第 48 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 2
2020 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20190369

不同结构层状硅酸盐矿物作为润滑油添加剂的摩擦学性能

尹艳丽[1]，于鹤龙[1]，王红美[1]，周新远[1]，宋占永[1]，许　一[2]，徐滨士[1]

(1. 陆军装甲兵学院，装备再制造技术国防科技重点实验室，北京 100072；
2. 北京金钰瑞曼新材料科技有限公司，北京 102300)

摘　要：采用 UMT-3 型往复磨损试验机考察了海泡石、凹凸棒石、蛇纹石 3 种不同结构天然层状硅酸盐矿物粉体作为润滑油添加剂的摩擦学性能。借助扫描电子显微镜、能量色散谱仪及 X 射线光电子能谱仪等对磨损表面进行了形貌和成分分析，探讨了硅酸盐结构与其摩擦学性能及减摩润滑机制之间的关系。结果表明：3 种硅酸盐粉体作为润滑油添加剂均具有较好的摩擦学性能，与基础油润滑下相比，可降低平均摩擦因数 2.4%～25.5%，减少磨损体积 37.4%～56.2%；含硅酸盐油样作用下的摩擦表面由于生成了由铁的氧化物、氧化硅和石墨等摩擦反应产物构成的复合摩擦反应膜，导致其具有良好的减摩润滑性能；相对蛇纹石而言，凹凸棒石和海泡石由于具有纤维状的形貌特征，同时独特的 TOT 型晶体结构使其更易在摩擦过程中形成高含量氧化物和石墨，从而在高载荷条件下具有更优异的摩擦学性能。

关键词：层状硅酸盐；润滑油；添加剂；摩擦学
中图分类号：TH117.3　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)02–0299–10
网络出版时间：2019–12–13



Tribological Performance of Phyllosilicate Minerals as Lubricating Oil Additives

YIN Yanli[1], *YU Helong*[1], *WANG Hongmei*[1], *ZHOU Xinyuan*[1], *SONG Zhanyong*[1], *XU Yi*[2], *XU Binshi*[1]
(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;
2. Beijing Jinyu Ruiman New Materials Technology Co. Ltd., Beijing 102300, China)

Abstract: Tribological properties of three different silicate natural mineral powders, *i.e.*, sepiolite, attapulgite and serpentine as lubricating oil additives were investigated in an UMT-3 tribometer. The morphologies and elemental components of the worn surfaces were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The relationship between the structure of silicate as well as its anti-wear and friction reducing mechanism were discussed. The results indicate that all three silicate powders can provide excellent tribological properties as lubricating oil additives. Compared to 500SN, these additives have lower friction coefficients and wear volumes, which are 2.4%–25.5% and 37.4%–56.2%, respectively. The friction films are formed with iron oxide, silicon oxide and graphite when silicate powder additives are used, providing the excellent anti-wear and friction reducing properties. Unlike serpentine, attapulgite and sepiolite have a fibrous structure, and the TOT crystal structure is easier to form the frictional films with more oxides and graphites, leading to the superior tribological performance at a higher load.

Keywords: layer-structure silicate; lubricating oil; additives; tribological behavior

摩擦磨损作为材料失效的主要形式之一，每年造成的经济损失巨大。中国工程院发布的摩擦学调查报告表明，2006 年全国因摩擦磨损而导致的各类损失高达 9 500 亿元，约占当年 GDP 的 4.5%[1–2]。对于特定的摩擦学系统，实施有效的润滑是降低摩擦、减小磨损的关键[3]。近年来，研究制备兼具减

收稿日期：2019–05–31。　修订日期：2019–06–29。
基金项目：国家重点基础研究发展规划项目(2017YFB0310703)资助。
第一作者：尹艳丽(1985—)，女，硕士，助理研究员。
通信作者：于鹤龙(1979—)，男，博士，副研究员。

Received date: 2019–05–31.　**Revised date:** 2019–06–29.
First author: YIN Yanli (1985–), female, Master, Assistant Researcher.
E-mail: yinyl2009@126.com
Correspondent author: YU Helong (1979–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: helong.yu@163.com

摩、抗磨和微损伤自修复等功能于一身的新型微纳米润滑材料是摩擦学研究领域的热点[4–5]。

天然层状硅酸盐矿物超细粉体由于具有独特的亚稳态结构，且原料成本低、细化工艺简单、环境友好，作为润滑油脂添加剂能够显著改善摩擦副的润滑状态，有效降低摩擦磨损，表现出了优异的摩擦学性能[6–8]。张宝森等[9]研究表明，蛇纹石作为添加剂可将基础油的摩擦因数及其润滑下材料的磨损体积分别降低 9.7%和 40.7%，并在磨损表面形成厚约 0.68 μm 的自修复摩擦反应膜。杨玲玲等[10]发现摩擦条件对凹凸棒石黏土作为润滑油添加剂的减摩抗磨性能影响较大，摩擦过程中载荷、往复频率、摩擦时间和添加量等 4 个因素对凹凸棒石添加剂性能影响的主次顺序为载荷、添加量、往复频率、摩擦时间，不同试验条件下摩擦因数降幅范围为 0.55%～33.3%，对材料磨损体积减小的幅度范围为 7.26%～42.77%。黄海鹏等[11]利用销盘磨损试验机考察海泡石作为润滑油添加剂的研究表明，海泡石在显著提高油品的减摩抗磨性能的同时，对基础油的理化特性没有不良影响。

鉴于层状硅酸盐矿物微粉具备良好的摩擦学性能[12–14]，同时考虑到硅酸盐矿物种类多，且已有研究中未见不同种类粉体在相同条件下的性能对比测试，特别是缺少关于层状硅酸盐结构与摩擦学性能之间关联性的研究，本工作利用往复滑动磨损试验机对比考察了海泡石、凹凸棒石、蛇纹石 3 种天然硅酸盐矿物粉体作为 500SN 基础油添加剂的摩擦学性能，并结合粉体结构和磨损表面分析，探讨了硅酸盐结构与其摩擦学性能及减摩润滑机制之间的关系。

1 实验

1.1 润滑油样制备

所用海泡石、凹凸棒石、蛇纹石均为天然矿物经工业化提纯粉碎细化后的市售粉末产品，分别由湖南湘潭源远海泡石新材料有限公司、江苏盱眙中材有限公司、江苏龙腾化工有限公司提供。3 种粉体主要化学组成如表 1 所示，其含量分别为 95.3%、96.2%、98.7%。

