

不同 TiB_2 含量下多元混杂铜基复合材料的摩擦磨损性能

韦江¹, 李恒青^{2, 3}, 刘洋振^{2, 3}

(1. 江西省科学院材料与智能制造研究所, 江西南昌 330096;

2. 暨南大学 化学与材料学院, 先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632;

3. 暨南大学, 高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心, 广东广州 510632)

摘要: 为明确 TiB_2 对混杂Cu基复合材料损伤机制的影响, 采用快速真空热压烧结方法制备了石墨- TiB_2 混杂增强Cu基复合材料, 研究了不同 TiB_2 含量(0.5%、1.0%、1.5%和3.0%, 质量分数)对复合材料摩擦因数、磨损率及磨损表面形貌等的影响。结果表明, 随着 TiB_2 含量的增加, 复合材料的摩擦因数和磨损率均先降低后上升, TiB_2 含量为1.0%时复合材料的耐磨性较优, 其磨损机制以磨粒磨损为主, 伴随有黏着磨损和氧化磨损; 混杂Cu基复合材料磨损表面由石墨、CuO、 Fe_3O_4 与 Fe_2O_3 构成。

关键词: Cu基复合材料; TiB_2 ; 石墨; 磨损形貌; 磨损机制

中图分类号: TH117.1; TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0330-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0047

Friction and Wear Properties of Multi-Component Hybrid Cu-Based Composites with Different TiB_2 Contents

WEI Jiang¹, LI Heng-qing^{2, 3}, LIU Yang-zhen^{2, 3}

(1. Institute of Materials and Intelligent Manufacturing, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, Jiangxi, China; 2. Institute of Advance Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, College of Chemistry and Materials Science, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 3. State Joint Local Engineering Research Centre for High Performance Metal Wear-Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

Abstract: To clarify the influence of TiB_2 on the damage mechanism of hybrid Cu-based composites, the graphite- TiB_2 hybrid reinforced Cu-based composites were prepared through rapid vacuum hot pressing sintering method. The effect of TiB_2 content (0.5%, 1.0%, 1.5% and 3.0%, mass fraction) on friction coefficient, wear rate and wear surface morphology of the composites was analyzed. The results show that with the increase of TiB_2 content, the friction coefficient and wear rate initially decrease and then increase, and the wear resistance of the composites with 1.0% TiB_2 is better, the wear mechanism is mainly abrasive wear, accompanied by adhesive wear and oxidative wear. The worn surface of the hybrid Cu-based composites is composed of graphite, CuO, Fe_3O_4 and Fe_2O_3 phases.

Key words: Cu matrix composite; TiB_2 ; graphite; worn morphology; wear mechanism

摩擦磨损工况广泛存在于轨道交通、电力系统和航空航天等领域, 随着我国社会和科技的快速进步, 各领域对设备部件的性能要求越来越高, 特别是制动器、高压开关等, 其摩擦磨损性能直接关系到部件的服役寿命^[1-3]。铜(Cu)基复合材料因具有良好的综合性能, 成为制备上述相关部件的理想材料之一^[4-5]。在改善材料的摩擦磨损性能方面, 固体润滑相是一种较为优异的增强相, 其中具有良好导电导热

性和耐腐蚀性的石墨备受关注。如: 王汇龙等^[6]探讨了石墨含量对Cu基复合材料摩擦磨损性能的影响, 发现磨损率随着石墨含量的增加呈先下降后轻微上升的趋势, 但复合材料的力学性能仍偏低。添加陶瓷颗粒增强相是提升材料力学性能的方式之一。如: Guo等^[7]研究了 CrB_2 对Cu基复合材料组织与性能的影响, 结果表明, 添加 CrB_2 后复合材料的力学性能有明显的提升, 但电导率却出现降低的趋势。单一增强相通

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020A1515111067); 广州市基础与应用基础研究基金项目(2024A04J3963)。

收稿日期: 2025-10-10 收到初稿, 2025-12-10 收到修订稿。

作者简介: 韦江(1987-), 男, 博士, 主要从事铜基复合材料设计与加工研究。E-mail: weijiang@jxas.ac.cn

通信作者: 刘洋振, 男, 博士, 副研究员。E-mail: yangzhenliu@jnu.edu.cn

引用格式: 韦江, 李恒青, 刘洋振. 不同 TiB_2 含量下多元混杂铜基复合材料的摩擦磨损性能[J]. 铸造, 2026, 75(4): 330-335.

