

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.11.023

层状 α -磷酸锆改性聚四氟乙烯摩擦磨损性能

郑合静¹, 杨兆方¹, 丁晓龙¹, 章然¹, 焦明华², 马少波²

(1. 合肥波林新材料股份有限公司, 合肥 230088; 2. 合肥工业大学摩擦学研究所, 合肥 230009)

摘要:以层状 α -磷酸锆、聚四氟乙烯 (PTFE) 乳液为原料, 采用含泥复合-塑化方法制备了 PTFE / 层状 α -磷酸锆复合材料, 从改性层铅笔硬度、摩擦面表面形貌、摩擦因数、磨损量四个方面分别研究干摩擦和有油润滑条件下不同含量层状 α -磷酸锆对 PTFE 摩擦磨损性能的影响机制。结果表明, 无论是在干摩擦条件下还是在有油润滑条件下, 添加层状 α -磷酸锆的 PTFE 改性层均具有优异的摩擦磨损性能。随着层状 α -磷酸锆含量提高, PTFE 改性层的铅笔硬度增加、摩擦因数先降低后升高, 磨损量大幅降低; 当层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 时摩擦因数最低, 在干摩擦条件下和有油润滑条件下其摩擦因数较纯 PTFE 分别降低 5% 和 50%, 磨损量较纯 PTFE 分别降低 83.33% 和 78.57%; 通过对摩擦面表面及磨损量的分析得出, 干摩擦条件下 PTFE 改性层的磨损机理以磨粒磨损为主, 有油润滑条件下磨损机理以轻微的黏着磨损为主。

关键词:层状 α -磷酸锆; 聚四氟乙烯; 摩擦因数; 磨损量

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)11-0126-06

Friction and Wear Properties of Layered α -Zirconium Phosphate Modified PTFE

Zheng Hejing¹, Yang Zhaofang¹, Ding Xiaolong¹, Zhang Ran¹, Jiao Minghua², Ma Shaobo²

(1. Hefei Bolin Advanced Materials Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2. Institute of Tribology Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract : The polytetrafluoroethylene (PTFE) / layered α -zirconium phosphate composite was prepared from the layered α -zirconium phosphate and PTFE emulsion by a mud-containing composite-plasticizing method. The influence mechanism of different mass fractions of layered α -zirconium phosphate on the friction and wear properties of PTFE under dry friction and oil lubrication were studied from four aspects : pencil hardness of modified layer, topography of friction surface, friction coefficient and wear amount. The results showed that the modified PTFE layer with α -zirconium phosphate had excellent friction and wear properties under both dry friction and oil lubrication. With the increase of the mass fraction of layered α -zirconium phosphate, the pencil hardness of the modified PTFE layer increased, and the friction coefficient first decreased and then increased. When the mass fraction of layered α -zirconium phosphate was 15%, the friction coefficient was the lowest. Under dry friction condition and oil lubrication condition, the friction coefficient of PTFE decreased by 5% and 50%, and the wear amount decreased by 83.33% and 78.57, respectively, compared with pure PTFE. Through the analysis of friction surface and wear amount, it was concluded that the wear mechanism of the modified PTFE layer was mainly abrasive wear under dry friction condition and slightly adhesive wear under oil lubrication condition.

Keywords : layered α -zirconium phosphate ; polytetrafluoroethylene ; friction coefficient ; wear amount

聚四氟乙烯 (PTFE) 具有优异的自润滑性能, 摩擦因数低, 是滑动摩擦零件中重要的减摩基体材料, 但 PTFE 材料存在耐磨性差、硬度和强度低等缺点, 限制了其在很多领域的发展和应用^[1-2]。通过在

PTFE 材料中添加一些添加剂, 如二硫化钼、石墨、二氧化锆、氮化硼等可有效提高其摩擦学性能。其中以层状结构的二硫化钼和石墨应用最为广泛^[3-7], 但这两种材料都存在一些应用局限性, 如钼元素属

通信作者: 郑合静, 工程师, 主要研究方向为金属基、聚合物基自润滑材料及轴套等相关产品, 摩擦副材料及产品开发

收稿日期: 2021-09-08

引用格式: 郑合静, 杨兆方, 丁晓龙, 等. 层状 α -磷酸锆改性聚四氟乙烯摩擦磨损性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(11) : 126-131, 138.

Zheng Hejing, Yang Zhaofang, Ding Xiaolong, et al. Friction and wear properties of layered α -zirconium phosphate modified PTFE[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(11) : 126-131, 138.

