

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210419002

石墨烯纳米片对多孔PI复合材料含油性能及摩擦学性能的影响*

李建勇¹ 李锦棒¹ 周宁宁² 于爱兵¹ 卿涛² 张激杨²

(1. 宁波大学机械工程与力学学院 宁波 315211;

2. 北京控制工程研究所 北京 100094)

摘要: 多孔聚酰亚胺(PI)应用广泛,但其摩擦磨损特性有待进一步提升。采用石墨烯纳米片(GNS)为改性剂,制备多孔PI复合材料,系统研究GNS填充剂对多孔PI材料的冲击性能、含油性能和摩擦学性能的影响,探究GNS、PI和润滑油三者的协调润滑机制。结果表明:添加一定量的GNS可以提高多孔PI材料的含油率和含油保持率。加入GNS填料后,复合材料的孔径和孔隙率均有所增大,使复合材料对油液的吸附力更强,提高了其贮油能力。复合材料的冲击强度随着GNS含量的变化为先升高后降低,少量的GNS分散在基体中,可以起到增韧的结果,而大量的GNS削弱了PI颗粒之间的结合性,且容易团聚导致界面结合性变差。添加0.5% GNS时,多孔PI复合材料表现出最佳的摩擦学性能,相比纯PI,摩擦因数降低了37.2%,磨痕宽度减小了26.5%。适量的GNS可以进一步提高材料的含油性能和摩擦性能。

关键词: 石墨烯; 多孔聚酰亚胺; 含油性能; 冲击性能; 摩擦磨损

中图分类号: TH145

Effect of Graphene Nanosheets on the Oil-bearing Properties and Tribological Properties of Porous PI Composites

LI Jianyong¹ LI Jinbang¹ ZHOU Ningning² YU Aibing¹ QING Tao² ZHANG Jiyang²

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Porous polyimide (PI) is widely used, but its friction and wear characteristics need to be further improved. Graphene nanosheets (GNS) were used as modifiers to prepare porous PI composites. The impact of GNS fillers on the impact performance, oil content and tribological properties of porous PI materials were studied, and the coordinated lubrication mechanism of GNS, PI and lubrications were explored. The results show that adding a certain amount of GNS can increase the oil content and oil retention rate of porous PI materials. After adding the GNS filler, the pore size and porosity of the composite material are increased, which makes the composite material have a stronger adsorption force for oil and improves its oil storage capacity. The impact strength of the composite material increases first and then decreases with the change of GNS content. A small amount of GNS is dispersed in the matrix, which can achieve toughening results, while a large amount of GNS weakens the bonding between PI particles. GNS is easy to agglomerate leads to poor interface bonding. When 0.5% GNS is added, the porous PI composite exhibits the best tribological performance. Compared with pure PI, the friction factor is reduced by 37.2%, and the wear scar width is reduced by 26.5%. A proper amount of GNS can further improve the oil-containing properties and friction properties of the material.

Keywords: graphene; porous polyimide; oily properties; impact performance; friction and wear

* 宁波市科技创新2025重大专项(2018B10004, 2019B10078)、浙江省自然科学基金(LY21E050003)和精密转动和传动机构长寿命技术北京市重点实验室开放基金(BZ0388201803)资助项目。

Fund: Supported by Science Technology Innovation 2025 Major Project of Ningbo (2018B10004, 2019B10078), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY21E050003), and Beijing Key Laboratory of Long-life Technology of Precise Rotation and Transmission Mechanisms (BZ0388201803).

20210429 收到初稿, 20210903 收到修改稿

0 前言

聚酰亚胺具有优良的耐热性、耐腐蚀性以及优异的力学和电学性能^[1-3],被广泛研究并应用于航空航天、轨道交通等领域^[4-6]。在飞轮、控制力矩陀螺等空间高速运动部件中,常采用多孔聚酰亚胺(PI)作为轴系的贮油器和轴承保持架,已提供长效而稳定的润滑。多孔PI内部连通的孔隙能贮存润滑油,随着温度和压力变化释放到摩擦表面实现润滑^[7-8]。目前,为了减少由PI材料摩擦和磨损后导致的机械故障,零件失效等问题,许多研究人员提出向PI基体中加入填料,例如纤维、介孔二氧化硅纳米球、CNT和PTFE等以提高复合材料的耐磨性^[9-12]。选择合适的填料在耐磨聚合物复合材料的设计中非常重要,这将极大地提高聚合物材料的摩擦性能。

石墨烯作为一种新型纳米材料,由于其独特的力学、导电性和自润滑性能^[13-15],近年来在材料应用方面受到广泛关注^[16-18]。有研究发现,将改性后的石墨烯加入到PI中,材料干摩擦状态下耐磨性提升了将近20倍^[19]。ROY等^[20]研究了PI/GNS复合涂层的摩擦学性能,提出GNS添加剂可以有效减少涂层表面的损坏。WANG等^[21]制备了多层石墨烯填充的聚氯乙烯复合材料,发现减摩主要是来自复合材料韧性的增强和石墨烯的高自润滑性能。但另有研究表明,过量的石墨烯会破坏转移膜的结构,导致摩擦学性能降低^[22]。那么对于多孔材料来说,石墨烯的加入会引起哪些作用呢?