WEI Jiang, LI Hengqing, LIU Yangzhen. Friction and wear properties of multi-component hybrid Cu-based composites with different TiB_2 contents [J]. Foundry, 2026, 75(4): 330-335.

常无法实现力学性能、导电性和摩擦学性能的同步改善。有研究表明两种或两种以上增强相构成的混杂模式，通过整合多种增强相的优点，相比于单一增强相可使复合材料具有更佳的性能^[8-10]。如：Li等^[11]研究了碳纤维与Al₂O₃混杂增强Cu基复合材料的摩擦磨损性能，发现混杂增强复合材料相比于Al₂O₃/Cu复合材料的磨损率降低了64.2%。

TiB₂具有模量高、热稳定性好等优点^[12]，是一种良好的颗粒增强相，将其与石墨进行混杂设计，有望实现力学性能、导电性和摩擦学性能的同步提升。课题组前期已开展了石墨含量对混杂Cu基复合材料力学性能和摩擦学性能的影响研究，明确了石墨含量的理想添加量及其对材料的损伤机制^[13-14]。然而，关于TiB₂含量对混杂Cu基复合材料的损伤机制仍不清晰。为了促进混杂Cu基复合材料的发展与应用，本课题开展了不同TiB₂含量（质量分数）下混杂Cu基复合材料摩擦磨损性能的研究，通过分析摩擦因数、磨损率及磨损表面形貌等明确复合材料损伤机制，为我国轨道交通、航空航天等关键领域用材的设计与开发提供坚实的试验基础。

1 试验材料与方法

1.1 复合材料的制备

试验原料为电解铜粉（纯度为99.99%，平均粒度为45 μm）、石墨粉（纯度为99.95%，平均粒度为45 μm）和TiB₂粉末（纯度为99.99%，平均粒度为50 μm）。为了改善增强相与Cu基体的结合能力，对石墨粉和TiB₂粉进行化学镀铜处理，具体镀覆步骤及粉末形貌特征可参考本团队前期研究工作^[15-16]。混杂增强Cu基复合材料的具体成分如表1所示，设定镀铜处理后TiB₂的质量分数为0.5%、1.0%、1.5%和3.0%。将铜粉、镀铜石墨粉和镀铜TiB₂粉末按比例称量后，置于真空球磨罐中，在行星式球磨机上进行机械合金化。球磨时间为6 h，转速为300 r·min⁻¹，磨球为GCr15钢，球料比为5：1。待充分混合后将粉末装入Φ40 mm的高强石墨模具中，然后置于快速热

压烧结炉进行烧结，烧结温度为800 ℃，保温时间为0.5 h，烧结压力为30 MPa。

1.2 试验方法

混杂增强Cu基复合材料的摩擦磨损性能测试在Rtec-MFT5000型多功能摩擦磨损试验机上开展，其运行方式为往复式，配副方式为球-盘式。磨盘为复合材料，尺寸为20 mm×20 mm×10 mm，磨盘在试验前需经砂纸打磨、抛光；对偶球为Φ6 mm的GCr15钢球。施加载荷为30 N，速度为0.1 m·s⁻¹，往复摩擦总行程为100 m。为了保证试验结果的可靠性，每组试样测试3次。摩擦因数可由运行软件直接得到，磨损率根据以下公式^[17]计算得到：

