

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.003

轴承瓦块用改性PEEK复合层的制备及摩擦学性能

李想^{1,3,4}, 邹太勇², 孔永刚^{1,3,4}, 委雪梅^{1,3,4}, 庄成康^{1,3,4}

(1. 洛阳轴承研究所有限公司, 河南洛阳 471039; 2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083;

3. 河南省高性能轴承技术重点实验室, 河南洛阳 471039; 4. 高性能轴承数字化设计国家国际科技合作基地, 河南洛阳 471039)

摘要: 针对潜油电动机止推轴承的失效状况, 为提高其承载能力和耐温性, 设计并制造了一种聚醚醚酮(PEEK)/铜-钢三层止推轴承瓦块。分别采用碳纤维(CF)和聚四氟乙烯(PTFE)改性PEEK, 形成PEEK基复合材料, 由于PEEK基复合材料的无黏度特性难以与光滑的基体牢固结合, 因此在基体表面预烧结多孔铜粉层, 提高了PEEK复合层与基体之间的结合强度, 再将PEEK复合粉末预埋在铜粉层表面, 采用压制烧结方法, 烧结后PEEK复合层通过铜粉层与基体牢固结合。在模拟轴承实际工作环境下, 对两种改性PEEK复合层瓦块的承载能力和耐温性进行了比较分析, 并比较了摩擦学性能。结果表明, 在129.1℃的工作环境温度下, CF/PEEK复合层能够至少承受17.80 MPa的单位载荷, CF不仅显著提高PEEK复合材料的力学强度、承载能力和耐温性能, 在摩擦过程中还起到了润滑的作用, 从而显著改善复合材料的摩擦学性能。PTFE对PEEK复合材料的摩擦学性能改善有限, 在13.67 MPa的单位载荷下润滑油膜被破坏, PTFE/PEEK复合层磨损严重并失效。PTFE/PEEK复合层的磨损机理为黏着磨损和磨粒磨损, CF/PEEK复合层磨损表面无明显的黏着现象。CF/PEEK复合层具有更高的承载能力和更好的耐温性。

关键词: 瓦块; 碳纤维; 改性聚醚醚酮; 复合层; 摩擦学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0020-06

Preparation and tribological properties of modified PEEK composite layer for bearing tiles

LI Xiang^{1,3,4}, ZOU Taiyong², KONG Yonggang^{1,3,4}, WEI Xuemei^{1,3,4}, ZHUANG Chengkang^{1,3,4}

(1. Luoyang Bearing Research Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China; 2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Henan Key Laboratory of High Performance Bearing Technology, Luoyang 471039, China; 4. China International Science and Technology Cooperation Base for Digitization Design of High Performance Bearings, Luoyang 471039, China)

Abstract : Addressing the failure modes of thrust bearings in electric submersible pump, a polyether ether ketone (PEEK)/copper-steel three-layer thrust bearing pad was designed and manufactured to enhance its temperature resistance and load-bearing capacity. Carbon fiber (CF) and polytetrafluoroethylene (PTFE) were respectively used to modify PEEK to form PEEK matrix composite materials. Considering the non-viscosity characteristics of PEEK matrix composites, it was difficult to firmly bond with smooth matrix, so pre-sintered porous copper powder layer on the matrix surface was made to improve the bonding strength between PEEK composite layer and matrix. Then PEEK composite powder was prefabricated on the surface of the copper powder layer, and the pressing sintering method was adopted. After sintering, PEEK composite layer was firmly bonded with the matrix through the copper powder layer. The load bearing capacity and temperature resistance of two modified PEEK composite tiles were compared and analyzed in the simulated bearing environment, and the tribological properties were compared. The results show that at the working ambient temperature of 129.1 °C, CF/PEEK composite layer can withstand a unit load of at least 17.80 MPa. CF can not only significantly improve the mechanical strength, bearing capacity and temperature resistance of PEEK composite, but also plays a role in lubrication during friction, thus significantly improving the tribological properties of PEEK. The tribological performance of PTFE on PEEK composite is limited, and the lubricating oil film is destroyed under the unit load of 13.67 MPa, and PTFE/PEEK composite layer is seriously worn and fails. The wear mechanism of PTFE/PEEK composite layer is adhesive wear and abrasive wear, while CF/PEEK composite layer has no obvious adhesion phenomenon. CF/PEEK composite layer has higher load carrying capacity and better temperature resistance.

