

## 铟锡锌软金属修复润滑剂对钢的自修复及其摩擦学特性\*

莫云辉<sup>a</sup>, 张黎明<sup>a</sup>, 王帅宝<sup>a</sup>, 陶德华<sup>a</sup>, 韦习成<sup>b</sup>

(上海大学 a. 机电工程与自动化学院 b. 材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 针对目前润滑自修复技术生成的修复层厚度较薄, 难以修复较严重磨损表面的不足, 研制了含铟、锡和锌三种软金属添加剂的新型磨损自修复润滑剂。在摩擦磨损试验机上, 考察了使用该润滑剂的钢-钢面接触摩擦副的磨损自修复行为及其摩擦学性能。用X射线能谱(EDS)和扫描电镜(SEM)分析了修复表面的主要化学元素和自修复涂层的厚度。用淬冷试验测试了涂层与基体的结合强度。结果表明, 研制的铟锡锌润滑脂能在钢表面摩擦形成约30 μm厚度的自修复涂层, 涂层与基体结合性能良好, 修复后的钢表面有良好的减摩抗磨性能。

**关键词:** 软金属添加剂; 自修复; 钢-钢摩擦副; 摩擦学性能; 结合强度

**中图分类号:** TH117.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9289(2010)06-0020-04

### Self-repairing on Steel with In-Sn-Zn Soft Metal Repairing Lubricant and Its Tribological Properties

MO Yun-hui<sup>a</sup>, ZHANG Li-ming<sup>a</sup>, WANG Shuai-bao<sup>a</sup>, TAO De-hua<sup>a</sup>, WEI Xi-cheng<sup>b</sup>

(a. School of Mechatronics Engineering and Automation b. School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

**Abstract:** At present, the repairing coatings formed through lubricating self-repairing technique are too thin to repair those seriously worn surfaces. This paper developed a new type of wearing self-repairing lubricant that contained three kinds of soft metal additives-In, Sn and Zn. The behavior of wearing self-repairing and its tribological performance on steel vs. steel plane contact tribo-pair added with the lubricant were studied on a friction and wear tester. The main chemical elements of self-repair surface and coatings thickness were analyzed with Energy Dispersive Spectroscopy X-ray analysis system (EDS) and Scanning Electronic Microscope (SEM). The bonding strength of the coatings with the substrate was tested through cooling quenching test. The results indicated that self-repairing coatings with the thickness of 30 μm were formed on the wearing steel surface after using the lubricant, and the coatings were well combined with the substrates. The test also proved that the repaired steel surface possessed excellent friction-reducing and anti-wear capability.

**Key words:** soft metal additives; self-repairing; steel vs. steel tribo-pair; tribological property; bonding strength

## 0 引言

摩擦磨损普遍存在于机械传动中, 当机械零部件发生磨损时, 将影响机械的正常运转和使用寿命。用传统的润滑剂虽能降低摩擦、减轻磨损, 但不具有修复功能。国内外学者在自修复领域开展了一系列研究<sup>[1-5]</sup>, 取得了一定的研究成果, 但纵观研究结论, 对于用各种软金属润滑剂修复的表面, 其涂层厚度甚薄<sup>[6-10]</sup>, 一般为几十纳米, 对于大多数微米级表面损伤的机械零件来说不具有实用意义,

且制备和修复工艺较为复杂。鉴于此, 文中围绕制备和提供能形成较厚的摩擦涂层的软金属修复润滑剂, 使之能对一般的表面损伤或磨损的零部件进行修复这个主题, 开展了研究和试验工作。研制了加入铟、锡、锌3种软金属微粒的修复润滑剂, 考察其对钢-钢摩擦副的修复性能、摩擦学特性、以及涂层与基体的结合性能。

## 1 试验部分

### 1.1 自修复润滑剂的制备

为了实现对磨损表面的原位动态修复, 润滑剂中应含有能实现自修复的软金属微粒, 取铟、锡、

收稿日期: 2010-07-02; 修回日期: 2010-09-07

基金项目: \*国家自然科学基金资助项目(50675128)

