

## 硅酸盐粉体作为润滑油添加剂对摩擦副耐磨性的影响研究\*

陈文刚, 高玉周, 张会臣, 许晓磊, 于志伟

(大连海事大学 机电与材料工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**采用MM-200摩擦磨损试验机研究了45#钢-45#钢摩擦副在含蛇纹石硅酸盐油润滑下的摩擦学行为,借助SEM及EDAX测试分析了自修复膜层的表面形貌及表面成分组成。结果表明:润滑油中添加硅酸盐蛇纹石粉体,在摩擦磨损初期,下试样的失重随磨损时间增加而增加;在试验时间为20 h时,试样失重达到最大值,随后试样的失重反而减小。在载荷600 N、试验时间30 h摩擦磨损后,在金属表面形成自修复保护膜,弥补了试样的部分失重;自修复膜层表面比较平整光滑,无明显的磨损划痕和犁沟,自修复膜层阻碍了金属摩擦表面的直接接触,有效地降低了金属摩擦副的磨损;自修复膜层与金属基体结合紧密,无明显的界面,膜层的厚度最大为8  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:**蛇纹石;硅酸盐;摩擦磨损;自修复;添加剂

中图分类号: TG115.58; TH117.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)01-0036-04

### Investigation of the Effects of Lubricant Oil With Silicate Particles as Additive on the Wear Resistance of Friction Pair

CHEN Wen-gang, GAO Yu-zhou, ZHANG Hui-chen, XU Xiao-lei, YU Zhi-wei

(Electromechanics and Materials Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026)

**Abstract:** The tribological behaviors of 45 steel friction pair were investigated using MM-200 friction and wear tester under lubricated condition with silicate additive. The surface morphologies of self-repairing layer and its chemical composition were analyzed by SEM and EDX. The experimental results showed that the wear mass loss of lower sample increases with time at initial stage, reaches the maximum loss after 20 hours and then decreases with time. The self-repairing layer is formed on the surface of 45 steel at 600N load and 30 hours wear time. The surface of self-repairing layer is very smooth without obvious wear scars compared with that without silicate additive. The self-repairing layer on the surface of 45 steel can avoid the direct contact of two metals, thus decrease wear mass loss effectively and improve the wear resistance of the metallic friction pairs; The self-repairing layer shows a good cohesion with the substrate without obvious interface with the substrate. The maximum depth of the self-repairing layer is about 8  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** Serpentine; Silicate; Friction and wear; Self-repairing; Additive

## 0 引言

摩擦和磨损是造成材料和能源损失的主要原因之一,随着当今科学技术的进步,各国科技工作者已经研究了许多有效降低摩擦磨损的方法。近十年,金属自修复技术有了很大发展,将自修复添加剂加到润滑油脂中使用,不与润滑油发生化学反应,不改变润滑油的粘度和性质,使用中无副作用,对环境对人体无害,摩擦磨损条件下可以在机械零

件摩擦表面生成自修复保护膜层。在设备运行过程中与铁基体发生摩擦化学反应,通过生成减摩性能优异的金属陶瓷保护层,实现对金属磨损的原位自修复<sup>[1~4]</sup>。文中采用表面修饰的羟基硅酸镁作为润滑油添加剂,研究硅酸盐添加剂在摩擦磨损条件下在金属表面自修复膜层形貌,分析硅酸盐添加剂在摩擦磨损中的减摩耐磨的影响。

## 1 试验步骤

### 1.1 含有添加剂润滑油的制备

首先将羟基硅酸镁(蛇纹石)手工粉碎成小于

收稿日期: 2006-01-06; 修回日期: 2006-01-16

基金项目: \*国家自然科学基金资助项目(50472025)

作者简介: 陈文刚(1973-),男(汉),辽宁锦州人,硕士生。

0.5 mm 的细粉,然后采用南京大学产的 QM-BP 型行星式球磨机制备超细粉体。向球磨罐中按一定质量比例加入钢球和蛇纹石,球磨机转速为 400 r/min,球磨时间为 24 h。球磨后的粉体粒径均小于 5  $\mu\text{m}$ 。将一定比例的硅酸镁粉体、分散剂、促进剂和稀释剂加入到基础油中,倒入球磨罐中球磨 2 h,进行分散处理。

## 1.2 摩擦磨损特性研究

摩擦磨损试验采用 MM-200 摩擦磨损试验机,上下试样均为 45<sup>#</sup>钢调质处理,硬度为 43~45 HRC。上试样尺寸为 16 mm  $\times$  10 mm  $\times$  10 mm,固定不动,下试样尺寸为  $\phi$ 45 mm  $\times$  10 mm。试验时间均为 30 h,转速为 200 r/m,载荷为 600 N,采用间歇式加入润滑油。试验中的油样包括以下两种:

基础油中加入修饰后的羟基硅酸盐微粒,添加剂的加入量为质量分数 2%;磨损试样表面采用 Philips-XL30 扫描电镜观测分析,表面成分采用 EDAX 进行测试。在试验时间分别为 5、10、15、20、25、30h 时停机,用丙酮对试样进行超声清洗,用分析天平得出试样失重(精度为 0.05 mg)。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 金属磨损表面自修复膜层的形貌及成分分析

图 1 基础油和含有硅酸盐添加剂的润滑条件下 30 h 时下试样表面摩擦磨损形貌图。从图 1(a)可以

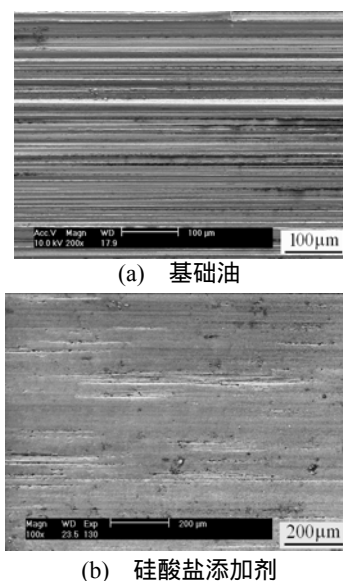


图 1 磨损表面微观形貌(a)无添加剂(b)有添加剂

Fig.1 Morphology of worn surface (a) without additive (b) with additive

看出,试样表面在平行于滑动方向上存在着密集的划痕和较深的犁沟。从图 1(b)可以看出,试样表面自修复膜层光滑平整,在平行于滑动方向上不存在贯穿的划痕,也不存在由于黏着磨损所形成的局部片层剥落,在局部区域存在着断断续续的划痕。在比较光滑的表面区域,存在大量的显微空洞,如图 2 所示。在自修复膜层不完整的局部区域,其底部是带有明显划痕的基体 45<sup>#</sup>钢,如图 3 所示,边缘处具有形貌不规则的多孔状物质,为硅酸盐添加剂在摩擦机械作用下在金属磨损表面铺展,这些都说明在磨损表面形成了一层自修复保护膜层。

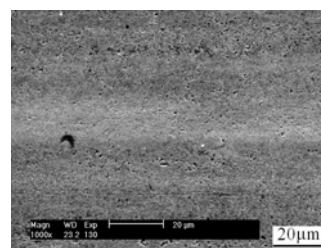


图 2 光滑表面形貌

Fig.2 Morphology of Smooth worn surface

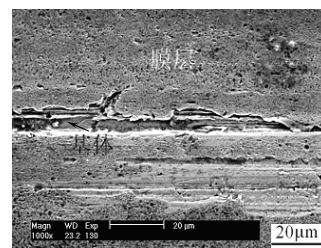


图 3 局部磨损表面形貌

Fig.3 Morphology of worn surface

图 4 为下试样表面自修复膜层的成分测试结果。可以看出,在磨损表面出现了蛇纹石的特征元素 Mg, Si 元素一部分来自于基体,一部分来自于自修复膜层,这些都说明了表面自修复膜层的主要成分来自于硅酸盐添加剂。图 5 是摩擦磨损试样的横截面形貌,从图中可以清楚地看到在基体表面生成了一层自修复膜层,膜层与基体之间无明显的界面,与基体结合非常紧密。由于摩擦表面的不规则性以及自修复膜的不均匀性,在横截面上自修复膜层厚度也不均匀,最大厚度约为 8  $\mu\text{m}$ 。

金属在摩擦时,由于摩擦副的相互作用,引起的力和热的脉冲将有助于添加剂在金属表面活化和相变快速进行。在较大的摩擦载荷或较高的滑动速度时有利于摩擦时快速的组织转变和相变的可能性,在微区加热可能导致合金元素的重新分布。

