

耐高温聚合物基自润滑轴承材料的摩擦学研究进展

何长昭^{1,2} 王文东^{2,3*} 邹 华¹

(1.上海理工大学材料科学与工程学院,上海 200082;2.上海材料研究所,上海 200437;
3.上海市工程材料应用评价重点实验室,上海 200437)

摘 要 综述了聚四氟乙烯、聚酰亚胺、聚苯硫醚和聚醚醚酮等 4 种耐高温聚合物基自润滑轴承材料的发展现状和摩擦学研究进展,重点讨论了耐高温聚合物基自润滑轴承材料摩擦磨损性能及其磨损机理,同时对未来发展提出建议。

关键词 自润滑轴承,耐高温,聚合物基,复合材料,摩擦学

Research progress on high-temperature resistance polymer-based self-lubrication bearing materials

He Changzhao^{1,2} Wang Wendong^{2,3} Zou Hua¹

(1.University of Shanghai for Science and Technology,Shanghai 200082;
2.Shanghai Research Institute of Materials,Shanghai 200437;
3.Shanghai Research Key Laboratory for Engineering Materials Evaluation,Shanghai 200437)

Abstract The development status and tribological research progress of four kinds of high temperature resistant polymer-based self-lubrication bearing materials,including PTFE,PI,PPS and PEEK,are introduced.The friction and wear properties and wear mechanism of high temperature resistant polymer-based self-lubrication bearing materials are emphatically discussed,and suggestions for future development have proposed.

Key words self-lubrication bearing,high temperature resistance,polymer-based,composite materials,tribology

随着材料科学的发展和技术工艺的进步,人们通过合成和改性研制了耐高温聚合物及其复合材料。耐高温聚合物的定义范围比较广泛,能承受较高温度并满足一定性能需求则可被认为是“耐高温聚合物”,常用的耐高温聚合物有聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰亚胺(PI)、聚苯硫醚(PPS)和聚醚醚酮(PEEK)等^[1]。耐高温聚合物基自润滑材料是以耐高温聚合物为基体,通过一定工艺加入固体润滑剂、填充材料等组分制备的可在较高温度下使用的减摩耐磨复合材料,可用来制造聚合物轴承,在一定工作环境中替代传统轴承^[2-3]。研究表明聚合物基体的摩擦学性能与轴承性能有密切联系,传统金属轴承的设计方法不能直接套用在聚合物基自润滑轴承上^[4-6]。笔者介绍了 4 种耐高温聚合物基自润滑轴承材料的摩擦学研究进展,重点关注其摩擦学性能和磨损机理,同时对其进一步发展和研究提供建议,

以期为研究人员提供参考。

1 PTFE 基自润滑复合材料

PTFE 可在 $-195\sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围内长期使用,有自润滑性,因此摩擦因数很低,常用来制作轴承和密封件^[7-8]。但纯 PTFE 磨损率高、线膨胀系数大、热导率低,研究人员用多种方法提高其摩擦学性能^[9]。

1.1 填充改性

PTFE 基自润滑复合材料填充改性常用填料为固体润滑剂,如石墨、 MoS_2 、碳纤维(CFs)、玻璃纤维(GFs)以及聚合物等^[10]。PTFE 基自润滑复合材料的性能与填料类型、尺寸和分散性密切相关,PTFE 基体和填料的相容性对复合材料性能十分重要。界面间结合良好时,可使负荷高效地从基体传递到增强体上,减少应力集中,最终提升聚合物基复合材料轴承的综合性能^[11]。

基金项目:上海市科技发展基金(15XD1520900)

