

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.11.006

# 聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能

李红波,赖亮庆,黄艳华,薛磊,冯林兆,杨睿,苏正涛

(中国航发减振降噪及应用技术重点实验室,北京航空材料研究院,北京 100095)

**摘要:**以牌号为 P84NT2 的聚酰亚胺 (PI) 为填料,采用粉末冶金方式制备不同填料含量的聚四氟乙烯 (PTFE) 密封材料,考察了 PTFE/PI 密封材料的拉伸、结晶、蠕变及摩擦学性能。研究表明:PI 的加入使得 PTFE/PI 密封材料的结晶度下降、熔点上升;随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料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;在摩擦实验过程中,PI 有效承担了摩擦载荷,当 PI 填充质量分数为 10%~25% 时,可使 PTFE/PI 密封材料的体积磨损率降低 3 个数量级。在法向载荷为 200 N、转速为 200 r/min 的环-块摩擦磨损测试模式下,加入 PI 可降低 PTFE/PI 密封材料的摩擦系数。当 PI 质量分数为 20% 时,PTFE/PI 密封材料的拉伸强度为 37.3 MPa,断裂伸长率为 202%,摩擦系数为 0.18,体积磨损率仅为纯 PTFE 的 4/1000,且蠕变变形比纯 PTFE 低 62.6%,综合性能最好。

**关键词:**聚四氟乙烯;聚酰亚胺;拉伸性能;蠕变性能;摩擦学性能;结晶性能;密封材料

**中图分类号:**V255+.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)11-0030-06

## Performance of PI Filled PTFE Sealing Materials

Li Hongbo, Lai Liangqing, Huang Yanhua, Xue Lei, Feng Linzhao, Yang Rui, Su Zhengtao

(Aviation Science and Technology Key Laboratory of Vibration Noise Reduction Materials and Application Technology,

AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract :** Polytetrafluoroethylene (PTFE) sealing materials with different content of polyimide (PI) P84NT2 were prepared by powder metallurgy process. The tensile, crystallization, creep and tribological properties of PTFE/PI sealing materials were studied. The results demonstrate that PI decreases the crystallinity and increases the melting point of PTFE/PI sealing material. As the content of PI increases, the tensile strength and elongation at break of sealing material decreases, but the creep resistance increases significantly. It is found that PI plays a critical role on load dissipation during the friction process, which reduces the volume wear rate of PTFE/PI sealing material by three orders of magnitude when the content of filler is between 10%–25%. The friction coefficient of PTFE/PI sealing material can be reduced by adding PI under the ring-block friction test mode with normal load of 200 N and rotating speed of 200 r/min. PTFE/PI sealing material with 20% PI has the best comprehensive properties, its tensile strength is 37.3 MPa, the elongation at break is 202%, the friction coefficient is 0.18, the volume wear rate is only 4/1000 of pure PTFE, and the creep strain is 62.6% lower than that of pure PTFE.

**Keywords :** polytetrafluoroethylene ; polyimide ; tensile property ; creep property ; tribological property ; crystallization property ; sealing material

聚四氟乙烯 (PTFE) 是一种高低温性能良好、自润滑性能优异、耐腐蚀性能卓越的高分子材料,在机械制造、石油化工、船舶运输、航空航天等领域作为密封材料获得了广泛使用<sup>[1-4]</sup>。然而纯 PTFE 易蠕变且耐磨损性能较差,单独作为动密封材料时极易

造成密封失效<sup>[1,4]</sup>。为了改善 PTFE 的性能缺陷,以扩充其应用范围,通常需要加入短切纤维、固体润滑剂、硬质金属粉末或耐高温聚合物等填料对其进行改性<sup>[5-9]</sup>。改性后的 PTFE 材料耐磨损性能、抗蠕变性能大大提高,将其与弹性体配合制备出的组合式

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

**收稿日期:**2019-09-25

**引用格式:**李红波,赖亮庆,黄艳华,等.聚酰亚胺填充聚四氟乙烯密封材料的性能[J].工程塑料应用,2019,47(11):30–35.

Li Hongbo, Lai Liangqing, Huang Yanhua, et al. Performance of PI filled PTFE sealing materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(11): 30–35.

