

Cu-Ni-Sn-P合金中Sn和Ni元素对其综合性能的影响

赵久辉, 刘羽飞, 刘诚毅

(江西铜业集团铜板带有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 通过对水平连铸坯进行多道次冷轧和热处理, 制备了不同成分的Cu-Ni-Sn-P(C19040)合金带材, 研究了Sn和Ni元素对Cu-Ni-Sn-P合金带材力学性能、抗软化性能和热收缩性能的影响。结果表明: Sn元素的增加因固溶强化提升了Cu-Ni-Sn-P合金力学性能和抗软化性能, 但加剧了Sn偏析, 劣化了热收缩性能; Ni元素的增加促进形成了更多的Ni-P第二相, 显著提高了抗软化性能。当Sn和Ni的质量分数分别为1.5%和0.85%时, Cu-Ni-Sn-P合金具备较高的综合性能(硬度174HV、抗拉强度565 MPa、延伸率4.3%、热收缩率0.006%、抗软化硬度141HV), 能满足引线框架材料的需求。

关键词: Cu-Ni-Sn-P合金; 力学性能; 抗软化性能; 热收缩率; 综合性能

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.004

中图分类号: TG33 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0042-06

在电子信息技术飞速发展的背景下, 集成电路与分立器件日益多元, 可靠性标准也愈发严格^[1-3]。引线框架是集成电路与分立器件的关键基础材料, 随着技术的不断进步, 其封装形式逐渐向小外形封装、四边扁平封装、球栅阵列封装、芯片尺寸封装等方向转变, 这些新型封装方式具备更高的集成度和更紧凑的结构, 对引线框架材料的性能提出了更为严苛的要求。与此同时, 5G通信、人工智能(AI)、大数据、自动驾驶、元宇宙、虚拟现实(VR)/增强现实(AR)等前沿技术的蓬勃发展, 推动了半导体产业规模的持续扩张, 其采用的集成电路也向高集成度、微型化和高速化发展, 对引线框架材料的综合性能同样提出了更高的要求。在此背景下, 中国引线框架用的铜合金材料大部分已经实现了国产化替代, 但高端引线框架材料依然依赖进口, 如何制备综合性能优异的高端引线框架材料依然是难题。

引线框架铜合金开发和生产的品种已达70余种, 主要包括Cu-Ni-Si系^[4-8]、Cu-Cr-Zr系^[9-13]和Cu-Fe-P系^[14-16]合金。在3个系列合金之外的C19040(Cu-Ni-Sn-P)合金, 因其较好的综合性能(力学性能、电镀性、热收缩率和抗软化性能), 也被广泛用于引线框架材料中。在C19040合金中, Sn元素为占比最大的合金元素, 主要以固溶形式存在^[17-18], 合金中

Sn质量分数越高, 其力学性能和抗软化性能越好, 但导电率和热收缩率越差。C19040合金中Sn元素质量分数的变化对该合金的各项性能有重要影响。C19040合金中另一主元素Ni也以固溶的形式存在于铜基体中, 还与P元素形成Ni-P析出相^[19-21], 析出相的变化对该合金的各项性能有重要影响。因此, 要获得综合性能优异的C19040合金带材, 需要精确控制主合金元素的含量。

引线框架材料需满足“高强高导”核心指标, 兼具抗高温软化和热收缩等性能, 这也是对高端引线框架材料的必然要求。目前市场中用于引线框架材料的Cu-Ni-Sn-P合金带材, 厚度约为0.11 mm, 具有较高的综合性能: 室温拉伸抗拉强度 ≥ 540 MPa, 延伸率 $\geq 4\%$, 维氏硬度 ≥ 165 HV, 抗软化硬度 ≥ 132 HV, 热收缩率 $< 0.011\%$ 。本文主要研究Sn和Ni元素对C19040合金微观组织、力学性能、抗软化性能和热收缩率的影响, 探究协同控制Sn和Ni元素质量分数制备出综合性能满足要求的Cu-Ni-Sn-P合金带材。

