

基于阳极氧化和脂润滑协同的 齿轮表面抗磨改性方法

熊伟^{1,2}, 朱文浩^{1,2}, 马亚军^{1,2}, 陈鹏^{1,2}, 徐佳佳^{1,2},
李梦雪^{1,2}, 要晋宇^{1,2}

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076; 2. 控制执行机构技术创新中心, 北京 100076)

摘要: 针对航空用高精度磁传感编码器齿轮系统在剧烈振动与高低温交变工况下的摩擦磨损问题, 提出阳极氧化协同脂润滑的表面改性方法; 通过建立齿轮啮合等效销盘模型, 对 7055 铝合金基体及 10~20 μm 阳极氧化膜在干摩擦/脂润滑条件下的摩擦学行为进行了研究; 采用 MFT-5000 摩擦磨损试验机模拟等效接触载荷 100 N、转速 59 rpm 的极端工况, 结合白光干涉三维形貌分析和质量损失定量表征; 结果表明: 干摩擦条件下, 20 μm 氧化膜试件较基体质量损失降低 96%; 脂润滑工况下, 其磨损深度降幅达 56%; 微观形貌显示氧化膜厚度增加可有效抑制磨粒磨损向黏着磨损的转变机制; 验证了氧化膜厚度与润滑协同效应对铝合金齿轮摩擦学性能的调控规律, 为航空航天精密传动系统表面改性提供了理论依据。

关键词: 7055 铝合金齿轮; 脂润滑; 销盘摩擦; 干摩擦; 阳极氧化膜

Anti-wear Surface Modification Method for Gears Based on Synergistic Anodic Oxidation and Grease Lubrication

XIONG Wei^{1,2}, ZHU Wenhao^{1,2}, MA Yajun^{1,2}, CHENG Peng^{1,2},
XU Jiajia^{1,2}, LI Mengxue^{1,2}, YAO Jinyu^{1,2}

(1. Beijing Institute of Precise Mechanical and Electronic Control Equipment, Beijing 100076, China;

2. Innovation Center for Control Actuators, Beijing 100076, China)

Abstract: To address the friction and wear issues of high-precision magnetic sensing encoder gear systems in aerospace applications under severe vibration and alternating high-low temperature conditions, this study proposes a surface modification method combining anodic oxidation with grease lubrication. By establishing an equivalent pin-on-disc model of gear meshing, the tribological behaviors of 7055 aluminum alloy substrates and 10~20 μm anodized films under dry friction/grease-lubricated conditions were systematically investigated. Experiments were conducted using an MFT-5000 tribometer to simulate extreme working conditions with an equivalent contact load of 100 N and a rotational speed of 59 rpm, complemented by white light interferometry three-dimensional topography analysis and quantitative characterization of mass loss. Results demonstrate that under dry friction, the 20 μm anodized specimen exhibited a 96% reduction in mass loss compared to the untreated substrate. In grease-lubricated conditions, its wear depth decreased by 56%. Microscopic morphology analysis revealed that increased oxide film thickness effectively inhibits the transition from abrasive to adhesive wear mechanisms. The experimental results have validated that the synergistic effect of oxide film thickness and lubrication significantly enhances the tribological performance of aluminum alloy gears, providing a theoretical basis for surface modification of aerospace precision transmission systems.

Keywords: 7055 aluminum alloy gear; grease lubrication; pin-disc friction; dry friction; anodized film

收稿日期:2024-12-31; 修回日期:2025-03-14。

作者简介:熊伟(1982-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:熊伟,朱文浩,马亚军,等. 基于阳极氧化和脂润滑协同的齿轮表面抗磨改性方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 34(4): 247-254.

0 引言

航空用高精度多圈式磁传感编码器设计中, 为保证系统测量精度, 齿轮传动系需满足足够的回差精度要求。7 系铝合金从高强、低韧到高强、高韧再到强韧且耐腐蚀持续不断发展。结合其密度低轻质且强度高的特点, 在航空航天如战机和客机以及火箭导弹等应用广泛^[1-2]。在开发设计小模数齿轮编码器的过程中, 为满足航空航天对于重量的严苛要求, 以及保证足够的传动稳定性, 采用铝材中的高强、高韧、耐腐蚀的 7055 铝合金来设计制造齿轮传动系统和基座以及壳体部分。^[3] 7055 铝合金是一种常用的航空铝合金, 是在原有的成熟的 7 系铝合金的体系里试验加入新的 Zn、Mg、Cu 等合金元素并进行一系列新的时效固溶热处理而广泛应用的一种品质高的铝合金^[4-5]。7055 铝合金的强度比 7075-T6 约高 25%, 比 7075-T76 约高 40%, 且能显著减轻结构的质量, 可用于抗压强度高、耐腐蚀性能良好的各种场合。但是干摩擦条件下, 7055 铝合金会有一定锈蚀现象发生^[6-7]。

磨损行为发生在相互触碰的一对安装好的部件或零件之间, 且它们之间有相对位移或转动, 例如齿轮啮合传动时的磨损及销盘之间在压力下的相对运动所产生的摩擦磨损。磨损的负面影响在于使零部件在预期寿命之前或未达疲劳极限时发生材料的过量消耗, 以至于发生结构的失效, 且使机械在在正常运转时消耗了更多的能量。对于表面破坏机理特征在磨损方面来说, 除了发生在特定环境下的腐蚀磨损和微动磨损, 较常见的是磨损初期的磨粒磨损和中期的黏着磨损以及后期的表面的疲劳磨损^[8-9]。磨粒磨损的突出特征在于工作表面和坚硬颗粒或带凸起坚硬颗粒的表面发生了压力下的相对运动, 例如坚硬且粗糙的工作表面紧贴组织者材质较软工作表面压力下滑动的二体磨损以及脱落下来的高硬微粒在两个互相接触的工作表面间被迫滑动而产生的三体磨损^[7]。

