

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.003

针状硅灰石填充 PTFE 密封材料的性能

索军营¹, 闵雅兰¹, 潘剑锋¹, 李红波², 蒋洪罡², 苏正涛²

[1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095]

摘要:以针状的硅灰石为填料,采用冷压烧结工艺制备了不同填料含量的聚四氟乙烯(PTFE)密封材料,考察了 PTFE 的拉伸、结晶、蠕变及摩擦性能,并借助扫描电子显微镜(SEM)、三维白光干涉表面形貌仪对样品的微观形貌进行了分析。结果表明:硅灰石的加入使得 PTFE 的结晶度和熔点有轻微的上升;随着硅灰石含量的增加,PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率逐渐下降,但抗蠕变性能显著提升;在摩擦过程中,硅灰石在磨痕界面区域堆积,有效承担了摩擦载荷,使得 PTFE 的体积磨损率降低了约两个数量级,但同时硅灰石也使磨痕的表面粗糙度明显变大,摩擦系数也因此增大。当硅灰石质量分数为 15% 时,PTFE 的拉伸强度为 48 MPa,断裂伸长率为 275%,蠕变量比纯 PTFE 降低约 50%,耐磨性比纯 PTFE 提高两个数量级,且摩擦系数低至 0.24,综合性能较好。

关键词:聚四氟乙烯;硅灰石;拉伸性能;蠕变性能;摩擦性能;密封材料

中图分类号: V255+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)08-0012-06

Performance of Acicular Wollastonite Filled PTFE Sealing Materials

Suo Junying¹, Min Yalan¹, Pan Jianfeng¹, Li Hongbo², Jiang Honggang², Su Zhengtao²

[1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China]

Abstract: Polytetrafluoroethylene (PTFE) sealing materials with different content of acicular wollastonite were prepared by cold molding and sintering process. In order to investigate the tensile properties, crystallization properties, creep properties and tribological properties of the sealing materials, micromorphology of the samples were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and surface 3D profiler. The results demonstrate that wollastonite filled PTFE sealing materials exhibit higher crystallinity and melting temperature compared with pure PTFE. As the content of wollastonite increases, the tensile strength and elongation at break of PTFE decrease, but the creep resistance increases significantly. It is found that the accumulation of wollastonite at the sliding interface plays a critical role on load dissipation during the friction process, which reduces the volume wear rate of PTFE by about two orders of magnitude. At the same time, the accumulation of wollastonite increases the roughness of the worn surface and the friction coefficient of PTFE. PTFE with mass fraction 15% of wollastonite has the best comprehensive properties, its tensile strength is 48 MPa, the elongation at break is 275%, the creep strain about 50% lower than that of pure PTFE, the wear resistance is two orders of magnitude higher than that of pure PTFE, and the friction coefficient is as low as 0.24.

Keywords: polytetrafluoroethylene; wollastonite; tensile property; creep property; tribological property; sealing material

聚四氟乙烯(PTFE)是一种直链型半结晶高分子材料,由于具有良好的耐腐蚀、耐高低温、自润滑等特性,常作为密封材料广泛地应用于航空航天、石油化工、机械制造、船舶运输等领域^[1-4]。然而纯 PTFE 易磨损、承载能力低、抗蠕变性差,作为动密封材料时极易造成密封失效^[1,4]。为了改善纯 PTFE

的性能缺陷,通常需要通过填充无机或有机填料对其改性,常用的填料有石墨、二硫化钼、玻璃纤维、碳纤维、铜粉、聚苯酯、纳米金属氧化物等^[5-11]。填充后的 PTFE 性能大大提高,将其与弹性体复合制备出的组合式密封件,能够适应飞行器液压与气动系统中高温、高压、高载荷、高转速的苛刻工况^[1,4]。

通讯作者: 李红波, 硕士, 工程师, 主要从事高性能橡胶与密封材料的研究 E-mail: 18801329406@163.com

收稿日期: 2018-06-11

引用格式: 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.

