

改性纳米坡缕石在油润滑中的 减摩抗磨性能研究

王陈向¹, 闫嘉昕¹, 范利锋¹, 李帅强^{1,2}

(1.内蒙古大学 交通学院 内蒙古自治区城市交通数据科学及应用工程技术研究中心,
呼和浩特 010070; 2.中国平煤神马能源化工集团, 河南 平顶山 467000)

摘 要: **目的** 探索不同改性剂对纳米坡缕石的表面修饰效果, 探究其在油润滑中的减摩抗磨和自修复机理。**方法** 以油酸和钛酸酯作为改性剂对纳米坡缕石进行表面修饰, 采用沉降法和透射电子显微镜 (TEM) 表征改性效果。将选择的改性剂和纳米坡缕石放入球磨机内在线修饰, 制备成润滑油添加剂并将其超声分散于纯基础油 150N 中, 形成润滑油分散体系。采用环-盘式摩擦磨损试验机对其摩擦性能进行考察, 通过金相显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散谱仪 (EDS) 进行微观结构观察与分析, 并探究其润滑及自修复机理。**结果** 采用油酸修饰的纳米坡缕石满足润滑油行业的要求, 可显著改善润滑油的摩擦学性能。与纯基础油相比, 当添加剂含量为 3.0% 时, 45# 钢摩擦副磨损表面形成了一层含多种元素的复合陶瓷自修复膜, 平均摩擦系数降低了 31.3%, 磨损量减少了 16.0%。**结论** 纳米坡缕石添加剂可随油液流动智能吸附于摩擦界面, 阻止摩擦副之间的直接接触, 产生纳米滚珠效应。同时, 随着界面滑动发生摩擦化学反应生成自修复膜, 填补犁沟和划痕, 在纳米滚珠和自修复膜共同作用下达到减摩抗磨的效果。

关键词: 纳米坡缕石; 表面改性; 润滑油添加剂; 减摩抗磨性能; 自修复

中图分类号: TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0218-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.026

Anti-friction and Anti-wear Performance of Modified Nano-palygorskite in Oil

WANG Chen-xiang¹, YAN Jia-xin¹, FAN Li-feng¹, LI Shuai-qiang^{1,2}

(1.Inner Mongolia Engineering Research Center for Urban Transportation Data Science and
Applications, Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;

2.China Pingmeishenma Group, Pingdingshan 467000, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the modification effects of different modifiers on nano-palygorskite surface and explore their anti-friction and anti-wear performance and self-repairing mechanism in oil lubrication. Oleic acid and titanate

收稿日期: 2019-01-27; 修订日期: 2019-04-26

Received: 2019-01-27; Revised: 2019-04-26

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2017BS0502); 内蒙古大学高层次人才引进项目 (5165169, 5185146)

Fund: Natural Science Foundation of Inner Mongolia (2017BS0502); Program of Higher-level Talents Fund of Inner Mongolia University (5165169, 5185146)

作者简介: 王陈向 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程及流体元件润滑控制技术。

Biography: WANG Chen-xiang (1984—), Male, Ph. D., Lecturer, Research focus: surface engineering and lubrication control technology of fluid components.

通讯作者: 李帅强 (1986—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为机械制造及摩擦学。邮箱: wcxx_788@163.com

Corresponding author: LI Shuai-qiang (1986—), Male, Intermediate engineer, Research focus: mechanical manufacturing and tribology. E-mail: wcxx_788@163.com

were selected as the modifiers to modify the nano-palygorskite and the modification effect was evaluated by sedimentation experiments and transmission electron microscope (TEM). The pre-selected modifier and the nano-palygorskite were put in a ball mill for online modification to prepare lubricating oil additive. Then the nano-palygorskite additive was dispersed into base oil 150N through ultrasonic treatment to obtain the final lubricating oil dispersion. After that, the tribological properties of nano-palygorskite additive were tested by a ring-on-disk tribometer. The microstructure was observed and analyzed by metallographic microscope, scanning electronic microscope (SEM) and energy dispersive spectrometry (EDS), and the lubrication and self-repairing mechanisms were also explored. The nano-palygorskite modified by oleic acid could meet the requirements of the lubricant industry and significantly improved the tribological performance of lubricating oil. Specially, when 3.0wt.% of nano-palygorskite additive was introduced, the average friction coefficient and wear mass loss of 45# steel friction pair were reduced by 31.3% and 16.0% respectively, due to the formation of multiple elements-based composite ceramic self-repairing films. Nano-palygorskite additive can be intelligently adsorbed to the frictional interface along with the flowing oil and generates a nano-ball effect by avoiding the direct contact between friction pairs. Simultaneously, the friction-induced furrows and scratches are also filled by the self-repairing films during the interface sliding process. The nano-ball effect and the self-repairing film can work together to achieve the excellent friction-reducing and wear-resisting effect.

