



Sn-15Cu-xNi合金组织及油润滑磨损行为

高秉阳¹, 郭华琪¹, 曹志强^{1,2}

(1. 大连理工大学 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 大连 116024;

2. 大连理工大学 宁波研究院, 宁波 315000)

摘 要: 利用电感耦合等离子发射光谱仪、场发射电子探针、场发射扫描电镜、激光扫描共聚焦显微镜、布氏硬度计、多功能摩擦磨损试验机, 研究 Sn-15Cu-xNi 合金的组织及油润滑磨损行为。结果表明: Sn-15Cu 合金中的硬质颗粒为 $\text{Cu}_3\text{Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 组成的板条状包晶组织, 添加 0.1%Ni 可以细化 Cu_3Sn 并使 Cu_6Sn_5 包覆层增厚, 添加 0.5%Ni 可以完全抑制 Cu_3Sn 的出现, 并使 Cu_6Sn_5 明显细化且弥散分布, 添加 1%Ni 后, Cu_6Sn_5 的细化效果减弱。Sn-15Cu-xNi 合金具有高载稳定性与减摩性。在 200 N 载荷作用下, 硬质颗粒起承载作用, 而软基体磨损后形成的微小坑洞成为贮油空间, 维持了润滑油膜的稳定性。Ni 含量为 0.5% 时, 磨损表面的贮油坑洞最均匀细密, 致使 Sn-15Cu-0.5Ni 合金具有最优的磨损性能。

关键词: 显微组织; 摩擦磨损; 轴瓦; 锡基合金

文章编号: 1004-0609(2022)-07-1966-09

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

引文格式: 高秉阳, 郭华琪, 曹志强. Sn-15Cu-xNi 合金组织及油润滑磨损行为[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(7): 1966–1974. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42145

GAO Bing-yang, GUO Hua-qi, CAO Zhi-qiang. Microstructure and tribological properties of Sn-15Cu-xNi alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 1966 – 1974. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42145

轴瓦作为机械工业中的重要零件, 其性能对装置的工作精度、稳定性、可靠性、安全性和使用寿命有重要影响^[1]。在轴瓦与轴颈组成的滑动摩擦副中, 轴瓦受损或失效之后可以轻易更换, 而轴颈通常与轴一体, 轴颈的制造和维护成本远高于轴瓦。因此, 轴瓦材料应具有良好的减摩性、抗咬合性、可嵌入性以及承载能力, 使磨损主要发生在轴瓦上, 尽量减少轴颈的磨损, 从而在保证设备稳定运行的同时, 降低设备的维护成本^[2]。

美国人 Isaac Babbitt 以质地软、强度低的 Sn 为基^[3], 加入 Sb、Cu 用以提高合金强度和硬度^[4], 得

到了最广为人知的轴瓦材料—巴氏合金^[5]。巴氏合金具有独特的组织特征, 硬质的金属间化合物相弥散分布在软基体中, Sn 基体使合金具有非常好的嵌藏性、顺应性和抗咬合性, 并在磨合后, 软基体内凹, 硬质金属间化合物外凸, 使滑动面之间形成微小间隙, 成为贮油空间和润滑油通道, 利于减摩; 外凸的硬质点起支承作用, 有利于承载^[6]。但当 Cu 含量高于 7.6%(质量分数)时, 凝固过程中会生成板条状初生相 Cu_3Sn , 随后降温过程中 Cu_3Sn 与液相发生包晶反应生成 Cu_6Sn_5 , 致使 Cu_6Sn_5 包覆在初生相 Cu_3Sn 表面, 这种板条状形貌的金属间化

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFE0306103, 2017YFA0403803); 国家自然科学基金资助项目(51771041); 宁波市重大科技专项(2018B10030)

收稿日期: 2021-08-04; **修订日期:** 2021-10-14

通信作者: 曹志强, 教授, 博士; 电话: 13941191184; E-mail: caozq@dlut.edu.cn

合物过于粗大^[7], 不利于油膜稳定性以及合金的耐磨性提高。

微合金化是改善凝固组织的重要方法^[8]。本文作者的早期研究^[7,9]发现, Ni 可以显著提高 Cu_6Sn_5 的形核温度, 从而抑制 Cu_3Sn 的析出, 当 Sn-8.5Cu 合金中的 Ni 含量高于 0.05%(质量分数)时, $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 的形核温度会高于 Cu_3Sn 的形核温度, 致使凝固过程中 Cu_3Sn 不再出现, 转而使 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 直接从液相析出。Ni 元素抑制粗大板条状 Cu_3Sn 的同时^[10], 促进了 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 在 Sn 基体中的弥散分布^[7], 对合金性能有非常好的改善效果。

以 Sn 为基, 通过提高 Cu 含量生成硬质颗粒 Cu_3Sn 和 Cu_6Sn_5 , 并以 Ni 元素调控合金组织, 理论上可以同时兼顾减摩性、耐磨性、可嵌入性及承载能力。然而, 到目前为止还没有关于 Sn-Cu-Ni 合金的摩擦磨损行为的研究, 将 Sn-Cu-Ni 合金应用于轴瓦材料这一研究领域尚属空白。因此, 本文作者拟通过探究不同 Ni 含量下 Sn-15Cu-xNi 合金的组织及摩擦磨损性能, 找出 Ni 含量对 Sn-Cu-Ni 合金组织和性能的影响规律, 从而得到一种全新的轴瓦

