

载荷、速度及环境温度对聚醚砜酮摩擦磨损性能的影响

邵鑫¹ 薛群基² 马春林¹ 温路新¹

(1.聊城大学材料科学与工程学院,聊城 252000; 2.中国科学院兰州化学物理研究所,兰州 730000)

摘要 利用 MM-2000 型和 THT07-135 型摩擦磨损试验机系统考察了载荷、滑动速度和环境温度对含二氮杂萘联苯型聚醚砜酮(PPESUK)摩擦磨损性能的影响,并利用扫描电子显微镜(SEM)观察分析了其磨损表面形貌及磨损机理。研究表明,干摩擦条件下,随载荷增加 PPESUK 的摩擦系数降低、磨损率增加;在高的滑动速度下,摩擦系数和磨损率都降低;环境温度对 PPESUK 的摩擦系数影响不大,并且粘着磨损是其主要磨损机理。

关键词 聚醚砜酮 摩擦磨损 磨损机理

聚合物具有强度高、摩擦系数小、自润滑性和易加工等优点,但在摩擦过程中聚合物的温度升高导致蠕变。近年来,为了满足各种工况下的摩擦学应用需要,人们对聚合物及其复合材料的开发和应用进行了大量研究,其中影响聚合物使用的最关键性能包括耐高温性能和耐磨性能。含二氮杂萘联苯型聚醚砜酮(PPESUK)是近年来开发的新型耐高温聚合物,它具有较高的力学强度和良好的耐热性、绝缘性及耐化学药品性^[1],而且溶解性能好,可以用作高性能复合材料的基体和分离膜材料。目前,有关 PPESUK 复合材料的摩擦学性能研究虽有报道^[2~6],但对 PPESUK 摩擦学性能的系统研究尚未见文献涉及。笔者较系统地考察了干摩擦条件下载荷、速度及环境温度对 PPESUK 摩擦磨损性能的影响,并探讨了其磨损机理。

1 实验部分

1.1 材料与设备

PPESUK: S/K = 1 :1, 玻璃化转变温度(T_g)为 284℃, 密度 1.35 g/cm³, 特性粘度 $[\eta]$ = 0.68 dL/g, 大连理工大学;

摩擦磨损试验机: MM-2000 型, 济南试验机厂;

高温摩擦磨损试验机: THT07-135 型, 瑞士 CSEM Instrument Ltd.;

扫描电子显微镜(SEM): JSM-5600LV 型, 日本电子光学公司。

1.2 试样制备

将 PPESUK 粉末在烘箱中于 100℃ 下处理 60 min, 然后采用热压模塑工艺在烧结温度 320℃、成型压力 20 MPa 下制备 PPESUK 试样。试样尺寸分别为 30 mm × 7 mm × 6 mm 和 25 mm × 8 mm, 其表面用 900# 水砂纸打磨至粗糙度 R_a 为 0.52 ~ 0.88

μm。

1.3 摩擦磨损性能测试

采用摩擦磨损试验机测试 PPESUK 试样在不同载荷及速度下的摩擦磨损性能, 摩擦对偶件为 40 mm × 16 mm × 10 mm 的 45# 钢环(AISI1045 钢)。试验条件为: 室温 20 ~ 25℃, 大气中干摩擦, 空气相对湿度 40% ~ 45%, 载荷为 100、200、250、300 N 和 400 N, 对偶环转速为 200 r/min(0.43 m/s) 和 400 r/min(0.86 m/s), 摩擦行程为 2 330 m。每次试验之前, 试样和对偶件均经丙酮超声清洗并晾干。试样的摩擦系数由与试验机相连的计算机直接采集给出, 摩擦系数取值为整个行程内的平均值; 采用精度为 0.01 mm 的读数显微镜确定试样的磨痕宽度, 并计算出材料的磨损率^[5], 所得摩擦系数和磨损率数据均为 3 次重复试验结果的算术平均值, 两次平行试验的相对误差小于 10%。

用高温摩擦磨损试验机考察环境温度对 PPESUK 摩擦学性能的影响, 采用球-盘接触形式。试盘材料为 PPESUK, 3 mm 的试球材料为 Si₃N₄ 陶瓷。试验前所有试样均在丙酮中超声清洗。试验条件为: 速度 0.43 m/s, 载荷 2 N, 摩擦行程 0.5 km。用表面轮廓仪测量试盘的磨损截面积, 从而计算出磨损率, 摩擦系数由试验机自动记录和处理。