表 1 不同硅酸盐矿物粉体的化学组成

Table 1 Chemical composition of different silicate mineral powders *w*/%

Silicate mineral	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	P_2O_5	H_2O
Sepiolite	58.37	23.46	2.71	3.14		0.72	0.36	0.46	0.03		10.75
Attapulgite	63.11	15.45	3.98	2.20		1.04	0.40	0.55	0.05	0.18	13.04
Serpentine	44.57	41.10	0.20		0.62	0.13	0.60		0.07		12.71

以质量分数 5%油酸为改性剂，等摩尔数二环已基碳二亚胺(DCC)及 20%摩尔分数 4-二甲氨基吡啶(DMAP)为改性助剂，甲苯为球磨介质，利用南京大学产 QM-2 型行星球磨机对硅酸盐微粉进行机械化学湿法表面改性，所用球磨罐体及研磨球均为玛瑙材质，球磨转速为 250 r/min，球料比为 30:1，时间为 3 h。球磨结束后，经离心、洗涤、过滤、烘干、研磨后得到表面改性层状硅酸盐矿物粉体。

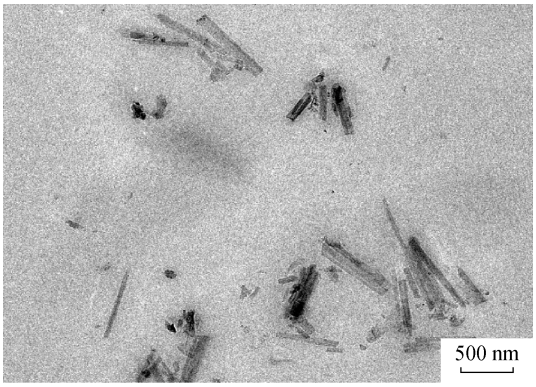
图 1 为改性后不同硅酸盐粉体的 TEM 形貌。可以看出，改性后海泡石粉体呈短棒状，直径为 50～100 nm，长度为 300～500 nm；改性后凹凸棒石粉体呈长纤维状，直径为 30～50 nm，长度为 700～800 nm；改性后蛇纹石粉体呈颗粒状，粒度为 80～300 nm。图 2 为改性处理前后不同硅酸盐矿物粉体的 XRD 谱。可以看出，改性后粉体的组分并未发生改变，但衍射峰的强度明显弱化，这主要是由于颗粒细化导致粉体的结晶度下降所致[15]。

以 500SN 矿物基础油为对比油样，将质量分数 0.5%的改性后硅酸盐粉体添加至 500SN 中进行球磨分散(转速 250 r/min，时间 3 h)，制备得到 3 种含不同硅酸盐矿物粉体的待测润滑油样。常温常压自然放置测试表明，分散后含硅酸盐油样的稳定悬浮时间达到 4 个月以上。

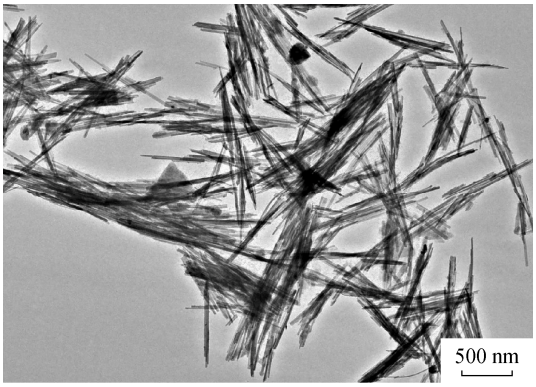
1.2 摩擦学试验

采用布鲁克公司产 UMT-3 型往复磨损试验机评价不同润滑油样的摩擦学性能，选用球—盘接触形式，往复运动的上试样为 GCr15 钢球(HRC 59-61，ϕ 4.0 mm)，保持固定的下试样为 45$^{\#}$钢圆盘(HRC 42–45，ϕ 25.4 mm×6.9 mm)；往复滑动行程 3 mm，时间 60 min，往复滑动频率 5 Hz，载荷分别为 5、10、15、20 N。摩擦因数由试验机自动实时记录。试验结束后，采用奥林巴斯 LEXT OLS4000 型 3D 激光共焦显微镜测量下试样钢盘表面磨痕截面轮廓

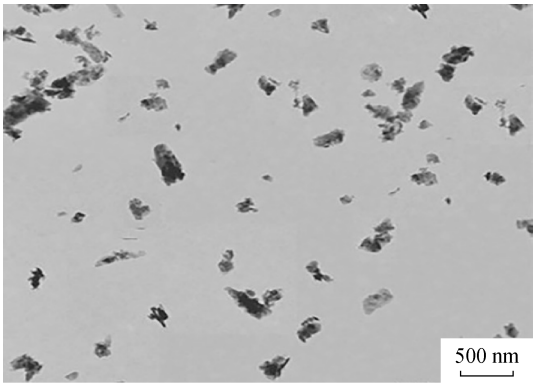
和磨损体积。每组参数进行 3 次试验，取其平均值作为最终结果。



(a) Sepiolite



(b) Attapulgite



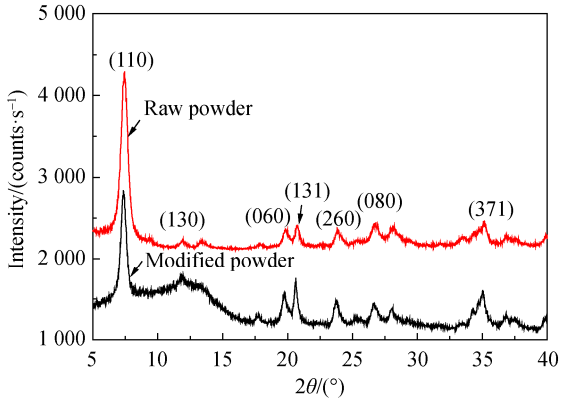
(c) Serpentine

图 1　改性后硅酸盐矿物粉体的 TEM 形貌

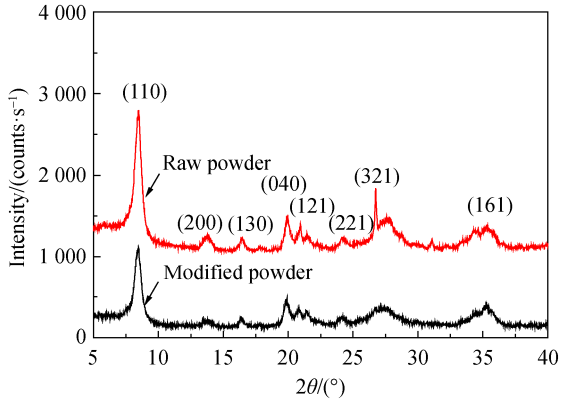
Fig. 1　TEM images of the surface-modified silicate powders