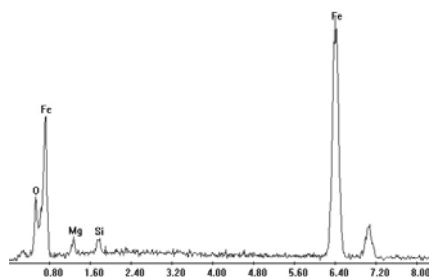


图4 45#钢环表面能谱图

Fig. 4 EDX spectrum of self-repairing coating

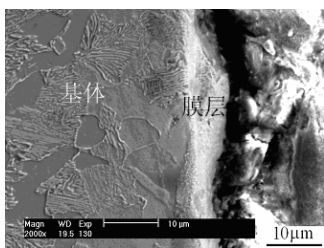


图5 自修复膜层的横截面形貌

Fig.5 SEM morphology of the self-repairing layer on cross-section

所以摩擦时对于新相的形成最重要的是加热和变形过程,而材料的性能、宏观和微观形貌、机械冲击大小、接触点存在的时间等是决定转变程度的因素。硅酸盐添加剂存在于 45#钢摩擦副接触表面,在表面高接触应力、瞬间高温脉冲作用以及接触表面的相对运动,硅酸盐微粒受到挤压发生严重的变形造成微粒碎裂;羟基硅酸镁属 1:1 型三八面体层状含水硅酸盐<sup>[5]</sup>,层与层之间以范德华力结合,结合力较弱,片层之间易于滑动,可以在磨损的犁沟处沿金属表面铺展;同时羟基硅酸镁存在许多活性基团<sup>[6]</sup>,如O-Si-O键、Si-O-Si键、含镁键类、羟基和氢键等,可以在摩擦产生的新鲜金属表面发生反应,形成化学键合,使自修复膜层与金属基体内的结合力增强。

## 2.2 摩擦因数及试样失重随时间的变化

图6为载荷600 N时摩擦因数随试验时间变化的曲线图。从图中看出,基础油摩擦因数在0.08~0.09之间变化。而加入添加剂后,由于在金属表面形成自修复膜层,摩擦发生在自修复膜层之间,摩擦因数大于基础油为润滑剂的摩擦因数,在0.11~0.12之间变化。从试样失重曲线看出,在摩擦磨损过程中,试样失重不是随时间增加而增加,如图7所示。在0~10 h范围内,试样表现为失重随时间增加而增加,摩擦过程中较高的摩擦载荷导致表面

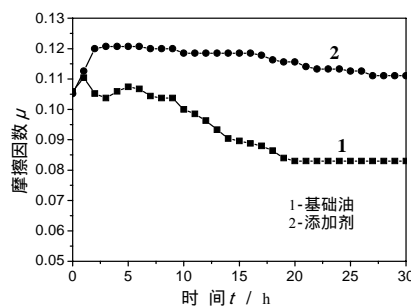


图6 摩擦因数-时间曲线

Fig.6 Variation of friction coefficient with time

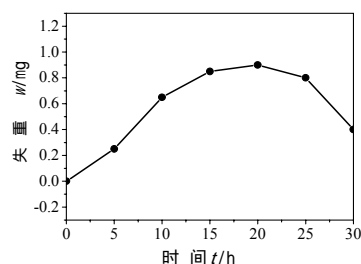


图7 试样磨损质量损失-时间曲线

Fig.7 Variation of wear mass loss of sample with time

接触应力增加和较强的摩擦热产生,温度升高,磨损材料表面软化,在摩擦磨损试验的初期导致材料的强烈磨损;在10~20 h范围内,摩擦磨损进入一个相对稳定状态,试样失重增加缓慢,在20 h达到最大值,试样失重不再增加,说明在摩擦产生较高的接触应力和瞬间高温条件下,硅酸盐添加剂受到压缩、剪切、延伸等机械作用和化学作用以及接触表面的相对运动,硅酸盐微粒受到挤压发生严重的变形和碎裂,在金属磨损表面铺展,如图3所示。此后随摩擦磨损试验的进行,在机械作用、摩擦化学作用及摩擦电化学作用下,硅酸盐添加剂不断向金属表面转移,在试样表面逐渐形成自修复膜层,膜层的质量不断增加,厚度增加,弥补了部分试样失重,在20~30 h范围内,试样的失重反而减小,即在含有硅酸盐添加剂的润滑条件下,金属的磨损表面得到了修复。

由此可以看出,在摩擦过程中存在着两个可逆过程,其一是金属的磨损过程,其二就是在金属摩擦表面生成新的物相-自修复膜层。当磨损大于自修复时,摩擦副表现为失重增加,试样的质量减少,金属摩擦副就会表现为正磨损;当这两个过程达到一定的平衡状态时,金属摩擦副就会表现为零磨损,表现为金属的失重不再增加;而当自修复过程大于磨损过程时,在摩擦机械作用、摩擦化学作用

及摩擦电化学作用下,添加剂硅酸盐不断向材料表面转移,试样的质量反而有增加的趋势,摩擦副就会表现出负磨损现象<sup>[7]</sup>。

### 3 结 论

(1) 润滑油中添加硅酸盐蛇纹石粉体,在载荷600 N、试验时间30 h摩擦磨损后,在金属表面形成自修复保护膜,磨损表面比较平整光滑,阻碍了金属表面的直接接触,有效地降低了金属摩擦副的磨损。