为了探索提高多孔PI摩擦学性能的方法,采用石墨烯纳米片为改性剂,添加到多孔PI中。PI材料本身、石墨烯纳米片及微孔中的润滑油均具有润滑作用,三者的协同润滑机理尚不明确,同时石墨烯纳米片也会改变多孔PI内部孔隙结构,影响材料的含油性能和力学性能。本文研究了石墨烯对多孔PI冲击强度、含油特性及摩擦磨损的影响,揭示石墨烯、PI与润滑油的协同作用,有助于进一步提升多孔含油PI材料的性能。

1 试验

1.1 材料

试验选用牌号为YS-20的PI模塑粉,由上海市合成树脂研究所有限公司生产。石墨烯纳米片(GNS)购置于南京先丰纳米材料科技有限公司,片径为5~10 μm,厚度3~10 nm。

1.2 制备

试样的制备过程分为混料、烧结和浸油三步。首先,将PI和GNS粉末放置于鼓风干燥箱进行干燥预处理。用电子天平按比例称取干燥后的PI和GNS粉末倒入多功能高速搅拌机,每次搅拌90 s,然后冷却20 min,重复8次。然后,将混合后的粉末放置于模具中,使用液压机对模具双向加压,设置试验压力大小为90 MPa,保压时间20 min。冷压成型后将紧固的模具放入加热炉中,设定烧结温度350 ℃,保温时间60 min。烧结完成后,模具随炉冷至室温,通过压力机辅助卸模,得到盘状试样和条状试样,石墨烯含量按质量分数设置为0.1%、0.5%、1%和2%。盘状试样的直径为48 mm,厚度为7 mm,条状试样的长度为80 mm,宽度为10 mm,厚度为4 mm。采用5000#砂纸打磨试样,并用超声波清洗机清洗备用。最后,将清洗干燥后的盘状试样垂直立在烧杯中,倒入聚α烯烃PAO4润滑油,浸没试样,置于真空干燥箱中,机械泵连续抽真空并加热至80 ℃,保温20 h后取出试样,去除表面浮油。

1.3 试验方法

含油率 φ 和保油率 ω 通过式(1)和(2)进行计算。其中甩油试验使用TG16G台式高速离心机,在3000 r/min转速下进行离心甩油,每隔10 min后取出试样称重,累计甩油120 min。

$$\psi = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\omega = \frac{m_x - m_0}{m_1 - m_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

式中, m_0 为试样干重; m_1 为含油后的试样重量; m_x 为每次间隔10 min离心甩油后的试样重量。

试样的摩擦学性能测试通过SFT-2M型球-盘摩擦磨损试验机进行,如图1所示。施加载荷为10 N,摩擦半径5 mm,电机转速400 r/min,测试时间为120 min。对摩球选用GCr15轴承钢,直径5 mm,每组试验重复三次,以计算平均摩擦因数。通过KH-8700型三维数字显微镜测量磨损试验后的磨痕宽

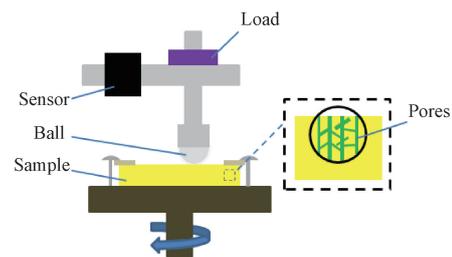


图1 摩擦副示意图

Fig. 1 Schematic diagram of friction pair

度,观察对摩擦球的表面形貌,采用 VK-X210 激光共聚焦扫描显微镜表征了磨痕的三维形貌,使用 SU5000 扫描电镜观察表面孔洞的分布,磨痕和断面形貌,采用 JZL 系列液晶数显冲击试验机测试材料的冲击强度。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的微结构分析

采用 SEM 观察 PI 与 GNS 颗粒形态,如图 2 所示。从图 2a 中可以看到 PI 颗粒表面光滑,呈现粒状。图 2b 中 GNS 为片状结构,大片径表面有褶皱凸起。为了减轻 GNS 的团聚,采用高速搅拌机多次搅拌。经充分搅拌后,此时粉末中难以观察到大片

径的 GNS,PI 颗粒表面附着细碎的小片。通过对比能谱结果可知(见表 1),图 2a 中 PI 颗粒处测得的 C 元素的含量为 85.25%,图 2c 中显示碎片处的 C 元素含量为 94.01%,其中微量的 Cu 元素来自于固定粉末的铜片。上述结果表明,GNS 在通过机械力搅拌后,细化了颗粒大小,形成了许多碎片均匀粘附在 PI 表面。

表 1 区域 1 和 2 的能谱分析结果

Table 1 Energy spectrum analysis results of regions 1 and 2

Area	C/%	O/%	Cu/%	Pt/%
1	85.25	11.79	1.32	1.65
2	94.01	3.57	1.15	1.27

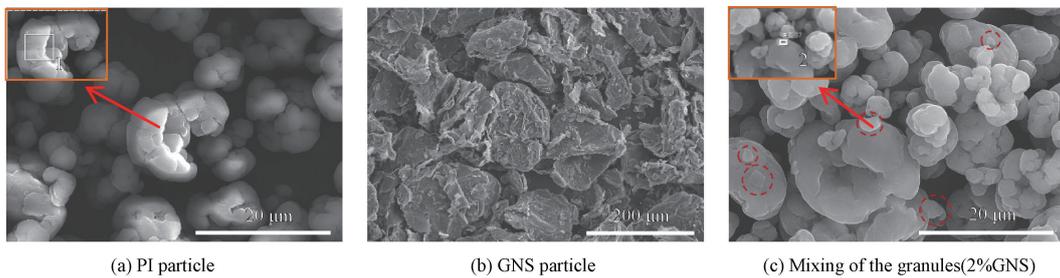


图 2 PI 颗粒与 GNS 颗粒 SEM 图片

Fig. 2 SEM micrographs of PI particles and GNS particles

2.2 GNS/多孔 PI 复合材料的冲击性能

图 3 为复合材料冲击性能结果和断面 SEM 形貌。对比纯 PI 试样,加入 0.1%GNS 后,复合材料的冲击性能有一定增强,进一步添加 GNS,可以看到材料的冲击性能明显降低。分析认为少量的 GNS 均匀分散在基体中,可以传递应力,提供承载

