

纳米 G/Fe₃O₄ 复合材料的 制备及其摩擦学性能

Preparation and tribological property
of nano-G/Fe₃O₄ composites

杨礼河^{1,2}, 陈绪望², 张建国², 孙玉德¹

(1 天津大学 内燃机研究所, 天津 300072; 2 天津大学
机械工程学院, 天津 300072)

YANG Li-he^{1,2}, CHEN Xu-wang²,

ZHANG Jian-guo², SUN Yu-de¹

(1 Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin
University, Tianjin 300072, China; 2 School of Mechanical
Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘要: 以石墨烯和纳米 Fe₃O₄ 为原料, 采用化学修饰的方法制备石墨烯负载四氧化三铁(G/Fe₃O₄)复合材料。通过透射电镜、X 射线衍射仪、傅里叶红外光谱仪对复合材料进行表征; 在 SN 5W-30 润滑油中添加 G/Fe₃O₄ 复合材料, 利用等离子体光谱仪和四球摩擦试验机研究复合材料在润滑油中的分散稳定性和摩擦学性能。结果表明: 使用油酸和硅烷偶联剂 KH570 共同修饰生成的 G/Fe₃O₄ 复合材料在石墨烯表面分散效果比单独使用油酸修饰的好; 沉淀稳定性实验表明: 放置 10 d 后, 未添加复合材料的润滑油铁元素含量下降了 48.3%, 添加采用油酸修饰的复合材料铁元素含量下降了 39%, 添加采用油酸和 KH570 共同修饰的复合材料铁元素含量下降了 31.1%; 四球摩擦实验表明 G/Fe₃O₄ 复合材料作为润滑油添加剂具有良好的摩擦学性能, 使用油酸和 KH570 共同修饰的效果要比单独使用油酸修饰的好, 最大无卡咬负荷 P_B 增大了 6.5%, 磨斑直径减小了 4.4%, 摩擦因数降低了 4.8%。

关键词: G/Fe₃O₄; 磁性复合材料; 润滑油添加剂; 摩擦学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000746

中图分类号: TQ584+.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2021)02-0143-06

Abstract: Graphene loaded ferric oxide (G/Fe₃O₄) composites were prepared by chemical modification using graphene and nano-Fe₃O₄ as raw materials. The composites were characterized by transmission electron microscope, X-ray diffractometer and Fourier infrared spectrometer, and G/Fe₃O₄ composites were added to SN 5W-30 lubricating oil, and the dispersion stability and tribological properties of composites in lubricating oil were studied by plasma spectrometer and four ball friction tester. The results show that G/Fe₃O₄ composite materials generated by the co-modification of oleic acid and silane coupling KH570 are better dispersed on the graphene surface than with oleic acid modification alone; precipitation stability experiments show 10 days later, iron content in the lubricating oil is decreased by 48.3% without composite added, iron content is decreased by 39% with oleic acid modified composite added, and iron content is decreased by 31.1% with oleic acid and KH570 jointly modified composite; four-ball experiments show that G/Fe₃O₄ composites acting as lubricating oil additives have good tribological properties, the use of oleic acid and KH570 joint modification effect is better than the use of oleic acid modification, the maximum card-free bite load P_B is increased by 6.5%, the diameter of the mocha is decreased by 4.4% and the coefficient of friction is decreased by 4.8%.

Key words: G/Fe₃O₄; magnetic composite material; lubricant additive; tribological property

在发动机运行过程中, 机械损失占比仅次于排气
损失和冷却损失, 其中机械损失绝大部分以摩擦损失

的形式消耗, 优化发动机摩擦副主要从材料、结构、表
面涂层和润滑油四个方面进行。市场上常见的润滑油

添加剂,比如二烷基二硫代磷酸锌(ZDDP),虽然能有效减少摩擦,但是 ZDDP 中含有对环境有害的硫元素、磷元素以及其他重金属。目前车用润滑油朝着低磷低硫低灰分方向发展,同时由于环保要求提高,寻求减摩抗磨效果更好、更环保的润滑油添加剂显得尤为重要^[1]。

