

Zn对Cu-Pb-Sn/Fe双金属组织与摩擦磨损性能的影响

毛鹏丽¹ 张国伟¹ 张绍军¹ 任晓燕² 徐 宏¹

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 太原 030051; 2. 太原工业学院机械工程系, 太原 030013)

摘 要 研究了液-固复合铸造下Zn含量(质量分数,下同)对Cu-Pb-Sn/Fe双金属组织性能与摩擦磨损性能的影响,以提高铜/钢双金属材料的力学性能。结果表明,当Zn含量为1.3%时,材料具有较好的力学性能和减摩性能,其硬度(HB)达79.4,界面剪切强度达212.4 MPa,较未添加Zn时分别提高了12.5%和28.7%;干摩擦条件下,总平均摩擦因数为0.234,磨损率为 $1.44 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加Zn时分别下降了26.4%和34.2%;油润滑条件下,总平均摩擦因数为0.074,磨损率为 $2.18 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加Zn时分别下降了36.8%和37.3%。

关键词 Cu-Pb-Sn/Fe双金属; Zn合金化; 摩擦磨损; 液-固复合铸造

中图分类号 TG146.1¹; TG291

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250214

Effects of Zn on Microstructure and Tribological Performance of Cu-Pb-Sn/Fe Bimetal

MAO Pengli¹, ZHANG Guowei¹, ZHANG Shaojun¹, REN Xiaoyan², XU Hong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051; 2. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030013)

Abstract: The impact of Zn content on microstructure, mechanical properties, and tribological performance of Cu-Pb-Sn/Fe bimetal prepared via liquid-solid composite casting was investigated to enhance the mechanical properties of Cu/Fe bimetallic materials. The results indicate that the material exhibits desirable mechanical and antifriction properties with Zn content of 1.3%, where the hardness and interfacial shear strength are 79.4 HB and 212.4 MPa, which are increased by 12.5% and 28.7%, respectively, compared to those of Zn-free material. Under dry friction conditions, the average friction coefficient and wear rate are 0.234 and $1.44 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, which are reduced by 26.4% and 34.2%, respectively, compared with those of Zn-free material. Under oil-lubricated conditions, the average friction coefficient and wear rate are 0.074 and $2.18 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, which are decreased by 36.8% and 37.3%, respectively, compared to those of Zn-free material.

Key Words: Cu-Pb-Sn/Fe Bimetal, Zn Alloying, Friction Wear, Liquid-solid Composite Casting

Cu-Pb-Sn/Fe双金属复合材料因兼具铅锡青铜合金的减摩性和钢的高强度,被广泛应用于船舶轴承、汽车轴瓦等领域^[1-3]。传统铅锡青铜存在铅颗粒偏聚、耐磨性不足等问题,限制了其在高端装备中的进一步应用^[4]。铅锡青铜/钢双金属作为一种铜基自润滑材料,在抗拉强度、耐磨性和承载能力方面表现出色,且可以节省相对昂贵的有色金属的使用^[5]。然而,合金的微观组织,如 α -Cu固溶体、 δ 相和铅颗粒的分布状态,对其摩擦磨损性能起着决定性作用,因此通过成分设计与工艺优化调控组织成为研究热点^[6-7]。

液-固复合铸造^[8]通过控制合金液的凝固速率,可

有效改善铅锡青铜的组织缺陷。该工艺能够在凝固阶段实现溶质元素的合理分布,减少铅颗粒的偏析,同时细化晶粒,提升材料的综合性能。相较于固-固复合铸造^[9-10],液-固复合铸造更便于实现复杂形状零件的一体化成形,且设备成本相对较低,在工业生产中具有独特的应用潜力。刘越等^[11]综述了铜/钢双金属复合材料的制备工艺(如爆炸复合、轧制复合、扩散复合等),分析了不同工艺的原理、界面冶金行为,并探讨了其在机械、能源等领域的应用。研究表明,铜/钢复合可兼顾铜的导电性与钢的强度,界面结合质量与工艺参数密切相关。目前液-固复合铸造工艺在铅锡青铜制备

收稿日期:2025-05-23;修订日期:2025-06-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(202403021211058)

第一作者:毛鹏丽,女,2000年出生,硕士研究生,E-mail:maopengli01@163.com

通信作者:张国伟,男,1976年出生,教授,E-mail:1125593238@qq.com

引用格式:毛鹏丽,张国伟,张绍军,等. Zn对Cu-Pb-Sn/Fe双金属组织与摩擦磨损性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(5):707-715.

MAO P L, ZHANG G W, ZHANG S J, et al. Effects of Zn on microstructure and tribological performance of Cu-Pb-Sn/Fe bimetal[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 707-715.

中仍面临一些挑战,如界面结合质量不稳定、组织均匀性难以精确控制等,这些问题影响了材料性能的稳定性和可靠性。

近年来,许多研究者通过向铜基合金中添加合金元素的方式,显著优化了铜/钢双金属复合材料的性能指标。DONG B W 等^[12]通过试验和热力学分析研究 Sn 添加对 Cu-Pb-Sn 合金凝固过程中第二相形貌的影响。结果表明,Sn 含量的增加促使富 Pb 第二相由网状向棒状转变。Sn 削弱 Cu-Pb 体系分相倾向,降低单变反应强度,引入三相共存区并减小界面张力,抑制 Marangoni 迁移,从而细化第二相分布。王明杰等^[13]探讨了稀土元素(Ce、La)与 P 对铅锡青铜组织与性能的影响。结果表明,添加 0.2% 的稀土和 0.5% 的 P 并控制熔炼温度至 1 250 ℃时,合金抗拉强度提升至 192 MPa,显微组织显著细化,铅颗粒分布均匀。TURHAN H 等^[14]揭示了 Mn 对铅锡青铜的调控作用,抑制脆性(Zn,Cu)S 相生成,形成 MnS 相,使疲劳寿命提升至 85 N/mm²(对比无 Mn 的 20 N/mm²),但初期磨损加剧,适用于高疲劳需求部件。AKSOY M 等^[15]研究了 P 对铅锡青铜微观组织与力学性能的影响。发现 P 通过形成 Cu₃P 相包裹脆性 S-(Zn,Cu)相抑制其生长,显著提升疲劳寿命和抗拉强度,但初期磨损加剧。研究表明,含 P 铅锡青铜适用于疲劳寿命要求高的机械部件。CHAUHAN R D 等^[16]综述了青铜合金的摩擦学性能,探讨 Sn、石墨(Gr)及 Ni 等元素对合金硬度、摩擦因数(Coefficient of friction)及磨损率的影响。结果表明,Sn 含量增加(4%~8%)可提升硬度并降低磨损率;Gr 添加显著减少摩擦和磨损,Ni 涂层增强 Gr 与铜基的相容性。复合材料的引入进一步优化性能,其中聚四氟乙烯(PTFE)+40% 碳纤维的磨损率相较于纯 PTFE 降低了 81%。