KEY WORDS: nano-palygorskite; surface modification; lubricating oil additives; anti-friction and anti-wear property; self-repairing

添加剂是使润滑油得到新特性或改善已有特性的一种或几种物质, 被称为近代高级润滑油的精髓。近年来, 受生物体具有智能修复其结构和功能损伤的启发及纳米技术的兴起, 将纳米颗粒, 如金属单质(及其化合物)^[1-4]、硅酸盐矿物^[5-7]、碳材料^[8-9]、稀土材料^[10]和复合纳米材料^[11-12]等, 作为自修复添加剂, 以改善油品摩擦性能的研究, 一直是摩擦学领域的研究热点。虽然多数自修复添加剂可以起到减摩抗磨效果, 但由于高成本、规模化制备技术的限制以及润滑稳定性差等问题, 纳米润滑材料尚未得到广泛应用。

坡缕石, 分子式为 $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Mg}_5(\text{Al})(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 又名凹凸棒石, 是一种天然一维纳米硅酸盐矿物, 具有开发成本低、环境友好、高吸附性、高化学活性等优点, 已被证明可有效改善润滑油的抗磨性能, 并在磨损表面生成自修复膜^[13-14]。吴雪梅等^[13]用 KH550 修饰纳米坡缕石, 进而制备成润滑油添加剂, 并研究了其含量为 2% 和 4% 时, 基础油体系的摩擦学性能。NAN F 等^[14]用油酸修饰天然凹凸棒石粉末制备成添加剂, 发现其摩擦学性能优异是由于形成摩擦膜的缘故。杨玲玲等^[6]将凹凸棒石黏土直接作为添加剂分散于基础油中, 研究不同试验条件下其减摩抗磨机理。最新研究表明, 坡缕石可作为油基钻井液的添加剂, 用来提高钻井液的摩擦学性能和黏度^[15-16]。在前人的基础上, 本研究对比了不同改性剂

对纳米坡缕石的修饰效果,揭示了坡缕石不同含量所对应接触界面不同的摩擦状态,阐明了摩擦表面自修复膜形成的临界范围,可为坡缕石纳米材料在摩擦学及相关领域的工业化应用和推广提供一定的理论和实验基础。

文中采用两种工业上常见的改性剂(油酸和钛酸酯)对纳米坡缕石进行表面修饰,通过沉降法和 TEM 表征改性效果,确定最终选用的改性剂。在上述研究工作基础上,将改性纳米坡缕石制备成添加剂超声分散于纯基础油中,随后在环-盘式摩擦磨损试验机上对其减摩抗磨性能进行测试,采用金相显微镜、SEM 和 EDS 对试验结果进行表征,探讨所制备的坡缕石添加剂在润滑油中的减摩抗磨作用机理,完善相关润滑及自修复理论。

1 材料与试验

1.1 材料

贵州大方产的纤维状坡缕石,其化学组成^[17]见表1。将原矿提纯得到原料,具体工艺见文献[18],其品位为96.96%,杂质主要为蒙脱石(1.46%)和铁矿石(1.58%)。所用改性剂、稀释剂、脱脂剂、清洗剂见表2。摩擦试验用油选取纯基础油150N。摩擦试样为调质处理45#钢,试样表面原始粗糙度为 $Ra=0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。

表 1 坡缕石的化学成分
Tab.1 Chemical composition of palygorskite

wt%											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Others
56.10	12.50	1.68	0.04	8.72	0.02	0.85	0.12	0.12	14.80	4.76	0.29

表 2 试验所用化学试剂

Tab.2 Chemical reagent used in the experiment

Reagent	Purpose	Specification	Manufacturer
Oleic acid ($C_{18}H_{34}O_2$)	Modifier	AR	Nanjing Reagent Co., Ltd
Titanate ($C_{57}H_{106}O_7Ti$)	Modifier	AR	Hangzhou Jessica Chemical Co., Ltd
Acetone (CH_3COCH_3)	Diluent	AR	Nanjing Reagent Co., Ltd
Ethanol (C_2H_5OH)	Degreaser	AR	Nanjing Reagent Co., Ltd
Toluene ($C_6H_5CH_3$)	Detergent	AR	Nanjing Reagent Co., Ltd

1.2 试验

1.2.1 表面改性

用机械球磨法制得纳米坡缕石 (nano-palygorskite, 简称 NP), 其工艺见文献[19]。选取油酸和钛酸酯作为改性剂, 分别将改性剂溶于丙酮, 配成质量分数为 5% 的改性剂溶液; 按照 NP 和改性剂质量比 20 : 1 的比例, 称取 NP 两份; 将配制好的改性剂溶液、NP 移入研钵中, 手工研磨 30 min, 之后放入温度为 60 °C 的恒温箱中, 干燥时间设为 60 min; 然后取出研钵, 研磨 15 min, 再放入恒温箱中, 重复上述步骤, 直到 NP 完全干燥。

1.2.2 摩擦学测试

确定改性剂后, 按照改性试验的比例将 NP、配制好的改性剂溶液放入球磨机玛瑙罐内进行在线修饰^[19], 制备成纳米坡缕石添加剂 (nano-palygorskite additive, 简称 NPA)。摩擦学试验采用环-盘式摩擦磨损试验机进行, 如图 1 所示, 对偶环顺时针旋转运动, 内外径分别为 $\phi 20.0$ mm 和 $\phi 25.6$ mm; 对偶盘为圆饼状, 固定在池槽中, 直径和厚度分别为 $\phi 41.0$ mm 和 $\phi 6.0$ mm。试验正压力为 200 N, 转速为 400 r/min, 平均线速度为 0.561 m/s。试验时, 润滑油液面高于摩擦界面, 温度为室温。将纯基础油 150N 和质量分数分别为 1%、2%、3% 的 NPA 配成油样 (见表 3), 并进行摩擦试验, 试验时间为 50 h, 之后将试样卸下,

