

增强相类型对铝基复合材料载流摩擦磨损行为的影响

齐柯柯 国秀花 李韶林 宋克兴 冯江 段玉森 宋昊 王志华

Effect of reinforcing phase type on current-carrying tribological behavior of aluminum matrix composites

QI Keke, GUO Xiuhua, LI Shaolin, SONG Kexing, FENG Jiang, DUAN Yusen, SONG Hao, WANG Zhihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241017.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多粒径TiB₂颗粒增强铜基复合材料的制备与载流摩擦磨损性能

Preparation and electrical wear characteristics of copper matrix composites reinforced with mixing sized TiB₂ particles

复合材料学报. 2019, 36(10): 2348–2356 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190226.001>

尼龙6填料对碳纤维-环氧树脂复合材料力学与摩擦磨损性能的提升机制

Enhancement mechanism of nylon 6 filler on the mechanical and frictional wear properties of carbon fiber-epoxy resin composites

复合材料学报. 2023, 40(9): 5011–5025 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230110.003>

原位自生TiB₂/7050铝基复合材料高周疲劳特性

Study on the high cycle fatigue properties of in-situ TiB₂/7050 composite

复合材料学报. 2023, 40(11): 6430–6438 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230112.001>

SiO₂-竹纤维协同改性对环氧树脂基复合材料摩擦磨损性能的影响

Effect of SiO₂-bamboo fiber synergistic modification on friction and wear properties of epoxy resin matrix composites

复合材料学报. 2019, 36(7): 1633–1639 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181009.003>

20vol%体积分数纳米Al₂O₃颗粒增强铝基复合材料的高温压缩性能

High-temperature compressive properties of 20vol% volume fraction nano-Al₂O₃ particles reinforced aluminum matrix composite

复合材料学报. 2023, 40(2): 1118–1128 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220401.001>

SiC颗粒增强铝基复合材料的纯铜中间层液相扩散焊

Liquid phase diffusion bonding for SiC particles reinforced aluminum matrix composites using pure copper inter-layer

复合材料学报. 2021, 38(2): 572–582 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200703.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241017.002

增强相类型对铝基复合材料载流摩擦磨损行为的影响



分享本文

齐柯柯^{1,2,3}, 国秀花^{*1,2}, 李韶林^{1,2}, 宋克兴^{3,4}, 冯江^{1,2}, 段玉森^{1,2}, 宋昊^{1,2}, 王志华^{1,2}

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南省有色金属材料科学与工程重点实验室, 洛阳 471023;

3. 河南省科学院材料研究所, 郑州 450046; 4. 河南省先进导体材料重点实验室, 郑州 450046)

摘要: 轻质 6063 铝合金具有一定的强度和耐蚀性使其在载流摩擦领域中得到广泛应用, 但 6063 铝合金的载流摩擦性能难以满足服役需求, 因此, 亟待提升 6063 铝合金的载流摩擦磨损性能。本研究以颗粒 ($\text{TiB}_{2\text{p}}$)、纤维 (C_f) 和晶须 (SiC_w) 作为增强相, 通过放电等离子烧结 (SPS) 和热挤压工艺相结合分别制备了增强相体积分数为 5vol% 的 $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al、 C_f /6063Al 和 SiC_w /6063Al 复合材料。重点研究了增强相类型对 6063Al 基复合材料载流摩擦磨损性能的影响, 深入分析了复合材料的摩擦系数、磨损率、磨损表面形貌及磨损机制。结果表明, $\text{TiB}_{2\text{p}}$ 和 C_f 在 6063Al 基体中分布较均匀, 而 SiC_w 在复合材料中存在团聚现象。其中, $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al 的硬度 (HB 68.38) 最高, 较 6063Al 基体提升约 11.55%; C_f /6063Al 复合材料的致密度 (99.41%) 和导电率 (48.4% 国际退火铜标准 (IACS)) 最高。载流摩擦磨损试验结果表明, 不同增强相的添加会使 6063Al 基复合材料的平均摩擦系数均有不同程度的降低, 对磨损率、载流质量和磨损表面形貌均有不同的影响。对比 3 种增强相, C_f 在提升 6063Al 的载流摩擦性能方面表现最为出色, 磨损率大幅降低, 载流摩擦系数稳定性和载流效率提高明显。 C_f /6063Al 复合材料的摩擦过程出现长时间的稳定摩擦滑动阶段, 线磨损率 ($3.19 \times 10^{-5} \text{ mg/mm}$) 最小, 较 6063Al 基体减少 32.27%; 载流效率 (66.61%) 最高, 较 6063Al 基体提升 29.44%; 同时, 其微观磨损表面较平整, 存在较少的金属熔融物, 磨损机制以磨粒磨损和电弧侵蚀为主。此外, C_f /6063Al 复合材料良好的导电率可能是 C_f /6063Al 复合材料载流摩擦系数较稳定和载流效率较高的原因之一。 SiC_w /6063Al 复合材料的平均摩擦系数 (0.235) 最小, 但其线磨损率较 6063Al 基体增加 11.25%, 载流质量也较差。 $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al 复合材料的平均摩擦系数和线磨损率分别较 6063Al 基体减小 8.85% 和 7.01%, 其载流质量较差。

关键词: 铝基复合材料; TiB_2 颗粒; 碳纤维 (C_f); SiC 晶须; 载流摩擦磨损; 磨损机制**中图分类号:** TG146.2+1; TB333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)09-5310-13

Effect of reinforcing phase type on current-carrying tribological behavior of aluminum matrix composites

QI Keke^{1,2,3}, GUO Xiuhua^{*1,2}, LI Shaolin^{1,2}, SONG Kexing^{3,4}, FENG Jiang^{1,2}, DUAN Yusen^{1,2}, SONG Hao^{1,2}, WANG Zhihua^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Henan Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Processing Technology, Luoyang 471023, China;

3. Henan Academy of Sciences, Institute of Materials, Zhengzhou 450046, China; 4. Henan Provincial

Key Laboratory of Advanced Conductor Materials, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Lightweight 6063 aluminum alloy has a certain strength and corrosion resistance, which makes it widely used in the field of current-carrying friction, but the current-carrying friction performance of 6063 aluminum alloy

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-11; 录用日期: 2024-10-14; 网络首发时间: 2024-10-17 16:36:02

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241017.002>**基金项目:** 河南省科技研发计划联合基金项目 (225200810052); 145 kV 单断口真空灭弧室关键技术研究

Henan Provincial Science and Technology R&D Plan Joint Fund Project (225200810052): Research on Key Technologies of 145 kV Single-Break Vacuum Interrupter

通信作者: 国秀花, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事新型金属基复合材料的开发及其载流摩擦学应用 E-mail: guoxiuhua@haust.edu.cn**引用格式:** 齐柯柯, 国秀花, 李韶林, 等. 增强相类型对铝基复合材料载流摩擦磨损行为的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(9): 5310-5322.

QI Keke, GUO Xiuhua, LI Shaolin, et al. Effect of reinforcing phase type on current-carrying tribological behavior of aluminum matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(9): 5310-5322(in Chinese).

is difficult to meet the service requirements, so it is urgent to improve the current-carrying friction and wear performance of 6063 aluminum alloy. In this study, $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al, C_f /6063Al and SiC_w /6063Al composites with a volume fraction of 5vol% were prepared by combining spark plasma sintering (SPS) and hot extrusion processes with particles ($\text{TiB}_{2\text{p}}$), fibers (C_f) and whiskers (SiC_w) as reinforcing phases, respectively. The influence of the reinforcing phase type on the current-carrying friction and wear properties of 6063Al matrix composites was studied, and the friction coefficient, wear rate, wear surface morphology and wear mechanism of the composites were analyzed in depth. The results show that $\text{TiB}_{2\text{p}}$ and C_f are evenly distributed in the 6063Al matrix, while SiC_w is agglomerated in the composites. Among them, the hardness of $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al (HB 68.38) is the highest, which is about 11.55% higher than that of 6063Al matrix. C_f /6063Al composites have the highest density (99.41%) and electrical conductivity (48.4% IACS). The results of current-carrying friction and wear test show that the addition of different reinforcing phases will reduce the average friction coefficient of 6063Al matrix composites to different degrees, and have different effects on wear rate, current-carrying quality and wear morphology. Compared with the three reinforcing phases, C_f has the best performance in improving the current-carrying friction performance of 6063Al, with a significant reduction in wear rate, and a significant improvement in the stability of the current-carrying friction coefficient and the current-carrying efficiency. The friction process of C_f /6063Al composites showed a long-term stable friction and sliding stage, and the linear wear rate (3.19×10^{-5} mg/mm) was the smallest, which was 32.27% lower than that of 6063Al matrix. The current-carrying efficiency (66.61%) was the highest, which was 29.44% higher than that of 6063Al matrix. At the same time, the microscopic wear surface is relatively flat, there is less metal melt, and the wear mechanism is mainly abrasive wear and arc erosion. In addition, the good conductivity of C_f /6063Al composites may be one of the reasons for the stable current-carrying friction coefficient and high current-carrying efficiency of C_f /6063Al composites. The average friction coefficient (0.235) of SiC_w /6063Al composites is the smallest, but its linear wear rate is 11.25% higher than that of 6063Al matrix, and the current-carrying quality is also poor. The average friction coefficient and linear wear rate of $\text{TiB}_{2\text{p}}$ /6063Al composites are 8.85% and 7.01% lower than those of 6063Al matrix, respectively, and their current-carrying quality is poor.

