

# 基于正交实验方法的蛇纹石 润滑油添加剂摩擦学性能

Tribological properties of serpentine  
lubricant additives evaluated by  
orthogonal tests method

尹艳丽,于鹤龙,周新远,宋占永,王红美,  
王文字,刘晓亭,徐滨士  
(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)

YIN Yan-li, YU He-long, ZHOU Xin-yuan, SONG Zhan-yong,  
WANG Hong-mei, WANG Wen-yu, LIU Xiao-ting, XU Bin-shi  
(National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy  
of Armored Forces, Beijing 100072, China)

**摘要:** 采用正交实验方法,利用往复式滑动磨损试验机研究油酸改性天然蛇纹石超细粉体作为 500SN 润滑油添加剂的减摩抗磨性能,分析载荷、往复频率、摩擦时间和蛇纹石添加量 4 个因素对蛇纹石添加剂性能的影响规律。结果表明:蛇纹石矿物粉体能够明显提高润滑油的摩擦学性能,各因素对其减摩性能影响的主次顺序依次为添加量、往复频率、载荷和摩擦时间,对应的最优摩擦学条件组合为 100 N,5 Hz,180 min,0.5%(质量分数,下同);对抗磨性能影响的主次顺序依次为载荷、添加量、往复频率和摩擦时间,最优条件组合为 100 N,50 Hz,180 min,0.3%。蛇纹石矿物在摩擦表面形成的由多种氧化物、石墨和有机化合物等组成的复合摩擦反应膜是改善摩擦和磨损的关键。

**关键词:** 蛇纹石;润滑油;添加剂;摩擦学性能;正交实验

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000617

**中图分类号:** TH117.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)07-0146-08

**Abstract:** Tribological properties of oleic acid modified natural serpentine ultrafine mineral powders as lubricating oil additive were investigated by a reciprocating sliding wear tester. The effects of the four factors including load, reciprocating frequency, sliding time and concentration of serpentine on the properties of serpentine additive were analyzed. Results indicate that the anti-wear and friction-reducing properties of the base oil are significantly improved by the addition of the modified serpentine powders. The order that affects the friction-reducing performance of the serpentine additive is: concentration, reciprocating frequency, load, sliding time, and the optimal tribological conditions are 100 N, 5 Hz, 180 min, 0.5% (mass fraction). While that affects the anti-wear property is: load, concentration, reciprocating frequency, sliding time, and the optimal conditions are 100 N, 50 Hz, 180 min, 0.3%. Serpentine minerals forms a tribofilm consisting of various oxides, graphite and organic compounds on the friction surface, which is the key to improving anti-wear and friction-reducing properties.

**Key words:** serpentine; lubricating oil; additive; tribological property; orthogonal test

摩擦磨损是造成能源损耗、资源消耗与机械失效的主要原因之一,合理地控制摩擦、降低磨损是实现节能减排和资源节约的重要手段<sup>[1-3]</sup>。近年来,将超细无机粉体用作润滑油(脂)添加剂的研究受到了国内外的

广泛关注。相关研究表明,将层状硅酸盐矿物材料添加到润滑介质中,可显著改善其摩擦学性能,优化摩擦表面的微观力学性能<sup>[4-6]</sup>。其中,天然蛇纹石矿物因具有独特的亚稳态层状结构和优异的减摩润滑性能而备

受关注<sup>[7-9]</sup>。张宝森等<sup>[10]</sup>研究表明,蛇纹石微粉能显著提高球墨铸铁摩擦副的摩擦学性能,使摩擦因数较基础油降低 51.5%,磨损量减少 29.6%,且磨损表面具有较高的力学性能。Yu 等<sup>[11]</sup>在利用蛇纹石微粉提升润滑油减摩抗磨性能的同时,在摩擦表面获得了一层具有较高纳米硬度(8 GPa 以上)和接近摩擦副基体弹性模量(约 230 GPa)的高硬度/弹膜比摩擦反应膜。赵福燕<sup>[12]</sup>验证了蛇纹石作为添加剂在不同润滑介质中均具有优异的摩擦学性能,并采用多种手段研究了摩擦反应膜的形成机理。

尽管已有大量研究关注于硅酸盐矿物作为润滑油添加剂的性能与机理,但目前该领域的研究主要集中在利用磨损试验机对比考察单一载荷、滑动速率、摩擦时间或添加剂含量等因素作用下基础油与含添加剂油样的性能,较少考虑多种因素协同作用对添加剂摩擦学性能的影响。基于此,本工作利用 SRV 磨损试验机,采用 4 因素 3 水平正交实验方法研究了摩擦实验过程中载荷、滑动时间、往复频率以及蛇纹石矿物粉体添加量对其作为润滑油添加剂摩擦学性能的影响,同时揭示上述因素对蛇纹石添加剂性能影响的主次顺序,进一步分析其减摩润滑机理。

