

# 稀土氧化物 $Y_2O_3$ 增强 Cu-Zn 基自润滑材料的摩擦学行为研究

张新运<sup>1)</sup>, 耿楠<sup>1)</sup>, 赵迎香<sup>1)</sup>, 杜珊<sup>3)</sup>, 曹岩<sup>1)</sup>, 孟军虎<sup>2)</sup>, 郭俊德<sup>1)</sup>✉

1) 西安工业大学机电工程学院, 西安 710021

2) 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室, 兰州 730000

3) 浙江联宜电机有限公司, 金华 322100

✉通信作者, E-mail: gjd0119@163.com

**摘要** 采用 SPS 放电等离子闪烧法, 制备了含稀土氧化物  $Y_2O_3$  和润滑相石墨的 Cu-Zn 基自润滑复合材料, 研究了稀土氧化物  $Y_2O_3$  和石墨的添加对铜基自润滑复合材料的力学性能和摩擦磨损性能的影响规律。结果表明: 添加 3wt% 石墨的 Cu-Zn 合金摩擦系数比普通 Cu-Zn 合金降低 63.6%; 添加质量分数 1wt% 稀土氧化物  $Y_2O_3$  的复合材料综合性能呈现峰值效应, 硬度提高 41.5%, 摩擦系数降低 25%。稀土氧化物  $Y_2O_3$  在基体中产生弥散强化效应, 细化晶粒、提高复合材料致密度。制备的复合材料在摩擦过程中, 摩擦副表面会富集润滑相, 构成性能良好的润滑层, 改善了 Cu-Zn 基滑动部件的摩擦学行为。

**关键词** SPS; 固体自润滑; 稀土元素; 摩擦磨损性能

分类号 TH117.1

## Tribological behaviour of Cu-Zn based self-lubricating materials reinforced with rare earth oxide $Y_2O_3$

Zhang Xin-yun<sup>1)</sup>, Geng Nan<sup>1)</sup>, Zhao Ying-xiang<sup>1)</sup>, Du Shan<sup>3)</sup>, Cao Yan<sup>1)</sup>, Meng Jun-hu<sup>2)</sup>, Guo Jun-de<sup>1)</sup>✉,

1) School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China

2) State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3) Zhejiang Linix Motor Co., Ltd, Jinhua 322100

✉Corresponding author, E-mail: gjd0119@163.com

**ABSTRACT** Cu-Zn-based self-lubricating composites containing rare-earth oxide  $Y_2O_3$  and lubricating phase graphite were prepared by SPS discharge plasma flash burning method, and the effects of the addition of rare-earth oxide  $Y_2O_3$  and graphite on the mechanical properties and friction and wear properties of Cu-based self-lubricating composites were studied. The results show that the friction coefficient of Cu-Zn alloy with 3 wt% graphite is 63.6% lower than that of ordinary Cu-Zn alloy; the comprehensive performance of the composite with the addition of 1 wt% of rare-earth oxide  $Y_2O_3$  in mass fraction shows a peak effect, with the hardness increased by 41.5% and the coefficient of friction reduced by 25%. Rare earth oxide  $Y_2O_3$  produces dispersion strengthening effect in the matrix, refines the grain and matrix pores, improves the density of composite materials. The prepared composites can enrich the lubricating phase on the surface of the friction sub-surface during the friction process, constituting a lubricating layer with good performance, which improves the tribological behaviour of Cu-Zn-based sliding parts.

**KEY WORDS** SPS; solid self-lubrication; rare earth elements; friction and wear properties

**基金项目:** 国家自然科学基金(52275508); 西安市科技计划项目(23GXFW0031); 固体润滑国家重点实验室开放基金(LSL-2308)

# 引言

随着航空航天、集成电路、医疗器械等各个工业领域的快速发展，机械装备在高温高压重载及乏油润滑条件下的服役寿命问题，对相关装备部件提出了更高的要求。机械系统运行的可靠性及服役寿命受限于相关部件材料的摩擦磨损性能，因此，摩擦副的磨损机理研究对于工业摩擦学是至关重要的<sup>[1-2]</sup>。铜合金凭借良好的热稳定性、导电性、力学性能及摩擦学性能占据了装备制造的一大部分市场，然而铜合金强度和耐磨性较差<sup>[3]</sup>。改善这一问题的有效手段之一就是制备新型铜基自润滑复合材料<sup>[4-5]</sup>。制备复合材料有多种有效的办法，放电等离子体烧结法作为目前比较前沿的方法，具有短时、低耗、高效等优点，是国内外的研究热点<sup>[6-11]</sup>。

