http://pmse.scu.edu.cn

六钛酸钾晶须对玄武岩纤维/聚酰亚胺复合材料摩擦磨损性能的影响

刘 明[1], 李 轩[1], 周德东[1], 蒋 杰[2], 王朝健[3], 杨远鹏[1], 邓 瑞[1], 林小薇[1]
刘志章[1], 张续译[1]

(1. 四川轻化工大学 机械工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 宜宾市恒美科技有限公司, 四川 宜宾 643000;
3. 泸州市智能机电控制工程技术研究中心, 四川 泸州 646199)

摘要: 采用热模压方法制备了六钛酸钾晶须(PTW)和氧化石墨烯改性玄武岩纤维(GBF)混杂改性的聚酰亚胺复合材料(PTW-GBF/PI),研究了 PTW 含量对复合材料显微结构、力学性能、耐热性能和摩擦磨损性能的影响。随 PTW 含量增加,复合材料的硬度上升,压缩强度和弯曲强度呈先增加后降低的趋势;其中,PTW 质量分数为 6% 时,PTW-GBF/PI 复合材料的压缩强度和弯曲强度均达到最大值,分别为 236.62 MPa 和 217.34 MPa,较 GBF/PI 复合材料分别提高约 14.8%和 36.6%,表明 PTW 质量分数在 6%时实现了最佳的协同增强效果,其在基体中的桥联、应力传递有效提升了界面结合与能量耗散能力,与 GBF 起到了良好的协同增强效果。摩擦磨损实验结果表明,适量 PTW 的引入显著改善了复合材料的摩擦性能,当 PTW 质量分数为 6%时,复合材料在 5 N,10 和 15 N 载荷下均具有最低的平均摩擦系数(0.506,0.323 和 0.291)和磨损率(6.75×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$,6.04×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$和 4.82×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$)。GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料的磨损均以疲劳磨损和犁削磨损为主,伴随有黏着磨损和磨粒磨损;适量添加 PTW(6%)对疲劳磨损、犁削磨损和黏着磨损具有显著抑制作用,但质量分数过高(9%)会因晶须团聚导致疲劳磨损加剧。

关键词: 聚酰亚胺;玄武岩纤维;六钛酸钾晶须;摩擦磨损;强度
中图分类号: TB332 **文献识别码:** A **文章编号:** 1000-7555(2025)12-0095-11

聚酰亚胺(PI)树脂具有轻质、高强、耐高低温、低介电、阻燃及优良的综合力学性能,在高性能摩擦材料中拥有广阔的应用前景[1,2]。但是纯 PI 的脆性高、弯曲和压缩强度不足[3]。通过在 PI 树脂中添加各种纤维作为增强体制成纤维/PI 复合材料,利用纤维的增强增韧和载荷支撑作用,是提高其力学性能和摩擦学性能的有效途径[4]。

研究人员针对纤维/PI 复合材料开展了大量研究,所用纤维包括碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维、矿物纤维、混合纤维及各种晶须等,研究内容涵盖纤维种类优选、纤维表面活化与改性、多组分复合材料的界面结构调控等多个方面[5-8]。其中,纤维与树脂基体的界面结合强度直接决定了载荷传递效率和抗分层、剥离的能力,结合过强会导致纤维断裂无法吸收

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2025.0183
收稿日期: 2025-04-01
基金项目: 四川省科技计划项目(2023YFG0239); 宜宾市科技计划重点研发项目(2024GY001); 四川轻化工大学科研创新团队计划项目(H92322); 泸州市智能机电控制工程技术研究中心开放课题(ZNJDKT25-01); 四川轻化工大学研究生基金项目(Y2024016); 2024 年四川轻化工大学大学生创新创业项目(CX2023072)
通讯联系人: 李轩, 主要从事材料成型及表面改性技术研究, E-mail: biluaner@163.com

能量,结合过弱则使得纤维易被拔出成为磨屑。玄武岩纤维(BF)是一种矿物纤维,具有轻质、高强、耐高低温且耐腐蚀性优良等特性,被称为 21 世纪无污染的绿色材料,也是当前我国重点发展的四大高性能纤维之一[9,10]。BF 的综合力学性能和制备成本与玻璃纤维(GF)相近,但耐腐蚀性和环保性更优,是极具潜力的 GF 替代性纤维[10~14]。不足的是,BF 表面光滑且化学惰性高,导致其与树脂基体的界面结合强度不足。为改善 BF 与树脂基体的结合强度,研究人员通过物理改性如等离子体刻蚀、化学改性如偶联剂活化或酸碱刻蚀、纳米粒子如 SiO_2、Co_3O_4 改性等多种方法对 BF 进行表面改性,相关研究取得了良好进展[15~18]。笔者团队前期研究表明,KH550 硅烷偶联剂改性的 BF(KBF)表面活性明显提升,与 BF/PI 相比,KBF/PI 的三点弯曲强度提高 17.1%,摩擦性能也显著提升,机制在于 KH550 的羟基活性基团与 BF 表面活性基团反应生成的“Si—O”键,显著增强了 BF 与 PI 树脂的结合强度[17];在 KH550 表面活化的基础上,通过静电自组装方法制备氧化石墨烯(GO)改性的 BF(GBF),能够进一步提升该纤维与 PI 树脂的结合强度和耐磨性能[18]。目前,GBF 与 PI 树脂间的界面相容性与工艺稳定性尚未完全解决,纤维与树脂界面区域易产生微裂纹,再加上聚酰亚胺的熔体黏度大、加工窗口窄等不利因素的影响,限制了 BF/PI 复合材料的实际应用[19,20]。因此,需要通过引入协同增强相,建立多尺度强化体系,进一步改善 GBF/PI 复合材料的界面结合、热稳定性与抗磨耗性能。

通过纤维与晶须对 PI 树脂进行混合改性,利用纤维承担宏观载荷,晶须抑制微裂纹扩展,可实现宏观和微观层面的协同增强增韧[21]。六钛酸钾晶须(PTW)是一种微米级短针状无机晶须,具有熔点高、弹性模量大、化学稳定性高、绿色无污染等优点,并且在有机聚合物中分散性及相容性良好,是改善聚合物摩擦性能的重要增强材料,但目前少见 PTW 改性 PI 复合材料的相关研究[22,23]。本文在笔者团队前期 GBF/PI 复合材料相关研究的基础上[17,18],引入 PTW 作为协同增强相,制备了 PTW 和 GBF 协同改性的聚酰亚胺复合材料(PTW-GBF/PI),研究了 PTW 含量对其力学性能、耐热性能影响及摩擦磨损性能的影响,讨论了复合材料的摩擦磨损机制,旨在进一步拓展聚酰亚胺复合材料的工程应用。

