

• 综述 •

高分子固体润滑材料研究进展

乔红斌^{1,2*}, 陈文勇^{1,2}, 张大伟^{1,2}, 田雪梅^{1,2}, 金玲^{1,2}

(1. 安徽工业大学化学与化工学院, 马鞍山 243002; 2. 安工大工业技术研究院高分子与固体润滑研究所, 马鞍山 243002)

摘要: 固体润滑可有效降低摩擦系数和磨损率, 大大延长基材使用寿命, 已成为工业领域应用于低速、重载和高温等工况下机械运动件摩擦副的关键技术之一。高分子固体润滑替代或者配合流体润滑, 利用高分子粉末、薄膜或复合材料避免金属间的直接接触, 形成低摩擦润滑介质实现减摩耐磨。本文概述了粘结固体润滑涂层(BSLCs)、固体润滑块(SSLs)、固体润滑膏(SLPs)以及自润滑复合材料(SLCs)四类高分子固体润滑材料(PSLMs)的研究进展, 着重论述以水性环氧(WEP)、水性聚氨酯(WPU)、水性聚酰胺酰亚胺(WPAI)为粘结剂的水性粘结固体润滑涂层研究现状。最后, 结合当前研发现状以及固体润滑技术在工业应用中的短板, 展望了高分子固体润滑材料未来发展趋势。

关键词: 固体润滑; 高分子; 涂层; 减摩; 耐磨; 自润滑

Research Progress on Solid Lubricating Polymer Materials

QIAO Hong-bin^{1,2*}, CHEN Wen-yong^{1,2}, ZHANG Da-wei^{1,2}, TIAN Xue-mei^{1,2}, JIN Ling^{1,2}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;
2. Industrial Technology Research Institute, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: Solid lubrication can effectively reduce the friction coefficient and wear rate, and greatly prolong the service life of the substrate, so it has become one of the key technologies applied to the mechanical friction pairs of the moving parts at low speed, heavy load, and high or low temperature. Wherein, polymer solid lubrication techniques can be employed to substitute or coordinate fluid lubrication, where polymer powders, thin films, or composites are utilized to form low-friction lubricating coatings, leading to the avoidance of metal-to-metal contacts, reducing friction and wear. Four types of polymer solid lubricating materials (PSLMs), including bonded solid lubricating coating (BSLCs), solid stick lubricants (SSLs), solid lubricating pastes (SLPs) and self-lubricating composites (SLCs), are surveyed and systematized in this paper. The research status of waterborne bonded solid lubricating coatings with waterborne epoxy (WEP), waterborne polyurethane (WPU), and waterborne polyamide-imide (WPAI) as binder is emphatically discussed. Finally, the future development trend of solid lubricating materials was prospected, considering the current research and development status of solid lubricating materials and the shortcomings of solid lubrication technology applications in industrial fields.

Keywords: Solid lubrication; Polymer; Coating; Friction reduction; Wear resistant; Self-lubricating

固体润滑材料尤其适用于低速、重载、高温、真空、强氧化、特殊介质等传统流体润滑材料难以满足的特殊工况条件下, 在金属、塑料、橡胶、

木器乃至无机非金属表面发挥减摩、降磨、降噪、减阻、抗微振动、延寿等作用^[1~3]。固体润滑材料和周围介质与摩擦表面发生物理化学反应形成固

收稿: 2023-01-13; 修回: 2023-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51474003)

* 通讯联系人: 乔红斌(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事固体润滑与高分子材料的研究。E-mail: qiaohb@ahut.edu.cn

doi:10.14028/j.cnki.1003-3726.2023.12.002

体润滑膜。形成的固体膜满足以下四个条件^[4]:与金属底材良好的附着性;良好的稳定性;较低的剪切强度和较强的承载能力。固体润滑材料中,因其粉末润滑方式独特且应用与实施方式特殊,在此未作论述,本文重点概述了以有机高分子为基体的粘结固体润滑涂层、润滑块、润滑膏以及自润滑复合材料研究与应用进展,尤其关注节能减排、环境友好与可降解固体润滑材料,以期得到更加系统、广泛的研究应用,四类高分子固体润滑材料的共性、差异性及应用特点等如图 1 所示。

1 固体润滑涂层

1.1 有机溶剂粘结固体润滑涂层

有机溶剂粘结固体润滑涂料以有机溶剂作为分散介质,主要成分包括溶剂型树脂、颜填料、固体润滑剂以及助剂等。溶剂型树脂粘结剂包括聚酰亚胺(PI)^[5]、聚酰胺酰亚胺(PAI)^[6]、环氧(EP)^[7]等,而石墨^[8]、氟化石墨^[9]、石墨烯^[10,11]、纳米金刚石^[12]和碳纳米管^[13]等片层结构或者碳素固体润滑剂与 Al_2O_3 ^[14]、 SiO_2 ^[15]、 TiO_2 ^[16]、 ZnO ^[17]、 SiC ^[18]、 Si_3N_4 ^[19]、氟化稀土^[20]等纳米填料可显著改善涂层摩擦学性能。

近年来围绕二硫化钼(MoS_2)、石墨(Gr)和聚四氟乙烯(PTFE)等固体润滑剂和纳米增强填料在涂层中的相互作用机理展开深入研究。固体润滑剂的特定晶面或分子间键合较弱,在摩擦接触

面上形成了润滑转移层,基于片层间解离的自润滑特性实现减摩抗磨作用^[21]。

在固体润滑体系中添加适量的纳米增强材料,可形成具有优异机械强度和耐磨减摩性能的高性能摩擦膜。这些纳米添加剂可以归纳为零维、一维、二维和三维纳米材料。由于不同维度纳米材料具有的独特性质,在摩擦膜中的作用规律与机理也不尽相同。不同维度纳米添加剂的作用规律如下^[22]:(1)零维纳米颗粒在所有尺度都小于 100 nm,球形或类球形的零维纳米颗粒具有独特的滚动承载功能,有利于提高摩擦膜的承载能力;(2)一维纳米线是在二维上具有纳米尺度的材料,具有较大的长径比,高长径比的一维添加剂具有良好的应力传递机制,同时还表现出纳米滚动效应,能有效降低摩擦阻力;(3)二维纳米材料是具有层状结构的纳米片,层间的原子通过范德华力连接,因此具有较低的层间剪切强度,其润滑性能与层间易发生滑动的结构特性相关;(4)三维纳米材料是由零维、一维和二维材料中的一个或多个基本结构单元组成,通过调节结构特征可结合从零维到二维添加剂的优点,因而具有巨大的摩擦学潜力。

纳米粒子作用机理可能包括^[23~25]:(1)微凸体接触面之间的球形纳米粒子可将摩擦表面之间的滑动转化为滚动,降低摩擦系数;(2)纳米粒子填充微谷底,以降低表面粗糙度并增大对磨金属