自润滑材料在工业装备制造中发挥着重要作用，一般由基体金属、润滑相和增强相组成。石墨是一种常见的固体润滑剂，因其特殊的层状结构，具有良好的润滑性能，在工业应用中常作机械设备的润滑相<sup>[12-15]</sup>。碳化物、氮化物、硼化物、氧化物等是常见的强化相颗粒，在微观水平上提高金属材料的机械性能。近年来，为提升金属材料的自润滑性能，国内外学者在开发新型耐磨复合材料上进行了大量的探索，发现稀土对耐磨复合材料来说是一种极为理想的增强相，这为铜基摩擦材料在更广泛领域的应用提供了可能性。以往的研究表明，基体中加入微量稀土元素可起到积极影响<sup>[16]</sup>。Dalvand 等<sup>[17]</sup>发现在铜合金中添加少量稀土元素 Ce、La，微观结构中产生了富稀土相，该相的形成有助于改善合金的力学性能和形状记忆效应；罗等<sup>[18]</sup>研究了 Ce 对 Cu-5Fe 合金组织、性能和热稳定性的影响，认为加入 0.1wt% 的 Ce 增加了 Fe 纤维的密度，从而获得了优异的机械性能。楼等<sup>[19]</sup>通过在 Cu-10W 复合材料中引入 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，产生了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Cu-10W 之间弥散强化的效果，显著提高了复合材料的力学性能。以上研究人员从不同的角度研究了稀土的添加对铜基材料微观组织及力学性能的影响，但关于稀土对铜基材料滑动磨损行为影响的研究仍然不足，且稀土在铜基材料的含量缺乏精确把握。因此，进一步研究稀土在铜及其合金中的应用理论，不仅能够推动铜合金工业的发展，还能促进稀土资源的有效利用<sup>[20]</sup>。

综上，本文为提高铜基材料的强度与摩擦性能，采用 SPS 技术制备了含稀土氧化物的新型铜基耐磨复合材料。分析铜基自润滑复合材料的组织与性能，探讨了稀土氧化物 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在常温下，其含量对于铜基材料摩擦磨损性能的影响规律和作用机理，对自润滑材料摩擦学设计与工程应用有着重要的参考价值。

## 1 实验部分

### 1.1 材料制备

采用了纯 Cu，纯度为 99.9%，粒径为 30 $\mu$ m，Zn 的纯度在 99% 以上，粒径为 30 $\mu$ m。润滑组元是粒径为 20 $\mu$ m、纯度为 99% 的石墨，分别制备不同稀土含量的铜基自润滑复合材料。添加稀土质量分数分别为 0%、0.5%、1%、2% 的自润滑复合材料分别以 Y-0、Y-0.5、Y-1、Y-2 命名，增添一组 Cu-Zn 合金作为基础对照组，验证加入石墨后的润滑效果，并将其命名为 G0。详细材料组分配比如表 1 所示。

表 1 自润滑复合原材料组成粉末

Table 1 Self-lubricating composite raw material composition powder

样品	材料组成 (%)			
	Cu	Zn	石墨	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
G0	余量	18	0	0
Y-0	余量	18	3	0
Y-0.5	余量	18	3	0.5
Y-1	余量	18	3	1
Y-2	余量	18	3	2

用精度为 0.0001g 的电子天平按照表中各组元配比称取原料，用漩涡混料机均匀混合，将混合均匀的粉末加入定制的石墨模具中，采用 SPS-20T-10-III 型放电等离子烧结设备进行真空状态下的高温烧结。经过大量实验，最终将成型温度设定在 700 °C，压力设定为 6 MPa，工艺结束后随炉冷却至室温。制得 $\phi$ 30 mm $\times$ 5 mm 的圆柱片体试样打磨抛光、清洗烘干。试样制备具体流程图如图 1 所示。

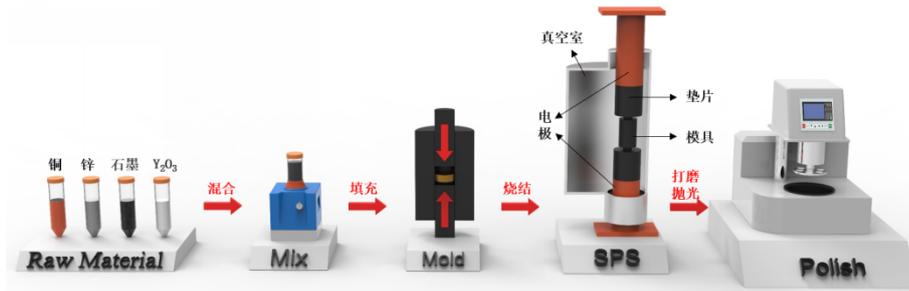


图1 试样制备流程图

Fig.1 Flow chart of specimen preparation

## 1.2 性能测试与表征

采用维氏硬度计 (HV-50) 测试自润滑复合材料的硬度, 每个试件进行 10 次重复测量, 平均化处理得出平均硬度值。复合材料密度采用阿基米德排水法测试, 测试 3 次, 取其平均值。

选用 HT-1000 型高温摩擦磨损试验机, 摩擦方式为球—盘式摩擦。对磨材料是直径为 6 mm 的 GCr15 钢球, 盘样品为制得的复合材料, 转速  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 摩擦半径为 5 mm, 实验时间为 30 min, 温度为常温, 施加的荷重分别为 5N、10N、15N。

配制氯化铁-盐酸金相腐蚀溶液 (5g  $\text{FeCl}_3$ 、15mL  $\text{HCl}$  和 100 mL 蒸馏水的混合溶液), 将已经打磨抛光好的试样超声清洗表面后, 采用配置好的金属腐蚀液滴在金属表面数秒后擦去, 待试样表面失去光泽即可。