1 实验部分

1.1 原料与仪器

热塑性聚酰亚胺(PI):YS20,粉末,800 目,东莞市安特塑胶原料有限公司;短切玄武岩纤维(BF):长 3~6 mm,海宁安捷复合材料有限责任公司;六钛酸钾晶须:直径 0.1~0.6 μm,长度 5~20 μm,秦皇岛一诺高新材料开发有限公司;去离子水:实验室自制。

高温机械加压硫化机:QLLHY-50T 型,厦门莱斯德科学仪器有限公司;维氏显微硬度仪:HVS-1000 型,深圳市浩鑫达仪器有限公司;高低温拉力机:YL-1161 型,广东越联仪器有限公司;电化学腐蚀摩擦磨损试验仪:MFTEC-4000 型,兰州华汇仪器科技有限公司;粗糙度测试仪:MitutoyoSJ-410 型,上海准权仪器设备有限公司;扫描电子显微镜(SEM/EDS):VEGA3SUB 型,捷克 TESCAN 公司;超景深显微 3D 工作站:LY-WN-YH1000 型,成都励扬精密机电有限公司;热重分析仪:TG209F3 型,德国耐驰公司。

1.2 实验过程

采用静电自组装法制备氧化石墨烯改性的玄武岩纤维(GBF),具体制备过程参见笔者团队前期研究[18];此外,当 GBF 的质量分数为 15% 时,GBF/PI 复合材料的断裂韧性和摩擦磨损性能具有最优值,因此,本文固定 GBF 的质量分数为 15%[18]。通过干混→热压成型→热处理工序制备了 PTW 质量分数分别为 0%,3%,6% 和 9% 的 PTW-GBF/PI 复合材料,详细工艺如下。1)共混。将 GBF,PTW 和 PI 粉末在高速搅拌机中混合 10 min;2)热模压成型。将混合均匀的粉末置入高温硫化机中,由室温升温至 200 ℃后加压 5 MPa,然后依次在 200~240 ℃恒温固化 20 min、240~280 ℃恒温固化 60 min;3)热处理。依次在室温~200 ℃保温 60 min,200~220 ℃保温 60 min,220~240 ℃保温 120 min。GBF 和 PTW 的 SEM 形貌如 Fig.1 所示。

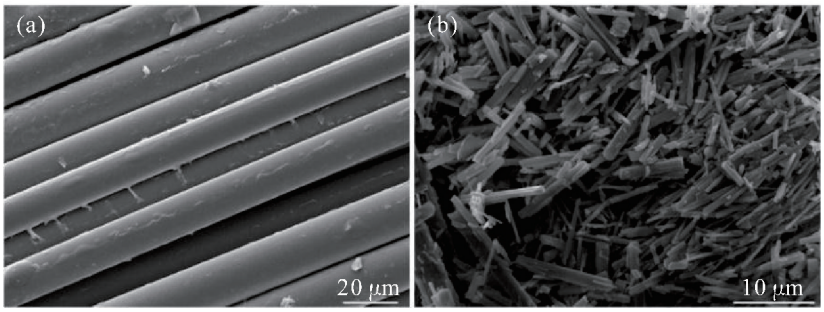


Fig. 1　SEM morphology of (a) GBF and (b) PTW

1.3　测试与表征

1.3.1　力学性能测试:采用显微硬度仪测定试样维氏硬度。加载载荷为 5 N,保压 15 s,每个试样测量 50 次取均值。采用高低温拉力机测试试样的弯曲强度和压缩强度;分别参照国标 GB/T 1449—2005 和 GB/T 1448—2008 执行,每组试样测 5 次取均值。

1.3.2　热重分析:采用热重分析仪进行测试。氮气气氛,升温速率为 10 ℃/min,温度范围室温至 800 ℃,实时记录试样质量变化曲线。

1.3.3　摩擦磨损性能测试:采用电化学腐蚀摩擦磨损试验仪进行摩擦磨损性能测试。摩擦方式为球-平面接触下的往复运动,摩擦配副为直径 4 mm 的调质 GCr15 不锈钢球,摩擦载荷为 5 N,10 N 和 15 N,循环磨损时间 60 min,往复频率 2 Hz,振幅 5 mm 在室温进行干摩擦。实验前依次采用 400-2000# SiC 砂纸将试样表面打磨光滑,用沾有无水乙醇的棉花清洁试样和磨球表面后晾干。摩擦系数由摩擦试验机自动记录。采用粗糙度测试仪测定磨痕的截面轮廓并计算磨损体积,磨损率的计算公式如式(1)所示

$$W=\Delta V/FL \tag{1}$$

式中:ΔV——磨损体积损失,mm^3;F——法向载荷,N;L——总滑动距离,m。

1.3.4　形貌表征:采用场发射扫描电子显微镜观察分析试样断面与磨损形貌,测试前对试样喷金处理,测试加速电压为 20 kV。采用超景深显微 3D 工作站观察试样与磨球的磨损表面形貌。

2　结果与讨论

2.1　复合材料的力学性能和断裂形貌

Fig.2 为 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料的维氏显微硬度。可以看出,随 PTW 含量由 0% 增至 9%,复合材料的平均硬度由 54.68 HV 提升至 63.16 HV。当 PTW 含量从 0% 增加至 6% 时,硬度增幅显著;但 PTW 含量从 6% 增至 9% 时,硬度提升速率明显减缓。

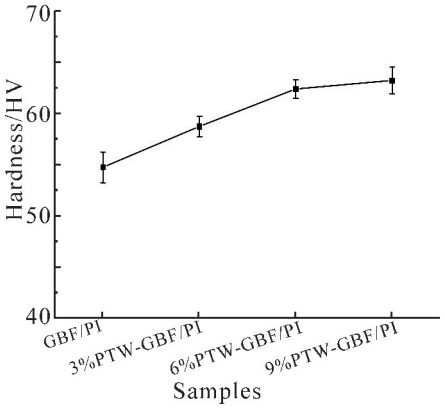


Fig. 2　Micro-hardness of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GGBF/PI composites

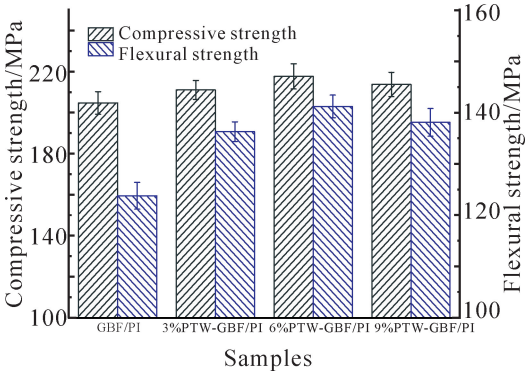


Fig. 3　Compressive strength and flexural strength of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites

Fig.3 为 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料在室

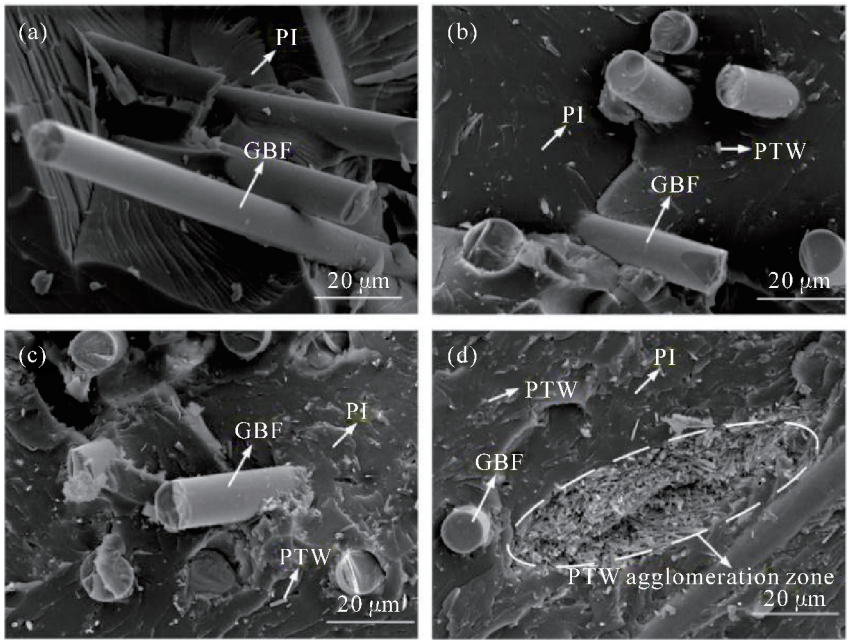


Fig. 4 SEM morphology of the fracture surfaces of (a) GBF/PI, (b) 3% PTW-GBF/PI, (c) 6% PTW-GBF/PI and (d) 9% PTW-GBF/PI composites

温的压缩强度和弯曲强度。随 PTW 添加量增加,复合材料的压缩强度和弯曲强度均呈先升高后降低的趋势;当 PTW 添加量为 6% 时,二者达到峰值,分别为 236.62 MPa 和 217.34 MPa,较 GBF/PI 复合材料分别提高 14.86% 和 36.62%。

Fig.4 为 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料的断裂表面 SEM 形貌。可以看出,GBF/PI 复合材料的断裂面呈光滑层状形貌,且 GBF 分散均匀;引入 PTW 后,复合材料断面逐渐粗糙化,且随 PTW 含量增加,断面粗化程度加剧,表明材料断裂行为由脆性向韧性转变。当 PTW 含量较低(3% 和 6%)时,其在基体中的分散性良好;而 PTW 含量增至 9% 时,出现明显团聚(Fig.4(d))。纤维与晶须的协同作用可优化应力传递,其拔出与断裂过程可消耗额外能量,从而提升复合材料力学性能;但过量 PTW(9%)引发的团聚导致孔隙率升高,致密度下降,进而削弱力学性能。上述结果表明,添加适量的 PTW(6%)能够与 GBF 互补,PTW 桥接裂纹配合 GBF 的拔出耗能机制,能够协同提高聚酰亚胺复合材料的硬度(Fig.2)和强度(Fig.3),对提升复合材料的摩擦磨损性能有利。

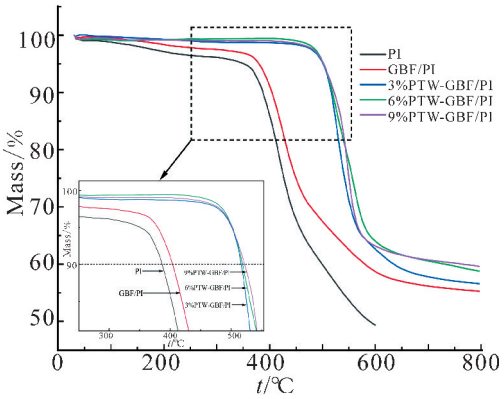


Fig. 5 Thermogravimetric curves of the pure PI, GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites

2.2 热重分析

Fig.5 为纯 PI,GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料在氮气气氛中的热重曲线,Tab.1 为对应的热分解特征参数。与纯 PI 相比,GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料的耐热性均明显提升,并且随 PTW 含量从 0% 增至 9%,PTW-GBF/PI 复合材料的耐热性能显著增强。纯 PI 在 600 ℃就已经大量分解,残余质量低于 50%,因此,未继续测试其 600 ℃以上分解情况。对于 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料,800 ℃残余质量、起始分解温度和 $T_{10\%}$ 均随 PTW 含量增加

Tab. 1　Thermal mass loss parameters of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites

Samples	$T_{10\%}$/℃	Onset decomposition temperature/℃	Temperature at the maximum mass loss rate/℃	Residual mass/%
Pure PI	385.6	362.7	407.5	47.21
GBF/PI	404.3	388.4	426.1	55.24
3% PTW-GBF/PI	515.9	505.1	527.4	56.56
6% PTW-GBF/PI	518.4	515.8	559.4	58.72
9% PTW-GBF/PI	521.9	519.1	553.2	59.56

而升高;其中,9% PTW-GBF/PI 复合材料的残余质量达 59.56%,起始分解温度为 519.1 ℃,较未添加 PTW 的 GBF/PI(残余质量 55.24%,起始分解温度 388.4 ℃)的失重率降低 9.6%,起始分解温度升高 130.7 ℃。适量添加 PTW(≤6%)可显著提高复合材料初始分解温度;但含量超过 6% 后,耐热性能改善趋于平缓。由于聚酰亚胺树脂是热分解的主要失重组分,而 PTW 和 GBF 具有优异热稳定性,其协同作用可抑制热损失。值得注意的是,PTW 独特的隧道式晶体结构(K^+位于隧道中心)可阻碍热传导,其热导率仅约 0.0534 W/(m·K),且随温度升高呈负温度系数特性,进一步增强了复合材料的热屏障效应[24, 25]。

