

微合金化对 Cu-Ti 系合金铸态组织与性能的影响

王 虎¹ 娄花芬¹ 杨 阔² 陈忠平¹ 张富强¹ 程 翔¹

(1. 中铝科学技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要 设计了4种 Cu-Ti 系合金,研究了微合金化元素 La、Mg、B 对 Cu-Ti 系合金铸态组织与性能的影响。结果表明,4种合金的铸态组织均由3种不同衬度的相构成,即黑色的初生 Cu₄Ti 相、灰色的高 Ti 含量的 α -Cu 基体、白色的低 Ti 含量的 α -Cu 相。La 元素能够细化枝晶,提高合金硬度,同时可抑制铸态合金中白色 α -Cu 组织的形成,降低合金的电导率;添加 Mg 和 B 可提高合金的硬度,但会降低合金的电导率。

关键词 微合金化元素; Cu-Ti 系合金; 铸态组织; 初生相

中图分类号 TG135; TG146.1⁺¹

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240190

Effects of Microalloying on As-cast Structure and Properties of Cu-Ti Series Alloys

WANG Hu¹, LOU Huafen¹, YANG Kuo², CHEN Zhongping¹, ZHANG Fuqiang¹, CHENG Xiang¹

(1. Chinalco Research Institute of Science and Technology Co., Ltd., Beijing 102209; 2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: Four types of Cu-Ti series alloys were designed, and effects of microalloying elements La, Mg and B on as-cast microstructure and properties of Cu-Ti series alloys were investigated. The results indicate that the as-cast microstructure of alloys is composed of phases with different linings, which are black primary phase of Cu₄Ti, gray α -Cu phase with a high content of Ti, and white α -Cu phase with a small amount of Ti. The addition of La element can refine the dendrite spacing and suppress the formation of white α -Cu structure, which improves the hardness and reduces the conductivity of alloy. Mg and B addition can enhance the hardness of the alloy, while the conductivity is decreased.

Key Words: Microalloying Elements, Cu-Ti Alloys, As-cast Structure, Primary Phase

Cu-Ti 系合金由于其具有高强度、良好的弹性、抗疲劳性能、抗应力松弛性能和最小弯曲半径而被广泛应用在弹性元件中,如弹簧、开关、接插件、接线端子和连接器中^[1-3],其强度随 Ti 含量增加而显著增加,可和铍青铜合金相媲美,且抗应力松弛性能远高于铍青铜合金,是最有望替代铍青铜合金的材料。然而,Ti 的添加显著降低了合金的电导率。因此,在保证合金具有超高强度的同时,大幅提升合金的电导率,以期替代铍青铜合金,是目前该系合金的研究热点^[4-5]。Cu-Ti 系合金研究起步较晚,一些微合金化元素对 Cu-Ti 系合金调控的影响和机理尚不够系统。

时效处理对 Cu-Ti 系合金强度的贡献主要有两方面,一是调幅分解组织,但此时电导率较低;另一方面,时效前期析出的具有共格亚稳态 β' -Cu₄Ti 相可提高合金强度,而时效后期析出的非共格不连续的 β -Cu₄Ti 相会降低合金的力学性能,但有利于电导率的提高^[1-2]。

此外,微合金元素的加入会对合金的时效析出过程产生影响,如加速过饱和固溶体的分解、促进第二相粒子的析出、抑制晶粒和第二相的长大等,这一过程又会净化基体,降低基体内部溶质原子的含量,提高合金的电导率^[4-5]。因此,许多研究者尝试添加不同合金元素,以期得到强度和电导率匹配的 Cu-Ti 合金。

关于 Fe 元素对 Cu-Ti 系合金组织与性能的影响,ROUXEL B 等^[2]发现 Fe 抑制了早期时效过程中调幅组织的形成,并且微量的 Fe 能够同时提升合金的成形性能和强度。HUANG L 等^[3]发现在 Cu-8Ti-0.4Cr-0.4Mg-0.3Fe 合金中,Fe、Cr 和 Ti 元素形成 (Fe,Cr)₂Ti 相,该相占据了不连续相的形核位置,抑制了时效后期不连续相的析出,从而提高了合金的抗应力松弛性能。此外,Fe 的添加还提高了合金的高温力学性能和抗氧化性能^[4]。

Al 元素对 Cu-Ti 合金组织和性能的影响也被许多研究者重视。WANG X H 等^[5]发现在 Cu-3Ti-1Al 合

收稿日期:2024-05-08;修订日期:2024-06-11

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB3501003);中铝重点研发计划资助项目(ZT2417)

第一作者简介:王虎,男,1988 年出生,高级工程师,E-mail: powin521@sina.com

通信作者:娄花芬,女,1970 年出生,正高级工程师,E-mail: louhuafen@cist.ltd

引用格式:王虎,娄花芬,杨阔,等.微合金化对 Cu-Ti 系合金铸态组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2025,45(6):925-931.

WANG H, LOU H F, YANG K, et al. Effects of microalloying on as-cast structure and properties of Cu-Ti series alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(6): 925-931.

