

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.10.019

凹凸棒石和硅灰石对 PTFE 摩擦磨损行为影响

吴迪¹, 赵福燕², 李桂金³, 张晶⁴, 白志民¹

[1. 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024; 4. 大连环球矿产股份有限公司, 辽宁大连 116100]

摘要: 将凹凸棒石与硅灰石以不同配比添加到聚四氟乙烯 (PTFE) 中, 通过机械混合、冷压烧结的方式制成 PTFE / 凹凸棒石 / 硅灰石复合材料。采用 X 射线衍射、傅里叶变换红外光谱、同步热分析、邵氏硬度计、环块摩擦磨损试验机、光学显微镜、3D 表面轮廓仪对复合材料的理化性能和摩擦学性能进行表征。结果表明, 凹凸棒石与硅灰石的引入使得复合材料的结晶度和玻璃转化温度降低, 硬度增加, 同时磨损率显著降低, 其中添加质量分数 10% 凹凸棒石与 30% 硅灰石的 PTFE 的复合材料的磨损率仅为 $4.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 较纯 PTFE 的磨损率降低了 97.9%, 减磨效果最好。研究表明, 凹凸棒石与硅灰石的引入有助于在金属摩擦副表面形成转移膜, 有效改善了对偶摩擦副的界面特征以及摩擦自适应性, 是降低磨损率的主要原因。

关键词: 聚四氟乙烯; 凹凸棒石; 硅灰石; 摩擦; 磨损

中图分类号: TD985 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)10-0102-08

Influence of Attapulgite and Wollastonite on the Friction and Wear Behavior of PTFE

Wu Di¹, Zhao Fuyan², Li Guijin³, Zhang Jing⁴, Bai Zhimin¹

(1. School of Materials Science and Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. China Building Materials Academy Co., Ltd., Beijing 100024, China; 4. Dalian Global Minerals Co., Ltd., Dalian 116100, China)

Abstract: Attapulgite and wollastonite are added to polytetrafluoroethylene (PTFE) in different proportions, and PTFE / Attapulgite / wollastonite composites were made by mechanical mixing and cold pressing sintering. X-ray diffraction, Fourier Transform infrared spectroscopy, tangent -defense and space center, Shore hardness tester, ring block friction and wear tester, optical microscope, 3D surface profiler were used to characterize the physical and chemical properties and tribological properties of the composite material. The results show that the introduction of attapulgite and wollastonite reduces the crystallinity and glass transition temperature of the composite material, increases the hardness, and significantly reduces the wear rate. The composite material of PTFE with 10% attapulgite and 30% wollastonite is added. The wear rate is only $4.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, which is 97.9% lower than that of pure PTFE, and the wear reduction effect is the best. The studies believe that the introduction of attapulgite and wollastonite helps to form a transfer film on the surface of the metal friction pair, which effectively improves the interface characteristics and friction adaptability of the friction pair, which is the main reason for reducing the wear rate.

Keywords: polytetrafluoroethylene; attapulgite; wollastonite; friction; wear

聚四氟乙烯 (PTFE) 因含有较强的氟碳键而具有优异的自润滑能力和显著的热和化学稳定性, 作为摩擦磨损高分子聚合物材料被广泛用作各种机器系统中的摩擦材料^[1-2]。但由于纯 PTFE 材料的热

导率低、线性热膨胀系数较大, 且力学性能和耐磨性有限, 因此在摩擦学应用中, 常用多种类型的填充材料对 PTFE 材料进行改性, 制备成 PTFE 复合材料^[3-4]。常见的填充材料有纤维增强材料 (有机芳

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0310703)

通信作者: 白志民, 博士, 教授, 主要研究方向为硅酸盐矿物

收稿日期: 2021-07-31

引用格式: 吴迪, 赵福燕, 李桂金, 等. 凹凸棒石和硅灰石对 PTFE 摩擦磨损行为影响 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10): 102-109.

Wu Di, Zhao Fuyan, Li Guijin, et al. Influence of attapulgite and wollastonite on the friction and wear behavior of PTFE [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10): 102-109.

纶纤维、碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等)、纳米颗粒增强材料(二硫化钼、碳化硅、碳纳米管、金属氧化物等)、有机共混增强材料(聚醚醚酮、聚醚酰亚胺、聚苯酯等)^[5-11]。近年来,天然硅酸盐矿物以丰富的资源储备、较低的成本、独特的结构和性能等特点引起摩擦学者的关注,研究将其作为 PTFE 共混和填充改性原料以改善 PTFE 的摩擦磨损性能。Jia Zhining 等^[12]将微纳米蛇纹石粉体添加到 PTFE 中,经机械混合-冷压烧结制备形成 PTFE/蛇纹石固体润滑剂复合材料,该复合材料具有相对稳定的摩擦系数,且摩擦系数在一定范围内与纯 PTFE 相同。蛇纹石颗粒可作为有效的屏障来防止 PTFE 产生粘着磨损,从而显著提高了 PTFE 的磨损率。闫艳红等^[13]采用正交实验法研究了纳米蛇纹石和纳米氧化镧对复合材料在沙尘环境下的摩擦学性能,发现纳米蛇纹石质量分数为 9%、纳米氧化镧的质量分数为 6% 时,复合材料的总体磨损率最低,此时磨损机制主要为磨粒磨损。针柱状硅灰石作为增强组分填充到 PTFE 中对改善复合材料耐磨性能和力学性能具有一定效果^[14-15]。索军营等^[16]以针状的硅灰石为填料,采用冷压烧结工艺制备 PTFE 密封材料,发现当硅灰石质量分数为 15% 时,复合材料磨损率较纯 PTFE 降低两个数量级,抗压缩蠕变性能提高约 50%。同时经表面改性或与石墨、二硫化钼等复合后的硅灰石对复合材料增强效果更佳^[17-21]。近年来,棒状凹凸棒石微纳米粉体也被应用在润滑油或润滑脂中,研究发现,凹凸棒石的存在可促进摩擦界面转移膜的形成,降低金属摩擦对偶的摩擦系数,并对摩擦副表面起到一定的修复作用^[22-28]。迄今,凹凸棒石与硅灰石复合填充改性 PTFE 材料的摩擦学性能的研究还处于起步阶段。笔者将棒状凹凸棒石微纳米粉体与针柱状硅灰石粉体作为 PTFE 的填充原料,通过机械混合-冷压成型-热烧结的方式制备复合材料。研究复合材料结构、热稳定性、硬度及摩擦磨损性能,并结合磨损表面形貌及化学成分分析,探讨复合材料的摩擦磨损机理。该研究可为凹凸棒石及硅灰石在耐磨聚合物材料工业开发和应用方面提供实验和理论依据。