近年来,由于纳米材料科学与技术的发展,很多学者对纳米粒子在润滑领域进行了研究^[2]。纳米石墨烯具有独特的层状结构不仅具有良好的力学性能和电学性能,还具有良好的润滑和抗磨效果^[3]。在研究石墨烯的同时,学者们发现磁性材料同样具有良好的摩擦磨损性能。磁性纳米颗粒(Fe_3O_4)不仅具备纳米材料的特性,与非磁性颗粒润滑添加剂相比,还具有特有的磁性能^[4-6]。有学者将磁性材料和非磁性材料进行化学结合并研究结合后材料的摩擦学特性,研究结果发现结合后材料作为纯水和基础油添加剂时具有良好的减摩和抗磨性能^[2,7-8]。虽然纳米材料具有良好的摩擦学性能,但是研究发现纳米材料由于比表面积大、活性高、易团聚等缺点在润滑油中分散性较差,一般采用油酸、硅烷偶联剂等表面活性剂对纳米粒子表面进行改性修饰以改善其沉降稳定性^[7,9-10]。

本工作通过超声波细胞破碎机使石墨烯、 Fe_3O_4 混合均匀并加入油酸和硅烷偶联剂 KH570 等表面活性剂进行化学修饰的方法制备 G/ Fe_3O_4 复合材料,并用透射电镜、红外谱图和 X 射线衍射等表征手段去分析所制备材料的结构和性质。利用等离子体光谱仪监测铁元素含量的变化来评价所制备的复合材料在润滑油中的沉降稳定性;分别取两种不同改性方法制备的纳米复合材料与润滑油按质量比 0.01% 添加进行四球摩擦实验,考察复合材料作为润滑油添加剂的摩擦学性能。

1 实验方法

1.1 实验材料与制备方法

实验所用的试剂:去离子水;无水乙醇;纳米石墨烯(厚度 3~10 nm);纳米四氧化三铁粒子(直径 20 nm);油酸;硅烷偶联剂 KH570;所用试剂均为分析纯。

实验方法:以无水乙醇(90 mL)为溶剂加入 2 g 油酸,按一定质量比称取石墨烯和四氧化三铁添加到上述溶液中并充分振荡使其混合均匀记为溶液 A,将混合均匀的溶液 A 放入超声波细胞破碎机中进行超声剥离,工作参数为:功率 400 W,超声 2 s,间隔 2 s,运行时间 30 min。同时取 1.2 g 硅烷偶联剂 KH570 加

入 120 mL 去离子水中超声 15 min 进行水解反应,此时溶液记为 B。将经过超声剥离的溶液 A 和经过水解反应的溶液 B 加入三口烧瓶中进行化学修饰实验(只进行油酸修饰实验时不加溶液 B)。混合溶液超声 10 min 后放入恒温水浴锅中,在 80 °C 条件下反应 4 h,取出三口烧瓶进行过滤并洗至中性,将滤纸放入鼓风干燥箱中 80 °C 烘干 2 h 获得 G/ Fe_3O_4 复合材料。

1.2 结构表征与性能测试

用场发射透射电子显微镜(FEI Tecnai G2 F20)观察 G/ Fe_3O_4 复合材料的微观形貌。采用 XRD (Ultima IV)分析表征材料的物相组成,分析条件:扫描速率为 10.0 (°)/min,扫面范围为 5°~90°。用傅里叶红外光谱(NICOLET iS10)观察 G/ Fe_3O_4 复合材料中存在的官能团,测试条件:吸收光谱,波数范围为 400~4000 cm^{-1} 。用等离子体光谱仪 SPECTROBLUE 检测 G/ Fe_3O_4 复合材料在润滑油中的稳定性。

分别取两种不同改性方法制备的纳米复合材料与润滑油按质量比 0.01% 添加,在四球摩擦试验机(MS-10A)上考察 G/ Fe_3O_4 材料作为润滑油添加剂具有的摩擦磨损性能,实验钢球为直径 12.7 mm 的四球机专用钢球,材料为 GCr15 轴承钢,洛氏硬度为 64~66HRC。实验条件:392 N,1200 r/min,室温下运行 60 min。

2 结果与分析

2.1 G/ Fe_3O_4 纳米复合材料的表征

2.1.1 透射电镜(TEM)

