

超声电机聚酰亚胺摩擦材料的设计与研究*

曹鑫鑫¹, 赵 盖^{1,2}, 李兴明¹, 丁庆军¹

(1. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

(2. 中国科学院兰州化学物理研究所润滑材料全国重点实验室 兰州, 730000)

摘要 聚酰亚胺(polyimide, 简称 PI) 分子主链中含有稳定的芳杂环结构, 在高温状态下表现出较好的机械强度和耐磨性。针对空间超声电机对长寿命摩擦材料的需求, 在纤维增强和纳米改性的基础上, 研究二硫化钼含量对 PI 材料摩擦磨损性能的影响规律。首先, 测试干摩擦条件下不同含量二硫化钼对 PI 复合材料摩擦磨损性能的影响; 其次, 通过扫描电子显微镜观察复合材料磨损表面, 揭示材料的损伤机制以及转移膜的形成过程; 最后, 优选磨损率最低的 PI 复合材料, 对超声电机摩擦材料进行加速寿命试验, 将摩擦材料切片粘贴在定子磷青铜表面, 配副为微弧氧化后铝合金转子, 验证该材料在超声电机中应用的可行性。结果表明: 随着二硫化钼含量的增加, 复合材料的摩擦因数和磨损率均有明显下降。使用新型摩擦材料的 TRUM-60 型电机经过 552 h 磨合后, 摩擦材料深度仅下降 40.28 μm , 占材料总厚度的 4.03%, 电机输出机械特性依旧保持稳定。

关键词 聚酰亚胺; 摩擦磨损; 二硫化钼; 转移膜; 超声电机

中图分类号 TH145.42

引 言

PI 相对分子质量较大, 其分子间的共价键结合强度大, 通常在高温状态下也拥有较好的机械强度以及耐磨性^[1-2], 已成为一种广泛应用的工程材料。然而, 纯 PI 的耐磨性较差^[3-4], 针对不同的应用环境, 需要添加功能填料进行填充改性。通常利用纤维对 PI 进行增强, 添加纳米颗粒和固体润滑剂以提高材料耐磨性, 协同改性后的材料综合性能可满足使用要求。

目前研究中常使用各种微尺度纤维来增强 PI 性能, 以提高其承载能力、减少摩擦过程中滑动表面的剪切应力和摩擦力。Zhao 等^[5]通过碳纤维、芳纶纤维增强 PI, 以提高机械强度和耐磨性能, 玻璃纤维(glass fiber, 简称 GF) 增强后的 PI 复合材料具有更高的弹性模量、更低的摩擦因数和更强的耐磨性能。Das 等^[6]分别使用黄麻纤维和 GF 进行复合材料增强, 结果表明 GF 具有更好的增强效果。牛永平等^[7]通过在聚四氟乙烯中添加纳米氧化铝(Al_2O_3) 颗粒, 使材料在保持低摩擦因数的同时提高了耐磨性能。张宏飞等^[8]在聚四氟乙烯中填充少于 10% 的聚苯酯(polybenzoate, 简称 POB), 提高了材料摩擦因数, 降低了材料的磨损率。

为进一步降低摩擦材料的磨损, 通常采用润滑剂来实现这一目的, 但在空间环境中, 液体润滑剂常常会受到限制^[9], 目前普遍的方法是使用固体润滑剂。聚合物中最常用的固体润滑剂有二硫化钼(MoS_2)^[10]、石墨^[11]以及氮化硅^[12]等。Wan 等^[13]通过在 PI 中添加纳米石墨, 降低了复合材料的摩擦因数和磨损率, 同时提升了热稳定性。目前, 有关不同填料和纤维对聚合物复合材料的减磨机理已有广泛研究, 但关于固体润滑剂、纤维增强以及纳米颗粒协同改性聚合物摩擦材料的研究较少。

在本研究中, 针对空间长寿命超声电机的特殊需求, 在纤维增强和纳米改性的基础上, 重点采用 MoS_2 对 PI 进行协同改性, 研究改性后 PI 复合材料的摩擦学性能演变规律, 旨在优选最低磨损率的材料。随后, 通过电机机械特性测试, 验证该摩擦材料的性能。