于稀土金属,成本高,且存在高温氧化失效的缺点,石墨的使用环境则必须存在一定量的水分^[8]。因此寻找新的材料补充或替代二硫化钼和石墨对 PTFE 材料进行改性一直是意义的研究课题。

层状磷酸锆具有与二硫化钼和石墨类似的层状晶体结构,不溶于水和有机溶剂,耐酸碱能力强,热稳定性和力学强度高,是近年来被广泛研究的一类固体润滑剂^[9-11]。然而,当前研究中层状磷酸锆主要应用于润滑油和润滑脂的改性上^[12-13],关于将层状磷酸锆应用于改性 PTFE 鲜有报道,层状磷酸锆对 PTFE 摩擦磨损性能的影响机制仍需要进一步研究。

基于此,笔者以层状 α -磷酸锆为填充材料,采用含泥复合-塑化方法制备了 PTFE/ α -磷酸锆复合材料,从改性层铅笔硬度、摩擦面表面形貌、摩擦因数、磨损量四个方面揭示不同含量层状 α -磷酸锆对 PTFE 摩擦磨损性能的影响机制,有望为后续优化 PTFE 摩擦磨损性能提供理论和技术支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTFE 乳液:FR301G,上海三爱富新材料有限公司;

层状 α -磷酸锆:99%,20~50 μm ,绵竹耀隆化工有限公司。

1.2 主要设备与仪器

箱式塑化炉:RX3-16-5 型,湖州双能工业炉有限公司;

涂层铅笔硬度检测仪:PPH-1 型,上海精密仪器仪表有限公司;

光学显微镜:XJL-02A 型,上海鑫天精密仪器有限公司;

端面摩擦磨损试验机:HDM-20 型,合肥工业大学。

1.3 试样制备

称取适量 PTFE 乳液,分别加入质量分数 0%,5%,10%,15%,20%,25% 和 30% 的层状 α -磷酸锆粉末,搅拌均匀后加入酒精破乳形成泥料,使用轧机将泥料与双金属球粉板(由钢背和烧结的多孔铜粉层组成)复合泥料厚度为 0.03~0.05 mm,在 180℃ 下对含泥复合的板材烘干 20 min,使用轧机对烘干的板材进行中轧,轧下量为 0.01 mm,对轧制的板材在氮气气氛下 370℃ 塑化 2 h 并随炉冷却,塑化好的板材再经终轧最终制成 PTFE 改性层

为 0.02~0.03 mm 的三层复合板材,板材结构如图 1 所示。

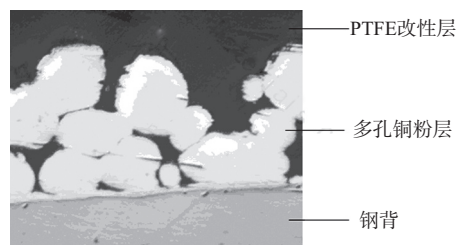


图 1 三层复合板材结构

1.4 测试表征

铅笔硬度依据 GB/T6739-2006 测试。

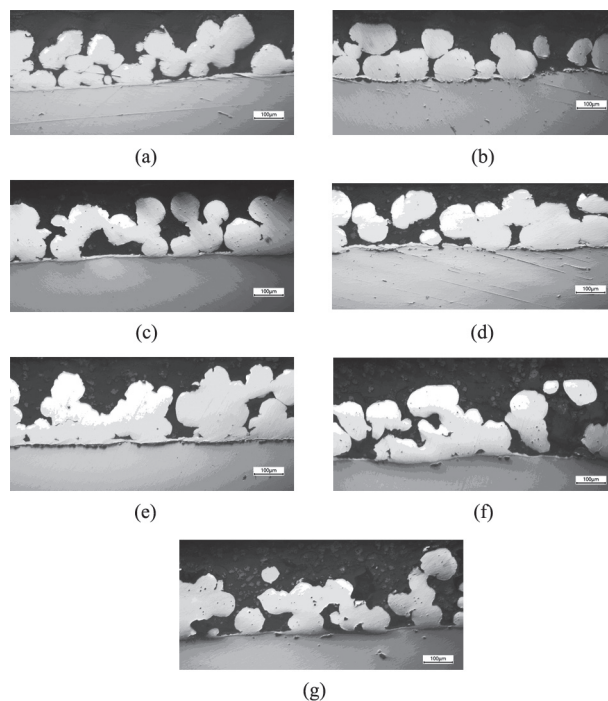
材料截面形貌及磨损表面形貌使用光学显微镜观察。

摩擦因数及磨损量依据 Q/BL 010-2020 测试,干摩擦载荷为 2 MPa,线速度为 0.2 m/s,摩擦时间 2 h;有油润滑载荷为 8 MPa,线速度为 0.4 m/s,摩擦时间 1.5 h。取试验稳定时的摩擦因数为试样的摩擦因数,用千分尺在样品磨损部位分别测量 4 点磨损前后的壁厚,并取算术平均值计算磨损量。