1.4 磨损机理分析

利用配有能量色散谱(EDS)的 SEM 观察、分析 PPESUK 的磨痕表面、磨屑和转移膜的形貌。

2 结果与讨论

2.1 载荷的影响

2.1.1 载荷对 PPESUK 摩擦磨损行为的影响

图 1 给出干摩擦条件下纯 PPESUK 的摩擦系数

和磨损率随载荷的变化关系曲线。由图 1 a 可以看出, 在给定的干摩擦试验条件下, PPESUK 的摩擦系数基本上随载荷的增大呈直线降低, 在载荷 100 N 时为 0.72, 而当载荷增大到 400 N 时则降为 0.26。载荷对摩擦系数的影响依赖于真实接触面积(取决于接触状态和变形)的变化, 见下式:

$$\mu=(S \cdot A_r) / P$$

式中: ——摩擦系数;

P ——法向载荷;

S ——材料的剪切强度;

A_r ——实际接触面积。

上式表明, 随着载荷增加, A_r 也增大。由于复合材料与钢表面的接触处于弹性或粘弹性状态, A_r 的增加速度比载荷 P 的增加速度慢, 所以摩擦系数随载荷的增加而降低。

由图 1 b 可知, 干摩擦条件下载荷为 300 N 以下时 PPESUK 的磨损率随载荷的增加而增大。这主要是因为随载荷增大, 聚合物表面产生的摩擦热增多, 其表面发生软化, 易于剪切, 在摩擦过程中容易造成聚合物本体发生大量转移; 而当载荷进一步增大(400 N)时, 产生的摩擦热使聚合物表面呈熔融态, 剪切发生在熔融层, 仅造成较少的本体转移, 所以 400 N 时磨损率反而降低。在试验选定的载荷范围内, PPESUK 的磨损率为 $38 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ ~ $120 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

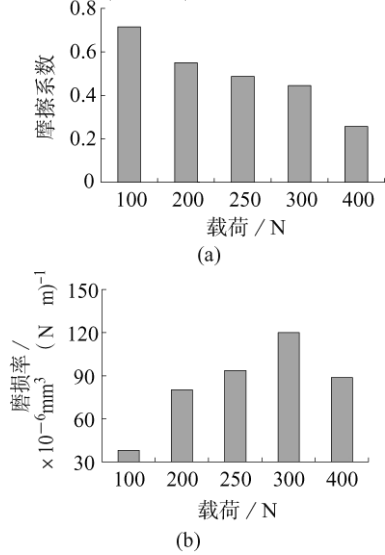


图 1 载荷对 PPESUK 摩擦系数和磨损率的影响
(滑动速度 0.43 m/s, 摩擦行程 2 330 m)

2.1.2 磨屑与磨损表面的 SEM 分析

图 2 给出 PPESUK 在不同载荷下磨损表面、磨

屑和摩擦对偶钢环表面形貌的 SEM 照片。由图 2 a、图 2 b 和图 2 c 可以看出, 不同载荷下 PPESUK 的磨损表面均形成了与滑动方向平行的沟槽, 并且沟槽周围存在大量剥落坑。这主要是由于在滑动过程中发生严重的粘着, 致使材料大片剥落。由图 2 d、图 2 e、图 2 f 可见, 此时形成的磨屑主要为较大的长条状, 呈现明显的粘着转移迹象。而在载荷为 100 N 时, 产生的磨屑大部分呈细小的颗粒状。这表明粘着磨损是造成 PPESUK 严重磨损的主要机理。

