

面向极端工况的PEEK基多孔复合材料的制备及摩擦学性能研究

杨辰飞¹, 陈光伟¹, 周俊², 徐纯华³

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 451460; 2. 郑州大学机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001;
3. 中铁电气化局集团有限公司, 北京 100036)

摘要: 为探究聚四氟乙烯(PTFE)对聚醚醚酮(PEEK)基多孔轴承保持架材料摩擦学性能的影响机理及其在极端工况下的服役性能, 采用熔融沉积成型(FDM)工艺制备PTFE含量梯度变化的PTFE/PEEK二元复合多孔材料, 并对材料进行改性处理。基于高温(200 °C)、长效(6 h)测试环境对复合材料PTFE含量及改性处理与极端工况下的摩擦学性能映射规律展开研究。结果表明: 高温条件下, 热处理改性可以明显改善材料的耐磨性能, 且填充PTFE可以提高试样的自润滑性能。但是, 较低的PTFE含量会导致复合材料的磨损率提高, 当PTFE质量分数达到12%及以上时, 复合材料的磨损率可降低6.08%。长效测试条件下, 热处理改性为长期维持多孔结构的运油、保油性提供了有效支撑。试样的摩擦因数平均降低39.31%, 且随着PTFE含量趋于合理, 试样的平均摩擦因数降低约31.92%, 材料的耐磨性能得到显著提高。

关键词: 熔融沉积成型; 聚四氟乙烯/聚醚醚酮; 极端工况; 摩擦学性能

中图分类号: TG669

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0086-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.016

Preparation and Tribological Properties Study of PEEK-based Porous Composites for Extreme Working Conditions

YANG Chenfei¹, CHEN Guangwei¹, ZHOU Jun², XU Chunhua³

(1. Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou 451460, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. China Railway Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: In order to investigate the mechanism of the influence of polytetrafluoroethylene (PTFE) on the tribological properties of poly-ether-ether-ketone (PEEK)-based porous bearing cage materials and their service performance under extreme working conditions, a PTFE/PEEK binary composite porous material with gradient change of PTFE content was prepared by fused deposition moulding (FDM) process, and the material was modified. Based on the high-temperature (200 °C) and long-lasting (6 h) test environment, the mapping laws of PTFE content and modification treatment of the composites and the tribological performance under extreme working conditions were investigated. The results show that under high-temperature conditions, heat treatment modification can significantly improve the wear resistance of the material, and the filling of PTFE can improve the self-lubrication performance of the specimen. However, a lower PTFE content will lead to an increase in the wear rate of the composite, when the PTFE mass fraction reaches 12% or above, the wear rate of the composite can be reduced by 6.08%. Under the long-lasting test conditions, heat treatment modification provides a good opportunity to maintain the oil transporting and oil retaining properties of the porous structure in the long term. The friction factor of the specimens is reduced by 39.31% on average, and the average friction factor of the specimens is reduced by about 31.92% as the content of PTFE tends to be reasonable, and the wear resistance of the

收稿日期 Submitted date 2025-02-01; 修回日期 Revised date 2025-03-09; 录用日期 Accepted date 2025-04-11

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(23A460032)

联系人, ChenFY101@163.com

引用本文: 杨辰飞, 陈光伟, 周俊, 等. 面向极端工况的PEEK基多孔复合材料的制备及摩擦学性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 86-91.

Citation: YANG C F, CHEN G W, ZHOU J, et al. Preparation and tribological properties study of PEEK-based porous composites for extreme working conditions[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 86-91.

material is improved significantly.

