

二硫化钼基润滑涂层在润滑油中的作用机理及实际应用

郑友华¹ 李冀生¹ 王平² 胡永乐¹

(1. 中科院兰州化物所 兰州 730000; 2. 山西平阳机械厂 山西平阳 043002)

摘要: 讨论了在几种液体润滑介质(液体石蜡、10[#]机油、HM46 液压油)中,涂敷 FM-510 二硫化钼基润滑涂层的摩擦副的摩擦磨损性能和润滑机理。试验机评价和台架考核结果表明,在润滑油中,涂敷 FM-510 涂层的摩擦偶对能够协助流体润滑膜的形成并维持流体润滑状态。扫描电镜观察涂层和对偶的微观表面,用能谱分析表面元素组成,揭示了其作用机理:干摩擦条件下,二硫化钼基润滑涂层与金属对偶表面的相对滑动,形成了以 Mo、S、Sb 为主的转移膜,但在润滑油介质中没有形成这类转移膜;二硫化钼基润滑涂层的表面有大量的、均匀分布的、直径小于 3 μm 的孔穴,起到了蓄油作用,更易于建立流体润滑条件,形成均匀分布的油膜。

关键词: 二硫化钼; 润滑; 固体膜

中图分类号: TE626.3 文献标识码: A 文章编号: 0254-0150(2005)2-127-3

Mechanisms of the Molybdenum Disulfide Solid Lubricant Film in Lubrication and its Applications

Zheng Youhua¹ Li Jisheng¹ Wang Ping² Hu Yongle¹

(1. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. Shanxi Pingyang Machinery Factory, Pingyang 043002, China)

Abstract The mechanisms of lubrication, the friction and wear characteristics of the molybdenum disulfide solid lubricant film in the oil were discussed. A ring-on-block type of testing apparatus was used. The testing data and the results from the tester and the test-bed reveal that the molybdenum disulfide solid lubricant film can help the formation of the liquid lubrication film in the oil. SEM was used to observe and EDS was used to analyze the testing specimens. The lubricating mechanism was found to be completely different in the oil and on the dry friction condition. Under the dry friction condition, the transfer film consisting of Mo, S, Sb occurs during the sliding, but under the oil lubrication condition, there is no same transfer film. Scanning electron microscopy shows that large numbers of voids whose average diameter was less than 3 μm distribute symmetrically in the molybdenum disulfide solid lubricant film. The oil can be stockpiled in those voids and the liquid lubrication film can be easily formed while sliding happens under the oil lubrication condition.

Keywords molybdenum disulfide, lubrication, solid film

滑动轴承是机器设备的关键部件。轴承的润滑类型可分为流体润滑、边界润滑、混合润滑和固体润滑等。滑动轴承工作状态的好坏一般与润滑介质的性能和工况条件的(负荷、速度、温度等)苛刻程度有关^[1,2,8]。滑动轴承的流体润滑的理想状态是“流体动力润滑”,即相对运动的两个表面被一层流体膜隔开,靠相对运动在流体膜中产生承载力。但是,由于各种因素的影响滑动轴承在工作时并不能完全达到这种理想状态,润滑经常会处于混合润滑状态,这样就产生了磨损和寿命问题。本文作者讨论了油(流体)润滑和二硫化钼基固体润滑涂层同时作用下的特征和效果。并采用扫描电镜观察涂层和对偶的微观表面,采用能谱分析涂层和对偶表面的组成。

1 实验部分

1.1 涂敷与固化

试件经吹砂或磷化后,用丙酮清洗干浄,采用荷花 No.2 型喷枪,在空气压力 0.15~0.20 MPa 的条件下,将 FM-510 干膜润滑剂分散液喷涂到试件表面上,在室温下放置 10~30 min 后,放入烘箱中加热烧结固化,固化温度为 120 °C、0.5 h + 190 °C、1.0 h。然后试件随炉冷却。

1.2 试验设备

MRH-3 环块磨损试验机,试环材料为渗碳钢,直径 49.2 mm,硬度 HRC 60,对偶为钢试块。

四球试验机。SETA-SHELL FOUR BALL E. P LUBRICANT TESTER。按润滑剂极压性能测定法(四球法) GB/T 12853-1998 进行试验。

表面形态和能谱分析采用 JSM-5600LV 低真空扫描电子显微镜和 X 射线能量色散谱仪。

收稿日期 2004-03-17

作者简介:郑友华(1962-),男,从事材料磨损与表面工程研究。
E-mail: zh6015@ns.lzb.ac.cn.