金中,Al与Ti元素形成 Ti_3Al 相,进一步降低了Ti在Cu基体中的含量,提高了合金的电导率。KONNO T J等^[6]也发现在Cu-3Ti-4Al合金中,Al抑制了时效初期调幅组织的形成,并在时效阶段形成了 $AlCu_2Ti$ 相,提高了合金的电导率,该相在靠近面心铜基体的 $\{110\}$ 惯习面析出,但是取向关系仍未确定。此外,VAIDYANATHAN T K等^[7]发现Al还能抑制Cu-Ti合金在时效后期不连续相的析出,延缓了时效后期合金硬度下降的趋势。值得注意的是,Al的加入虽然能够提高合金的电导率,但降低了合金的强度。因此,在设计Cu-Ti系合金成分时,应严格控制Al含量。

其他元素的研究方面,LIU J等^[8-9]发现添加Ni后,Ni与Ti形成 Ni_3Ti 相和NiTi相,降低了基体内部Ti元素的含量,因此提高了合金的电导率,并在时效过程中与 Cu_4Ti 相共同作用贡献合金优异的力学性能。WANG X H等^[10]也发现Sn元素的添加形成了 $CuSn_3Ti_5$ 相,降低了Ti在Cu基体中的含量,因此提升了合金的电导率。WANG F L等^[11]发现C加入后不仅降低了Ti在Cu基体中的含量,而且形成了均匀弥散分布的纳米碳化物,同时提高了合金的强度和电导率。JUNG T K等^[12]发现Ag可在短时间时效条件下不损失电导率而提高强度,但在长时间时效条件下会降低合金的力学性能。CAO X M等^[13]发现Zr抑制了Ti元素在晶界处的扩散,从而抑制了时效后期不连续相的转变,并最终使得Cu-3.5Ti合金的软化温度由480℃提高到540℃。HUANG L等^[14]报道了Cr添加到Cu-Ti合金中在晶界处形成了 Cr_2Ti 相和富Cr相,占据了不连续相的形核位点,抑制了时效后期不连续相的析出。LIU W等^[15]发现V的添加能够促进Laves C_{14} 相的析出,使得合金在铸态和固溶态的晶粒得到细化,同时该相也占据了不连续相的形核位置,抑制了不连续相的析出,因此提高了合金的峰值硬度。近些年来,Co元素对Cu-Ti合金组织和性能的影响也被广泛研究,NAGARJUNA S等^[16]发现Co与Ti形成 Ti_2Co 和TiCo相,与 Cu_4Ti 相共同作用强化基体,且降低了Ti在基体中的含量,净化基体,提高了合金的电导率,因此,Co的加入提升了合金的综合性能。此外,MARKANDEYAR等^[17]还发现Co的加入导致在过时效阶段没有观察到 $\beta-Cu_3Ti$ 相的存在,表明Co能够抑制不连续相的析出。

综上,微合金化元素能在一定程度影响合金的性能,如何选择合适的合金化元素,结合合适的热处理工艺制度以期同时提升合金的强度和电导率是目前Cu-Ti系合金的主要研究方向,但目前有关Mg、B、La等微合金化元素在铸态组织中的存在形式和作用机理尚不明晰。因此,本研究基于课题组前期开发的具有较高强度和电导率的Cu-3Ti-0.1Mg-0.05B-0.05La合金^[18],开展微合

金化元素对合金铸态组织与性能的影响,研究Mg、B、La等微合金化元素在铸态组织中的存在形式和作用机理,旨在为开发新型高强导电Cu-Ti系合金提供参考。

1 试验方法及材料

1.1 Cu-Ti系合金成分设计

Mg能降低高温熔液黏度,提高合金熔体的流动性,大幅降低铸锭缩孔及缩松程度,提升浇注后铸锭质量。此外,Mg原子还能够填充空位,使得析出相在高温下稳定存在,提高合金的强度和抗高温软化性能。B可使得合金在高温熔炼过程中的夹杂物发生聚集,提高造渣技术,消除夹杂物,提高浇注后的铸锭质量。此外,有研究指出,稀土元素La能够偏聚在晶界处,达到细化晶粒的目的^[18-19]。基于此,为了获得具有高质量的新型Cu-Ti系合金铸锭,设计了4种Cu-Ti合金,具体成分见表1。合金原材料采用质量分数为99.99%的电解Cu块、Cu-20Ti、Cu-10La、Cu-5B中间合金和质量分数为99.9%的纯镁等。电解铜块和中间合金的尺寸应适中,并考虑烧损。

表1 Cu-Ti系合金的成分设计

Tab. 1 Composition design of Cu-Ti alloys %					
合金编号	w_B				
	Ti	La	Mg	B	Cu
1	3	—	—	—	余量
2	3	0.05	—	—	余量
3	3	0.05	0.1	—	余量
4	3	0.05	0.1	0.05	余量

1.2 熔炼铸造

Cu-Ti系合金熔炼在真空中频感应炉(ZG-15)中进行。熔炼前要对模具和配料进行200℃×30 min的烘烤。在熔炼过程中,升温至1 280℃后保温5 min,关闭加热系统,待温度降至1 200℃时进行浇注。最终得到尺寸为150 mm×150 mm×30 mm的铸锭,见图1。

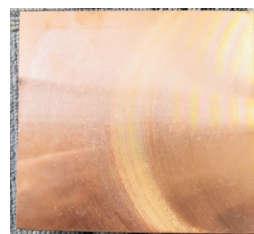


图1 合金铸锭宏观照片

Fig.1 Macro image of alloy ingots

1.3 试样组织观察及性能测试

金相(OM)观察在蔡司Axio Scope.A1m金相显微镜下进行,试样经过取样标记后,在自动压力热镶机上进行镶样,经过400~800号水磨砂纸粗磨、800~3 000