1 实 验

图1为引线框架用Cu-Ni-Sn-P合金带材的制备工艺路线: 采用水平连铸的方式拉铸出厚度为14 mm铸坯, 铸坯铣面后进行粗轧和中轧, 再进行

收稿日期: 2025-04-12; 修订日期: 2025-08-02

基金项目: 赣鄱俊才支持计划-主要学科学术和技术带头人培养项目(20243BCE51104)资助

作者简介: 赵久辉(1992—), 男, 江西上饶人, 博士, 工程师, 研究方向: 铜加工, E-mail: 1582756504@qq.com

中间退火,中间退火后进行精轧和留底退火,然后进行成品轧制,轧制至厚度0.11 mm。

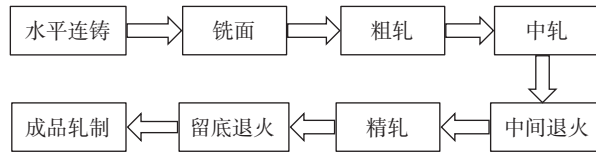


图1 Cu-Ni-Sn-P成品带材制备的工艺路线图

Fig. 1 Process flow diagram for preparation of Cu-Ni-Sn-P alloy strip

C19040合金中主要合金元素为Ni, Sn, Zn和P,成分见表1。通过水平连铸,制备4种不同成分Cu-Ni-Sn-P合金,主要成分见表2。通过Sn1.2合金、Sn1.5合金和Sn1.8合金研究Sn元素的变化对该合金组织和综合性能的影响。通过Ni0.75合金和Ni0.85合金研究Ni元素对该合金组织和综合性能的影响。将4种成分的合金通过图1工艺制备出C19040合金成品带材,研究Sn和Ni元素对成品带材微观组织、硬度、室温拉伸性能、抗高温软化性能和热收缩性能的影响。

表1 C19040合金化学成分

Table 1 Chemical composition of C19040 alloy

合金元素	Ni	Sn	Zn	P	Cu
质量分数/%	0.7~0.9	1.0~2.0	0~0.8	0.02~0.09	余量

表2 不同成分的Cu-Ni-Sn-P合金

Table 2 Different chemical compositions of Cu-Ni-Sn-P alloy (% , mass fraction)

合金元素	Ni	Sn	P	Cu
Sn1.2合金	0.75	1.2	0.08	余量
Sn1.5/Ni0.75合金	0.75	1.5	0.08	余量
Sn1.8合金	0.75	1.8	0.08	余量
Ni0.85合金	0.85	1.5	0.08	余量

硬度试验:采用维氏数显硬度计进行测试,每个样品测量5次,取平均值。

室温拉伸试验:用线切割机加工出室温拉伸试样,使用水磨砂纸将试样打磨光滑后,采用万能材料试验机进行室温拉伸试验。

抗拉强度和延伸率测试:取3组不同样品作为室温拉伸平行试样,用万能材料试验机测试抗拉

强度和延伸率。

抗软化性能测试:取铜带样品在450℃的加热箱中保温3 min后,取出自然冷却至室温,再用维氏数显硬度计测量其抗软化性能,每个样品测量5个数值后取平均值。

热收缩性能测试:对不同样品分别取3组长度为200 mm且表面平整、版型平直的样品作为试样,测试其热收缩值,取3组测试结果的平均值作为最终测试结果。测试前先用打孔设备在样品上打两个距离为180 mm的圆孔,并测量两个圆孔中心的距离,结果标注为C1;然后将样品放入温度恒定为500℃的加热箱内,加热1 min后取出自然冷却至室温,再次测量两个圆孔中心的距离,结果标注为C2。测量所得数据精确到小数点后四位。热收缩值 $= (C2 - C1) / C1 \times 100\%$ 。

2 Sn和Ni对Cu-Ni-Sn-P合金组织和性能的影响

2.1 Sn对Cu-Ni-Sn-P合金组织和性能的影响

图2为3种不同Sn质量分数(1.2%, 1.5%和1.8%)C19040合金成品带材的面扫描Sn元素分布图,右下角为所对应的Ni元素分布,红色箭头所示为富Ni第二相。不同Sn质量分数的成品带材扫描显示:图2(a~c)均存在富Ni的第二相(图中右下角所示),但在第二相中Sn元素分布未出现明显的变化,表明Sn元素较均匀地分布在铜基体中,主要以固溶的形式存在于C19040合金中。