Keywords: Fused deposition moulding; PTFE/PEEK; Extreme working conditions; Tribological properties

现代工业对高端轴承需求的日益增长使高性能轴承保持架的制造要求逐渐提高^[1-3]。特别是在一些极端工况下,例如高温环境、长时间连续运行等复杂条件下,对保持架材料的摩擦学性能提出了极为严苛的要求^[4-6]。聚醚醚酮(PEEK)作为一种特种工程塑料,因其优异的力学性能、耐热性和化学稳定性,在航空航天领域得到广泛应用^[7-9]。然而,尽管PEEK材料已经具备诸多优异特性,但在极端工况下,其摩擦学性能仍然存在一定的局限性,需要进一步优化和提升,以更好地满足日益苛刻的使用要求^[10-12]。

聚四氟乙烯(PTFE)作为一种自润滑材料,具有良好的减摩、耐磨性能,将其与PEEK复合,有望改善PEEK基多孔轴承保持架材料的摩擦学性能^[13-16]。近年来,许多研究人员对PTFE/PEEK复合材料进行了研究^[17-19]。王妍等^[20]采用分子动力学方法模拟建立了不同质量分数的PEEK填充PTFE复合材料的无定型模型(填充相PEEK的质量分数分别为5%、10%、15%、20%)。模拟结果显示:当填充相的质量分数达到10%时,复合材料的耐磨性能达到最佳状态,磨损率相对于未添加填充相的PTFE材料降低26.44%。王文文等^[21]采用熔融沉积法制备PTFE/PEEK复合材料,探讨PTFE含量对材料摩擦学性能的影响,发现适量的PTFE可以提高复合材料的耐磨性能。

尽管已有研究取得了一定的成果,但对于PTFE/PEEK复合材料在极端工况下的摩擦学性能及其改性处理的研究尚不充分。为此,本文制备PTFE含量梯度变化的PTFE/PEEK二元复合多孔材料,并对该复合材料进行改性处理。基于高温(200 °C)、长效(6 h)测试环境,研究复合材料PTFE含量及改性处理与极端工况下的摩擦学性能映射规律,以期为极端工况下轴承保持架材料的设计与制造提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PTFE, Teflon™ 601X, 四氟新材料(苏州)有限公司; PEEK, 330PF, 吉林省中研高分子材料股份有限公司; 造孔剂, 氯化钠(NaCl), 上海麦克林生化科技有限公司。需要注意的是,为保证造孔剂在材料内部的流动性进而形成良好的造孔效果,将造孔剂粒径控制在合理范围内,对NaCl进行研磨并采用320目筛网进行过滤。

1.2 仪器与设备

熔融沉积成型(FDM)快速成型机, FDM 200 MC, 东莞市祥兴仪器有限公司; 高温摩擦磨损试验机, HT-1000, 兰州中科凯华科技开发有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 基于FDM工艺的PTFE/NaCl/PEEK试样制备

PTFE含量是影响PTFE/NaCl/PEEK试样在极端环境下服役性能的核心指标之一,故文中各组试样的PTFE含量呈梯度变化。表1为PTFE/NaCl/PEEK复合材料的配方。

表1 PTFE/NaCl/PEEK复合材料的配方

Tab.1 Formula of PTFE/NaCl/PEEK composites 单位:%

试样编号	W_{PTFE}	W_{PEEK}	W_{NaCl}
1#	0	80	20
2#	4	76	20
3#	8	72	20
4#	12	68	20
5#	16	64	20

采用FDM快速成型机制备复合材料试样。其中,打印机喷嘴直径1.75 mm,填充率100%,喷头温度设为440 °C,成型平台的温度设为160 °C。打印完成后,采用超声水洗工艺去除材料内部的造孔剂。具体实施步骤为:将试样放入烧杯中,加入蒸馏水没过试样,超声水洗时长12 h,水洗期间每隔2 h换1次蒸馏水并清洗烧杯。水洗完成后将材料置于烘箱中2 h作干燥处理,烘箱温度设置为120 °C。

1.3.2 PTFE/PEEK试样热处理

热处理改性是提升材料耐磨性能的有效手段。将超声水洗后的试样采用铝箔包裹,置于高温烘箱中进行改性处理,设置升温速率为5 °C/min,升至200 °C后保温2 h,降温速率设为2 °C/min。

1.4 性能测试与表征

摩擦学性能测试:采用高温摩擦磨损试验机进行摩擦磨损试验。环境温度设置为200 °C。参考文献[22-23]中的耐磨材料长期摩擦学性能测试标准和方法,将长期摩擦学性能测试时长设为6 h。除此之外,用于测试的对磨球直径为5 mm,摩擦半径为5 mm,测试转速为400 r/min。