硅灰石是一种链状晶体结构的偏硅酸盐矿物,化学式为 CaSiO_3 ,密度为 2.9 g/cm^3 ,其耐高温性能优越,热膨胀系数小,无毒无味且耐化学药品腐蚀,在橡塑改性中常作为增强或耐磨填料来使用,具有明显的性能优势与成本优势^[12]。国外某著名密封件生产厂商开发的一种含有硅灰石的 PTFE 密封材料,已在海外成功地应用于部分商用和军用飞机上。

近年来国内也有研究者报道了硅灰石的含量、形貌尺寸、表面改性以及和二硫化钼 (MoS_2) 复合填充对 PTFE 性能的影响^[13-16],但先前的研究仅仅关注了硅灰石对 PTFE 拉伸性能、摩擦学性能的影响,虽然发现了针状硅灰石能提升 PTFE 的耐磨性,但并未对耐磨性提高的机理进行深入分析。笔者为开发新型的航空液压组合动密封件,需要研制一种高耐磨、自润滑、抗压缩蠕变且具有一定力学强度的填充 PTFE 材料。因此在借鉴前人研究成果的基础上,选用了经过偶联剂处理的硅灰石为填料对 PTFE 进行改性。在考察硅灰石对 PTFE 力学、结晶、蠕变及摩擦学性能影响的同时,利用扫描电子显微镜 (SEM) 和三维白光干涉表面形貌仪对摩擦样品的微观形貌进行分析,深入探究了硅灰石影响 PTFE 摩擦系数和提升耐磨性的作用机制,具有一定的创新性和应用价值。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PTFE:M18F,平均粒径 $25 \mu\text{m}$,日本大金工业株式会社;

针状硅灰石粉:直径 $10 \mu\text{m}$,长径比 $1:8$,经偶联剂 KH570 处理,江西思远矿业有限公司。

1.2 主要仪器及设备

高速混合机:DAC 400 VAC 型,美国 Flack Tek Inc 公司;

液压成型机:YM-C100T 型,无锡阳明橡胶机械有限公司;

高温气氛炉:GF14Q 型,南京博蕴通仪器科技有限公司;

电子拉力机:AI-3000 型,高铁检测仪器有限公司;

同步热分析仪:STA 449F3 型,德国 NETZSCH 公司;

环块摩擦磨损试验机:MRH-1 型,济南益华摩擦学测试技术有限公司;

高温蠕变试验机:GT-7049-DH2 型,高铁检测

仪器有限公司;

SEM:JSM-6010LA 型,日本 JEOL 公司;

三维白光干涉表面形貌仪:NewView 型,美国 ZYGO 公司。

1.3 试样制备

将硅灰石粉于 150°C 的烘箱中干燥处理 3 h ,然后按照一定的配比(硅灰石与 PTFE 的质量比分别为: $5:95, 10:90, 15:85, 20:80, 25:75$)用高速混合机混合将其与 PTFE 混合,过筛后便得到填充的 PTFE 粉料。将粉料均匀地铺放于模具中,然后置于液压成型机下冷压成型,设置压力为 55 MPa ,保压 40 min 。脱模后将预成型品于室温下静置 3 h 以脱气并消除内应力,然后转移至烧结炉中烧结。具体的烧结工艺为:以 60°C/h 的速率将炉温由室温升至 310°C ,然后以 30°C/h 的速率升温至 340°C ,再以 60°C/h 的速率升温至 365°C ,保温烧结 4 h ,然后以 50°C/h 的降温速率降温至 340°C ,再以 30°C/h 的降温速率降至 300°C ,保温 0.5 h ,最后以 50°C/h 的降温速率冷却至室温。烧结后得到毛坯制品,经机械加工后制成各种尺寸的测试样品。

1.4 性能测试

拉伸性能:参照 ASTM D 638-2014 测试,V 型试样,拉伸速率为 20 mm/min 。

压缩蠕变性能:试样尺寸为 $12.7 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$,测试温度为 30°C 与 100°C ,测试压力为 10 MPa ,时间为 48 h 。