Keywords: aluminum-matrix composites; $\text{TiB}_{2\text{p}}$; carbon fiber (C_f); SiC_w ; current-carrying friction wear; wear mechanism

随着航空航天、武器装备及轨道交通等领域对轻质合金材料需求的不断增加,对高质量、多用途铝合金的需求也相应增加^[1-4]。铝基复合材料已经成为国防、航空航天及民用领域极为重要的集结构和功能的一体化材料^[5]。轻质6系铝合金具有良好的导电性、高的比强度、良好的加工性能、耐腐蚀等特点^[6],比7系铝合金具有更高的疲劳强度和比2系铝合金具有更高的耐腐蚀性,适用于制作精密的摩擦接触部件^[7]。基于对载流摩擦副材料的综合考虑,单一的轻质6系铝合金无法满足服役需求,研究出优异承载电流、耐摩擦磨损的高强度铝基复合材料,是降低载流摩擦副在服役过程中材料损伤和失效的关键。

载流摩擦工况下,机械磨损和电气磨损同时发生,载流摩擦副的界面材料磨损消耗是导致其性能下降和失效的重要原因之一,主要磨损机制为磨粒磨损、粘着磨损、氧化磨损和电弧侵蚀等^[3,8-12]。铝基复合材料的耐磨性能主要取决于增强相种类、尺寸、形状以及与基体的结合强度^[3,13-14]。通常在铝基体中加入颗粒、纤维、晶须等类型的

增强相,使铝基复合材料具有更好的力学性能和耐摩擦磨损性能^[3,15]。 $\text{TiB}_{2\text{p}}$ 等硬质陶瓷颗粒由于具有高硬度、高模量、高耐磨性等优点在金属基复合材料领域得到了广泛的应用^[16-18]。同时,碳纤维、碳纳米管、石墨等碳材料因其优异的力学性能、耐高温、抗摩擦和其自润滑性,被认为是耐摩擦磨损复合材料的重要增强相材料^[5,19-28]。作为固体润滑剂,碳的存在可以平稳摩擦过程、降低摩擦系数和磨损率等^[29-30]。晶须材料也可以提升铝基复合材料的耐磨性,其中 SiC_w 是已合成晶须中硬度最高、模量最大的晶须^[5,25]。 SiC_w 增强铝基复合材料具有高强度高耐磨性等特点^[31]。Zhong等^[32]制备了40vol% ($\text{TiB}_{2\text{p}}\text{-TiC}_\text{p}$)/Al-Cu-Mg复合材料,发现亚微米级的 $\text{TiB}_{2\text{p}}$ 具有较好的界面结合能力,可以保持复合材料的刚性,抵抗塑性流动。Cao等^[30]制备了碳纤维增强AA5052块体复合材料,磨擦试验表明,铝基复合材料的磨损过程更加稳定,磨损体积损失降低70%以上。碳纤维在铝基体中可以抑制微裂纹的形核和扩展,有效防止材料在磨损过程中的剥落,从而提高摩

擦学性能。Rouhi 等^[17]制备了 10vol% 的 SiC_w/Al 复合材料, 进行参数为 5 N、0.1 m/s、1 000 m 的销-盘式磨损实验, 发现其磨损率较基体下降 90%, 表现出更稳定的摩擦性能, 耐磨性的提高是由于在磨损表面形成了保护性的机械混合层。可见, 降低接触界面的磨损程度是提高载流摩擦副可靠性和稳定性的关键^[8]。陶瓷颗粒的加入对降低磨损率有显著效果, 但摩擦时材料的磨粒磨损机制不利于摩擦过程, 会增大磨损率, 后续研究应该尽量避免。

目前, 对于铝基复合材料载流摩擦磨损研究主要集中于单一增强相改变其体积分数或表面涂层对材料干摩擦磨损性能的影响^[13, 33-35], 而针对载流工况下增强相种类对复合材料载流摩擦磨损性能的研究较少。本文选用颗粒 (TiB_{2p})、纤维 (C_f) 和晶须 (SiC_w) 作为增强相, 采用放电等离子

烧结 (SPS) 和热挤压的工艺结合制备 5vol% 的 6063Al 基复合材料, 并对其微观组织和基础性能进行对比分析, 同时探究铝基复合材料在载流工况下的摩擦系数、磨损率、磨损形貌并总结分析其磨损机制, 为载流摩擦应用下铝合金的摩擦磨损行为研究提供一定的思路和理论依据。

1 实验材料及方法

本实验所用基体材料为 6063 铝合金粉 (平均粒径为 6~9 μm, 长沙天久金属材料有限公司, 其名义成分如表 1 所示), 增强相材料为 TiB₂ 颗粒 (平均粒径为 2 μm, 上海卜微应用技术有限公司)、碳纤维 (C_f) (平均长度为 150 μm, 平均直径为 7~8 μm, 上海新翱复合材料科技研发中心)、SiC 晶须 (平均长度为 5~10 μm, 平均直径为 0.5 μm)。其微观形貌如图 1 所示。

表 1 6063 铝合金的名义成分表
Table 1 Nominal composition list of 6063Al alloy

6063Al alloy	Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn
Content/wt%	Bal.	0.45-0.90	0.20-0.60	0.35	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

Note: Bal.—Balance.

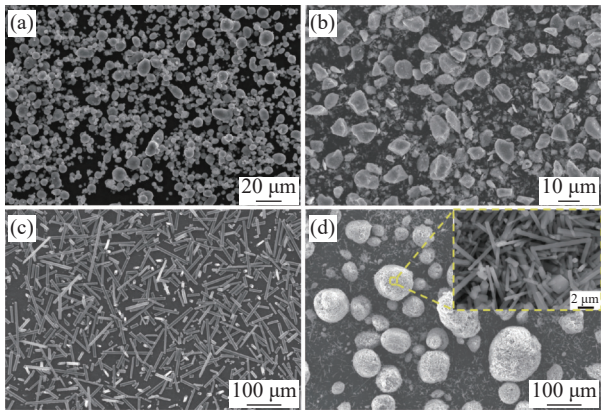


图 1 原材料的 SEM 图像: (a) 6063 铝合金粉; (b) TiB₂ 颗粒; (c) 碳纤维; (d) SiC 晶须

Fig. 1 SEM images of the raw material: (a) 6063Al alloy powders; (b) TiB_{2p}; (c) C_f; (d) SiC_w

采用 SPS 烧结法和热挤压法相结合制备 TiB_{2p}/6063Al、C_f/6063Al、SiC_w/6063Al 3 种复合材料, 同时, 6063Al 基体作为对比材料采用相同工艺进行制备, 其制备工艺过程如下: (1) 翻转式混粉: 将 6063 铝合金粉、增强相粉末和适量玛瑙球按比例装入球磨罐中 (增强相体积分数为 5vol%), 大中小规格的玛瑙球质量比为 1 : 3 : 6, 球料比为 1 : 1。将球磨罐固定在卧式机床 (CD6140A, 大连

机床厂) 上, 设置翻转转速为 45 r/min, 混合时间 8 h。图 2 为混粉结束后复合粉末的微观形貌。可以看出, TiB_{2p}、C_f 和 SiC_w 均在基体粉末中均匀分布, 这有利于后续烧结体的高致密性; (2) SPS 烧结: 利用 FHP-828 型快速热压烧结炉 (上海哈腾电炉设备有限公司) 烧结成型, 烧结温度为 500℃, 烧结压力为 30 MPa, 保温保压 5 min, 制成直径和高度为 Φ40 mm×30 mm 的圆柱形试样; (3) 热

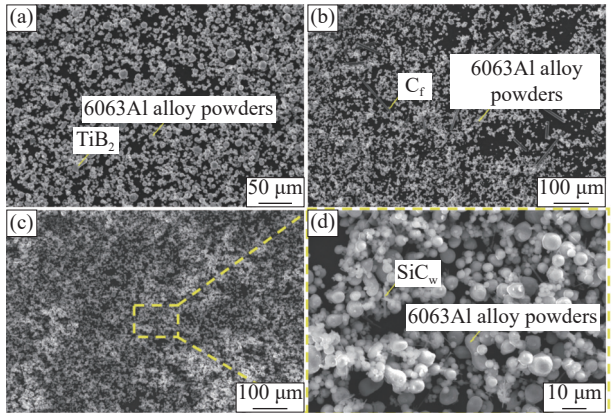


图 2 混粉后的 6063Al 复合粉末 SEM 图像: (a) TiB_{2p}/6063Al; (b) C_f/6063Al; ((c), (d)) SiC_w/6063Al