2 结果与讨论

2.1 PTFE 改性层形貌

图 2 为不同层状 α -磷酸锆含量的三层复合板材的截面形貌。由图 2 可知,添加的层状 α -磷酸



a—0%; b—5%; c—10%; d—15%; e—20%; f—25%; g—30%

图 2 不同层状 α -磷酸锆含量的三层复合板材截面形貌

锆均匀嵌入在 PTFE 基体中,且随着层状 α -磷酸锆含量的增加,PTFE 基体中分布的层状 α -磷酸锆增多。

2.2 PTFE 改性层铅笔硬度

PTFE 材料硬度低导致其在使用时耐磨性差,加入填料后材料的硬度会有所变化进而影响到其耐磨性,因此硬度是探究材料摩擦磨损性能的重要参考指标^[9]。实验制备的 PTFE 改性层厚度仅有 0.02~0.03 mm,一般测试材料硬度的方法并不合适,笔者参考漆膜硬度测试方法通过测试材料的铅笔硬度来了解不同含量的层状 α -磷酸锆对 PTFE 改性层硬度的影响。

表 1 为不同层状 α -磷酸锆含量的 PTFE 改性层的铅笔硬度。从表 1 可以看出,随着层状 α -磷酸锆含量的增加,PTFE 改性层的铅笔硬度也在不断增加。复合材料的硬度与基体本身的性质有关,也与所填充填料的种类、形貌及含量有关。PTFE 其本身硬度较低,而层状 α -磷酸锆是一种硬质粒子,因此在加入了层状 α -磷酸锆后 PTFE 改性层的硬度大幅提高,但随着含量的增加层状 α -磷酸锆对 PTFE 硬度的影响减小,因此 PTFE 改性层硬度增加幅度变小。

表 1 不同层状 α -磷酸锆含量的 PTFE 改性层铅笔硬度

项目	层状 α -磷酸锆质量分数/%						
	0	5	10	15	20	25	30
铅笔硬度等级	HB	2H	3H	3H	4H	5H	6H

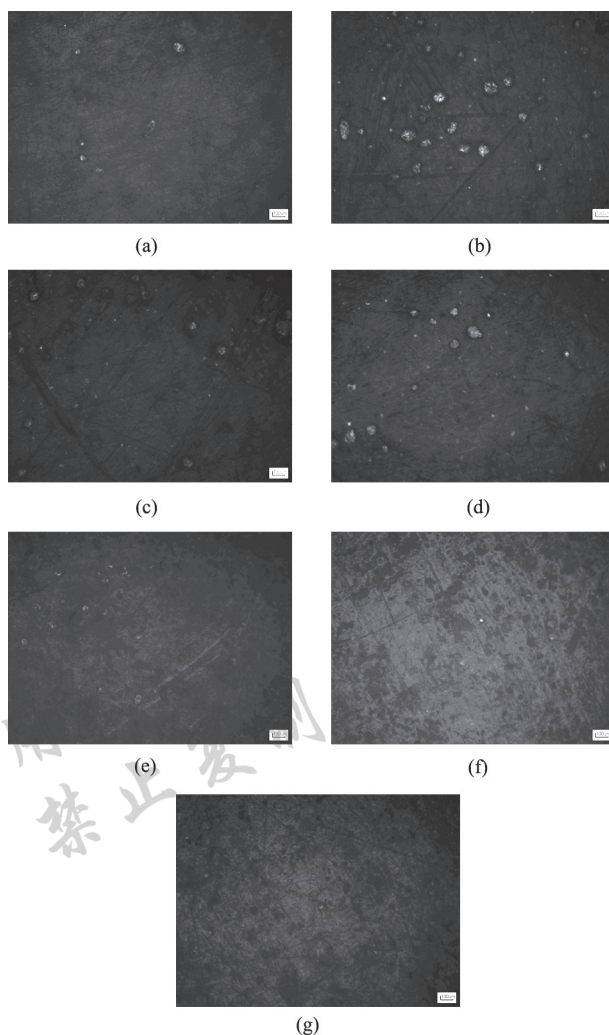
2.3 摩擦与磨损

对不同层状 α -磷酸锆含量的 PTFE 改性层进行端面摩擦磨损试验,通过对比摩擦面表面形貌、摩擦因数及磨损量来分析 PTFE 改性层的摩擦磨损性能。此外,不同润滑条件下材料的摩擦磨损性能不一样,分别在干摩擦条件下和有油润滑条件下进行端面摩擦磨损试验,分析其摩擦磨损性能。

