

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.019

真空 / 高低温环境中 PI 基复合材料的摩擦学特性

刘晓亮,赵新学,孙胃涛,章健

(滨州学院机电工程学院,山东滨州 256600)

摘要:以聚酰亚胺(PI)为基体,添加不同功能填料,通过调整组分比例制备了 PI 基复合材料,作为超声电机用摩擦材料,利用高温摩擦试验机和真空 / 高低温复合环境测试系统,分别研究了环境温度和真空度对 PI 基复合材料摩擦学性能的影响规律,揭示了不同环境中材料的摩擦磨损机理。实验结果表明,在常压、30~120℃环境中,PI 基复合材料的稳定系数为 0.95,变化系数为 0.97,其具有稳定的摩擦特性;同时,完整均匀转移膜的形成极大地降低了复合材料的磨损率,磨损机制主要表现为磨粒磨损和粘着磨损。在高真空度环境中,环境温度降低会减小界面实际接触面积,摩擦系数相应减小;空气和水蒸气介质稀薄,导致转移膜较难形成,随着环境温度的降低,复合材料的磨损率呈现先减小后增大的趋势,与摩擦副的磨合期延长,磨损机制主要表现为磨粒磨损和疲劳磨损。完整、均匀转移膜的形成可以有效降低接触界面的磨损率并稳定摩擦系数。

关键词:聚酰亚胺基复合材料;环境温度;真空度;摩擦磨损机理

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0109-06

Tribological Characteristics of PI Matrix Composites under Vacuum/High and Low Temperature Environments

Liu Xiaoliang, Zhao Xinxue, Sun Weitao, Zhang Jian

(College of Electromechanical Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

Abstract : Using polyimide (PI) as the matrix, adding different functional fillers, and adjusting the proportion of components, PI matrix composites were prepared as friction materials for ultrasonic motors (USM). Using a high temperature friction tester and vacuum/high and low temperature composite environment test system, the effects of ambient temperature and vacuum degree on the tribological properties of PI matrix composites were studied, and the friction and wear mechanisms of composites in different environments were revealed. The experimental results show that at atmospheric pressure, 30–120℃ environment, the stability coefficient of PI-based composites is 0.95 and the change coefficient is 0.97, which has stable friction characteristics. The formation of a complete and uniform transfer film greatly reduces the wear rate of the composite. The wear mechanism is mainly characterized by abrasive particles wear and adhesive wear. In high vacuum degree environment, the reduction of ambient temperature reduces the actual contact area of the interface, and the friction coefficient decreases accordingly. The air and water vapor media are thin, which makes the transfer film difficult to form. With the decrease of the ambient temperature, the wear rate of PI-based composite decreases firstly and then increases, and the running-in period of the tribo-pairs is prolonged. The wear mechanism is mainly abrasive particles wear and fatigue wear. The formation of a complete and uniform transfer film can effectively reduce the interfacial wear rate and stabilize the interfacial friction coefficient.

Keywords : polyimide matrix composite ; ambient temperature ; vacuum degree ; friction and wear mechanism

作为精密驱动的主要功能部件,超声电机(USM)在航空航天器的高精度运动和定位控制等方面得到广泛应用。USM 主要依靠定子与摩擦材

料间的能量转换和运动传递输出力或力矩,实现负载的精确运动和定位控制^[1-2]。因此,摩擦材料的力学性能、摩擦磨损特性和环境适应性等指标参数对

基金项目:国家自然科学基金项目(52075047),山东省重点研发计划项目(2018GNC112003),滨州学院博士科研启动基金项目(2019Y25)

通信作者: 刘晓亮,博士,副教授,主要从事表面工程技术和精密驱动功能部件的应用研究

收稿日期: 2022-06-27

引用格式: 刘晓亮,赵新学,孙胃涛,等. 真空 / 高低温环境中 PI 基复合材料的摩擦学特性[J]. 工程塑料应用,2022,50(9):109–114.

