

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4004

脱氧剂 Cu-10P 对真空熔铸 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金微观组织和力学性能的影响

姜健明¹, 张建平¹, 汤子生¹, 苏伊桐¹, 邹军涛²

(1. 庆安集团有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西安智通自动化技术开发公司, 陕西 西安 710048)

摘要: Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金由于较高的 Sn 含量以及凝固组织中存在硬脆 δ -Cu₄₁Sn₁₁ 相, 具备较高的强度、硬度和耐磨性, 广泛应用于具有高速滑动摩擦场景的机械部件中。本文通过真空感应熔炼 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金, 采用光学显微镜、X 射线及荧光探伤对添加脱氧剂 Cu-10P 前后 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金的组织 and 力学性能进行测试表征。结果表明, 添加 0.05% (质量分数) 脱氧剂 Cu-10P 后, 铸锭组织更加均匀, 树枝晶的生长更加充分, δ 相的生长得到抑制。铸锭的边缘抗拉强度由 323 MPa 提升到了 342 MPa, 断后伸长率由 12.5% 提升到了 16.5%; 铸锭芯部抗拉强度由 300 MPa 提升到了 324 MPa, 断后伸长率由 11% 提升到了 19%。

关键词: Cu-10Sn 合金; 脱氧剂 Cu-10P; 真空熔铸; 合格率; 力学性能

中图分类号: TG146.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)01-0001-05

Effect of a Cu-10P Deoxidizer on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-10Sn-3Pb-4Ni Alloy Prepared by Vacuum Induction Melting

LOU Jianming¹, ZHANG Jianping¹, TANG Zisheng¹, SU Yitong¹, ZOU Juntao²

(1. Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an Zhitong Automation Technology Development Company, Xi'an 710048, China)

Abstract: Due to the high Sn content and the presence of a hardness and brittleness δ -Cu₄₁Sn₁₁ phase in the solidification structure, Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloys have high strength, hardness and wear resistance, allowing them to be widely used in high-speed sliding friction scenarios. This article reports a comparative study of a Cu-10Sn alloy prepared by vacuum induction melting with the addition of a Cu-10P deoxidizer. The microstructure and mechanical properties of the Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloy were tested and characterized using optical microscopy and X-ray and fluorescence inspections. The results show that after adding 0.05 wt.% Cu-10P as a deoxidizer, the microstructure of the ingot becomes more uniform, the growth of dendrites becomes more sufficient, and the growth of the δ phase is inhibited. The tensile strength of the edge in the ingot increases from 323 MPa to 342 MPa, and the elongation after fracture increases from 12.5% to 16.5%. The tensile strength of the core in the ingot increases from 300 MPa to 324 MPa, and the elongation after fracture increases from 11% to 19%.

Key words: Cu-10Sn alloy; deoxidizer Cu-10P; vacuum induction melting; qualified rate; mechanical properties

铜合金由于具有优异的机械和摩擦性能, 如中高强度、良好的延展性、低摩擦系数、良好的化学稳定性和自润滑性, 长期以来被用于润滑条件差和摩擦条件相对复杂的工况环境^[1-3]。铜合金的耐磨性取决于其微观组织中晶粒尺寸和相组成^[4], 其中 Cu-10Sn

合金由于成分简单且具备优异耐磨性而被广泛应用。

Cu-10Sn 合金通常以常规铸造制备而成, 由于凝固过程中 Sn 原子的扩散速率明显高于 Cu 原子, 且合金液温度随着凝固的进行而逐渐降低, Sn 原子在初生 α -Cu 相中的固溶度逐渐降低, 从而导致 Sn

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 西安市重大科技成果就地转化(2021SFGX0004)

作者简介: 姜健明, 1987 年生, 本科, 工程师。主要从事铝合金铸造工艺开发和铜合金真空工艺开发工作。Email: 705505908@qq.com

通讯作者: 张建平, 1979 年生, 本科, 高级工程师。主要从事铸造工艺开发工作。

引用格式: 姜健明, 张建平, 汤子生, 等. 脱氧剂 Cu-10P 对真空熔铸 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(1): 94-98.

LOU J M, ZHANG J P, TANG Z S, et al. Effect of a Cu-10P deoxidizer on the microstructure and mechanical properties of Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloy prepared by vacuum induction melting[J]. Foundry Technology, 2024, 45(1): 94-98.