$$K_a = \frac{\Delta V}{FL} \quad (1)$$

式中： K_a 为磨损率，mm³·N⁻¹·m⁻¹； ΔV 为磨损体积，mm³； F 为平均载荷，N； L 为往复摩擦总行程，m。

采用VK-9710型三维表面轮廓仪分析复合材料磨损表面的三维形貌特征。基于复合材料的摩擦因数、磨损率及磨痕表面形貌等结果可得出复合材料的损伤行为。

2 试验结果与讨论

2.1 摩擦因数和磨损率

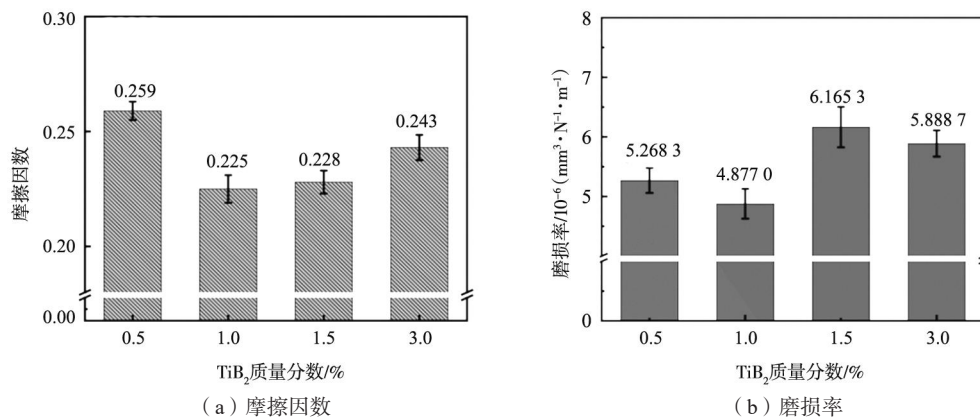
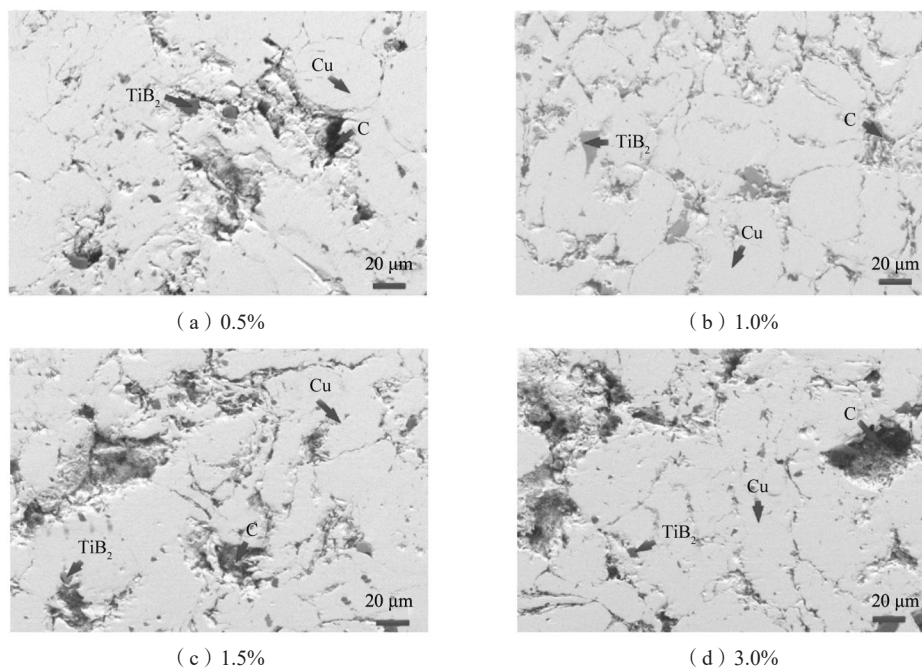
图1为不同TiB₂含量下混杂增强Cu基复合材料的摩擦因数与磨损率。从图1(a)可以看出，混杂增强Cu基复合材料的摩擦因数随TiB₂含量的增加呈先降低后增加的趋势，在TiB₂含量为1.0%时，摩擦因数最低，为0.225。出现这种现象的原因可能是在TiB₂含量较高或过低时，磨损表面的TiB₂与石墨发生了剥落（图2），导致摩擦因数增加。从图1(b)可以看出，复合材料磨损率随TiB₂含量的增加先降低后升高，最低点在TiB₂为1.0%时，为4.877 0×10⁻⁶ mm³·N⁻¹·m⁻¹，相比于TiB₂含量为0.5%时，复合材料磨损率降低了7.4%。结合课题组前期研究可知，随着TiB₂含量的增加，混杂增强Cu基复合材料的纳米硬度逐渐提高^[18]。TiB₂含量为1.0%的复合材料硬度较高，对偶球与复合材料接触面积小，所以增强相的剥落较少。随TiB₂含量进一步提升，磨损率急剧增加，这是因为材料整体硬度虽然增加，但TiB₂与石墨的团聚和弱界面导致磨损表面TiB₂与石墨大量剥落，剥落的颗粒在往复运行过程中充当了磨损介质，形成了三体磨损，从而加剧了材料磨损率的提升。

