

Si-Ni、Si-Ag添加对Cu-7Fe合金凝固组织与性能影响

刘飞跃¹ 冯江¹ 张彦敏^{1,2} 薛向阳¹ 周仕康¹ 王震¹ 徐耀科¹

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南省有色金属材料科学与加工技术重点实验室, 洛阳 471023)

摘要 采用光学显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜和电子万能试验机等研究了Si-Ni和Si-Ag添加对Cu-7Fe合金凝固组织与性能的影响。结果表明,微量合金元素的添加优化了Cu-7Fe合金中的富Fe相分布,促使富Fe相形貌由花瓣状向树枝晶结构转变。Si-Ni和Si-Ag的添加降低了Fe(质量分数,下同)在Cu基体中的固溶度,基体中Fe含量(质量分数,下同)由4.4%分别下降至3.2%和2.9%。同时,Cu晶粒得到细化,晶粒尺寸由79.4 μm分别细化至48.7 μm和65.3 μm。相较铸态Cu-7Fe合金,Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag合金具有更为理想的综合性能,其电导率、硬度(HV)、抗拉强度和伸长率分别为22.7 MS/m、106.3、284 MPa和31.4%。

关键词 Cu-Fe合金;微合金化;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.1¹;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250188

Effects of Si-Ni and Si-Ag Additions on Solidified Structure and Properties of Cu-7Fe Alloy

LIU Feiyue¹, FENG Jiang¹, ZHANG Yanmin^{1,2}, XUE Xiangyang¹, ZHOU Shikang¹, WANG Zhen¹, XU Yaoke¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023;

2. Henan Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Processing Technology, Luoyang 471023)

Abstract: The effects of Si-Ni and Si-Ag additions on solidified microstructure and properties of Cu-7Fe alloy were investigated by optical microscopy, X-ray diffractometer, scanning electron microscopy and electronic universal mechanical testing machine. The distribution of Fe-rich phases in Cu-7Fe alloys is optimized by addition of minor alloying elements, promoting the transformation of Fe-rich phase morphology from petal-shaped to dendritic structure. The solid solubility of Fe in the Cu matrix is reduced by additions of Si-Ni and Si-Ag, which is decreased from 4.4% to 3.2% and 2.9%, respectively. Concurrently, Cu grains are refined, and the grain size is refined from 79.4 μm to 48.7 μm and 65.3 μm, respectively. Compared with as-cast Cu-7Fe alloy, Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag alloy exhibits superior comprehensive properties, where the electrical conductivity, hardness, tensile strength and elongation reach up to 22.7 MS/m, 106.3 HV, 284 MPa and 31.4%, respectively.

Key Words: Cu-Fe Alloys, Microalloying, Solidified Structure, Mechanical Properties

Cu-Fe合金因其优良的导电导热性、力学性能和电磁屏蔽性能而备受关注,广泛应用于电气电子工业、集成电路引线框架和电磁功能材料等领域^[1-2]。然而,Cu-Fe合金属于难混熔合金,凝固过程中液-液相分离导致的宏观偏析和Fe相分布不均匀,通常会降低Cu-Fe合金的力学性能^[3],制约其在5G通信、电动汽车等领域的应用拓展。因此,开发既具有均匀组织又具有优异性能的Cu-Fe合金系已成为重要的研究课题。研究表明,在Cu-Fe合金中添加不同微合金元素,如Si、Ag、Zr、Mg等元素^[4-7],可以抑制液-液相分离现象,优化凝固组织,促

进第二相析出,是调控其微观组织并改善性能的重要方法^[8]。LUO X等^[9]研究了Sn对Cu-5Fe合金中Fe相分布的影响,发现Sn可以抑制枝晶偏析,增强Cu/Fe的协同变形能力,使Fe纤维具有更好的连续性和密度,抗拉强度比拉拔态Cu-5Fe合金提高了约190 MPa,电导率仅下降了0.8 MS/m。YUAND W等^[10]发现Ag能够细化Fe枝晶和纳米级Fe析出相,降低Fe的活化能,有利于其成核。PANG Y J等^[11]发现Si可以改变Cu-10Fe合金中第二相的组成,形成具有FCC结构的Fe₃Si脆性相。YU X Y等^[12]发现Si能够促进Cu-Fe合金中Fe相

收稿日期:2025-05-06;修订日期:2025-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52373313);河南省科技攻关资助项目(242102231023)

第一作者:刘飞跃,男,2001年出生,硕士研究生,E-mail:2819621082@qq.com

通信作者:冯江,男,1986年出生,实验师,E-mail:fhap256@163.com

引用格式:刘飞跃,冯江,张彦敏,等. Si-Ni、Si-Ag添加对Cu-7Fe合金凝固组织与性能影响[J]. 特种铸造及有色金属,2026,46(4):582-588.

LIU F Y, FENG J, ZHANG Y M, et al. Effects of Si-Ni and Si-Ag additions on solidified structure and properties of Cu-7Fe alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 582-588.

