

纳米结构 Cu-Ti 合金的力学与电学性能优化

贾 萌 李启伟 田艳中

(东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110167)

摘 要 采用冷轧与峰时效工艺可以提升 Cu-Ti 系合金的强度,但对电导率的提升有限,无法满足高端电子元件需求。针对该问题,开发了过时效结合冷轧变形工艺,对各处理阶段的微观组织进行了表征,测试了合金的拉伸性能和导电性能。发现冷轧变形可以细化过时效组织,制备出含有完全纳米条带结构的板材,具有优异的强度和电导率,其电导率为 11.77 MS/m,远超大部分 Cu-Ti 系合金。此外,分析了合金力学性能与导电性能的协同提升机理。

关键词 Cu-Ti 合金;强度;电导率;纳米结构;过时效

中图分类号 TG146.1⁺1;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250171

Mechanical and Electrical Property Optimization of Nanostructured Cu-Ti Alloy

JIA Meng, LI Qiwei, TIAN Yanzhong

(School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110167)

Abstract: Cold rolling and peak aging process can enhance strength of Cu-Ti series alloy, which have limited effect on electrical conductivity, failing to meet the demands of advanced electronic components. On this basis, a novel process of overaging and cold rolling was developed to characterize the microstructure at each treatment stage and test the tensile properties and electrical conductivity. The results indicate that cold rolling deformation can refine the overaging microstructure to fabricate complete nano-strip structure sheet with excellent tensile strength and electrical conductivity. The electrical conductivity reaches 11.77 MS/m, which is far higher than that of most Cu-Ti alloys. Moreover, the synergistic improvement mechanism of mechanical properties and electrical conductivity was analyzed.

Key Words: Cu-Ti Alloy, Strength, Electrical Conductivity, Nanostructure, Overaging

作为一种典型的时效强化型合金,Cu-Ti 合金因其高强度、高弹性、优异的耐热性及耐磨性而备受关注,有望取代 Cu-Be 合金成为新一代的导电弹性铜合金^[1-4]。随着电子与电气工业的快速发展,高性能弹性导电铜合金的需求日益增长^[5-8],亟需开发兼具高强度与良好导电性能的 Cu-Ti 合金。

Cu-Ti 合金的时效析出过程已经得到广泛研究^[9-10]。时效初期固溶体内部均匀分布的 Ti 原子发生扩散并出现成分起伏,发生调幅分解,随后生成有序化富 Ti 相,即与基体具有共格关系的亚稳有序相 β' -Cu₄Ti;随着温度升高或时效时间延长,共格 β' -Cu₄Ti 相开始粗化,其与基体间的共格取向关系逐渐发生破坏,最终在时效后期生成稳定相 β -Cu₄Ti。研究表明,晶内连续析出的亚稳态 β' -Cu₄Ti 相有助于获得优异的力学性能,而晶界处不连续析出的稳态

β -Cu₄Ti 相则被认为不利于提升 Cu-Ti 合金的力学性能^[11-14]。电学性能方面,时效初期大量 Ti 原子脱溶形成纳米 β' -Cu₄Ti 相,晶格畸变程度及相应的电子散射减弱,导致电导率迅速上升;随着时效温度升高或时间延长,Ti 原子从 β' -Cu₄Ti 相扩散至 β -Cu₄Ti 相,导致 β' -Cu₄Ti 相含量下降而 β -Cu₄Ti 相含量上升,此时 Cu 基体中 Ti 的含量基本不变,合金电导率被限制在 11.6 MS/m 以下;时效后期, β -Cu₄Ti 相充分生长,基体中 Ti 含量持续降低,电导率开始上升至较高水平^[15]。

除了传统的固溶与时效工艺,塑性变形引入的大量缺陷会显著提升合金强度,同时这些缺陷作为析出的形核部位,能促进固溶原子析出,从而改善合金的导电性能^[16-17]。研究发现,采用塑性变形与时效相结合的热机械处理方法可以有效提升 Cu-Ti 合金的综合性能^[18-20]。HUANG L 等^[18]采用 50% 冷轧与后续峰时效

收稿日期:2025-04-18;修订日期:2025-05-20

基金项目:国家重点研发计划重点资助项目(2023YFB3710001)

第一作者:贾萌,女,2001 年出生,硕士研究生, E-mail: 2300594@stu.neu.edu.cn

通信作者:田艳中,男,1984 年出生,教授, E-mail: tianyanzhong@mail.neu.edu.cn

引用格式:贾萌,李启伟,田艳中. 纳米结构 Cu-Ti 合金的力学与电学性能优化[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(5):750-754.