1.3　磨损表面分析

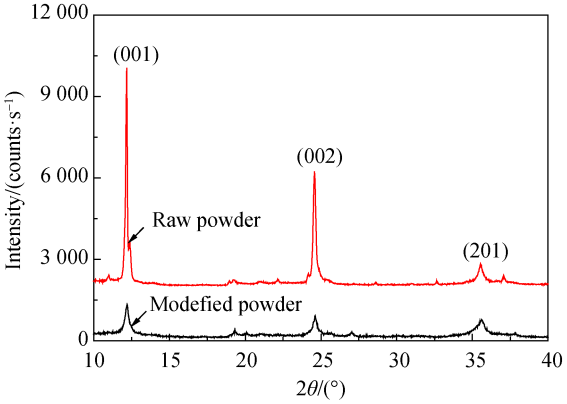
采用美国 FEI 公司产 Nova Nano SEM 450 型高分辨扫描电镜(HRSEM)及其配备的 OXFORD 公司产 X-Max 80 型 X 射线能谱仪(EDS)分析磨损表面形貌和元素组成；采用美国 Thermo Fisher 公司产 ESCLAB 250Xi 型光电子能谱仪(XPS)分析磨损表面特征元素的化学状态，发射源采用能量为 1 486.6 eV 的单色 Al 靶，能量分辨率为±0.2 eV，通过能量为 29.4 eV，采用标准碳污染峰(C1*s*: 284.8 eV)对峰位进行校正。



(a) Sepiolite



(b) Attapulgite



(c) Serpentine

图 2　不同硅酸盐矿物粉体改性前后的 XRD 谱

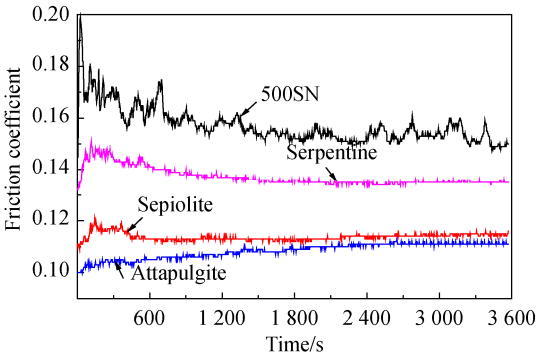
Fig. 2　X-ray diffraction (XRD) patterns of different silicate powders before and after modification

2　结果与讨论

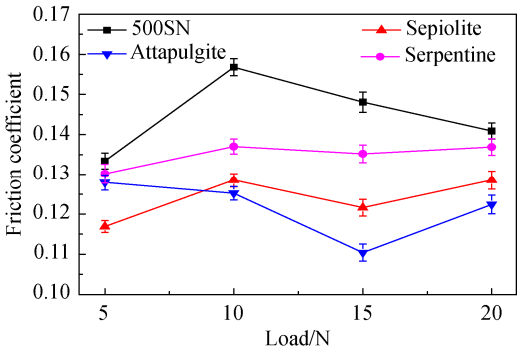
2.1　硅酸盐粉体的摩擦学性能

图 3 为 500SN 和含硅酸盐油样的摩擦因数随时间和载荷变化的关系曲线。可以看出，基础油润滑

下摩擦因数较高，波动幅度较大，加入硅酸盐粉体后基础油的摩擦因数明显降低，且波动较小，在600 s 后趋于平稳。但不同载荷作用下，海泡石和凹凸棒石改善基础油减摩性能的效果更优。在低载荷下(5 N)，含海泡石油样的摩擦因数最低，而在中高载荷下(10～20 N)，含 3 种粉体油样的摩擦因数均随载荷的增加呈先减小后增大的变化趋势，可将基础油的摩擦因数降低 2.4%～25.5%，其中凹凸棒石表现出最佳的减摩性能。



(a) Typical friction coefficient with time (10 N)



(b) Average friction coefficient with load

图 3 500SN 与含硅酸盐矿物油样的摩擦因数随载荷和时间的变化曲线

Fig. 3 Friction coefficient curves under lubricated with 500SN and oil containing different silicate powders

图 4 为 500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样的磨损体积随载荷变化的关系曲线。可以看出，不同润滑条件下试样磨损体积均随载荷的增加呈升高的变化趋势，但相同载荷下含硅酸盐矿物油样润滑下试样磨损体积同基础油润滑相比明显降低，含硅酸盐油样的抗磨性能较 500SN 提高 37.4%～56.2%。在 5～10 N 条件下，含海泡石、凹凸棒石、蛇纹石油样润滑下试样的磨损体积接近。在 15～20 N 条件下，海泡石和凹凸棒石改善油品抗磨性能的作用好于蛇纹石。

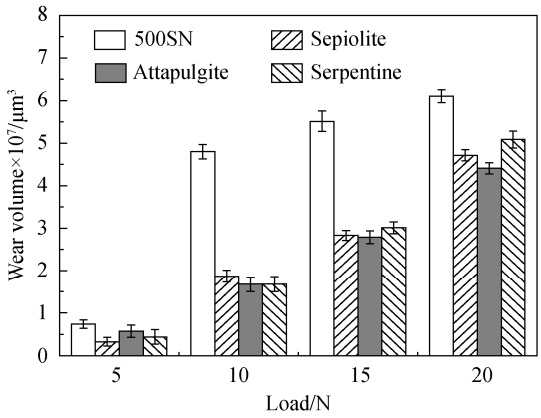


图 4 500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样的磨损体积随载荷变化

Fig. 4 Wear volume changing with load lubricated under 500SN and oil containing silicate powders

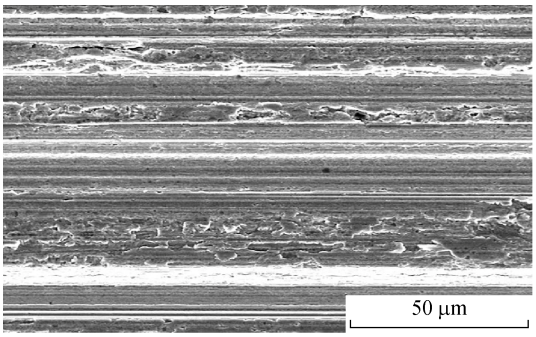
2.2 磨损表面形貌

图 5 为载荷 20 N 条件下 500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样磨损形貌 SEM 照片。由图 5 可见，基础油 500SN 润滑下试样磨损比较剧烈，表面存在着大量沿摩擦方向宽而深的划痕和犁沟，沿犁沟边缘发生了明显的塑性变形；而添加蛇纹石后，磨痕表面略显平滑，仍然存在一定的犁沟和划痕，但其深度和宽度明显降低，摩擦损伤较基础油明显减轻；添加海泡石和凹凸棒石油样润滑下的磨损表面较光滑，仅有少量的划痕和贯穿性犁沟，摩擦表面损伤较轻微。与图 4 所示载荷为 20 N 条件下磨损体积情况一致。