密封件,能够满足耐高压、耐高温、低摩擦、长寿命的苛刻要求,在航空液压与气动系统中已获得成功应用<sup>[1,4]</sup>。

聚酰亚胺(PI)是一种分子主链上含有酰亚胺环的特种工程塑料<sup>[10]</sup>。由德国赢创公司通过二苯甲酮四酸二酐、二异氰酸甲苯二酯和二异氰酸二苯甲烷二酯聚合得到的P84系列PI,其玻璃化转变温度( $T_g$ )超过315℃,且具有高强度、高模量、自润滑等特性<sup>[10-11]</sup>。杨培娟等<sup>[12]</sup>用牌号为P84的PI填充改性PTFE制备无油润滑压缩机用活塞环,发现随着PI填充量的增加,PTFE的拉伸强度和断裂伸长率均明显下降,而耐磨损性能提高了2个数量级,但是摩擦系数稍有升高。P84NT2是赢创公司在原有P84系列PI树脂基础上开发出的耐高温改性牌号,根据原材料厂商提供的技术资料,该牌号的树脂分子量较高,其 $T_g$ 高达390℃,同时其模量较高、耐磨损性能更为突出。目前,用该种耐高温PI树脂填充的改性PTFE材料还未见报道。

为制备一种高强度、低摩擦、耐磨损、抗蠕变的PTFE密封材料,笔者曾研究过以表面改性硅灰石作为主要填料的PTFE材料体系,发现硅灰石虽然可以有效提升PTFE的耐磨损性能和抗蠕变性能,但是会使得材料的摩擦系数明显增大,因此还需要配合石墨或其它固体润滑剂进行复合填充才能发挥出其良好的功效<sup>[13-14]</sup>。为了在提升PTFE耐磨损性能的同时维持其良好的低摩擦特性,笔者选用了牌号为P84NT2的PI模塑粉对PTFE进行填充,并以粉末冶金的方式制备了PTFE/PI密封材料。通过研究PI对PTFE材料的结晶性能、拉伸性能、蠕变性能以及摩擦学性能的影响,为研发新型的航空液压动密封材料提供技术依据,具有一定的创新性与应用价值。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PTFE:M-18F,平均粒径为25 μm,大金氟化工(中国)有限公司;

PI:P84NT2,平均粒径为30 μm,德国赢创工业集团。

### 1.2 主要仪器及设备

高速混合机:DAC 400 VAC型,美国Flack Tek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;

万能试验机:INSTRON3366型,英斯特朗公司;  
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;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6010LA型,日本JEOL公司;

红外热成像仪:Ti450型,美国FLUKE公司。

### 1.3 试样制备

混料前先将PI放置于温度为160℃的烘箱中干燥3 h,然后将树脂粉末与填料按一定比例(PI与PTFE的质量比分别为5:95,10:100,15:85,20:80,25:75)称量好,并转移至高速混合机中。打开高速混合机的冷却水,开启马达,以2000 r/min的转速混合1 min,然后静置5 min,重复以上动作至少三次,直至填料与树脂混合均匀为止。压制前将混合均匀的填充PTFE粉料于23~27℃的环境中静置24 h,然后平整地铺放于模具中。开启压机,排气三次,然后以55 MPa的压力保压40 min。保压结束后,脱模顶出,将预成型体移至烧结炉中烧结。烧结时的升温速率为60℃/h,烧结温度为365℃,烧结时间为4 h,降温速率为50℃/h,降温过程中在300℃保温30 min。烧结结束后将得到的毛坯制品进行机械加工,制备成各种尺寸的测试试样。

