第 24 卷 第 6 期
2004 年 11 月

摩 擦 学 学 报
TRIBOLOGY

Vol 24, No 6
Nov, 2004

羟基硅酸盐润滑油添加剂对 45# 钢/球墨铸铁摩擦副摩擦磨损性能的影响

郭延宝[1], 徐滨士[2], 马世宁[1], 许 一[1]
(1. 装甲兵工程学院 材料科学与工程系, 北京 100072;
2. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘要: 采用MM-200 型摩擦磨损试验机考察了 45# 钢/球墨铸铁摩擦副在 650SN 基础油和含羟基硅酸盐矿物复合微粉的 650SN 基础油(KF-1) 润滑下的摩擦磨损性能. 结果表明: 在 650SN 基础油润滑下的摩擦系数和磨损率随试验时间增加变化较小; 而在 KF-1 润滑下, 试验初期的摩擦系数和磨损率比基础油润滑下的稍大, 随着试验时间的延长, 相应的摩擦系数和磨损率同基础油润滑下的相比明显降低. 磨损表面显微硬度测试结果表明, 在 KF-1 润滑下 45# 钢磨损表面形成了多孔摩擦改性层, 硬度明显提高, 因而摩擦磨损性能显著改善.

关键词: 45# 钢/球墨铸铁摩擦副; 羟基硅酸盐; 矿物微粉; 润滑油添加剂; 摩擦磨损性能
中图分类号: O634.31; TH117.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-0595(2004)06-0512-05

研究表明, 多种无机纳米微粒作为润滑油添加剂可以起到减摩、抗磨和抗极压作用[1~3]. 其原因在于, 纳米微粒润滑油添加剂在摩擦过程可形成纳米颗粒沉积膜, 且纳米微粒中的活性元素可同金属摩擦副表面相互作用形成摩擦化学反应膜, 二者组成复合边界润滑膜, 从而有效地改善润滑剂的摩擦学性能[4]. 与此相适应, 针对纳米微粒润滑油添加剂的研究报道较多[5~10].

众所周知, 作为润滑油添加剂的固体材料必须满足润滑油的有关标准, 如粒径必须小于 0.5 μm, 必须能长期稳定溶解或分散于润滑油中等[4], 这限制了微米级无机微粒作为润滑油添加剂的应用. 一般认为, 往润滑油中引入微米级矿物微粉可导致磨粒磨损, 因而针对微米级矿物微粉作为润滑油添加剂的研究颇为少见. 值得注意的是, 从国外部分产品专利[11~13]和实用效果来看[14, 15], 尽管粒径较大的无机微米颗粒可导致轻微磨粒磨损, 但俄罗斯和乌克兰研制的微米级无机矿物复合微粉产品在实际应用中显示出了较好的抗磨减摩性能. 罗虹等[16]发现, 当钢部件同纸张对摩时, 在材料硬度、磨粒粒度和载荷等适当时, 钢试件磨损表面因嵌入来自于纸张的矿物微粒而发生强化, 其耐磨性能优于某些硬度更高的材料. 由此可见, 磨粒磨损作用不应成为限制微米颗粒作为润滑油添加剂的理由. 基于此, 本文作者将主要成分为羟基硅酸铝的微米级羟基硅酸盐矿物复合微粉用作润滑油添加剂, 考察了其在油润滑条件下的抗磨作用及对金属磨损表面的强化作用.

1 实验部分

1.1 添加剂与基础油

试验所用矿物复合微粉添加剂为实验室产品, 其主要成分为羟基硅酸铝, 粒度为 1~30 μm. 基础油为工业品 650SN. 将 0.3% (质量分数, 下同) 的矿物复合微粉添加剂加入 650SN 基础油中, 配制成试验油样(代号为 KF-1); 试验前经 60 min 超声分散处理.

1.2 摩擦磨损试验

用 MM-200 型环-块摩擦磨损试验机评价 650SN 基础油及 KF-1 的摩擦学性能. 上试样为 45# 钢块(20 mm × 10 mm × 10 mm, 134 HV, R_a = 0.3~0.6 μm); 下试样为调质处理球墨铸铁环 (φ40 mm × φ16 mm × 10 mm, 128.4 HV, R_a = 0.3~0.7 μm). 将试环下半部浸于油盒中, 试环在旋转过程中将润滑油

