

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.09.007

耐磨改性 PA1012 复合材料制备及性能

李声耀¹, 赵志¹, 刘成骏², 张英伟¹, 胡天辉¹

(1. 株洲时代工程塑料科技有限责任公司, 湖南株洲 412007; 2. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 为了获得具有低吸水率、良好摩擦性能和力学性能的聚酰胺 (PA) 材料, 以聚四氟乙烯 (PTFE) 为固体润滑剂, 制备了不同 PTFE 含量的 PA1012 复合材料, 并进一步在固定 PTFE 质量分数为 10% 条件下, 添加短切玻纤 (GF) 以尝试提高复合材料的力学性能。对复合材料的摩擦磨损性能、压缩等力学性能、吸水率和线膨胀系数进行了表征。结果表明, 当添加 PTFE 的质量分数 $\geq 10\%$ 时, 复合材料的摩擦系数和磨损率显著降低。短切 GF 的添加使复合材料的多项力学性能大幅提高, 但添加质量分数达 20% 时, 复合材料的摩擦系数和磨损率明显上升。PTFE 和短切 GF 的添加降低了复合材料的吸水率和线膨胀系数。当 PA1012, PTFE 和短切 GF 质量比为 75 : 10 : 15 时, 复合材料的综合性能最佳。

关键词: 聚酰胺 1012; 耐磨改性; 力学性能; 吸水率; 线膨胀系数

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)09-0039-06

Preparation and Properties of Wear Resistant Modified PA1012 Composites

Li Shengyao¹, Zhao Zhi¹, Liu Chengjun², Zhang Yingwei¹, Hu Tianhui¹

(1. Zhuzhou Times Engineering Plastics Industrial Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract : To obtain polyamide (PA) materials with low water absorption, good friction and mechanical properties, PA1012 composites with different poly tetrafluoroethylene (PTFE) content were prepared by using PTFE as a solid lubricant. Then chopped glass fiber (GF) was used to improve the mechanical properties of the composites when the mass fraction of PTFE is fixed at 10%. The tribological properties, mechanical properties including compression properties and so on, water absorption, linear expansion coefficient of the composites were characterized. The results show that when the mass fraction of PTFE is more than 10%, the friction coefficient and wear rate of the composites decrease significantly. Most mechanical properties of the composite are improved greatly with the addition of chopped GF, but the friction coefficient and wear rate of the composite increase obviously with the mass fraction of chopped GF reaches 20%. The addition of PTFE and chopped GF reduces the water absorption and linear expansion coefficient of the composite. When the mass ratio of PA1012, PTFE and chopped GF is 75 : 10 : 15, the composite has the best comprehensive property.

Keywords : polyamide 1012; wear resistant modification; mechanical property; water absorption; linear expansion coefficient

水润滑轴承是一种以水为润滑介质的轴承, 由于其具备无污染、散热快等优点, 在各类舰船中得到了广泛应用。早期的水润滑轴承以天然的铁梨木作为材料, 随着耐磨材料技术的不断进步, 多种耐磨高分子复合材料成为水润滑轴承更合适的选择。如超高分子量聚乙烯 / 丁腈橡胶复合材料、聚氨酯复合

材料、酚醛树脂 / 纤维复合材料、环氧树脂 / 纤维复合材料、改性聚酰胺 (PA) 材料等^[1-4]。其中 PA 材料因其亲水性好、摩擦系数稳定等特性使轴承在水润滑条件下具备更小的震动和更平稳的运行性。但相比其它热固性材料, PA 吸水率较高、尺寸稳定性一般, 不利于轴承和轴的长期精密配合; 另外, PA 材

通信作者: 李声耀, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为工程塑料改性及工程塑料制品设计

收稿日期: 2022-07-11

引用格式: 李声耀, 赵志, 刘成骏, 等. 耐磨改性 PA1012 复合材料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(9):39-44.

Li Shengyao, Zhao Zhi, Liu Chengjun, et al. Preparation and properties of wear resistant modified PA1012 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(9):39-44.