2 结果与讨论

2.1 高温摩擦学性能

2.1.1 干摩擦性能

干摩擦过程中不添加或填充其他润滑剂。图1为高温条件下的干摩擦性能。为直观体现热处理改性前后摩擦因数对比,对图1中的摩擦因数取平均值,图2为高温条件下热处理改性前后的平均摩擦因数对比。PEEK相比其他聚合物材料具有一定的耐高温性能,这也为维持其复合

材料在200 °C以上的环境中干摩擦提供了基础。从图1可以看出,随着复合材料中PTFE含量越来越高,该材料提供润滑的能力也逐渐增强,反映到摩擦因数则表现为PTFE含量越高,摩擦因数越低。但是,整体而言,热处理改性材料的摩擦因数曲线变化更加剧烈,这一现象是不容忽视的。产生这种现象的原因是:FDM工艺制备复合材料试样的过程是多种材料熔融结晶的过程,均相材料的结合效果强于非均相复合材料^[24-26]。PTFE作为填充相,较低含量造成其在基体材料内部的连续性较差。层层搭接成型过程中与基体结合的效果并不理想,所以在干摩擦环境中更容易形成表层材料的脱落。而事先经过热处理改性的脱落层材料结晶程度更高,即硬度更高,滞留在对偶球高速滑擦的沟道内更易对PTFE/PEEK材料的摩擦因数造成影响。

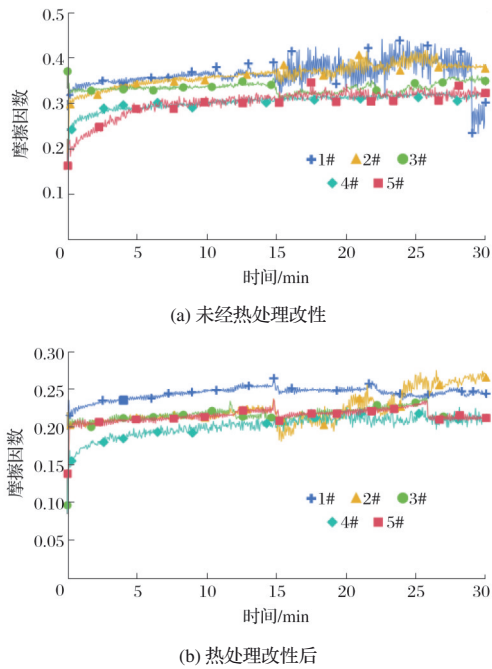


图1 高温条件下的干摩擦性能

Fig.1 Dry friction performance under high-temperature condition

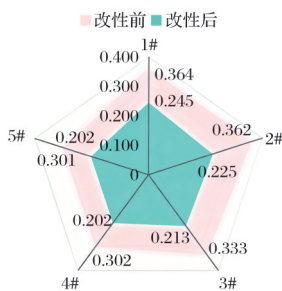


图2 高温条件下热处理改性前后的平均摩擦因数对比

Fig.2 Comparison of average friction factor before and after heat treatment modification under high-temperature condition

2.1.2 贫油润滑性能

贫油润滑试验开始前采用真空浸油机对试样进行浸油处理,浸油时长为2 h,后取出采用无尘布擦拭,将试样

置于摩擦磨损试验机中进行贫油润滑性能测试。图3为高温条件下的贫油润滑性能,图4为高温条件下热处理改性前后贫油润滑过程中的平均摩擦因数对比。贫油润滑过程中,除了PTFE材料可以提供一定的润滑能力,多孔PEEK材料内部的润滑油可以通过离心力等条件迁移至摩擦副表面,从而显著改善PTFE/PEEK材料与对偶球之间的摩擦环境。从图3可以看出,热处理改性材料的摩擦因数曲线更加稳定,且相比干摩擦条件下有所降低。除此之外,PTFE材料易脱落的现象也得以改善,这在热处理改性PTFE/PEEK材料的摩擦因数曲线稳定性方面可以得到证明。以上摩擦学性能测试结果在一定程度上证明了PEEK基多孔复合材料在高温条件下仍能保持服役性能,为其在航天轴承保持架领域的探索与应用奠定基础。