作者简介:何长昭(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为聚合物基复合材料。

联系人:王文东,男,教授级高级工程师。

1.1.1 MoS₂ 填充改性

胡刚等^[12]以 MoS₂ 和石墨为固体润滑剂,CFs 和 GFs 为增强体分别制备了不同种类的 PTFE 基自润滑复合材料,对比分析不同种类的增强纤维和固体润滑剂对 PTFE 基自润滑复合材料摩擦学性能的影响。研究发现填充的固体润滑剂种类相同时,GFs 增强的 PTFE 基自润滑复合材料中部分纤维从基体中脱出,磨损量较大;而相同纤维增强时,MoS₂ 作固体润滑剂的复合材料摩擦学综合性能比石墨填充的复合材料更好。

王文东等^[13]制备出聚苯酯/MoS₂ 填充 PTFE 基自润滑复合材料,研究发现复合材料对铝合金的摩擦因数和磨损率均随聚苯酯和 MoS₂ 含量的增加而逐步减小,MoS₂ 质量含量超过 3% 后,复合材料的摩擦学性能趋于稳定。

1.1.2 玻璃纤维填充改性

Jiang 等^[14]将表面改性 GFs、MoS₂、滑石组成的复合填料添加到 PTFE 基体中制成复合材料。研究表明,含表面改性 GFs 的复合材料的摩擦因数、拉伸强度和断裂伸长率等摩擦学性能和力学性能均优于含未改性 GFs 的同组分复合材料,证明改性后的 GFs 在 PTFE 基自润滑复合材料中显示出优良的界面粘接性。填充 2% GFs/3% MoS₂/3% 滑石(均为质量分数)的 PTFE 基自润滑复合材料综合性能最好。

1.1.3 SiO₂ 填充改性

Han 等^[15]对比了填充常规 SiO₂ 和填充纳米 SiO₂ 微粒对 PTFE 基自润滑复合材料摩擦学性能的影响。研究发现,纳米 SiO₂ 微粒分散性更佳,可减小复合材料的表面粗糙度,纳米 SiO₂ 微粒填充的 PTFE 基自润滑复合材料摩擦面上微凸体和磨屑明显较少,磨损率显著下降。

1.2 摩擦学测试方法

不同测试方法能对复合材料摩擦学性能测试结果产生一定的影响。摩擦学行为取决于摩擦系统,根据摩擦副的运动类型可以将滑动摩擦分为单向旋转运动(URM)、往复滑动运动(RSM)和面对面扭转运动(FTM)^[16]。Cao 等^[17]用实验与数值模拟的方法研究了 PTFE 基自润滑复合材料在 3 种不同摩擦运动(URM、RSM、FTM)中摩擦学性能的变化。结果表明,复合材料的摩擦因数按 URM、RSM 和 FTM 顺序依次升高,磨损机理分别是:URM 含磨粒磨损和粘着磨损,RSM 含磨粒磨损和塑性形变,FTM 含疲劳磨损、粘着磨损和磨粒磨损。

2 PI 基自润滑复合材料

PI 是耐热芳杂环聚合物中应用最广泛的材料之一,短时可耐受 555℃ 高温,可长期在 300℃ 以下使用,综合性能优越^[18]。PI 在轴承保持架领域应用比较成功^[19]。传统 PI 不溶不熔、难以加工,同时粘结性、透明性差,常用改性方法有结构改性、填充改性、共聚改性和功能化侧基改性等^[1]。近年来改性研究主要集中在填充改性^[20]。

2.1 BN 填充改性

六方晶系 BN(h-BN)是一种结构类似石墨的层状陶瓷化合物,导热性和化学稳定性优良。限制 h-BN 在 PI 基自润滑复合材料中应用的主要问题是 h-BN 微粒和 PI 基体之间界面结合力弱,其次是 h-BN 在 PI 基体中分散不均,有沉积在基体底部的倾向^[21]。Mittal 等^[22]氧化处理并功能化 h-BN 微粒,使界面相互作用力提高、h-BN 层间距离增大,达到与 PI 基体最大粘结力和最佳分散性,最后制成 h-BN/PMMA/PI 自润滑复合材料。功能化后的 h-BN 在聚合物基体中分散更均匀,使复合材料摩擦学性能和热稳定性均得到提升。