料的压缩强度一般,承载能力不及热固性材料。因此,PA材料在水润滑轴承中的应用还十分有限。

在PA材料中,长碳链PA因其酰胺键密度较低而具备更低的吸水率和更好的尺寸稳定性。过去,商品化的长碳链PA主要为PA11, PA12等,为国外垄断的材料,因此对PA材料耐磨改性的相关研究主要集中在单体浇注PA(MCPA)^[5], PA6^[6-7]或PA66^[8-10]等常见PA材料中,且对材料的尺寸稳定性和压缩性能表征鲜有提及。近年来以长链二元酸、胺为原料的PA逐步实现国产化, PA1012就是一种从原料到聚合物都实现国内自主生产的长碳链PA材料。笔者以PA1012为基体树脂,使用聚四氟乙烯(PTFE)为固体润滑剂,制备了一系列不同PTFE添加量的耐磨改性PA1012复合材料,并进一步添加短切玻纤(GF)以改善复合材料力学性能。通过摩擦磨损性能、线膨胀系数、压缩强度等测试表征了耐磨改性PA1012复合材料的性能,为长碳链PA材料作为水润滑耐磨材料的可行性提供数据参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA1012树脂: B150, 山东广垠新材料有限公司;
PA6树脂: YH2400, 中石化巴陵石油化工有限公司;

PTFE粉末: L-5, 大金氟化工(中国)有限公司;
短切GF: 直径13 μm, 泰安浩松纤维有限公司。

1.2 主要设备与仪器

双螺杆挤出机: SHJ-35型, 南京富亚橡塑机械制造有限公司;

注塑机: MA1200型, 海天塑机集团有限公司;
微机控制电子试验机: Zwick Z020型, 德国Zwick Roell公司;

塑料摆锤冲击试验机: 501J型, 深圳万测试验设备有限公司;

动态粘弹谱仪: GABO EPLEXOR 500N型, 德国耐驰公司;

摩擦磨损试验机: MMS-2A型, 济南思达测试技术有限公司;

显微镜: SVM2515型, 长沙双鑫测量技术有限公司。

1.3 样品制备

将原材料按表1配方称量混合均匀后, 通过主喂料口加入双螺杆挤出机共混造粒, 挤出机从一区

至机头的温度分别为210, 215, 210, 220, 220, 225, 225, 230, 240℃, 主机转速为250 r/min。

表1 耐磨改性PA1012复合材料配方 %

试样编号	PA1012	PTFE 粉末	短切 GF
1 [#]	100	0	0
2 [#]	95	5	0
3 [#]	90	10	0
4 [#]	85	15	0
5 [#]	80	20	0
6 [#]	85	10	5
7 [#]	80	10	10
8 [#]	75	10	15
9 [#]	70	10	20

1[#]~5[#]试样为PA1012和PTFE共混材料, PTFE添加量依次提高。6[#]~9[#]试样是在3[#]试样的基础上添加短切GF, 其添加量依次提高。另外, 为了对比长碳链PA与普通PA的吸水率和线膨胀系数, 还制备了10[#]试样和11[#]试样, 其中, 10[#]试样是纯PA6树脂, 11[#]试样是将8[#]试样中的PA1012替换为PA6, 固体润滑剂PTFE和短切GF添加量一致。

共混后的塑料粒子在120℃下干燥4 h, 使用注塑机注射成型各测试所需样条, 1[#]~9[#]试样的进料段、压缩段、计量段及喷嘴温度依次为180, 185, 190, 200℃, 10[#], 11[#]试样进料段、压缩段、计量段及喷嘴温度依次为215, 220, 225, 235℃。注射压力为5.5 MPa、保压压力为4.5 MPa, 模具无油温控制。

1.4 性能测试

摩擦磨损性能按照GB/T 3960-2016测试, 样条尺寸为6 mm×7 mm×30 mm, 测试负荷为196 N, 转速为200 r/min, 取3次测试结果的平均值。其中, 按照GB/T 3960-2016得出的材料磨损结果为质量磨损, 由于各试样材料密度不同, 选择以磨损率对比材料的磨损情况, 所述磨损率的计算方法是材料的质量磨损除以摩擦样条的初始质量。

