

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.020

石墨 /Cr₂O₃ 协同改性 PTFE/ 硅灰石材料摩擦学性能

魏莉岚, 魏刚, 蒋雨江, 许荣霞, 吴洁萃

(西华大学材料科学与工程学院, 成都 610039)

摘要: 采用电子万能试验机、环-块式摩擦试验机和扫描电子显微镜等分析表征手段, 考察了针状硅灰石与石墨 (Gr) 和 Cr₂O₃ 并用对聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料摩擦磨损性能的影响。结果表明, 随着硅灰石含量的增加, PTFE/ 硅灰石复合材料的磨损率逐渐降低, 而摩擦系数呈现出先降低后增加的趋势。在 15% (质量分数, 下同) 硅灰石的基础上添加 10% Gr 时, 复合材料的磨损率降低到 $0.22 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 摩擦系数略有增大。进一步添加 1% Cr₂O₃ 代替相应含量的 Gr 时, PTFE/ 硅灰石 /Gr/Cr₂O₃ 复合材料表现出最低的磨损率, 仅有 $0.13 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 对应的摩擦系数为 0.25。磨损机理分析表明: 适量硅灰石在摩擦过程中起到了较好的支撑载荷作用, 阻止了对偶上微凸体对摩擦表面的嵌入; 在此基础上继续添加 9% Gr 和 1% Cr₂O₃ 时, 对偶上形成了非常致密完整、薄且均匀的转移膜, 表现为轻微的磨粒磨损特征。

关键词: 聚四氟乙烯; 硅灰石; 石墨; 三氧化二铬; 摩擦学性能

中图分类号: TQ320.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)02-0117-06

Tribological Properties of PTFE/Wollastonite Composites Synergistically Modified with Graphite and Cr₂O₃

Wei Lilan, Wei Gang, Jiang Yujang, Xu Rongxia, Wu Jieui

(College of Material Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: The effects of wollastonite and its combination with graphite(Gr) and Cr₂O₃ on the tribological properties of polytetrafluoroethylene(PTFE) composites were investigated by means of electronic universal testing machine, ring-block friction testing machine and scanning electron microscope. The results indicate that the wear rate of PTFE/wollastonite composites gradually decrease and the friction factor present a trend of first decreasing and then increasing with the increase in the amount of wollastonite. When 10% Gr is added into composite with 15% wollastonite, the wear rate of the composite is reduced to $0.22 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and the friction factor increase slightly. When 1% Cr₂O₃ is further added to replace the corresponding content of Gr, the PTFE/wollastonite/Gr/Cr₂O₃ composite exhibit the lowest wear rate that is only $0.13 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, and its corresponding friction factor is 0.25. The analysis of the wear mechanism show that an appropriate amount of wollastonite play a better role in supporting the load during the friction process, preventing the micro-protrusions on the ring from being embedded into the friction surface. On this basis, when 9% Gr and 1% Cr₂O₃ are continued to be added, a very complete, thin and uniform transfer film is formed on the pair, which behave as a slight abrasive wear characteristic.

Keywords: polytetrafluoroethylene; wollastonite; graphite; chromium trioxide; tribological property

聚四氟乙烯 (PTFE) 又称“塑料王”, 由于分子链独特的螺旋构象, 其氟原子紧密地包裹住易受化学破坏的碳链骨架^[1-2], 分子间的吸引力和表面能较低, 从而使 PTFE 具有低摩擦系数、优异的化学稳定性、电绝缘性和耐高低温性能等^[3-5]。目前, PTFE

常作为动密封材料广泛地应用于航天航空、石油化工、机械船舶、乘用车和工程机械等领域^[6-7]。然而纯 PTFE 的耐磨性和抗蠕变能力较差, 受到载荷时容易出现冷流现象, 导致其在高速高压等苛刻工况下很容易出现磨损而造成密封失效^[8-9]。

基金项目: 四川省重点研发计划项目 (20ZDYF2404)

通信作者: 魏刚, 博士, 教授, 主要从事高分子功能复合材料、材料摩擦学 & 耐磨 / 密封材料研究

收稿日期: 2021-12-03

引用格式: 魏莉岚, 魏刚, 蒋雨江, 等. 石墨 /Cr₂O₃ 协同改性 PTFE/ 硅灰石材料摩擦学性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(2):117-122.