1 实验

1.1 实验材料

实验用蛇纹石粉体为辽宁岫岩产天然蛇纹石经粉碎提纯后的市售产品。图 1 所示为蛇纹石粉体的 TEM 形貌照片,平均粒径为 100~300 nm。蛇纹石粉体主要由叶蛇纹石、少量硅酸铝和微量杂质组成,其晶体化学式为:  $Mg_{5.70} Al_{0.13} Fe_{0.02} Ca_{0.06} K_{0.04} Mn_{0.03} [Si_{4.05} O_{10}](OH)_8$ <sup>[13]</sup>。以蛇纹石粉体质量分数 5% 的油酸为表面改性剂,对蛇纹石粉体、500SN 矿物基础油的混合物进行行星磨改性与分散(300 r/min, 3 h),最后得到能够稳定悬浮 4 个月以上的待测油样。

1.2 摩擦学实验

实验采用 SRV4 磨损试验机,选用球-盘接触的往复滑动模式,往复行程为 0.8 mm。下试样为 45# 钢圆盘(42~45HRC,  $\phi 25.4\text{ mm} \times 6.88\text{ mm}$ ),上试样为 GCr15 钢球(59~61HRC,  $\phi 10.0\text{ mm}$ )。利用 4 因素 3 水平正交实验考察摩擦过程中载荷、滑动频率、摩擦时间和蛇纹石含量对其摩擦学性能的影响。实验结束后,采用 LEXT OLS4000 型激光共聚焦显微镜测量下试样磨损体积。每组参数进行 3 次实验,取其平均值作为最终结果。

为便于定量评价正交实验结果,用  $f_R$ (见式(1))表示含蛇纹石润滑油的摩擦因数同基础油相比降低的

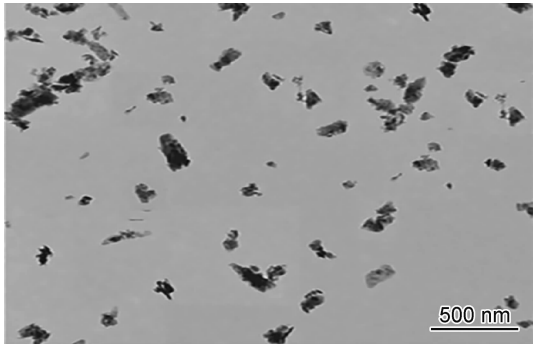


图 1 蛇纹石粉体的 TEM 形貌  
Fig. 1 TEM morphology of serpentine powders

百分比,用于评价蛇纹石的减摩性能。同理,引用  $w_R$ (见式(2))用于评价蛇纹石的抗磨性能<sup>[14]</sup>。

$$f_R = \frac{f_b - f_a}{f_b} \times 100\% \tag{1}$$

式中:  $f_b$  为基础油 500SN 的摩擦因数;  $f_a$  为含蛇纹石润滑油的摩擦因数。

$$w_R = \frac{w_b - w_a}{w_b} \times 100\% \tag{2}$$

式中:  $w_b$  为 500SN 润滑下试样磨损体积;  $w_a$  为含蛇纹石润滑油作用下试样磨损体积。

1.3 磨损表面分析

采用 Nova Nano SEM 450 高分辨扫描电镜(SEM)及其配备的 X 射线能谱仪(EDS)分析磨损表面形貌与元素构成;采用 ESCLAB 250Xi 型 X 射线光电谱仪(XPS)分析磨痕表面元素的化学状态,发射源采用能量为 1486.6 eV 的单色 AlK $\alpha$  靶,能量分辨率为  $\pm 0.2\text{ eV}$ ,采用标准碳污染峰(C1s; 284.8 eV)对峰位进行校正。

2 结果与讨论

2.1 正交实验

表 1 给出了正交实验设计与摩擦学实验结果。蛇纹石粉体的加入,可使不同润滑条件下 500SN 的摩擦因数降低 20% 以上,最高达 42.4%,表明加入蛇纹石粉体后润滑油的减摩性能得到明显改善。同时,除实验 1 外,含蛇纹石润滑油作用下试样磨损体积明显减小,在实验 6 条件下减少超过 85%,表明蛇纹石在改善润滑油耐磨性能方面作用显著。

表 2 所示为正交实验的直观分析和因素指标分析结果。摩擦过程中蛇纹石粉体添加量(D)对其减摩性能影响最大,其余依次为往复频率(B)、载荷(A)和摩擦时间(C),改善减摩性能的最优水平为  $A_2 B_1 C_3 D_3$ ,即 100 N, 5 Hz, 180 min, 0.5% (质量分数,下同)。对