线膨胀系数按照ISO 11359-2: 1999测试, 样条尺寸为10 mm×10 mm×10 mm, 测试温度为0~80℃, 取3次测试结果的平均值。

吸水率按照GB/T 1034-2008测试, 样条尺寸为60 mm×60 mm×2 mm, 测试温度为23℃, 时间为72 h, 取3次测试结果的平均值。

压缩性能按照GB/T 1041-2008测试, 样条尺寸为10 mm×10 mm×4 mm, 压缩速率为1 mm/min, 取5次测试结果的平均值。

拉伸性能按照GB/T 1040.2-2006测试, 哑铃型样条, 拉伸速率为50 mm/min, 取5次测试结果的平均值。

弯曲性能按照 GB/T 9341-2008 测试,样条尺寸为 $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,弯曲速率为 2 mm/min ,取 5 次测试结果的平均值。

简支梁无缺口、缺口冲击强度按照 GB/T 1043-2008 测试,样条尺寸为 $80\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,摆锤能量为 7.5 J ,取 5 次测试结果的平均值。

2 结果与讨论

2.1 PTFE 改性 PA1012 复合材料的摩擦磨损性能及力学性能

(1) 摩擦磨损性能。

不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料 ($1^{\#} \sim 5^{\#}$ 试样) 的摩擦磨损性能如图 1 所示。

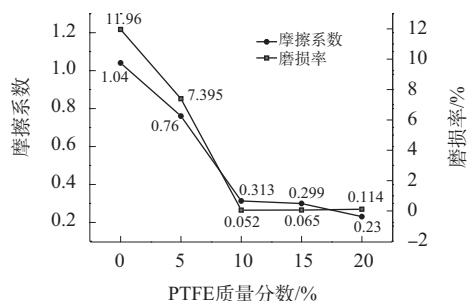
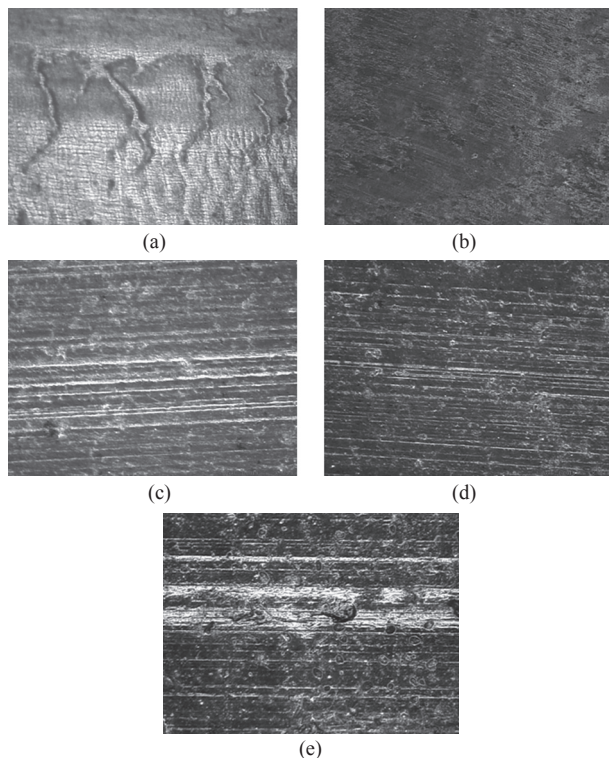


图 1 不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料的摩擦磨损性能

由图 1 可知,随着 PTFE 添加量的增加,PTFE 改性 PA1012 复合材料的摩擦系数和磨损率整体呈下降趋势。当添加 PTFE 质量分数为 0% 和 5% 时,PTFE 改性 PA1012 复合材料 ($1^{\#}, 2^{\#}$ 试样) 的摩擦系数较高,同时磨损率高出添加 PTFE 质量分数为 10%~20% 的复合材料 ($3^{\#} \sim 5^{\#}$ 试样) 约两个数量级。这主要是因为 PA1012 的熔点较低,当固体润滑剂 PTFE 添加较少时,复合材料与对磨钢环以粘着磨损为主,而摩擦生热不断积累使材料软化变黏,进一步增加复合材料的摩擦系数,最终使复合材料熔融而快速磨损。

