高分子材料科学与工程
POLYMER MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING

http://pmse.scu.edu.cn

聚四氟乙烯材料的减摩性能研究进展

曹晓宇[1,2]，张旭[2]，党恩[1,2]，栾苏[1]，郝建旭[1]，郭晨辉[2]，于晓婧[2,3]，赵康[2,3]

（1. 宝鸡石油机械有限责任公司，陕西 宝鸡 721002；2. 西安理工大学 材料科学与工程学院，陕西 西安 710048；3. 西安理工大学 陕西省腐蚀与防护重点实验室，陕西 西安 710048）

摘要：聚四氟乙烯材料（PTFE）因其卓越的自润滑特性、极低的摩擦系数、出色的化学稳定性以及宽广的耐温范围，在减摩材料领域占据不可替代的重要地位，已成为高端装备和精密机械中关键摩擦副的首选材料之一。为进一步提升其综合性能并拓展应用边界，近年来国内外学者致力于通过填充改性、表面处理及复合材料制备等技术手段优化 PTFE 的摩擦学行为。本文系统综述了 PTFE 减摩材料的研究进展，着重探讨了改性工艺的优化策略、界面作用机理及其对摩擦磨损性能的影响机制，并综合分析了温度、湿度、载荷及对磨副材料等环境与工况因素对其摩擦学性能的影响规律。同时，文章还梳理了 PTFE 及其复合材料在航空航天、机械制造、汽车工业等传统与新兴领域中的具体应用与发展趋势。本综述旨在总结现有研究成果，明确关键问题与发展瓶颈，为 PTFE 减摩材料的后续研究提供理论参考与技术导向，从而推动该材料在更广泛工业场景中的创新应用。

关键词：聚四氟乙烯；减摩材料；改性工艺；界面；摩擦学性能

摩擦与磨损是普遍的物理现象，通常会导致能量损耗、设备寿命缩短及成本增加[1]。因此，有效控制摩擦对节能降耗与保障设备可靠运行至关重要。作为核心解决方案，减摩材料通过延缓磨损来保护设备、延长寿命，已广泛应用于航空航天、汽车等关键工业领域。随着工业发展对材料性能提出更高要求，也持续推动着该领域的创新与进步[2]。

聚四氟乙烯（PTFE）是一种优异的自润滑减摩材料，具有化学稳定、耐温、不粘附等特性[3]。然而，其工程应用受限于诸多固有缺陷，主要包括：机械性能差（强度与硬度低）、耐磨性与抗蠕变性不足、难于加工且导热性有限。因此，如何在保持其原有优点的同时，通过改性提升综合力学与耐磨性能，是当前的研究重点[4]。

当前针对 PTFE 的改性研究主要聚焦于高性能复合材料的开发，旨在通过引入增强相来优化其综合性能[5-7]，但材料在苛刻环境（如高压、低温、腐蚀）下的摩擦学机理与性能演变研究仍不足。鉴于此，本文系统综述了 PTFE 减摩材料的最新进展，重点探讨了其摩擦机理、各类改性方法与界面科学、环境因素影响、表征评价及典型应用，旨在为其设计开发与工程应用提供理论指导。

1 PTFE 的摩擦学机理

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0127
收稿日期：2025-09-01
基金项目：中国石油天然气集团有限公司科技项目（2024ZG47）
通讯联系人：于晓婧，主要从事高分子-金属复合材料、密封材料等研究，E-mail: yxj@xaut.edu.cn

聚四氟乙烯（PTFE）的独特性质源于其分子结构[8]。其一，高结晶度使其能在-250℃至 260℃的宽温区内保持物理性能稳定。其二，极高的 C-F 键能赋予了材料卓越的化学稳定性。其三，因 F 原子取代 H 原子，C-C 主链形成螺旋构型，致密的 F 原子保护层进一步增强了耐化学腐蚀性并导致极低的表面能。也正是这种螺旋结构导致链间范德华力微弱，分子链极易相对滑动，从而表现出极低的摩擦系数[9]。

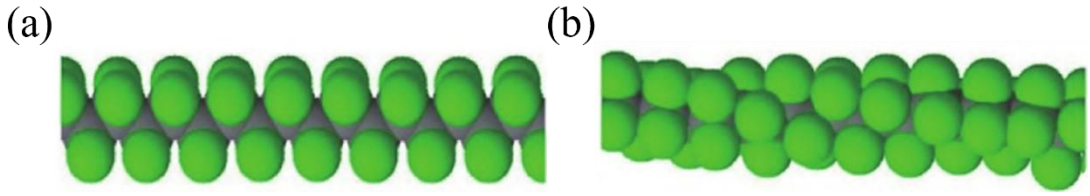


Fig. 1　Structural differences between PE and PTFE[10]: (a) zigzag conformation of polyethylene (PE); (b) helical conformation of polytetrafluoroethylene (PTFE)

PTFE 的摩擦机制主要涉及分子链滑移和转移膜形成[11]。因链间作用力弱，分子链在剪切力下易于滑移；同时，对偶面形成的取向转移膜及其黏附性也显著影响摩擦。其磨损机制则以粘着磨损为主、疲劳磨损为辅，且转移膜的形成与破坏过程是影响磨损率的关键[12-13]。

PTFE 的摩擦学性能具有载荷与速度依赖性[3]。随载荷增加，法向力增速快于摩擦力，导致摩擦系数降低，但磨损会加剧[14]。在滑动速度影响方面，摩擦力随滑动速度的增加先增大后减小趋势，在速度为 1.2 m/s 处达到最大值。此外，其微观摩擦行为与宏观不同：分子取向影响更显著，局部应力可致分子链断裂，且转移膜的形成机制具有尺度依赖性。