图 1 是石墨烯的透射电镜图,可以看出,石墨烯具有不规则的多层片状结构,厚度不一且存在褶皱和弯曲。图 2(a)是油酸修饰制备的 G/ Fe_3O_4 复合材料的 TEM 图,可以看出纳米 Fe_3O_4 粒子呈球状,在石墨烯表层分布的位置较少且纳米 Fe_3O_4 粒子出现团聚现象。这可能是由于 Fe_3O_4 粒子比表面积大,分子之间作用力强导致的团聚,也可能是由于在进行化学修饰时与石墨烯和 Fe_3O_4 粒子表面发生反应的官能团达到饱和,未被修饰上的 Fe_3O_4 粒子停留在石墨烯表面导致^[11]。图 2(b)是油酸和 KH570 共同修饰制备的 G/ Fe_3O_4 复合材料,可以看出纳米 Fe_3O_4 粒子均匀分布在石墨烯表层,几乎没有发生团聚现象。 Fe_3O_4 粒子粒径在 20 nm 左右,形貌没有发生变化,且粒径比较均匀。从图 2(a),(b)可以看出油酸和 KH570 共同修饰制备的 G/ Fe_3O_4 复合材料中 Fe_3O_4 粒子分散效果比单独使用油酸修饰的好。

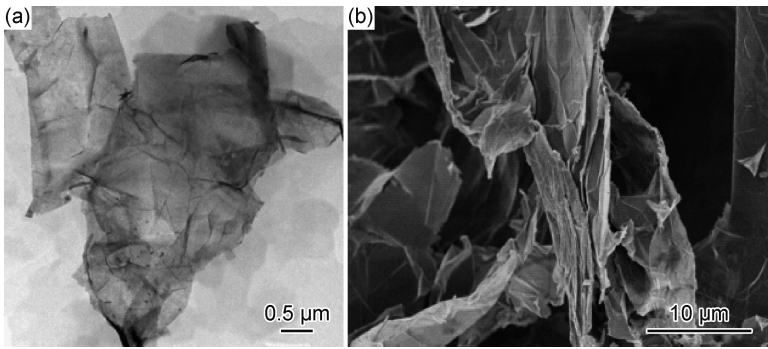


图 1 石墨烯的 TEM 照片 (a)低倍;(b)高倍

Fig. 1 TEM images of graphene (a)low magnification;(b)high magnification

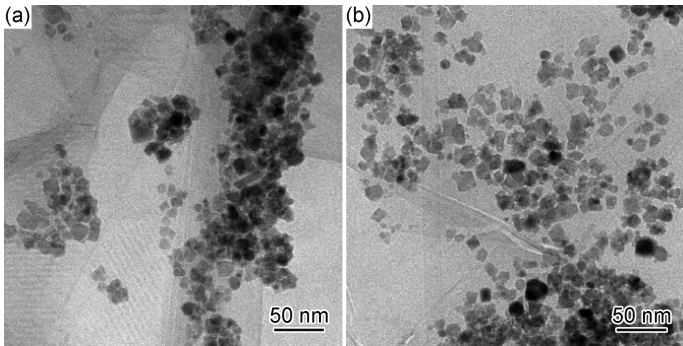


图 2 G/Fe₃O₄ 的 TEM 照片

(a)油酸改性;(b)油酸-硅烷偶联剂改性

Fig. 2 TEM images of G/Fe₃O₄

(a)oleic acid modification;(b)oleic acid-silane coupling agent modification

2. 1. 2 X 射线荧光衍射

图 3 是 Fe₃O₄、油酸修饰 G/Fe₃O₄ 和油酸加 KH570 共同修饰的 G/Fe₃O₄ 复合材料的 XRD 图谱。可以看出衍射角 $2\theta=26.81^{\circ}$ 是石墨烯的衍射吸收峰,对应的晶面为(002);Fe₃O₄ 具有 8 个特征峰对应着 8 个不同的晶面^[12];油酸修饰制备的 G/Fe₃O₄ 复合材料,油酸和 KH570 共同修饰制备的 G/Fe₃O₄ 复合材料都具有石墨烯和 Fe₃O₄ 的特征峰,且没有出现杂峰,说明制备的复合材料纯度较高^[13]。虽然采用两种修饰方法制备的 G/Fe₃O₄ 复合材料都存在石墨烯和 Fe₃O₄ 的特征峰,但是特征峰的强度是不同的,采用油酸修饰制备的复合材料,这种差别可能是由于 Fe₃O₄ 晶面表面能较大,与硅烷偶联剂发生反应造成晶面强度的降低,同时复合材料中的固相含量也会影响衍射强度。