(1) 摩擦面表面形貌。

为了探究材料的摩擦磨损机理,采用光学显微镜观察试样摩擦面表面形貌,通过对比磨损前后 PTFE 改性层的表面形貌对其摩擦磨损机理进行分析。

图 3 为磨损前不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的表面形貌。从图 3 可以看出,层状 α -磷酸锆质量分数为 5%~15% 时,由于泥料较软导致含泥复合的 PTFE 改性层较薄,磨损前材料表面出现隐约露铜现象。

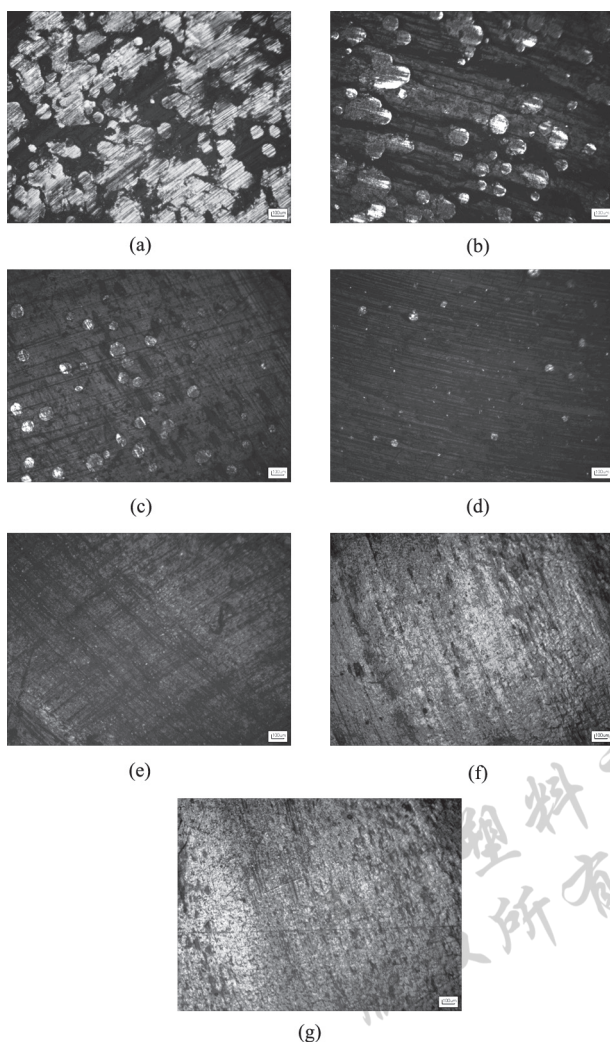


a—0%; b—5%; c—10%; d—15%; e—20%; f—25%; g—30%

图 3 磨损前不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的表面形貌

图 4 为摩擦条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的表面形貌。从图 4 可以看出,干摩擦条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的摩擦面均出现犁沟,由此说明 PTFE 改性层以磨粒磨损为主^[14-15]。对比图 3 中磨损前 PTFE 改性层的表面形貌可以看出,层状 α -磷酸锆质量分数为 0%~15% 的 PTFE 改性层摩擦面出现漏铜现象,且漏铜程度随着层状 α -磷酸锆含量的增加逐渐减小;而层状 α -磷酸锆质量分数为 20%~30% 的 PTFE 改性层摩擦面没有出现漏铜现象,但改性层表面出现析出物,层状 α -磷酸锆质量分数为 20% 的 PTFE 改性层的摩擦面析出物较少。

图 5 为有油润滑条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的表面形貌。由图 5 可看出,有油润滑条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性