1 试验介绍

1.1 试验材料

选用 YS20 型 PI 粉末(平均粒径小于 75 μm , 密度为 1.4 g/cm^3 , 上海合成树脂研究所) 为基体, 图 1 为 PI 粉末化学结构。

* 国家自然科学基金资助项目(52075247, U2037603); 中央高校基本科研业务费资助项目(NS2022016); 南京航空航天大学研究生科研与实践科研创新计划资助项目(xcxjh20210110)

收稿日期: 2022-08-06; 修回日期: 2022-12-13

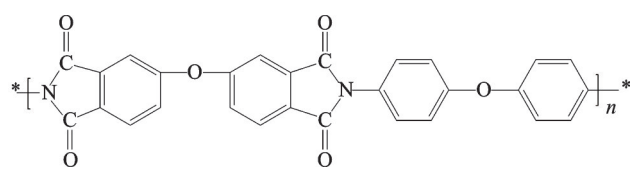


图1 PI粉末化学结构

Fig.1 Chemical structure of PI powder

选用MoS₂粉末(纯度为99.5%,粒径小于2 μm,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)、GF(直径为10 μm,长径比约为10:1,南京玻璃纤维设计研究院)、POB纤维(长度约为10 μm,上海多源塑胶原料有限公司)和纳米Al₂O₃颗粒(α相,纯度为99.99%,直径为50 nm,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)为改性材料。图2为改性材料的扫描电子显微镜(scanning electron microscope,简称SEM)图像。

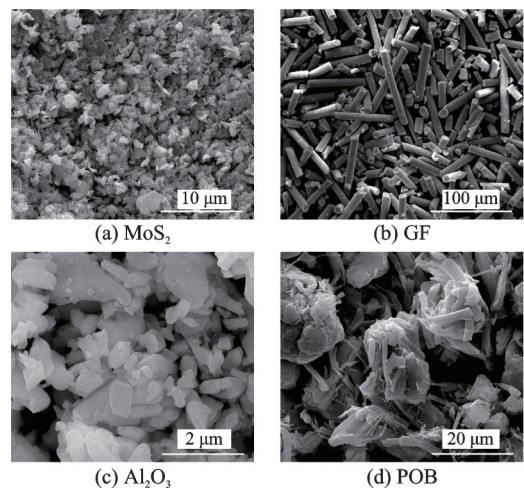


图2 改性材料的SEM图像

Fig.2 SEM images of modified materials

1.2 PI复合材料制备

采用湿混-热压烧结法制备复合材料,将PI粉末与各种填料按比例混合,表1为PI复合材料配比表。在无水乙醇中进行超声分散和机械搅拌处理,混合分散4 h;将得到的固液混合物在80 ℃下进行烘干至液体完全挥发,然后将复合粉末过200目筛;将筛分

表1 PI复合材料配比表						
Tab.1 Ratio of PI composite materials						
材料	含量(质量百分比)/%					
PI	75	74	72	70	68	66
MoS ₂	0	1	3	5	7	9
GF	10	10	10	10	10	10
Al ₂ O ₃	5	5	5	5	5	5
POB	10	10	10	10	10	10

后的粉末放入模具进行热压成型,热压温度为375 ℃,保温1 h后自然冷却脱模,得到PI复合材料。

1.3 摩擦磨损性能测试

使用多功能摩擦磨损试验机(MFT5000型,美国Rtec-Instruments Inc公司)进行摩擦学性能测试,图3为Rtec多功能摩擦磨损试验机。直径为6.35 mm的GCr15轴承钢球具有硬度高、耐磨性好、抗腐蚀性能优和性能稳定等特点,是评估材料耐磨性的理想配副。选择该钢球作为摩擦配副材料,以考察不同含量MoS₂对于复合材料摩擦学性能的影响规律。

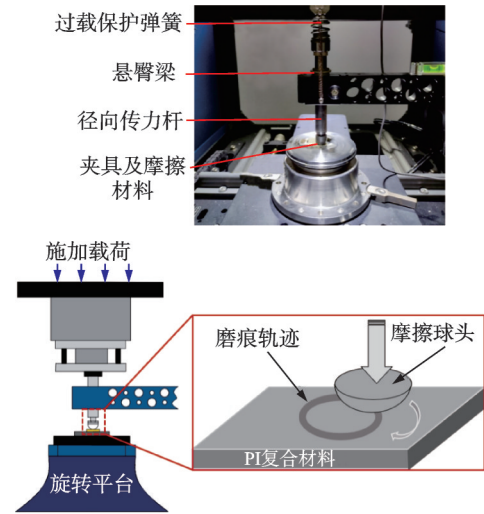


图3 Rtec多功能摩擦磨损试验机

Fig.3 Rtec multifunctional friction and wear tester

根据摩擦学性能测试标准ASTM G99-23确定摩擦磨损试验参数,表2为试验条件参数。同一组分下的摩擦测试均在同一工况下进行3次重复试验,以确保试验数据的可靠性和准确性。