不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料 ($1^{\#} \sim 5^{\#}$ 试样) 经过摩擦试验后表面形貌的显微镜照片如图 2 所示。

由图 2 可以看出,磨损率较大的 PTFE 改性 PA1012 复合材料 ($1^{\#}, 2^{\#}$ 试样) 表面存在熔融状态下被对磨钢环剪切的痕迹。而磨损率较小的复合材料 ($3^{\#} \sim 5^{\#}$ 试样) 在表面有典型的犁沟效应产生的沟槽、凹坑,反映了复合材料在摩擦时以磨粒磨损为主^[11-13]。当添加 PTFE 质量分数在 10%~20% 之间时,虽然复合材料的摩擦系数进一步降低,但磨损率却不断增加。这是由于 PTFE 在材料摩擦过程中以形成转移膜的形式降低材料的摩擦系数,而 PTFE



a— $1^{\#}$; b— $2^{\#}$; c— $3^{\#}$; d— $4^{\#}$; e— $5^{\#}$

图 2 不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料摩擦后表面形貌的显微镜照片

自身的表面能较低,容易在摩擦过程中被对磨物带走,随着 PTFE 含量增加,被带走的 PTFE 增加,导致磨损率反而增大。

(2) 压缩性能。

压缩性能是判断材料承载能力的指标之一,不同 PTFE 添加量的 PA1012 复合材料 ($1^{\#} \sim 5^{\#}$ 试样) 的压缩性能如图 3 所示。

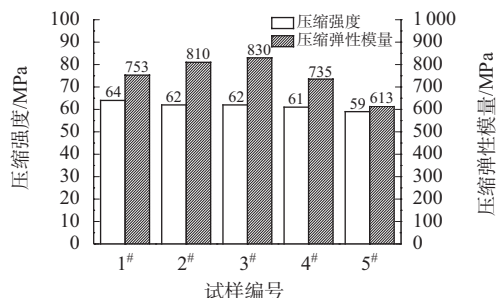


图 3 不同 PTFE 添加量 PA102 复合材料的压缩性能

由图 3 可以发现,不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料的压缩强度没有显著变化,都在 $59 \sim 65\text{ MPa}$ 范围内,且纯 PA1012 树脂 ($1^{\#}$ 试样) 的压缩强度最高。这是因为 PTFE 作为固体润滑剂以微小颗粒分散在 PA1012 基体中,而 PTFE 材料通常需要高温高压下烧结为连续相结构才能表现出力学强度,因此随着 PTFE 添加量提升,复合材料的压缩强

度整体是下降的。随着 PTFE 添加量的增加,复合材料的压缩弹性模量有一定提升,但添加质量分数超过 10% 后,压缩弹性模量又开始下降,压缩弹性模量的范围在 600~850 MPa 之间。不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料的压缩强度和压缩弹性模量相比热固性轴承材料有较大差距。

(3) 其它力学性能。

作为轴承材料,除了摩擦磨损性能和承载能力外,还需要保证其它常规力学性能要求。不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料 (1[#]~5[#] 试样) 的拉伸、弯曲及冲击性能见表 2。

表 2 不同 PTFE 添加量 PA1012 复合材料的拉伸、弯曲及冲击性能

项目	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
拉伸强度 /MPa	51.1	41.5	38.2	37.5	35.8
拉伸弹性模量 /MPa	1 238	1 247	1 281	1 282	1 284
断裂伸长率 /%	278	231	222	73.3	91.5
弯曲强度 /MPa	42.7	44.3	42.7	43.9	42.8
弯曲弹性模量 /MPa	992	1 000	1 019	1 071	1 073
简支梁缺口冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	17.1	11.8	11.3	8.5	9.2
简支梁无缺口冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	未冲断	未冲断	未冲断	未冲断	未冲断