1 实验部分

1.1 原材料

PTFE: DF-16A, 山东东岳公司;

凹凸棒石(Paly): 安徽滁州联胜化工有限公司;

硅灰石(W1): HQ-3000, 大连环球矿产股份有

限公司。

1.2 仪器及设备

X 射线衍射(XRD)仪: D8 Advance 型, 德国 Bruker 公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: Nicolet 6700 型, 美国赛默飞公司;

同步热分析[热重(TG)-差示扫描量热(DSC)]仪: 449 F3 型, 德国耐驰公司;

扫描电子显微镜(SEM): G300 型, 德国蔡司公司;

邵氏硬度计: LX-D 型, 上海高致精密仪器有限公司;

环块摩擦磨损试验机: MRH-3 型, 济南益华摩擦学测试技术有限公司

光学 3D 表面轮廓仪: GTK 3D 型, 德国 Bruker 公司;

行星式球磨机: QM-QX4 型, 南京南大仪器有限公司;

高速搅拌机: XY-2200B 型, 合肥小宝电器有限公司;

平板硫化机: XLB-300 型, 青岛宙斯智创机械科技有限公司;

烘箱: 101-0B 型, 绍兴市尚诚仪器制造有限责任公司;

光学显微镜: Axio Imager 2 型, 北京普瑞赛司仪器有限公司;

X 射线光电子能谱(XPS)仪: K-Alpha 型, 美国赛默飞公司。

1.3 试样制备

凹凸棒石原料预处理: 将凹凸棒石原料、水、球磨钢球以 1 : 5 : 20 的比例混合后置于球磨罐中在行星式球磨机中进行机械化学力球磨, 以 500 r/min 的速度球磨 30 h; 将球磨后的粉体在 105℃ 下烘干、研磨, 得到改性凹凸棒石粉体。

将 PTFE, 凹凸棒石和硅灰石按表 1 所列的配比称重后在高速搅拌机中混合后, 在 120℃

表 1 PTFE 复合材料原料配比 %

样品编号	PTFE	Paly	W1
PTFE	100	0	0
PTFE / 10 Paly / 10W1	80	10	10
PTFE / 10 Paly / 20W1	70	10	20
PTFE / 10 Paly / 30W1	60	10	30
PTFE / 5 Paly / 30W1	65	5	30
PTFE / 15 Paly / 30W1	55	15	30

烘箱中(以去除表面吸附水)烘干4 h后得到复合粉体;混合粉体通过冷压成型,成型尺寸为 $25\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,成型压力50 MPa,保持压力60 min、无压烧结,烧结工艺如图1所示,制得PTFE复合材料。

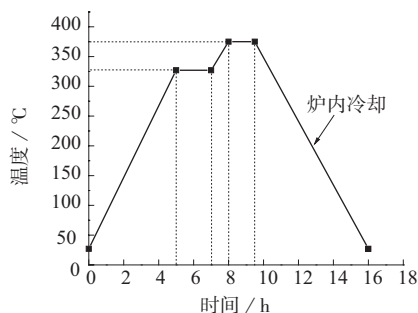


图1 复合材料前驱体热处理工艺制度图

1.4 测试表征

XRD 测试: 以 $6^\circ/\text{min}$ 的扫描速度,在 $5^\circ \sim 70^\circ$ 的扫描角度范围进行连续扫描。采用Jade6软件对XRD衍射图谱进行拟合并积分,用积分面积表示衍射强度计算相对结晶度(晶态峰的衍射强度/总峰的衍射强度),多次拟合计算结晶度后算平均值。

FTIR 测试: 扫描范围 $400 \sim 4000\text{ cm}^{-1}$,使用衰减全反射(ATR)附件直接扫描法。

SEM 测试: 将试样的摩擦表面进行喷金处理,在不同的放大倍数下,利用SEM观察表面并拍照。

TG-DSC 测试: 在氮气气氛下,以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率由 30°C 升温至 800°C 。

硬度测试: 选取复合材料的5个点(两个测点之间距离至少相距6 mm且测点距离试样边缘不少于12 mm)进行测量,测定值以5个点测量值的算术平均值表示。

环块摩擦磨损测试: 在室温及不使用润滑介质条件下,复合材料与304不锈钢环对磨,载荷为50 N,滑动速度为 0.42 m/s ,时长2 h。摩擦系数由摩擦试验设备在运行中自动记录,聚合物试样的磨损率通过测量磨痕宽度进行计算。