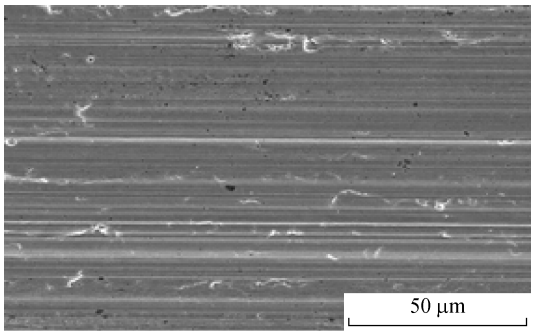
图 6 为载荷 20 N 条件下，500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样磨痕截面轮廓曲线(X 轴为与摩擦方向垂直的磨痕宽度方向，Y 轴为磨痕的深度方向)。可以看出，不同润滑条件的下试样磨痕表面宽度相近，但含硅酸盐油样作用下磨痕深度明显减小，同时磨痕表面更加光滑平整，进一步表明硅酸盐矿物粉体作为添加剂能够显著改善润滑油的抗磨性能。

2.3 磨损表面化学组成

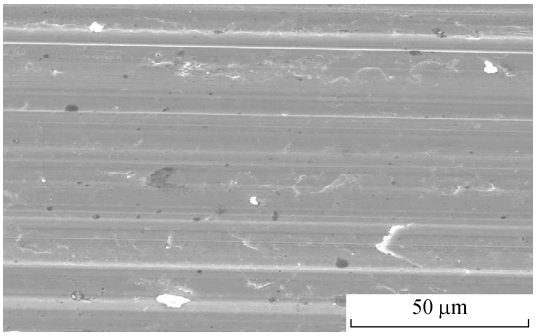
图 7 为载荷 20 N 条件下含硅酸盐油样和 500SN 润滑下试样磨损表面的 EDS 谱。表 2 列出了对应各磨损表面的元素组成及含量。500SN 润滑时，磨损表面主要由 Fe、C、O 元素组成；而含硅酸盐油样润滑时，磨损表面除 Fe、C、O 元素外，还含有少量的硅酸盐特征元素 Mg 和 Si，且 O 元素含量较基础油润滑下的摩擦表面显著升高。显然，摩擦过程中层状硅酸盐矿物参与了摩擦表面复杂的摩擦化学



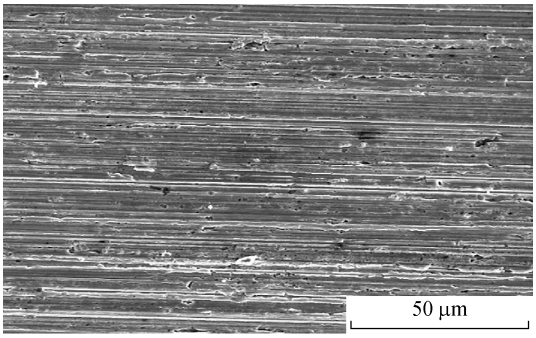
(a) 500SN



(b) Oil containing sepiolite



(c) Oil containing attapulgite



(d) Oil containing serpentine

图 5　500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样磨损表面的 SEM 照片

Fig. 5　SEM images of worn surfaces lubricated with 500SN and oil containing silicate powders

反应，促进了摩擦表面的氧化，诱发形成了富含 Fe、Mg、Si、C、O 等元素的复合摩擦反应膜。

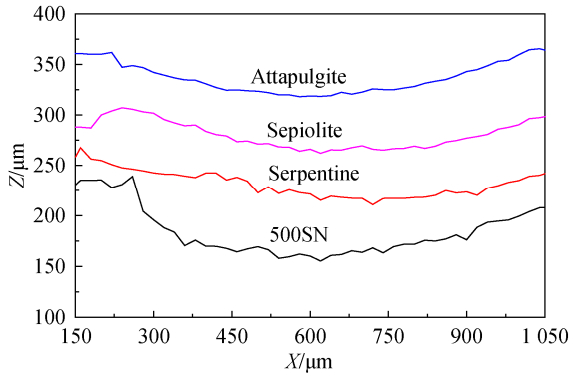


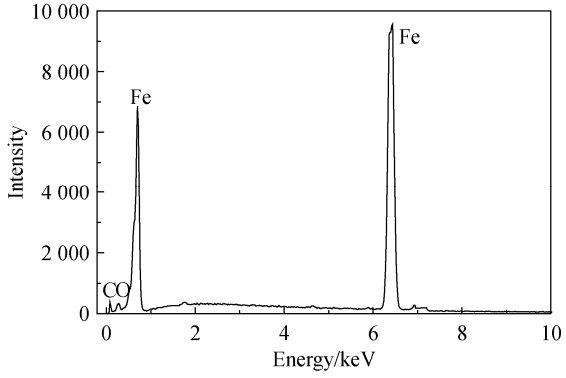
图 6　500SN 和含硅酸盐油样润滑下试样磨痕深度曲线

Fig. 6　Wear mark profiles of the worn surface lubricated with 500SN and oil containing silicate powders