Liu Xiaoliang, Zhao Xinxue, Sun Weitao, et al. Tribological characteristics of PI matrix composites under vacuum/high and low temperature environments[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):109–114.

USM 的输出性能至关重要,尤其是服役于真空、高低温交变复合环境中时,需重点考虑环境因素对接触界面摩擦磨损特性的影响^[3-4]。

近年来,USM 的研究工作主要集中于 USM 的运动原理揭示、动力学模型建立和摩擦材料选择等方面^[5-7],通过纤维增强和功能改性等方法制备的聚四氟乙烯 (PTFE)、聚酰亚胺 (PI) 和酚醛树脂等高分子复合材料得到广泛应用^[8-10]。同时,精密微细加工技术的不断发展促使表面织构技术成功应用于 USM 定/转子接触界面上,USM 的能量转换效率和输出性能得到大幅提升^[11-13]。随着我国探月工程、载人航天和火星探测等深空探测计划的陆续实施,对航天器精密驱动功能部件的性能指标提出更高要求,尤其是摩擦材料在真空、高低温交变环境中的摩擦学特性演变规律成为近年来的研究热点^[14-16]。真空条件下,定子表面质点的超声振动所引起的减摩效应减弱、环境温度对摩擦材料摩擦学性能的影响、表面织构影响摩擦界面的接触状态,以及激振频率、电压幅值等输入参数和组装工艺参数等因素,均影响 USM 的输出性能并改变摩擦材料的摩擦磨损机理^[17-20]。

前期工作中,笔者重点研究了 PI 基复合材料的摩擦学性能及其对 USM 的能量转换效率和机械输出性能等指标的影响规律,通过引入表面织构技术优化界面接触状态、调整输入参数和工艺参数等改善了 USM 的宏观性能指标^[21-23],但并未就摩擦材料的摩擦磨损机理展开详细分析。笔者以热压烧结制备的改性 PI 基复合材料为研究对象,通过高温摩擦磨损实验和真空、高低温复合环境实验,利用界面摩擦系数变化和表面形貌表征等分析方法,从界面摩擦磨损机理入手,研究了环境参数对 PI 基复合材料和磷青铜平销摩擦副的界面摩擦系数和磨损率的影响规律。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PI 粉末: 粒径 < 75 μm , 上海合成树脂研究所;

PTFE 粉末: 粒径 < 75 μm , 大金氟化工(中国)有限公司;

碳纤维 (CF): 长度 20 ~ 50 μm , 直径 7 μm , 南通森友炭纤维有限公司;

纳米 SiO_2 粉末: 粒径 25 nm, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

对位聚苯酚 (PPL) 粉末: 粒径 75 μm , 南京智

宁新型材料有限公司;

石墨粉末: 粒径 50 ~ 70 μm , 南京智宁新型材料有限公司。

1.2 主要仪器与设备

高温烧结炉: 非标定制, 上海贯勃电炉有限公司;

高温摩擦磨损试验机: HT-1000 型, 兰州中科凯华科技开发有限公司;

真空/高低温复合环境测试系统: 非标定制, 中国科学院兰州化学物理研究所;

超景深数码显微镜: DSX1000 型, 日本奥林巴斯公司;