2 结果与讨论

2.1 PTFE 复合材料结构与形貌分析

图2为PTFE材料与PTFE/凹凸棒石/硅灰石复合材料的XRD图谱。由图2可见,添加矿物粉体后的复合材料的衍射峰强度有所降低,且随着矿物粉体添加量增加,衍射峰强度进一步降低。对比纯PTFE材料及复合材料的结晶度可以发现,结晶度随矿物粉体添加量的增加而降低,其中,纯PTFE

材料的结晶度为64.65%,PTFE/15Paly/30Wl复合材料的结晶度为29.58%,分析认为,添加矿物粉体后,阻碍了PTFE基体的成核结晶,是造成添加矿物粉体后PTFE复合材料的结晶度降低的原因^[29]。

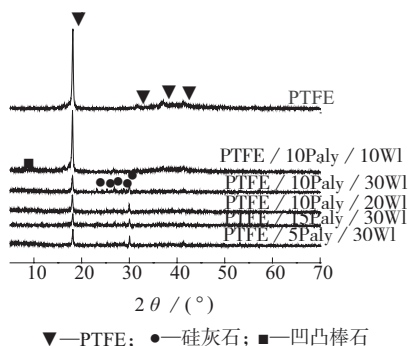


图2 PTFE及其复合材料的XRD图谱

图3为PTFE与PTFE/凹凸棒石/硅灰石复合材料的FTIR谱图。添加矿物粉体后复合材料中PTFE的特征峰依然明显可见,分别为在 1210 cm^{-1} 出现的 $-\text{CF}_2-$ 不对称伸缩振动的吸收峰和在 1151 cm^{-1} 出现的 $-\text{CF}_2-$ 对称伸缩振动的吸收峰。添加矿物粉体后的复合材料,出现了与凹凸棒石的特征峰[分别为在 3614 cm^{-1} 出现的凹凸棒石内部结构中连接硅氧四面体与八面体的羟基伸缩振动峰、在 1649 cm^{-1} 出现的 $-\text{OH}$ 弯曲振动的吸收峰,在 1029 cm^{-1} 出现的 $\text{Si}-\text{O}-(\text{Mg}/\text{Al})$ 振动特征峰]和硅灰石的特征峰(分别为在 1018 cm^{-1} 出现的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 非对称伸缩振动的吸收峰、在 967 cm^{-1} 出现的 $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 对称伸缩振动的吸收峰、在 927 cm^{-1} 出现的 $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 非对称伸缩振动的吸收峰、在 681 cm^{-1} 和 645 cm^{-1} 出现的 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 对称伸缩振动的吸收峰)^[30-32]。

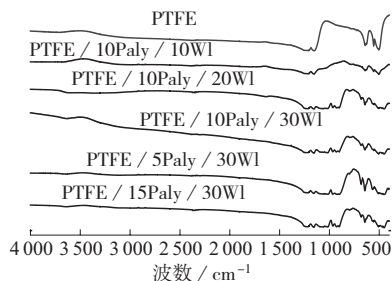


图3 PTFE及其复合材料的FTIR谱图

图4为PTFE/10 Paly/30Wl复合材料表面的微观形貌SEM照片。可以看出,凹凸棒石粉体在PTFE基体中分布不均匀,出现局部聚集现象,相比于凹凸棒石,针柱状的硅灰石在PTFE基体中分布相对均匀。

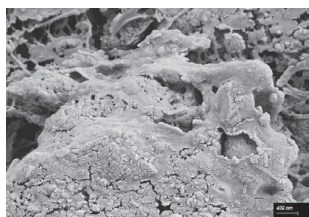
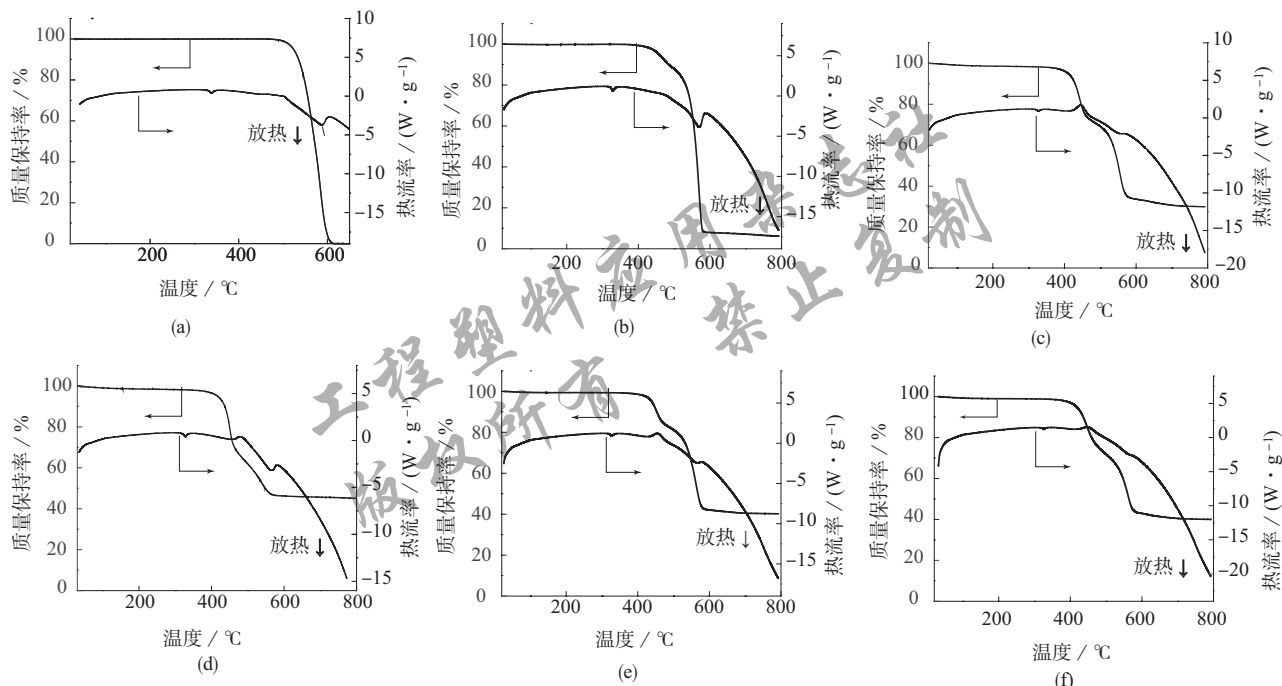