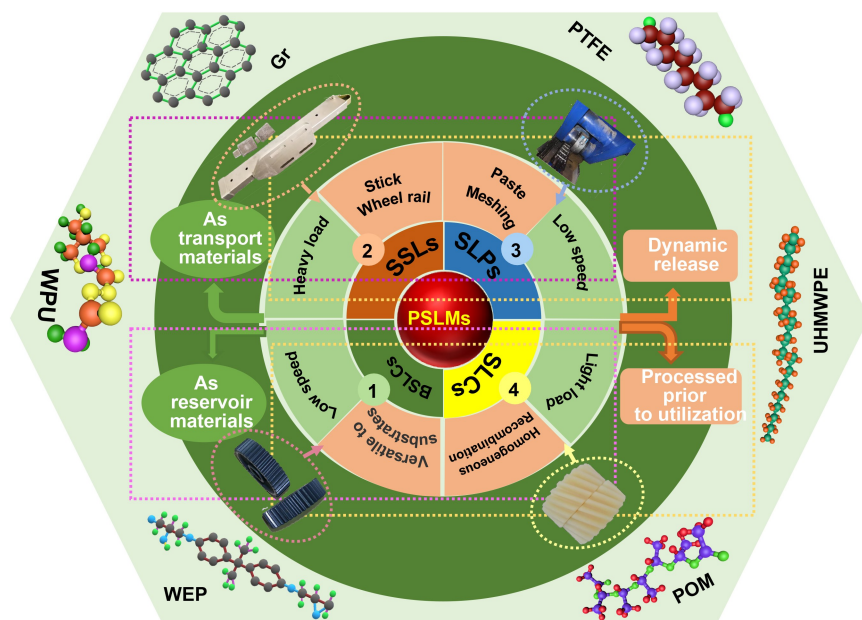


图 1 高分子固体润滑材料主要类型与应用特点

Figure 1 The main types, applications and characteristics of polymer solid lubricating materials

间接接触面积；(3)纳米粒子作为隔离体或第三体材料转移形成连续的复合摩擦膜，避免表面微凸体直接接触；(4)界面处捕获的纳米粒子发生剪切作用，不形成粘附膜；(5)纳米粒子的抛光作用可降低摩擦表面粗糙度，形成低剪切阻力保护膜；(6)纳米粒子在摩擦闪温作用下烧结熔化于微裂纹中，强化表面并修复磨痕和补偿磨损损失。而纳米润滑剂在金属表面形成薄膜保护接触表面降低摩擦力，同时在高载荷和低速滑动下实现边界润滑。

溶剂型固体润滑涂层附着力强、耐老化、耐酸碱，在诸多领域得到广泛应用，但在制备、成膜乃至应用过程中产生挥发性有机化合物(VOCs)，造成环境污染且危害人体健康，因此开发环保型涂层是固体润滑涂层可持续发展的必然趋势^[26]。

1.2 水性粘结固体润滑涂层

水性粘结固体润滑涂料以水性树脂作粘结剂，水作分散介质，因其环境友好正成为固体润滑涂料研究热点。水性环氧树脂(WEP)对基材附着力高，涂层耐腐蚀性能优异，但耐磨性一般，适用于常温常规基材；而水性聚氨酯树脂(WPU)固体润滑涂层固化条件适中，粘结性能优异，树脂的低温成膜性能使其在特定的基材和工况条件下，适应能力更强；水性聚酰胺酰亚胺树脂(WPAI)兼具良好的水分散性、优异的附着力和热稳定性，涂层硬度高且耐磨寿命更长，适用于耐温和强韧基材。研究者们对 WEP、WPU、WPAI 基等水性固体润滑涂层的机械和摩擦学性能进行了广泛而深入的研究。

1.2.1 组分匹配优化

通过优化固体润滑涂层组分间匹配设计以充分发挥其协同增强作用，从而显著提升机械性能、减摩耐磨性能。例如 MoS_2 、Gr 和三氧化二锑(Sb_2O_3)/WEP 复合涂层^[27~29]、 MoS_2 /WEP 涂层^[30]、WPAI- MoS_2 涂层^[31,32]、WPAI-PTFE- LaF_3 纳米复合涂层^[33]、WPAI-Gr 涂层^[34]、WPAI-Gr- LaF_3 涂层^[35]、WPAI- MoS_2 -Gr 复合涂层^[36] 以及 WPU-PTFE 涂层^[37] 等。

1.2.2 纳米增强

纳米粒子在粘结固体润滑涂层中发挥着优化涂层的力学、摩擦学性能以及延长使用寿命等纳米增强作用。例如稀土氟化物 LaF_3 纳米颗粒由于其价格低廉、毒性小、绿色环保等特点，被广泛用作水性固体润滑涂层的增强填料，以提高涂层

承载能力与耐磨性^[32,33,35]。此外，纳米填充有利于增强界面结合强度，从而提高涂层的结构致密性，进一步优化机械强度和摩擦学性能。Li 等^[38] 比较了微米级不规则棒状和纳米级正多面体状 PTFE 固体润滑剂对水性粘结固体润滑涂层的基本结构、力学和摩擦学性能的影响。相比于填充有微米级 PTFE 的涂层，纳米涂层表面更为光滑、规整，孔隙明显减少，并表现出优异的耐磨减摩性能和机械强度。由于纳米级 PTFE 形态较为规整，且尺寸相对更小，树脂与润滑剂之间接触面积显著增大，有助于与涂层中的其他组分更充分地结合，并实现更均匀的分布，从而提高涂层的结构致密性。另外，纳米粒子较高的表面活性使其在水性涂料中容易团聚，可对纳米粒子进行表面改性改善其水分散性，从而显著提升涂层的减摩耐磨性能^[39]。纳米增强 WPU 润滑涂层性能也得到一定的研究，如原位合成的 MoS_2 @ZIF-8(沸石咪唑骨架-8) 纳米颗粒/WPU 涂层摩擦系数低至 0.05，比纯 WPU 膜低 10.3%^[40]。

1.2.3 水性树脂改性

采用物理共混制备而成的水性固体润滑涂层往往表现出较差的机械性能和摩擦学性能，通过对水性树脂进行交联改性增强界面结合强度，可提高涂层的耐磨减摩性能。例如单一 WPU 固含量低、耐水耐溶剂性差、生产成本低，交联改性 WPU 耐磨涂层质量损失同比降低 40%^[41]。化学改性后的高交联度 WPU 粘附强度从原来的 5 级提高到 1 级，当与 PTFE 以质量比为 9/10 复合时，涂层表现出优异的摩擦学性能^[37]。

通过设计优化匹配涂层中各组分、填充纳米填料提高界面结合强度或通过表面改性改善水分散性以及树脂改性弥补其固有缺陷等方法，三类涂层中，WEP 涂层减摩性能较优，但物理化学性能和耐磨性尚可提升；WPU 涂层力学强度得到深度优化；WPAI 涂层机械和减摩耐磨性能得到显著提升。低碳、环保的水性粘结固体润滑涂层将在电子、通讯、航天航空等高新技术应用领域得到广泛应用，并逐步替代传统有机溶剂型涂层。尽管水性粘结固体润滑涂层得到一定的发展，但基体树脂合成或改性的报道较少，因而使得涂料商业化应用受限。因此，除了上述方法以外，研发适用于固体润滑体系，且具有良好耐水性、耐高温、低成本的水性树脂也势在必行。

1.3 其他环保固体润滑涂层

无溶剂涂料采用活性稀释剂,避免溶剂型涂层 VOCs 和水基涂层水溶胀性缺陷,在固化时分子链排列规整,气孔少,具有良好的耐磨性、耐渗透与耐候性^[42]。例如,改性脂肪胺固化环氧树脂填充活性稀释剂与活性增韧剂制得管道减阻耐磨无溶剂涂层,表面能低至 26.22 mN/m,从而影响受壁面状态控制的边界层内区,减小流体阻力^[43]。

粉末涂料节能、环保、高效、可回收再利用,已见开发应用于开式齿轮、微振动钢丝绳以及其他摩擦部件^[44~46]。以聚酯型、聚酯/环氧复合型、环氧型三类粉末涂料耐磨性优于溶剂型的,其磨损机制主要为粘着磨损;聚酯涂层在相对运动速度较快时润滑耐磨性能优异,聚酯/环氧涂层则相反^[47,48]。羧酸聚酯树脂和异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)、聚酯流平剂和固体润滑剂的复合涂层用于金属缆绳微动疲劳防护^[49]。

