

摩擦与润滑

脉冲电流下 7075-T6 铝合金的摩擦特性与微观组织

钱海旭¹, 夏建生^{1,2}, 窦沙沙¹, 刘镭滔¹, 朱春雨¹, 朱云飞¹

(1. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224001; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 在电辅助成形中, 结合冲压工艺特点, 利用自主研发的脉冲电流摩擦测试平台, 研究了脉冲电流密度为 0~10 A·mm⁻² 时, 7075-T6 铝合金与 P20 钢摩擦副之间摩擦因数的变化规律, 分析了磨损表面的三维形貌、微观结构与物相组成。结果表明: 电流密度为 0~6 A·mm⁻² 时, 7075-T6 铝合金表面形成致密氧化膜, 摩擦因数随着电流密度增加而减小, 在电流密度为 6 A·mm⁻² 时平均摩擦因数最小, 为 0.216; 电流密度大于 6 A·mm⁻² 时, 在摩擦热和焦耳热的共同作用下, 塑性变形加剧, 导致氧化膜破损, 摩擦因数随着电流密度的增大而增大。低电流密度 (0~6 A·mm⁻²) 时, 摩擦过程中机械磨损起主要作用; 高电流密度 (6~10 A·mm⁻²) 时, 摩擦过程中机械磨损和电辅助磨损起主要作用。

关键词: 7075-T6 铝合金; 脉冲电流; 摩擦特性; 微观机理; 机械磨损; 电辅助磨损

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.026

中图分类号: TG115.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 06-0208-07

Friction characteristics and microstructure of 7075-T6 aluminum alloy under pulsed current

Qian Haixu¹, Xia Jiansheng^{1,2}, Dou Shasha¹, Liu Rongtao¹, Zhu Chunyu¹, Zhu Yunfei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Yancheng College of Technology, Yancheng 224001, China;

2. College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In the electrical-assisted forming, combined with the characteristics of stamping process, the variation rule of friction factor between 7075-T6 aluminum alloy and P20 steel rubbing pair at the pulse current density of 0~10 A·mm⁻² was studied by using a self-developed pulsed current friction test platform, and the three-dimensional morphology, microstructure and phase composition of the wear surface were analyzed. The results show that the dense oxide film is formed at the surface of 7075-T6 aluminum alloy when the current density is 0~6 A·mm⁻², and the friction factor decreases with the increasing of current density. When the current density is 6 A·mm⁻², the average friction factor is the smallest, which is 0.216. When the current density is greater than 6 A·mm⁻², the plastic deformation is intensified under the combined effect of friction heat and Joule heat, which results in the breakage of the oxide film, and the friction factor increases with the increasing of current density. At the low current densities (0~6 A·mm⁻²), mechanical wear plays a major role in the friction process, and at the high current densities (6~10 A·mm⁻²), mechanical and electrical-assisted wear play a major role in the friction process.

Key words: 7075-T6 aluminium alloy; pulsed current; friction characteristics; micro-mechanism; mechanical wear; electrical-assisted wear

随着工业的不断发展, 能源短缺成为日益严峻的问题, 在提倡环境保护全球化的背景下, 推进工业产品轻量化尤为重要。铝合金因具有相对较高的

比强度和比刚度、良好的延伸性和耐腐蚀性、低廉的价格等特点, 成为航空工业领域和现代交通运输轻量化、高速化的关键材料^[1-3]。

7XXX 铝合金在室温条件下, 塑性较差, 易开裂, 难以保证成形零件的精度, 通过热冲压成形可以在一定程度上提高零件的成形质量^[4-5], 但传统的热成形工艺存在成本高、受热不均匀等问题。电流辅助成形是指将电流通入金属板材, 使得板材在电、热、力三场耦合作用下利用电塑性效应来提高材料塑性的一种成形方法, 可以改善加工性能, 具

收稿日期: 2023-10-06; 修订日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51505408); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2022174)

作者简介: 钱海旭 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1461561806@qq.com

通信作者: 夏建生 (1980-), 男, 博士, 教授

E-mail: Xiajiansheng@163.com

有加热效率高、加工道次少的优点，已逐渐成为研究的热点^[6-8]。文献 [9] 的研究表明，脉冲电流处理具有升温快、节约能源等特点，在脉冲电流辅助成形过程中，板料及模具间的摩擦特性对零件的成形质量和仿真精度有着重要影响，目前，很多仿真软件使用定摩擦因数，缺乏有效的摩擦模型，模拟精度不高，如何获取准确的摩擦模型，分析脉冲电流下成形的摩擦磨损微观机理，对于提高材料的耐磨性能和应用性能具有重要意义。

