

聚酰亚胺复合材料的摩擦性能及其机理研究

贾均红¹, 周惠娣¹, 高生强², 周 华³, 陈建敏¹

(1. 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, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院北京化学研究所 工程塑料国家重点实验室, 北京 100864;

3. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 研究了含有固体润滑剂的碳纤维增强 PI 复合材料在干摩擦和水润滑 2 种状态下的摩擦磨损性能及其磨损机理。结果表明, 在水润滑条件下, 摩擦系数和磨损率都有不同程度的降低, 其中含 PTFE 的碳纤维增强 PI 复合材料的耐磨性最佳, 最低磨损率为 $9.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。其主要原因可能与材料存在极性酰胺基团有关, 酰胺基易通过氢键与水分子结合, 在摩擦表面形成水吸附膜, 使摩擦表面直接接触减少, 从而改善材料的摩擦磨损性能。

关键词: 聚酰亚胺; 碳纤维; 复合材料; 水润滑; 摩擦学性能

中图分类号: TH117.1

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2002)04-0273-04

20 世纪 70 年代研制成功的 PMR 型热固性聚酰亚胺树脂, 由于其加工成型工艺简单, 因而得到了广泛应用^[1]。聚酰亚胺不仅具有突出的热稳定性、力学性能、抗辐照及耐溶剂性能, 而且在高温、高压和高速等苛刻条件下具有优异的减摩抗磨性能^[2~6], 因而在航空航天等真空环境下得到了较为广泛的应用。而针对以水代替矿物油为传递介质的水基液压传动技术, 与其密切相关的水环境条件下传动元件材料的设计以及与此相关的摩擦、磨损和密封技术的研究已成为人们关注的热点。

鉴于具自润滑性的 PI 复合材料在水环境条件下的摩擦学特性研究的相关报道还不多见, 本文作者考察以碳纤维为增强体, 分别填充石墨、二硫化钼 (MoS₂) 及聚四氟乙烯 (PTFE) 等固体润滑剂的自润滑 PI 复合材料在干摩擦和水润滑 2 种状态下的摩擦磨损性能, 并探讨了其磨损机理。

1 实验部分

1.1 复合材料的制备

选用的聚酰亚胺为中国科学院北京化学所提供的耐高温聚酰亚胺树脂, 纤维选用经过高温活化处理的长约 100 μm 的短切碳纤维, 石墨、二硫化钼及聚四氟乙烯的粒度均控制在 50 μm 以下。将碳纤维和

固体润滑剂与树脂混合并搅拌均匀, 放入真空烘箱中真空烘干后, 粉碎至规定细度制得模塑粉, 再将模塑粉置入金属模具中施加压力 1.5~2.5 MPa, 升温至 320 $^{\circ}\text{C}$, 保温保压 2 h; 然后降至室温卸压开模, 得到复合材料模压件, 最后通过机加工制得试验样品。制得的几种复合材料的组成列于表 1。

1.2 试验方法

摩擦学性能评价在 MM-200 型试验机上进行, 下试样为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试环, 外径为 40 mm, 试样接触形式为线接触, 试样和偶件环在试验前均用 900# 水砂纸打磨, 并用丙酮超声清洗, 表面粗糙度 R_a 为 0.08~0.18 μm , 采用蒸馏水为润滑介质, 以 65~70 滴/分的速度滴注到摩擦副接触表面, 试验所用转速 400 r/min (线速度为 0.86 m/s), 载荷 200 N, 时间 120 min。用精度为 0.01 mm 的读数显微镜测量试样磨痕宽度并换算成磨损率; 采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察试样磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 PI 复合材料的摩擦磨损特性

表 2 给出了在干摩擦和水润滑 2 种不同状态下, 4 种材料的稳态摩擦系数和磨损率。可以看出: 纤维、固体润滑剂和水可明显改善 PI 复合材料的摩擦性

基金项目: 国家自然科学基金资助 (59925513); 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放课题资助 (9905); 中国科学院国防创新基金资助 (2001)。

收稿日期: 2001-11-12 修回日期: 2002-02-15/联系人贾均红, E-mail: chenjm@ns.lzb.ac.cn; jiah75@sina.com.

作者简介: 贾均红, 男, 1975 年生, 博士研究生, 目前主要从事材料的环境失效行为及摩擦学表面工程研究。

表 1 各种聚酰亚胺复合材料的组成

Table 1 The composition of various PI composites

Composites	Content /%				
	Polyimide	Carbon fiber	Graphite	MoS ₂	PTFE
PI	100	0	0	0	0
PII	80	15	0	0	5
PI2	80	15	5	0	0
PI3	80	15	0	5	0

表 2 碳纤维增强 PI 复合材料在干摩擦和水润滑下的摩擦系数和磨损率

Table 2 Friction coefficient and wear rate of carbon fiber reinforced PI composites in air and water

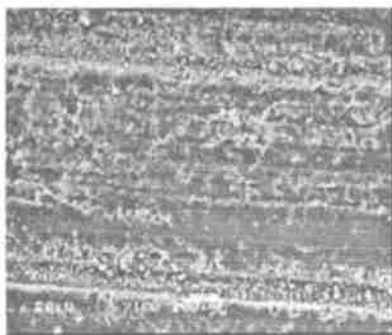
Composites	Friction coefficient		Wear rate/ $10^{-6} \text{mm}^3(\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$	
	Air	Water	Air	Water
PI	0.227	0.231	31.82	3.83
PII	0.184	0.141	1.80	0.99
PI2	0.157	0.138	5.14	1.18
PI3	0.187	0.125	9.46	1.32

能, 各种材料的摩擦系数都不同程度地降低, 而 PII、PI2 和 PI3 的摩擦系数比较接近, 基本在 0.13 左右; 但在干摩擦条件下, 各种固体润滑剂的作用效果有所不同, 特别是石墨的减摩作用更明显; 水润滑条件下, PI 复合材料的磨损率比干摩擦下的大幅度降低。这可能是由于 PI 及其复合材料含有极性酰胺基团, 酰胺基易通过氢键与水分子结合, 从而在摩擦表面形成吸附水膜而起到润滑作用; 另一方面, 聚酰亚胺在水

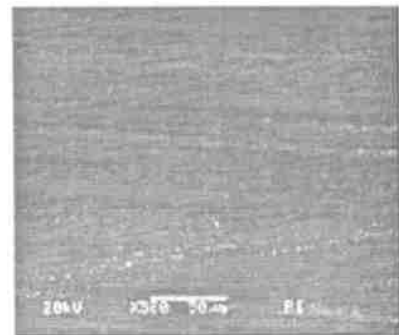
中其表层都会有不同程度的吸水, 吸水将引起溶胀, 使其剪切强度降低, 摩擦系数减小。此外, 含碳纤维和固体润滑剂的 PI 复合材料, 无论在干摩擦条件下还是水润滑下都不失为一种优良的耐磨材料, 其中含 PTFE 的 PII 复合材料在水润滑条件下的磨损率仅为 $9.9 \times 10^{-7} \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ 。

2.2 复合材料磨损表面 SEM 分析

图(1 和 2) 分别给出了聚酰亚胺在干摩擦和水润



(a) In air



(b) In water

Fig 1 SEM morphology of the worn surface of PI in air and water

图 1 聚酰亚胺磨损表面形貌 SEM 照片

滑状态下的磨损表面及其偶件表面转移膜形貌 SEM 照片。可以看出, 在干摩擦条件下, 其磨损表面沿滑动方向有明显犁沟, 沿滑动垂直方向存在微裂纹, 还有严重的塑性变形和剥落迹象[图 1(a)], 表现为粘着磨损和磨粒磨损特征, 在干摩擦条件下, 偶件表面形成了厚而疏松的 PI 转移膜, 这也是干摩擦下其磨损率较高的原因之一。

在水润滑条件下, PI 及其偶件磨损表面较为平

整光滑[见图 1(b) 和图 2(b)], 仅有微切削的痕迹, 粘着和犁削明显减轻, 偶件表面未形成 PI 转移膜。这与在高温及真空条件下的磨损机制明显不同^[2]。这是由于聚酰亚胺分子中存在酰胺基, 酰胺基易通过氢键与水分子结合, 使水分子吸附在摩擦副接触表面而形成水膜, 减少了摩擦副表面之间的直接接触; 另外, 水润滑时聚合物摩擦表面层吸水引起溶胀, 使其剪切强度减小, 从而改善材料的摩擦磨损性能。同时, 考虑到水

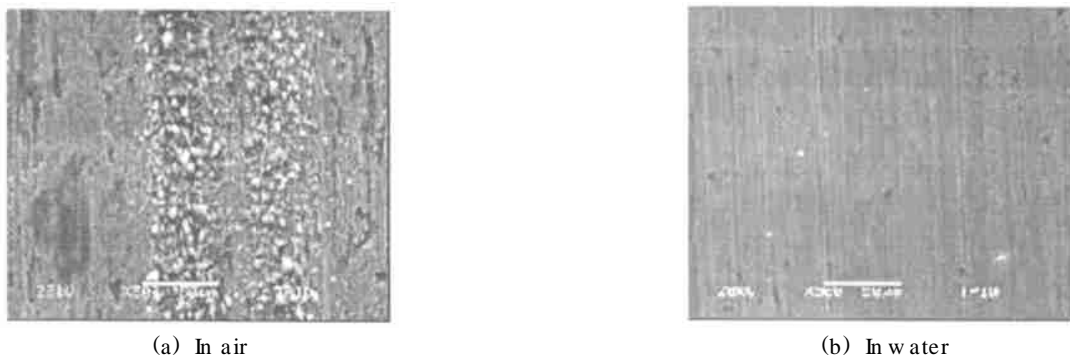


Fig 2 SEM morphology of the worn surface of stainless steel sliding against PI

图 2 不锈钢偶件磨损表面形貌 SEM 照片

的冷却作用, 摩擦表面不易发生粘着和摩擦氧化, 摩擦表面仅受到偶件表面微突体的轻微切削作用 因此

水润滑下 PI 复合材料磨损表面较为平整光滑

图 3 给出了纤维和固体润滑剂填充增强的 PI 复

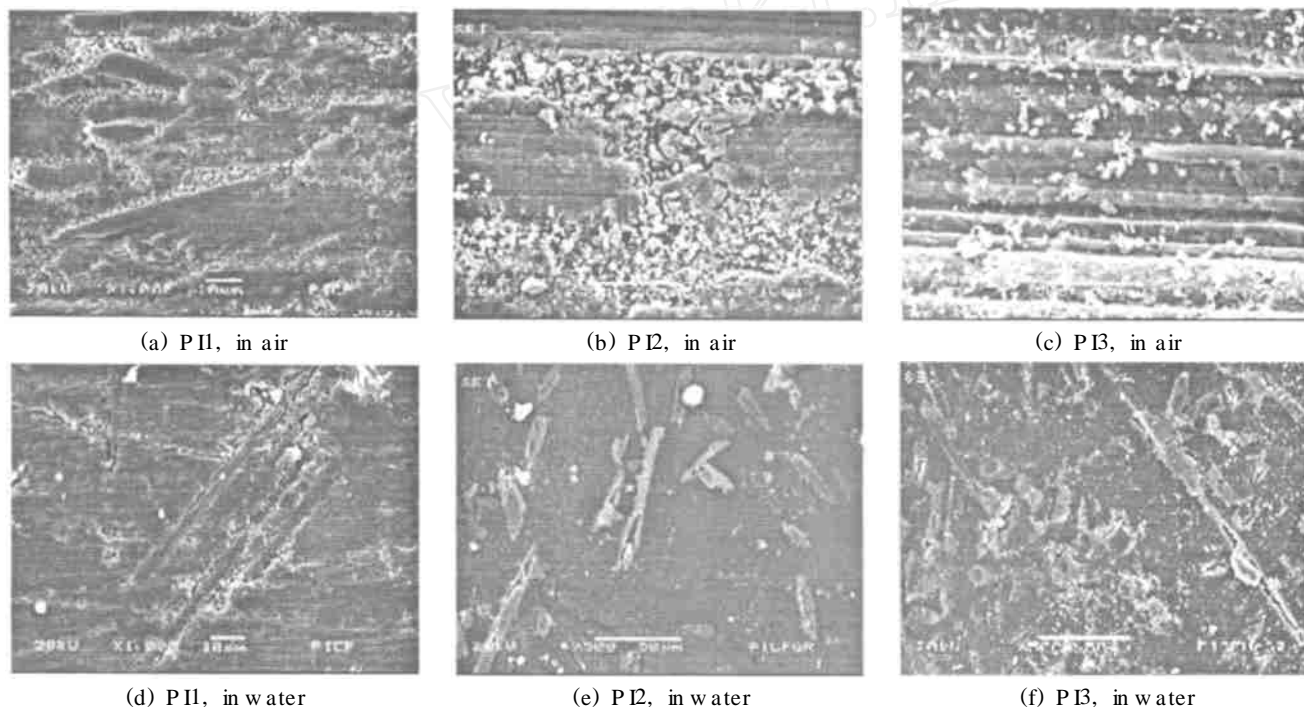


Fig 3 SEM morphology of the worn surface of PI composites in air and water

图 3 聚酰亚胺复合材料的磨损表面形貌 SEM 照片

合材料在 2 种试验条件下的磨损表面形貌 SEM 照片。由图 3(a, b 和 c) 可见, 干摩擦时 P13 磨损表面被严重拉伤, 犁沟明显, 而且有大量磨屑散落, 呈现出明显的磨粒磨损特征; P12 磨损表面的犁削相对减轻; P11 磨损表面犁削划痕明显减轻, 主要表现出粘着磨损特征。可见摩擦过程中犁削作用以 P11、P12 及 P13 的顺序增强, 而材料的磨损率也按同样顺序增大。

在水润滑条件下, 各复合材料的磨损表面都较为平整, 如图 3(d, e 和 f), 基体和纤维结合较好, 突出的纤维被局部磨平并断裂, 磨损主要是基体的磨损及纤

维的磨平, 3 种材料的摩擦系数都在 0.13 左右, 可能对应于吸附水的边界润滑。由于润滑剂水的边界润滑作用, 使这 3 种材料的磨损率均大幅度下降, 水膜起主导作用, 而试样材料本身也对磨损有一定影响。同时, 在干摩擦时与 P11 对摩偶件表面的粘着作用比未填充的明显减轻, 表面较为平整, 转移膜完整, 光滑且致密, 粘着和犁削作用减弱, 粘着磨损作用减轻。水润滑条件下未见形成聚合物转移膜, 磨屑随水冲刷流失, 磨粒不易积聚于摩擦副接触表面, 因而表面比较光滑平整。

3 结论

a 聚酰亚胺经碳纤维和固体润滑剂填充增强后摩擦磨损性能得到改善,在水润滑条件下,摩擦系数和磨损率都有不同程度的降低,其中填充 PTFE 和碳纤维的 PI 复合材料的耐磨性最佳,磨损率仅为 $9.9 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$.

b 在水润滑条件下,聚酰亚胺复合材料磨损率的降低可能与材料存在极性酰胺基团有关,水润滑时聚合物摩擦表面层吸收水引起溶胀,使其剪切强度减小,从而改善材料的摩擦磨损性能,同时由于存在水吸附膜的边界润滑效应,各复合材料在水润滑条件下的耐磨性接近

c 在干摩擦条件下,聚酰亚胺复合材料表面由于受到犁削作用而表现出磨粒磨损特征;在水润滑条件下,摩擦偶件表面未见形成聚合物转移膜,表现为机械微切削

参考文献:

[1] Bahadur S, Polineni V K. Tribological studies of glass fabric-

reinforced polyamide composites filled with CuO and PTFE [J]. *Wear*, 1996, 200: 95-104

[2] CONG Peihong (丛培红), LI Tongsheng (李同生). The Friction and Wear Behavior of Polyimide Composites (聚酰亚胺及其复合材料的摩擦与磨损) [J]. *Lubrication Engineering (润滑与密封)*, 1998, 6: 2-7

[3] Buhadur S. The effect of reinforcement and the synergism between CuS and carbon fiber on the wear of nylon [J]. *Wear*, 1994, 178: 123-130

[4] WANG Hequan (王鹤泉), CAO Lili (曹立礼), SUN SQ (孙淑琴), et al. A Study on Friction and Wear Behavior of Nylon 1010 under Water Lubricating with A3 Steel (尼龙 1010 在水润滑下的摩擦学特性与磨损机理) [J]. *Tribology (摩擦学报)*, 1997, 17(2): 152-159

[5] WANG Junxiang (王军祥), GE Shirong (葛世荣). The Progress of Study of Carbon Reinforced Polymer composites (纤维增强聚合物复合材料的摩擦学研究进展) [J]. *Tribology (摩擦学学报)*, 2000, 20 (1): 76-80

[6] ZHAO Weiyan (赵伟严), LI Yan (李岩), LU ZP (陆再平), et al. The Friction and Wear Behavior of Polyethersulfone Composites Reinforced with Carbon Fiber (碳纤维增强聚醚砜复合材料的摩擦磨损性能研究) [J]. *Tribology (摩擦学报)*, 2000, 20 (6): 421-425

The Tribological Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyimide Composites under Water lubrication

JIA Jun-hong¹, ZHOU Hui-di¹, GAO Sheng-qiang², ZHOU Hua³, CHEN Jian-m in¹

(1. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Engineering Plastic, Beijing Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

3. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Polyimide-based composites filled with various solid lubricants and reinforced with carbon fiber were prepared by compression molding. The tribological behavior of the composites sliding against steel under water lubrication was comparatively investigated with that under dry sliding. The wear mechanism was comparatively examined as well. As the results, the PI-based filled composites sliding against stainless steel register lower friction coefficients and wear rates in water than in air. The lowest wear rate is recorded as $0.99 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ for the PTFE filled PI composite. The lowered wear rate of PI-based composites could depend on the polar imide radical in the composite molecules. In other words, the polar imide radicals could link with water molecules by hydrogen bond. Consequently an adsorbed film of water could form to keep off the direct contact between the frictional pair sliding surfaces. Therefore a decreased wear rate of the composites would be observed.

Key words: polyimide; carbon fiber; composite; water environment; tribological behavior

Author: JIA Jun-hong, male, born in 1975, Ph. D. student, E-mail: chenjm@ns.lzb.ac.cn; jiajh75@sina.com.