Keywords : tile ; carbon fiber ; modified polyether ether ketone ; composite layer ; tribological property

通信作者: 邹太勇, 博士研究生, 主要研究方向为先进材料加工与制备

收稿日期: 2025-03-18

引用格式: 李想, 邹太勇, 孔永刚, 等. 轴承瓦块用改性PEEK复合层的制备及摩擦学性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 20-25.

LI Xiang, ZOU Taiyong, KONG Yonggang, et al. Preparation and tribological properties of modified PEEK composite layer for bearing tiles [J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 20-25.

潜油电泵以其排量大、泵效高的特点,在油田开发中发挥着重要的作用。潜油电泵中的轴承总是在高温和高载荷的条件下工作,这会对摩擦副表面造成严重的磨损,轴承的磨损会导致潜油电动机的早期失效和报废,甚至导致相关事故。因此,有必要开发具有高承载能力和耐温性的摩擦副材料。

潜油电动机中的止推轴承由静块和动块组成,止推轴承的失效主要是由静块严重磨损引起的。可倾瓦块止推轴承采用金属和塑料作为瓦块的复合层材料,通常由两层或三层组成^[1-3]。通常瓦块的复合层材料采用改性聚四氟乙烯(PTFE),由于纯PTFE力学强度低、易冷流蠕变、无耐磨性、导热性差和热膨胀系数大,使得纯PTFE难以直接用作轴承材料^[4],此外,摩擦过程中还会发生摩擦化学反应,影响转移膜的形成和完整性^[5]。因此,改性PTFE通常用作轴承瓦块的复合层,常采用玻璃纤维、碳纤维、石墨、二硫化钼、青铜粉、铅粉和氧化铅粉等作为填充增强剂对PTFE进行改性处理。但随着潜油电泵技术的发展和市场的不断增加,对止推轴承提出了更高的要求,改性PTFE瓦块已无法满足过载和超高温的工作环境要求。

聚醚醚酮(PEEK)具有一定自润滑性能,是继PTFE后又一种重要的工程塑料,具有低摩擦系数、耐高温、耐腐蚀等优良的综合性能^[6-8]。PEEK广泛应用于航空航天、汽车、能源等行业,纯PEEK可在250℃下长期使用,使用温度上限比PTFE高出近50℃,短时使用温度可以达到300℃,且在400℃下短时间内几乎不分解。改性PEEK复合材料具有更优异的性能^[9-11],高温下仍能保持较高的强度,200℃的弯曲强度比PTFE在常温时还高,热变形温度可达300℃以上。Xu等^[12]研究了航空液压泵摩擦副用PTFE增强PEEK的摩擦性能,结果表明,PTFE改性PEEK复合层在航空液压泵上具有广阔的应用潜力。纤维增强已被证明是改善PEEK综合性能的非常有效的方法^[13-16],碳纤维(CF)的掺入可以显著提高PEEK的耐磨性,在摩擦过程中,CF可以保护基体免受严重磨损^[17-18]。邓争荣等^[19]以PEEK为基体,将PTFE、CF和MoS₂作为填料加入其中,采用共混改性的方法制备了新型PEEK复合材料轴瓦。试验结果表明:在干摩擦、海水润滑和油润滑三种条件下,改性后试样的摩擦系数和磨损量较纯PEEK材料均有不同程度的下降。改性PEEK