的析出,细化晶粒尺寸,而Mg的加入进一步改善了材料的力学性能,Si-Mg协同加入使轧制后Cu-2.5Fe-0.1Si合金的抗拉强度提高了159 MPa。

研究表明,单一微合金化元素可实现组织调控,然而关于多组元协同作用对Cu-Fe合金凝固组织和性能的影响报道很少。基于此,本研究拟通过成分设计,将Si、Si-Ni、Si-Ag添加到Cu-7Fe合金中,以调控合金的凝固组织和性能,探究多组元复合添加对Cu-7Fe合金凝固组织、电学和力学性能的影响,旨在为高性能铜合金的制备提供参考。

1 试验材料与方法

采用质量分数为99.99%的电解Cu、99.95%的纯Fe、99.99%的纯Si和纯Ni、99.999%纯Ag为原材料。熔炼时先将原料放入石墨坩埚中,抽真空至0.1 Pa,充入氩气到10 kPa,加15 kW功率使材料熔化,经2 min精炼调温后浇注成锭,用机械切割去除表面缺陷后得到尺寸为150 mm×100 mm×15 mm的铸锭。利用XRF-XL2型X射线荧光光谱分析仪进行化学成分检测,合金的化学成分见表1。

表1 4种合金的化学成分

合金	设计成分	$w_B/\%$				
		Fe	Si	Ag	Ni	Cu
1	Cu-7Fe	6.85	—	—	—	余量
2	Cu-7Fe-0.3Si	6.86	0.26	—	—	余量
3	Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni	6.88	0.27	—	0.31	余量
4	Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag	6.90	0.26	0.30	—	余量

从铸锭顶部相同高度的横截面中心部位取样,经砂纸打磨后进行抛光处理,使用Fe(NO₃)₃·HCl·H₂O体积比为1:5:4配制成的腐蚀液进行化学腐蚀,在

Zeiss Axio Vert A1型光学显微镜下观察试样的组织形貌,并用Nano Measurer软件统计Cu基体的晶粒尺寸。采用D8 advanced型X射线衍射仪进行物相鉴定,电压为40 kV,电流为40 mA,扫描速率为2 (°)/min,扫描角度为30°~100°。在JSM-IT100型钨灯丝扫描电镜(SEM)下观察断口形貌,采用扫描电镜自带的EDS分析仪对合金成分进行表征。采用HVT-1000A显微硬度计测量合金的硬度,载荷为4.9 N,加载时间为10 s,测试5个硬度值并取平均值。采用RK2514N精密电阻测试仪测量电阻率,测量5次后取平均值。室温拉伸试验在MTS-CMT5205型电子万能试验机上进行,拉伸速率为0.5 mm/min,每组试样取3个平行试验值的平均值,拉伸试样见图1。

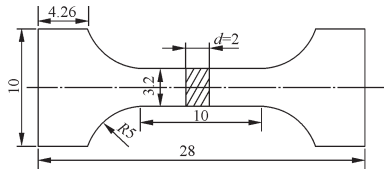


图1 拉伸试样尺寸图
Fig.1 Dimension of tensile specimen

2 试验结果与分析

2.1 组织分析

图2为不同合金的铸态金相组织。可以看出,合金组织均由深灰色富Fe相和亮黄色Cu基体构成,其中富Fe相呈现粗大枝晶状和细小球状两种典型形貌,Cu基体均呈等轴晶特点,并且晶粒尺寸大小相差较大。值得注意的是,粗大的富Fe枝晶区域往往伴随着较大的Cu晶粒,而在富Fe颗粒聚集区,Cu晶粒尺寸较为细小,这表明富Fe相尺寸越大,其对Cu晶粒的细化作用