(2) 自修复膜层的主要成分来自于硅酸盐添加剂,在摩擦机械作用、摩擦化学作用及摩擦电化学作用下,与金属基体结合紧密,无明显的界面,膜层的厚度最大为8  $\mu\text{m}$ 。

(3) 含有添加硅酸盐时摩擦副的摩擦因数大于不含添加剂基础油的摩擦因数。在含有硅酸盐添加剂的润滑条件下,在摩擦磨损的初期表现为正磨损,在20 h左右进入零磨损状态,此后表现为负磨损,硅酸盐添加剂在试样表面逐渐形成较完整的自修复膜层,弥补了部分试样失重,金属的磨损表面得到了修复。

### 参考文献:

- [1] 刘家浚,郭凤炜.一种摩擦表面自修复技术的应用效果及分析[J].中国表面工程,2004(3):42-45.
- [2] 周平安.金属磨损自修复材料的功能特点和应用前景[J].中国表面工程,2004(1):39-41.
- [3] 顾艳红,田斌,岳文,等.金属陶瓷润滑油添加剂对钢-钢摩擦副磨损行为的影响及其铁谱验证[J].中国表面工程,2005(1):16-19.
- [4] 董伟达.工程机械减摩自修复材料技术[J].机械工程师,2003(3):3-6.
- [5] Tartaj P, Cerpa A, Garcia-Gonzalez MT, et al. Surface instability of serpentine in aqueous suspensions [J]. Journal of Colloid and Interface Science. 2000(231): 176-181.
- [6] 李学军,王丽娟,鲁怀安,等.天然活性蛇纹石机理初探[J].岩石矿物杂志,2003,22(4):409-412.
- [7] 莫易敏,邹岚,赵源.磨损自补偿理论设想[J].中国机械工程,1998(2):12-14.

作者地址:大连市甘井子区凌海路1号 116026

大连海事大学 机电与材料工程学院

Tel: (0411) 82045105

E-mail: chenwengang999@163.com.cn

(上接第35页)

时,QSn6-6-3+30%Ni/C涂层中Pb处于金属态,与C在QSn6-6-3+30%Ni/C涂层表面形成Pb-C润滑膜,在两种润滑保护膜之间形成油润滑膜。3种润滑膜相互作用大大降低了摩擦因数,减少了磨损。一旦温度升高,油润滑膜被破坏,则 $\text{MoO}_2$ - $\text{MoS}_2$ 润滑膜与Pb-C润滑膜仍起着润滑与保护的作用。加入自润滑材料的量不宜过多,文献<sup>[3]</sup>表明固体润滑剂影响锡青铜基自润滑复合材料的机械与摩擦学性能,随着固体润滑剂加入量的提高,复合材料的机械性能明显变差,而摩擦学性能得到改善。所以加入石墨量不宜过多。

图5为NiCrBSi+30%Mo摩擦磨损120 min后形貌及黑点处能谱。从图中可以看出,涂层的磨损机制主要是以磨粒磨损为主。这可能是以下几点原因引起的: 试件加工表面粗糙度较大,容易在磨合阶段形成磨粒。 磨擦产生热量,促使磨屑生成氧化物等硬质磨粒。 磨粒引起摩擦副之间典型的磨粒磨损。

从图5能谱可以看出图中黑点含有较高的C-O成分,这是涂层中微孔存储的油。从图5中还可进一步看出,油迹左侧的滑痕经过储油孔后明显减轻,表明微孔储油作用可以很好的减轻磨粒磨损,这是涂层耐磨性能优异的另一个原因。

### 3 结 语

超音速等离子喷涂制备的NiCrBSi-Mo、QSn-Ni/C涂层致密,孔隙率低,结合强度高。NiCrBSi-Mo与QSn-Ni/C涂层摩擦副摩擦因数小,平均摩擦因数0.0043仅为18Cr2Ni4WA-ZQPb30的1/2,磨损量也小,仅为18Cr2Ni4WA-ZQPb30的1/15。表现出较好的摩擦学性能。

### 参考文献:

- [1] 王海军,刘向平,张平,等.高效能超音速等离子喷涂技术[J].新技术新工艺,2004,12:25-26.
- [2] 王海军,潘荣辰,韩志海.超音速等离子喷涂Mo-30%NiCrBSi涂层耐磨性能研究[J].金属热处理,2005,30(5):17-20.
- [3] Wang BQ, Luer K, The erosion-oxidation behavior Of HVOF  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ -NiCr cermet coating [J]. Wear, 1994 (174): 177-185.
- [4] 王静波,吕晋军,宁莉萍,等.锡青铜基自润滑材料的摩擦学特性研究[J].摩擦学学报,2001,21(2):110-113.

作者地址:辽宁大连市解放军65545部队 116200

Tel: 13311321637

E-mail: lnjianwang@126.com