2.2 磨损形貌分析

图3为不同TiB₂含量下混杂增强Cu基复合材料的磨

表1 混杂增强Cu基复合材料的名义成分
Tab. 1 Nominal composition of hybrid reinforced Cu matrix composites $w_B/\%$

试样编号	铜粉	镀铜石墨粉	镀铜TiB ₂ 粉
A1	92.5	7.0	0.5
A2	92.0	7.0	1.0
A3	91.5	7.0	1.5
A4	90.0	7.0	3.0

图1 不同TiB₂含量下Cu基复合材料的摩擦因数和磨损率Fig. 1 Friction coefficients and wear rates of the Cu-based composites with different TiB₂ contents图2 不同TiB₂含量下Cu基复合材料的微观组织Fig. 2 Microstructures of the Cu-based composites with different TiB₂ contents

损表面微观形貌。可以看出, TiB₂含量为0.5%时, 复合材料的磨损表面出现较深的犁沟和较多剥落, 这是因为TiB₂与铜基体结合较弱, 在摩擦过程中脱嵌至磨损表面, 形成磨粒磨损; TiB₂含量增加至1.0%时, 复合材料磨损表面相对光滑, 有少量剥落, 其主要原因在于TiB₂含量增多, 复合材料硬度增加, 对石墨的支撑能力提升, 石墨的润滑作用得到体现^[19], 复合材料的耐磨性较优; TiB₂含量为1.5%时, 复合材料的磨损表面有大量剥落, 一种可能的原因是随TiB₂含量的增加, TiB₂与石墨团聚严重^[18], 且与铜基体结合较差, 在摩擦过程中TiB₂与石墨大量剥落, 造成较大的剥落坑; 当TiB₂含量达到3.0%时, 剥落坑反而变少, 这是因为复合材料的整体硬度增加, 磨损率随之有所降低。以上结果与复合材料的磨损率变化高度吻合。

为进一步探究TiB₂含量对复合材料摩擦学行为的影响, 对混杂增强Cu基复合材料磨损表面的三维形貌和对应二维轮廓进行分析, 分别如图4与图5所示。可以看出, 磨损表面的粗糙度随着TiB₂含量的增加先降低后升高, 与磨损率的变化趋势基本一致, 其中在TiB₂含量为1.0%时, 复合材料磨损表面的粗糙度最低, 为(95.56 ± 9.93) nm, 说明此时磨损表面较为光滑。

由图5可知, TiB₂含量为1.0%时复合材料的磨痕宽度与深度最低, 分别为933.5 mm和2.2 μm, 相比于TiB₂含量为0.5%的复合材料(磨痕宽度941.7 mm、深度2.7 μm), 磨痕宽度和深度分别降低了0.8%和18.5%。TiB₂含量为1.5%的复合材料磨痕宽度与深度最大, 分别为1 192.1 mm和4.6 μm, TiB₂含量为1%的复合材料磨痕宽度和深度较之分别降低了21.7%和52.2%。TiB₂含量