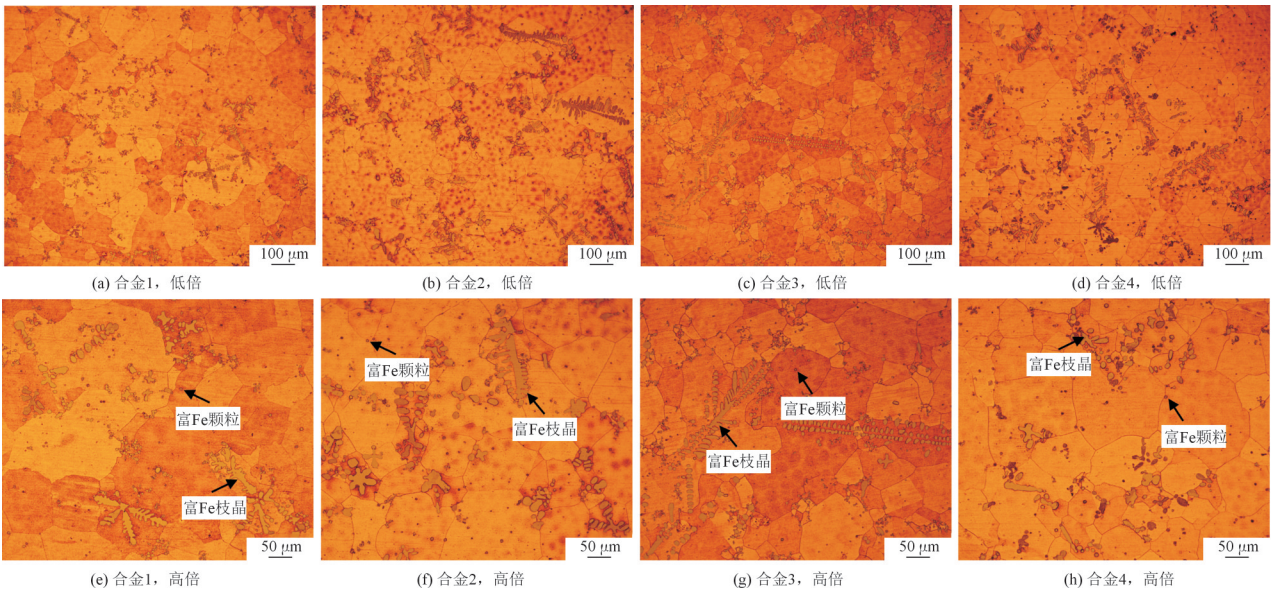


图2 不同合金的铸态组织

Fig.2 As-cast microstructure of different alloys

越弱。合金成分变化显著影响富 Fe 相的形貌特征, Cu-7Fe 合金中富 Fe 相分布不均, 富 Fe 枝晶尺寸较小, 呈花瓣状。Si、Si-Ni 和 Si-Ag 的添加促进了 Fe 相的形核及析出, 使富 Fe 相分布更加均匀, 但也使富 Fe 枝晶发生了粗化行为, 表现为一次枝晶臂主干伸长, 二次枝晶臂增多, 形成了发达树枝晶结构。

图 3 为 Cu 基体晶粒尺寸分布直方图。可以看出, 随着 Si、Si-Ni 和 Si-Ag 的加入, Cu 基体晶粒得到不同程度细化。Cu-7Fe 和 Cu-7Fe-0.3Si 的 Cu 晶粒尺寸分别为 $79.4\ \mu\text{m}$ 和 $78.4\ \mu\text{m}$, Si 的单独加入对 Cu 晶粒的细化效果并不明显, 这可能是因为 Si 的加入虽然增加了凝固过程中 Fe 的形核驱动力, 引起大量形核位点^[13], 抑制了晶粒长大, 使小晶粒变多。但同时 Si 促进了富 Fe 枝晶充分生长, 粗大 Fe 枝晶对 Cu 晶粒长大的抑制效果较弱, 大尺寸 Cu 晶粒增加, 两种效果叠加导致总体平均尺寸变化不大。当 Si-Ni、Si-Ag 元素协同添加时, 细化效果更为明显, 平均晶粒尺寸达到了 $48.7\ \mu\text{m}$ 和 $65.3\ \mu\text{m}$ 。多组元协同添加, 既增加了溶质原子分布, 又为 Fe 相提供了大量的形核位点, 晶界迁移受到更大的阻碍作用, 抑制了晶粒长大。

图 4 为不同成分合金凝固组织示意图。从热力学角度分析, 枝晶粗化是由界面自由能所驱动的自发过程, 通过减小固/液接触面积, 从而降低固/液体系总的界面自由能^[14]。在高温熔体(见图 4a)冷却过程中, 当合金熔体的温度低于液相温度时, Cu-Fe 合金进入亚稳液相不混溶区(见图 4b), 分离为富 Fe 液相和富 Cu 液相。在液-液体系中, 光滑的界面结构具有最低的能量^[15]。富 Fe 液相的熔点远高于富 Cu 液相, 在冷却过程中先形成球形 γ -Fe 相颗粒, 之后向 α -Fe 相转变。合金化元素 Si、Si-Ni、Si-Ag 的添加通过改变固/液界面能,

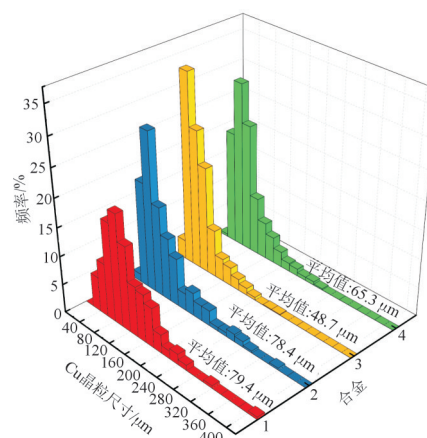


图 3 合金元素添加对铸态 Cu-7Fe 合金晶粒尺寸影响
Fig.3 Effects of alloying element addition on grain refinement in as-cast Cu-7Fe alloy

削弱 Fe 相形核势垒, 促进了 Fe 相形核, 在凝固初期形成更多的富 Fe 液滴。随着温度进一步降低(见图 4c), 凝固界面处 Fe 原子快速耗尽, 形成浓度梯度, 产生局部成分过冷, 而 Fe 在 Cu 基体中的低扩散系数导致凝固前沿 Fe 原子无法及时均匀化, 会形成周期性溶质富集/贫化区, 驱动枝晶主干与二次枝晶臂的分级生长, 并通过 Ostwald 熟化机制形成枝晶状结构。多元合金中具有更多的富 Fe 液滴和 Fe 形核位点, 导致 Fe 原子更易向枝晶尖端迁移, 从而在凝固过程中形成发达树枝晶形貌。富 Fe 枝晶的生长需要吸收 Cu 液中的 Fe 原子, 当枝晶附近 Cu 液中的 Fe 含量不足时会停止生长。在 Marangoni 效应和液体对流等多种机制的共同作用下, 小的富 Fe 液滴向大的富 Fe 液滴移动并合并, 当小液滴还没有被大液滴完全吸收时, 合金可能已经凝固(见图 4d), 形成富 Fe 相颗粒聚集现象^[16]。Si-Ni 和 Si-Ag 的加入对 Cu 基体晶粒长大具有明显的抑制效果, 晶界面