性,起到了增韧的结果。过量的 GNS 与 PI 粉末均匀混合后,一方面,GNS 依附在较大的 PI 颗粒表面,弱化了 PI 颗粒自身的结合,另一方面,GNS 之间团聚成较大颗粒进一步削弱了 PI 基体的强度。从材料的断面图上也可以证明,图 3b、3c、3d 断面充满褶皱,布满了网状的粘接结构,主要是由材料之间相互

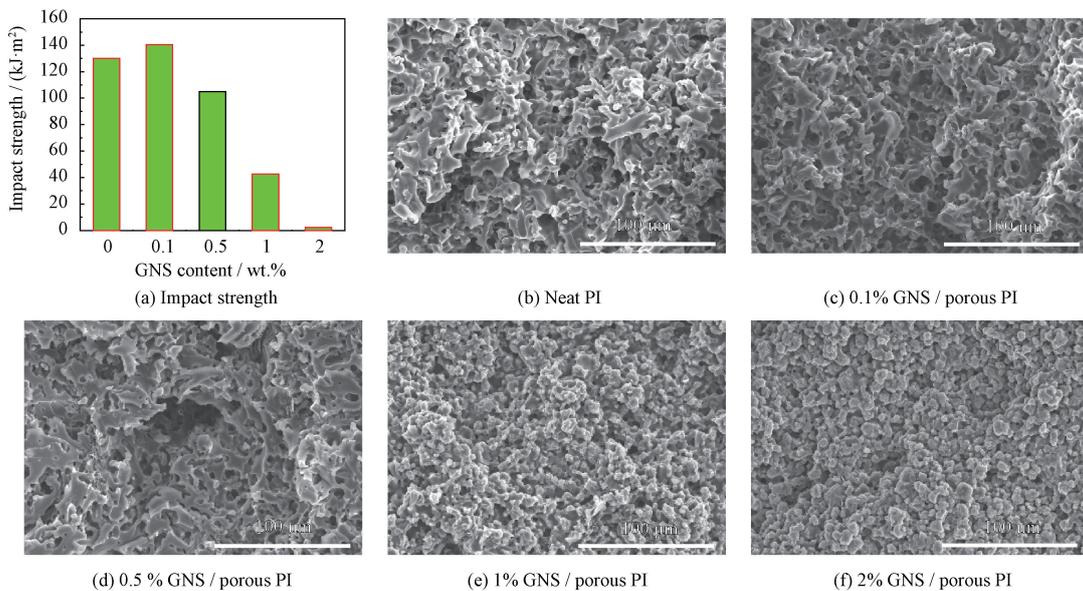


图 3 复合材料冲击性能结果和断面 SEM 照片

Fig. 3 Composite material impact performance results and cross-sectional SEM micrographs

拉扯作用所造成的。观察图 3e、3f, 断口呈现脆性断裂的迹象, 粘接结构明显减小, PI 颗粒之间的结合性减弱。另外, 在每个试样的断面处都能观察到的 GNS, 也证明了 GNS 会影响材料的结合性能。

2.3 GNS/多孔 PI 复合材料的含油特性

图 4 为 GNS/多孔 PI 复合材料的含油特性测试结果。含油率和含油保持率是衡量材料储油性能的两个重要指标。对比含油率的试验结果, 如图 4a 所示。因为少量 GNS 均匀分布在 PI 基体中, 占据了部分油液体积, 使得含油率降低。GNS 填料增加

后, 材料内部孔隙结构改变, GNS 团聚加重导致材料孔隙变大, 毛细作用力加强, 使得复合材料的含油率慢慢上升。另外, 由于 GNS 较大的比表面积使得复合材料的内比表面增大, 体现出更好的吸油能力。从材料的含油保持率来看, 与纯 PI 相比, GNS 的加入进一步提高了材料的含油保持率。同时, 为了更好地表征复合材料的含油特性, 通过压汞仪分别测试了纯 PI、0.1% GNS 和 1% GNS 的孔隙率和孔径大小, 如表 2 所示, 试验结果表明 0.1% GNS 和纯 PI 孔隙率相近, 而 1% GNS 的孔隙率从 13.8% 增加到