近年研究表明, 氧化膜与脂润滑的协同作用可突破单一技术的性能瓶颈。如, 直径 15~25 μm 的氧化膜表面微孔通过储油效应提升润滑膜覆盖率至 85% 以上^[8], 同时弹性模量可达 380 GPa 的硬质 Al_2O_3 层能够分散接触应力, 抑制疲劳裂纹萌生^[9]。然而, 现有研究多聚焦于平板试样, 缺乏对齿轮啮合多轴应力状态的等效模拟; 此外, 氧化膜临界厚度与微孔参数的优化匹配机制尚不明确。

本研究以航空编码器齿轮系统为对象, 提出“阳极氧化+脂润滑”协同的表面改性方法, 通过建立齿轮啮合等效销盘模型 (见图 1), 系统研究 7055 铝合金在不同氧化膜厚度 (10/15/20 μm) 与润滑条件下的摩擦学

行为, 结合白光干涉三维形貌分析与磨损率定量表征, 验证了阳极氧化协同脂润滑方法的可行性和氧化膜厚度—润滑协同效应对界面损伤的调控规律, 为高精度铝合金齿轮设计提供理论支撑。

1 齿轮啮合等效方法

基于赫兹接触理论^[10], 建立渐开线齿轮啮合等效销盘模型, 如图 1 所示。关键参数推导如下:

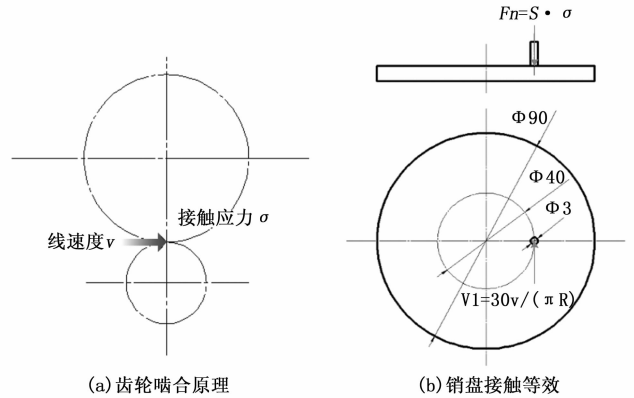


图 1 齿轮等效销盘接触示意图

齿轮啮合时的最大滑动率时啮合点正应力 σ 如公式 (1) 所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{F_n \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}{\pi L \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (1)$$

式中, F_n 为接触点正压力, ρ_1 和 ρ_2 分别为接触点两齿轮齿廓曲率半径, E_1 和 E_2 分别两齿轮材料的杨氏模量, μ_1 和 μ_2 分别为两齿轮材料的泊松比, L 为齿宽。

销盘间相互正压力 $F_n = \kappa \sigma \pi r_p^2$, r_p 为圆柱销半径, κ 为经验公式系数; 齿轮 1 分度圆半径 $r_{c1} = Z_1 m/2$, 齿轮 1 分度圆半径 $r_{c2} = Z_2 m/2$, Z_i 为对应齿轮齿数, m 为齿轮模数; 基圆半径 $r_{b1} = R_1 \cos(\alpha)$, R_1 为齿轮 1 曲率半径, α 为压力角; 齿轮 1 齿顶圆半径 $r_{t1} = r_{c1} + m h_a$, h_a 取值为 1; 齿轮 2 齿顶圆半径 $r_{t2} = r_{c2} + m h_a$; 齿轮 1 顶圆压力角 $\alpha_{t1} = \arccos(r_{b1}/r_{t1})$, 齿轮 2 顶圆压力角 $\alpha_{t2} = \arccos(r_{b2}/r_{t2})$ 。

则齿轮 1 啮合时根部最大滑动率 M_{s1} :

$$M_{s1} = \frac{\{(Z_1 + Z_2)[\tan(\alpha_{t2}) - \tan(\alpha)]\}}{[(Z_1 + Z_2)\tan(\alpha) - Z_2 \tan(\alpha_{t2})]} \quad (2)$$

式中, Z_1 和 Z_2 分别为齿轮 1 和齿轮 2 的齿数。齿轮 2 啮合时根部最大滑动率 M_{s2} :

$$M_{s2} = \frac{\{(Z_1 + Z_2)[\tan(\alpha_{t1}) - \tan(\alpha)]\}}{[(Z_1 + Z_2)\tan(\alpha) - Z_1 \tan(\alpha_{t1})]} \quad (3)$$

轴 1 旋转的总圈数 $c_{t1} = \omega_1 t / (2\pi)$, ω_1 为轴 1 的转动角速度, t 为寿命试验时间。

齿轮 1 齿轮齿廓长度 $L_1 = m(2.25 Z_1 - 0.5625)/$

($Z_1 \cos(\alpha)$), 齿轮 2 齿轮齿廓长度 $L_2 = m(2.25Z_2 - 0.5625)/(Z_2 \cos(\alpha))$;

齿轮 1 单个齿廓相对滑动的总路程 $c_{t1} L_1 M_{s1}$, 齿轮 2 单个齿廓相对滑动的总路程 $c_{t2} L_2 M_{s2}$ 。则圆盘转动圈数 p_1 :

$$p_1 = \frac{c_{t1} L_1 M_{s1}}{2\pi R}$$
 (4)

式中, s_{t1} 为齿轮 1 齿廓上不动点滑动总路程, R 为圆柱销与摩擦盘接触圆心与摩擦盘选择轴心的距离。转动圈数 p_2 :

$$p_2 = \frac{c_{t2} L_2 M_{s2}}{2\pi R}$$
 (5)

式中, s_2 为齿轮 2 齿廓上不动点滑动总路程。转速 r_{s1} :

$$r_{s1} = \frac{60v}{2\pi R}$$
 (6)