图4 PTFE/10paly/30wl 复合材料 SEM 照片

2.2 PTFE 复合材料的热相变

图5为PTFE及其复合材料的TG-DSC曲线,由图5可见,复合材料均在330℃左右出现放热峰,但没有伴随质量损失情况,分析认为,以PTFE为基体的复合材料,在成型烧结时,烧结温度(375℃)已超过PTFE的熔点,使得复合材料从结晶态转变

为非晶态,在DSC-TG分析时,330℃左右是非晶态复合材料发生结晶的温度,出现结晶放热效应。在470℃左右出现吸热谷并有一定的质量损失,是复合材料中凹凸棒石脱出结晶水而产生的吸热效应。在575℃左右出现放热峰并出现较大的质量损失,是PTFE因燃烧而发生的放热效应。对比PTFE及其复合材料的TG曲线可以发现,纯PTFE材料在600℃左右因燃烧完全而无质量剩余,添加矿物的复合材料在800℃时还有质量剩余,且剩余质量分数与矿物粉体添加量相差不大,进一步说明复合材料中存在凹凸棒石与硅灰石。对比PTFE及其复合材料的DSC曲线可以发现,纯PTFE的玻璃化转变温



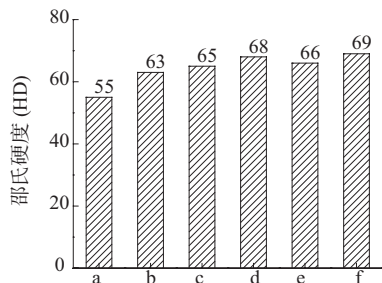
a—PTFE ; b—PTFE/10Paly/10Wl ; c—PTFE/10Paly/20Wl ; d—PTFE/10Paly/30Wl ; e—PTFE/5Paly/30Wl ; f—PTFE/15Paly/30Wl

图5 PTFE及其复合材料的TG-DSC

度(T_g)为342.52℃,添加矿物后,复合材料的 T_g 有所降低,分析是复合材料中的矿物粉体使得PTFE间的分子结合力减弱、自由体积增大的原因^[14,33]。

2.3 PTFE 复合材料的硬度

图6为PTFE及PTFE/Paly/Wl复合材料的邵氏硬度对比图。比纯PTFE材料(邵氏硬度为55),添加矿物粉体后的复合材料的邵氏硬度有所提高,且随着粉体添加量的增加而增大,其中PTFE/15Paly/30Wl复合材料的邵氏硬度可达到69,较未添加矿物粉体的PTFE增大了25.5%。分析认为,凹凸棒石与硅灰石粉体由于具有较高的硬度,同时粉体的加入限制了PTFE基体中的高分子链运动,是造成复合材料邵氏硬度增加的原因^[34]。



a—PTFE ; b—PTFE/10Paly / 10Wl ; c—PTFE/10Paly / 20Wl ; d—PTFE / 10Paly / 30Wl ; e—PTFE/5Paly / 30Wl ; f—PTFE / 15Paly / 30Wl

图6 PTFE及其复合材料的邵氏硬度

2.4 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能

图7为在干摩擦条件下与304不锈钢对磨的

PTFE 与其复合材料平均摩擦系数与磨损率。纯 PTFE 材料的摩擦系数为 0.216, 磨损率为 $1.95 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。图 8 为 PTFE 及其复合材料的摩擦系数。由图 8 可以看出, 在摩擦初期, 由于温度较低和摩擦时间较短, 在对磨钢环表面未形成有效且完整的转移膜, 使得添加矿物粉体后的复合材料摩擦系数变化较大且相对较高。经过一段时间的摩擦反应后, 摩擦副表面生成具有减摩作用的转移膜, 使复合材料的摩擦系数稳定在 0.3 左右。分析认为, 由于矿物粉体填料的引入, 在摩擦副表面出现微凸体, 造成摩擦副之间的相对运动阻力增大, 是 PTFE 复合材料摩擦系数稍有增加的原因。而矿物粉体的加入使 PTFE 复合材料的耐磨性能得到显著提高, 磨损率较纯 PTFE 材料降低了两个数量级。值得注意, PTFE / 10Paly / 30Wl 复合材料的摩擦系数较其它复合材料最低且非常稳定, 且该复合材料的磨损率仅为 $4.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, 较纯 PTFE 材料降低了 97.9%, 效果最佳。综合分析认为, PTFE 添加凹凸棒石和硅灰石粉体后, 尽管摩擦系数略有升高, 但磨损率显著降低, 对于改善 PTFE 材料使用效能的综合效益更好。