由表 2 可知,随着 PTFE 添加量的增加,PTFE 改性 PA1012 复合材料的拉伸强度、断裂伸长率和简支梁缺口冲击强度整体呈下降趋势,但拉伸弹性模量、弯曲强度和弯曲弹性模量没有显著变化,试样无缺口时由于未冲断,无法得到其冲击强度数据。

综上所述,当添加 PTFE 的质量分数 $\geq 10\%$ 时,PTFE 改性 PA1012 复合材料的摩擦系数和磨损率得到显著改善,继续增加 PTFE 用量,复合材料的摩擦系数进一步降低,同时压缩弹性模量、拉伸强度也会进一步降低,综合性能变差。其中,综合性能较好的 3[#] 试样的压缩强度和压缩弹性模量依然较低,还需进一步改性增强。

2.2 PTFE/短切 GF 改性 PA1012 复合材料的摩擦磨损性能及力学性能

(1) 摩擦磨损性能。

3[#], 6[#]~9[#] 试样为固定添加 PTFE 质量分数 10%、短切 GF 添加量依次提高的 PA1012 复合材料,其摩擦系数和磨损率如图 4 所示。

由图 4 可以看出,随着短切 GF 添加量的增加,PTFE/短切 GF 改性 PA1012 复合材料的摩擦系数小幅下降,但当短切 GF 质量分数大于 10% 时,其又开始上升,特别是短切 GF 质量分数从 15% 提高至 20% 时,复合材料的摩擦系数大幅提高,同时磨损率也大幅增加。这可能是由于短切 GF 添加量

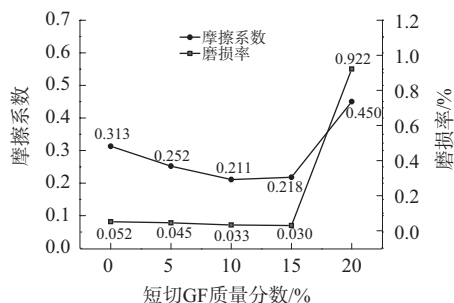


图 4 添加 PTFE 质量分数 10% 时不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的摩擦和磨损性能

较低时,短切 GF 降低了摩擦过程中材料与对磨钢环的实际接触面积,使摩擦系数下降^[14]。而当短切 GF 添加量达到一定值后,基体树脂 PA1012 对短切 GF 的包裹能力不足,短切 GF 容易在摩擦中折断并在摩擦处积累,使摩擦系数和磨损率提高。

添加 PTFE 质量分数 10% 时,不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的表面形貌的显微镜照片如图 5 所示。

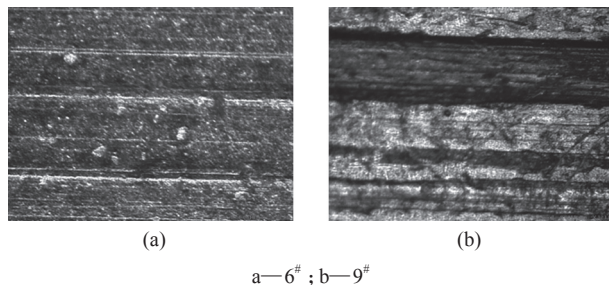


图 5 添加 PTFE 质量分数 10% 时不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的表面形貌的显微镜照片

对比图 5a 与图 5b 可以发现,添加短切 GF 质量分数 20% 的 9[#] 试样表面出现了宽度较大的沟痕,与一般的固体润滑剂在材料表面形成的沟痕不同,这是硬度和尺寸都较大的短切 GF 碎屑对材料表面不断刮擦导致的。

(2) 压缩性能。

添加 PTFE 质量分数 10% 时,不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的压缩性能如图 6 所示。

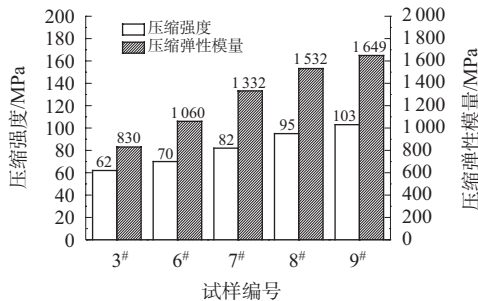


图 6 添加 PTFE 质量分数 10% 时不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的压缩性能