光固化涂料在紫外或蓝光下常温固化,速度快、耐磨性优、对摩面划伤小,显著改善水基涂层固化缺陷,尤其适用于不耐温基材的润滑耐磨^[50],如木器表面润滑降噪^[51]。

固体润滑涂层因其树脂聚合物特定的链段结构,在受到压力时发生塑性变形,同时表面桔皮状结构具有良好的吸震降噪功能,微观多孔也可储存润滑油脂,形成减摩协同效应,涂层及其携带的固体润滑剂于运动过程中在对摩面形成转移膜,起到减摩耐磨效果^[52]。

在装配之前形成的固体润滑涂层失效之后不能现场补充和维护,而固体润滑块和润滑膏则可在运动过程中反复施涂,避免了上述缺陷。

2 固体润滑块

固体润滑块形似肥皂,在运动摩擦副界面反复释放润滑剂并形成兼具极高压强度和抗拉强度的润滑膜,防止金属表面微凸起穿透膜,减小基材实际接触面积,避免液态润滑剂非预想迁移与环境污染,适用于低速、重载以及高低温等运行的轮轨工况^[53]。

充分发挥油脂润滑方式包括石蜡融化渗入和微胶囊包覆润滑油。由 PTFE、石墨粉等挤压成型,通过阶梯加热与降温,渗入石蜡得到固体润滑块^[54]。现有固体润滑块在高温或低温下使用润滑效果欠佳,通过改性环氧树脂携带固体润滑剂和

微胶囊包覆润滑油制得固体润滑块,实现较宽温域的持久润滑^[55]。此外,弥补现有润滑块高吸湿性、粘性差等缺陷,通过酚醛环氧或者不饱和聚酯先调整密度,再创新性地复合乳化油制备兼具硬度和尺寸稳定性的含油固体润滑块,应用于重载滑动或者滚动摩擦副^[56,57]。除了上述固体润滑块以外,以多孔基体为骨架材料,内部原位嵌入润滑块的创新设计也广泛应用于轴承、轴套、轴瓦或滑板等^[58]。

材料磨损率一般均随接触压强、蠕滑率和摩擦系数的升高而增大。固体润滑块的润滑机理在于^[59]:轮缘固体润滑块受推力作用压靠至轮缘并在钢轨摩擦副界面受热软化熔化粘附于轮缘或钢轨上,形成的润滑膜降低蠕滑率和摩擦系数,抑制轮轨疲劳裂纹的生长和扩展,减少滚动接触疲劳(RCF)磨损。润滑膜应具备“薄”、“牢”、“补”三特性。“薄”是指膜薄而均匀,若润滑膜太“厚”,浪费材料、污染轮轨、破坏润滑效果;膜不均匀则影响润滑整体效果。“牢”是指膜与金属附着力优,牢固粘附接触表面并形成致密网膜。“补”是指在轮轨表面不断补充润滑材料。

固体润滑均属边界润滑状态,其摩擦系数高于流体润滑。润滑剂中复合低摩擦固体颗粒,作为油、脂、膏的添加剂,提高极压性能,在流体润滑失效时起边界润滑作用。

3 固体润滑膏

固体润滑膏形似牙膏,应用于齿轮齿条,粘附性优且反复施涂,形成含油或固体润滑介质的膜。采用道旁涂覆设备涂覆摩擦调节剂,可将波形磨损增长率降低到原来的 1/11~1/8,同时抑制轮轨摩擦产生的噪声。

针对润滑油脂使用周期、抗氧化和抗乳化能力受限缺陷,以矿物油经过金属皂稠化,添加三聚氰胺尿酸络合物(MCA)、PTFE、氟化稀土以及增粘剂和成膜剂等制得固体润滑膏,具有低剪切、长寿命、高承载能力和高烧结负荷能力等优点^[60]。在此基础上添加 CeF_3 、 LaF_3 、 Cu_2O 等摩擦成膜剂,润滑膏成膜性好且承载能力高,烧结负荷高达 7840 N^[61]。长链烷基硅油添加 PTFE 微粉制得润滑膏,PTFE 微粉既可作为长链烷基硅油的增稠剂,又可作为固体润滑剂,改善长链烷基硅油抗磨减摩性能,大幅提高烧结负荷^[62]。

聚醚或聚酯多元醇的润滑膏由固体润滑剂、

抗磨添加剂、增粘剂,经高温混炼而成,用于轻纺、造纸、印刷及机加工等行业数控机床的卡盘、导轨、齿轮和轴承以及各种弯道钢轨、火车轨道等^[63,64]。除了复合分散液与耐磨添加剂,剪切触变剂对于润滑膏性能的发挥也起到重要作用,浅色固体润滑膏尤其适用于清洁生产的齿轮齿条部件^[65]。也有水基润滑膏具有的低软化点、低摩擦系数、抗冲击性和渗透性的特性,能有效防止器械受损并提供抗蚀防锈功能,适用于高强度环境下维护设备的正常运转^[66]。

固体润滑膏润滑机理通常分为两个阶段^[67]:固体润滑膏网状结构在齿轮相互运动挤压下析出;进而吸附于金属齿面的固体润滑剂填充齿面凹坑,在凸点发生摩擦化学效应形成固体润滑膜。这些薄膜作为物理屏障来防止磨损滑动面之间的直接接触。金属间触点被金属对膜层或膜层对膜层的接触取代,发挥以下几个方面作用^[68]:(1)表面微凸起免受微焊接和后续的粘着磨损;(2)表面免受其粗糙表面的磨蚀作用;(3)插入的纳米结构承担载荷,取代了表面微凸体的承担;(4)在保护膜层间出现载荷和剪切引起的弹、塑性变形,取代了摩擦表面本身,这也减少了接触疲劳。

4 高分子自润滑复合材料

上述三类润滑材料通过携带固体润滑剂和增强体,较多地发挥其第三体转移膜的润滑特性,其中,粘结固体润滑涂层在使用前制备,固体润滑膏、润滑块在使用过程中反复释放,而后两者中的固体润滑膏还适用于复杂和特殊形状运动部件。高分子自润滑材料本身可作为摩擦副,在滑动过程中形成的转移层发挥显著的减摩抗磨作用,同时转移层隔离坚硬的金属,保护较软的聚合物表面,降低摩擦系数。由于低热导率和耗散率以及高膨胀系数等无法有效耗散界面热量,自润滑材料较多应用于低 PV(压力、速度)条件的齿轮、轴承、皮带轮、导轨、活塞环和密封材料。填充固体润滑剂、功能和增强填料以及其他无机填料,或者升级基体树脂以延长服役寿命。根据高分子自润滑材料性能差异,将其分为工程高分子自润滑复合材料、高性能高分子自润滑复合材料以及超高性能高分子自润滑复合材料三类^[69]。

4.1 工程高分子自润滑复合材料

尼龙-66(PA66)、聚甲醛(POM)以及超高分

子量聚乙烯(UHMWPE)是应用最广泛的热塑性工程塑料,作为润滑材料可免除外部润滑剂。其中 PA66 具有高强度、自润滑、高耐磨性等性能。然而,其高吸湿性导致其机械性能和尺寸稳定性降低。通常填充增强纤维和固体润滑剂以改善其机械性能和摩擦学性能,如玻璃纤维(GF)^[70]、碳纤维(CF)^[71]和 PTFE^[72]。然而,纤维通常会因变薄、开裂和连续去除从而导致润滑失效,通过在填充有纤维的 PA66 中添加纳米材料并构建表面纹理,可在显著增强摩擦学性能的同时避免上述缺陷^[73]。另有学者探索了局部诱导化学转化工艺作为提高工程塑料摩擦学性能的新途径,利用氢氧化镁作为摩擦活性组分制得具有应变响应特性的智能润滑材料^[74]。