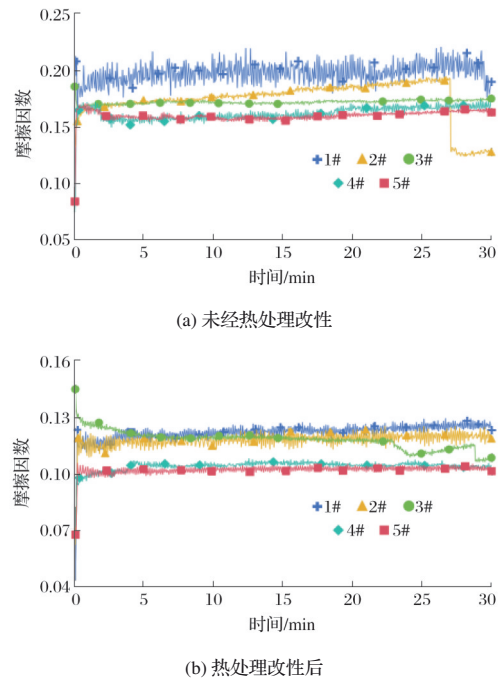


图3 高温条件下的贫油润滑性能

Fig.3 Oil-poor lubrication performance under high-temperature condition

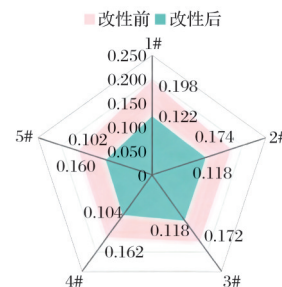


图4 高温条件下热处理改性前后贫油润滑过程中的平均摩擦因数对比

Fig.4 Comparison of average friction factor before and after heat treatment modification in oil-poor lubrication process under high-temperature condition

2.1.3 磨损率

磨损率可用于表征PEEK多孔复合材料在高温条件下的耐磨性。图5为高温条件下各组试样磨损率对比。对比文献[22]可知,伴随着高温环境对于材料的软化,材料的耐磨性能明显下降,表现为同等载荷条件下试样的磨损率更大。从图5可以看出,相对无PTFE填充的PEEK材料,低PTFE含量并未明显降低材料的磨损率,反而提高了部分试样的磨损率(如2#、3#试样)。产生这一现象的原因是PTFE的含量较低时,作为填充相的PTFE在复合材料内部的连续性较差,以至于不足以在摩擦进程中维持稳定而连续的润滑效能,且局部材料的结合强度更低,使试样更易在划擦-耕犁机制的作用下形成磨屑,提高材料的磨损率。但是,进一步提高PTFE的含量后这一现象得以改善。而且,改性后的材料磨损率更低,这一结论在干摩擦和贫油润滑试样的磨损率数据中均有所体现,验证了热处理改性可以有效提高材料的耐磨性能的结论。

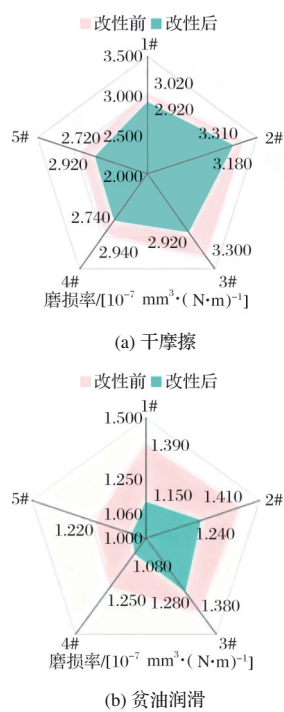


图5 高温条件下各组试样磨损率对比

Fig.5 Comparison of wear rate of each group of specimens under high-temperature condition

2.2 长效摩擦学性能

相比一般测试时长(30 min),长效服役要求PEEK材料能够在较长时间的摩擦学性能测试进程中保持稳定且良好的摩擦学性能,此处将时间延长至6 h,进一步探究各组试样干摩擦及贫油润滑性能。

