

# 聚苯硫醚 / 聚四氟乙烯摩擦学性能研究

冉爱 唐建宏\* 罗靖翔 蒋铖

四川沿江攀宁高速公路有限公司, 中国·四川 西昌 615000

**摘要:** 聚苯硫醚 (PPS) / 聚四氟乙烯 (PTFE) 所制备的复合材料由于其优良的综合性能而成为最有应用潜力的航空航天工程材料之一。论文对不同比例 PPS/PTFE 复合材料进行了摩擦磨损试验。结果表明: 在一定的载荷下, 随着摩擦副接触面积的增加, 材料磨损程度不断加剧; 当磨损达到一定程度时, 磨损率随摩擦副接触面积增大而减少; 同时, 随着摩擦速度的增加, 磨损率先增大后减小。

**关键词:** 聚苯硫醚; 聚四氟乙烯; 摩擦; 磨损; 性能

## Research on the Triboelectric Properties of Polyphenylene Sulfide/Polytetrafluoroethylene

Ai Ran Jianhong Tang\* Jingxiang Luo Cheng Jiang

Sichuan Yanjiang Panning Expressway Co., Ltd., Xichang, Sichuan, 615000, China

**Abstract:** The composite material prepared from polyphenylene sulfide (PPS)/polytetrafluoroethylene (PTFE) has become one of the most promising aerospace engineering materials due to its excellent comprehensive properties. This paper conducted friction and wear tests on PPS/PTFE composite materials with different ratios. The results showed that under a certain load, as the contact area of the friction pair increased, the degree of material wear continued to intensify; when the wear reaches a certain level, the wear rate decreases as the contact area of the friction pair increases; meanwhile, as the friction speed increases, the wear first increases and then decreases.

**Keywords:** Polyphenylene sulfide; Teflon; friction; wear and tear; performance

## 0 前言

聚苯硫醚 (PPS) 具有优异的耐高温、化学稳定性及较高的热机械性能, 是目前世界上最优秀的热塑性工程塑料之一, 但其热变形温度为 100℃。聚四氟乙烯 (PTFE) 作为一种综合了许多优良特性的工程塑料, 具有非常好的耐高温性, 其使用温度可达 200℃~250℃。当 PPS 和 PTFE 相互混合后得到复合材料, 由于它们各自所特有的综合性能, 如热塑性和热固性、极低的摩擦系数以及极佳的抗腐蚀性等, 使得这种新型复合材料成为航空航天领域最有应用潜力的材料之一。在材料研究中, 摩擦磨损试验被认为是评价材料综合性能的重要手段之一。从理论上讲, 复合材料可以通过调整组分来改善材料的摩擦磨损性能。然而, 对 PPS/PTFE 复合材料的摩擦磨损试验报道较少, 为此论文开展了不同比例 PPS/PTFE 复合材料进行摩擦磨损试验, 并结合扫描电镜、红外光谱和 XRD 测试结果深入分析了摩擦磨损机理, 为开发更有竞争力的航空航天复合材料提供了数据支撑。

## 1 实验过程

### 1.1 试验材料和方法

①材料: 采用 T304 不锈钢丝材作为摩擦副, PPS 和 PTFE 树脂分别为聚合级和热塑性级。

②试样制备: 用 1050℃/15min、60℃/1h 共 28h 的热压

工艺制备复合材料试件<sup>[1]</sup>。将制件放入热空气中进行软化处理, 然后在真空干燥箱中, 于 95%N<sub>2</sub>、5%O<sub>2</sub>、80℃~90℃环境下恒温 24h, 使其完全致密化后进行剪切试验。将试件剪切成不同尺寸 (如 5mm×5mm), 并经打磨抛光后得到所需的摩擦副。

③摩擦磨损试验: 使用万能试验机测试摩擦副的静态摩擦力。通过调节载荷控制装置来控制摩擦力大小, 使其达到所要求的摩擦参数范围内。通过手动旋转摩擦试验机的主电机, 调节速度从而改变摩擦速度。

