

油润滑条件下弹性金属塑料复合材料的摩擦磨损特性研究

赵新泽¹, 萧汉梁², 高虹亮¹, 严新平²

(1. 三峡大学 机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉理工大学 可靠性工程研究所, 湖北 武汉 430063)

摘要: 在 M PX-2000 型盘销式摩擦磨损试验机上评价了油润滑条件下弹性金属塑料复合材料与钢对摩时的摩擦学特性, 用扫描电子显微镜观察试样磨损表面形貌并分析其磨损机理, 并在试验基础上建立了弹性金属塑料材料与钢对摩时的等磨损率图。结果表明: 在低载荷条件下摩擦系数较高, 随着载荷升高摩擦系数降低; 当滑动速度小于 3.52 m/s 时, 摩擦系数基本稳定在 0.030; 弹性金属塑料材料的磨损率随滑动速度和载荷的升高而增加。结合等磨损率图分析发现, 当载荷小于 1.515 N 而滑动速度小于 3.52 m/s 时, 弹性金属塑料复合材料的磨损率相对较低; 当滑动速度小于 3.52 m/s 时, 弹性金属塑料材料的磨损机理以微切削、挤压变形和犁沟磨损为主, 在摩擦副两表面形成转移-依附物; 当滑动速度为 5.24 m/s 时, 弹性金属塑料材料的磨损以表层材料软化和熔融为主要特征。所建立的等磨损率图对弹性金属塑料材料的使用有一定的指导作用。

关键词: 弹性金属塑料复合材料; 摩擦磨损性能; 磨损机理

中图分类号: TH117.3

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2001)06-0430-04

弹性金属塑料(EMP)复合材料具有较高的工作比压和许用工作温度, 以及较好的减摩和耐磨性等优点^[1], 特别适合用于制作大型、超大型重载机械设备的滑动轴承轴瓦, 如用在大型水电站的水轮发电机上等。EMP 复合材料作为轴瓦材料在油润滑条件下长期使用时会产生磨损, 磨损必将影响机械设备的寿命。目前, 尽管对构成 EMP 表层材料的 PTFE 及 PTFE 复合材料的摩擦磨损特性已进行了大量的研究^[2-7], 但由于 EMP 复合材料的特殊结构与制造工艺, 对其许多性能的研究目前仍处于探索阶段, 国内外对其摩擦学特性的研究亦很少。本文作者以在某水电站发电机组上使用的由纯 PTFE 构成表层的 EMP 复合材料轴瓦为研究对象, 考察其在油润滑条件下与钢对摩时的摩擦磨损特性, 以期为这类材料的应用提供实验依据。

1 实验部分

在 M PX-2000 型盘销式摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损试验, 采用盘-环摩擦副, EMP 复合材料从某水力发电机组使用的推力轴瓦上取得, 其表层是厚度约为 1 mm 的纯 PTFE, 中间弹性层青铜丝厚约为

8 mm, 整体材料平均硬度为 48HBS, 弹性压缩模量为 2.251 MPa (试验载荷小于 6.120 N 时)^[8], 将其加工成直径 32 mm 的试盘, 与尺寸为 $\phi 2 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的钢胶接后作为下试样。试样表面于磨削时采用强风冷却, 表面粗糙度 $R_a < 1.50 \mu\text{m}$ 。试环材料为 40# 锻钢, 硬度为 248HBS, 弹性模量 180 GPa, 表面平均粗糙度 R_a 约为 $0.48 \mu\text{m}$, 尺寸 $\phi 4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

采用 L-TSA 32 透平油作为润滑油, 其运动粘度为 $34.8 \text{ mm}^2/\text{s}$ (使用 GB/T 265 标准测定)^[9], 油池体积约 180 cm^3 , 试验时将上、下试样全部浸入油池中, 为了保证油池液位不变, 试验过程中不断添加新油。试验条件为: 滑动速度 0.66~5.24 m/s, 载荷 500~2000 N, 试验时间 10~25 min。在试验达到平稳状态后读取摩擦系数。在摩擦磨损试验结束 24 h 后, 通过测定 EMP 材料表面刻痕的长度来确定其磨损量; 用扫描电子显微镜(SEM)观察试样磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 摩擦特性