摩擦磨损性能:参照 GB/T 3960-2016 测试,试样尺寸为 $30 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,载荷为 200 N ,转速为 200 r/min ,测试时间为 1 h ,室温干摩擦。

差示扫描量热 (DSC) 测试:在氩气气氛下,以 10°C/min 的速率由室温升温至 390°C 。

SEM 分析:将样品拉伸断口和摩擦后的表面喷金后置于 SEM 下观察其微观形貌。

三维白光干涉表面形貌分析:10 倍物镜镜头,光斑检测区域为 $800 \mu\text{m} \times 800 \mu\text{m}$ 。

2 结果与讨论

2.1 硅灰石填充 PTFE 的结晶度

常用的测量 PTFE 结晶度的方法有密度法、X 射线分析法、DSC 法等,采用不同的测量方法得到的结晶度值有明显差异。笔者利用 DSC 法测量 PTFE 及其复合材料的熔融热,然后根据式 (1) 计算

结晶度 $X_c^{[17]}$:

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m0} \times \omega} \quad (1)$$

式中: ΔH_m ——测试样品的熔融热, J/g;

ΔH_{m0} ——完全结晶样品的熔融热, 取值为 69 J/g^[17];

ω ——样品中 PTFE 的质量分数。

图 1 为不同样品的 DSC 曲线, 表 1 为测试的不同样品的熔融热、结晶度及熔点。

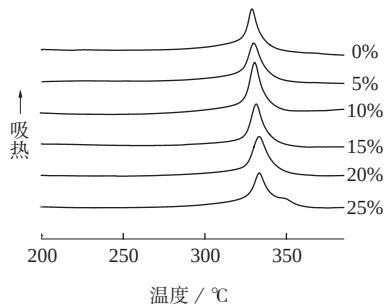


图 1 不同样品的 DSC 曲线

表 1 不同样品的熔融热、结晶度及熔点

硅灰石质量分数 / %	熔融热 / (J · g ⁻¹)	结晶度 / %	熔点 / °C
0	27.86	40.37	328.9
5	27.11	41.35	330.4
10	28.54	45.95	331.1
15	26.56	45.28	331.5
20	25.83	46.79	332.7
25	23.99	46.35	332.5

由表 1 可知, 填充了硅灰石的 PTFE 结晶度均高于纯 PTFE 的结晶度, 且熔点也有增大的趋势。这是由于硅灰石粉末存在一定的粒径分布, 其中粒径较小的颗粒可能充当了异相成核剂, 诱导 PTFE 的结晶, 使其结晶度增大。同时硅灰石的存在会使得 PTFE 链段的活动空间减少, 在熔融过程中大分子链的运动受到限制, 因此熔点有轻微的升高。

2.2 硅灰石填充 PTFE 的拉伸性能

不同硅灰石含量下 PTFE 的拉伸性能如图 2 所示。由图 2 可以看出, PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率随着硅灰石含量的增加而降低。填充少量 (质量分数为 5%) 的硅灰石时, PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率便明显降低; 而当填充量较高 (质量分数为 20% 或 25%) 时, PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率更是急剧下降。由于硅灰石与 PTFE 只是简单的物理混合, 两者间形成了两相结构。纤维状的硅灰石粒子弹性模量大、刚性较强, 而树脂基体 PTFE 的弹性模量相对较低, 因此在受到拉伸应力时, 硅灰石粒子与 PTFE 的形变量不匹配, 界面间易滑脱并形成空穴, 造成局部的应力集中。

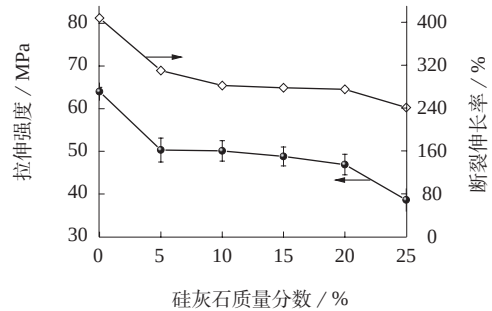


图 2 不同硅灰石含量下 PTFE 的拉伸性能

图 3 为不同样品拉伸端口的形貌, 可明显观察到硅灰石与 PTFE 树脂基体间滑脱并出现空洞的现象。所以随着硅灰石含量的增加, PTFE 的拉伸强度和断裂伸长率逐渐降低。当硅灰石质量分数为 15%, PTFE 的拉伸强度为 48 MPa, 断裂伸长率为 275%。