2.2.1 干摩擦性能

图6为长期测试条件下的干摩擦性能。图7为长期测试条件下热处理改性前后的平均摩擦因数对比。从图6和图7可以看出,热处理改性对于提高材料的耐磨性能起

到了至关重要的作用,这表现在改性后的试样摩擦因数普遍低于未经改性的试样。除此之外,填充PTFE对于提高复合材料的摩擦学性能也有重要意义,这是因为热处理改性前后,多孔材料的摩擦因数均随着PTFE的填充出现了下降趋势,这一现象有力证明了PTFE可以提高材料在长期干摩擦条件下的摩擦学性能。

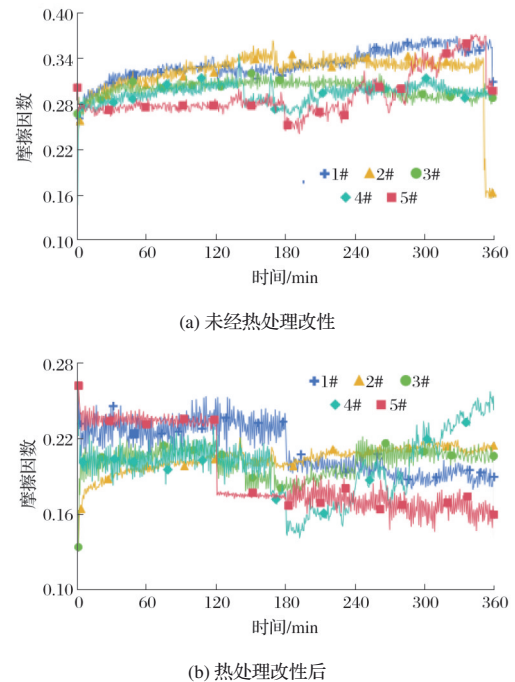


图6 长期测试条件下的干摩擦性能

Fig.6 Dry friction performance under long-term test condition

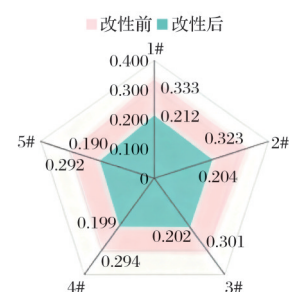


图7 长期测试条件下热处理改性前后的平均摩擦因数对比

Fig.7 Comparison of average friction factor before and after heat treatment modification under long-term test condition

2.2.2 贫油润滑性能

图8为长期测试条件下的贫油润滑性能。图9为长期测试条件下热处理改性前后贫油润滑过程中的平均摩擦因数对比。从图8可以看出,贫油润滑测试过程中,多孔材料的摩擦学性能相较于干摩擦条件下有所改善。热处理改性有利于提高材料表层的结晶度和致密性,提高其承载能力,这为长期维持多孔结构的运油、保油性能提供了有效支撑,实现试样摩擦学性能的提升[22]。对于1#试样,改性前后的摩擦因数降低约39.31%。随着PTFE的