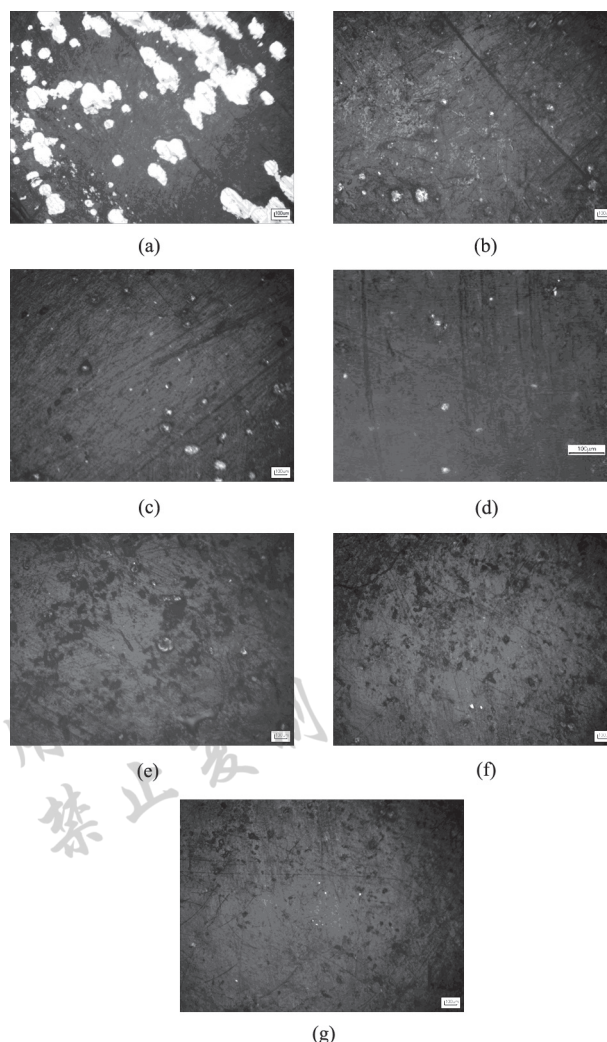
a—0% ; b—5% ; c—10% ; d—15% ; e—20% ; f—25% ; g—30%

图4 干摩擦条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的摩擦面表面形貌

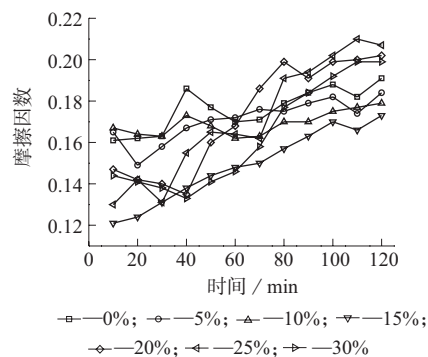
层的摩擦面未出现犁沟、点蚀、剥落、裂纹等磨损现象。对比图5和图3可以看出,纯PTFE层摩擦面出现严重漏铜;层状 α -磷酸锆质量分数为5%~15%的PTFE改性层摩擦面出现轻微隐约漏铜;与磨损前的状态相差不大;层状 α -磷酸锆质量分数为20%~30%的PTFE改性层摩擦面没有出现漏铜现象。由上述现象可知,添加层状 α -磷酸锆后PTFE的耐磨性提高。

(2) 摩擦因数。

图6为干摩擦时摩擦因数随时间的变化曲线。随着时间增加,摩擦因数呈上升趋势,在100 min后趋于稳定。其中层状 α -磷酸锆质量分数为15%时PTFE改性层的摩擦因数在整个阶段都处于最低状态。层状 α -磷酸锆质量分数在0~



a—0% ; b—5% ; c—10% ; d—15% ; e—20% ; f—25% ; g—30%

图5 有油润滑条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的摩擦面表面形貌图6 干摩擦条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层摩擦因数与时间的关系

10%之间的PTFE层在70 min前摩擦因数较高,在70 min后摩擦因数较低。层状 α -磷酸锆质量分数在20%~30%之间的PTFE层摩擦因数相差不

大。由上述分析可知,干摩擦条件下当层状 α -磷酸锆质量分数在 15% 时其对 PTFE 材料的减摩效果最佳,稳定时材料的摩擦因数较纯 PTFE 降低 5% 左右;层状 α -磷酸锆质量分数小于 15% 时未起到减摩效果,且随着时间的延长 PTFE 改性层磨损严重导致露铜、耐磨性差;层状 α -磷酸锆质量分数大于 15% 时前期虽起到减摩效果,但随着时间的延长改性层表面聚集了较多的层状 α -磷酸锆硬质粒子,形成的层状 α -磷酸锆聚集层与对摩件摩擦,导致摩擦因数增加^[16]。