2. 1. 3 FT-IR

图 4 是石墨烯、Fe₃O₄、油酸修饰 G/Fe₃O₄ 和油酸与 KH570 共同修饰 G/Fe₃O₄ 的红外谱图。从 Fe₃O₄

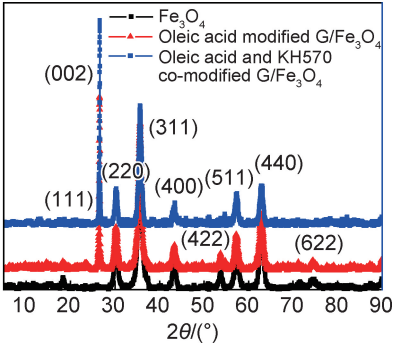


图 3 Fe₃O₄、油酸修饰 G/Fe₃O₄ 及油酸和 KH570 共同修饰 G/Fe₃O₄ 的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of Fe₃O₄, oleic acid modified G/Fe₃O₄ and oleic acid and KH570 co-modified G/Fe₃O₄

的图谱中可以看出 586 cm^{-1} 处存在振动峰,这是 Fe—O 键的振动峰, 3400 cm^{-1} 处比较宽的峰对应着—OH 键的伸缩振动峰^[11];石墨烯的图谱中, 1560 cm^{-1} 处为石墨结构特征峰。油酸修饰和油酸-KH570 共同修饰制备的复合材料中都出现了 586 cm^{-1} 和 1560 cm^{-1} 这两个峰,这说明制备的材料中含有石墨烯和 Fe₃O₄^[12]。油酸修饰 G/Fe₃O₄ 图谱中, $2920\sim 2850\text{ cm}^{-1}$ 处为

—CH键的振动峰,1709 cm^{-1} 对应着 $\text{C}=\text{O}$ 键的振动峰,1370 cm^{-1} 对应着 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键的振动峰^[14-15], $\text{C}=\text{O}$ 键和 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 键振动峰的出现可能是因为油酸的羧基与石墨烯或者 Fe_3O_4 中的羟基发生了化学反应。油酸和 KH570 共同修饰 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的图谱中,1410~1260 cm^{-1} 对应着 $\text{Si}-\text{C}$ 键的振动峰,800 cm^{-1} 和 1150 cm^{-1} 对应着 $\text{Si}-\text{O}$ 键的振动峰,这些峰的出现说明硅烷偶联剂发生了水解反应。水解产物会与纳米 Fe_3O_4 颗粒表面的羟基发生化学作用,同样也会与石墨烯表面的羟基发生化学作用,这样硅烷偶联剂就可以连接石墨烯和 Fe_3O_4 。同时还可以看出 Fe_3O_4 在 3400 cm^{-1} 处对应的—OH 键伸缩振动峰消失,这应该是 Fe_3O_4 表面的羟基与油酸或者硅烷偶联剂发生了化学反应导致的。

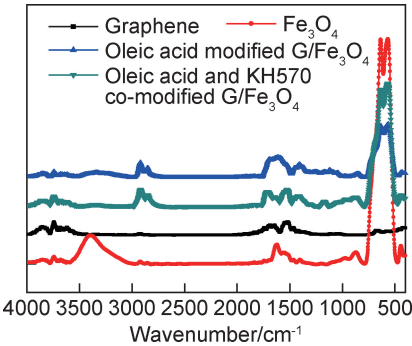


图 4 石墨烯、 Fe_3O_4 、油酸修饰 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 及油酸和 KH570 共同修饰 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的 FT-IR 图谱

Fig. 4 FT-IR spectra of graphene, Fe_3O_4 , oleic acid modified $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ and oleic acid and KH570 co-modified $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

2.2 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 在润滑油中的分散稳定性

因为润滑油中不含铁元素,所以以铁元素含量的变化作为复合材料在润滑油中沉降稳定性的评价指标,同时参照底部沉淀选取合适的添加比例。利用等离子体光谱仪研究油酸修饰和油酸-KH570 共同修饰制备的复合材料在润滑油中的沉降稳定性。分别将 Fe_3O_4 和 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合材料按一定比例加入 SN 5W-30 润滑油中,搅拌并超声分散 10 min 至添加剂完全分散在润滑油中,以此状态作为研究复合材料在润滑油中的沉降稳定性的起始点,按一定时间取上层液进行元素分析。考虑到 10 d 到 20 d 这段时间润滑油中的铁元素含量变化很小,所以取前 10 d 润滑油中的铁元素含量变化进行分析。