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(50235030); 国家 973 计划资助项目(G1999065009); 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室博士基金资助项目(2003).
收稿日期: 2003-01-13; 修回日期: 2004-05-05 /联系人郭延宝, e-mail: xubinshi@sina.com.
作者简介: 徐滨士, 男, 1931 年生, 教授, 博导, 中国工程院院士, 目前主要从事纳米表面工程及再制造研究

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

带入摩擦副接触表面并通过旋转而起到搅拌作用, 防止润滑油中的悬浮微粒发生沉淀. 试验条件为: 载荷 150 N, 转速 180 r/min, 室温. 由试验机显示的摩擦力矩计算得到摩擦系数. 试验前首先在 650SN 基础油润滑下进行 3 h 磨合, 以消除摩擦副接触表面粗糙度造成的误差; 试验过程中每间隔一定时间拆卸摩擦副, 用精度为 0.1 mg 的分析天平称量试环的磨损质量损失.

1.3　磨损表面硬度、形貌及组成分析

用 JMT-3 型显微硬度计测定不同润滑条件下球墨铸铁试环磨损表面硬度, 载荷为 0.5 N, 加载时间为 15 s. 用 Quanta200 型扫描电子显微镜(SEM)观察 45# 钢试块磨损表面形貌(试验时间 70 h, 观察前用丙酮超声清洗 20 min). 将 KF-1 润滑下的 45# 钢试块表面清洗并除油, 刷镀镍(防止在制样和抛光时破坏表面层), 随后从侧面磨平、抛光, 用丙酮超声清洗 10 min 后进行 SEM 观察. 利用扫描电子显微镜附带的能量色散谱仪(EDS)测定 650SN 基础油及 KF-1 润滑下的 45# 钢试块磨损表面元素组成.

2　结果与讨论

2.1　摩擦磨损性能

图 1 示出了 650SN 基础油和 KF-1 润滑下试环

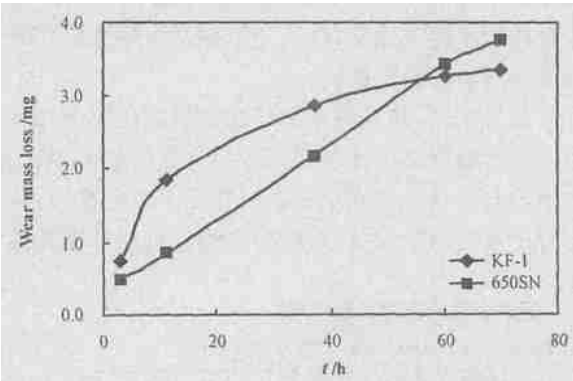

Fig 1　Wear mass loss of ring vs test duration

图 1　试环磨损质量损失-时间曲线

磨损质量损失随试验时间变化的关系曲线. 可以看出, 在 650SN 基础油润滑下, 试环在初期磨合阶段的磨损质量损失较大, 这是由于磨合阶段粗糙度较大的偶件表面产生较强的犁削作用所致; 随着试验时间的延长, 磨损质量损失增大幅度显著减小. 在 KF-1 润滑下, 试环在相当长试验时间内的磨损质量损失均明显比基础油润滑下的大, 表明作为添加剂的矿物微粉可加剧磨粒磨损. 但当试验时间超过 55 h 后, 试环在 KF-1 润滑下的磨损质量损失明显较小且增大幅度很小. 因此, 含羟基硅酸盐的矿物微粉作为添加剂可以显著改善 650SN 基础油的长效抗磨性能.

图 2 示出了 2 种油样润滑下的摩擦系数随试验

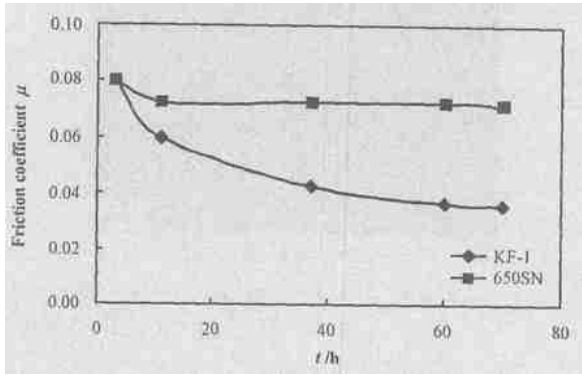

Fig 2　Friction coefficient vs test duration

图 2　摩擦系数-时间曲线

时间变化的关系曲线. 可以看出, 在 650SN 基础油和 KF-1 润滑下摩擦系数均随试验时间的延长而降低, 但当试验时间超过 10 h 后, 650SN 基础油润滑下的摩擦系数几乎保持不变, 而 KF-1 润滑下的摩擦系数则随着试验时间的延长逐渐降低, 直至试验时间超过 60 h 后降低至 0.036 并保持平稳降. 这说明 KF-1 具有优良的长效减摩性能.