表2 试验条件参数	
Tab.2 Testing condition parameters	
测试参数	数值
载荷/N	5
线速度&转速/(r·min ⁻¹)	0.063 & 200
旋转半径/mm	3
测试时长/min	60
测试温度/℃	25
相对湿度/%	45~50
采样频率/Hz	360
摩擦对偶球尺寸/mm	∅6.35
对偶球材料	GCr15
对偶球表面粗糙度/μm	0.05
对偶球硬度/HRC	63~65

2 结果与讨论

2.1 摩擦性能研究

图4为不同MoS₂含量下PI复合材料性能。摩擦因数为预压力与摩擦力的比值,为无量纲单位。图4(a)为干摩擦条件下MoS₂含量(质量百分数,下同)对PI复合材料摩擦因数的变化曲线,随时间变化过程可以分为磨合阶段与稳定阶段。磨合阶段表现为摩擦因数的明显上升,稳定阶段下复合材料均能得到较为稳定的摩擦因数。

为更好地分析MoS₂含量对复合材料摩擦因数的影响,选取稳定阶段1 500~3 500 s范围内的平均摩擦因数进行对比分析,见图4(b)。随着MoS₂含量的增加,复合材料的摩擦因数逐渐下降,且可更快地进入稳定阶段。原因是MoS₂容易聚集在界面或转移在对偶球头表面,减少了摩擦副间的直接接触,降低了摩擦因数,同时增加了稳定性。未添加MoS₂或质量分数过小会导致润滑效果下降,难以形成转移膜或形成转移膜的速度较慢,因此难以快速达到稳定阶段。当MoS₂质量分数为9%时,相较于未添加MoS₂的PI复合材料,摩擦因数下降了23.62%。

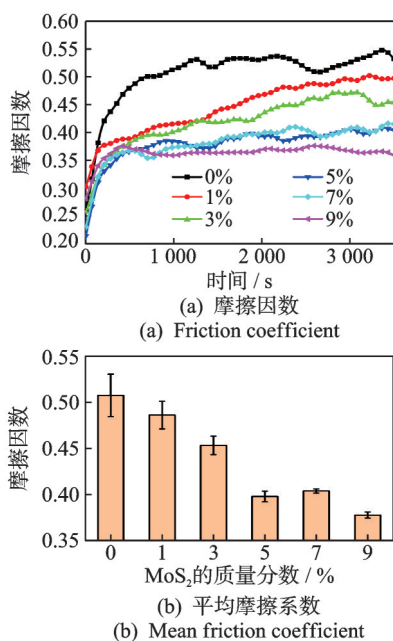


图4 不同MoS₂含量下PI复合材料性能
Fig.4 Performance of PI composites with different MoS₂ contents

2.2 磨损性能研究

通过测量磨痕宽度和深度,磨损率 K 为

$$K = \frac{\Delta V}{PL} \quad (1)$$

其中: ΔV 为样件磨损体积,单位为mm³; P 为载荷,

单位为N; L 为总滑动距离,单位为m。

磨损体积由横截面面积乘以磨损轨迹的周长计算得出^[5],即

$$\Delta V = \left[\frac{\pi (R/2)^2}{180} \arcsin \frac{b}{R} - \frac{b \sqrt{(R/2)^2 - (b/2)^2}}{2} \right] \pi d \quad (2)$$

其中: $R=6.35$ mm,为摩擦球直径; b 为磨痕宽度; d 为旋转直径。

图5为计算得到的不同MoS₂含量下PI复合材料磨损率。当MoS₂含量为0~5%时,材料磨损率随着MoS₂含量的增加迅速下降,这是由于MoS₂转移膜的形成过程降低了PI复合材料的磨损,摩擦副间转移膜不稳定导致了磨痕表面磨损率较大;当含量为5%~9%时,磨损率下降速度减小并逐渐趋于稳定,说明稳定后的转移膜对复合材料的磨损影响较小。当MoS₂质量分数为9%时,相较于未添加MoS₂的PI复合材料,磨损率降低了52.88%。