式中, v 为目标齿轮啮合点切向速度。转动时间 t_1 :

$$t_1 = \frac{c_{t1} L_1 M_{s1}}{2\pi R r_{s1}}$$
 (7)

根据以上公式, 计算出系列传动齿轮对于的销盘参数。根据实验具体情况, 直径五毫米的圆柱销与摩擦圆盘对磨只有约一半接触表面参与实际摩擦, 因此取中间工况确定折算系数来模拟齿轮最严重的工况, 进行试验以验证设计可靠性。

2 销盘滑动摩擦试验

2.1 试验参数

编码器减速器的给定工况为工作时间 70 h, 输入轴 8 000 rpm、加速度 28 000 rad/s² 的实测数据, 经过等效计算后, 确定的试验参数: 载荷 100 N、转速 59 rpm、持续时间 14 min, 接触半径 20 mm。该参数可等效模拟齿轮系统在极端工况下的累计磨损。

2.2 试验材料

基材为航空级 7055 铝合金 (成分: Zn 8.0%, Mg 2.3%, Cu 2.2%), 经 T76 时效处理。其中 7055 铝合金经过固溶处理、时效处理等工艺, 具有优良的综合性能。采用硬质阳极氧化工艺^[11]制备梯度氧化膜试样, 膜厚通过氧化时间控制 (10±1、15±1、20±1 μm), 表面粗糙度经 Talysurf CLI 2000 检测 (表 1)。

精密仪器专用润滑脂的制备基于多元复合型稠化剂在基础油相中的分散工艺, 并辅以功能性添加剂体系复合而成。该半固态润滑介质因组分比例与分子结构的差异呈现特性分化, 本研究所采用的高纯度白色润滑剂专为精密传动系统开发。关键质量指标中, 挥发性参数与抗热氧化性能直接关联着其工况适用性与贮存稳定性, 需着重考量。鉴于微型减速装置编码器需经历长期静置, 必须有效抑制润滑体系在热氧化分解反应中生成有机酸类腐蚀介质, 此类化学产物易引发金属构件晶间腐

蚀, 进而导致传动副表面钝化膜损伤, 最终引发材料性能退化与服役周期衰减。

表 1 试样表面参数

试样类型	Ra/μm	膜厚/μm	显微硬度/HV
基体	0.35±0.05	—	152±8
10 μm 氧化膜	1.12±0.12	10.2±0.5	1 346±120
15 μm 氧化膜	1.08±0.10	15.3±0.6	1 420±105
20 μm 氧化膜	1.05±0.08	19.8±0.7	1 485±98

2.3 试验设备

采用的 MFT-5000 摩擦磨损试验机如图 2 所示。实验系统关键参数的调控依托试验机 MCU 实现, 包括温度梯度、旋转速率以及法向载荷等变量。法向加载机构采用弹簧联动式夹具设计, 该装置通过柱销装夹结构与加载器形成弹性连接, 因此在动态测试过程中载荷值会呈现可接受范围内的微小波动。实验平台传动机构由电机驱动齿形带构成, 其通过精密切环控制实现夹具底座的角速度稳定输出。摩擦盘组件通过双定位销配合轴向锁紧螺钉实现与传动基座的刚性连接。力学测量系统方面, 悬臂梁集成的压电式力传感器实时获取摩擦力数值, 结合预设算法动态生成摩擦系数曲线, 实现接触界面的动态摩擦特性表征。

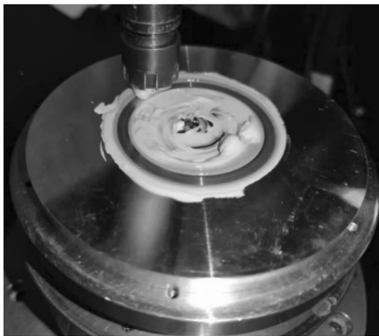


图 2 MFT-5000 摩擦磨损试验机

配置 φ5 mm Al₂O₃ 球头销 ($Ra=0.02 \mu m$) 与 φ 90 mm 试样盘构成摩擦副。试验环境为常温环境, 温度 25±2 ℃, 相对湿度 45±5%。脂润滑组采用航空级全氟聚醚润滑脂 (PFPE, 40 ℃粘度 280 mm²/s)^[12], 涂覆量 0.2 mg/mm²。

2.4 试验过程

实验预处理阶段采用无水乙醇对 7055 铝合金圆柱销及对磨盘试样实施超声清洗, 清洗时长严格控制在 600±5 s。试样经气刀辅助干燥后, 使用 FA1004 型高精度分析天平进行质量标定。试验平台搭建时, 通过定位销—轴向锁紧组件复合定位系统将摩擦盘固定于 MFT-5000 型试验机基座, 悬臂机构则搭载圆柱销夹持装置。通过 X—Y 向精密位移平台进行对心操作,

建立试样接触坐标系原点, 该基准点的数字化标定为后续位移控制提供空间参照。接触轨迹半径参数经伺服驱动齿形带系统实现亚微米级定位, 预紧力监控系统完成初始载荷校准后, 依次设定法向载荷梯度与旋转运动参数。

试验加载过程采用三阶段动态控制模式: 初始接触期、线性加载期、稳态摩擦期。重点关注第三阶段的摩擦学响应, 采用高采样率记录摩擦系数时域数据。后处理阶段复测质量损失, 结合 ContourGT-K 白光干涉仪和 VHX-6000 三维显微系统进行表面形貌学表征。

润滑介质选择特种精密润滑脂, 实验参数体系包含: 赫兹接触压力阈值 48 MPa、切线速度 59 rpm、持续周期 840 s、累计滑移距离 103.79 m。为控制数据离散度, 每个工况点进行 3 次平行试验, 环境温度维持在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