扫描电子显微镜 (SEM): Zeiss SUPRA 55 型, 德国卡尔·蔡司公司。

1.3 PI 基复合材料制备

PI 基复合材料采用热压烧结工艺并在高温烧结炉中制备, 其基体材料与功能填料的体积分数见表 1。通过调整基体材料和功能填料的比例, 提高材料的摩擦学性能; 通过纤维增强、固体润滑剂和纳米颗粒改性, 改善材料的各向异性、耐磨性和热稳定性。制备时, 首先将各组分混合均匀后研磨并过 200 目 (约 75 μm) 筛, 将原材料中的大颗粒筛分出来, 填充至截面尺寸为 60 mm × 60 mm 的模具中后, 施加 2.88 MPa 压强; 其次, 依次按照 20 min 加热至 250 $^{\circ}\text{C}$, 10 min 加热至 330 $^{\circ}\text{C}$ 并保温 10 min, 10 min 加热至 380 $^{\circ}\text{C}$ 并保温 1 h 的工艺参数烧结; 最后, 自然冷却至室温, 完成 PI 基复合材料的制备。烧结完成后将 PI 基复合材料粘贴在固定夹具上, 通过机加工和表面研磨等处理方式保证材料厚度为 0.2 mm, 表面粗糙度 $R_a < 1.0 \mu\text{m}$ 。

表 1 PI 基复合材料中基体材料与功能填料的体积分数 %

PI	PTFE	CF	PPL	石墨	SiO_2
60	9	15	10	5	1

1.4 性能测试

(1) 摩擦磨损表面形貌分析。

对 PI 基复合材料摩擦磨损表面进行喷金处理, 采用 SEM 对摩擦磨损表面表面形貌进行分析, 加速电压为 15 kV。

(2) 高温摩擦磨损性能测试。

采用高温摩擦磨损试验机测试 PI 基复合材料在 30 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$ 内的摩擦磨损性能, 该设备主要由计算机控制系统、高温炉、机械摩擦系统和加载机构四部分组成。制备的 PI 基复合材料作为摩擦材料应

用于超声电机时的额定组装预压力为 300 N,非工作状态时定子与转子间的接触面积为 297.2 mm^2 ,工作状态下定子中激出行波驱动时与摩擦材料的接触面积减小到 102.9 mm^2 ,此时摩擦材料层对应的压强为 2.91 MPa。摩擦实验选用截面尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的磷青铜平销作为对偶件,为保证摩擦材料所受的压强基本一致,实验中设定法向预压力为 45 N,对应压强为 2.81 MPa。同时,设定摩擦材料的转速为 160 r/min,测试时间为 120 min。

(3) 真空/高低温复合环境摩擦磨损性能测试。

采用真空/高低温复合环境测试系统测试高低温/真空复合环境下 PI 复合材料的摩擦磨损性能。实验中设定温度范围为 $-60 \sim 30^\circ\text{C}$,环境真空度为 10^5 Pa (常压) 和 10^{-5} Pa (高真空度),其它实验参数设定与高温摩擦磨损性能测试一致。

2 结果与讨论

2.1 常压、不同环境温度中 PI 基复合材料摩擦学特性的影响

PI 基复合材料摩擦实验工作原理示意图如图 1 所示。将环境实验舱内的摩擦副温度加热到设定值并保温 30 min,通过加载机构施加 45 N 的法向预压力,驱动摩擦材料做 160 r/min 的定速旋转,传感器采集接触界面间的实时摩擦力,计算机控制系统显示实时的摩擦系数曲线。

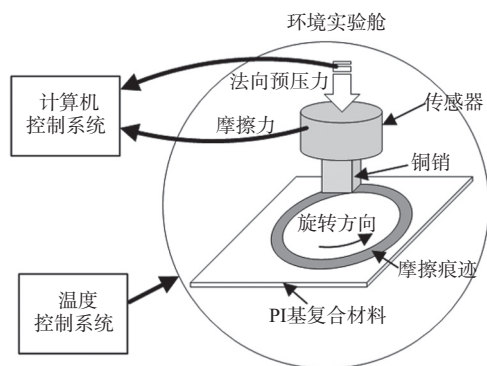


图1 PI基复合材料摩擦实验工作原理示意图

通过稳定系数 (δ_s) 和变化系数 (δ_a) 表征不同环境温度时接触界面间摩擦系数的稳定性^[24],磨损率 (K) 表征界面磨损特性,3 个参数的计算公式见式 (1)~式 (3):

$$\delta_s = \frac{\mu_a}{\mu_{\max}} \quad (1)$$

$$\delta_a = \frac{\mu_{\min}}{\mu_{\max}} \quad (2)$$

$$K = \frac{\Delta V}{FL} \quad (3)$$

式中: μ_a ——界面平均摩擦系数;