1.3 试验

(1) MRH-3 环-块磨损试验机的油润滑试验和干摩擦试验。润滑油为市售液体石蜡和 HM46 液压油, 试验时加入 80 ~ 90 mL 润滑油, 润滑方式为浸油润滑。试验分为两组, 一组是涂有 FM-510 二硫化钼润滑涂层的试环和未涂膜的试块, 试环涂层厚度为 15 ~ 25 μm , 试块表面粗糙度为 $R_a 0.06 \mu\text{m}$; 另一组试环和试块均不涂膜, 表面粗糙度为 $R_a 0.06 \mu\text{m}$ 。图 1 为试验示意图。干摩擦试验是在相同速度、负荷条件下, 采用涂有 FM-510 二硫化钼润滑涂层的试环和未涂膜试块进行试验 (试环涂层厚度为 15 ~ 25 μm , 试块表面粗糙度为 $R_a 0.06 \mu\text{m}$)。

(2) 四球试验机对润滑油的评价。试验分为两组, 一组评价试验前润滑油的 p_B 值; 另一组评价分散有 FM-510 涂层细微磨屑的润滑油悬浮液的 p_B 值。

(3) 径向柱塞泵台架考核。

2 实验结果与讨论

2.1 环-块磨损试验结果与讨论

图 2 是有油和无油状态下, 试环有涂层和无涂层时的摩擦因数变化曲线。图 3 是试环 120 min 试验前后的状态。

表 1 是 3 种试验条件下, 试环和试块的摩擦磨损状态比较。对比表明: 试环有涂层的摩擦副在油介质中的润滑状态大大优于无涂层油润滑和涂层固体润滑状态。

在 HM46 液压油中, 对试环有涂层的摩擦副按负荷 200 N 不变, 速度分别为 2 000 r/min、3 000 r/min、4 000 r/min 的条件进行试验, 时间为 120 min。结果发现: 试环上的涂层逐渐减薄,

且速度越高减薄越严重。涂层的磨屑进入润滑油中, 油的颜色变为黑灰色。但是摩擦因数均稳定在 0.04

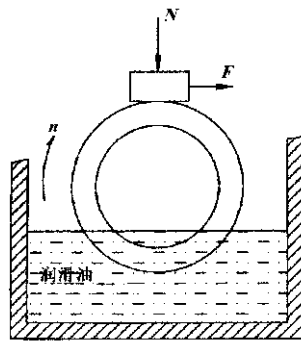


图 1 MRH-3 环-块磨损试验机示意图

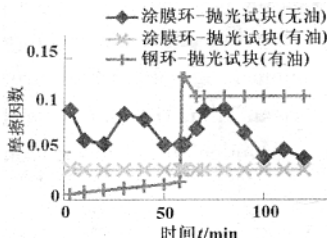


图 2 有油、无油状态下的摩擦因数 (负荷 200 N, 速度 1 500 r/min)

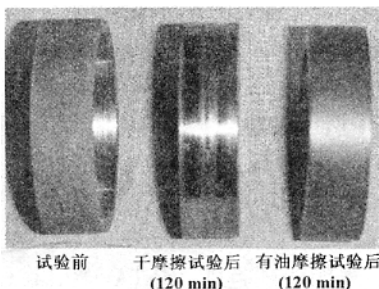


图 3 涂层试验前后的状态

以下, 没有异常突变。

2.2 四球试验结果与讨论

采用四球试验机分别测定了 HM46 液压油和添加有二硫化钼涂层的磨屑微粒的 HM46 液压油的 p_B 值, 结果如表 2 所示。

表 1 试环和试块的摩擦磨损状态

摩擦副	钢环-抛光试块	涂膜环-抛光试块	涂膜环-抛光试块
润滑状态	液体石蜡	干摩擦	液体石蜡、10 [#] 机油、HM46 液压油
摩擦因数	从 0.02 突变到大于 0.1	在 0.05 ~ 0.1 之间波动	0.03
试块磨痕宽度 /mm	5.2 ~ 5.6	1.2 ~ 1.6	0.6 ~ 1.0
试环磨损状态	金属试环有明显划痕	涂层发亮, 较严重磨损, 但未露出金属底材	涂层有轻微磨损

表 2 试验前后液压油的 p_B 值

润滑油	HM46 液压油	分散有 FM-510 涂层细微磨屑的 HM46 液压油
状态	清、透明	黑灰色、不透明、无沉淀
p_B/N	855	800

由表 2 的结果可以看出, 二硫化钼涂层的微粒作为固体润滑添加剂分散在 HM46 液压油中, 并没有增大液压油的极压性能。说明是二硫化钼涂层本身对润滑状态的保持起作用。