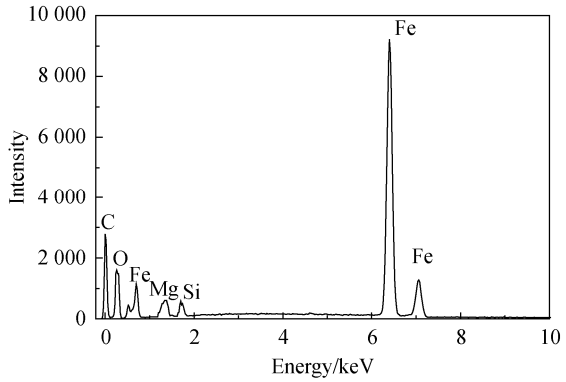
2.4　磨损表面的 XPS 分析

图 8 和图 9 为载荷 20 N 条件时 500SN 和含硅酸盐油样润滑下磨损表面元素的 XPS 谱。表 3 列出了通过对 XPS 谱进行面积计算获得的不同润滑条件下磨损表面物质含量。由图 8 和图 9 可知，500SN 润滑下的磨损表面成分主要由 Fe、O 和 C 元素构成，Fe $2p_{3/2}$ 谱可拟合为 Fe(707 eV)、FeO(708.1 eV)、Fe(OH)O(709.2 eV)、Fe_3O_4(710.4 eV)和 Fe_2O_3(711.7 eV)等特征峰[16–19]，根据各子峰的积分面积可估算出上述物质在磨损表面的相对含量比约为 57:13:10:8:12，其中单质铁为摩擦副材料的主要成分，而 FeO、Fe(OH)O、Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 等铁的化合物为摩擦过程中形成，相对总含量约为 43%。含硅酸盐油样润滑时，磨损表面的 Fe $2p_{3/2}$ 同样拟合为 Fe(707 eV)、FeO(708.1 eV)、Fe(OH)O(709.2 eV)、Fe_3O_4(710.4 eV)和 Fe_2O_3(711.7 eV)等子峰，而含海泡石和凹凸棒石油样润滑下的磨损表面除存在上述成分外，在结合能为 714.8 eV 处还出现新的特征峰，经判定为铁的有机物。含海泡石、凹凸棒石和蛇纹石油样润滑下的磨损表面 Fe、FeO、Fe(OH)O、Fe_3O_4、Fe_2O_3 和铁的有机物的相对含量比依次为 36:17:16:16:8:7，24:11:18:20:21:6 和 46:11:14:14:15，其中，铁的化合物相对总含量分别为 64%、76%、54%。

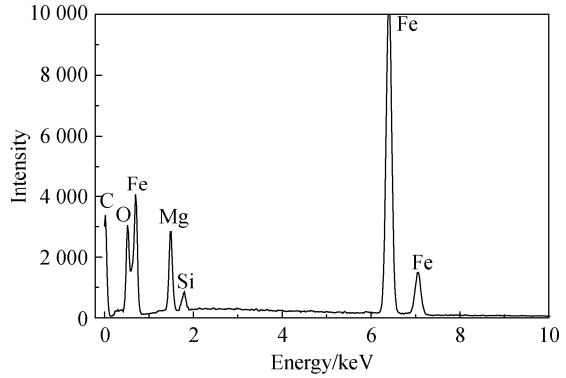
不同润滑条件下的摩擦表面 O 1*s* 谱均可拟合为氧化物(529.5 eV、530.2 eV)和有机化合物(530.8 eV、531.7 eV)等特征子峰[16–20]，由表 3 可知，含硅酸盐油样润滑的磨损表面氧化物的含量明显高于基础油润滑的磨损表面，而含凹凸棒石油样又高于含海泡石和蛇纹石油样，结果与磨损表面铁的氧化物的相对含量一致。摩擦表面 C 1*s* 谱均可拟合为石墨(284.5 eV)、污染碳(285 eV)、有机物(285.5 eV、



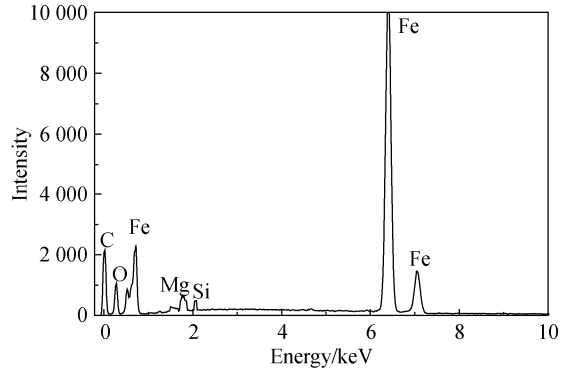
(a) 500SN



(b) Oil containing sepiolite



(c) Oil containing attapulgite



(d) Oil containing serpentine

图 7 四种润滑剂润滑下的磨损表面的 EDS 能谱

Fig. 7 EDS energy spectra on worn surfaces under lubricated with 500SN and oil containing silicate powders

表 2 不同润滑剂润滑下的磨损表面元素含量

Table 2 Elemental content of worn surfaces lubricated with 500 SN and oil containing silicate powders

Worn surface	Mole fraction/%				
	Fe	C	O	Si	Mg
500SN	90.72	4.96	4.32		
Oil containing sepiolite	58.32	6.65	34.15	0.52	0.36
Oil containing attapulgite	61.42	14.21	16.52	7.08	0.77
Oil containing serpentine	77.99	6.27	15.21	0.22	0.31

286.6 eV)等特征峰[16,20]，但含硅酸盐油样润滑的磨损表面石墨含量高于 500SN 润滑下表面。

此外，含硅酸盐油样润滑下的磨损表面 XPS 谱图中 Si 2*p* 在 101.9 eV 附近出现明显特征峰，表明有硅的氧化物存在。同时，在磨损表面均未检测到 Mg 元素，这与 EDS 分析结果相矛盾，可能是两种测试方法的原理不同，EDS 可检测到从表面到内部几微米范围内的信息，而 XPS 检测到的信息仅为几十纳米范围内的表面信息[21–22]。总体上，含硅酸盐粉体油样润滑的磨损表面铁的氧化物和石墨含量明显高于 500SN 润滑的磨损表面，这可能是层状硅酸盐矿物作为添加剂改善油品润滑性能的关键。

2.5 讨论

海泡石、凹凸棒石、蛇纹石等亚稳态天然硅酸盐矿物均具有层状结构，易发生解理和断裂，释放氧原子等活性反应基团，通常认为该类矿物材料作为润滑油脂添加剂的减摩润滑机理体现在 3 个方面：一是极性的层状硅酸盐矿物具有较强吸附能力，极易在摩擦过程中吸附到金属表面并铺展，层状结构在剪切过程中发生滑移，从而起到润滑作用[23–25]；二是在摩擦作用下硅酸盐晶体结构被破坏并产生化学键断裂，释放出大量的高反应活性 O—、—O—、Si—、—Si—O、OH—、—Mg—OH 等基团，与摩擦副表面的 Fe 元素发生反应，形成复杂的摩擦保护膜[26–28]；三是硅酸盐颗粒对摩擦副表面起到研磨抛光作用，能够洁净优化摩擦表面，同时硅酸盐结构断裂释放的氧化硅等颗粒填补摩擦表面损伤部位，从而改变摩擦副的润滑状态[29–31]。对于上述不同的作用机理，由于层状硅酸盐的成分和结构影响矿物的化学键性质、离子交换能力、反应活性及其与摩擦副交互作用，从而影响不同作用机理下硅酸盐的摩擦学性能。层状硅酸盐矿物作为添加剂可显著改善润滑油的摩擦学性能，但不同载荷下不同种类矿物对油品减摩抗磨性能的改善效果差异较大。