2　PTFE 的减摩改性方法

目前，PTFE 的减摩改性研究主要集中在表面改性、填充改性和共混改性三个方向。这些改性方法各具特色，针对 PTFE 不同的性能缺陷提供了优化方案。

2.1 表面改性

在表面改性领域，等离子体处理因其清洁、高效和可控性强等特点，已成为研究最为广泛的表面改性方法。研究表明，等离子体处理可通过表面活化、化学基团引入和物理刻蚀等多重作用机制改善 PTFE 的表面性能[15]。马义蘅等[16]采用氧气等离子体处理 PTFE 纤维，实验结果显示材料的初始接触角降低 23.36%，剥离强度显著提升 186%，这种改善源于等离子体轰击打断了 PTFE 表面的 C-F 键，产生活性自由基并引入含氧基团。然而，改性后的材料在空气中存放 24 小时后，其表面活性表现出明显的时效性衰减（即疏水回复现象），这成为制约等离子体处理技术大规模应用的瓶颈。

为克服单一气体等离子体处理的局限性，研究者开发了多种创新性处理方案。Ji 等[17]则采用氦气/丙烯酸(He/AA)混合气氛等离子体处理，使 PTFE 膜的水接触角从 95.83°降至 49.9°，剥离强度从 0.53 N/cm 提升至 13.52 N/cm，表明混合气氛等离子体可以实现更为显著的表面改性效果。

在等离子体复合改性方面，多种新工艺被开发。例如，Chen 等[18]将激光纹理化与冷等离子体处理相结合，通过物理与化学协同作用，使剪切强度与剥离强度分别达到 2.75MPa 和 6.37N/mm。

Asrafali 等[19]则采用全氟辛酸/全氟辛醇((PFOA/PFOL)结合氮气等离子体的复合处理，使 PTFE 水接触角显著降低，且改性效果持久（一周后仍稳定）。这些进展表明该技术正朝着高效、稳定的方向发展。

化学处理法作为另一种重要的表面改性途径，主要通过改变 PTFE 表面的化学组成来精准调控其界面特性，通过改变 PTFE 表面的化学组成来调控其性能。根据反应机理和处理方法的不同，化学处理主要包括化学接枝、化学刻蚀和表面化学改质三种策略。

化学接枝改性可定向调控 PTFE 表面性能。例如，Sun 等[20]通过高能辐射将甲基丙烯酸甲酯(MMA)接枝于 PTFE 纤维如 Fig.2。接枝后形成的表面交联网络起到了机械增强与改善界面结合的双重作用，使复合材料摩擦系数和磨损率分别降低 42.2%和 87.9%，层间剪切强度则提升了 45.8%。

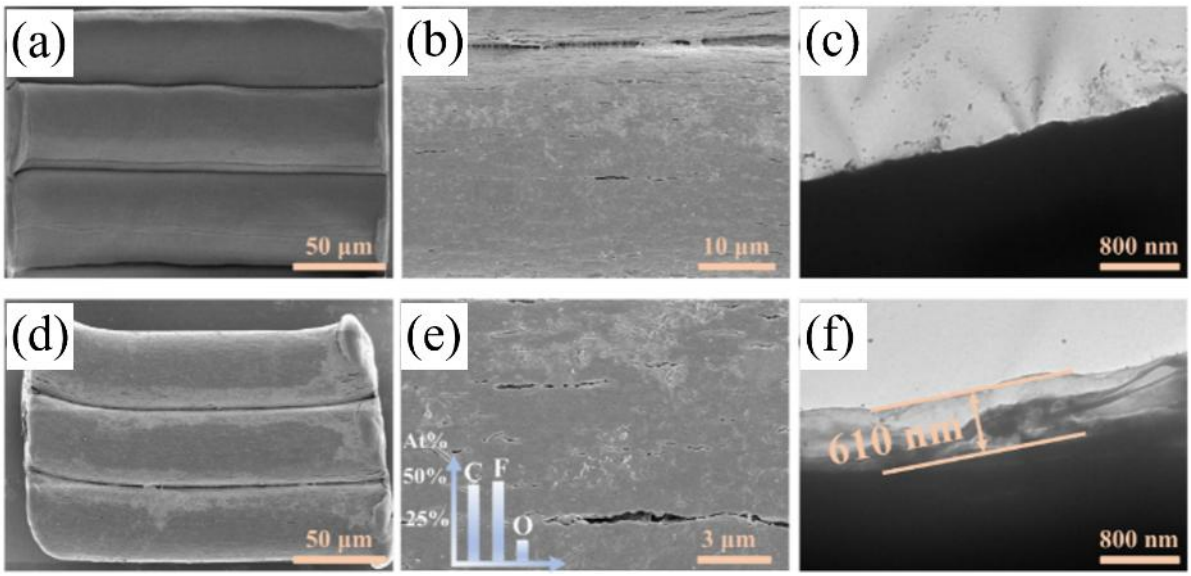


Fig. 2　Morphological and elemental analysis of pristine and modified PTFE fibers: (a) SEM image of a pristine PTFE fiber; (b, d) SEM images of PTFE-g-MMA fibers; (c) TEM image of a pristine PTFE fiber. (e) EDS elemental mapping of a selected area on a PTFE-g-MMA fiber[20]; (f) TEM image of a PTFE-g-MMA fiber

化学刻蚀是另一种重要的表面改性方法，其核心是通过选择性化学反应去除 PTFE 表面的氟原子，暴露出活性位点。Herlem 等[21]在温和条件下开发了一种创新的锂烷基酰胺处理方法，通过直接脱氟胺化反应改变 PTFE 表面性质。研究发现，二亚乙基三胺锂(LiDETA)处理具有最高的脱氟效率，这种方法不仅可以有效改变 PTFE 的表面性质，而且避免了传统强碱处理方法带来的材料损伤。

表面化学改质则通过在 PTFE 表面引入特定的化学基团或涂层来改善其性能。尹航宇等[22]开发了一种基于硅烷偶联剂的表面改质方法，通过γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH550)对 PTFE 表面进行处理，成功引入了具有反应活性的氨基基团。这种改质不仅提高了 PTFE 的表面能，而且为后续功能化改性提供了活性位点。