2.3　摩擦磨损性能分析

2.3.1　*摩擦系数和磨损率*:Fig.6 为 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料与 GCr15 球在 5~15 N 载荷下对磨 60 min 后的摩擦系数曲线。摩擦载荷为 5 N 时,GBF/PI 复合材料的摩擦系数较高,PTW-GBF/PI 复

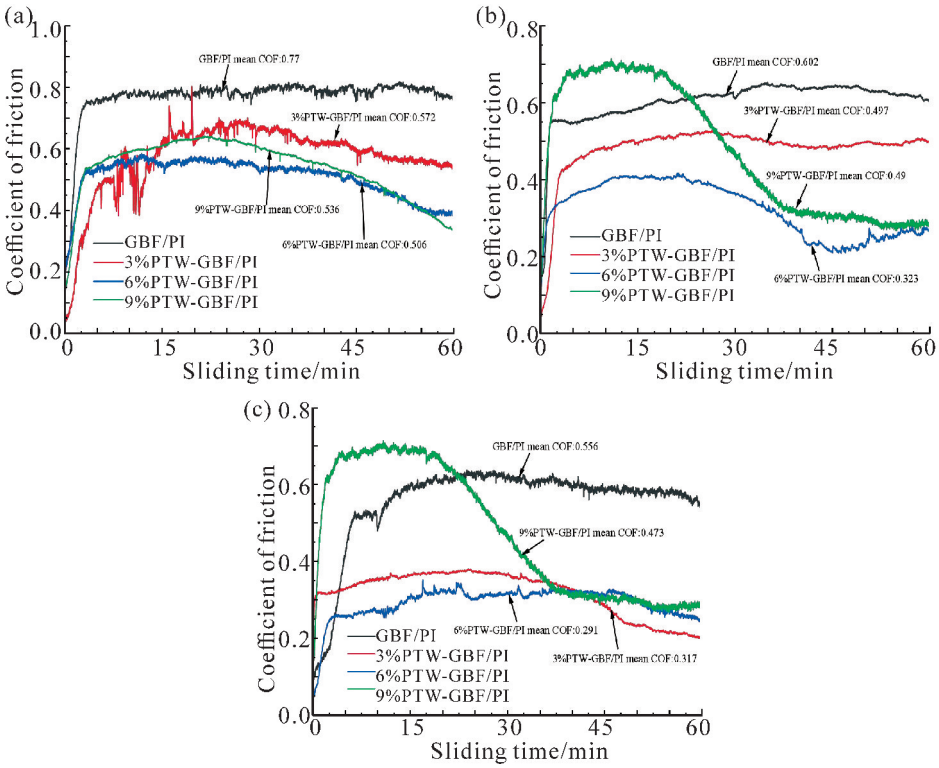


Fig. 6　Friction coefficient curves of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites under wear loads of (a) 5 N, (b) 10 N and (c) 15 N

合材料则表现出不同特征,3% PTW-GBF/PI 在初始阶段摩擦系数剧烈波动,随后逐渐稳定;6% 和 9% PTW-GBF/PI 的摩擦系数全程相对平稳,但磨损后期显著下降。钟厉等[26]的研究指出,硬质 PTW 脱落形成的微米级磨屑可促进转移膜更新,从而在磨损后期降低摩擦系数。当载荷增至 10 N 和 15 N 时,9% PTW-GBF/PI 初始摩擦系数最高,但随摩擦进行快速下降;磨损后期,GBF/PI 的摩擦系数在各试样中最高。值得注意的是,GBF/PI 在不同载荷下摩擦系数波动较小,而 PTW-GBF/PI 的摩擦系数随磨损时间延长持续下降并稳定于低值,其中 9% PTW-GBF/PI 的下降趋势最显著。6% PTW-GBF/PI 在 5 N,10 N 和 15 N 载荷下的平均摩擦系数分别为 0.506,0.323 和 0.291,为最低值。可以看出,随 PTW 含量增加其减磨效果明显,但过量 PTW(9%)引发的团聚会导致孔隙率上升,致使高载荷(15 N)下磨球切入磨损面较深,初期摩擦系数升高。

Fig.7 为 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料在 5 ~15 N 载荷下磨损后的磨损率。从摩擦载荷变化维度分析,随摩擦载荷增加,各试样的磨损率均呈逐渐降低的趋势,这种现象可能与高摩擦载荷所致的摩擦热积累有关:较高界面温度使 PI 基体发生黏弹性转变,形成转移膜覆盖摩擦副表面,能够降低磨损面真实接触面积[27]。但随摩擦载荷增加,不同试样磨损率的变化规律存在差异,当摩擦载荷由 5 N 增至 10 N 时,GBF/PI 和 3% PTW-GBF/PI 试样的磨损率明显下降,6% PTW-GBF/PI 和 9% PTW-GBF/PI 试样的磨损率下降幅度较小;当摩擦载荷由 5 N 增至 10 N 时,GBF/PI 和 3% PTW-GBF/PI 试样的磨损率下降幅度较小,而 6% PTW-GBF/PI 和 9% PTW-GBF/PI 试样的磨损率下降幅度相对较大。

从 PTW 的含量维度分析,固定载荷下,磨损率随 PTW 含量增加呈先降后升趋势,尤其在 10 N 和 15 N 载荷下,9% PTW-GBF/PI 磨损率略高于 3% PTW-GBF/PI。其中,6% PTW-GBF/PI 试样的磨损率在各载荷下均最低,在 5 N,10 N 和 15 N 载荷下的磨损率分别为 6.75×10^{-6} mm^3/(N·m),6.04×10^{-6} mm^3/(N·m) 和 4.82×10^{-6} mm^3/(N·m),较 GBF/PI 复合材料的磨损率分别低 49.5%,23.1% 和 31.6%。上述结果表明,适量 PTW(6%)可显著提升复合材料的耐磨性,但过量 PTW(>6%)所致的内部缺陷会导致耐磨性变差。