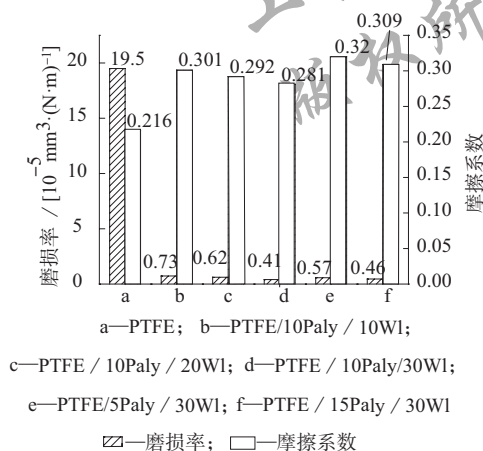


图 7 PTFE 及其复合材料的磨损率及平均摩擦系数

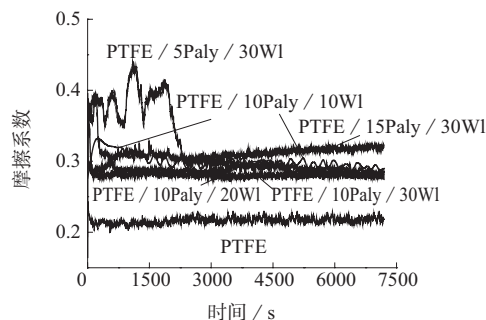
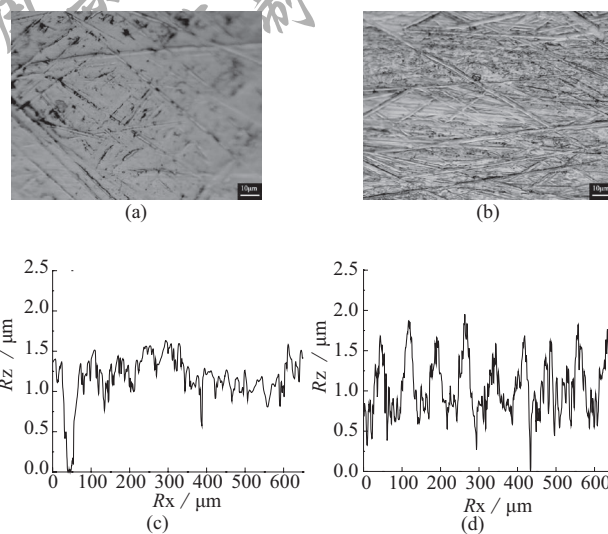


图 8 PTFE 及其复合材料的摩擦系数

2.5 磨损机理

纯 PTFE, PTFE / 10Paly / 30Wl 复合材料与 304 不锈钢对磨后, 钢环表面形貌 SEM 照片及粗糙度轮廓曲线如图 9 所示。Ra 为算术平均粗糙度, Rx 为 X 方向的采样长度, Rz 为轮廓的最大高度。可发现, 与纯 PTFE 对磨后的钢环表面出现明显的犁沟痕迹, 且没有发现明显的转移膜 (图 9a)。而与添加凹凸棒石和硅灰石粉体后的 PTFE 基复合材料对磨后的钢环表面的犁沟痕迹减少, 且形成了不连续的氧化膜和转移膜 (图 9b)。对比对磨钢环的粗糙度 (图 9c 与图 9d) 发现, 与纯 PTFE 对磨的钢环的粗糙度 ($0.194 \mu\text{m}$) 明显低于 PTFE / 10Paly / 30Wl 对磨钢环 ($0.281 \mu\text{m}$)。分析认为, 矿物粉体通过摩擦物理与摩擦化学的作用在对磨钢环表面形成具有一定厚度的氧化膜和转移膜, 一定程度上避免摩擦副的直接接触, 改善了摩擦界面的自适应性, 进而体现 PTFE 复合材料对钢环具有良好的抗磨效果 [35]。