表 1 正交实验设计及结果

Table 1 Orthogonal experimental design and results

No	Factor				Result	
	Load(A)/N	Frequency(B)/Hz	Duration(C)/min	Content(D)/%	$f_R/\%$	$w_R/\%$
1	1(50)	1(5)	1(60)	1(0.1)	23.2	-27.0
2	1(50)	2(20)	2(120)	2(0.3)	20.4	18.8
3	1(50)	3(50)	3(180)	3(0.5)	35.5	15.8
4	2(100)	1(5)	2(120)	3(0.5)	42.4	53.9
5	2(100)	2(20)	3(180)	1(0.1)	22.3	51.5
6	2(100)	3(50)	1(60)	2(0.3)	29.7	85.3
7	3(150)	1(5)	3(180)	2(0.3)	34.6	71.4
8	3(150)	2(20)	1(60)	3(0.5)	27.8	51.3
9	3(150)	3(50)	2(120)	1(0.1)	26.8	65.7

表 2 正交实验分析

Table 2 Analysis of the orthogonal tests

T	$f_R$				$w_R$			
	Load(A)/N	Frequency(B)/Hz	Duration(C)/min	Content(D)/%	Load(A)/N	Frequency(B)/Hz	Duration(C)/min	Content(D)/%
$T_1$	79.1	100.1	80.7	72.3	7.5	98.3	109.5	90.2
$T_2$	94.3	70.5	89.6	84.6	190.7	121.7	138.4	175.4
$T_3$	89.2	92.0	92.3	105.7	188.4	166.8	138.7	121.0
$t_1$	26.4	33.4	26.9	24.1	2.5	32.8	36.5	30.1
$t_2$	31.4	23.5	29.8	28.2	63.6	40.5	46.1	58.5
$t_3$	29.7	30.6	30.8	35.2	62.8	55.6	46.2	40.3
R	5.0	9.9	3.9	11.1	61.1	22.8	9.7	28.4
Optimal solution	$A_2$	$B_1$	$C_3$	$D_3$	$A_2$	$B_3$	$C_3$	$D_2$
Order of factors	$D>B>A>C$				$A>D>B>C$			

抗磨性能影响的主次顺序为:载荷>添加量>往复频率>摩擦时间,以抗磨性能为评价指标的最优水平为 $A_2B_3C_3D_2$ ,即 100 N,50 Hz,180 min,0.3%。

2.2 单一水平实验

通过正交实验得到的蛇纹石添加剂减摩与抗磨性能的最优水平分别为 $A_2B_1C_3D_3$ 和 $A_2B_3C_3D_2$ 。由于上述水平不属于表 1 所列实验条件,为此开展上述单一水平实验,进一步研究蛇纹石添加剂的摩擦学性能。

图 2 为较优水平下基础油与含蛇纹石油样样的摩擦因数及下试样磨损体积变化。在 100 N,5 Hz,180 min( $A_2B_1C_3$ )条件下,基础油润滑的摩擦因数较高,波动较大,相对稳定阶段的平均摩擦因数达到 0.32,而含 0.5%蛇纹石油样样的摩擦因数较平稳,平均摩擦因数仅为 0.15,较基础油降低 53.1%;含蛇纹石油样样润滑下试样磨损体积与基础油润滑下相比降低 40.3%。在 100 N,50 Hz,180 min( $A_2B_3C_3$ )条件下,基础油的摩

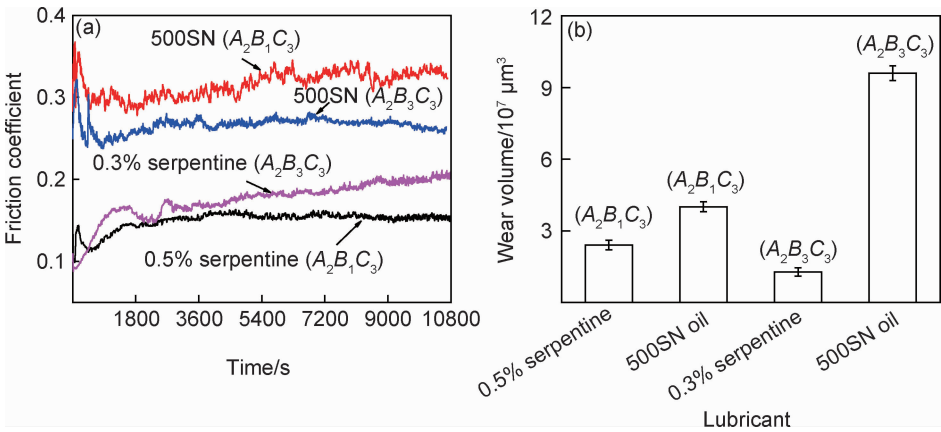


图 2 500SN 和含蛇纹石油样的典型摩擦因数变化曲线(a)及润滑油作用下的材料磨损体积(b)

Fig.2 Friction coefficient (a) and wear volume (b) for 500SN and oil containing serpentine powders

擦因数平均值为 0.27,而含蛇纹石油样 的摩擦因数为 0.18,降低 33.3%;同时,含蛇纹石油样润滑下试样磨 损体积较基础油作用下降低 87.7%。以上实验结果 进一步验证了蛇纹石微粉作为润滑油添加剂具有较好 的减摩抗磨性能,适当的摩擦学条件和添加量可使其 表现出优异的抗磨减摩性能。