采用扫描电子显微镜 (SEM, ZEISS Sigma 300, 德国) 观测试样表面及磨痕的微观形态, 采用光谱仪 (EDS) 测试试样表面的元素组成和分布情况, 采用 X 射线衍射仪 (XRD, Rigaku MiniFlex600, 德国) 分析样品的物相组成, 扫描工作区域  $10^\circ\text{-}80^\circ$ , 扫描速度  $8^\circ\text{min}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相分析

图 2 为复合材料试样的 X 射线衍射图谱, 图中最强衍射峰出现在  $44^\circ$  左右, 对应铜的 (111) 晶面, 晶格参数为  $2.0872\text{\AA}$ 。由于添加 Y 的质量分数较低, 含 Y 元素的相仅寻到了一组极其微弱的衍射峰。两个试样的衍射峰位置均无明显偏移现象, 表明晶胞参数及晶面间距未发生改变, 晶体结构保持面心立方结构。

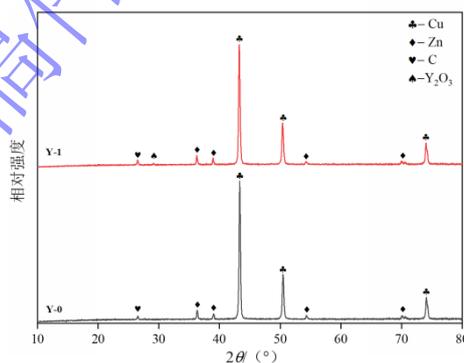


图2 复合材料试样的 X 射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction pattern of composite specimens

### 2.2 微观组织分析

图 3 为不同稀土含量试样经腐蚀后的组织形貌图。随着稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量增加, 铜基复合材料的基体组织尺寸明显减小, 微观结构在基体中分布趋于均匀化。这主要是由于晶粒长大需要晶界移动, 弥散分布的稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  阻碍晶界的滑移, 因此在结晶的过程中稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  可以抑制晶粒长大, 达到细化晶粒的目的<sup>[21]</sup>。当添加稀土氧化物  $\text{Y}_2\text{O}_3$  质量分数为 1% 时, 可以明显看出图 3 (c) 的组织细小且均

匀。为了进一步确认元素分布情况，对 Y-1 复合材料进行了 EDS 图谱测试，如图 4 所示，检测到复合材料试样中有 Cu、Zn、C 和稀土 Y 元素的存在，各元素在基体表面基本呈现出均匀分布的状态。烧结后的样品表面无明显缺陷，样品的密度和致密度如表 2 所示，由于  $Y_2O_3$  的密度低于铜和锌的密度，因此复合材料的密度通常随  $Y_2O_3$  含量的增加而降低。同时可以看出采用放电等离子技术烧结的复合材料致密度高，均在 99% 左右。致密度随着  $Y_2O_3$  颗粒在一定范围内有微量增大的原因可能是由于  $Y_2O_3$  颗粒自身与基体的结合力比较大，粒子之间容易形成较为稳定的界面<sup>[22]</sup>。

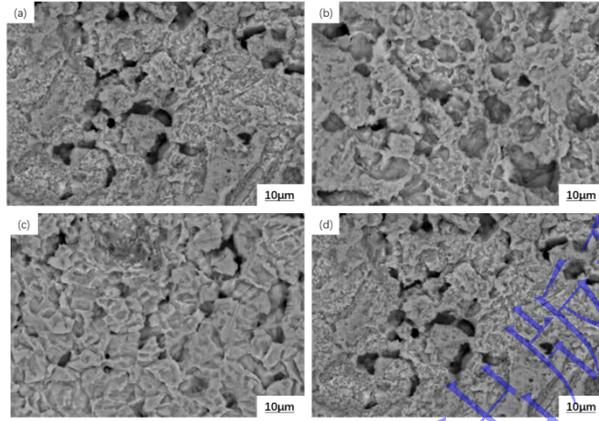


图 3 复合材料微观形貌图 (a) Y-0; (b) Y-0.5; (c) Y-1; (d) Y-2

Fig.3 Microscopic morphology of composite materials (a) Y-0; (b) Y-0.5; (c) Y-1; (d) Y-2

表 2 试样的致密度

Table 2 Density of the sample

样品	密度( $g\ cm^{-3}$ )	致密度
Y-0	8	99.20%
Y-0.5	7.94	99.25%
Y-1	7.91	99.37%
Y-2	7.79	98.60%

