

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.06.004

改性石墨填充环氧复合材料的摩擦性能和力学性能

焦晓岚¹, 邓鑫^{1,2}, 郑玲¹, 周依莎¹

(1. 中南林业科技大学材料科学与工程学院, 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学材料表面科学与技术湖南省重点实验室, 长沙 410004)

摘要: 为了提高石墨与环氧树脂 (EP) 的界面粘接能力, 使用异氰酸酯和硅烷偶联剂对石墨进行联合改性, 并探究了改性石墨 (MG) 对 EP 的磨损行为影响。通过傅里叶变换红外光谱仪测试和扫描电子显微镜 (SEM) 测试证实了二苯甲烷二异氰酸酯和硅烷偶联剂 KH550 成功接枝到石墨上, 并形成了杏叶状石墨。又通过拉伸性能测试、冲击测试、摩擦磨损测试和 SEM 表征, 分析了 MG 含量和界面形态对 EP/MG 复合材料摩擦磨损性能的影响, 评估了磨损的机理。最后得出, MG 质量含量为 4% 时, EP/MG 复合材料的拉伸强度达到最大值 38.527 MPa, 是纯 EP 的 2.17 倍。MG 质量含量为 6% 时, EP 复合材料冲击强度达到最大值 19.777 kJ/m², 是纯 EP 的 2.77 倍, 并且载荷为 40 N 时, MG 质量含量为 6% 的 EP/MG 复合材料的摩擦磨损性能最好, 磨损率最低达到 $3.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。摩擦磨损的主要机理是粘着磨损。

关键词: 石墨; 环氧树脂材料; 磨损机理; 改性

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)06-0019-06

Tribological and Mechanical Properties of Modified Graphite Filled Epoxy Resin Composites

Jiao Xiaolan¹, Deng Xin^{1,2}, Zheng Ling¹, Zhou Yisha¹

(1. School of materials science and engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Key Laboratory of Material Surface Interface Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract : In order to improve the interfacial bonding ability between graphite and epoxy resin, graphite was modified by using isocyanate and silane coupling agent, and the effect of modified graphite (MG) on the wear behavior of epoxy resin (EP) was investigated. Fourier transform infrared spectrometer test and scanning electron microscope (SEM) test confirm that diphenylmethane diisocyanate and silane coupling agent KH550 are successfully grafted onto graphite and form apricot-leaf graphite. The effects of MG content and interface morphology on the friction and wear properties of EP/MG composites were analyzed by tensile test, impact test, friction and wear test and SEM, and the wear mechanism was evaluated. Finally, the tensile properties of EP/MG composite with 4% MG content reach the maximum 38.527 MPa, which is 2.17 times that of pure EP. When MG content is 6%, the maximum impact strength reaches 19.777 kJ/m², which is 2.77 times that of pure EP, and the friction and wear performance of EP/(6%MG) composite is the best, with the lowest wear rate reaching $3.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$. The main mechanism of friction and wear is adhesive wear.

Keywords : graphite ; epoxy composite ; wear mechanism ; modification

机械系统,如汽车发动机、摩擦齿轮、离合器和机床导轨,都与摩擦材料密切相关。对摩擦材料进行摩擦磨损试验,使其正常工作和延长使用寿命是

一个研究方向^[1-2]。设计摩擦系数稳定、磨损率低、噪音低的高性能摩擦材料是热点研究方向^[2-3]。目前,在工业应用中,聚合物复合材料已逐渐占据主要

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (51203193), 材料表面科学与技术湖南省重点实验室开放课题

通信作者: 邓鑫, 博士, 副教授, 主要研究方向为高分子复合材料成型与加工

收稿日期: 2022-04-06

引用格式: 焦晓岚, 邓鑫, 郑玲, 等. 改性石墨填充环氧复合材料的摩擦性能和力学性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(6):19-24.

Jiao Xiaolan, Deng Xin, Zheng Ling, et al. Tribological and mechanical properties of modified graphite filled epoxy resin composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6):19-24.