作者简介: 莫云辉(1953—), 女(汉), 南京人, 副教授, 博士。

锌微粒作添加剂, 钢粉粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ , 锡粉粒径 $\leq 40\sim 50 \mu\text{m}$ , 锌粉粒径 $\leq 30 \mu\text{m}$ 。试验表明, 对于表面损伤较大或表面粗糙度较高的零件, 采用一定范围的微米级添加剂具有较好的填补和修复性。

将质量分数为30%的3号Li基脂与70%的VG32号油充分混合后制成00号半流体脂(锥入度400~430), 作为润滑剂的基础材料。取质量分数为15%的钢粉、20%的锡粉、15%的锌粉与35%的00号基础脂和15%的芳香族有机脂肪酸衍生物活性剂混合, 在高速乳化均质机上, 以16 000 r/min转速搅拌均匀, 制成15In20Sn15Zn的润滑脂; 用相同的配制方法改变钢粉和00号脂的配比, 得到质量分数分别为10In20Sn15Zn和5In20Sn15Zn的润滑脂。

试验另取两组对比润滑剂, 一组用VG32号基础油; 另一组用不加活性剂的5In20Sn15Zn脂, (记为WHI)。润滑剂编号为1~5(见表1), 此编号也作为对应转化涂层的编号。

## 1.2 试验条件和修复试验

对原MS-800型四球式摩擦磨损试验机进行设计改造, 将上试样设计成圆环形, 下试样设计成平面, 使原上、下试样的点接触摩擦副变为环-面接触摩擦副。上试样材料为GCr15钢, 表面硬度59~61HRC; 下试样材料为45钢, 表面硬度40~50HRC。上试样的圆环内径 $\phi 9 \text{ mm}$ , 外径 $\phi 14 \text{ mm}$ ; 下试样为厚度0.4 mm的钢片。试验时上试样旋转, 转速为500 r/min, 下试样固定。试验在室温下进行。施加载荷为300 N, 试验时间为10 min。

试验时在上、下试样之间分批适量加入各种配比的钢锡锌复合润滑剂, 修复剂微粒在摩擦滑动中将被研磨细化, 考察它们对下试样表面的修复情况。摩擦试验后, 用CP225D(精度为0.01 mg)电子分析天平称量试样在试验前后的质量变化。用X射线能谱(EDS)和扫描电镜(SEM)分析钢试样修复表面的化学元素组成和修复涂层厚度。

## 1.3 摩擦磨损性能试验

用石油醚清洗试样后, 在摩擦磨损试验机上, 按以下两种情况模拟评定钢对已形成In-Sn-Zn涂层钢片的摩擦磨损性能, 从而评定各种In-Sn-Zn修复润滑剂的摩擦学特性。每级载荷、每级转速, 磨损10 min。

(1) 考察对比在100、200、300和400 N载荷条

件下, 钢对各In-Sn-Zn涂层钢片的摩擦磨损性能。采用杠杆加载, 取固定转速为500 r/min。

(2) 考察对比在300、500、800和1000 r/min转速条件下, 钢与各In-Sn-Zn涂层钢片的摩擦磨损性能。上试样转速可进行无级变速微调, 取固定载荷为200 N。