3 结果与讨论

3.1 质量损失分析

表 2 试验件干摩擦试验前后质量统计表

项目名称	磨损前 质量/g	磨损后 质量/g	质量 差/mg	比值 /‰
未镀膜盘	110.589 1	110.577	12.1	0.98
未镀膜盘+销	111.099 2	111.088 3	10.9	0.98
10 μm 氧化膜盘	110.945 9	110.918 2	27.7	2.50
10 μm 氧化膜盘+销	111.453 8	111.431 1	22.7	2.04
15 μm 氧化膜盘	110.877 9	110.874 7	3.2	0.29
15 μm 氧化膜盘+销	111.388 0	111.386 2	1.8	0.16
20 μm 氧化膜盘	110.713 2	110.712 6	0.6	0.05
20 μm 氧化膜盘+销	111.218 2	111.217 1	1.1	0.10

对摩擦试验数据进行质量统计处理发现: 在相同载荷及试验条件下, 10 μm 厚度阳极氧化膜圆盘试件的质量损失量为 27.7 mg, 而对磨副(圆盘-圆柱销)系统的总质量损失量仅为 22.7 mg。该差异表明存在圆盘向圆柱销的质量转移现象。经微观分析发现, 当 10 μm 阳极氧化膜层被完全磨穿后, 基体铝材直接暴露并引发铝-铝接触副的黏着磨损。进一步通过运动学分析可知, 圆柱销在相对运动过程中对圆盘产生类似刀具的切削作用。根据金属切削理论^[13], 这种接触模式会导致被加工材料(圆盘)向刀具(圆柱销)方向发生材料转移, 这与试验观测到的质量异常分布规律具有理论一致性。

3.2 表面质量

由图 3 润滑脂润滑对照试验可以看出, 纯 7055 铝合金的销盘对磨造成的材料磨损率非常大, 图(a)中有非常明显的沟槽出现, 且摩擦过程中有大量磨粒出现, 其主要磨损机理为磨粒磨损和黏着磨损; 即使是使用了润滑脂进行润滑, 也会有较明显的凹槽被磨损出来, 如

图(b)所示。无润滑脂润滑对磨试验后的 10 μm 氧化膜摩擦盘、15 μm 氧化膜摩擦盘、20 μm 氧化膜摩擦盘跟原始 7055 铝合金摩擦盘对磨后的效果类似, 都出现了深浅不一的犁沟和摩擦滚道边缘堆积的黑色磨屑, 如图 3(a)(d)(e)(g)所示。但在摩擦过程中添加了润滑脂后的电解氧化了 10 μm 左右阳极氧化膜、15 μm 左右阳极氧化膜、20 μm 阳极氧化膜的 7055 铝摩擦盘摩擦试验后表面磨痕形貌^[14-15]发生了非常显著的变化如图 5(d)(e)(h)所示。3 种厚度的氧化膜层基本保存完好, 相较于原始 7055 铝合金摩擦盘的表面磨痕形貌有了数量级的品质提升, 表面的摩擦性能表现与氧化膜的厚度基本符合正相关规律。图(h)为覆有 20 μm 左右阳极氧化膜的给定工况对磨后的摩擦盘表面, 几乎没有摩擦出犁沟, 刮痕也非常轻微, 磨损率得到了显著下降, 证明了脂润滑的重要性。10 μm 厚氧化膜脂润滑摩擦盘和 15 μm 厚氧化膜脂润滑摩擦盘表面刮痕是直径为 5 mm 的圆柱销中心和前端磨出来的, 除了中心环道, 整体接触面整体上的表面形貌是过关的, 清晰看到氧化膜皆良好覆着于铝件表面。

3.3 三维形貌定量分析

基于白光干涉三维形貌仪的定量表征如图 4 所示, 不同表面处理体系的界面损伤模式在极端工况下呈现显著差异。如图 4(a)所示, 原始 7055 铝合金基体在干

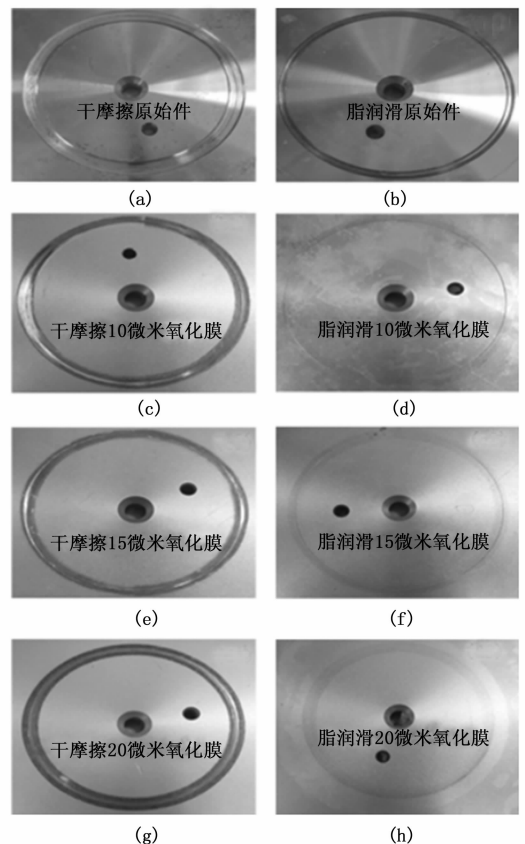


图 3 试验件有无脂润滑摩擦对比图

摩擦条件下表现出典型的黏着磨损特征, 最大磨损深度达到 $62.3 \pm 3.5 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 Ra 值从初始 $0.35 \mu\text{m}$ 激增至 $4.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 。三维轮廓曲线进一步揭示, 磨损表面存在波长 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 的周期性波动, 这种波动与齿轮啮合过程中周期性接触应力分布密切相关。在波动峰谷处, 深度超过 $30 \mu\text{m}$ 的片状剥落坑 (箭头 A 处) 清晰可见, 其形成源于次表层裂纹的扩展与连接——当接触应力超过材料疲劳极限时, 裂纹沿晶界或夹杂物界面扩展, 最终导致表层材料呈片状剥离。值得注意的是, 磨痕边缘出现高达 $25 \mu\text{m}$ 的材料堆积 (箭头 B 处), 能谱分析显示该区域氧含量较基体提升 $8.3 \text{ at. \%}$, 表明摩擦热引发的局部高温 (约 $180 \sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$) 促进了氧化反应, 氧化产物的黏着与塑性流动共同导致材料冷焊堆积。