合金材料以满足现代机械制造的需求。

1 实验

Sn-15Cu-xNi($x\%=0, 0.1\%, 0.5\%, 1.0\%$, 质量分数)合金由纯度为 99.99% 的 Sn 锭、99.99% 的 Cu 粒和 99.99% 的 Ni 粒在 600 °C 井式电阻炉中炼制, 本文中各元素含量均为质量分数。待成分均匀后, 熔体浇注至涂有氮化硼的不锈钢模具中。距各铸锭底部 10 cm 处切取样品薄片, 采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES, Agilent 720, 美国)进行成分测定, 结果如表 1 所示。

使用 JXA-8530F PLUS 场发射电子探针背散射成像测各成分合金的显微组织, 并进行元素分析。使用 HBE-3000A 布氏硬度计, 依据 GB/T 231.1—2018 标准^[11]进行硬度测试。使用 MVF-1A 立式多功能摩擦磨损试验机, 依据 ASTM G 99—05 标准^[12]进行销-盘式摩擦磨损试验。销试样如图 1(a)所示, 45# 钢盘的摩擦面三维形貌及粗糙度通过 OLS4000 激光扫描共聚焦显微镜测得, 如图 1(b)所

表 1 ICP-OES 测定 Sn-15Cu-xNi 合金成分

Table 1 Composition of Sn-15Cu-xNi alloy determined by ICP-OES

x	Mass fraction/%						
	Sn	Cu	Ni	Pb	Sb	Zn	Al
0	Bal.	14.932	<0.0005	0.001	0.001	<0.0005	<0.0005
0.1	Bal.	14.863	0.097	0.001	0.001	<0.0005	<0.0005
0.5	Bal.	15.013	0.459	0.001	0.001	<0.0005	<0.0005
1.0	Bal.	15.027	0.971	0.001	0.001	<0.0005	<0.0005

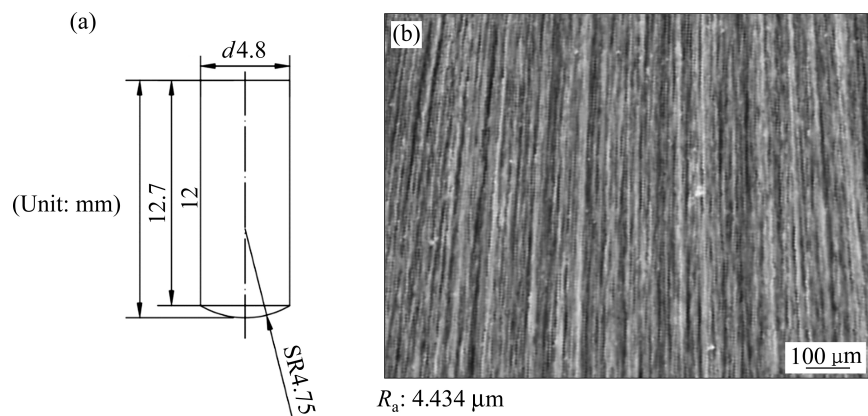


图 1 销-盘式摩擦磨损试验

Fig. 1 Wear testing experiment with pin-on-disk apparatus: (a) Pin sample; (b) Surface morphology of 45# steel disk

示。试验载荷 100 N、200 N、400 N，转速 48 r/min (线速度 60 mm/s)，实验时间 1200 s，润滑油为美孚一号 5W-30 全合成发动机油。摩擦磨损测试后，使用搭载能谱仪的 SUPARR 55 场发射扫描电镜分析磨损表面形貌及成分。依据 ASTM G99—05 标准^[12] 计算出磨损量 ΔV ，并计算磨损率^[13]：

$$W_r = \frac{\Delta V}{F \times L} \quad (1)$$

式中： W_r 为磨损率； ΔV 为磨损体积； F 为试验载荷； L 为滑动距离。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图2所示为 Sn-15Cu- x Ni 合金的背散射电子像，由电子探针定量分析测得深色析出相为 Cu_3Sn ，浅色析出相为 Cu_6Sn_5 ，灰白色基体中 Sn 含量大于 99%。Sn-15Cu 合金中 (见图 2(a))，粗大板条状 Cu_3Sn 表面包覆一层 Cu_6Sn_5 。与 GAO 等^[7] 的 Sn-8.5Cu 合金同步辐射原位成像研究结果相符，Sn 基

高铜合金中初生相 Cu_3Sn 优先从液相析出，随后发生包晶反应： $\text{Cu}_3\text{Sn} + \text{液相} \rightarrow \text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ，但由于 Cu_3Sn 表面被 Cu_6Sn_5 包覆后无法与液相直接接触，固相扩散速度缓慢致使包晶反应不完全，因此完全凝固合金中有 Cu_3Sn 相残留。如图 2(b) 所示，在 0.1Ni 的作用下 Cu_3Sn 变细， Cu_6Sn_5 包覆层增厚。此现象与 MEHREEN 等^[10] 关于 Ni 的添加量对 Sn-10Cu 合金影响的研究结果一致，这是由于 Ni 元素使 Sn-Cu 相图发生一定的偏移，从而起到抑制 Cu_3Sn 并促进 Sn_6Sn_5 析出的效果。如图 2(c) 所示，添加 0.5%Ni 后，合金显微组织出现重大变化， Cu_3Sn 被完全抑制，细密的 Cu_6Sn_5 均匀分布在 Sn 基体中。添加 1%Ni 后， Cu_6Sn_5 的晶粒出现了一定的粗化 (见图 2(d))。本文通过电子探针对 Sn-15Cu-0.1Ni 和 Sn-15Cu-1.0Ni 进行元素面分析，从而进一步讨论 Ni 元素对 Sn-15Cu 合金组织的影响。

图3所示为 Sn-15Cu-0.1Ni 合金的元素分布图。通过 Cu、Sn 元素分布可以清晰地看出中心区 Cu_3Sn 包覆层 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 以及基体 Sn 之间的界面。由于 Ni 元素添加量只有 0.1%，探测难度大，因此，富