2.3 磨损表面 SEM 分析

图 3 所示为 100 N,50 Hz,180 min( $A_2B_3C_3$ )条件

下,基础油 500SN 与含 0.3%蛇纹石油样润滑下磨损 表面形貌的 SEM 照片。可以看出,基础油润滑下磨 损表面沿摩擦滑动方向平行分布着大量的犁沟和深刻 痕以及材料剥落和微区塑性变形,呈现典型磨粒磨损 和部分黏着磨损的特征。含蛇纹石油样润滑下的磨损 表面相对光滑平整,仅分布少量较浅划痕,未见严重擦 伤,磨损明显减轻。

图 4 所示为 100 N,50 Hz,180 min 条件下不同磨

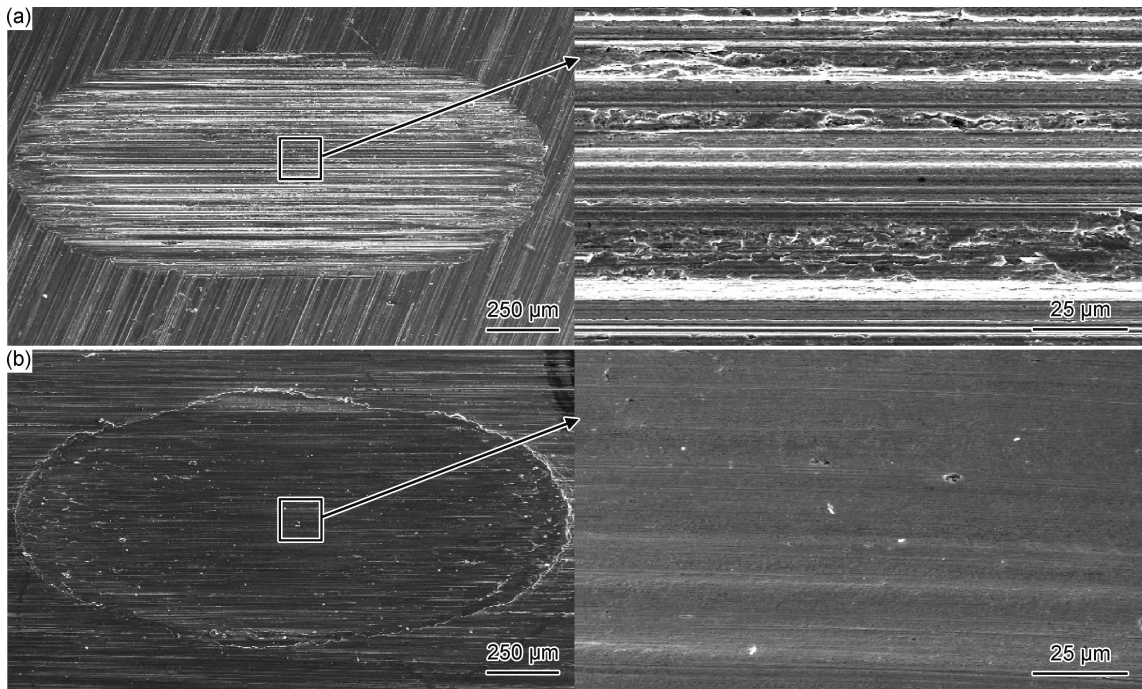


图 3 在 100 N,50 Hz,180 min 条件下 500SN(a)与添加蛇纹石润滑油(b)润滑下的磨损表面 SEM 形貌  
Fig. 3 SEM morphologies of the worn surface lubricated with 500SN (a) and oil containing serpentine powders (b) under 100 N,50 Hz,180 min

损表面形貌及其对应的 EDS 图谱,表 3 列出了摩擦表 面的元素组成及含量。500SN 润滑下磨损表面主要 由 Fe,C 和少量 O 元素组成。而含 0.3%蛇纹石油样 润滑下的表面除上述元素外,还含有 Mg,Al,Si 等蛇 纹石的主要构成元素,且 O 元素含量远高于基础油润 滑的表面。这与赵福燕<sup>[12]</sup>前期研究结果相一致,即蛇 纹石添加剂作用下的摩擦表面形成了一层富含 O, Mg,Al,Si 等元素的摩擦反应膜。

2.4 磨损表面 XPS 分析

图 5 所示为 100 N,50 Hz,180 min 条件下不同磨 损表面主要元素的 XPS 图谱。基础油润滑 Mg2p, Si2p 仅有噪音信号,而 0.3%蛇纹石微粉存在时,Si2p 出现明显的特征峰,其结合能峰位于 101.9 eV,表明 有硅的氧化物存在,但试样磨损表面未检测到 Mg 元 素,可能 Mg 元素在摩擦过程中仅起催化作用,并未参 与到摩擦化学反应过程中<sup>[15]</sup>。