国内外许多学者针对不同工艺参数下材料的摩擦特性进行了大量研究。Decrozant-Triquenaux J 等^[10]使用 flat-on-flat 测试方法，比较了镜面抛光和未抛光的 CrN 涂层模具钢与 6016 铝合金摩擦副润滑条件下的摩擦因数，得出镜面抛光试样的摩擦因数低于未抛光试样的摩擦因数。Liu Y 等^[11]研究了 6061 铝合金在不同载荷和不同温度条件下的摩擦行为，发现摩擦因数随着温度和载荷的增大而增大，且高温时粘着摩擦起主要作用。Zhou Y K 等^[12]研究了 CNTs-MoS₂/Cu 复合材料在载流条件下的摩擦性能、磨损性能和导电性能，发现该材料的磨损机制取决于电流大小和 MoS₂ 和 CNT 的含量，在电流为 21 A 时，主要的磨损机制转变为粘着磨损和电弧烧蚀耦合。Bao J X 等^[13]通过电流辅助压缩试验，以微观的角度建立了考虑电流密度与尺寸效应的多尺度摩擦模型，可以较好地预测摩擦因数。Xia J S 等^[14]以 7075 铝合金为研究对象，研究了不同电流密度下的变摩擦模型，并验证了其有效性，然而其并未针对载流条件下的摩擦机理进行深入研究。

由此可见，目前对于脉冲电流下铝合金的摩擦特性和微观组织的研究并不多，铝合金在脉冲电流下的摩擦磨损特性仍然存在一些不确定性。基于以上问题，本文以 7075-T6 铝合金为研究对象，通过试验探究铝合金在脉冲电流作用下的摩擦因数变化规律，并研究其磨损表面的三维形貌、微观结构以及物相组成，为提高铝合金的成形性能和应用性能提供参考。

1 试验

1.1 试验材料

本文选取 7075-T6 铝合金板料为试验材料，使用线切割将铝合金板料切割成形状尺寸为 1000 mm×20 mm×0.5 mm 的试样，其化学成分见表 1。摩擦副选取 P20 模具钢，其化学成分见表 2。每次试验

表 1 7075-T6 铝合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 7075-T6 aluminum alloy
(%, mass fraction)

Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.40	1.96	0.50	0.30	2.76	0.24	5.60	0.2	余量

表 2 P20 模具钢材料的化学成分（%，质量分数）
Table 2 Chemical compositions of P20 die steel material
(%, mass fraction)

C	Mn	Cr	Mo	S	Fe
0.38	1.30	1.85	0.40	0.008	余量

开始前将 7075-T6 铝合金板料以及 P20 模具钢依次用 1000#、1500# 和 2000# 砂纸打磨光滑，以避免上次试验模具钢表面产生的划痕导致试验误差，保证试验结果的准确性和可重复性。每次试验前试样及模具均用酒精溶液超声波清洁并干燥，保证模具与板料的接触精度。使用 VX-100 激光显微镜对铝合金试样表面进行表征，其三维形貌如图 1 所示。

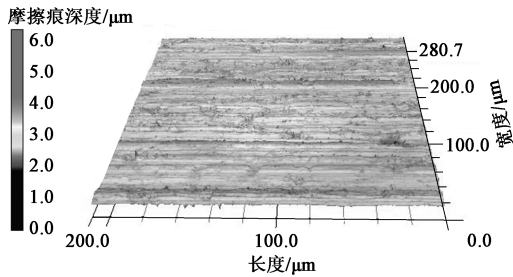


图 1 7075-T6 铝合金试样三维表面形貌
Fig. 1 3D surface morphology of 7075-T6 aluminum alloy specimen

1.2 试验原理和方法

图 2a 为自制脉冲电流摩擦试验机，包括摩擦试验平台、控制平台、脉冲电源以及数据采集平台，其详细部件及原理图如图 2b 和图 2c 所示。试验前，将铝合金试样的两端连接在聚醚醚酮（PEEK）绝缘夹具上，测试试样与模具间垂直方向上的载荷通过负载机构上的砝码施加来实现，负载机构由导套与施压板组成（总重力为 10 N）。当通入脉冲电流时，电流依次通过夹头→P20 模具钢和铝合金试样→夹头，完成闭合电路。考虑到试验的安全性，摩擦试验机的其他部位还需进行绝缘处理，用氧化铝陶瓷绝缘环和 PEEK 绝缘板进行绝缘。试验中，通过电机驱动丝杠滑块模组，使铝合金试样在预设速度 V 下运动，水平方向和竖直方向两个力传感器会实时采集数据，并通过库伦定律公式转换实现摩