2.2 碳纳米管(CNTs)填充改性

多壁碳纳米管(MWCNTs)自从被发现以来就引起科研人员广泛关注。Nie 等^[23]用原位聚合法生成 MWCNTs-COOH/PI 纳米复合材料,羧基接枝的 MWCNTs 在 PI 基体中的分散性和界面相容性均提升,复合材料的拉伸应力和拉伸模量增大。研究认为 MWCNTs 在摩擦过程中充当了润滑剂。Fu 等^[24]研究了 TiO₂/CNTs/PI 自润滑复合材料的摩擦磨损性能,结果发现纳米 TiO₂ 微粒能有效降低摩擦因数和磨损率。CNTs 和 TiO₂ 之间能产生协同效应,其中 CNTs 的主要作用是提高材料表面硬度,TiO₂ 作为润滑剂减小片层状磨屑的产生。

2.3 碳纤维填充改性

Chen 等^[25]采用一步水热法制备了 MoS₂ 改性碳纤维,最终制成 CF-MoS₂/PI 复合材料。结果表明,改性后 CF 与基体的界面结合力提高,复合材料硬度和热稳定性均优于纯 PI 或 CF/PI 复合材料。CF-MoS₂/PI 复合材料在低速或低载条件下摩擦因数和磨损率较低,而高速或高载条件下摩擦学性能表现不佳。Song 等^[26]为了提高 CFs 和 PI 基体之间的界面结合力,用聚多巴胺(PDA)改性 CFs 表面。研究表明,与未改性 CFs/PI 复合材料相比,改性后的 PDA-CFs/PI 复合材料拉伸强度和拉伸模

量分别提高了 16.4% 和 187.5%, 摩擦因数和磨损率分别下降了 13.3% 和 62.9%。

2.4 介孔二氧化硅(MPS)填充改性

Ma 等^[27]对比了 MPS 填充改性的 PI 基复合材料和纯 PI 高温下的摩擦学性能。研究表明, 当温度达到 300℃ 时纯 PI 的比磨损率下降了一个数量级, 摩擦因数也有显著降低, PI/MPS 复合材料在高温下摩擦学性能提升有限。他们认为高温使摩擦转移膜质量提高、形成更加容易。

3 PPS 基自润滑复合材料

PPS 长期使用温度为 220~240℃, 短期耐热性和长期连续使用的热稳定性为所有的工程塑料中最优^[28]。PPS 可用于制作复合材料轴承^[29], 但纯 PPS 脆性较大, 韧性和延伸率低, 熔体黏度不稳定。现在国内外常用的改性方式是共混, 共混改性可以获得高性能 PPS 复合纤维, PPS 纤维改性也包括结构改性和表面处理改性^[30-31]。

3.1 填充改性

3.1.1 CFs 填充改性

Zhang 等^[32]关注了 PPS 基自润滑复合材料在柴油润滑条件下的摩擦学表现。研究发现, 将短切碳纤维(SCFs)加入到 PPS 中能大幅提高 PPS 在柴油润滑条件中的摩擦学性能。进一步加入六方结构的 WS₂ 或 AlN 纳米微粒到 SCFs/Gr/PPS 复合材料中, 能进一步提高摩擦学性能。

Panin 等^[33]研究了不同尺寸 CFs(纳米、微米和毫米级)对 CFs/PPS 复合材料摩擦学性能的影响。研究表明质量含量 40% 的 200μm 和 2mm CFs 的 PPS 基复合材料强度最佳, 质量含量 40% 的 70μm CFs 的 PPS 基复合材料耐磨性最佳。

3.1.2 TiO₂ 填充改性

Najim 等^[34]用 TiO₂ 纳米微粒填充 PPS 以提升摩擦学性能。研究表明, 摩擦速率为 1m/s 时, 1% (wt, 质量分数, 下同) TiO₂/PPS 复合材料摩擦学综合性能最好; 摩擦速率在 0.4m/s 时, 6% TiO₂/PPS 摩擦学综合性能最优。

