

载荷对 Sn-Al₂O₃/STS 摩擦学性能影响研究

熊邦英¹ 陈阳¹ 林海波¹ 通讯作者 杨慷² 通讯作者

(1 四川轻化工大学机械工程学院 四川 自贡 423000; 2 安阳工学院机械工程学院 河南 安阳 233000)

摘要: 本研究利用 Sn 与 Al₂O₃ 构建 Sn-Al₂O₃ 复合润滑剂并在钨钢表面成功制备鱼鳞状微凹槽表面织构 (STS)。随后将 Sn-Al₂O₃ 熔渗至织构中, 并研究载荷对其影响。经测试, 在 10N 和 15N 时, 试样获得最大的摩擦系数和磨损率, 分别约为 0.33 与 $3.12 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。在 20N 时, 获得了最小的摩擦系数和磨损率, 分别约为 0.13 与 $1.21 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。分析可知, 摩擦学性能改善的原因为 20N 工况下的磨痕较为光滑, 固体润滑剂 Sn-Al₂O₃ 挤出迁移到摩擦表面并沿着滑动方向形成润滑膜, 从而降低磨损系数和磨损率。

关键词: Sn-Al₂O₃; 表面织构; 摩擦学性能

0 引言

钨钢材料具有高硬度、高强度、良好的耐腐蚀和耐磨性^[1], 因此被广泛应用于机械、汽车、国防和航天等领域的关键零部件^[2], 钨钢的摩擦磨损性能在汽车、航天和国防的关键部件方面产生直接影响, 尤其影响设备的使用精度和服役寿命。因此, 改善钨钢的摩擦学性能对提高机械、汽车、国防和航天等领域设备的可靠性具有非凡的意义。

本文通过激光打标技术在钨钢表面制作鱼鳞状微凹槽结构, 并采用高温熔渗技术在微结构中熔渗 Sn-Al₂O₃ 复合润滑剂, 利用摩擦磨损试验机测试载荷对 Sn-Al₂O₃/STS 摩擦学性能的影响。通过场发射扫描电镜 (FESEM) 对样品的微观形貌进行分析。基于此, 研究 Sn-Al₂O₃/STS 在摩擦过程中分析摩擦磨损机理, 并揭示 Sn-Al₂O₃ 的润滑性能。本文对 Sn-Al₂O₃/STS 摩擦磨损性能的研究成果对一定载荷范围内的工业应用具有一定的参考价值。

1 试验

1.1 材料制备

为制备 Sn-Al₂O₃/STS 试样, 本文使用台式高速振动混料机 (MSK-SFM-3) 对高纯 Sn 粉和 Al₂O₃ (质量分数比为 98 : 2) 振动混料, 振动时间 30min。市售钨钢 (东莞市长安明尚金属材料商行提供) 主要成分采用 EDS 进行 3 次测量, 取其平均值, 即主要元素为 73.93%W、11.38%C、3.93%O、7.09%Co、0.14%Mo、0.3%Cr、0.23%Fe、0.34%Ni。

采用型号 CT-MF30 激光打标加工设备在钨钢 (TS) 表面制备槽宽和槽深为 0.6mm, 且具有 90° 角度参数的鱼鳞状微凹槽织构 (STS)。将混合均匀的 Sn-Al₂O₃ 固

体润滑剂与 STS 装入直径为 30mm 的石墨模具中, 借助人工智能箱式电阻炉对固体润滑剂进行熔渗处理, 熔渗温度 300℃, 熔渗压力约为 0.14MPa。保温 2h 后停止加热, 对炉腔进行降温处理, 样品随炉冷却, 取出样品。

1.2 试验方法

1.2.1 硬度和密度测试

在硬度测试之前, 采用 MPJ-23 型金相试样磨平机对试样进行表面磨平抛光处理, 保证试验面平坦光滑, 尽量避免有氧化物及外来污物。采用 HV-1000A 型维氏硬度测量仪对处理好的各个试样进行硬度测试。载荷 300gf (2.92N), 加载时间 13s。对每个试样进行 10 次测量, 取其平均值约为 1203HV。