表3为3种不同Sn质量分数Cu-Ni-Sn-P合金成品带材的维氏硬度、抗拉强度和延伸率,表中±号后的数值表示多个试样测试后的误差值,3种不同Sn质量分数的合金中Ni质量分数均为0.75%。Sn质量分数为1.8%时,成品带材硬度和抗拉强度最高,分别为181HV和576 MPa,延伸率为3.8%。Sn元素基本以固溶的形式存在于铜基体中^[17-18],Sn元素越高固溶强化效果越好,因而力学性能越好。当Sn质量分数降低至1.5%时,硬度和抗拉强度分别下降至171HV和557 MPa,延伸率升高至4.3%;当Sn质量分数进一步下降至1.2%后,硬度和抗拉强度下降至158HV和523 MPa,延伸率升高至4.5%。

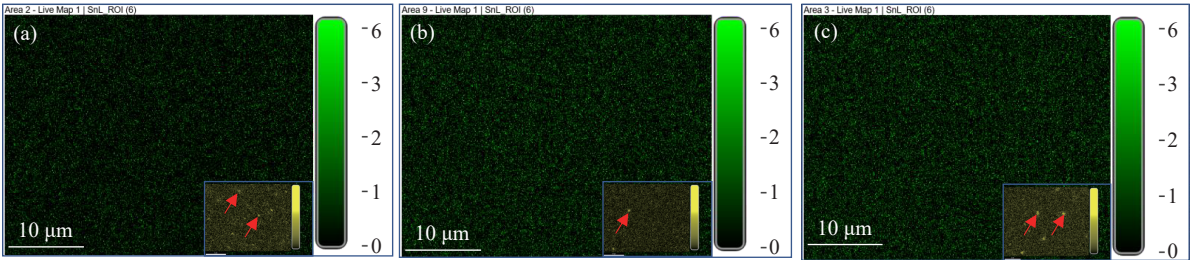


图2 不同Sn质量分数成品带材面扫描中Sn和Ni元素分布

Fig. 2 Surface distribution of Sn and Ni on finished strip samples with different Sn mass fractions :
(a) 1.2%; (b) 1.5%; (c) 1.8%

表3 不同Sn质量分数Cu-Ni-Sn-P成品的力学性能

Table 3 Mechanical properties of Cu-Ni-Sn-P alloys with different Sn mass fractions			
Sn质量分数/%	维氏硬度(HV)	抗拉强度/MPa	延伸率/%
1.8	181 ± 1	576 ± 4	3.8 ± 0.1
1.5	171 ± 3	557 ± 5	4.3 ± 0.2
1.2	158 ± 3	523 ± 3	4.5 ± 0.2

表4为3种不同Sn质量分数Cu-Ni-Sn-P合金成品带材的抗软化硬度和热收缩率。Sn质量分数为1.8%时,抗软化硬度和热收缩率均为最高,分别为151HV和0.010%; Sn质量分数为1.5%时,抗软化硬度和热收缩率下降至130HV和0.006%; Sn质量分数为1.2%时,抗软化硬度和热收缩率最低,分别为107HV和0.002%。抗软化硬度为成品带材在450℃保温3 min的硬度, Sn元素质量分数的变化对抗软化性能有重要的影响,在高温保温时,会发生静态回复,位错不断滑动、迁移至晶界位置湮灭,使得位错密度不断减少,从而硬度不断降低。Sn元素基本以固溶的形式存在于铜基体中^[17-18]。在Cu-Ni-Sn-P合金中, Sn质量分数越高,高温保温时Sn元素对位错移动的阻碍作用越大,减少位错的移动,从而减少位错的湮灭。因此, Sn质量分数越高对成品高温保温时位错运动的阻碍效果越大,抗软化性能越好。Sn元素的质量分数同样对热收缩性能有重要的影响,不同Sn元素质量分数的C19040合金具有不同的原子间晶格常数,尤其在熔铸过程中Sn容易发生偏析^[22-23], Sn元素质量分数越大, Sn偏析情况越严重,致使原子晶格常数相差越大,不同的晶格常数热胀冷缩的变形程度不同,致使出现不同的热收缩率值。因此, C19040合金中Sn质量分数越大,原子晶格常数越大,这将增加热胀冷缩的变化程度,从而使得热收缩率增大。