Wei Lilan, Wei Gang, Jiang Yujang, et al. Tribological properties of PTFE/Wollastonite composites synergistically modified with graphite and Cr₂O₃[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):117-122.

目前,为了改善 PTFE 的摩擦磨损性能,国内外研究主要集中在采用无机纤维、无机纳米粒子、特种聚合物粉末或金属粉末等增强材料及其与固体润滑颗粒复合对 PTFE 进行改性,如玻璃纤维、纳米二氧化硅、碳纤维 - 石墨 (Gr)、硅灰石 - Gr、聚苯酯 - 二硫化钼、青铜 - 二硫化钼等增强材料与润滑组分复合对 PTFE 摩擦学性能的影响^[10-19],而有关 Cr_2O_3 与 Gr 复合对 PTFE/ 硅灰石复合材料摩擦磨损性能的影响还少见报道。

笔者首先考察硅灰石对 PTFE 力学性能和摩擦学性能的影响,在此基础上,进一步研究 Gr 及其与 Cr_2O_3 复合改性对 PTFE/ 硅灰石摩擦磨损性能的影响,并对复合材料的磨损机理进行探讨。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTFE : M-18F, 粒径 25 μm , 日本大金工业株式会社;

针状硅灰石: 直径 6.5 μm , 长径比 10 : 1, 江西新余市思远矿业有限公司;

Gr : 粒径 4 μm , 上海一帆石墨有限公司;

Cr_2O_3 : 粒径 40 μm , 南京智宁新型材料有限公司;

乙醇: 分析纯, 成都市科龙化工试剂厂。

1.2 主要设备及仪器

电热恒温鼓风干燥箱: DB-210SC 型, 成都天宇试验设备有限责任公司;

高速混合机: SHR10L 型, 苏州松远环保科技有限公司;

平板硫化机: XLB-400 $\times$ 400 型, 青岛亚东橡塑机械有限公司;

裁样机: GT-7016-AR 型, 高铁检测仪器 (东莞) 有限公司;

微机控制电子万能试验机: E44.104 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM) : JSM-5900LV 型, 日本电子株式会社;

摩擦磨损试验机: M-2000 型, 济南宏达实验仪器有限公司;

光学显微镜: VME400 型, 深圳智泰精密仪器有限公司。

1.3 试样制备

先将 PTFE 粉料于电热恒温鼓风干燥箱 120 $^{\circ}\text{C}$

干燥 4 h, 然后加入一定量的针状硅灰石, Gr 或 Cr_2O_3 于高速混合机内搅拌均匀, 将混合料于平板硫化机上压制成 90 mm $\times$ 10 mm $\times$ 4(1.5)mm 的片材, 然后将压制好的片材放在烧结炉中烧结成型, 烧结温度为 375 $^{\circ}\text{C}$, 保温 3 h, 实验配方见表 1。

表 1 实验配方

样品编号	PTFE	硅灰石	Gr	Cr_2O_3	%
A	100	0	0	0	
B	95	5	0	0	
C	90	10	0	0	
D	85	15	0	0	
E	80	20	0	0	
F	75	25	0	0	
G	80	15	5	0	
H	75	15	10	0	
I	70	15	15	0	
J	75	15	9	1	
K	75	15	7	3	
L	75	15	5	5	

1.4 性能测试

按照 GB/T 1040.1-2018, 测试 PTFE 复合材料的拉伸性能, 每个试样测量 5 次, 取其平均值。

按照 GB/T 3960-2016, 测试 PTFE 复合材料在室温、干摩擦条件 (200 N, 200 r/min) 下的环 - 块摩擦磨损性能, 试样尺寸为 30 mm $\times$ 7 mm $\times$ 4 mm, 对偶为 45 $^{\circ}$ 钢, 直径 40 mm, 试验时间 2 h。试验前, 用 800 $^{\#}$ 砂纸将对偶表面打磨光亮, 然后用无水乙醇清洗、自然晾干。摩擦过程中记录摩擦力矩值, 实验结束后计算出试样的摩擦系数和体积磨损率。