3.2 熔融共混改性

不同种类高分子熔融共混是聚合物材料改性的一种主要方法。Xing 等^[35]研究了熔融共混的 PPS/PVDF 复合材料。研究发现, PPS/PVDF 复合材料在 PPS 和 PVDF 基体界面上形成一种海岛状两相结构, PPS 与 PVDF 仅机械混合在一起, 两种聚合物在分子结构上没有可混性。复合材料中

PVDF 加入量低于 20% 时可以提高复合材料的热稳定性。

4 PEEK 基自润滑复合材料

PEEK 热分解温度约 500℃, 可在 250℃ 长期使用。德国 Neo-plastics 公司用 PEEK 制造在较高温度下使用的轴承, 美国 Paul Muller 公司用 PEEK 制作滚轴轴承^[36]。纯 PEEK 材料摩擦因数较高、粘滑性突出, 其改性研究一直都是热点, PEEK 可与聚醚酮、聚醚砜、PTFE 等聚合物共混改性, 还可用 CFs、GFs 和无机纳米材料等填充增强^[37-38]。

4.1 填充改性

4.1.1 CFs 填充改性

CFs 填料尺寸能在一定程度上影响 PEEK 基自润滑复合材料的摩擦学性能^[39]。在过去的研究中常用微米级 CFs 提高复合材料的机械强度, 而纳米级 CFs 能在填料和聚合物基体间形成大量界面, 利于界面间相互作用力提升。Wang 等^[40]制备了微米/纳米级 CFs(m-CFs/n-CFs)和 PTFE 微粒共同填充的 PEEK 基自润滑复合材料。研究发现, 加入 CFs(尤其是 m-CFs)能大幅提高材料的热扩散系数和导热系数, m-CFs 对于摩擦学性能的提升作用优于 n-CFs。最理想的添加剂比例为 4% nCF、20% mCF、2% nPTFE 和 10% mPTFE。

在 PEEK 基体中同时加入 PTFE 和 CFs 能显著降低 PEEK 基自润滑复合材料的摩擦因数。姚光督等^[41]为解决核电系统中某装置的耐磨耐腐蚀问题, 将 CFs 和 PTFE 微粉添加到 PEEK 基体中。结果表明, CFs 含量增加时复合材料的硬度和压缩强度递增; PTFE 微粉含量增加, 上述性能逐步降低。CFs 含量增加有助于降低摩擦因数和磨痕宽度, 观察微观结构发现干摩擦条件下复合材料的磨损机理以磨粒磨损为主。

李振光等^[42]以 CFs/PEEK 复合材料为基体, 再加入氧化石墨烯-ZnO(GO-ZnO)填料制成复合填料填充材料。结果表明, GO-ZnO/CF/PEEK 新型复合材料与原复合材料相比摩擦因数和磨损率均下降, 同时在基体中形成了良好的导热网络, 当 GO-ZnO 加入量为 1.5% 时复合材料摩擦因数仅 0.2。

4.1.2 石墨相氮化碳(g-C₃N₄)填充改性

Zhang 等^[43]对比了用不同方法改性后的 g-C₃N₄ 对 PEEK 基自润滑复合材料摩擦学性能的影响。结果表明, 加入 g-C₃N₄ 能显著提高复合材料

的耐磨性。对比不同方法改性的 $g-C_3N_4$ 发现, $g-C_3N_4$ 层间氢键状态对复合材料摩擦学性能起到了关键作用。Zhang 等^[44]同时报道了 $g-C_3N_4$ 纳米管对 PEEK 基复合材料减摩耐磨性能的影响。研究发现, 填充 0.5% $g-C_3N_4$ 纳米管(体积分数)与填充 4% $g-C_3N_4$ 微粒(体积分数)的复合材料摩擦学性能相同。