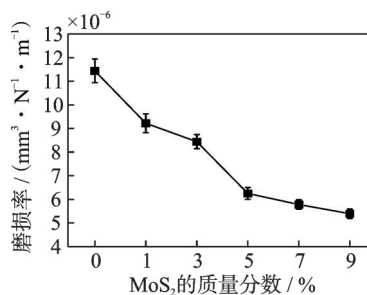


图5 不同MoS₂含量下PI复合材料磨损率
Fig.5 Wear rate of PI composites with different MoS₂ contents

2.3 磨损形貌分析

图6为不同MoS₂含量下PI复合材料磨痕SEM图像。分析发现,在磨痕处常伴有微小磨屑产生,这是因为复合材料在反复的剪切应力作用下产生了磨粒磨损。MoS₂含量在0~5%时,观察到材料表面的沟槽以及较大的划伤情况,图中可以明显看到断裂以及深的沟槽。这表明MoS₂含量在0~5%时,PI复合材料的抗磨损性能较差,这主要是由于MoS₂含量较低,摩擦副之间的转移膜不稳定。

MoS₂含量在7%~9%时,随着MoS₂含量的不断增加,复合材料表面较光滑并无明显磨损痕迹,材料表面的沟壑、划伤和粘着磨损现象也得到明显改善。局部裂纹变为塑性变形,长且深的划伤也变为短且浅的微擦伤。这是由于材料表面在进入稳定磨损阶段后形成了稳定的转移膜,转移膜层间较弱的剪切力使得层与层之间可以切向滑移,减少了摩擦球头和材料的直接接触,避免了材料的进一步磨损。

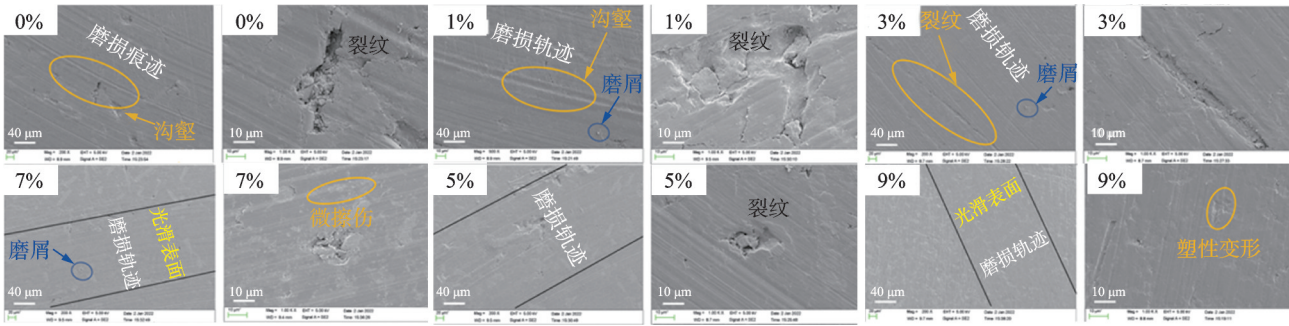


图6 不同MoS₂含量下PI复合材料磨痕SEM图像

Fig.6 SEM images of wear scars of PI composites with different MoS₂ contents

图7为不同MoS₂含量下摩擦球头SEM与能量色散谱(energy dispersive spectroscopy,简称EDS)。整体来看,当无MoS₂添加时,未见转移膜形成;而当添加MoS₂时,有磨屑转移到球头上。图7(b)中,开始出现初始圆形转移膜痕迹,原因是MoS₂的含量较低,难以形成稳定且均匀的转移膜。图7(c)、(d)中,可以明显看出均匀且稳定的转移膜,说明随着MoS₂

含量的增加,转移膜的稳定性逐渐提高,降低了接触界面间磨损。分别对图7(a)、(d)进行EDS点扫分析,结果见图7(e)、(f)。无转移膜的图7(a)球头上,Fe质量占比高达80.59%。图7(d)转移膜上,Fe质量占比仅有49.24%,且检测出Mo、Al等元素,均为PI复合材料中改性剂中所含元素。此外,C和O含量也有明显的提升。