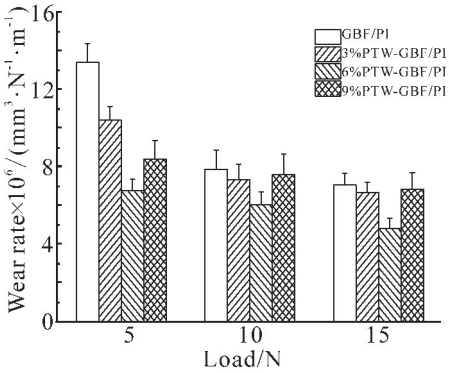


Fig. 7 Wear rate of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites

2.3.2 磨损形貌和磨损机制:Fig.8 为 GBF/PI,3% PTW-GBF/PI,6% PTW-GBF/PI 和 9% PTW-GBF/PI 复合材料分别在 5 N,10 N 和 15 N 载荷下与 GCr15 球对磨 60 min 后的磨损表面显微形貌。各磨损表面都可见大面积凹坑、黏着撕裂痕及边缘密集犁沟,部分 GBF 半裸露或断裂,纤维-基体界面脱黏严重,表明其磨损机制以疲劳磨损和犁削磨损为主,伴随黏着磨损与磨粒磨损。随载荷增加,磨损面横向裂纹与凹坑数量显著增多,并产生大量细小磨屑,说明疲劳磨损和磨粒磨损随载荷增加而加剧。PTW-GBF/PI 复合材料磨损面较 GBF/PI 更光滑,但随载荷增加,其表面横向裂纹和块状剥落亦明显增多,磨损机制从黏着磨损向疲劳/磨粒磨损转变。不同 PTW 含量试样的磨损形貌差异显著,3% PTW 和 6% PTW 试样在低中载荷(5 N,10 N)下以撕裂痕和犁沟为主,高载荷(15 N)下呈现明显疲劳磨损特征;9% PTW 试样在低载荷(5 N)下以犁痕和组织剥落为主,中高载荷下出现大尺寸剥落坑,表明疲劳磨损加剧。其中,6% PTW-GBF/PI 试样在各载荷下磨损面最平整,中高载荷时疲劳磨损程度最轻,证实适量添加 PTW(6%)可有效抑制黏着磨损、犁削磨损和疲劳磨损,但过量添加 PTW(9%)会加剧疲劳损伤。

Fig.9 给出了 GCr15 球分别与 GBF/PI 和 PTW-GBF/PI 复合材料在 10 N 载荷下对磨 60 min 后的球缺形貌。可以看出,各球缺表面均可见连续的平行

犁沟,并且随 PTW 含量增加,GCr15 磨损面上的深色转移膜呈增加趋势,而球缺则先增大然后略有降低。上述现象与摩擦界面产生的犁削磨损和磨粒磨损密切相关,首先是复合材料中高硬度的 BF 和 PTW 对 GCr15 球造成较严重的犁削作用,并且 BF 和 PTW 磨损产生的硬质磨屑会对 GCr15 配副的磨损面造成严重的磨粒磨损;其次是 PTW 对促进转移膜的形成有积极作用,能够在一定程度上减弱复合材料和磨粒对 GCr15 球造成的犁削和磨粒磨损,因此,当 PTW 含量较高时(9%)其 GCr15 球缺反而略有减小。

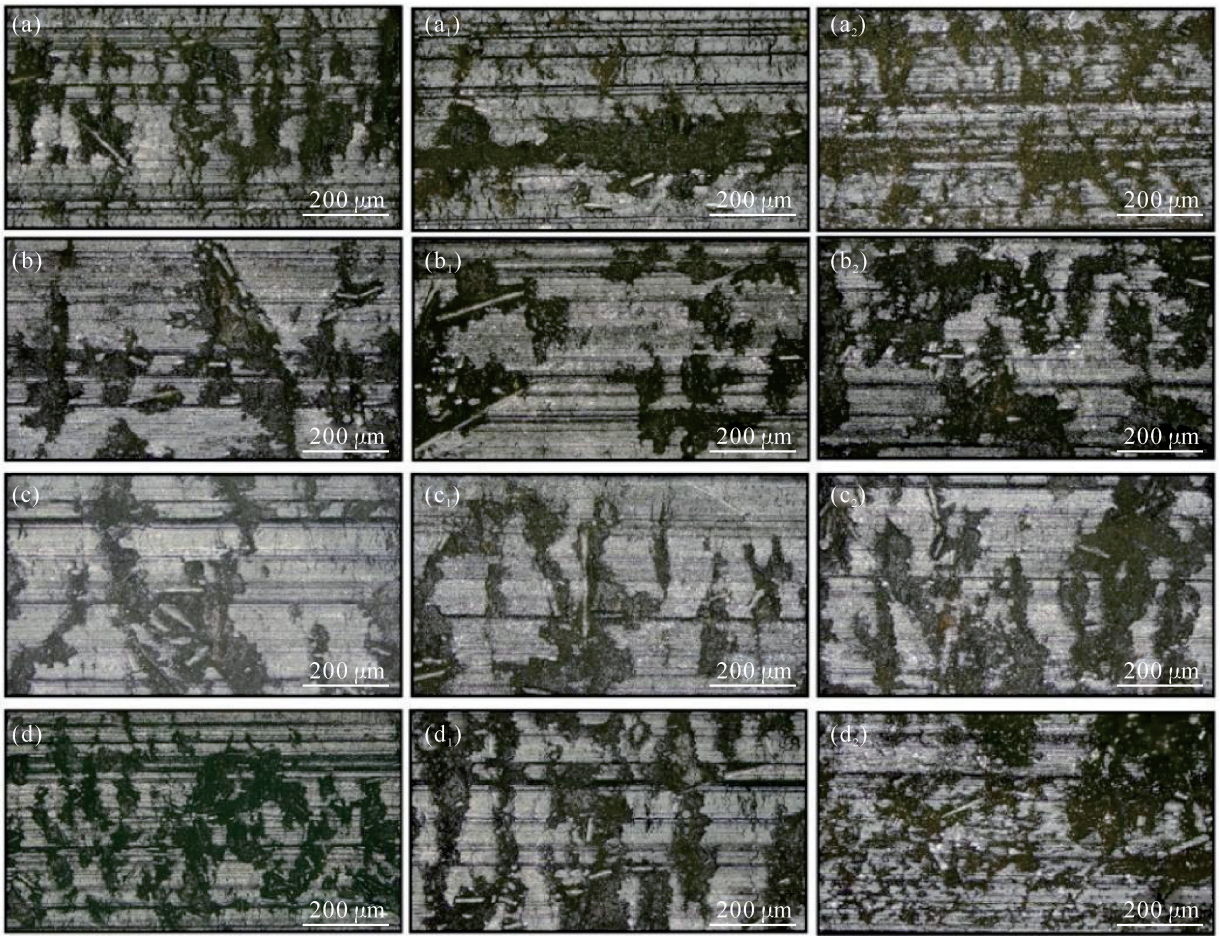


Fig. 8　Micrographs of the worn surfaces of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites under loads of (a ~d) 5 N, (a_1~d_1) 10 N and (a_2~d_2) 15 N: (a, a_1, a_2) GBF/PI; (b, b_1, b_2) 3% PTW-GBF/PI; (c, c_1, c_2) 6% PTW-GBF/PI; (d, d_1, d_2) 9% PTW-GBF/PI)