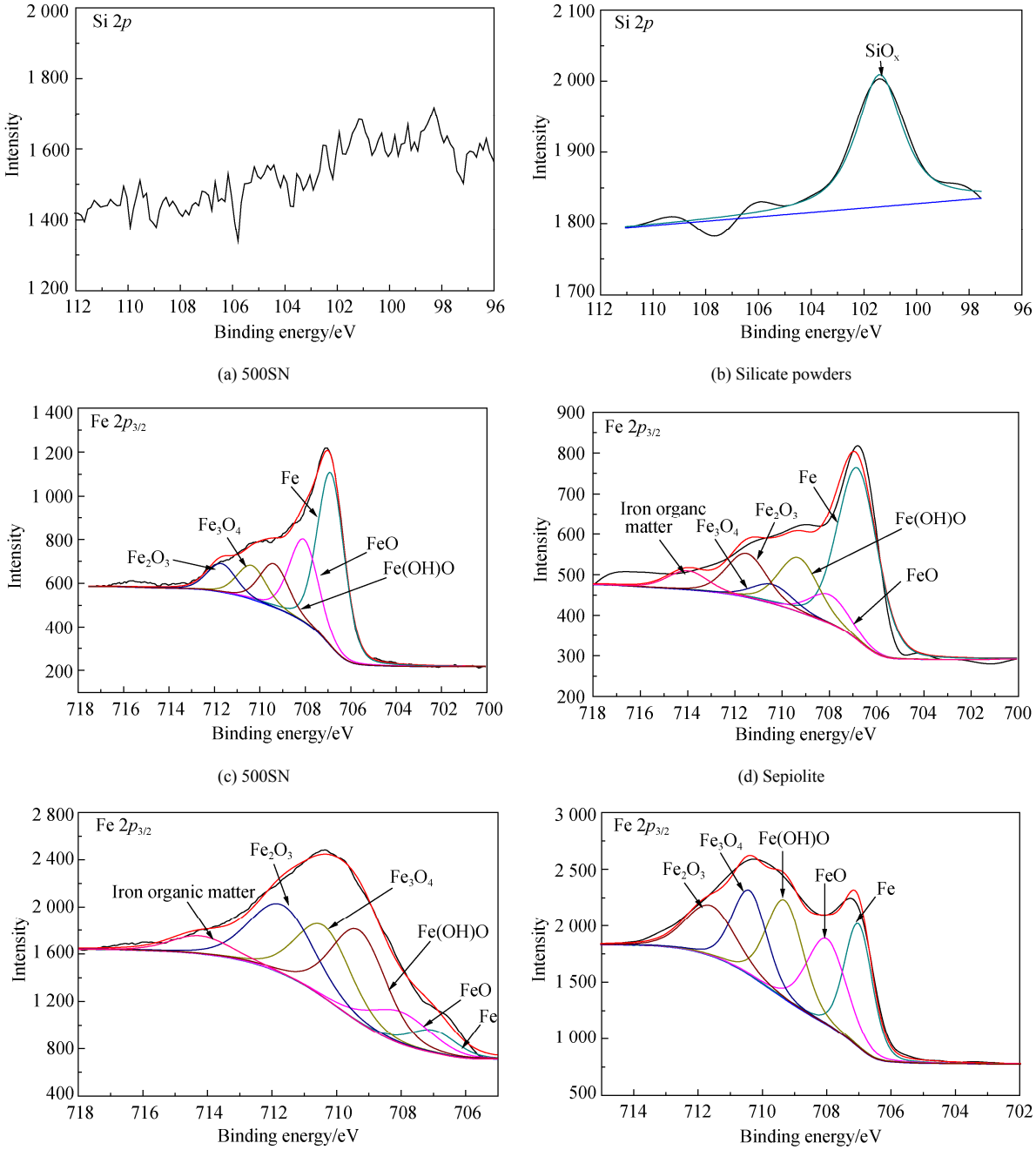


图 8　基础油 500SN 和含不同种类硅酸盐粉体润滑下磨损表面 Si 2*p*、Fe 2$p_{3/2}$ 的 XPS 谱

Fig. 8　XPS spectra of Si 2*p* and Fe 2$p_{3/2}$ on worn surfaces lubricated with 500SN and oil containing silicate powders

3 种硅酸盐矿物粉体均含有微量的杂质，但通过 EDS 和 XPS 的结果发现，磨损表面生成了铁的氧化物、氧化硅、石墨等，未检测到杂质组分，磨损表面的铁的氧化物、氧化硅、石墨等是添加剂改善油品润滑性能的关键，均来自硅酸盐，因此杂质不影响其减摩润滑性能。

海泡石、凹凸棒石表现出较好的减摩性能，且随载荷的增大，其减摩作用呈先增强后减弱的趋势。海泡石和凹凸棒石由于具有棒状和纤维状结构，导致其在中低载荷作用下在摩擦表面容易发生滚动，从而起到类似滚子轴承的作用而降低摩擦。而高载荷条件下，凹凸棒石和海泡石发生进一步破碎和结构断裂，使其产生滚动减摩的作用弱化。