分析可知,基础油润滑下磨损表面 Fe2p<sub>3/2</sub> 图谱可 拟合为 707,708.1,709.3,710.4,711.7 eV 等 5 个子 峰,以单质 Fe,FeO,FeOOH,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 存 在<sup>[16-19]</sup>,其质量分数分别为 46%,24%,10%,8% 和 12%,而 0.3%蛇纹石微粉存在时,除以上 5 个子峰 外,在 714.2 eV 处出现子峰,为铁的有机物,单质 Fe, FeO,FeOOH,Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和铁的有机物质量分 数分别为 6%,11%,22%,25%,30%和 6%。由此可 见,蛇纹石微粉的存在能够促进摩擦表面的氧化反 应,使 Fe 单质的含量显著降低,高价态铁的氧化物含 量明显提高,从而削弱磨粒磨损程度,有利于摩擦因 数的降低。

在添加蛇纹石微粉时,O1s 的结合能峰经拟合可 得 529.5,529.9,530.2 eV 和 531.9 eV,分别对应于 磨损表面中的氧化物、有机化合物等<sup>[16-21]</sup>,与基础 油润滑时相比,拟合峰的结合能减小,O 元素以氧化 物形式存在的相对含量增多,与 Fe2p<sub>3/2</sub> 的拟合结果 对应。基

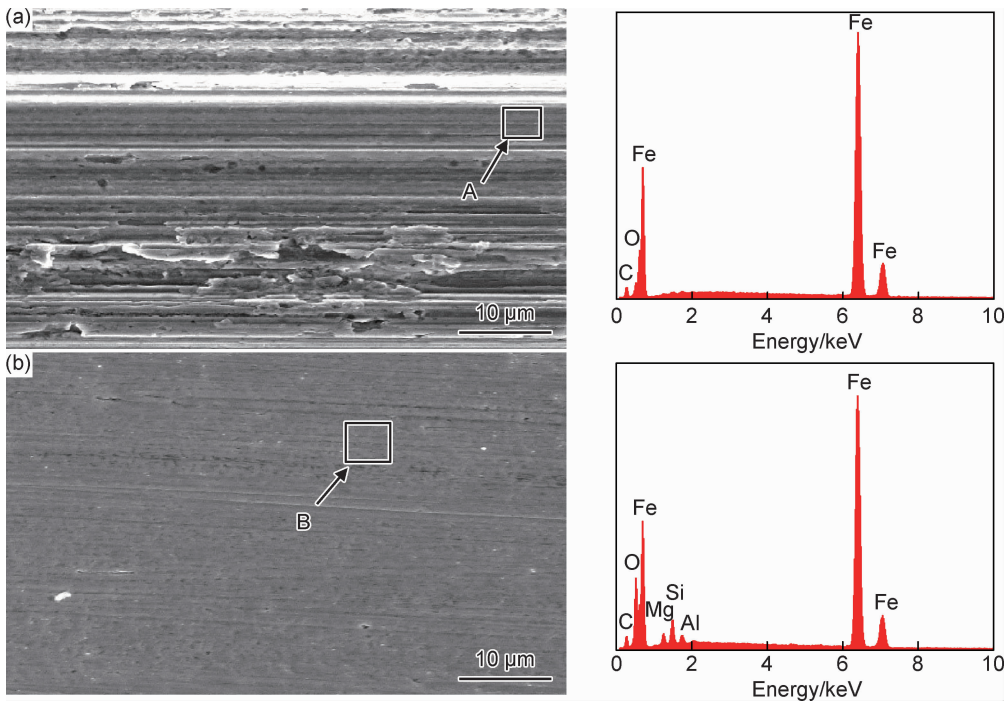


图 4 磨损表面形貌及 EDS 能谱图 (a)500SN 润滑;(b)含蛇纹石油样润滑  
Fig. 4 Morphologies of worn surface and EDS spectra  
(a)lubricated by 500SN;(b)lubricated by oil containing serpentine powders

表 3 磨损表面 EDS 能谱分析结果(质量分数/%)

Table 3 EDS analysis results of worn surface  
(mass fraction/%)

Area	C	O	Mg	Si	Al	Fe
A	7.87	2.91	—	—	—	89.22
B	7.94	12.50	1.55	2.54	0.81	74.66

础油润滑时,C1s 可拟合为 285.5,285 eV 和 284.5 eV 等 3 个子峰,分别对应有机物、污染碳和石墨<sup>[16,20]</sup>,其质量分数分别为 45%,38%和 17%,C 元素主要以有机物和污染碳存在,而蛇纹石存在时,C1s 拟合的特征峰的结合能位置与基础油润滑时相同,但石墨的质量分数提高为 26%,明显高于基础油润滑时的磨损表面。由此可知,蛇纹石微粉能够促进摩擦表面的石墨化反应,有利于提高摩擦表面的自润滑能力。