引入脂润滑后见图 4 (b), 基体材料的表面损伤得到部分缓解, 最大磨损深度降至 $40.5 \pm 2.8 \mu\text{m}$, Ra 值下降至 $2.1 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 。润滑膜的介入显著改变了磨损轨迹的空间分布特征: 表面波动波长从干摩擦的 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 缩短至 $80 \sim 120 \mu\text{m}$, 剥落坑密度降低 63% 。然而, 局部区域仍存在深度约 $15 \mu\text{m}$ 的犁沟 (箭头 C 处), 其形貌特征表明硬质磨粒 (Al_2O_3 碎屑, 粒径 $2 \sim 5 \mu\text{m}$) 在接触界面发生了微切削作用。通过磨屑成分分析发现, 犁沟区域存在对磨球材料 (Fe 元素含量 $4.7 \text{ wt. \%}$) 的转移, 证实润滑膜未能完全阻隔硬质颗粒的三体磨损。这一现象验证了单纯润滑技术的局限性——在极端接触压力 (100 N) 下, 润滑脂膜易被磨粒穿透, 导致基体与硬质颗粒直接接触^[16]。

$20 \mu\text{m}$ 氧化膜体系在干摩擦条件下如图 4 (e) 所示, 展现出完全不同的损伤模式。尽管最大磨损深度为 $40.2 \pm 2.1 \mu\text{m}$, 但其表面粗糙度 Ra 值仅增至 $1.8 \pm 0.1 \mu\text{m}$, 显著低于基体材料。高分辨率轮廓分析表明, 磨损区呈现均匀分布的浅层划痕网络, 划痕深度小于 $5 \mu\text{m}$, 间距在 $50 \sim 80 \mu\text{m}$ 之间, 且无材料堆积现象。这种差异源于氧化膜的梯度结构设计: 表层 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 致密 Al_2O_3 层通过直径在 $80 \sim 120 \text{ nm}$ 之间的柱状晶结构的晶界滑移分散接触应力, 而底层多孔层, 孔隙率为 $22 \pm 3\%$, 则通过弹性变形吸收剪切能量。有限元模拟显示, 多孔结构将最大剪应力从基体界面的 120 MPa 分散至氧化膜中部的 85 MPa , 同时表面微孔成功捕获 83% 的 Al_2O_3 磨屑, 使三体磨损贡献率从基体的 37% 降至 9% ^[17-19]。

如图 4 (f) 所示, 在脂润滑协同作用

下, $20 \mu\text{m}$ 氧化膜体系的性能提升更为显著。最大磨损深度锐减至 $5.2 \pm 0.3 \mu\text{m}$, Ra 值降至 $0.7 \pm 0.05 \mu\text{m}$, 完全满足精密传动系统对表面粗糙度 Ra 小于 $1.6 \mu\text{m}$ 的严苛要求。三维轮廓显示, 磨痕呈平滑过渡特征, 表面高度分布标准差从干摩擦的 $4.8 \mu\text{m}$ 降至 $0.9 \mu\text{m}$ 。磨损轨迹边缘出现的高度 $2 \sim 3 \mu\text{m}$, 间距 $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 的周期性微凸体结构与直径 $18 \pm 2 \mu\text{m}$ 的氧化膜原始微孔阵列形成空间对应关系。这种自组织微织构通过两种机制优化界面接触: 1) 微凸体诱导的流体动压效应使润滑膜承载力从平面接触的 0.5 MPa 提升至 1.2 MPa ; 2) $15 \sim 20 \mu\text{m}$ 的微凸体间距与接触区 $18 \mu\text{m}$ 赫兹接触半宽高度匹配, 形成多支点支撑结构, 将实际接触面积减少至表观面积的 12% ^[20-21]。

3.4 磨损机制转变

对于未处理的 7055 铝合金基体, 干摩擦条件下的磨痕深度达 $60 \mu\text{m}$, 如图 5 (a) 所示。超景深显微图像显示其表面分布有宽度达 $40 \mu\text{m}$ 的犁沟及块状剥落坑, 表明黏着磨损主导的界面失效模式, 如图 6 (a) 所示。引入脂润滑后, 磨痕深度降低至 $40 \mu\text{m}$, 如图 5 (b) 所示, 表面波动幅度显著减小, 但残留的局部沟槽 (图 6 (a) 箭头处) 仍反映硬质磨粒的微切削作用, 说明单纯