号的金相砂纸细磨后,在抛光机上分别采用颗粒度为 3、1 和 0.12 μm 的抛光膏进行抛光,直至在金相显微镜下观察不到划痕。使用成分为 5 g 的 $\text{FeCl}_3 + 2 \text{ mL}$ 的浓盐酸 + 96 mL 的无水乙醇金相腐蚀液腐蚀试样表面。采用 Empyrean 多功能 X 射线衍射仪进行 X 射线衍射 (XRD) 分析,采用 $\text{Cu K}\alpha$ 射线,加速电压为 40 kV,电流为 40 mA,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,扫描角度为 $20^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扫描速度为 $1 (^{\circ})/\text{min}$ 。采用 JSM-7800F 场发射扫描电镜进行形貌(二次电子)和成分衬度(背散射)分析,采用显微镜自带的能谱分析仪(EDS)对合金进行成分分析。采用 JEM-F200 透射电镜对试样的微观组织进行观察。采用 EAM-3A-500 型全自动显微维氏硬度计进行硬度测试,加载载荷为 1 N,加载时间为 10 s,同一试样取 10 个有效测量值,结果取平均值。采用 SIGMATEST2.070 涡流电导率仪测试合金的电导率,测试标准参照 GB/T 32791-2016,电导率测试频率为 960 kHz,同一试样取 10 个有效测量值,结果取平均值。

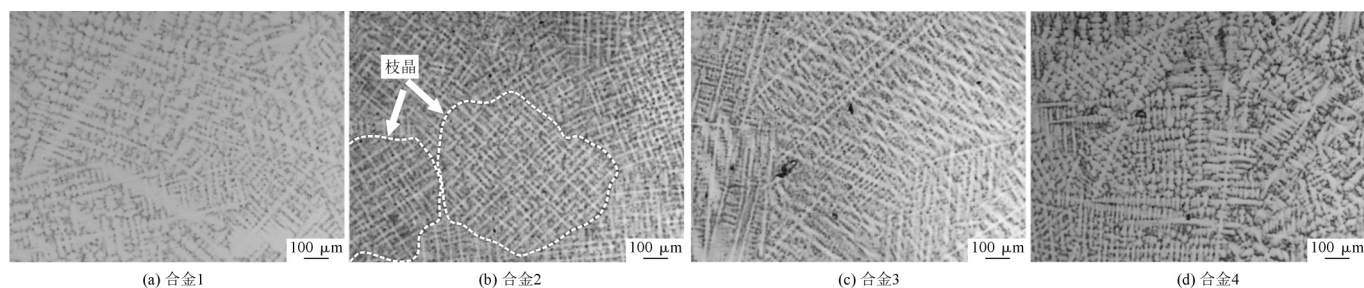


图2 Cu-Ti系合金的铸态金相组织

Fig.2 Metallographic structure of as-cast Cu-Ti series alloys

2.2 XRD 分析

图3为4种合金的XRD图谱。由图3a可知,4种铸态合金除了Cu的衍射峰以外,还出现了 Cu_4Ti 相的衍射峰,这表明4种合金初生相中均含有 Cu_4Ti 相。由图3b可以发现,添加合金元素后,主峰发生了左移,添加的合金元素越多,左移的程度越大。表明合金元素固溶到基体内导致了晶格畸变的发生,而固溶程度越大,晶格畸变越严重。

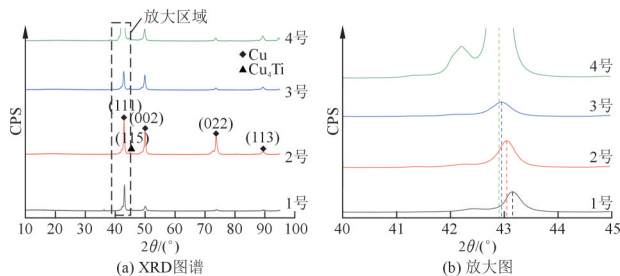


图3 4种铸态合金XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of as-cast alloys

2.3 SEM 和 EDS 分析

图4为4种合金铸态低倍SEM组织。可以看到,4

2 试验结果与讨论

2.1 金相组织分析

图2为Cu-Ti系合金的铸态金相组织。可以看出,4种铸态合金均呈典型的枝晶状组织,这是由于在浇注凝固过程中,传热速度较快,组织呈枝晶状方式生长,最后形成由白色的枝晶干(基体)和黑色的枝晶间区域(初生相)所组成的枝晶组织。在合金1中,枝晶轴较宽而且枝晶间距较小,添加0.05%的La后,枝晶轴相比于合金1变细,即晶粒细化,初生相分布更加弥散,因此,添加La可细化铸态枝晶,这与文献[19]的研究结论一致。此外,一次枝晶轴和二次枝晶轴沿不同方向生长,各区域枝晶轴生长到相互碰撞后形成较大的枝晶胞(见图2b)。合金3和合金4的枝晶相对于合金1也变细,初生相的体积分数也高于合金1。同时,枝晶越细,初生相分布更加弥散。