Zn 作为一种有效的合金化元素,在铜基合金中能够通过固溶强化、晶粒细化和优化第二相分布等作用提升材料性能^[17-18]。但在液-固复合铸造制备的 ZCuPb15Sn7/Fe 双金属体系中^[19],Zn 对其微观组织、界面结合特性以及摩擦磨损性能的影响机制尚未明晰。基于液-固复合铸造工艺,系统探究 Zn 对 ZCuPb15Sn7/Fe 双金属组织性能与摩擦磨损性能的影响,旨在为铜/钢双金属轴承材料性能的提升提供参考。

1 试验材料及方法

选用 ZCuPb15Sn7 高铅锡青铜作为熔覆合金,成分见表 1。选用 42CrMo 调质钢作为金属基体,其化学成分见表 2。

表 1 铜合金 ZCuPb15Sn7 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZCuPb15Sn7 copper alloy %

编号	w_B					
	Sn	Pb	Zn	P	Ni	Cu
1	7	15	0	≤0.05	≤2	余量
2	7	15	0.3	≤0.05	≤2	余量
3	7	15	0.7	≤0.05	≤2	余量
4	7	15	1.3	≤0.05	≤2	余量
5	7	15	2	≤0.05	≤2	余量

表 2 钢基体 42CrMo 的主要化学成分

Tab.2 Main chemical composition of 42CrMo steel matrix %

w_B						
Cr	Mn	C	Si	Mo	P	Fe
1.20	0.8	0.45	0.37	0.25	≤0.03	余量

图 1 为 Cu-Pb-Sn/Fe 双金属试样制备过程示意图。试验前,将 42CrMo 钢基体制备成 $\phi 34$ mm×60 mm 的盲孔型腔,后对基体内表面依次进行超声碱性除油清洗(10% 的 NaOH 溶液)、酸性除锈清洗(10% 的 HCl 溶液)。ZCuPb15Sn7 合金的熔炼在 SG2-12-12 坩埚电阻炉中完成,控制熔炼温度为(1 200±20)℃,熔炼完成后保温 30 min 将合金液浇注到预热(1 150±20)℃的钢基体中。

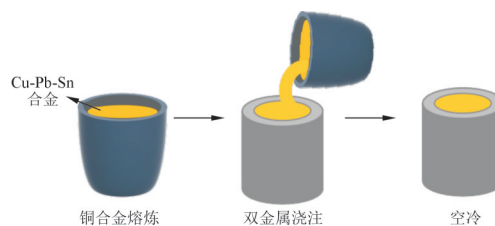


图 1 Cu-Pb-Sn/Fe 双金属试样制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of preparation process of Cu-Pb-Sn/Fe bimetallic specimens

试验结束后获得铜/钢双金属试样,取样方法见图 2。采用日立 SU5000 扫描电镜和 Zeiss 光学显微镜对微观组织进行表征。表征前依次用 280、400、800、1 000 和 2 000 目 SiC 砂纸对试样进行研磨和抛光,采用体积分数为 3% 的硝酸酒精溶液对钢侧腐蚀约 7 s,用 NH₃·H₂O、H₂O₂、H₂O 体积比为 1:1:3 的腐蚀剂对铜侧腐蚀 2~3 min。使用 WAW-20/30 电子力学试验机进行剪切试验,试样剪切模具尺寸见图 2b,每组试样测 3 次后取平均值。使用 HB-300B 型布氏硬度计测量减摩铜层的硬度,测量前需将被测面用砂纸打磨,使得表面粗糙度 $Ra \leq 0.6 \mu\text{m}$,载荷为 2 500 N,压头直径为 5 mm,保荷时间为 30 s。使用 MRH-3A 高速环块式摩擦试验机进行摩擦磨损性能测试,采用环-块摩擦副方式,摩擦副试样接触方式见图 3。试样采用尺寸为 19 mm×12 mm×12 mm 的块状,摩擦环材料为 45 号淬火钢,尺寸为 $\phi 40$ mm×12 mm。在进行摩擦磨损试验前,首先

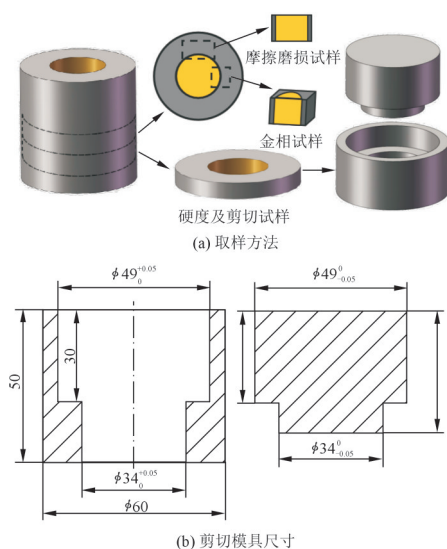


图2 Cu-Pb-Sn/Fe双金属取样方法及剪切模具尺寸

Fig.2 Sampling method and shearing die size of Cu-Pb-Sn/Fe bimetal

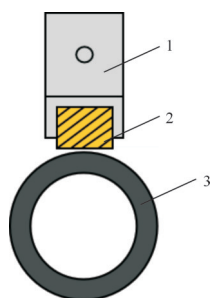


图3 摩擦副试样接触方式

Fig.3 Contact mode of friction pair specimens

1. 试样固定块 2. 试样 3. 摩擦环

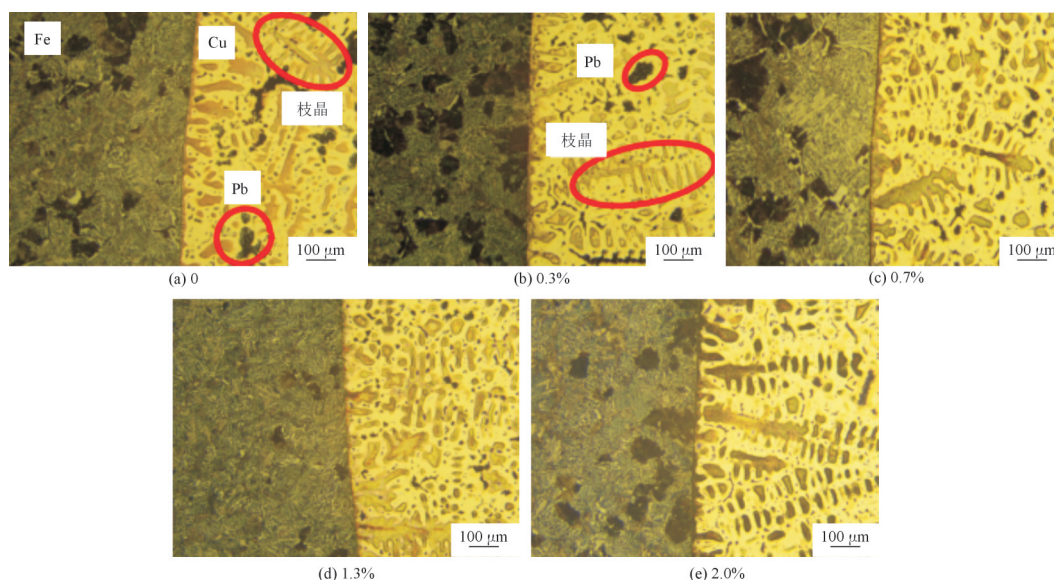


图4 不同Zn含量的Cu-Pb-Sn/Fe双金属界面金相组织

Fig.4 Metallographic structure of Cu-Pb-Sn/Fe bimetallic interface with different Zn contents