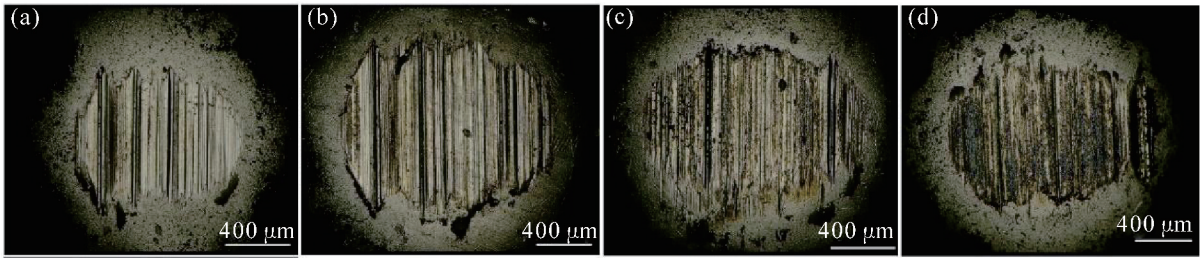


Fig. 9　Wear surface micrographs of GBF/PI, 3% PTW-GBF/PI, 6% PTW-GBF/PI and 9% PTW-GBF/PI composites matched with GCr15 under the friction load of 10 N: (a) GBF/PI; (b) 3% PTW-GBF/PI; (c) 6% PTW-GBF/PI; (d) 9% PTW-GBF/PI

Fig.10 给出了 6% PTW-GBF/PI 试样在 10 N 载荷下的磨损面 SEM 形貌。断裂的 BF 部分裸露于基体,表面黏附大量细磨屑,这些裸露的 BF 作为主要接触区优先承载,同时成为次要接触区的形核点。在本文的摩擦体系中,疲劳磨损和磨粒磨损是造成复合材料质量损失的重要因素。基于 Lancaster 的增强体承载理论[28],填料能够有效承受基体传递的应力,进而减轻材料的疲劳磨损破坏。结合 Fig.2 和

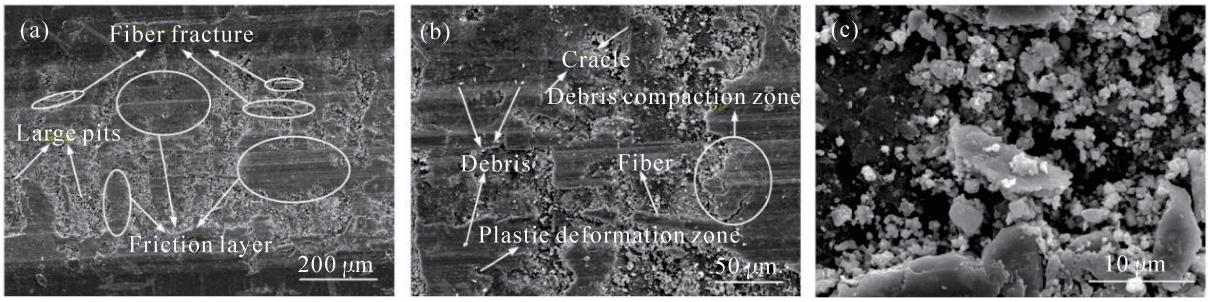


Fig. 10 SEM morphology of 6% PTW-GBF/PI composites with different magnifications under the friction load of 10 N: (a) 150×; (b) 500×; (c) 4000×

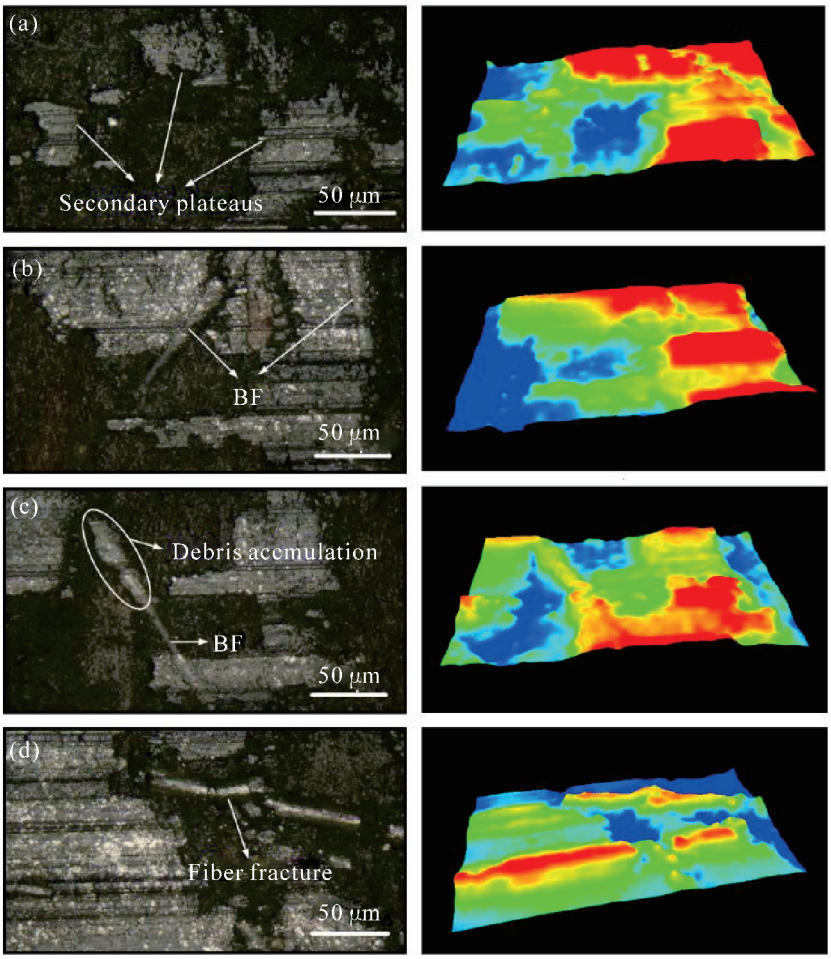


Fig. 11 Morphology and three-dimensional contour mapping of friction contact area of 6% PTW-GBF/PI composites under the friction load of 10 N: (a) independent secondary contact area; (b) fiber-nucleated secondary contact area; (c) fiber-nucleated primary contact area; (d) broken fibers in primary contact area