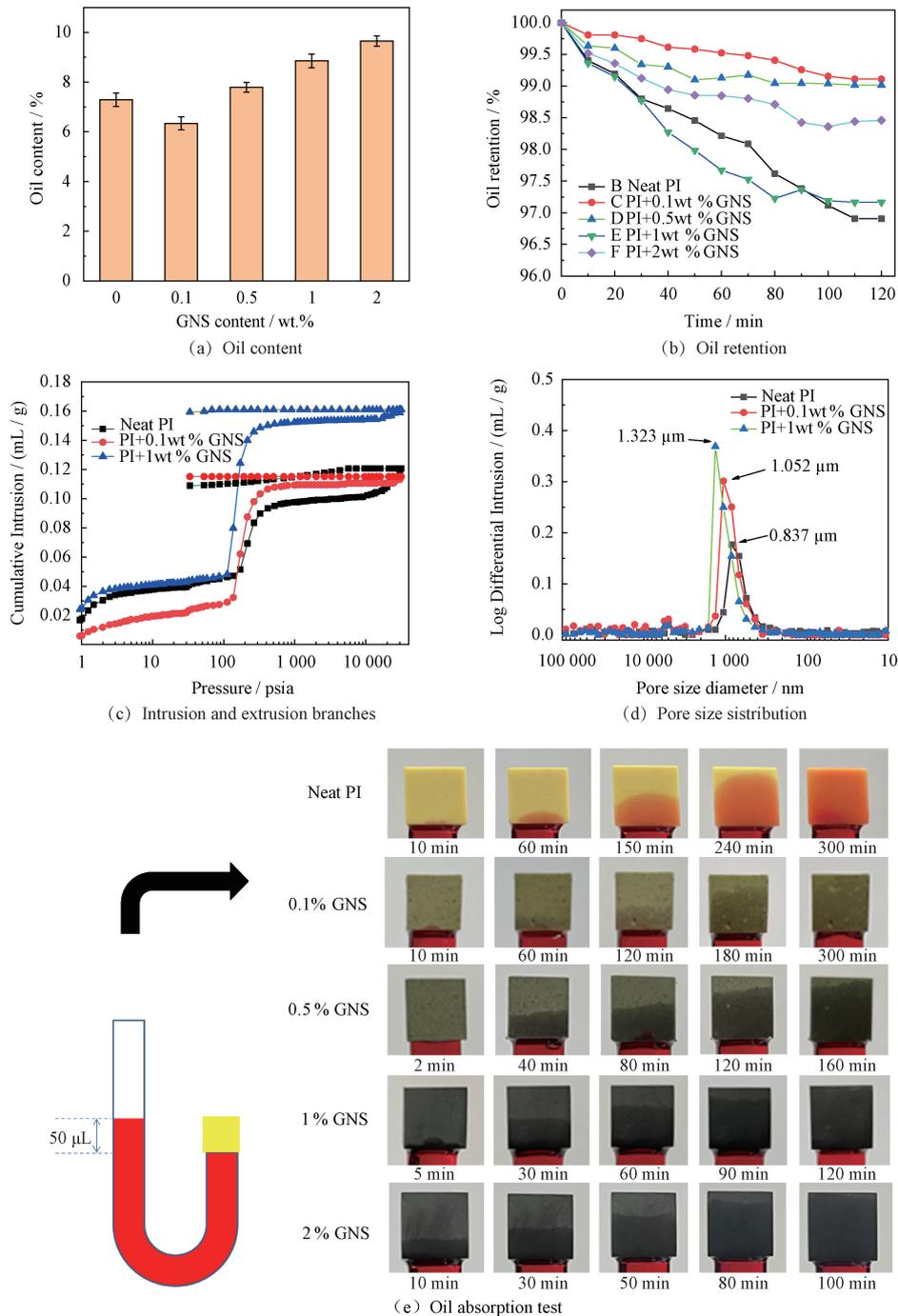


图 4 PI 及 GNS/多孔 PI 含油特性测试结果

Fig. 4 PI and GNS/porous PI oil characteristics test results

17.7%,且材料内部孔径随着 GNS 含量的增加而变大,如图 4d 所示,这印证了含油率的结果。另外,通过简易的吸油装置测试试样的吸油性能,如图 4e 所示,试验前调平液面,然后将试样放置在 U 型管右侧,从左侧管中注入 50 μl 油液。由于微孔产生的毛细作用力,U 型管中的润滑油能够自下而上地吸收到材料内部。通过记录不同时刻的液面高度,发现随着 GNS 含量的增加,材料块吸满油所花的时间越少。因为 GNS 对油液的吸附力更强,复合材料体现出更好的吸油效果,加快了材料的储油能力,含油保持率的结果也体现了这一点。

表 2 压汞仪测试结果

Table 2 Mercury porosimeter test results

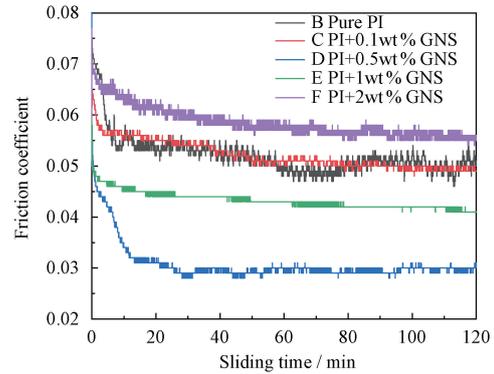
Sample	Pore size diameter/ μm	Porosity/%
Neat PI	1.323	13.83
0.1% GNS/porous PI	1.052	13.92
1% GNS/porous PI	0.837	17.73