POM 在高负荷和苛刻 PV 条件下磨损率高、自润滑性能差,通过纳米固体润滑剂、增强纤维、碳纳米材料中的一种或多种材料等来改善其摩擦学性能,如 MoS₂^[75]、PTFE^[76]、氧化石墨烯(GO)^[77]和纳米杂化材料^[78,79]等。球状纳米 MoS₂ 可改善 POM 塑料在真空条件下的自润滑性能,而片层结构纳米 MoS₂ 虽可改善 POM 的自润滑,但也导致 POM 的明显降解,填充纤维可以阻止降解。具有较低剪切强度的 PTFE 纤维在滑动时转移到更硬的摩擦副表面形成润滑膜,从而降低 POM 的摩擦学性能。此外,平行于滑动方向的 PTFE 纤维易在对摩表面形成转移膜,从而显著降低摩擦系数和比磨损率。GO 通过与全氟聚醚(PFPE)嵌合可提高与 POM 基体化学相容性,显著改善了材料的摩擦学性能。与纯 POM 相比,摩擦系数和磨损率分别降低了 65.2%和 74.4%。多元 POM 纳米复合材料在机械性能和摩擦学性能等方面明显优于一元纳米复合材料,显著提高了使用寿命和抗压能力。另一方面,对高分子实施表面改性也是改善其理化性能和摩擦学性能的有效途径,如电子束辐照处理后的 POM 表面表现出良好的碳化、交联以及部分物理改性和降低的摩擦系数和表面粗糙度^[80]。

UHMWPE 因其优异的耐磨性、化学稳定性和良好的自润滑性能而备受关注。然而,在干摩擦与水润滑条件下 UHMWPE 表现出较高的磨粒磨损率,限制其摩擦学应用,往往通过添加碳纳米材料、增强纤维和无机纳米材料等单一或杂化填料来改善摩擦学性能,以降低摩擦和磨损^[81~84]。

也有使用微胶囊化润滑剂修饰高分子自润滑材料以降低其摩擦和磨损^[85]。此外,高分子-高分子复合自润滑材料由于其组成成分均可在对摩面形成转移膜,表现出良好的机械性能和摩擦学性能^[86]。例如,Cai等^[87]将聚丙烯酸(PAA)通过紫外光诱导接枝到 UHMWPE 粉末表面,制得具有优良摩擦学性能的海洋工程设备用自润滑摩擦副材料。

综上所述,高分子自润滑材料在添加各种功能和增强填料或者经表面改性处理后,较好地发挥了其自润滑特性。其中,PA66 和 POM 适用于开发高耐磨性自润滑轴承,而 UHMWPE 可作为水润滑轴承材料。值得注意的是,由于高性能高分子材料的自润滑性能或形成转移膜的能力更为突出,而复合材料的磨损率在很大程度上取决于转移膜的质量,因此高性能高分子自润滑材料能被更广泛应用于工业领域。

4.2 高性能高分子自润滑复合材料

PTFE 与聚苯硫醚(PPS)是典型的高性能高分子自润滑材料,其中 PTFE 因其低摩擦系数(约为 0.15)、良好的高温稳定性和耐化学性,在分子材料中应用最为广泛。而纯 PTFE 磨损率较高,通常填充增强材料在表面形成不间断的强力粘附转移膜以提高耐磨性和延长使用寿命。填充无机纳米粒子可能会使基体的干摩擦系数更高,因此需要选择添加合适的纳米填料以获得良好的摩擦学性能。例如以蛇纹石为纳米功能填料,与 PTFE 复合,复合材料的耐磨性比纯 PTFE 的耐磨性高出 2~3 个数量级^[88]。此外,仅仅添加 2 wt% 纳米银,PTFE 耐久性提高了 3.6 倍^[89]。复合材料的固液协同自润滑性能可实现超低摩擦。例如,填充有中空 SiO₂ 颗粒与润滑油 PAO6 的 PTFE 复合材料摩擦系数降至 0.037,仅为纯 PTFE 材料的 26%^[90]。核/壳复合材料由于较强的摩擦副界面结合能力,在机械工程等领域的应用中具有广阔的发展前景。如 PTFE@酚醛树脂核壳复合材料在高载荷、高温、高滑动速度和高粗糙度摩擦条件下磨损寿命比纯 PTFE 高 6 倍,表现出优异的多环境适应性^[91]。

PPS 具有低吸湿性、优异的尺寸稳定性和抗蠕变性。然而,PPS 基体较差的摩擦学特性限制其应用,特别是在恶劣的使用条件下,往往通过添加碳材料^[92]、纤维材料^[93]进行增强改性,尽管 PPS 基复合自润滑材料在干摩擦条件下的耐磨性

显著提高,但在水润滑条件下其摩擦学性能更优。Golchin 等^[94]比较了短碳纤维、多壁碳纳米管和石墨三类碳材料增强 PPS 复合材料在水润滑条件下与金属的摩擦学行为。与纯 PPS 相比,短碳纤维/PSS 复合材料的磨损降低了 3 个数量级以上,摩擦降低了 60% 以上。然而,多壁碳纳米管或石墨的掺入对 PPS 复合材料的摩擦磨损性能影响不大。多孔结构 PPS 自润滑材料在干摩擦条件下的摩擦学性能与其孔隙率相关。孔隙率为 21% 的 PPS 复合材料表现出优异的自润滑性能,多孔材料中的微孔被润滑脂填充,显著降低摩擦系数和磨损率耐磨性,其中耐磨性比纯 PPS 增加了 4 个数量级,摩擦系数降低了 90%^[95]。也有学者通过添加有序微纤维结构的 PA66 以改善 PPS/PTFE 复合材料的摩擦学性能,其摩擦系数和比磨损率分别比纯 PPS 低近 80% 和 3 个数量级^[96]。通过共沉淀法在 PPS 材料上构建增强隔离填料网络结构使其热导率和摩擦学性能同步得到增强,有效改善了自润滑材料的界面散热能力^[97]。

4.3 超高性能高分子自润滑复合材料

聚酰亚胺(PI)和聚醚醚酮(PEEK)的耐化学性、高温稳定性以及耐磨性能更高,较多应用于极端工作环境下。然而,PI 基体难以满足广泛的润滑材料需求,功能性填料和纤维可进一步增强 PI 复合材料在干摩擦或润滑条件下的摩擦学行为^[98]。He 等^[99]采用静电自组装方法制备具有核壳结构的铜纳米颗粒@还原氧化石墨烯(rGO),改善与 PI 的界面相容性,并显著改善 PI 材料的摩擦学性能。涂层、铸造和热压等加工方式严格限制 PI 在复杂环境中的应用,采用三维靶区润滑方法可解决相应难题。如 3D 打印光敏聚酰亚胺(PSPI)-PTFE 复合材料摩擦系数和磨损率分别降低 88% 和 98%,适用于制造复杂和特殊形状的自润滑设备^[100]。利用多孔含油复合材料在热/机械刺激下内部介质响应释放的特性,开发具有自愈合润滑性能的热响应多孔聚酰亚胺(PPI)材料,在润滑层磨损时,其内部介质在热刺激下持续释放到表面,自我修复受损润滑层^[101]。

PEEK 具有低摩擦系数和良好的耐热性、机械性能及加工性能,其优异的耐磨性能可归因于刚性苯环的主链化学结构。此外,PEEK 具有比 PPS 更高的疲劳强度和承载能力,比 PTFE 具有更低的比重,通过引入固体润滑剂、增强纤维、有