### 1.4 性能测试

拉伸性能:参照ASTM D638-2014测试,试样为标准中规定的V型试样,拉伸速度为20 mm/min。

压缩蠕变性能:试样尺寸为12.7 mm×12.7 mm×12.7 mm,测试温度为30℃与150℃,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,转速为200 r/min,载荷为200 N,测试时间为2 h,试样尺寸为30 mm×7 mm×6 mm。

红外热成像分析:利用红外热成像仪检测摩擦过程中试验件表面温度,然后将其采集到的照片用SmartView3.5软件处理,即可得到摩擦过程中试验件和对磨铁环表面的温度分布云图。

SEM分析:将试样喷金后置于SEM下观察其微观形貌。

差示扫描量热 (DSC) 测试: 在氩气气氛下, 以  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速率由  $25^{\circ}\text{C}$  升温至  $390^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PI 对 PTFE/PI 密封材料结晶性能的影响

常用于测量高分子材料结晶度的方法有 X 射线分析法、DSC 法、密度法等, 采用不同方法得到的结晶度存在一定的差异。笔者利用 DSC 法测量不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的熔融热, 然后根据公式 (1) 计算材料的结晶度 ( $X_c$ )。

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m0} \times \omega} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\Delta H_{m0}$ ——完全结晶 PTFE 样品的熔融热, 其值为  $69 \text{ J/g}^{[13]}$ ;

$\Delta H_m$ ——测试样品的熔融热;

$\omega$ ——样品中 PTFE 的质量分数。

不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的 DSC 曲线如图 1 所示, 其熔点、熔融热及结晶度列于表 1。

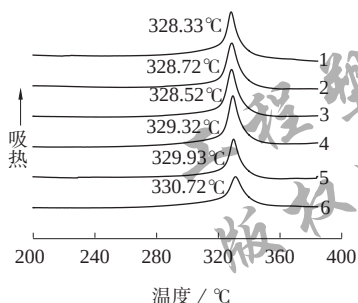


图 1 不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的 DSC 曲线

表 1 不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的熔点、熔融热及结晶度

| PI 质量分数 / % | 熔点 / $^{\circ}\text{C}$ | $\Delta H_m / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$ | $X_c / \%$ |
|-------------|-------------------------|-----------------------------------------------|------------|
| 0           | 328.33                  | 27.93                                         | 40.47      |
| 5           | 328.72                  | 26.39                                         | 40.26      |
| 10          | 328.52                  | 25.36                                         | 40.84      |
| 15          | 329.32                  | 23.55                                         | 40.15      |
| 20          | 329.93                  | 20.86                                         | 37.79      |
| 25          | 330.72                  | 18.97                                         | 36.65      |

由表 1 数据可以看出, PTFE 的熔点随着 PI 含量的增加而升高, 但变化幅度较小。PI 的存在使得 PTFE 链段的活动空间减少, 并且 PI 模量高、刚性较强, 在熔融过程中会限制 PTFE 大分子链的运动, 因此 PTFE/PI 密封材料的熔点会有轻微的升高。在烧结过程中的冷却阶段, 刚性 PI 颗粒的存在同样会限制 PTFE 大分子链的运动, 因此随着填料 PI 含量的增加, PTFE/PI 密封材料的结晶度逐渐下降。在 PI 质量分数低于 15% 时, PTFE/PI 密封材料的结晶度变化幅度较小; 当 PI 质量分数超过 20% 时, 其结晶度开始明显下降。

### 2.2 PI 对 PTFE/PI 密封材料拉伸性能的影响

不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的拉伸性能如图 2 所示。

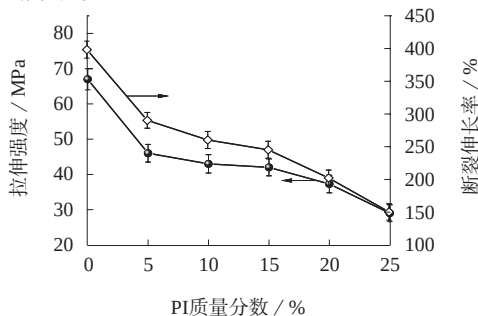
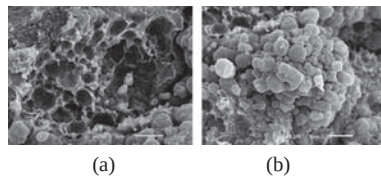