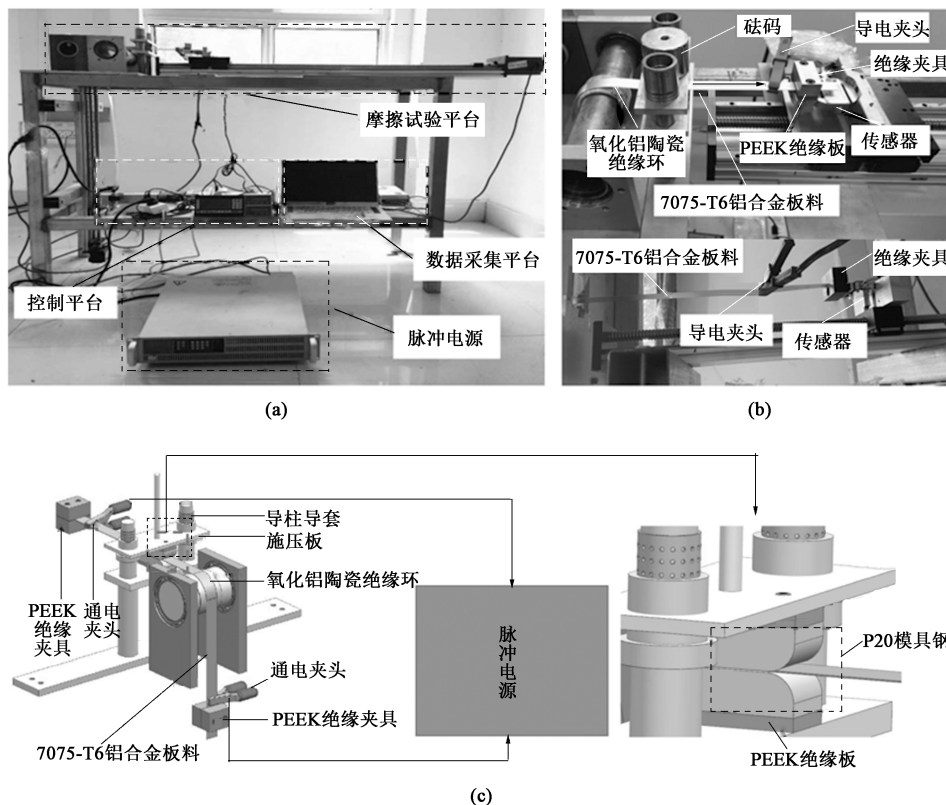


图 2 脉冲电流摩擦试验机及原理图

(a) 脉冲电流摩擦试验机 (b) 详细部件 (c) 原理图

Fig. 2 Pulse current friction experimental machine and principle diagram

(a) Pulse current friction experimental machine (b) Detailed parts (c) Principle diagram

擦因数的测量, 摩擦因数计算公式如式 (1) 所示。

$$\mu = \frac{F_1 - F_2}{2(P_1 + P_2)} \quad (1)$$

式中: μ 为摩擦因数; F_1 为水平方向传感器值; F_2 为竖直方向传感器值; P_1 为负载机构自身重力; P_2 为负载机构上砝码的重力。

1.3 试验方案

铝合金脉冲电流辅助成形过程中的摩擦机理比较复杂, 本文研究电流密度对 7075-T6 铝合金摩擦特性的影响。先进行多次试验选取合适的电流密度范围, 试验中脉冲电流输出频率固定为 50 Hz, 占空比固定为 80%。结合刘镭滔等^[15]的研究, 综合考虑试验安全及脉冲电流摩擦试验的需要, 设计试验在载荷为 20 N、滑动速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、行程为 240 mm 的干摩擦环境下进行, 试验电流密度分别为 2、4、6、8 和 $10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。试验前先向试样通入脉冲电流 30 s, 使其达到稳定状态后, 再进行摩擦试验, 每组试验重复 5 次, 取平均值。

在进行摩擦试验后, 使用 VX-100 激光显微镜对铝合金试样的磨损表面进行表征, 分析其三维形

貌并绘制摩擦痕横截面轮廓。通过具有能量色散光谱 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 观察磨损表面的微观结构态, 并分析磨损后板材表面的化学成分。

2 结果与分析

2.1 不同脉冲电流密度下的摩擦因数

当载荷为 20 N、滑动速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 通过试验获得不同电流密度下 7075-T6 铝合金的摩擦因数变化曲线, 如图 3a 所示。图 3a 中, 摩擦因数曲线的变化趋势一致, 包括迅速上升、缓慢下降和逐渐稳定 3 个阶段。当电流密度为 $0 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时, 摩擦曲线出现频繁的剧烈振荡, 摩擦因数峰值达到 0.803; 当电流密度为 2、4 和 $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时, 摩擦因数变化规律与未通电情况下具有相似的变化趋势, 且随着电流密度增大, 摩擦曲线振荡幅度减小, 变化趋于稳定, 摩擦因数峰值和平均值变小; 当电流密度大于 $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时, 摩擦曲线振荡幅度开始变