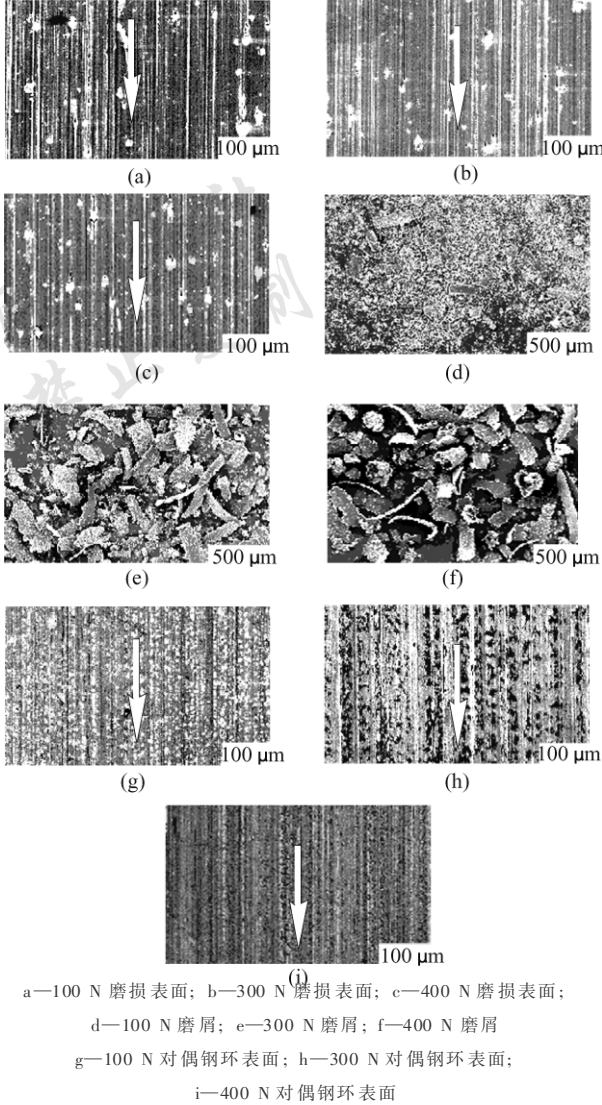


图 2 不同载荷下 PPESUK 磨损表面、磨屑及对偶钢环表面形貌的 SEM 照片(滑动速度 0.43 m/s, 摩擦行程 2 330 m)

众所周知, 对偶件表面转移膜形貌对摩擦学行为起着决定性作用。图 2 g、图 2 h 和图 2 i 分别示出不同载荷下对偶钢环表面形貌。从图 2 g、图 2 h 和图 2 i 可以看出, 在不同载荷下 PPESUK 与钢环对磨后, 在钢环表面形成的转移膜存在明显差别。在

载荷较小时,对偶钢环表面没有形成均匀、连续的转移膜,显得非常粗糙(见图 2 g);当载荷进一步增大时,对偶钢环表面的转移膜虽然没有完全覆盖其表面,但明显较为光滑(见图 2 h);当载荷为 400 N 时,对偶钢环表面形成了较连续、均匀的转移膜,并且完全覆盖了其表面(见图 2 i)。因此 PPESUK 的摩擦系数随着载荷的增大而降低。

2.2 滑动速度的影响

2.2.1 滑动速度对 PPESUK 摩擦磨损行为的影响

表 1 给出不同滑动速度下 PPESUK 的摩擦系数和磨损率。由表 1 可见,当滑动速度由 0.43 m/s 增大到 0.86 m/s 时,PPESUK 的摩擦系数由 0.55 降至 0.31,同时磨损率由 $80.12 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 降为 $18.80 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。分析认为,这主要是因为干摩擦条件下摩擦副表面的温度随滑动速度的提高而升高,从而使 PPESUK 的表层发生微观熔融,由于 PPESUK 为热的不良导体,因而次表层及基体部分未发生变化,摩擦过程中剪切发生在熔融层内,因此高速下摩擦表面的摩擦磨损减小。对比不同载荷下的摩擦磨损试验数据可以认为,在较苛刻的试验条件(较高载荷、较高滑动速度)下摩擦表面的微观熔融是摩擦磨损减小的主要原因。

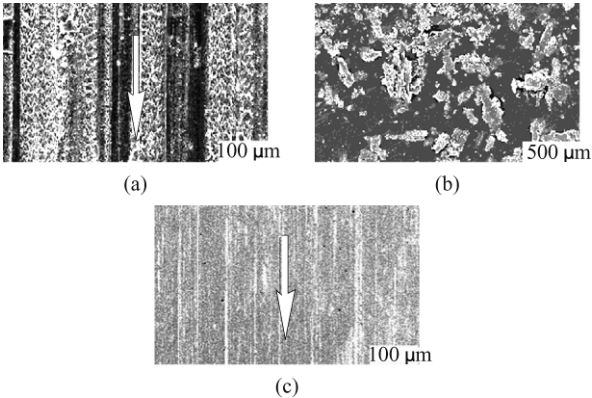
表 1 滑动速度对 PPESUK 摩擦学性能的影响

滑动速率 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	摩擦系数	磨损率 / $\times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$
0.43	0.55	80.12
0.86	0.31	18.80