在摩擦磨损试验机上安装摩擦扭矩测试仪, 以测定上、下试样工作时的摩擦力矩。试验时, 在一定的载荷和转速下, 摩擦力矩信号经过压力传感器输入到记录仪, 根据摩擦力矩 $M$ (N·mm)计算出摩擦因数 $\mu$ , 计算公式如下:

$$\mu = \frac{M}{P \cdot r_f} \quad (1)$$

式中:  $P$  为法向载荷(N),  $r_f$  为摩擦环面平均半径(mm)。

摩擦磨损试验研究重点是考察修复层的摩擦学行为, 在试验过程中发现, 由于上试样钢的硬度较高, 测试的磨损量甚微, 故在后续磨损评价试验中, 忽略上试样磨损对摩擦副系统的影响, 磨损量均按下试样的质量损失计算。磨损量 $W$ 计算如下:

$$W = m_a - m_b \quad (2)$$

式中:  $m_a$  为原始试样质量/mg,  $m_b$  为磨损后试样质量/mg。摩擦磨损数据取3次重复试验的平均值。

## 1.4 涂层的结合性能测试

采用淬冷法判定涂层与基体的结合强度。将试验试样放入DHG-9070A电热恒温鼓风干燥箱(功率: 1500 W, 控温范围: 40~300 °C)内, 于300 °C时保温1 h, 取出后立即放入自来水中冷却, 此过程重复4~5次。用SMZ645显微镜放大10倍观察, 最后根据涂层是否出现滑移、鼓泡或脱落现象来判定涂层的结合强度。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 润滑剂的修复性能

表1给出了修复试验后下试样钢质量变化的情况。可见, 用VG32号基础油和WHI脂润滑时, 钢试样质量减轻, 发生磨损, 表明32号油和WHI脂不具有修复功能。用各种钢锡锌脂润滑时, 钢质量均有增重, 且随着脂中锡含量的增多而增重, 说明这些试样表面已形成修复层, 试样质量增重越多, 修复涂层越厚。

表1 摩擦修复后下试样质量变化

Table 1 Mass change of the lower sample after friction repairing

编号	润滑剂或添加剂	下试样质量变化 $\Delta m$ /mg
1	VG32 号油	-0.36
2	WHI	-0.17
3	5In20Sn15Zn	+4.55
4	10In20Sn15Zn	+6.47
5	15In20Sn15Zn	+7.93

## 2.2 修复涂层的成分

用X射线能谱测试了在钢表面深度为1  $\mu\text{m}$ 处的化学成分(见图1)。主要元素有In、Sn、Zn、Fe、C、O, 涂层内In含量为3.89%、Sn为74.90%、Zn为5.47%。说明In、Sn和Zn具有一定的渗镀功能, 能穿透表面渗入到基体。

图2所示为钢表面涂层横断面的X射线能谱和SEM照片, 左边为钢基体, 右边为环氧树脂粘结剂, 中间为钢锡锌修复涂层。可以看出, 沿涂层厚度方

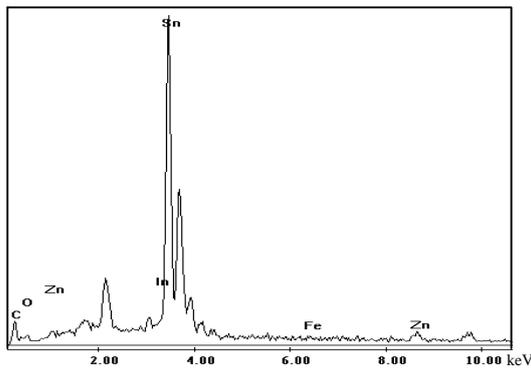


图1 修复后钢表面的EDS能谱图

Fig.1 EDS spectrum on steel surface after repairing

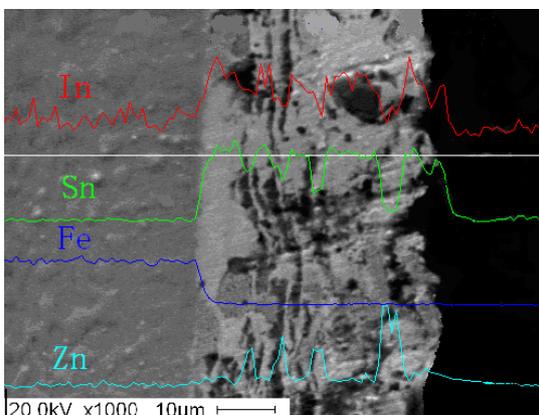


图2 钢表面涂层横断面的EDS能谱和SEM照片

Fig.2 EDS spectrum and SEM micrograph of cross-section of coating on steel surface