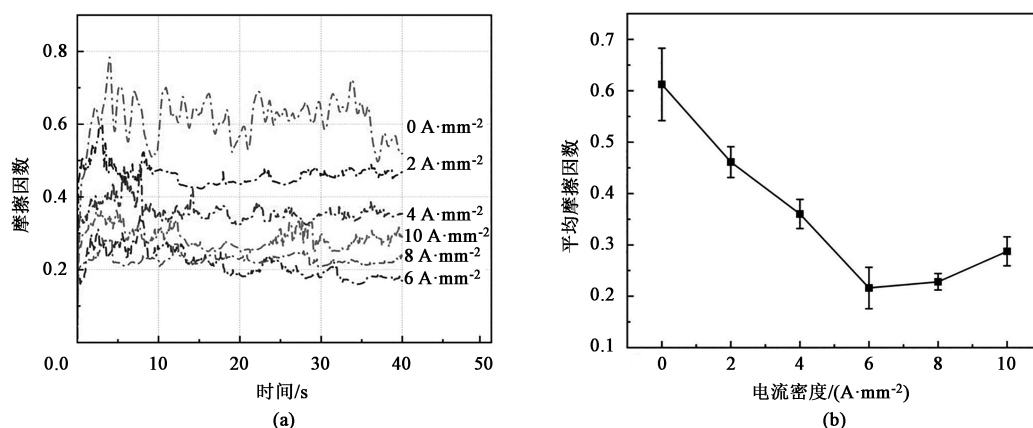


图3 不同电流密度下摩擦因数随时间变化曲线 (a) 和平均摩擦因数变化曲线 (b)

Fig. 3 Variation curves of friction factor with time (a) and average friction factor (b) under different current densities

大。由图 3b 可知, 在相同滑动速度与载荷下, 平均摩擦因数随着电流密度的增大表现出先减小后增大的变化趋势, 在电流密度为 0、2、4、6、8 和 10 A·mm⁻² 下的平均摩擦因数分别为 0.612、0.461、0.360、0.216、0.228 和 0.287。可见当电流密度达到某一个值 (6 A·mm⁻²) 时, 摩擦因数最小。

2.2 脉冲电流密度对表面形貌的影响

不同电流密度下试样摩擦表面的三维形貌和横截面平均轮廓分别如图 4 和图 5 所示。当电流密度为 0 A·mm⁻² 时, 摩擦表面出现大量细小的犁沟带 (图 4a), 其方向平行于滑动方向, 摩擦痕深度计算参考横截面平均轮廓 (图 5a), 深度约为 13.9 μm; 当电流密度 2 A·mm⁻² 时, 摩擦表面凹槽数量减少

且深度变小, 摩擦痕深度约为 9.96 μm, 说明脉冲电流对摩擦表面形貌产生了一定的影响; 当电流密度为 4 A·mm⁻² 时, 摩擦痕深度持续减少至约 7.1 μm, 且摩擦痕宽度变小; 当电流密度增加至 6 A·mm⁻² 时, 摩擦痕出现了少量片状分层区, 由于焦耳热影响显著, 铝合金试样塑性增加, 试样相对较软, 导致摩擦痕深度增加至约 9.2 μm; 当电流密度达到 8 A·mm⁻² 时, 摩擦痕边缘出现了更为明显的分层和凸起, 凹槽的数量减少, 但凹槽宽度增加, 表层出现剥落现象, 摩擦痕深度约为 10.2 μm; 当电流密度为 10 A·mm⁻² 时, 摩擦痕发生了严重的塑性变形, 犁沟几乎消失且凹槽进一步变宽, 摩擦痕深度约为 14.6 μm。