2.3 SEM 和能谱分析的结果与讨论

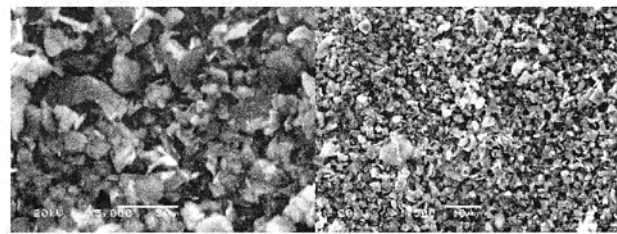


图 4 二硫化钼涂层的微观表面形态

图 4 是二硫化钼涂层的 SEM 照片。在放大 5 000 倍和 1 500 倍的照片上, 可以清楚地看出二硫化钼涂层表面分布着大量孔径小于 3 μm 的微孔穴。这些微孔穴可以蓄油, 对于流体润滑薄膜的形成具有重要的作用。

有关表面粗糙度和微沟槽对轴承流体动力润滑影响的研究指出: 一定尺寸范围和方向的微沟槽能够提高轴承的承载能力, 带微沟槽的轴承最小油膜厚度 h_{min} 比光滑表面轴承的最小油膜厚度 h_{min} 要大^[3-5]。二硫化钼涂层表面分布的微孔穴, 因具有一定的深度, 其蓄油能力, 即保持润滑油的能力远远大于机械加工的微沟槽, 更加易于建立流体润滑条件。

图 5、6 分别是干摩擦和油润滑条件下环-块磨损试验后, 试块磨痕的 SEM 照片。对比两组照片可以

看出：干摩擦与油润滑环-块磨损试验后，试块磨痕的表面形态明显不同。干摩擦的磨痕表面显示有致密的转移膜迹象，且较为光滑。白色点状部分则是转移膜缺陷。油润滑的磨痕表面的颜色与旁边金属表面的颜色接近，磨痕上的黑色条状部分可能是润滑油中的元素转移到金属上形成的。下文的能谱分析证明了上述判断。

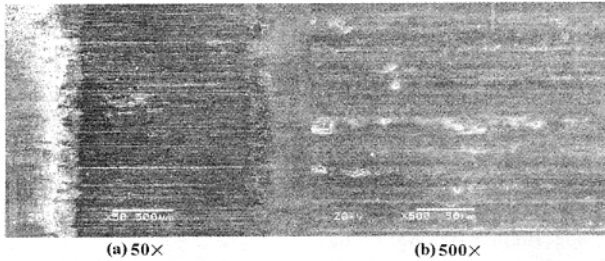


图 5 干摩擦下试块磨痕的表面形态（涂层环-抛光试块，环-块磨损试验后）

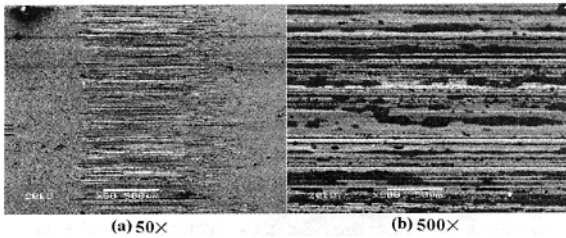


图 6 油润滑下试块磨痕的表面形态（涂层环-抛光试块，环-块磨损试验后）

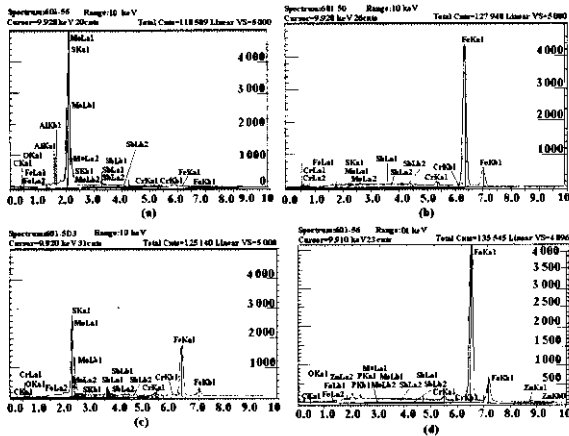


图 7 表面能谱图

图 7 是 4 种表面能谱图。图 7 (a) 是 MoS_2 涂层的表面能谱图，可以看出涂层的主要成分有 Mo、S (Mo、S 在谱图上处于同一位置) 和 Sb。图 7 (b) 是金属底材的表面能谱图，主要成分是 Fe、Cr。图 7 (c) 是干摩擦磨痕的表面能谱图（对应的表面形态如图 5）。由图 7 (c) 可以看出干摩擦磨痕表面有 Mo、S、Sb 元素，这说明：试环上 MoS_2 涂层在摩擦试验过程中产生了向对偶的转移。 MoS_2 转移膜的厚