复合材料具有优异的承载能力、耐温性和耐磨性,在轴承行业具有很大的应用潜力。但是,将改性PEEK复合材料运用到潜油电动机止推轴承瓦块上却鲜有报道。

笔者设计并制造了一种三层复合止推轴承瓦块,采用PTFE或CF改性PEEK制备瓦块复合层,在复合层与基体之间加入铜粉层,兼有金属材料和塑料的双重优点:与金属材料相比,具有密度小、耐磨性及摩擦性好、自润滑性好等优点;与塑料材料相比,具有强度更高、导热性好、线膨胀系数小、极限PV值大及使用温度范围广、克服了塑料单独使用时磨损率高和承载能力差等特点。同时介绍了止推轴承瓦块的制造工艺;并对两种改性PEEK复合层的承载性能和耐温性能进行了比较分析,同时还揭示了其摩擦学性能。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PEEK:550G,1000目(13 μm),吉林省中研高分子材料股份有限公司;

PTFE:SG05JY801,1000目(13 μm),大连疆宇新材料有限公司;

CF粉末:约900目(15 μm),河南五星新材科技股份有限公司;

基材低碳钢:Q235A,沪丰特种合金(上海)有限公司。

1.2 主要仪器及设备

球磨机:WSM-300,无锡明海粉体机械设备厂;

加压烧结一体炉:GN4412P1,湘潭新大粉末冶金技术有限公司;

氮气一体炉:DQ-SC6,精工锐意科技(河南)有限公司;

台架试验机:ZTDM-150,洛阳轴承研究所有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):GeminiSEM300,德国卡尔蔡司公司。

1.3 瓦块制备

采用PTFE或CF改性PEEK制备瓦块复合层,各材料含量见表1。将表1中的CF/PEEK和PTFE/PEEK分别进行机械混合,形成PEEK基复合材料。

轴承瓦块三层结构的制造方案如图1所示。瓦块的基材为低碳钢,厚度为6 mm,对其结构进行了合理优化,以减少热弹性变形对承载力的影响,最

表 1 瓦块复合层材料含量

Tab. 1 Material composition of tile composite layer

Materials	Mass fraction/%
CF or PTFE	15
PEEK	85

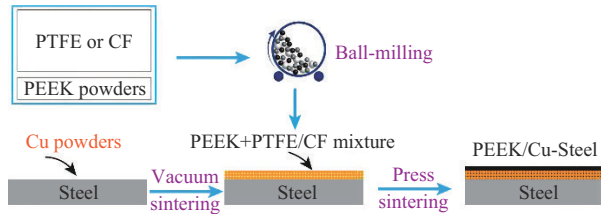


图 1 PEEK 基复合层的制造

Fig. 1 Manufacture of PEEK composite layer

大限度地提高承载能力。

PEEK 基复合材料的无黏度特性使其难以与光滑的基体牢固结合。通过在基体表面预成型多孔铜粉层,PEEK 基复合材料在压力作用下可嵌入到铜粉层的孔隙中,从而通过机械嵌合与金属基体形成牢固的结合。采用真空烧结的方法在低碳钢表面烧结铜层,烧结温度为 900 °C,保温时间为 60 min,铜层厚度为 2.4 mm。铜具有很高的导热性,多孔铜粉层不仅起到连接基材与 PEEK 基复合层的作用,还能及时传导摩擦副产生的热量。

将 PEEK 复合粉末预制在铜粉层表面,采用压制烧结的方法,压制压力约为 220 MPa,烧结后 PEEK 复合层通过铜粉层与金属基体牢固结合。烧结工艺如图 2a 所示,成型后轴承瓦块如图 2b 所示。烧结、磨加工后的 PEEK 基复合层厚度为 1 mm。

1.4 测试与表征

(1)摩擦磨损试验。

将制备好的瓦块与基座组装成样品,如图 2c 所示。利用台架试验机模拟轴承的实际工况,如图 2d 所示。试验的原理是:在动块(GCr15,硬度 50~65HRC)和静块之间施加不同的载荷,动块以一定的速度旋转,利用张力传感器测量静块圆周切线上的张力,计算不同试验条件下的摩擦系数和油温,所有试验均在润滑油浸没环境下进行。