$\mu_{\max}$ ——界面最大摩擦系数;

$\mu_{\min}$ ——界面最小摩擦系数;

F ——法向预压力;

L ——相对运动总距离;

ΔV ——界面磨损体积,由超景深数码显微镜测量磨损轨迹的截面积与长度计算得到。

在常压、不同环境温度中 PI 基复合材料的平均摩擦系数和磨损率如图 2 所示。

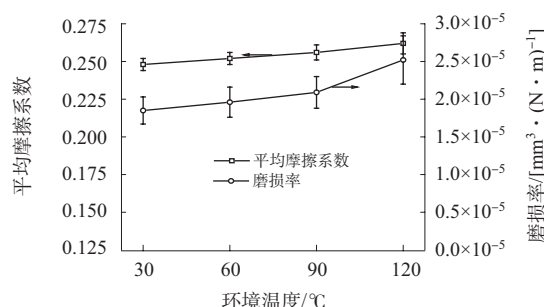


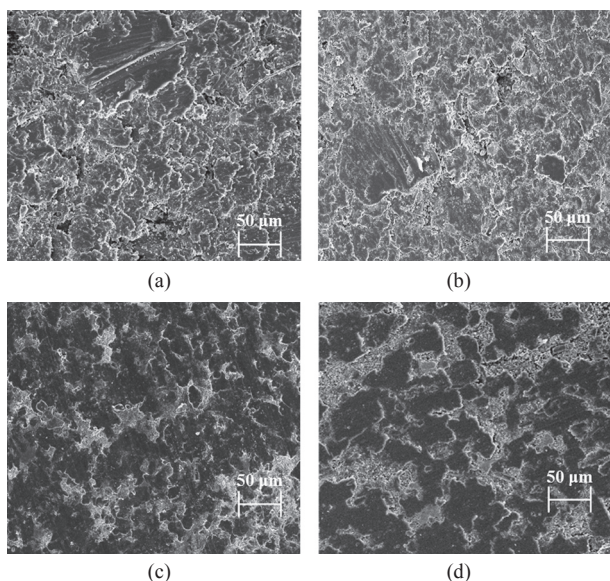
图2 常压、不同环境温度中 PI 基复合材料的平均摩擦系数和磨损率

在常压下,随着环境温度的升高,PI 分子链的热运动增强,导致材料的摩擦学性能和力学性能下降,因此,从图 2 可以看出,平均摩擦系数逐渐增大,但总体波动范围较小,在测试环境温度范围内的 δ_s 为 0.95, δ_a 为 0.97,说明制备的改性 PI 基复合材料在常压、 $30 \sim 120^\circ\text{C}$ 范围内具有较为稳定的摩擦特性。

PTFE、石墨和纳米 SiO_2 作为固体润滑剂,其滚动作用可以促进转移膜的快速形成,有效降低接触界面的磨损率,同时 PPL 可以改善材料的热稳定性。从图 2 可以看出,环境温度的升高会提高磨损率, 120°C 时的磨损率 [$2.52 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$],相比于 30°C 时的磨损率 [$1.85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$],提高了 36.2%,但整体仍保持较低的磨损率,说明制备的改性 PI 基复合材料具有良好的耐磨性能。

在常压、不同环境温度中 PI 基复合材料磨损表面形貌的 SEM 照片如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在常压下,当环境温度为 30°C 时,由于接触界面的动态接触和高频剪切作用,导致材料表面出现明显的剥层、刮擦和犁沟现象,此时界面磨损形式主要为磨粒磨损。随着环境温度的不断升高,材料的摩擦学性能出现不同程度的下降,相对运动时因高频剪切和机械嵌合作用产生的剥层状磨损明显,此时界面磨损形式主要为粘着磨损,磨损表面形貌区域平整、光滑,尤其是犁沟现象明显减弱,材料的整体磨损率明显增大。