地位。这是因为纤维、填料和固体润滑剂的加入使复合材料具有更稳定摩擦系数和良好的耐磨性^[4]。纤维增强聚合物复合材料摩擦磨损过程存在微耕、微切削、微疲劳和微裂纹4种不同磨损机制^[5]。这几种机理可用来研究如何提高复合材料摩擦磨损性能。环氧树脂(EP)具有工业应用广泛、力学性能好、热稳定性高、附着力高等优点^[6],但由于其三维网络结构和表面特性较差,不能直接用作耐磨材料^[7-8]。添加填料和固体润滑剂是解决这一问题的重要途径。研究表明,润滑填料主要作用是降低表面能,但同时会产生弱键,导致强度降低^[9]。许多研究者对EP基摩擦材料进行了研究。田晋等^[10]用功能化的纳米二氧化硅(T-SiO₂)增强EP可以有效提高复合材料的耐磨性,当T-SiO₂含量较小时,磨损机制主要为微观脆性断裂磨损,其含量较高时磨损机制主要为疲劳磨损。王春红等^[11]以纳米SiO₂粒子和竹纤维作为填料,制备了EP基复合材料,同等条件下,复合材料的体积磨损比纯EP的降低了75%。

石墨是一种相对廉价的填料,将其作为填料用于研究更有利于工业应用。目前,研究石墨增强树脂复合材料的人很多。石墨有助于降低摩擦系数和磨损率。然而,不同的加工方法和不同的石墨形态对复合材料的影响是不同的。李秀兵等^[12]用鳞片状石墨增强EP,磨损体积下降了两个数量级。Bao等^[13]使用氨基处理过的石墨烯填充EP,摩擦系数比纯树脂低57.9%,磨损率比纯树脂低92.2%,极大提高了复合材料的耐磨性。Alajmi等^[14]制备了0%~7%质量含量的石墨填充环氧复合材料,研究了石墨含量对环氧复合材料摩擦性能的影响。结果表明,石墨含量为3%时,复合材料的表面粗糙度较低,而含量>5%对复合材料的表面粗糙度有负面影响。Kadiyala等^[15]对采用溶液浸渍技术改性的石墨粉与未改性石墨粉填充环氧复合材料进行对比分析,发现石墨改性后的环氧复合材料具有良好的电阻阻性。张恩等^[16]研究了不同石墨含量增强酚醛树脂材料的耐磨性,结果表明石墨在试样磨损的表面形成一层致密的润滑层,从而可以降低磨损率和稳定摩擦系数。以上研究表明,石墨的改性对于复合材料是非常重要的,不同的改性处理会影响其复合材料的性能。因此,有必要寻找一种更有效的填料改性方法来降低摩擦系数,提高其抗磨效果。笔者使用二苯基甲烷二异氰酸酯(MDI)和KH550对石墨进行联合改性,成功获取了杏叶状石墨,提高

了粘结能力,并探究了改性石墨(MG)含量和界面形态对EP/MG复合材料摩擦磨损性能的影响,评估了磨损的机理。

1 实验部分

1.1 主要原材料

EP:E51,工业品,定远县丹宝树脂有限公司;
丙酮:分析纯,国药控股有限公司;
甲基膦酸二甲酯:分析纯,西隆科技有限公司;
KH550 偶联剂:分析纯,国药控股有限公司;
石墨粉:工业品,200目,东凯石墨有限公司;
MDI:分析纯,株洲时代新材料科技有限公司;
N,N-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,西龙股份有限公司;

端羧基液体丙烯腈橡胶:工业品,靖江同高化工有限公司;

2-乙基-4-甲基咪唑:工业品,滁州汇盛电子材料有限公司。

1.2 主要设备及仪器

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Bruker Vector 33型,德国Bruker AXS公司;

万能拉力试验机:WDW-10型,济南新试金试验机有限公司;

简支梁冲击试验机:XJJ-50型,承德试验机有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):MAIA 3XMH型,泰思肯有限公司;

摩擦磨损试验机:MC-200型,北京中航鼎力仪器设备有限公司。

1.3 实验方法

(1) 石墨的改性。

将MDI,DMF和石墨粉按质量比5:20:1加入三颈烧瓶中。将溶液在80℃真空搅拌1h,冷却至40℃后加入KH550(与MDI等物质的量),真空搅拌1h后抽滤出粉末,放入真空烤箱烘干。干燥后,将上述粉末置于DMF与丙酮体积比为1:1的混合溶液中浸泡8h后干燥,得到MG。