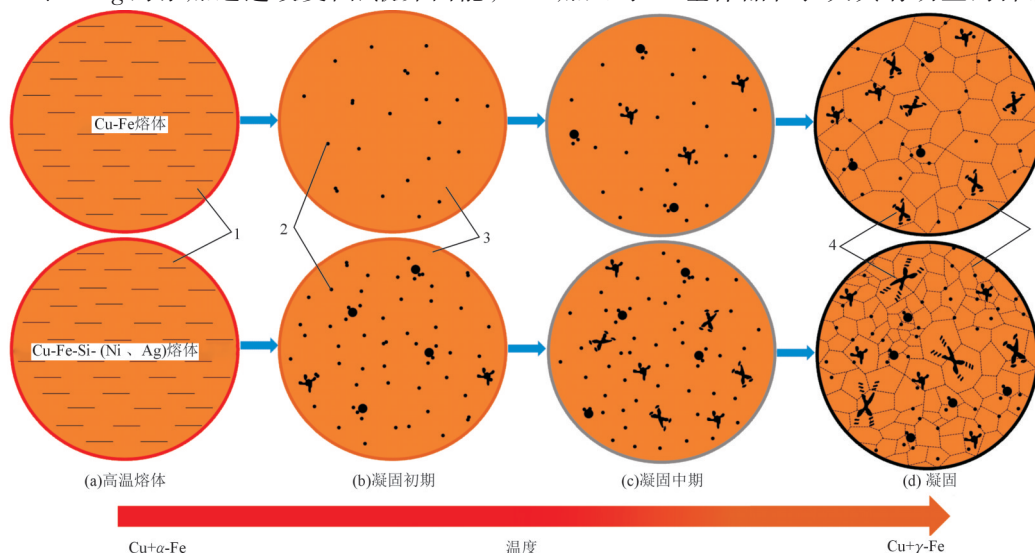


图 4 合金元素添加对 Cu-Fe 合金凝固组织影响示意图

Fig.4 Schematic diagram of effects of alloying element additions on solidification microstructure of Cu-Fe alloys

1. 高温熔体 2. 富 Fe 液滴 3. 富 Cu 液相 4. 富 Fe 枝晶 5. Cu 基体晶界

积的增加可为 Fe 原子扩散提供更多的驱动力和形核位点,相较于二元 Cu-Fe 合金,多元合金凝固组织中的富 Fe 颗粒更多。

2.2 合金化元素分布及对 Fe 固溶度影响

图 5 为铸态合金的 XRD 图谱。可以看出,4 组合金的衍射花样无显著差别,这是因为 Si、Ni 和 Ag 元素添加量较少,形成的衍射峰强度非常弱。通过衍射峰标定,4 组合金均由面心立方结构的 Cu 相和体心立方结构的 α -Fe 相构成。值得注意的是,相较于二元 Cu-7Fe 合金,多元合金的 α -Fe 峰向右移动,说明合金化元素的

加入改变了 α -Fe 相的晶格参数和亚微观结构。根据 X 射线衍射花样计算出了不同成分的合金的 Cu 基体和 α -Fe 相的晶面间距,结果见表 2。可以看出, Si 和 Si-Ni 元素的加入使 Cu 基体和富 Fe 相的晶面间距减小,而 Si-Ag 的加入却使 Cu 基体晶面间距增大。这是因为 Ag (0.144 nm)、Cu (0.128 nm)、Ni (0.125 nm)、Fe (0.124 nm) 和 Si (0.111 nm) 的原子半径是依次减小的,原子半径较小的 Si、Ni 固溶于 Cu 基体和富 Fe 相中,内部发生点阵收缩,导致晶面间距减小。而原子半径较大的 Ag 引起的取代固溶体会置换 Cu 基体中的 Fe 原子和 Si 原子,导致 Cu 基体晶面间距增大。合金元素的固溶使 Cu 基体和富 Fe 相内部发生点阵收缩,产生严重的晶格畸变,提升固溶强化效果。

图 6 为不同成分合金的 SEM 形貌及元素分布图。

表 2 4 组合金的 Cu 基体和 α -Fe 晶面间距

铸态合金	晶面间距/nm			
	(111) _{Cu}	(200) _{Cu}	(220) _{Cu}	(110) _{α-Fe}
Cu-Fe	0.223 94	0.199 56	0.160 10	0.218 69
Cu-7Fe-0.3Si	0.223 91	0.199 54	0.160 09	0.218 29
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni	0.223 89	0.199 51	0.160 06	0.218 35
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag	0.224 02	0.199 62	0.160 12	0.218 61

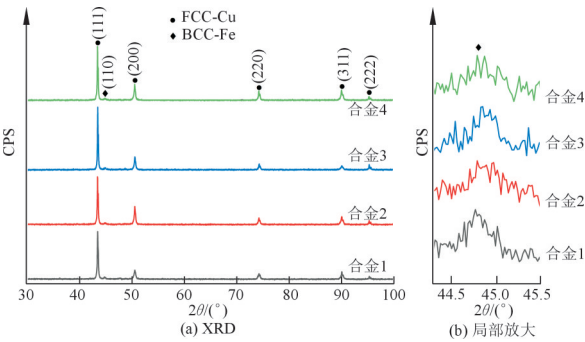


图 5 不同成分合金的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of alloys with varying compositions