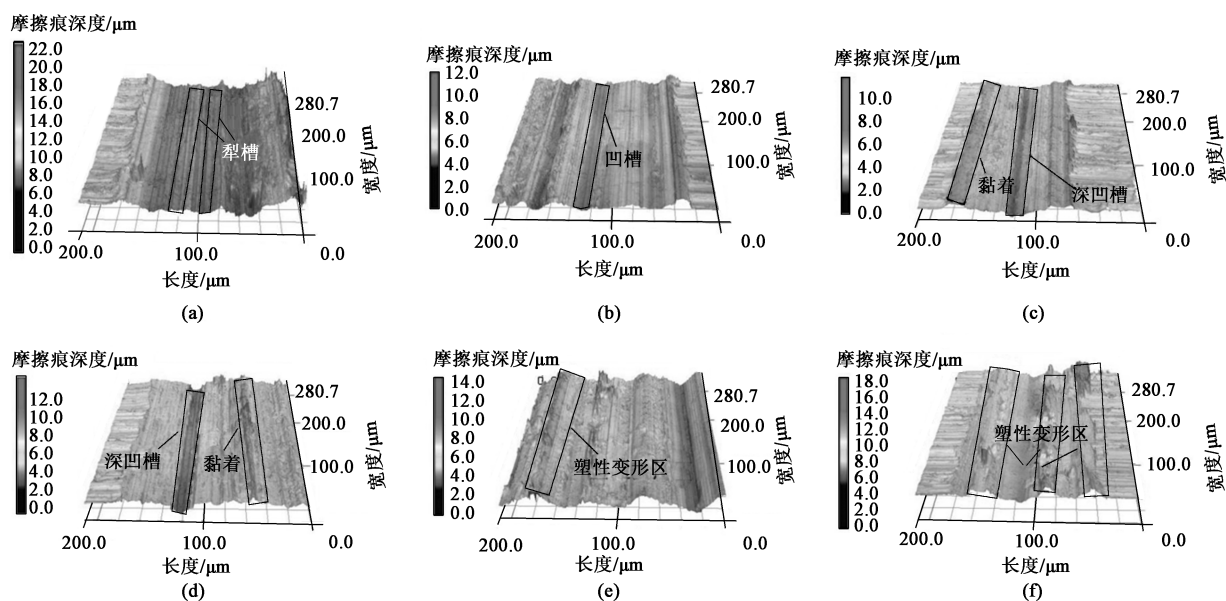


图4 不同电流密度下摩擦痕的三维形貌

(a) 0 A·mm⁻² (b) 2 A·mm⁻² (c) 4 A·mm⁻² (d) 6 A·mm⁻² (e) 8 A·mm⁻² (f) 10 A·mm⁻²

Fig. 4 3D morphologies of friction marks under different current densities

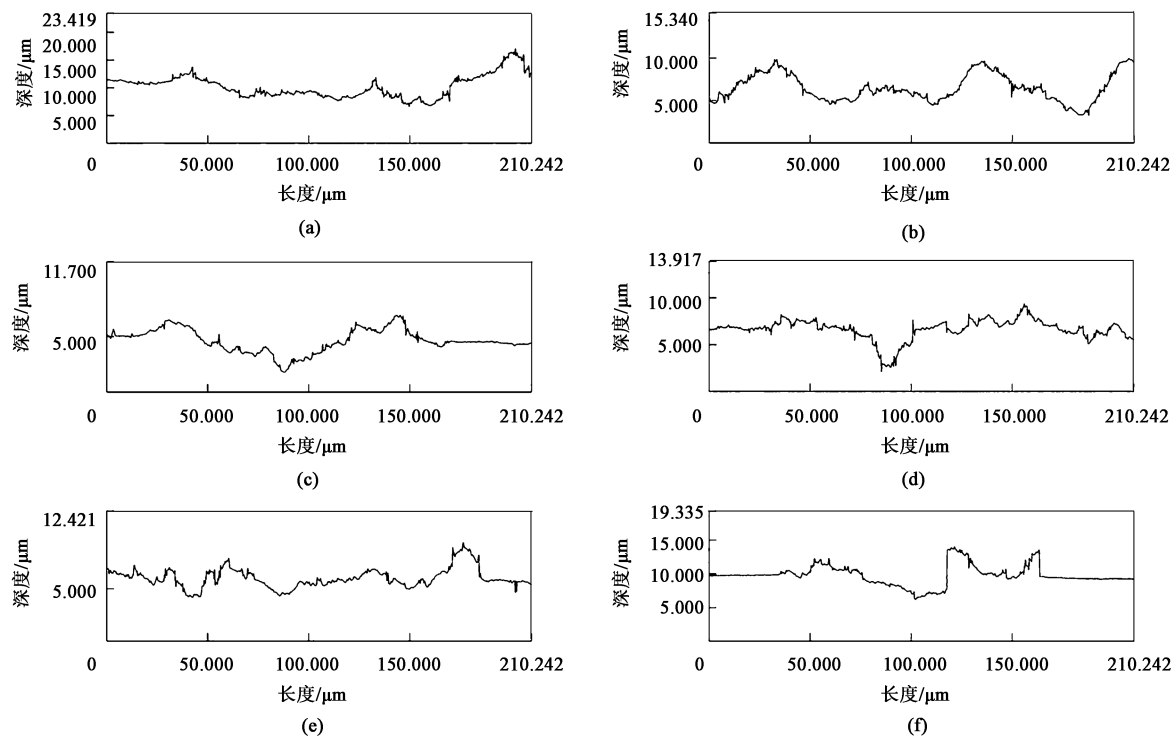


图 5 不同电流密度下摩擦痕横截面平均轮廓
(a) $0\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (b) $2\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (c) $4\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (d) $6\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (e) $8\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (f) $10\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$
Fig. 5 Cross-sectional average profile of friction marks under different current densities