(2) EP/MG复合材料的制备。

将EP与羧基端液体丙烯腈橡胶(质量比为5:1)在200℃下混合搅拌150min,然后加入甲基膦酸二甲酯(其质量为EP的5%),不同质量含量的MG(0,2%,4%,6%,8%),继续混合搅拌15min,最后加入固化剂2-乙基-4-甲基咪唑(其质量为EP的20%)搅拌均匀后倒入模具中,在真空干燥箱

65℃下放置 4 h,即得到 EP/MG 复合材料。

1.4 性能测试

(1) FTIR 测试。

将石墨与 MG 分别与溴化钾混合压片,在波数范围 $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 测量,并根据特征吸收峰判断石墨是否改性成功。

(2) 力学性能测试。

拉伸性能按 GB/T 2567-2008 测试,以 2 mm/min 测试速率进行,样条尺寸 $50 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。冲击性能按 GB/T 2567-2008 测试,样条尺寸 $10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,V 型缺口。

(3) 摩擦磨损测试。

所有摩擦磨损试件均按 GB/T 3960-2016 标准制作,耐磨板的半径为 40 mm 。在 $40 \sim 70 \text{ N}$ 的载荷下,滑动速度为 50 r/min ,进行了滑动试验。测试时间为 3600 s 。通过记录失重来测量磨损程度,然后通过测量样品密度将上述数据转换为磨损体积。

(4) SEM 测试。

在 EP/MG 复合材料的冲击断面和磨损表面溅射一层薄薄的金后,用 SEM 观察表面形貌,观察冲击断面时加速电压为 10 kV ,观察磨损表面时加速电压为 5 kV 。

2 结果与讨论

2.1 石墨表面改性

图 1 为纯石墨和 MG 的 FTIR 谱图。由图 1 可知,—NH 拉伸峰出现在 3354 cm^{-1} 附近;—NCO—拉伸振动峰值出现在 2279 cm^{-1} 附近^[17]。纯石墨几乎没有峰,只在 1545 cm^{-1} 处出现一个峰,这是一— NO_2 拉伸振动峰。石墨经改性处理后,光谱出现了 3304 cm^{-1} (N—H), 2367 cm^{-1} (—NCO), 1640 cm^{-1} (—C=O), 1597 cm^{-1} (—C=H), 1545 cm^{-1} (— NO_2), 1408 cm^{-1} (C—H), 1300 cm^{-1} [—C(OH)₃], 1228 cm^{-1} [—Si(CH₃)₂O—] 等几个峰^[18-24]。结果显示,MDI 和 KH550 对石墨改性成功,将更多亲水官能团接枝到石墨上,使表面有更多机会与基体接触,结合良好。

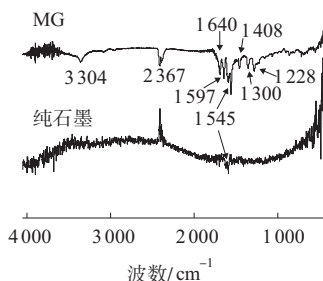


图 1 纯石墨和 MG 的 FTIR 谱图

图 2 为纯石墨和 MG 的 SEM 图。由图 2 可知,未处理的石墨薄片呈层状,表面光滑;而经过处理的石墨片更薄,薄片之间的间隙变小,呈现叠叶形状,单片面积减少。这些变化有助于增加比表面积,提高表面粗糙度,提高界面粘接性能,使其在后续实验中能更好地与 EP 粘接。同时,树脂与增强材料之间的亲和力也得到了提高,引入的官能团可以提高界面结合性能。