图5为Cu-Pb-Sn/Fe双金属界面SEM以及不同Zn含量的界面原子扩散距离。可以看出,界面形成

对试样进行表面处理,保证其表面粗糙度 $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$ 。干摩擦工况下,加载载荷为100 N,转速为200 r/min,时间为10 min;油润滑工况下加载载荷为300 N,转速为500 r/min,时间为15 min。使用7900F热场发射扫描电镜观察试样摩擦后的磨损表面的显微组织形貌,同时使用自带的能谱仪来表征磨损表面的元素分布。摩擦试验前后使用精度为0.000 1 g的电子分析天平进行称重,每个试样重复称量5次取平均值。磨损率 Φ 的计算公式为:

$$\Phi = \frac{m_1 - m_2}{\rho F v t}$$

式中, m_1 和 m_2 为磨损前、后的质量,g; ρ 为密度,g/cm³;F为加载载荷,N; v 为旋转速度,m/s; t 为摩擦时间,s。

2 试验结果与分析

2.1 Cu-Pb-Sn/Fe双金属显微组织分析

图4为不同Zn含量的Cu-Pb-Sn/Fe双金属界面金相组织,界面左侧组织为钢,右侧组织为铜,铜侧组织由 α -Cu固溶体、 δ 相和Pb颗粒构成。从图4a可以看出,未添加Zn时枝晶较粗大,Pb相在枝晶间呈长条状或块状聚集,分布不均匀;当Zn含量为0.3%时,一次枝晶细化,二次枝晶臂间距减小,铅相分散性改善,聚集程度降低。随着Zn含量增加(0.7%~1.3%),一次枝晶臂缩短,二次枝晶逐渐被溶断,枝晶较为细小且结合紧密,而当Zn添加量为2%时,枝晶粗大且不规则。

了连续且致密的冶金结合层,原子扩散距离呈先上升后下降的趋势。当Zn含量达1.3%时,界面原子扩散

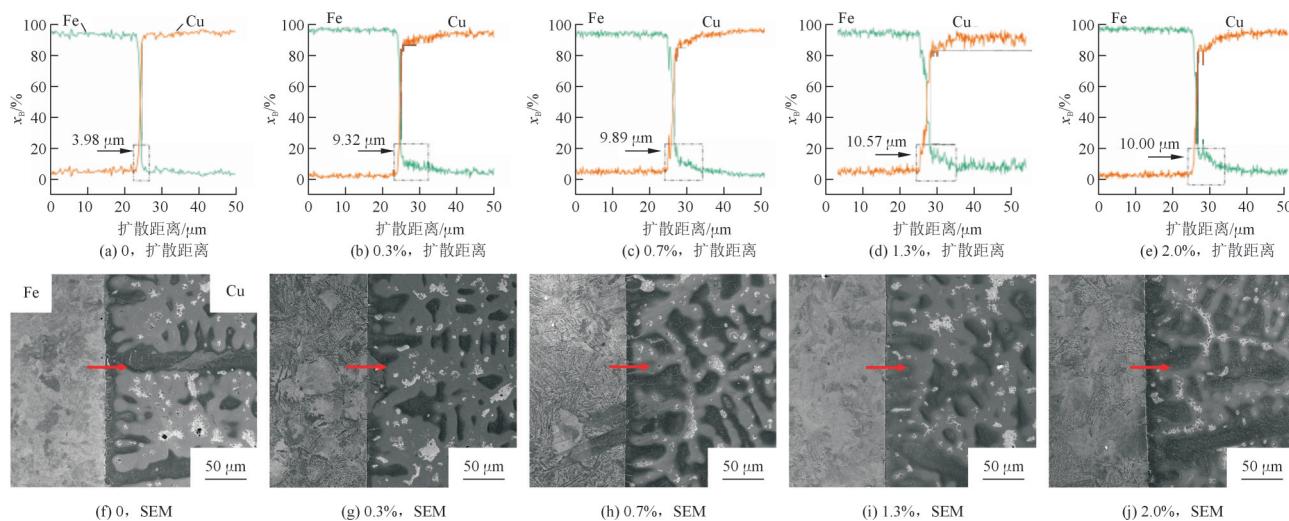


图5 不同Zn含量的Cu-Pb-Sn/Fe双金属界面形貌及原子扩散距离

Fig.5 Atomic diffusion distance of Cu-Pb-Sn/Fe bimetallic interface with different Zn contents

距离最大,达到 $10.57\ \mu\text{m}$ 。这是因为适量的Zn元素降低了合金液的表面张力,有利于合金液更好地流动并铺展在钢基体表面,同时增大了Cu、Fe等溶质原子在界面处的扩散,形成了牢固的Fe-Cu固溶体过渡层,促进原子在界面的扩散。当Zn含量为2.0%时,扩散距离降至 $10.00\ \mu\text{m}$,这里因为因过量Zn导致熔体黏度升高,Cu-Fe原子扩散阻力增大,抑制互扩散^[20]。

图6是Zn含量为2.0%时的Cu-Pb-Sn/Fe双金属

界面SEM元素面扫图(对应图5j)。可以看出,界面主要由Fe、Cu、Pb、Sn、Zn元素组成。Cu元素作为基体的主要成分,在整个组织中呈连续的基体分布,提供了合金的基本力学性能。图6c中,Pb与Cu完全不相溶,以颗粒状或长条状分布在基体中; δ 相是存在于枝晶间的以电子化合物 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ 为基体的固溶体,具有复杂的体心立方结构和硬而脆的特性。在图6d中,Sn元素分布均匀,界面结合层附近的Sn元素未出现偏析现象。

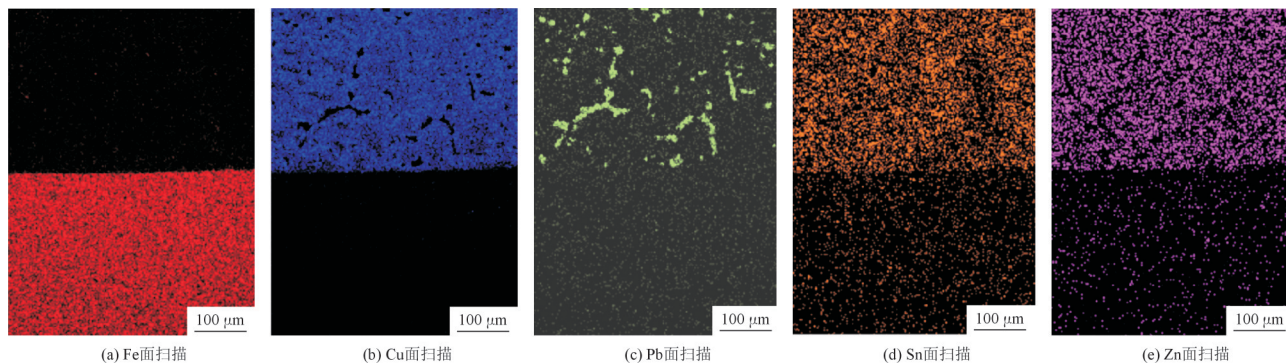


图6 Zn含量为2%时Cu-Pb-Sn/Fe双金属界面元素面扫图

Fig.6 SEM images and EDS mapping of Cu-Pb-Sn/Fe bimetallic interface with 2% Zn content