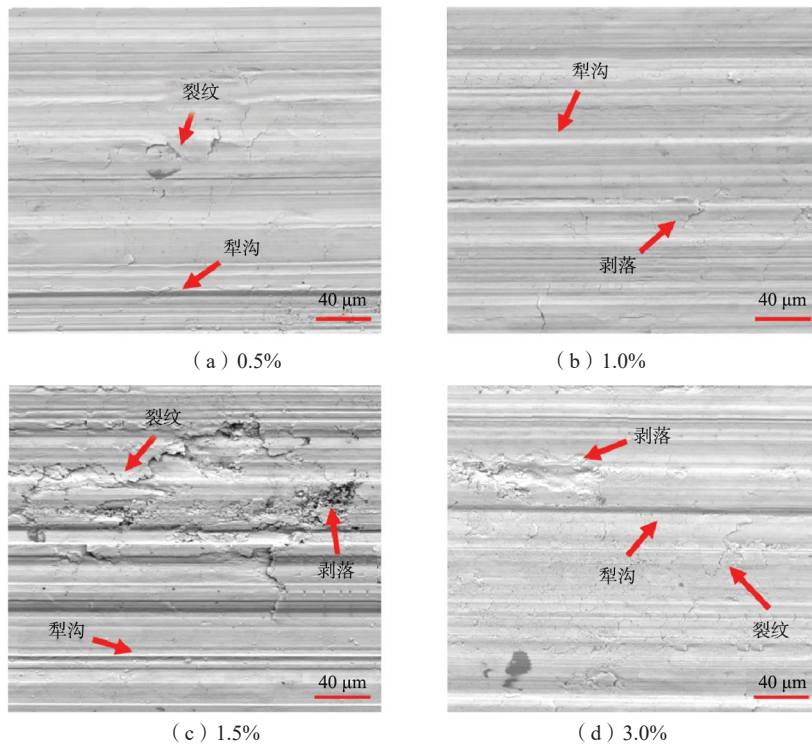


图3 不同TiB₂含量下Cu基复合材料磨损表面形貌

Fig. 3 Worn surface morphologies of the Cu-based composites with different TiB₂ contents

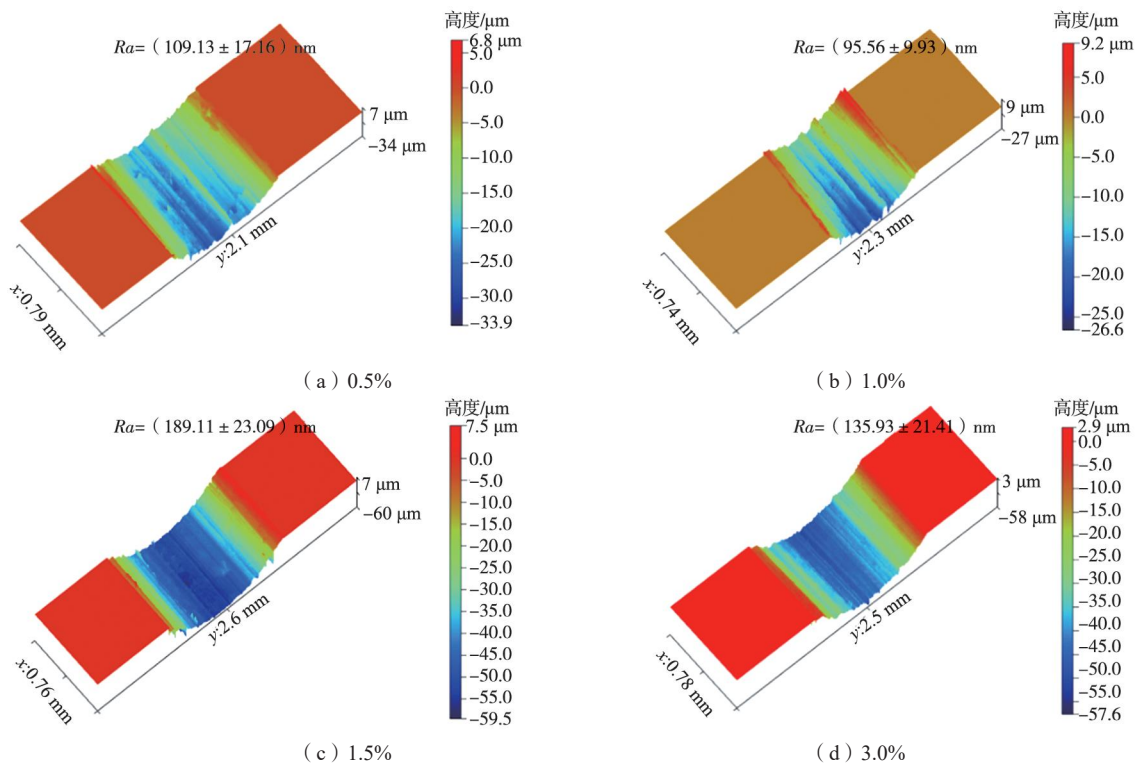


图4 不同TiB₂含量下Cu基复合材料磨损表面三维形貌

Fig. 4 3D morphologies of worn surfaces of the Cu-based composites with different TiB₂ contents