图 2 不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料的拉伸性能

由图 2 可知, 加入 PI 后, PTFE/PI 密封材料的拉伸强度和断裂伸长率明显下降。当只填充质量分数 5% 的 PI 时, 密封材料的拉伸性能就开始明显的恶化, 拉伸强度下降为  $45.7 \text{ MPa}$ , 断裂伸长率下降为 290%。PI 为耐高温树脂, 其分子量较高, 链段刚性较强, 模量较高。在 PTFE 的烧结温度下, PI 不熔融也不发生化学反应, 两者形成了两相结构, PTFE 为连续相, PI 为分散相。由于两相之间没有有效的化学作用, 因此在受到拉伸应力时会因两种材料形变量的不匹配而在界面处产生裂纹。图 3 为 PI 质量分数为 20% 的 PTFE/PI 密封材料的断口形貌, 可明显观察到 PI 颗粒与树脂基体之间脱粘, PI 颗粒从树脂基体中被拔出的现象。因此, 随着 PI 含量的增加, PTFE/PI 密封材料的拉伸性能逐渐降低。当 PI 质量分数为 20% 时, PTFE/PI 密封材料的拉伸强度为  $37.3 \text{ MPa}$ , 断裂伸长率为 202%。而当 PI 质量分数超过 20% 时, PTFE/PI 密封材料的拉伸强度和断裂伸长率开始急剧恶化。PI 质量分数为 25% 时, 密封材料的拉伸强度已下降为  $28.6 \text{ MPa}$ , 断裂伸长率下降为 144%, 拉伸性能较差。