4.2 共混改性

Teng 等^[45]研究了钛酸钾晶须(PTW)和 GFs 含量对 PTFE/PEEK 共混复合材料摩擦学性能的影响。研究发现 PTW 和 GFs 均能提升复合材料的摩擦学性能, 但 GFs 提升效率更优, 含 1% PTW 的复合材料摩擦因数和磨损率分别下降了 7.2% 和 21%; 含 1% GFs 的共混材料上述指标分别下降了 0.66% 和 51%。Jean-Fulcrand 等^[46]制备了质量比为 50:50 的 PEEK/PBI 共混复合材料, 研究共混材料在不同温度下的摩擦学性能。结果发现只有测试温度高于 PEEK 玻璃化温度后, 复合材料才显示出有效的摩擦学性能提升, 同时摩擦转移膜形成和状态主要与 PEEK 有关。

4.3 转移膜结构与性能

聚合物基自润滑复合材料的自润滑性与在摩擦副表面形成的摩擦转移膜密切相关, 研究人员希望通过控制复合材料的组成成分来控制摩擦转移膜的结构。摩擦转移膜结构和组成多样, 在形成过程中包含的物理和化学反应非常复杂, 同时转移膜很薄, 一些常用的表征手段无法使用。特别是聚合物基自润滑复合材料本身结构复杂, 所以转移膜的形成方式和工作机理至今仍有待深入研究。

Guo 等^[47]研究了软-硬纳米微粒对摩擦转移膜结构和性能的影响, 分别加入混合氧化纳米微粒(如 $Bi_2O_3-SiO_2$ 和 $CuO-SiO_2$) 和混合六方结构纳米微粒(如 WS_2 和 SiC) 到 PEEK 基自润滑复合材料中制成新型复合材料。实验中发现了明显的软硬质纳米微粒协同效应, 软粒子可以转移到对磨面上提高摩擦膜形成率, 硬粒子提高摩擦膜负载能力, 而六方晶体结构的纳米微粒可大幅降低摩擦因数。

5 结语

目前, 随着工业智能生产线的推广, 耐高温聚合物基自润滑轴承在工业领域的应用日渐广泛, 与其他学科相互交叉渗透更密切。研究表明选择合适填料以及适当对填料进行改性可对复合材料摩擦学性能提升起着重要作用。综上所述, 以下为目前研究

存在的部分问题和值得改进的方向。

(1) 聚合物基自润滑轴承材料摩擦学性能研究的主要条件仍是室温, 干、水或油润滑等。可研究高温连续变化、干水油复合和高真空等环境下聚合物基自润滑轴承材料性能的变化, 更应关注高温对衰变机理和摩擦磨损的影响。