此外，海泡石和凹凸棒石在中高载荷下(15～20 N)改善油品抗磨性能的效果优于蛇纹石，这可能与 XPS 分析结果显示的磨损表面形成的氧化

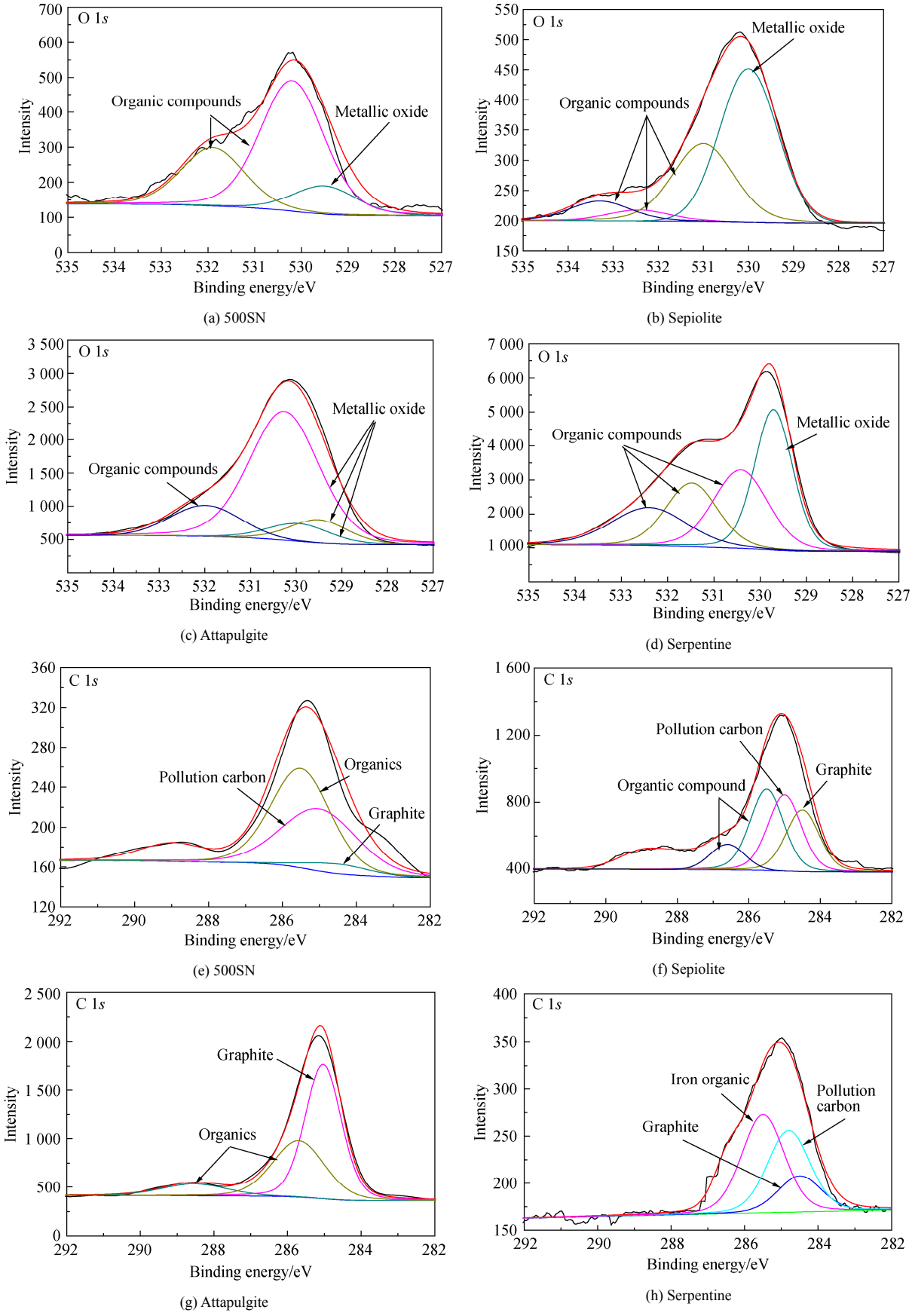


图 9 基础油 500SN 和含不同种类硅酸盐粉体润滑下磨损表面 O 1*s* 和 C 1*s* 的 XPS 谱

Fig. 9 XPS spectra of O 1*s* and C 1*s* on worn surfaces lubricated with 500SN and oil containing silicate powders

表 3　通过面积计算获得的不同润滑剂润滑下的磨损表面物质含量

Table 3　Material content (mass fraction *w*) of friction surfaces under different lubrication conditions obtained by area calculation of XPS spectras　　*w*/%

Silicate	Fe 2$p_{3/2}$						O 1*s*		C 1*s*		
	Fe	FeO	Fe(OH)O	Fe_3O_4	Fe_2O_3	Iron organic matter	Organic compounds	Metallic oxide	Graphite	Pollution carbon	Organic compound
500SN	57	13	10	8	12		78	21	13	45	42
Sepiolite	36	17	16	16	8	7	56	44	29	31	40
Attapulgite	24	11	18	20	21	6	24	76	42		58
Serpentine	46	11	14	14	15		65	35	25	30	45

物、石墨等摩擦反应产物含量高低密切相关。研究表明[30]，凹凸棒石和海泡石具有 TOT 型晶体结构，即矿物结构层由两层硅氧四面体与一层氢氧镁石八面体结合而成，结构中存在晶格置换，含有不定量的 Na^+、Ca^{2+}、Fe^{3+}、Al^{3+}等离子，层内的原子间作用力高于层间作用力，从而具有良好的解离性能[32−33]；而蛇纹石具有 TO 型晶体结构，即由一层硅氧四面体与一层氢氧镁石八面体结合而成，八面体层的全部空隙被 Mg^{2+}填充，结构相对稳定[15]。因此，凹凸棒石、海泡石在摩擦表面的载荷和剪切作用下容易产生滑移、剥离或解理断裂，释放大量高活性原子或原子团主导了摩擦过程中的化学反应进程[12,14]，从而导致了含凹凸棒石和海泡石油样润滑下的磨损表面形成相对含量更多的氧化物和石墨等摩擦反应产物，从而表现出更优异的摩擦学性能。

3　结论

海泡石、凹凸棒石、蛇纹石 3 种硅酸盐矿物微粉作为润滑油添加剂均具有优异的摩擦学性能，不同摩擦条件下可将基础油的平均摩擦因数降低 2.4%～25.5%，将材料磨损体积减少 37.4%～56.2%。3 种硅酸盐矿物作为润滑油添加剂的减摩润滑机制是在摩擦表面生成由铁的氧化物、氧化硅和石墨等摩擦反应产物构成的复合摩擦反应膜，相对蛇纹石而言，凹凸棒石和海泡石由于具有纤维状的形貌特征，同时二者独特的 TOT 型晶体结构特征使其在摩擦过程中更易形成高含量氧化物和石墨，从而表现出更优异的摩擦学性能。

参考文献：

[1] 张嗣伟. 我国摩擦学工业应用的节能潜力巨大[J]. 中国表面工程, 2008, 12(2): 49–52.
ZHANG Siwei. China Surface Eng (in Chinese), 2008, 12(2): 49–52.

[2] 谢友柏, 张嗣伟. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究—摩擦学在工业节能、降耗、减排中地位与作用的调查[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 3–5.

[3] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术(第二版)[M]. 国防工业出版社, 2010: 1–8.

[4] 张博, 许一, 王建华. 凹凸棒石润滑脂添加剂对45号钢的微动磨损及自修复性能研究[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(11): 89–94.
ZHANG Bo, XU Yi, WANG Jianhua. Petrol Process Petrochem (in Chinese), 2014, 45(11): 89–94.

[5] 张博, 许一, 徐滨士, 等. 亚微米颗粒化凹凸棒石粉体对45#钢的减摩与自修复[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(3): 291–299.
ZHANG Bo, XU Yi, XU Binshi, et al. Tribology (in Chinese), 2012, 32(3): 291–299.

[6] ZHANG B S, XU Y, GAO F, et al. Preparation of ultrafine natural mineral powders and their tribological properties as lubricant additive[J]. Adv Sci Lett, 2011, 4(3): 1270–1275.

[7] QI Xiaowen, LU Ling, JIA Zhining, et al. Comparative tribological properties of magnesium hexsilicate and serpentine powder as lubricating oiladditives under high temperature[J]. Tribol Int, 2012, 49: 53–57.