为3.0%的复合材料磨痕宽度与深度分别为1 092.0 mm和4.0 μm，较TiB₂含量为1.5%的复合材料分别降低了8.4%和13%。

2.3 摩擦学特征分析

为了明确磨损表面的相组成，对TiB₂含量为1%时混杂增强Cu基复合材料的磨损表面进行XPS分析。从

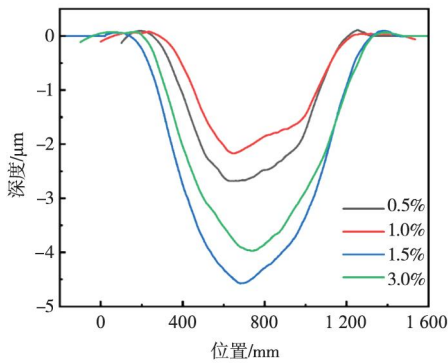


图5 不同TiB₂含量下Cu基复合材料磨损表面二维轮廓
Fig. 5 2D profiles of worn surfaces of the Cu-based composites with different TiB₂ contents

图6 (a)可以看出,石墨单峰位于284.5 eV处,同时存在结合能为284.8 eV和288.3 eV的C-O-C和C=O键,说明摩擦过程中发生了氧化反应。而图6 (b)、(c)中存在的CuO峰与O峰也进一步证实了氧化反应的发生。在图6 (d)中,位于711.6 eV的Fe₁峰说明摩擦时对偶球中的Fe转移到了混杂增强Cu基复合材料中,证明发生了黏着磨损。同时,位于727.6 eV和714.7 eV的Fe₃O₄与位于720.1 eV的Fe₂O₃进一步证实了摩擦过程中发生了氧化磨损^[18, 20]。综上所述, TiB₂含量为1%时混杂增强Cu基复合材料的磨损表面同时存在石墨、CuO、Fe₃O₄与Fe₂O₃,其中石墨为润滑膜的主要成分, TiB₂起支撑作用,强化了材料磨损性能。

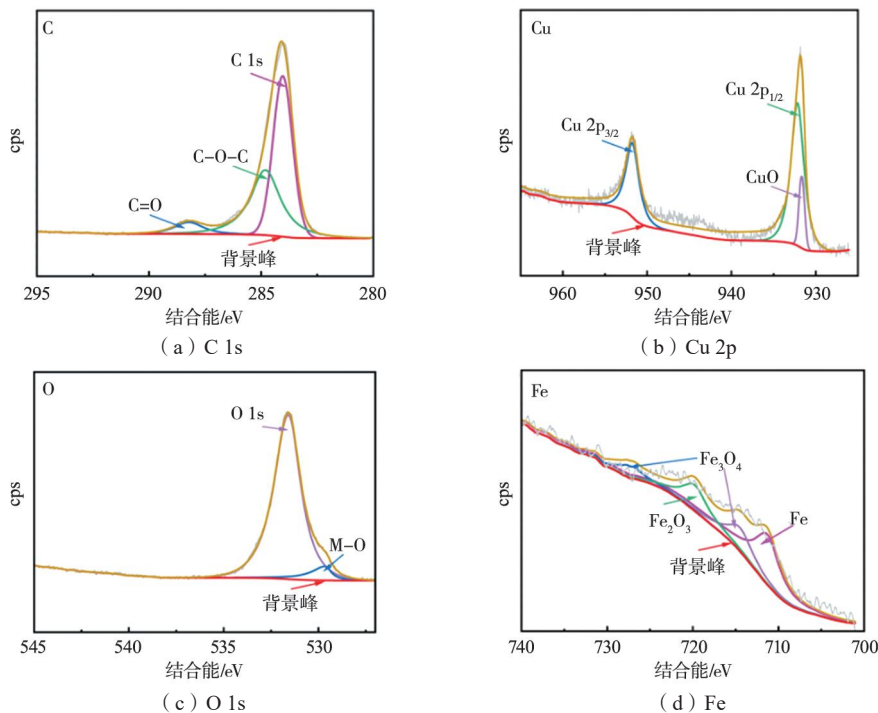


图6 TiB₂含量为1.0%的Cu基复合材料磨损面XPS分析
Fig. 6 XPS analysis of worn surface of the Cu-based composite with 1.0% TiB₂ content

3 结论

(1) 混杂增强Cu基复合材料的摩擦因数和磨损率随着TiB₂含量的增加呈先降低后增加的变化趋势, TiB₂含量为1.0%时出现最低值, 对应摩擦因数和磨损率分别为0.225和 $4.877 0 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(2) 不同TiB₂含量下混杂增强Cu基复合材料的磨