表4 不同Sn质量分数Cu-Ni-Sn-P的抗软化性能和热收缩率

Table 4 Softening resistance and thermal contraction rate of Cu-Ni-Sn-P alloys with different Sn mass fractions		
Sn质量分数/%	抗软化硬度(HV)	热收缩率/%
1.8	151 ± 2	0.010 ± 0
1.5	130 ± 1	0.006 ± 0.001
1.2	107 ± 3	0.002 ± 0

2.2 Ni对Cu-Ni-Sn-P合金组织和性能的影响

在Cu-Ni-Sn-P合金中,一部分Ni元素以固溶的形式在铜基体中存在,一部分Ni元素以富Ni析出相的形式存在^[19-21]。在Cu-Ni-Sn-P合金中Ni元素质量分数为0.7%~0.9%,当Sn质量分数为1.5%时,分别研究Ni元素的质量分数在下限附近(0.75%)和上限附近(0.85%)时对该合金带材组织和综合性能的影响。图3为Sn质量分数为1.5%、Ni质量分数为0.75%时成品的面扫描结果,可以看出,在该合金中存在明显的第二相析出的情况,亚微米级别的第二相的扫描结果中出现了明显的Ni原子富集伴随Cu原子大幅度骤减。

图4为Ni质量分数分别为0.75%和0.85%时的Cu-Ni-Sn-P合金带材扫描照片。在两种Ni质量分数的Cu-Ni-Sn-P合金中,均出现较多尺寸为100~300 nm的第二相,图中所示Ni质量分数由0.75%增加至0.85%后第二相数量明显增加。图4(a, b)中红色箭头所示的第二相成分见表5,第二相主要为Ni-P相, Ni和P的原子比例约为2:1,因而Cu-Ni-Sn-P合金中析出的第二相成分主要为Ni₂P相^[20-21]。两种合金中Ni质量分数的不同对应着不同的第二相数量,第二相数量越多,该合金在高温加热阶段