2.4 GNS/多孔 PI 复合材料含油摩擦磨损性能

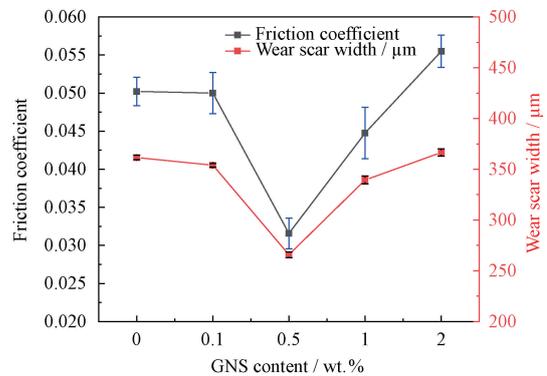
2.4.1 摩擦因数和磨痕宽度

图 5a 表示含油后的多孔复合材料通过摩擦试验后得到的摩擦因数。可以看到大约在 20 min 后,摩擦因数趋于平稳。另外,0.5% GNS/多孔 PI 复合材料表现出最好的摩擦性能。图 5b 给出了平均摩擦因数和磨痕宽度,对比于纯 PI 试样,加入 GNS 后,材料的平均摩擦因数先减小后增大,磨痕宽度与摩擦因数的变化一致。其中,当 GNS 含量为 0.5% 时,摩擦因数从 0.050 下降到 0.032,最低磨痕宽度为 265.8 μm ,与纯 PI 相比,降低了 26.5%。说明一

定量的 GNS 可以提高复合材料的摩擦学性能,少量的 GNS 作用微小,过量的 GNS 破坏了材料内部结构,不利于材料摩擦磨损的降低。



(a) Friction coefficient variation curve



(b) Average friction coefficient and wear scar width

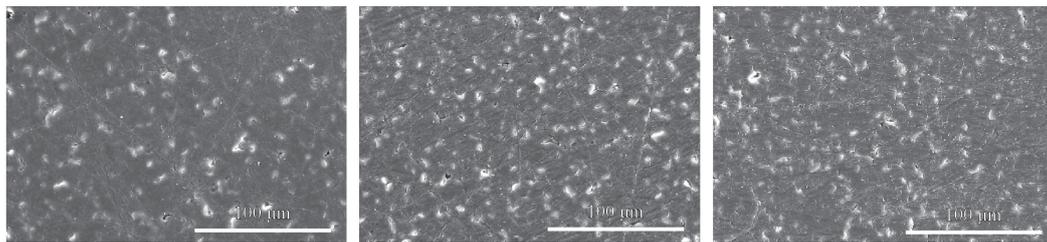
图 5 GNS/多孔 PI 复合材料含油摩擦性能测试结果

Fig. 5 GNS/porous PI composite oil-containing friction performance test results

2.4.2 摩擦磨损机理

(1) GNS/多孔 PI 试样表面

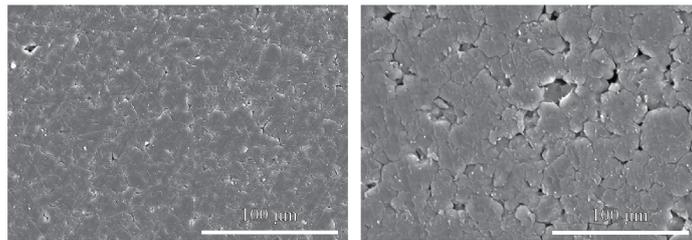
图 6 表示为不同 GNS 含量试样的表面形貌,可



(a) Neat PI

(b) 0.1% GNS / porous PI

(c) 0.5% GNS / porous PI



(d) 1% GNS / porous PI

(e) 2% GNS / porous PI

图 6 试样表面 SEM 照片

Fig. 6 SEM micrographs of sample surface

以看到所有表面均匀分布了一些孔洞,且随着 GNS 含量的增加,发现表面的孔径变大,GNS 含量超过 0.5% 时尤为明显,表面出现了裂缝和材料脱落的现象,如图 6d、6e 所示。这是因为 PI 颗粒与 GNS 颗粒之间的界面结合力小,导致 GNS 与 PI 之间有间隙,表面的材料容易脱落。

(2) GNS/多孔 PI 磨损形貌

通过 SEM 观察给出了不同 GNS 填料的试样含油摩擦后的磨损表面,如图 7 所示。可以看到磨损后的材料表面上出现很多开放式的大孔,未被磨屑填补或覆盖,且 SEM 下未观察到磨损区域

与未磨损区域的分界线,磨损较轻微。在图 7a 中,最显著的特征是孔洞的变大。由于储存在多孔结构中的润滑油在摩擦热和载荷的协同作用下被释放到材料表面,形成润滑油膜,且孔洞周围的材料受到更大的接触应力,容易脱落,导致表面孔隙变大。图 7b、7c 的磨痕形貌相似,表面的微孔更加密集。在图 7d 中,磨痕表面的裂缝进一步延伸,出现了较大孔。因为 GNS 的分布密度提高,产生局部应力集中,裂缝沿基体界面向边缘扩展。图 7e 中磨痕表面呈现龟裂状,出现大块的材料脱离现象,磨损加剧。