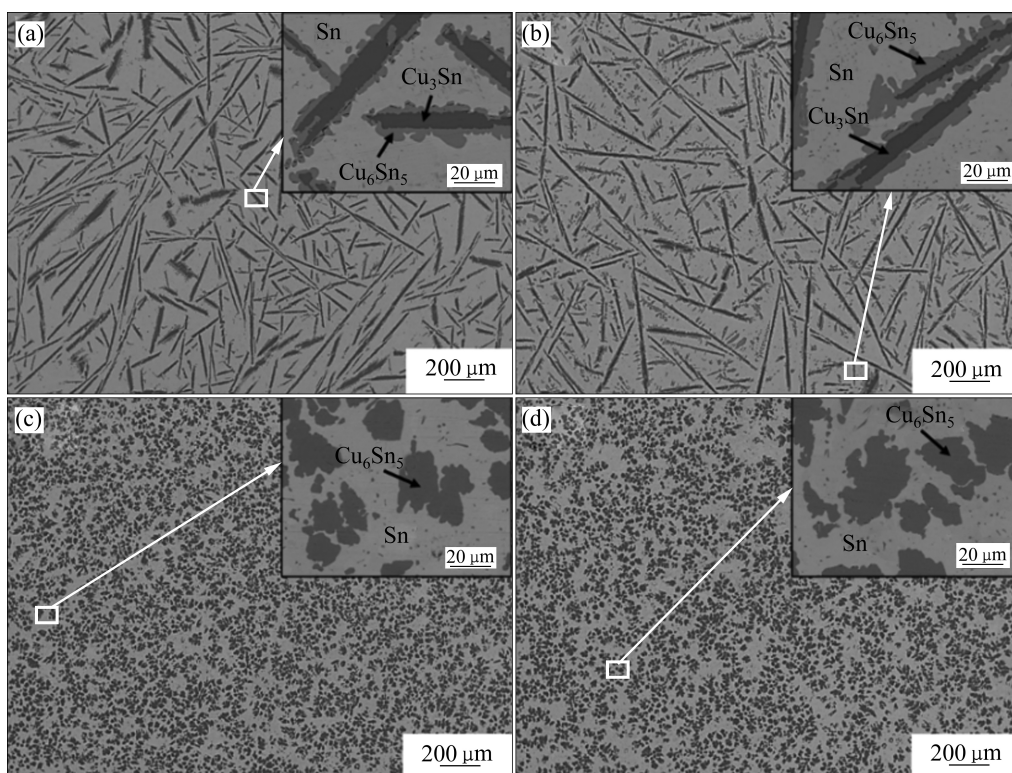


图2 Sn-15Cu- x Ni 合金的背散射电子成像图

Fig. 2 Backscattered electron images of Sn-15Cu- x Ni alloy: (a) Sn-15Cu; (b) Sn-15Cu-0.1Ni; (c) Sn-15Cu-0.5Ni; (d) Sn-15Cu-1.0Ni

集区域不明显,但仍可辨认出主要分布在包覆层 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 区域。在凝固过程中Ni原子可以取代 Cu_6Sn_5 中的部分Cu原子,进而转变为 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 相^[14]。YU等^[15]通过第一性原理计算了 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的结构和电子性能,其能量计算和态密度结果表明 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 具有比 Cu_6Sn_5 更稳定的结构。图4所示为Sn-15Cu-1.0Ni合金的元素分布图,通过图4(c)的Sn元素分布可以清晰看出 Cu_3Sn 已完全消失, $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 成为合金中唯一的金属间化合物颗粒。进一步对比图4(a)与(b)可以明显看出,Ni元素富集在 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的颗粒中心。据文献报道,相较于 Cu_6Sn_5 , $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的生成焓更负,Ni可以显著提高 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的形核温度^[7]。因此,在凝固过程中,富Ni的 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 在高温下优先析出,随后较低Ni含量的 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 依附先析出相继续生长,致使Ni元素分布呈现出从中心至边缘含量递减的现象。同时,由于Ni原子在 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 中占据Cu原子的位置,被替换的Cu原子仍处于溶质中致使溶质Cu浓度升高加速了 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的生长,因此Ni

含量过高在一定程度上会导致 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 的粗化。

2.2 摩擦磨损性能

根据图2所示Sn-15Cu-xNi合金的组织特征分析,Sn-15Cu和Sn-15Cu-0.1Ni合金中的硬质颗粒为 $\text{Cu}_3\text{Sn}+(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 形成的包晶组织,Sn-15Cu-0.5Ni和Sn-15Cu-1.0Ni合金中硬质颗粒为单一 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 。本文从两类组织中分别选取硬质颗粒较细密的Sn-15Cu-0.1Ni与Sn-15Cu-0.5Ni,对比探究不同载荷下两种合金的摩擦磨损行为。

图5所示为Sn-15Cu-0.1Ni与Sn-15Cu-0.5Ni在油润滑、转速为48 r/min、不同载荷下的摩擦磨损行为。由图5可见,Sn-15Cu-0.1Ni合金的摩擦因数随时间的变化如图5(a)所示,载荷越高,摩擦因数越低,且波动越小,呈现出优良的高载稳定性与减摩性。如图5(b)所示,Sn-15Cu-0.5Ni合金的摩擦因数随时间的变化呈现先降低后升高的规律,低载荷时摩擦因数随载荷增加而降低,而当载荷为400 N时,摩擦因数显著增大且波动剧烈,这说明当载荷