为研究添加了不同Zn含量后Cu-Pb-Sn/Fe双金属减摩铜层的铅颗粒尺寸大小的变化,用Image J软件统计了未腐蚀前不同尺寸范围内的Pb颗粒数量的占比,见图7。可以看出,Pb颗粒尺寸主要集中在 $0\sim 500\ \mu\text{m}^2$ 范围内。随着Zn含量增加, $0\sim 10\ \mu\text{m}^2$ 范围内的Pb颗粒数量占比呈现先逐渐增加后减少的趋势,而 $10\sim 500\ \mu\text{m}^2$ 范围内的则呈现先逐渐减少而后增加的趋势。未添加Zn时,结合金相显微组织观察可知,Pb颗粒尺寸较大且有偏聚,Zn含量为0.3%~1.3%时,

Pb颗粒的分布逐渐趋于均匀化,见图7a,当Zn含量为2.0%时,Pb颗粒出现小区域的聚集。这表明适量Zn的添加使得Pb颗粒逐渐细化且分布均匀,但Zn过量时会出现Pb颗粒聚集及尺寸增大的现象。Zn元素改变Pb颗粒尺寸和分布的主要原因是Zn添加使得试样组织中枝晶形貌发生了变化,不加Zn时枝晶较粗大、不规则,随着Zn的添加,枝晶逐渐细化,而Pb相主要分布在枝晶间,枝晶的生长状态则直接影响了Pb颗粒的分布及大小。

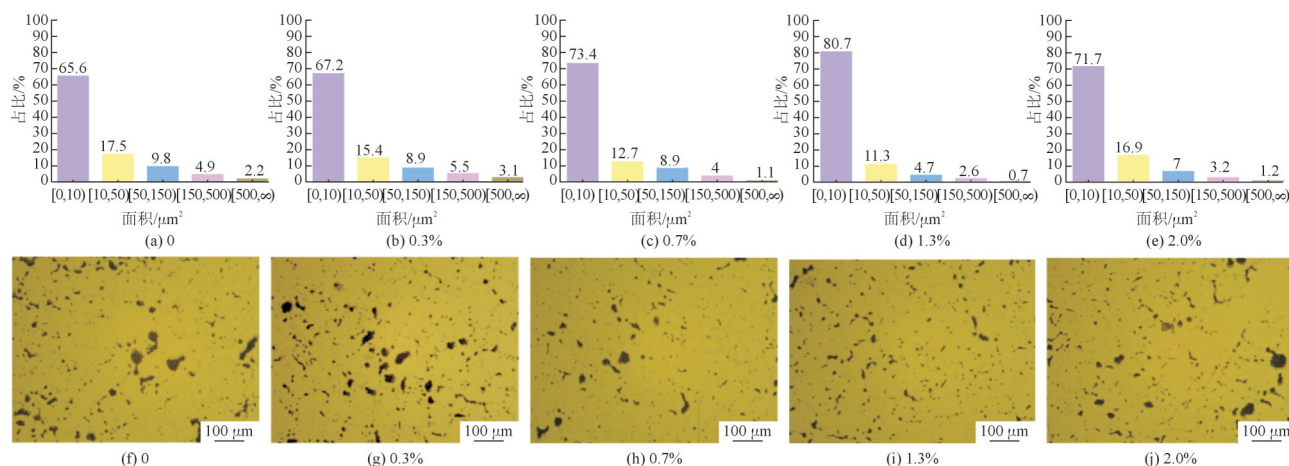


图7 不同Zn含量下Cu-Pb-Sn/Fe双金属减摩铜层Pb颗粒尺寸数目统计图及形貌

Fig.7 Statistics of Pb particle size and morphologies of antifriction copper layer in Cu-Pb-Sn/Fe bimetal with different Zn contents

2.2 Cu-Pb-Sn/Fe双金属力学性能分析

减摩铜层布氏硬度随Zn含量的变化见图8。可以看出,未添加Zn时,双金属布氏硬度(HBW)为70.6,随着Zn含量增加,硬度先逐渐升高后下降,当Zn含量为1.3%时,硬度达到峰值(79.4),较未添加Zn时提升了12.5%。当Zn含量达到2.0%时,硬度略有下降。

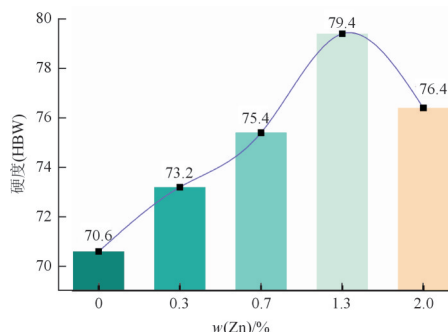
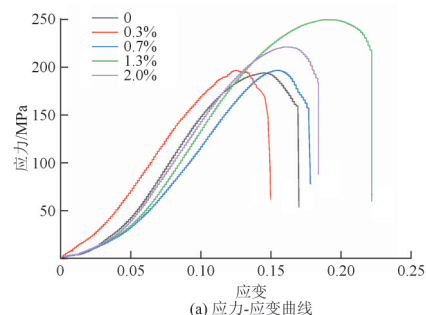


图8 Cu-Pb-Sn/Fe双金属减摩铜层布氏硬度

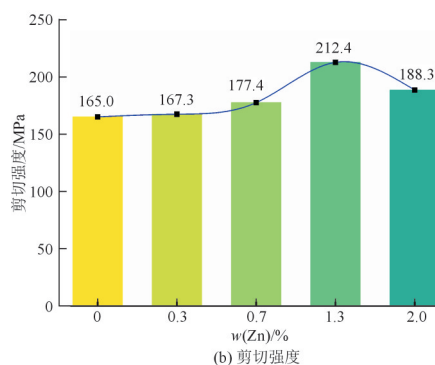
Fig.8 Brinell hardness of antifriction copper layer in Cu-Pb-Sn/Fe bimetal

图9为Cu-Pb-Sn/Fe双金属应力-应变曲线以及界面剪切强度。可以看出,未添加Zn时,整体应力水平较低,界面结合相对较弱,承载能力有限,界面剪切强度为165.0 MPa;添加1.3%的Zn时界面的应力峰值最高,体现出最优的界面结合强度,为212.4 MPa,较未添加Zn时提升了28.7%;当Zn含量为2.0%时,应力峰值低于1.3%的Zn时界面,界面结合强度降低,为188.3 MPa。