SEM 测试: 将摩擦实验后的试样表面进行喷金处理, 然后在不同倍率下观察磨损面形貌特征。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

PTFE 试样拉伸强度和断裂伸长率如图 1 所示。从图 1 可看出, 与纯 PTFE 试样 A 相比, 单独加硅灰石作为填料时, 随着硅灰石含量增加, PTFE/ 硅灰石复合材料 (试样 B~F) 的拉伸性能和断裂伸长率均呈现出先增加后降低的趋势。当硅灰石质量分数在 5% 时, 试样 B 的拉伸强度最高, 达到 35.06 MPa, 相比纯 PTFE 提高了 43.64%, 断裂伸长率提高了 84.65%。之后, 随着硅灰石含量增加, 拉伸强度和断裂伸长率逐渐降低。在试样 D 基础上再加入 Gr, PTFE/ 硅灰石 /Gr 复合材料 (试样 G~I) 的拉伸强度和断裂伸长率表现出逐渐降低趋势。其中, 试样 I 的拉伸强度达到最低, 仅有 10.74 MPa, 比纯 PTFE 低 60.6%, 断裂伸长率降低了 85.99%。在试样 H 基

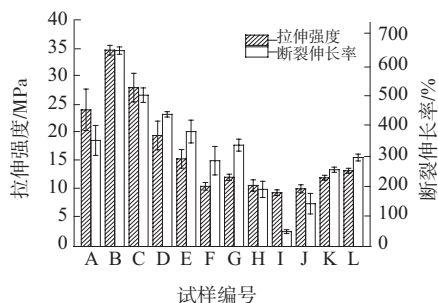


图1 PTFE材料拉伸性能

础上再加入Cr₂O₃时,试样J~L的拉伸强度和断裂伸长率呈现先降低后升高变化趋势。

2.2 摩擦磨损性能

图2为在相同干摩擦实验条件下,不同类型PTFE复合材料的摩擦系数随时间的变化曲线。从图2可以看到,纯PTFE试样A的摩擦系数随摩擦时间延长而逐渐下降,到1 h时,摩擦系数降低到0.21,此时因试样磨损很厉害而无法继续进行。而不同类型的改性PTFE复合材料(试样B~L)的摩擦系数随时间的变化都表现出先减小后增大再逐渐达到稳定的趋势。在摩擦初期阶段,与对偶接触的试样表面更多地表现为纯PTFE基体的摩擦行为,摩擦系数降低。但随着摩擦的进行,试样中的填料逐渐与对偶表面接触,摩擦界面上更多地表现为对偶与填料之间的滑动摩擦作用,从而导致摩擦系数开始增大。当摩擦实验进行到1 h后,各改性PTFE复合材料的摩擦系数逐渐趋于稳定。

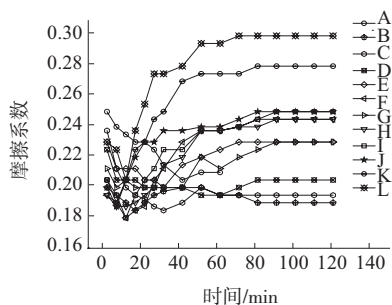


图2 PTFE材料摩擦系数随时间的变化曲线

图3为各试样在稳定阶段的摩擦系数和相应的磨损率。从图3可以看出,随着硅灰石含量的增加,PTFE/硅灰石复合材料(试样B~F)的稳定摩擦系数呈现出先减小后增大的趋势。纯PTFE试样A因在200 N的摩擦实验条件下试样很快磨损而提前终止,故而没有计算其磨损率。当硅灰石质量分数从5%增加到15%时,试样的稳定摩擦系数从0.195增大到0.205,均低于纯PTFE试样的摩擦系数。但当硅灰石的质量分数增加到20%以上时,试样的稳