机或无机填料以优化其摩擦学性能,用于极端负载条件,如 PTFE^[102]、碳纤维^[103]、有机摩擦改性剂(OFM)s^[104]以及氮化硅(Si₃N₄)^[105]等。此外,已有研究表明,纳米 Al₂O₃^[106]、铜纳米线^[107]、二维石墨氮化碳(g-C₃N₄)纳米片^[108]等零维、一维和二维纳米材料作为增强材料,可有效降低 PEEK 在干摩擦或水润滑条件下的磨损率。

随着科学技术的发展,对于运动部件在高 PV 或高温等恶劣条件下的性能和服役可靠性提出更高的要求。高分子自润滑材料除了填充润滑填料(如 PTFE、碳材料)、增强纤维(如 CF、GF)以及其他有机、无机微纳米填料以外,还可应用化学接枝、表面纹理化和离子束辐照等表面改性技术。此外,需要对复合材料在干摩擦、油润滑、水或海水润滑、离子液体和其他液体润滑的摩擦行为和磨损机理进行深入研究,结合实际应用工况优化润滑方案。

5 展望

高分子固体润滑材料已取得显著研究成果,然而先进固体润滑材料商业应用进程缓慢,必须深入基础研究,推动其在高新技术领域的应用。结合高分子固体润滑材料研究现状和技术短板,未来可关注以下几个方面:(1)升级基体树脂,研发与固体润滑体系相容性优良,具有良好耐水性、耐高温、低成本的水性树脂,推动先进的水性固体润滑涂层在电子、通讯、航天航空等高新技术领域的应用;(2)调节多尺度增强体组元结构,开发高性能多元纳米固体润滑复合材料,包括过渡金属二硫属化物(TMDs)或二维层状固体润滑剂 MXene;(3)构建多孔结构或具有良好界面粘附强度的微纤维结构、微胶囊结构、核壳结构等;(4)推动 3D 打印复合材料等先进工艺的工程应用;(5)开发可降解、环境友好型固体润滑剂,如生物基固体润滑剂;(6)开发高效和智能化固体润滑材料,如自修复涂层、仿生涂层;(7)深入研究高分子基复合润滑材料摩擦磨损方式和润滑机理,建立有效的润滑系统。

参考文献:

[1] Findik, F. Latest progress on tribological properties of industrial materials. *Mater. Des.*, **2014**, 57, 218-244.
[2] Chen, C.; Qiu, S. H.; Cui, M. J.; Qin, S. L.;

Yan, G. P.; Zhao, H. C.; Wang, L. P.; Xue, Q. J. Achieving high performance corrosion and wear resistant epoxy coatings *via* incorporation of noncovalent functionalized graphene. *Carbon*, **2017**, 114, 356-366.
[3] Zhu, S. Y.; Cheng, J.; Qiao, Z. H.; Yang, J. High temperature solid-lubricating materials: a review. *Tribol. Int.*, **2019**, 133, 206-223.
[4] Rosenkranz, A.; Costa, H. L.; Baykara, M. Z.; Martini, A. Synergetic effects of surface texturing and solid lubricants to tailor friction and wear—a review. *Tribol. Int.*, **2021**, 155, 106792.
[5] 丛培红, 李同生, 张绪寿. 聚酰亚胺固体润滑膜的摩擦学研究概况. *材料科学与工程*, **1998**, 16(1), 50-52.
[6] Xi, Z. C.; Wan, H. Q.; Ma, Y. J.; Wu, Y. P.; Chen, L.; Li, H. X.; Zhou, H. D.; Chen, J. M.; Hou, G. L. *In-situ* synthesis of Cu₂S nanoparticles to consolidate the tribological performance of PAI-PTFE bonded solid lubricating coatings. *Prog. Org. Coat.*, **2021**, 154, 106197.
[7] Wan, H. Q.; Jia, Y. L.; Ye, Y. P.; Xu, H. Y.; Cui, H. X.; Chen, L.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Tribological behavior of polyimide/epoxy resin-polytetrafluoroethylene bonded solid lubricant coatings filled with *in situ*-synthesized silver nanoparticles. *Prog. Org. Coat.*, **2017**, 106, 111-118.
[8] Hasan, M. S.; Kordijazi, A.; Rohatgi, P. K.; Nosonovsky, M. Machine learning models of the transition from solid to liquid lubricated friction and wear in aluminum-graphite composites. *Tribol. Int.*, **2022**, 165, 107326.
[9] Li, W. T.; Zhao, W. J.; Mao, L. S.; Zhou, S. G.; Liu, C.; Fang, Z. W.; Gao, X. L. Investigating the fluorination degree of FG nanosheets on the tribological properties of FG/PI composite coatings. *Prog. Org. Coat.*, **2020**, 139, 105481.
[10] Ruan, H.; Zhang, Q.; Liao, W. Q.; Li, Y. Q.; Huang, X. H.; Xu, X.; Lu, S. R. Enhancing tribological, mechanical, and thermal properties of polyimide composites by the synergistic effect between graphene and ionic liquid. *Mater. Des.*, **2020**, 189, 108527.
[11] Upadhyay, R. K.; Kumar, A. Effect of particle weight concentration on the lubrication properties of graphene based epoxy composites. *Colloid Interface Sci. Commun.*, **2019**, 33, 100206.
[12] Lim, D. P.; Lee, J. Y.; Lim, D. S.; Ahn, S.

