

水冷铜模铸造对铜铅合金显微组织与摩擦磨损性能的影响

茄菊红¹, 贾丽¹, 徐超军², 谢峰¹, 刘雪¹, 杨立新¹, 刘小辉², 王帅星²

(1. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西西安 710077;

2. 南昌航空大学材料科学与工程学院, 江西南昌 330063)

摘要: 采用水冷铜模铸造制备了ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金, 对比研究了铸锭不同位置铜铅合金的显微组织、硬度和摩擦学性能的差异。结果表明: 水冷铜模铸造ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金未见明显比重偏析, 但铸型不同位置冷却速率的差异导致铸锭显微组织和力学性能呈现不均匀性。铸锭下部试样富Pb相粒子呈细小的弥散点状分布在枝晶间, 对合金力学性能影响较小, 试样硬度可达HB76.4。而铸锭上部由于冷却速率较慢, 富Pb相呈粗化球状分布, 并且铸锭上部边缘较中心处富Pb相含量更多, 试样硬度仅约HB67.9。由于粗大的富Pb相在摩擦过程中可以形成较完整的润滑膜, 上部试样摩擦因数较稳定, 比磨损率由 $81.978 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 降至 $4.281 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

关键词: 铜铅合金; 水冷铜模铸造; 显微组织; 摩擦学性能

作者简介:

茄菊红(1982-), 女, 硕士, 主要从事铸造材料及工艺研究。E-mail: avci_mse@163.com

通信作者:

刘小辉, 男, 讲师, 博士, 硕士生导师。E-mail: xiaohuilu612@163.com

中图分类号: TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)12-1590-07

基金项目:

国家自然科学基金(52461020)。

收稿日期:

2025-07-09 收到初稿,
2025-08-25 收到修订稿。

铜铅合金具有优异的导热、减摩耐磨性和较高的承载能力, 被广泛用作高速、重载工况下的轴瓦合金材料^[1]。在铜铅合金中, 由于Cu和Pb几乎互不固溶, 形成以相对较硬的Cu基体为骨架、软质富Pb相为第二相的显微组织^[2]。在高速摩擦过程中, 低熔点富Pb相熔化后在摩擦副表面形成一层富Pb薄液膜起到边界润滑剂的作用, 提高合金耐磨性, 因此, 富Pb相的尺寸和分布直接决定了铜铅合金的耐磨性能^[3-4]。然而, 铜铅合金中富Pb相的分布受到制备工艺、温度和冷却速率等因素的影响^[5]。

目前, 铜铅合金的制备方法主要有粉末冶金、连续铸造、离心铸造、砂型铸造和金属型铸造等工艺^[5-7]。由于Cu和Pb熔点和密度存在较大差异, 在粉末冶金或常规铸造过程中容易发生严重的Pb流动偏析或比重偏析^[8]。褚小丽等^[8]通过添加均质剂的方法改善了粉末冶金制备铜铅合金中的严重成分偏析问题; 唐建达等^[9]通过感应加热-颗粒离心熔铸工艺制备了组织均匀的铜铅合金; 历长云等^[10]通过工艺优化确定了ZCuPb10Sn10铜铅合金的离心铸造工艺。

基于快速凝固原理的金属型铸造工艺因为其冷却快、生产效率高和设备简单等特点, 被广泛应用于铜铅合金的生产^[5, 11]。李海兰等^[12]发现强制水冷可以进一步减轻金属型铸造高铅青铜合金中Pb的偏析。近年来, 水冷金属型铸造常被用来制备壁厚相对较厚的铜合金^[11, 13]。此外, 为了减轻二元铜铅合金的比重偏析, 提高其力学性能, 常加入镍、锌、磷和稀土等合金元素^[14-17]。康圆圆等^[18]研究发现Ni和P元素的复合添加细化了ZCuPb20Sn5合金中 α -Cu晶粒, 提高了合金耐磨性。刘毅军等^[19]发现在干摩擦条件下ZCuSn10Pb10合金的磨损率随着Zn含量增加呈现先增加后减小然后增加的趋势, 优化后Zn含量为1.3%。ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P作为一种具有优异性能的新型铜铅合金, 关于其水冷铜模铸造组织均匀性及不同位置显微组织差异性仍不清楚, 尤其是铸锭不同位置富Pb相分布及其对铜铅合金摩擦学性能的影响尚且缺乏系统研究。