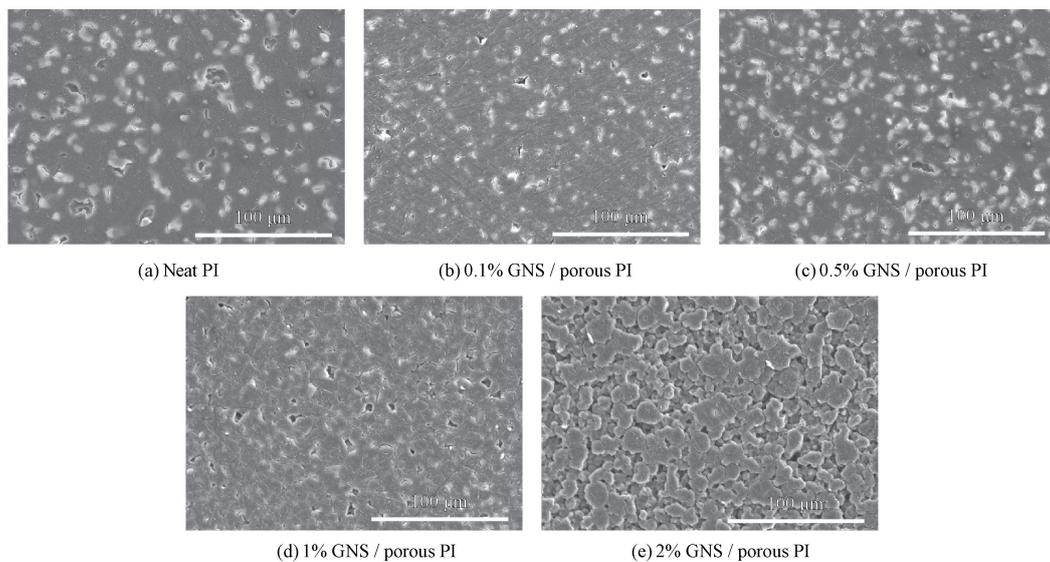


图 7 不同 GNS 含量的复合材料含油摩擦后的 SEM 磨损表面

Fig. 7 SEM wear surface of composite materials with different GNS content after oil-bearing friction

为了更好地对比材料的磨损情况,通过激光共聚焦显微镜表征了材料的三维形貌,如图 8 所示,发现纯 PI 磨痕深度明显,约为 $8\ \mu\text{m}$ 。加入 GNS 后,复合材料的磨痕深度进一步减小。其中,0.5% GNS/多孔 PI 的磨损表面几乎看不到磨损痕迹,在摩擦过程中,脱落的石墨烯微粒在摩擦副间起到了缓解摩擦力的作用。当 GNS 含量超过 0.5% 时,因为 GNS 与 PI 之间的界面结合性差,脱落的微粒逐渐增大,降低了润滑作用。

(3) 对磨球磨损形貌

图 9a₁~9e₁ 为含油摩擦后钢球表面形貌。可以发现,在摩擦试验 2 h 后,钢球上能清楚地看到油膜,说明所有试样均能稳定有效地向表面持续供油,避免了钢球和试样的直接接触,大大降低了摩擦因数,同时减小了材料的磨损。图 9a₂~9e₂ 为清洗后钢球表面,能观察到少量材料的粘附,且钢球表面能看到一些划痕。随着 GNS 含量的增加,对比发现

0.5% GNS 填料的试样摩擦后,钢球表面划痕最少,磨损最小,也证明填充 0.5% GNS 为最佳比例。

综合以上试验结果,可得出 GNS 对多孔 PI 材料摩擦润滑的影响机理。纯 PI 和 0.1% GNS 的摩擦曲线相似,钢球上观察到较多的划痕,这是因为试验开始时,金属小球表面微凸起与材料表面凸峰摩擦造成,这种点接触产生的犁耕作用明显,随着摩擦时间的延长,摩擦副接触方式改变,且油液顺着微孔渗出到摩擦表面,摩擦因数开始趋于稳定。通过比较纯 PI 和 0.1% GNS 的磨损表面和三位形貌图,可知 0.1% 的 GNS 没有起到明显的作用,可能原因为 GNS 含量较少,且均匀分布在 PI 基体中,微量 GNS 存在摩擦副之间难以发挥效果。加入 0.5% GNS 后,摩擦曲线较纯 PI 稳定,GNS 颗粒的加入,细化了 PI 磨屑,少量的 GNS 可以保持润滑的稳定性。同时,GNS 增大了材料的孔径,润滑油在毛细作用力下以更快的速度释放,形成稳定的润滑油膜,石墨烯