损机制以磨粒磨损为主, 伴随少量的黏着磨损和氧化磨损; 随着TiB₂含量的增加, 材料表面剥落程度先减轻后加剧, TiB₂含量为1.0%时复合材料的耐磨性较优。

(3) TiB₂含量为1.0%时, 混杂增强Cu基复合材料的磨损表面同时存在石墨、CuO、Fe₃O₄与Fe₂O₃, 其中石墨为润滑膜的主要成分, TiB₂起支撑作用, 强化了磨损性能。

参考文献:

- [1] 李天亦, 范敏灏, 李九霄, 等. 高温钛基复合材料显微组织和摩擦磨损行为[J]. 铸造, 2025, 74(8): 1075-1080.
- [2] XIAO J K, XIAO S X, CHEN J, et al. Wear mechanism of Cu-based brake pad for high-speed train braking at speed of

380 km/h[J]. Tribology International, 2020, 150: 106357.

- [3] 智俊旻, 王世强, 张奎, 等. 超高速激光熔覆FeAl-TiB₂复合涂层的摩擦磨损性能研究[J]. 铸造, 2024, 73(11): 1512-1520.

- [4] 秦笑, 王娟, 林高用, 等. 镀铜石墨/铜复合材料的组织和摩擦磨损性能 [J]. 材料导报, 2020, 34 (1): 380-384.
- [5] 王怡然, 高义民, 李焯飞, 等. 石墨镀Sn调控对石墨/Cu复合材料组织及力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2021, 38 (5): 1497-1506.
- [6] 王汇龙, 李丕毅, 高希瑞, 等. 石墨含量对车用镀Ni石墨/Cu复合材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45 (9): 77-83.
- [7] GUO X F, JIA L, LU Z L, et al. Enhanced combination of strength and electrical conductivity properties with CrB₂ reinforced Cu matrix composites fabricated by powder metallurgy [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107980.
- [8] ZHOU M Y, REN L B, FAN L L, et al. Progress in research on hybrid metal matrix composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 838: 155274.
- [9] 郭光辉, 郭文波, 吕书林, 等. Ti_p/TiB_{2p}混杂增强镁基复合材料组织性能研究 [J]. 铸造技术, 2025, 46 (6): 541-549.
- [10] XU Y, ZHANG Y, WANG G, et al. Examining the mechanical properties of B₄C/SiC hybrid reinforced 7075Al matrix composites using fast hot pressure sintering technique [J]. Materials Today Communications, 2025, 42: 111293.
- [11] LI S L, JIA C F, GUO X H, et al. Enhancement mechanism of carbon fiber on the current-carrying tribological properties of C_r-Al₂O₃/Cu composites [J]. Wear, 2023, 530-531: 205033.
- [12] 张强, 牛宗伟, 于浩, 等. TiB₂对激光熔覆成形钛基复合材料组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (6): 901-908.
- [13] LI H Q, LIU Y Z, ZHENG B C, et al. On the tribological behaviors of Cu matrix composites with different Cu-coated graphite content [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 83-94.
- [14] 舒鑫. 粉冶法的石墨-铜基复合材料摩擦磨损性能研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2022.
- [15] 刘洋赓, 李恒青, 郑宝超, 等. 电流密度对镀铜石墨-铜复合材料载流摩擦磨损性能的影响 [J]. 铜业工程, 2023 (1): 75-81.
- [16] 李恒青. 电接触 (C-TiB₂)/Cu复合材料的制备及性能研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2024.
- [17] ZHANG Z Y, CHANG B L, YU Z G, et al. Tribological behaviors of Mo₂BC ceramics against various counterpart materials [J]. Tribology International, 2021, 163: 107174.
- [18] 刘洋赓, 李恒青, 李卫, 等. TiB₂含量对石墨-TiB₂混杂增强铜基材料组织与力学性能的影响 [J]. 铜业工程, 2025 (5): 35-41.
- [19] YANG T, CAO F, JIANG Y H, et al. Investigation of current-carrying tribological properties and mechanisms of in-situ 2TiB₂/Cu-3B composite [J]. Tribology International, 2025, 207: 110612.
- [20] WANG Y R, GAO Y M, LI Y F, et al. Research on synergistic lubrication effect of silver modified Cu-Ni-graphite composite [J]. Wear, 2020, 444/445: 203140.