填充且含量趋于合理,试样的平均摩擦因数降低约31.92%,这说明合理的热处理及适量的PTFE改性手段对于提升材料在贫油润滑状态下的长效摩擦学性能具有显著作用。

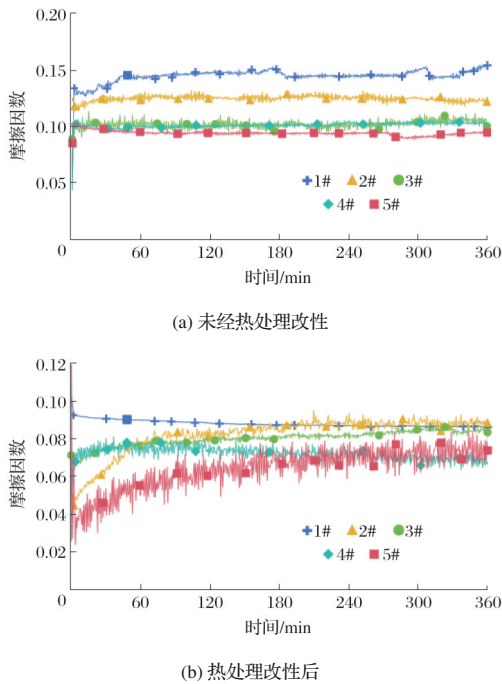


图8 长期测试条件下的贫油润滑性能

Fig.8 Oil-poor lubrication performance under long-term test condition

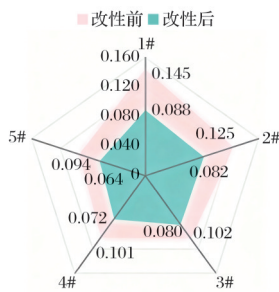


图9 长期测试条件下热处理改性前后贫油润滑过程中的平均摩擦因数对比

Fig.9 Comparison of average friction factor before and after heat treatment modification in oil-poor lubrication process under long-term test condition

2.2.3 磨损率

图10为长期测试条件下各组试样磨损率对比。区别于高温测试,长期测试过程并不会引起材料的软化。从图10可以看出,长期测试条件下的磨损率相较于高温测试的磨损率有所降低。但是,干摩擦条件下试样的磨损率明显大于贫油润滑环境中的试样,且热处理改性后材料的磨损率相较于未经热处理改性的材料仍然具有一定优势。

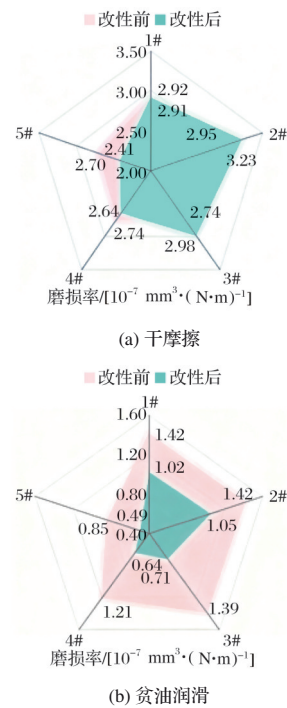


图10 长期测试条件下各组试样磨损率对比
Fig.10 Comparison of wear rate of each group of specimens under long-term test condition

3 结论

分别基于200℃及摩擦时长为6h的测试环境探究PTFE/PEEK复合轴承保持架材料的干摩擦及贫油润滑性能,并采用对照实验研究热处理改性前后PTFE/PEEK复合材料的摩擦学性能变化规律及内在机理。高温条件下的摩擦因数结果表明,热处理改性可以明显改善材料的耐磨性能。同时,在PEEK基多孔材料中填充PTFE材料可以提高试样的自润滑性能,但是PTFE含量是影响自润滑效果的重要因素。高温条件下的磨损率结果表明,较低的PTFE含量会导致复合材料的磨损率提高,当PTFE质量分数 $\geq 12\%$ 时,复合材料的磨损率才得以明显降低。这是因为较低的PTFE含量降低其在材料表面的连续性,不利于发挥材料的自润滑性,而增加PTFE含量使其在材料表面分布的均匀性得以提高,提升材料的耐磨性能。长效自润滑性能结果表明,热处理改性有利于实现试样摩擦学性能的提升,稳定润滑油膜的形成还可以有效减少甚至避免磨屑的形成,长效自润滑性能测试中的磨损率测试结果与高温条件下的磨损率变化展现出相似的规律。

参考文献

[1] KOIKE H, KIDA K, SANTOS E C, et al. Self-lubrication of PEEK polymer bearings in rolling contact fatigue under radial loads[J]. Tribology International, 2012, 49: 30-38.

[2] GONG T, WANG Z Q, MA Q, et al. Motor bearing fault diagnosis in an industrial robot under complex variable speed conditions[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2024, 19(2): 021007.