采用激光显微镜自带的软件分析,得到如表 3 所示的不同电流密度下铝合金试样的粗糙度,未通电情况下铝合金试样的表面粗糙度 $Ra = 0.284\text{ }\mu\text{m}$,当电流密度为 $2\sim 8\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,表面粗糙度随着电流密度的增大而减小,当电流密度为 $8\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,表面粗糙度 Ra 为 $0.178\text{ }\mu\text{m}$,达到最小。

表 3 不同电流密度下试样表面粗糙度
Table 3 Surface roughnesses of specimen under different current densities

电流密度/ ($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$)	0	2	4	6	8	10
粗糙度/ μm	0.284	0.264	0.225	0.206	0.178	0.214

2.3 脉冲电流密度对 7075-T6 铝合金微观组织结构演变的影响

表 4 为不同电流密度下铝合金摩擦表面的 EDS 测量结果,表面出现了氧元素,进一步验证了通入脉冲电流后 7075-T6 铝合金试样表面发生了氧化,并且氧含量随着电流密度的增大而增大。未通入脉冲电流时,磨损表面的 EDS 测量结果不含氧元素,由于铝合金在表层氧化生成的氧化铝非常少,在 EDS 分析测试中,电子的激发深度一般为 $0.5\sim 5.0\text{ }\mu\text{m}$,表

表 4 不同电流密度下 7075-T6 铝合金摩擦表面的 EDS 结果
Table 4 EDS results of friction surface for 7075-T6 aluminum alloy under different current densities

电流密度/ ($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$)	0	2	4	6	8	10
氧元素质量分数/%	0.00	3.53	4.03	5.41	6.10	7.06

层的氧化反应未被 EDS 检测出来。结合表 4 结果分析,金属表面有无数微凸体^[16],微凸体使得材料表面具有一定的粗糙度。通电情况下,铝合金表层能够形成坚固完整的氧化膜^[17],随着电流密度的增加,电接触界面形成的氧化膜越来越厚,氧化膜可以填充微凸体之间的空隙,且微凸体塑性流动增强,使电接触界面更加平整,但是当电流密度增大至一个固定值时,电辅助磨损可能会导致铝合金表面的粗糙度增加。

图 6 给出了电流密度为 $0、6$ 和 $10\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时 7075-T6 铝合金磨损表面形貌及其 EDS 分析。未通电情况下,磨损表面出现大量光滑的犁沟,犁沟边缘有轻微剥落的痕迹,这是典型的磨粒磨损现象。当电流密度为 $6\text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时,光滑犁沟的数量逐渐减少,且深度增加,此时铝合金试样的硬度降低,磨损表面两端出现了少量的粘着以及塑性变形,这