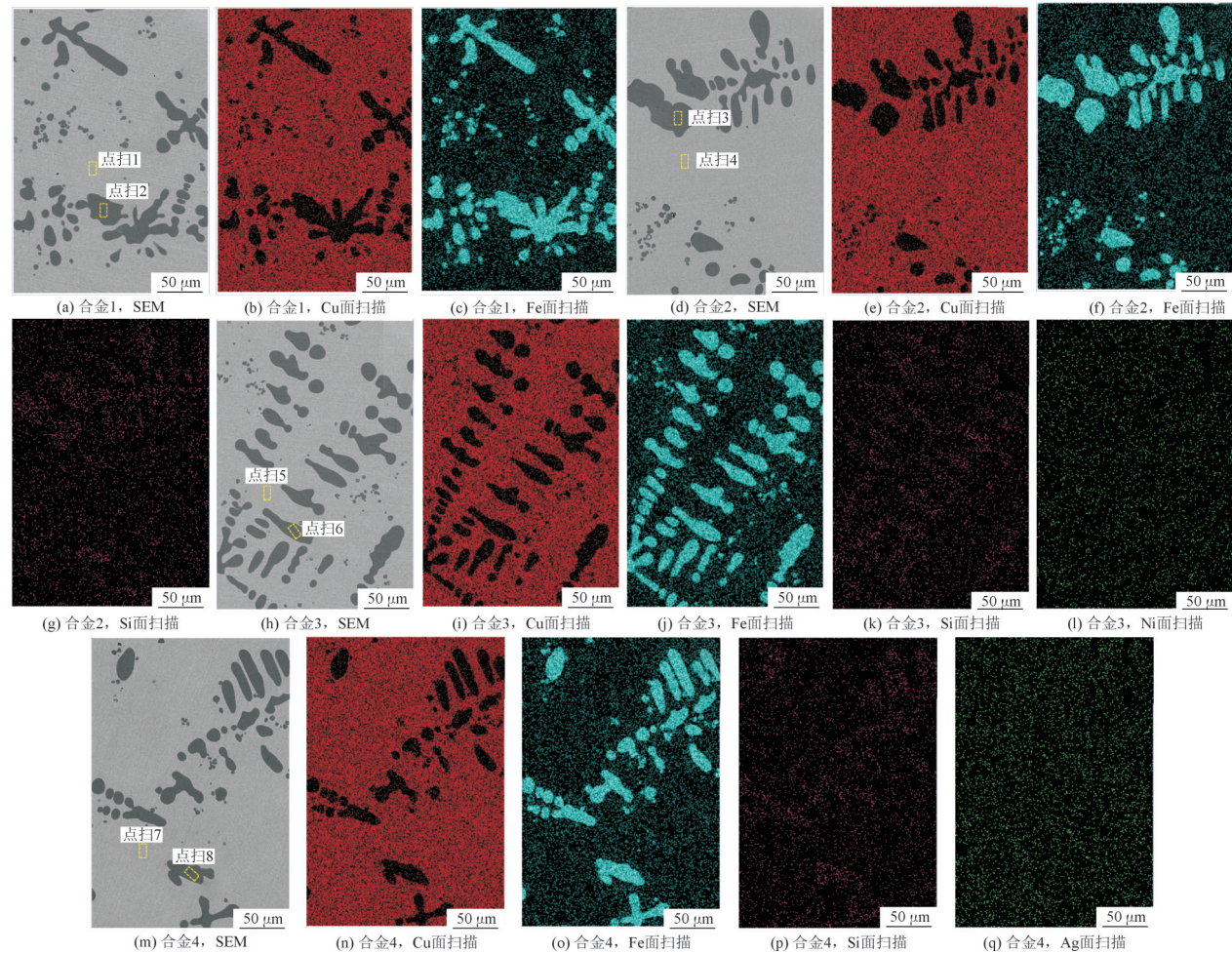


图 6 不同成分合金 SEM 形貌和 EDS 面扫

Fig.6 SEM morphologies and EDS mapping of alloys with varying compositions

液体 $\Delta H_{\text{Cu-Fe}}$ 、 $\Delta H_{\text{Cu-Si}}$ 和 $\Delta H_{\text{Fe-Si}}$ 的混合焓分别为 +13、-19 和 -35 kJ/mol, Cu-Fe 之间的正混合焓使二者存在排斥力, Fe-Si 之间的负混合焓表现出强的化学亲和力^[17]。由元素分布结果可知, 相较于 Cu 基体, Si 与 Fe 元素分布存在明显的趋同性, 表明 Si 元素主要固溶于富 Fe 相中。而 Ni、Ag 元素基本均匀分布于整个平面, 无明显富集现象, 结合 EDS 点扫描结果, Ni 元素主要固溶富 Fe 相中, Ag 元素主要固溶在基体中。