注:载荷 200 N,摩擦行程 2 330 m。

2.2.2 磨屑与磨损表面的 SEM 分析

滑动速度为 0.86 m/s 时,PPESUK 与钢环对磨后磨损表面与磨屑的 SEM 照片见图 3。由图 3 a 可



a—PPESUK 磨损表面;b—磨屑;c—对偶钢环表面

图 3 滑动速度为 0.86 m/s 时 PPESUK 磨损表面与对偶钢环表面的 SEM 照片

以看出,PPESUK 的磨损表面存在较明显的犁沟和塑性流动迹象,说明在高速下试样表面微观熔融加剧,且熔融物更易流动。此时,在对偶钢环表面形成的转移膜更加均匀、致密,且完全覆盖了钢环表面(见图 3 c)。由于摩擦过程中剪切仅发生在试样表层的熔融流动层,所以形成的磨屑相对较小(见图 3 b)。因此,在高速滑动摩擦下,PPESUK 的摩擦系数较低,磨损率较小。

2.3 环境温度的影响

2.3.1 环境温度对 PPESUK 摩擦磨损行为的影响

图 4 示出 PPESUK 摩擦系数和磨损率分别随环境温度变化的关系曲线。由图 4 可以看出,随着环境温度的升高,PPESUK 的摩擦系数没有明显变化;而磨损率随着环境温度的升高呈现增大的趋势。可以认为在本试验条件下,随环境温度进一步升高,整个试样处于较高的环境温度下,尤其是在多次摩擦作用下摩擦表面的软化层变厚,此时剪切主要发生在试样表面与次表面之间,所以对应的磨损率增大。

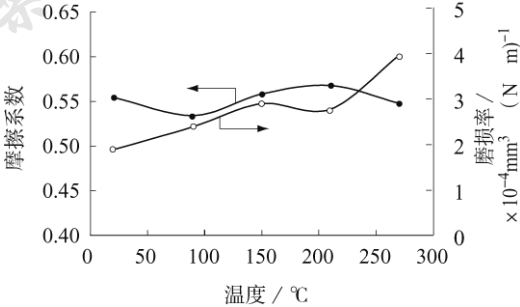
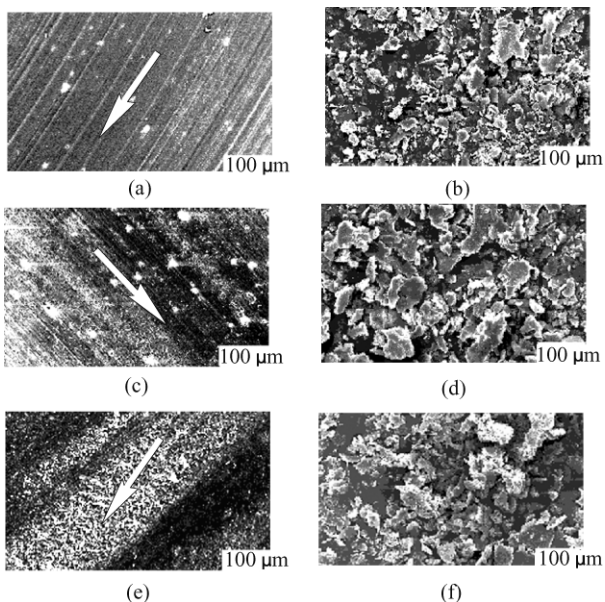


图 4 环境温度对 PPESUK 摩擦系数、磨损率的影响
(滑动速度 0.43 m/s,载荷 2 N,摩擦行程 0.5 km)

2.3.2 磨屑与磨损表面的 SEM 分析

图 5 示出环境温度为 25℃(室温)、150℃和 270℃时 PPESUK 磨损表面和磨屑形貌的 SEM 照片。由图 5 a、图 5 c 和图 5 e 可以看出,在环境温度较低(25℃)时,PPESUK 的磨损表面几乎看不到剥落坑,仅在滑动平行方向存在细小的沟槽;随着环境温度的升高(150℃),在磨损表面可以观察到剥落坑,这主要是由于温度升高时材料的表面发生软化,使得粘着加剧所致;而在更高环境温度(270℃)下,磨损表面形成的犁沟既宽又深,并且呈明显的粘着撕裂迹象,沟槽宽度约 150 μm。可以认为,在较高的环境温度下聚合物的软化促使粘着现象加剧,致使表面发生严重撕裂,故磨损加剧。