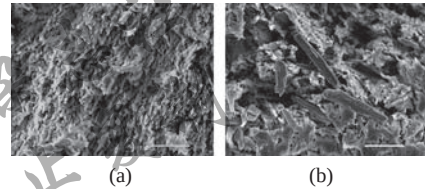
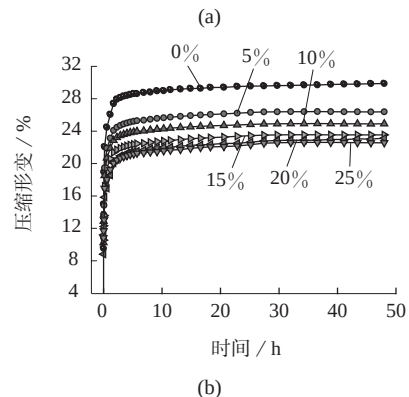
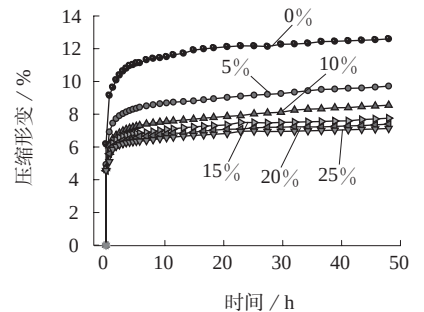


图 3 不同样品拉伸端口的形貌

2.3 硅灰石填充 PTFE 的蠕变性能

当测试温度分别为 30℃ 与 150℃ 时, 不同硅灰石含量下 PTFE 的压缩蠕变曲线如图 4 所示。



测试温度: a—35℃; b—150℃

图 4 不同硅灰石含量下 PTFE 的负载变形曲线

由图 4 可知,在施加载荷的瞬间,所有样品均会产生一个瞬时形变(施加载荷后 10 s 内产生的变形量),并且形变量随硅灰石含量的增加而减小;瞬时形变量的大小反应了材料的压缩弹性模量的高低,形变量越小,则压缩弹性模量越高。随着加载时间的延长,PTFE 呈现出了显著的“冷流”特性,但是蠕变量(蠕变量为加载 48 h 后的总形变与加载后 10 s 内瞬时形变的差值)随着硅灰石含量的增加明显降低。这是由于在压缩蠕变过程中,硅灰石与树脂基体之间不脱粘,刚性的硅灰石粒子首先可有效承担和传递载荷;其次,由于硅灰石粒子的存在,PTFE 链段的活动空间减小,大分子链间的滑移受到了限制;并且硅灰石可使得 PTFE 的结晶度增大,而对于半结晶高聚物来说,结晶区可看作是物理交联点,能进一步提升材料的抗蠕变性能。在 30℃ 时,纯 PTFE 的蠕变量为 6.4%;而填充质量分数为 15% 硅灰石的 PTFE 的蠕变量为 3.1%,比纯 PTFE 降低了约 50%。

温度升高,PTFE 的压缩弹性模量降低,同时非晶区中链段和分子链的活动能力增强,蠕变柔量因此增大,蠕变松弛时间也进一步缩短,所以在 150℃ 条件下,所有样品的蠕变量均明显变大。纯 PTFE 的蠕变量高达 20.4%,比在 30℃ 条件下的蠕变量增大了 218%。填充硅灰石后,PTFE 在高温下的抗蠕变性能得到了进一步的改善。硅灰石质量分数为 15% 的 PTFE 在 150℃ 时的蠕变量为 12.9%,比纯 PTFE 降低了 37%。