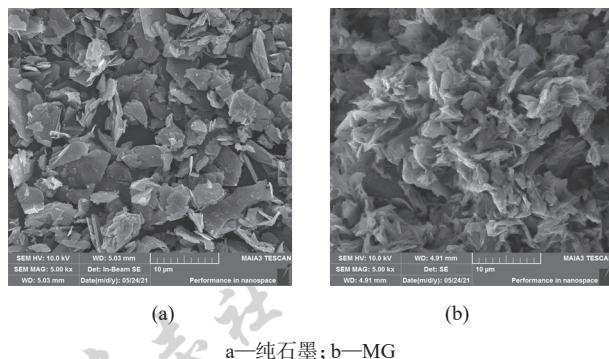


图 2 纯石墨和 MG 的 SEM 图

2.2 力学性能

加入不同填料可以有效地改善 EP 复合材料的力学性能,如图 3 所示,随着 MG 加入,拉伸强度逐渐增大。在 MG 质量含量为 4% 时,EP/MG 复合材料拉伸强度达到最大值 38.527 MPa ,是纯 EP 的 2.17 倍。然后急剧下降,在 MG 为 8% 时 EP/MG 复合材料的拉伸强度逐渐提高,这可能是由于填充剂的均匀加入,有效地降低了复合材料的应力,避免了脆性^[25]。而 MG 含量大时,MG 在 EP 基体中的分散性变差,MG 团聚导致拉伸强度急剧下降^[26]。材料韧性的指标是冲击强度。随着 MG 的加入,EP/MG 复合材料的缺口冲击强度逐渐增加,MG 含量在 6% 时达到最大值 19.777 kJ/m^2 ,是纯 EP 树脂的 2.77 倍,在 8% 时又略微下降。Dungani 等^[27]指出,当填料增加时,由于表面官能团的存在,会产生更高的团聚体,这将显著降低纳米复合材料性能。

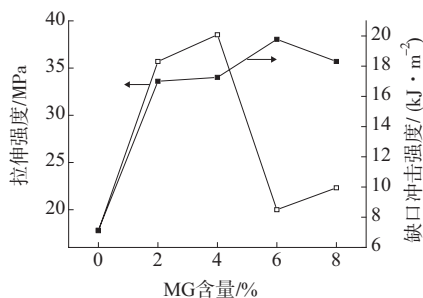


图 3 不同 MG 含量时复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度

图 4 为不同 MG 含量的 EP 复合材料冲击断面 SEM 表征。由图 4 可知,材料断口表面主要表现为表面剥落和拉出。随着 MG 含量的增加,片层截面逐渐增大,可以清楚地看到石墨的存在。石墨的存在对 EP 基体有一定的约束关系,这使得 EP 断裂强度有了小幅提高。石墨片层与 EP 基体结合,截面逐层重叠。基体限制了石墨的脱落,石墨也限制了基体的拔出。MG 含量较少,冲击强度在小范围内得到了提高。而大量 MG 可能会导致团聚,在冲击过程中集体破碎,导致复合材料出现微小脱落。

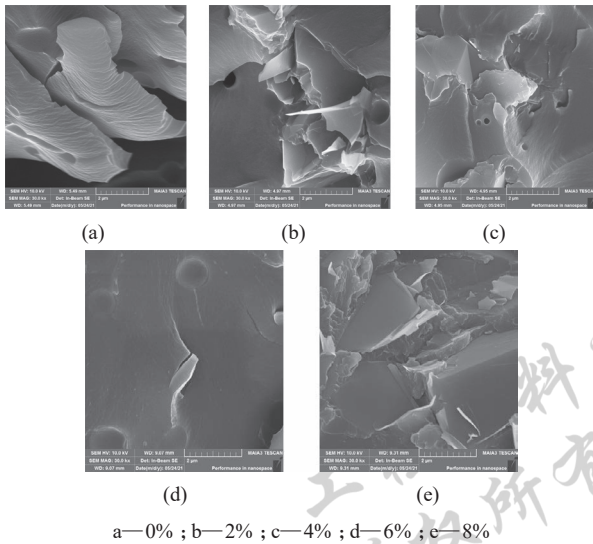


图 4 不同 MG 含量时 EP 复合材料冲击截面 SEM 表征

2.3 摩擦性能

表 1 和表 2 分别为不同 MG 含量 (0%, 2%, 4%, 6%, 8%) 的 EP/MG 复合材料在 40, 50, 60, 70 N 载荷下的平均摩擦系数和体积磨损率。

表 1 不同 MG 含量时 EP 复合材料在不同载荷下的平均摩擦系数

MG 质量 含量 /%	载荷 /N			
	40	50	60	70
0	0.16	0.14	0.13	0.1
2	0.15	0.14	0.13	0.12
4	0.2	0.12	0.14	0.12
6	0.12	0.13	0.1	0.1
8	0.14	0.15	0.11	0.11