环境温度: a—30℃; b—60℃; c—90℃; d—120℃

图3 常压、不同环境温度中PI基复合材料磨损表面形貌的SEM照片

2.2 高真空度、不同环境温度中PI基复合材料的摩擦学特性

真空环境中空气和水蒸气等介质非常稀薄,会影响接触界面间转移膜的形成,因摩擦产生的热量聚集也会改变界面的磨损机制^[25]。在高真空度(10^{-5} Pa)、不同环境温度中PI基复合材料的平均摩擦系数和磨损率如图4所示。

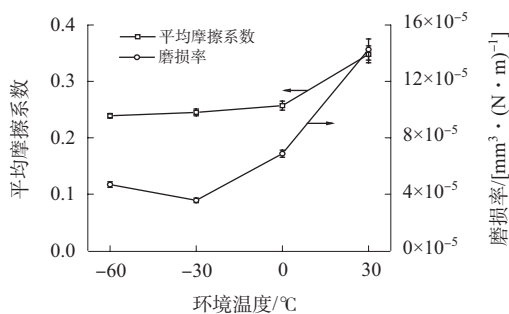


图4 高真空度、不同环境温度中PI基复合材料的平均摩擦系数和磨损率

从图4可以看出,在高真空度(10^{-5} Pa)环境中,随着环境温度的降低,PI基复合材料接触界面的平均摩擦系数逐渐减小。分析原因为:PI基复合材料在高真空度、低温环境中较难形成完整均匀的转移膜,磨合期内始终处于生成、破坏的循环,摩擦副的实际接触面积成为影响界面摩擦系数的主要因素。环境温度的降低会提高PI基复合材料的摩擦学性能,相同法向预压力作用下的材料弹性变形减小,实际接触面积也随之减小。

从图4还可以看出,接触界面的磨损率随着环

境温度的降低呈现出先减小后增大的趋势。真空环境中,稀薄的介质导致转移膜形成困难,同时,接触界面发生相对运动时产生的摩擦热量无法及时耗散而导致摩擦副的温度不断升高。因此,当环境温度为30℃时的主要磨损形式为粘着磨损。随着环境温度降低到-30℃,摩擦热量的及时耗散、摩擦学性能的改变以及界面接触应力的增大都会相应提高物理剪切、挤压等方式在对偶件表面形成转移膜的几率。此时,粘着磨损现象明显减弱,犁沟现象明显增加,界面磨损形式演变为磨粒磨损和疲劳磨损,此时,磨损率达到最小值。当环境温度进一步降低到-60℃时,材料表面硬度和脆性的增加导致增强纤维和磨屑引起的磨粒磨损现象更加明显,磨损率变大。