④磨损分析: 分别用扫描电镜、红外光谱和 X 射线衍射等手段对试件的表面结构、化学成分进行分析。

在实验过程中主要是利用高速混合机和双螺杆挤出机以及精密注塑机、扫描电子显微镜等。在样品制备过程中, 需要烘干处理 PPS/PTFE 复合材料的原材料, 随后根据特定配比混合, 利用双螺杆挤出机完成造粒工作, 控制器温度在 260℃~290℃范围内<sup>[2]</sup>。干燥处理粒料之后, 注射出需要的样条。在开展摩擦实验之前利用金相砂质对试样表现进行处理, 并且利用丙酮超声完成试样处理工作, 维持 12h 以上的干燥时间。在摩擦性能测试过程中, 通过试样摩擦之后利用扫描电子显微镜观察表面形态。开展动态热力学分析, 利用三点弯曲模式对储能模量和损耗因子进行测量, 在实验过程中利用温度扫描模式, 控制温度范围在室温 270℃左右。利用 1.0Hz 频率。选用的温度变化率为 3℃/min。

## 1.2 摩擦系数的测定

根据摩擦因数的测定方法,采用自制的标准钢球(直径 32mm)与材料制成不同接触面积的摩擦试样,并对其进行摩擦系数测量。在试验台上固定一块玻璃板作为滑动部件,用两个带编码器的传感器来确定摩擦力大小和方向,实验时将磨料置于待测样品的接触面上,以低速、小载荷往复运动,记录下对应时间内的滑动速度、位移等数据,由计算机自动计算出相应的摩擦系数,从而得到每个试件的摩擦系数。

当 PPS/PTFE 复合材料与标准钢球间的接触面积增大时,摩擦系数呈先增大再减小后又增大的趋势;对于 65 : 35 配比的 PPS/PTFE 复合材料,其摩擦系数最高可达 0.49,而 85 : 15 配比的 PPS/PTFE 复合材料则仅为 0.28 左右<sup>[3]</sup>。因此,从磨损机理的角度考虑,这两种比例的复合材料具有较高的摩擦性能。

## 1.3 磨损形貌图及磨损率测试

对各组试样磨损表面进行 SEM 观察:随着摩擦副接触面积的增加,摩擦区的磨损现象较为严重。此外,磨损后形成的粉末状物分布于整个摩擦副表面,并且随着时间的延长,材料中颗粒逐渐向中间聚集。

以两个接触面为中心,在半径为 0.5mm 的圆形区域内用扫描电镜测试磨损率,随着接触面积的增大,磨损加剧,尤其是当接触面积增大到一定值时,此时样品开始出现分层和断裂;而当接触面积达到最大值时,磨损仍没有停止,且有增大的趋势<sup>[4]</sup>。通过对比发现,当接触面积不变时,随着转速的增大,磨损率先增大,然后减小。当转速大于 800r/min 时,随着转速的增加,材料中的微粒越来越少,这与上面的实验结果相一致。因此,论文采用线性关系式对该复合材料的磨损率进行了计算。

## 1.4 断口微观结构分析

通过 SEM 观察磨损后的试样断面,可以得到许多重要信息。随着载荷的增加,断口逐渐形成。在接触表面发生剥离时,产生了一些碎片状材料和纤维结构;由于摩擦温度高,样品表面很快形成一层极薄的氧化物,这可能是氧化膜或摩擦膜。随着摩擦接触面积的增加,剪切区内的断面也随之增大,而最大切割力越小,试样断面上出现的裂纹越多。这说明,在滑动摩擦过程中,当载荷增加到一定程度时,纤维与基体间的界面结合变差,使纤维间出现了较大的空隙。另外,随着滑动摩擦速度的增加,试样内部裂纹扩展速度加快,导致材料破坏程度加大。当载荷一定时,PPS/PTFE 复合材料在高速摩擦时易出现热裂纹、断裂现象。

## 1.5 磨损机理探讨

在试验中,摩擦因数随着载荷的增加而增大,但在相同的磨损量下,接触面积越大,摩擦力越小。当载荷较小时,材料表面生成了一层较为均匀、致密的氧化物膜<sup>[5]</sup>。这是由于受到载荷作用的冲击,材料表面首先产生裂纹,然后由这

些裂纹形成粘结剂,并通过与金属之间的扩散黏结,逐渐形成一个致密的氧化膜,以提高材料表面硬度和耐磨性能。随着载荷的增加,当达到某一临界值时,氧化层开始破坏,使得材料表面出现细小的划痕或凹陷,这主要是由于较大载荷下材料内部的应力集中所导致的。此外,在氧化膜的作用下,材料表面的犁沟也开始加剧磨损。从断口形貌分析可以看出,PPS/PTFE 复合材料的摩擦磨损机理如下:载荷较小时(小于 0.02N),材料表面生成了一层很薄的氧化膜,它不仅能保护材料不被进一步磨损,而且还可防止摩擦因数的急剧增加;载荷继续增加,氧化膜遭到破坏,材料表面出现了细小的划痕或凹坑。

## 2 实验分析

### 2.1 复合材料的摩擦磨损试验结果和分析

结合表 1 可以看出,对比没有填充 PTFE 的 PPS,填充 PTFE 的 PPS 复合材料摩擦因数更小。增加 PTFE 添加量之后,摩擦因数随之增大,同时会降低磨损体积<sup>[7]</sup>。在摩擦过程中,很容易将 PTFE 大分子在洁净区拉出,在摩擦初期开始向对偶面转移 PTFE 大分子,利用库仑力在对偶面上产生转移膜,因此降低了摩擦因数。增加了 PTFE 含量之后,转移膜形成难度因此以降低,同时会不断增强转移膜的附着力。在摩擦过程中,针对对偶面的微凸起发挥出控制。在复合材料中添加填料,可以发挥出支持作用,对于磨损体积发挥控制作用。

表 1 PPS/PTFE 复合材料磨损体积和摩擦因数

组分	磨损体积 (cm <sup>3</sup> )	平均摩擦因数
PPS	0.016	0.35
PPS+5%PTFE	0.001	0.26
PPS+10%PTFE	0.001	0.18
PPS+15%PTFE	0	0.11

分析 PPS/PTFE 复合材料和对偶面摩擦因数随着滑动距离产生的变化。针对纯 PPS,在滑动初期,增加滑动距离之后,将会随之增大摩擦系数,当达到最大值之后将会呈现出降低趋势,最后趋于稳定。在摩擦初期,试样表面和金属表面之间属于弹性接触。因为接触面积直接影响到摩擦因数,增大滑动近距离和结合粗面积之后,将会明显增加摩擦因数。产生转移膜之后,将会逐渐降低摩擦因数。

在摩擦初期条件下,PPS/PTFE 在摩擦过程中的摩擦系数有所提高,当进入到摩擦稳定阶段,随着 PTFE 用量的增多,将会逐渐缩短达到稳定阶段的时间。在摩擦初始阶段,并不能完全生成转移膜,而材料表面的微凸点对高分子材料产生了犁削效应,从而增加了材料的摩擦系数。PPS/PTFE 两种材料在经历了一个较长的过渡时期后,都达到了一个相对平稳的状态,这与其表面的磨损量较低有关。通过分析可知:PTFE 的添加量越大,其表面越易生成黏附力强且分布均匀的转移薄膜,有利于更快进入稳定状态,在实际生产过程中可以参考这一规律。

在对偶面上不断除去附着的转移膜, 因为受到摩擦的重复作用, 将会增加 PPS 磨损, 主要是因为对偶面凸起产生的犁耕作用和刨削作用。如果 PTFE 含量比较低, 不利于保障转移膜的黏着力, 也无法对表面完全覆盖, 这时主要是磨粒磨损, 对比纯 PPS, 这时磨损体积比较小。提高 PTFE 含量之后, 将会形成均匀的转移膜, 并且实现完整覆盖, 这时样条接触转移膜, 因此会降低摩擦系数和磨损体积。

## 2.2 复合材料的固体流变实验结果分析

对 PTFE 填充之后, 对比没有填充 PTFE 的 PPS, 提高了玻璃化转变温度, 而且 PTFE 填充比例不同, 转变温度也具有较大的差异性, 损耗因子和摩擦因数之间具有紧密的联系, 当提高损耗因子之后, 将会降低摩擦因数。在力学内耗角度出发, 冻结链段运动之后, 因为链段之间不会出现相对迁移, 因此可以忽视链段之间的摩擦力, 这时不会产生较大的内耗。在链段运动自由阶段, 将会减小链段之间的相对作用, 而且不会产生较大的链段迁移的摩擦力, 因此也不会产生较大的内耗, 只有链段运动向自由运动转化的时候, 才会增大内耗, 这时玻璃化转变温度将会达到极大值。图 1 为 PPS/PTFE 复合材料损耗因子随温度变化曲线图。

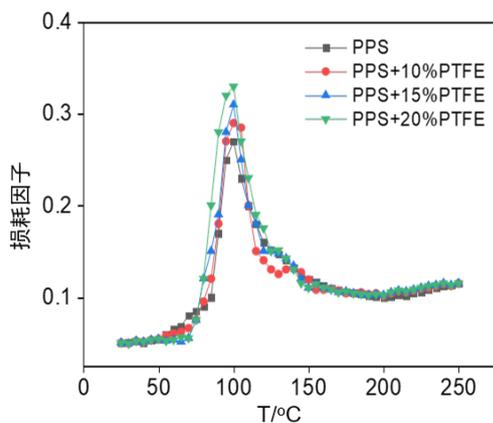


图 1 PPS/PTFE 复合材料损耗因子随温度变化曲线图

加入 PTFE 后, 由于 PTFE 的存在, PPS 大分子链的移动受到了限制, 导致了聚合物的玻璃化转变温度稍有提高。在此过程中, PTFE 粒子与 PPS 之间存在着较大的位移, 使得聚合物在聚合物中的移动受到的阻力较小, 并且随着 PTFE 含量的增加, 聚合物在聚合物中的移动能力增强。由于 PTFE 阻止了 PPS 大分子的移动, 而 PTFE 将 PPS 从聚合物中带走, 因此, PTFE 的加入并未改变 PPS 的玻璃化转变温度。在摩擦时, PTFE 和 PPS 之间的迁移表现为两个方向

的移动, 因此形成了一种平滑、完整、黏附力强的传递薄膜, 从而降低了摩擦系数。衰减系数的峰值反映了材料的减振特性, 随着衰减系数的增大, 系统的减振效果也相应提高, 从而降低了摩擦系数。

## 3 结语

①在一定载荷和速度下, PPS/PTFE 复合材料的摩擦磨损机理主要为磨粒磨损。②不同材料比例的复合材料具有不同的摩擦特性, 65 : 35、75 : 20、85 : 15 复合材料在低速下摩擦系数较小, 随着转速的增加, 三者的摩擦系数增大; 在高速下, 三者的摩擦系数均减小。③随着摩擦接触面积的增加, PPS/PTFE 复合材料的磨损程度逐渐加剧, 但其磨损率随接触面积增大而降低; 随着摩擦速度的增加, PPS/PTFE 复合材料磨损率先增大后减小, 说明 PPS/PTFE 复合材料是由脆性断裂转变为韧性断裂。④通过 SEM 照片和断口形貌分析, 可知在摩擦力的作用下, PPS/PTFE 复合材料的表面出现了塑性变形和破坏, 导致裂纹的产生并扩展。

## 参考文献:

- [1] 付建伟, 蔡醇洋, 白鲸, 等. PTFE 基复合材料在不同工况下的摩擦磨损性能研究进展[J]. 有机氟工业, 2023(2): 53-56.
- [2] 吴海江, 朱家乐, 杨丹, 等. Ti<sub>2</sub>SnC 纳米片增强 PTFE 基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1141-1146.
- [3] 聂娅, 金石磊, 段家真. 玻璃纤维长径比对 PTFE 复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. 广州化工, 2021, 49(24): 40-42+56.
- [4] 吴迪, 白志民, 张晶. 凹凸棒石-硅灰石/PTFE 复合材料摩擦磨损性能及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(10): 2078-2088.
- [5] 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.
- [6] 胡刚, 陈学庆, 金石磊. 不同纤维增强和不同固体润滑剂改性 PTFE 复合材料的摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(7): 41-44.
- [7] 李朋辉, 侯根良, 毕松, 等. 碳纳米管改性 PTFE 复合材料摩擦磨损性能[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(5): 108-112.

作者简介: 冉爱 (1974-), 男, 中国重庆人, 本科, 从事高速公路建设及运营管理研究。

通讯作者: 唐建宏 (1978-), 男, 中国四川南充人, 本科, 从事高速公路建设及运营管理研究。

基金项目: 四川省交通运输科技项目 (项目编号: 2018-ZL-04)。