向有In、Sn、Zn分布, 渗入钢基体后Sn和Zn逐渐减弱, 但In峰还较活跃。涂层的厚度约为30  $\mu\text{m}$ , 涂层与钢基体结合紧密。表层含In、Sn和Zn元素, 使表面性能得到改善, 这在摩擦磨损试验中得到验证。

## 2.3 摩擦磨损性能

### 2.3.1 载荷对摩擦磨损性能的影响

表2给出了钢-钢摩擦副在不同载荷下的摩擦因数, 可见, 摩擦因数随载荷的增大略有上升, 但变化有限。VG32号油和WHI脂在各种载荷下保持了较低的摩擦因数, 各种In-Sn-Zn涂层钢片的摩擦因数在各种载荷下变化不明显, 但稍高于VG32号基础油和WHI脂, 推测可能是由于In和活性剂之间产生的“粘滞”效应, 增大了脂中的摩擦阻力。

表2 载荷P对摩擦因数 $\mu$ 的影响Table 2 Effect of load  $P$  on friction coefficient  $\mu$ 

编号	载荷 $P$ /N	100	200	300	400
1	VG32 号油	0.06	0.09	0.10	0.12
2	WHI	0.07	0.07	0.08	0.10
3	5In20Sn15Zn	0.12	0.15	0.15	0.16
4	10In20Sn15Zn	0.12	0.16	0.15	0.17
5	15In20Sn15Zn	0.12	0.14	0.15	0.16

表3给出了钢-钢摩擦副在不同载荷下的磨损量。可以看出, 用VG32号油和WHI润滑时, 在各种载荷下均发生磨损, 磨损量随载荷的增加非线性增大。各种In-Sn-Zn脂润滑修复的钢试样均为负磨损, 其中15In20Sn15Zn脂的抗磨效果尤为显著, 显示出该润滑剂优异的修复性能和抗磨性能。

表3 不同载荷下的磨损量  $W$ /mgTable 3 Wear mass loss  $W$ /mg under various loads

编号	载荷 $P$ /N	100	200	300	400
1	VG32 号基础油	+0.23	+0.23	+0.53	+0.73
2	WHI	+0.27	+0.32	+0.75	+0.75
3	5In20Sn15Zn	-2.47	-1.31	-0.45	-0.21
4	10In20Sn15Zn	-5.38	-2.94	-4.22	-0.76
5	15In20Sn15Zn	-7.52	-4.42	-4.22	-2.77

### 2.3.2 转速对摩擦磨损性能的影响

表4是转速对摩擦因数 $\mu$ 的影响。在各种转速下, 32号油和WHI脂润滑时的摩擦因数变化较小, 减摩性较好; 各种In-Sn-Zn涂层钢片的摩擦因数随转速的变化先微升再逐渐减小, 转速越高, 摩擦因

表4 转速对摩擦因数 $\mu$ 的影响Table 4 Effect of rotating speed on friction coefficient  $\mu$ 

编号	转速 $n/(r/min)$	300	500	800	1000
1	VG32号基础油	0.09	0.09	0.08	0.10
2	WHI	0.08	0.07	0.07	0.06
3	5In20Sn15Zn	0.12	0.15	0.04	0.07
4	10In20Sn15Zn	0.13	0.16	0.07	0.06
5	15In20Sn15Zn	0.13	0.14	0.06	0.07

数越小,表现出在高转速下的低摩擦因数特性。

转速对磨损量的影响见表5,用32号油和WHI润滑时,试样发生明显磨损;各种In-Sn-Zn涂层钢试样均为负磨损,其中15In20Sn15Zn脂的抗磨性最好,转速越高磨损负增长越大,体现了高转速下的良好抗磨性能。