然而，化学处理方法也面临一些挑战。首先是处理效果的持久性问题，许多化学改性方法虽然能够在短期内显著改善 PTFE 的表面性能，但随着时间推移会出现性能衰减。其次是工艺过程的环境友好性，部分化学处理方法会使用有机溶剂或强碱性试剂，这与绿色化学的发展理念不相符。此

外，化学处理的均匀性和可控性也需要进一步提高，特别是在大面积处理时更为突出。

2.2 填充改性

填充改性是提高 PTFE 综合性能的重要方法，根据填料的作用机理可分为增强型填料和润滑型填料。近年来，研究者在填料的选择、复配及其作用机制等方面取得了显著进展，其中，填料的类型、尺寸和含量对材料性能具有决定性影响。根据填料形态可将其分为颗粒填充、纤维填充和复合填充三大类，各类填料通过不同的作用机制改善 PTFE 的性能。

在颗粒填充方面，研究主要集中在无机微粒对 PTFE 性能的影响。裴高林等[23]对比研究了石墨、二硫化钼、氮化硼和氟化石墨等填料，发现 25%体积分数的石墨填充可使 PTFE 的摩擦系数降至 0.19，体积磨损率降低两个数量级。这表明润滑性颗粒可通过形成稳定的转移膜来改善材料的摩擦学性能。新型颗粒填料的开发也取得突破，如 Zhang 等[24]采用聚多巴胺改性二氧化硅(SiO_2)@聚α烯烃(PAO-6)微胶囊，Fig.3 制备的涂层不仅使摩擦系数降低 78%，还将使用寿命延长 73 倍。

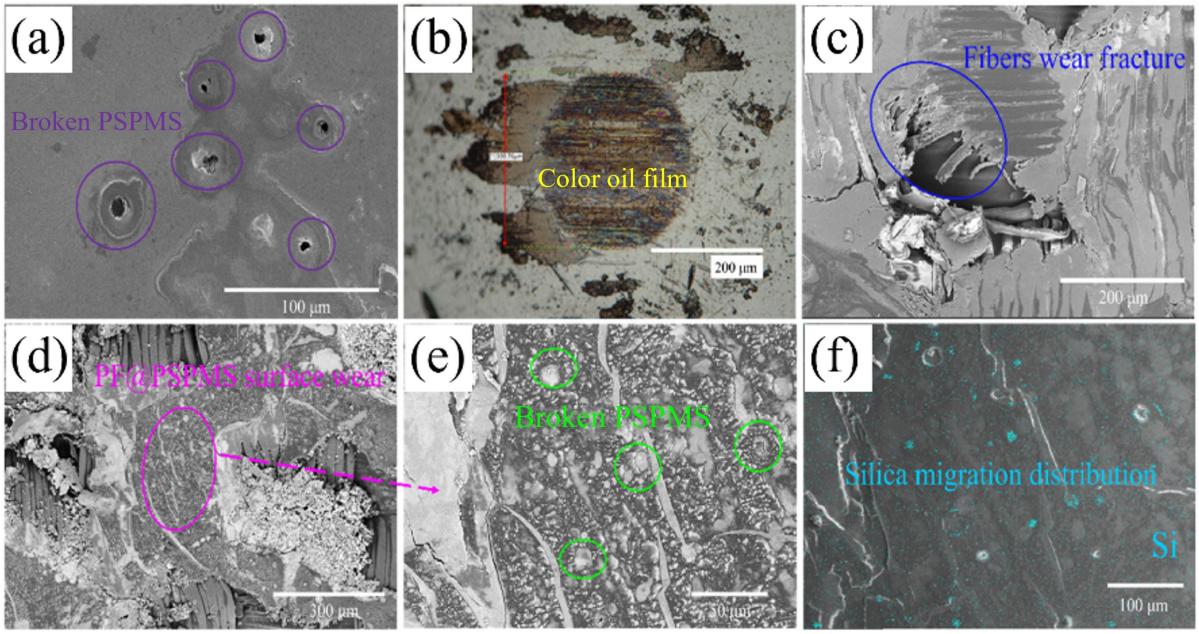


Fig. 3 Analysis of wear morphologies: (a) wear track on the PF@PSPMS coating and (b) corresponding steel ball surface; (c) wear track on the PF liner; (d) wear track on the PF@PSPMS liner; (e, f) distribution and transfer of PSPMS within the wear track of the PF@PSPMS liner[24]

在纤维填充领域，碳纤维和玻璃纤维是研究最为广泛的两种填料。He 等[25]创新性地采用不同长度短碳纤维(0.5mm LSCFs 和 400 目 SSCFs)复配改性，通过代表性体积单元(RVE)模型优化配比，使复合材料的比磨损率降低超过 90%。Amenta 等[26]对比研究了玻璃纤维(GF)和碳纤维(CF)增强 PTFE 与不同表面处理钢材的摩擦行为如 Fig.4 所示，发现 GF-PTFE 与未涂层钢配对时可获得 0.20-0.27 的低摩擦系数。