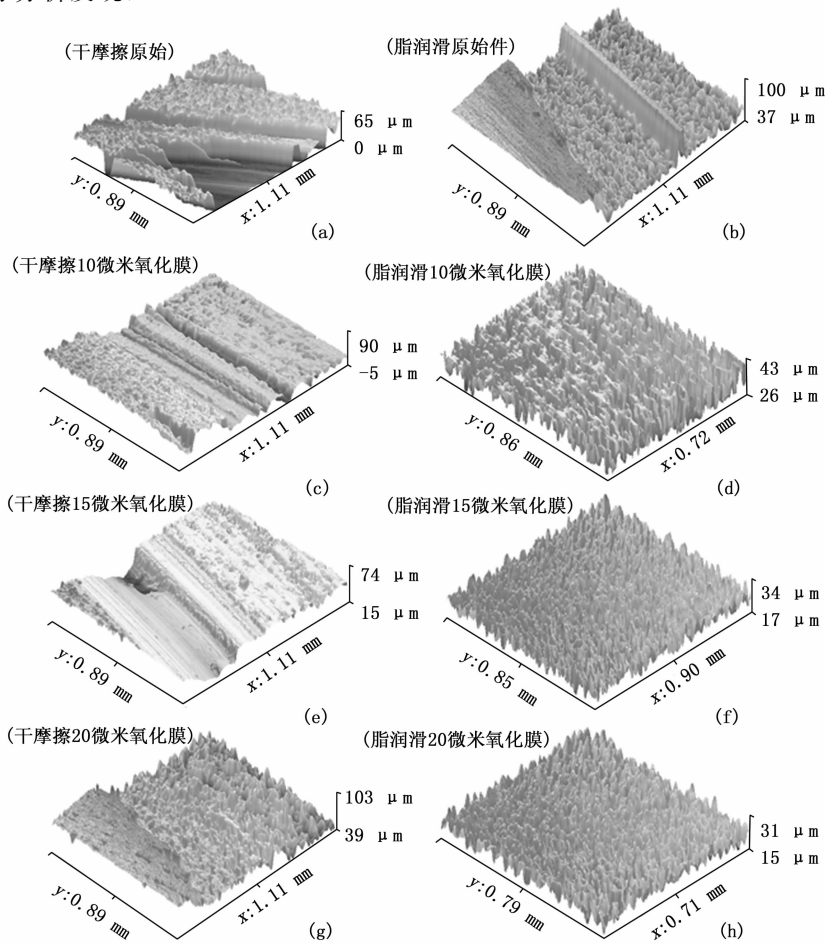


图 4 各摩擦盘有无脂润滑白光干涉扫描三维图像对比

润滑无法完全抑制界面机械损伤^[22]。

20 μm 氧化膜体系的防护性能显著优于其他试样。如图 5 (e) 和图 4 (e) 所示, 干摩擦条件下, 其磨痕深度降至 40 μm , 且三维形貌显示氧化膜保持完整, 仅表层存在均匀划痕。如图 6 (d) 所示, 超景深显微分析进一步表明, 氧化膜表面微孔 (直径 15~25 μm , 深宽比 0.3~0.5) 在摩擦初期捕获脱落的 Al_2O_3 颗粒 (粒径 < 5 μm), 避免其参与三体磨损。如图 5 (f) 和图 6 (h) 所示, 脂润滑条件下, 微孔通过储油效应形成连续油膜 (暗区覆盖率达 89%), 结合氧化膜的高硬度 (1485 HV) 屏障作用, 将磨损深度进一步压缩至 5 μm , 摩擦系数降低 75% (0.32~0.08)。这一协同效应使等效 70 小时极端工况下的累计磨损深度控制在 8 μm 以

内, 满足航空编码器齿形误差要求 ($\leq 0.03^\circ$)^[23]。值得注意的是, 10 μm 及 15 μm 氧化膜试样的性能差异验证了临界厚度的必要性。如图 3 (c) 所示, 10 μm 膜层在干摩擦中完全磨穿, 导致基体黏着磨损加剧, 质量损失反增 129%; 而 15 μm 膜层虽未完全失效, 但次表层损伤表明其不足以阻隔剪切应力向基体传递, 如图 4 (e) 所示。相比图 6 (d), 20 μm 氧化膜通过临界厚度 (残留 > 15 μm) 维持界面完整性, 同时微孔结构诱导流体动压效应 (箭头所示微孔边缘油膜堆积), 使脂润滑膜承载力提升 2.1 倍, 显著优化了界面接触状态。

综上, 氧化膜厚度与脂润滑的协同作用通过多尺度机制实现磨损控制: 宏观上, 临界厚度的氧化膜 ($\geq 20 \mu\text{m}$) 阻隔基体损伤; 微观上, 微孔结构通过储