2.5 讨论

通常认为,以蛇纹石为代表的硅酸盐矿物作为润滑油(脂)添加剂的减摩润滑机理体现在以下方面:一是层状硅酸盐矿物极易吸附到金属摩擦表面,在摩擦剪切过程中晶体发生层间滑移,从而起到减摩和支撑作用<sup>[21-22]</sup>;二是晶体结构在摩擦过程中受到破坏,化学键发生断裂并释放出大量氧化物陶瓷颗粒及含氧活性基团,形成成分复杂的摩擦反应膜<sup>[23-24]</sup>;三是高反应活性硅酸盐矿物的催化作用,促进润滑油碳链的分解,生成具有润滑作用的有机化合物和石墨<sup>[25]</sup>;四是超细硅

酸盐粉体及释放的硬质颗粒对摩擦表面起到研磨和填补作用,从而通过降低摩擦表面粗糙度而改变润滑状态<sup>[26-27]</sup>。XPS 与 EDS 分析结果证实,含蛇纹石油样润滑下的磨损表面形成了由铁的氧化物、氧化物陶瓷颗粒和石墨等构成的复合摩擦反应膜。

天然蛇纹石矿物微粉作为添加剂具有良好的减摩抗磨性能,而实验条件是影响其性能的重要因素。本实验条件下,摩擦学条件对蛇纹石减摩性能影响的主次顺序为:添加量>往复频率>载荷>摩擦时间,对添加剂抗磨性能影响的主次顺序则为:载荷>添加量>往复频率>摩擦时间。添加量是影响蛇纹石减摩性能最重要的因素,随着添加量的增加,蛇纹石颗粒通过基础油被不断传递至磨损区域,使摩擦化学反应过程中反应物的供给增多,不仅有利于摩擦反应膜的形成,同时促进了润滑油碳链的分解,从而有利于油品减摩性能的改善,因此当蛇纹石含量为 0.5%时具有最优的减摩性能。

载荷是影响蛇纹石抗磨性能的最重要因素,随着载荷的升高,能量不断得到累积,润滑状态向边界润滑转移,摩擦表面发生复杂的摩擦化学反应,形成摩擦反应膜,降低磨损;当载荷增大到一定值时,材料的磨损速率开始高于摩擦反应膜的生成速率,从而表现为磨损加剧。对于滑动速率而言,低速滑动的摩擦表面更容易维持在边界润滑或混合润滑区域,有利于摩擦化