[8] ZHANG Bo, XU Binshi, XU Yi, et al. Research on tribological characteristics and worn surface self-repairing performance of nano attapulgite powders used in lubricant oil as additives[J]. Rare Metl Mater Eng, 2012, 41(S1): 336–340.

[9] 张保森, 徐滨士, 许一. 蛇纹石微粉对类轴—轴瓦摩擦副的自修复效应及作用机理[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(3): 246–252.
ZHANG Baosen, XU Binshi, XU Yi, et al. Mater Sci Eng Powder Metall (in Chinese), 2013, 18(3): 246–252.

[10] 杨玲玲, 于鹤龙, 杨红军. 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): 274–279.
YANG Lingling, YU Helong, YANG Hongjun. Mater Sci Eng Powder Metall (in Chinese), 2015, 20(2): 274–279.

[11] 黄海鹏, 朱和菊, 岳文, 等. 海泡石作为润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 石油学报, 2012, 25(1): 143–148.
HUANG Haipeng, ZHU Heju, YUE Wen, et al. Acta Petrol Sin (in Chinese), 2012, 25(1): 143–148.

[12] 杜鹏飞, 陈国需, 宋世远, 等. 白云母微粉作为润滑脂添加剂的摩擦学性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(5): 748–753.
DU Pengfei, CHEN Guoxu, SONG Shiyuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2016, 44(5): 748–753.

[13] 高传平, 王燕民, 潘志东. 纳米高岭土作为润滑添加剂的减摩行为[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(4): 506–513.
GAO Chuanping, WANG Yanmin, PAN Zhidong. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(4): 506–513.

[14] 席翔, 夏延秋, 曹正锋. 蒙脱石作为润滑脂添加剂的减摩抗磨性能及机理[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(8): 1159–1167.
XI Xiang, XIA Yanqiu, CAO Zhengfeng. J Chin Ceram Soc, 2017, 45(8): 1159–1167.

[15] 张保森. 基于亚稳态蛇纹石矿物的自修复材料制备及摩擦学机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
ZHANG Baosen. Preparation of self-reconditioning materials based on metastable serpentine mineral and investigation on their tribology mechanisms (in Chinese, dissertation). Shanghai: School of Materials Science & Engineering, 2011.

[16] WAGNER C D, RIGGS W M, DAVIS L E, et al. Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy[M]. Eden Prairie: Perkin-Elmer Corporation, 1979: 49–58.

[17] YAMASHITA T, HAYES P. Analysis of XPS spectra of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions in oxide materials[J]. Appl Surf Sci, 2008, 254: 2441–2449.

[18] ALLAHDIN O, DEHOU S C, WARTEL M, et al. Performance of FeOOH-brick based composite for Fe(II) removal from water in fixed bed column and mechanistic aspects[J]. Chem Eng Res Des, 2013, 91: 2732–2742.

[19] PELISSIER B, FONTAINE H, BEAURAIN A, et al. HF contamination of 200 mm Al wafers: A parallel angle resolved XPS study. Microelectron[J]. Engineering, 2011, 88: 861–866.

[20] MONTESDEOCA-SANTANA A, JIMÉNEZ-RODRÍGUEZ E, MARRERO N., et al. XPS characterization of different thermal treatments in the ITO–Si interface of a carbonate-textured monocrystalline silicon solar cell[J]. Nucl Instrum Meth B, 2010, 268: 374–378.

[21] 高飞. 纳米蛇纹石的水热合成和自修复机理研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2013.
GAO Fei. Study on hydro-thermal synthesis and self-repairing mechanism of nano-scale chrysotile (in Chinese, dissertation). Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2013.

[22] 金元生. 蛇纹石内氧化效应对铁基金属磨损表面自修复生成的作用[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 45–50,56.
JIN Yuansheng. China Surface Eng (in Chinese), 2010, 23(1): 45–50, 56.

[23] 南峰, 许一, 高飞, 等. 凹凸棒石粉体作为润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(4): 836–841.
NAN Feng, XU Yi, GAO Fei, et al. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(4): 836–841.

[24] 肖舟, 侯根良, 苏勋家, 等. 蛇纹石对不同粗糙度45#钢表面的减摩行为[J]. 硅酸盐学报, 2012, 40(8): 1190–1195.
XIAO Zhou, HOU Genliang, SU Xunjia, et al. J Chin Ceram Soc, 2012, 40(8): 1190–1195.

[25] 李桂金, 白志民, 赵平. 蛇纹石对铁基金属摩擦副的减摩修复作用[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(2): 306–312.
LI Guijin, BAI Zhimin, ZHAO Ping. J Chin Ceram Soc, 2018, 46 (2): 306–331.

[26] 于鹤龙, 许一, 史佩京, 等. 蛇纹石润滑油添加剂摩擦反应膜的力学特征与摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(5): 500–506.
YU Helong, XU Yi, SHI Peijing, et al. Tribology (in Chinese), 2012, 32(5): 500–506.

[27] 张博, 许一, 李晓英, 等. 纳米凹凸棒石对磨损表面的摩擦改性[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(4): 514−521.
ZHANG Bo, XU Yi, LI Xiaoying, et al. Mater Sci Eng Powder Metall (in Chinese), 2012, 17(4): 514−521.

[28] 张树华, 刘 岩, 唐诗洋. 蛇纹石粉体作为机械摩擦副磨损表面自修复添加剂的研究[J]. 化学工程师, 2012, 206(11): 48-50.
ZHANG Shuhua, LIU Yan, TANG Shiyang. Chem Eng (in Chinese), 2012, 206(11): 48–50.

[29] Zhi Min BAI, Na YANG, Man GUO, et al. Antigorite: Mineralogical characterization and friction performances[J]. Tribol Int, 2016, (101): 115–121.

[30] 岳文. 硅酸盐矿物微粒润滑油添加剂的摩擦学性能与磨损自修复机理[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.
YUE Wen. Tribological performance and wear-self-repairing mechanism of silicate particles as lubricating oil additive (in Chinese, dissertation). Beijing: China University of Geosciences, 2009.

[31] YU Helong, XU Yi, SHI Peijing, et al. Microstructure, Mechanical Properties and Tribological Behavior of Tribofilm Generated from Natural Serpentine Mineral Powders as Lubricant Additive[J]. Wear, 2013, 297: 802–810.

[32] 李胜荣. 结晶学及矿物学. 北京: 地质出版社, 2008: 40–46.

[33] 张博. 基于纳米凹凸棒石的在线修复型润滑脂制备与摩擦学机理研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2012.
ZHANG Bo. Preparation of self-repairing greases based on nano attapulgite powders and investigation on their tribological characteristics (in Chinese, dissertation). Beijing: Academy of Armored Forces Engineering, 2012.