种合金均由3种不同衬度的相构成,即灰色基体、黑色区域相和白色的点状组织。其中仅添加La元素的合金2枝晶更细小,可能是由于La元素分布在晶界处,对晶界起到钉扎作用,这与上述金相组织相对应,同时白色点状组织减少。合金3和合金4的黑色区域相比合金1增多,同时枝晶也变得细小。

为观察合金元素的分布和初生相的形状及其组成,对4种合金组织和成分进行了分析。合金1的SEM形貌及EDS分析结果分别见图5和图6。由图5可以看出,合金1中Ti元素主要分布在白色组织间的黑色区域相中,Cu元素富集在白色组织处。结合图6可以确定,灰色组织C为含Ti的 $\alpha\text{-Cu}$ 基体,黑色区域相A为富Ti相,其Cu和Ti摩尔比接近4:1,与XRD表征结果相吻合,确定为初生 Cu_4Ti 相,而白色的点状组织B为贫Ti相,其Ti含量低于基体中Ti含量。结合Cu-Ti二元相图可知,在Ti含量为3%时,其整个凝固过程为液相先形成 $\alpha\text{-Cu}$,随着温度降低, $\alpha\text{-Cu}$ 脱溶析出 Cu_4Ti 相,所以在室温下其主要由 $\alpha\text{-Cu}$ 和 Cu_4Ti 相组成,而扫描电镜下观察到的白色贫Ti组织可能是由于在凝固过程

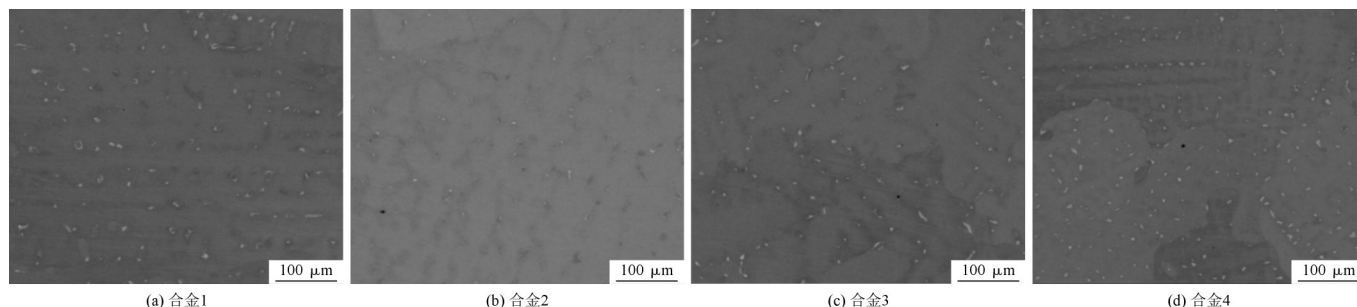


图 4 4 种合金铸态低倍 SEM 组织
Fig.4 Low magnification SEM images of as-cast alloys

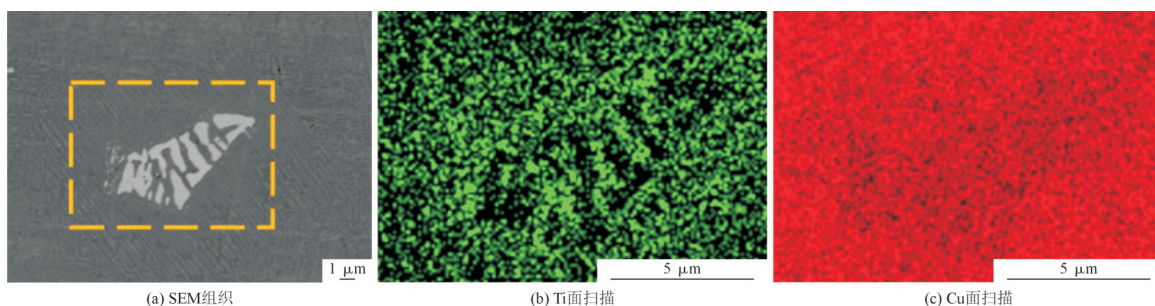


图 5 合金 1 铸态的 SEM 形貌及元素面扫描
Fig.5 As-cast SEM morphologies and element mapping of alloy 1