由图 6 可以看出,随着短切 GF 添加量的提高,PTFE/短切 GF 改性 PA1012 复合材料的压缩强度和压缩弹性模量都显著提高,当添加短切 GF 质量分数达到 15% 时,相比只添加 PTFE 的 3[#] 试样,压缩强度和压缩弹性模量分别提升 53% 和 85%。相比微颗粒状态的 PTFE,短切 GF 与 PA1012 有更强的结合力,在材料被压缩时,能有效抵抗材料在与被压方向垂直方向的变形趋势,最终表现为压缩性能提高。

(3) 其它力学性能。

添加 PTFE 质量分数 10% 时,不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的拉伸、弯曲及冲击性能见表 3。

表 3 添加 PTFE 质量分数 10% 时不同短切 GF 添加量 PA1012 复合材料的拉伸、弯曲及冲击性能

项目	3 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]
拉伸强度 /MPa	38.2	50.5	65.3	107	120
拉伸弹性模量 /MPa	1 281	1 882	3 231	5 513	8 016
断裂伸长率 /%	222	73.1	21.5	5.6	3.2
弯曲强度 /MPa	42.7	48.6	60.5	135	151
弯曲弹性模量 /MPa	1 019	1 594	2 088	3 223	4 583
简支梁缺口冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	11.3	6.1	6.9	9.1	9.8
简支梁无缺口冲击强度 /(kJ·m ⁻²)	未冲断	59.6	69.8	未冲断	未冲断

由表 3 可以看出,随着短切 GF 添加量的提高,PTFE/短切 GF 改性 PA1012 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及弯曲性能显著提高,但断裂伸长率降低,而简支梁缺口冲击强度呈现先降低后增加的趋势。这是由于短切 GF 含量较低时,短切 GF 的增强效果不明显,不足以抵消其带来的应力集中,因此简支梁缺口冲击强度反而降低。试样无缺口时,3[#], 8[#], 9[#] 试样由于未冲断,无法得到其冲击强度数据,6[#], 7[#] 试样的简支梁无缺口冲击强度分别为 59.6, 69.8 kJ/m²。

综上所述,添加 PTFE 质量分数 10% 时,随着短切 GF 添加量的提高,PTFE/短切 GF 改性 PA1012 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、压缩及弯曲性能显著提高,但材料的简支梁缺口冲击强度呈现先降低后增加的趋势;当添加短切 GF 质量分数由 15% 提高到 20% 时,复合材料的摩擦系数和磨损率都得到显著提升。

2.3 复合材料的吸水率及线膨胀系数

尺寸稳定性也是水润滑使用工况十分重要的指标。不同填料含量的 PA1012 和 PA6 复合材料(1[#], 3[#], 5[#], 8[#], 10[#], 11[#] 试样)的吸水率及线膨胀系数

见表 4。

表 4 不同填料含量的 PA1012 和 PA6 复合材料的

试样编号	吸水率 /%	吸水率及线膨胀系数	
		线膨胀系数 /K ⁻¹	
		0 ~ 40℃	40 ~ 80℃
1 [#]	0.44	164.1 × 10 ⁻⁶	197.7 × 10 ⁻⁶
3 [#]	0.36	177.4 × 10 ⁻⁶	238.8 × 10 ⁻⁶
5 [#]	0.31	190.4 × 10 ⁻⁶	247.2 × 10 ⁻⁶
8 [#]	0.29	95.1 × 10 ⁻⁶	101.4 × 10 ⁻⁶
10 [#]	2.58	139.8 × 10 ⁻⁶	187.1 × 10 ⁻⁶
11 [#]	1.36	89.5 × 10 ⁻⁶	97.2 × 10 ⁻⁶