2.3 恒温、不同环境真空度中PI基复合材料的摩擦学特性

在温度30℃、不同环境真空度中PI基复合材料的平均摩擦系数和磨损率如图5所示。

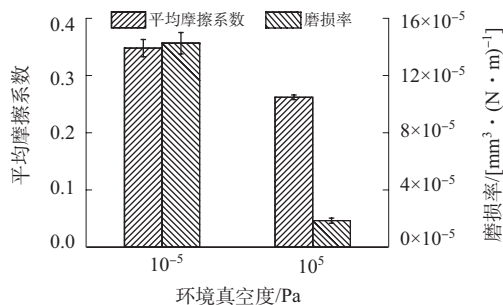


图5 温度30℃、不同环境真空度中PI基复合材料的平均摩擦系数和磨损率

从图5可以明显看出,在温度30℃下,常压(10^5 Pa)环境中的PI基复合材料的平均摩擦系数和磨损率分别为0.248和 $1.85 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,高真空度(10^{-5} Pa)环境的摩擦系数和磨损率分别为0.348和 $14.26 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,分别提高40.3%和670.8%,高真空度环境中的摩擦系数和磨损率明显增大。分析原因为:固体润滑剂PTFE、石墨和纳米 SiO_2 具有优异的低摩擦性能,在高真空度环境中,摩擦热量的聚集是影响材料磨损的主要因素,磨损形式以粘着磨损为主,导致接触界面具有相对较高的摩擦系数和磨损率。而常压环境中,摩擦副发生相对运动时,在法向预压力的作用下,界面微凸起间的相互嵌合、机械剪切以及挤压等综合作用可在对偶面上形成较为完整的转移膜,避免了PI基摩擦材料与磷青铜平销接触界面的直接对磨,可有效降低界面摩擦系数和磨损率。

2.4 不同温度和环境真空度中PI复合材料的摩擦学特性

不同温度和环境真空度中PI复合材料的摩擦系数曲线如图6所示。

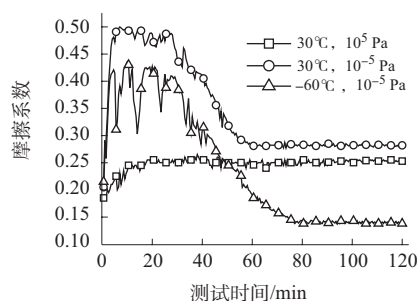


图6 不同温度和环境真空度中PI复合材料的摩擦系数曲线

从图6可以看出,在30℃、常压(10^5 Pa)环境中,由于空气和水蒸气介质的存在,使得PI基复合材料极易在铜销表面形成均匀的转移膜,磨合时间较短,且转移膜形成后使得界面磨损率明显降低,在法向预压力施加稳定后,PI复合材料的摩擦系数也相应快速趋于平稳,整体波动较小。在30℃、高真空度(10^{-5} Pa)环境中,空气稀薄,尤其是缺少了水蒸气的存在,使得磷青铜平销接触表面较难形成完整均匀的转移膜,没有被转移膜覆盖的表面对PI基复合材料造成持续的磨损,转移膜一直处于生成、破坏的交替过程中。可以看出,磨合初期的摩擦系数波动较大,且明显高于稳定后的摩擦系数。当环境温度从30℃降到-60℃时,该趋势更为明显。由此可见,完整均匀转移膜的形成可以有效降低界面磨损率并稳定界面摩擦系数。

3 结论

通过优化PI基体材料和功能填料配比制备了改性PI基复合材料,主要研究了环境温度和真空度对PI基复合材料接触界面摩擦系数和磨损率的影响规律,结合SEM表征的表面形貌,揭示了不同环境中材料的摩擦磨损机理,所得结论归纳如下:

(1) 常压环境中,对偶件表面可快速形成完整、均匀的转移膜,磨合时间较短且磨损率较低。环境温度的升高会提高分子链的热运动,降低材料的摩擦学性能,平均摩擦系数相应增大,但整体波动范围较小,磨损机制由磨粒磨损演变为黏着磨损主导。

(2) 真空环境中,由于空气和水蒸气介质的减少,磷青铜平销表面难以在短时间内形成完整均匀的转移膜,磨合时间相对较长且磨损率明显增大。此时,环境温度的降低一方面加快摩擦热量的耗散,另一方面提高材料的摩擦学性能,减小摩擦副的实