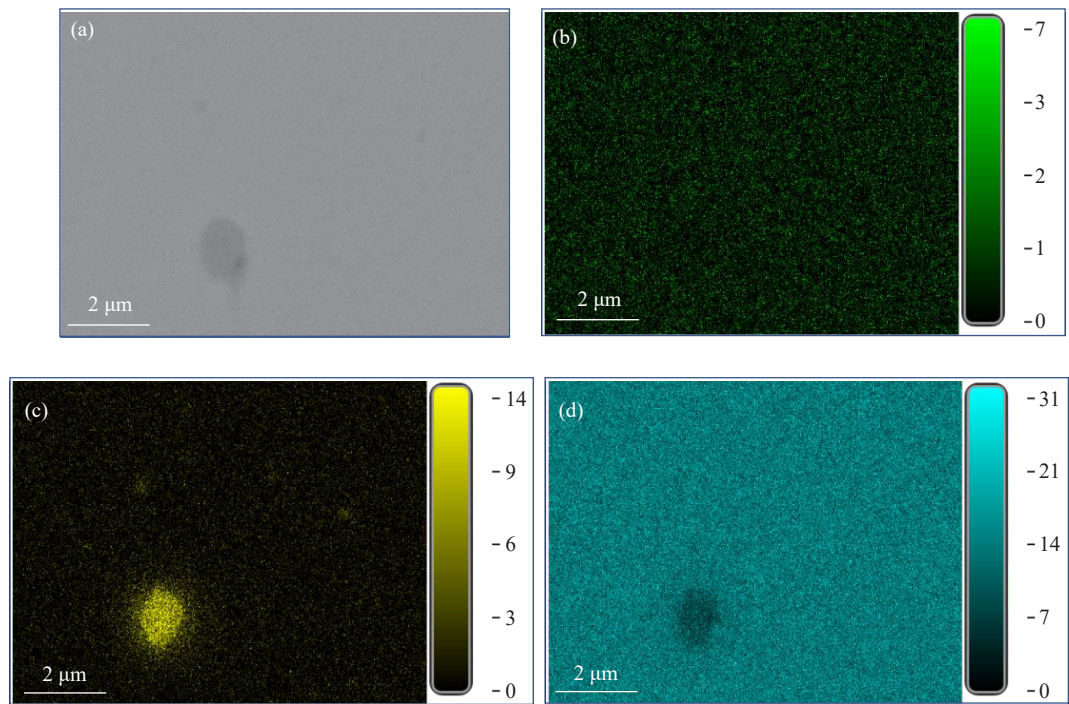


图3 Cu-Ni-Sn-P合金第二相面扫描结果:(a)原图;(b)Sn;(c)Ni;(d)Cu

Fig. 3 Secondary phase surface scanning results of Cu-Ni-Sn-P alloy: (a) Original image; (b) Sn; (c) Ni; (d) Cu

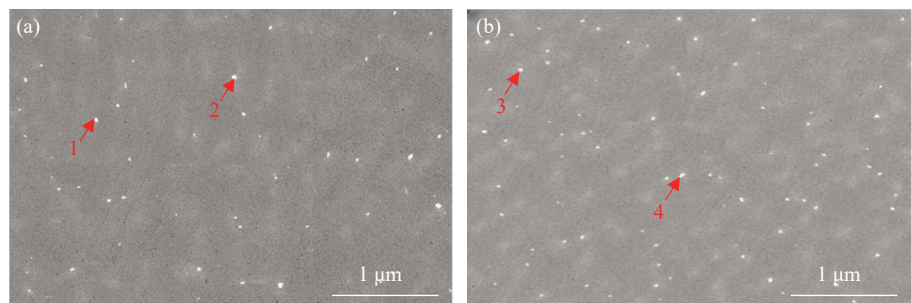


图4 不同Ni质量分数Cu-Ni-Sn-P合金带材扫描结果

Fig. 4 Scanning results of Cu-Ni-Sn-P strip samples with different Ni mass fractions: (a) 0.75%; (b) 0.85%

表5 图4扫描中第二相各元素原子占比

Table 5 Atomic proportions in the second phase for different positions in Fig.4(%, auto fraction)

第二相位点	Ni	Sn	P	Cu
1	11.42	0.58	5.23	82.95
2	10.13	0.53	4.72	84.62
3	10.6	0.47	4.93	83.84
4	10.96	0.54	4.98	83.57

越能阻碍和钉扎位错的运动,减少位错的湮灭,从而提高该合金的抗软化性能。

表6为两种不同Ni质量分数的Cu-Ni-Sn-P合金带材的综合性能。Ni质量分数由0.75%增加至0.85%时,硬度和抗拉强度略有升高,延伸率和

表6 不同Ni质量分数的Cu-Ni-Sn-P合金综合性能

Table 6 Comprehensive properties of Cu-Ni-Sn-P alloy with different Ni mass fractions

Ni 质量 分数/%	硬度 (HV)	抗拉强度/ MPa	延伸率/ %	热收缩率/ %	抗软化 硬度 (HV)
0.75	172 ± 1	558 ± 3	4.3 ± 0.2	0.006 ± 0	130 ± 2
0.85	174 ± 2	565 ± 3	4.3 ± 0.1	0.006 ± 0	141 ± 3

热收缩率保持不变,而抗软化硬度明显升高,由130HV增加至141HV。Cu-Ni-Sn-P合金Ni质量分数由0.75%增加至0.85%时,Ni元素质量分数升高幅度较小,对各项性能影响不大,但Ni元素质量分数增加促进形成了更多Ni-P第二相,将显著影响