图(1和2)分别给出了 EMP 复合材料与钢对摩时的滑动摩擦系数随载荷和滑动速度的变化关系。

基金项目: 电力部电力行业青年科技促进费项目(Q9607); 交通部博士点基金项目(9743032)。

收稿日期: 2001-02-16; 修回日期: 2001-05-20/联系人赵新泽, e-mail: xzzhao@263.net

作者简介: 赵新泽, 男, 1964年生, 博士, 副教授, 主要从事材料的摩擦磨损和油液分析技术的研究。



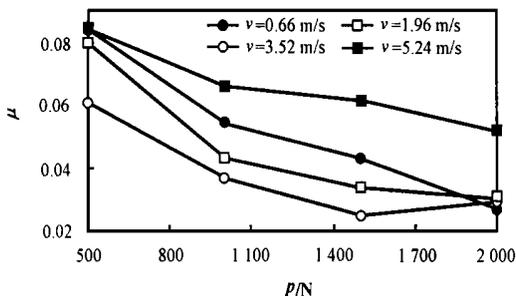


Fig 1 Variation in the friction coefficient with specific pressure at various velocities

图 1 不同滑动速度下摩擦系数随载荷变化的关系曲线

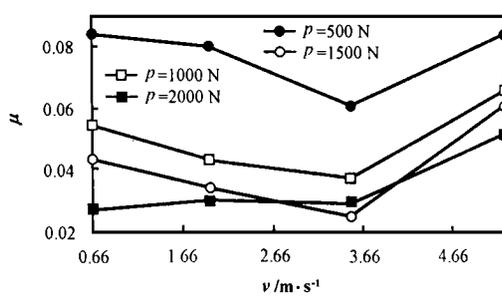


Fig 2 Variation in the friction coefficient with velocity at various specific pressure

图 2 不同载荷下摩擦系数随速度变化的关系曲线

从图 1 可见: 当滑动速度为 5.24 m/s 时, 摩擦系数随载荷增大而缓慢减小; 在其它滑动速度条件下, 随着载荷的升高, 摩擦系数快速减小, 最后稳定在 0.030 左右, 小于 PTFE 材料与钢在滑动干摩擦条件下对摩时的摩擦系数^[10]。从图 2 可见: 4 种载荷下摩擦系数随滑动速度增大而减小, 当速度达到 5.24 m/s 时则迅速增大至 0.050 以上; 当滑动速度小于 4 m/s 时, 除 500 N 载荷以外, 其它载荷下滑动摩擦系数位于 0.022~0.045 之间; 当载荷为 500 N 时, 不同滑动速度下的摩擦系数与其它载荷下的相比略高。总体而言, 在低载荷下, EM P 复合材料与钢在油润滑条件下

的滑动摩擦系数较高, 在高速滑动时也如此; 从降低摩擦系数角度而言, 其滑动速度存在临界值。在临界速度以下, 载荷对摩擦系数的影响大于速度的影响; 而当滑动速度超过临界速度时, 速度对摩擦系数的影响大于载荷的影响。在本文试验条件下, 该临界速度处于 3.52~5.24 m/s 之间。

2.2 磨损性能

按正交试验方法选取摩擦磨损试验条件, 采用单位滑动行程内的表面垂直磨损位移 h (相对磨损率) 来评定 EM P 复合材料的耐磨性能。图 (3 和 4) 分别示出了不同滑动速度和载荷下 EM P 复合材料的磨

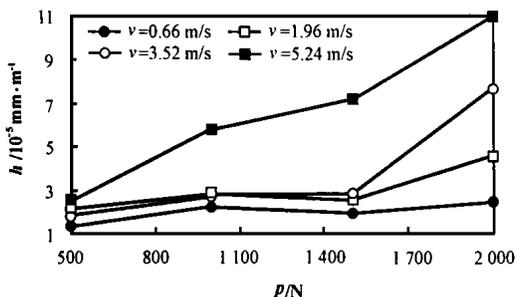


Fig 3 Variation in wear rate of EM P with specific pressure at various velocities