由表 4 可以看出,纯 PA1012 树脂(1[#] 试样)的吸水率显著低于纯 PA6 树脂(10[#] 试样),因为 PA 分子链上酰胺键与水的氢键作用是其具有吸水性的主要原因^[15],而 PA1012 的酰胺键密度远低于 PA6,因此吸水率存在明显差异。当复合材料中 PTFE 的添加量增加时,由于 PTFE 亲水性很低,复合材料的吸水率逐渐下降。对比 3[#] 和 8[#] 试样可知,增加短切 GF 也会进一步降低复合材料的吸水率。但如果以 PA6 为基体树脂,经过质量分数 10% 的 PTFE 及 15% 的短切 GF 共同改性,复合材料(11[#] 试样)的吸水率依然较高。

由表 4 还可以看出,纯 PA1012 树脂(1[#] 试样)的线膨胀系数在 0 ~ 40℃ 和 40 ~ 80℃ 两个温度段都高于纯 PA6 树脂(10[#] 试样)。因为 PA1012 的酰胺键密度低于 PA6,进一步导致 PA1012 分子链之间的氢键作用和结晶度都较低,在受热时分子链运动更不受约束,线膨胀系数增大。而 PTFE 自身的线膨胀系数较大,且会破坏基体树脂的规整性,因此随着 PTFE 添加量的增加,复合材料的线膨胀系数进一步增大。短切 GF 有利于束缚材料受热时的分子运动,可以有效降低复合材料的线膨胀系数^[16]。对比相同短切 GF 和 PTFE 添加量的 8[#], 11[#] 试样可知,其线膨胀系数差距已经很小。

3 结论

(1) 纯 PA1012 的耐磨性差,在摩擦过程中因热量累积熔融磨损严重,添加固体润滑剂 PTFE 的质量分数 ≥ 10% 时,复合材料的摩擦系数和磨损率显著降低,摩擦以磨粒磨损为主,进一步提高 PTFE 的用量,复合材料的摩擦系数降低,但磨损率增加。

(2) 固体润滑剂 PTFE 的添加对 PA1012 的压缩强度影响很小,但添加 PTFE 质量分数大于 10% 后,复合材料的压缩弹性模量下降明显,拉伸强度、断裂伸长率和简支梁缺口冲击强度随着 PTFE 的添加量增加整体呈下降趋势。

(3) 固定添加 PTFE 的质量分数为 10%, 添加短切 GF 增强复合材料, 材料的压缩性能、拉伸强度、拉伸弹性模量及弯曲性能都显著提高, 而简支梁缺口冲击强度呈现先降低后增加的趋势, 当添加短切 GF 质量分数从 15% 提高至 20% 时, 复合材料的摩擦系数和磨损率都显著升高。

(4) 纯 PA1012 树脂的吸水率显著低于纯 PA6 树脂, PTFE 和短切 GF 的添加可以进一步降低复合材料的吸水率; 在 0 ~ 40℃ 和 40 ~ 80℃ 两个温度段, 纯 PA1012 树脂的线膨胀系数都大于纯 PA6 树脂, PTFE 的添加使复合材料的线膨胀系数增大, 短切 GF 的添加使材料的线膨胀系数减小。

(5) 综合摩擦磨损性能、力学性能、吸水率和线膨胀系数, 当 PA1012, PTFE 与短切 GF 质量比为 75 : 10 : 15 时, 复合材料的综合性能较好, 可作为水润滑耐磨材料使用。