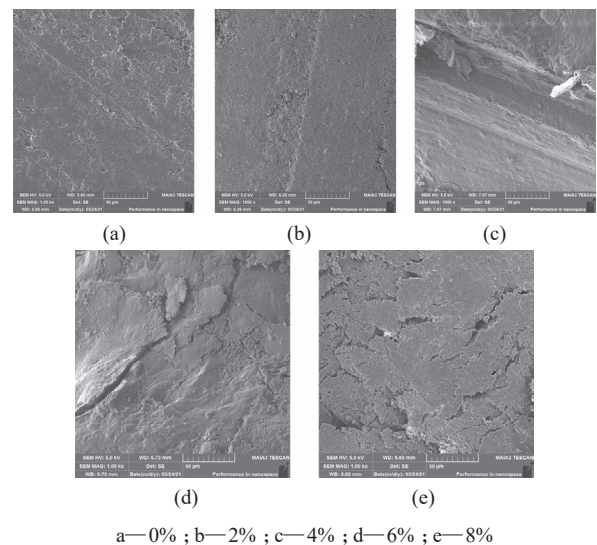
由表 1 和表 2 可知,在 40 N 载荷下,含 MG 为 6% 的 EP 复合材料的摩擦磨损性能最好,平均摩擦系数为 0.12,体积磨损率为 $3.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,磨损率比纯树脂低 15%。50 N 载荷下, MG 在 4% 时复合材料平均摩擦系数达到最小值 0.12; 2% 时复合材料磨损率最低,为 $1.4 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。60 N 载荷下,含 MG 为 6% 的 EP 复合材料的平均

摩擦系数最小,为 0.1,最小磨损率为 $0.0015 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。70 N 载荷下,含 MG 为 6% 的 EP 复合材料与纯 EP 的平均摩擦系数均为 0.1,含 MG 为 4% 的 EP 复合材料的最小磨损率为 $0.0016 \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。总体而言,含 MG 为 6% 的 EP 复合材料的摩擦磨损性能最好。

表 2 EP 复合材料在不同载荷下体积磨损率 $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$

MG 含量 /%	载荷 /N			
	40	50	60	70
0	0.0021	0.0019	0.0036	0.0022
2	3.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}	0.0068	0.0032
4	4.8×10^{-4}	4.2×10^{-4}	0.0019	0.0016
6	3.2×10^{-4}	0.0026	0.0015	0.0027
8	0.0021	0.0031	0.0029	0.0019

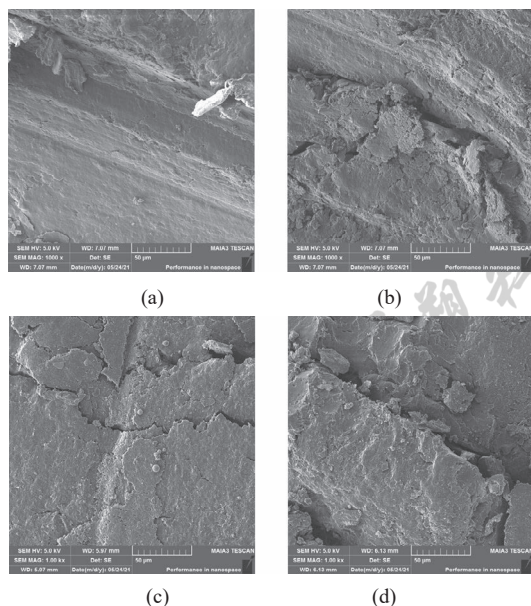
为进一步研究改善耐磨性能的可能机制,对纯 EP 和 EP/MG 复合材料磨损表面进行了 SEM 图像采集。图 5 显示了纯 EP 和含有 2%, 4%, 6%, 8% MG 的 EP/MG 复合材料磨损表面 SEM 图。由图 5 可知,纯 EP 树脂表面光滑,摩擦盘对材料挤压疏松,从图 5b、图 5c 可以看到痕迹周围有裂纹,图 5d 中的道迹比前几道更密,裂纹也分布在道迹周围;在图 5e 中,过多的 MG 被 EP 压实,从而产生更大的裂缝。在 40 N 负载、50 r/min 条件下,可以看到大量的片状磨屑。这种磨损机制主要是粘着磨损和疲劳磨损^[28-29]。MG 含量为 6% 时具有较好的分散性,并且 MG 的加入有助于 EP/MG 复合材料减少摩擦, MG 能有效传递应力,防止裂纹的萌生,保持摩擦接触面高的完整性。结合表 1 和表 2 的实验数据,总体而言,含 MG 为 6% 的 EP 复合材料的摩擦磨损性能最好。