Fig. 2 SEM images of 6063Al composite powder after mixing: (a) TiB_{2p}/6063Al; (b) C_f/6063Al; ((c), (d)) SiC_w/6063Al

挤压：复合材料在 450℃ 的温度下保温 3 h 后，利用四柱液压机 (YA32-315A) 对烧结坯进行热挤压成型，挤压比约为 7 : 1，最终制成直径为 Φ15 mm 的棒材。

采用钨灯丝扫描电子显微镜 (SEM, JSM-IT100, JEOL, 日本) 对 6063Al 基复合材料的微观组织形貌进行表征。采用 Sigma2008B1 涡流电导率仪测试复合材料的导电率。采用 320HBS-3000 型数显布氏硬度计 (钉钎精密仪器 (深圳) 有限公司) 测试复合材料的硬度 (压头为 Φ5 mm 的碳化钨硬质合金球，测试载荷为 2 451.66 N，保压时间为 30 s)。采用阿基米德排水法测量计算复合材料的致密度，测量湿重时介质为去离子水 (25℃)。根据下式计算材料的实际密度^[36]：

$$\rho_{\text{实际}} = \frac{M_{\text{干}}}{M_{\text{干}} - M_{\text{湿}}} (\rho_{\text{水}} - \rho_{\text{空}}) + \rho_{\text{空}} \tag{1}$$

式中： $\rho_{\text{实际}}$ 为材料的实际密度 (g/cm³)； $M_{\text{干}}$ 和 $M_{\text{湿}}$ 分别是材料在空气和液体介质中测得的质量 (g)； $\rho_{\text{水}}$ 为常温去离子水的密度 (g/cm³)； $\rho_{\text{空}}$ 为空气的密度 (g/cm³)。用实际密度除以理论密度即为材料的致密度。

采用 MTF-CF200 特种材料电损伤测试系统 (南京神源生智能科技有限公司) 对 6063Al 基复合材料的载流摩擦磨损性能进行测试，其中，加载电流由大概率直流电源 (RU-S100150-3U，万瑞达电气有限公司) 提供，测试系统示意图如图 3 所示。该设备为销-盘式摩擦试验系统，本试验所用的销材料为 6063Al 基复合材料，尺寸为 Φ6 mm×15 mm，盘材料为 CuCrZr 合金，其尺寸为 Φ130 mm×10 mm。在试验前将销试样的摩擦面加工出半径为 0.5 mm、角度为 45°的倒角，此时销试样的截面积约为 19.63 mm²。工作参数设定：线速度为 12 m/s、法向力为 30 N、加载电流和电压分别为 20 A 和 22 V。此时摩擦面的电流密度约为 1.02 A/mm²。试验前后使用精度为 0.1 mg 的高精度电子天平 (LS220A，上海天美天平仪器有限公司) 测量销试样的质量。根据公式 (2) 计算磨损前后材料的线磨损率^[37]：

$$W = \frac{\Delta G}{vt} \tag{2}$$

式中： W 为线磨损率 (mg/m)； ΔG 为磨损前后复合材料的质量损失 (mg)； v 为线速度 (m/s)； t 是磨损时间 (s)。

根据式 (3)~(4) 计算材料的载流效率，公式 (3)、(5)、(6) 计算其载流稳定性^[37]：

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

$$\eta = \frac{\bar{I}}{I_0} \times 100\% \tag{4}$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{I})^2} \tag{5}$$

$$\delta = \frac{\sigma_A}{\bar{I}} \times 100\% \tag{6}$$

式中： $\bar{I}$ 为试验过程中实际电流的平均值 (A)； x_i 为瞬时电流值 (A)； η 为载流效率 (%)， I_0 为设定电流值 (A)； σ_A 为实际电流的标准差 (A)； δ 为载流稳定性 (%)。

采用钨灯丝扫描电子显微镜 (SEM, JSM-IT100, JEOL, 日本) 观察磨损后销试样表面的微观形貌；采用奥林巴斯 OLS5100 激光共聚焦显微镜观察磨损后销试样表面的三维形貌。

2 结果及讨论

2.1 6063Al 基复合材料微观组织

图 4 为 6063Al 基复合材料的 SEM 微观组织。可以看出，图 4(a) 中的白色颗粒为 TiB_{2p}，大部分均匀地分布在 6063Al 基体 (灰色区域) 中，表现为与基体之间良好的界面结合。TiB_{2p}/6063Al 复合材料表面存在小部分的空洞缺陷 (黑色区域)，这些缺陷一部分是在磨样抛光过程中 TiB_{2p} 脱落造成的，一部分是 TiB_{2p} 少量聚集使得颗粒之间没有基体填充造成的 (图 4(a₁))。图 4(b) 中的圆形黑点为 C_f，可以观察到 C_f 在 6063Al 基体中分布较均匀，与 6063Al 基体之间结合紧密，未见空洞、裂纹等缺陷。图 4(b₁) 为 C_f/6063Al 复合材料沿挤压方向剖面的微观组织，可以观察到大部分 C_f 沿着平行于热挤压的方向择优排布。图 4(c) 中的亮白色部分为 SiC_w，黑色部分的中心及周围是 SiC_w 出现大量团聚的区域。将团聚区域放大观察 (图 4(c₁))，发现 SiC_w 聚集区域的中心形成约 20 μm 的微孔，并且微孔的边缘部分出现晶须之间的相互搭桥现象。这是由于聚集区域周围的 SiC_w 与 6063Al 基体的界面结合最薄弱，裂纹容易在此区域形成和扩展。试样在进行打磨抛光时，试样受力方向与晶须接触处垂直，缺陷处会形成微小的裂纹，随着裂纹扩展，团聚区域的中心材料容易脱离，形成微孔。而基体中团聚的晶须也会导致材料内部中

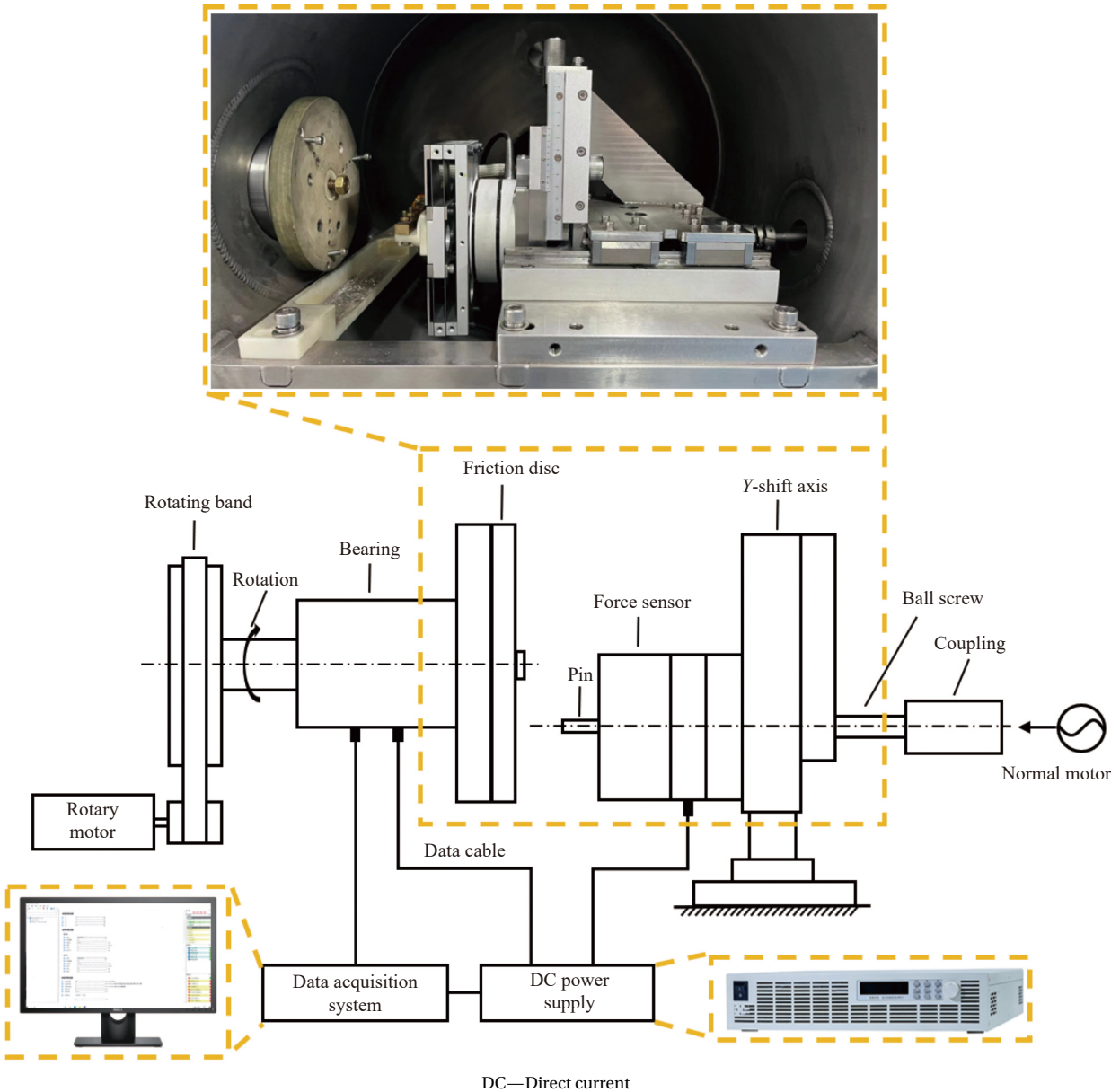


图3 销-盘式 MTF-CF200 特种材料电损伤测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pin-disc MTF-CF200 special material electrical damage test system

