摩擦系数没有发生明显变化。机理分析表明摩擦过程中会在无定型复合薄膜表面诱导产生高结晶度的 MoS_2 , 这是真空条件下低摩擦系数的主要来源; 在大气条件下由于氧气和水分的存在, 复合薄膜在摩擦过程中会产生一定的 MoO_3 , 使摩擦系数略有上升; 但是, 由于 $\beta\text{-TiNb}$ 合金的存在能够减缓固体润滑薄膜的氧化, 降低了摩擦诱导形成的转移膜对水氧的敏感性; 同时, 复合薄膜再次进入真空条件下能够诱导产生高结晶度的 MoS_2 , 摩擦学性能得到了再次恢复。上述研究结果表明, 采用记忆金属复合固体润滑薄膜的策略, 可以进一步拓展现有固体润滑薄膜的性能限制, 同时发挥多元金属的独特性, 有望开发高性能新型固体润滑薄膜材料。

D40 -P19

基于氢键特性的新型低共熔润滑的环保设计及其性能应用研究

姚盈盈, 刘梦瑶, 文平, 董瑞, 凡明锦*

宝鸡文理学院 化学化工学院

低共熔溶剂 (DES) 具有优异的性能可控性和分子结构可设计性, 在分子水平上, DESs 是典型的氢键驱动的三维网络结构体系, 具有高极性和强吸附等特点, 成为高性能润滑材料的潜力选择。因此, 本工作以不同结构的磷酸酯作为氢键受体, 薄荷醇作为氢键供体, 设计并制备了一系列磷酸薄荷醇 (P-DL DESs) 作为高性能润滑剂。研究结果表明所合成的 DESs 具有低黏度和超亲水性, 以及更高效的吸附和界面自组装行为。优异的腐蚀性和热稳定性显著增强其在剪切过程中的化学稳定性。就摩擦学性能而言, 从不同摩尔比和链长结构的角度讨论了磷酸酯 DESs 的理化性能和摩擦学性能, 更多的氢键供体、更长的烷基链和合适的支链结构对润滑剂的减摩抗磨和极压承载性能有积极的影响。可见, 不同的分子结构和组分会影响氢键的强度和结构特征, 并与润滑性能表现出一定的相关性。此外, 结合 FIB-TEM 和 XPS 等揭示了磷酸酯 DES 体系在金属滑动界面上的成膜机理: 超亲水性、极性吸附和摩擦化学反应的协同作用是润滑性能提升的关键因素。本工作为高性能环保型润滑材料的设计和性能研究提供一定的指导意义。