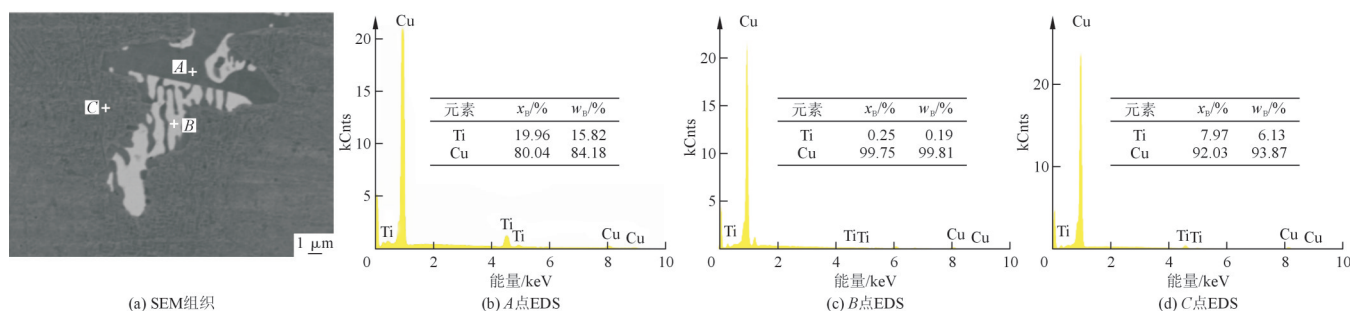


图 6 合金 1 铸态高倍 SEM 组织及 EDS 分析

Fig.6 High magnification as-cast SEM images and EDS analysis of alloy 1

中冷却速率较慢,同时晶界处最后凝固,并且晶界处 Ti 含量较高,在凝固过程基本结束后,晶界处偏聚形成了 Cu_4Ti 和 $\alpha\text{-Cu}$ 。由于形成了 Cu_4Ti 相,因此,最后偏聚形成的 $\alpha\text{-Cu}$ 相对于凝固过程形成的 $\alpha\text{-Cu}$ 中 Ti 含量较低,从而在扫描电镜下呈现出衬度为白色的点状组织。

图 7 和 8 分别为合金 2 的 SEM 形貌及 EDS 分析。可

以看出,La 元素主要富集在白色组织处,即晶界处,同时根据图 4 可知 La 元素的添加能够抑制铸态 Ti 含量较低的白色 $\alpha\text{-Cu}$ 组织的形成。这是由于 La 的添加使得合金晶粒细化,大量晶粒同时形核,形核率增加,当液相开始大量形核时,残留的 Ti 含量降低,因此使得最后偏聚形成的 Cu_4Ti 相和 Ti 含量较低的 $\alpha\text{-Cu}$ 共晶组织减少。

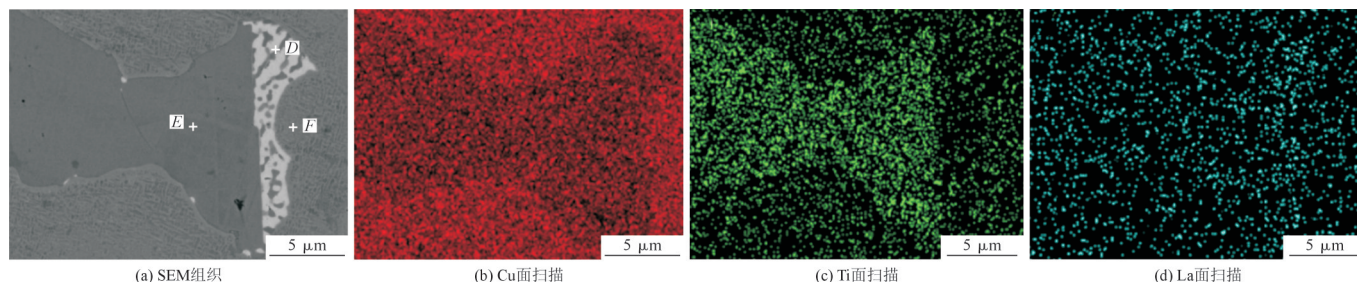


图 7 合金 2 铸态高倍 SEM 组织及元素面扫描

Fig.7 High magnification as-cast SEM morphology and element mapping of alloy 2

图 9 和 10 分别为合金 3 的 SEM 形貌及 EDS 分析。由图 9 可以看出,Mg 元素主要分布在含 Ti 量较低的白

色 $\alpha\text{-Cu}$ 相处。图 11 和 12 分别为合金 4 的 SEM 形貌及 EDS 分析。可以看出,合金 4 的 3 种不同衬度的组织均