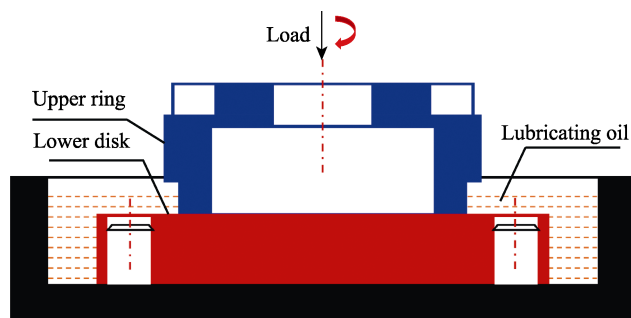


图 1 环-盘试验示意图
Fig.1 Schematic diagram of ring-disk test

表 3 不同的润滑油组成

Tab.3 Composition of different lubricating oil samples

Code name	Constituent
NPA-0	150N
NPA-1	1wt.%NPA+150N
NPA-2	2wt.%NPA+150N
NPA-3	3wt.%NPA+150N

用脱脂剂 (乙醇) 除油, 然后在甲苯中超声清洗 10 min, 清洁环境下风干。

1.3 表征

1.3.1 改性效果表征

表面修饰效果用沉降法和 TEM 进行分析评价。沉降法评价: 将不同改性剂修饰后的 NP 与纯基础油按一定比例分别混合, 用电磁搅拌器搅拌 20 min, 转速为 900 r/min; 随后用超声分散仪分散 15 min, 形成润滑油分散体系, 之后分别移入 10 mL 的量筒进行沉降试验。每隔 2 h 读取沉降体积并记录数据, 观察时间为 24 h。TEM 测试: 采用透射电子显微镜 (TEM, 日本电子株式会社生产, JEM-2000FX) 观察不同改性剂修饰后 NP 样品的形态大小, 加速电压为 180 kV。

1.3.2 摩擦试验表征

摩擦系数作为表征摩擦副综合特性的关键参数由试验机直接记录, 每 5 h 做平均数, 描述试验期间的波动, 之后统计整个试验期间的平均摩擦系数, 并用万分之一电子天平记录试样磨损量的变化。通过金相显微镜初步观察试样磨损区域, 用扫描电子显微镜 (SEM, 日本岛津公司生产, EPMA-1600) 进一步观察磨损表面微观形貌, 并配合能量色散谱仪 (EDS) 对其成分进行表征。

2 结果与讨论

2.1 改性结果与分析

2.1.1 沉降试验结果

含有不同改性剂修饰 NP 的油样静置 24 h 期间的沉降体积变化如图 2 所示。钛酸酯、油酸作为改性剂的油样分别记为 1#油样和 2#油样。由图 2 可知, 1#油样每一时刻的沉降速率都大于 2#, 且随着时间推移, 两者差异愈大, 特别是 20 h 之后, 2#油样趋于稳定, 而 1#油样的沉降高度差仍在增大, 试验结束时, 两种油样的沉降高度差分别为 5.5 mm 和 3.0 mm。沉降高度差越小, 表明改性粉体的分散性越好。因此, 油酸修饰的 NP 在纯基础油中的分散性能好。

2.1.2 TEM 检测结果

将不同改性剂修饰的 NP 进行 TEM 检测, 结果如图 3 所示。油酸、钛酸酯改性的 NP 团聚体最大粒

径分别为 416 nm 和 508 nm，表明油酸对纳米粉体表面的修饰效果较好，而钛酸酯的改性效果较差，纳米

粉体易出现团聚现象，这与沉降试验结果一致。同时，油酸改性的 NP 粒径分布相对均匀，且满足润滑油行业的要求 (<500 nm)。因此，后续的摩擦试验采用油酸作为改性剂，制备纳米坡缕石润滑油添加剂。

2.1.3 改性机理

油酸在表面改性试验中起到了偶联、稳定和分散的作用，使 NP 在纯基础油中获得了较高的分散度。油酸中的羧基与 NP 颗粒表面羟基发生酯化反应，把有机基团接枝于 NP 颗粒表面形成核壳结构，其中核为 NP 颗粒，壳则为油酸包覆层^[20]，如图 4 所示。壳层的引入可以有效降低纳米粒子的表面能并削弱颗粒之间的团聚，使纳米颗粒尺寸得到控制，粒度大小均匀。同时，NP 颗粒表面的油酸分子在油液中充分铺展，极大地增加颗粒的浮力，使改性粉体可以长时间稳定悬浮于润滑油中。