图 7 为有油润滑时摩擦因数随时间的变化曲线。随着时间增加摩擦因数呈降低趋势,在 40 min 后趋于稳定。有油润滑条件下添加层状 α -磷酸锆的 PTFE 改性层摩擦因数较纯 PTFE 层低,且随着层状 α -磷酸锆含量增加 PTFE 改性层的摩擦因数先减小后增加,当层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 时 PTFE 改性层的摩擦因数最低。由上可知,有油润滑条件下层状 α -磷酸锆对 PTFE 基体有明显的减摩效果,当层状 α -磷酸锆质量分数在 15% 时减摩效果最佳,其稳定时的摩擦因数较纯的 PTFE 降低 50%。纯 PTFE 层摩擦面严重漏铜,露出的铜影响整个油膜的完整性、导致材料的摩擦因数较大;层状 α -磷酸锆质量分数为 5%~15% 时 PTFE 改性层摩擦面虽有轻微隐约漏铜,但其对油膜的完整性影响很小,层状 α -磷酸锆对材料的减摩作用占优势,因此其摩擦因数较纯 PTFE 低,且随着层状 α -磷酸锆含量的增加 PTFE 改性层的摩擦因数降低;层状 α -磷酸锆质量分数为 20%~30% 的 PTFE 改性层摩擦面虽没有漏铜,但其表面含有较多的层状 α -磷酸锆硬质粒子,破坏了油膜的完整性,导致改性层的摩擦因数比 15% 时高,且随着层状 α -磷酸锆含量的增加 PTFE 改性层的摩擦因数增加。

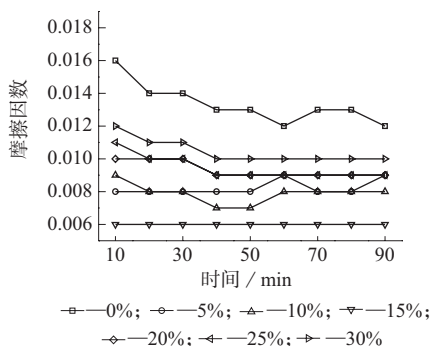


图 7 有油润滑条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层摩擦因数与时间的关系

(3) 磨损量。

图 8 为干摩擦时磨损量随层状 α -磷酸锆含量的变化曲线。干摩擦条件下纯 PTFE 层磨损量最大为 0.06 mm,随着层状 α -磷酸锆含量的增加,PTFE 改性层的磨损量减小。当层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 时 PTFE 改性层的磨损量为 0.009 mm,相比纯 PTFE 其磨损量降低了 83.33%;当层状 α -磷酸锆质量分数大于 25% 时磨损量达到最低,由此来看干摩擦条件下层状 α -磷酸锆对提高 PTFE 的耐磨性效果明显。纯 PTFE 自身耐磨性差,加入层状 α -磷酸锆后 PTFE 改性层的硬度增加,且随着层状 α -磷酸锆含量的增加硬度不断增加,最终出现随层状 α -磷酸锆含量的增加 PTFE 改性层磨损量不断降低的状况,耐磨性不断增强。

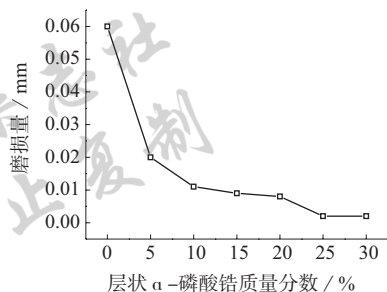


图 8 干摩擦条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的磨损量

图 9 为有油润滑条件下磨损量随层状 α -磷酸锆含量的变化曲线。在有油润滑条件下纯 PTFE 层磨损量较大,虽然比干摩擦条件下低很多,但仍然达到 0.014 mm。加入层状 α -磷酸锆 PTFE 改性层的磨损量大幅降低,当层状 α -磷酸锆质量分数为 5% 时,PTFE 改性层的磨损量即降低到 0.003 mm。当层状 α -磷酸锆含量继续增加时 PTFE 改性层的磨损量降低幅度不明显,由此来看有油润滑条件下改变层状 α -磷酸锆含量对提高 PTFE 的耐磨性效果明显,层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 时 PTFE 改性层的磨损量较纯 PTFE 磨损量降低了 78.57%。

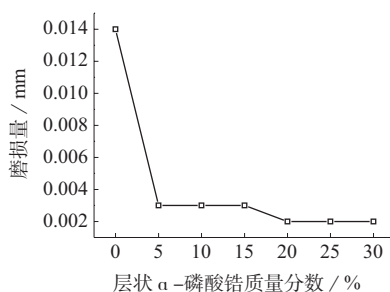


图 9 有油润滑条件下不同层状 α -磷酸锆含量 PTFE 改性层的磨损量

有油润滑条件下 PTFE 改性层的磨损量很小,经观察其摩擦面未发现犁沟、点蚀、剥落、裂纹等磨损现象,试验时对磨件之间又有油膜形成,因此分析有油润滑条件下磨损主要是在油膜破损时改性层与对磨件发生轻微的黏着磨损造成的,即有油润滑条件下 PTFE 改性层以轻微的黏着磨损为主。