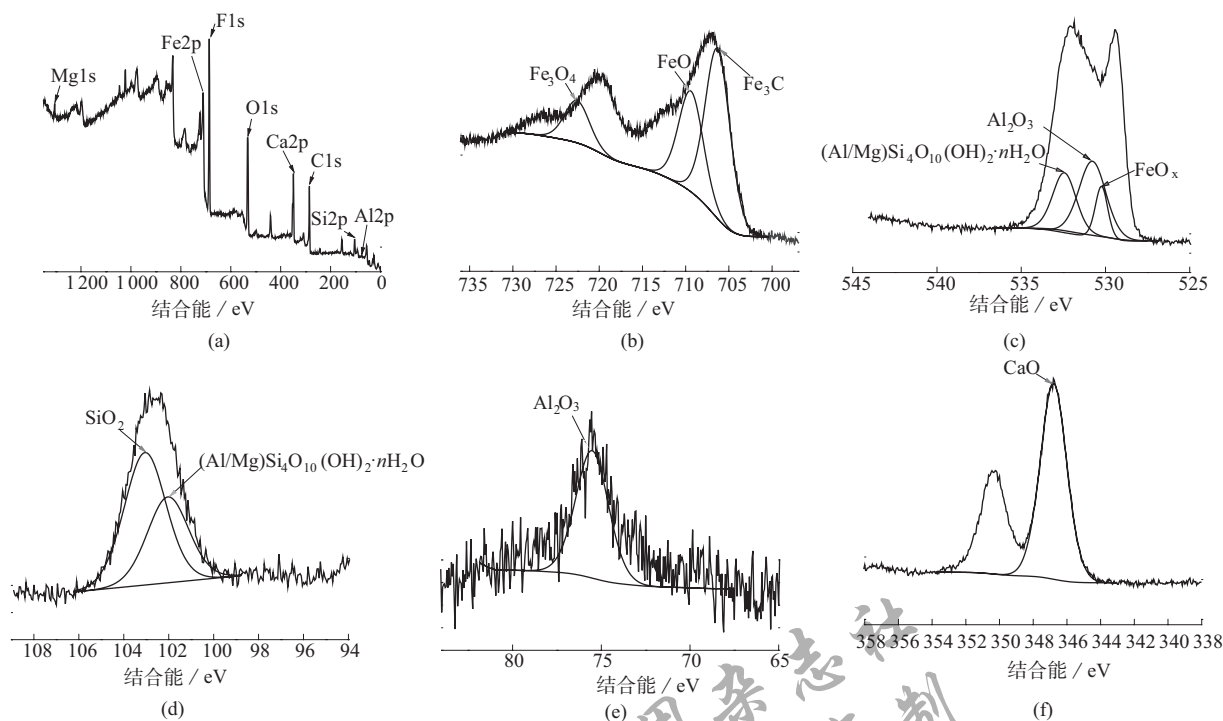


SEM : a—PTFE ; b—PTFE / 10paly / 30Wl

粗糙度轮廓曲线: c—PTFE ; d—PTFE / 10paly / 30Wl

图 9 与 PTFE 及 PTFE / 10paly / 30Wl 对磨钢环表面的微观 SEM 照片及粗糙度轮廓曲线

为进一步揭示矿物粉体参与摩擦反应降低 PTFE 复合材料磨损的机理, 利用 XPS 对 PTFE / 10Paly / 30Wl 复合材料对磨后的钢环表面转移膜化学状态进行分析, 钢环表面元素 (Fe, C, O, F, Si, Mg, Al, Ca) 价态及能谱如图 10a 所示。708.1 eV 处的 Fe 2p 峰代表 Fe_3C , 是 304 不锈钢的元素组成 (图 10b)。结合 O 1s (图 10b) 和 Fe 2p (图 10c) 能谱的拟合结果, 723.8 eV 及 709.2 eV 处的 Fe 2p 峰与 530.2 eV 处的 O 1s 峰对应铁氧化物 (Fe_3O_4 和



a—总 XPS ; b—O 1s ; c—Fe 2p ; d—Si 2p ; e—Al 2p ; f—Ca 2p

图 10 与 PTFE/10Paly/30Wl 复合材料对磨后钢环表面的 XPS 谱图

FeO),说明在干摩擦条件下发生摩擦氧化反应^[27]。结合 O 1s (图 10c) 和 Al 2p (图 10e) 及 Si 2p (图 10d) 能谱的拟合结果,75.5eV 处的 Al 2p 峰与 530.8 eV 处的 O 1s 峰对应 Al_2O_3 ,102 eV 处的 Si 2p 峰与 532.5 eV 处的 O 1s 峰对应硅酸盐物相,体现出凹凸棒石有效参与了摩擦界面的摩擦反应^[36-37]。结合 Ca 2p (图 10f) 能谱的拟合结果,346.5 eV 处的 Ca 2p 谱峰表明 CaO 存在^[38],反映了硅灰石有效参与了钢环表面摩擦转移膜和氧化膜的形成。研究认为,复合材料中的凹凸棒石及硅灰石粉体,在摩擦动能和热能作用下结晶度降低、反应活性增强,其中的活性 O 与铁基摩擦副表面的 Fe 键合形成铁氧化物,进而在摩擦副表面形成了富含铁氧化物、 Al_2O_3 , CaO 和复合硅酸盐的转移膜。

3 结论

(1) 微纳米凹凸棒石粉体与针柱状硅灰石粉体的引入,使得 PTFE 复合材料具有较低的结晶度和玻璃化转变温度及较高的硬度。摩擦磨损结果显示,矿物粉体使 PTFE 复合材料摩擦系数稍有升高但磨损率显著降低。

(2) 综合对比复合材料摩擦系数与磨损率,PTFE/10Paly/30Wl 复合材料的性能最优,该复合材料的磨损率仅为 $4.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,较纯

PTFE 材料降低了 97.9%,对于改善 PTFE 材料使用效能的综合效益更好。

(3) 在与复合材料对磨钢环表面形成具有一定厚度、含有矿物组分、不连续的氧化膜和转移膜,一定程度上避免摩擦副直接接触,改善摩擦界面的自适应性,减弱钢环对 PTFE 复合材料的表面磨损。为凹凸棒石及硅灰石等矿物材料作为耐磨聚合物的功能性填料开发和应用提供理论依据和技术支撑。

参考文献

- [1] Tanaka K. Effects of various fillers on the friction and wear of PTFE-based composites[M]. New York:American Chemical Society,1986.
- [2] Blanchet T A.Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene(PTFE) and PTFE composites[J]. Wear,1992,153(1):229-243.
- [3] Burris D L, Santos K, Lewis S L, et al. Polytetrafluoroethylene matrix nanocomposites for tribological applications[J]. Tribology and Interface Engineering Series,2008,55(8):403-438.
- [4] Harris K L, Pitenis A A, Sawyer W G, et al. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films[J]. Macromolecules,2015(48):3 739-3 745.
- [5] Babuska T F, Pitenis A A, Jones M R, et al. Temperature-dependent friction and wear behavior of PTFE and MoS_2 [J]. Tribology Letters, 2016,63:15-21.
- [6] Gu Dapeng, Zhang Longxiao, Chen Suwen, et al. Significant