2.4 硅灰石填充 PTFE 的摩擦性能

不同硅灰石含量下 PTFE 的摩擦系数与体积磨损率如图 5 所示,不同样品磨痕及转移膜的 SEM 照片如图 6 所示。

由图 5 可知,纯 PTFE 的摩擦系数较低,且随着滑动距离的增大呈现出先上升后下降最后缓慢上升的趋势。在摩擦过程的起始阶段,由于材料与粗糙的对磨钢环直接接触并发生剧烈磨损,滑动接触面积迅速增大,摩擦系数急剧上升;在下降阶段,PTFE 在钢环上逐渐形成转移膜(如图 6c 所示),材料呈现出自润滑性能,摩擦系数因此降低;最后趋于缓慢上升的阶段是材料逐渐磨损、滑动接触面积缓慢扩大的阶段。纯 PTFE 的磨痕表面存在明显的犁沟(如图 6a 所示)。这是由于 PTFE 抵抗变形的能力较差,对磨环上的微观凸起在载荷的作用下嵌

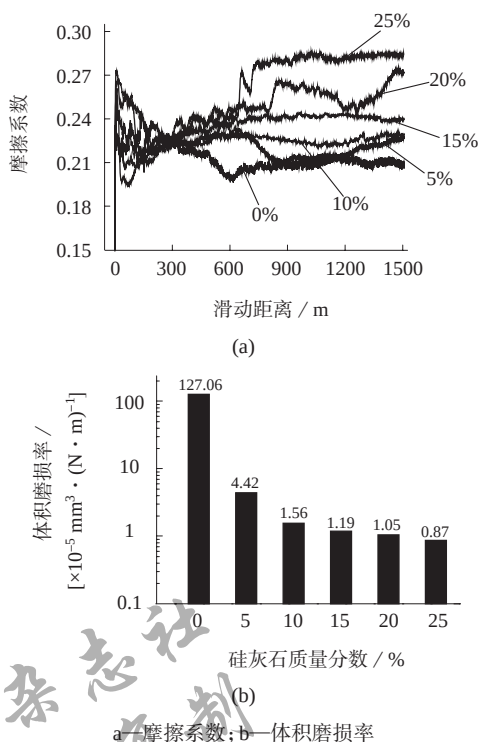
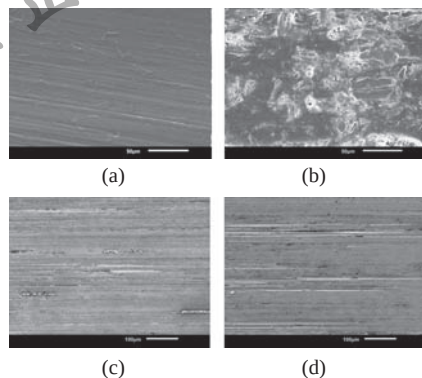


图 5 不同硅灰石含量下 PTFE 的摩擦系数与体积磨损率



a—纯 PTFE 磨痕; b—硅灰石质量分数为 20% 的 PTFE 磨痕;
c—纯 PTFE 转移膜; d—硅灰石质量分数为 20% 的 PTFE 转移膜

图 6 不同样品磨痕及转移膜的 SEM 照片

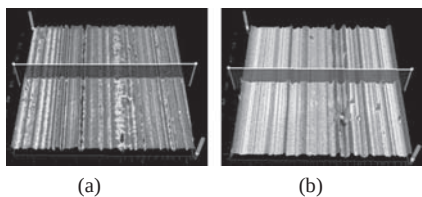
入树脂基体内,使得 PTFE 在滑动过程中发生了严重的磨粒磨损,因此纯 PTFE 的耐磨性较差,体积磨损率高达 $1.27 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,但是其摩擦系数较低,趋于平稳后约为 0.21。