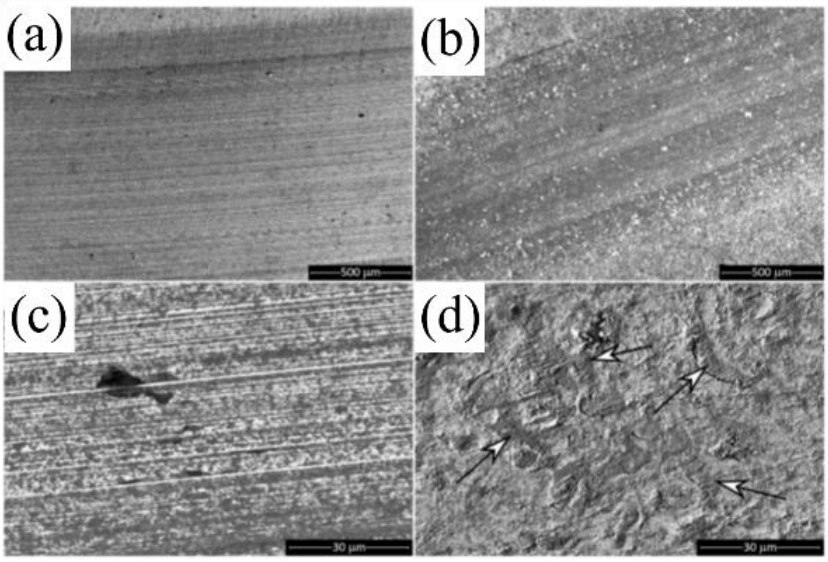


Fig. 4 SEM micrographs of the worn surfaces of (a, c) an uncoated AISI 304 steel disc and (b, d) a Cr_2O_3-coated disc after a pin-on-disc sliding wear test against a GF-PTFE composite pin. The test was conducted at a load of 10 N and a speed of 1.8 m/s. Panels (a) and (b) are overview images, while (c) and (d) are detailed, magnified views[26]

复合填充技术通过多种填料的协同作用进一步优化 PTFE 性能。Huang 等[27]采用原位法制备的纳米铜/石墨烯填充 PTFE 复合涂层 ，使涂层结合强度提升 24.6% (达 5.98MPa) ，磨损率降低 42.2% ，摩擦系数降至 0.087 。王壮等[28]开发的 15CF/8CaF_2/PTFE 三元复合体系实现了 8.9×10^{-7} $mm^3/(N\cdot m)$ 的超低磨损率，证实了纤维增强与润滑颗粒的协同效应。Tarasov 等[29]将 PTFE 与负热膨胀的锆钨酸盐复合，如 Fig.5 所示。显著改善了材料在高温下的尺寸稳定性和耐磨性，在 180°C 时磨损率降至 3.48×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$。

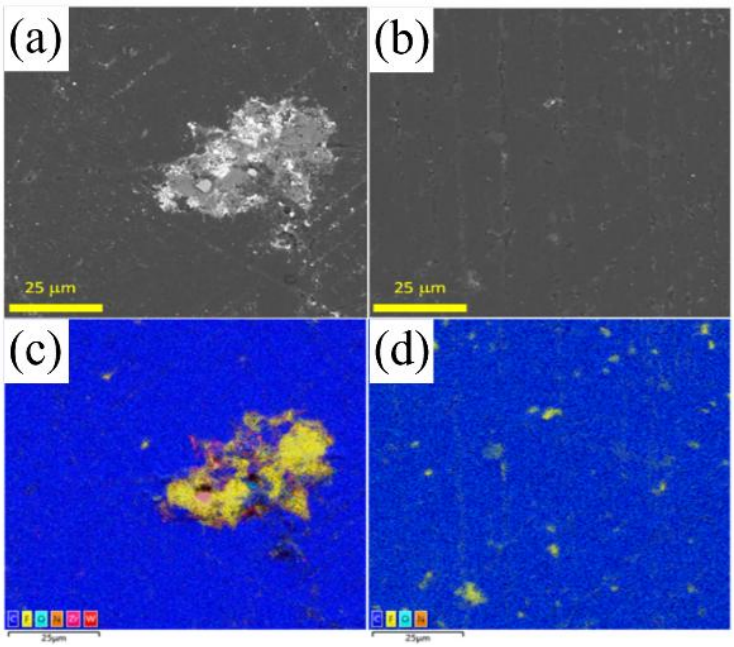


Fig. 5 SEM-BSE micrographs of the worn surfaces on (a) PEI/PTFE/ZT and (b) PEI/PTFE, with their

corresponding EDS maps shown in (c) and (d), respectively. The tests were conducted at t = 23 °C[29]

这些研究表明，不同类型填料通过独特的作用机制改善 PTFE 性能：颗粒填料主要通过改善材料的承载能力和形成稳定转移膜来优化摩擦学性能；纤维填料则通过提供机械增强和热导性改善来提升材料的综合性能；复合填充通过多种填料的协同作用实现性能的进一步优化。未来研究应重点关注填料的界面设计、分散控制和协同机制的深入认识，为开发新型高性能 PTFE 复合材料提供理论指导。

2.3 共混改性

聚四氟乙烯（PTFE）与其他聚合物的共混改性研究一直是提升其摩擦学性能的重要方向。近年来，研究人员探索了多种聚合物作为改性剂与 PTFE 共混，取得了显著成果[30]。研究表明，选择适当的共混物质和工艺条件，可以有效改善 PTFE 的摩擦磨损性能[31]。

李红波等[32]采用粉末冶金法制备的聚酰亚胺(PI)/PTFE 复合材料在 20%PI 添加量时表现出优异的综合性能：拉伸强度达 37.3MPa，断裂伸长率为 202%，摩擦系数降至 0.18，且体积磨损率显著降低至纯 PTFE 的 4/1000。特别值得注意的是，该材料的蠕变变形降低了 62.6%，这对于提升 PTFE 密封材料的实际应用性能具有重要意义。

通过综合比较这三种改性方法，可以发现:表面改性适合于特定应用场景下的性能优化，但稳定性有待提高；填充改性效果显著且应用广泛，是目前最成熟的改性方法；共混改性虽然存在一定局限性，但在某些特定领域具有独特优势。未来的研究应着重解决各种改性方法存在的关键科学问题，并积极探索多种改性方法的协同应用策略。

3 PTFE 复合材料的界面科学

回顾以上研究，PTFE 的各类改性（表面、填充及共混）效果均取决于界面调控。深入理解并控制界面科学机理是优化改性技术的理论基础。接下来将从界面相互作用、粘合强度对性能的影响及界面工程设计三个方面，重点探讨 PTFE 复合材料的界面科学研究进展。