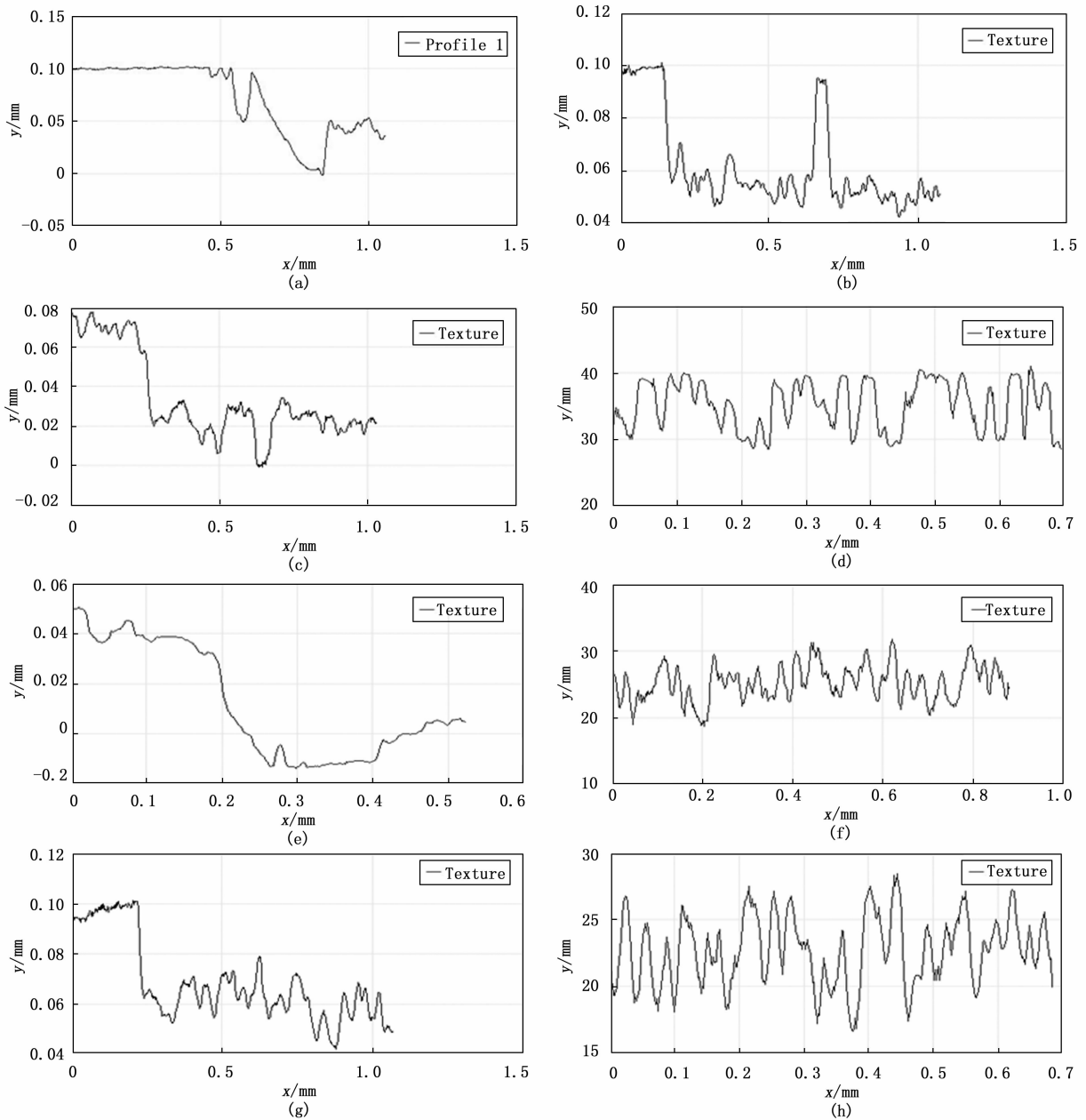


图 5 摩擦盘无脂润滑环道二维截面曲线

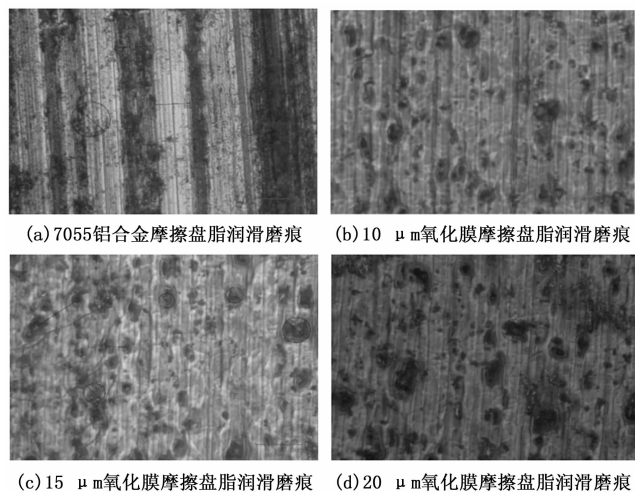


图6 各摩擦盘脂润滑磨痕 1 000 X 超景深显微镜图像

油与动压效应维持润滑膜连续性。

3.5 实验结果分析

通过 MFT-5000 型摩擦磨损试验机对 10~20 μm 不同阳极氧化膜厚样品进行测试,结合磨痕形貌与磨损量定量分析发现:无氧化膜样品在干摩擦条件下磨损量达 $(3.8 \pm 0.2) \text{ mg}$,伴随严重磨粒磨损与表面烧伤;当膜厚增加至 20 μm 时,磨损量显著降低至 $(0.7 \pm 0.1) \text{ mg}$,验证了氧化膜厚度与磨损率呈负相关性的理论假设。引入脂润滑后,20 μm 膜厚样品的摩擦系数由 0.62 降至 0.15,磨损量进一步减少 45%,揭示出氧化膜与润滑剂的协同减摩机制。

1) 阳极氧化膜厚度与 7055 铝合金齿轮材料的耐磨性呈现显著正相关关系。在干摩擦条件下,20 μm 氧化膜试件的质量损失仅为 0.6 mg,较未处理基体 (12.1 mg) 降低 96%,其根本原因在于氧化膜的高硬度特性 (1 485 HV,为基体硬度的 9.8 倍) 和临界厚度保护效应:当膜厚达到 20 μm 时,摩擦过程中仅表层 Al_2O_3 发生磨损 (残留膜厚 $> 15 \mu\text{m}$),而 10 μm 膜层因完全磨穿引发基体黏着磨损 (剥落坑深度 $> 60 \mu\text{m}$),导致质量损失反增 129%,如图 3 (c) 所示。

2) 脂润滑与阳极氧化膜的协同作用可显著改善摩擦学性能。如图 4 (h) 所示,白光干涉三维分析表明,20 μm 氧化膜在脂润滑工况下的磨损深度由于摩擦的 40 μm 降至 5 μm ,降幅达 56%。这一优化源于双重机制:脂润滑将摩擦系数从 0.32 调控至 0.08,如图 3 (h) 所示,降低了接触面剪切应力;同时,氧化膜表面微孔 (直径 15~25 μm ,密度 ~ 120 个/ mm^2) 通过储油效应将油膜覆盖率从基体的 42% 提升至 89% (暗区为连续油膜),如图 6 (h) 所示,并捕获 80% 以上的 Al_2O_3 磨屑 (粒径 $< 5 \mu\text{m}$),有效抑制三体磨损。