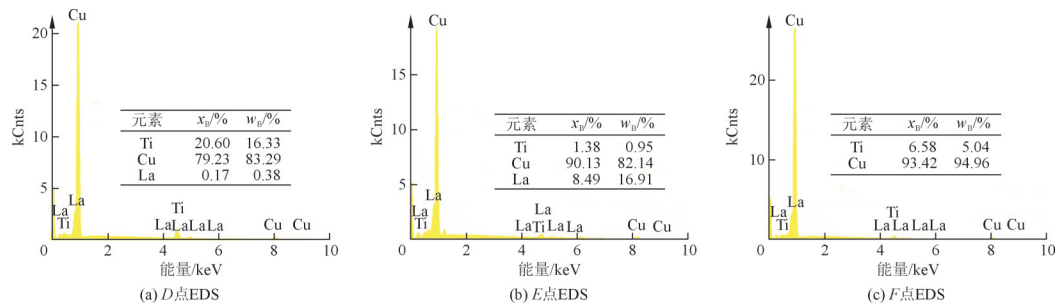


图8 合金2 EDS分析
Fig.8 EDS analysis of alloy 2

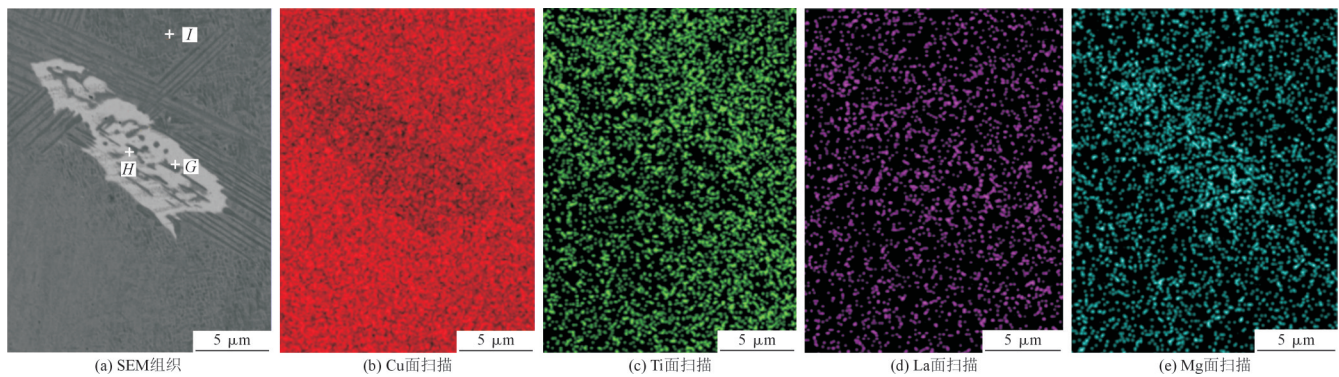


图9 合金3铸态高倍SEM组织及元素面扫描

Fig.9 High magnification as-cast SEM morphology and element mapping of alloy 3

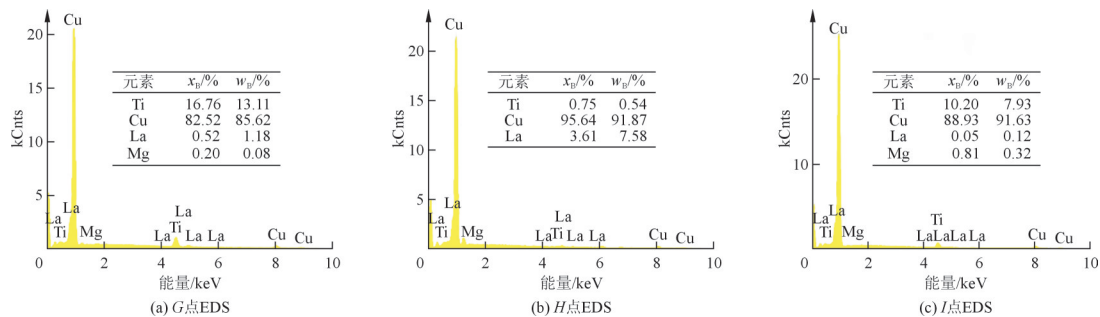


图10 合金3 EDS分析
Fig.10 EDS analysis of alloy 3

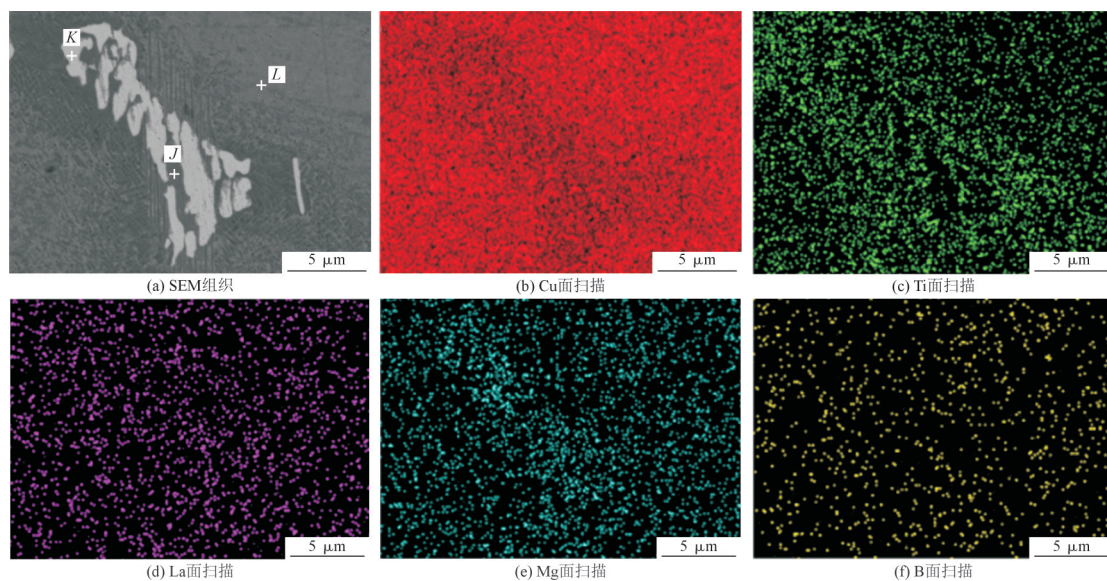


图11 合金4铸态高倍SEM组织及元素面扫描

Fig.11 High magnification as-cast SEM morphology and element mapping of alloy 4

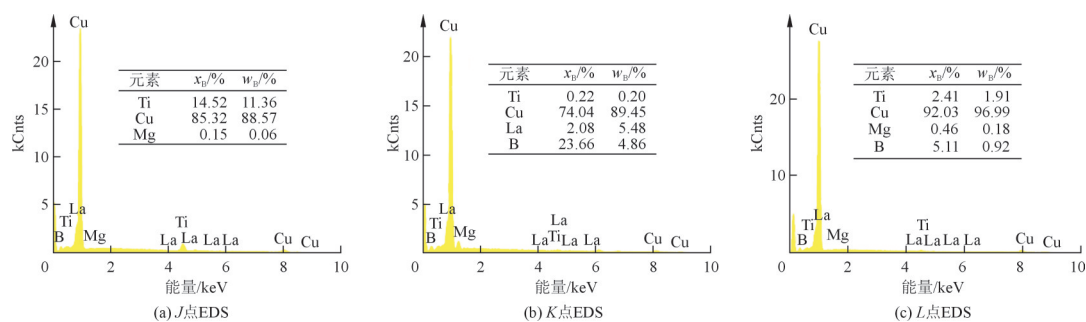


图 12 合金 4 EDS 分析

Fig.12 EDS analysis of as-cast alloy 4

与合金 1 相吻合。此外, Mg 和 B 元素的加入降低了合金的凝固点, 因此残留的液相较多, 同时由于多组元的合金 3 和合金 4 相对于合金 1 枝晶变细, 形核率较高, 因此最后凝固在晶界处偏聚形成的 Cu_4Ti 相和含 Ti 量较低的白色 $\alpha\text{-Cu}$ 组织增多, 和 SEM 组织相对应。

2.4 TEM 分析

综上, 初生 Cu_4Ti 相和贫 Ti 的 $\alpha\text{-Cu}$ 白色组织尺寸

较大, 均在微米级以上。为了进一步探究其铸态组织中更低尺度的粒子分布形态, 对合金 1 进行了 TEM 观察, 见图 13。由图 13a 可见, 铸态合金 1 基体内部含有胞状组织, 在组织内部同样观察到了球形粒子, 表 2 为能谱分析结果, 发现其也为贫 Ti 的 $\alpha\text{-Cu}$ 粒子, 该种组织的形成与 SEM 观察到的微米尺度组织类似。