该合金的抗软化性能。

对于Cu-Ni-Sn-P合金而言,当Ni质量分数为0.75%、Sn元素质量分数由1.2%增加至1.8%时,由于固溶强化的作用,当Sn质量分数为1.2%时,该合金难以满足引线框架材料对力学性能的要求。在Cu-Ni-Sn-P合金熔铸过程中,Sn元素存在偏析的情况,Sn质量分数越高偏析越严重,该合金在加热保温过程中晶格常数变化越大,因而Sn质量分数越高热收缩率越大,当Sn质量分数为1.8%时,热收缩率值基本达到引线框架要求上限值0.011%,难以满足稳定生产的要求。当Sn元素质量分数为1.5%时,抗软化硬度难以满足引线框架132HV的要求,但可通过增加Ni质量分数提高其抗软化硬度,Ni质量分数的增加使得尺寸为100~300 nm的Ni₂P第二相增多,从而提高该合金的抗软化性能。当Sn质量分数为1.5%时,Ni质量分数由0.75%增加至0.85%,该合金抗软化硬度可增加至141HV,能满足引线框架对抗软化性能的要求。

为了同时满足引线框架对力学性能、抗软化性能和热收缩率的要求,Cu-Ni-Sn-P合金元素Sn与Ni质量分数分别为1.5%和0.85%最佳,此时该合金硬度为174HV,抗拉强度为565 MPa,延伸率为4.3%,抗软化硬度为141HV,热收缩率为0.006%,各项性能均能满足引线框架材料使用要求。

3 结 论

通过对水平连铸铸坯进行多道次冷轧和退火后,制备了不同Sn质量分数和Ni质量分数的Cu-Ni-Sn-P合金成品带材,并研究了Sn和Ni元素质量分数的变化对该合金组织、力学性能、抗软化性能和热收缩性能的影响,主要得出以下结论:

1) 在Cu-Ni-Sn-P合金成品带材中,Sn元素主要以固溶的形式存在于铜基体中,而Ni元素主要形成Ni₂P第二相;

2) 在Cu-Ni-Sn-P合金成品带材中,Sn质量分数由1.2%增加至1.8%时,硬度由158HV增加至181HV,抗拉强度由523 MPa提高至576 MPa,抗软化硬度由107HV增加至151HV,热收缩率由0.002%增加至0.010%;

3) 在Cu-Ni-Sn-P合金成品带材中,Ni元素由0.75%升高至0.85%时,100~300 nm的Ni₂P第二相

数量明显增多,该合金的抗软化硬度由130HV增加至141HV。

参考文献:

- [1] 姜雁斌,黄承智,李周,等.集成电路引线框架用铜合金研究现状[J].铜业工程,2024(3): 131-144.
- [2] 张文芹,吕显龙,冯小龙.蚀刻型高密度引线框架铜合金带材的研制进展[J].有色金属材料与工程,2020,41(3): 1-6.
- [3] 陈文革,王纯.集成电路用金属铜基引线框架和电子封装材料研究进展[J].材料导报,2002,16(7): 29-30.
- [4] 杨耀鹏,张彦敏,王要利,等.时效处理对Cu-Ni-Si合金应力松弛行为影响研究[J].特种铸造及有色合金,2023,43(9): 1230-1234.
- [5] 刘军,曹祎程,米绪军,等.高性能Cu-Ni-Si系合金研究现状及发展趋势[J].铜业工程,2024(3): 152-162.
- [6] 张英,孟凡俭,方晓阳,等.Cu-Ni-Si合金带材表面白线缺陷成因分析[J].铜业工程,2023(2): 92-100.
- [7] 张英,刘焱,陈建永.Cu-Ni-Si合金时效处理过程中产品性能影响因素研究[J].铜业工程,2022(3): 10-13.
- [8] HAN S Z, JEONG I S, RYU B, et al. Enhanced strength of Cu-Ni-Si alloy via heterogeneous nucleation at grain boundaries during homogenization [J]. Materials Characterization, 2024, 215: 114198.
- [9] 刘胜光,李应焕,陈帅峰,等.复杂多组元Cu-Cr-Zr-Ni-Si-Co-Zn合金时效析出动力学研究[J].铜业工程,2024(5): 1-10.
- [10] 宋旭,周宏桥,卢峰,等.ECAP和热处理对建筑装饰Cu-Cr-Zr合金耐蚀性能的影响[J].热加工工艺,2021,50(23): 11-16.
- [11] 马玉霞,党淑娥,陈慧琴.固溶处理对Cu-Cr-Zr合金组织与性能的影响[J].金属热处理,2022,47(1): 163-166.
- [12] SONG Y L, WANG G C, NI J J, et al. First-principles study on the structural, mechanical and thermodynamic properties of Cu-Cr-Zr alloy [J]. Physica B: Condensed Matter, 2024, 685: 416029.
- [13] 曲建平,刘佳,岳世鹏,等.旋转磁场调控优化Cu-Cr-Zr-Si合金组织和性能[J].铜业工程,2023(5): 1-9.
- [14] 杨春秀,郭富安,向朝建,等.时效态Cu-Fe-P合金组织和性能的研究[J].特种铸造及有色合金,2007,