a—PI 颗粒从基体材料中拔出后留下的凹坑;  
b—PI 颗粒与基体脱粘后裸露于断口表面

图 3 PI 质量分数为 20% 的 PTFE/PI 密封材料的断口形貌

### 2.3 PI 对 PTFE/PI 密封材料压缩蠕变性能的影响

不同温度下, 不同 PI 含量的 PTFE/PI 密封材料在  $10 \text{ MPa}$  下压缩 48 h 的负载形变曲线如图 4 所示。

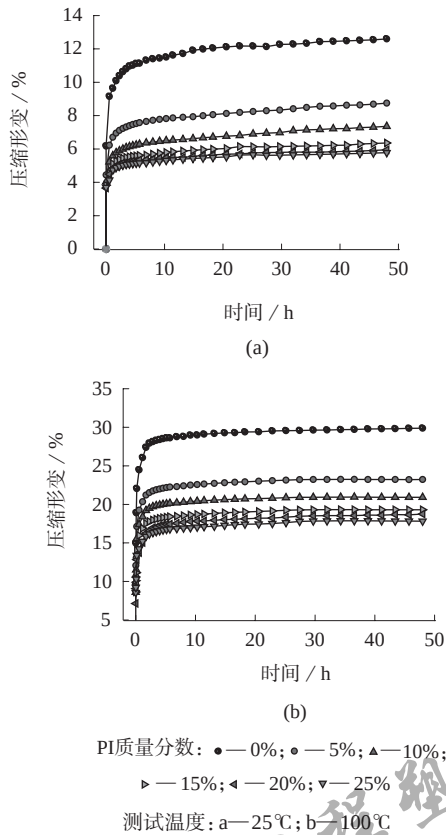


图4 不同温度下不同PI含量的PTFE/PI密封材料的负载变形曲线

在施加压缩载荷的瞬间,试样会产生瞬时形变(施加载荷后10 s内产生的变形量),瞬时形变的大小反应了材料压缩模量的高低,形变量越小,则材料的压缩模量越高。随着加载时间的延长,试样会发生明显的蠕变变形(此处定义为加载后48 h的总形变与加载后10 s内瞬时形变的差值)。由图4可以看出,在测试温度为30℃时,纯PTFE的总形变为12.21%,其蠕变变形为6.09%;随着PI含量的增加,PTFE/PI密封材料的总变形与蠕变变形均明显降低。填充PI质量分数20%时,PTFE/PI密封材料的压缩总变形已经下降为5.95%,蠕变变形也下降为2.28%,蠕变变形比纯PTFE下降了62.6%。在150℃的温度条件下,所有试样的蠕变变形都明显增大,纯PTFE的蠕变变形竟高达21.77%,总变形也上升为29.07%,但是填充了PI的PTFE/PI密封材料的抗蠕变性能依然明显优于纯PTFE。

PTFE/PI密封材料的蠕变性能改善源于其压缩模量和压缩强度的提升,其根本原因是由于刚性的PI颗粒限制了PTFE链段的运动以及阻碍了PTFE晶片之间的滑移。当温度升高,尤其是当温度高于 $T_g$ (PTFE的 $T_g$ 约为140℃)时,PTFE的链

段解冻,非晶区分子链在受到持续的压缩载荷时会呈现出更加明显的冷流现象,而填充了硬质PI颗粒的PTFE/PI密封材料可在一定程度上减弱这种冷流效应。

#### 2.4 PI对PTFE/PI密封材料摩擦学性能的影响

作为典型的自润滑高分子材料,PTFE分子间相互吸引力小,分子链间容易滑移。不同PI含量的PTFE/PI密封材料的摩擦学性能如图5所示,纯PTFE和PI质量分数20%的PTFE/PI密封材料磨痕的SEM照片如图6所示。

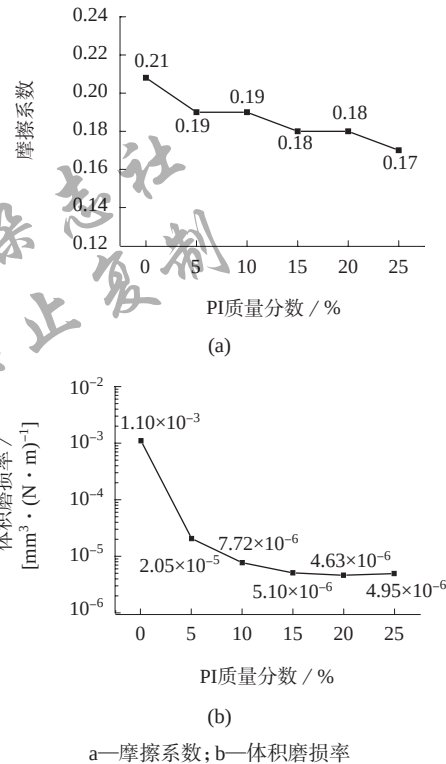
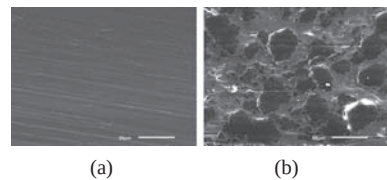


图5 不同PI含量的PTFE/PI密封材料的摩擦学性能



a—纯PTFE; b—PI质量分数20%的PTFE/PI密封材料

图6 纯PTFE和PI质量分数20%的PTFE/PI密封材料磨痕的SEM照片

由图5a可以看出,在载荷为200 N、转速为200 r/min、测试时间为2 h的环-块摩擦测试条件下,纯PTFE表现出良好的低摩擦特性,摩擦系数仅为0.21,然而,在纯PTFE的磨痕表面(图6a)出现了多条明显的“犁沟”。这是因为PTFE抵抗变形的能力较差,摩擦钢环上的微观凸起在法向载荷的

作用下嵌入到树脂基体内部,使得材料在滑动过程中发生了严重的磨粒磨损。因此,纯 PTFE 的耐磨损性能较差,在笔者的测试条件下,纯 PTFE 的体积磨损率高达  $1.10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