表5 不同转速下的磨损量  $W/mg$ Table 5 Wear mass loss  $W/mg$  under various rotating speeds

编号	转速 $n/r/min$	300	500	800	1000
1	VG32号基础油	+0.56	+0.23	+0.12	+0.12
2	WHI	+0.76	+0.32	+0.33	+0.26
3	5In20Sn15Zn	-0.45	-0.21	-1.62	-2.96
4	10In20Sn15Zn	-2.94	-3.99	-3.67	-3.89
5	15In20Sn15Zn	-3.26	-4.42	-5.39	-12.36

#### 2.4 修复涂层与基体的结合性能

用淬冷法测试的涂层与基体结合性能见表6。结果表明,各种In-Sn-Zn涂层与钢基体的结合性能良好。

表6 淬冷测试结果

Table 6 Results of cooling quenching test

试样编号	3	4	5
基体材料	45钢	45钢	45钢
涂层	5In20Sn15Zn	10In20Sn15Zn	15In20Sn15Zn
结果	未见涂层起皮、鼓泡、开裂、滑移		

试验结果表明,修复添加剂铟、锡、锌之间有良好的相容性和协同性,以及各自的优良特性,如锡有非常优秀的减摩性能,铟能较大幅度提高抗磨性能和具有优良的抗腐蚀性,锌具有减摩和防锈抗腐性能,它们的综合效应改善了钢表面的摩擦学性能。润滑剂中的活性剂以及修复试验时选取的载荷、转速,对钢表面的活化起了至关重要的作用,从而在摩擦表面生成了较厚的修复涂层,而VG32

基础油和WHI脂,由于化学活性差,对金属表面的活化能力十分有限,因而不具有自修复效应。

### 3 结论

(1) 研制的In-Sn-Zn软金属自修复润滑剂,制备简单,能在钢表面摩擦形成约30  $\mu m$ 厚度的自修复涂层。淬冷试验表明,涂层与基体结合性能良好。

(2) 摩擦磨损试验表明,润滑修复后的钢-钢摩擦副,在不同载荷和转速下均呈现负磨损,在高转速下有稳定的低摩擦因数特性。

#### 参考文献:

- [1] 刘谦,徐滨士,许一,等. 摩擦磨损自修复润滑油添加剂研究进展 [J]. 润滑与密封, 2006, 31(2): 150-154.
- [2] 刘维民. 纳米颗粒及其在润滑油中的应用 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(4): 265-267.
- [3] Tarasov S, Kolubaev A, Belyaev S, et al. Study of friction reduction by nanocopper additives to motor oil [J]. Wear, 2002, 252:63-69.
- [4] Garbar I I, Sher E, Shneck R. Structural mechanism of action of some additives to lubricant [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2000, 52(4): 186-192.
- [5] Hisakado T, Ikuta K, Suda H, et al. The effects of copper particles and oleic acid on the friction and wear characteristics of ceramics in ethanol [J]. Wear, 1996, 197: 280-285.
- [6] 史佩京,许一,刘谦,等. 纳米复合自修复添加剂的制备及其在发动机上的应用 [J]. 中国表面工程, 2004, 65(2):37-40.
- [7] 周静芳,张治军,王小波,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.
- [8] 乔玉林,徐滨士,马世宁,等. 含纳米铜的减摩修复添加剂摩擦学性能及其作用机理研究 [J]. 石油炼制与化工, 2002, 33(8): 34-38.
- [9] 赵彦保,张治军,吴志申,等. 锡纳米微粒的摩擦学性能 [J]. 应用化学, 2003, 25(12): 1157-1160.
- [10] 刘仁德,梁敬辉,陶德华. 表面修饰纳米铜粒子的制备及其摩擦学性能 [J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 161-164.

作者地址: 上海市延长路 149 号

200072

上海大学 21 信箱

Tel: 135 8597 8743

E-mail: moyunhlaosh@yahoo.com.cn