JIA M, LI Q W, TIAN Y Z. Mechanical and electrical property optimization of nanostructured Cu-Ti alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(5): 750-754.

工艺开发了屈服强度为 1 016 MPa、电导率为 6.84 MS/m 的 Cu-3Ti-1Cr 合金。XU B F 等^[19]研究了不同时效过程对冷轧 Cu-Ti-Fe 合金组织和性能的影响,发现冷轧 Cu-Ti-Fe 合金在 450 °C 下时效 2 h 后,硬度(HV)为 342.2,电导率为 9.34 MS/m,抗拉强度为 1 051 MPa,表现出优异的综合性能。HAN Z Y 等^[20]采用 80% 冷轧与后续峰值时效工艺开发了 Cu-1.6Ti-0.1Zr-0.5Mg 合金,其抗拉强度与电导率分别为 823 MPa 和 11 MS/m。综上,采用峰值时效工艺开发的 Cu-Ti 合金具有较高强度,但导电性能依然不足,并普遍低于 Cu-Be 和 Cu-Ni-Si 等其他时效强化型铜合金^[21-23],难以满足电子与电气工业的要求。传统的固溶与时效处理可以大幅提升合金电导率,与峰时效工艺相比,过时效处理后的 Cu-Ti 合金强度相对较低,但具有更好的导电性能。与之相比,对过时效合金进行大变形量塑性变形可以大幅提升过时效合金的强度,同时保持较好的电导率。SEMBOSHI S 等^[24]开发了充分过时效与后续拉拔工艺,制备出强度和电导率优于传统峰时效合金的 Cu-Ti 合金丝。JIANG H W 等^[25]通过对过时效 Cu-9Ni-6Sn 合金塑性变形同时提高了强度和导电性。上述研究结果表明,采用过时效与塑性变形组合工艺能够在保持 Cu-Ti 合金高强度的同时显著改善其导电性能,但相关研究尚不完善。

本研究采用充分过时效结合大应变量冷轧处理工艺,制备兼具高强度与良好导电性能的双相纳米结构 Cu-3Ti 合金,研究过时效与轧制过程对合金微观组织和性能的影响,为开发高性能 Cu-Ti 合金提供参考。

1 试验材料与方法

使用纯 Cu(质量分数为 99.99%)、Cu-50Ti 中间合金为原料,在氩气保护下,通过真空悬浮熔炼法制备 Cu-3Ti 合金铸锭。在 1 173 K 下对合金铸锭进行固溶处理 2 h,取出后立即水淬(命名 ST)。随后在 823、723 K 下对固溶态试样分别进行 15、10 h 的时效处理,获得充分时效态试样(命名 OA)。对时效后的试样进行

90% 压下量的室温冷轧,得到冷轧态试样(命名 CR)。

采用线切割加工标距为 10 mm、宽为 4 mm、厚为 1 mm 的狗骨状拉伸试样,并在室温下使用 CMT5105 试验机进行拉伸试验,拉伸速率为 0.6 mm/min。根据 GB/T 351-2019,在 293 K 下用直流电阻测试仪(TH-2515)沿冷轧方向测试试样的电导率。研磨和抛光后,用 $\text{FeCl}_3(5 \text{ g}) + \text{HCl}(25 \text{ mL}) + \text{CH}_2\text{OH}(100 \text{ mL})$ 的溶液腐蚀试样。在背散射模式(BSD)下使用扫描电镜(SEM, Zeiss Auriga Compact FIB)观察和分析 Cu-Ti 合金的微观结构和元素分布。使用 $\text{CuK}\alpha$ 辐射的 X 射线衍射仪(XRD, Smartlab 9)分析沿轧制板面的物相结构,扫描角度为 $30^\circ \sim 80^\circ$,扫描速度为 $2(^\circ)/\text{min}$ 。通过 ImageJ 软件对析出物尺寸和含量进行量化分析。透射电镜试样使用 400~3 000 目砂纸机械研磨至 $80 \mu\text{m}$,随后进行离子减薄,采用 FEI Tecnai G2F20 透射电镜(TEM)进行微观结构表征。