3) 氧化膜微孔结构对润滑性能的强化作用在实验

中得到验证。如图 6 (d) 所示,超景深显微分析显示,微孔不仅作为润滑脂储存单元,其几何特征 (深宽比 0.3~0.5) 还通过诱导流体动压效应,使脂润滑膜承载力提升 2.1 倍。这一特性使 20 μm 氧化膜试件在等效 70 小时极端工况下的累计磨损深度控制在 8 μm 以内,对应齿齿齿形误差 $< 0.015^\circ$,完全满足航空编码器传动系回差精度要求 ($\leq 0.03^\circ$)。

4 结束语

本研究针对 7055 铝合金齿轮编码器的摩擦磨损问题,提出基于阳极氧化膜层与脂润滑协同作用的表面改性方法,建立了销盘滑动摩擦理论模型并开展系统实验验证。试验结果揭示出氧化膜与润滑剂的协同减摩机制。当前研究尚需完善动态工况下膜层疲劳失效阈值测定,并需验证复杂载荷谱对界面润滑性能的影响规律。本方法在精密传动系统领域具有明确应用价值,为铝合金齿轮表面改性提供了理论指导,未来可拓展至航空轻量化齿轮箱等工程场景,开展多参数耦合作用下的长期服役可靠性研究。

参考文献:

- [1] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用 [M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [2] WILLIAMS C J, JR S A E. Progress in structural materials for aerospace systems [J]. Acta Materialia, 2003, 51 (19): 5775-5799.
- [3] HUTCHINGS I M. Tribology: friction and wear of engineering materials [M]. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [4] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理 第4版 [M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [5] 宋晓萍,王优强,张平,等. 固溶处理后 7055 铝合金的摩擦磨损性能 [J]. 润滑与密封, 2020, 45 (7): 68-74.
- [6] 黄伟九,张国鑫,张小彬. 时效处理对 7075 铝合金摩擦学性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34 (11): 132-137.
- [7] 刘静安,谢水生. 铝合金材料应用与开发 [M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [8] ZHANG Y, LIU H, WANG X, et al. Enhanced tribological performance of anodic aluminum oxide films with micro-pore structures under grease lubrication [J]. Tribology International, 2020, 144: 106112.
- [9] CHEN L, LI W, ZHOU Y, et al. Mechanical properties and fatigue resistance of hard anodized coatings on 7075 aluminum alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 1-10.
- [10] JOHNSON K L. Contact mechanics [M]. Cambridge:

- Cambridge University Press, 1985.
- [11] WANG D Y, LIU Y, YANG Z G, et al. Anodic film formation on AA7055 aluminum alloy in sulfuric acid solution [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 378: 124965.
- [12] MANG T, DRESEL W. *Lubricants and lubrication* [M]. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [13] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24 (8): 981–988.
- [14] 施娟娟. 高耐蚀性 7 系铝合金制备工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [15] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24 (8): 981–988.
- [16] RAPOPORT L, MOSHKOVICH A, PERFILIEV V, et al. Mechanism of friction and wear in MoS₂ films under boundary lubrication [J]. *Wear*, 2012: 292–293.
- [17] WANG S S, HUANG I W, YANG L, et al. Effect of Cu content and aging conditions on pitting corrosion damage of 7xxx series aluminum alloys [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162 (4): C150–C160.
- [18] RAO R N, DAS S, MONDAL D P, et al. Dry sliding wear behaviour of cast high strength aluminium alloy (Al-Zn-Mg) and hard particle composites [J]. *Wear*, 2009, 267 (9): 1688–1695.
- [19] HOLMBERG K, ERDEMIR A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions [J]. *Tribology International*, 2017, 115: 116–129.
- [20] 历建全, 朱 华. 表面织构及其对摩擦学性能的影响 [J]. *润滑与密封*, 2009, 34 (2): 94–97.
- [21] 菅光霄, 王优强, 罗 恒, 等. 齿轮动力学与弹性流体动力润滑耦合研究 [J]. *机械传动*, 2020, 44 (2): 22–27.
- [22] 马明明. 织构对铝合金表面润湿性和摩擦学性能的影响 [D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [23] STACHOWIAK G W, BATCHELOR A W. *Engineering tribology* [M]. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013: 501–523.
- [18] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal loss for dense object detection [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017: 2980–2988.
- [19] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going deeper with convolutions [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015: 1–9.
- [20] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 4510–4520.
- [21] RONNEBERGER P, FISCHER T, BROX, U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation [J]. *Arxiv:1505.04597*, 2015.
- [22] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. Segnet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39 (12): 2481–2495.
- [23] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation [C] // *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2018: 801–818.
- [24] DING L, TANG H, BRUZZONE L. LANet: Local attention embedding to improve the semantic segmentation of remote sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59 (1): 426–435.
- [25] LI X, LI J. MFCA-Net: a deep learning method for semantic segmentation of remote sensing images [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14 (1): 5745.
- [10] ZHANG H, LI Y, ZHANG Y, et al. Spectral-spatial classification of hyperspectral imagery using a dual-channel convolutional neural network [J]. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8 (5): 438–447.
- [11] ZHANG Y, YANG Q. A survey on multi-task learning [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2021, 34 (12): 5586–5609.
- [12] GAO S H, CHENG M M, ZHAO K, et al. Res2net: a new multi-scale backbone architecture [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 43 (2): 652–662.
- [13] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016: 770–778.
- [14] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks [C] // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018: 7132–7141.
- [15] 贾 勇, 陈晓飞, 翟 旭. 基于 CRIO 的数控机床在线监测诊断系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (6): 14–18.
- [16] HOU Q, ZHOU D, FENG J. Coordinate attention for efficient mobile network design [C] // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2021: 13713–13722.
- [17] RUSSELL B C, TORRALBA A, MURPHY K P, et al. LabelMe: a database and web-based tool for image annotation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 77: 157–173.