界面相互作用机理研究表明，填料与 PTFE 基体之间存在多种相互作用形式。物理相互作用主要通过填料表面特性的改变来增强，如介孔二氧化硅(mSiO_2)填料的微孔结构能吸附 PTFE 分子链，形成物理缠结网络如 Fig.6[33]。同时，由表面粗糙度和剪切屈服强度决定的机械互锁效应，也对界面结合强度有重要影响。Xue 等[34]研究了碳化钛($Ti_3C_2T_x$ MXene)增强的聚醚醚酮(PEEK)-PTFE 热压复合材料。得益于 MXene 与基体的强界面作用及对润滑膜的促进，材料摩擦系数低至 0.065±0.003，磨损率降低 40%，压缩强度则提高了 28.37%。

界面化学相互作用通过形成化学键结合，其强度取决于键的数量与类型[35]。范德华力则源于表面电荷极性差异，强度与电荷密度及接触程度相关。界面粘合强度是决定复合材料性能的关键：作为应力传递桥梁，它影响承载与耐磨性；其物理性能不连续性通过影响电磁等特性改变摩擦学表现；其诱导效应还可改变基体结构，影响材料的弹性、膨胀及抗冲击能力。

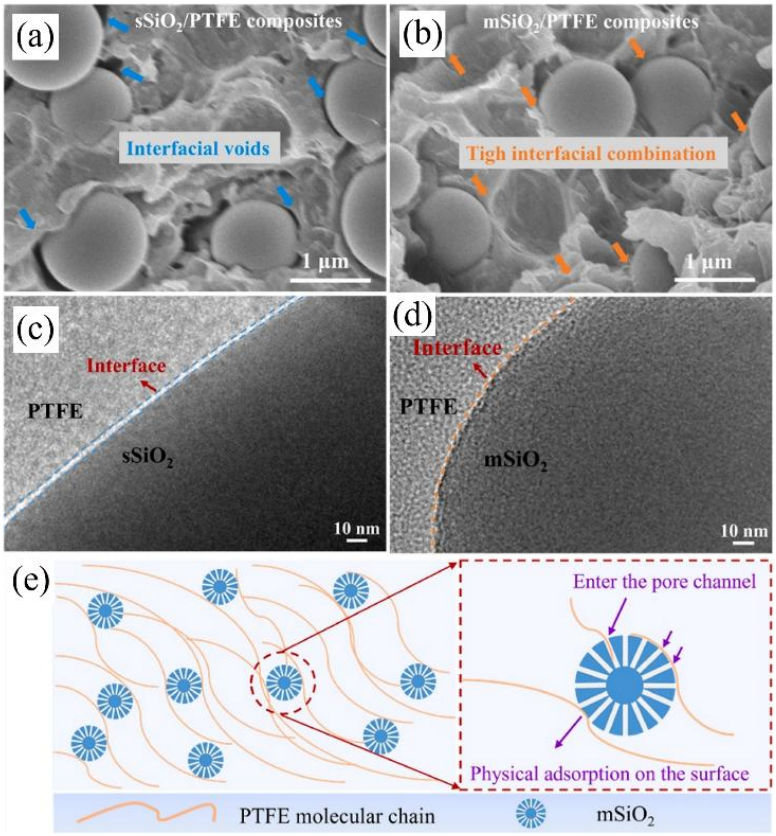


Fig. 6 Cross-sectional FESEM images of (a) sSiO₂/PTFE and (b) mSiO₂/PTFE. TEM images of ultrathin sections of the composites: (c) sSiO₂/PTFE and (d) mSiO₂/PTFE. (e) Schematic diagram illustrating the physical interaction mechanism between mSiO₂ and the PTFE molecular chains[33]

除机理分析外，界面工程设计对提高 PTFE 复合材料减摩性能也至关重要。例如，将碳纳米管(CNTs)改性至玄武岩纤维（BFs）表面可增强界面结合与耐磨性[36]。在其他复合材料体系中，设计梯度涂层以钝化裂纹、减小界面应力[37]，或采用表面蚀刻、涂层等技术来提升界面粘合与整体性能[38]，也证实了界面改性的有效性。

由此可知，后续研究可进行新型界面改性技术探索、微纳级界面结构设计优化以及深入的界面作用机理分析。同时，建立更完善的界面性能表征方法和评价体系，为 PTFE 复合材料的性能优化和工程应用提供理论指导[39]。

4 环境和工况因素对 PTFE 摩擦学性能的影响

4.1 温度和湿度对 PTFE 摩擦学性能的影响。

温度是影响 PTFE 复合材料摩擦行为的关键环境因素，其主要机理是通过改变材料的机械与化学性能实现的[40]。通常，环境温度升高会降低 PTFE 的摩擦系数（如 25K-300K 区间）；但在-100℃至 100℃，因蠕变效应，摩擦系数降低的同时磨损率会反常增加。对于 PTFE 纤维，升温（25℃-150℃）则会使其断裂机制由滑动剪切转为纤维拔出、切断和剥落，从而影响磨损。此外，摩擦过程自身导致的局部温升与滑动速度相关，分子动力学模拟表明其临界速度约为 20 m/s。

4.2 载荷对 PTFE 膜材学性能的影响

合适的载荷有助于维持 PTFE 摩擦的稳定性[41]。在适当的载荷下，PTFE 与对摩材料之间可以形成相对稳定的摩擦界面，摩擦系数波动较小。但是，当载荷过高或过低时，摩擦稳定性会受到影响。Fig.7 载荷对二硫化钼(MoS_2)/PTFE 复合材料性能影响显著[42]。摩擦系数在无润滑和脂润滑时先降后升，脂润滑下 140MPa 时最低，超此载荷材料变形使系数增大。磨损形貌上，无润滑低载荷磨屑少、高载荷破坏重，有润滑整体磨损小但高载荷下受限。微观结构中，适当载荷利转移膜降系数，高载荷阻碍且易挤出。