出现许多孔隙等微缺陷。

2.2 6063Al 基复合材料的基础性能

表 2 为 6063Al 基复合材料的致密度、硬度和导电率。可以看出，不同增强相的添加会对 6063Al 的硬度有不同程度的提升作用，而对其致密度和导电率会有不同程度的降低作用。其中， $C_f/6063Al$ 复合材料和 6063Al 基体的致密度均达到 99% 以上，材料较致密。 $TiB_{2p}/6063Al$ 和 $SiC_w/6063Al$ 复合材料的致密度分别在 98% 和 97% 左右，这是由于两种增强相与基体之间的界面结合相对较弱，且在基体中存在增强相的部分聚集，使得

基体与增强相之间不能完全啮合，复合材料中的局部孔隙数目增加，导致复合材料的致密度降低。6063Al 基复合材料的硬度均高于 6063Al 基体，这是由于增强相作为第二相，可以阻碍位错运动，增强了复合材料的抗塑性变形能力，从而提高了 6063Al 基复合材料的硬度。其中， $TiB_{2p}/6063Al$ 的硬度最高，其值为 HB 68.38，较 6063Al 基体提升 11.55%； $C_f/6063Al$ 和 $SiC_w/6063Al$ 的硬度分别较 6063Al 基体提升 3.43% 和 10.51%。这是由于 TiB_{2p} 属于硬质陶瓷相，硬度较高的细小颗粒均匀分布在 6063Al 基体中，对复合材料硬度的提升效果优

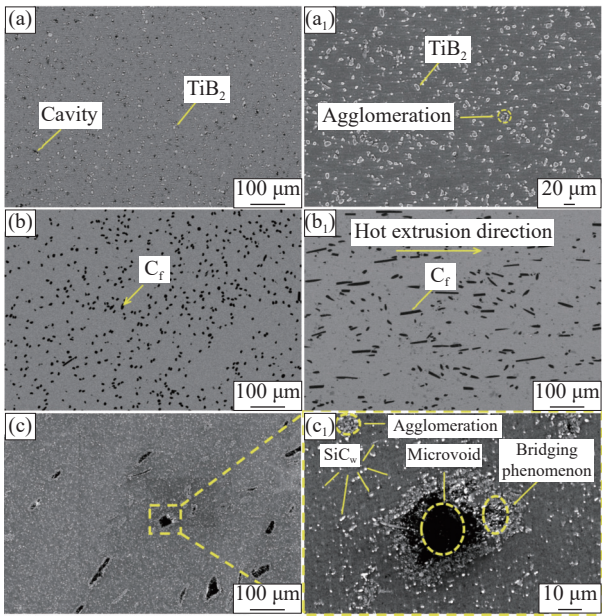


图4 6063Al基复合材料的SEM微观组织形貌：((a), (a₁)) TiB_{2p}/6063Al；((b), (b₁)) C_f/6063Al；((c), (c₁)) SiC_w/6063Al

Fig. 4 SEM microstructure morphology of 6063Al matrix composites: ((a), (a₁)) TiB_{2p}/6063Al; ((b), (b₁)) C_f/6063Al; ((c), (c₁)) SiC_w/6063Al

于另外两种增强相。另外，SiC_w/6063Al复合材料的硬度虽然也较高，但材料表面和内部的微孔缺陷较多，且复合材料的致密度较低，这对复合材料的力学性能有一定的影响。

增强相的加入导致6063Al基复合材料中电子传输的界面增多，对电子的散射作用增强，金属中自由电子运动的阻力增大，导致导电率的下降^[9]，因此，6063Al基复合材料的导电率均低于6063Al基体。其中，C_f/6063Al的导电率(48.40% IACS)下降最少，较6063Al基体降低3.97%；TiB_{2p}/6063Al和SiC_w/6063Al的导电率分别较6063Al基体下降11.67%和9.42%。这是由于C_f/6063Al复合材料的致密度优于另外两种复合材料，材料内部的缺陷较少，对电子的散射作用相对较弱；C_f长径比约为16，其电阻率具有各向异性，沿轴向的电阻率较低，而C_f在基体中大部分沿挤压方向择优排布(图4(b₁))，这缓解了界面增多带来的铝基复合材

料导电率下降现象。TiB_{2p}虽与C_f的整体电阻率相差不大^[38]，但TiB_{2p}的粒径较小，在相同体积分数下分布在基体中，TiB_{2p}/6063Al比C_f/6063Al电子传输的界面数量多，对电子散射作用较强，故TiB_{2p}/6063Al的导电率较低。在SiC_w/6063Al复合材料中SiC_w存在团聚，团聚处有空洞等缺陷会影响其导电率。综上，当3种增强相以相同的体积分数添加时，TiB_{2p}/6063Al复合材料的硬度最高，C_f/6063Al复合材料的导电率和致密度受增强相的影响最小。

2.3 6063Al基复合材料的载流摩擦磨损性能

2.3.1 摩擦系数和磨损率

图5和图6分别显示了6063Al基复合材料载流摩擦系数的瞬时波动值、均值和线磨损率。由图5和图6中的摩擦系数均值可以看出，不同增强相类型对6063Al基复合材料载流摩擦系数的影响不同。由图5(a)可以看出，当摩擦时间为0~60 s时，TiB_{2p}/6063Al复合材料的摩擦系数波动较大；60 s后，摩擦系数逐渐平稳。整体来看，TiB_{2p}/6063Al复合材料的摩擦系数整体变化趋势较6063Al基体平稳，平均摩擦系数(0.309)较6063Al基体降低8.85%，这说明添加TiB_{2p}可降低摩擦系数，使摩擦过程更加平稳。由图5(b)可以看出，当摩擦时间为0~30 s时，C_f/6063Al复合材料的摩擦系数呈现小范围的波动；30~45 s之间，摩擦系数出现较大波动，这可能是由于摩擦形成的机械层的剥落导致的；60 s后，摩擦系数在0.24左右的极小数值范围内波动，出现平稳滑动阶段，其平均摩擦系数(0.257)较6063Al基体降低24.19%，说明C_f的添加极大地提升了复合材料的摩擦性能。由图5(c)可以看出，SiC_w/6063Al复合材料的摩擦系数整体波动较其余材料最为明显，但是其平均摩擦系数(0.235)最小，说明SiC_w的添加对降低复合材料的载流摩擦系数具有一定的效果，但是对摩擦过程的稳定性提升并不明显。

由摩擦系数分析可知，C_f/6063Al复合材料的

表2 6063Al基复合材料的基础性能

Table 2 Basic properties of 6063Al matrix composites

Aluminum matrix and composites	Relative density/%	Hardness HB	Electrical conductivity/% IACS
TiB _{2p} /6063Al	98.63	68.38(±0.56)	44.52(±0.18)
C _f /6063Al	99.41	63.40(±0.71)	48.40(±0.07)
SiC _w /6063Al	97.57	67.74(±1.28)	45.65(±0.16)
6063Al	99.87	61.30(±0.48)	50.40(±0.06)

Note: IACS—International Annealed Copper Standard.

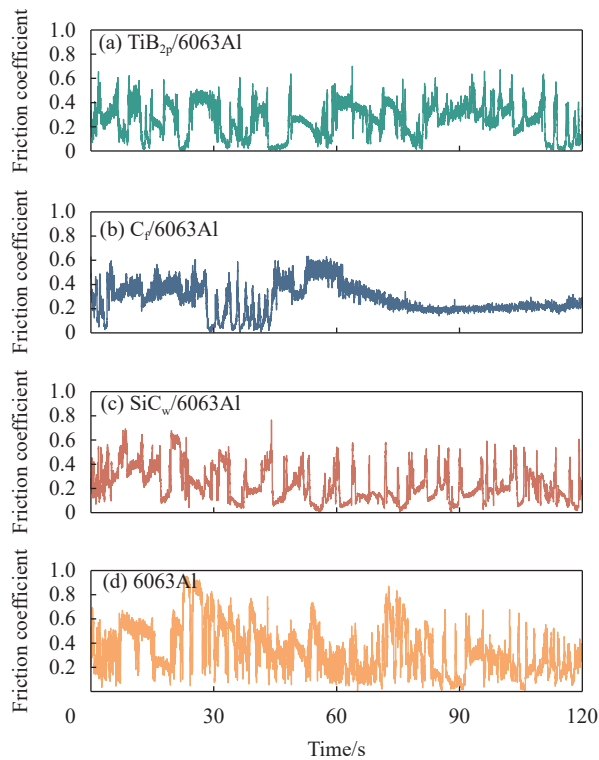


图5 6063Al 基复合材料的瞬时摩擦系数变化规律

Fig. 5 Variation of instantaneous friction coefficient of 6063Al matrix composites