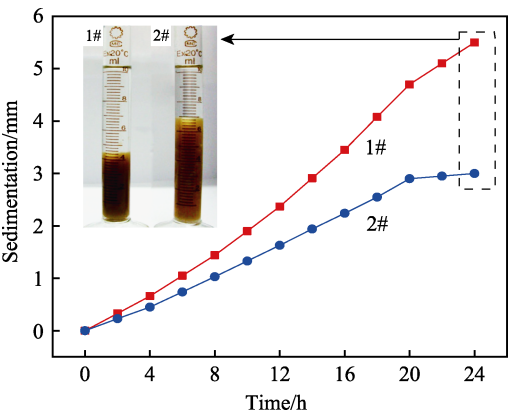


图 2 样品沉降体积统计
Fig.2 Statistics of sample sedimentation volume

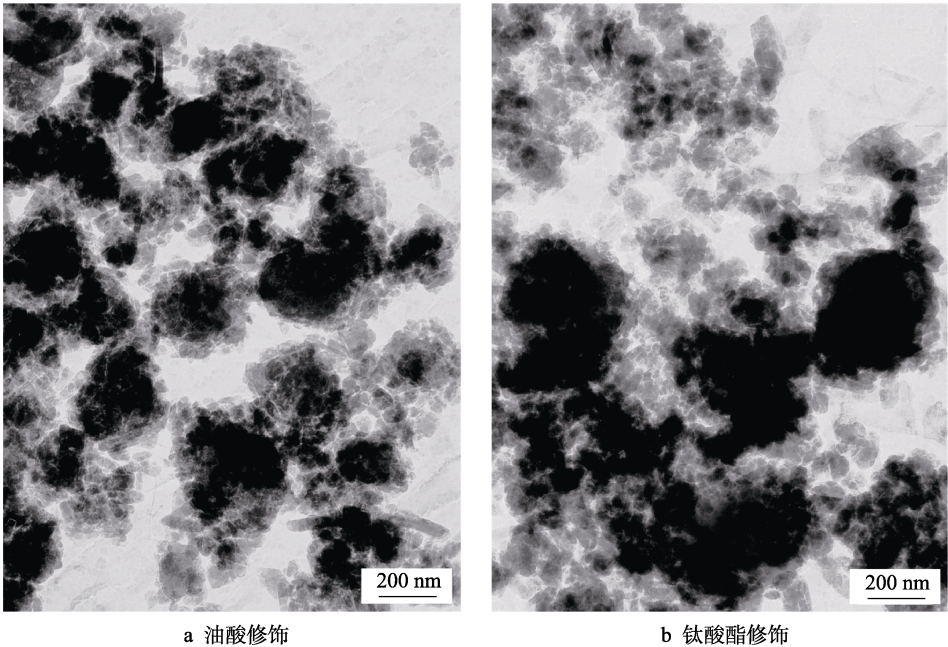


图 3 改性 NP 的 TEM 图片
Fig.3 TEM image of modified NP: a) modified by oleic acid; b) modified by titanate

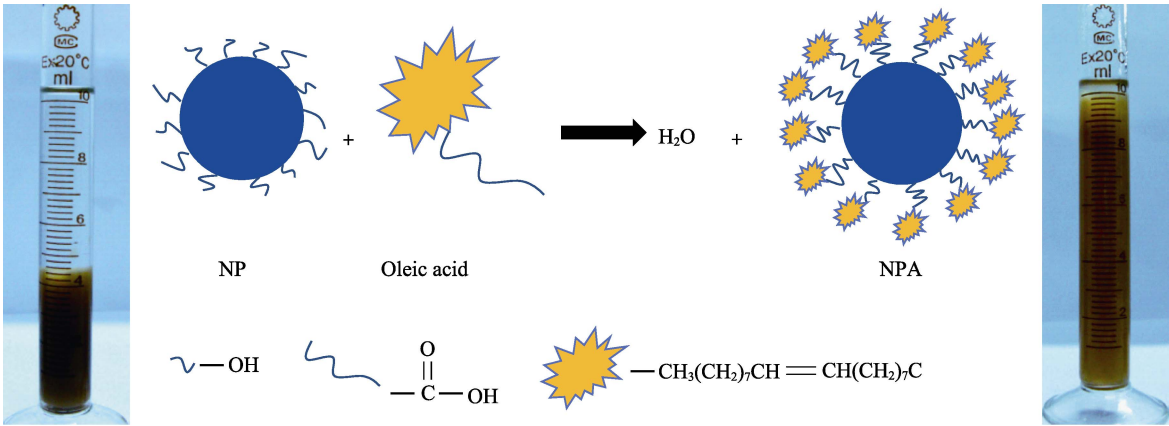


图 4 分散于纯基础油中的 NP 与 NPA
Fig.4 NP (a) and NPA(b) particles dispersed in pure base oil

2.2 摩擦试验结果与分析

2.2.1 摩擦系数与磨损量

不同油样中 45# 钢试样平均摩擦系数的递变规律如图 5a 所示。随着 NPA 浓度的增加, 平均摩擦系数呈递减趋势, 表明含 NPA 的油样可有效降低试样的摩擦系数, 尤其当质量分数由 2% 增加到 3% 时, 摩擦系数下降最明显。NPA 质量分数为 1%、2%、3% 油样的

平均摩擦系数比纯基础油分别降低 7.0%、14.4%、31.3%。

摩擦试验结束后, 不同油样中 45# 钢试样磨损量的递变规律如图 5b 所示。磨损量随着 NPA 浓度的增加呈递减趋势, 表明含 NPA 的油样可显著减少试样磨损, 增强油液的抗磨作用, 特别在质量分数由 2% 增加到 3% 时, 磨损量减少最明显。NPA 质量分数为 1%、2%、3% 油样的磨损量比纯基础油分别减少 3.2%、8.0%、16.0%。

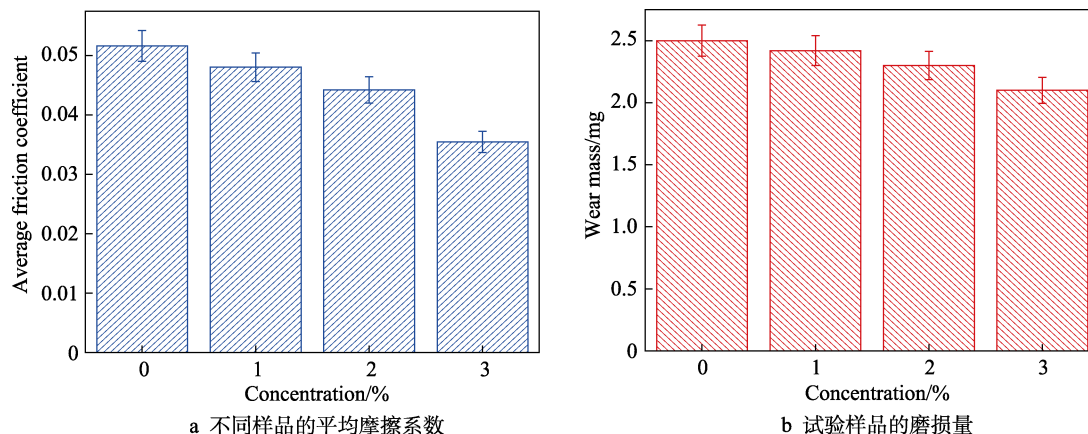


图 5 NPA 摩擦磨损性能测试

Fig.5 Friction and wear performance test of NPA: a) average friction coefficient of different samples; b) wear mass loss of different samples