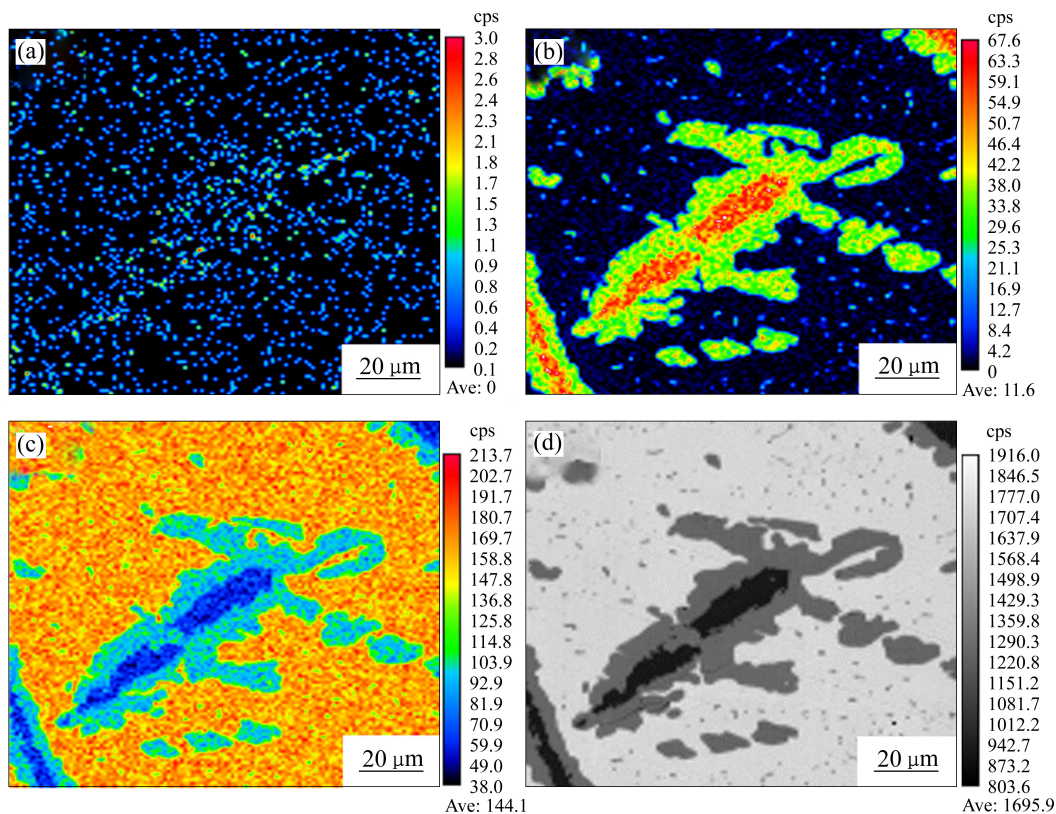


图3 Sn-15Cu-0.1Ni的元素面分析

Fig. 3 EPMA mappings analysis of Sn-15Cu-0.1Ni alloy (cps: counts per second): (a) Ni element distribution; (b) Cu element distribution; (c) Sn element distribution; (d) Backscattered electron images

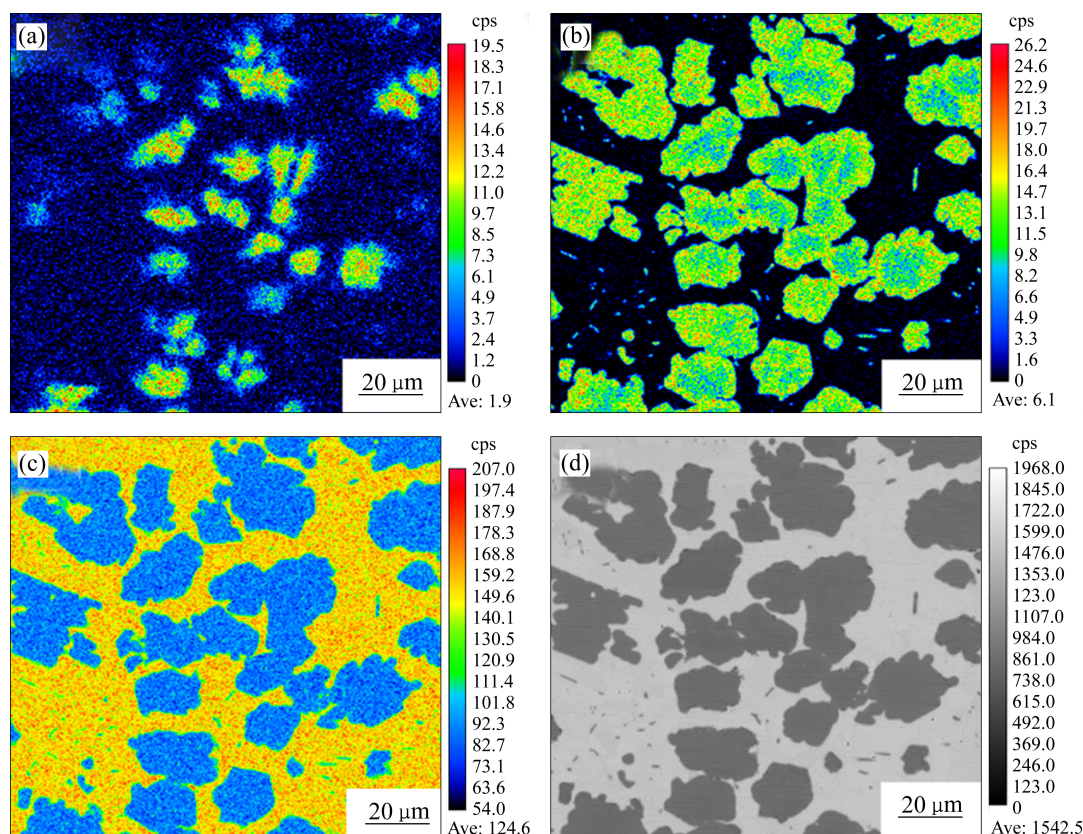


图4 Sn-15Cu-1Ni的元素面分析

Fig. 4 EPMA mappings analysis of Sn-15Cu-1Ni alloy (cps: counts per second): (a) Ni element distribution; (b) Cu element distribution; (c) Sn element distribution; (d) Backscattered electron images