减摩铜层布氏硬度测试与界面剪切强度测试结果表明,适量添加Zn提升了Cu-Pb-Sn/Fe双金属的性能,这是因为Zn固溶于 α -Cu基体产生固溶强化效应,导致基体晶格畸变,从而阻碍位错运动,使材料的强度和硬度增加,同时均匀分布的Pb颗粒也增强了基体的承载能力^[21]。过量的Zn则会破坏铅相的均匀分布与界面组织均匀性,削弱基体连续性,导致硬度回落并降低



(a) 应力-应变曲线



(b) 剪切强度

图9 不同Zn含量下Cu-Pb-Sn/Fe双金属应力-应变曲线以及界面剪切强度

Fig.9 Stress-strain curves and interfacial shear strength of Cu-Pb-Sn/Fe bimetal with different Zn contents

结合强度。

2.3 Cu-Pb-Sn/Fe双金属摩擦磨损性能分析

2.3.1 干摩擦条件下试验结果与分析

图10为干摩擦条件下不同Zn含量减摩铜层的平均摩擦因数和磨损率。可以看出,未添加Zn时,总平均摩擦因数为0.318,磨损率为 $2.19 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。随着Zn含量增加,总平均摩擦因数和磨损率均先逐渐降低后增加,Zn含量为1.3%时值较低,总平均摩擦因数降至0.234,磨损率降低至 $1.44 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加Zn时分别下降了26.4%和34.2%。

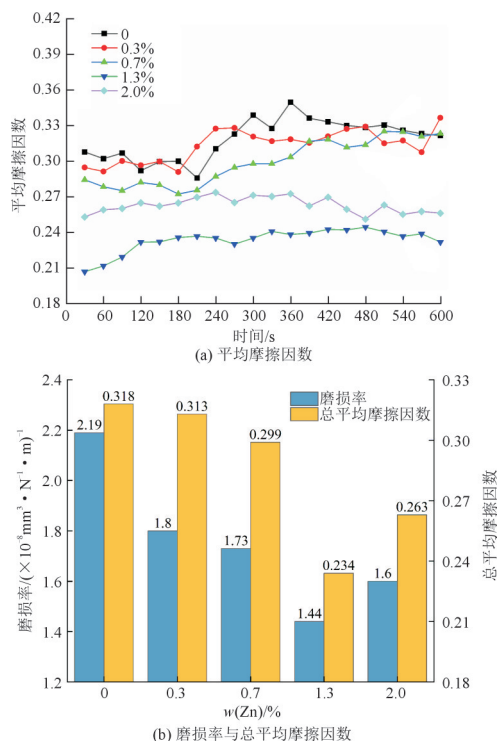


图 10 干摩擦条件下不同 Zn 含量减摩铜层的平均摩擦因数和磨损率

Fig.10 Average friction coefficient and wear rate of antifriction copper layers with different Zn contents under dry friction conditions

图 11 为干摩擦条件下不同 Zn 含量试样的磨痕

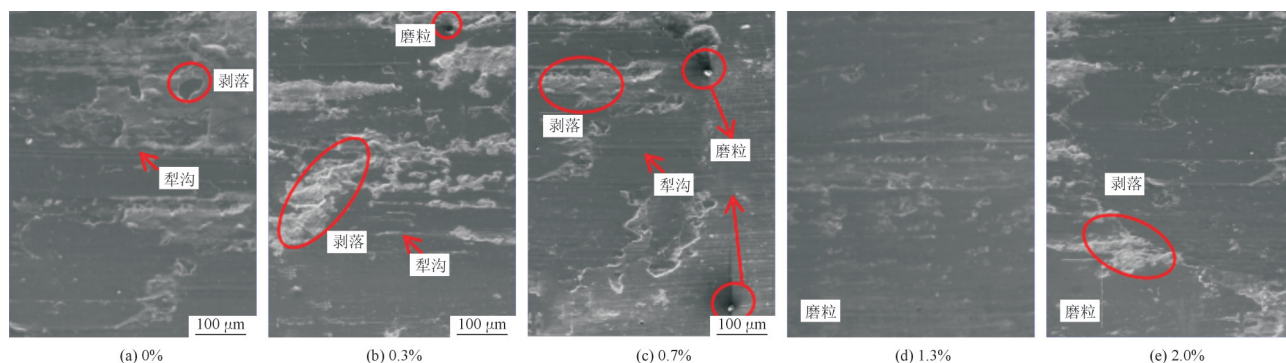


图 11 干摩擦条件下试样的磨痕 SEM 图

Fig.11 SEM images of worn trace of specimens under dry friction

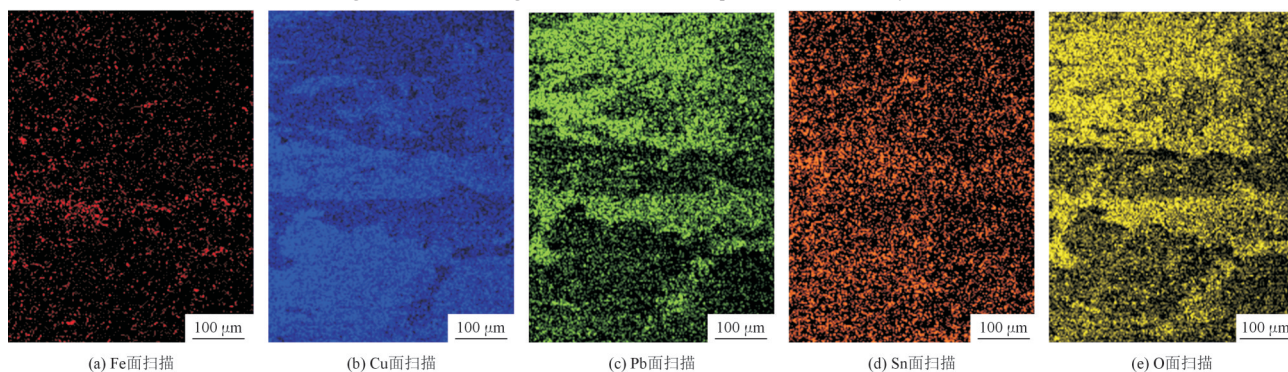


图 12 干摩擦条件下不加 Zn 元素的试样表面磨痕面扫描图

Fig.12 Surficial element mapping of specimens without Zn addition under dry friction condition

SEM。从图 11a 可以看出,磨痕表面有犁沟划痕并粘附着磨屑,有白色铅膜,而图 11b 中,磨痕表面粗糙,呈现复杂的剥落与划痕,表明摩擦过程中有局部应力集中导致材料脱落,硬质颗粒或对磨表面对减摩铜层的犁削作用产生较多划痕^[22]。在图 11c 中剥落和划痕减少,磨损区域分布相对集中,材料耐磨性提升。在图 11d 中几乎没有剥落,磨痕表面相对平整,划痕密度降低,说明 1.3% 的 Zn 添加有效抑制了粘着磨损。添加 2.0% 的 Zn 时,剥落区域较 0.7% Zn 增大,表明 Zn 含量过高导致材料脆性增大,抗疲劳剥落能力下降。