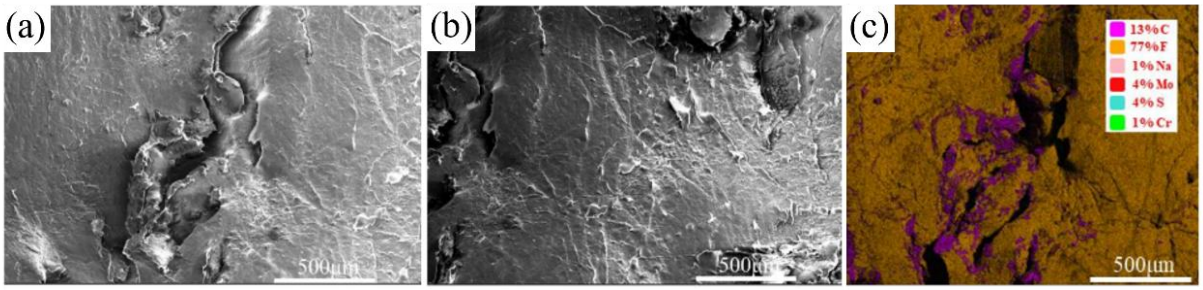


Fig. 7 Surface morphology of the material(s) at 200 MPa: (a) surface morphology 1; (b) surface morphology 2; (c) corresponding EDS map[42]

4.3 对磨副对 PTFE 摩擦性能的影响

对磨副对 PTFE 复合材料摩擦性能影响显著。金属、陶瓷、高分子各有不同摩擦特性；表面粗糙度低利于形成转移膜，降低摩擦与磨损，高则相反。对磨副显著影响聚四氟乙烯基复合材料摩擦性能。磨损量上，与 WC - 10Co - 4Cr 对磨时纯 PTFE 磨损最大，与镀铬对磨时聚合物/PTFE 磨损量小于纯 PTFE，镀铬粗糙度降则磨损量降。研究发现摩擦系数对对磨副材质的敏感度较低，但在不同配副条件下，材料的磨损机制存在显著差异，碳纤维/PTFE 系数最大。摩擦机理方面，镀铬配副形成复合材料间剪切摩擦，WC-10Co-4Cr 配副以轻微磨粒和粘着磨损为主，其最佳配副为碳纤维/PTFE[43]。

5 PTFE 减摩材料的应用

因其优异的摩擦学性能、化学稳定性与耐高低温特性，PTFE 减摩材料应用广泛[44]。在航空航天领域，它被用于发动机密封、轴承等极端工况部件。在机械、汽车及石化工业中，则主要作为轴承、活塞环及耐腐蚀泵阀的密封件[45-46]，以延长设备寿命[45]。此外，其良好的生物相容性与低摩擦特性，也使其适用于人工血管等高端医疗领域[47]。

未来，随着各领域对高性能减摩材料需求的不断提升，PTFE 减摩材料的应用将进一步拓展。特别是在微纳器件、极端环境装备等新兴领域[46]，PTFE 材料的应用潜力有待进一步挖掘。同时，新型 PTFE 复合材料的开发也将为传统应用领域带来性能提升，推动相关产业的技术进步。

6 结语与展望

通过对 PTFE 减摩材料研究进展的系统梳理可知，近年来在工艺优化、机理研究、性能调控及应用开发等方面取得了显著进展。在工艺方面，传统的粉末冶金法、机械球磨法等工艺不断优化，新型的原位聚合、界面改性等工艺技术的开发为提升材料性能提供了新思路。在机理研究方面，通过先进表征手段和理论模拟，对 PTFE 的界面作用机制、摩擦转移膜形成机制以及材料失效机理等有了更深入的认识，为材料设计提供了理论指导。在性能影响因素方面，系统研究了温度、湿度、载荷、速度等因素对 PTFE 减摩材料摩擦学性能的影响规律，建立了性能-结构-工艺关系，为材料性能优化提供了依据。这些研究成果推动了 PTFE 减摩材料在航空航天、机械制造、汽车工业、石油化工和医疗器械等领域的广泛应用。

未来 PTFE 减摩材料的研究应重点关注以下几个方面：首先，开发新型复合改性技术，如智能响应型界面设计、仿生结构设计等，提升材料的综合性能；其次，深入研究极端服役环境下材料的失效机理，开发适应极端条件的高性能 PTFE 材料；第三，发展环境友好型制备工艺，降低材料制备过程的环境影响；最后，探索 PTFE 减摩材料在新兴领域的应用潜力，如微纳器件、柔性电子等。这些研究不仅将推动 PTFE 减摩材料性能的进一步提升，也将为材料在更广泛领域的应用奠定基础。

参考文献：

[1] Wei J, Sun W, Liu K, et al. Tribochemical driven interfacial energy gradient in ultralow wear PTFE composite[J]. Tribology International, 2023, 183: 108438.

[2] Yin N, Yang P, Liu S. AI for tribology: present and future[J]. Friction, 2024, 12: 1060-1097.

[3] 潘登, 刘长鑫, 张泽洋, 等. 速度对聚四氟乙烯摩擦系数影响的分子动力学模拟[J]. 物理学报, 2019, 68(17): 221-30.

Pan D, Liu C X, Zhang Z Y, et al. Effect of velocity on polytetrafluoroethylene friction coefficient using molecular dynamics simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(17): 221-30.

[4] 廖琪琪, 李成才, 刘国金, 等.聚四氟乙烯膜的亲水改性研究进展及应用[J].高分子材料科学与工程, 2023, 39(2): 162-168.

Liao Q Q, Li C C, Liu G J, et al. Progress and application of hydrophilic modification on polytetrafluoroethylene membrane[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(2): 162-168.

[5] Guo Q, Huang Y, Xu M, et al. PTFE porous membrane technology: a comprehensive review[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 664: 121115.