超出 Sn-15Cu-0.5Ni 的适用承载极限时, 减摩性与稳定性严重受损。表2所列不同Ni含量合金的布氏硬度测试结果, Sn-15Cu-0.1Ni的硬度值最高, 因此其承载能力高于 Sn-15Cu-0.5Ni 的。图5(c)所示为两种合金在稳定磨损阶段摩擦因数平均值随载荷的变化, 与图5(a)和(b)的变化趋势一致, 未超出承载极限前, 载荷越高摩擦因数越低且波动越小, 当超出了 Sn-15Cu-0.5Ni 的承载极限时, 摩擦因数随之升高。图5(d)所示为两种合金磨损率随载荷的变化, 合金磨损率随载荷的增大呈现出先降低后升高的趋势, 载荷 200 N 时, 其磨损率最低。此时, Sn-15Cu-xNi 合金磨合时呈现出软基体内凹, 硬质点外凸, 滑动面之间存在微小贮油空间的特征, 从而具有优良的减摩性能。因此, 本文作者在载荷为 200 N 的条件下, 进一步对比探究了不同 Ni 含量 Sn-15Cu-xNi ($x=0, 0.1, 0.5, 1.0$) 合金的摩擦磨损行为及磨损形貌。

图6所示为 Sn-15Cu-xNi 合金在 200 N、转速为

48 r/min、油润滑条件下的摩擦磨损行为。如图6(a)所示, Sn-15Cu-xNi 合金的摩擦因数及波动很小, 大致在 0 至 0.05 之间波动, 具有优良的减摩性。图6(b)所示磨损率则具有较大差异, 其中含 0.5Ni 试样的磨损率明显低于其他试样的, 在本实验条件中具有最优良的耐磨性。耐磨性与合金组织密切相关, 在图2所示的显微组织中, 含 0.5Ni 的合金中硬质金属间化合物最细小且弥散分布, 因而磨损率最低。具体磨损机制需要通过磨损表面进一步分析。

图7所示为 Sn-15Cu-xNi 合金在 200 N、转速为 48 r/min、油润滑条件下磨损 1200 s 后的磨损表面形貌, 红色虚线框所示区域的局部放大图见右上角分图。试样表面存在大量的微小坑洞, 坑洞中显露出具有一定几何形状的小颗粒。能谱分析测试发现, Sn-15Cu-0Ni(见图7(a))和 Sn-15Cu-0.1Ni(见图7(b))坑洞附近, Cu 与 Sn 摩尔比接近 2:1, 介于 Cu_3Sn 与 Cu_6Sn_5 之间, 结合前文图2和3该成分合