a—0% ; b—2% ; c—4% ; d—6% ; e—8%

图 5 不同 MG 含量时 EP/MG 复合材料 SEM 形貌

图6为含MG为6%的EP复合材料在不同载荷下的SEM形貌图。由图6可知,随着载荷的增加,磨损失效机理不断发生变化。由图6a可知,40 N载荷条件下,主要为两侧磨粒散射方式;从图6b可以看出,裂纹在轨道附近产生,并以块状向一侧移动;图6c中的轨迹清晰可见,排列整齐。随着载荷的增加,磨损率也随之增加。其原因可能是载荷的增加导致磨损磨屑的增加;在图6d中,摩擦后可以看到大块的薄片,可能是载荷太大,导致材料移位和滑动所致。总之,当圆盘对试样施加压力并旋转时,会发生相对摩擦,首先,在EP表面形成的薄膜被破坏,随着内部石墨的出现,摩擦系数会变小,石墨慢慢剥落,然后发生粘着磨损。



a—40 N; b—50 N; c—60 N; d—70 N

图6 含MG为6%的EP复合材料在不同载荷下的SEM形貌

3 结论

研究了EP/MG复合材料制备工艺对摩擦磨损性能的影响,得出如下结论:

(1) 用MDI和KH550对石墨进行改性,并通过FTIR和SEM对其进行表征。证实EP成功地接枝到石墨上,形成杏叶状石墨,有利于提高粘结能力。

(2) EP/MG复合材料的拉伸性能先升高后降低。含MG为4%的EP复合材料达到最大值38.527 MPa;随着MG的加入,冲击强度逐渐提高,在含MG为6%的EP复合材料中,缺口冲击强度最大值为19.777 kJ/m²,是纯EP的2.77倍。

(3) EP/MG复合材料的摩擦磨损性能试验表明,含MG为6%的EP复合材料的摩擦磨损性能

最好,摩擦磨损的主要机理是粘着磨损。

参考文献

- [1] Wang H, Xie X, Hua X, et al. Analysis of the lubrication process with composition of solid lubricants of laser-modified sliding surfaces[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(4):1–11.
- [2] Ma Y, Liu Y, Wang L, et al. Performance assessment of hybrid fibers reinforced friction composites under dry sliding conditions[J]. *Tribology International*, 2018, 119:262–269.
- [3] Cai P, Wang T, Wang Q. Effect of several solid lubricants on the mechanical and tribological properties of phenolic resin - based composites[J]. *Polym Composite*, 2014, 36(12):2 203–2 211.
- [4] Zhang H J, Zhang Z, Guo F. Studies of the influence of graphite and MoS₂ on the tribological behaviors of hybrid PTFE/nomex fabric composite[J]. *Tribology Transactions*, 2011, 54(3):417–423.
- [5] Gahr K H Z. Wear by hard particles[J]. *Tribology International*, 1998, 31(10):587–596.
- [6] Gu H, Ma C, Gu J, et al. An overview of multifunctional epoxy nanocomposites[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2016, 4(25):5 890–5 906.
- [7] Dasari A, Yu Z Z, Mai Y W. Fundamental aspects and recent progress on wear/scratch damage in polymer nanocomposites[J]. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2009, 63(2):31–80.
- [8] Sosnovskii S V, Mikhnevich A S, Sel' kin V P. Effect of reinforcing epoxy coatings with carbon cloth on their wear under great loads[J]. *Journal of Friction and Wear*, 2015, 35(6):465–469.
- [9] Hao Y, Zhou X, Shao J, et al. The influence of multiple fillers on friction and wear behavior of epoxy composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 362:213–219.
- [10] 田晋,高立,蔡滨,等. 功能化纳米SiO₂改性环氧树脂复合材料及其摩擦磨损行为与机制[J]. *材料工程*, 2019, 47(11):92–99.
- Tian Jin, Gao Li, Cai Bin, et al. Tribological behavior and wear mechanism of modified nano-SiO₂ reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(11):92–99.
- [11] 王春红,王利剑,任子龙,等. SiO₂-竹纤维协同改性对环氧树脂树脂基复合材料摩擦磨损性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(7):1 633–1 639.
- Wang Chunhong, Wang Lijian, Ren Zilong, et al. Effect of SiO₂-bamboo fiber synergistic modification on friction and wear properties of epoxy resin matrix composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(7):1 633-1 639.
- [12] 李秀兵,高义民,邢建东,等. 树脂基复合材料中石墨与MoS₂的减摩作用机理[J]. *西安交通大学学报*, 2004(5):452–456.
- Li Xiubing, Gao Yimin, Xing Jiandong, et al. Antifriction mechanism of graphite and MoS₂ in epoxy composites[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004(5):452–456.
- [13] Bao T, Wang Z, Zhao Y, et al. Friction and mechanical properties of amino-treated graphene-filled epoxy composites:modification conditions and filler content[J]. *RSC Advances*, 2020,