Fig.3 可知,当 PTW 含量为 6% 时,复合材料硬度、压缩强度和弯曲强度的提升最为显著,可有效抑制摩擦载荷引发的疲劳磨损和塑性变形。然而,随 PTW 含量增加,GCr15 球磨损表面犁痕面积增大,表明磨粒磨损加剧;但对偶件表面转移膜的形成与复合材料磨损面接触区的稳定性提升,在一定程度上抵消了磨粒磨损的负面影响。当 PTW 含量超过 6% 时,磨粒磨损主导致使复合材料的摩擦性能变差。值得注意的是,PTW-GBF/PI 复合材料的摩擦系数在摩擦中后期下降并趋于稳定,结合 Fig.8 和 Fig.10 的磨损形貌分析,摩擦初期高磨粒磨损导致摩擦系数升高,中期稳定摩擦层和转移膜形成后维持了低摩擦水平与磨损率。

Fig.11 为 6% PTW-GBF/PI 复合材料在 10 N 载荷下磨损表面接触区的显微形貌与三维轮廓映射(蓝色表示低凹区域,红色表示高凸接触区)。Fig.11(a)和 Fig.11(b)为磨损面的次要接触区形貌。Fig.11(a)形貌显示,次要接触区可不依赖 GBF 独立形成,其成因主要为法向压力、剪切力及摩擦热共同压实磨屑;次要接触区也可能以纤维为形核点生长,如 Fig.11(b)所示;Fig.11(c)和 Fig.11(d)为磨损面主要接触区形貌特征。Fig.11(c)显示,GBF 周围磨屑堆积较少,推测此现象与纤维-基体界面结合强度及 GBF 在 PI 基体中的三维取向有关;但是 GBF 因硬脆特性,作为主要接触区时易断裂甚至破碎(Fig.11(d))。综上,6% PTW-GBF/PI 的摩擦接触区包括三类:(1)磨屑挤压堆积形成的独立次要接触区;(2)以 GBF 为形核点的次要接触区;(3)裸露 GBF 构成的主要接触区。已有研究表明,增强体主导接触区性质,次要接触区可降低界面应力集中并改善摩擦性能[29]。本文中,6% PTW 的引入不仅通过组织结构调控优化了晶须的分散状态,更通过与 GBF 的协同作用有效促进磨损界面形成高密度、结构稳定的次要摩擦接触区,降低了界面应力集中,从而实现对基体磨损行为的抑制。

3　结论

研究了六钛酸钾晶须对氧化石墨烯改性玄武岩纤维/聚酰亚胺复合材料力学性能和摩擦性能的影响。结果表明,PTW 晶须在 GBF/PI 体系中实现了多尺度结构调控,通过桥联和应力传递显著提升了界面结合强度与载荷传递效率,使复合材料的硬度、压缩强度和弯曲强度呈现“先升后降”的变化规律,其中 6% 为最优添加量,此时 PTW-GBF/PI 复合材料的压缩强度和弯曲强度达到最大值,分别为 236.62 MPa 和 217.34 MPa,较 GBF/PI 复合材料分别提高约 14.8% 和 36.6%。摩擦磨损实验结果表明,与 GCr15 在 5~15 N 载荷下对磨时,适量添加 PTW 可与 GBF 产生协同作用,有效促进磨损界面形成高密度、结构稳定的次要摩擦接触区,降低界面应力集中,从而提升复合材料的耐磨性能,但过量 PTW(9%)会导致晶须团聚,加剧界面应力集中与疲劳磨损。6% PTW 含量的 PTW-GBF/PI 复合材料在 5 N,10 N 和 15 N 载荷下均具有最低的磨损率,较 GBF/PI 复合材料分别低 49.5%,23.1% 和 31.6%。

参考文献:

[1] 吴嘉宁, 赵光辉, 陈薇, 等. RTM 成型用聚酰亚胺树脂及其复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(6): 1-8.
Wu J N, Zhao G H, Chen W, *et al.* Research progress on polyimide resin and their composites for RTM[J]. Aerospace Materials & Technology, 2023, 53(6): 1-8.

[2] 李媛媛, 尚晓辉, 李柯颖, 等. 石墨烯/多孔聚酰亚胺自润滑保持架材料的制备及其性能[J]. 轴承, 2024(5): 164-169.
Li Y Y, Shang X H, Li K Y, *et al.* Preparation and performances of graphene/porous polyimide self-lubricating cage materials[J]. Bearing, 2024(5): 164-169.

[3] Wu L, Zhang Z, Yang M, *et al.* Surface modification of YS-20 with polydopamine for improving the tribological properties of polyimide composites[J]. Friction, 2022, 10: 411-421.

[4] 王姗, 姜帅, 韩旭辉, 等. 高性能聚酰亚胺树脂及其复合材料的研究进展[J]. 功能高分子学报, 2021, 34(6): 570-585.
Wang S, Jiang S, Han X H, *et al.* Research progress on high-performance polyimide resins and their composites[J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(6): 570-585.

[5] 刘福华, 明白, 李轩, 等. 聚酰亚胺及其复合材料的摩擦学改性研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41(6): 1033-1040.
Liu F H, Ming B, Li X, *et al.* Research progress on tribological modification of polyimide and its composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2023, 41(6): 1033-1040.

[6] 董凤霞, 侯国梁, 刘亮, 等. 稀土改性对碳纤维增强聚酰亚胺复合材料在不同温度下摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(2): 148-154.

Dong F X, Hou G L, Liu L, *et al.* Effect of surface treatment on carbon fiber by rare earth on the tribological properties of carbon fiber reinforced polyimide composite at elevated temperatures[J]. Tribology, 2017, 37(2): 148-154.

[7] Chen X, Liu H, Jiang R, *et al.* Study on the macro-and micro-mechanical properties of quartz fiber reinforced polyimide resin matrix composite after thermal aging[J]. Composite Structures, 2022, 292: 115666.

[8] Zheng L, Zhang K, Liu L, *et al.* Biomimetic architectured Kevlar/polyimide composites with ultra-light, superior anti-compressive and flame-retardant properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 230: 109485.

[9] Jamshaid H, Mishra R. A green material from rock: basalt fiber-a review[J]. The Journal of the Textile Institute, 2016, 107: 923-937.

[10] Dhand V, Mittal G, Rhee K Y, *et al.* A short review on basalt fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 73: 166-180.

[11] Selcuk S, Ahmetoglu U, Gokce E C. Basalt fiber reinforced polymer composites (BFRP) other than rebars: a review[J]. Materials Today Communications, 2023: 107359.

[12] Yu K, Shang X, Zhao X, *et al.* High frictional stability of braking material reinforced by basalt fibers[J]. Tribology International, 2023, 178: 108048.