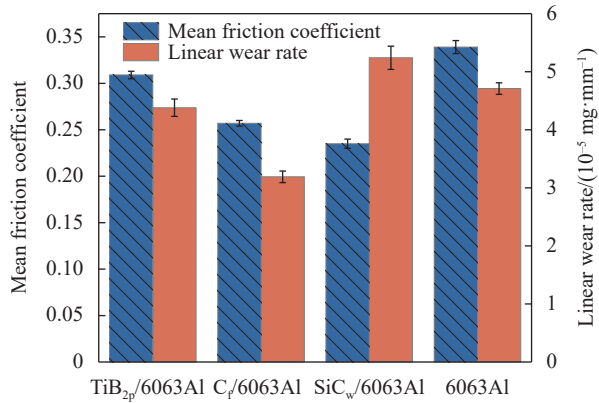


图6 6063Al 基复合材料的摩擦系数均值和线磨损率

Fig. 6 Mean of the coefficient of friction and linear wear rate of 6063Al matrix composites

摩擦性能最优。在经历约 60 s 磨合阶段后即进入平稳摩擦阶段，这得益于 C_f 本身属于良好的润滑相，且在摩擦时可以在磨损表面形成一层碳膜^[39]。碳润滑膜的存在可以减少接触和粘着，随着摩擦时间的延长，摩擦表面温度升高，此时摩擦系数的降低和平稳主要得益于这层碳膜的润滑作用^[37]。此外， $C_f/6063Al$ 复合材料的导电率较 6063Al 基体下降最少，材料传输电流的阻力较小，这也是摩

擦系数较稳定的原因之一。 $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料的硬度最高，在摩擦时颗粒支撑点较多，凸起的 TiB_{2p} 减小了基体与磨盘之间的接触面积，使摩擦阻力减小，并且支撑点的存在可以加快热量的扩散，使得摩擦系数减小，但随时变化的接触面积使得其承载电流的能力减弱，摩擦稳定性较低^[10]。 $SiC_w/6063Al$ 复合材料表面存在较多微孔缺陷，缺陷中的 SiC_w 容易脱落，缺陷增大，裂纹随之扩展。随着磨损的增加， SiC_w 脱落得越来越多，机械层也更易被磨掉成磨屑飞出，使得摩擦系数波动较大。同时，脱离基体的大量 SiC_w 未与基体形成磨屑掉落前，在摩擦面上 SiC_w 的嵌入、垂直在基体中分布和脱落的材料在摩擦面上的滚动可能对摩擦副间的摩擦具有正向作用，故其摩擦系数整体较小。

由图 6 中 6063Al 基复合材料的线磨损率可以看出，6063Al 基体的线磨损率为 $4.71 \times 10^{-5} \text{ mg/mm}$ 。3 种复合材料中， $C_f/6063Al$ 复合材料的线磨损率 ($3.19 \times 10^{-5} \text{ mg/mm}$) 最低，较 6063Al 基体降低了 32.27%。 $TiB_{2p}/6063Al$ 的线磨损率较 6063Al 基体降低 7.01%，而 $SiC_w/6063Al$ 的线磨损较 6063Al 基体升高 11.25%。结合摩擦系数可以看出，除了 $SiC_w/6063Al$ 复合材料外，其余材料的摩擦系数与磨损率基本呈正相关，这与 Zhai 等^[40]的研究结果一致。在空载和室温条件下，电流对晶格间原子排列的影响相对较小，但摩擦会引起晶粒的塑性变形，产生大量的层错、位错等缺陷，导致原子间的不规则排列，这阻碍了电流的分布和流动，使得局部的焦耳热增加，晶粒在一定程度上软化，随着热量的积累和磨损加剧，基体材料会因软化、熔化发生粘着磨损而被消耗^[41]。在磨损过程中，接触表面即将脱落的增强相材料与软化的铝基体继续参与磨损，在力的作用形成了一层机械混合层，对复合材料的次表面起到好的保护作用。

随着磨损的增加，原有的机械层被破坏，磨损率增加，进而形成新的机械层^[9]。 $C_f/6063Al$ 复合材料的线磨损率最小，耐磨损性能最优。碳纤维轴向力学性能的各向异性使得 $C_f/6063Al$ 复合材料在摩擦时纤维能够承担主要的载荷，这可以抑制裂纹的形成和扩展，有效地防止材料在磨损过程中的脱落，从而减小材料的磨损。在摩擦时， $C_f/6063Al$ 复合材料受到机械磨损和电磨损的共同作用，基体材料逐渐损耗，碳材料在磨损表面聚

集、研磨、破碎，形成一层碳润滑相^[42]，这能有效减少材料的机械磨损。同时， C_f 具有一定的分散和稳定电弧的作用，可使材料避免受到集中的电弧侵蚀，有效减少了材料的电磨损^[37]。 $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料在摩擦时，随着6063Al基体的损耗，硬质颗粒会暴露出来直接与摩擦盘接触滑动。 $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料的硬度虽然最高，在一定程度上可以增强材料抵抗塑性变形的能力，但 TiB_{2p} 与6063Al之间的界面结合属于机械结合，结合强度不高，在摩擦时 TiB_{2p} 容易被拖拽出形成磨粒，导致磨损表面的粗糙度增大，摩擦副之间的接触面积减少，电流密度增大，这会使接触面“起弧”，加重电磨损的程度，从而使得其线磨损率较6063Al基体仅降低了7.01%。 $SiC_w/6063Al$ 复合材料的表面存在大量的微孔等缺陷，在电流的条件下，微孔等缺陷处电流密集，会产生严重的电弧侵蚀。与基体结合不牢固的 SiC_w 脱落时，摩擦表面会形成大量的电火花，同时产生大量热能对表面进行侵蚀熔化。由于 $SiC_w/6063Al$ 复合材料的内部缺陷较多，使得磨损表面材料剥落速度加快，这严重影响了复合材料的耐磨损性能。

2.3.2 载流质量

载流质量包括载流效率和载流稳定性，载流效率是载流摩擦过程中电信号传导的效率，该值越大，载流能力越强；载流稳定性是衡量载流摩擦副传输电流稳定性的特征参数，该值越小，代表载流越稳定^[9-10]。

图7是6063Al基复合材料的载流效率和载流稳定性。可以看出，6063Al基复合材料的载流效率均不超过70%，其中 $C_f/6063Al$ 复合材料的载流效率(66.61%)最高，较6063Al基体提升29.44%， $TiB_{2p}/6063Al$ 和 $SiC_w/6063Al$ 复合材料的载流效率分别较6063Al基体降低15.02%和17.39%。载流效率与摩擦接触面的平整程度、接触情况及材料的导电率有关^[9, 20, 42]。6063Al基体的导电率最高，增强相加入后，复合材料的导电率下降，这是6063Al基体的载流效率比复合材料的载流效率高的重要原因之一。其中， $C_f/6063Al$ 复合材料的载流效率较6063Al基体提升较多，这是由于：(1) $C_f/6063Al$ 复合材料的导电率下降最少，承载和传输电子的效率较高；(2)磨损表面的碳材料，不仅起到分散电弧的作用，而且增加了摩擦接触面的润滑性，破碎的纤维填充在软化的基体表面，使得摩擦副

接触面积的增大和电流更加均匀地分布；(3)由瞬时摩擦系数的稳定阶段可知，摩擦副之间的接触情况较好，这是由于 $C_f/6063Al$ 复合材料载流效率较6063Al基体得到了大幅度地提升。然而，当 C_f 被磨断、破碎或拔出重新分布在基体表面时，引起磨损表面的凹凸会影响材料的载流稳定性。在摩擦时， $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料中的 TiB_{2p} 会降低摩擦面的平整度，使得摩擦副的实际接触面积减小，电流密度增加，电阻增大，接触面间的状态不稳定，导致载流效率和稳定性较差。在摩擦时， $SiC_w/6063Al$ 复合材料的磨损最严重，同时材料表面的缺陷会引起大量微小电弧的产生，加剧磨损，这都导致 $SiC_w/6063Al$ 复合材料的载流质量最差。

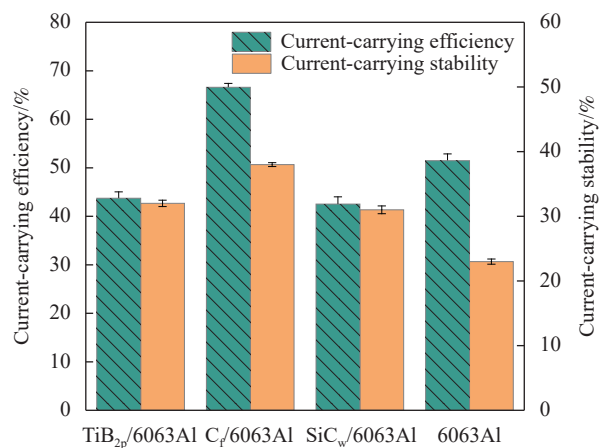


图7 6063Al 基复合材料的载流效率和载流稳定性
Fig. 7 Current carrying efficiency and current carrying stability of 6063Al matrix composites