度比较薄，谱图上所反映 Fe、Cr 元素是入射电子束在穿透 MoS_2 转移膜以后，激发试块金属底材所含元素 Fe、Cr 的结果^[6]。图 7 (d) 是油润滑磨痕的表面能谱图（对应的表面形态如图 6），与图 7 (b) 对比，该图有很小的 P、S、Zn 峰，这是 HM46 液压油中极压添加剂和抗氧化添加剂如二烷基二硫代磷酸锌所含元素在金属对偶上转移所致。该谱图没有出现 Mo (S)、Sb 峰，说明摩擦对偶上没有涂层转移膜。

通过对上述 SEM 像和对应能谱的元素组成分析，可以确定：在干摩擦下， MoS_2 涂层的润滑机理是，在相对滑动过程中， MoS_2 涂层向对偶转移，在对偶上形成了 MoS_2 涂层的转移膜；而在油润滑下， MoS_2 涂层的润滑机理则与干摩擦不同。二硫化钼涂层表面分布着大量孔径小于 $3 \mu\text{m}$ 孔穴。这些孔穴储存油介质，在相对滑动过程中，能够保持流体润滑的薄膜，使润滑处于流体润滑状态之下。

2.4 径向柱塞泵台架考核

在工业实际应用中，有很多滑动摩擦副因为负荷、速度条件到达了一定的限度后，就难以形成连续的流体润滑薄膜，亦即不能形成流体动力润滑，从而发生严重的磨损。径向柱塞泵就是一个比较典型的例子。图 8 为径向柱塞泵示意图。

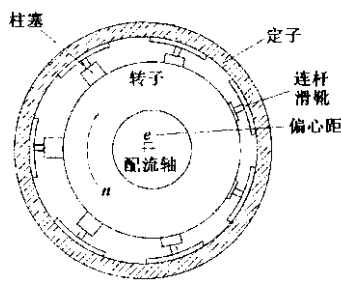


图 8 径向柱塞泵示意图

图 8 为径向柱塞泵示意图。径向柱塞泵是近几年发展起来的一种新型液压泵，与轴向柱塞泵相比有体积小、重量轻、效率高等很多优点。其滑动摩擦副——连杆滑靴-定子是关键组件^[7]。径向柱塞泵的工作原理，决定了连杆滑靴-定子摩擦副所承受的负荷与速度随着转子的转动作周期性变化。速度的变化产生加速度，对轴承流体动力润滑薄膜的承载能力起负作用^[8]。采用传统的办法如滑靴-定子不同合金的组合，如奥-贝合金球墨铸铁，或在滑靴工作表面挂巴氏合金均不能满意地解决他们之间的润滑问题。

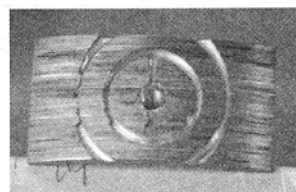


图 9 台架试验后表面为巴氏合金的滑靴磨损形态

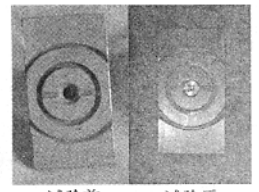


图 10 台架试验前后的二硫化钼基润滑涂层

图 9 是滑靴工作表面挂巴氏合金经过台架试验的表面形态。当泵输出压力达到一定（下转第 132 页）

气燃料。

2.4 WSD 与 K_m 之间的关系

我国 3 号喷气燃料的润滑性, 长期采用 SH/T 0073-91 方法测定, 用抗磨指数 K_m 表示, K_m 越大, 喷气燃料润滑性越好, 这与磨痕直径 WSD 越小越好相反。目前国内喷气燃料的润滑性只需测定抗磨指数 K_m , 而部分进口和出口喷气燃料要求测试磨痕直径 WSD。因此, 确定抗磨指数 K_m 与磨痕直径 WSD 的相关性, 为从事喷气燃料生产、应用和科研工作者所关注。为此, 本文作者分别测定了国产 36 个喷气燃料样品的 K_m 和 WSD 值, 并把测得的数据以 WSD 值为 X 轴, K_m 值为 Y 轴绘制于图 3 中。