[6] Cui W, Chen H, Zhao J, et al. Progresses on cryo-tribology: lubrication mechanisms, detection methods and applications[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2023, 5: 022004.

[7] Theiler G, Gradt T. Friction and wear behaviour of polymers in liquid hydrogen[J]. Cryogenics, 2018, 93: 1-6.

[8] Alam K I, Bragaw P, Burris D L. Isolating the tribochemical and mechanical effects of nanofillers on PTFE wear[J]. Wear, 2022, 494: 204256.

[9] Sun W, Ye J, Jiao Y, et al. Nanofiller tribochemical functionality is not sufficient to achieve ultralow wear of

PTFE[J]. Wear, 2024, 548: 205379.

[10] 刘顺权, 张馨月, 冯占苗, 等. PTFE 改性技术及其性能优化研究进展[J]. 中国塑料, 2024, 38(7): 112-9.
Liu S Q, Zhang X Y, Feng Z M, et al. Research progress in modification techniques and performance optimization of PTFE[J]. China Plastics, 2024, 38(7): 112-9.

[11] Qu H, Wen Z, Qu J, et al. Study on effects of ultrasonic vibration on sliding friction properties of PTFE composites/phosphor bronze under vacuum[J]. Vacuum, 2019, 164: 1-6.

[12] Meng Y G, Xu J, Jin Z M, et al. A review of recent advances in tribology[J]. Friction, 2020, 8: 221-300.

[13] Qi H, Li G, Zhang G, et al. Distinct tribological behaviors of polyimide composites when rubbing against various metals[J]. Tribology International, 2020, 146: 106254.

[14] Yan Y, Du J, Ren S, et al. Prediction of the tribological properties of polytetrafluoroethylene composites based on experiments and machine learning[J]. Polymers, 2024, 16: 356.

[15] Yang Y, Zhao J, Cui J, et al. Investigation on mechanical and tribological properties of PTFE nanocomposites reinforced by surface-modified graphene using molecular dynamics simulations[J]. Polymer Testing, 2024, 138: 108555.

[16] 马义蘅, 王建勇. PTFE 纤维等离子体表面改性及机理研究[J]. 中国塑料, 2024, 38(6): 66-71.
Ma Y H, Wang J Y. Study on plasma surface modification and mechanism of PTFE fiber[J]. China Plastics, 2024, 38(6): 66-71.

[17] Ji Z, Zhao Y, Zhang M, et al. Surface modification of ETFE membrane and PTFE membrane by atmospheric DBD plasma[J]. Membranes, 2022, 12: 510.

[18] Chen F, Liu W, Zhang D. Femtosecond laser texturing assisted cold plasma hydrophilization of polytetrafluoroethylene surface[J]. Applied Surface Science, 2023, 641: 158488.

[19] Asrafali S P, Periyasamy T, Kim S C. Hydrophilic nature of polytetrafluoroethylene through modification with perfluorosulfonic acid-based polymers[J]. Sustainability, 2023, 15: 16479.

[20] Sun X, Zhang L, Yu C, et al. Surface modification of polytetrafluoroethylene (PTFE) fibers through methyl methacrylate (MMA) polymerization for self-lubricating composites[J]. Applied Surface Science, 2024, 660: 159992.

[21] Herlem G, Roina Y, Fregnaux M, et al. Direct defluorination and amination of polytetrafluoroethylene and other fluoropolymers by lithium alkylamides[J]. Molecules, 2024, 29: 3045.

[22] 尹宇航, 雷浩, 宋敬伏, 等. 改性石墨烯增强聚四氟乙烯摩擦学性能的分子模拟研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(3): 598-608.
Yin Y H, Lei H, Song J F, et al. Molecular dynamics simulation on the tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced with modified graphene[J]. Tribology, 2022, 42(3): 598-608.

[23] 裴高林, 李红波, 苏正涛. 不同固体润滑填料对聚四氟乙烯性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6): 122-7.

Pei G L, Li H B, Su Z T. Effect of solid lubricant fillers on the performance of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6): 122-7.

[24] Zhang W, Li J, Cheng S, et al. Synthetic of phenolic resin@ SiO_2 containing PAO6 to reinforce the tribological properties of PTFE/aramid fabric liner composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 31: 157-164.

[25] He Y, Lin B, Wang Y, et al. Hybrid reinforcing effect of multi-scale short carbon fibers on the wear resistance of PTFE composites: Self-reconstruction and stress transmission [J]. Tribology International, 2024, 194: 109510.

[26] Amenta F, Bolelli G, Pedrazzi S, et al. Sliding wear behaviour of fibre-reinforced PTFE composites against coated and uncoated steel[J]. Wear, 2021, 486: 204097.

[27] Huang S, Yin Y, Fang X, et al. Effect of nano-Cu-loaded graphene fillers on tribological properties of PTFE based composite coatings[J]. Physica Scripta, 2024, 99: 115962.

[28] 王壮，喻萍，刘根，等. 碳纤维和氟化钙协同提高 PTFE 摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(6): 657-65.

Wang Z, Yu P, Liu G, et al. Synergetic role of carbon fibers and calcium fluoride particles on enhancing tribological performance of PTFE[J]. Tribology, 2023, 43(6): 657-65.

[29] Tarasov S Y, Buslovich D G, Panin S V, et al. Structure and tribological behavior of a polyetherimide/polytetrafluoroethylene matrix filled with negative thermal expansion zirconium tungstate particles[J]. Wear, 2024, 558: 205567.

[30] Dong Z, Tang H, Yang B, et al. Molecular dynamics simulation and experimental study of the mechanical and tribological properties of GNS-COOH/PEEK/PTFE composites[J]. Polymers, 2024, 16: 2572.

[31] Chen Z, Wu J, He S, et al. Combining nano diamond-like carbon coatings with fillers for enhanced wear resistance of PTFE: nodal support-lubrication mechanism[J]. Surface & Coatings Technology, 2025, 497: 131807.