[3] GAO S, HAN Q K, ZHOU N N, et al. Dynamic and wear

- characteristics of self-lubricating bearing cage: Effects of cage pocket shape[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 110(1): 177-200.
- [4] 闫海鹏, 包志刚, 秦志英, 等. 高速乏油全陶瓷角接触球轴承振动与噪声实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2023, 43(5): 95-101.
- [5] 葛临风, 陈飞, 闫柯, 等. 面向乏油工况的高速轴承润滑增效研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(1): 154-161.
- [6] 潘盈卓, 吕宝华, 马楷, 等. 高温环境 Si_3N_4 陶瓷与 M50 钢材料的球盘配副与润滑油量对摩擦学行为的影响研究[J]. *摩擦学学报(中英文)*, 2024, 44(2): 200-213.
- [7] ZHOU D B, HARAGUCHI D. Design and evaluation of a robotic forceps with flexible wrist joint made of PEEK plastic[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 8020-8027.
- [8] ZHU J J, XIE F, DWYER-JOYCE R S. PEEK composites as self-lubricating bush materials for articulating revolute pin joints[J]. *Polymers*, 2020, 12(3): 665.
- [9] 逢显娟, 岳世伟, 黄素玲, 等. 烧结温度对快速热压烧结 PEEK 材料结构及力学、热学和摩擦学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2023(8): 43-50.
- [10] 刘天伟. h-BN/PTFE 改性 CF/PEEK 复合材料制备及摩擦磨损性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [11] CHOE B, KWAK W, JEON D, et al. Experimental study on dynamic behavior of ball bearing cage in cryogenic environments, Part II: Effects of cage mass imbalance[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 116: 25-39.
- [12] CHOE B, LEE J, JEON D, et al. Experimental study on dynamic behavior of ball bearing cage in cryogenic environments, Part I: Effects of cage guidance and pocket clearances[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 545-569.
- [13] LI C, GUO Z K, ZHEN M S, et al. A noncontact rotational speed sensor for bearing cages in a high-temperature and high-speed environment[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(14): 22773-22780.
- [14] DESHWAL D, BELGAMWAR S U, BEKINAL S I, et al. Role of reinforcement on the tribological properties of polytetrafluoroethylene composites: A comprehensive review[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(16): 14475-14497.
- [15] SREENILAYAM-RAVEENDRAN R K, AZARIAN M H, MORILLO C, et al. Comparative evaluation of metal and polymer ball bearings[J]. *Wear*, 2013, 302(1/2): 1499-1505.
- [16] VISHAL K, RAJKUMAR K, SABARINATHAN P. Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite[J]. *Silicon*, 2022, 14(9): 4601-4610.
- [17] SIRAJ N, HASHMI S A R, VERMA S. State-of-the-art review on the high-performance poly(ether ether ketone) composites for mechanical, tribological and bioactive characteristics[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(10): 3049-3077.
- [18] ZAREI A, FARAHANI S, PRADEEP S A, et al. Design and manufacturing of roller bearing polymeric cages and development of a theoretical model for predicting the roller push-out force[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1017.
- [19] CHEN J, CAO G, LI L, et al. Modification of polyether ether ketone for the repairing of bone defects[J]. *Biomedical Materials*, 2022, 17(4): 042001.
- [20] 王妍, 汤赫男, 赵晶, 等. PEEK 填充 PTFE 摩擦学性能分子动力学模拟分析[J]. *润滑与密封*, 2024, 49(8): 44-49.
- [21] 王文文, 刘洁, 赵训茶, 等. 基于 FDM 的 PTFE/PEEK 多孔轴承保持架材料制备与摩擦学性能研究[J]. *塑料科技*, 2024, 52(6): 16-21.
- [22] ZHANG H, DUAN M D, QIN S K, et al. Preparation and modification of porous polyetheretherketone (PEEK) cage material based on fused deposition modeling (FDM)[J]. *Polymers*, 2022, 14(24): 5403.
- [23] OKOKPUJIE I P, TARTIBU L K, MUSA-BASHEER H O, et al. Effect of coatings on mechanical, corrosion and tribological properties of industrial materials: A comprehensive review[J]. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 2024, 10(1): 2.
- [24] WATTEL S Z, GARCIA-SUAREZ J, MOLINARI J F. Understanding the mechanisms of adhesive wear for heterogeneous materials through atomistic simulations[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2022, 57: 101913.
- [25] ZHANG Z N, GE X R. Multiscale shear fracture of heterogeneous material using the virtual internal bond[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2007, 47(3): 185-191.
- [26] BOUAZIZ O, BRÉCHET Y, EMBURY J D. Heterogeneous and architected materials: A possible strategy for design of structural materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2008, 10(1/2): 24-36.