图 3 不同滑动速度下 EM P 的磨损率与载荷的关系曲线

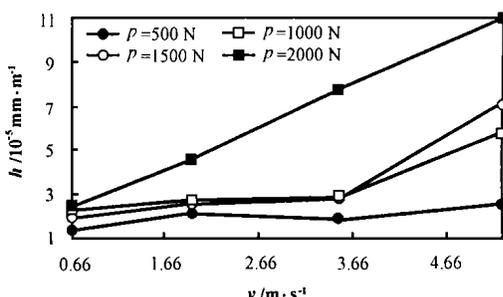


Fig 4 Variation in wear rate of EM P with velocity at various specific pressure

图 4 不同载荷下 EM P 的磨损率与滑动速度的关系曲线

损率。从图 3 可见: 在相同滑动速度下, 磨损率首先随着载荷的升高而增大, 当载荷上升到约 1000 N 后, 磨损率稳定在某一水平 (保持或基本保持不变), 在此稳定阶段, 除滑动速度为 5.24 m/s 时的磨损率处于 $(6.5 \sim 7.0) \times 10^{-5} \text{ mm/m}$ 之间外, 其它速度下的磨损率处于 $(1.8 \sim 3.2) \times 10^{-5} \text{ mm/m}$ 范围内; 当载荷达到 1515~1660 N 后, 磨损率随载荷的升高而快速增大。以上结果表明, 当滑动速度小于 3.52 m/s 时, 载荷对磨损率的影响存在一个转折点, 当载荷小于此值时磨损率较低, 反之则磨损率高, 该载荷转折

点处于 1515~1660 N 范围内。从图 4 可以看出: 在相同载荷 (除载荷为 500 N 外) 下, 磨损率随速度的增加而增加; 在载荷分别为 1000 N 和 1500 N 时磨损率随速度变化发生转折, 当滑动速度大于 3.52 m/s 时磨损率随速度快速增加, 同时这 2 种载荷下的磨损率具有相似的变化趋势, 且数值接近; 当载荷为 2000 N 时, 磨损率随速度直线上升。图 5 所示为 EM P 复合材料与钢对摩时的等磨损率, 结合上述试验结果可以看出, 当载荷小于 1515 N 而滑动速度小于 3.50 m/s 时, EM P 复合材料的磨损率较低。

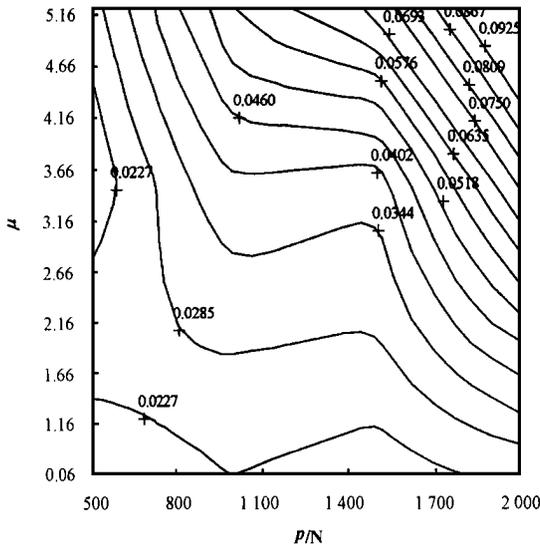


Fig 5 Isogram of wear rate for EM P-steel

图 5 EM P 与钢对摩时的等磨损率图

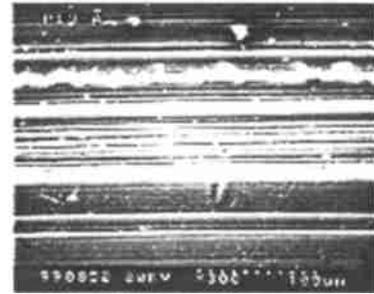
2.3 磨损表面形貌 SEM 分析

图 6 给出了不同试验条件下部分 EM P 复合材料试样磨损表面形貌 SEM 照片。可见：在滑动速度为 0.66 m/s 而载荷为 1000 N 条件下，EM P 磨损表面沟槽有两种形式，一种槽边整齐，无材料迁移痕迹，另一种槽边存在明显的材料迁移迹象，前者主要是由于挤压变形产生，后者为微切削。这种情况下 EM P 表层材料转移较少，磨损量相对较小[图 6(a)]。