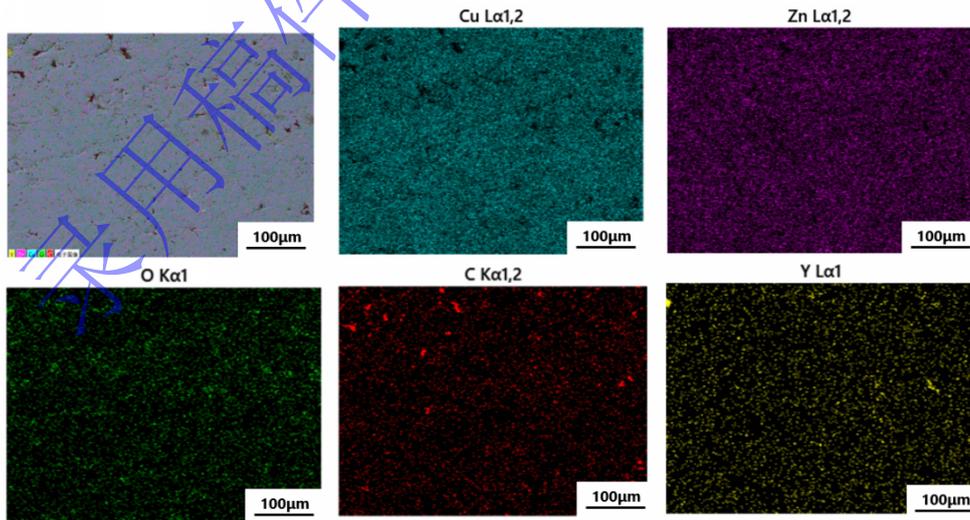


图 4 复合材料的 EDS 元素分布图

Fig.4 EDS elemental distribution of the composites

### 2.3 硬度结果分析

图 5 为复合自润滑材料不同含量稀土含量的维氏硬度图。铜锌合金的维氏硬度为 49HV，添加质量分

数为 3% 的石墨后，由于石墨是六边形层状结构，且层与层之间的结合力为强度不高的范德华力，硬度降低为 41HV。 $Y_2O_3$  作为强化相，添加到基体材料当中会产生弥散强化，增强位错阻力，在一定范围内，复合材料的强化程度随其含量的增加而增加，当  $Y_2O_3$  含量为 1% 时，复合材料硬度达到峰值，较无稀土试样提高了 41.5%；如果继续添加  $Y_2O_3$ ，过量的稀土又会堆积在晶界处，影响物质的传输，导致摩擦组元在材料中分布不均匀，极易发生应力集中，受力不平衡，因此硬度会相应地有所下降<sup>[23]</sup>，呈现出峰值效应。

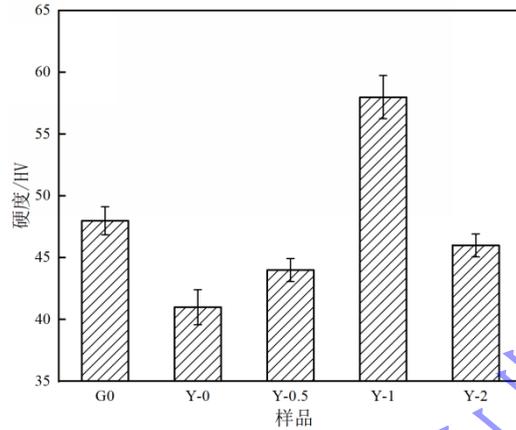


图 5 复合材料的维氏硬度

Fig.5 Vickers hardness of composites

#### 2.4 摩擦学性能分析

图 6(a) 为自润滑复合材料摩擦系数的变化趋势。在常温下，添加石墨后的复合材料摩擦系数较基体合金波动性会有明显地降低。因为石墨的层状结构，层与层之间在受力过程中会产生相对滑动，在摩擦的过程中，减小应力对摩擦表面构成的损伤。表面的材料被磨损后，新的润滑组元石墨会暴露出来，在剪切力的作用下，石墨逐渐形成了具有连续性的光滑自润滑复合膜，磨损的过程相对平稳。引入  $Y_2O_3$  后，摩擦系数仍会继续降低，但相比石墨， $Y_2O_3$  对摩擦系数的影响较小，但仍可以看出试样 Y-1 的摩擦系数最低，减摩效果最好。图 6(b) 为不同稀土含量试样的摩擦系数与磨损量的关系曲线，Y-1 为磨损量最低的试样，相比未添加稀土的试样 Y-0 磨损量降低了 54.8%，呈现最高的耐磨性。综上所述，Y-1 自润滑复合材料的减摩抗磨性能为最优。

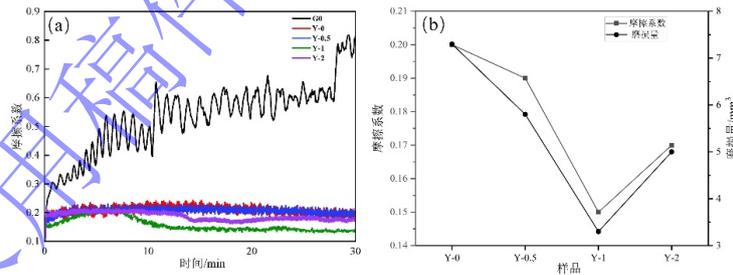


图 6 复合材料的摩擦系数曲线和磨损量 (a) 5N 下不同稀土含量试样摩擦系数曲线；

(b) 不同稀土含量试样的摩擦系数和磨损量关系曲线

Fig.6 Friction coefficient curves and wear of composites (a) Friction coefficient curves of specimens with different rare earth contents at 5N; (b) Relationship curves between friction coefficients and wear of specimens with different rare earth contents