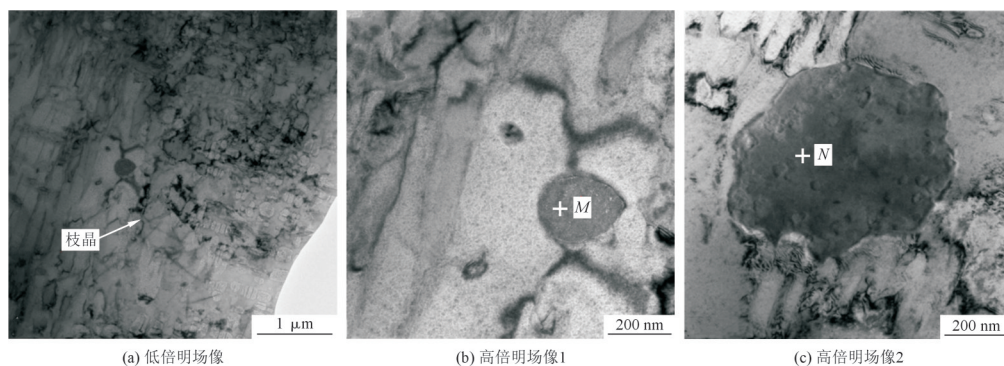


图 13 合金 1 铸态 TEM 组织

Fig.13 As-cast TEM microstructure of alloy 1

表 2 M、N 粒子能谱分析
Tab.2 EDS results of particle M and N

位置	$x_B/\%$			
	Ti	Cu	La	B
M	0.65	95.74	3.61	0
N	0.42	74.24	2.06	23.86

2.5 铸态合金的性能

图 14 为 4 种铸态合金的硬度和电导率。可以看出, 添加 0.05% La 的合金 2 硬度高于合金 1, 而电导率低于合金 1, 这是由于添加 La 能够细化枝晶, 初生相分布更加弥散, 弥散强化效果更显著, 从而导致合金的硬度较高。此外, 添加 La 能够减少最后凝固贫 Ti 的 $\alpha\text{-Cu}$ 白色组织的形成, 其中固溶的 Ti 含量很低, 对电子散射作用小, 有利于增加合金的电导率, 相反, 其组织的减少降低了该合金铸态的电导率。同时, 初生相弥散分布增加了对电子的散射能力, 综合两方面原

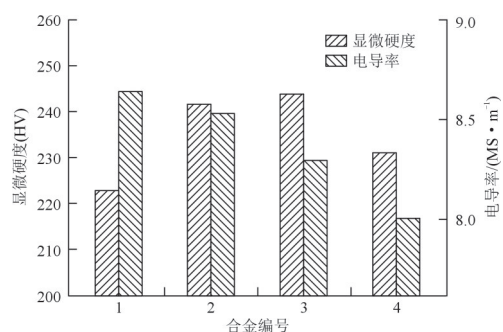


图 14 4 种合金硬度和电导率变化规律

Fig.14 Variation law of hardness and conductivity of as-cast alloys
因使得合金 2 电导率稍有下降, 和观察到的组织相吻合。多组元微合金化调控后的合金 3 和合金 4 硬度也均高于合金 1, 而电导率均低于合金 1, 这是因为添加 Mg 和 B 后, 一部分 Mg 原子和 B 原子固溶在基体中导致固溶强化效果增强, 同时两者合金晶粒相对于合金 1 更细小, 初生相体积分数比合金 1 高, 弥散强化效果也增强, 因此综合两方面原因使得硬度值提高。此