际接触面积,共同作用下导致摩擦系数减小,磨损机制主要表现为磨粒和疲劳磨损。

参考文献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Zhao Chunsheng, Ultrasonic motors technologies and applications [J]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] 刘晓亮, 章健, 孙胃涛. 改性聚酰亚胺基复合材料在超声电机中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2): 1-6.
Liu Xiaoliang, Zhang Jian, Sun Weitao. Application of modified polyimide based composites in ultrasonic motor [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2): 1-6.
- [3] Qu Jianjun, Tian Xiu, Zhou Ningning. Characteristics of traveling wave ultrasonic motor under atmosphere and vacuum cycle condition [J]. Vacuum, 2008, 82(11): 1302-1305.
- [4] Qu Jianjun, Zhang Yanhu, Tian Xiu, et al. Wear behavior of filled polymers for ultrasonic motor in vacuum environments [J]. Wear, 2015, 322-323: 108-116.
- [5] 尹育聪, 周盛强, 陈超, 等. 行波型旋转超声电机双路行波的运行机理 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 101-108.
Yin Yucong, Zhou Shengqiang, Chen Chao, et al. Operating mechanism of dual traveling wave of traveling wave rotary ultrasonic motor [J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(33): 101-108.
- [6] 陈超, 曾劲松, 赵淳生. 行波超声电动机的动力学模型 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 76-82.
Chen Chao, Zeng Jinsong, Zhao Chunsheng. Dynamic model of traveling-wave-type rotary ultrasonic motor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 76-82.
- [7] Olofsson J, Johansson S, Jacobson S. Influence from humidity on the alumina friction drive system of an ultrasonic motor [J]. Tribology International, 2009, 42(10): 1467-1477.
- [8] Ding Qingjun, Zhang Yudan, Zhao Gai, et al. Properties of POB reinforced PTFE-based friction material for ultrasonic motors [J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 37(7): 681-687.
- [9] Zhao Gai, Wu Chuhan, Zhang Liangchi, et al. Friction and wear behavior of PI and PTFE composites for ultrasonic motors [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29(5): 1487-1496.
- [10] Wang Qihua, Song Fuzhi, Zhang Xinrui, et al. Impact of fillers and counterface topography on wear behavior of PTFE polymers for ultrasonic motor [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(19). DOI:10.1002/app.44835.
- [11] Li Jinbang, Liu Shuo, Yu Aibing, et al. Effect of laser surface texture on CuSn6 bronze sliding against PTFE material under dry friction [J]. Tribology International, 2018, 118: 37-45.
- [12] Li Song, Duan Chunjian, Li Xiao, et al. The effect of different layered materials on the tribological properties of PTFE composites [J]. Friction, 2020, 8(3): 542-552.
- [13] Li Jinbang, Zeng Shuaishuai, Liu Shuo, et al. Tribological properties of textured stator and PTFE-based material in traveling wave

- ultrasonic motors[J]. Friction, 2020, 8(2):301–310.
- [14] Gu Dapeng, Duan Changsheng, Fan Bingli, et al. Tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric composites in vacuum[J]. Tribology International, 2016, 103:423–431.
- [15] 曲建俊,周宁宁,丁熠. 真空低温环境下超声马达驱动特性研究——空载特性[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(4):357–361.
- Qu Jianjun, Zhou Ningning, Ding Yi. Drive characteristics of ultrasonic motor under vacuum and low temperature——No-load characteristics[J]. Tribology, 2009, 29(4):357–361.
- [16] 罗婕,樊俊峰,司永顺,等. 超声电机在真空高低温环境下的驱动性能[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2):376–380, 424.
- Luo Jie, Fan Junfeng, Si Yongshun, et al. Driving performance investigation on ultrasonic motor under vacuum and high-low temperature environment[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2):376–380, 424.
- [17] Wang Qihua, Zheng Fei, Wang Tingmei. Tribological properties of polymers PI, PTFE and PEEK at cryogenic temperature in vacuum[J]. Cryogenics, 2016, 75:19–25.
- [18] Morita T, Takahashi S, Asama H, et al. Rotational feedthrough using an ultrasonic motor and its performance in ultra high vacuum conditions[J]. Vacuum, 2003, 70(1):53–57.
- [19] Qu Huajie, Wen Zhongpu, Qu Jianjun, et al. Study on effects of ultrasonic vibration on sliding friction properties of PTFE composites/phosphor bronze under vacuum[J]. Vacuum, 2019, 164:1–6.
- [20] Lee D J, Lee S K, Kim W S. Precise contour motion of XY stage driven by ultrasonic linear motors in a high vacuum environment[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(3):293–301.
- [21] Liu Xiaoliang, Zhao Gai, Qiu Jinhao. Improving the performance of ultrasonic motors in low-pressure, variable-temperature environments [J]. Tribology International, 2021, 160. DOI:10.1016/j.triboint.2021.107000.
- [22] Liu Xiaoliang, Song Jingfu, Chen Hucheng, et al. Enhanced transfer efficiency of ultrasonic motors with polyimide based frictional materials and surface texture[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2019, 295:671–677.
- [23] Liu Xiaoliang, Huang Xiaoming, Zhang Jian, et al. Influence mechanism of surface texture on the output performance of an ultrasonic motor[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2021, 73(5):750–755.
- [24] Fei Jie, Li Hejun, Qi Lehua, et al. Carbon-fiber reinforced paper-based friction material: Study on friction stability as a function of operating variables[J]. Journal of Tribology, 2008, 130(4). DOI:10.1115/1.2966388.
- [25] Song Fuzhi, Yang Zenghui, Zhao Gai, et al. Tribological performance of filled PTFE-based friction material for ultrasonic motor under different temperature and vacuum degrees[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(39). DOI:10.1002/APP.45358.