(2) 对磨损机理的研究集中于观察磨损现象。研究人员可更加深入地探究微观机理, 结合计算机模拟等手段对聚合物基复合轴承材料的磨损和失效提出预测。

(3) 许多研究工作仍停留在实验阶段。可进一步关注实际应用中聚合物基自润滑轴承材料的摩擦学现象, 将降低摩擦磨损的研究与实际工况条件结合, 应用至各个工业领域。

参考文献

- [1] 周其凤, 范星河, 谢晓峰. 耐高温聚合物及其复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 1-32.
- [2] 申泽慧, 孙荣禄. 自润滑复合材料中不同组分之间的协同作用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 25-30.
- [3] Gardos M N. Self-lubricating composites for extreme environment applications[J]. Tribol Int, 1982, 15(5): 273-283.
- [4] Neale M J, Priest M, Stachowiak G. Applied tribology: bearing design and lubrication, 3rd Edition[M]. England: John Wiley & Sons, 2017, 1-32.
- [5] 石森森. 固体润滑技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 220-280.
- [6] 张恒. 复合材料轴承[M]. 北京: 中国石化出版社, 1996, 2-20.
- [7] 王枫, 孙小波, 王子君. 轴承保持架用聚四氟乙烯改性材料研究进展[J]. 轴承, 2013(4): 59-63.
- [8] 王顺, 谭庆昌. 大型推力轴承 PTFE-金属复合瓦热弹流润滑设计[J]. 润滑与密封, 2017, 42(3): 12-17.
- [9] 吴昊, 朱丽娜, 岳文, 等. PTFE 复合涂层的摩擦学性能及疏水性能研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 284-288.
- [10] Miyoshi K. Solid lubrication fundamentals[M]. 1st ed. UK: CRC Press, 2001, 10-22.
- [11] Xiang D, Gu C. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with ultra-fine kaolin particulates[J]. Mater Lett, 2006, 60(5): 689-692.
- [12] 胡刚, 陈学庆, 金石磊. 不同纤维增强和不同固体润滑剂改性 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(7): 41-44.
- [13] 王文东. 聚苯酯/MoS₂ 填充 PTFE 复合材料对铝合金的摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2015, 40(11): 98-103.
- [14] Jiang B, Zhu A, Zhang C, et al. Interface enhancement between polytetrafluoroethylene and glass fibers modified with a titanate coupler[J]. J Appl Polym Sci, 2017, 134(14): 44668.
- [15] Han Y, Zheng B, Chen J, et al. Study on the reinforcing effect of nano-SiO₂ filled PTFE composites [J]. AIP Advances, 2019, 9(5): 55217.