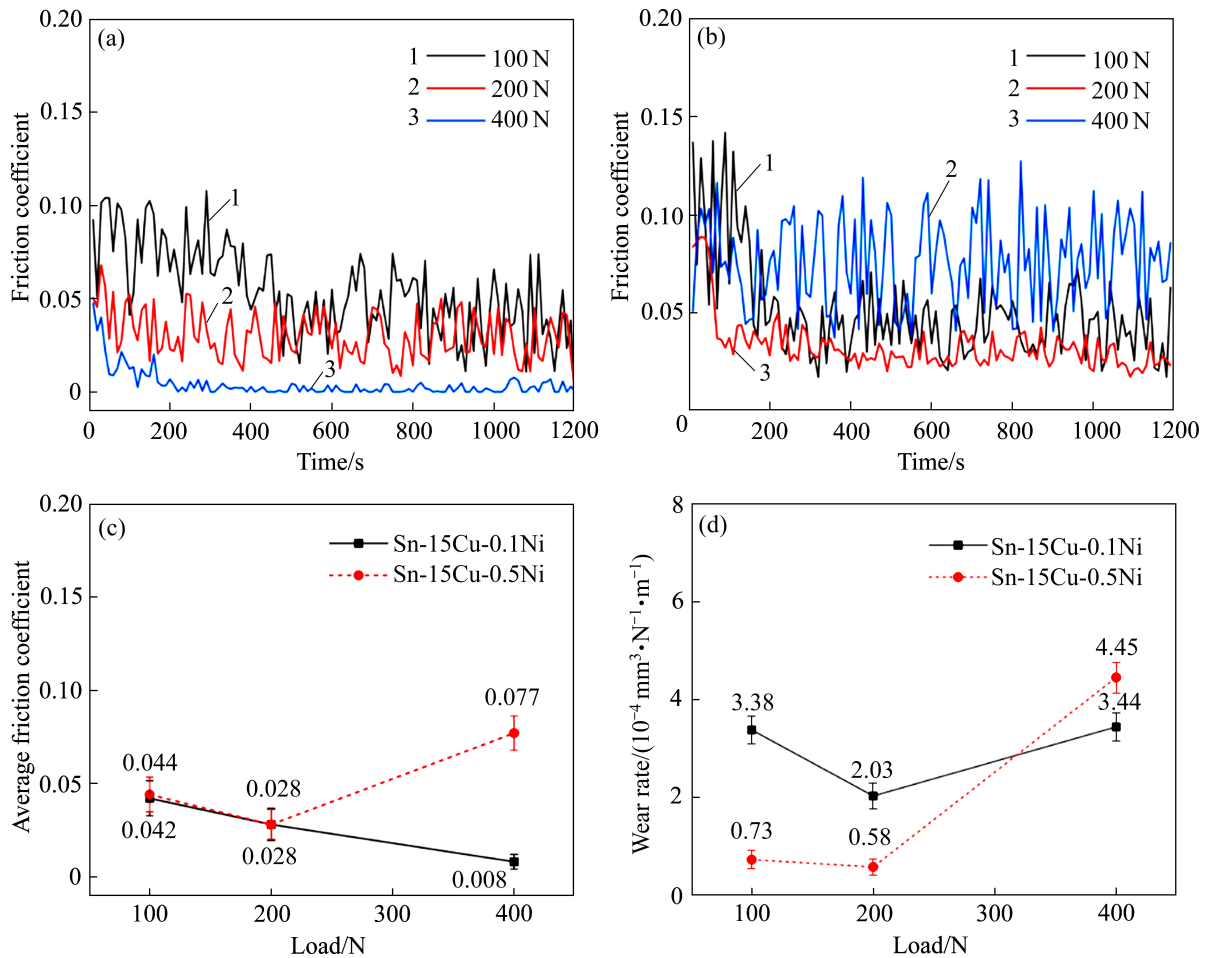


图5 不同载荷下 Sn-15Cu-0.1Ni 和 Sn-15Cu-0.5Ni 的摩擦磨损行为

Fig. 5 Friction and wear behavior of Sn-15Cu-0.1Ni and Sn-15Cu-0.5Ni under different loads: (a) Variation of friction coefficient of Sn-15Cu-0.1Ni alloy with time; (b) Variation of friction coefficient of Sn-15Cu-0.5Ni Alloy with time; (c) Variation of friction coefficient with load; (d) Variation of wear rate with load

表2 布氏硬度测试结果

Table 2 Brinell hardness test results

Alloy	Hardness, HBW
Sn-15Cu-0Ni	18.47
Sn-15Cu-0.1Ni	21.30
Sn-15Cu-0.5Ni	19.59
Sn-15Cu-1Ni	19.09
45 [#] steel	259.98

金的组织特征, 可以判断支撑颗粒为 $\text{Cu}_3\text{Sn} + \text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 组成的包晶颗粒。而 Sn-15Cu-0.5Ni (见图 7(c)) 和 Sn-15Cu-1Ni (见图 7(d)) 磨损表面的坑洞细小, 可以清晰分辨出孔内多棱角的 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 颗粒^[16], 能谱分析表明 $(\text{Cu} + \text{Ni})$ 与 Sn 的摩尔比接近 6:5。DENG 等^[17]通过纳米压痕技术并采用 DAO 等^[18]提出的模

型算出 Cu_6Sn_5 的屈服强度约为 2009 MPa, Cu_3Sn 的屈服强度约为 1787 MPa, 而 Sn 的屈服强度仅为 35 MPa。这表明 Sn-15Cu-xNi 合金的摩擦过程中以 Sn 为主的软质基体主要起固体润滑的作用, 并保证合金具有一定的嵌入性^[19], 起承载作用的主要为 Cu_3Sn 与 Cu_6Sn_5 。坑洞内成分以 C 为主并辅以少量其他元素, 可以判断为样品残留润滑油。理论上讲, 在摩擦磨损过程中, 硬质颗粒支撑出的坑洞为贮油空间, 对维持润滑油膜的稳定有积极作用, 从而增强了减摩性。图 7(c) 所示的 Sn-15Cu-0.5Ni 磨损表面贮油坑洞最均匀细密, 这与图 2(c) 中金属间化合物最细小且弥散分布相一致, 因此在本实验中具有最优良的磨损性能。

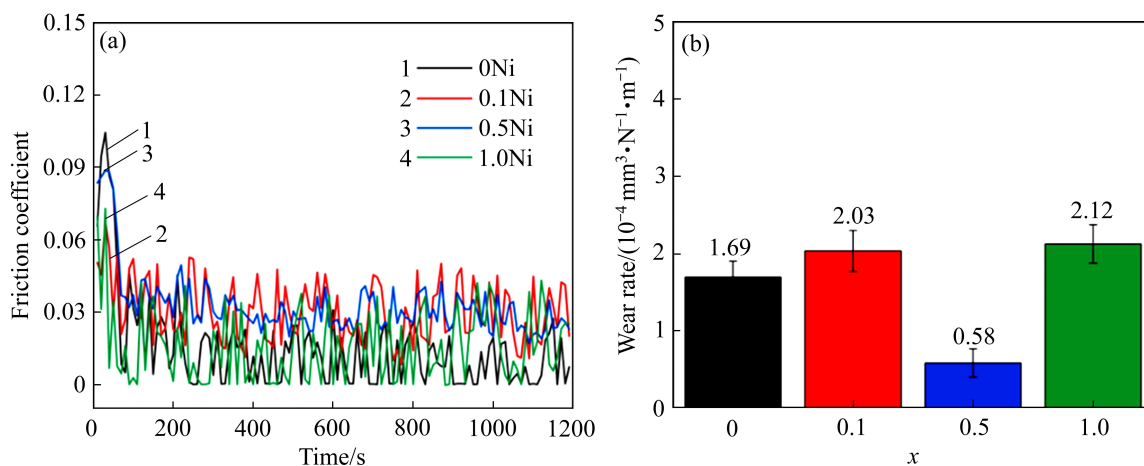


图6 Sn-15Cu- x Ni 合金的摩擦磨损行为

Fig. 6 Friction and wear behavior of Sn-15Cu- x Ni alloy: (a) Variation of friction coefficient with time; (b) Variation of wear rate with Ni content