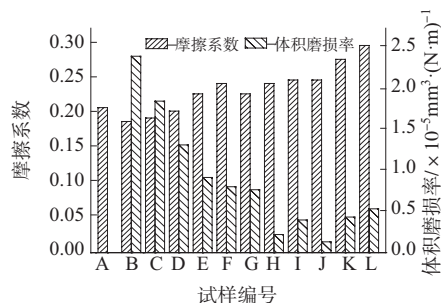


图3 PTFE材料摩擦系数与磨损率

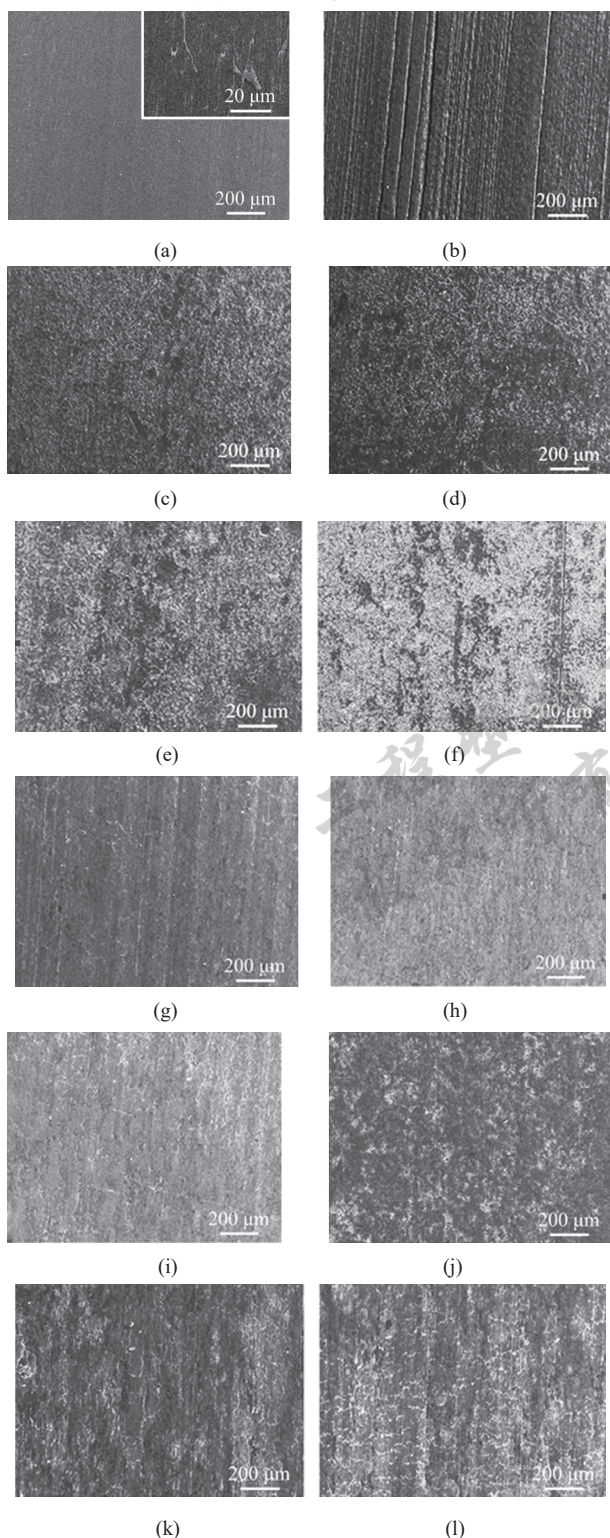
定摩擦系数逐渐增大,且明显高于试样A的摩擦系数。同时,PTFE/硅灰石复合材料的体积磨损率随硅灰石质量分数的增加而逐步降低。PTFE基体中填充的硅灰石在摩擦过程中起到了支撑载荷的作用,阻碍了PTFE带状晶体的滑移,减少了对偶对摩擦表面的摩擦作用,使得PTFE/硅灰石复合材料的磨损率降低。当硅灰石的质量分数达到15%时,PTFE/硅灰石复合材料的体积磨损率下降到 $1.32 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