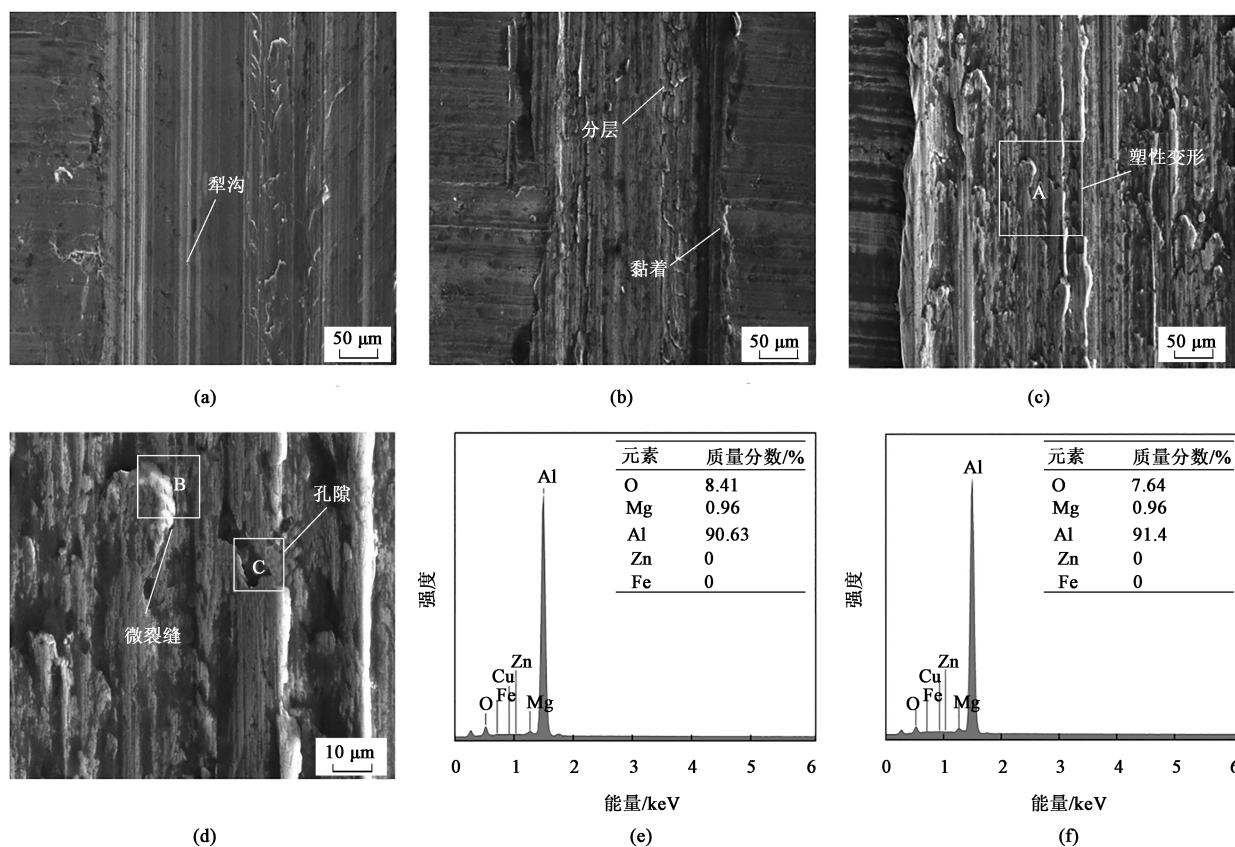


图6 不同电流密度下 7075-T6 铝合金磨损形貌及 EDS 分析结果

(a) $0 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (b) $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (c) $10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (d) A 区的放大图 (e) B 区的 EDS 分析结果 (f) C 区的 EDS 分析结果

Fig. 6 Wear morphologies and EDS analysis results for 7075-T6 aluminum alloy under different current densities

(a) $0 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (b) $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (c) $10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ (d) Enlarged diagram of region A
(e) EDS analysis result of region B (f) EDS analysis result of region C

是由于电流密度增大, 焦耳热作用明显, 使得铝合金表面发生软化, 软化表层在压力的作用下发生挤出。结合 7075-T6 铝合金在低电流密度下平均摩擦因数小于未通电时的平均摩擦因数, 表明氧化铝薄膜在摩擦副滑动过程中起到了一定的积极作用, 光滑的氧化膜表层提供了更低的表面粗糙度, 减少了金属表面之间的直接接触, 导致摩擦力减小。因此, 低电流密度 ($0 \sim 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$) 下, 7075-T6 铝合金的磨损失效行为主要为机械磨损, 具体表现为粘着磨损、磨粒磨损 (犁沟) 和塑性变形等。当电流密度增加至 $10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时, 磨损表面出现了严重的塑性变形, 犁沟几乎消失, 反而出现了微裂纹以及细小孔隙, 这是电辅助磨损的独有特点^[18]。图 6e 和图 6f 为电流密度为 $10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时 B 区 (微裂纹) 和 C 区 (孔隙) 的 EDS 分析结果, 发现微裂纹与孔隙的氧含量较高。分析主要原因为: 高电流密度导致铝合金试样表面局部高温和热膨胀, 产生的电辅助磨损导致铝合金表面形成微裂纹和孔隙,

这些微裂纹和孔隙与空气的接触面积更大, 氧化更充分。因此, 在高电流密度 ($6 \sim 10 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$) 下, 摩擦热、焦耳热和电弧热共同作用, 导致 7075-T6 铝合金表面的微凸体塑性变形能力增大, 摩擦副之间的实际接触面积增大, 磨损表面也观察到明显的塑性变形区, 此时氧化膜容易被破坏, 导致金属基体裸露出来, 磨损失效行为主要为机械磨损 (磨粒磨损、粘着磨损、塑性变形等) 与电辅助磨损相结合。

3 结论

(1) 当法向载荷为 20 N 、滑动速度为 $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 电流密度在 $0 \sim 6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 范围时, 摩擦因数随着电流密度的增大而减小, 当电流密度超过 $6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ 时, 摩擦因数随着电流密度的增大而逐渐增大。

(2) 氧含量随着电流密度的增大而增大, 7075-T6 铝合金在脉冲电流下生成的氧化膜在低电流密度

作用下不容易被破坏,对摩擦有一定的润滑作用。氧化膜可以填充微凸体之间的空隙,使接触表面更加平整并减小粗糙度。

(3) 在电流密度阈值 ($6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$) 内,磨损类型主要为机械磨损,包括粘着磨损、磨粒磨损(犁沟)和塑性变形;当电流密度超过阈值 ($6 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$) 时,由于铝合金试样表面局部高温和热膨胀,磨损表面容易形成微裂纹和孔隙,并且出现严重的塑性变形,磨损类型主要为机械磨损和电辅助磨损相结合,耐磨损性能逐渐下降。