- G.; Lyo, I. W. Effect of reinforcement particle size on the tribological properties of nano-diamond filled polytetrafluoroethylene based coating. *J. Nanosci. Nanotech.*, **2009**, 9(7), 4197-4201.
- [13] Chen, B. B.; Li, X.; Jia, Y. H.; Xu, L.; Liang, H. Y.; Li, X. F.; Yang, J.; Li, C. S.; Yan, F. Y. Fabrication of ternary hybrid of carbon nanotubes/graphene oxide/MoS₂ and its enhancement on the tribological properties of epoxy composite coatings. *Compos. A*, **2018**, 115, 157-165.
- [14] Bazrgari, D.; Moztaarzadeh, F.; Sabbagh-Alvani, A. A.; Rasoulianboroujeni, M.; Tahriri, M.; Tayebi, L. Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al₂O₃ nanocomposite. *Ceram. Int.*, **2018**, 44(1), 1220-1224.
- [15] Zhang, G. F.; Xiao, G. C.; Chen, Z. Q.; Guo, N. S.; Xu, C. H.; Yi, M. D.; Zhang, J. J.; Zhou, T. T. A new preparation method of CaF₂@SiO₂ nano solid lubricant and analysis of its coating mechanism. *J. Alloys Compd.*, **2021**, 883, 160795.
- [16] You, Y. L.; Li, D. X.; Si, G. J.; Deng, X. Investigation of the influence of solid lubricants on the tribological properties of polyamide 6 nanocomposite. *Wear*, **2014**, 311(1-2), 57-64.
- [17] Sanes, J.; Carrión, F. J.; Bermúdez, M. D. Effect of the addition of room temperature ionic liquid and ZnO nanoparticles on the wear and scratch resistance of epoxy resin. *Wear*, **2010**, 268(11-12), 1295-1302.
- [18] Liu, F. Y.; Wang, T. M.; Wang, Q. H.; Meng, J. H.; Lu, J. J. Improved frictional behavior of SiC derived carbon coating using MoS₃ as a solid lubricant. *Tribol. Int.*, **2016**, 94, 61-66.
- [19] Li, H. L.; Yin, Z. W.; Jiang, D.; Huo, Y. J.; Cui, Y. Q. Tribological behavior of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites with nano-Si₃N₄ and sub-micron size WS₂ fillers. *Tribol. Int.*, **2014**, 80, 172-178.
- [20] Ma, Y. J.; Ye, Y. P.; Wan, H. Q.; Chen, L.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Tribological behaviors of the UV curing polyurethane acrylate resin-polytetrafluoroethylene bonded solid lubricating coatings filled with LaF₃. *Prog. Org. Coat.*, **2018**, 121, 218-225.
- [21] Wang, X. B.; Huang, J. X.; Guo, Z. G. Overview of the development of slippery surfaces: lubricants from presence to absence. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2022**, 301, 102602.
- [22] Chen, Y.; Yang, K.; Lin, H. B.; Zhang, F. Z.; Xiong, B. Y.; Zhang, H. L.; Zhang, C. H. Important contributions of multidimensional nano-additives on the tribofilms: from formation mechanism to tribological behaviors. *Compos. B*, **2022**, 234, 109732.
- [23] He, T. X.; Chen, N. C.; Fang, J. H.; Cai, G. X.; Wang, J.; Chen, B. S.; Liang, Q. L. Micro/nano carbon spheres as liquid lubricant additive; achievements and prospects. *J. Mol. Liq.*, **2022**, 357, 119090.
- [24] Shahnazar, S.; Bagheri, S.; Abd Hamid, S. B. Enhancing lubricant properties by nanoparticle additives. *Int. J. Hydrog. Energy*, **2016**, 41(4), 3153-3170.
- [25] Huang, S. Q.; Wu, H.; Jiang, Z. Y.; Huang, H. Water-based nanosuspensions: formulation, tribological property, lubrication mechanism, and applications. *J. Manuf. Process.*, **2021**, 71, 625-644.
- [26] Wegmann, A. Chemical resistance of waterborne epoxy/amine coatings. *Prog. Org. Coat.*, **1997**, 32(1-4), 231-239.
- [27] 王月梅, 周惠娣, 陈建敏, 陈磊, 冶银平. 水性环氧粘结固体润滑涂层的摩擦学性能研究. *中国表面工程*, **2010**, 23(2), 42-45.
- [28] 王月梅, 周惠娣, 陈建敏, 陈磊, 冶银平. 固化对水性环氧粘结固体润滑涂层理化及摩擦学性能的影响. *材料保护*, **2010**, 43(11), 7-9.
- [29] 王月梅, 周惠娣, 陈建敏, 陈磊, 冶银平. 含二硫化钼、石墨和三氧化二锡的水性环氧树脂黏结固体润滑涂层的摩擦磨损性能. *摩擦学学报*, **2010**, 30(6), 577-583.
- [30] 罗建海, 王仙琴, 罗锋, 吴吉娜, 王引婷, 陈强, 曹维成, 吕晋军. 水性环氧基二硫化钼干膜润滑涂层的制备及摩擦学性能. *中国钨业*, **2020**, 44(3), 34-37.
- [31] 李斌, 冶银平, 万宏启, 陈磊, 陈建敏. 水性二硫化钼基粘结固体润滑涂层制备及其摩擦学性能. *中国表面工程*, **2017**, 30(4), 142-149.
- [32] Li, B.; Wan, H. Q.; Ye, Y. P.; Chen, L.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Investigating the effect of LaF₃ on the tribological performances of an environment friendly hydrophilic polyamide imide resin bonded solid lubricating coating. *Tribol. Int.*, **2017**, 116, 164-171.
- [33] Li, B.; Jiang, X. F.; Wan, H. Q.; Chen, L.;

- Ye, Y. P.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Fabrication and tribological behaviors of a novel environmental friendly water-based PAI-PTFE-LaF₃ bonded solid lubricating composite coating. *Tribol. Int.*, **2018**, 121, 400-409.
- [34] Li, B.; Jiang, X. F.; Wu, Y. P.; Wan, H. Q.; Chen, L.; Ye, Y. P.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Green waterborne PAI-graphite bonded solid-lubricating coatings: promising lubricating materials with robust mechanical and tribological properties. *Prog. Org. Coat.*, **2019**, 132, 211-220.
- [35] Li, B.; Jiang, X. F.; Wu, Y. P.; Wan, H. Q.; Chen, L.; Ye, Y. P.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Novel environmental-friendly lubricating materials: water-based PAI-graphite-LaF₃ bonded solid lubricating coatings. *Appl. Surf. Sci.*, **2019**, 481, 900-909.
- [36] Li, B.; Xv, W.; Liu, P.; Huang, D. Q.; Zhou, X. T.; Zhao, R. F.; Li, S. J.; Liu, Q. F.; Jiang, X. F. Novel green lubricated materials: aqueous PAI-MoS₂-graphite bonded solid lubricating coating. *Prog. Org. Coat.*, **2021**, 155, 106225.
- [37] Li, B.; Jiang, X. F.; Sun, H. Y.; Li, T.; Chen, S. N.; Lyu, S.; Zhang, C. T.; Yu, C. Y.; Shi, Y. N.; Li, D. D.; Sun, D. Z. Novel green waterborne polyurethane-polytetrafluoroethylene BSLCs: chemically optimized crosslinking extent for enhancing the mechanical and tribological properties. *Prog. Org. Coat.*, **2021**, 161, 106457.
- [38] Li, B.; Jiang, X. F.; Wan, H. Q.; Chen, L.; Ye, Y. P.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Environment-friendly aqueous PTFE based bonded solid lubricating coatings: mechanical and tribological properties under diversified environments. *Prog. Org. Coat.*, **2019**, 137, 104904.
- [39] Li, B.; Jiang, X. F.; Wan, H. Q.; Chen, L.; Ye, Y. P.; Zhou, H. D.; Chen, J. M. Optimum hydrophilic modification of lanthanum trifluoride nanoparticles and their application in enhancing tribological properties of eco-friendly water-based bonded solid lubricating coatings. *Tribol. Int.*, **2018**, 125, 1-11.
- [40] Mu, C. L.; Chen, H.; Sun, X. D.; Liu, G. Q.; Yan, K. MoS₂@ZIF-8 doped waterborne polyurethane membranes with water vapor permeable, lubricating, and antibacterial properties. *Prog. Org. Coat.*, **2021**, 161, 106465.
- [41] 王新宇. 功能化水性聚氨酯制备及其涂层性能研究. 大连: 大连理工大学, **2021**.
- [42] De Luna, M. M.; Chen, B.; Bradley, L. C.; Bhandia, R.; Gupta, M. Solventless grafting of functional polymer coatings onto Parylene C. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **2016**, 34(4), 041403.
- [43] 粟鹰, 廖有为, 李芳, 丁武斌. 新型改性脂肪胺固化剂的合成及其在管道减阻耐磨无溶剂涂料中的应用. *上海涂料*, **2012**, 50(5), 7-11.
- [44] Sharma, R.; Setia, G. Mechanical dry particle coating on cohesive pharmaceutical powders for improving flowability—a review. *Powder Technol.*, **2019**, 356, 458-479.
- [45] Saini, V.; von Tapavicza, M.; Eloo, C.; Braesch, K.; Wack, H.; Nellesen, A.; Schmidt, A. M.; Garcia, S. J. Superabsorbent polymer additives for repeated barrier restoration of damaged powder coatings under wet-dry cycles: a proof-of-concept. *Prog. Org. Coat.*, **2018**, 122, 129-137.
- [46] 郭强, 乔红斌, 朱亚辉, 许乐波. 粉末涂料型复合固体润滑膜及其制备方法和固体润滑膜齿轮. 中国, CN1328360C. 2005-06-29.
- [47] 乔红斌, 郭强, 潘国梁, 朱亚辉, 王三舟, 许乐波. 粉末涂料固体润滑膜滚动/滑动复合干摩擦磨损特性研究. *润滑与密封*, **2006**, 31(3), 47-49.
- [48] 朱亚辉, 乔红斌, 郭强. 粉末涂料自润滑耐磨涂层的研究. *润滑与密封*, **2006**, 31(12), 92-94.
- [49] 郭强, 罗唯力, 孙毅, 王申生. 粉末型高分子涂料及其形成的微动疲劳防护涂层. 中国, CN1077909C. 1998-06-10.
- [50] 乔红斌, 邹李华, 吴胜华, 古绪鹏, 杨建国, 章昌华, 郑祎群. 一种光固化干膜润滑剂. 中国, CN102433201A. 2011-11-05.
- [51] 乔红斌. 一种木器用紫外光固化的水性固体润滑剂及其制备方法. 中国, CN105400414B. 2015-12-30.
- [52] 乔红斌, 郭强. 高分子固体润滑耐磨涂层研究进展. *机械工程材料*, **2004**, 28(2), 1-3.
- [53] Fasihi, P.; Kendall, O.; Abrahams, R.; Mutton, P.; Lai, Q.; Qiu, C.; Yan, W. Y. Effect of graphite and MoS₂ based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails. *Tribol. Int.*, **2021**, 157, 106886.
- [54] 吕卫兵, 谢忠斌, 初振平. 轮轨固体润滑块及其制备方法. 中国, CN104927991A. 2015-06-08.
- [55] 乔红斌. 一种耐高温固体润滑块及其制备方法. 中