2.2　磨损表面显微硬度、形貌及组成分析

对 650SN 基础油及 KF-1 润滑下的球墨铸铁试环磨损表面进行硬度测试, 结果表明, 650SN 润滑下试环磨损表面显微硬度平均值为 128.4*HV* (5 次测量测得的硬度值分别为 151*HV*、134*HV*、119*HV*、119*HV*、119*HV*); 而 KF-1 润滑下试环磨损表面显微硬度平均值为 200*HV* (5 次测量值分别为 198*HV*、187*HV*、193*HV*、230*HV*、193*HV*). 很显然, KF-1 润滑下的试环磨损表面显微硬度明显比 650SN 基础油润滑下试环磨损表面显微硬度高. 由于磨损表面硬度同材料耐磨性密切相关[17], 通常磨损表面硬度越高则材料的耐磨性能越好, 因此 KF-1 作为润滑剂有利于试环磨损表面硬化, 从而有利于提高其抗磨性能.

图 3 示出了 650SN 基础油和 KF-1 润滑下 45# 钢试块磨损表面形貌 SEM 照片(试验时间 70 h). 可以看出, 650SN 基础油润滑下的试块磨损表面存在大量划痕, 并呈现粘着迹象[见图 3(a)], 而 KF-1 润滑下的试块磨损表面形成了多孔的摩擦改性层, 且无擦伤迹象[见图 3(b)]. 这种磨损表面形貌差异与相应的摩擦磨损性能差异相对应.

将 KF-1 润滑下的 45# 钢试块用丙酮超声清洗干净并在磨损表面刷镀 Ni 镀层, 然后从试块侧面打磨

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

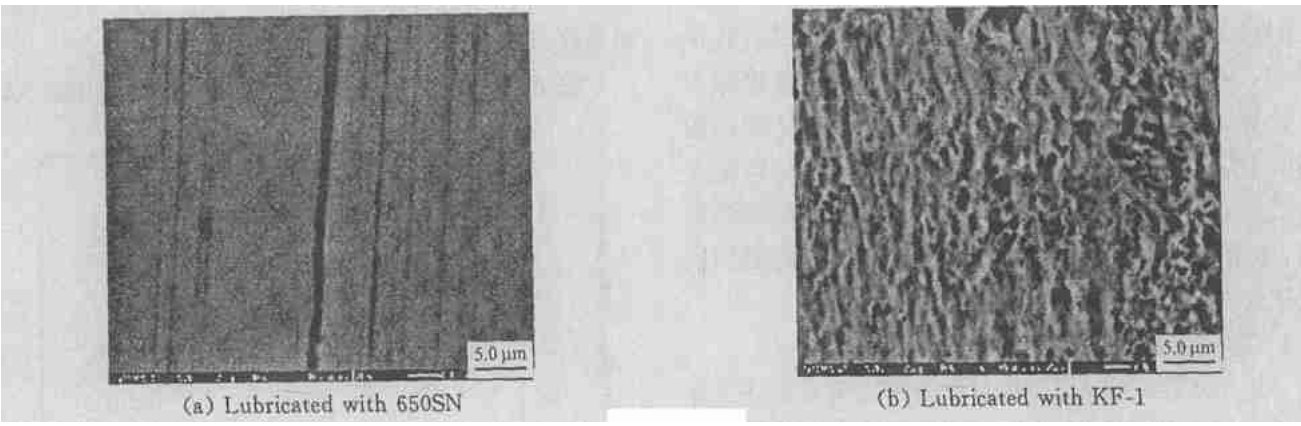

Fig 3 SEM micrographs of worn surface of AISI1045 steel block lubricated with 650SN and KF-1

图 3 650SN 及 KF-1 润滑下 45# 钢试块磨损表面形貌 SEM 照片

并抛光, 得到磨损剖面分析用 SEM 试样, 相应的磨损剖面形貌 SEM 照片示于图 4 可以看出, 在基体

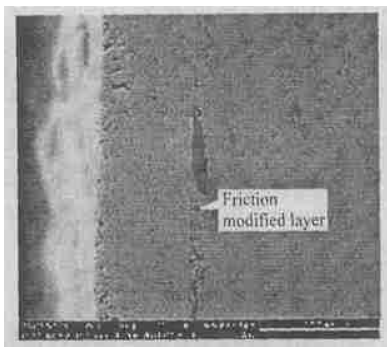

Fig 4 SEM micrograph of the cross-section of AISI1045 steel block lubricated with KF-1 (1 000×)