综合考虑PTFE/硅灰石复合材料的摩擦系数和磨损率的大小,以硅灰石质量分数为15%的试样D为基础,考察Gr对PTFE/硅灰石复合材料摩擦学性能的影响。从图3可以看出,随着Gr质量分数的增加,PTFE/硅灰石/Gr复合材料(试样G~I)的摩擦系数呈现出缓慢增大的趋势,而试样的磨损率则先减小后增大。当Gr的质量分数为5%时,PTFE/硅灰石/Gr复合材料的摩擦系数为0.23,此时体积磨损率为 $0.77 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$;当Gr的质量分数增加到10%时,复合材料的摩擦系数为0.245,此时体积磨损率达到最低,为 $0.22 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$;进一步增加Gr的质量分数到15%时,PTFE/硅灰石/Gr复合材料的摩擦系数为0.25,此时体积磨损率增加到 $0.40 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

在保持填料总质量分数为25%的前提下,以试样H为基础进一步添加适量Cr₂O₃并调整Gr的质量分数,考察PTFE/硅灰石/Gr/Cr₂O₃复合材料(试样J~L)的摩擦系数和体积磨损率的变化规律。从图中可以看出,与试样H(摩擦系数为0.245)相比较,当Cr₂O₃质量分数为1%时,PTFE/硅灰石/Gr/Cr₂O₃复合材料的摩擦系数(为0.25)基本保持不变,而体积磨损率进一步降低,仅有 $0.13 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。此后随着Cr₂O₃质量分数的增加,复合材料的摩擦系数和体积磨损率都出现明显的增大。

2.3 磨损机理分析

图 4 是硅灰石与 Gr 和 Cr_2O_3 协同改性 PTFE 试样在室温、干摩擦条件下磨损面的 SEM 照片。



试样编号: a—A; b—B; c—C; d—D; e—E; f—F; g—G; h—H; i—I; j—J; k—K; l—L

图 4 PTFE 材料磨损表面 SEM 图

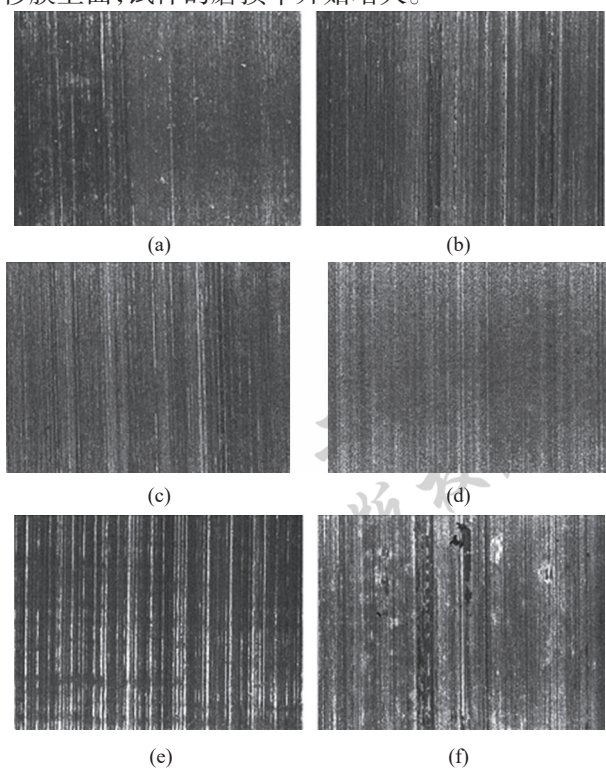
从图 4a 及其插图 (试样 A 磨损面放大形貌) 可以看出,纯 PTFE 的磨损表面呈现出明显的塑性变形和犁沟痕迹,这是由于纯 PTFE 在外力作用下容易产生带状晶体滑移,抵抗变形的能力较差,对偶表面的微凸体嵌入摩擦表面而导致其磨损严重。从图 4b~4f 可以看出,当硅灰石含量较少时 (5%),复合材料磨损表面的塑性变形得到了抑制,但硅灰石质量分数过少未能有效阻止对偶表面微凸体对试样的犁削作用,反而加剧了硅灰石在摩擦表面上的磨粒磨损,留下明显的沟槽。当硅灰石质量分数增加到 10% 上时,摩擦过程中硅灰石在基体中起到了较好的支撑载荷作用,阻止了对偶上微凸体对摩擦表面的嵌入,塑性变形基本消失,对偶的犁削作用和磨粒磨损都明显减弱。当硅灰石质量分数为 15% 时,磨损表面变得光滑平整,表现为轻微的磨粒磨损特征,此时的磨损率大幅降低。随着硅灰石质量分数进一步增加到 20% 以上时,从图 4e 和图 4f 可见过多的硅灰石在摩擦过程中暴露于磨损表面,部分硅灰石脱落并产生磨粒磨损沟槽,磨损表面出现明显的“泛白”现象。