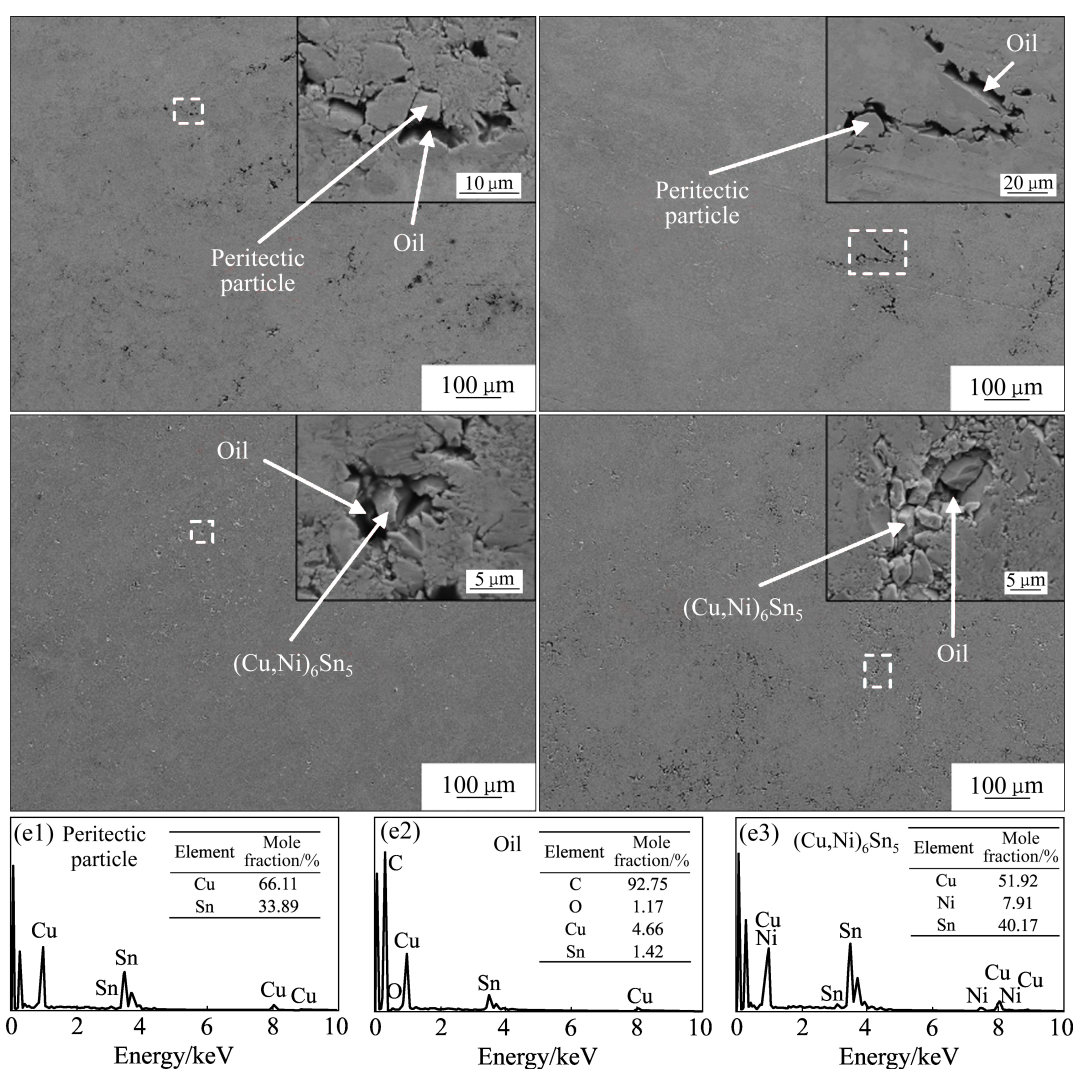


图7 Sn-15Cu- x Ni 合金的磨损表面分析

Fig. 7 Wear surface analysis of Sn-15Cu- x Ni alloy (Upper right corner of image is an enlarged view of white dashed frame area): (a) Sn-15Cu; (b) Sn-15Cu-0.1Ni; (c) Sn-15Cu-0.5Ni; (d) Sn-15Cu-1.0Ni; (e1), (e2), (e3) Energy spectra analysis

3 结论

1) 微量Ni可以显著改变Sn-15Cu合金的凝固组织。Sn-15Cu合金中硬质颗粒为 $\text{Cu}_3\text{Sn}+\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 组成的板条状粗大包晶组织, 添加0.1%Ni可以细化 Cu_3Sn 并使 Cu_6Sn_5 包覆层增厚, 添加0.5%Ni可以完全抑制 Cu_3Sn 并使 Cu_6Sn_5 明显细化且弥散分布, 添加1%Ni虽可以完全抑制 Cu_3Sn 但 Cu_6Sn_5 将发生粗化。

2) Sn-15Cu-xNi合金具有优良的高载稳定性与减摩性。当载荷为200 N时, 合金在磨损过程中呈现出软基体内凹, 硬质点外凸, 滑动面之间存在微小贮油空间的特征, 从而具有优良的减摩性能。

3) 本实验中Sn-15Cu-0.5Ni合金具有最优良的摩擦磨损性能。Sn-15Cu-0.5Ni合金中硬质金属间化合物最细小且弥散分布, 最有利于提高耐磨性, 而形成的贮油坑洞最均匀细密, 对维持润滑油膜的稳定有积极作用。