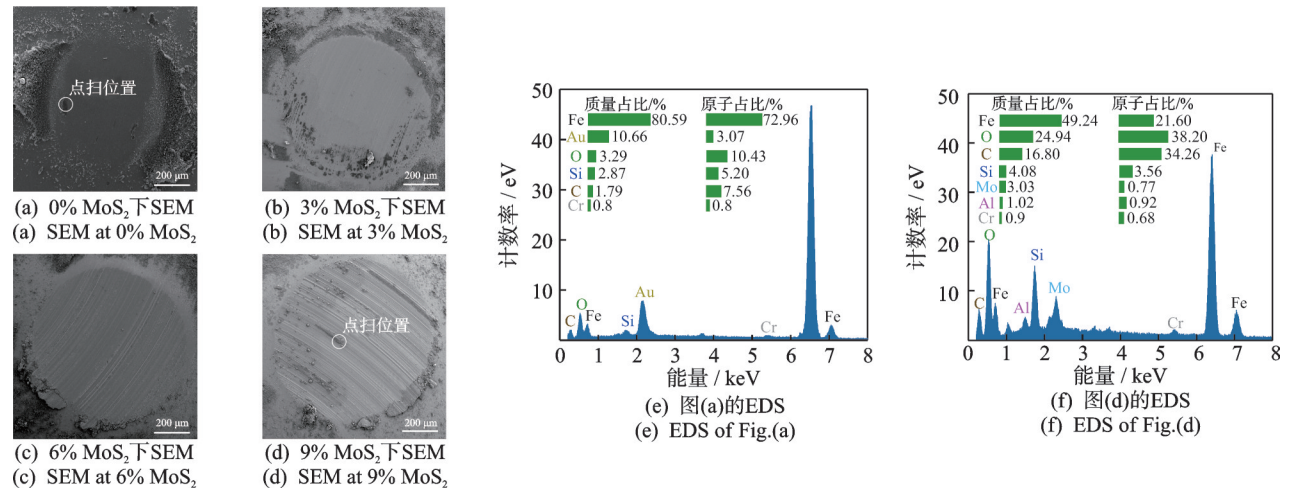


图7 不同MoS₂含量下摩擦球头SEM与EDS

Fig.7 SEM and EDS of friction ball with different MoS₂ contents

3 超声电机应用研究

行波型超声电机摩擦界面特性决定着其机械输出特性和使用寿命^[14-15]。笔者提出将含有MoS₂的PI复合材料粘贴在磷青铜定子上,摩擦材料厚度为1 mm,摩擦配副为微弧氧化后铝合金涂层转子,Al₂O₃涂层厚度为22 μm。图8为超声电机定/转子示意图及实物图。装配预压力为250 N,驱动频率设为41.5 kHz,电机转速为60 r/min。为考察新型PI材料在超声电机中的使用情况,在上述参数下进行不同时长电机性能测试,以研究电机的机械特性变化规律与材料磨损情况。

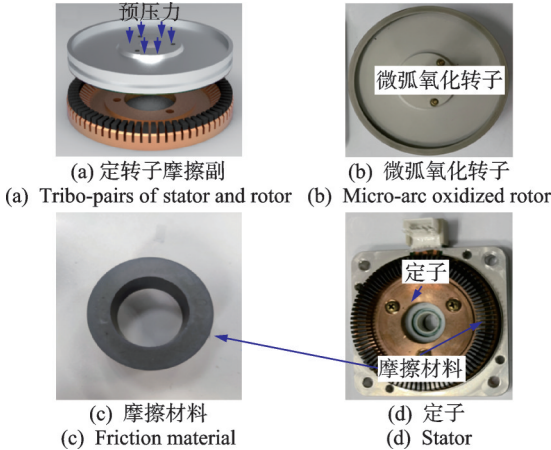


图8 超声电机定/转子示意图及实物图

Fig.8 Diagrams of ultrasonic motor stator/rotor

3.1 超声电机机械特性研究

分别以24、48、96和192 h为时间间距进行超声电机机械特性测试,图9为TRUM-60型超声电机不同时间的机械特性曲线。经过24 h不间断磨合后,复测了电机的机械特性。0和24 h的超声电机的堵转力矩分别为1.632 N·m和1.617 N·m,电机性能基本稳定。72~138 h后,机械特性曲线相较于24 h时略有下降,但基本处于稳定输出阶段。