2.4 6063Al 复合材料磨损微观形貌及磨损机制

2.4.1 磨损微观形貌

图8是6063Al基复合材料磨损表面的微观形貌。可以看出，6063Al基复合材料的磨损表面均以熔融烧蚀、片层状磨损、犁沟等形貌为主。

由图8(a)可以看出， $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料的磨损表面存在少许磨粒、大面积的金属熔融区、大量的金属熔融块和局部片状磨损区，犁沟区域比6063Al基体磨损表面浅。放大倍数观察发现(图8(b)和8(c))，熔融区域存在珊瑚状熔融物和尺寸较小的岛状熔融物，粘着痕迹明显，磨损机制主要以磨粒磨损、粘着磨损和电弧侵蚀为主。在摩擦磨损过程中，电流的加入使销试样和摩擦盘之间产生电弧，接触面温度升高，最终热量累积导致磨损表面被烧蚀产生烧蚀坑和金属熔融物。

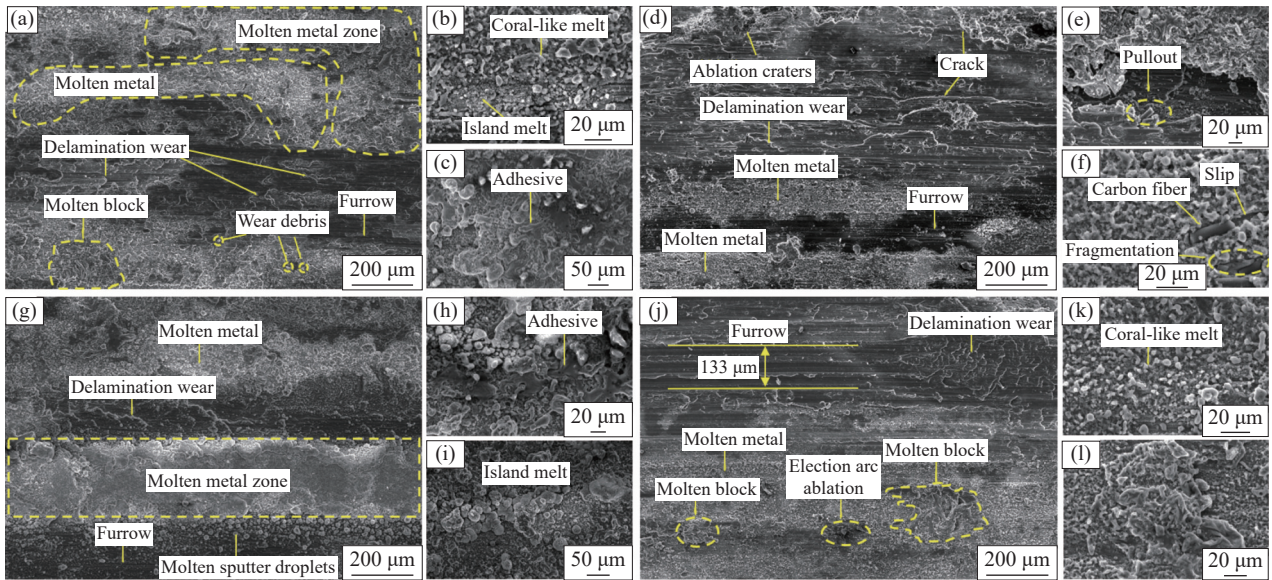


图 8 6063Al 基复合材料磨损表面的微观形貌: ((a)~(c)) TiB_{2p}/6063Al; ((d)~(f)) C_f/6063Al; ((g)~(i)) SiC_w/6063Al; ((j)~(l)) 6063Al

Fig. 8 Microscopic morphologies of wear surfaces of 6063Al matrix composites: ((a)~(c)) TiB_{2p}/6063Al; ((d)~(f)) C_f/6063Al; ((g)~(i)) SiC_w/6063Al; ((j)~(l)) 6063Al

由图 8(d) 可以看出, C_f/6063Al 复合材料的磨损表面较其余铝基复合材料更平整, 可以清晰地观察到金属熔化区形成的熔体较小, 犁沟深度较 6063Al 材料的浅, 并伴随有裂纹产生。由图 8(e) 和 8(f) 可以看出, C_f 裸露在磨损表面, 一部分 C_f 被破碎和拔出, 粘着现象减轻。可以看到明显的剥落坑(图 8(e)) 和纤维在基体表面轻微的滑动现象(图 8(f)), 磨损机制主要以磨粒磨损和电弧侵蚀为主。摩擦过程中, C_f 起主要的承载作用^[43-44], 随着材料的损耗, 碳纤维在磨损表面研磨和破碎, 形成碳润滑层^[39, 43], 这极大地降低了复合材料的摩擦系数和磨损率。

由图 8(g) 可以看出, SiC_w/6063Al 复合材料的磨损表面的片层状磨损区域较小, 存在大面积的金属熔融区和小尺寸熔块, 出现严重的电弧侵蚀。从图 8(h) 和 8(i) 可以看出, 熔融区域周围伴随有许多岛状熔融金属冷却后的凝固液滴, 电弧烧蚀导致磨损表面局部熔化严重, 粘着痕迹较多, 存在许多粘着块, 其磨损机制主要以粘着磨损、磨粒磨损和电气磨损为主。

由图 8(j) 可以看出, 6063Al 基体材料的磨损表面沿摩擦方向存在较深且数量较多的犁沟和大范围的片层状磨损区。犁沟区域附近存在机械混合层, 在摩擦时容易产生粘着磨损。电流作用下, 6063Al 基体材料出现电弧烧蚀区, 金属熔化形成尺寸较大的熔融区, 该区域附近存在许多珊瑚状

熔融物(图 8(k)) 和大尺寸的熔块(图 8(l))。此外, 磨损表面清晰可见一条宽约 133 μm 左右的犁沟带, 这可能是熔融液态金属铝在电弧烧蚀后产生的液滴沿着摩擦方向发生瞬时冷焊, 形成的磨粒造成磨粒磨损的结果。磨损机制主要以粘着磨损、磨粒磨损和电弧侵蚀为主。

2.4.2 磨损三维形貌

图 9 是 6063Al 基复合材料磨损表面的三维高度示意图。可以看出, 磨损率较高的 6063Al 基体材料及 SiC_w/6063Al 复合材料的表面存在较少的熔融金属残留物, 磨损率较低的 TiB_{2p}/6063Al 和 C_f/6063Al 复合材料表面的表面凸起较多。这是由

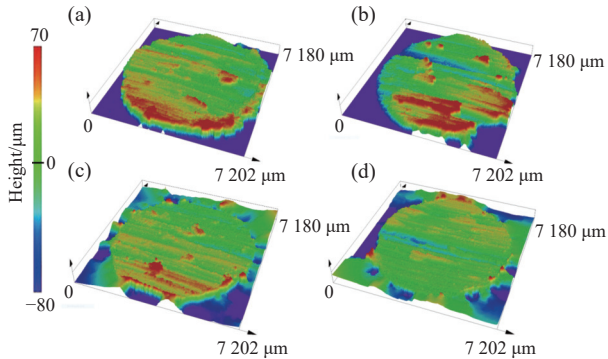


图 9 6063Al 基复合材料磨损表面的三维高度示意图: (a) TiB_{2p}/6063Al; (b) C_f/6063Al; (c) SiC_w/6063Al; (d) 6063Al

Fig. 9 The three-dimensional height schematic diagram of the wear surface of a 6063Al matrix composite: (a) TiB_{2p}/6063Al; (b) C_f/6063Al; (c) SiC_w/6063Al; (d) 6063Al

于 6063Al 基体在摩擦时粘着磨损较严重，没有增强相的支撑和承载作用，表面软化和熔化的部分会更易形成磨屑被磨损消耗，使得最终的磨损面高度差较小。SiC_w/6063Al 复合材料在摩擦时由于 SiC_w 的易脱落性、复合材料表面和内部的缺陷使得材料容易脱离飞溅形成磨屑，其磨损表面存在一部分凸起。在摩擦时，TiB_{2p} 和 C_f 阻碍基体的剥落作用更好，机械层维持时间较长。值得注意的是，C_f 对基体的承载作用最佳，机械层留在 C_f/6063Al 复合材料磨损表面的面积更大、时间更久，这有利于载流摩擦磨损的进行，同时降低磨损率。

2.4.3 磨损机制

图 10 是 6063Al 基复合材料的磨损机制示意图。由磨损表面的微观形貌分析可知，TiB_{2p}/6063Al 复合材料的磨损机制主要以磨粒磨损、粘着磨损和电弧侵蚀为主。由图 10(a) 可以看出，由于 TiB_{2p}/6063Al 复合材料的硬度较高，在摩擦过程中，TiB_{2p} 起到支撑作用，有利于加快摩擦表面的热量散失，减少了粘着磨损痕迹。同时，TiB_{2p} 的存在提高基体中增强相周围的位错密度^[10, 45]，减少裂