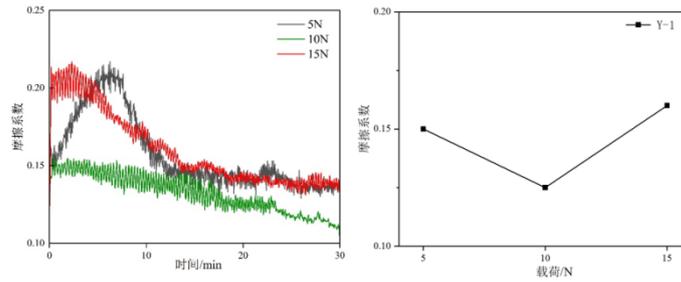


图7 不同荷重下 Y-1 样品的摩擦系数曲线 (a) 和平均摩擦系数 (b)

Fig.7 Friction coefficient curves (a) and average friction coefficient (b) of Y-1 sample under different loads

为更加深入探究自润滑复合材料 Y-1 在不同荷重下的摩擦磨损机理, 在恒转速不同荷重下做了摩擦系数随时间的变化曲线<sup>[24]</sup>。不同荷重下 Y-1 样品的摩擦系数曲线如图 7 所示, 复合材料在不同的荷重下摩擦系数均保持在 0.15 左右, 减摩特性良好。荷重由 5N 增加到 10N, 对偶面的接触面积逐渐增大, 润滑组元的量随之增大, 摩擦系数会降低, 曲线会趋于平缓<sup>[25]</sup>。增加到 15N 荷重, 接触面积增大的同时, 大量的摩擦热累积致使摩擦副区域温度升高、黏着磨损加剧, 此时摩擦系数有所上升<sup>[26]</sup>。图 8 和图 9 分别为自润滑复合材料在相同转速, 不同荷重下 Y-1 样品表面磨痕的三维形貌图和截面轮廓图。当荷重为 5N 时, 磨痕的宽度和深度为  $192.7\mu\text{m}\times 1.44\mu\text{m}$ ; 当荷重为 10N 时, 磨痕的宽度和深度为  $289.1\mu\text{m}\times 2.44\mu\text{m}$ ; 当荷重为 15N 时, 磨痕的宽度和深度为  $375.9\mu\text{m}\times 4.44\mu\text{m}$ , 表明磨损体积和荷重呈正相关, 实验变化规律与摩擦学理论相符。摩擦测试实验结束, 摩擦副表面存在硬颗粒, 磨料在荷重的作用下压入摩擦副的表面, 从而挤压出碎屑, 属于典型的松散磨粒磨损现象。在滑动的过程中, 脱落的硬质颗粒无法及时排到磨痕外, 堆积在磨痕内, 随着对偶球的咬合挤压, 使得磨痕的宽度和深度都会有所增加, 磨痕的轨迹逐渐形成台阶形状, 结合摩擦系数的波动情况, 表明磨损过程较为稳定。

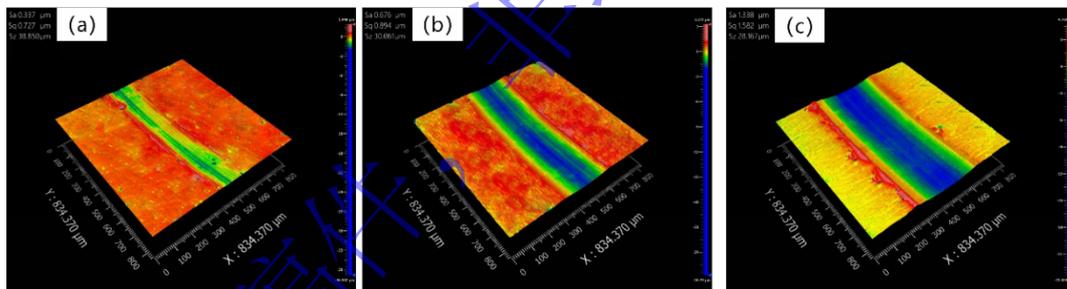


图8 不同荷重下 Y-1 样品表面磨痕的三维形貌图 (a) 5N; (b) 10N; (c) 15N

Fig.8 Three-dimensional morphology of abrasion marks on the surface of Y-1 sample under different loads (a)5N;(b)10N;(c)15N

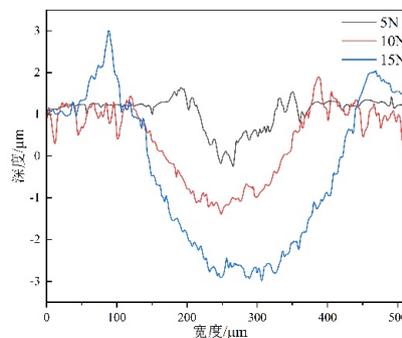


图9 不同荷重下 Y-1 样品表面磨痕的截面轮廓图

Fig.9 Cross-sectional contours of abrasion marks on the surface of Y-1 sample under different loads