- [16] Xie Y. Three axioms in tribology[J]. Tribology-Beijing, 2001, 21(3):166-170.
- [17] Cao B, Gao S, Yao Z, et al. Tribological behavior of polytetrafluoroethylene under unidirectional rotation, reciprocating sliding, and torsion motion[J]. Tribol T, 2017, 60(4): 605-164.
- [18] Ding M. Isomeric polyimides[J]. Prog Polym Sci, 2007, 32(6): 623-668.
- [19] 赵华俊, 王晓雷, 黄巍. 多孔聚酰亚胺保持架对轴承贫油润滑性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 31-34.
- [20] 郭准, 于菲, 赵阳, 等. 原位聚合法制备石墨烯/聚酰亚胺复合材料及其性能[J]. 化工新型材料, 2019, 47(5): 73-76.
- [21] Tabkhpaz M, Shajari S, Mahmoodi M, et al. Thermal conductivity of carbon nanotube and hexagonal boron nitride polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 100:19-30.
- [22] Mittal G, Rhee K Y, Park S J. Processing and characterization of PMMA/PI composites reinforced with surface functionalized hexagonal boron nitride[J]. Applied Surface Science, 2017, 415:49-54.
- [23] Nie P, Min C, Chen X, et al. Effect of MWCNTs-COOH reinforcement on tribological behaviors of PI/MWCNTs-COOH nanocomposites under seawater lubrication[J]. Tribol T, 2016, 59(1):89-98.
- [24] Fu Y F, Li J, Zhang F Q, et al. The preparation and the friction and wear behaviours of $\text{TiO}_2/\text{CNT}/\text{PI}$ composite film[J]. J Exp Nanosci, 2016, 11(6): 459-469.
- [25] Chen B, Li X, Jia Y, et al. MoS_2 nanosheets-decorated carbon fiber hybrid for improving the friction and wear properties of polyimide composite[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 109:232-238.
- [26] Song H, Li L, Yang J, et al. Fabrication of polydopamine-modified carbon fabric/polyimide composites with enhanced mechanical and tribological properties[J]. Polym Composite, 2018, 40(5):1911-1918.
- [27] Ma J, Qi X, Zhao Y, et al. Effects of elevated temperature on tribological behavior of polyimide and polyimide/mesoporous silica nanocomposite in dry sliding against GCr15 steel[J]. Wear, 2017, 374:142-151.
- [28] Rahate A S, Nemade K R, Waghuley S A. Polyphenylene sulfide (PPS): state of the art and applications[J]. Reviews in Chemical Engineering, 2013, 29(6): 471-489.
- [29] 邱明, 周占生, 周大威, 等. 聚四氟乙烯/聚苯硫醚织物自润滑关节轴承的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(5): 547-553.
- [30] 姜振华, 张云鹤. 耐高温耐腐蚀有机纤维[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017, 60-73.
- [31] Yu L, Yang S, Liu W, et al. An investigation of the friction and wear behaviors of polyphenylene sulfide filled with solid lubricants[J]. Polymer Engineering & Science, 2000, 40(8): 1825-1832.
- [32] Zhang D, Qi H, Zhao F, et al. Tribological performance of PPS composites under diesel lubrication conditions[J]. Tribol Int, 2017, 115:338-347.
- [33] Panin S V, Le T, Kornienko L A, et al. Mechanical and tribotechnical properties of polyphenylene sulfide composites reinforced with carbon fibers of various dimension[M]. 2018:1-32.
- [34] Najim A S, Ola A K. Enhancement of tribological and mechanical behavior of polyphenylene sulfide reinforced by titanium dioxide nanoparticles[J]. Key Engineering Materials, 2016, 724:20-27.
- [35] Xing J, Ni Q Q, Deng B Y, et al. Morphology and properties of polyphenylene sulfide (PPS)/polyvinylidene fluoride (PVDF) polymer alloys by melt blending[J]. Composites Science and Technology, 2016, 134:184-190.
- [36] 赵纯, 张玉龙. 聚醚醚酮[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008, 1-3.
- [37] 陈威, 刘杏, 文怀兴. 海洋环境下 PEEK 复合材料摩擦学研究进展[J]. 工程塑料应用, 2017, 45(8): 135-138.
- [38] 李长林, 黄志刚, 翁云宣. PEEK 特种工程塑料耐磨改性研究进展及其应用展望[J]. 中国塑料, 2018, 32(4): 18-23.
- [39] Liu N, Wang J Z, Yang J, et al. Effects of nano-sized and micro-sized carbon fibers on the interlaminar shear strength and tribological properties of high strength glass fabric/phenolic laminate in water environment[J]. Compos Part B-Eng, 2015, 68:92-99.
- [40] Wang Q, Wang Y, Wang H, et al. Comparative study of the effects of nano-sized and micro-sized CF and PTFE on the thermal and tribological properties of PEEK composites[J]. Polym Advan Technol, 2018, 29(2): 896-905.
- [41] 姚光督, 王文东, 沈景凤, 等. PTFE 微粉/CF 改性 PEEK 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 材料科学与工艺, 2018, 26(3): 59-65.
- [42] 李振光, 于飞, 刘浏, 等. 碳纤维聚醚醚酮树脂基复合材料的制备及摩擦磨损性能研究[J]. 化工新型材料, 2018, 46(7): 56-59.
- [43] Zhang L G, Qi H M, Li G T, et al. Significantly enhanced wear resistance of PEEK by simply filling with modified graphitic carbon nitride[J]. Mater Design, 2017, 129:192-200.
- [44] Zhang L, Li G, Guo Y, et al. PEEK reinforced with low-loading 2D graphitic carbon nitride nanosheets: high wear resistance under harsh lubrication conditions[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 109:507-516.
- [45] Teng X, Wen L, Lv Y, et al. Effects of potassium titanate whisker and glass fiber on tribological and mechanical properties of PTFE/PEEK blend[J]. High Perform Polym, 2017, 30(6): 752-764.
- [46] Jean-Fulcrand A, MASEN M A, BREMNER T, et al. Effect of temperature on tribological performance of polyetheretherketone-polybenzimidazole blend[J]. Tribol Int, 2019, 129:5-15.
- [47] Guo L, Zhang G, Wang D, et al. Significance of combined functional nanoparticles for enhancing tribological performance of PEEK reinforced with carbon fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 102:400-413.