图 5 为 Fe 元素含量变化。可以看出同样是质量比为 0.1% 的添加比例, Fe_3O_4 从加入润滑油并分散均匀到第十天时铁元素含量下降 48.3%,油酸修饰 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合材料铁元素含量下降 39%。在第一天

时铁元素含量下降比较快是因为添加剂中的大颗粒沉淀所导致的,第三天以后铁含量下降较快可能是纳米材料之间发生的团聚导致。在进行沉降稳定性实验时发现添加质量比为 0.1% 的油酸-KH570 共同修饰制备的复合材料底部沉淀较多,添加质量比 0.01% 时底部沉淀几乎没有沉淀,所以选取质量比 0.01% 的添加比例研究油酸修饰和油酸-KH570 修饰制备复合材料的沉降稳定性。可以看出,10 d 后油酸修饰复合材料铁元素含量下降 43.3%,油酸和 KH570 共同修饰复合材料铁元素含量下降 31.1%,这说明油酸和 KH570 共同修饰复合材料作为润滑油添加剂稳定性好于只经过油酸修饰的复合材料。

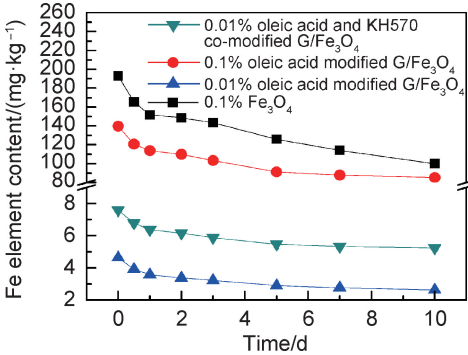


图 5 Fe 元素含量变化
Fig. 5 Change of Fe content

2.3 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的摩擦学性能

2.3.1 最大无卡咬负荷 P_B

最大无卡咬负荷 P_B 代表润滑油油膜承载力。 P_B 越大,润滑油的承载能力就越强,相应地润滑减摩抗磨作用也就越强^[3]。表 1 为材料的最大无卡咬负荷。可以看出,添加 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 材料后最大无卡咬负荷 P_B 比 SN 5W-30 大,未添加 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 时 P_B 为 863 N,添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料时最大无卡咬负荷 P_B 增大 13.7%;添加油酸修饰材料时 P_B 为 925 N,最大无卡咬负荷比未添加时增大 7.2%;添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料比添加油酸修饰材料时润滑油最大无卡咬负荷 P_B 增大 6.5%。这可能是由于 $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合材料不仅具有 Fe_3O_4 材料的磁性还具有石墨烯的多层片状结构。磁性使复合材料易吸附在

表 1 材料的最大无卡咬负荷 P_B

Table 1 Maximum nonseizure load of the material

Material	Maximum nonseizure load P_B/N
SN 5W-30	863
Oleic acid modified $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$	925
Oleic acid and KH570 co-modified $\text{G}/\text{Fe}_3\text{O}_4$	981

摩擦副表面,石墨烯具有的高强度使其很难被磨破,随着摩擦的进行会发生摩擦化学反应从而提高油膜承载能力^[2,6]。

2.3.2 磨斑直径

表 2 为材料的磨斑直径,可以看出,SN 5W-30 润滑油磨斑直径是 0.46 mm,添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料时润滑油磨斑直径为 0.41 mm,比未添加时减小 10.9%;添加油酸修饰复合材料时润滑油磨斑直径为 0.43 mm,比未添加时减小 6.5%;添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料比添加油酸修饰复合材料时磨斑直径减小 4.4%。添加复合材料润滑油的磨斑直径小于 SN 5W-30 润滑油,这说明 G/Fe₃O₄ 复合材料作为润滑油添加剂具有抗磨减摩的作用,这可能是由于复合材料具有磁性,容易吸附在摩擦表面并在摩擦副表面形成稳定、低摩擦因数的膜从而减少了摩擦副之间的磨损。