(上接第91页)

- internal thread demoulding mechanism and injection mould[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(4):68–72.
- [6] 徐文庆,熊建武,刘少华,等. 自底向上的电熨斗倒置式布局三板点浇口模具设计[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(7):85–90.
- Xu Wenqing, Xiong Jianwu, Liu Shaohua, et al. Design of three plate point gate mould with inverted layout of electric iron from bottom to top[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7):85–90.
- [7] 李源,郭辰光,李威力. 薄壁电子机壳侧向抽芯注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2015, 43(8):45–48.
- Li Yuan, Guo Chenguang, Li Weili. Design of the side-core pulling injection mold for the thin shell of electronic part[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(8):45–48.
- [8] 张维合. 汽车水箱左右盖复杂抽芯注塑模设计[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(1):57–61.
- Zhang Weihe. Design of complicated core pulling injection mold for car water tank left and right cover[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(1):57–61.
- [9] 杨志立,黄诚驹. 斜滑块内侧抽芯注射模设计[J]. 模具工业, 2013, 39(12):52–54.
- Yang Zhili, Huang Chengju. Slanted slider inside core-pulling injection mould for lamp back cover[J]. Die & Mould Industry, 2013, 39(12):52–54.
- [10] 张维合,成永涛,许淑娟,等. 汽车后背门护板热流道大型注塑模设计[J]. 中国塑料, 2019, 33(5):102–107.
- Zang Weihe, Cheng Yongtao, Xu Shujuan, et al. Design of large and hot runner injection mold for car rear door[J]. China Plastics, 2019, 33(5):102–107.
- [11] 蒋南希. 新能源汽车电池充电盖浮动侧抽芯注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2016, 44(11):70–73, 126.
- Jiang Nanxi. Design on floating side core pulling injection mould of charging cover for new energy vehicle battery[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(11):70–73, 126.
- [12] 叶久新,王群. 塑料成型工艺及模具设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- Ye Jiuxin, Wang Qun. Plastic molding process and mold design[M]. Beijing:China Machine Press, 2013.
- [13] 江昌勇,沈洪雷. 塑料成型模具设计[M]. 北京:北京大学出版社, 2012.
- Jiang Changyong, Shen Honglei. Design of plastic molding mold[M]. Beijing:Peking University Press, 2012.
- [14] 欧阳波仪. 汽车仪表罩倾斜式多种脱模机构及其注塑模具设计[J]. 塑料工业, 2016, 44(9):70–75.
- Ouyang Boyi. Inclined multiple ejection mechanisms for automobile instrument cover and injection mold design[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(9):70–75.