在硅灰石质量分数为 15% 的基础上,添加不同含量的 Gr,如图 4g~图 4i 所示。与试样 D 的磨损面相比较,适量 Gr 的加入明显抑制了 PTFE 基体的带状晶体滑移,阻止了 PTFE 磨屑的产生及硅灰石在摩擦中的脱落,这也会导致试样的摩擦系数有较大幅度的增大。此外,具有片层状的 Gr 在摩擦过程中受到剪切作用时容易发生层间滑移而产生润滑作用,使得试样的摩擦系数有所减小。上述两个效应相叠加,最终使得试样的摩擦系数出现增大的现象,但这两种效应都会降低试样的磨损率。当 Gr 含量过高时,试样在摩擦面上呈现出明显的疲劳磨损行为,磨损率反而开始增大。

在试样 H 基础上,进一步添加适量 Cr_2O_3 代替相应含量的 Gr。从图 4j~图 4l 可以看出,当 Cr_2O_3 质量分数为 1% 时,复合材料的磨损面更加光滑平整,没有明显的犁沟和磨屑,疲劳磨损几乎消失,表现为轻微的磨粒磨损。但当 Cr_2O_3 质量分数增加到 3% 以上时,试样摩擦表面出现宽且深的犁沟和明显的疲劳磨损脱落痕迹。

图 5 是放大 80 倍光学显微镜下部分 PTFE 试样的转移膜形貌照片。从图 5a 和图 5b 可以看出,当硅灰石质量分数从 15% 增加到 25% 时,转移膜

上的PTFE磨屑和脱落的硅灰石明显减少,但转移膜的完整性变差,试样的摩擦系数增大。图5c是在15%硅灰石的基础上添加10%Gr的试样H,与图5a相比,其形成的转移膜更加均匀完整,但试样表面的硬质粒子对转移膜产生了明显的刮擦破坏作用。图5d~5f分别对应试样J、K和L的转移膜,可以看出,当Cr₂O₃质量分数为1%时,对偶上形成的转移膜变得非常致密完整、厚度薄且均匀,其表面只有轻微的刮擦痕迹。进一步增大Cr₂O₃含量时,过多的Cr₂O₃粒子反而对转移膜产生了严重的刮擦破坏,转移膜变得不均匀完整,以致产生磨屑留在转移膜上面,试样的磨损率开始增大。



试样编号: a—D; b—F; c—H; d—J; e—K; f—L

图5 PTFE试样转移膜形貌光学照片

3 结论

(1) 随着硅灰石质量分数的增加,PTFE/硅灰石复合材料的体积磨损率逐渐降低,而摩擦系数呈现出先降低后增加的趋势。纯PTFE的摩擦系数为0.21,当硅灰石质量分数为15%时,复合材料的摩擦系数为0.205,体积磨损率为 $1.32 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(2) 在15%硅灰石的基础上添加固体润滑剂Gr能进一步降低复合材料的体积磨损率,但摩擦系数会略微增加。在保持填料总含量和硅灰石质量分数分别为25%和15%不变的基础上,进一步添加