为了获得有关磨损行为的进一步信息，复合材料的磨损表面的低倍率（a1、a2、a3）高倍率（b1、b2、b3）SEM 图像如图 10 所示。在低倍率图中试样 Y-1 未磨损表面上有少量的微孔和微裂纹存在，一般情况下微孔和微裂纹均来自于烧结的过程。常温下试样在 5N、10N、15N 荷重下的磨损表面总体上较为相似，磨损表面均有明显的固体润滑膜，表明复合材料有良好的成膜能力。在载荷为 5N 时，磨损表面局部呈现出相对平滑的状态，形成了局部光滑的润滑膜。随着载荷的增大，摩擦副接触表面的温度上升，润滑膜面积明显增大。在高倍率图中，平行于滑动方向上有明显的犁沟，犁沟出现是由于在摩擦的过程中，试样脱落的硬质颗粒被压在摩擦副之间，随着摩擦嵌入到表面并随之运动形成的。同时也并未在试样磨痕上观察到黏附的迹象，因此可以推测出固体润滑膜可能会有抑制或者减少黏附磨损的作用<sup>[27]</sup>。

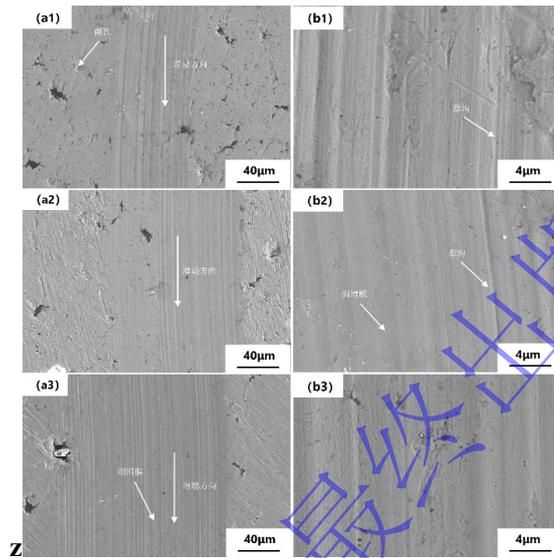


图 10 不同载荷下 Y-1 样品表面磨痕的 SEM 图 (a1, b1) 5N; (a2, b2) 10N; (a3, b3) 15N  
**Fig.10** SEM images of abrasion marks on the surface of Y-1 samples under different loads (a1, b1) 5N; (a2, b2) 10N; (a3, b3) 15N

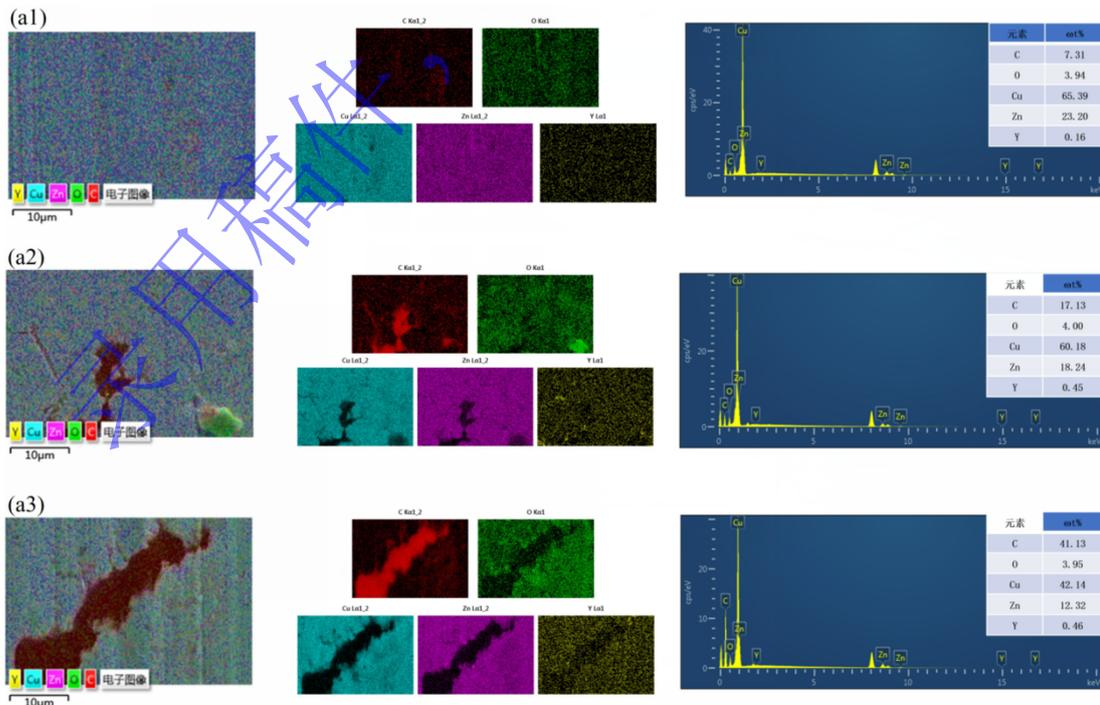


图 11 不同载荷下 Y-1 样品表面磨痕的元素分布图 (a1) 5N; (a2) 10N; (a3) 15N  
**Fig.11** Elemental distribution of abrasion marks on the surface of Y-1 samples under different loads (a1) 5N; (a2) 10N; (a3) 15N