原子由初生 α 相不断向液相中偏析,经过包晶转变和多次共析转变,在 α 的枝晶间形成复杂立方结构的 δ -Cu₄₁Sn₁₁ 相^[5-8]。因此,由于固溶强化和析出强化的影响,Cu-10Sn 合金具有较高的强度、硬度和耐磨性,从而广泛应用于高温、高压、重载等恶劣服役环境中,常用作轴承、轴套、高速液压马达、齿轮、涡轮、液压泵及螺旋桨部件^[9-11]。然而,传统铸造方式制备的 Cu-10Sn 合金由于铸型反应,合金组织易产生缩松、缩孔、裂纹等铸造缺陷,极大影响了合金力学性能和加工性能^[12]。

为了减少 Cu-10Sn 合金的铸造缺陷以提升合金的力学性能,对其熔炼制备工艺进行优化具有重要意义。研究表明,真空感应熔炼后进行水冷铜坩埚浇铸铸锭,能够充分进行合金的脱氢脱氧,因此,所制备的合金气体含量低、氧化夹杂物含量少^[13-14]。但仅改变熔炼工艺对 Cu-10Sn 合金的铸造缺陷抑制和力学性能提升有限,因此,本文基于真空感应熔炼的优势,研究了添加脱氧剂对 Cu-10Sn 合金的微观组织、力学性能的影响,为批量化制备高强度、高塑性的 Cu-10Sn 合金提供参考。

1 实验材料与方法

将 Cu、Sn、Pb、Ni 块体按照 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 牌号的质量百分比进行称量,采用真空感应熔炼炉制备 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金。先在熔炼坩埚中加入 Cu 块和 Sn 块,当温度达到 1 100 ℃时,加入 2/3 的 Cu-10P 用于预脱氧,当熔炼温度达到 1 150 ℃时先后加入 Pb 块和 Ni 块,再加入 1/3 的 Cu-10P,进行终脱氧;当熔炼温度达到 1 290 ℃后进行浇铸,得到 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金。加工前后的合金铸锭如图 1 所示,合金的化学成分如表 1 所示。采用 XS-1000 型 X 射线及 HT-2402BP 荧光探伤仪对铸锭的缺陷进行检测,采用 OLYMPUS U-CA 光学显微镜对铸件的金相组织进行观察。

将 Cu-10Sn 合金铸件按照图 2a 所示的尺寸进

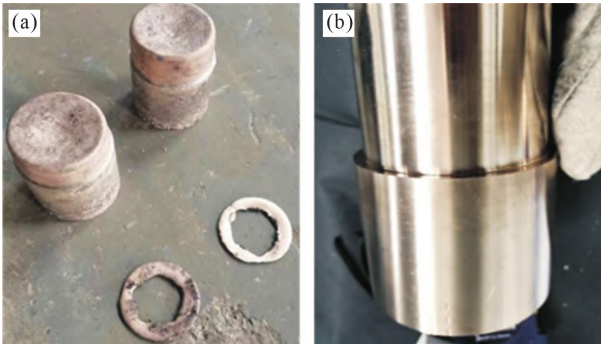


图 1 加工前后的 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 铸锭:(a) 加工前,(b) 加工后
Fig.1 Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloy before and after processing:
(a) before processing, (b) after processing

表 1 锡青铜合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the Cu-Sn alloy
(mass fraction/%)

元素	Sn	Pb	Ni	Cu
要求范围	9~11	2.00~3.25	3~4	余量
名义成分	10	3	3.8	余量

行切片,每个铸件取 10 个切片,采用 X 射线探伤仪和荧光探伤仪对切片进行检测。由于 Cu-10Sn 铸锭芯部与边缘力学性能存在较大差异,将 Cu-10Sn 合金铸件按照图 2b 所示的尺寸进行取样,得到直径为 5 mm,标距为 10 mm 的拉伸圆试样,采用 HT-2402BP 拉伸试验机进行抗拉强度和伸长率的检测,拉伸速度为 1 mm/min。

2 实验结果及讨论

2.1 添加脱氧剂对铸件缺陷的影响

图 3 为添加 Cu-10P 前后的 X 射线探伤及荧光探伤结果。经探伤检测发现,未添加 Cu-10P 的铸件切片中存在部分孔洞类缺陷,尺寸为 0.2~1.0 mm,且气孔无规律散布于铸件截面,未能达到铸锭加工后表面缺陷标准(不允许存在超过 0.2 mm 孔洞类缺陷)。荧光探伤发现铸锭缺陷为气孔,不存在成片夹杂物等缺陷。送检的 10 片铸件切片中仅 3 件没有缺陷。添加 Cu-10P 脱氧剂后铸件表面未观察孔洞等缺陷,送检的 10 片铸件切片中 8 件没有缺陷。这是由于