密度测试通过 FA232J 型精密电子天平对表面处理好的试样进行实际密度测量, 测试液体为无水乙醇。其中, 对每个试样进行 3 次测量, 取其平均值约为 11.3g/cm³。

1.2.2 摩擦学性能测试

在室温条件下, 利用球盘式摩擦磨损试验机对 Sn-Al₂O₃/STS 进行摩擦磨损性能测试。在不同载荷 (10 ~ 30N) 和滑动频率 (2Hz) 下, 进行往复摩擦磨损测试 40min。对磨球为 3.00mm 的 Si₃N₄ 球, 摩擦系数被专业测试软件实时测量并自动记录。采用 D/MAX-RB 型 3D 表面形貌仪测量出试样磨痕的宽度和深度, 随后根据公式 (1) 计算磨损体积并带入公式 (2), 得出试样磨损率^[3]。

试样磨损率的结果通过公式 (1) 和公式 (2) 计算得到, 公式 (1) 和公式 (2) 如下:

$$\Delta V = A b' \quad (1)$$

$$W = \frac{\Delta V}{FL} = \frac{\Delta V}{F b f t} \quad (2)$$

式中: f — 往复频率 (Hz);

b — 往复行程 (m);
 b' — 磨痕长度 (m);
 t — 摩擦时间 (s);
 L — 时间 t 内的摩擦路程 (m);
 A — 磨痕的横截面积 (m^2);
 W — 磨损率 ($\text{m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$);
 ΔV — 磨损体积 (mm^3);
 F — 载荷 (N)。

2 结果与讨论

2.1 摩擦磨损性能

图1所示为不同载荷下 Sn-Al₂O₃/STS 的平均摩擦系数和磨损率。当滑动频率为 2Hz, 往复行程为 3mm, 测试时间为 60min, 对磨球为 Si₃N₄ 球时, 不同的载荷对 Sn-Al₂O₃/STS 的摩擦系数有着显著影响。载荷为 20N 时, 其摩擦系数和磨损率最低且分别为 0.13 和 $1.21 \times 10^{-13} \text{m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。摩擦磨损测试结果表明, 在 20N 载荷下, Sn-Al₂O₃/STS 拥有最优摩擦学性能, 与之相比, 当载荷增加到 30N 时, 试样的磨损率上升了约 1.7 倍。

2.2 磨损机理分析

图2所示为 10N、15N、20N 和 30N 载荷下 Sn-Al₂O₃/STS 的磨痕形貌图。图2(a)展示 10N 载荷下样品的磨痕形貌。当载荷为 10N 时, 样品的磨痕表面较为光滑, 观察到少量磨屑和犁痕; 同时, 磨痕表面也出现表面剥落以及轻微的塑性变形, 这说明在 10N 载荷下, 样品主要的磨损机制是磨粒磨损和疲劳磨损。

图2(b)展示了 15N 载荷下样品的磨痕形貌。载荷上升到 15N, 在样品的磨痕表面观察到严重裂纹以及

表面剥落, 这说明在 15N 载荷下, 样品的主要磨损机制变为疲劳磨损。载荷增大使样品表面的循环应力上升, 导致磨痕表面材料发生塑性变形, 随着摩擦时间延长, 塑性变形的表面材料在较高循环应力的作用下发生开裂, 形成裂纹并导致剥落, 最终使疲劳磨损成为材料主要的磨损机制。

在载荷为 20N 时, 如图2(c)所示, 在样品磨痕表面部分区域观察到一层膜状物质沿着滑动方向铺展开, 并且膜的表面也存在表面剥落。相比于图2(b)的磨痕形貌, 20N 载荷下的磨痕较为光滑。这是由于随着载荷的上升, 摩擦表面产生的应力相应提高, 样品织构边缘的材料在较高应力的作用下变形量增大, 储存在织构中固体润滑剂 Sn-Al₂O₃ 被挤出迁移到摩擦表面并沿着滑动方向铺展形成润滑膜; 同时, 在摩擦过程中, 润滑膜的表面在循环应力的作用下也会发生部分剥落。因此, 固体润滑剂和金属氧化物共同构成的润滑膜为复合材料提供出色的润滑能力, 使 Sn-Al₂O₃/STS 在 20N 载荷下拥有出色的摩擦磨损性能。