- 27(12): 975-978, 902.
- [15] 赵久辉, 郭祊鹤, 肖桥平. Ag 对 C19210 合金带材的微观组织和性能的影响 [J]. 铜业工程, 2023(3): 64-69.
- [16] ZENG D L, QIU Y T, YI Y L, et al. Effect of current on the tribological behavior of Cu-Fe-P immiscible alloy produced by laser powder bed fusion [J]. Wear, 2024, 558: 205591.
- [17] 陈忠平, 杨扬, 姜花芬. 电磁参数对宽幅锡磷青铜水平连铸坯组织和铸造性能的影响 [J]. 材料热处理学报, 2024, 45(12): 121-129.
- [18] 林志霖, 刘媛, 罗金宝, 等. 预轧-退火对 Cu-7.5Sn-0.1P 带材组织与力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(9): 2955-2965.
- [19] 张文芹, 张斌. Cu-Ni-Sn-P 合金的耐热性能研究 [J]. 铜业工程, 2019(3): 12-15.
- [20] 熊书俊, 万佳, 陈金水, 等. 微合金化 Cu-Ni-Sn-P 合金的组织 and 性能 [J]. 金属热处理, 2022, 47(9): 164-170.
- [21] 熊书俊. Cu-Ni-Sn-P(-Si) 合金成分调控及组织性能研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- [22] 王松伟, 郑莲宝, 宋鸿武, 等. 锡磷青铜水平连铸坯反偏析及其对轧制边裂的影响 [J]. 材料工程, 2025, 53(3): 70-82.
- [23] 郑莲宝. 锡磷青铜水平连铸坯边部组织不均匀及反偏析控制研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2024.

Optimization of Sn and Ni on Comprehensive Properties of Cu-Ni-Sn-P Alloy

ZHAO Jiuhui, LIU Yufei, LIU Chengyi

(Jiangxi Copper Strip and Foil Corporation Limited, Nanchang 330096, China)

Abstract: In this study, Cu-Ni-Sn-P (C19040) alloy strip materials with different compositions were prepared by horizontal continuous casting followed by multiple cold rolling and heat treatment processes. Effects of Sn and Ni mass fraction variations on the mechanical properties, softening resistance, and thermal contraction of Cu-Ni-Sn-P alloy strip materials were investigated. Results indicated that an increase in Sn mass fraction enhanced mechanical properties and softening resistance of Cu-Ni-Sn-P alloy through solid solution strengthening. However, excessive Sn mass fraction exacerbated Sn segregation, which worsened the thermal contraction behavior. An increase in Ni mass fraction promoted the formation of more Ni-P precipitates, significantly improving the softening resistance. When mass fraction of Sn was 1.5% and that of Ni was 0.85%, the alloy exhibited superior comprehensive properties, with a hardness of 174HV, tensile strength of 565 MPa, elongation of 4.3%, thermal contraction rate of 0.006%, and softening resistance hardness of 141HV. These properties met the requirements for lead frame materials.

Key words: Cu-Ni-Sn-P alloy; mechanical property; softening resistance; thermal contraction rate; comprehensive property

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.004

引文格式: 赵久辉, 刘羽飞, 刘诚毅. Cu-Ni-Sn-P 合金中 Sn 和 Ni 元素对其综合性能的影响 [J]. 铜业工程, 2026(1): 42-47.
ZHAO Jiuhui, LIU Yufei, LIU Chengyi. Optimization of Sn and Ni on comprehensive properties of Cu-Ni-Sn-P alloy [J]. Copper Engineering, 2026(1): 42-47.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc