

PEEK填充PTFE的力学和摩擦学性能的实验研究

王 妍, 汤赫男, 王世杰

沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月20日; 发布日期: 2026年2月2日

摘 要

以聚四氟乙烯(PTFE)和聚醚醚酮(PEEK)为原材料, 制备了PEEK/PTFE复合材料。研究了10% PEEK对PTFE的力学性能、摩擦学性能的影响。结果表明, 在力学性能方面, 添加10% PEEK的PEEK/PTFE复合材料的抗拉强度比纯PTFE提升了11.51%, 抗压强度提升了40.76%, 断裂伸长率降低了16.21%。在摩擦学性能方面, 磨损率降低了实现了17.65%。通过扫描电镜观察磨损后的表面形貌, 揭示了PEEK对PEEK/PTFE复合材料摩擦性能的影响规律, 为研发新型PTFE基复合材料提供理论参考。

关键词

聚四氟乙烯, 聚醚醚酮, 力学性能, 摩擦学性能, 实验研究

Experimental Study on the Mechanical and Tribological Properties of PEEK Filled with PTFE

Yan Wang, Henan Tang, Shijie Wang

School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

Received: December 29, 2025; accepted: January 20, 2026; published: February 2, 2026

Abstract

PEEK/PTFE composites were prepared using polytetrafluoroethylene (PTFE) and polyetheretherketone (PEEK) as raw materials. The effect of 10% peek on the mechanical and tribological properties of PTFE was studied. The results showed that the tensile strength, compressive strength and

elongation at break of PEEK/PTFE composites with 10% peek were 11.51%, 40.76% and 16.21% higher than those of pure PTFE. In terms of tribological properties, the wear rate was reduced by 17.65%. The effect of peek on the friction properties of PEEK/PTFE composites was revealed by observing the worn surface morphology with SEM, which provided a theoretical reference for the development of new PTFE matrix composites.

Keywords

Polytetrafluoroethylene, Polyetheretherketone, Mechanical Properties, Tribological Properties, Experimental Study

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

机械密封广泛使用在各类机械设备中, 尤其是以航空航天、核工业和石油化工为应用背景的高参数设备中。机械密封的可靠性对整个设备的工作性能具有深远影响, 它直接关系到设备的工作效率、稳定可靠性、安全保障以及使用寿命的长短。目前动密封活塞环的材料主要采用高分子聚合物、固体润滑材料以及聚合物基复合材料, 如聚四氟乙烯、聚酰亚胺(PI)以及聚醚醚酮等。PTFE 作为一种卓越的动密封材料, 在众多机械设备中得到了广泛应用, 尤其是在对材料性能要求极高的航空航天、核工业及石油化工领域中的高参数设备上。它主要被制成密封垫、密封圈及填料等关键部件, 确保设备的稳定运行。

PTFE 因具有良好的自润滑性、延展性能、抗渗透性能和耐腐蚀等性能, 是石油化工、医疗、机械和化学等行业中重要的工程塑料材料[1]。然而纯 PTFE 在展现其优越性能的同时, 也暴露出了一些不容忽视的缺陷, 如耐磨性能差、易发生蠕变等。因此对 PTFE 适当地增强、增韧改性, 探索提升高分子材料的机械性能和摩擦学性能的机理, 开发出一种具备低摩擦系数、卓越耐磨性、强大承载力, 并能完美契合特殊领域需求的新型高性能聚合物, 其迫切性愈发凸显。

近年来, 国内外学者运用各类创新改性材料对 PTFE 进行了深入的改性研究。从传统材料如金属颗粒填料[2]-[4]、纤维填料[5]-[9]及无机粒子填料[10]-[14], 到近年来崛起的纳米科技——纳米粒子填料[15]-[19], 这些多样化的改性剂在不同程度上提升了 PTFE 复合材料的减磨耐磨性能。

佟伟[20]利用 PPS 与 PTFE 良好的相容性和协同效应, 有效提升了 PTFE 的成型性、尺寸稳定性、抗蠕变性以及压缩强度。楚婷婷[21]等采用热模压工艺制备 PEEK/PTFE 复合材料, 研究复合轴承材料拉伸强度、邵氏硬度和摩擦学性能。王枫等[22]通过试验分析了聚醚醚酮添加量对聚四氟乙烯复合保持架材料的力学性能、摩擦磨损性能及热性能的影响。

作者在前期的研究中, 通过分子动力学仿真分析的方法, 研究了添加不同质量分数的 PEEK 对 PTFE 力学性能和摩擦学性能的影响[23] [24]。PEEK/PTFE 复合材料相比较于纯 PTFE, 在保证减摩性能基础上, 耐磨损性能得到明显提升。当 PEEK 添加量为 10%, PEEK/PTFE 复合材料的力学性能较优, 且具有较好的耐磨性。本文在前期研究的基础上, 进一步从实验的角度研究 PEEK 对 PTFE 力学性能和摩擦学性能的影响, 探索 PEEK 对 PTFE 力学性能和摩擦学性能的影响机制, 同时也进一步验证仿真的准确性, 为开发 PTFE 基复合材料提供理论和实验基础。

2. 实验

2.1. 原材料

聚四氟乙烯的生产厂家为日本大金氟化工有限公司，平均粒径为 40 μm ，密度为 2.14~2.20 g/cm^3 ；聚醚醚酮的生产厂家为吉林中研高分子材料股份有限公司，平均粒径 24 μm ，密度为 1.4 g/cm^3 。

2.2. 复合材料的制备

将 PTFE 与 PEEK 粉末在 150 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 3 h，干燥后密封备用。使用电子天平按表 1 中的配比分别称取 PTFE 粉末、PEEK 粉末，在高速共混机中以 1200 r/min 的速度进行混合，每次 30 S，混合 3~4 次，混合均匀后的原料待冷却至室温后密封备用。对共混的原料进行成型压力 30 MPa、加压速度 20 mm/min 的冷压成型，保持压力 30 分钟。为释放成型件的内应力，对冷压成型制备后的胚料静置 12 h 以上。脱模成型的坯料放入烘箱中，以 50 $^{\circ}\text{C}$ /小时的速率由室温缓慢升温到 360 $^{\circ}\text{C}$ ，保温 3~4 h，随后缓慢冷却至室温后取出样本，参考图 1 试样加工简图，经机加工得到所需的试样。

Table 1. Composition of PTFE composites

表 1. PTFE 复合材料的成分

复合材料	ω (PTFE)/%	ω (PEEK)/%
PTFE	100	0
10% PEEK/PTFE	90	10

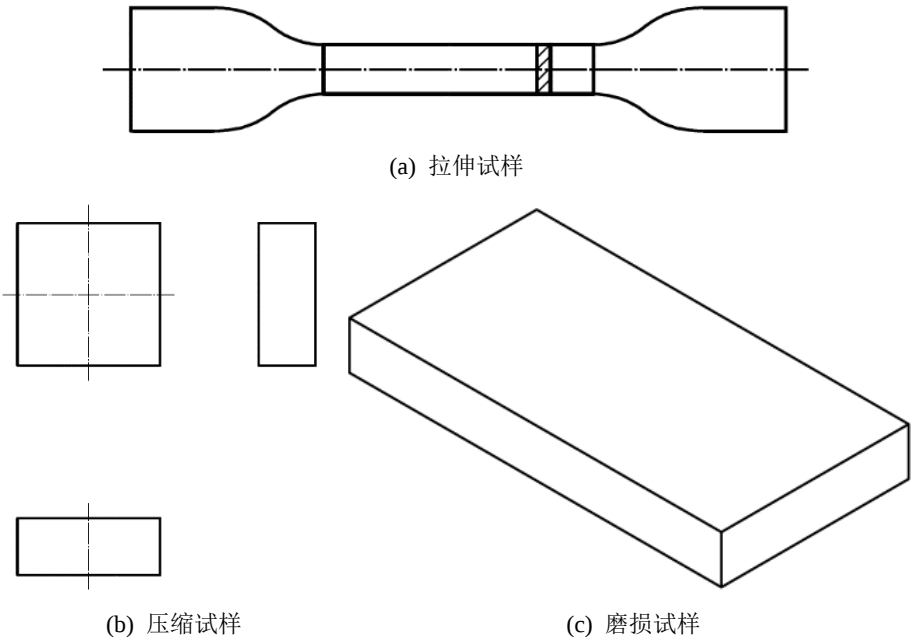


Figure 1. Test piece processing diagram
图 1. 试样加工简图

2.3. 实验方法

在进行试件拉伸试验时，遵循 GB/T 1040.2-2022《塑料拉伸性能的测定第 2 部分：模塑和挤塑塑料的试验条件》的规范。在压缩性能测试方面，依据 GB/T 1041-2008《塑料压缩性能的测定》的标准进行

操作。为了确保测试结果的精确性,选用了 AG-X 立式电子万能试验机来全面评估复合材料的拉伸和压缩性能。在拉伸试验中,设定了恒定的拉伸速度为 50 mm/min,以确保测试的稳定性和准确性。对于压缩试验,准备了尺寸为 $10 \times 10 \times 4$ mm 的试样,压缩速度为 1 mm/min,以模拟实际使用中的压缩环境。在摩擦磨损性能测试方面,遵循 GB/T 3960-2016《塑料滑动摩擦磨损试验方法》的要求,使用了蚀微动磨损试验机。试样尺寸为 $30 \times 7 \times 6$ mm,并选择了 QT450 作为摩擦副,其硬度达到 HBW170。试验过程中采用了干摩擦无润滑的条件,在 200 N 的载荷、2 Hz 的频率以及室温环境下进行。试验时间设定为 0.5 小时,往复行程为 10 mm,速度为 0.04 m/s。为保证实验数据的可靠性与统计意义,所有上述性能测试均设置三组平行实验,最终测试结果以三次实验数据的平均值为准,并基于该组数据计算标准差。

试验结束后,对试件进行了后续处理和分析。首先,我们通过称重计算出了磨损质量,以量化磨损率。接着,对试件进行了喷金处理,以增强其导电性。最后,采用了 Zeiss Sigma 300 扫描电子显微镜(SEM)对试样的磨损形貌进行了深入观察和分析,以揭示其磨损机制和特性。

3. 结果与讨论

3.1. 力学性能分析

表 2 详尽地列出了纯 PTFE 材料与 10% PEEK/PTFE 复合材料之间力学性能的对比数据。对于抗拉强度这一指标,10% PEEK/PTFE 复合材料的数值为 23.44 MPa,与纯 PTFE 材料的 21.02 MPa 相比,增幅达到了 11.51%。而在伸长率方面,该复合材料的数值为 212%,相较于纯 PTFE 材料的 253%,也降低了 16.21%。然而,值得注意的是,在抗压强度上,10% PEEK/PTFE 复合材料展现出了显著的优势,其抗压强度高达 259 MPa,相较于纯 PTFE 材料的 184 MPa,实现了 40.76%的飞跃性增长。这一结果揭示了 PEEK 材料的高刚性特性对 PTFE 复合材料抗压性能的积极贡献,进而可能延长该复合材料的使用寿命,并使其更适用于那些对密封性能有极高要求的严苛工作环境。深入剖析这一现象的内在机理,可以发现,PEEK 与 PTFE 在结构上的差异导致了界面结合性的不足,进而使得复合材料的抗拉强度和伸长率有所降低,但 PEEK 的高刚性特点却为复合材料的抗压强度带来了显著的增强效果。同时,结合第 2.2 节中的力学性能模拟结果,可以进一步确认,10% PEEK/PTFE 复合材料在分子链分布上更为均匀,这有助于降低应力集中现象,从而进一步提升材料的整体性能。

Table 2. Mechanical properties of composites

表 2. 复合材料力学性能

复合材料	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)	抗压强度(MPa)
PTFE	21.02 ± 1.25	253 ± 8.7	184 ± 6.3
10% PEEK/PTFE	23.44 ± 1.51	212 ± 7.2	259 ± 9.8

3.2. 摩擦性能分析

表 3 列出了纯 PTFE 材料与含有 10% PEEK 的 PTFE 复合材料在摩擦系数及磨损质量方面的对比数据。从表格中可以清晰地观察到,在承受高载荷时,纯 PTFE 材料的摩擦系数显著较高。然而,当掺入 10%的 PEEK 材料后,尽管 PEEK 本身的摩擦系数较大,却导致了 10% PEEK/PTFE 复合材料的整体摩擦系数有所增加。具体而言,10% PEEK/PTFE 复合材料的摩擦系数达到了 0.1146,相较于纯 PTFE 材料的 0.0985,其增长幅度达到了 16.35%。这是因为纯 PTFE 因分子链间作用力弱,滑动时分子链易发生解缠结并转移至对偶面,形成低剪切强度的润滑转移膜,表现出极低的摩擦系数(0.0985)。当引入 10% PEEK 后,PEEK 分子链中的刚性苯环结构与 PTFE 的柔性氟碳链之间形成较强的界面相互作用,一方面限制了

PTFE 分子链的自由滑移,增加了分子链间的内摩擦阻力;另一方面,PEEK 的高模量特性使复合材料的表面硬度与剪切强度提升,滑动过程中需克服更强的界面黏附与剪切阻力,导致摩擦系数从 0.0985 升高至 0.1146,增幅达 16.35%。与此同时,在磨损质量方面,10% PEEK/PTFE 复合材料展现出了显著的优越性。其磨损质量仅为 8.4 mg,相较于纯 PTFE 材料的 10.2 mg,实现了 17.65%的减少。这一结果表明,PEEK 刚性粒子的加入不仅增强了 PTFE 材料的抗剪切形变能力,还有效地降低了在摩擦过程中 PTFE 基体与摩擦副之间的犁削作用。这一发现为 PTFE 复合材料在需要承受高载荷及低磨损场景下的应用提供了有力的支持。

Table 3. The friction properties of composites
表 3. 复合材料摩擦性能

复合材料	摩擦系数	增加百分比(%)	磨损质量(mg)	下降百分比(%)
PTFE	0.0985 ± 0.0052	0	10.2 ± 0.73	0
10% PEEK/PTFE	0.1146 ± 0.0068	16.35	8.4 ± 0.59	17.65

3.3. PEEK 增强 PTFE 摩擦机理分析

图 2 展示了纯 PTFE 材料以及 10% PEEK/PTFE 复合材料在磨损后的表面形貌特征。从图中可以清晰地观察到,纯 PTFE 材料因在摩擦过程中的表面剥离现象,呈现出显著的裂纹网络,其表面布满了磨损痕迹与大量微小的脱落颗粒。这些颗粒在持续的摩擦作用下,逐渐从 PTFE 材料的本体中剥落,进而形成细碎的粉末状物质。反观 10% PEEK/PTFE 复合材料,尽管在摩擦过程中也遭遇了类似的微观裂纹与表面磨损现象,但其展现出了与纯 PTFE 材料截然不同的耐磨损性能。具体而言,相较于纯 PTFE 材料,10% PEEK/PTFE 复合材料的表面划痕数量显著减少,且划痕深度更为浅显。这一显著变化得益于 PEEK 成分的加入,因其高硬度的物理特性,显著地增强了 PTFE 复合材料的表面硬度,赋予了该复合材料卓越的抗黏着磨损特性,有效提升了复合材料的耐磨性,从而抑制了表面剥离现象的进一步发展。进一步观察发现,10% PEEK/PTFE 复合材料的表面颗粒物质明显减少,这一现象进一步证实了 PEEK 对复合材料耐磨性的积极贡献。相比之下,纯 PTFE 材料在经历磨损后,其表面变得异常粗糙,光滑度大幅下降。而 10% PEEK/PTFE 复合材料,凭借其卓越的表面硬度与抗剪切形变能力,展现出了更加优异的耐磨性能。总体而言,10% PEEK 的加入不仅显著改善了 PTFE 复合材料的耐磨性能,还使得其表面变得更加平整光滑,为材料在更广泛的应用领域中提供了更为可靠的保障。