3 结论

(1) 层状 α -磷酸锆影响 PTFE 改性层的铅笔硬度。随着层状 α -磷酸锆含量的增加,PTFE 改性层的铅笔硬度增加。

(2) 层状 α -磷酸锆影响 PTFE 改性层的摩擦因数。无论是在干摩擦条件下还是在有油润滑条件下,PTFE 改性层的摩擦因数随着层状 α -磷酸锆含量的增加先降低后升高,当层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 时摩擦因数最低,在干摩擦条件下和有油润滑条件下较纯 PTFE 分别降低 5% 和 50%。

(3) 层状 α -磷酸锆影响 PTFE 改性层的磨损量。无论是在干摩擦条件下还是在有油润滑条件下,加入层状 α -磷酸锆的 PTFE 改性层其磨损量较纯 PTFE 层降低明显、耐磨性大幅提高。在干摩擦条件下,随着层状 α -磷酸锆含量增加 PTFE 改性层的磨损量降低明显;在有油润滑条件下,随着层状 α -磷酸锆含量增加 PTFE 改性层的磨损量变化不明显。在干摩擦条件下和有油润滑条件下层状 α -磷酸锆质量分数为 15% 的 PTFE 改性层的磨损量较纯 PTFE 分别降低 83.33% 和 78.57%。

(4) 在干摩擦条件下,PTFE 改性层的磨损机理以磨粒磨损为主;在有油润滑条件下,其磨损机理以轻微的黏着磨损为主。

参考文献

- [1] 黄彧,王文东,黄炜,等. 聚四氟乙烯在滑动轴承中的应用[J]. 有机氟工业,2020(4):47-51.
Huang Yu, Wang Wendong, Huang Wei, et al. Application of polytetrafluoroethylene in sliding bearing[J]. Organic Fluorine Industry, 2020(4):47-51.
- [2] 赵泽鹏,黎相孟,严鑫. 聚四氟乙烯涂层制备及润湿性研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(2):9-12,21.
Zhao Zepeng, Li Xiangmeng, Yan Xin. Research on preparation and wettability of polytetrafluoroethylene coating[J]. Machinery Manufacturing & Automation, 2021, 50(2):9-12, 21.
- [3] 崔锦峰,文泽东,白常宁,等. 聚四氟乙烯改性研究进展[J]. 塑料工业,2020,48(11):8-13.
Cui Jinfeng, Wen Zedong, Bai Changning, et al. Research progress on modification of polytetrafluoroethylene[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(11):8-13.
- [4] 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.
- [5] 王丽婧,金霞,武聪,等. 玻璃纤维对 PTFE/SiO₂ 复合基板材料性能的影响[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):130-134.
Wang Lijing, Jin Xia, Wu Cong, et al. Effect of glass fiber on properties of PTFE/SiO₂ composite substrate[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):130-134.
- [6] 李朋辉,侯根良,毕松,等. 二硫化钼改性 PTFE 摩擦磨损性能[J]. 塑料工业,2018,46(11):33-36.
Li Penghui, Hou Genliang, Bi Song, et al. Friction and wear properties of PTFE composites filled with MoS₂[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(11):33-36.
- [7] Zhang Ke, Ji Xin, Mi Yiming, et al. Effects of carbon fibers with different particle sizes on the physical properties of MoS₂-filled PTFE composites[J]. Philosophical Magazine Letters, 2021, 101(7):277-286.
- [8] 王建吉,刘涛. 聚酰亚胺/石墨改性聚四氟乙烯的摩擦学性能[J]. 高分子材料科学与工程,2018,34(8):61-66.
Wang Jianji, Liu Tao. Tribological properties of polyimide/graphite modified polytetrafluoroethylene[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2018, 34(8):61-66.
- [9] 李佳欣,赖学军,叶振兴,等. 层状纳米磷酸锆的制备及催化成炭阻燃聚合物的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程,2019,35(1):183-190.
Li Jiaxin, Lai Xuejun, Ye Zhenxing, et al. Progress in preparation of nano-layered phosphate zirconium and its catalyzing carbonization in flame retardant polymer[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(1):183-190.
- [10] 李迪帆,倪文秀,侯震山. 磷酸锆催化剂用于生物质转化[J]. 催化学报,2017,38(11):1784-1793.
Li Difan, Ni Wenxiu, Hou Zhenshan. Conversion of biomass to chemicals over zirconium phosphate-based catalysts[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2017, 38(11):1784-1793.
- [11] 代莹静,牛文星,张效胜,等. 层状磷酸锆作为无水钙基脂添加剂的摩擦性能[J]. 石油学报(石油加工),2018,34(4):776-782.
Dai Yingjing, Niu Wenxing, Zhang Xiaosheng, et al. Tribological properties of layered zirconium phosphate as anhydrous calcium based lipid additive[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing), 2018, 34(4):776-782.