2 试验结果与讨论

2.1 过时效态试样的微观组织

图 1 为 Cu-3Ti 合金试样分别经固溶和过时效处理后的微观组织形貌。固溶处理后的合金试样内部呈单相过饱和固溶体组织,平均晶粒尺寸为 $(336.8 \pm 6.1) \mu\text{m}$,见图 1a。经充分过时效处理后,OA 试样基体中 Ti 含量降低,大量取向随机的 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相沿垂直晶界方向析出并生长,同时晶粒内部分布着少量已粗化的 $\beta'\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相,含量相较于峰时效状态显著降低。 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相片层取向随机,呈团簇式分布。由图 1b 可以发现,析出相主要呈片层状和点棒状。结合图 1c 和图 1d,对其特征尺寸进行量化分析,结果见图 2。可以看出,过时效态试样内部的点棒状相为 $\beta'\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相($I4/m$ 结构; $a=0.583 \text{ nm}$, $c=0.362 \text{ nm}$)^[9-10],粒径尺寸为 $(90.6 \pm 2.2) \text{ nm}$,已发生粗化,片层状相为 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ ($Pnma$ 结构; $a=0.453 \text{ nm}$, $b=0.434 \text{ nm}$, $c=1.293 \text{ nm}$),片层厚度为 $(137.8 \pm 4.7) \text{ nm}$,片层间距为 $(421.1 \pm 6.7) \text{ nm}$,此时合金处于过时效阶段^[11-14]。通过 XRD 检测到基体与析出