REFERENCES

- [1] 许桐舟, 张 陈, 孙长青, 等. 激光熔覆镍/锡基巴氏合金的显微组织及力学性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031403.
XU Tong-zhou, ZHANG Chen, SUN Chang-Qing, et al. Analysis of micromorphology and mechanical properties of laser cladding nickel/tin-based babbitt alloy[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 155–162.
- [2] 尹延国, 焦明华, 解 挺, 等. 滑动轴承材料的研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(5): 183–187.
YI Yan-guo, JIAO Ming-hua, XIE Ting, et al. Research progress in sliding bearing materials[J]. Lubrication Engineering, 2006(5): 183–187.
- [3] 张胜全, 王一纯, 张 博, 等. 显微激冷处理对ZChSnSb11-6合金组织性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(17): 88–90.
ZHANG Sheng-quan, WANG Yi-chun, ZHANG Bo, et al. Effect of micro-chilling treatment on microstructure and properties of ZChSnSb11-6 alloy[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(17): 88–90.
- [4] 段思华. 电弧喷涂锡基巴氏合金层组织及性能研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009: 1–8.
DUAN Si-hua. Study on microstructure and properties of arc sprayed tin-base babbitt coating[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009: 1–8.
- [5] 郭正兴. 巴氏合金ZSnSb8Cu4的摩擦磨损研究[D]. 北京: 清华大学, 2014: 1–9.
GUO Zheng-xing. Friction and wear analysis of tin-based white metal ZSnSb8Cu4[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014: 1–9.
- [6] 刘 杰. 锡基巴氏合金制备新方法及其对组织性能的作用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015: 1–10.
LIU Jie. A new preparation method in tin-babbitt and its effects on microstructures and properties[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015: 1–10.
- [7] GAO Bing-yang, MENG Xiang-rui, GUO En-yu, et al. Effects of Ni on the nucleation and growth behavior of Cu_6Sn_5 in Sn-8.5Cu alloy: An in situ observation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 862: 158603.
- [8] ZENG Guang, MCDONALD S D, GU Qin-fen, et al. The influence of Ni and Zn additions on microstructure and phase transformations in Sn-0.7Cu/Cu solder joints[J]. Acta Materialia, 2015, 83: 357–371.
- [9] GAO Bing-yang, GUO En-yu, MENG Xiang-rui, et al. Grain nucleation and growth behavior of $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ in Sn-10Cu-1Ni alloy under pulse current: An in situ observation[J]. Materials Characterization, 2019, 158: 109969.
- [10] MEHREEN S U, NOGITA K, MCDONALD S, et al. Suppression of Cu_3Sn in the Sn-10Cu peritectic alloy by the addition of Ni[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766: 1003–1013.
- [11] GB/T 231.1—2018. 金属材料布氏硬度试验第1部分: 试验方法[S].
GB/T 231.1—2018. Metallic materials Brinell hardness test Part 1: Test method[S].
- [12] G99—05. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus[S].
- [13] ZHU M, GAO Y, CHUNG C Y, et al. Improvement of the wear behaviour of Al-Pb alloys by mechanical alloying[J]. Wear, 2000, 242: 47–53.
- [14] NOGITA K. Stabilisation of Cu_6Sn_5 by Ni in Sn-0.7Cu-0.05Ni lead-free solder alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(1): 145–149.
- [15] YU C, LIU J, LU H, et al. First-principles investigation of the structural and electronic properties of $\text{Cu}_{6-x}\text{Ni}_x\text{Sn}_5$ ($x=0, 1, 2$) intermetallic compounds[J]. Intermetallics, 2007, 15(11): 1471–1478.
- [16] XIAN J W, BELYAKOV S A, OLLIVIER M, et al. Cu_6Sn_5

- crystal growth mechanisms during solidification of electronic interconnections[J]. *Acta Materialia*, 2017, 126: 540–551.
- [17] DENG X, CHAWLA N, CHAWLA K K, et al. Deformation behavior of (Cu, Ag)-Sn intermetallics by nanoindentation[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(14): 4291–4303.
- [18] DAO M, CHOLLACOOPE N, VAN VLIET K J, et al. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(19): 3899–3918.
- [19] DONG Q, YIN Z, LI H, et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu babbitt[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 722: 225–230.

Microstructure and tribological properties of Sn-15Cu-xNi alloy

GAO Bing-yang¹, GUO Hua-qi¹, CAO Zhi-qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province),

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China)

Abstract: The microstructure and tribological properties of Sn-15Cu-xNi alloy were studied by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy, electron probe microscope analyzer, scanning electron microscope, confocal laser scanning microscope, Brinell hardness tester, and multi-specimen test machine. The results show that the particles in Sn-15Cu alloy are the peritectic structure composed of Cu_3Sn and Cu_6Sn_5 . Adding 0.1% Ni can refine Cu_3Sn and thicken the Cu_6Sn_5 coating layer. Adding 0.5% Ni can completely inhibit Cu_3Sn and make Cu_6Sn_5 more refined. The refinement effect of Cu_6Sn_5 is reduced after adding 1% Ni. The Sn-15Cu-xNi alloy exhibits high-load stability and anti-friction properties. Under load of 200 N, the hard particles play bearing role, and the tiny pits formed after the soft substrate wear out become the oil storage space, maintaining the stability of the lubricating oil film. When the Ni content is 0.5%, the oil storage pitting on the worn surface are the most uniform, so the Sn-15Cu-0.5Ni alloy has the best wear performance.

Key words: microstructure; friction and wear; bearing shell; tin-based alloy

Foundation item: Projects(2018YFE0306103, 2017YFA0403803) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project(51771041) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2018B10030) supported by the Ningbo Major Science and Technology, China

Received date: 2021-08-04; **Accepted date:** 2021-10-14

Corresponding author: CAO Zhi-qiang; Tel: +86-13941191184; E-mail: caozq@dlut.edu.cn

(编辑 李艳红)