图 4 KF-1 润滑下 45# 钢试块磨损剖面形貌 SEM 照片 (×1 000)

Fe 和刷镀 Ni 镀层之间存在厚约 5 μm 的摩擦改性层, 各层之间的界面清晰; 其中左侧为 Ni 刷镀层, 右侧为 Fe 基体, 中间为摩擦改性层; 摩擦改性层呈现某种较为疏松的复合材料结构, 其致密度明显不如左侧的 Ni 刷镀层和右侧的 Fe 基体

表 1 列出了 650SN 基础油及 KF-1 润滑下 45# 钢试块磨损表面元素组成 EDXA 分析结果 (试验时间 70 h). 可以看出, 650SN 润滑下 45# 钢试块磨损表面主要含 Fe、O 和其它微量杂质元素, 而 KF-1 润滑下试块磨损表面存在一定含量的 Si 和 Al 这同相应的 KF-1 润滑下 45# 钢磨损剖面形貌 SEM 分析结果相符 (见图 4). 换言之, 表 1 所示的 EDXA 分析结果同样证实金属磨损表面的确形成了含嵌入添加剂微粉颗粒的摩擦改性层, 这正是摩擦副摩擦磨损性能得以显著改善的根本原因

综上所述, 粒径较小的矿物微粉在压应力作用下可嵌入金属摩擦副接触表面并使之发生嵌入强化; 嵌入微粒与金属基体在局部高温作用下发生微熔合, 并形成硬度较高的摩擦改性层, 摩擦改性层的微孔结构

表 1 650SN 基础油和 KF-1 润滑下 45# 钢试块磨损表面元素组成

Table 1 Elemental composition on worn steel surfaces lubricated with 650SN and KF-1

Worn surface	Elemental composition/at%				
	Fe	O	Si	Al	Other
Lubricated with 650SN	80.59	18.98	0	0	0.43
Lubricated with KF-1	77.10	18.88	2.15	1.87	0

有利于储存润滑油和加强边界润滑作用 因此, KF-1 润滑剂之所以对 45# 钢/球墨铸铁摩擦副表现出良好的长效抗磨减摩作用, 根本原因在于其使得摩擦副接触表面形成硬度较高且具有微孔结构的摩擦改性层

3 结论

a. 将主要成分为羟基硅酸铝的矿物微粉作为添加剂引入 650SN 基础油中, 当试验时间较短时, 由于无机微米颗粒的磨粒磨损作用, 45# 钢/球墨铸铁摩擦副的摩擦磨损性能反而变差; 但该矿物微粉添加剂具有显著的长效减摩抗磨作用

b. 羟基硅酸铝矿物微粉添加剂可使摩擦副接触表面形成硬度较高且具有微孔结构特征的摩擦改性层, 因此表现出优良的长效减摩抗磨作用

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 刘维民, 薛群基, 周静芳, 等. 纳米颗粒的抗磨作用及作为磨损修复添加剂的应用研究[J]. 中国表面工程, 2001, (3): 21-29.
Liu W M, Xue Q J, Zhou J F, *et al*. Antiwear properties of nanoparticles and application study of nanoparticles asadditives in wear-repairing agent[J]. China Surface Engineering, 2001, (3): 21-29.

[2] Zhou J F, Wu Z S, Zhang Z J, *et al*. Study on an antiwear and extreme pressure additive of surface coated LaF_3 nanoparticles in liquid paraffin[J]. Wear, 2001, 249: 333-337.

[3] 王九, 陈波水, 黄伟九. 纳米微粒添加剂在润滑剂中的应用与开发[J]. 江苏化工, 2001, 29(3): 13-18.
Wang J, Chen B S, Huang W J. Application and development of nanoparticles as lube additives in lubricants[J]. Jiangsu Chemical Industry, 2001, 29(3): 13-18.

[4] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油脂中的应用[J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 265-267.
Liu W M. Application of nanoparticles in lubricants[J]. Tribology, 2003, 23(4): 265-267.

[5] 胡泽善, 王立光, 黄令. 纳米硼酸铜颗粒的制备及其用作润滑油添加剂的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(4): 292-295.
Hu Z S, Wang L G, Huang L. Preparation and tribological properties of nanometer copper borate as lubricating oil additive[J]. Tribology, 2000, 20(4): 292-295.