- 45(10):26 646–26 657.
- [14] Alajmi M, Alrashdan K R, Alsaeed T, et al. Tribological characteristics of graphite epoxy composites using adhesive wear experiments[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6):13 671–13 681.
- [15] Kadiyala A K, Bijwe J. Surface lubrication of graphite fabric reinforced epoxy composites with nano-and micro-sized hexagonal boron nitride[J]. *Wear*, 2013, 301(1-2):802–809.
- [16] 张恩, 高飞. 石墨对酚醛树脂材料摩擦性能的影响[J]. *大连交通大学学报*, 2021, 42(5):80–83.
Zhang En, Gao Fei. Tribological properties of graphite for phenolic resin-based friction composites[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2021, 42(5):80–83.
- [17] Suwan A, Sukhawipat N, Uthaipan N, et al. Some properties of experimental particleboard manufactured from waste bamboo using modified recycled palm oil as adhesive[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 149. DOI.10.1016/j.porgcoat.2020.105899.
- [18] Baptista R, Mendão A, Rodrigues F, et al. Effect of high graphite filler contents on the mechanical and tribological failure behavior of epoxy matrix composites[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2016, 85:113–124.
- [19] Zhang Y, Sun T, Zhang D, et al. Enhanced photodegradability of PVC plastics film by codoping nano-graphite and TiO_2 [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 181. DOI.10.1016/j.polymdegradstab.2020.109332.
- [20] Ghazi M L, Ganjaee S M, Ramezanzadeh B. Polyester-amide hyperbranched polymer as an interfacial modifier for graphene oxide nanosheets: Mechanistic approach in an epoxy nanocomposite coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2020. DOI.10.1016/j.porgcoat.2020.105573.
- [21] Rawat P S, Srivastava R C, Dixit G, et al. Structural, functional and magnetic ordering modifications in graphene oxide and graphite by 100 MeV gold ion irradiation[J]. *Vacuum*, 2020, 182. DOI.10.1016/j.vacuum.2020.109700.
- [22] Fang S, Feng G, Guo Y, et al. Synthesis and application of urethane-containing azo disperse dyes on polyamide fabrics[J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 176. DOI.10.1016/j.dyepig.2020.108225.
- [23] Sun J, Li L, Yu R, et al. Synthesis and microwave absorption properties of sulfur-free expanded graphite/ Fe_3O_4 composites[J]. *Molecules*, 2020, 25(13). DOI.10.3390/molecules25133044.
- [24] Zheng X, Cai Z, Lyu Z, et al. Synthesis of Si-containing macro-RAFT agent for the water-borne polyacrylate polyurethane with anti-graffiti coating applications[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 25. DOI.10.1016/j.mtcomm.2020.101590.
- [25] Tao P, Li J, Li J, et al. Enhanced performance of rosin-based epoxy composites mixed with carbon nanotubes and cork powders from oriental oak bark[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 158. DOI.10.1016/j.indcrop.2020.113051.
- [26] Fan J, Yang J P, Wang L T, et al. Enhanced mechanical properties of epoxy nanocomposites with mildly surface-functionalized graphene oxide by tuned amine species[J]. *Appl Surf Sci*, 2021, 558. DOI.10.1016/j.apsusc.2021.149964.
- [27] Dungani R, Sumardi I, Alamsyah E M, et al. A study on fracture toughness of nano-structured carbon black-filled epoxy composites[J]. *Polymer Bulletin*, 2020. DOI.10.1007/s00289-020-03444-5.
- [28] Basavarajappa S, Ellangovan S. Dry sliding wear characteristics of glass-epoxy composite filled with silicon carbide and graphite particles[J]. *Wear*, 2012, 296(1-2):491–496.
- [29] Dhieb H, Buijnsters J G, Eddoumy F, et al. Surface damage of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy composites under reciprocating sliding in ambient air[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(15):1 769–1 776.