图 12 为干摩擦条件下不加 Zn 元素的试样表面磨痕面扫描图(对应图 11a)。可以看出,Fe 元素出现局部富集,分布不均,这是由于磨损较重导致摩擦环上 Fe 基体粘附到磨损表面;Pb 元素在磨损区域富集形成铅膜,因磨损剧烈,部分区域铅膜被破坏;O 元素在磨损表面有一定分布,表明干摩擦过程中表面发生氧化,形成的氧化膜虽能阻隔试样与摩擦环直接接触,减少磨损,但因磨损严重,其保护作用并不显著。

图 13 为干摩擦条件下 Zn 含量为 1.3% 的试样表面磨痕面扫描图(对应图 11d)。观察可知,Fe 元素分布相对离散,减摩铜层未产生剥落,界面结合基本稳定。Pb 元素在磨损区域虽有富集,但整体分布均匀,表明软相 Pb 在摩擦过程中向表面迁移,形成润滑膜以降低摩擦。

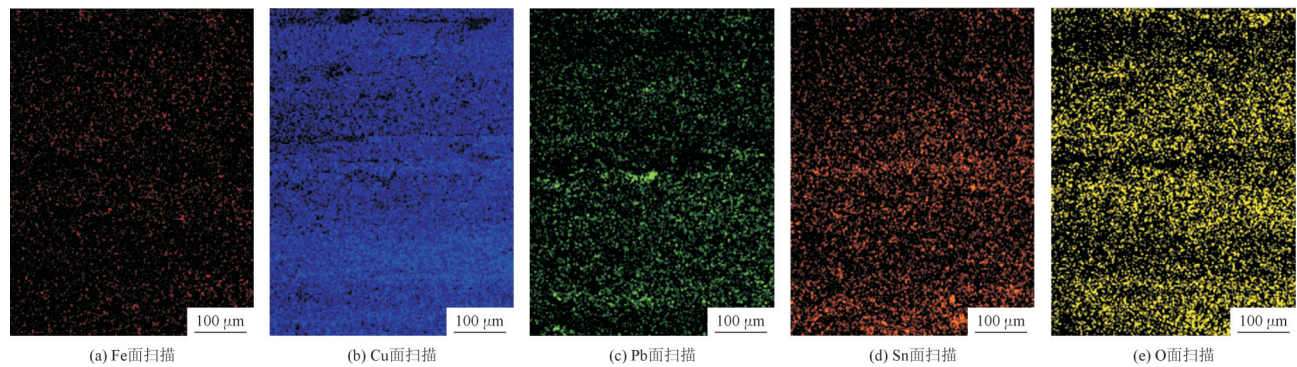


图 13 干摩擦条件下 Zn 含量 1.3% 的试样表面磨痕面扫描图

Fig.13 Surficial element mapping of specimens with 1.3% Zn addition under dry friction condition

图 13e 表明,摩擦过程有 O 元素存在,干摩擦高温促使表面氧化,形成氧化膜,缓解了磨损。

干摩擦条件下,Zn 含量对 ZCu15Pb7Sn/Fe 双金属的摩擦磨损性能影响显著。添加 1.3% 的 Zn 有相对更优的减摩耐磨性能,但干摩擦条件下磨损仍较明显。因此,为进一步改善减摩耐磨性能,优化了摩擦条件,引入润滑介质,研究在油润滑条件下不同 Zn 含量试样的耐磨性。

2.3.2 油润滑条件下试验结果与分析

图 14 为油润滑条件下不同 Zn 含量减摩铜层的平均摩擦因数和磨损率。相较于干摩擦条件,试样的平均摩擦因数和磨损率较低。图 14a 的摩擦因数是每 45 s 的平均摩擦因数,未添加 Zn 时,总平均摩擦因数为 0.117,磨损率为 $3.48 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。随着 Zn 含量增加,平均摩擦因数和磨损率均先逐渐降低后增加,当 Zn 含量为 1.3% 时,总平均摩擦因数降至 0.074,磨损率降低至 $2.18 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加 Zn 时分别下降了 36.8% 和 37.3%。

图 15 为油润滑条件下试样的磨痕 SEM。可以看出,未添加 Zn 时,磨痕表面存在较多明显的磨粒和较深的划痕,表面较为粗糙,磨损较为严重,见图 15a;随着 Zn 含量进一步添加,磨痕表面的磨粒和划痕有所减少,磨损程度有所减轻;添加 1.3% 的 Zn 时磨痕表面较为光滑,磨粒和划痕很少,磨损程度明显降低;但当 Zn 含量

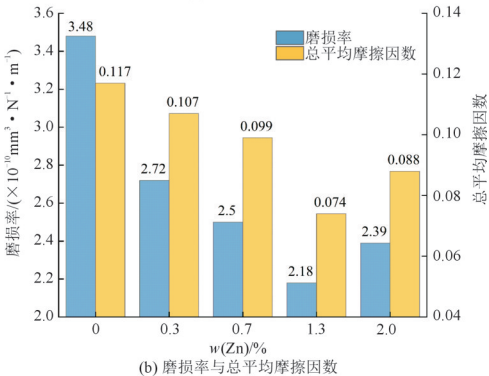
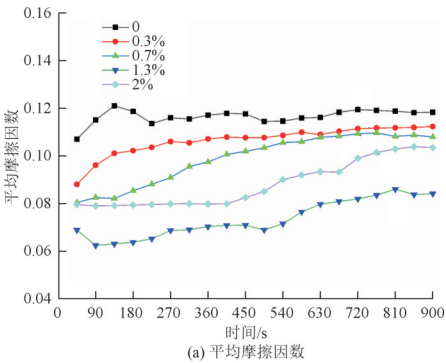


图 14 油润滑条件下不同 Zn 含量减摩铜层的平均摩擦因数和磨损率

Fig.14 Average friction coefficient and wear rate of antifriction copper layers with different Zn contents under oil lubrication