表 3 为各元素在 Cu 基体和富 Fe 相中的 EDS 点扫描结果。可以看出, 室温下 Fe 在 Cu 中固溶度极低, 但凝固时部分 Fe 原子因冷却速率快未能完全析出, 基体中会残留较多 Fe。在 Cu-7Fe 合金中, Cu 基体中 Fe 含量约为 4.4%, 随着 Si、Si-Ni 和 Si-Ag 元素的添加, Cu 基体中的 Fe 含量分别下降至 3.5%、3.2% 和 2.9%。值得注意的是, Ni、Ag 元素的添加也能显著降低 Si 在 Cu 基体中的固溶度, Si 含量由 Cu-7Fe-0.3Si 的 0.6% 分别下降至 0.1% 和 0.2%。多组元相具有比单组元相更低的生成自由能, Si 与 Fe 结合可能生成形核能较低的 Fe-Si 化合物, 其在凝固过程中会优先形核。Ni 在 Cu 中较高的固溶度会引起晶格畸变, 增加 Fe 原子的扩散驱动力, 进一步促进 Fe 相形核。而 Ag 具有与 Cu 相近的电子结构和晶体结构, 会先于 Fe 溶解到 Cu 基体中, 成为 Fe 相的异质形核核心, 促进高温下 γ -Fe 的形核和析出^[18-19], Ag 与 Si 协同作用会显著降低 Fe 在基体中的固溶度。

表 3 各合金元素在 Cu 基体和富 Fe 相中的含量

Tab.3 Content of alloying elements in Cu matrix and Fe-rich phase

合金	区域	$w_B/\%$				
		Cu	Fe	Si	Ni	Ag
Cu-7Fe	Cu 基体	95.6	4.4	—	—	—
	富 Fe 相	11.5	88.5	—	—	—
Cu-7Fe-0.3Si	Cu 基体	95.9	3.5	0.6	—	—
	富 Fe 相	11.2	87.0	1.8	—	—
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni	Cu 基体	96.1	3.2	0.1	0.6	—
	富 Fe 相	11.9	85.4	1.6	1.1	—
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag	Cu 基体	96.4	2.9	0.2	—	0.5
	富 Fe 相	10.1	87.3	2.5	—	0.1

2.3 性能分析

2.3.1 电导率和硬度

图 7 为不同成分铸态合金的电导率和硬度。从图 7a 可以看出, 铸态 Cu-7Fe 合金的电导率为 22.5 MS/m, 随着 Si、Si-Ni 元素的添加, 合金的电导率分别下降至 22.1 MS/m 和 21.1 MS/m, 而 Si-Ag 的添加使电导率略有升高, 达到了 22.7 MS/m。对于 Cu-Fe 合金, 电导率主要受 Cu 基体中溶质原子浓度的影响, 固溶度越高, 杂质散射效果越强, 导电性能越差。Si 的添加虽然能

够减少基体中固溶的 Fe 原子, 但部分 Si 会固溶于 Cu 基体中, 引起晶格畸变, 增强电子散射效应, 电导率略低于 Cu-7Fe 合金。而 Ni 易溶于 Cu 基体中, Ni 固溶对电导率的负面影响远超对促进 Fe 析出的补偿作用, 加之 Si 引起的电子散射作用, 因此 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni 电导率最低。由表 3 可知, Ag 的添加能够明显降低 Fe 原子和 Si 原子的固溶, 尽管部分 Ag 会固溶在基体中, 但 Ag 本身导电性优异, 引起的晶格散射远比 Fe 固溶引起的晶格散射要小^[5], 这可能是 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag 合金电导率提升的原因。从图 7b 可以看出, 随着 Si、Si-Ni 和 Si-Ag 的添加, Cu-7Fe 合金的铸态硬度(HV)从 95.7 分别上升至 101.4、103.9 和 106.3。Cu-7Fe 无其他元素促进细晶或析出, 缺乏有效的强化机制, 对位错阻碍作用弱, 硬度主要依赖 Fe 相的强化效果。Si、Ni、Ag 通过置换 Cu 基体原子, 引起晶格畸变, 位错运动阻力增大, 硬度提升。其中 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag 合金的硬度最高, 得益于 Ag 和 Cu 之间的原子尺寸差异远大于 Fe 和 Cu 之间的原子尺寸差异, Ag 固溶会导致基体周围发生更严重的晶格畸变。

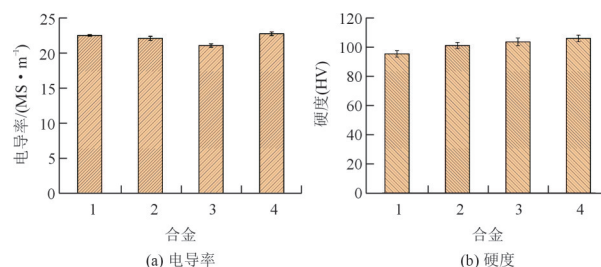


图 7 铸态合金的电导率和硬度

Fig.7 Electrical conductivity and hardness of as-cast alloys

2.3.2 力学性能

表 4 为室温下 4 种合金的抗拉强度和伸长率。与二元 Cu-7Fe 合金相比, 多元合金的抗拉强度显著增加, 但伸长率有所下降。在铸态 Cu-Fe 合金中, 强度的贡献主要来自细小弥散的第二相颗粒对位错的钉扎作用。此外, 固溶强化也不容忽视, 溶质元素固溶会使铜基体发生晶格畸变产生相应的应变场, 从而抑制滑移面上的位错移动^[20]。Si 的加入既形成了固溶体, 又强化了富 Fe 相, 提高了富 Fe 相的抗变形能力^[21], 强度较初始合金有所提升。相较于 Si 的单独加入, Si-Ni 和 Si-Ag 的添加带来了更有效的固溶强化和细晶强化。由表 3 可知, Cu 基体中的 Ni、Ag 含量分别为 0.6% 和 0.5%, 固溶在基体中的 Ni、Ag 原子对晶粒和晶界变形产生了更大的阻碍作用, 位错受到钉扎作用更加明显, 抗拉强度进一步提高。但与 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag 不同的是, Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni 的塑性得到了改善。这可能