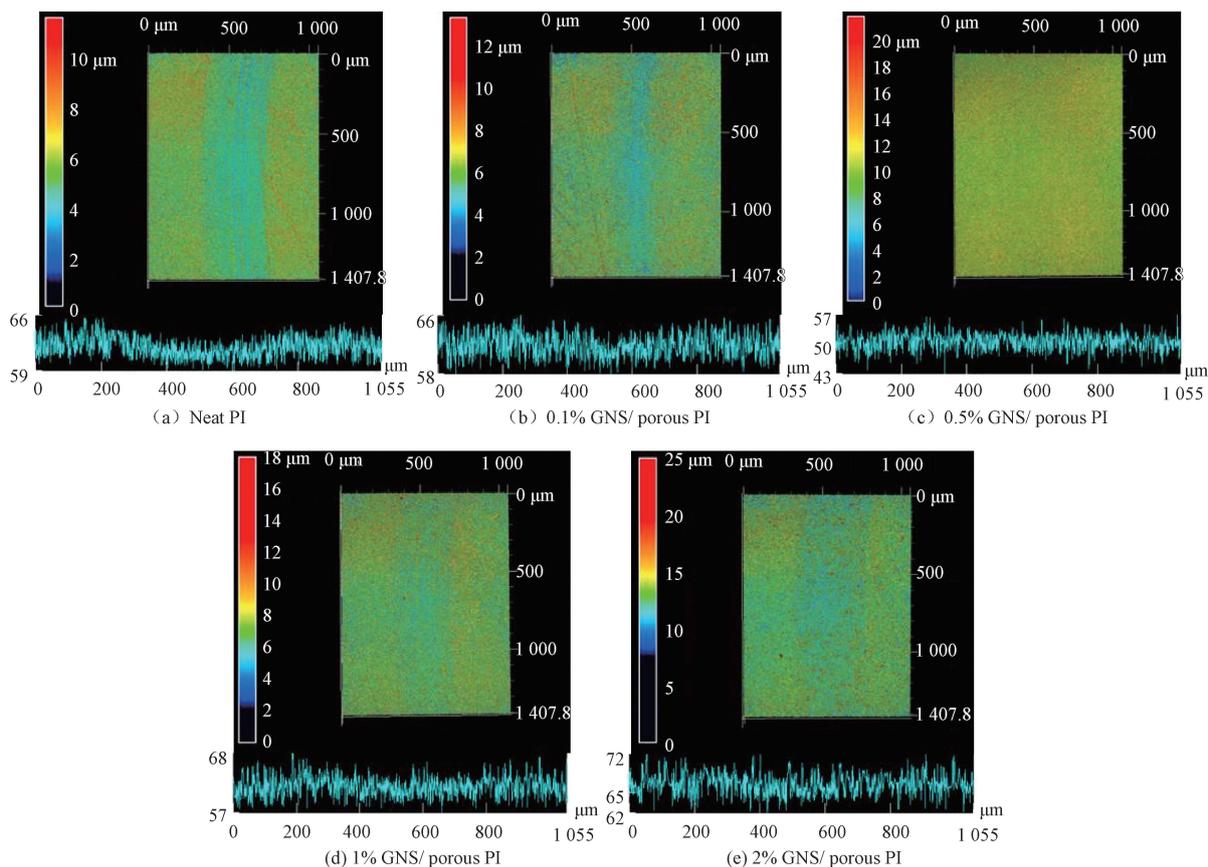


图 8 不同 GNS 含量的复合材料含油摩擦后磨痕三维形貌图

Fig. 8 Three-dimensional topography of wear scars of composites with different GNS content after oil-bearing friction

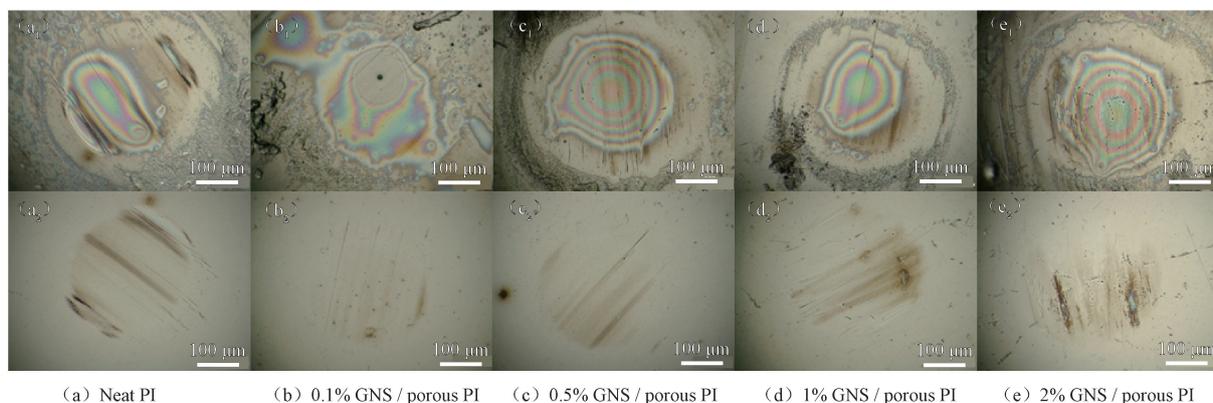


图 9 光学显微镜下与不同 GNS/PI 多孔复合材料含油摩擦后的对磨球表面形貌

Fig. 9 The surface morphology of the grinding ball after friction with different GNS/PI porous composite materials under an optical microscope

与微量润滑油的协同作用降低了摩擦因数和磨痕宽度,此时复合材料表现出最佳的摩擦学性能。当 GNS 的含量超过 0.5% 时,摩擦因数开始增大。这是由于 GNS 的含量超过阈值,GNS 弱化了 PI 颗粒之间结合,材料的磨损加剧。在摩擦过程中,过量的 GNS 颗粒在对磨副中运动抑制了油膜的形成,磨屑的增加导致部分接触平衡被打破,不利于摩擦的降低。另外,孔径的进一步增大,使得润滑油的回流加

快,对油膜承载能力有一定的削弱。

3 结论

(1) 合理的 GNS 含量可以提高冲击强度。采用冷压烧结的方法,制备了 GNS/多孔 PI 复合材料。GNS 与 PI 混合后,GNS 会粘附于 PI 颗粒表面,少量的 GNS 可以提高冲击强度,GNS 含量较大会导致 PI 之间交联性减弱,降低材料的冲击强度。