达到 2.0% 时,磨痕表面又出现了一些磨粒和较浅的划痕,磨损情况略有恶化。

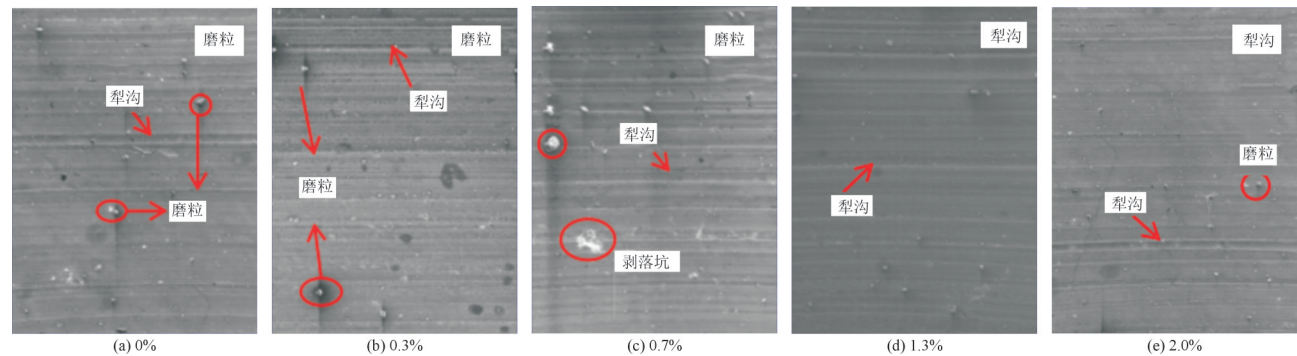


图 15 油润滑条件下试样的磨痕 SEM 图

Fig.15 SEM images of worn traces of specimens under oil lubrication

图 16 为油润滑条件下不加 Zn 元素的试样表面磨痕面扫描图(对应图 15a)。可以看出,Fe 元素在磨痕表面出现部分富集,说明试样与摩擦副间有轻微粘着磨

损;Pb 元素分布较为弥散,有助于在摩擦过程中形成润滑膜;O 元素分布均匀,表明在摩擦过程中,磨痕表面发生了氧化现象,可能伴有轻微的氧化磨损。

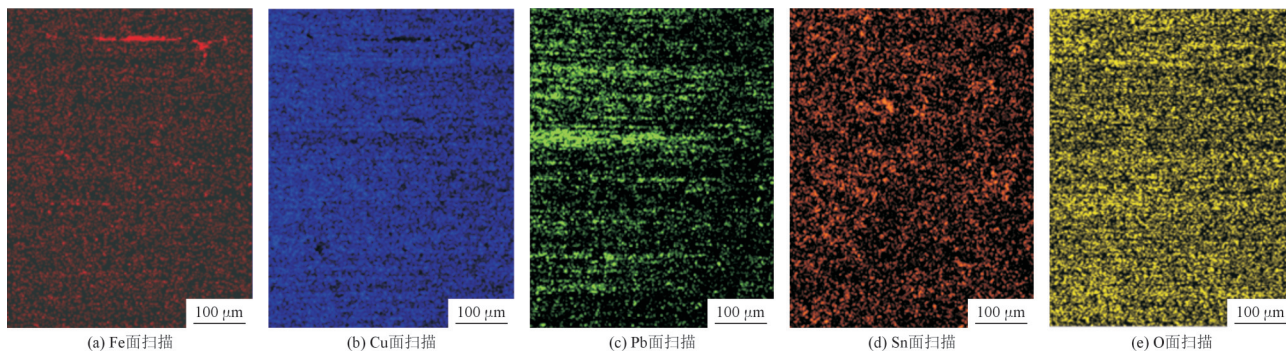


图 16 油润滑条件下不加 Zn 元素的试样表面磨痕面扫描图

Fig.16 Surficial element mapping of specimens without Zn addition under oil lubrication condition

图 17 是油润滑条件下 Zn 含量为 1.3% 的试样表面磨痕面扫描图(对应图 15d)。与图 16 相比,Fe 元素在磨痕表面分布相对均匀,这表明当 Zn 含量为 1.3% 时,摩擦过程中 Fe 从基体向表面的转移有所抑制。Pb 元

素分布较不加 Zn 元素时更具规律性,有助于其更好地发挥润滑作用。O 元素分布范围和强度相较于不加 Zn 的试样有所降低,表明在 Zn 含量为 1.3% 时,磨痕表面的氧化程度有所减轻。

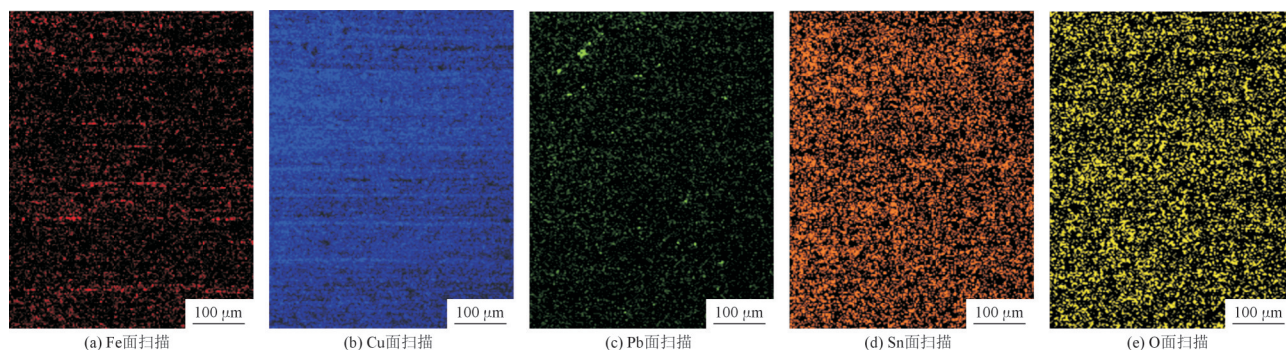


图 17 油润滑条件下 Zn 含量 1.3% 的试样表面磨痕面扫描图

Fig.17 Surficial element mapping of specimens with 1.3% Zn under oil lubrication

由于 Fe 元素减少和 O 元素分布降低,说明粘着磨损和氧化磨损得到了缓解,而 Pb、Sn 等元素相对更均匀地分布,有助于在摩擦过程中形成有效的润滑膜,降低摩擦因数,减轻磨损。不加 Zn 元素时,磨损机制为轻微粘着磨损、氧化磨损与磨粒磨损;添加 1.3% 的 Zn 时,抑制了粘着磨损和氧化磨损,同时元素分布改善使得润滑作用增强,综合提升了材料的减摩耐磨性能,主要磨损机制为轻微氧化磨损与磨粒磨损。

2.3.3 摩擦磨损机理分析

干摩擦条件下,Zn 添加(0%~1.3%)表现出积极作用,Zn 促进细化的 Pb 颗粒在摩擦过程中连续析出,形成厚度均匀的 Pb 润滑膜,降低真实接触面积,且摩擦表面形成少量氧化膜,可有效阻隔基体直接接触,磨损表面损伤逐渐减轻,磨损机制以轻微氧化磨损、粘着磨损和磨粒磨损为主,摩擦因数最低,为 0.23。Zn 含量为 2.0% 时,基体的脆性上升,粗大的 Pb 颗粒易脱落形成硬质磨粒,在表面犁削形成划痕,铅锡青铜中硬脆相在

摩擦过程中,导致局部区域剥落增加,引发轻微粘着磨损,摩擦因数波动增大,磨损性能降低,磨损率升至 $1.60 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。油润滑条件下,Zn 固溶强化 α -Cu 基体,支撑润滑油形成的流体动压膜,同时在摩擦过程中,Pb 颗粒形成的物理吸附膜与少量润滑油作用形成的极性分子膜结合,表现出协同作用,Zn 含量为 1.3% 时,摩擦因数低至 0.074,磨痕表面仅有浅划痕,磨损以轻微磨粒磨损为主。Zn 含量为 2.0% 时,剥落的硬脆相颗粒混入润滑油,加剧磨粒磨损,摩擦因数波动至 0.088,磨损率升至 $2.39 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