是因为 Ag 易在晶界处富集^[22],形成弱结合界面,成为裂纹优先形核点,在变形中引发局部断裂,Ag 与 Si 共同加剧晶界脆性,导致伸长率较低。Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni 合金的伸长率较高,一方面是由于 Ni 的延性补偿作用可抵消一部分 Si 带来的脆化倾向,另一方面是晶粒细化效果最为明显,位错可在更多晶粒间协调滑移,在提高强度的同时部分保留塑性,伸长率仅次于初始合金。

表 4 铸态合金的力学性能
Tab.4 Mechanical properties of as-cast alloys

合金	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Cu-7Fe	252±7	34.8±0.9
Cu-7Fe-0.3Si	268±9	32.0±1.2
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni	297±4	32.8±1.3
Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag	284±10	31.4±0.7

图 8 为不同成分合金铸态的室温拉伸断口形貌。可以看出,不同合金的断口形貌主要表现为韧性断裂特征,在断口上观察到许多韧窝、剪切面以及枝晶分离留下的孔洞。相较于二元 Cu-7Fe 合金,多元合金的小

韧窝数量更多,进一步表明合金化元素的添加提高了第二相的形核,形成更多的第二相颗粒。在拉伸变形过程中,硬质富 Fe 枝晶会对软 Cu 基体的变形产生阻碍作用,当堆积在枝晶相附近的位错应变场达到峰值后,可能导致枝晶脱落,从而形成较大尺寸的孔洞。由于合金在塑性变形时开动的滑移系和变形方向不一致,在孔洞周围还会存在一些剪切面。富 Fe 相与 Cu 基体的界面结合力越强,裂纹在扩展到富 Fe 枝晶附近时受到的阻碍作用越强,强度和塑性越好。反之,富 Fe 枝晶就更容易脱落,裂纹就会沿着相界扩展,导致强度和塑性变差。Cu-7Fe 和 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni 合金的孔洞中残留较多断裂的富 Fe 枝晶,一些 Fe 枝晶在拉伸过程中没有直接脱落,而是发生断裂,部分富 Fe 枝晶留在韧窝底部。而在 Cu-7Fe-0.3Si 和 Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag 的断口中,由于富 Fe 相与 Cu 基体的结合力较弱,残留的断裂富 Fe 枝晶较少,枝晶在拉伸过程中大量脱离,易扩展形成尺寸更大的孔洞。进一步说明 Si 和 Si-Ag 的加入会降低 Cu/Fe 界面结合力,加剧晶界脆性, Ni 的加入能够改善 Si 对 Cu/Fe 界面结合力产生的不利影响。

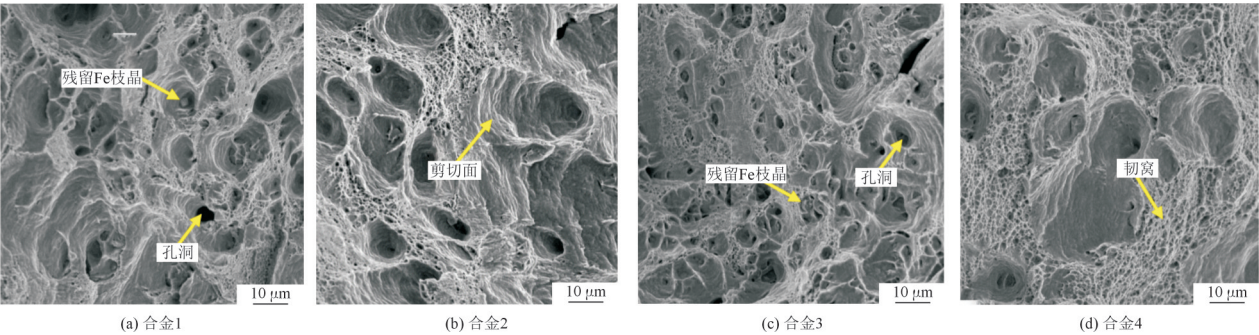


图 8 铸态合金的断口形貌
Fig.8 Fracture morphologies of as-cast alloys

3 结 论

- (1)合金化元素的添加显著影响 Cu-Fe 合金中的富 Fe 相形貌,添加 Si、Si-Ni 和 Si-Ag 元素后,Cu-7Fe 合金中的富 Fe 相分布得到优化,并且富 Fe 相形貌从花瓣状转变为发达的树枝状。同时 Cu 基体晶粒得到细化,其中 Si-Ni 的添加对晶粒细化效果最为显著,晶粒尺寸由 Cu-7Fe 合金的 79.4 μm 下降至 48.7 μm。
- (2)在铸态合金中,Si、Ni 元素主要固溶在富 Fe 相中,而 Ag 元素主要固溶在 Cu 基体中。合金化元素的添加能够促进 Fe 相的形核和析出,降低 Fe 在 Cu 基体中的固溶度。随着 Si、Si-Ni 和 Si-Ag 的添加,Cu 基体中的 Fe 含量由 Cu-7Fe 合金的 4.4% 分别下降至 3.5%、3.2% 和 2.9%。
- (3)Si-Ag 元素的添加提升了 Cu-7Fe 合金的综合