本研究采用水冷铜模铸造技术制备了ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金, 通过表征

铸锭不同位置的显微组织、硬度和摩擦磨损性能,研究了ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金组织均匀性及富Pb相形貌和尺寸对合金显微组织和摩擦学性能的影响。

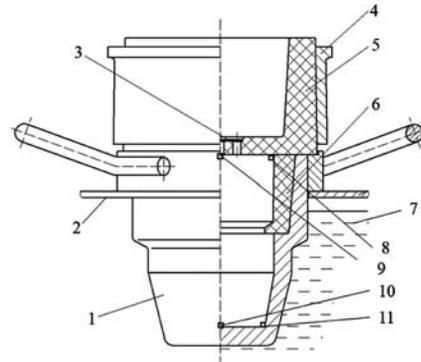
1 试验材料与方法

1.1 试验材料与制备

试验所用ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金化学成分如表1所示。合金在电阻炉中进行熔炼,熔炼温度为1 070 ℃。熔炼完毕后,在1 050 ℃下浇注至水冷铜模铸型中,水冷铜模示意图及取样位置如图1所示。运用Anycasting数值模拟软件对充型过程进行数值模拟分析,获得铸锭凝固顺序以及浇注后约22 s时的温度场分布结果,如图2所示。由图2可知,铸件横向和纵向上中心与边缘温度差异均较大,凝固时按照由边缘向中心、由下部向上部的顺序凝固,表明铸锭下部边缘凝固速率最快,而上部中心位置凝固速率最慢。根据数值模拟分析结果,分别在铸锭上部边缘、上部中心、下部边缘和下部中心部位进行取样,分析铸锭不同位置富Pb相分布差异及其对合金摩擦磨损性能的影响。

表1 ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金化学成分
Tab. 1 Chemical composition of the ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P copper-lead alloy $w_B/\%$

Pb	Zn	Sb	Ni	P	Cu
18.33	3.53	3.77	3.46	0.24	余量



1. 水冷铜模 2. 铜转子浇注机 3. 堵片 4. 浇口杯套 5. 浇口杯
6. 冒口砂套 7. 冷却水 8. 铸锭上部边缘取样 9. 铸锭上部中心
取样 10. 铸锭下部中心取样 11. 铸锭下部边缘取样

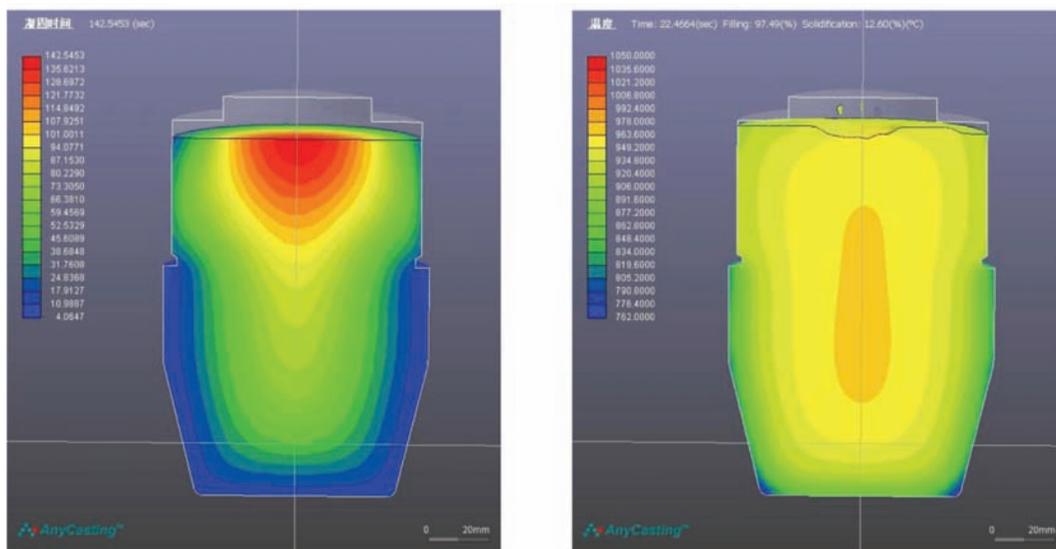
图1 水冷铜模铸造铜铅合金示意图及取样位置

Fig. 1 Schematic diagram and sampling locations of copper-lead alloy ingot prepared by water-cooled copper mold casting

1.2 显微组织表征与性能测试

试样依次经 Al_2O_3 水砂纸打磨后,经金刚石抛光膏抛光,然后通过U-TV0.5XC-3型光学显微镜(OM)进行金相观察;借助Nova Nano SEM450型场发射扫描电镜(FESEM)在背散射模式下观察铜铅合金试样的第二相,并通过INCA X-Max50型能谱仪(EDS)分析不同相的化学组成;通过Bruker D8-Advance A25型X射线衍射仪(XRD)分析相结构,测试采用Cu $K\alpha$ 靶,加速电压为40 kV,电流为40 mA,步长为0.02,扫描区间 $20^\circ\sim 80^\circ$ 。

通过THB-3000型电子布氏硬度计测量铜铅合金的硬度,加载载荷为612.9 N,保压时间为15 s,每个试样



(a) 铸锭凝固顺序

(b) 约22 s时温度场分布

图2 水冷铜模铸造铜铅合金凝固过程模拟结果

Fig. 2 Simulation results of the copper-lead alloy ingot prepared by water-cooled copper mold casting during solidification process

测量3次取平均值；选用CFT-1型显微磨损试验机，通过球-盘磨损试验测试ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金的摩擦学性能，摩擦副为 $\Phi 5$ mm的Si₃N₄球（HV2 200），转速（ ω ）为600 r/min，载荷为5 N，摩擦半径（ r ）为3 mm，持续试验时间（ t ）为5 h。

摩擦磨损试验后，采用KH-7700型三维视频显微镜观察磨痕形貌；采用JB-6C粗糙度轮廓仪测量磨痕剖面轮廓，借助Origin软件对磨痕轮廓积分得到剖面面积 A （mm²），测量5次取平均值，并按式（1）算出体积比磨损率 W_s 。

$$W_s = \frac{V}{F \cdot L} \quad (1)$$

式中： W_s 为体积比磨损率，mm³/（N·m）； V 为磨损体积损失，mm³，可通过剖面面积和摩擦半径进行换算， $V=2\pi rA$ ； F 为施加的载荷，N； L 为摩擦滑动总距离，m，可通过转速与试验时间进行换算， $L=2\pi\omega t$ 。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织与相组成

图3为不同取样位置的ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金的XRD测试结果。由图可见，铸锭不同位置均只存在基体 α -Cu和第二相Pb，未见其他金属间化合物，说明铸型不同位置冷却速率差异对ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金的物相种类影响较小。

图4为铸锭不同位置的金相形貌。可见，铸型不同位置冷却速率差异虽然对ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅

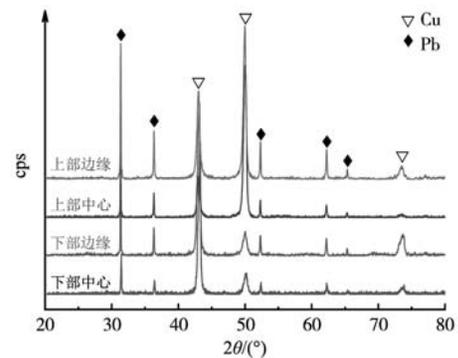
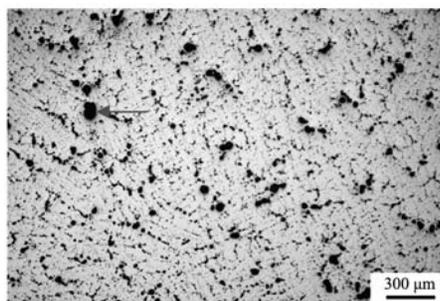


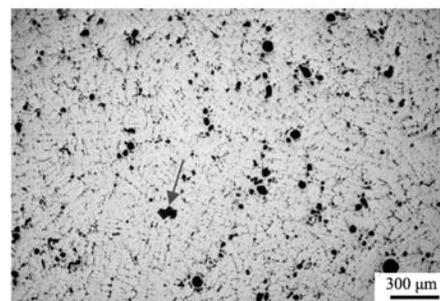
图3 铜铅合金铸锭不同位置试样的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

合金的物相种类影响较小，但合金中富Pb相尺寸、形状及分布有显著差异。与铸锭上部试样相比，铸锭下部试样中富Pb相的尺寸和含量显著较小，表明采用水冷铜模铸造ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金可有效降低铜铅合金的比重偏析。其中，在铸锭上部边缘的试样中，富Pb相含量较多，呈粗大弥散球棒状分布于枝晶间；在铸锭上部中心位置取样的试样中，富Pb相主要呈细小弥散点状分布，另有少量粗化的球状颗粒；而在铸锭下部取样的试样中富Pb相含量均较少，呈细小的弥散点状分布。运用Image J软件对富Pb相进行统计分析，发现在铸锭上部边缘、上部中心、下部边缘和下部中心所得试样中富Pb相面积占比分别为13.1%，10.5%，5.6%和5.4%。



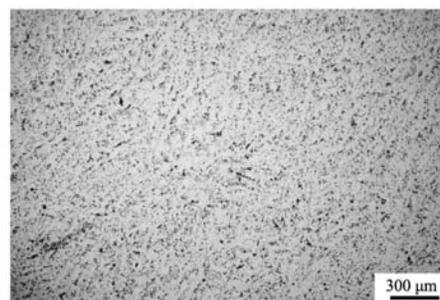
(a) 铸锭上部边缘取样



(b) 铸锭上部中心取样



(c) 铸锭下部边缘取样



(d) 铸锭下部中心取样

图4 铜铅合金铸锭不同位置试样的金相图片

Fig. 4 OM images of the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

为了更好地观察样品中第二相的组成和形貌，通过SEM和EDS进一步分析了水冷铜模铸造ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P铜铅合金不同位置处试样的物相组成，结果如图5和表2所示。可见，不同位置试样均主要含有3种第二相（分别如箭头A、B和C所示），但不同位置试样中的第二相尺寸和形貌存在差异。结合表2中EDS结果可知，箭头A所示的第二相主要富集Ni、Cu和Sb等元素，箭头B所示的第二相尺寸较小，主要富集P、Ni和Cu等元素，而箭头C所指的颗粒主要为Pb富集相。由于Ni-Cu-Sb富集相与P-Ni-Cu富集相含量较少，因此在XRD中未能检测到。此外，铸锭下部试样中富Pb相、Ni-Cu-Sb富集相与P-Ni-Cu富集相等第二相颗粒尺寸显著小于铸锭上部试样中的第二相颗粒尺寸。这是因为在水冷铜模铸造过程中，铸锭上部凝固时间较长，冷却速率慢，富Pb相颗粒有足够时间与附近铅相发生合并长大，进而形成粗大的富Pb相颗粒。此外，富Pb相颗粒尺寸还受到Pb原子扩散因素影响。由图5(a)、(b)所示，虽然铸锭上部边缘处凝固冷却速率高于中心处冷却速率，但是边缘处的富Pb相颗粒尺寸大于中心处的富Pb相颗粒尺寸。这是因为上部边缘先凝固形成固态壳层，限制Pb原子长距离扩散，富Pb相形核后难以合并，故呈现粗大分散分布；中心区域凝固时间更长，Pb原子可通过未凝固液相迁移，形成数量更多但尺寸较小的颗粒。

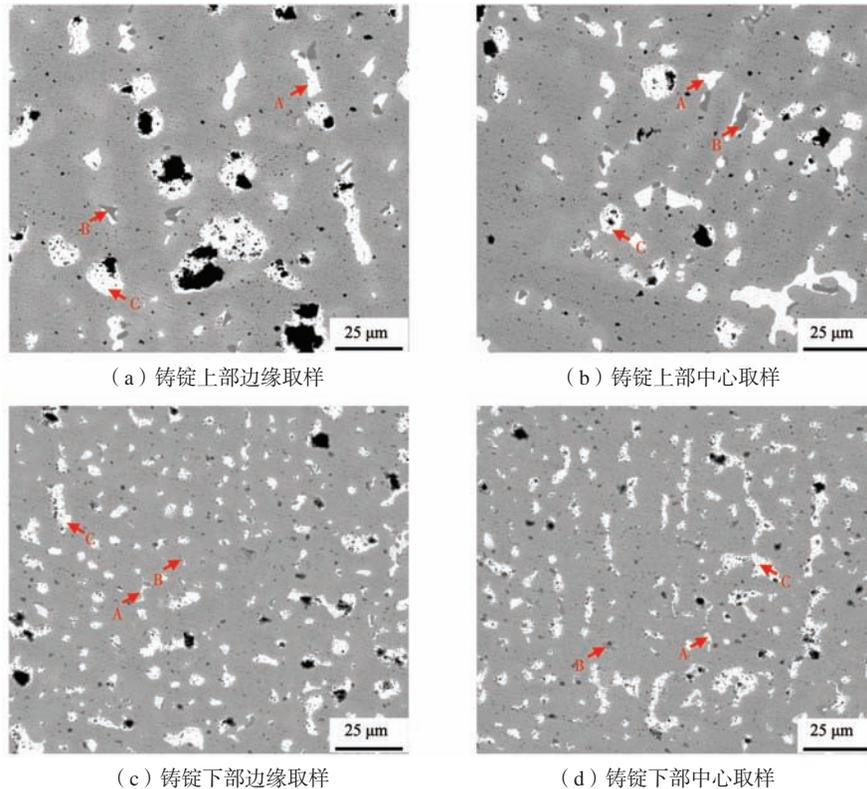


图5 铜铅合金铸锭不同位置试样的SEM图片

Fig. 5 SEM images of the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

表2 铜铅合金铸锭不同位置试样中不同相EDS成分结果
Tab. 2 EDS results of different phases in the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

取样位置	$w_B / \%$						
	P	Ni	Cu	Zn	Sb	Pb	
铸锭上部边缘	A	0.19	7.18	52.75	—	39.5	0.38
	B	18.41	67.33	11.29	2.83	—	0.14
	C	—	—	2.37	—	0.79	96.84
铸锭上部中心	A	—	7.12	54.88	—	37.4	0.6
	B	18.78	65.66	11.54	2.1	0.92	0.99
	C	0.14	—	4.02	—	1.61	94.22
铸锭下部边缘	A	—	9.08	52.93	—	37.81	0.18
	B	17.76	63.96	13.33	3.36	1.58	—
	C	—	—	4.83	0.6	—	94.57
铸锭下部中心	A	—	16.27	41.8	0.2	39.92	1.81
	B	20.88	68.6	8.06	1.31	1.14	—
	C	0.2	3.49	5.77	0.26	10.41	79.87

2.2 硬度与摩擦磨损

图6为铜铅合金铸锭不同位置试样的布氏硬度。由图可见，铸锭上部试样的硬度值约HB64.1~67.9，而试样下部硬度值约HB71~76.4。这是由于铸锭上部冷却速率较慢，较多的软质富Pb相析出长大，导致铜铅合金单位面积上承载能力降低。

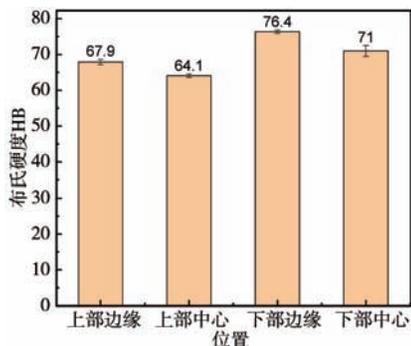


图6 铜铅合金铸锭不同位置试样的布氏硬度

Fig. 6 Brinell hardness of the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

图7为铜铅合金在干摩擦实验下的时间-摩擦系数曲线。由图可知，所有试样在干摩擦实验过程中均可分为两个阶段，即磨合阶段和稳定磨损阶段。但是不同位置试样的摩擦系数起伏程度随时间推移产生变化，其中，铸锭上部边缘和中心试样分别约22 min和47 min后进入稳定磨损阶段，摩擦系数波动较小，平均摩擦系数分别约0.469和0.560；而铸锭下部边缘和中心试样在整个过程中摩擦系数均波动较大，平均摩擦系数分别约为0.386和0.414。分析认为，铜铅合金的自润滑性能与弥散分布在Cu基体上的富Pb相相关，富Pb相粒子硬度和熔点较低，在摩擦副的挤压以及摩擦生热作用下融化而形成一层液态润滑膜。铸锭上部富Pb相呈粗大弥散球棒状且游离于Cu基体中，该膜可持续隔离Cu基体与 Si_3N_4 对磨副，避免频繁硬接触，故摩擦系数稳定性优异；但厚膜在局部载荷集中或高温区易发生瞬时破裂，导致 Si_3N_4 (HV2 200) 直接接触较软的Cu基体（上部硬度HB64.1~67.9，图6），引发短暂黏着摩擦，反复的润滑膜“覆盖-破裂”过程最终推高平均摩擦系数。然而，铸锭下部富Pb相呈细小弥散点

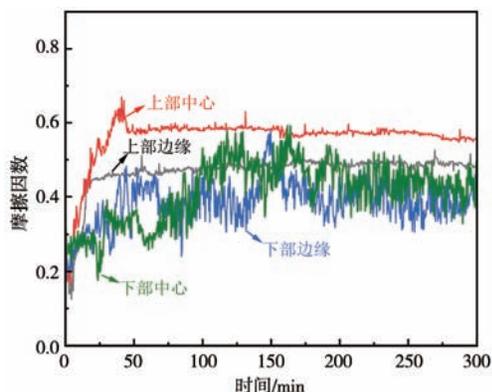
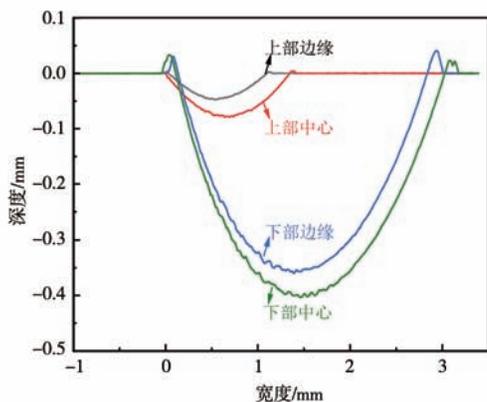


图7 铜铅合金铸锭不同位置试样的时间-摩擦系数曲线

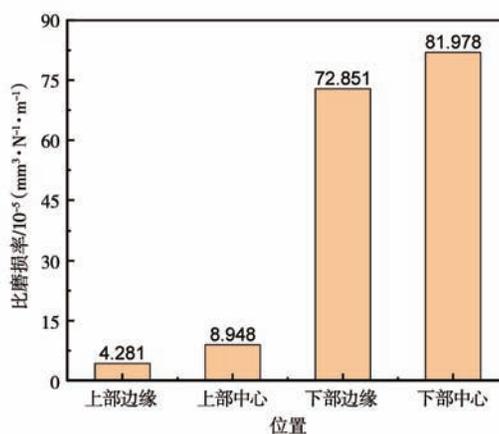
Fig. 7 Friction coefficient of the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

状且紧密嵌入Cu基体枝晶间，难以游离形成连续润滑膜，摩擦状态以“Cu硬基体（硬度HB71~76.4，图6）与 Si_3N_4 的局部接触”为主，硬基体可降低对磨副压入深度，减少黏着摩擦，故平均摩擦系数更低；但下部富Pb相含量低（5.4%~5.6%），润滑不足，易引发磨粒磨损，摩擦过程中局部裂纹扩展导致的剥落磨屑会随机划伤表面，造成摩擦系数频繁波动。

图8为铜合金试样摩擦磨损试验后测得的磨痕横截面轮廓曲线。由图可见，铸锭上部试样的磨痕深度和宽度均小于铸锭下部试样的磨痕。其中，铸锭上部边缘试样磨痕的深度和宽度仅约47.9 μm 和1 115.6 μm ；而铸锭下部中心试样磨痕尺寸最大，深度和宽度分别约405.3 μm 和3 079.3 μm 。与铸锭上部边缘试样比磨损率相比，铸锭下部中心试样的比磨损率从 $4.281 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 急剧增大至 $81.978 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，增加了一个数量级。结合摩擦系数曲线可知，铸锭上部试样在稳定磨损阶段的摩擦系数波动均较小，表明试验过程中试样与对磨副之间的润滑膜较完整，其磨损率较小。



(a) 磨痕剖面轮廓



(b) 比磨损率

图8 铜铅合金铸锭不同位置试样磨痕轮廓与比磨损率

Fig. 8 Cross-sectional profile and specific wear rate of wear tracks on the samples from different positions of the copper-lead alloy ingot

图9为不同位置铜铅合金试样摩擦磨损试验后的磨损形貌图。由图可见,在铸锭上部试样中,磨痕表面较平整,同时出现了较多的压溃片状碎屑,这是典型的黏着磨损特征^[20]。表明,在摩擦过程中对磨擦副边界形成了一定厚度的润滑膜,使得滑动过程较为平稳,有效降低了摩擦因数的波动性,提高了合金的耐磨性。在铸锭下部试样中均表现出了较深的平行于滑动方向的犁沟形貌,磨损表面犁沟两侧较为光滑,边缘部位存在裂纹,呈现明显的磨粒磨损特征。其中磨

粒主要来源于磨损表面局部区域产生裂纹,裂纹扩展导致局部脆性断裂剥落,断裂剥落的磨屑成为磨粒。磨粒在法向载荷的作用下嵌入到合金表面,并在压应力和切应力作用下沿滑动方向运动,从而对磨损表面产生犁沟或微切削作用^[21]。这是由于铜铅合金与 Si_3N_4 硬度差距较大,且水冷铜模 ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P 合金铸锭下部试样富Pb相含量较少并呈细小弥散分布,在摩擦磨损过程中缺乏足够的润滑,形成大量磨粒,导致摩擦因数剧烈波动,耐磨性较差。

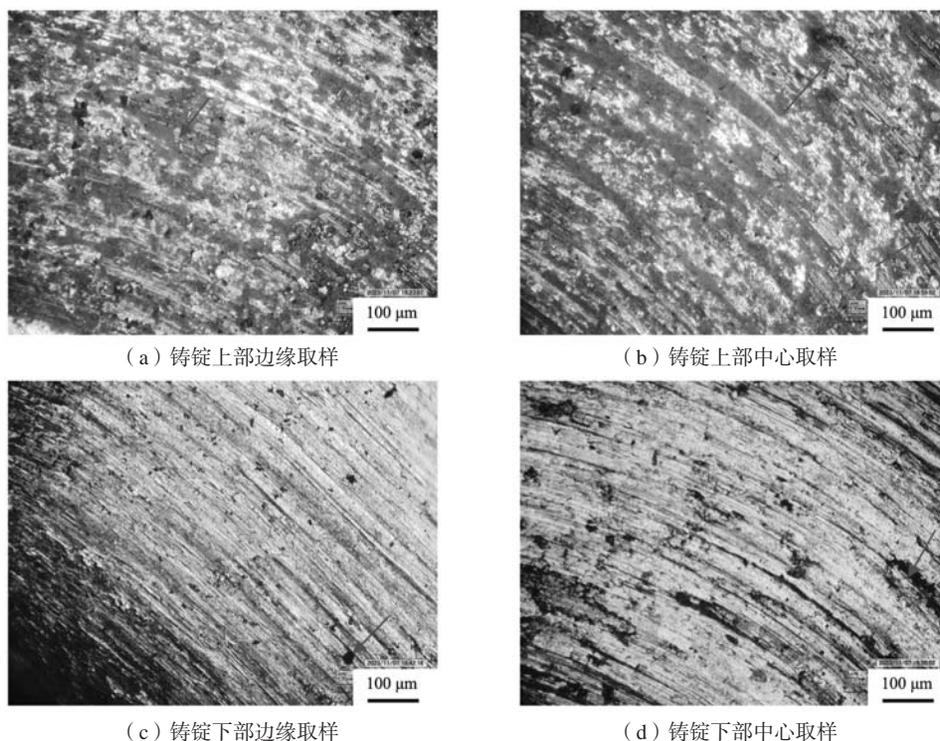


图9 铸锭不同位置试样与 Si_3N_4 干摩擦后磨痕表面形貌

Fig. 9 Worn surface morphologies of the samples after dry sliding against Si_3N_4

3 结论

(1) ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P 铜铅合金主要由 α -Cu基体和富Pb第二相组成,另有少量Ni-Cu-Sb富集相与P-Ni-Cu富集相,铸锭不同位置凝固速率差异对物相组成无显著影响。

(2) ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P 铜铅合金铸锭整体未明显的比重偏析,但铸锭下部由于冷却速率较快,富Pb相呈细小的弥散点状分布在枝晶间;铸锭上部试样

富Pb相主要呈粗大颗粒状分布,且含量较多。

(3) 铸锭下部呈细小弥散点状分布的富Pb相对力学性能影响较小,合金布氏硬度达HB76.4,游离态细小尺寸富Pb相自润滑性能较低,摩擦因数波动较大,磨痕形貌呈犁沟状,比磨损率高达 $81.978 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$;铸锭上部弥散球棒状富Pb相具有较佳的自润滑性能,磨损机制为黏着磨损,比磨损率降至 $4.281 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] HUANG J, DOU Z, WANG Z, et al. Tribological properties of cylinder block/valve plate interface of axial piston pump on the tribometer [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34 (6): 299-315.
- [2] HUTTUNEN-SAAKIVIRTA E, ISOTAHDON E, METSÄJOKI J, et al. Behaviour of leaded tin bronze in simulated seawater in the absence and presence of tribological contact with alumina counterbody: corrosion, wear and tribocorrosion [J]. Tribology International, 2019, 129: 257-271.

- [3] ZONGLONG G, JIAQI W, ZHUAN L, et al. Mechanical and tribological properties of ceramic-reinforced copper-based composites: analysis of single and multi-component synergistic mechanisms [J]. Tribology, 2025, 45 (1): 154–185.
- [4] WANG Z, ZHANG G, KANG Y, et al. The effect of Y on the microstructure, mechanical and wear properties of ZCuSn10Pb10 alloy [J]. Materials, 2022, 15 (3): 1047.
- [5] 刘守杰, 彭博, 接金川, 等. 铜合金层厚度对固液连铸Cu-Pb-Sn/钢背层状复合材料组织及性能的影响 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (5): 339–345.
- [6] CUI H B, GUO J J, SU Y Q, et al. Microstructure evolution of Cu-Pb monotectic alloys during directional solidification [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16 (4): 783–790.
- [7] ZHANG Y, YIN Y, LI R, et al. Microstructure and interfacial properties of ZCuSn10Pb10/Q235 bimetallic composite after semi-solid and cladding treatment [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2022, 63: 101–111.
- [8] 诸小丽, 王颢. 解决铜铅合金成分偏析的方法 [J]. 机械工程材料, 2008, 32 (8): 74–75.
- [9] 唐建达, 李娄明, 朱正锋, 等. 感应加热-颗粒离心熔铸工艺制备钢背铜铅合金滑动轴承的研究 [J]. 机车车辆工艺, 2012 (4): 1–3.
- [10] 历长云, 王英, 张锦志, 等. 铅青铜轴瓦离心铸造工艺及组织性能分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33 (7): 653–655.
- [11] 史东丽, 潘多龙, 姜伟航, 等. 高铅青铜铜套水冷金属型生产研究 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (9): 949–951.
- [12] 李海兰, 王鹏华, 董峰, 等. 高铅青铜摩擦环的工艺设计 [J]. 铸造, 2016, 65 (12): 1228–1233.
- [13] 赵健, 章丽艳, 向朝建. 铸造工艺对C19400铜合金带缺陷的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (1): 84–88.
- [14] 诸小丽, 王颢. 添加新元素改善Cu-Pb难混溶合金组织的研究 [J]. 热加工工艺, 2007, 36 (21): 22–24.
- [15] 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.
- [16] 马飞澳, 刘嘉靖, 常子赫, 等. 真空热压工艺制备Cu-2Ni-7Sn/45号钢复合材料 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (5): 691–697.
- [17] 康圆圆. P含量对Fe/ZCuPb20Sn5双金属铜层摩擦性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (10): 1320–1325.
- [18] 康圆圆, 刘彬, 韩栋梁, 等. Ni、P复合对钢/铜双金属ZCuPb20Sn5层组织及性能的影响 [J]. 金属材料与冶金工程, 2024, 52 (5): 11–17.
- [19] 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.
- [20] 黄绍服, 王晓龙, 柳建, 等. 等离子熔覆FeCoNiCrMnAl_{0.5}Si_{0.5}高熵合金修复密封环 [J]. 铸造, 2025, 74 (2): 194–202.
- [21] 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.

Effect of Water-Cooled Copper Mold Casting on Microstructure and Friction-Wear Properties of Copper-Lead Alloy

QIE Ju-hong¹, JIA Li¹, XU Chao-jun², XIE Feng¹, LIU Xue¹, YANG Li-xin¹, LIU Xiao-hui², WANG Shuai-xing²
(1. AECC Xi'an Power Control Technology Corporation, Xi'an 710077, Shaanxi, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China)

Abstract:

ZCuSb3Ni3Zn3Pb20P copper-lead alloy was casted using water-cooled copper molds. The microstructure, hardness, and tribological properties at different positions of the ingot were studied. The results showed that no significant specific gravity segregation was observed, but differences in cooling rates caused uneven microstructure and mechanical properties. In the lower ingot, finely dispersed Pb-rich phases between dendrites resulted in higher hardness (HB76.4) but poor wear resistance (specific wear rate: $81.978 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) due to insufficient lubrication. In the upper ingot, coarse spherical Pb-rich phases formed a stable lubricating film, leading to lower hardness (\approx HB67.9) but superior wear resistance (specific wear rate: $4.281 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$), with a more stable friction coefficient.

Key words:

copper-lead alloy; water-cooled copper mold casting; microstructure; tribological property