参考文献

- [1] 王玉玺, 杨辉. 水润滑轴承技术进展 [J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(4): 67-71.
Wang Yuxi, Yang Hui. Research progress of water-lubricated bearings [J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(4): 67-71.
- [2] 段海涛, 王学美, 吴伊敏, 等. 水润滑轴承研究进展 [J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 109-116.
Duan Haitao, Wang Xuemei, Wu Yimin, et al. Present research status of water lubricated bearings [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9): 109-116.
- [3] Wu Kepeng, Zhou Guangwu, Mi Xiongwei, et al. Tribological and vibration properties of three different polymer materials for water-lubricated bearings [J]. Materials, 2020, 13(14). DOI:10.3390/ma13143154.
- [4] Yu Ping, Li Guitao, Zhang Ligang, et al. Regulating microstructures of interpenetrating polyurethane-epoxy networks towards high-performance water-lubricated bearing materials [J]. Tribology International, 2019, 131: 454-464.
- [5] 郑梯和, 谭玉宝, 胡天辉. MC 尼龙 /PTFE 复合材料的制备与性能研究 [J]. 现代塑料加工应用, 2021, 33(4): 23-25.
Zheng Tihe, Tan Yubao, Hu Tianhui. Preparation and properties of MC nylon/PTFE composites [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2021, 33(4): 23-25.
- [6] 游一兰, 李笃信, 刘士军, 等. 石墨 / 聚四氟乙烯 / 玻璃纤维改性 PA6 的力学和摩擦磨损性能 [J]. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(8): 85-89, 95.
You Yilan, Li Duxin, Liu Shijun, et al. Tribological and mechanical properties of graphite/polytetrafluoroethylene/glass fiber filled polyamide 6 composite [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2017, 33(8): 85-89, 95.
- [7] Luo M, Huang S Y, Man Z Y, et al. Tribological behaviour of fused deposition modelling printed short carbon fibre reinforced nylon composites with surface textures under dry and water lubricated conditions [J]. Friction, 2022. DOI:10.1007/s40544-021-0574-5.
- [8] 杨海洋, 陆逢, 王全兵, 等. 固体润滑剂对玻纤 PA66 复合材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 塑料工业, 2016, 44(10): 100-103.
Yang Haiyang, Lu Feng, Wang Quanbing, et al. Friction and wear properties of PA66 composites filled with different solid lubricants [J]. China Plastics Industry, 2016, 44(10): 100-103.
- [9] Gebretsadik D W, Hardell J, Prakash B. Friction and wear characteristics of PA66 polymer composite/316L stainless steel tribopair in aqueous solution with different salt levels [J]. Tribology International, 2020, 141. DOI:10.1016/j.triboint.2019.105917.
- [10] Sun Haoyang, Li Tao, Lei Fan, et al. Graphite fluoride and fluorographene as a new class of solid lubricant additives for high-performance polyamide 66 composites with excellent mechanical and tribological properties [J]. Polymer International, 2020, 69(5): 457-466.
- [11] 刘玉坤, 王帅, 刘浩, 等. 硅灰石填充尼龙 1010 复合材料摩擦磨损性能 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(1): 5-8.
Liu Yukun, Wang Shuai, Liu Hao, et al. Tribological properties of nylon1010/wollastonite composites [J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1): 5-8.
- [12] Morino M, Kajiyama T, Nishitani Y. Influence of epoxy resin treatment on the mechanical and tribological properties of hemp-fiber-reinforced plant-derived polyamide 1010 biomass composites [J]. Molecules, 2021, 26(5). DOI:10.3390/molecules26051228.
- [13] Wang Shibao. Tribological properties of nylon 1010 composites filled with zinc oxide whisker in rolling friction with traction [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2012, 46(3). DOI:10.1108/00368791211218696.
- [14] 顾金萍. 短玻璃纤维增强 MC 尼龙复合材料力学性能的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
Gu Jinping. Study on mechanical properties of short glass fiber reinforced MC nylon composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [15] 张英伟, 葛冬冬, 李声耀, 等. 低吸水共聚聚酰胺树脂的制备及性能表征 [J]. 塑料工业, 2021, 49(8): 162-166.
Zhang Yingwei, Ge Dongdong, Li Shengyao, et al. Preparation and characterization of low water absorbent copolyamide resin [J]. China Plastics Industry, 2021, 49(8): 162-166.
- [16] 杨俊, 何创创, 罗小芳. 短切玻纤含量对 TiO₂/PTFE 复合材料性能的影响 [J]. 材料导报, 2021, 35(Z2): 570-572, 582.
Yang Jun, He Chuangchuang, Luo Xiaofang. Effect of chopped glass fiber on the properties of TiO₂/PTFE composites [J]. Materials Reports, 2021, 35(Z2): 570-572, 582.