表 2 材料的磨斑直径

Table 2 Wear scar diameter of the material

Material	Wear scar diameter/mm
SN 5W-30	0.46
Oleic acid modified G/Fe ₃ O ₄	0.43
Oleic acid and KH570 co-modified G/Fe ₃ O ₄	0.41

2.3.3 摩擦因数

图 6 为摩擦因数随时间的关系,可以看出 G/Fe₃O₄ 复合材料可以改善摩擦副的摩擦学性能。SN 5W-30 润滑油的平均摩擦因数为 0.103;油酸修饰的复合材料的平均摩擦因数为 0.089;油酸与 KH570 共同修饰复合材料的平均摩擦因数为 0.084。摩擦因数大致呈先减小后增大的趋势,SN 5W-30 润滑油摩擦因数随时间变化较小。添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料时,平均摩擦因数比未添加降低 18.4%;添加油酸修饰复合材料时平均摩擦因数降低 13.6%;添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料比添加油酸修饰复合

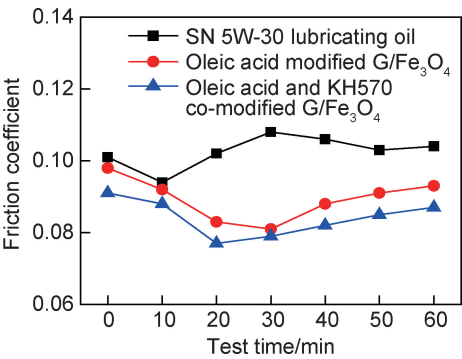


图 6 摩擦因数随时间的关系

材料时磨斑直径减小 4.8%。在摩擦实验过程的前 10min 摩擦因数的降低是因为随着转速的升高以及随着摩擦的进行,摩擦副之间的相对运动导致温度的升高从而使摩擦因数受到影响,从而出现摩擦因数先降低后升高的现象。摩擦因数随时间增大的趋势可能是因为随着摩擦时间的延长,摩擦副之间的摩擦状态由流体润滑状态向边界润滑状态过渡形成。添加复合材料润滑油摩擦因数较 SN 5W-30 润滑油低可能是因为石墨烯本身具有自润滑的效果,加上石墨烯和 Fe₃O₄ 修饰后形成了类似于轴承的结构,可以在摩擦副之间形成滚动摩擦从而降低了摩擦因数^[16]。

3 结论

(1)利用油酸和油酸-KH570 两种方法修饰制备 G/Fe₃O₄ 复合材料并对其进行结构和形貌的表征,结果表明使用油酸和 KH570 共同修饰制备的 G/Fe₃O₄ 复合材料在石墨烯表面的分散效果好于油酸修饰制备的复合材料。

(2)添加油酸和 KH570 共同修饰制备的复合材料在前 10 d 沉降率最小,未经修饰的 Fe₃O₄ 粒子沉降率最大。添加油酸和 KH570 共同修饰制备的复合材料稳定性比添加油酸修饰的要好。

(3)G/Fe₃O₄ 材料作为润滑油添加剂具有良好的抗磨减摩性能,油酸和 KH570 共同修饰复合材料作为润滑油添加剂时最大无卡咬负荷 P_B 、磨斑直径以及平均摩擦因数均优于油酸修饰制备的复合材料。

(4)与未添加复合材料相比,添加油酸修饰复合材料时润滑油最大无卡咬负荷 P_B 增大 7.2%,磨斑直径减小 6.5%,平均摩擦因数降低 13.6%;添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料时润滑油最大无卡咬负荷 P_B 增大 13.7%,磨斑直径减小 10.9%,平均摩擦因数降低 18.4%;添加油酸和 KH570 共同修饰复合材料的润滑油比添加油酸修饰复合材料时最大无卡咬负荷 P_B 增大 6.5%,磨斑直径减小 4.4%,平均摩擦因数降低 4.8%。

参考文献

[1] 关磊,张力婧,闫启博,等. 新型润滑油添加剂的制备及润滑油性质研究进展[J]. 硅酸盐通报,2018,37(5):1632-1636.
GUAN L,ZHANG L Q,YAN Q B,et al. Research progress on preparation of novel lubricant additives and properties of lubricating oils[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2018,37(5): 1632-1636.
[2] 乔玉林,赵海朝,臧艳,等. 石墨烯负载纳米 Fe₃O₄ 复合材料的摩擦学性能[J]. 无机材料学报,2015,30(1):41-46.