[32] 李红波，赖亮庆，黄艳华，等. 聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11): 30-5.

Li H B, Lai L Q, Huang Y H, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11): 30-5.

[33] Li X, Shen J, Zhou J, et al. Enhancing the dielectric and thermal properties of polytetrafluoroethylene-based composites through designing and constructing a novel interfacial structure[J]. Heliyon, 2024, 10: e25442.

[34] Xue L, Xu Q, Meng C, et al. Achieving the ultra-low friction and wear rate of PEEK-PTFE composites by $Ti_3C_2T_x$ MXene reinforcement[J]. Tribology International, 2024, 199: 110030.

[35] Ryu C, Ri J G, Kim Y S, et al. Interfacial properties of a ZnO/PTFE composite from density functional tight-binding simulations[J]. RSC Advances, 2024, 14: 35097-35103.

[36] Wang F, Wang J, Fang D, et al. Surface sizing introducing carbon nanotubes for interfacial bond strengthening of basalt fiber-reinforced polymer composites[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6: 117.

[37] 李帅鹏, 张明瑜, 黄东, 等. SiC-$MoSi_2$-Si 复合梯度涂层的制备及其抗氧化性能[J]. 新型炭材料, 2018, 33(1): 82-7.

Li S P, Zhang M Y, Huang D, et al. Preparation and antioxidation property of a SiC-$MoSi_2$-simultilayer coating on a C/C composite[J]. New Carbon Materials, 2018, 33(1): 82-7.

[38] Zheng H, Zhang W, Li B, et al. Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 233: 109639.

[39] Sun C, Gu P, Wan H, et al. Enhancements of physical microstructure and chemical activation on interfacial bonding strength of carbon fiber reinforced polymer[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 188: 108530.

[40] Xu M, Wang Z, Guo L, et al. Tribological properties of PTFE-based fabric composites at cryogenic temperature[J]. Friction, 2024, 12: 245-257.

[41] Deshpande A R, Kulkarni A P, Wasatkar N, et al. Prediction of wear rate of glass-filled PTFE composites based on machine learning approaches[J]. Polymers, 2024, 16: 2666.

[42] 秦磊. MoS_2/PTFE 复合材料摩擦学性能评价及磨损机理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.

Qin L. Tribological performance evaluation and wear mechanism of MoS_2/PTFE composites[D]. Qinhuangdao: Yanshan University,2024.

[43] 张航, 李国一, 窦志伟, 等.聚四氟乙烯基复合材料油润滑下往复摩擦学行为[J]. 润滑与密封, 2025, 50(7):168-175.

Zhang H, Li G Y, Dou Z W, et al. Study on reciprocating tribological behavior of PTFE composites in oil lubricaiton[J]. Lubrication Engineering, 2025, 50(7):168-175.

[44] 刘吟松, 帅长庚, 陆刚, 等.不同表面润湿性水润滑材料的摩擦特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(7):111-120.

Liu Y S, Shuai C G, Lu G, et al. Tribological characteristics of water-lubricating materials with different surface wettability[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(7):111-120.

[45] 张昆, 孔雨婷, 周茜, 等.二氧化硅填充聚四氟乙烯复合薄膜界面调控及性能提升[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(3): 79-86.

Zhang K, Kong Y T, Zhou Q, et al. Interface control and performance improvement of silica filled polytetrafluoroethylene composite films[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2025, 41(3): 79-86.

[46] 雷小强, 徐雪峰, 范玉斌, 等. T 型管内高压成形过渡区结构与润滑区域优化[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(8): 78-86.

Lei X Q, Xu X F, Fan Y B, et al. Optimization of transition zone structure and lubrication zone for internal high-pressure forming of T-shaped tube[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2025, 32(8): 78-86.

[47] 刘世雪, 李成才, 刘国金, 等.基于纺织材料的人造血管制备及应用进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(2): 173-181.

Liu S X, Li C C, Liu G J, et al. Preparation and application progress of artificial blood vessels based on textile materials[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(2): 173-181.

Progress on Research of the Anti-Friction Performance of Polytetrafluoroethylene Materials

Xiaoyu Cao[1, 2], Xu Zhang[2], En Dang[1, 2], Su Luan[1], Jianxu Hao[1], Chenhui Guo[2], Xiaojing Yu[2,3], Kang Zhao[2,3]

(1. Baoji Petroleum Machinery Co Ltd, Baoji 721002, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Shaanxi Province Key Laboratory of Corrosion and Protection, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

ABSTRACT: Polytetrafluoroethylene (PTFE), renowned for its exceptional self-lubricating properties, extremely low friction coefficient, outstanding chemical stability, and wide temperature tolerance, holds an irreplaceable position in the field of anti-friction materials. It has become one of the preferred materials for criticalfriction pairs in high-end equipment and precision machinery. To further enhance its comprehensive performance and expand its application boundaries, researchers worldwide have focused on optimizing the tribological behavior of PTFE through techniques such as filler modification, surface treatment, and composite material preparation in recent years. This review systematically summarized the research progress on PTFE-based anti-friction materials, with a particular emphasis on optimization strategies for modification processes, interfacial interaction mechanisms, and their impact on tribological properties. Additionally, it comprehensively analyzed the influence of environmental and operational factors, including temperature, humidity, load and counterface materials, on the tribological performance of PTFE. The review also outlined the specific applications and emerging trends of PTFE and its composites in traditional and cutting-edge fields such as aerospace, mechanical engineering, and the automotive industry. By synthesizing existing research findings, identifying key challenges, and highlighting development bottlenecks, this review aims to provide theoretical guidance and technical direction for future studies on PTFE anti-friction materials, thereby promoting their innovative applications across a broader range of industrial scenarios.

Keywords: polytetrafluoroethylene; anti-friction materials; modification processes; interface; tribological properties