适量Cr₂O₃代替相应质量分数的Gr,当硅灰石、Gr和Cr₂O₃的质量分数分别为15%、9%和1%时,复合材料的体积磨损率最低,仅有 $0.13 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,相应的摩擦系数为0.25。

(3) 磨损机理分析表明,纯PTFE磨损面呈现出明显塑性变形和犁沟痕迹。当硅灰石质量分数为15%时,其在摩擦过程中起到了较好的支撑载荷作用,阻止了对偶上微凸体对摩擦表面的嵌入,塑性变形基本消失,表现为磨粒磨损的特征。在此基础上,添加9%Gr和1%Cr₂O₃时,对偶上形成了非常致密完整、厚度薄且均匀的转移膜;磨损面光滑平整,没有明显的犁沟和磨屑,表现为轻微的磨粒磨损行为。

参考文献

- [1] 彭凯旋.PTFE基复合材料在潮湿环境下的摩擦磨损性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2018.
Peng Kaixuan. Study on friction and wear properties of PTFE matrix composites in humid conditions[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [2] 刘沛.高性能织物增强聚四氟乙烯复合材料摩擦学性能研究[D].上海:复旦大学,2013.
Liu Pei. Tribological properties of high performance fabric reinforced polytetrafluoroethylene composites[D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [3] 吴昊,朱丽娜,岳文,等.PTFE复合涂层的摩擦学性能及疏水性研究现状[J].材料导报,2018,32(S1):284-288.
Wu Hao, Zhu Lina, Yue Wen, et al. Tribological properties and hydrophobic properties of PTFE composite coatings[J]. Materials Review, 2018, 32(S1): 284-288.
- [4] 文怀兴,曹蕾,高飒飒.PTFE改性研究进展[J].工程塑料应用,2019,47(6):133-138.
Wen Huaixing, Cao Lei, Gao Sasa. Research progress on modification of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(6): 133-138.
- [5] 李玮杰,季鑫,张科.PTFE塑料纳米填充改性及其性能优化的研究进展[J].上海工程技术大学学报,2019,33(4):339-343.
Li Weijie, Ji Xin, Zhang Ke. Research progress of nano-filler modification and performance optimization of PTFE plastic[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2019, 33(4): 339-343.
- [6] 钱知勉.聚四氟乙烯塑料的实用性[J].有机氟工业,2003(1):10-20.
Qian Zhimian. Practical usage of PTFE plastics[J]. Organofluorine Industry, 2003(1): 10-20.
- [7] 张雷,韩朝阳,罗欣,等.填充改性聚四氟乙烯拉伸多孔膜的研究进展[J].当代化工,2018,47(3):603-606.
Zhang Lei, Han Chaoyang, Luo Xin, et al. Research progress in filling modification of oriented polytetrafluoroethylene(PTFE)