试样 Y-1 在不同载荷下，磨痕表面元素分布能谱图如图 11 所示，磨痕上 C 元素和 Y 元素含量逐渐增加，表明在摩擦磨损过程中摩擦副表面会逐渐产生材料的转移及润滑相、增强相的富集，由此构成性能良好的润滑层。结合图 10 和图 11，将复合材料 Y-1 在不同荷重下磨损机理解释如图 12 所示。荷重为 5N 时，在持续的摩擦作用下，摩擦副表面出现微量的润滑剂，覆盖磨损表面的面积较小。随着荷重的增大，越来越多的石墨和稀土转移到磨损表面，在对偶面压力的作用下，润滑剂被均匀的积压在摩擦界面，固体润滑剂富集到一定程度会形成相对完整的固体润滑膜，减少两个表面的直接接触，从而有效地保护基体材料。

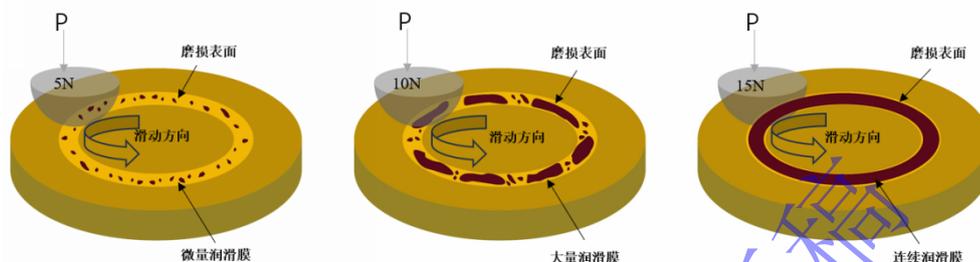


图 12 复合材料 Y-1 在不同荷重下磨损机理示意图

Fig.12 Schematic diagram of wear mechanism of composite Y-1 under different loads

### 3 结论

(1) 采用放电等离子闪烧技术制备了铜基自润滑复合材料，所烧结的复合材料致密度均可达到 98 % 以上，各元素粉末在基体中具有良好的分散性。

(2) 在 Cu-Zn 基复合材料中引入稀土氧化物  $Y_2O_3$  后，随着  $Y_2O_3$  添加量的增加，硬度、致密度、减摩擦抗磨性能均呈现先增强后降低的规律。在  $Y_2O_3$  含量为 1% 时，硬度较无稀土试样提高了 41.5%，磨损量降低了 54.8%，摩擦系数较铜锌合金降低 72.7%。

(3) 稀土氧化物  $Y_2O_3$  可细化 Cu-Zn 基材料晶粒，使材料具备优良的力学性能和摩擦学性能。制备的复合材料在摩擦过程中，摩擦副表面会富集润滑相，构成性能良好的润滑层，改善了 Cu-Zn 基滑动部件的摩擦学行为，为进一步研究先进铜基自润滑复合材料提供了新的途径。

### 参考文献

- [1] Li Y M, Liu X Q, Li J P, et al. Research progress of high temperature solid self-lubricating composites. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33 (01): 99  
(李艳敏,柳学全,李金普,等. 高温固体自润滑复合材料研究进展. 粉末冶金工业, 2023, 33 (01): 99)
- [2] Liu E Y, Jia J H, Gao Y M et al. Research progress of continuous lubrication materials in wide temperature domain . China Surface Engineering, 2015, 28 (04): 1  
(刘二勇,贾均红,高义民,等. 宽温域连续润滑材料的研究进展. 中国表面工程, 2015, 28 (04): 1)
- [3] Gao, P., Liu, C. X., Tian, B., et al. Microstructure, phase transformation and mechanical properties of NiMnGa/Cu composites prepared by SPS. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022,(10):3291
- [4] Zheng Y, Zhao H, Zhu S, et al. Effect of rolling deformation on microstructure and properties of Cu-Ni-Mo alloy prepared by aluminothermic reaction. Modern Physics Letters B, 2021, 35(34): 2150510.
- [5] Chen S Y, Fan H, An D, et al. Research on the structure and friction properties of the SiC particles reinforced copper-based self-lubricating composites. Advanced Materials Research, 2012, 535: 77
- [6] Yang Y C, Pan Y, Lu X, et al. Research progress of particle-reinforced titanium matrix composites prepared by powder metallurgy. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38 (02): 150