[13] Fragassa C, Pavlovic A, Santulli C. Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fibre vinylester composites and their hybrids[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 137: 247-259.

[14] Chairman C A, Kumaresh B S P. Mechanical and abrasive wear behavior of glass and basalt fabric-reinforced epoxy composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 130: 120-130.

[15] Cagrialp A, Mehmet D. The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 146: 145-154.

[16] Han R, She Z X, He P, *et al.* Enhanced performances of basalt fiber/polypropylene composite via introducing Co_3O_4 nanosheets for interfacial reinforcement[J]. Materials Chemistry and Physics, 2025, 334: 130420.

[17] 李轩, 明白, 刘福华, 等. 玄武岩纤维增强聚酰亚胺复合材料的往复摩擦磨损行为[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(6): 991-998.
Li X, Ming B, Liu F H, *et al.* Reciprocating friction and wear behavior of basalt fiber reinforced polyimide composites[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2024, 42(6): 991-998.

[18] 李轩, 周德东, 何瑜, 等. 氧化石墨烯改性玄武岩纤维/聚酰亚胺复合材料的制备与摩擦学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(5): 76-86.
Li X, Zhou D D, He Y, *et al.* Preparation and tribological performance of graphene oxide modified basalt fiber/polyimide composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2024, 40(5): 76-86.

[19] Lee J J, Lee J A, Kwon S, *et al.* Effect of different reinforcement materials on the formation of secondary plateaus and friction properties in friction materials for automobiles[J]. Tribology International, 2018, 120: 70-79.

[20] Joo B S, Jara D C, Seo H J, *et al.* Influences of the average molecular weight of phenolic resin and potassium titanate morphology on particulate emissions from brake linings[J]. Wear, 2020, 450: 203243.

[21] 程芳伟, 姜其斌, 张志军. 六钛酸钾晶须在高分子复合材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2014, 42(12): 123-126.
Cheng F W, Jiang Q B, Zhang Z J. Application of potassiumhexatitanate whisker on polymer composites[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(12): 123-126.

[22] Mao S, Wang J, Qiu C, *et al.* Modification of polypropylene composites containing potassium titanate whisker and talcum[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 116: 3455-3459.

[23] 胡晓兰, 羊宏山, 兰茜, 等. 钛酸钾晶须-玻璃纤维/苯并噁嗪混杂复合材料的摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2436-2443.
Hu X L, Yang H S, Lan X, *et al.* Friction and wear properties of potassium titanate whisker-glass fiber/benzoxazine hybrid composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2436-2443.

[24] Wang H Y, Zhu Y J, Feng X, *et al.* The effect of self-assembly modified potassium titanate whiskers on the friction and wear behaviors of PEEK composites[J]. Wear, 2010, 269: 139-144.

[25] 马娜, 隋国鑫. 干摩擦条件下短碳纤维/钛酸钾晶须增强聚醚醚酮复合材料的摩擦机制[J]. 复合材料学报, 2013, 30(S1): 49-54.
Ma N, Sui G X. The tribological mechanism of short carbon fibers and potassiumtitanate whiskers reinforced polyetheretherketone composites in dry sliding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(S1): 49-54.

[26] 钟厉, 吴林群, 陈梦青. 树脂基摩擦材料耦合机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 159-165.
Zhong L, Wu L Q, Chen M Q. Research on coupling mechanism of resin-based friction materials[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 159-165.

[27] 史以俊, 何明, 顾晓利, 等. 钛酸钾晶须填充环氧树脂复合材料的摩擦磨损特性[J]. 功能高分子学报, 2009, 22(4):

401-404.
Shi Y J, He M, Gu X L, *et al*. Tribological properties of potassium titanate whisker filled epoxy composite[J]. Journal of Functional Polymers, 2009, 22(4): 401-404.
[28] Lancaster J K. The effect of carbon fiber reinforcement on the friction and wear ofpolymers[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 1: 549-559.
[29] Jara D C, Jang H. Synergistic effects of the ingredients of brake friction materials on friction and wear: a case study on phenolic resin and potassium titanate[J]. Wear, 2019, 430: 222-232.

Effect of Potassium Titanate Whiskers on the Friction and Wear Performance of Basalt Fiber/Polyimide Composites

Ming Liu[1], Xuan Li[1], Dedong Zhou[1], Jie Jiang[2], Chaojian Wang[3], Yuanpeng Yang[1], Rui Deng[1]
Xiaowei Lin[1], Zhizhang Liu[1], Xuyi Zhang[1]
(*1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China; 2. Yibin Hengmei Technology Co., Ltd., Yibin 643000, China; 3. Intelligent Electromechanical Control Engineering Technology Research Center, Luzhou 646199, China*)

ABSTRACT: The potassium titanate whisker (PTW) and graphene oxide-modified basalt fibers (GBF) hybrid-modified polyimide composites (PTW-GBF/PI) were prepared through hot pressing method. The effects of PTW content on the mechanical properties, thermal stability, and friction-wear performance of the composites were investigated. As the PTW content increases, the hardness of the composites increases, while the compressive strength and flexural strength initially increase and then decrease. When the PTW mass fraction is 6%, the compressive strength and flexural strength of PTW-GBF/PI composite show the maximum values of 236.62 MPa and 217.34 MPa, respectively, which are approximately 14.8% and 36.6% higher than those of GBF/PI composite. The above observation indicates that when the PTW mass fraction is 6%, the composite achieves the optimal synergistic reinforcement effect. The bridging and stress-transfer functions of PTW within the matrix effectively enhance the interfacial bonding and energy dissipation capability, exhibiting excellent cooperative strengthening behavior with GBF. The results of friction-wear tests indicate that the introduction of appropriate amount of PTW significantly improve the tribological performance of composite. When the PTW mass fraction is 6%, the composite exhibits the lowest average coefficient of friction (0.506, 0.323, and 0.291) and wear rate (6.75×10^{-6} mm^3/(N·m), 6.04×10^{-6} mm^3/(N·m), and 4.82×10^{-6} mm^3/(N·m)) under loads of 5 N, 10 N, and 15 N, respectively. The wear of GBF/PI and PTW-GBF/PI composites is primarily characterized by fatigue wear and plowing wear, accompanied by adhesive wear and abrasive wear. The appropriate PTW addition (mass fraction of 6%) significantly inhibits fatigue wear, plowing wear, and adhesive wear; however, excessive PTW content (9%) leads to increased fatigue wear due to whisker agglomeration.

Keywords: polyimide; basalt fiber; potassium titanate whiskers; friction-wear; strength