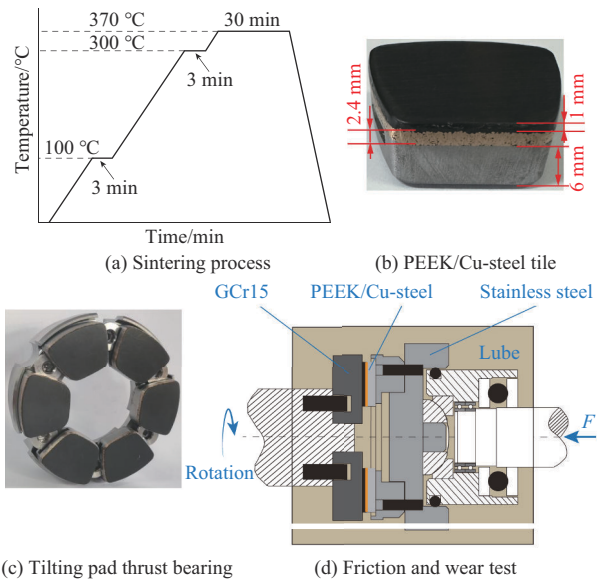
试验加载参数见表 2。试验采用逐步提高转速和载荷,最大转速为 2 970 r/min,最大负载为 50 kN。

(2)采用 FESEM 对 PEEK 复合层摩擦后的表面形貌和元素分布进行分析。

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能

摩擦磨损试验结果如图 3 所示。在 2 970r/min



(c) Tilting pad thrust bearing

(d) Friction and wear test

图 2 烧结工艺、PEEK/铜-钢瓦块、可倾瓦块止推轴承及摩擦学试验示意图

Fig. 2 Diagram of sintering process, PEEK/Cu-steel tile, tilting pad thrust bearing and friction and wear test

表 2 摩擦磨损试验加载参数

Tab. 2 Load parameters of friction and wear test

Serial number	Time/min	Rotational speed/(r·min ⁻¹)	Load/kN	Remark
1	Start	500	1	—
2	5	1 000	10	—
3	10	2 000	15	—
4	15	2 970	20	—
5	20	2 970	30	Stop if the bearing is damaged
6	25	2 970	35	
7	30	2 970	40	
8	35	2 970	50	
9	40	2 970	50	Start heating
10	—	2 970	50	Stop:
				1. Bearing failure
				2. Oil temperature reaches preset temperature
				3. Temperature rise of oil is very slow

和 35 kN 的试验条件运行过程中,PTFE/PEEK 复合层可倾瓦块止推轴承的摩擦系数波动幅值较小(图 3c),且油箱温度随时间有规律地升高(图 3d)。结果表明,止推轴承的两摩擦副之间没有接触,形成了良好的动压润滑油膜。当载荷持续增加到 40 kN 时,摩擦系数突然增大,油温异常升高,表明随着载荷的增加,此试验条件下油膜形成的压力无法平衡外载荷,导致润滑油膜的破坏,两摩擦副直接接触而导致工作面失效。上述结果表明,PTFE/PEEK 复合层可倾瓦块止推轴承在此尺寸下无法承受 40 kN(单位载荷为 13.67MPa)的载荷。