- (杨宇承, 潘宇, 路新,等. 粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展. 粉末冶金技术, 2020, 38 (02): 150)
- [7] LIN P P, LIN J C, YU D, et al. Current status of discharge plasma sintering technology for material joining. *Journal of Welding*, 2022, 43 (11): 15  
(林盼盼, 林金城, 于迪,等. 放电等离子体烧结技术在材料连接领域的应用现状. 焊接学报, 2022, 43 (11): 15)
- [8] Shi J L, Pei J, Zhang B P, et al. Progress of mechanical alloying combined with discharge plasma sintering technology for the preparation of thermoelectric materials. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39 (01): 4  
(石建磊, 裴俊, 张波萍, 等. 机械合金化结合放电等离子体烧结技术制备热电材料的研究进展. 粉末冶金技术, 2021, 39 (01): 4)
- [9] Han C L, Shen X F, Wang Y, et al. Research status and development trend of new materials for discharge plasma sintering new technology. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2019, 62 (22): 43  
(韩翠柳, 沈学峰, 王衍,等. 放电等离子烧结新技术新材料研究现状与发展趋势. 航空制造技术, 2019, 62 (22): 43)
- [10] Li A, Liu S F, Wang B J, et al. Current status of research on discharge plasma sintered metal porous materials. *Powder Metallurgy Technology*, 2017, 35 (05): 378  
(李安, 刘世锋, 王伯健, 等. 放电等离子烧结金属多孔材料研究现状. 粉末冶金技术, 2017, 35 (05): 378)
- [11] Wang Z, Li J, Li D. Analysis of tribological properties of graphite and aluminum composite materials prepared by powder metallurgy technique. *Materials Express*, 2020, 10(5): 663
- [12] Ma W L, Liu Y C, Wang S C, et al. Friction and wear properties of discharge plasma sintered Cu-15Ni-8Sn/graphite self-lubricating composites. *Journal of Tribology*, 1  
(马文林, 刘益超, 王小超, 等. 放电等离子烧结 Cu-15Ni-8Sn/石墨自润滑复合材料摩擦磨损性能研究. 摩擦学学报, 1)
- [13] Yin Y G, Zheng Z X, Ma S B, et al. Influence of temperature on friction reduction and wear resistance of copper-based self-lubricating materials. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, (11): 1856  
(尹延国, 郑治祥, 马少波, 等. 温度对铜基自润滑材料减摩耐磨特性的影响. 中国有色金属学报, 2004, (11): 1856)
- [14] Joseph A, Akshay K S, Sajith V. Synergistic effect of ceria-zirconia nanoparticles and hBN nanosheets incorporation on the corrosion resistance of MoS<sub>2</sub> solid lubricant coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 473
- [15] Ran X, Ren X, Zou H H, et al. Research on the mixing way and content of molybdenum disulfide with copper matrix self-lubricating composites. *Advanced Materials Research*, 2014, 1015: 42
- [16] Xie K, Zhang H, Zhang S Q. Preparation technology of rare earth oxide diffusion reinforced copper matrix composites. *Thermal Processing Technology*, 2016, 45(10): 25  
(谢鲲, 张惠, 张守清. 稀土氧化物弥散强化铜基复合材料的制备技术. 热加工工艺, 2016, 45(10): 25)
- [17] Dalvand P, Raygan S, López G A, et al. Properties of rare earth added Cu-12wt% Al-3wt% Ni-0.6 wt% Ti high temperature shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 754: 370
- [18] Luo X, Zeng H, Yuan D, et al. Effect of the rare earth element Ce on the microstructure, properties and thermal stability of Cu-5Fe alloy. *Materials Today Communications*, 2023, 36
- [19] Lou W, Li X, Wei S, et al. Effect of nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructure and mechanical properties of Cu-10W composites prepared by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 2023, 49(22): 36251
- [20] Li Q, Ma B, Huang G J, et al. Current status and prospects of rare earths in high strength and high conductivity copper alloys. *Thermal Processing Technology*, 2011, 40(2): 1  
(李强, 马彪, 黄国杰, 等. 稀土在铜合金中的研究现状与展望. 热加工工艺, 2011, 40(2): 1)
- [21] Wang T G, Qin Q, Liang Q C. Effect of rare earth La content on the friction and wear performance of copper-based powder metallurgy friction materials. *Lubrication and Sealing*, 2016, 41(4): 49  
(王天国, 覃群, 梁启超. 稀土 La 含量对铜基粉末冶金摩擦材料摩擦磨损性能的影响. 润滑与密封, 2016, 41(4): 49)
- [22] LIU Y G, ZHU S Y, WU G J, et al. Study on the microstructure and properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced copper matrix composites. *Thermal Processing Technology*, 2020, 49(16): 97  
(刘云贵, 朱绍严, 吴光进, 等. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 增强铜基复合材料微观结构及性能的研究. 热加工工艺, 2020, 49(16): 97)

- [23] Chu H Y, Lin J F, Chiu Y C, et al. The Tungsten Density Distribution and Tribological Performance Analysis of Carburized Medium Carbon Steel with Tungsten Ion Implantation. *Advanced Materials Research*, 2011, 328: 906
- [24] Zhao L H, Wei X B, Li X G. The analysis on the tribological properties of CR/EPDM blends with chrome-plated steel under dry sliding. *Advanced Materials Research*, 2013, 774: 99
- [25] Liang X M, Xing Y Z, Li L T, et al. An experimental study on the relation between friction force and real contact area. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 20366.
- [26] Dong S C, Zhong L, Dan M, et al. Friction wear performance of MoS<sub>2</sub> coatings under different loads and rotational speeds. *Fusion and Plasma Physics*, 2023, 43(1): 99.  
(董思成, 钟利, 但敏, 等. 不同荷重及转速条件下 MoS<sub>2</sub> 涂层的摩擦磨损性能研究. *核聚变与等离子体物理*, 2023, 43(1): 99.)
- [27] Moazami-Goudarzi M, Nemati A. Tribological behavior of self lubricating Cu/MoS<sub>2</sub> composites fabricated by powder metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(5): 946

录用稿件，非最终出版稿