图2(d)为 30N 载荷下 Sn-Al₂O₃/STS 的磨痕形貌。如图所示, 随着载荷增加到 30N, 磨痕表面观察到孤岛状物质, 其周围存在大量表面剥落形成的凹坑, 这说明在 30N 的载荷下, 疲劳磨损仍是 Sn-Al₂O₃/STS 的主要磨损机制。随着载荷上升到 30N, 储存在织构中的固体润滑剂迁移到 Sn-Al₂O₃/STS 的磨痕表面, 并在摩擦表面富集; 但载荷增加导致摩擦表面产生的循环应力相应提高, 富集的固体润滑剂在高循环应力作用下被大面积剥落, 未剥落的少量 Sn-Al₂O₃ 在磨痕表面形成孤岛状物质; 同时, 在 30N 载荷下, 失去润滑剂保护的试样表面发生严重的疲劳剥落, 并形成凹坑。

上述研究结果表明, 载荷上升导致摩擦表面产生的循环应力相应提高。在 20N 载荷下, 织构边缘的材料在应力作用下产生较大的变形, 导致固体润滑剂被挤出织构, 迁移并富集于摩擦表面; 摩擦表面富集的固体润滑剂在循环应力作用下发生塑性变形并逐渐铺展成膜。在 30N 的载荷下, 虽然固体润滑剂迁移到摩擦表面, 但是增大载荷导致高的循环应力使摩擦表面的润滑剂被剥落, 无法为样品提供有效的润滑与保护作用。因此, 随着载荷从 20N 上升至 30N, 样品的磨损率增加了约 1.7 倍, 材料的抗磨性能明显下降。