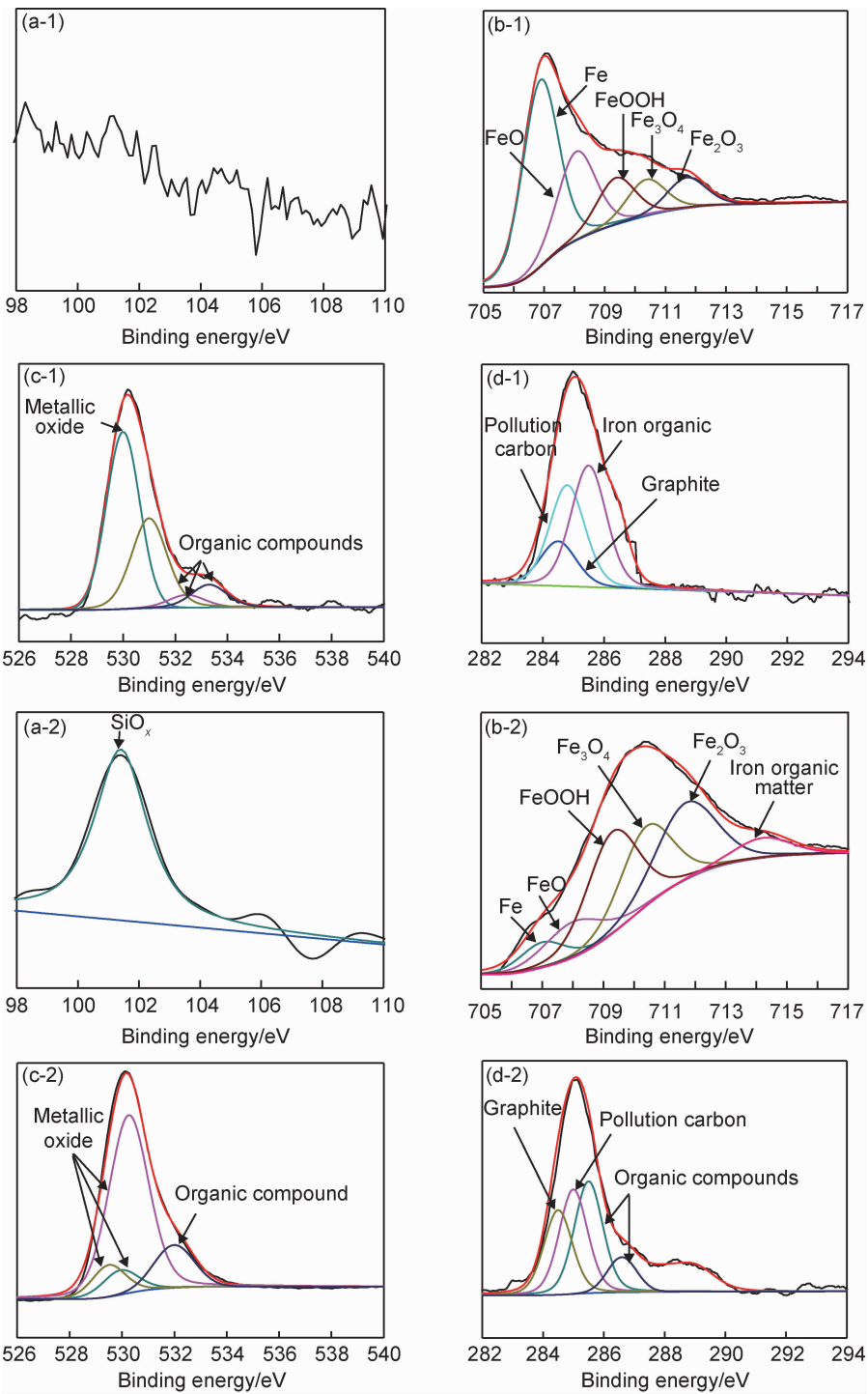


图 5 500SN(1)和含蛇纹石油样(2)润滑下磨损表面主要元素的 XPS 图谱

(a) Si2p; (b) Fe2p<sub>3/2</sub>; (c) O1s; (d) C1s

Fig. 5 XPS spectra of main elements in different worn surfaces lubricated under 500SN (1) and containing serpentine powders (2)

(a) Si2p; (b) Fe2p<sub>3/2</sub>; (c) O1s; (d) C1s

学反应的发生;而摩擦反应膜的形成与磨损时间密切相关,摩擦接触时间越长,摩擦温度越高,发生的反应越多,当温度高于 800 ℃ 时,蛇纹石的结构才能够完全破坏并转化<sup>[24-27]</sup>,释放出大量活性基团,因此滑动时间同样影响磨损表面修复过程与磨损过程的动态平衡。

总体而言,适当的摩擦学实验条件有利于蛇纹石形成摩擦反应膜。摩擦过程中的载荷、滑动时间、往复频率和蛇纹石含量等因素影响摩擦反应膜的形成、石墨的生成,并影响摩擦反应膜的形成与材料磨损之间的动态平衡过程,从而使其表现出良好减摩抗磨性能

的同时,在不同摩擦条件下存在较大的性能差异。

### 3 结论

(1)天然蛇纹石矿物微粉作为润滑油添加剂具有良好的减摩抗磨性能。蛇纹石粉体参与了摩擦界面复杂的理化作用,在摩擦表面形成了一层由铁的氧化物、硅的氧化物、石墨等组成的膜层,从而显著改善了基础油的摩擦磨损性能。

(2)摩擦过程中对蛇纹石减摩性能影响的主次顺序为:添加量>往复频率>载荷>摩擦时间,最优组合为载荷 100 N、往复频率 5 Hz、时间 180 min、添加量 0.5%;对抗磨性能的影响顺序为:载荷>添加量>往复频率>摩擦时间,最优组合为载荷 100 N、往复频率 50 Hz、时间 180 min、添加量 0.3%。

(3)摩擦过程中的载荷、滑动时间、往复频率和蛇纹石含量等因素影响摩擦表面反应膜的形成、石墨的生成以及反应膜形成与磨损的动态平衡过程,从而使其表现出良好减摩抗磨性能的同时,在不同摩擦条件下存在较大的性能差异。