- Reduction of the Friction and Wear of PMMA Based Composite by Filling with PTFE[J]. *Polymers*, 2018, 10(9):966–976.
- [7] Sawae Y, Morita T, Takeda K, et al. Friction and wear of PTFE composites with different filler in high purity hydrogen gas[J]. *Tribology International*, 2021. DOI:10.17577/IJERTV5IS090318.
- [8] Mccook N L, Boesl B, Burris D L, et al. Epoxy, ZnO, and PTFE nanocomposite: friction and wear optimization[J]. *Tribology Letters*, 2006, 22(3):253–257.
- [9] Yang Mingming, Zhu Xiaotao, Ren Guina, et al. Influence of air-plasma treatment and hexagonal boron nitride as filler on the high temperature tribological behaviors of hybrid PTFE / nomex fabric / phenolic composite[J]. *European Polymer Journal*, 2015, 67:143–151.
- [10] Liu Yingyi, Xu Nuo, Wang Yuan, et al. Preparation and tribological properties of hybrid PTFE / Kevlar fabric self-lubricating composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018(361):196–205.
- [11] Zhang Zhaozhu, Xue Qunji, Liu Wweimin, et al. Friction and wear characteristics of copper and its compound-filled PTFE composites under oil-lubricated conditions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 72(8):751–761.
- [12] Jia Zhining, Yang Yulin, Chen Jinjiang, et al. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE / serpentine composite under dry sliding condition[J]. *Wear*, 2010, 268(7):996–1 001.
- [13] 闫艳红, 王腾彬, 吴子健, 等. 基于正交设计的纳米蛇纹石-纳米氧化铜 / 聚四氟乙烯复合材料在沙尘环境下的摩擦学性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(7):1 522–1 530.
- Yan Yanhong, Wang Tengbin, Wu Zijian, et al. Tribological properties of nano Serpentine-nano La_2O_3 / polytetrafluoroethylene composites based on orthogonal design in sand-dust environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(7):1 522–1 530.
- [14] 李翠. 填充改性聚四氟乙烯的摩擦磨损性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- Li Cui. Study on friction and wear properties of filled PTFE[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [15] 古娜. 聚四氟乙烯复合材料摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- Gu Na. Study on friction and wear properties of PTFE composites[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [16] 索军营, 闵雅兰, 潘剑锋, 等. 针状硅灰石填充 PTFE 密封材料的性能[J]. *工程塑料应用*, 2018, 46(8):12–17.
- Suo Junying, Min Yalan, Pan Jianfeng, et al. Performance of acicular wollastonite filled PTFE sealing materials[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(8):12–17.
- [17] 孙庆杰, 冯新, 汪怀远, 等. 硅灰石形貌和尺寸因素对 PTFE 复合材料摩擦学性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2009, 25(5):56–59.
- Sun Qingjie, Feng Xin, Wang Huaiyuan, et al. Effects of filler's size and shape on the tribological properties of PTFE composites[J]. *Polym Mater Sci Eng*, 2009, 25(5):56–59.
- [18] 孙庆杰, 冯新, 王海棠, 等. 硅灰石的表面改性对其填充 PTFE 复合材料摩擦学性能和力学性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2008, 36(8):13–16.
- Sun Qingjie, Feng Xin, Wang Haitang, et al. The influence of surface modification of wollaston on the tribological and mechanical properties of its PTFE composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2008, 36(8):13–16.
- [19] 禹权, 叶素娟. 硅灰石纤维改性 PTFE 材料摩擦性研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(4):73–75.
- Yu Quan, Ye Sujuan. Research of the tribological properties of mineral fiber filled PTFE composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2012, 40(4):73–75.
- [20] 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.
- [21] 许恩恩, 范慧俐, 郭志猛, 等. 硅灰石纤维与二硫化钼填充改性聚四氟乙烯复合材料的性能研究[J]. *粉末冶金工业*, 2016, 26(1):51–55.
- Xu Enen, Fan Huili, Guo Zhimeng, et al. Study on the properties of wollastonite fiber -molybdenum disulfide filled polytetrafluoroethylene composites[J]. *Power Metall Ind*, 2016, 26(1):51–55.
- [22] 张博, 许一, 徐滨士, 等. 亚微米颗粒化凹凸棒石粉体对 45[#] 钢的减摩与自修复[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(3):291–300.
- Zhang Bo, Xu Yi, Xu Binshi, et al. Friction reduction and self-repairing performance of granulated nano attapulgite powders to 45[#] steel[J]. *Tribology*, 2012, 32(3):291–300.
- [23] 杨玲玲, 于鹤龙, 杨红军, 等. 摩擦试验条件对凹凸棒石黏土润滑油添加剂摩擦学性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2015, 20(2):273–279.
- Yang Lingling, Yu Helong, Yang Hongjun, et al. Effects of tribological test conditions on properties of attapulgite powders as lubricant additives[J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2015, 20(2):273–279.
- [24] 南峰, 许一, 高飞, 等. 凹凸棒石粉体作为润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(6):836–841.
- Nan Feng, Xu Yi, Gao Fei, et al. Tribological Property of Attapulgite Powder as Lubricant Additive[J]. *J Chin Ceram Soc*, 2013, 41(6):836–841.
- [25] 张博, 许一, 李晓英, 等. 纳米凹凸棒石对磨损表面的摩擦改性[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2012, 17(4):514–521.
- Zhang Bo, Xu Yi, Li Xiaoying, et al. Tribological modification of nano attapulgite powders on wear surface[J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2012, 17(4):514–521.