Fig. 6 Relationship between friction coefficient and test time

- QIAO Y L, ZHAO H B, ZANG Y, et al. Tribological properties of graphene-based Fe_3O_4 nanocomposite materials[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(1): 41-46.
- [3] 刘向波. 石墨烯润滑油添加剂及其内燃机摩擦学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- LIU X B. Study on graphene lubricant additive and its tribological properties on internal combustion engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [4] SAMMAIAH A, HUANG W, WANG X. Synthesis of magnetic Fe_3O_4 /graphene oxide nanocomposites and their tribological properties under magnetic field[J]. Materials Research Express, 2018, 5(10): 1-9.
- [5] LIU L, JIAO S, PENG Y, et al. A green design for lubrication: multifunctional system containing Fe_3O_4 @ MoS_2 nanohybrid[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(6): 7372-7379.
- [6] GAO C, WANG Y, HU D, et al. Tribological properties of magnetite nanoparticles with various morphologies as lubricating additives[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2013, 15(3): 1502.
- [7] JIAO F, HU D, WANG Y. Tribological properties of steel pairs in lubricant oils with nano-particles of Fe_3O_4 with various morphologies[J]. Journal of the Chinese Silicate Society, 2011, 39(1): 152-157.
- [8] TRIVEDI K, PAREKH K, UPADHYAY R V. Nanolubricant: magnetic nanoparticle based [J]. Materials Research Express, 2017, 4(11): 114003.
- [9] WANG Y, SUN J, WANG B, et al. Tribological properties of nano- Fe_3O_4 as additive in cold rolling emulsion for steel strip[J]. Tribology, 2010, 30(6): 572-576.
- [10] PARK J O, RHEE K Y, PARK S J. Silane treatment of Fe_3O_4 and its effect on the magnetic and wear properties of Fe_3O_4 /epoxy nanocomposites[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(23): 6945-6950.
- [11] 王辉, 浮燕, 卢松, 等. 氧化石墨烯负载磁性 Fe_3O_4 复合纳米材料的制备及其对液压油中苯胺吸附性质的研究[J]. 山东化工, 2016, 45(22): 12-15.
- WANG H, FU Y, LU S, et al. Preparation of $\text{GO}@ \text{Fe}_3\text{O}_4$ material and its application in the adsorption of amidobenzene[J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(22): 12-15.
- [12] 兰徐东, 万静. 石墨烯/ Fe_3O_4 复合粉体材料的制备及吸波加热性能研究[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2018, 44(6): 596-601.
- LAN X D, WAN J. Preparation of graphene/ Fe_3O_4 powders and their microwave absorbing properties[J]. Journal of Southwest Minzu University(Natural Science Edition), 2018, 44(6): 596-601.
- [13] 耿健. 二硫化钼复合微粒作为润滑添加剂的摩擦学性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- GENG J. Tribological properties of molybdenum disulfide composite particles used as lubricant additives[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [14] 吴鹏, 王云, 胡学文, 等. 四氧化三铁/氧化石墨烯纳米带复合材料对轴的吸附性能[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1561-1568.
- WU P, WANG Y, HU X W, et al. Uranium adsorption on ferromagnetic oxide/graphene oxide nanoribbon composite material[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1561-1568.
- [15] 张舰, 甘伟, 王广林, 等. 石墨烯/ Fe_3O_4 复合物的制备及其对镁离子的吸附[J]. 广州化工, 2018, 46(8): 58-60.
- ZHANG J, GAN W, WANG G L, et al. Preparation of $\text{GO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ composite and its adsorption of Mg^{2+} [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(8): 58-60.
- [16] 邵鹏. 稀土润滑油添加剂的制备及其摩擦学性能的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2014.
- GAO P. Study on preparation and tribological properties of rare earth compounds as lubrication additives[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2014.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51876141)

收稿日期: 2019-08-11; 修订日期: 2020-01-07

通讯作者: 杨礼河(1966—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事油品评定及代用燃料研究, 联系地址: 天津市南开区天津内燃机研究所(300072), E-mail: ylh@tju.edu.cn

(本文责编: 高磊)