填充硅灰石后,PTFE 的摩擦系数随填充量的增加而明显升高,摩擦系数曲线呈现出与纯 PTFE 类似的趋势,随着滑动距离的增大,摩擦系数呈现出先急剧上升后逐渐下降最后缓慢上升的趋势。由图 6b 硅灰石填充 PTFE 磨痕界面区域可观察到大量的填料。由于硅灰石比树脂基体耐磨,因此在摩擦过程中材料表面纯 PTFE 部分的磨损深度会瞬间超过有填料填充的部分,硅灰石逐步凸出从而受到更

高的载荷;当硅灰石表面接触压力增加后,会因为PTFE的“冷流”作用再次陷入到树脂基体内部,这个过程的不循环将导致接近滑动界面区域上的填料堆积。无润滑特性的硅灰石在摩擦界面上的逐步出现,使得PTFE摩擦系数在滑动过程中逐渐升高;硅灰石含量越大,填料堆积就越迅速,摩擦系数也更大。当硅灰石质量分数为15%时,PTFE的摩擦系数约为0.24,而当硅灰石质量分数上升为25%时,PTFE的摩擦系数已经增大到0.29。同时,由于大量的硬质硅灰石粒子在滑动界面聚集,会对磨钢环表面造成损伤,因此在转移膜(如图6d所示)上可以观察到明显的刮擦现象。但是填料的堆积却能对载荷起到更大的支撑作用,并且呈纤维状的硅灰石粒子刚性较强,会在一定程度上阻碍PTFE大分子链间的滑移,因此硅灰石可以显著降低PTFE的体积磨损率。由图5b可知,当硅灰石质量分数为15%时,PTFE的体积磨损率降低至 $1.19 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$,耐磨性比纯PTFE提升了两个数量级。

纯PTFE和硅灰石填充PTFE磨痕的三维白光干涉表面形貌图如图7所示。

由图7可知,纯PTFE磨痕表面的粗糙度较低,为 $0.240 \mu\text{m}$,而硅灰石填充的PTFE磨痕表面的粗糙度明显增大,达 $1.168 \mu\text{m}$;同时纯PTFE磨痕表面微凸体的最大高度仅为 $7.251 \mu\text{m}$,而硅灰石填充PTFE磨痕表面微凸体的最大高度已增大为 $26.762 \mu\text{m}$ 。微凸体最大高度的增加说明硅灰石在摩擦过程中从树脂基体中凸出,优先承担了载荷,使得PTFE的磨损率显著降低,这与前述的结论相符。同时磨痕的表面粗糙度成倍数的上升,也说明填料在接近磨痕表面区域的堆积,PTFE的摩擦系数因此明显升高。



a—纯PTFE;b—硅灰石质量分数为20%的PTFE

图7 样品磨痕的三维白光干涉表面形貌

3 结论

(1) 由于硅灰石存在一定的粒径分布,其中粒度较小的颗粒可能起到了异相成核剂的作用,使得PTFE的结晶度增大,熔点也有轻微的上升。

(2) 在拉伸过程中,由于材料整体的形变量较

大,硅灰石粒子会与树脂基体之间滑脱并形成空穴,因此随着硅灰石含量的增加,PTFE的拉伸强度和断裂伸长率明显降低;当填充量较高时,PTFE的拉伸强度和断裂伸长率更是急剧下降。

(3) 在蠕变过程中,刚性的硅灰石粒子可有效承担和传递载荷,并且限制大分子链间的滑移,显著提升了PTFE的抗压缩蠕变性能。

(4) 在摩擦磨损过程中,硅灰石粒子会在滑动界面区域逐渐堆积,使得磨痕表面的粗糙度增大,摩擦系数也因此增大;但是填料的堆积可起到优先承担载荷的作用,并且刚性的硅灰石粒子限制了PTFE大分子链间的滑移,使得PTFE的体积磨损率降低了约两个数量级。

(5) 当硅灰石质量分数为15%时,PTFE的拉伸强度为48 MPa,断裂伸长率为275%,在30℃时的蠕变量比纯PTFE降低约50%,耐磨性比纯PTFE提高两个数量级,且摩擦系数低至0.24,综合性能较好。