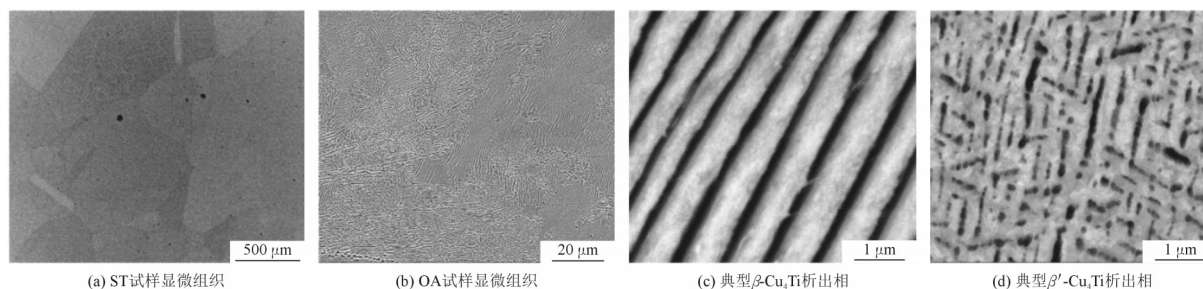


图 1 ST 和 OA 试样的 SEM 图像

Fig.1 SEM images of ST and OA specimens

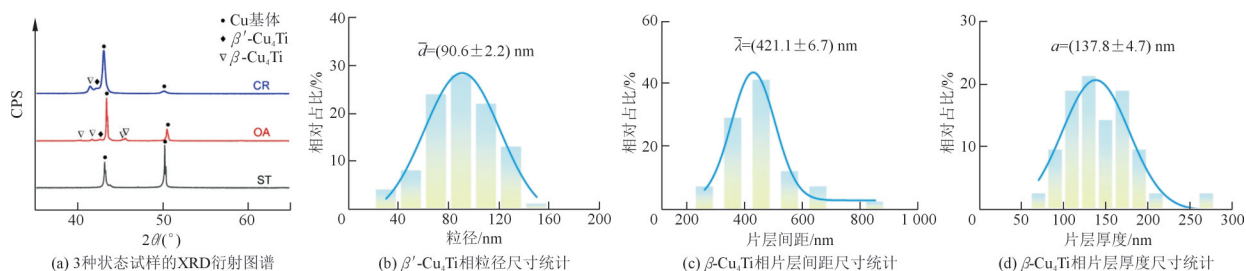


图2 XRD图谱及OA试样析出相尺寸统计

Fig.2 XRD patterns and statistics of precipitates in OA specimen

相信息,析出相形成过程中会消耗基体中的固溶Ti原子,基体中Ti原子含量的降低导致晶格畸变效果减弱,衍射角发生偏移。根据布拉格方程^[26],衍射角的增大对应晶体面间距的减小,符合图2a中Cu基体衍射峰向右偏移的现象。

2.2 冷轧态试样的微观组织

CR试样微观组织见图3。可以看出,经过大应变量的冷轧变形后,CR试样内部物相开始沿轧制方向(RD)分布,晶粒沿轧制方向伸长,同时引入大量剪切带协调塑性变形。图3c显示剪切带附近的条带形貌,表明大应变冷轧变形使片层状相得到细化,整体呈波浪形。剪切带与轧制方向约呈45°,可以跨越多相结构,并不会被相之间的取向关系影响,表明其形成是由轧制过程引入的切应力造成的。

进一步采用TEM对CR试样的微观组织进行表征,见图4。可以看出,经冷轧变形后,晶粒从过时效态的 $(336.8 \pm 6.1) \mu\text{m}$ 细化至 $(38.4 \pm 7.4) \text{nm}$,获得了完全纳米结构。此外,在Cu基体内部可以明显观察到微观剪切带分布,见图4a。对比图4c和图4d以及图2c和图2d可知,冷轧变形导致合金中 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 片层相的厚度从 $(137.8 \pm 4.7) \text{nm}$ 减至 $(5.3 \pm 0.4) \text{nm}$,片层间距从 $(421.1 \pm 6.7) \text{nm}$ 减至 $(32.9 \pm 2.4) \text{nm}$,表明通过轧制处理可细化 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相条带。根据图2a,经冷轧后试样内部 $\beta'\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相含量极低,这可能是由于塑性变形导致其尺寸进一步细化,从而发生了机械合金化导致 $\beta'\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相发生回溶,此时试样内部结构主要为Cu基体与片层状 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相。纳米级双相条带层厚度和层间距的细化显著增加相界面及晶界密度,可有效阻碍位错运动,从而大幅提升合金的强度。

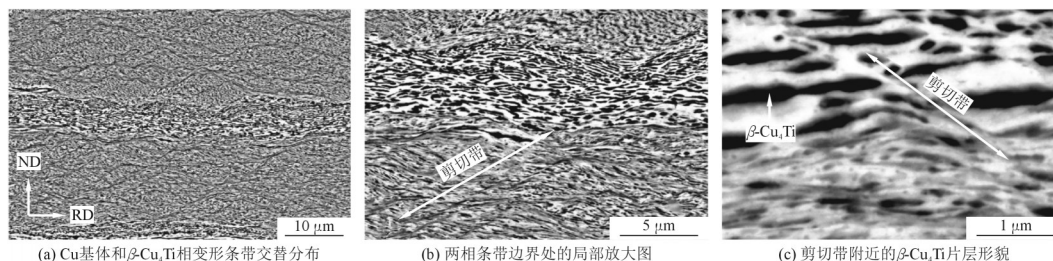
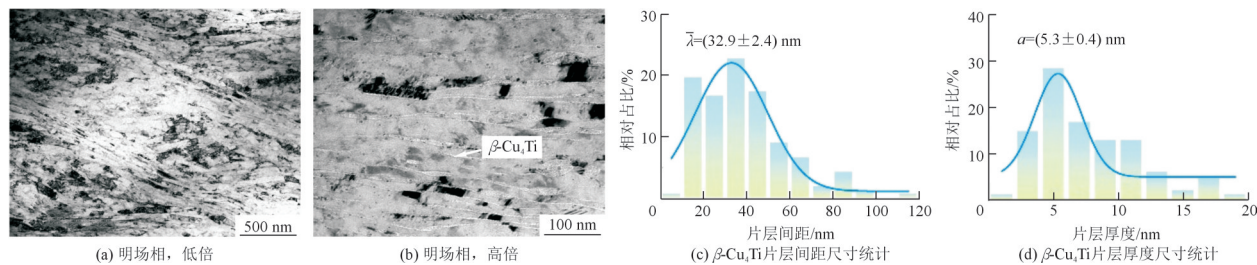