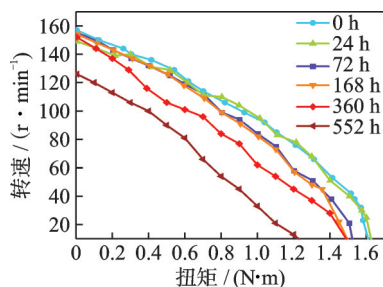


图9 TRUM-60型超声电机不同时间的机械特性曲线

Fig.9 Mechanical characteristics of TRUM-60 ultrasonic motor at different time

电机输出性能在运转360 h后出现下滑。经过552 h的持续运转、磨合约200万转后,再一次复测电机机械特性曲线,电机性能虽有明显下降,但仍处于良好水平,初始转速下降至125 r/min,堵转扭矩下降至1.21 N·m。相较于电机最优性能时,最大转速下降了20.9%,堵转扭矩下降了25.3%。主要原因是随着摩擦材料的逐渐磨损,材料中的MoS₂逐渐转移到转子表面,形成了稳定且均匀的转移膜,使得接触界面摩擦因数降低,电机的机械输出减小。

3.2 超声电机寿命预测

在测试机械特性时,采用三维超景深显微镜表征电机摩擦材料磨损表面三维形貌,并测量磨损深度,图10为磨痕深度二维曲线及三维形貌。整体来看,随着电机运转时间的延长,摩擦层厚度逐渐降低。在0~24 h时,电机处于磨合阶段,摩擦材料磨损较快,材料厚度每24 h下降5.02 μm;在24~72 h阶段,电机继续运行48 h后材料总体厚度下降了4.27 μm,材料厚度每24 h下降2.14 μm;随着时间继续延长,在72~168 h阶段,材料厚度仅下降2.22 μm,材料厚度每24 h下降0.56 μm。

图11为超声电机定子转移膜和转子摩擦界面形貌,转子摩擦材料表面有黑色固体润滑剂析出,随着时间的延长以及MoS₂析出,磨损逐渐降低。在无其

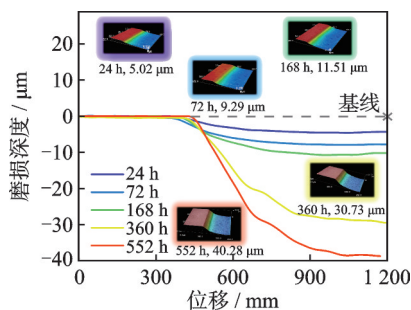


图10 磨痕深度二维曲线及三维形貌

Fig.10 Two-dimensional curves and three-dimensional topographies of wear scar depth

他因素影响的情况下,电机摩擦材料的磨损量较小,552 h磨合后摩擦材料的总磨损厚度为40.28 μm,占摩擦材料总厚度的4.03%。

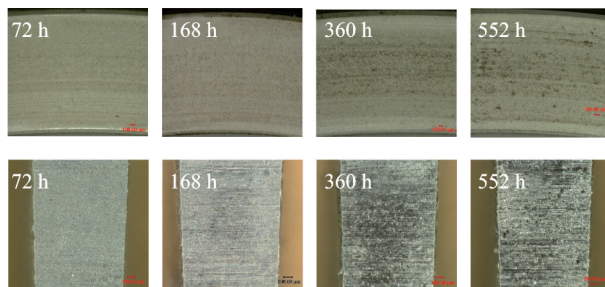


图11 超声电机定子转移膜和转子摩擦界面形貌

Fig.11 Transfer films of ultrasonic motor stator and morphologies of friction interface

从上述时间与摩擦材料厚度的关系分析得出,摩擦材料的可使用寿命与厚度大致符合如下线性关系,即

$$\Delta H = 0.0725T \quad (3)$$

其中: H 为材料厚度,单位为μm; T 为材料使用时间,单位为h。

在预压力为定值以及其他影响因素不变的情况下,电机在该工况下的总使用寿命为13 793 h。

4 结 论

1) MoS₂改性后PI复合材料摩擦因数降低,而稳定性提高,复合材料的磨损率变化趋势与摩擦因数的变化趋势一致。当MoS₂质量分数为9%时,复合材料的摩擦因数、磨损率相较于未添加MoS₂时分别降低了23.62%和52.88%。