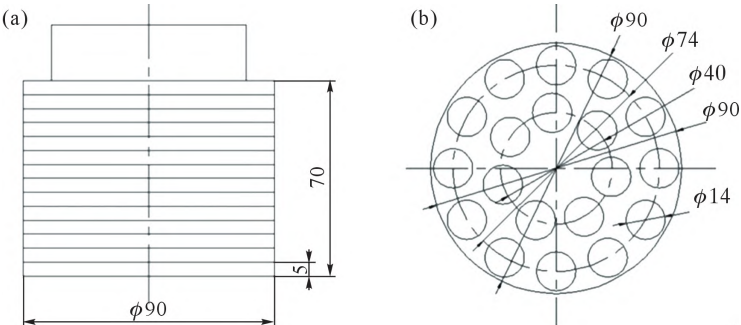


图 2 检测样品制备要求:(a) 缺陷检测切片要求(主视图),(b) 力学性能测试取样要求(俯视图)
Fig.2 Preparation requirements for testing: (a) slicing requirements used for defect detection (front view), (b) sampling requirements for mechanical performance testing (vertical view)

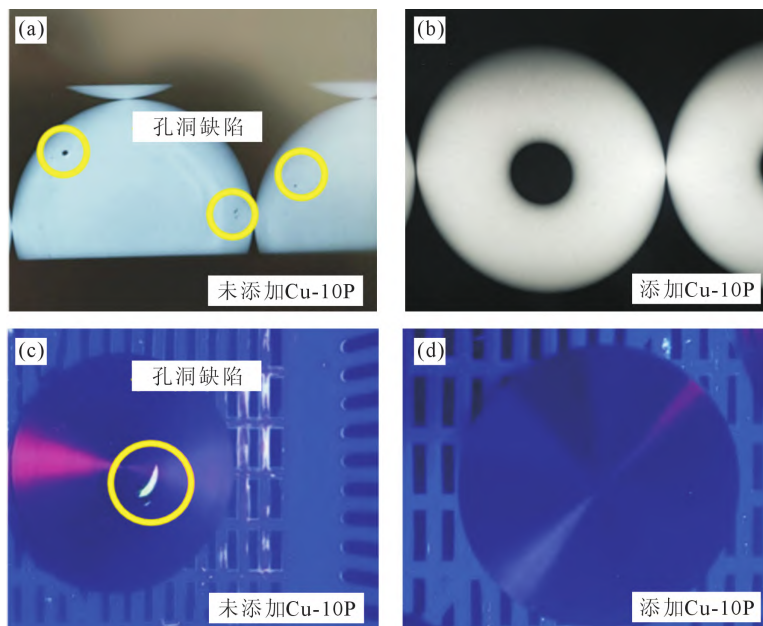


图3 X射线及荧光探伤结果:(a~b) X射线探伤,(c~d) 荧光探伤

Fig.3 Results of the X-ray and fluorescence inspections: (a~b) X-ray inspection, (c~d) fluorescence inspection

脱氧剂 Cu-10P 的加入提升了熔融 Cu-10Sn 金属液的稳定性,促进气体从金属液中排出。脱氧剂反应产物在金属液中形成的气泡可以作为排气通道,帮助金属液中的气体快速排出,减少气孔的形成。因此,添加脱氧剂 Cu-10P 可以消除 Cu-10Sn 铸锭缺陷。

2.2 添加脱氧剂对铸件微观组织的影响

添加脱氧剂 Cu-10P 对 Cu-10Sn 合金组织的影响如图 4 所示。由图 4a 知,合金的铸态组织为典型的树枝晶形貌,Sn 元素在树枝晶间偏析形成 δ 相, Pb 颗粒在晶界处偏聚。如图 4b 所示,脱氧剂 Cu-10P 的加入降低了 Cu-10Sn 合金中的夹杂物,抑制了凝固过程的非均匀形核,提升了合金组织的均匀性,

Cu-10Sn 合金组织中的树枝晶得以充分生长,使得溶质 Sn 有足够的时间在晶粒内部扩散,从而减小了 δ 相的偏析。此外,加入 Cu-10P 可以影响 Pb 的分布状态,使 Pb 颗粒随机分布在基体中。