纹的萌生和扩展，也阻碍了基体材料在摩擦高热时的金属流动。当基体软化时，TiB_{2p} 嵌入到基体中继续参与磨损，从而阻碍材料的磨损脱落，降低了磨损率。C_f/6063Al 复合材料的磨损机制主要以磨粒磨损和电弧侵蚀为主。由图 10(b) 可以看出，C_f 作为减磨和润滑材料，摩擦时起到承担主要载荷和分散电弧的作用，随着磨损的进行，破碎、裸露和拔出(图 8(b₁))的 C_f 在基体表面形成一层碳润滑膜^[37]，不仅起到固体润滑的作用，而且阻止了摩擦副金属间的直接接触，可有效地改善材料的摩擦系数和降低磨损率。SiC_w/6063Al 复合材料的磨损机制主要以粘着磨损、磨粒磨损和电气磨损为主。由图 10(c) 可以看出，SiC_w/6063Al 复合材料的硬度虽然比基体材料高，但是 SiC_w 与基体材料结合较弱，且表面及内部存在大量缺陷，导致摩擦时缺陷处的 SiC_w 会大量脱落，销试样在摩擦盘表面上的反复挤压和摩擦面上的切削力使磨损更加严重，在电流和摩擦力的作用下，与熔化后飞溅的金属基体一同脱落，这使得 SiC_w/6063Al 复合材料的整体摩擦系数不稳定，磨损率也高于基体材料。

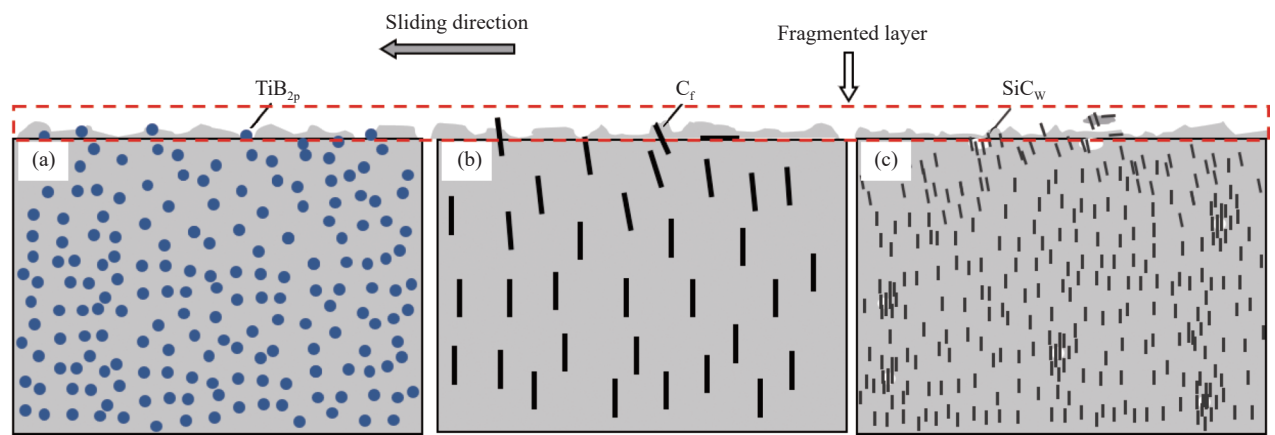


图 10 6063Al 基复合材料的磨损机制示意图：(a) TiB_{2p}/6063Al；(b) C_f/6063Al；(c) SiC_w/6063Al

Fig. 10 Schematic diagram of the wear mechanism of 6063Al matrix composites: (a) TiB_{2p}/6063Al; (b) C_f/6063Al; (c) SiC_w/6063Al

3 结论

(1) 相同体积分数下，TiB₂ 颗粒 (TiB_{2p}) 和纤维 (C_f) 在 6063Al 基体中分布较均匀，而晶须 (SiC_w)/6063Al 复合材料中的 SiC_w 存在部分团聚现象。不同类型增强相对 6063Al 基体的硬度有不同幅度的提升效果，而致密度和导电率均有不同程度的降低。其中，TiB_{2p}/6063Al 复合材料的硬度最高，其值为 HB 68.38，较 6063Al 提升 11.55%，C_f/6063Al 和 SiC_w/6063Al 的硬度较基体分别提升 3.43% 和

10.51%。

(2) 不同类型增强相的添加使 6063Al 基复合材料摩擦系数的稳定性和均值有不同程度的降低，对磨损率和载流质量的影响不同。综合来看，C_f/6063Al 复合材料的载流摩擦磨损性能最优异，载流摩擦系数的波动性最小，出现稳定摩擦滑动阶段。同时，其线磨损率最小、载流效率最高，线磨损率 (3.19×10⁻⁵ mg/mm) 较 6063Al 减少 32.27%，载流效率 (66.61%) 较 6063Al 基体提升 29.44%。

(3) 载流摩擦条件下, $C_f/6063Al$ 复合材料的磨损表面拥有更平整的微观形貌, 较少的金熔融属物。 C_f 承担主要载荷, 并在磨损表面形成一层碳润滑膜, 磨损机制主要以磨粒磨损和电弧侵蚀为主。 $TiB_{2p}/6063Al$ 复合材料的磨损机制主要以磨粒磨损、粘着磨损和电弧侵蚀为主, $SiC_w/6063Al$ 复合材料主要以粘着磨损、电气磨损为主。

参考文献:

- [1] LI S S, SU Y S, ZHU X H, et al. Enhanced mechanical behavior and fabrication of silicon carbide particles covered by in-situ carbon nanotube reinforced 6061 aluminum matrix composites[J]. *Materials & Design*, 2016, 107: 130-138.
- [2] 孟祥臣. 微量 Cu 和 Cr 对 6063 铝合金的组织及力学性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
MENG Xiangchen. Effect of micro-additions of Cu and Cr on the microstructure and mechanical properties of Al 6063 alloy [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023(in Chinese).
- [3] HE W, LI H, HAN X D, et al. High-temperature dry sliding friction and wear behavior of in-situ $(Al_3Zr+ZrB_2)/AA6016$ aluminum matrix composites[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 39: 108951.
- [4] 李月英, 刘勇兵, 曹占义. 飞灰颗粒增强铝基复合材料的摩擦与磨损特性 [J]. *复合材料学报*, 2003, 20(6): 26-30.
LI Yueying, LIU Yongbing, CAO Zhanyi. Friction and wear properties of fly ash particles reinforced ZL109 composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2003, 20(6): 26-30(in Chinese).
- [5] 杜亨亭. 金属纤维增强铝基复合材料高强韧设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
DU Tingting. Metal fiber reinforced aluminum matrix composite high strength design [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022(in Chinese).
- [6] 姚正军, 姚一波, 袁明. 尼龙 66 纤维/6061 铝合金复合板静电植绒工艺及隔声性能 [J]. *复合材料学报*, 2015, 32(6): 1625-1632.
YAO Zhengjun, YAO Yibo, YUAN Ming. Electrostatic flocking technology and sound insulation properties of nylon 66 fibers/aluminium alloy 6061 composite plates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2015, 32(6): 1625-1632(in Chinese).
- [7] PRABAKARAN V, PALANI R, PRAVEEN M, et al. Study of tribological performance and corrosion resistance of aluminum alloy 6063 composites enhanced with a combination of silicon carbide and tungsten disulfide particles[J]. *Results in Surfaces and Interfaces*, 2024, 15: 100233.
- [8] 王东伟, 李发强, 黄起昌, 等. 表面织构对滑动电接触界面摩擦学行为的影响 [J]. *表面技术*, 2024, 53(9): 137-147, 179.
WANG Dongwei, LI Faqiang, HUANG Qichang, et al. Effect of surface texture on tribological behavior of sliding electrical contact interface.[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(9): 137-147, 179(in Chinese).
- [9] 林焕然, 国秀花, 宋克兴, 等. $(WC+SiC_w)/Cu-Al_2O_3$ 复合材料载流摩擦磨损行为 [J]. *表面技术*, 2022, 51(1): 33-42.
LIN Huanran, GUO Xiuhua, SONG Kexing, et al. Current carrying friction and wear behavior of $(WC+SiC_w)/Cu-Al_2O_3$ composites[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(1): 33-42(in Chinese).
- [10] 张胜利, 国秀花, 宋克兴, 等. 多粒径 TiB_{2p} 颗粒增强铜基复合材料的制备与载流摩擦磨损性能 [J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2348-2356.
ZHANG Shengli, GUO Xiuhua, SONG Kexing, et al. Preparation and electrical wear characteristics of copper matrix composites reinforced with mixing sized TiB_{2p} particles [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2348-2356(in Chinese).
- [11] 肖琪琳, 周峰, 吴珊. 无压熔渗制备 TiC/Ti_3SiC_2 复合材料高速载流摩擦磨损性能 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(10): 2832-2840.
XIAO Qidan, ZHOU Feng, WU Shan. Current-carrying friction and wear characteristics of TiC/Ti_3SiC_2 composites under high speed by infiltration sintering [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2832-2840(in Chinese).
- [12] 周文艳, 冉丽萍, 彭可, 等. Mo_2C 改性 C/C-Cu 复合材料的组织及载流摩擦磨损性能 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(9): 2074-2081.
ZHOU Wenyan, RAN Liping, PENG Ke, et al. Structure and tribological property with electric current of Mo_2C modified C/C-Cu composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(9): 2074-2081(in Chinese).
- [13] KUMAR S, BALASUBRAMANIAN V. Effect of reinforcement size and volume fraction on the abrasive wear behaviour of AA7075 Al/ SiC_p P/M composites—A statistical analysis[J]. *Tribology International*, 2010, 43(1-2): 414-422.
- [14] KUMAR S, BALASUBRAMANIAN V. Developing a mathematical model to evaluate wear rate of AA7075/ SiC_p powder metallurgy composites[J]. *Wear*, 2007, 264(11): 1026-1034.
- [15] 苗永鑫, 焦安源, 李海一, 等. 高体积分数 SiC_p/Al 复合材料的螺旋铣削试验研究 [J]. *表面技术*, 2024, 53(14): 164-172.
MIAO Yongxin, JIAO Anyuan, LI Haiyi, et al. Experimental study of helical milling of high volume fraction SiC_p/Al composites[J]. *Surface Technology*, 2024, 53(14): 164-172(in Chinese).
- [16] WU W G, ZENG T C, HAO W F, et al. Microstructure and