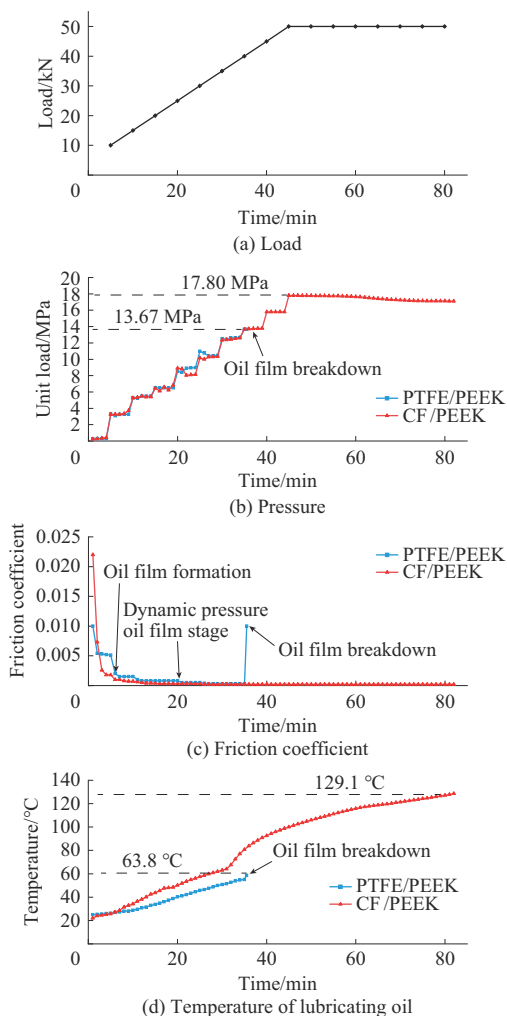


图3 可倾瓦块止推轴承的摩擦学试验

Fig. 3 Tribological testing of tilting pad thrust bearing

对于CF/PEEK复合层可倾瓦块止推轴承,从开始形成动压油膜到试验结束,其摩擦系数变化曲线始终保持稳定,近似于水平直线。在2 970 r/min和50 kN的试验条件下运行一段时间后,利用油箱内电阻丝对润滑油开始加热(此时油箱温度63.8 °C,图3d),在整个加热过程中,摩擦系数无任何变化,加热52 min后,油温上升速度缓慢,可以认为油箱中产生热量和散发热量逐渐达到动态平衡,故停止试验。此时,润滑油的温度达到129.1 °C(止推轴承的两摩擦副表面温度远高于129.1 °C)。结果表明:该尺寸下CF/PEEK复合层可倾瓦块止推轴承可承受50 kN载荷(单位载荷可达17.80 MPa),环境温度不低于129.1 °C。

2.2 可倾瓦块(PEEK/铜-钢)的表征

图4为复合层的SEM照片和元素分布图。由图4可知,两种复合层均结合良好,无孔洞等缺陷。

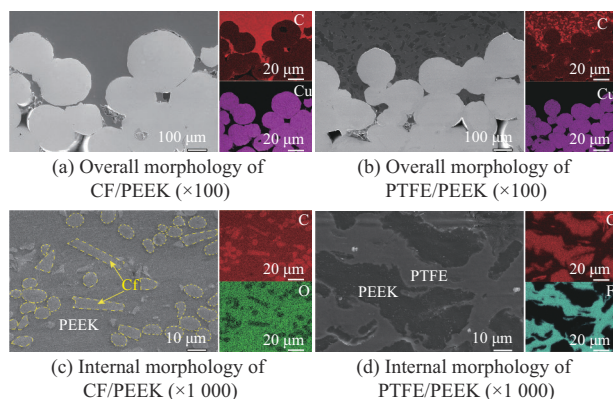


图4 CF/PEEK和PTFE/PEEK复合层的SEM照片和元素分布

Fig. 4 SEM photos and element distribution of CF/PEEK and PTFE/PEEK composite layer

在烧结过程中,PEEK基复合材料的液相渗透到多孔铜层间隙中,其与铜层之间形成了可靠结合(图4a和图4b)。图4c表明,CF在PEEK基体中分布均匀。图4d显示了PTFE/PEEK涂层的形貌和元素分布。根据C元素和F元素的分布,黑色颗粒为PEEK,灰色区域为PTFE,这表明PTFE以网状结构连续分布在复合层PEEK中。