- porous film[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(3):603–606.
- [8] 魏刚, 魏莉岚, 谢强, 等. GF/MoS₂ 改性 PTFE 密封唇片材料的力学及摩擦学性能 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2020, 39(3):22–28.
- Wei Gang, Wei Lilan, Xie Qiang, et al. Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites modified by glass fiber and MoS₂ for seal lip application[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2020, 39(3):22–28.
- [9] 宋伟. 芳纶纤维填充改性增强聚四氟乙烯复合材料性能研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- Song Wei. Study on the properties of PTFE matrix composites reinforced by organic fibre of PPTA[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009.
- [10] 侯梅, 寇开昌, 张冬娜, 等. 协同填充改性聚四氟乙烯复合材料的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2011, 39(5):110–113.
- Hou Mei, Kou Kaichang, Zhang Dongna, et al. Recent advance in PTFE composites filled with different mix materials[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(5):110–113.
- [11] 马伟强, 侯根良, 苏勋家, 等. 玻璃纤维填充改性 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 工程塑料应用, 2017, 45(9):33–37.
- Ma Weiqiang, Hou Genliang, Su Xunjia, et al. Friction and wear properties of GF doped PTFE composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):33–37.
- [12] 马伟强, 侯根良, 苏勋家, 等. 纳米 SiO₂ 填充改性聚四氟乙烯复合材料的摩擦磨损性能研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45(5):43–47.
- Ma Weiqiang, Hou Genliang, Su Xunjia, et al. Study on the friction and wear properties of Nano-SiO₂ doped PTFE composites[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(5):43–47.
- [13] 杨丽君, 王齐华, 宁丽萍, 等. 碳纤维及石墨填充聚四氟乙烯复合材料的摩擦学性能研究 [J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5):705–708.
- Yang Lijun, Wang Qihua, Ning Liping, et al. Study on the tribological properties of CF-Gr-PTFE composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2004, 22(5):705–708.
- [14] 李红波, 苏正涛, 杨睿, 等. 硅灰石与石墨对聚四氟乙烯摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国塑料, 2018, 32(10):32–38.
- Li Hongbo, Su Zhengtao, Yang Rui, et al. Effect of wollastonite and graphite on friction and wear properties of polytetrafluoroethylene[J]. China Plastics, 2018, 32(10):32–38.
- [15] 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.
- Wang Wendong. Tribological properties of polybenzoate/MoS₂ filled PTFE composites against aluminum alloy[J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(11):98–103.
- [16] Ye S J, Zeng X R, Tan F, et al. Research on the tribological performance of Cr₂O₃ filled with bronze-based PTFE composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014. DOI:10.1002/app.41117.
- [17] Sun W, Liu X J, Liu K, et al. Ultralow wear PTFE composites filled with beryllia and germania particles[J]. Wear, 2020. DOI:10.1016/j.wear.2020.203270.
- [18] Wang Z Q, Wu S F, Ni J. Influence of SiO₂/MoS₂/graphite content on the wear properties of PTFE composites under natural seawater lubrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology, 2018, 232(5):607–618.
- [19] 裴高林, 李红波, 苏正涛. 不同固体润滑填料对聚四氟乙烯性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):122–127.
- Pei Gaolin, Li Hongbo, Su Zhengtao. Effect of solid lubricant fillers on the performance of PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):122–127.

(上接第 116 页)

- [10] 张少飞. 汽车风管控制器双色注射模设计 [J]. 模具工业, 2019, 45(1):45–49.
- Zhang Shaofei. Design of two-color injection mould half for automobile air duct controller[J]. Die & Mould Industry, 2019, 45(1):45–49.
- [11] 万守臣, 傅建, 彭必友, 等. 多组分注射技术研究现状 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(10):91–93.
- Wan Shouchen, Fu Jian, Peng Biyou, et al. Research status of multicomponent injection technology[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(10):91–93.
- [12] 苏慧祎. 型芯旋转式双色模具设计 [J]. 工程塑料应用, 2015, 43(7):87–90.
- Su Huiyi. Design of double color mould with core rotary type[J]. Engineering Plastics Application, 2015, 43(7):87–90.
- [13] 范有发, 肖雪清. 控制开关面板双色注射模设计 [J]. 工程塑料应用, 2012, 40(1):51–54.
- Fan Youfa, Xiao Xueqing. Design of bi-color injection mold for control switch facepanel plastic[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(1):51–54.
- [14] 杨明池. 转盘旋转式双色注塑模结构设计 [J]. 模具技术, 2017(3):39–43.
- Yang Mingchi. Rotating double-colour injection mould design[J]. Die and Mould Technology, 2017(3):39–43.
- [15] 石世铤. 注射模具设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017:68–76.
- Shi Shiyao. Injection mold design[M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2017:68–76.
- [16] 杨剑萍, 肖国华, 刘路兴, 等. 防疫消毒瓶盖异型子模双色注塑模设计 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(2):97–102.
- Yang Jianping, Xiao Guohua, Liu Luxing, et al. Design of bi-color injection mold with different sub-mold for epidemic prevention and disinfection bottle cap[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(2):97–102.