- [10] 刘娟,李青芳,韩悦,等. 笼状硫代磷酸酯对聚氨酯泡沫性能的影响[J]. 塑料,2017,46(1):55-57.
Liu Juan, Li Qingfang, Han Yue, et al. Effect of caged sulfur phosphate on the properties of rigid polyurethane foam[J]. *Plastics*, 2017,46(1):55-57.
- [11] 王娜,于芳,王升,等. 笼状季戊四醇磷酸酯-可膨胀石墨协同阻燃天然橡胶[J]. 复合材料学报,2018,35(11):2966-2972.
Wang Na, Yu Fang, Wang Sheng, et al. Caged pentaerythritol phosphate-expandable graphite synergistic flame retardant natural rubber[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018,35(11): 2966-2972.
- [12] Zhang Gang, Song Dongdong, Ma Su, et al. A novel P-S-Si-based cage-structural monomer for flame-retardant modification of unsaturated polyester resin[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021,32(4):1604-1614.
- [13] Jian Rongkun, Wang Pan, Duan Weisen, et al. Synthesis of a novel P/N/S-containing flame retardant and its application in epoxy resin: thermal property, flame retardance, and pyrolysis behavior[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(44):11520-11527.
- [14] 罗星,谢德龙,梅毅,等. 有机磷-氮系协同阻燃剂的研究进展及其表征[J]. 塑料工业,2018,46(4):20-25.
Luo Xing, Xie Delong, Mei Yi, et al. Research progress and characterization of organic phosphorus and nitrogen synergistic flame retardants[J]. *China Plastics Industry*, 2018,46(4):20-25.
- [15] Wu Haiyang, Zeng Birong, Chen Jinmei, et al. An intramolecular hybrid of metal polyhedral oligomeric silsesquioxanes with special titanium-embedded cage structure and flame retardant functionality[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019,374: 1304-1316.
- [16] 王彦林,沈敏杰,陈秀丽,等. 一种磷氮协同木材阻燃剂的制备方法:201610057598[P].2016-01-28.
Wang Yanlin, Shen Minjie, Chen Xiuli, et al. Preparation method of phosphorus and nitrogen synergistic wood flame retardant:201610057598[P].2016-01-28.
- [17] Chen Yajun, Li Linshan, Qi Xiaoqing, et al. The pyrolysis behaviors of phosphorus-containing organosilicon compound modified APP with different polyether segments and their flame retardant mechanism in polyurethane foam[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019,173:106784-106792.

(上接第131页)

- [12] Zhang Xiaosheng, Xu Hong, Dong Jinxiang. Tribological properties of magnesium ion-exchanged α -zirconium phosphate as a solid lubricant additive in lithium grease[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science)*, 2019(1):47-54.
- [13] Jiang Feng, Sun Haoyang, Chen Lei, et al. Dispersion-tribological property relationship in mineral oils containing 2D layered α -zirconium phosphate nanoplatelets[J]. *Friction*, 2020, 8(4):695-707.
- [14] 周红成,郭永信,卞达,等. 六方氮化硼改性聚四氟乙烯/聚酰胺酰亚胺复合涂层摩擦磨损性能的研究[J]. 塑料工业,2020, 48(9):154-158.
Zhou Hongcheng, Guo Yongxin, Bian Da, et al. Friction and wear properties of polytetrafluoroethylene / polyamideimide composite coatings modified by hexagonal boron nitride[J]. *China Plastics Industry*, 2020,48(9):154-158.
- [15] 陈全贵,张美林,王孝军,等. 半芳香族聚酰胺 PA6T 及其 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 中国塑料,2021,35(7):1-11.
Chen Quanguai, Zhang Meilin, Wang Xiaojun, et al. Friction and wear properties of semi-aromatic polyamide PA6T and PTFE composites[J]. *Chinese Plastics*, 2021,35(7):1-11.
- [16] Mazur K, Gdek-Moszczak A, Liber-Kne A, et al. Mechanical behavior and morphological study of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites under static and cyclic loading condition[J]. *Materials*, 2021.doi:10.3390/ma14071712.