#### 参考文献

- [1] 徐滨士,朱绍华.表面工程的理论与技术[M].2版.北京:国防工业出版社,2010:1-8.  
XU B S,ZHU S H. Theories and technologies on surface engineering[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 1-8.
- [2] BAI Z M,YANG N,GUO M,et al. Antigorite: mineralogical characterization and friction performances[J]. Tribology International, 2016, 101: 115-121.
- [3] 张博,徐滨士,许一,等. 润滑剂中微纳米润滑材料的研究现状[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(2): 194-204.  
ZHANG B,XU B S,XU Y,et al. Research status of micro- and nano-materials in lubricating additives[J]. Tribology, 2011, 31(2): 194-204.
- [4] 吴雪梅,杨绿,周元康,等. 超微坡缕石/Cu 复合粉体作为润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 材料工程, 2018, 46(9): 88-94.  
WU X M,YANG L,ZHOU Y K,et al. Tribological properties of ultrafine-palyorskite/copper composite powder as lubricant additive[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(9): 88-94.
- [5] 张博,许一,王建华,等. 非皂基凹凸棒石润滑脂磨损修复机理研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(6): 697-704.  
ZHANG B,XU Y,WANG J H,et al. Wear repairing mechanism of non-soap base attapulgite grease (NBAG)[J]. Tribology, 2014, 34(6): 697-704.
- [6] 陈文刚,高玉周,张会臣,等. 超细羟基硅酸镁粉体在磨损后钢表面的自修复特性[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 762-767.  
CHEN W G,GAO Y Z,ZHANG H C,et al. Self-repairing characteristics of superfine powder of hydroxyl magnesium silicate on a worn steel surface[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010, 38(4): 762-767.
- [7] ZHANG B S,XU Y,GAO F,et al. Sliding friction and wear behaviors of surface-coated natural serpentine mineral powders as lubricant additive[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(7): 2540-2549.
- [8] ZHANG B,XU Y,ZHANG B S,et al. Tribological performance research of micro-nano serpentine powders additive to lubricant oil[J]. Advanced Materials Research, 2011, 154/155: 220-225.
- [9] JIA Z N,YANG Y L,CHEN J J,et al. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition[J]. Wear, 2010, 268(7/8): 996-1001.
- [10] 张宝森,徐滨士,许一,等. 蛇纹石微粉对球墨铸铁摩擦副的减摩抗磨作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(12): 2037-2042.  
ZHANG B S,XU B S,XU Y,et al. Friction reduction and anti-wear mechanism of serpentine micro powders for spheroidal graphite iron tribopair[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(12): 2037-2042.
- [11] YU H L,XU Y,SHI P J,et al. Microstructure, mechanical properties and tribological behavior of tribofilm generated from natural serpentine mineral powders as lubricant additive[J]. Wear, 2013, 297(1/2): 802-810.
- [12] 赵福燕. 微纳米蛇纹石粉体的摩擦行为及其成膜机理研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.  
ZHAO F Y. Tribological properties of serpentine micro-nanoparticles and mechanism of tribofilm formation[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [13] 于鹤龙,许一,史配京,等. 蛇纹石润滑油添加剂摩擦反应膜的力学特征和摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(5): 500-506.  
YU H L,XU Y,SHI P J,et al. Mechanical and tribological properties of tribofilm derived from serpentine mineral lubricant additive[J]. Tribology, 2012, 32(5): 500-506.
- [14] 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.  
YANG L L,YU H L,YANG H J,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.
- [15] 金元生. 蛇纹石内氧化效应对铁基金属磨损表面自修复层生成的作用[J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 45-50.  
JIN Y S. The effect of internal oxidation from serpentine on generating reconditioning layer on worn ferrous metal surface[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(1): 45-50.
- [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.
- [17] YAMASHITA T,HAYES P. Analysis of XPS spectra of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  ions in oxide materials[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 2441-2449.
- [18] ALLAHADIN O,DEHOU S C,WARTEL M,et al. Performance of  $\text{FeOOH}$ -brick based composite for  $\text{Fe}(\text{II})$  removal from water in fixed bed column and mechanistic aspects[J]. Chemical En-

- gineering Research & Design, 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[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(6): 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]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2010, 268(3/4): 374-378.
- [21] 许一, 南峰, 徐滨士. 凹凸棒石/油溶性纳米铜复合润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 材料工程, 2016, 44(10): 41-46.  
XU Y, NAN F, XU B S. Tribological properties of attapulgite/oil-soluble nano-Cu composite lubricating additive[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(10): 41-46.
- [22] 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 G J, BAI Z M, ZHAO P. Antifriction repair function of serpentine on Fe based metal friction pairs[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(2): 306-312.
- [23] 高玉周, 张会臣, 许晓磊, 等. 硅酸盐粉体作为润滑油添加剂在金属磨损表面成膜机制[J]. 润滑与密封, 2006(10): 39-42.  
GAO Y Z, ZHANG H C, XU X L, et al. Formation mechanism of self-repair coatings on the worn metal surface using silicate particle as lubricant oil additive[J]. Lubrication Engineering, 2006(10): 39-42.
- [24] 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 X M, ZHOU Y K, YANG L, 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.
- [25] 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 F. Study on hydro-thermal synthesis and self-repairing mechanism of nano-scale chrysotile[D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2013.
- [26] 郭延宝. 微纳米矿物粉体润滑油添加剂自修复及摩擦学性能研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2006.  
GUO Y B. Self-repairing and tribological properties of micro-nano mineral powder lubricating oil additives [D]. Beijing: Academy of Armored Force Engineering, 2006.
- [27] YU Y, GU J L, KANG F Y, et al. Surface restoration induced by lubricant additive of natural minerals[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(18): 7549-7553.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0310703)

收稿日期: 2019-07-01; 修订日期: 2020-04-13

通讯作者: 于鹤龙(1979—), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为自修复材料及再制造工程, 联系地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号院再制造技术重点实验室(100072), E-mail: helong.yu@163.com

(本文责编: 寇凤梅)