

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.002

MAPE对PA66/PTFE共混材料摩擦磨损性能的影响

涂旋, 沈旭康, 李张, 宋艳江, 羊海棠

(杭州师范大学材料与化学化工学院, 有机硅化学和材料技术教育部重点实验室, 杭州 311121)

摘要: 采用熔融共混的方法制备了马来酸酐接枝聚乙烯(MAPE)改性的聚酰胺66/聚四氟乙烯(PA66/PTFE)共混材料。在无润滑条件下, 选用三针销-盘式摩擦测试方法对材料在不同载荷下的摩擦磨损性能进行了测试, 借助扫描电子显微镜(SEM)对材料断面及磨损表面形貌进行了表征, 并分析了其磨损机理。结果表明, 单独添加PTFE虽然能够改善PA66材料的自润滑性, 但摩擦系数波动较大, 且表现出升高的体积磨损率。在固定总添加质量分数20%的情况下, 用MAPE替代PTFE, 可使材料的摩擦系数进一步减小, 耐磨性大幅改善, 且呈现一定的协同减摩作用。与PA66/MAPE(80/20)和PA66/PTFE(80/20)相比, PA66/PTFE/MAPE(80/5/15)表现出最低的摩擦系数0.234, 较纯PA66(0.523)下降了55.3%, 体积磨损率为 $3.23 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 较纯PA66下降了44.1%。在长距离的分阶段摩擦测试中, 除纯PA66外, 所有改性材料单位距离的体积磨损率均随着滑动距离的增加逐渐变小并趋于稳定。其中PA66/PTFE/MAPE共混材料有最低且稳定的摩擦系数, 总体积磨损率也最小。磨损表面SEM照片表明, MAPE能够增强PA66基体与PTFE之间的相互作用, 减小磨痕宽度、改善材料耐磨性。不同载荷下的摩擦测试结果则进一步表明MAPE与PTFE对PA66材料具有协同减摩作用。

关键词: 聚酰胺66; 马来酸酐接枝聚乙烯; 聚四氟乙烯; 摩擦系数; 干摩擦

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0008-08

Effect of MAPE on friction and wear properties of PA66/PTFE blends

TU Xuan, SHEN Xukang, LI Zhang, SONG Yanjiang, YANG Haitang

(College of Material, Chemistry and Chemical Engineering, Hangzhou Normal University, Key Laboratory of Organosilicon Chemistry and Material Technology, Ministry of Education, Hangzhou 311121, China)

Abstract : Maleic anhydride grafted polyethylene (MAPE) modified polyamide 66/polytetrafluoroethylene (PA66/PTFE) blends were prepared by melt blending. Under dry friction conditions, the friction and wear properties of the materials under different loads were tested by three-needle pin-disc friction test method. The fracture surface and wear surface morphology of the materials were characterized by scanning electron microscope(SEM), and the wear mechanism were analyzed. The results show that the addition of PTFE alone can improve self-lubrication property of PA66 materials, but the friction coefficient fluctuates acutely and exhibits an increased volume wear rate. At a fixed total additive amount of 20 wt%, replacing PTFE with MAPE can further reduce the friction coefficient of the material, significantly improve the wear resistance, and exhibit a certain synergistic friction reduction effect. Compared to PA66/MAPE(80/20) and PA/PTFE(80/20), PA/PTFE/MAPE(80/5/15) shows the lowest friction coefficient of 0.234, 55.3% lower than that of pure PA66(0.523), and its volume wear rate is $3.23 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 44.1% lower than that of pure PA66. In the long distance staged friction test, except for pure PA66, the volume wear rate per unit distance of all modified materials gradually decrease and tend to be stable with the increase of sliding distance. Among them, PA66/PTFE/MAPE blend shows the lowest and stable friction coefficient and the lowest total volume wear rate. The SEM photos of wear surface show that MAPE can enhance the interaction between PA66 matrix and PTFE, reduce the width of wear scar and improve the wear resistance of the materials. The friction test results under different loads further demonstrate the synergistic anti-friction effect of MAPE and PTFE on PA66.

Keywords : polyamide 66 ; maleic anhydride grafted polyethylene ; polytetrafluoroethylene ; friction coefficient ; dry friction

通信作者: 羊海棠, 博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为高分子材料的改性加工

收稿日期: 2024-12-09

引用格式: 涂旋, 沈旭康, 李张, 等. MAPE对PA66/PTFE共混材料摩擦磨损性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2): 8-15.

TU Xuan, SHEN Xukang, LI Zhang, et al. Effect of MAPE on friction and wear properties of PA66/PTFE blends[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 8-15.

聚酰胺 66 (PA66)是一种可替代金属、应用于汽车零部件、机械制造等领域的工程塑料,具有力学强度高、加工性能等优点^[1-3],可用以制造齿轮、轴承等制件^[4-8]。但在缺乏润滑时,PA66体现出较高的摩擦系数和低耐磨性^[9],特别是在极端工况下,尤其在禁止使用润滑油/润滑脂的特殊场合,如航空航天工业等^[10-11],则对其耐磨自润滑性提出了更高的要求。