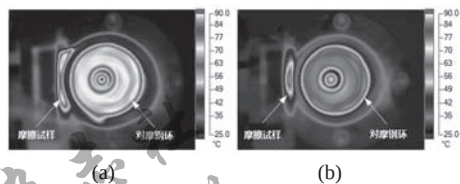
向 PTFE 中加入 PI 后,PTFE/PI 密封材料的摩擦系数和体积磨损率均出现了下降的趋势,其中体积磨损率的下降十分显著。当 PI 质量分数为 10% 时,PTFE/PI 密封材料的体积磨损率为  $7.72 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,仅为纯 PTFE 的 7/1000。而当 PI 质量分数增加至 20% 时,密封材料的体积磨损率已下降为  $4.63 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ,仅为纯 PTFE 的 4/1000,在 PTFE/PI 密封材料磨痕表面出现了大量的球状 PI 颗粒,且磨痕表面的“犁沟”数量明显低于纯 PTFE 试样磨痕表面(图 6b)。这是由于 PI 颗粒的耐磨损性能优于 PTFE 基体,在摩擦过程中填料会逐渐在磨痕界面区域富集,承担了主要的法向和切向载荷,减弱了“犁沟”效应,并且刚性 PI 粒子可有效地限制 PTFE 分子链之间的滑移,所以随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料的体积磨损率逐渐降低。但是当 PI 粒子填充量过大时,PTFE 对 PI 颗粒的包裹性减弱,PI 颗粒在摩擦过程中容易从基体中脱出,因此当填料 PI 质量分数超过 20% 时,密封材料的体积磨损率降低得不明显。

如图 5a 所示,PTFE/PI 密封材料的摩擦系数随着 PI 含量的增加呈现出缓慢下降的趋势,这可能是以下几种因素共同作用的结果:首先,填料 PI 与基体材料 PTFE 同为自润滑工程塑料,都可以在对磨材料上形成转移膜,加入 PI 提高了转移膜在对磨钢环上的吸附能力;其次,随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料的体积磨损率逐渐降低,这意味着试样表面的磨痕宽度逐渐减小,磨痕表面的接触压力逐渐增大,而 PTFE 是一种随接触压力增大而摩擦系数逐渐降低的材料<sup>[1]</sup>;最后,球状的 PI 颗粒在摩擦过程中会从基体中脱出并被释放到磨痕表面,可能充当了“滚珠”的作用,使得两种材料发生一定程度的滚动摩擦。因此,随着 PI 含量的增加,PTFE 的摩擦系数逐渐下降。当 PI 质量分数为 20% 时,PTFE/PI 密封材料的摩擦系数为 0.18,比纯 PTFE 降低了 14.3%。

## 2.5 PI 填充 PTFE 密封材料的摩擦热分析

在法向载荷均为 200 N、滑动速度均为 200 r/

min,以及其它环境条件均相同的条件下,试验件表面温度的高低反映了滑动摩擦过程中产生热量的多少,而摩擦热量的多少则直接反映了材料摩擦系数的大小。摩擦系数越大,试验件的表面温度越高。笔者利用红外热成像仪采集了在稳定摩擦过程中试样表面的温度数据,并利用软件处理为热云图,如图 7 所示,其中纯 PTFE 试样外表面的最高温度为  $71.5^\circ\text{C}$ ,而 PI 质量分数为 20% 的 PTFE/PI 密封材料试样外表面的最高温度为  $66.0^\circ\text{C}$ 。摩擦热分析的结果进一步说明,填充 PI 可降低 PTFE/PI 密封材料在环-块干摩擦实验条件下的摩擦系数。



a—纯 PTFE; b—PI 质量分数 20% 的 PTFE/PI 密封材料

图 7 纯 PTFE 和 PI 质量分数 20% 的 PTFE/PI 密封材料在摩擦过程中的温度云图

## 3 结论

(1) 由于 PI 模量高、刚性较强,加入 PI 会使得 PTFE 链段的活动空间减少,分子链的运动受到限制,随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料的熔点上升,结晶度下降。