[6] 徐滨士, 欧忠文, 刘维民. 纳米硫化锌的原位合成和摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2002, 22 (4s): 12-15.
Xu B S, Ou Z W, Liu W M. In-situ synthesis and tribological behavior of nanometer ZnS[J]. Tribology, 2002, 22 (4s): 12-15.

[7] Hu Z S, Dong J X, Chen G X, *et al*. Preparation and tribological properties of nanoparticle lanthanum borate[J]. Wear, 2000, 243: 43-47.

[8] Xue Q J. Liu W M, Zhang Z J. Friction and wear properties of a surface-modified TiO_2 nanoparticle as an additive in liquid paraffin[J]. Wear, 1997, 213: 29-32.

[9] 周静芳, 张治军, 王晓波, 等. 油溶性铜纳米微粒作为液体石蜡添加剂的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(2): 123-126.
Zhou J F, Zhang Z J, Wang X B, *et al*. Study on the tribological behavior of oil-soluble Cu nanoparticles as an additive in liquid paraffin[J]. Tribology, 2000, 20(2): 123-126.

[10] Chen S, Liu W M. Preparation of DDP-coated PbS nanoparticles and investigation of the antiwear ability of the prepared nanoparticles as additive in liquid paraffin[J]. Wear, 1998, 218: 153-158.

[11] 尼基丁·伊戈尔·符拉基米洛维奇. 机械零件摩擦表面和接触表面之选择补偿磨损保护层生成方法[P]. CN 98121144, 1998.

[12] 董伟达. 机械零件表面强化和自修复的处理方法[P]. CN 1391059A, 2003.

[13] 董伟达. 黑色金属滑动轴承及其制备方法[P]. CN 1388325A, 2003.

[14] 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.
Zhou P A. The functional characteristics and applied prospect of the metallic auto restoration materials[J]. China Surface Engineering, 2004, (1): 39-41.

[15] 董伟达. 金属磨损自修复材料[J]. 汽车工艺与材料, 2003, (5): 31-35.
Dong W D. Self-repairing materials for wear of metal[J]. Automobile Technology & Material, 2003, (5): 31-35.

[16] 罗虹, 刘家浚, 孙希桐. 磨粒磨损中基体表面形成复合材料层的作用机理及其影响因素的考察[J]. 摩擦学学报, 1995, 15(3): 218-223.
Luo H, Liu J J, Sun X T. An examination of mechanism and influencing factors of a composite material layer formed in the abrasive wear[J]. Tribology, 1995, 15(3): 218-223.

[17] 刘英杰, 成克强. 磨损失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Effect of Hydroxyl Silicate particulates as an Additive on the Friction and Wear Behavior of Mild Steel/Ductile Cast Iron Pair

GUO Yan-bao, XU Bin-shi, MA Shi-ning, XU Yi

(*National Key laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China*)

Abstract: An MM-200 friction and wear tester was performed to evaluate the friction and wear behavior of 1045 steel/ductile cast iron pair under the lubrication of 650SN oil and the 650SN containing hydroxyl silicate particulates as the additive (The latter oil specimen was coded as KF-1). The worn surface and cross-section of the AISI1045 steel block were observed using a scanning electron microscope, and the elemental composition on the worn surface of the steel block was examined using an energy dispersive X-ray analyzer. It was found that the inorganic mineral particulates as the additive led to increased friction coefficient and wear volume loss of the ductile cast iron ring at a relatively shorter test duration, which was attributed to the abrasion action of the particulates. The friction and wear of the frictional pair under the lubrication of KF-1 was significantly decreased at an extended test duration, which was attributed to the embedding strengthening effect of the inorganic particulates to the worn steel surface. Namely, a friction-modified layer was formed on the worn steel surface under the lubrication of the KF-1, and the relevant worn steel surface had a much larger microhardness than the one under the lubrication of the base stock alone. At the same time, the surface-modified layer in the former case was porous, which helped to entrap the lubricating oil therein and to enhance the boundary lubricating function as well. Subsequently, the friction and wear of the frictional pair was greatly decreased at a large enough test duration.

Key words: mild steel/ductile cast iron pair; hydroxyl silicate; mineral particulates; lubricating oil additive; friction and wear behavior

Author: XU Bin-shi, male, born in 1931, Professor, member of Chinese Academy of Engineering, e-mail: xubinshi@sina.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net