- 国, CN105670749B. 2015-12-30.
- [56] 田雪梅, 乔红斌, 王圣达, 乔红斌, 吴胜华, 古绪鹏, 陈国昌. 一种聚酯树脂固体润滑块及其制备方法. 中国, CN106883917B. 2017-03-30.
- [57] 田雪梅, 乔红斌, 王圣达, 乔红斌, 吴胜华, 古绪鹏, 陈国昌. 一种酚醛环氧树脂固体润滑块及其制备方法. 中国, CN106967484B. 2017-03-30.
- [58] 袁建业, 陈健, 叶勇. 金属嵌镶固体润滑剂滑动部件的方法. 中国, CN1032064A. 1988-04-09.
- [59] Eadie, D. T.; Hui, R. Proceedings of the 14th international wheelset congress. Orlando, Florida; The University of Illinois, **2004**, 17-21.
- [60] 聂明德, 党鸿辛, 鄂吉胜, 周兆福. 白色固体润滑成膜膏. 中国, CN1032550A. 1987-10-10.
- [61] 聂明德, 党鸿辛, 周兆福. 铁路轮轨润滑成膜膏. 中国, CN1032549A. 1987-10-10.
- [62] 诸国建, 惠泽民. PTFE 微粉对长链烷基硅油润滑膏摩擦学性能的影响. *有机硅材料*, **2014**, 28(3), 176-178.
- [63] 梁军, 彭振军, 周兆福. 一种极压白色无油无毒润滑膏. 中国, CN103773572A. 2012-10-26.
- [64] 梁军, 彭振军, 周兆福. 一种环保型无油重载轮轨润滑膏. 中国, CN103773571A. 2012-10-26.
- [65] 乔红斌, 田闽, 田雪梅, 陈国昌, 吴胜华, 古绪鹏, 余世锋, 闫光文. 一种不含油脂的浅色固体润滑膏及其制备方法. 中国, CN106350150B. 2016-08-08.
- [66] 毛杰, 曲波, 李子荣, 汪徐春, 陈君华, 张雪梅, 刘川. 一种水基润滑膏及其制备方法. 中国, CN108517253A. 2018-05-15.
- [67] 丁守忠. 二硫化钼齿轮油膏的应用概况. *摩擦学学报*, **1984**, 3, 167-171.
- [68] Nyholm, N.; Espallargas, N. Functionalized carbon nanostructures as lubricant additives—a review. *Carbon*, **2023**, 201, 1200-1228.
- [69] Padhan, M.; Marathe, U.; Bijwe, J. Tribology of poly(etherketone) composites based on nano-particles of solid lubricants. *Compos. B*, **2020**, 201, 108323.
- [70] Kunishima, T.; Nagai, Y.; Kurokawa, T.; Bouvard, G.; Abry, J. C.; Fridrici, V.; Kapsa, P. Tribological behavior of glass fiber reinforced-PA66 in contact with carbon steel under high contact pressure, sliding and grease lubricated conditions. *Wear*, **2020**, 456-457, 203383.
- [71] 刘树文, 邱军, 刘文君, 陈广强. 碳纤维增强尼龙 66 低磨耗复合材料制备及性能研究. *塑料工业*, **2021**, 49(9), 34-38.
- [72] Simo Kamga, L.; Nguyen, T. D.; Emrich, S.; Oehler, M.; Schmidt, T.; Gedan-Smolka, M.; Kopnarski, M.; Sauer, B. The effect of irradiated PTFE on the friction and wear behavior of chemically bonded PA46-PTFE-cb and PA66-PTFE-cb compounds. *Wear*, **2022**, 502-503, 204380.
- [73] Clavería, I.; Elduque, D.; Lostalé, A.; Fernández, Á.; Castell, P.; Javierre, C. Analysis of self-lubrication enhancement *via* PA66 strategies: texturing and nano-reinforcement with ZrO₂ and graphene. *Tribol. Int.*, **2019**, 131, 332-342.
- [74] Kamerling, S.; Schlarb, A. K. Magnesium hydroxide—a new lever for increasing the performance and reliability of PA66/steel tribosystems. *Tribol. Int.*, **2020**, 147, 106271.
- [75] Liu, J. J.; Wang, Z. X.; Yang, J.; Yin, B.; Sun, Q. C.; Liu, Y. L.; Wang, S.; Qiao, Z. H. Study on tribological behaviors of Si₃N₄ based ceramics sliding against POM under different solutions. *Tribol. Int.*, **2018**, 118, 368-372.
- [76] Zhou, S. T.; Wu, Y.; Zou, H. W.; Liang, M.; Chen, Y. Tribological properties of PTFE fiber filled polyoxymethylene composites: the influence of fiber orientation. *Compos. Commun.*, **2021**, 28, 100918.
- [77] Chen, C. L.; Zhang, Z.; Zhao, X. W.; Ye, L. Polyoxymethylene/graphene oxide-perfluoropolyether nano-composite with ultra-low friction coefficient fabricated by formation of superior interfacial tribofilm. *Compos. A*, **2020**, 132, 105856.
- [78] Mohsenzadeh, R.; Soudmand, B. H.; Shelesh-Nezhad, K. Failure analysis of POM ternary nanocomposites for gear applications; experimental and finite element study. *Eng. Fail. Anal.*, **2022**, 140, 106606.
- [79] Qi, Z. T.; Liu, H.; He, T.; Wang, J. Z.; Yan, F. Y. Friction and transfer behavior of alumina nanoparticle-reinforced carbon fiber/polyoxymethylene composites in the deep sea environment. *Tribol. Int.*, **2022**, 170, 107516.
- [80] Rahman, M. S.; Shaislamov, U.; Yang, J. K.; Kim, J. K.; Yu, Y. H.; Choi, S.; Lee, H. J. Effects of electron beam irradiation on tribological and physico-chemical properties of polyoxymethylene copolymer (POM-C). *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B*, **2016**, 387, 54-62.
- [81] Tai, Z. X.; Chen, Y. F.; An, Y. F.; Yan, X. B.; Xue, Q. J. Tribological behavior of