2.2.2 对偶盘磨损表面分析

图 6a、b、c 分别为摩擦实验结束后 NPA-0、NPA-2、NPA-3 油样中磨损区域的金相显微形貌。图 6a 中, 摩擦划痕密集, 纹路清晰尖锐, 深坑频现, 已经覆盖掉原始加工痕路, 摩擦界面磨损严重, 硬质

点犁沟效应明显, 立体感强。图 6b 中摩擦运行方向的划痕相对平整, 磨损较轻, 痕路较模糊, 与摩擦运行方向垂直的原始加工痕迹清晰。图 6c 中摩擦界面的一层薄膜覆盖了原始的加工痕迹, 摩擦界面平整, 磨损轻, 划痕纹路模糊, 无犁沟效应。

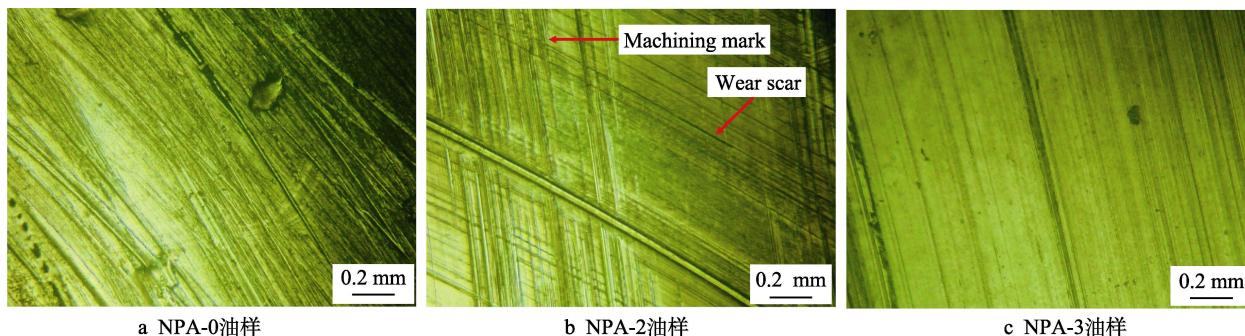


图 6 对偶盘磨损表面光学图像

Fig.6 Wear surface under optical microscope: a) NPA-0 oil; b) NPA-2 oil; c) NPA-3 oil

为进一步研究减摩抗磨机理, 采用 SEM 观察对磨结束后不同油样中对偶盘磨损表面的形貌, 如图 7 所示。图 7a 中摩擦界面损伤严重, 层次感强, 出现了沿摩擦方向密集、深而宽、连续不断的犁沟和划痕, 原始加工痕迹被完全破坏, 属于典型的磨粒磨损特征。同时, 犁沟和划痕的边缘参差不齐, 产生了严重的塑性变形, 出现材料堆积和叠加的现象, 此情况必然导致粘着磨损。图 7b 中摩擦界面损伤较轻, 原始

加工痕迹依旧可见, 摩擦方向上的犁沟和划痕浅而窄, 其边缘相对清晰, 材料塑性变形极少, 表明试验过程以磨粒磨损为主。图 7c 中磨损表面相对平整, 原始加工痕迹被一层光滑致密自修复摩擦膜覆盖, 没有犁沟出现, 划痕很轻且边缘模糊, 表面层次感弱, 偶尔出现摩擦膜包覆的基体凸起和凹坑, 未见疲劳剥落, 为滚动摩擦的特征。

在试验所用添加量范围内, 结合金相和 SEM 图

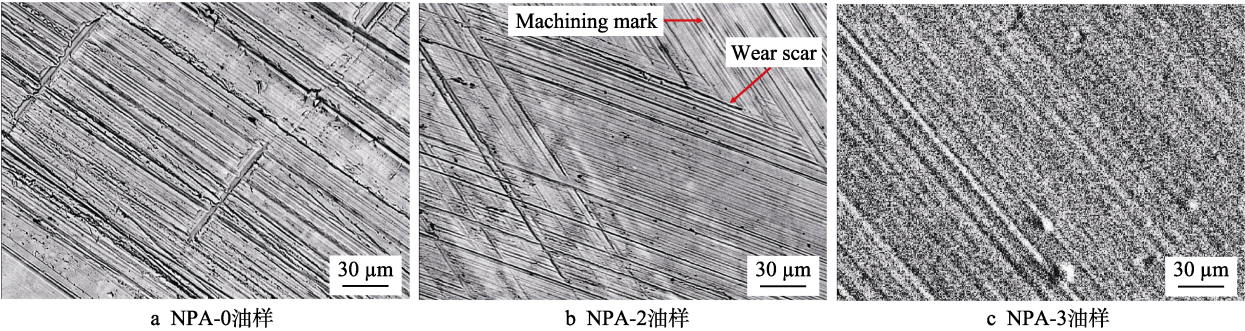


图 7 对偶盘磨损表面 SEM 图像
Fig.7 SEM images for wear surface of the disk: a) NPA-0 oil; b) NPA-2 oil; c) NPA-3 oil