2.3 PEEK基复合层的磨损表面分析

图5为CF/PEEK和PTFE/PEEK复合层的磨损表面形貌。如图5a和图5b所示,CF/PEEK复合层表面存在细微的磨损痕迹,主要是由电机启停过程引起的。在电动机启停的短时间内,由于润滑油供油滞后,此时无法形成充分的油膜,造成高速运转工况下止推轴承动静块两摩擦副直接接触,其表面上的微凸体相接触,在摩擦力的不断作用下可能会形成细小的磨屑,细小的磨屑在摩擦的过程中会充

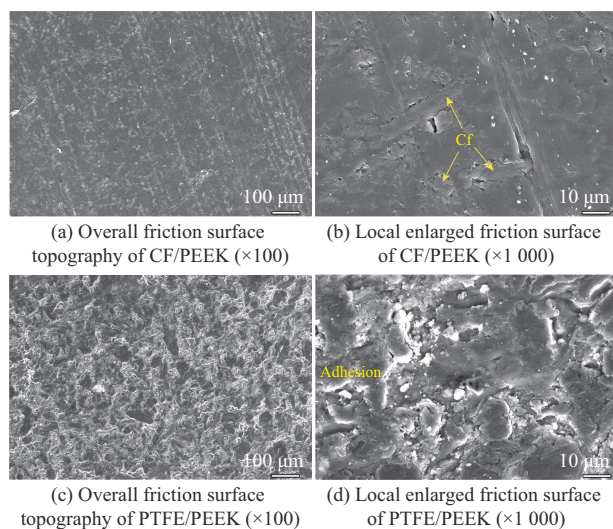


图5 CF/PEEK和PTFE/PEEK复合层的磨损表面

Fig. 5 Wear surface of composite layer of CF/PEEK and PTFE/PEEK

当第三体杂质磨损的作用,在摩擦副表面出现犁耕效应,形成沿滑动方向上细小的犁沟。

图6为复合层的磨损表面元素分布。表3为图6中各点EDS能谱分析结果。如图6a,图6b和图6c和表3可知,在CF/PEEK复合层表面观察到裸露的CF。CF作为一种硬质刚性材料,其加入提高了复合层的抗蠕变性能、耐压性能和强度,CF可以部分取代PEEK优先承担载荷^[20],减小了PEEK基体承受的压应力和剪切应力,提高了瓦块的承载能力,并且减少PEEK与钢表面的相互作用,降低复合层的黏着和磨损(图5b);同时复合层中的CF在摩擦过程中也会脱落(图6a),形成磨屑能够促进转移膜在对偶面的黏结,从而减缓复合层的磨损;逐渐暴露出来的CF也可以起到减摩润滑的作用,使两摩擦副之间的温度不至于太高。因此复合层表面经摩擦后无明显黏连和剥落现象。