仔细观察图 5 b、图 5 d 和图 5 f 发现,不同环境



a—25℃磨损表面; b—25℃磨屑; c—150℃磨损表面;
d—150℃磨屑; e—270℃磨损表面; f—270℃磨屑

图5 不同环境温度下 PPESUK 的 SEM 照片

(滑动速度 0.43 m/s, 载荷 2 N, 摩擦行程 0.5 km)

温度下 PPESUK 磨损后产生的磨屑明显不同。25℃时的磨屑大部分为细小的颗粒状, 另有少量片状, 不过其尺寸较小; 150℃时形成的磨屑为较大的片状; 而在更高温度(270℃)时, 磨屑呈较大的团聚状, 它们由较小的磨屑堆积而成, 呈现明显的粘着转移迹象。分析认为, 在较低的环境温度下, 聚合物表面的微凸体不易发生变形, 所以在摩擦力剪切作用下, 仅发生微凸体转移, 形成的磨屑尺寸较小; 随着环境温度的升高, 聚合物的变形能力提高, 微凸体在温度和载荷的共同作用下发生变形并被压平, 在摩擦过程中多次挤压造成较大的磨屑; 在更高的环境温度下, 聚合物表面的粘着作用加剧, 致使形成较大的团聚

状磨屑。

3 结论

(1) PPESUK 在干摩擦条件下具有较高的摩擦系数和磨损率, 其摩擦系数随载荷的增加而直线下降, 磨损率基本上随载荷的增加而增大。分析表明, 粘着磨损是造成 PPESUK 严重磨损的主要机理。

(2) 在苛刻摩擦条件(高的滑动速度或载荷)下 PPESUK 具有更低的摩擦系数和磨损率, PPESUK 的导热性差, 苛刻条件下摩擦表面的微观熔融可能是造成摩擦磨损减小的主要原因。

(3) 环境温度对 PPESUK 摩擦系数的影响不大。PPESUK 的磨损率随着环境温度的升高呈增大的趋势, 此时试样摩擦表面的软化层变厚, 剪切主要发生在试样表面与次表面之间, 所以对应的磨损率增大。在较高的环境温度下, 其磨损机理仍是粘着磨损。

参考文献

- Meng Y Z, Hay A S, Jian X G, et al. Synthesis of novel poly (phthalazinone ether sulfone ketone) s and improvement of their melt flow properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 1997, 66: 1425
- 刘少琼, 张军, 蹇锡高. 聚醚砜酮树脂基摩擦材料的性能研究. *工程塑料应用*, 2000, 28(2): 6
- 彭静, 蹇锡高, 刘少琼, 等. PPESK 树脂基复合材料的摩擦磨损性能. *材料研究学报*, 2001, 15(2): 244
- 廖明义, 安娜, 蹇锡高. 聚醚砜酮复合材料摩擦性能的研究. *合成树脂及塑料*, 1998, 15(1): 46
- Xin Shao, Jun Tian, Weimin Liu, et al. Tribological properties of SiO₂ nanoparticle filled-phthalazine ether sulfone/phthalazine ether ketone copolymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 85(10): 2136
- 邵鑫, 田军, 刘维民, 等. 纳米 SiO₂ 对聚醚砜酮复合材料摩擦学性能的影响. *材料工程*, 2002(2): 38

INFLUENCES OF THE LOAD, VELOCITY AND TEMPERATURE ON THE FRICTION AND WEAR PROPERTIES OF PPESUK

Shao Xin¹, Xue Qunji², Ma Chunlin¹, Wen Luxin¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China;

2. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT The effects of load, sliding velocity and temperature on the friction and wear properties of PPESUK were investigated using Modes MM-2000 & THT 07-135 friction and wear tester. The wear mechanisms of the PPESUK materials were investigated by using a scanning electron microscope (SEM). It was found that the friction coefficient of PPESUK decreased and the wear rate increased with the applied load increased. The friction coefficient and wear rate of PPESUK is lower when the velocity is higher under dry friction conditions, and the temperature has little effect on the tribological behaviors of PPESUK. Analysis indicate that the wear mechanism of PPESUK is a characteristic of adhesive wear.

KEYWORDS PPESUK, friction and wear, wear mechanism