像可知，摩擦测试期间，当采用 NPA-0 润滑油时，摩擦界面磨粒磨损和粘着磨损现象同时存在，摩擦系数大，材料损失严重；当采用 NPA-2 润滑油时，摩擦界面以磨粒磨损为主，摩擦系数相对较小，材料损失相对较少；当采用 NPA-3 润滑油时，摩擦界面被一层光滑致密的自修复摩擦膜覆盖，以滚动摩擦为主，故摩擦系数最小，材料损失最少。这与图 5 中的试验结果吻合。

图 8a、b、c 分别为 NPA-0、NPA-2、NPA-3 油样中对偶盘磨损表面的 EDS 能谱图及主要元素原子数分数。由图 8 可知，磨损表面 Si 含量随着 NPA 浓度

的增加而增加，Si 变化不能严格证明是由坡缕石引起的，但采用 NPA-2 和 NPA-3 润滑油时，磨损表面出现坡缕石矿物的特征元素 Mg 和 Al 以及 Fe 含量下降，则充分证明坡缕石参与了自修复摩擦膜的形成。磨损表面 O 含量随着 NPA 浓度的增加而增加，表明摩擦过程提高了材料表面活性，促进了 O 元素在摩擦界面的富集。结合 SEM 图像，采用 NPA-3 润滑油时，磨损表面形成了一层含多种元素的复合陶瓷摩擦膜，摩擦膜对表面的智能填补和修复可进一步降低磨损，这与图 5b 中试验结果吻合。

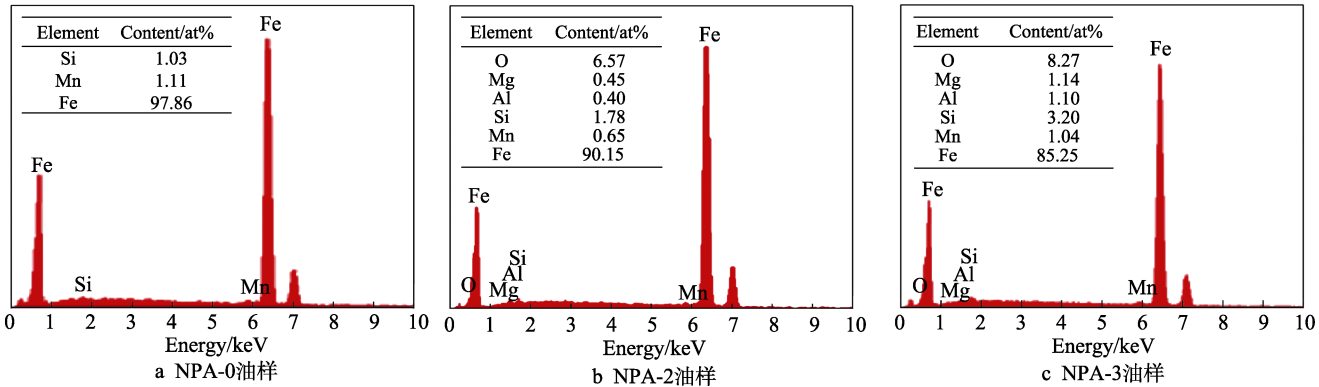


图 8 对偶盘磨损表面 EDS 能谱图
Fig.8 EDS patterns for wear surface of the disk: a) NPA-0 oil; b) NPA-2 oil; c) NPA-3 oil

2.2.3 润滑及自修复机理

根据试验结果可知，NPA 对 45#钢摩擦副具有优异的润滑特性和自修复作用，该效应与坡缕石矿物的结构、理化性质、含量以及摩擦界面的热力学条件有关。坡缕石晶体结构由硅氧四面体（Si-O）和氢氧镁铝八面体（[Mg, Al]-OH）按照 2：1 比例构成，四面体和八面体之间主要以氢键、范德华力结合。这种结构使坡缕石具有大的表面能、高吸附性、高化学活性等性质^[21]。当 NPA 含量较低时，油液中硬相的 NPA 颗粒因比表面积大、活性高等性质，主动向磨损表面流动，富集于界面，在摩擦滑动中对磨损表面产生研磨抛光和滚珠效应；同时，油液流动和压缩效应诱导悬浮的 NPA 颗粒向摩擦界面移动，造成接触区域附

近油液黏度增大，使界面间隙的油膜稠化，甚至变为具有相当触变强度的类固体膜^[22]，两种现象共同作用提高润滑油的减摩性能。当 NPA 含量为 3.0%时，磨损表面在 NPA 颗粒抛光研磨作用下裸露出新的 Fe 原子；同时，在载荷作用下，原本结合力较弱的氢键和范德华力受到剪切挤压破坏断裂，使坡缕石晶体结构变化释放出活性氧、自由水和二次粒子^[23]，加之界面滑动时试样微凸体碰撞瞬间产生的闪温 and 高压，促使 NPA、Fe 和润滑油之间发生微冶金反应，反应产物相互融合重组并焊接在微凸体附近的凹坑处，不断累积延伸扩展形成一层含多种元素的复合陶瓷摩擦膜，智能修复磨损表面的犁沟和划痕，进一步提高润滑油的抗磨性能。

3 结论

1) 和钛酸酯改性剂相比, 纳米坡缕石经油酸修饰后在纯基础油中的分散稳定效果更好, 粒径均匀, 且满足润滑油行业对固体颗粒添加剂的要求。

2) 在试验所用添加量范围内, 纳米坡缕石润滑油添加剂可在 45# 钢摩擦副表面有效起到减摩抗磨作用, 特别是当添加量为 3.0% 时, 与纯基础油相比, 试样平均摩擦系数降低了 31.3%, 磨损量减少了 16.0%; 摩擦过程中的机械和化学作用, 促进了富集于磨损表面元素的反应, 形成了含 Fe、O、Si、Mg、Al 等多种元素的复合陶瓷自修复膜。