综上,两种工况下,Zn 通过优化 Pb 分布、细化 Pb 颗粒、优化界面结合,提高基体布氏硬度,提升润滑膜稳定性与基体的承载能力,与铅锡青铜中的硬脆相共同作用,显著提高双金属减摩铜层的耐磨性。在摩擦过程初期,Pb 颗粒率先软化并转移至摩擦表面形成 Pb 膜^[23],使得磨损表面光滑,降低摩擦因数;随着摩擦磨损的进行,试样在与摩擦副相互作用时,由于摩擦升温及变形挤压的共同作用,游离态的铅会逐渐被挤出铜

合金材料表面,在摩擦副表面展开形成连续的软质铅润滑膜,使得磨损表面光滑,减小了铜合金基体与摩擦副的接触面积,从而显著降低磨损率。过量Zn添加会提升基体脆性,使Pb颗粒部分聚集,影响其分布,在摩擦过程中Pb颗粒脱落与基体硬脆相加加剧磨损,使材料的耐磨性能降低。通过摩擦因数与磨损率以及磨痕分析,该机制为高铅青铜轴承材料的设计提供了理论基础,即通过合金化调控Pb的“挤出-成膜-耐剥落”行为,平衡材料强度与润滑性能。

3 结 论

(1)在液-固复合铸造制备的ZCuPb15Sn7/42CrMo双金属中,Zn添加显著细化了Pb颗粒,促进界面原子扩散,优化了组织均匀性。当Zn含量为1.3%时,Pb颗粒尺寸及界面组织呈现最优化。

(2)Zn添加有效提升了减摩铜层布氏硬度和界面剪切强度。当Zn含量为1.3%时,布氏硬度(HBW)为79.4,较未添加Zn时提升了12.5%;界面剪切强度为212.4 MPa,较未添加Zn元素时提高了28.7%。

(3)Zn显著改善了Cu-Pb-Sn/Fe双金属的摩擦磨损性能。干摩擦条件下,Zn含量为1.3%时,总平均摩擦因数为0.234,磨损率为 $1.44 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加Zn元素时分别下降了26.4%和34.2%;油润滑条件下,Zn含量为1.3%时,总平均摩擦因数为0.074,磨损率为 $2.18 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,较未添加Zn时分别下降了36.8%和37.3%。

(4)综合考虑材料组织、硬度、界面性能及摩擦磨损性能,在ZCuPb15Sn7/42CrMo双金属中,Zn的最佳添加量为1.3%。

参 考 文 献

- [1] DONG B W, JIE J C, PENG B, et al. Revealing the relationship between morphology of Pb-rich secondary phases and mechanical properties of laminated Cu-Pb-Sn/steel composite through CALPHAD and FEA [J]. Metall. Mater. Trans., 2022, A53: 1462-1478.
- [2] DONG B W, JIE J C, WANG S H, et al. Fabrication of Cu-24Pb-2Sn/C10 laminar composite by solid-liquid continuous casting compositing [J]. Materials Letters, 2020, 262: 127-174.
- [3] 李宝民,徐成海,闫玉涛.滑动轴承合金耐磨性能规律的探讨[J].机械制造,2009,47(11):8-10.
- [4] 任晓燕,张国伟,徐宏,等.ZCuPb₂₀Sn₅合金耐磨性能研究[J].摩擦学学报,2020,40(4):467-476.
- [5] LIU R T, XIONG X, CHEN F S, et al. Tribological performance of graphite containing tin lead bronze-steel bimetal under reciprocal sliding test [J]. Tribology International, 2011, 44(2): 101-105.
- [6] 陈宁宁,张国伟,张有贵,等.淬火对Cu-Pb-Sn/Fe双金属组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(3):333-338.
- [7] 邢明,张国伟,王明杰,等.铜基体参数对铜/铜双金属结合界面的影响[J].热加工工艺,2020,49(8):77-79, 83.
- [8] ZHANG Y, LI L Y, LI X, et al. Dissimilar joining of Cu₄₆Zr₄₆Al₈ metallic glass and 304 stainless steels through liquid-solid casting [J]. Materials Science and Engineering, 2025, A925: 147-907.
- [9] 李慧蓉,程玉杰,马涛,等.铜/钢双金属固-固相复合的研究现状及展望[J].热加工工艺,2021,50(18):19-24.
- [10] 姜超,龙伟民,冯健,等.铜/不锈钢爆炸焊界面组织及性能[J].焊接,2021(9):22-27,62.
- [11] 刘越,张太正,孙爱新,等.铜/钢双金属复合制备工艺技术研究现状[J].材料导报,2015,29(15):10-14,21.
- [12] DONG B W, JIE J C, YAO X X, et al. Effect of Sn addition on morphology evolution of secondary phase in hypomonotectic Cu-Pb-Sn alloy during solidification [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 791: 936-946.
- [13] 王明杰,张国伟,刘少杰.微量元素对铅锡青铜组织与性能的影响[J].热加工工艺,2016,45(5):87-89.
- [14] TURHAN H, AKSOY M, KUZUCU V, et al. The effect of manganese on the microstructure and mechanical properties of leaded-tin bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 114(3): 207-211.
- [15] AKSOY M, KUZUCU V, TURHAN H. A note on the effect of phosphorus on the microstructure and mechanical properties of leaded-tin bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1-2): 113-119.
- [16] CHANHAN R D, BHARTI P K. A review of tribological excellence of bronze alloys [J]. Discov. Appl. Sci., 2025, 7: 283.
- [17] BOUCHERIT A, AVETTAND-FENOËL M N, TAILLARD R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu [J]. Materials & Design, 2017, 124: 87-99.
- [18] 刘毅军,张国伟,王赵杰,等.Zn对ZCuSn10Pb10合金组织与摩擦磨损性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(10):1286-1290.
- [19] 任冰冰,王元龙,张吉贤,等.熔铸工艺对铜钢双金属复合材料组织性能作用规律[J].铸造,2021,70(5):515-520.
- [20] XIE L L, ZHENG Y S, LU H, et al. Thermal diffusion and microstructural evolution of Cu-Zn binary system under hypergravity [J]. Acta Materialia, 2024, 268: 119-790.
- [21] 李飞,赵侠.Cu-Zn合金固溶强化的电子理论研究[J].稀有金属,2011,35(3):336-341.
- [22] 刘越,陈超,吕文玲.离心铸造高铅锡青铜合金摩擦磨损性能研究[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(3):338-342.
- [23] EQUEY S, HOURIET A, MISCHLER S, et al. Wear and frictional mechanisms of copper-based bearing alloys [J]. Wear, 2011, 273(1): 9-16.

(编辑:彭瑾)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!