聚四氟乙烯(PTFE)是一种常用于高分子材料耐磨自润滑改性的有机固体润滑剂^[12-13],滑动过程中能够在其表面和配合面上形成薄膜层,摩擦系数较低^[14]。根据 Li 等^[15]研究,在低载荷和低转速条件下,PTFE/铜复合材料在 GCr15 配合面上形成薄而均匀的转移膜,但转移膜和钢环之间的附着力弱,缺乏连续的转移膜。因 PTFE 的极端惰性和弱的分子间作用力,使其与高分子基体的相容性差,材料的耐磨性难以改善^[16-17],因此必须对 PTFE 与基体的相容性进行改进。Li 等^[18]报道指出,选用反应接枝共聚物马来酸酐(MAH)接枝聚四氟乙烯(PTFE-g-MAH)能够有效增加聚酰胺 6(PA6)和 PTFE 之间的界面黏附力,提升 PA6/PTFE-g-MAH 共混材料的摩擦学性能和拉伸强度。但因 PTFE 的熔融加工温度很高,PTFE-g-MAH 的制备难度较大。

聚乙烯(PE)有着与 PTFE 相似的非极性链段结构,因其低的分子间作用力和固有的分子链柔顺性,也可作为固体润滑剂应用于高分子耐磨自润滑材料^[19-22]。Jin 等^[23]仅在 PEEK 基体中加入质量分数 2.0% 的超高分子量聚乙烯(PE-UHMW),材料的摩擦系数、磨损率就分别降低了 61%,89%。Keresztes 等^[24]发现,PE 填充浇铸 PA6 可明显改善 PA6 的耐磨性。此外,可以较容易地通过表面改性来提高 PE 与聚酰胺基体的相容性,使得 PE 颗粒分散更均匀,摩擦性能有望进一步改善。Wang 等^[25]制备了 MAH 接枝高密度聚乙烯(PE-HD-g-MAH)增容的 PA66/PE-UHMW 材料,发现材料的摩擦系数随 PE-UHMW 填充量的增加而明显降低。

目前,对 PA66 摩擦磨损性能的改善主要集中在纤维增强^[26-27]、润滑剂改性^[28-29]等,MAH 接枝聚乙烯(MAPE)对 PA66/PTFE 共混材料摩擦磨损性能的影响少有报道。考虑到 PE 和固体润滑剂 PTFE 非极性结构的相似性及其对官能化的适应性,笔者主要探讨了 MAPE 对 PA66/PTFE 共混材料摩擦磨损性能的影响及磨损机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA66:101 F,美国杜邦公司;

MAPE:HAD-14A,接枝率 0.8%~1.0%,南海柏晨高分子新材料有限公司;

PTFE:M1300,粒径 5~10 μm ,美国杜邦公司;

二甲苯和乙醇:上海国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机:TSE-30A/500-11-40,南京瑞亚挤出集团有限公司;

注塑机:SA600 II/130,宁波海天塑料机械集团有限公司;

电子万能试验机:UTM4204,珠海三思试验设备有限公司;

冲击试验机:DR-6025A,扬州德瑞仪器设备有限公司;

摩擦磨损实验机:MMW-1A,济南益华摩擦学测试技术有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):sigma500,德国蔡司公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9140A,上海精宏实验设备有限公司。

1.3 试样制备

使用双螺杆挤出机将 PA66 与 PTFE,MAPE 进行熔融混炼,试样代号及各组分具体的质量分数见表 1。螺杆转速为 300 r/min,温度为 270 $^{\circ}\text{C}$ 。通过注射成型制备测试样条,注塑温度为 270 $^{\circ}\text{C}$ 。

表 1 试样代号及各组分质量分数

Tab. 1 Abbreviation and each component mass fraction

				%
Sample code	PA66	PTFE	MAPE	
PA	100			
PA/F5	95	5		
PA/F10	90	10		
PA/F15	85	15		
PA/F20	80	20		
PA/M5	95		5	
PA/M10	90		10	
PA/M15	85		15	
PA/F5/M15	80	5	15	
PA/F10/M10	80	10	10	
PA/M20	80		20	

1.4 测试与表征

在摩擦磨损试验机上进行了干滑动条件下的三针-盘模式的摩擦学试验,测试标准参照 ASTM G

99-2017,改变试验载荷,摩擦系数测试速度(v)=120 r/min。测量并计算平均每个样品摩擦前后的磨损高度 Δh ,计算磨损体积 ΔV 。体积磨损率 ω [$\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$]计算公式见式(1)。

$$\omega = \frac{\Delta V}{P \times L} \quad (1)$$

式中: ΔV 为磨损体积, mm^3 ; P 为载荷, N ; L 为滑动距离, m 。

使用万能试验机,根据GB/T 9341-2008和GB/T 1040.2-2006测试材料的弯曲和拉伸性能,测试速度20 mm/min。

使用冲击试验机,根据GB/T 1043-1993测试了材料的冲击强度。

动态热机械分析测试在三点弯曲配置下进行,频率为1 Hz,升温速率5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,温度范围为25~180 $^{\circ}\text{C}$ 。

使用SEM观察材料磨损表面和冲击断面的形态。表征前,试样断面使用二甲苯蚀刻,并进行喷金处理。

2 结果与讨论

2.1 PTFE对PA66摩擦磨损性能的影响

图1为不同含量PTFE填充PA66/PTFE共混材料的摩擦磨损性能(测试载荷为36 N)。由图1a可以看出,由于PTFE的加入,PA66/PTFE共混材料的摩擦测试曲线下移,表明材料摩擦系数得到了有效下降,且随PTFE含量的增大,下降幅度增大,但摩擦系数的波动幅度也增大,这应该是因为PTFE与PA66相容差导致的。PTFE含量越大,试样因两相相容性差导致的缺陷越多,摩擦系数越不稳定。由摩擦系数测试曲线及试样磨损高度统计所得的平均摩擦系数和体积磨损率可见图1b。结果表明,当PTFE添加质量分数为20%时,PA/F20材料的摩擦系数降低到0.39,比纯PA66下降了25.4%,起到了一定的自润滑改进作用。但因PA66与PTFE差的相容性,PA66/PTFE共混材料的体积磨损率均高于纯PA66。

2.2 MAPE对PA66摩擦磨损性能的影响

图2是不同MAPE含量填充PA66/MAPE共混材料的摩擦和磨损性能测试,数据显示,随着MAPE含量的增加,PA66/MAPE共混材料摩擦系数逐渐变小。当MAPE质量分数从5%增加到10%,摩擦系数下降了20%,MAPE质量分数增加到10%以上,摩擦系数下降趋势趋于平缓。

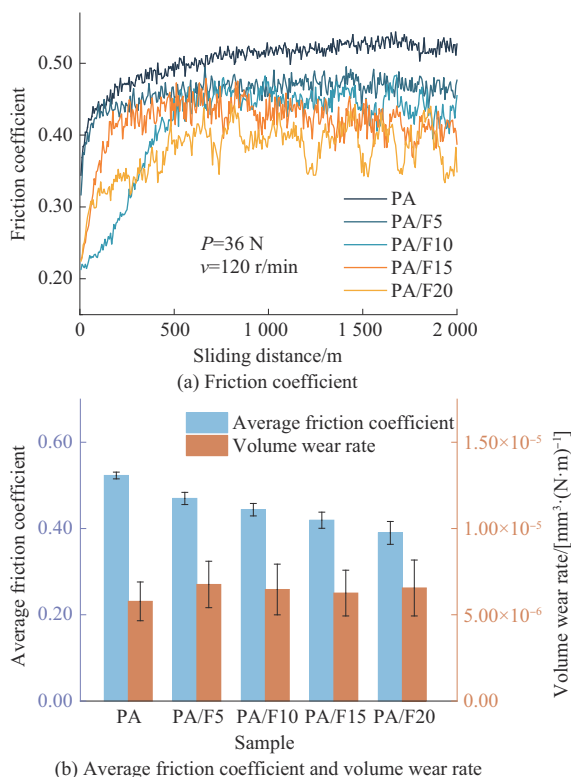


图1 不同含量PTFE填充PA66/PTFE共混材料的摩擦磨损性能
Fig. 1 Friction and wear properties of PA66/PTFE blends filled with different contents of PTFE

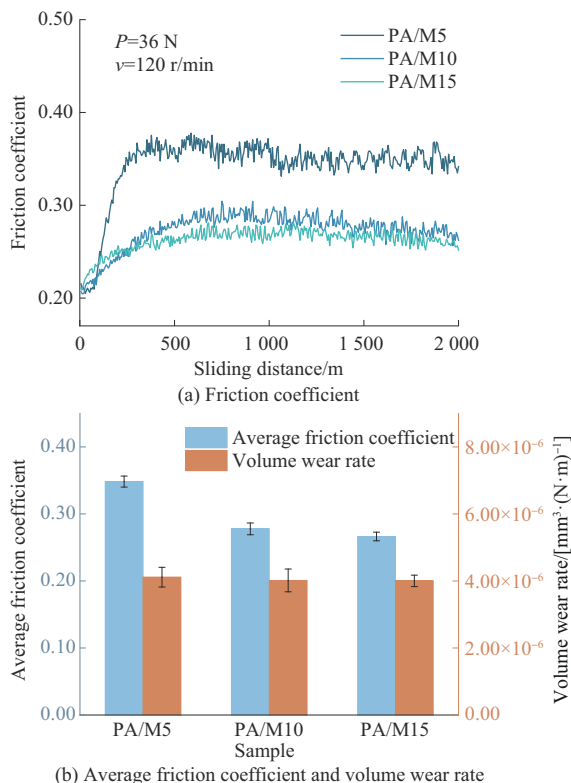


图2 不同含量MAPE填充PA66/MAPE共混材料的摩擦磨损性能
Fig. 2 Friction and wear properties of PA66/MAPE blends filled with different contents of MAPE

2.3 MAPE对PA/PTFE共混材料性能的影响

采用MAH接枝,因其引入的MAH基团能够与PA66中的氨基—H发生亲核取代反应形成共价键,而形成良好的界面作用,常用于PA66材料的改性^[30]。固定PTFE和MAPE添加总质量分数为20%,PA66/MAPE, PA66/PTFE, PA66/PTFE/MAPE共混材料的摩擦系数曲线见图3a,统计所得的平均摩擦系数和体积磨损率见图3b。很明显,随着MAPE的加入,所有试样的摩擦系数均大幅低于仅添加PTFE的试样PA/F20,且摩擦系数更为稳定。其中PA/F5/M15材料的摩擦系数最低,为0.234,较纯PA66的0.523下降了55.3%,体积磨损率为 $3.23 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较纯PA66的 $5.78 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 下降了44.1%。PA/F10/M10材料的平均摩擦系数也仅为0.237。数据显示出PTFE和MAPE对PA66摩擦磨损性能有一定的协同改善作用。

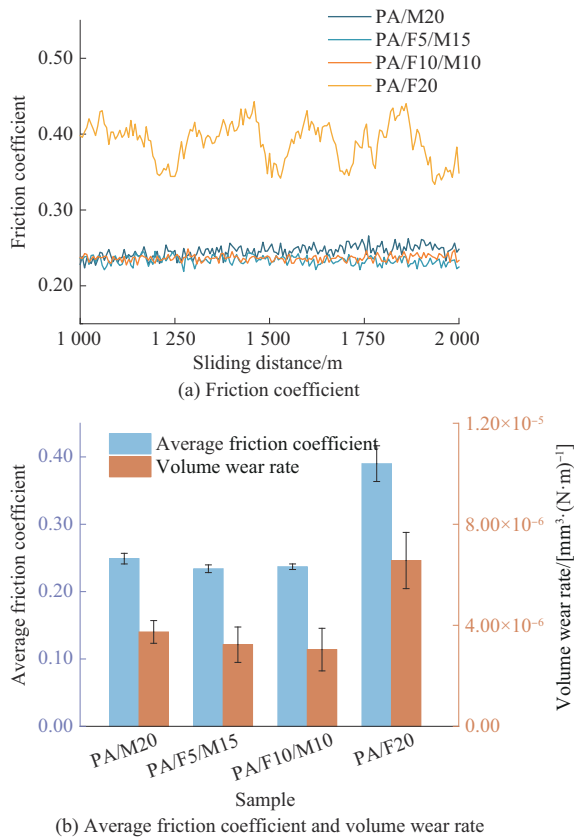


图3 MAPE改性PA66/PTFE共混材料的摩擦磨损性能

Fig. 3 Friction and wear properties of PA66/PTFE blends modified by MAPE

表2为PTFE和MAPE改性PA66共混材料的弯曲和拉伸性能。由表2可知,PTFE和MAPE均对PA66材料的力学强度和模量有负面影响,且MAPE的影响大于PTFE。但因MAPE与PA66良好的相容

性,共混材料的冲击强度会因MAPE的加入而提高。与纯PA66相比,PA/M20的冲击强度比纯PA66的 8.1 kJ/m^2 提高了约59.3%。PA/F5/M15的冲击强度比仅添加PTFE的PA/F20提升了103.9%。PA66/PTFE/MAPE的弯曲模量有一定下降,材料刚性下降,其中最低的PA/F10/M10仅下降13.4%。

表2 PA66/PTFE/MAPE共混材料的弯曲和拉伸性能

Tab. 2 Flexural and tensile properties of PA66/PTFE/MAPE blends

Sample	Flexural strength /MPa	Tensile strength /MPa	Impact strength $/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2})$	Flexural modulus/MPa
PA	111.4	68.0	8.1	2 628.9
PA/M20	88.8	57.6	12.9	2 331.0
PA/F5/M15	78.0	46.8	10.4	2 052.4
PA/F10/M10	85.1	48.3	8.1	2 275.5
PA/F20	99.8	53.5	5.1	2 522.9

为分析MAPE及PTFE对PA66共混材料性能的影响机理,采用SEM分别对PA/F20, PA/M20和PA/F10/M10材料的脆性断面进行了形貌分析,如图4所示。图4b中PA/F20断面相对平整,PTFE脱落留下的光滑孔洞清晰可见,表明PTFE与PA66基体相容性极差,材料体现为脆性断裂,且PTFE易于从表面脱落。这应该是PA/F20材料体积磨损率大于PA66的原因。而PA/F10/M10上除了MAPE被刻蚀的密集孔洞外,还有较多的PTFE颗粒暴露并黏附在表面上,表明MAPE的加入一定程度起到了改善PTFE与PA66基体相容性的作用。

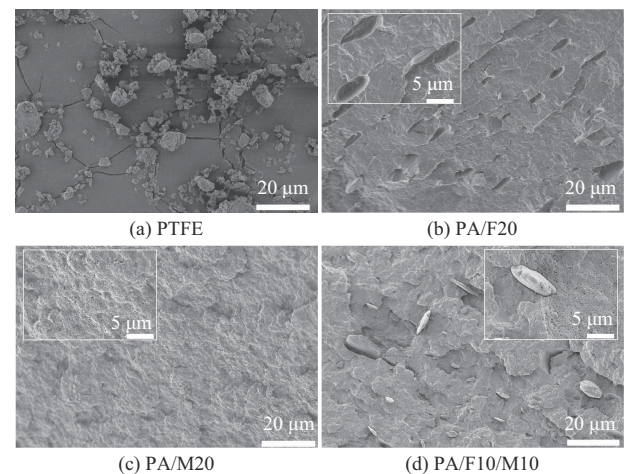


图4 PTFE及PA66/PTFE/MAPE共混材料冲击断面的SEM照片

Fig. 4 SEM photos of PTFE and impact fracture surface of PA/PTFE/MAPE blends

2.4 长距离阶段性摩擦测试

为进一步探索MAPE及PTFE对PA66材料摩擦磨损性能的影响,对各材料进行了长距离阶段性

摩擦测试,如图5所示。由图5可知,在相同的测试条件下,仅添加PTFE的PA/F20试样摩擦系数极不

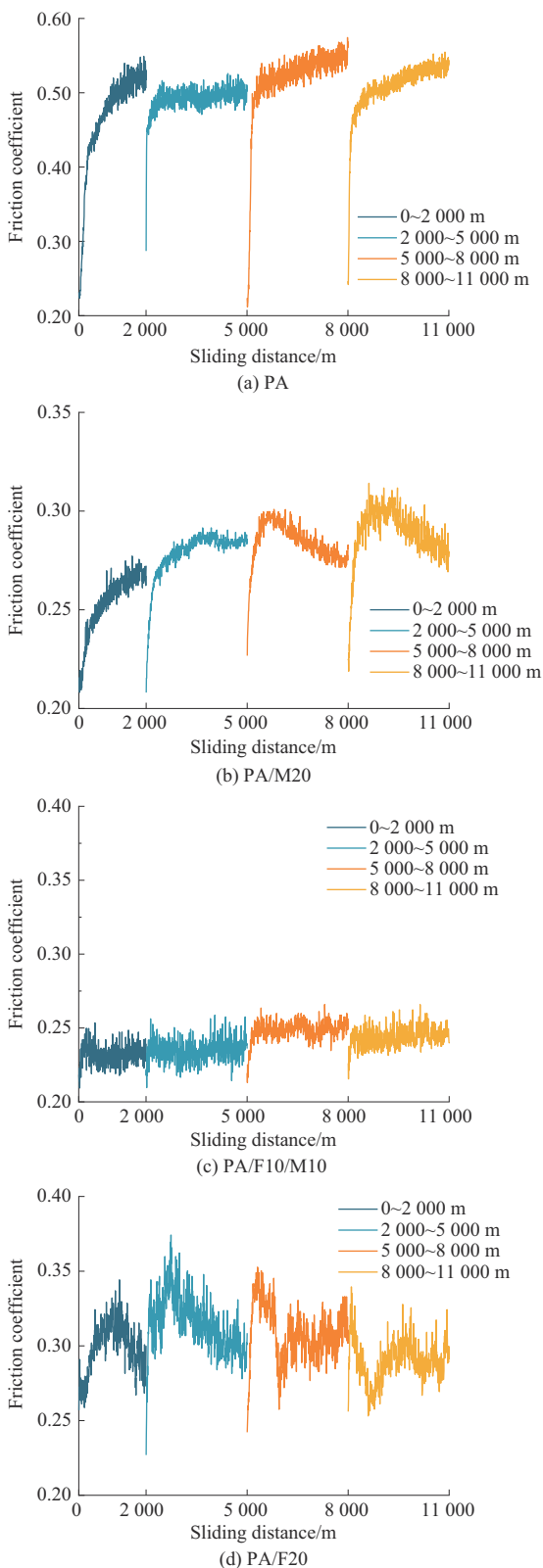


图5 不同滑动距离阶段PA66及其共混材料的摩擦系数
Fig. 5 Friction coefficient of PA66 and its composites in different friction stages

稳定,周期间及周期内摩擦系数曲线均有很大波动,这进一步说明PTFE与PA66基体相容性差,PTFE在摩擦过程中易剥离。而PA/M20在滑动距离超过2 000 m的摩擦阶段,也显示出较高的摩擦系数。与PA/M20和PA/F20相比,在滑动距离为0~11 000 m内,PA/F10/M10具有更低的摩擦系数和稳定性,显示出PTFE与MAPE对PA66的协同减摩作用。

图6a列出了PA66及其共混材料在各个摩擦测试阶段的体积磨损量。由图6a可见,纯PA66在各个阶段内都呈现高的体积磨损量。值得注意的是,填充PTFE或(和)MAPE的改性材料,随着滑动距离的规律性增加,材料的体积磨损量逐步下降,且幅度变小,趋于稳定值,维持在较低水平,体现良好的耐磨性。由图6b统计的全周期(0~11 000 m)总的体积磨损量可知,PA/F10/M10材料具有最低的总磨损量,表明其耐磨性最优。

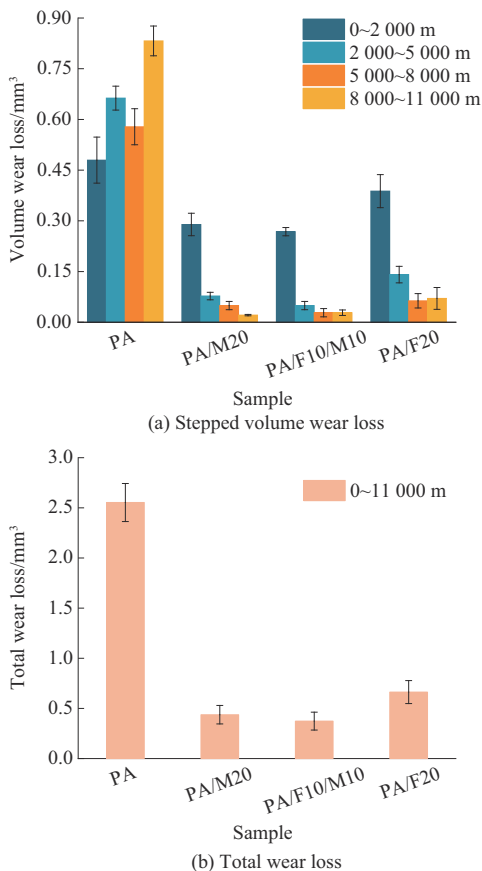


图6 PA66及其共混材料的体积磨损量

Fig. 6 Volumetric wear loss of PA66 and its composites

为更好地对PA66及其共混材料的摩擦行为进行研究,采用SEM对滑动距离为2 000 m的磨损表面进行了分析,如图7所示。由图7可以观察到,纯

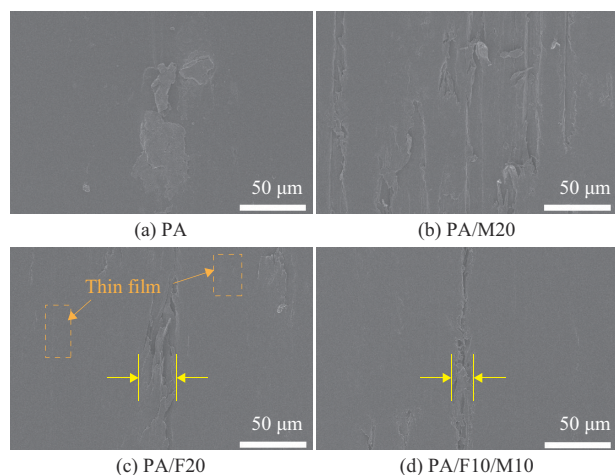


图7 滑动至2 000 m的PA66材料磨损表面形貌

Fig. 7 Morphology of worn surface of PA66 sliding to 2 000 m

PA66表面有颗粒状物黏附着,形成磨粒和黏着磨损。PA66表面上的微小凸起颗粒受到剪切和摩擦热作用发生变形和移动,磨损机制主要表现为磨粒磨损和黏着磨损。

MAPE较PA66具有更高的柔性,在摩擦剪切作用下PA/M20表面的MAPE屈服变形,形成鳞片状磨屑,但因其与PA66基体良好的界面作用,片状磨屑不易脱落。从而使材料表现为低的摩擦系数和体积磨损率,磨损机制主要表现为黏着磨损。

PA/F20磨损表面较为平整,这也是因为PTFE在摩擦作用下易屈服变形导致的。仔细观测图7c可以发现表面有部分层状物质存在,这是摩擦接触面上的PTFE形成了不连续的薄膜层,减少了材料与钢配面的直接接触,是PTFE改善PA66/PTFE摩擦系数的主要原因^[15]。由于PTFE与基体相互作用弱,易于从磨损表面脱落,从而在表面留下较宽的磨痕,因而材料表现出极不稳定的摩擦系数和低的耐磨性。相比较,PA/F10/M10摩擦表面上沿摩擦方向的磨痕更窄。结合图4c分析,进一步表明MAPE能够改善PTFE与PA66基体的相容性,增强PTFE与PA66基体间的相互作用,摩擦表面上的PTFE薄膜层与PA66基体黏附更牢固,从而磨痕变窄,耐磨性提高。MAPE在增强PTFE与PA66间相互作用的同时,自身也发生塑性变形,促进了连续而均匀的转移膜的产生,磨损机制主要也是黏着磨损。

2.5 不同载荷下MAPE对PA66/PTFE摩擦磨损性能的影响

在同测试速度($v=120$ r/min)下,改变载荷(P)对PA, PA/M20, PA/F20和PA/F10/M10进行了摩擦测

试,结果见图8。虽然基于PTFE的自润滑性,PA/F20材料的摩擦系数低于纯PA66,但因PTFE易于

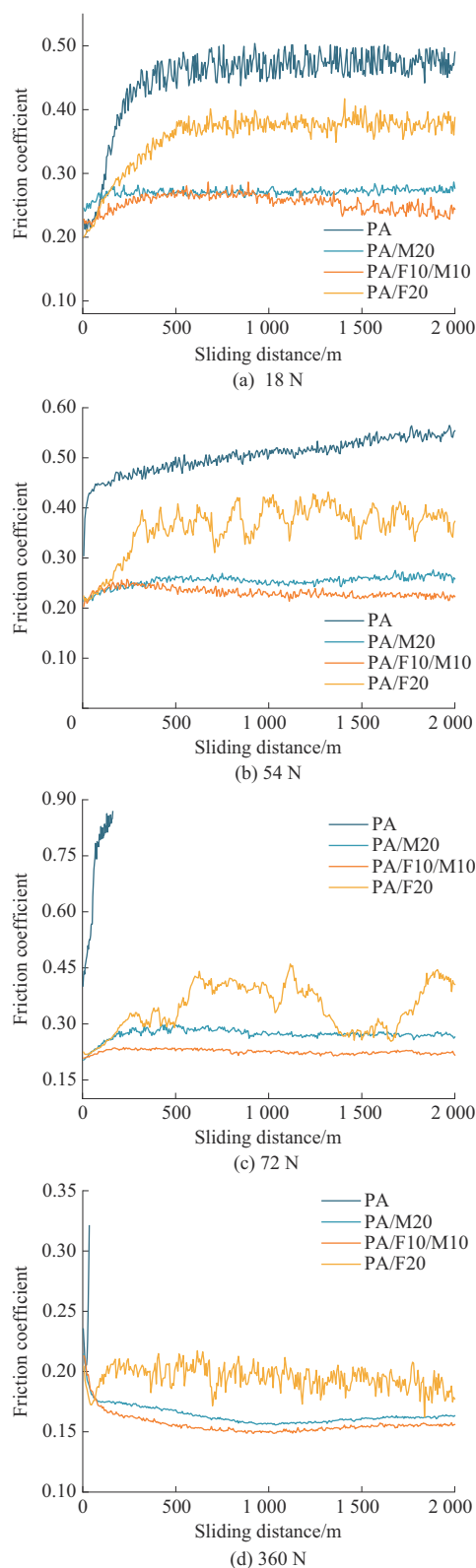


图8 不同载荷下PA66及其共混材料的摩擦系数

Fig. 8 Friction coefficient of PA66 and its composites under different loads

脱落,使材料的摩擦系数呈现较大的波动,且测试过程中的振动噪声大。

随着 MAPE 的加入,无论是在低载荷或是高载荷下,对应材料都显示出更低的摩擦系数。其中 PA/F10/M10 材料体现了良好的协同改善作用,材料表现出最低且稳定的摩擦系数。

表 3 为不同测试载荷下各个 PA66 样品的体积磨损率。由表 3 可以看到,在不同的载荷下,PA/F10/M10 的体积磨损率均低于 PA/F20 和 PA/M20,这进一步说明 MAPE 与 PTFE 对 PA66 具有减磨效果,PA66 材料的耐磨性得到进一步改善。

表 3 不同载荷下 PA,PA/M20,PA/F20,PA/F10/M10 的体积磨损率

Tab. 3 Volume wear rate of PA,PA/M20,PA/F20,PA/F10/M10 under different loads				
	mm ³ /(N·m)			
Sample	18 N	54 N	72 N	360 N
PA	21.7	8.88	—	—
PA/M20	4.51	3.00	1.42	2.60
PA/F20	5.68	4.57	3.38	2.56
PA/F10/M10	4.31	1.70	1.27	2.40

3 结论

采用熔融混炼法制备了 PTFE 和 MAPE 改性的 PA66 基共混材料(PA/PTFE/MAPE),在干摩擦条件下进行摩擦磨损测试。并使用 SEM 对材料断面和磨损表面进行了形貌分析,探讨了摩擦磨损机理。得到结论如下:

(1) PTFE 的加入能一定程度降低 PA66 的摩擦系数。但因其与 PA66 相容性差,摩擦过程中 PTFE 易脱落,使 PA66/PTFE 材料呈现出高的体积磨损率和不稳定的摩擦系数。

(2) MAPE 能够大幅改善 PA66/PTFE 材料的摩擦磨损性能,在 PTFE 与 MAPE 总填充量(质量分数 20%)不变时,不同摩擦测试条件下,MAPE 与 PTFE 对 PA66 的摩擦磨损性能均具有协同改善作用。材料体现低且稳定的摩擦系数和低体积磨损率。在载荷为 54 N 的摩擦测试中,PA/F10/M10 材料平均摩擦系数和体积磨损率分别为 0.237 和 1.7×10^{-6} mm³/(N·m)。

(3) SEM 分析表明 MAPE 与 PTFE 具有良好的相容性,能够改善 PA66 与 PTFE 的界面作用,从而提高材料的冲击韧性和摩擦磨损性能。

参考文献

[1] SUN H Y, FANG Z Q, LI T, et al. Enhanced mechanical and tribological performance of PA66 nanocomposites containing 2D

layered α -zirconium phosphate nanoplatelets with different sizes [J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2019, 2(3): 407–422.

[2] LEE S M, SHIN M W, JANG H. Effect of carbon-nanotube length on friction and wear of polyamide 6, 6 nanocomposites[J]. *Wear*, 2014, 320:103–110.

[3] JIANG L N, ZHAO J Y, ZUO C L, et al. Protein-tannin interactions towards fabricating flame-retardant, UV-resistance, antibacterial and mechanical-reinforced PA66 fabric[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2024, 197.DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108798.

[4] CLAVERIA I, ELDUQUE D, LOSTALÉ A, et al. Analysis of self-lubrication enhancement via PA66 strategies: Texturing and nano-reinforcement with ZrO₂ and graphene[J]. *Tribology International*, 2019, 131:332–342.

[5] DEMIRCI M T, DÜZCÜKOĞLU H. Wear behaviors of polytetrafluoroethylene and glass fiber reinforced polyamide 66 journal bearings[J]. *Materials & Design*, 2014, 57:560–567.

[6] 李云凯,王优强,谢奕浓,等.不同润滑条件下 PA66 的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(6):706–712.

LI Yunkai, WANG Youqiang, XIE Yinong, et al. Tribological properties of polyamide 66 in multiple lubrication conditions[J]. *Tribology*, 2019, 39(6):706–712.

[7] 闫鹏娟.扶正器新型 PA66/PEEK/SCF 复合材料摩擦学性能研究[D].秦皇岛:燕山大学,2024.

YAN Pengjuan. Study on the tribological properties of new PA66/PEEK/SCF composite materials for centralizers[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2024.

[8] 崔旨桃,郭智威,谢心,等.尼龙自润滑性与表面结构协同作用对 HDPE 基水润滑轴承摩擦磨损性能的影响[J]. *摩擦学学报*, 2019, 39(4):407–417.

CUI Zhitao, GUO Zhiwei, XIE Xin, et al. The synergistic effect mechanism of PA66 self-lubrication property and surface texture on tribological performance of HDPE water-lubricated bearing[J]. *Tribology*, 2019, 39(4):407–417.

[9] JIA B B, LI T S, LIU X J, et al. Tribological behaviors of several polymer – polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions[J]. *Wear*, 2007, 262(11-12):1 353–1 359.

[10] JOSE J, SURYAWANSHI A, BEHERA N. Prediction of coefficient of friction of solid powder lubricants under high pressure conditions using machine learning algorithms[J]. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2024, 55(7):936–946.

[11] LENCE J R, WOODS P, WOODS E, et al. Cold spray deposition of MoS₂ and WS₂ based solid lubricant coatings[J]. *Lubricants*, 2024, 12(7).DOI: 10.3390/lubricants12070237.

[12] WU C, WU Y W, ZHAO H J, et al. Influence of hardness of nanoparticle additive in PTFE solid lubricant on tribological properties of GCr15 steel with bionic texture[J]. *Tribology International*, 2023, 189.DOI: 10.1016/j.triboint.2023.108915.

[13] 宋宇,宋博. PTFE 对 PE-UHMW 性能的影响[J]. *工程塑料应用*,

- 2016,44(2):129–133.
- SONG Ning, SONG Bo. Effect of PTFE on properties of PE-UHMW[J]. *Engineering Plastics Application*, 2016, 44(2): 129–133.
- [14] 刘亮, 阎逢元, 王鸿灵, 等. 聚四氟乙烯复合材料的摩擦学二次转移行为研究[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(3):30–33.
- LIU Liang, YAN Fengyuan, WANG Hongling, et al. Study on second transfer of PTFE composites under dry friction[J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(3):30–33.
- [15] LI H L, YIN Z W, JIANG D, et al. A study of the tribological behavior of transfer films of PTFE composites formed under different loads, speeds and morphologies of the counterface[J]. *Wear*, 2015, 328–329:17–27.
- [16] LIU Y Y, XU N, WANG Y, et al. Preparation and tribological properties of hybrid PTFE/Kevlar fabric self-lubricating composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 361:196–205.
- [17] LIN Z B, YUE H Q, GAO B Z. Enhancing tribological characteristics of PEEK by using PTFE composite as a sacrificial tribofilm-generating part in a novel dual-pins-on-disk tribometer[J]. *Wear*, 2020, 460–461.
- [18] LI J, XIA Y C. Effect of interfacial compatibility on the mechanical and tribological properties of blending PTFE with PA6[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2009, 48(11): 1 153–1 157.
- [19] ZHEN J M, ZHEN C C, YUAN M, et al. Significant sliding speed effect on the friction and wear behavior of UHMWPE matrix composites[J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2024, 76(6): 804–811.
- [20] YERUBANDI V R M, KAMBAGOWNI V S, AYYAGARI J K P, et al. Comparative study on dry and wet wear characteristics of ultra-high molecular weight polyethylene composites reinforced with direct precipitated nano zinc oxide[J]. *Annales De Chimie-Science Des Matériaux*, 2024, 48(1):63–72.
- [21] SINHA S K, HATANO N, HIRAYAMA T. Tribological studies of hybrid composites of epoxy with solid (UHMWPE) and liquid (squalane) lubricant fillers[J]. *Tribology Online*, 2023, 18(7): 469–481.
- [22] XU B, YIN B F, LI Q Z, et al. Tribological performance of self-lubricating polyurethane elastomer compounding with the modified ultra-high molecular weight polyethylene[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2021, 61(7):2 033–2 042.
- [23] JIN Y L, SHEN W R, YI J, et al. Significant tribological enhancement and mechanical property maintenance in polyether ether ketone (PEEK) matrix composites with minimal ultra-high-molecular-weight polyethylene(PE-UHMW)[J]. *Tribology Transactions*, 2024, 67(6):1 195–1 207.
- [24] KERESZTES R, ODROBINA M, NAGARAJAN R, et al. Tribological characteristics of cast polyamide 6(PA6G) matrix and their composite (PA6G SL) under normal and overload conditions using dynamic pin-on-plate system[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160:119–130.
- [25] WANG H G, JIAN L Q, PAN B L, et al. Mechanical and tribological behaviors of polyamide 66/ultra high molecular weight polyethylene blends[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2007, 47(5): 738–744.
- [26] 郑星莹, 连雨欣, 孙晓丽. 高强耐磨纤维用PA6/PA1010复合材料的制备及摩擦磨损性能研究[J]. *福建轻纺*, 2024(5):38–42.
- ZHENG Xingying, LIAN Yuxin, SUN Xiaoli. Preparation and friction properties of PA6/PA1010 composites for high strength wear-resistant fibers[J]. *The Light & Textile Industries of Fujian*, 2024(5):38–42.
- [27] 刘晨璐, 席宇阳, 任威, 等. HGM/GF/PA66/PPS 四元复合材料性能研究[J]. *中国塑料*, 2024, 38(12):43–47.
- LIU Chenjun, XI Yuyang, REN Wei, et al. Study on performance of PPS/PA66/GF/HGM quaternary composites[J]. *China Plastics*, 2024, 38(12):43–47.
- [28] 游一兰, 李笃信, 刘士军, 等. PTFE/MoS₂改性PA6/TiO₂的力学和摩擦磨损性能[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(8):77–79.
- YOU Yilan, LI Duxin, LIU Shijun, et al. Mechanical and tribological properties of PTFE/MoS₂ modified PA6/TiO₂ composite[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(8):77–79.
- [29] 张永. PA66/PTFE 复合材料摩擦性能研究[J]. *上海塑料*, 2022, 50(2):31–35.
- ZHANG Yong. Study on friction properties of PA66/PTFE composites[J]. *Shanghai Plastics*, 2022, 50(2):31–35.
- [30] TAHA M A, DELAGE K, CASTÉLAN F, et al. Functionalization of polyolefins with maleic anhydride by flash reactive extrusion: processing and applications[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, 63(14):6 446–6 458.