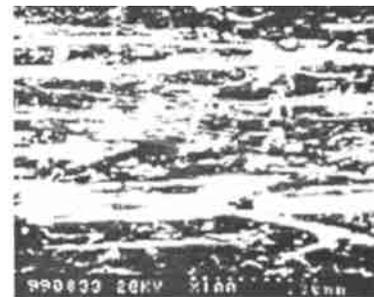
从图 6(b) 可以看出，EM P 复合材料磨损表面沟槽周围分布有大量不规则细小纤维状磨屑(载荷为 1500 N ，滑动速度 1.96 m/s)，这是 EM P 表层材料在摩擦过程中发生大分子链拔出和向表面转移的结果。在载荷为 2000 N 而滑动速度为 3.52 m/s 的条件下，EM P 磨损表面有明显的沟槽，从沟槽内转移出大的磨屑，同时存在明显的挤压受力痕迹[如图 6(c) 所示]。与图 6(a) 所示的运行状态相比，在这两种运行状态下的材料转移较为剧烈，故相应的磨损量较大，这与图(3 和 4) 的试验结果相一致。

当滑动速度 5.24 m/s ，载荷 2000 N 时，试验观察到此时油池出现持续“开锅”现象，测得摩擦表面温度为 199°C ；增加润滑油量时，油温保持稳定，说明此时润滑油膜已破坏，材料损失严重，因而磨损率较高。同时，由于摩擦高温产生的 EM P 表面熔融导致摩擦副真实接触面积增大，EM P 表层 PTFE 与钢的粘着倾向增强，而运动阻力主要是粘性液态 PTFE 的剪切力，因此摩擦阻力较大。

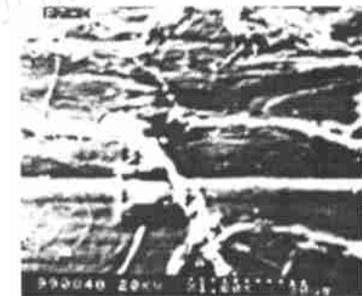
图 7 示出了与 EM P 材料对摩的钢试样磨损表



(a) Micro-cutting and extruding in EM P surface
($v = 0.66 \text{ m/s}$, $p = 1000 \text{ N}$)



(b) Extraction of fibre bunches in EM P surface
($v = 1.96 \text{ m/s}$, $p = 1500 \text{ N}$)



(c) Ploughing in EM P surface
($v = 3.52 \text{ m/s}$, $p = 2000 \text{ N}$)

Fig 6 SEM images of worn surface for EM P under different test condition

图 6 不同试验条件下 EM P 磨损表面形貌 SEM 照片

面形貌 SEM 照片($v = 3.52 \text{ m/s}$, $p = 1500 \text{ N}$)。可以看出，其表面粘附有一层不连续分布的白色 PTFE 转移膜，且转移膜的分布有一定的方向性。在其它试验中也观察到了类似现象。在摩擦过程中，EM P 表层材料向偶件表面转移并形成转移膜，从而使 EM P 表层材料与钢的摩擦转变为 EM P 表层材料(或部分表层材料)与转移膜之间的摩擦，导致摩擦系数减小。

3 结论

a 在油润滑条件下，EM P 复合材料与钢对摩时的摩擦系数在低载荷下较高，随着载荷升高而降低，当滑动速度小于 3.52 m/s 时，摩擦系数稳定在 0.030 左右，这是由于 EM P 复合材料表层的 PTFE