mechanical properties of aluminum matrix composites reinforced with in-situ $\text{TiB}_{2\text{p}}$ particles[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 817376.

[17] ROUHI M, MOAZAMI-GOUDARZI M, ARDESTANI M. Comparison of effect of SiC and MoS_2 on wear behavior of Al matrix composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(6): 1169-1183.

[18] 张现亮. $\text{TiB}_{2\text{p}}$ 颗粒增强 7075 铝基复合材料挤压型材组织与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.

ZHANG Xianliang. Research on microstructure and properties of extruded profile of $\text{TiB}_{2\text{p}}$ Particulate Reinforced 7075Al Composite[D]. Jinan: Shandong University, 2023(in Chinese).

[19] 田经纬, 齐肖, 郭瑞, 等. 湿热老化对碳纤维增强复合材料力学和摩擦磨损性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(4): 1872-1884.

TIAN Jingwei, QI Xiao, GUO Rui, et al. Effect of hygrothermal aging on the mechanical and frictional wearproperties of carbon fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(4): 1872-1884(in Chinese).

[20] 许玮, 胡锐, 高媛, 等. 碳纳米管增强铜基复合材料的载流摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2010, 30(3): 303-307.

XU Wei, HU Rui, GAO Yuan, et al. Friction and wear properties of carbon nanotubes reinforced copper matrix composites with and with out electric current[J]. *Tribology*, 2010, 30(3): 303-307(in Chinese).

[21] 金延文, 曲彦平, 王东, 等. SiC 与球形石墨颗粒混杂增强铝基复合材料的摩擦磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2021, 41(3): 334-343.

JIN Yanwen, QU Yanping, WANG Dong, et al. Sliding wear behavior of aluminum matrix composites hybrid reinforced by SiC_p and spherical graphite particles[J]. *Tribology*, 2021, 41(3): 334-343(in Chinese).

[22] 杨静煜, 朱明光, 王云华, 等. 铝/石墨复合材料高速高温下的摩擦磨损特性 [J]. *复合材料学报*, 1987, 4(3): 51-56, VI-VII.

YANG Jingyu, ZHU Mingguang, WANG Yunhua, et al. Friction and wear behavior of graphite particle/Al composites at high sliding spdde and high temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1987, 4(3): 51-56, VI-VII(in Chinese).

[23] PARK O, KIM S, YOU N, et al. Synthesis and properties of iodo functionalized graphene oxide/polyimide nanocomposites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 56: 365-371.

[24] LU H B, YAO Y T, HUANG W M, et al. Noncovalently functionalized carbon fiber by grafted self-assembled graphene oxide and the synergistic effect on polymeric shape memory nanocomposites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 67: 290-295.

[25] 贾进浩. $\text{C}_\text{f}/\text{SiC}$ -Al 复合材料的制备及其性能的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2022.

JIA Jinhao. Fabrication and performance of $\text{C}_\text{f}/\text{SiC}$ -Al composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022(in Chinese).

[26] VAMSEE P, PAVAN K K, VAIRA R V, et al. Development and characterization of aluminum matrix composite reinforced with continuous stainless-steel fibers[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45(9): 7816-7821.

[27] PEI R S, CHEN G Q, WANG Y P, et al. Effect of interfacial microstructure on the thermal-mechanical properties of mesophase pitch-based carbon fiber reinforced aluminum composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 756: 8-18.

[28] ZHANG Y H, WU G H. Interface and thermal expansion of carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(11): 2148-2151.

[29] AKBARZADEH E, PICAS J A, BAILE M. Orthogonal experimental design applied for wear characterization of aluminum/ C_{sf} metal composite fabricated by the thixomixing method[J]. *International Journal of Material Forming*, 2016, 9(5): 601-612.

[30] CAO X, SHI Q Y, LIU D M, et al. Fabrication of in situ carbon fiber/aluminum composites via friction stir processing: Evaluation of microstructural, mechanical and tribological behaviors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 139: 97-105.

[31] 王铀, 曹利, 刘家设, 等. $\text{SiC}_\text{w}/\text{Al}$ 复合材料滑动磨损的微观机制 [J]. *复合材料学报*, 1991, 8(2): 85-90.

WANG You, CAO Li, LIU Jiashe, et al. Micromechanism of dry sliding wear of $\text{SiC}_\text{w}/\text{Al}$ composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 1991, 8(2): 85-90(in Chinese).

[32] ZHONG X M, LI Q Y, GONG Y Z, et al. Effects of various proportions $\text{TiB}_{2\text{p}}$ - TiC_p reinforced Al-Cu-Mg composites in high-temperature mechanical properties and sliding wear behaviors[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 30: 4169-4180.

[33] CALIMAN R. Aspects regarding wearing behaviour in case of aluminium composite materials reinforced with carbon fibers[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 145(7): 072013.

[34] CUI L H, LUO R Y, MA D H. Carbon fiber reinforced carbon-Al-Cu composite for friction material[J]. *Materials*, 2018, 11(4): 538.

[35] 邵若男, 贺甜甜, 杜三明, 等. 铝合金表面 Al_2O_3 -Ni 涂层的制备及耐磨性研究 [J]. *表面技术*, 2020, 49(4): 173-179.

SHAO Ruonan, HE Tiantian, DU Sanming, et al. Preparation and wear resistance of Al_2O_3 -Ni coating on aluminum

alloy surface[J]. Surface Technology, 2020, 49(4): 173-179(in Chinese).

[36] 张昂昂. CNTs-SiC 复合颗粒的制备及其对铝基复合材料性能的影响 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.

ZHANG Ang'ang. Preparation of CNTs-SiC composite particles and its effect on properties of aluminum matrix composites[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019(in Chinese).

[37] LI S L, JIA C F, GUO X H, et al. Enhancement mechanism of carbon fiber on the current-carrying tribological properties of Cf-Al₂O₃/Cu composites[J]. Wear, 2023, 530-531: 205033.

[38] 邹存磊. 原位 Cu-Ti(Zr)-B 颗粒增强铜基复合材料的制备与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

ZOU Cunlei. Study on the fabrication and properties of in situ Cu-Ti(Zr)-B particulate reinforced copper matrix composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018(in Chinese).

[39] MOSTAFA E, SALEH K, OMA YMA E, et al. Microstructure and mechanical properties of CF/Al composites fabricated by hot coining technique[J]. Ceramics International, 2021, 47(15): 21890-21904.

[40] ZHAI H X, HUANG Z Y. Instabilities of sliding friction governed by asperity interference mechanisms[J]. Wear, 2004, 257(3-4): 414-422.

[41] DU J B, LU M C, FANG J M, et al. Current-carrying friction behavior and wear mechanism of Ag coatings by rotary spray deposition[J]. Wear, 2024, 546-547: 205367.

[42] 程晓超. 短碳纤维增强铝基复合材料的制备及性能研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2019.

CHENG Xiaochao. Preparation and properties of short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019(in Chinese).

[43] HOON K, SEUNGJIN N, SOO S, et al. Tribological properties of carbon fiber-reinforced aluminum composites processed by spark plasma sintering[J]. Carbon Letters, 2017, 21: 103-106.

[44] LIU L, LI W W, TANG Y P, et al. Friction and wear properties of short carbon fiber reinforced aluminum matrix composites[J]. Wear, 2008, 266(7): 733-738.

[45] 冯江. 颗粒晶须混杂增强铜基复合材料电性能和力学性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.

FENG Jiang. Study on electrical and mechanical properties of particle and whisker hybrid reinforced copper matrix composites[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022(in Chinese).