外,添加的 Mg 和 B 一部分会固溶在基体内,导致晶格畸变程度增加,再者,初生相体积分数越多,对电子散射程度越大,因此综合两方面原因使得合金的电导率降低。

3 结 论

(1) Cu-Ti 系合金的铸态组织呈现出了典型的枝晶状组织,4 种合金也均由 3 种不同衬度的相构成,即由灰色基体、黑色区域相和白色的点状组织构成。其中,黑色区域是初生 Cu_4Ti 相、灰色为含有较高 Ti 含量的 $\alpha\text{-Cu}$ 基体、白色为含有较少 Ti 含量的 $\alpha\text{-Cu}$ 相。

(2) 添加 La 能够细化枝晶,初生 Cu_4Ti 相分布更加弥散,产生弥散强化效果,提高了铸态合金的硬度。同时,添加 La 能够减少最后凝固贫 Ti 的 $\alpha\text{-Cu}$ 白色组织的形成,其白色 $\alpha\text{-Cu}$ 组织中固溶的 Ti 含量很低,对电子散射作用小,有利于增加合金的电导率。

(3) Mg 和 B 的加入降低了合金的凝固点,使得在晶界处偏聚较多的 Cu_4Ti 相以及 Ti 含量较低的白色 $\alpha\text{-Cu}$ 组织增多,其固溶强化效果和初生相带来的弥散强化效果提高了铸态合金的硬度。同时,部分 Mg 和 B 元素会固溶在基体内,导致晶格畸变程度增加,伴随着初生相体积分数增加,对电子散射程度越大,降低了铸态合金的电导率。

参 考 文 献

- [1] LI S, LI Z, XIAO Z, et al. Microstructure and property of Cu-2.7Ti-0.15Mg-0.1Ce-0.1Zr alloy treated with a combined aging process [J]. Materials Science and Engineering, 2016, A650: 345-353.
- [2] ROUXEL B, CAYRON C, BORNAND J, et al. Micro-addition of Fe in highly alloyed Cu-Ti alloys to improve both formability and strength [J]. Materials & Design, 2022, 213: 110 340.
- [3] HUANG L, CUI Z S, MENG X P, et al. Effect of trace alloying elements on the stress relaxation properties of high strength Cu-Ti alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A846: 143 281.
- [4] HUANG L, CUI Z S, MENG X P, et al. Effects of microelements on the microstructure evolution and properties of ultrahigh strength Cu-Ti alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A823: 141 581.
- [5] WANG X H, SUN X C, YANG X H, et al. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Cu-3Ti-1Al alloy [J]. Materials Science Forum, 2013, 749: 282-286.
- [6] KONNO T J, NISHIO R, SEMBOSHI S, et al. Aging behavior of Cu-Ti-Al alloy observed by transmission electron microscopy [J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(11): 3 761-3 768.
- [7] VAIDYANATHAN T K, MUKHERJEE K. Continuous precipitation in Cu-rich Cu-Ti binary and Cu-Ti-Al ternary alloys [J]. Jour-

nal of Materials Science, 1975, 10(10): 1 697-1 710.

- [8] LIU J, WANG X H, CHEN J, et al. The effect of cold rolling on age hardening of Cu-3Ti-3Ni-0.5Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797: 370-379.
- [9] LIU J, WANG X H, RAN Q N, et al. Microstructure and properties of Cu-3Ti-1Ni alloy with aging process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3 183-3 188.
- [10] WANG X H, CHEN C Y, GUO T T, et al. Microstructure and properties of ternary Cu-Ti-Sn alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(7): 2 738-2 743.
- [11] WANG F L, LI Y P, WAKOH K, et al. Cu-Ti-C alloy with high strength and high electrical conductivity prepared by two-step ball-milling processes [J]. Materials & Design, 2014, 61: 70-74.
- [12] JUNG T K, JOH D W, LEE H S, et al. Effect of Ag content on electrical conductivity and tensile properties of Cu-Ti-Ag alloys [J]. MRS Proceedings, 2011, 1 297: 143-148.
- [13] 曹兴民, 李华清, 向朝建, 等. Zr 的加入对 Cu-Ti 合金耐热性能影响的研究 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(14): 16-18.
- [14] HUANG L, PENG L J, MI X J, et al. Relationship between microstructure and properties of high-strength Cu-Ti-Cr alloys during aging [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 942: 168 865.
- [15] LIU W, LI J, CHEN X, et al. Effect of vanadium on the microstructure and kinetics of discontinuous precipitation in Cu-3.2Ti-0.2Fe alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 121-136.
- [16] NAGARJUNA S, SARMA D S. Effect of cobalt additions on the age hardening of Cu-4.5Ti alloy [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(10): 1 929-1 940.
- [17] MARKANDEYA R, NAGARJUNA S, SARMA D S. Precipitation hardening of Cu-Ti-Zr alloys [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(7): 849-858.
- [18] 王虎, 莫永达, 娄花芬. 高强导电 Cu-3Ti-0.1Mg-0.05B-0.05La 合金的微观组织与性能 [J]. 工程科学学报, 2023, 45(2): 295-300.
- [19] PAN Z Y, CHEN J B, LI J F. Microstructure and properties of rare earth-containing Cu-Cr-Zr alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(4): 1 206-1 214.

(编辑:刘晨辉)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

2024 年起,《特种铸造及有色合金》杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件,并可体验 AI 导读功能,网址: www.special-cast.com, 欢迎访问!