对于PTFE/PEEK复合层,在摩擦磨损试验过程中,油膜被破坏,两摩擦副表面直接接触。PTFE/PEEK复合层表面存在明显的塑性变形和大面积黏

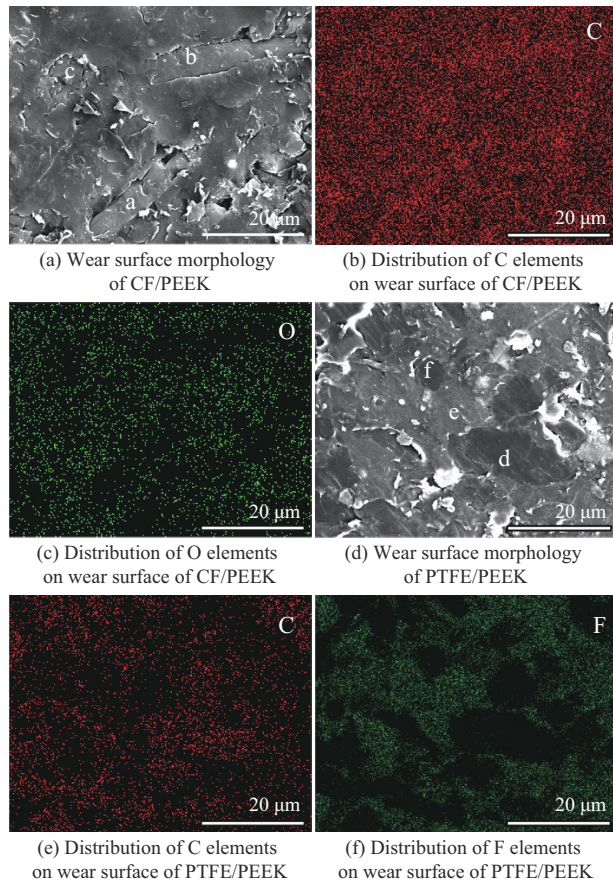


图6 CF/PEEK和PTFE/PEEK复合层的磨损表面元素分布
Fig. 6 Distribution of elements in wear surfaces of CF/PEEK and PTFE/PEEK composite layer

表3 图6中各点EDS能谱分析结果(at%)

Tab. 3 EDS analysis results of each point in Fig. 6 (at%)

Position	C	O	F
a	95.92	4.07	0.01
b	97.63	2.35	0.02
c	96.35	3.64	0.01
d	84.30	15.50	0.02
e	34.89	0.03	65.08
f	84.68	15.31	0.01

着剥落,是黏着和磨粒的混合磨损形式^[21-22](图5c和图5d)。如图6d~图6f以及表3所示,摩擦后复合层表面出现了大面积的PTFE黏着剥落现象。由于PTFE承受大负荷的能力较低,在摩擦过程中PTFE易发生塑性变形,只起到润滑的作用。在高速、高载荷和高温度的试验环境下,止推轴承因PTFE/PEEK复合层磨损严重而报废。

3 结论

设计并制造了一种PEEK/铜-钢三层复合止推轴承瓦块,在模拟轴承实际工况的条件下研究了CF/PEEK和PTFE/PEEK复合层的摩擦学性能。为PEEK基可倾瓦块止推轴承在潜油电泵上的应用提供了基础理论研究,得出以下结论。

(1)在低碳钢基体上烧结铜粉层,以增强PEEK复合材料与基体的结合强度,采用压制烧结法制备了CF改性的PEEK复合层。

(2)PTFE对提升PEEK复合材料的摩擦学性能的作用有限,在13.67 MPa的单位载荷下,PTFE/PEEK复合材料磨损严重,导致轴承失效。而CF在提高PEEK复合材料的强度和承载能力的同时也具有润滑效果,从而显著改善PEEK复合材料的摩擦学性能。在129.1℃的工作环境温度下,CF/PEEK复合层能够至少承受17.80 MPa的单位载荷。

(3)PTFE/PEEK复合层的磨损机理主要是黏着和磨粒的混合磨损。CF/PEEK复合层磨损面无明显黏附和剥落现象,主要表现为磨粒磨损机理。因此,CF/PEEK复合层具有更高的承载能力和更优的耐温性能。

参考文献

- [1] 曲述曾. 我国弹性金属塑料瓦运行及生产情况[J]. 大电机技术, 1992(5):7-12.
QU Shuzeng. The operation and manufacture of the elastic metallic plastic pads for thrust bearings of hydrogenerators in China[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1992(5):7-12.
- [2] 王初铭. 弹性金属塑料瓦运行与技术分析[J]. 大电机技术, 1996(3):1-8.