- [26] 尹艳丽,于鹤龙,王红美,等.不同结构层状硅酸盐矿物作为润滑油添加剂的摩擦学性能[J].硅酸盐学报,2020,48(2):299-308.
Yin Yanli, Yu Helong, Wang Hongmei, et al. Tribological performance of phyllosilicate minerals as lubricating oil additives[J]. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(2):299-308.
- [27] Nan Feng, Xu Yi, Xu Binshi, et al. Effect of natural attapulgite powders as lubrication additive on the friction and wear performance of a steel tribo-pair[J]. Applied Surface Science, 2014, 307:86-91.
- [28] Wang Kunpeng, Wu Huaichao, Wang Hongdong, et al. Tribological properties of novel palygorskite nanoplatelets used as oil-based lubricant additives[J]. Friction, 2021(9):332-343.
- [29] Ye Sujuan, Zeng Xingrong, Tan Feng, et al. Research on the tribological performance of Cr_2O_3 filled with bronze - based PTFE composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(22):547-557.
- [30] 黄海刚,王彩云,施点望.聚四氟乙烯纤维的定性鉴别研究[J].中国纤检,2014(17):78-81.
Huang Haigang, Wang Caiyun, Shi Dianwang. Study on the qualitative identification for PTFE fiber[J]. China Fiber Inspection, 2014(17):78-81.
- [31] 宋功保,刘福生.坡缕石的红外光谱研究[J].岩石学报,1999,15(3):469-474.
Song Gongbao, Liu Fusheng. Infrared spectrum study of palygorskite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3):469-474.
- [32] 赵文俞,张清杰,彭长琪.硅灰石分子结构的 FTIR 谱[J].硅酸盐学报,2006,34(9):1137-1139.
Zhao Wenyu, Zhang Qingjie, Peng Changqi. FTIR spectra for molecular structure of Wollastonite[J]. J Chin Ceram Soc, 2006, 34(9):1137-1139.
- [33] 张芳,杜春毅,张炎. PP / POE / Nano- CaCO_3 复合材料的动力学热分析[J].塑料工业,2005,33(1):19-22.
Zhang Fang, Du Chunyi, Zhang Yan. Dynamic Mechanical thermal analysis of PP / POE / nano-meter CaCO_3 [J]. China Plastics Industry, 2005, 33(1):19-22.
- [34] 杨东亚,王月,董悦,等.不同纳米填料增强 PPS-PTFE 共混物的摩擦磨损性能分析[J].功能材料,2014,45(6):11-15.
Yang Dongya, Wang Yue, Dong Yue, et al. Tribological performance of different nanoparticles reinforced PPS-PTFE blends[J]. J Funct Mater, 2014, 45(6):11-15.
- [35] 牛永平,王亮,杜三明,等.不同温度下 PTFE 纳米复合材料摩擦学性能的研究[J].塑料工业,2011,39(7):83-86,106.
Niu Yongping, Wang Liang, Du Sanming, et al. Tribological properties of PTFE nanocomposites at different temperature[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(7):83-86, 106.
- [36] Zhao Fuyan, Gao Chuanping, Wang Honggang, et al. Tribological behaviors of carbon fiber reinforced epoxy composites under PAO lubrication conditions[J]. Tribology Letters, 2016, 62(3):1-11.
- [37] Nan Feng, Xu Yi, Xu Binshi, et al. Tribological behaviors and wear mechanisms of ultrafine magnesium aluminum silicate powders as lubricant additive[J]. Tribology International, 2015, 81:199-208.
- [38] 龙沁,周大利,张翔,等.硅烷偶联剂制备及对磷灰石-硅灰石生物玻璃陶瓷的表面改性[J].无机化学学报,2013,29(5):948-952.
Long Qin, Zhou Dali, Zhang Xiang, et al. Preparation of a silane coupling agent and surface modification of apatite-wollastonite bioactive glass-ceramic chin[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2013, 29(5):948-952.

(上接第 101 页)

- Wen Rui, Xiao Guohua. Design for compound second inclined ejecting mechanism and injection mould of vacuum cleaner switch cover[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(12):85-91.
- [9] 杨志红,海争平.电动汽车电池盖多面及双层滑块脱模机构注塑模设计[J].塑料,2017,46(2):98-101.
Yang Zhihong, Hai Zhengping. Design of injection mold for the new energy automotive battery cover with double layer sliding block ejection mechanism[J]. Plastics, 2017, 46(2):98-101.
- [10] 任长春,卢勇.笔记本电脑屏幕框热流道注射模具设计[J].中国塑料,2012,26(9):93-97.
Ren Changchun, Lu Yong. Design of injection mould with hot runner for notebook computer display frame[J]. China Plastics, 2012, 26(9):93-97.
- [11] 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 forming technology and mould design[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2013.
- [12] 黄继战,范玉,仇文宁,等.基于 UG NX 的汽车音响面板注塑模设计[J].工程塑料应用,2017,45(9):80-83.
Huang Jizhan, Fan Yu, Qiu Wenning, et al. Design of injection mould for car audio panel based on UG NX[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(9):80-83.
- [13] 芦亚萍.塑料成型工艺与模具设计[M].北京:清华大学出版社,2010.
Lu Yaping. Plastic molding process and die design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [14] 任长春,窦宝林.浇口偏置笔记本电脑外壳注塑模设计[J].工程塑料应用,2012,40(8):64-67.
Ren Changchun, Dou Baolin. Design of injection mold with offset gate for notebook computer cover[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(8):64-67.
- [15] 肖小峰,宋琪,薛琼.基于 Pro/E 旋转桶热流道注塑模设计[J].塑料,2012,41(1):101-104.
Xiao Xiaofeng, Song Qi, Xue Qiong. Design of spin-tub's hot runner injection mold based on Pro / E[J]. Plastics, 2012, 41(1):101-104.