性能,相较于铸态 Cu-7Fe 合金,Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ag 合金的电导率略微提升,硬度(HV)由 95.7 提升至 106.3,抗拉强度由 252 MPa 提升至 284 MPa,但伸长率由 34.8% 下降至 31.4%。Si-Ni 元素的添加对抗拉强度的提升较为突出,Cu-7Fe-0.3Si-0.3Ni 合金的抗拉强度和伸长率分别为 297 MPa 和 32.8%。

参 考 文 献

[1] TIAN Y Z, YANG Y, PENG S Y, et al. Managing mechanical and electrical properties of nanostructured Cu-Fe composite by aging treatment[J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112 600.
[2] GUO J M, SHAO Q Q, RENK O, et al. Combined Fe and O effects on microstructural evolution and strengthening in Cu-Fe nanocrystalline alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A772: 138 800.
[3] DING Y J, DENG Z X, XIAO Z, et al. Effect of Nb content on mechanical reinforcement of the Cu-10Fe composites[J]. Journal of

- Alloys and Compounds, 2023, 966: 171-540.
- [4] LU X X, CAO N, HE L J, et al. Effects of Si addition on mechanical, electrical and magnetic property of Cu-10Fe alloy[J]. Materials Characterization, 2023, 196: 112-612.
- [5] SHI J Q, ZHAO L, CHEN L G, et al. Effect of accelerated Fe-rich precipitation induced by Ag addition on the microstructure and comprehensive properties of Cu-10 Fe alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2023, A54(2): 757-767.
- [6] MOON H J, YEO T M, LEE S H, et al. Effect of Zr addition on metasTab. liquid-liquid phase separation of Cu-Fe alloys[J]. Scripta Materialia, 2021, 205: 114-218.
- [7] LUO X, YUAN D W, WANG H, et al. Multi-stage thermomechanical treatment Cu-6.5Fe-xMg alloy: Excellent physical and mechanical properties[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 556: 169-407.
- [8] YU X Y, SONG Y F, WANG C C, et al. Effect of Mg content on the microstructure and properties of high strength, high conductivity Cu-Fe-Cr-Si-Mg alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2023, A883: 145-510.
- [9] LUO X, WANG L H, YUAN D W, et al. Influences of Sn on Fe phase segregation and properties of Cu-5Fe alloy[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(15): 2-191-2-204.
- [10] YUAN D W, XIAO X P, CHEN J S, et al. Influence of Ag addition on the microstructure and properties of Cu-6.5Fe-0.2Cr alloy prepared by upward continuous casting [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 887: 161-458.
- [11] PANG Y J, CHAO G H, LUAN T Y, et al. Microstructure and properties of high strength, high conductivity and magnetic Cu-10Fe-0.4Si alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A826: 142-012.
- [12] YU X Y, XIANG Y L, LI Y K, et al. Synergistic strengthening mechanism of Mg and Si on Cu-Fe alloys with high strength and high conductivity [J]. Materials Science and Engineering, 2025, A920: 147-534.
- [13] MEHTA U, YADAV S K, KOIRALA I, et al. Study of surface tension and viscosity of Cu-Fe-Si ternary alloy using a thermodynamic approach[J]. Heliyon, 2020, 6(8):218-226.
- [14] 朱鸣芳, 邢丽科, 方辉, 等. 合金凝固枝晶粗化的研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54(5): 789-800.
- [15] SHI R P, WANG C P, WHEELER D, et al. Formation mechanisms of self-organized core/shell and core/shell/corona microstructures in liquid droplets of immiscible alloys [J]. Acta Materialia, 2013, 61(4): 1-229-1-243.
- [16] WANG M, ZHANG R, XIAO Z, et al. Microstructure and properties of Cu-10 Fe alloy produced by double melt mixed casting and multi-stage thermomechanical treatment [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 820: 153-323.
- [17] LIU S C, YUE S P, JIE J C, et al. Unveiling the mechanisms for Si addition on solidification microstructure and properties of Cu-Fe alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 938: 168-550.
- [18] ZHANG P, YUAN X B, LI Y D, et al. Influence of minor Ag addition on the microstructure and properties of powder metallurgy Cu-10Fe alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 904: 163-983.
- [19] XIE Z X, GAO H Y, LU Q, et al. Effect of Ag addition on the as-cast microstructure of Cu-8Fe in situ composites [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 508(2): 320-323.
- [20] 岳世鹏, 接金川, 曲建平, 等. Ni, Si 元素对 Cu-Fe 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1-485-1-493.
- [21] 张宇博, 陈佳乐, 接金川, 等. Si 对 Cu-10Fe 合金凝固组织及软磁性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(6): 721-727.
- [22] YUAN D W, CHEN J S, XIAO X P, et al. Microstructure and properties of Cu-Fe-Cr-Ag alloy prepared by directional solidification and upward continuous casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2021, A52: 2-489-2-500.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