2.3 添加脱氧剂对铸件力学性能的影响

图 5 为添加 Cu-10P 前后 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金抗拉强度与伸长率。未添加 Cu-10P 时铸件边缘的抗拉强度为 323 MPa,随着取样位置逐渐靠近芯部,合金的抗拉强度呈现出先减小后增大的趋势,芯部的抗拉强度为 300 MPa,抗拉强度高于 240 MPa 的标准要求。同时,铸件不同位置样品的伸长率也出现了先减小后增大的趋势,铸件边缘和芯部样品的伸

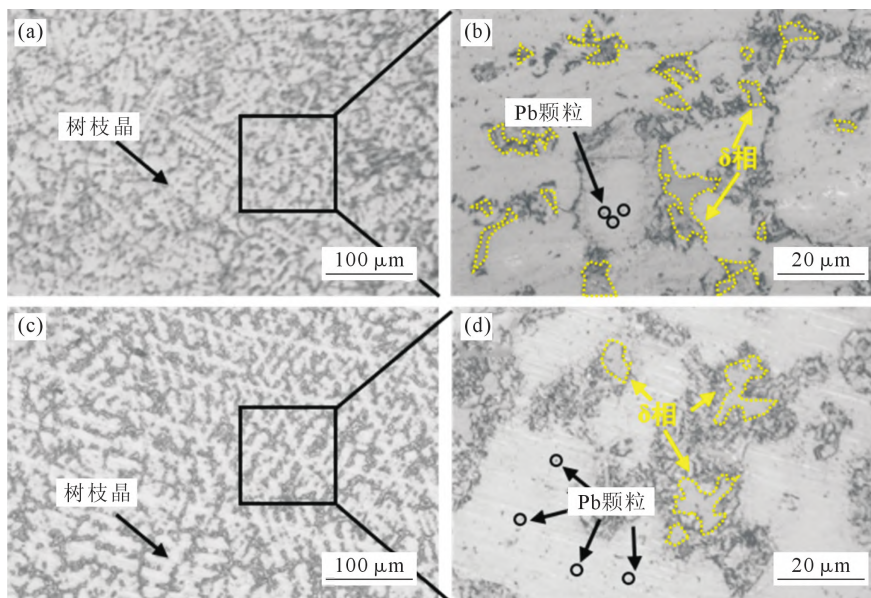


图4 添加 Cu-10P 前后 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金的金相组织:(a~b) 添加 Cu-10P 前,(c~d) 添加 Cu-10P 后

Fig.4 Metallographic structure of the Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloy before and after the addition of Cu-10P: (a~b) before the addition of Cu-10P, (c~d) after the addition of Cu-10P

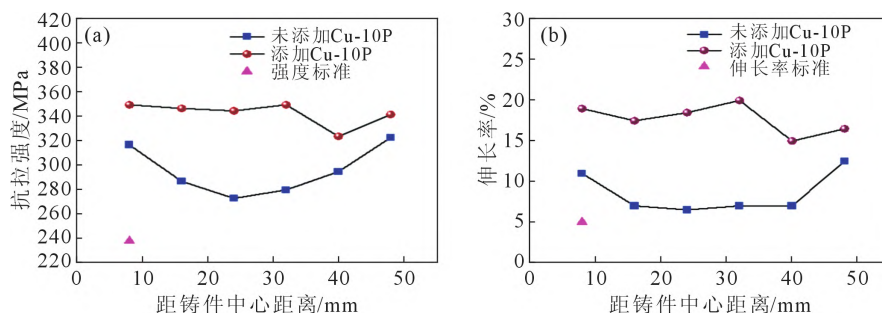


图5 添加 Cu-10P 前后 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金不同位置的力学性能:(a) 抗拉强度,(b) 伸长率

Fig.5 The mechanical properties of the Cu-10Sn-3Pb-4Ni alloy at different positions before and after the addition of Cu-10P: (a) tensile strength, (b) elongation

长率分别为 12.5%和 11%, 伸长率均高于 5%的标准要求。

添加脱氧剂 Cu-10P 后,Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金铸件边缘样品的抗拉强度为 342 MPa, 伸长率为 16.5%,芯部样品的抗拉强度为 324 MPa,伸长率达到 19%,实现了 Cu-10Sn 合金抗拉强度和塑性的协同提升。脱氧剂 Cu-10P 使得 Cu-10Sn 合金中树枝晶的生长更加规律,组织的取向性增强,合金的强度得到提升。脱氧剂 Cu-10P 的加入可以提升 Sn 原子的溶解度,进而细化 δ 相,Cu-10Sn 合金的伸长率逐渐增大。此外,添加脱氧剂 Cu-10P 后,铸锭不同位置造成的力学性能差异逐渐减小,这是由于脱氧剂的添加使得 Pb 颗粒分布更加均匀,减少了 Pb 颗粒分布不均对铸锭不同位置造成的力学性能差异。

3 结论

(1)Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金真空感应熔炼过程中,添加脱氧剂 Cu-10P 可以减少合金的铸造缺陷。

(2)脱氧剂 Cu-10P 的添加在促进 Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金树枝晶的生长的同时,还抑制了的 δ 相的偏析,使合金兼具良好的强度和伸长率。

(3)添加脱氧剂 Cu-10P 后,Cu-10Sn-3Pb-4Ni 合金中的 Pb 颗粒分布更加均匀,减少了 Pb 颗粒分布不均对铸锭不同位置造成的力学性能差异。

参考文献:

- [1] LIU C, YIN Y G, LI C M, et al. Properties of lead-free copper matrix composites prepared through in situ Ni-coated FeS surface modification and mechanical alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160580.
- [2] JIANG X S, LIU W X, LI J R, et al. Microstructures and mechanical properties of Cu/Ti₃SiC₂/C/MWCNTs composites prepared by vacuum hot pressing sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 618: 700-706.
- [3] MOGHADAM A D, OMRANI E, MENEZES P L, et al. Mechanical and tribological properties of self-lubricating metal matrix nanocomposites reinforced by carbon nanotubes (CNTs) and

graphene-a review[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 77: 402-420.

- [4] SUN L X, YANG Q, ZOU J T, et al. Effect of hot-dip tin coating treatment on the CuSn10Pb10/45 steel joint fabricated by diffusion bonding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1147-1154.
- [5] 任政,曹明轩,王敏,等.激光选区熔化 Cu-10Sn 合金组织和性能研究[J].新技术新工艺,2023,427(7): 68-77.
REN Z, CAO M X, WANG M, et al. Research on Cu-10Sn alloy structure and properties of laser selective melting[J]. New Technology & New Process, 2023, 427(7): 68-77.
- [6] 陈守东,陈敬超,封皓,等.对冷拉拔铜锡合金导线显微组织的分子动力学模拟[J].机械工程材料,2012,36(11): 88-91, 101.
CHEN S D, CHEN J C, FENG H, et al. Molecular dynamics simulation for microstructure of cold-drawn Cu-Sn alloy conductor[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(11): 88-91, 101.
- [7] SHI L, ZOU J T, CHEN J, et al. Study on segregation solidification and homogenization behavior of Cu-16Sn-0.3Ti alloy powders[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 5547-5558.
- [8] SHI L, ZOU J T, SUN L X, et al. Microstructure evolution, strength-ductility synergy and fracture mechanisms of Cu-18Sn-0.3Ti alloy prepared using direct current assisted Hot pressed sintering and conventional solution treatment[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113346.
- [9] 刘培兴,刘晓璐,刘华鼎.铜与铜合金加工手册[M].北京:化学工业出版社,2008.
LIU P X, LIU X T, LIU H N. Copper and copper alloy processing manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [10] 刘平,任凤章,贾淑果.铜合金及其应用[M].北京:化学工业出版社,2007.
LIU P, REN F Y, JIA S G. Copper alloys and their applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [11] 于乐,贾成厂.机械合金化法强化 Cu-10Sn 合金[J].中国有色金属学报,2013,23(8): 2169-2175.
YU L, JIA C C. Strengthening of Cu10Sn alloy by mechanical alloying[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2169-2175.
- [12] 文科.温轧及退火处理对半固态 CuSn10 合金组织和性能的影响[D].昆明:昆明理工大学,2023.
WEN K. Effect of warm rolling and annealing on microstructure and properties of semi-solid CuSn10 alloy[D]. Kunming: Kunming

- University of Science and Technology, 2023.
- [13] 朱勤天,朱贺,李乐松. GH4169 合金真空感应熔炼过程中夹杂物演变规律研究[J]. 江西冶金, 2023, 43(3): 224-231.
- ZHU Q T, ZHU H, LI L S. Research on the evolution law of inclusions in GH4169 alloy during the vacuum induction melting process[J] Jiangxi Metallurgy, 2023, 43(3): 224-231.
- [14] 李靖,蒋世川,戚慧琳,等. GH4169 真空感应过程夹杂物的演变机制[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 159-164.
- LI J, JIANG S C, QI H L, et al. Evolution mechanism of inclusions in GH4169 produced by vacuum induction melting[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 159-164.