从图 3 中这些离散数据可以看到, 若磨痕直径 WSD 大, 则抗磨指数 K_m 小; 磨痕直径 WSD 小, 则抗磨指数 K_m 大。

为观察 K_m 值与 WSD 值之间的关系, 进一步对数据进行线性回归, 得到:

$$Y = -261.75X + 296.41, R = -0.90874$$

式中: Y 为 K_m 值, X 为 WSD 值。

上式中 R 为 0.908, 即 36 个数据具有很好的线性关系。按照我国长期执行的抗磨指数 K_m 不小于

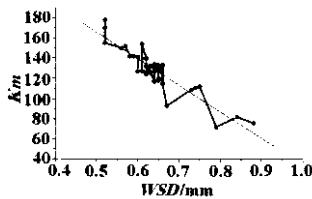


图 3 WSD 与 K_m 之间的关系图

90, 则可以得到磨痕直径 WSD 为 0.79 mm, 这高于按照 DEF STAN 91-91/4 中要求不大于 0.85 mm 的指标。同样, WSD 为 0.85 mm 时, 可以得到 K_m 值为 74。若按照美国军用飞机 WSD 要求不大于 0.65 mm, K_m 值为 126。

3 结论

(1) 3 种精制工艺生产的 3 号喷气燃料馏分, 润滑性为: 非加氢工艺精制 > 精制工艺精制 > 加氢裂化工艺。

(2) 3 号喷气燃料的润滑性整体优于进口民用 JetA-1 喷气燃料。

(3) 抗磨指数 K_m 与磨痕直径 WSD 具有较好的线性相关性, 抗磨指数 K_m 为 90 时, 磨痕直径 WSD 约 0.79 mm。按照美国军用飞机 WSD 不大于 0.65 mm 的指标, K_m 约为 126。

参考文献

- 【1】刘济赢, 等. 中国喷气燃料. 烃加工出版社, 1992. 334 ~ 338.
- 【2】Maxwell Smith. Aviation Fuel. G. T. Foulis & Co. Ltd. 1970. 359.
- 【3】王翠芳, 刘济赢. 硫化物对喷气燃料抗磨性的影响. 石油炼制, 1984 (10): 16 ~ 22.
- 【4】Standards for Defence Turbine Fuel. Aviation, Kerosine Type, JetA-1, Nato Code: F-35, Defence Standard 91-91 Issue 4 Publication, Date 14 June 2002.

(上接第 129 页) 值时, 流体润滑难以维持, 滑靴和定子之间产生金属之间直接接触, 造成严重磨损, 使试验无法正常进行。

图 10 是滑靴工作表面涂敷 FM-510 二硫化钼基润滑涂层台架试验前后的表面形态。润滑介质为 N46 液压油。经过 40 h, 转速 1 800 r/min, 输出压力 28 ~ 31.5 MPa 的台架试验考核, 二硫化钼基润滑涂层仍然保持了良好状态, 说明滑靴在运动过程中与定子保持着流体润滑状态。只有流体润滑状态才能保护二硫化钼基润滑涂层本身不被磨损。

3 结论

(1) 干摩擦条件下, 二硫化钼基润滑涂层与金属对偶表面的相对滑动, 可形成以 Mo、S、Sb 为主的转移膜, 但在润滑油介质中没有形成这类转移膜。

(2) 二硫化钼基润滑涂层的表面有大量的、均匀分布的、直径小于 3 μm 的孔穴, 在油润滑下, 润滑油贮存于孔穴中, 易于建立流体润滑条件。

(3) 二硫化钼基润滑涂层在径向柱塞泵滑靴-定子摩擦副这类滑动组件上应用, 对流体润滑的维持起

到了主要作用。

参考文献

- 【1】马艳艳, 李桂国. 动载滑动轴承设计计算的研究进展 [J]. 润滑与密封, 2003 (4): 96 ~ 98.
- 【2】杨金福, 刘占生, 于达仁, 等. 滑动轴承非线性油膜力研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003 (3): 257 ~ 260.
- 【3】胡雄海, 洪玉芳, 汪久根. 微沟槽表面的滑动轴承性能分析 [J]. 机械设计与研究, 2002 (2): 51 ~ 53.
- 【4】Ram Turaga, A S Sekhar, B C Majumdar. The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces [J]. Tribology International, 1999 (32): 231 ~ 236.
- 【5】A W Bush, P H Skinner, R D Gibson. The effect of surface roughness in elastohydrodynamic lubrication [J]. Wear, 1984, 96: 177 ~ 202.
- 【6】赵家政, 许洮. 分析电子显微镜实用手册 [M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 1996. 70 ~ 71.
- 【7】侯铎, 等. 国产新型径向柱塞泵取代引进轴向柱塞泵 [J]. 液压与气动, 2003 (2): 34 ~ 36.
- 【8】O 平克斯, B 斯德因李希特. 流体动力润滑理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 386 ~ 388.