3) 归纳改性纳米坡缕石在油润滑中的减摩抗磨及自修复机理为滚珠研磨抛光作用机理和摩擦化学反应膜机理, 改性纳米坡缕石直接参与了复合陶瓷自修复膜的形成, 且其含量对润滑和自修复效应具有重要影响, 不同含量范围对应接触界面不同的摩擦状态。

参考文献:

- [1] NAN F, XU Y, XU B S, et al. Effect of Cu nanoparticles on the tribological performance of attapulgite base grease[J]. Tribology transactions, 2015, 58(3): 1031-1038.
- [2] 杨峰, 夏晓雷, 徐创. 纳米铜润滑油添加剂的摩擦学特性及其自修复机理[J]. 材料保护, 2018, 51(2): 22-25.
YANG Feng, XIA Xiao-lei, XU Chuang. Self-repairing mechanism and tribological properties of nano-Cu as lubricating oil additives[J]. Materials protection, 2018, 51(2): 22-25.
- [3] 林彬, 陈国需, 粟斌, 等. 纳米二氧化钛亲油化改性及其摩擦学性能研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(11): 69-73.
LIN Bin, CHEN Guo-xu, SU Bin, et al. Review on oleophilic modification and tribological properties of titanium dioxide nanoparticles[J]. Materials review, 2017, 31(11): 69-73.
- [4] 梅堂杰, 郭俊德, 李月, 等. 片状纳米 MoS₂ 的制备及其在油润滑中的减摩抗磨性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 129-138.
MEI Tang-jie, GUO Jun-de, LI Yue, et al. Preparation of flaky nano-MoS₂ and its anti-friction and anti-wear performance in oil[J]. Surface technology, 2018, 47(8): 129-138.
- [5] 王利民, 许一, 高飞, 等. 凹凸棒石纳米纤维用作润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(5): 657-663.
WANG Li-min, XU Yi, GAO Fei, et al. Tribological properties of attapulgite clay as lubricant additive for steel-steel contacts[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2012, 17(5): 657-663.
- [6] 杨玲玲, 于鹤龙, 杨红军, 等. 摩擦试验条件对凹凸棒石黏土润滑油添加剂摩擦学性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(2): 273-279.
- [7] YANG Ling-ling, YU He-long, YANG Hong-jun, et al. Effects of tribological test conditions on properties of attapulgite powders as lubricant additives[J]. Materials science and engineering of powder metallurgy, 2015, 20(2): 273-279.
- [8] ZHANG B, XU B S, XU Y, et al. Tribological characteristics and self-repairing effect of hydroxy-magnesium silicate on various surface roughness friction pairs[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1326-1333.
- [9] 郑帅周, 周琦, 杨生荣, 等. 氟化石墨烯的制备及其作为润滑油添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(3): 402-408.
ZHENG Shuai-zhou, ZHOU Qi, YANG Sheng-rong, et al. Preparation and tribological properties of fluorinated graphene nanosheets as additive in lubricating oil[J]. Tribology, 2017, 37(3): 402-408.
- [10] HOU K, GONG P, WANG J, et al. Construction of highly ordered fluorinated graphene composite coating with various fluorine contents for enhanced lubrication performance[J]. Tribology letters, 2015, 60(1): 1-12.
- [11] 王进礼, 李立全, 刘超, 等. 黑云母/氯化镧复合粉体的摩擦性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 333-339.
WANG Jin-li, LI Li-quan, LIU Chao, et al. Tribological properties of biotite/lanthanum chloride composite powders[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2016, 44(2): 333-339.
- [12] 吴雪梅, 周元康, 杨绿. 坡缕石/铜复合纳米粉体对 HT200 摩擦副的摩擦学性能[J]. 材料科学与工程学报, 2012, 30(2): 222-226.
WU Xue-mei, ZHOU Yuan-kang, YANG Lv. Tribological effects of palygorskite/copper nanocomposites as lubricating oil additive on HT200 tribo-pair[J]. Journal of materials science and engineering, 2012, 30(2): 222-226.
- [13] NAN F, XU Y, XU B S, et al. Tribological performance of attapulgite nano-fiber/spherical nano-Ni as lubricant additive[J]. Tribology letters, 2014, 56(10): 531-541.
- [14] 吴雪梅, 周元康, 杨绿, 等. 纳米坡缕石润滑油添加剂对 45# 钢摩擦副的抗磨及自修复性能[J]. 材料工程, 2012(4): 82-87.
WU Xue-mei, ZHOU Yuan-kang, YANG Lv, et al. Effect of nano-palygorskite additive in base oil on anti-wear and self-repairing properties of 45# steel tribo-pair[J]. Journal of materials engineering, 2012(4): 82-87.
- [15] NAN F, XU Y, XU B S, et al. Effect of natural attapulgite powders as lubrication additive on the friction and wear performance of a steel tribo-pair[J]. Applied surface science, 2014, 307(4): 86-91.
- [16] ABDO J. Nano-attapulgite for improved tribological properties of drilling fluids[J]. Surface and interface analysis, 2014, (46)2: 882-887.
- [17] ZHUANG G Z, ZHANG Z P, JABER M, et al. Comp-