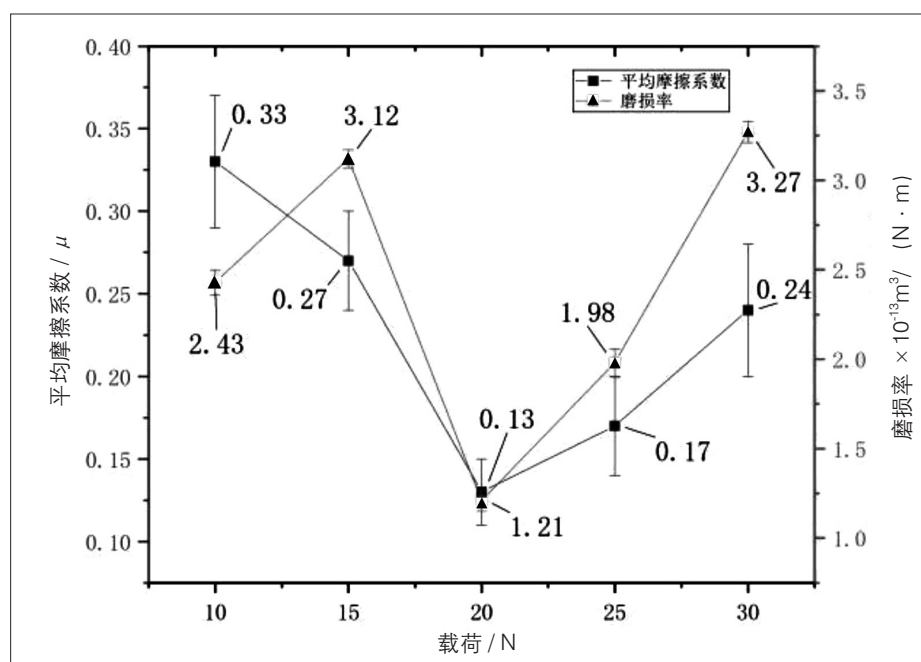


图1 不同载荷下 Sn-Al₂O₃/STS 的平均摩擦系数和磨损率

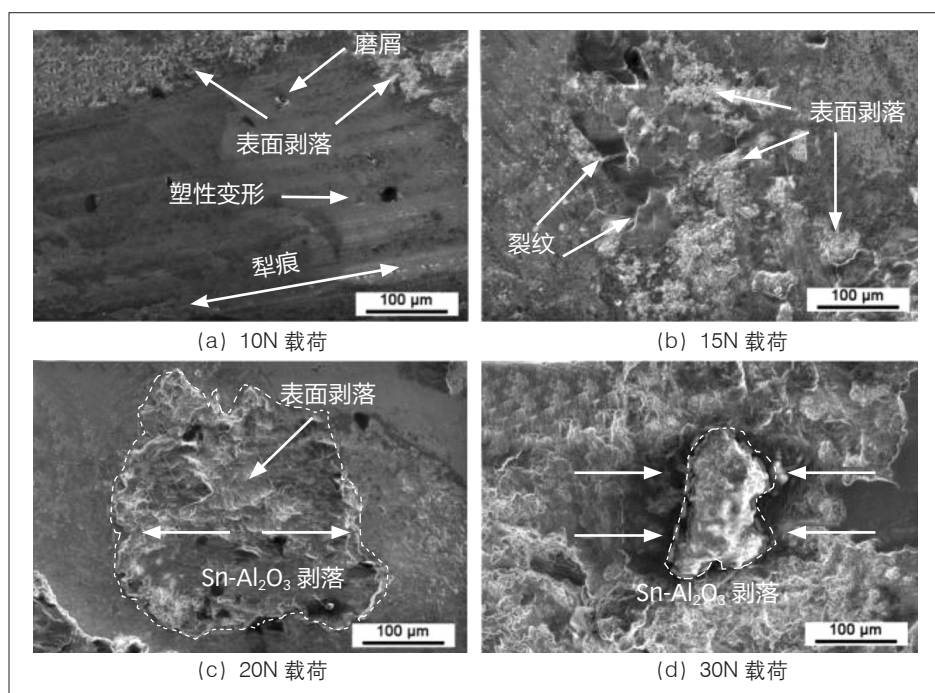


图2 不同载荷下 Sn-Al₂O₃/STS 的磨痕形貌

3 结语

本文研究了载荷对 Sn-Al₂O₃/STS 摩擦学性能的影响, 获得如下结论:

(1) Sn-Al₂O₃/STS 自润滑材料的摩擦学性能受工况条件影响较大。在载荷为 20N 时出现最小的摩擦系数 0.13; 磨损率则随着载荷增大呈现出先增大后减小, 随后呈现快速上升的趋势, 在 15N 时试样表现出较大的磨损率, 为 $3.12 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$; 随着载荷上升至 20N, 磨损率降低 41.2%, 达到最小值 $1.21 \times 10^{-13} \text{ m}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(2) 20N 载荷下的磨痕较为光滑, 这是由于 Sn-Al₂O₃/STS 织构边缘发生了塑性变形, 并将固体润滑剂 Sn-Al₂O₃ 挤出迁移到摩擦表面并沿着滑动方向形成润滑膜; 同时, 润滑膜在摩擦过程中也会发生部分脱落。

基金项目: 中国博士后科学基金 (2019M442282);

河南省科技厅科技攻关项目 (212102210111, 212102210223); 河南省青年教师重点培训项目 (2021GGJS129)。

参考文献:

- [1]MANDAL P, EHIASARIAN A P, HOVSEPIAN P. Tribological behaviour of Mo-W doped carbon-based coating at ambient condition[J]. Tribology International, 2015(90):135-147.
- [2] CZYZNIEWSKI A. The effect of air humidity on tribological behaviours of W-C:H coatings with different tungsten contents sliding against bearing steel[J].

Wear, 2012 (294): 327-337.

- [3]QIU Z K, ZHANG P Z, WEI D B, et al. A study on tribological behavior of double-glow plasma surface alloying W-Mo coating on gear steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2013(278):92-98.

作者简介: 熊邦英 (1995.03-), 男, 汉族, 湖北荆州人, 硕士研究生在读, 研究方向: 摩擦界面结构优化设计与纳米润滑剂; 陈阳 (1996.12-), 男, 汉族, 四川德阳人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 摩擦界面结构优化设计与纳米润滑剂。

通讯作者: 林海波 (1975.01-), 男, 汉族, 四川自贡人, 硕士研究生, 教授, 研究方向: 态化技术、环保设备、压力容器安全技术; 杨慷 (1984.05-), 男, 汉族, 河南驻马店人, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 微纳米结构制备与表面润滑。