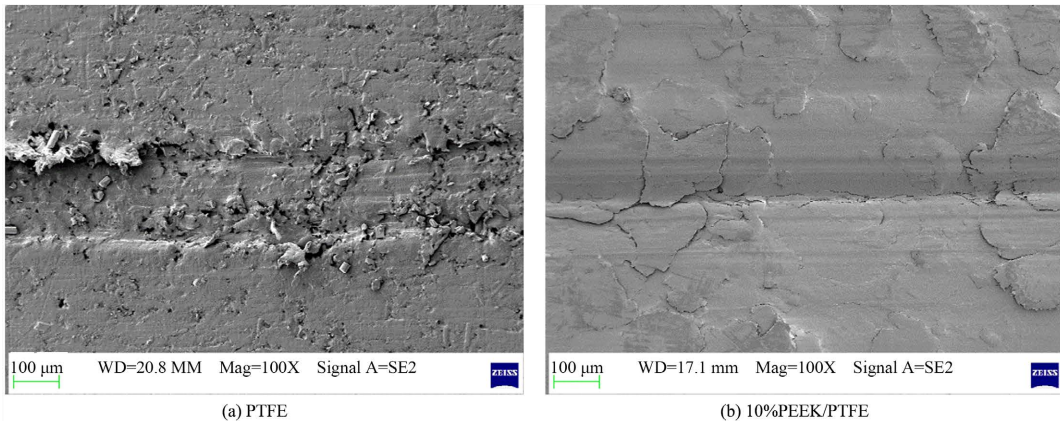


Figure 2. Worn of surface morphology of composites
图 2. 复合材料磨损表面形貌照片

4. 结论

(1) 在力学性能方面,添加 10% PEEK 的 PEEK/PTFE 复合材料的抗拉强度比纯 PTFE 提升了 11.51%,抗压强度提升了 40.76%,断裂伸长率降低了 16.21%。

(2) 在摩擦学性能方面,当掺入 10%的 PEEK 材料后,使 10% PEEK/PTFE 复合材料的整体摩擦系数有所增加。但是磨损率降低了 17.65%。

(3) 通过观察磨损表面形貌,发现 10% PEEK 的加入,显著地增强了 PEEK/PTFE 复合材料的表面硬度,赋予了该复合材料卓越的抗黏着磨损特性,有效提升了复合材料的耐磨性。

参考文献

- [1] 陈战, 王家序, 郑小光, 等. 聚四氟乙烯工程材料的摩擦磨损性能研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(4): 74-77.
- [2] 解挺, 江凯, 丁亚. 填料粒径对 Cu/PTFE 复合材料摩擦学性能影响的数值模拟[J]. 摩擦学学报, 2016(1): 38-44.
- [3] Tang, A., Wang, M., Huang, W. and Wang, X. (2015) Composition Design of Ni-NaNO-Al₂O₃-PTFE Coatings and Their Tribological Characteristics. *Surface and Coatings Technology*, **282**, 121-128. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.034>
- [4] 张招柱, 薛群基, 沈维长, 等. 金属填充 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 17(1): 68-72.
- [5] Lv, M., Wang, L., Liu, J., Kong, F., Ling, A., Wang, T., et al. (2019) Surface Energy, Hardness, and Tribological Properties of Carbon-Fiber/Polytetrafluoroethylene Composites Modified by Proton Irradiation. *Tribology International*, **132**, 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.028>
- [6] Wu, H., Zhu, L., Yue, W., Fu, Z. and Kang, J. (2019) Wear-Resistant and Hydrophobic Characteristics of PTFE/CF Composite Coatings. *Progress in Organic Coatings*, **128**, 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.013>
- [7] Desale, D.D. and Pawar, H.B. (2018) Performance Analysis of Polytetrafluoroethylene as Journal Bearing Material. *Procedia Manufacturing*, **20**, 414-419. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.060>
- [8] Gweon, J.H., Joo, B.S. and Jang, H. (2016) The Effect of Short Glass Fiber Dispersion on the Friction and Vibration of Brake Friction Materials. *Wear*, **362**, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.004>
- [9] Song, F., Wang, Q. and Wang, T. (2016) Effects of Glass Fiber and Molybdenum Disulfide on Tribological Behaviors and PV Limit of Chopped Carbon Fiber Reinforced Polytetrafluoroethylene Composites. *Tribology International*, **104**, 392-401. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.01.015>
- [10] Aderikha, V.N., Krasnov, A.P., Naumkin, A.V. and Shapovalov, V.A. (2017) Effects of Ultrasound Treatment of Expanded Graphite (EG) on the Sliding Friction, Wear Resistance, and Related Properties of PTFE-Based Composites Containing EG. *Wear*, **386**, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.022>
- [11] Trabelsi, M., Kharrat, M. and Dammak, M. (2016) On the Friction and Wear Behaviors of PTFE Based Composites Filled with MoS₂ and/or Bronze Particles. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **69**, 1119-1128. <https://doi.org/10.1007/s12666-015-0666-x>
- [12] Jin, Z., Chen, X., Wang, Y. and Wang, D. (2015) Thermal Conductivity of PTFE Composites Filled with Graphite Particles and Carbon Fibers. *Computational Materials Science*, **102**, 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.02.019>
- [13] 苏峰华, 张招柱, 王坤, 等. MoS₂ 和 PTFE 改性碳纤维织物复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(4): 338-342.
- [14] Zhang, Z., Liu, W. and Xue, Q. (2001) Effects of Various Kinds of Fillers on the Tribological Behavior of Polytetrafluoroethylene Composites under Dry and Oil-Lubricated Conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, **80**, 1891-1897. <https://doi.org/10.1002/app.1286>
- [15] Qi, Y., Gong, J., Cao, W.H., Wang, H.G., et al. (2018) Tribological Behavior of PTFE Composites Filled with PEEK and NaNO-Al₂O₃. *Tribology Transactions*, **61**, 694-704. <https://doi.org/10.1080/10402004.2017.1395099>
- [16] Wang, Y., Gong, J., Yang, D., Gao, G., Ren, J., Mu, B., et al. (2014) Tribological Behavior of Nano-Al₂O₃-Reinforced PPS-PTFE Composites. *Tribology Transactions*, **57**, 173-181. <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.861567>
- [17] Shi, Y.J., Feng, X., Wang, H.Y., Liu, C. and Lu, X.H. (2007) Effects of Filler Crystal Structure and Shape on the Tribological Properties of PTFE Composites. *Tribology International*, **40**, 1195-1203. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.12.006>
- [18] Burris, D.L. and Sawyer, W.G. (2006) Improved Wear Resistance in Alumina-PTFE Nanocomposites with Irregular

-
- Shaped Nanoparticles. *Wear*, **260**, 915-918. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.06.009>
- [19] Wang, Q., Xue, Q. and Shen, W. (1997) The Friction and Wear Properties of Nanometre SiO₂ Filled Polyetheretherketone. *Tribology International*, **30**, 193-197. [https://doi.org/10.1016/s0301-679x\(96\)00042-4](https://doi.org/10.1016/s0301-679x(96)00042-4)
- [20] 佟伟. 聚苯硫醚摩擦复合材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2006.
- [21] 楚婷婷, 李媛媛, 孙小波, 等. 聚醚醚酮/聚四氟乙烯复合水润滑轴承材料性能研究[J]. 轴承, 2015(5): 35-37.
- [22] 王枫, 孙小波, 时连卫. 聚四氟乙烯/聚醚醚酮复合保持架材料性能试验分析[J]. 轴承, 2013(3): 38-40.
- [23] 张潜, 汤赫男, 王妍, 等. 聚醚醚酮增强聚四氟乙烯力学性能模拟研究[J]. 润滑与密封, 2023, 48(1): 85-89.
- [24] 王妍, 汤赫男, 赵晶, 等. 聚醚醚酮增强聚四氟乙烯摩擦学性能模拟研究[J]. 润滑与密封, 2024, 49(8): 44-49.