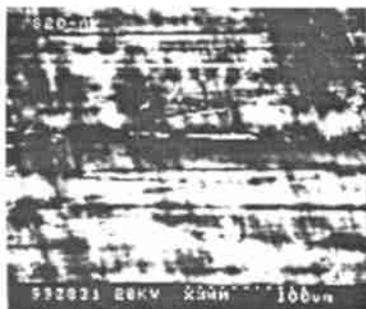


Fig 7 Worn surface of steel

图7 钢试样磨损表面形貌 SEM 照片

向偶件表面转移并形成转移膜所致。当滑动速度为 5.24 m/s 时, 摩擦系数较高, 这是由于高速产生的摩擦热而使表层 PTFE 材料熔融所致。

b EM P 复合材料的磨损率随滑动速度和载荷的升高而增加, 但在不同试验条件下增加的速度不同。当载荷小于 1.515 N 而滑动速度小于 3.50 m/s 时, EM P 复合材料的磨损率较低。

c 在试验基础上所建立的 EM P 材料与钢对摩时的等磨损率图, 对于 EM P 复合材料的摩擦学性能研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 徐华, 吕长春, 朱均. 复合材料轴瓦的力学性能研究[J]. 西安交通大学学报, 1999(6): 14-21.
- [2] Stejie R P. The Sliding Surface of Polytetrafluoroethylene-A n Investigation w ith The Electron M icroscope[J]. Wear, 1968, 12: 193-212.
- [3] 李同生, 孙守镁, 胡廷永, 等. 聚四氟乙烯磨损机理的探讨[J]. 摩擦学学报, 1992(7): 222-232.
- [4] Blanchet T A, Kennedy T E. Sliding Wear Mechanism of Polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE Composites[J]. Wear, 1992, 153: 229-243.
- [5] 佟金, 任露泉, 陈永潭, 等. 聚四氟乙烯和超高分子量聚乙烯的磨粒磨损性能与机理研究[J]. 摩擦学学报, 1994(1): 65-72.
- [6] 张招柱, 薛群基, 刘维民, 等. 几种金属氧化物填充聚四氟乙烯复合材料在干摩擦条件下的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 1997(1): 45-52.
- [7] 阎逢元, 李飞, 刘维民, 等. 铜包石墨填充 PTFE 基复合材料摩擦学特性的研究. 摩擦学学报[J], 1999(1): 7-11.
- [8] 赵新泽. 弹性金属塑料复合材料轴瓦的摩擦学特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学动力与环境工程学院, 2000.
- [9] 中国石油化工总公司编. 石油及石油化工产品标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 1998: 256-257.
- [10] 王承鹤. 塑料摩擦学——塑料的摩擦、磨损、润滑理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994: 114-151.

Study on the Tribological Properties of Elastic-Metallic-Plastic Composite under Oil Lubrication Condition

ZHAO Xin-ze¹, XIAO Han-liang², GAO Hon-liang¹, YAN Xin-ping²

¹ Mechanical & Material College, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

² Reliability Engineering Institute, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The tribological properties of elastic-metallic-plastic (EM P) composite rubbing against steel under oil lubrication were investigated on a pin-on disc friction and wear test rig, and their worn surfaces were examined with a scanning electron microscope. It has been found that the friction coefficients are relatively high at low load and decrease with the increase of load, then stabilize around 0.03 at a sliding speed below 3.52 m/s . The wear rate of EM P increases with the increase of velocity and load at a different pace under various test conditions. By analyzing the isogram of wear rate for EM P-steel pair, it was found that a lower wear rate of EM P was registered at a load below 1.515 N and a sliding speed below 3.50 m/s . Observation of the worn surfaces of both the EM P composites and the counterpart steel by scanning electron microscope indicates that the wear of the EM P composites is characterized by micro-cutting, extruding deformation and ploughing at a sliding speed below 3.52 m/s , and a transfer film is formed on the counterpart steel surface. The wear of the EM P composites at a sliding speed 5.24 m/s is characterized by surface softening and melting.

Key words: elastic-metallic-plastic (EM P) composite; friction and wear behavior; wear mechanism