- arative study on the structures and properties of organo-montmorillonite and organo-palygorskite in oil-based drilling fluids[J]. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2017, 56(7): 248-257.
- [17] 陈春燕, 管琪明, 何林, 等. 贵州大方坡缕石表面改性工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2006(6): 19-21.
CHEN Chun-yan, GUAN Qi-ming, HE Lin, et al. Technological research on the surface modification of palygorskite in Guizhou Dafang[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2006(6): 19-21.
- [18] 周元康, 郑忠恒, 李屹, 等. 贵州坡缕石矿物纳米的干式制备及其在酚醛树脂中的分散状态表征[J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2006, 35(6): 5-9.
ZHOU Yuan-kang, ZHENG Zhong-heng, LI Yi, et al. Dry preparation of Guizhounano-palygorskite minerals and scattered characterization in phenolic resin[J]. *Journal of Guizhou University (Natural science)*, 2006, 35(6): 5-9.
- [19] 杨绿, 周元康, 李屹, 等. 纳米坡缕石润滑油添加剂对灰铸铁 H200 摩擦磨损性能的影响[J]. *材料工程*, 2010(4): 94-98.
YANG Lv, ZHOU Yuan-kang, LI Yi, et al. Influence of nano-palygorskite lubricant additive on friction and wear properties of HT200 friction components[J]. *Journal of materials engineering*, 2010(4): 94-98.
- [20] 夏雷, 全姬善, 于婷, 等. 油酸改性超顺磁性氧化铁纳米粒子的制备[J]. *精细化工*, 2017, (34)7: 735-739.
XIA Lei, QUAN Ji-shan, YU Ting, et al. Preparation of oleic acid modified superparamagnetic iron oxide nanoparticles[J]. *Fine chemicals*, 2017, 34(7): 735-739.
- [21] LI J, YAN L, LI H Y, et al. Underwater superoleophobic palygorskite coated meshes for efficient oil/water separation[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2015, 28(3): 14696-14702.
- [22] 张博, 许一, 徐滨士, 等. 亚微米颗粒化凹凸棒石分体对 45# 钢的减摩与自修复[J]. *摩擦学学报*, 2012, 32(3): 291-300.
ZHANG Bo, XU Yi, XU Bin-shi, et al. Friction reduction and self-repairing performance of granulated nanoattapulgitite powders to 45# steel[J]. *Tribology*, 2012, 32(3): 291-300.
- [23] 南峰, 许一, 高飞, 等. 热处理对凹凸棒石摩擦学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(2): 1-5.
NAN Feng, XU Yi, GAO Fei, et al. Effect of thermal treatment on tribological properties of attapulgitite[J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2014, 35(2): 1-5.

(上接第 210 页)

- [23] EVIRGEN A, KARAMAN I, NOEBE R D, et al. Effect of precipitation on the microstructure and the shape memory response of the $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{29.7}\text{Zr}_{20}$ high temperature shape memory alloy[J]. *Scripta materialia*, 2013, 69(5): 354-357.
- [24] EVIRGEN A, KARAMAN I, SANTAMARTA R, et al. Microstructural characterization and superelastic response of a $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{29.7}\text{Zr}_{20}$ high-temperature shape memory alloy[J]. *Scripta materialia*, 2014, 81: 12-15.
- [25] FENG Z W, GAO B D, WANG J B, et al. Influence of Zr additions on shape-memory effect and mechanical properties of Ni-rich NiTi alloys[C]// *Trans Tech Publications Ltd. Switzerland: Materials science forum*, 2001: 365-368.
- [26] EVIRGEN A, KARAMAN I, SANTAMARTA R, et al. Relationship between crystallographic compatibility and thermal hysteresis in Ni-rich NiTiHf and NiTiZr high temperature shape memory alloys[J]. *Acta materialia*, 2016, 121: 374-383.
- [27] CARL M, SMITH J, VAN DOREN B, et al. Effect of Ni-content on the transformation temperatures in NiTi-20 at.%Zr high temperature shape memory alloys[J]. *Metals*, 2017, 7(11): 511.
- [28] OTSUKA K, REN X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys[J]. *Progress in materials science*, 2005, 50(5): 511-678.
- [29] OLIER P, BRACHET J C, BECHADE J L, et al. Investigation of transformation temperatures, microstructure and shape memory properties of NiTi, NiTiZr and NiTiHf alloys[J]. *Journal de physique IV*, 1995, 5(C8): C8-741-C8-746.
- [30] SUN H Q, SHI Y N, ZHANG M X. Wear behaviour of AZ91D magnesium alloy with a nanocrystalline surface layer[J]. *Surface and coatings technology*, 2008, 202(13): 2859-2864.
- [31] LIM S C, ASHBY M F, BRUNTON J H. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms[J]. *Acta metallurgica*, 1987, 35(6): 1343-1348.
- [32] 刘正林. 摩擦学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
LIU Zheng-lin. *Principles of tribology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [33] NEUPANE R, FARHAT Z. Wear mechanisms of nitinol under reciprocating sliding contact[J]. *Wear*, 2014, 315 (1/2): 25-30.
- [34] ABEDINI M, GHASEMI H M, AHMADABADI M N. Tribological behavior of NiTi alloy in martensitic and austenitic states[J]. *Materials & design*, 2009, 30(10): 4493-4497.
- [35] HU T, WEN C S, SUN G Y, et al. Wear resistance of NiTi alloy after surface mechanical attrition treatment[J]. *Surface and coatings technology*, 2010, 205(2): 506-510.
- [36] ZHANG X, LIN L, XIA Y, et al. Experimental study on wear of TBM disc cutter rings with different kinds of hardness[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2018, 82: 346-357.