- WANG Chuming. Operation and technic analysis of EMP-segments [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1996(3):1-8.
- [3] 胡荣华. 船用滑动推力轴承结构设计研究[J]. 船舶工程, 2007, 29(5):60-64.
- HU Ronghua. Structural design research of the marine thrust bearing[J]. Ship Engineering, 2007, 29(5):60-64.
- [4] 温丹丹. 环保型三层复合材料及其摩擦磨损性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- WEN Dandan. Research on environmental protection three-layer composite and its friction and wear properties[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [5] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- WEN Shizhu. Tribological principle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [6] PUHAN D, WONG J S S. Properties of polyetheretherketone (PEEK) transferred materials in a PEEK-steel contact[J]. Tribology International, 2019, 135:189-199.
- [7] ZHU J J, MA L, DWYER-JOYCE R. Friction and wear behaviours of self-lubricating peek composites for articulating pin joints[J]. Tribology International, 2020, 149. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.04.025.
- [8] HINTZE M, ELIASSEN N, SIVEBAEK I. Wear and friction of PEEK composites, dry or lubricated[J]. Wear, 2023, 534. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205135.
- [9] JIN Z Y, YAO Z Q, SUN Y F, et al. Loading capacity of PEEK blends in terms of wear rate and temperature[J]. Wear, 2022, 496. DOI:10.1016/j.wear.2022.204306.
- [10] TATSUMI G, RATOI M, SHITARA Y, et al. Mechanism of oil-lubrication of PEEK and its composites with steel counterparts[J]. Wear, 2021, 486. DOI:10.1016/j.wear.2021.204085.
- [11] NIKONOVICH M, RAMALHO A, EMAMI N. Effect of cryogenic aging and test-environment on the tribological and mechanical properties of PEEK composites[J]. Tribology International, 2024, 194. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109554.
- [12] XU Y F, ZHANG K Y, WU H, et al. Optimization and tribological performance of PEEK based composite coatings reinforced with PTFE for friction pairs of aviation hydraulic pumps[J]. Tribology International, 2024, 195. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109661.
- [13] DHAKAL N, ESPEJO C, MORINA A, et al. Tribological performance of 3D printed neat and carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Tribology International, 2024, 193. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109356.
- [14] LI F F, HU Y, HOU X C, et al. Thermal, mechanical, and tribological properties of short carbon fibers/PEEK composites[J]. High Performance Polymers, 2018, 30(6):657-666.
- [15] LIN L Y, SCHLARB A K. Recycled carbon fibers as reinforcements for hybrid PEEK composites with excellent friction and wear performance[J]. Wear, 2019, 432. DOI: 10.1016/j.wear.2019.202928.
- [16] LI J, LIU H, WANG Y, et al. Strength-plasticity synergetic CF/PEEK composites obtained by adjusting melt flow rate[J]. Polymer, 2024, 305. DOI:10.1016/j.polymer.2024.127186.
- [17] CHEN B B, WANG J Z, YAN F Y. Comparative investigation on the tribological behaviors of CF/PEEK composites under sea water lubrication[J]. Tribology International, 2012, 52:170-177.
- [18] ZHAO X N, GUAN J X, YANG Z, et al. Orientation of carbon fiber in magnesium-doped hydroxyapatite and its effect on mechanical and tribological properties of carbon fiber reinforced composites[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 306. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128078.
- [19] 邓争荣, 杨世平, 周杨帆, 等. 舰船用滑动轴承轴瓦 PEEK 基复合材料制备及性能研究[J]. 今日制造与升级, 2024(2):1-3.
- DENG Zhengrong, YANG Shiping, ZHOU Yangfan, et al. Study on preparation and properties of PEEK-based composites for marine sliding bearing bush[J]. Manufacture & Upgrading Today, 2024(2):1-3.
- [20] ZHANG K, LIN Z B, CHEN J X, et al. An ingenious synergistic solid lubricant of copper and graphite for exceptional wear resistance of the SCF/PTFE/PEEK composite[J]. Tribology International, 2024, 195. DOI:10.1016/j.triboint.2024.109583.
- [21] 万磊, 刘丽斌, 马越, 等. 碳化硅陶瓷与聚醚醚酮复合材料的摩擦磨损特性研究[J]. 轴承, 2020(5):22-26.
- WAN Lei, LIU Libin, MA Yue, et al. Study on friction and wear characteristics of SiC ceramics/PEEK composites[J]. Bearing, 2020(5):22-26.
- [22] GAO P Y, WANG Y J, MENG D Z, et al. Preparation of CF/PEEK and study on friction performance[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 714(3). DOI: 10.1088/1755-1315/714/3/032052.