2) 当MoS₂含量在0~5%时,PI复合材料表面难以形成稳定的转移膜,导致磨损表面出现微观断裂和粘着磨损。当MoS₂含量在5%~9%时,材料表面形成稳定且均匀的转移膜,磨痕变得相对光滑,

且磨损率明显降低。

3) 采用新型PI复合材料的TRUM-60型超声电机具有稳定的机械输出特性。经过552 h不间断运行后,电机摩擦材料仅磨损40.28 μm ,占总摩擦材料的4.03%,磨损率较低,超声电机的使用寿命得到显著提高。

参 考 文 献

- [1] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C, et al. Advanced polyimide materials: syntheses, physical properties and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(7): 907-974.
- [2] ZHANG C H, SU G D, CHEN H, et al. Synthesis of polyimides with low viscosity and good thermal properties via copolymerization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(3): 41303.
- [3] SAMYN P, SCHOUKENS G, VERPOORT F, et al. Friction and wear mechanisms of sintered and thermoplastic polyimides under adhesive sliding[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2007, 292(5): 523-556.
- [4] SAMYN P, DEBAETSP, VANCRAENENBROECK J, et al. Postmortem raman spectroscopy explaining friction and wear behavior of sintered polyimide at high temperature[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2006, 15(6): 750-757.
- [5] ZHAO G, DING Q J, WANG Q H. Comparative study on the tribological properties of the polyimide composites reinforced with different fibers[J]. Polymer Composites, 2016, 37(8): 2541-2548.
- [6] DAS S C, PAUL D, KHAN M A, et al. A comparative study between jute and glass fiber reinforced composites[J]. Key Engineering Materials, 2021, 891: 125-130.
- [7] 牛永平, 李香燕, 张军凯, 等. 接枝改性纳米氧化铝填充PTFE复合材料摩擦学性能研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(7): 5-8.
NIU Yongping, LI Xiangyan, ZHANG Junkai, et al. Tribological properties of PTFE composites filled with grafted alumina nanoparticles[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(7): 5-8. (in Chinese)
- [8] 张宏飞, 高永操, 王廷梅, 等. 聚苯酯填充聚四氟乙烯机械性能和摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(1): 97-101.
- ZHANG Hongfei, GAO Yongcao, WANG Tingmei, et al. Study on mechanical and tribological properties of POB filled PTFE composites[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(1): 97-101. (in Chinese)
- [9] REN Y L, ZHANG L, XIE G X, et al. A review on tribology of polymer composite coatings[J]. Friction, 2021, 9(3): 429-470.
- [10] YUAN H, LIU X H, MA L M, et al. Application of two-dimensional MoS_2 nanosheets in the property improvement of polyimide matrix: mechanical and thermal aspects[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 95: 220-228.
- [11] GOYAL R K, YADAV M. Study on wear and friction behavior of graphite flake-filled PTFE composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 127(4): 3186-3191.
- [12] 何小芳, 赵运启, 张崇, 等. 纳米氮化硅改性聚合物基复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(10): 96-99.
HE Xiaofang, ZHAO Yunqi, ZHANG Chong, et al. Advances in research on polymer/nano- Si_3N_4 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(10): 96-99. (in Chinese)
- [13] WAN C X, YAO C Y, LI J, et al. Friction and wear behavior of polyimide matrix composites filled with nanographite[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(18): 52058.
- [14] LI J B, ZENG S S, LIU S, et al. Tribological properties of textured stator and PTFE-based material in travelling wave ultrasonic motors[J]. Friction, 2020, 8(2): 301-310.
- [15] LI J B, ZHOU N N, YU A B, et al. Tribological behavior of CF/PTFE composite and anodized Al-rotor in traveling wave ultrasonic motors [J]. Tribology Letters, 2016, 65(1): 4.



第一作者简介:曹鑫鑫,男,1998年4月生,硕士生。主要研究方向为超声电机长寿命摩擦材料。
E-mail:1723662232@qq.com

通信作者简介:赵盖,男,1987年3月生,博士、教授。主要研究方向为聚合物基复合材料。

E-mail:zhaogai@nuaa.edu.cn