参考文献:

- [1] 吴兆辉. 汽车轻量化及铝合金在现代汽车生产中的应用 [J]. 内燃机与配件, 2022, (23): 106-108.
Wu Z H. Automobile lightweight and application of aluminum alloy in modern automobile production [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022, (23): 106-108.
- [2] 高景洲, 赵升吨, 杜威, 等. 铝合金板材热冲压成形装备的合理性探讨 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 168-173.
Gao J Z, Zhao S T, Du W, et al. Discussion on rationality of hot stamping equipment for aluminum alloy sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 168-173.
- [3] 韦增磊. 浅述铝合金零部件对汽车轻量化的影响 [J]. 中国设备工程, 2022, (6): 139-141.
Wei Z L. Influence of aluminum alloy parts on automotive lightweighting [J]. China Plant Engineering, 2022, (6): 139-141.
- [4] 胡志力, 芦俊杰, 华林. 铝合金热冲压技术研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 1-11.
Hu Z L, Lu J J, Hua L. Review of hot stamping technology for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 1-11.
- [5] 吴新星, 范家春, 邢阳, 等. 铝合金板温成形和热成形技术应用研究 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49 (1): 22-28.
Wu X X, Fan J C, Xing Y, et al. Application research of warm & hot deformation technology for aluminum alloys [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49 (1): 22-28.
- [6] 陈超. 脉冲电流密度及施加方向对 Ti-6Al-4V 合金拉伸性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
Chen C. Study on the Effect of Pulse Current Density and Application Direction on the Tensile Properties of Ti-6Al-4V Alloy [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.
- [7] 赵理想, 陈光军, 轩文涛, 等. 难加工金属材料电塑性辅助加工技术 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 11-24.
Zhao L X, Chen G J, Xuan W T, et al. Electroplastically assisted manufacturing technology for hard-to-working metal materials [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 11-24.
- [8] Perkins T A, Kronenberger T J, Roth J T. Metallic forging using electrical flow as an alternative to warm/hot working [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129 (1): 84-94.
- [9] Jiang Y, Tang G, Shek C, et al. Effect of electropulsing treatment on microstructure and tensile fracture behavior of aged Mg-9Al-1Zn alloy strip [J]. Applied Physics A, 2009, 97: 607-615.
- [10] Decrozant-Triquenaux J, Pelcastre L, Courbon C, et al. High temperature tribological behaviour of PVD coated tool steel and aluminium under dry and lubricated conditions [J]. Friction, 2020, 9 (20): 802-821.
- [11] Liu Y, Zhu Z J, Wang Z J, et al. Flow and friction behaviors of 6061 aluminum alloy at elevated temperatures and hot stamping of a B-pillar [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (3): 4063-4083.
- [12] Zhou Y K, Zhu R, Zuo X, et al. Tribo-electrical behaviors of CNTs-MoS₂/Cu composites under sliding electrical contact with brass [J]. Tribology International, 2023, 180: 108207.
- [13] Bao J X, Bai J N, Lyu S D, et al. Interactive effects of specimen size and current density on tribological behavior of electrically-assisted micro-forming in TC4 titanium alloy [J]. Tribology International, 2020, 151: 106457.
- [14] Xia J S, Liu R T, Zhao J, et al. Study on friction characteristics of AA7075 aluminum alloy under pulse current-assisted hot stamping [J]. Metals, 2023, 13 (5): 972.
- [15] 刘镔滔, 夏建生, 赵军, 等. 6061 铝合金脉冲电流辅助热冲压下的摩擦特性 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (6): 191-198.
Liu R T, Xia J S, Zhao J, et al. Friction characteristics for 6061 aluminium alloy under pulse current assisted hot stamping [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6): 191-198.
- [16] 杨正海. 载流摩擦副的电弧损伤机制研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究总院集团有限公司, 2015.
Yang Z H. Research on the Arc Damage Mechanism of Triboelectric Pairs [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., 2015.
- [17] Abdeldjalil B, Bouchoucha A, Mouadji Y. Effect of electrical current on friction and wear behavior of copper against graphite for low sliding speeds [J]. Mechanical Engineering, 2018, 80 (3): 117-130.
- [18] 惠阳, 刘贵民, 闫涛, 等. 载流摩擦磨损研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2019, 33 (13): 2272-2280.
Hui Y, Liu G M, Yan T, et al. Research status and prospect of current-carrying friction and wear [J]. Materials Reports, 2019, 33 (13): 2272-2280.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部