参考文献

- [1] 钱知勉,包永忠.氟塑料加工与应用[M].北京:化学工业出版社,2010:50-209.
Qian Zhimian, Bao Yongzhong. Processing and application of fluoroplastics[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2010:50-209.
- [2] Gong Ran, Liu Meng, Zhang He, et al. Experimental investigation on frictional behavior and sealing performance of different composites for seal application[J]. Wear, 2015, 342:334-339.
- [3] 廖彬,曾祥兵,潘晓霞,等.聚四氟乙烯密封圈密封性能研究[J].真空科学与技术学报,2015,35(1):69-73.
Liao Bin, Zeng Xiangbing, Pan Xiaoxia, et al. Influence of helium permeation in polytetrafluoroethylene gasket on leak detection[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(1):69-73.
- [4] 蔡仁良.流体密封技术:原理与工程应用[M].北京:化学工业出版社,2013:402-519.
Cai Renliang. Fluid seal technology: Principle and engineering application[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2013:402-519.
- [5] Song Fuzhi, Wang Qihua, Wang Tingmei. Effects of glass fiber and molybdenum disulfide on tribological behaviors and PV limit of chopped carbon fiber reinforced polytetrafluoroethylene composites[J]. Tribology International, 2016, 104:392-401.
- [6] Ohlopkova A A, Struchkova T S, Vasilev A P, et al. Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Be-lum modified carbon fibers[J]. Journal of Friction and Wear, 2016, 37(6):529-534.
- [7] 林启权,毛波,董文正,等.二硫化钼与二硫化钨填充改性聚四氟乙烯的摩擦学性能[J].高分子材料科学与工程,2016,32(11):51-

- 57.
- Lin Qiquan, Mao Bo, Dong Wenzheng, et al. Tribological behaviour of polytetrafluoroethylene composites modified with molybdenum disulfide and tungsten disulfide[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(11):51-57.
- [8] Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology[J]. Wear, 2000, 245(1):92-99.
- [9] Sun Yousong, Zhang Qiang, Gao Lei, et al. Experimental study on tribological properties of carbon / polytetrafluoroethylene hybrid fabric reinforced composite under heavy loads and oil lubrication[J]. Tribology International, 2016, 94:82-86.
- [10] Jin Zunlong, Chen Xiaotang, Wang Yongqing, et al. Thermal conductivity of PTFE composites filled with graphite particles and carbon fibers[J]. Computational Materials Science, 2015, 102:45-50.
- [11] 郭永刚. 聚苯酯 / 聚四氟乙烯复合涂层的制备及润湿性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2016, 32(01):89-93, 99.
- Guo Yonggang. One-step fabrication of polyoxybenzoyl / polytetrafluoroethylene composite coatings by a simple casting method and their wettability[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2016, 32(01):89-93, 99.
- [12] 张晶, 丁学宁, 张梦显, 等. 硅灰石在塑料中的应用 [J]. 工程塑料应用, 2016, 44(7):133-136.
- Zhang Jing, Ding Xuening, Zhang Mengxian, et al. Application of wollastonite in plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(7):133-136.
- [13] 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.
- [14] 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. Effect of wollastonite morphology and size on tribological properties of PTFE composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2009, 25(5):56-59.
- [15] 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. Effect of surface modification of wollastonite on tribological properties and mechanical properties of PTFE composites[J]. Engineering Plastics Application, 2008, 36(8):13-16.
- [16] 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 Hui, Guo Zhimeng, et al. Study on the properties of wollastonite fiber -molybdenum disulfide filled polytetrafluoroethylene composites[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016, 26(1):51-55.
- [17] 郑振超, 寇开昌, 张冬娜, 等. 聚四氟乙烯 / 聚苯酯共混物的蠕变及结晶性能研究 [J]. 中国塑料, 2013, 27(7):52-56.
- Zheng Zhenchao, Kou Kaichang, Zhang Dongna, et al. Study on creep behavior and crystallization of POB filled PTFE blends[J]. China Plastics, 2013, 27(7):52-56.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2018 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 19 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2018 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2018 年 19 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>