(2) 在拉伸过程中,由于 PTFE/PI 密封材料试样整体的形变量较大,PI 颗粒与基体 PTFE 之间会因形变量的不匹配而滑脱,造成应力集中,随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料的拉伸强度和断裂伸长率明显下降。

(3) 在蠕变过程中,PI 颗粒限制了 PTFE 链段的运动,阻碍了 PTFE 晶片之间的滑移,因此随着 PI 含量的增加,PTFE/PI 密封材料的抗蠕变性能逐渐提升。

(4) 在载荷为 200 N、转速为 200 r/min、测试时间为 2 h 的环-块摩擦磨损测试模式下,加入牌号为 P84NT2 的 PI 可降低 PTFE/PI 密封材料的摩擦系数和体积磨损率,在有效提升 PTFE 耐磨损性能的同时维持了 PTFE 良好的低摩擦特性。

(5) 当 PI 质量分数为 20% 时,PTFE/PI 密封材料的拉伸强度为 37.3 MPa,断裂伸长率为 202%,摩擦系数为 0.18,体积磨损率仅为纯 PTFE 的 4/1000,且蠕变变形比纯 PTFE 降低了 62.6%,综合性能最好。

## 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.
- Qian Zhimian, Bao Yongzhong. Processing and application of fluoroplastics[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2010.
- [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] 叶素娟,曾幸荣,范清,等. 高回弹低磨损食品级 PTFE 密封材料研制[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(2):20-24.
- Ye Sujuan, Zen Xingrong, Fan Qing, et al. Study on good-frade ptfe sealing material with high resilience and wear resilience[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(2):20-24.
- [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.
- Cai Renliang. Fluid sealing technology:Principles and engineering applications[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2013.
- [5] Jang I, Burris D L, Dickrell P L, et al. Sliding orientation effects on the tribological properties of polytetrafluoroethylene[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 102(12):doi:10.1063/1.2821743.
- [6] Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology[J]. Wear, 2000, 245(1):92-99.
- [7] 张宏飞,高永操,王廷梅,等. 聚苯酯填充聚四氟乙烯机械性能和摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(1):97-101.
- Zhang Hongfei, Gao Yongcao, Wang Tingmei, et al. Study on mechanical and tribological properties of pob filled PTFE composites[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(1):97-101.
- [8] 杨东亚,董悦,龚俊. 聚醚醚酮填充聚四氟乙烯摩擦学性能[J]. 润滑与密封, 2013, 38(10):60-63.
- Yang Dongya, Dong Yue, Gong Jun. The tribological behaviours of peek filled ptfe composites[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(10):60-63.
- [9] Qu Mengnan, Yao Yali, He Jinmei, et al. Tribological study of polytetrafluoroethylene lubricant additives filled with Cu microparticles or SiO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. Tribology International, 2017, 110: 57-65.
- [10] 吴忠文. 特种工程塑料及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2011.
- Wu Zhongwen. Special engineering plastics and their applications[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2011.
- [11] Ren Jizhong, Li Zhansheng, Wong F S. Membrane structure control of BTDA-TDI / MDI (P84)co-polyimide asymmetric membranes by wet-phase inversion process[J]. Journal of Membrane Science, 2004, 241(2):305-314.
- [12] 杨培娟,黄健. PI 填充 PTFE 复合材料[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(1):9-12.
- Yang Peijuan, Huang Jian. PTFE-based composite filled with PI[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1):9-12.
- [13] 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 material[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8):12-17.
- [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.

## 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 2000~2019 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 20 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. 2004~2019 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. 2000~2019 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 2000~2019 年 20 本《论文集》的全部内容外,还包括约 3300 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>

本刊唯一合法投稿网址: [www.epa1973.net](http://www.epa1973.net)