(2) GNS 可提升复合材料的含油率和含油保持率。随着 GNS 填料的增加,复合材料内部孔径增大,材料体现的亲油性更强,增强了孔隙对润滑油的毛细作用。

(3) 当 GNS 含量为 0.5% 时,GNS、PI 及润滑油三者的协同润滑作用最好。相比纯 PI,摩擦因数明显减小,磨痕宽度也相应减小。

参 考 文 献

- [1] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C, et al. Advanced polyimide materials: Syntheses, physical properties and applications[J]. *Progress in Polymer Science*, 2012, 37(7): 907-974.
- [2] HUANG F, CORNELIUS C J. Polyimide-SiO₂-TiO₂ nanocomposite structural study probing free volume, physical properties, and gas transport[J]. *Journal of Membrane Science*, 2017, 542: 110-122.
- [3] ZHOU S G, LI W T, ZHAO W J, et al. Tribological behaviors of polyimide composite coatings containing carbon nanotubes and fluorinated graphene with hybrid phase or blend phase [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 147: 105800.
- [4] ZHANG D, WANG C, WANG Q H, et al. High thermal stability and wear resistance of porous thermosetting heterocyclic polyimide impregnated with silicone oil [J]. *Tribology International*, 2019, 140: 105728.
- [5] ZHANG X R, PEI X Q, WANG Q H. Friction and wear studies of polyimide composites filled with short carbon fibers and graphite and micro SiO₂ [J]. *Materials and Design*, 2009, 30 (10): 4414-4420.
- [6] MARCHETTI M, MEURISSE M H, VERGNE P, et al. Lubricant supply by porous reservoirs in space mechanisms[J]. *Tribology Series*, 2000, 38: 777-785.
- [7] WANG J Q, ZHAO H J, HUANG W, et al. Investigation of porous polyimide lubricant retainers to improve the performance of rolling bearings under conditions of starved lubrication [J]. *Wear*, 2017, 380-381: 52-58.
- [8] 邱维维, 孟祥宇, 王非, 等. 聚酰亚胺基自润滑材料与 WS₂-Ag 固体润滑膜的相容性[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(1): 55-62.
- QIU W W, MENG X Y, WANG F, et al. Compatibility of polyimide-based self-lubricating material and WS₂ - Ag solid lubricating film[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(1): 55-62. (in Chinese)
- [9] ZHAO G, HUSSAINOVA I, ANTONOV M, et al. Friction and wear of fiber reinforced polyimide composites[J]. *Wear*, 2013, 301(1-2): 122-129.
- [10] JIA W H, YANG S G, REN S L, et al. Preparation and tribological behaviors of porous oil-containing polyimide/hollow mesoporous silica nanospheres composite films [J]. *Tribology International*, 2020, 145: 106184.
- [11] 黄占凯. 碳纳米管填充聚合物多孔含油材料摩擦学性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- HUANG Z K. Research on the tribological properties of carbon nanotube filled porous polymer with oily material [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [12] SHI Y J, MU L W, FENG X, et al. The tribological behavior of nanometer and micrometer TiO₂ particle-filled polytetrafluoroethylene/polyimide [J]. *Materials and Design*, 2011, 32(2): 964-970.
- [13] LI X H, YAN S J, CHEN X, et al. Microstructure and mechanical properties of graphene-reinforced copper matrix composites prepared by in-situ CVD, ball-milling, and spark plasma sintering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 834: 155182.
- [14] 孔尚, 胡文敬, 李久盛. 石墨烯在 PAO 基础油中的摩擦学性能 [J]. *中国表面工程*, 2019, 32(3): 162-169.
- CHEN S, HU W J, LI J S. Tribological properties of graphene in PAO base oil [J]. *China Surface Engineering*, 2019, 32(3): 162-169. (in Chinese)
- [15] 李迎春, 程蓓, 邱明, 等. 不同石墨烯添加量下 MoS₂ 基复合涂层的摩擦磨损及耐腐蚀性能 [J]. *中国机械工程*, 2020, 31(20): 2437-2444.
- LI Y C, CHENG B, QIU M, et al. Friction, wear and corrosion resistance of MoS₂-based composite coatings with different graphene additions [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(20): 2437-2444. (in Chinese)
- [16] TIWARI S K, SAHOO S, WANG N N, et al. Graphene research and their outputs: Status and prospect [J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2020, 5(1): 10-29.
- [17] VERDEJ R, BERNAL M M, ROMASANTA L J, et al. Graphene filled polymer nanocomposites [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(10): 3301-3310.
- [18] 耿浩, 李金华, 刘宣勇. 石墨烯在表面工程领域的研究进展 [J]. *中国表面工程*, 2015, 28(1): 4-14.
- GENG H, LI J H, LIU X Y. Research progress of graphene in the field of surface engineering [J]. *China Surface Engineering*, 2015, 28(1): 4-14. (in Chinese)
- [19] HUANG T, XIN Y S, LI T S, et al. Modified graphene/polyimide nanocomposites: reinforcing and tribological effects. [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5 (11): 4878-4891.
- [20] ROY A, MU L W, SHI Y J. Tribological properties of polyimide-graphene composite coatings at elevated temperatures [J].

- Progress in Organic Coatings, 2020, 142: 105602.
- [21] WANG H, XIE G Y, ZHU Z G, et al. Enhanced tribological performance of the multi-layer graphene filled poly (vinyl chloride) composites [J]. Composites Part A, 2014, 67: 268-273.
- [22] 胡超, 徐静, 余家欣, 等. 氧化石墨烯/聚酰亚胺复合材料摩擦学行为及其机理研究 [J]. 摩擦学学报, 2020, 40(1): 12-20.
- HU C, XU J, YU J X, et al. Research on tribological behavior

and mechanism of graphene oxide/polyimide composite [J]. Tribology, 2020, 40(1): 12-20. (in Chinese)

作者简介: 李建勇, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为聚合物摩擦学。

E-mail: 572187102@qq.com

李锦棒(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 研究生导师。主要研究方向为压电驱动和聚合物摩擦学。

E-mail: lijibang@nbu.edu.cn