- UHMWPE reinforced with graphene oxide nanosheets. *Tribol. Lett.*, **2012**, 46(1), 55-63.
- [82] Sattari, M.; Naimi-Jamal, M. R.; Khavandi, A. Interphase evaluation and nano-mechanical responses of UHMWPE/SCF/nano-SiO₂ hybrid composites. *Polym. Test.*, **2014**, 38, 26-34.
- [83] Vadivel, H. S.; Golchin, A.; Emami, N. Tribological behaviour of carbon filled hybrid UHMWPE composites in water. *Tribol. Int.*, **2018**, 124, 169-177.
- [84] Belotti, L. P.; Vadivel, H. S.; Emami, N. Tribological performance of hygrothermally aged UHMWPE hybrid composites. *Tribol. Int.*, **2019**, 138, 150-156.
- [85] Yang, Z. X.; Guo, Z. W.; Yang, Z. R.; Wang, C. B.; Yuan, C. Q. Study on tribological properties of a novel composite by filling microcapsules into UHMWPE matrix for water lubrication. *Tribol. Int.*, **2021**, 153, 106629.
- [86] Chen, S.; Wei, L.; Cheng, B. X.; Jin, Y. L.; Li, C.; Jia, D.; Duan, H. T. Dry sliding tribological properties of PI/UHMWPE blends for high speed application. *Tribol. Int.*, **2020**, 146, 106262.
- [87] Cai, T.; Zhan, S. P.; Yang, T.; Li, Y. H.; Jia, D.; Tu, J. S.; Li, J.; Duan, H. T. Study on the tribological properties of UHMWPE modified by UV-induced grafting under seawater lubrication. *Tribol. Int.*, **2022**, 168, 107419.
- [88] Jia, Z. N.; Yang, Y. L. Self-lubricating properties of PTFE/serpentine nanocomposite against steel at different loads and sliding velocities. *Compos. B*, **2012**, 43(4), 2072-2078.
- [89] Choudhury, D.; Niyonshuti, I. I.; Chen, J. Y.; Goss, J. A.; Zou, M. Tribological performance of polydopamine+Ag nanoparticles/PTFE thin films. *Tribol. Int.*, **2020**, 144, 106097.
- [90] Li, X. L.; Ling, Y. L.; Zhang, G. L.; Yin, Y. C.; Dai, Y. J.; Zhang, C. H.; Luo, J. B. Preparation and tribological properties of solid-liquid synergetic self-lubricating PTFE/SiO₂/PAO6 composites. *Compos. B*, **2020**, 196, 108133.
- [91] Yang, Y. W.; Wang, H. G.; Ren, J. F.; Gao, G.; Zhao, G. R.; Chen, S. S.; Wang, N.; Wang, J. Q. Multi-environment adaptability of self-lubricating core/shell PTFE@PR composite; tribological characteristics and transfer mechanism. *Tribol. Int.*, **2021**, 154, 106718.
- [92] Chen, G. W.; Mohanty, A. K.; Misra, M. Progress in research and applications of polyphenylene sulfide blends and composites with carbons. *Compos. B*, **2021**, 209, 108553.
- [93] Solfiti, E.; Solberg, K.; Gagani, A.; Landi, L.; Berto, F. Static and fatigue behavior of injection molded short-fiber reinforced PPS composites: fiber content and high temperature effects. *Eng. Fail. Anal.*, **2021**, 126, 105429.
- [94] Golchin, A.; Friedrich, K.; Noll, A.; Prakash, B. Tribological behavior of carbon-filled PPS composites in water lubricated contacts. *Wear*, **2015**, 328-329, 456-463.
- [95] Wang, H. Y.; Liu, D. J.; Yan, L.; Li, M. L.; Wang, C.; Zhu, Y. J. A computed model for tribological properties of porous self-lubricating PPS composites: numerical analysis and experimental verification. *Wear*, **2014**, 320, 94-102.
- [96] Shi, Y.; Zhou, S. T.; Zou, H. W.; Liang, M.; Chen, Y. *In situ* micro-fibrillation and post annealing to significantly improve the tribological properties of polyphenylene sulfide/polyamide 66/polytetrafluoroethylene composites. *Compos. B*, **2021**, 216, 108841.
- [97] Shi, Y.; Bai, Y.; Lei, Y. Z.; Zhang, H. R.; Zhou, S. T.; Zou, H. W.; Liang, M.; Chen, Y. Simultaneously enhanced heat dissipation and tribological properties of polyphenylene sulfide-based composites *via* constructing segregated network structure. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2022**, 99, 239-250.
- [98] Qi, H. M.; Hu, C.; Zhang, G.; Yu, J. X.; Zhang, Y. F.; He, H. T. Comparative study of tribological properties of carbon fibers and aramid particles reinforced polyimide composites under dry and sea water lubricated conditions. *Wear*, **2019**, 436-437, 203001.
- [99] He, G. R.; Li, Y.; Wu, L. F.; Wang, Y. L.; Liu, M.; Yuan, J. Y.; Men, X. H. Synergy of core-shell Cu@rGO hybrids for significantly improved thermal and tribological properties of polyimide composites. *Tribol. Int.*, **2021**, 161, 107091.
- [100] Yao, X. L.; Ji, Z. Y.; Guo, R.; Sun, C. F.; Guo, Y. X.; Wang, X. L.; Wang, Q. H. 3D printing of PTFE-filled polyimide for programmable lubricating in the region where lubrication is needed. *Tribol. Int.*, **2022**, 167, 107405.

- [101] Ruan, H. W.; Zhang, Y. M.; Wang, Q. H.; Wang, C.; Wang, T. M. A novel earthworm-inspired smart lubrication material with self-healing function. *Tribol. Int.*, **2022**, 165, 107303.
- [102] Lin, Z. B.; Zhang, K.; Ye, J. X.; Li, X. J.; Zhao, X. G.; Qu, T.; Liu, Q. F.; Gao, B. Z. The effects of filler type on the friction and wear performance of PEEK and PTFE composites under hybrid wear conditions. *Wear*, **2022**, 490-491, 204178.
- [103] Chen, B. B.; Wang, J. Z.; Yan, F. Y. Comparative investigation on the tribological behaviors of CF/PEEK composites under sea water lubrication. *Tribol. Int.*, **2012**, 52, 170-177.
- [104] Tatsumi, G.; Ratoi, M.; Shitara, Y.; Sakamoto, K.; Mellor, B. G. Effect of organic friction modifiers on lubrication of PEEK-steel contact. *Tribol. Int.*, **2020**, 151, 106513.
- [105] Zhang, J. J.; Liu, J. C.; Wang, Z. X.; Chen, W.; Hu, B.; Zhang, Y.; Liao, H. M.; Ma, S. D. Tribological behavior and lubricating mechanism of Si_3N_4 in artificial seawater. *Ceram. Int.*, **2020**, 46(10), 14361-14368.
- [106] Qiao, H. B.; Guo, Q.; Tian, A. G.; Pan, G. L.; Xu, L. B. A study on friction and wear characteristics of nanometer Al_2O_3 /PEEK composites under the dry sliding condition. *Tribol. Int.*, **2007**, 40(1), 105-110.
- [107] Zhu, J. J.; Ma, L.; Dwyer-Joyce, R. Friction and wear behaviours of self-lubricating peek composites for articulating pin joints. *Tribol. Int.*, **2020**, 149, 105741.
- [108] Gao, C. P.; Fan, S. G.; Zhang, S. M.; Zhang, P. Y.; Wang, Q. H. Enhancement of tribofilm formation from water lubricated PEEK composites by copper nanowires. *Appl. Surf. Sci.*, **2018**, 444, 364-376.