图3 CR试样的SEM图像

Fig.3 SEM images of CR specimen

图4 CR试样的TEM图像及 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 析出相尺寸统计Fig.4 TEM images of CR specimen and statistics of $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ precipitates

进一步对CR试样的相界面进行了表征,见图5。根据HRTEM图像和FFT图可知, $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 片层与Cu基体的位向关系为 $[110]_{\text{Cu}}//[50\bar{1}]_{\beta}$ 和 $(\bar{1}11)_{\text{Cu}}//(\bar{0}10)_{\beta}$,为非共格界面。HUANG L等^[10]发现时效后 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相与Cu基体的位向关系为 $[1\bar{1}0]_{\text{Cu}}//[501]_{\beta}$ 和 $(111)_{\text{Cu}}//(\bar{0}10)_{\beta}$,由

此可见冷轧处理后Cu基体与 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 相的位向关系并未产生明显改变,表明两相之间具有较好的塑性变形相容性,这也保障了该材料能够在室温下具有优异的塑性变能力,且经过90%压下量变形后依然保持较好的表面状况。

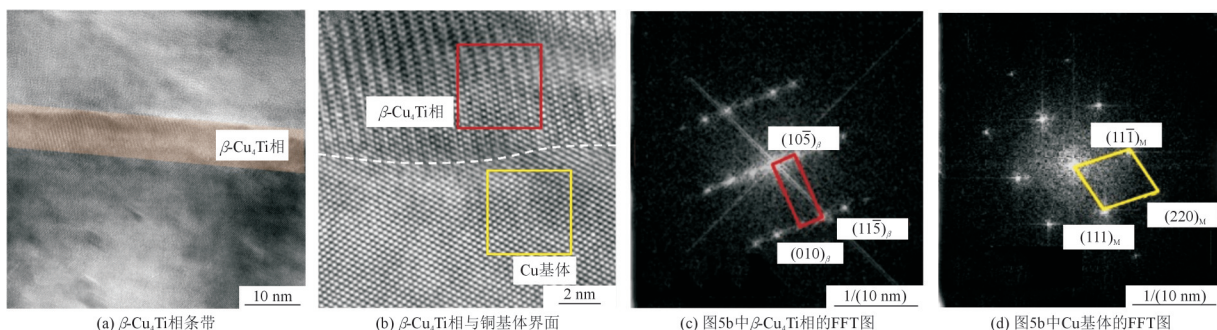


图5 CR试样的HRTEM和FFT图像

Fig.5 HRTEM images and FFT patterns of CR specimen

2.3 力学与电学性能

3种不同状态试样的应力-应变曲线与电学性能见图6。由图6a可知,ST试样的抗拉强度为575 MPa,电导率为5.1 MS/m。一般认为,固溶原子由于尺寸差异会诱发基体晶格畸变,是影响Cu合金导电性的主要因素,而Ti原子固溶产生的晶格畸变远大于析出相对电子的散射作用。因此,ST试样较低的电导率主要源自过饱和固溶Ti原子诱发的剧烈晶格畸变。经过25 h过时效处理后,OA试样的抗拉强度提升至630 MPa,而电导率则大幅增加至15.37 MS/m。峰时效状态下合金内部弥散分布的纳米连续析出相 β' -Cu₄Ti对位错的钉扎作用更显著,相比于峰时效处理对合金强度的改善程度^[18-20],过时效处理对Cu-Ti合金强度的提升并不明显,但对电导率的改善效果显著。过时效处理使合金内部固溶的Ti原子充分析出,Cu基体晶格畸变程度减弱,这大幅缓解了电子散射效应,因此电导率显著提升。进一步冷轧处理后,CR试样的抗拉强度大幅上升至1 020 MPa,电导率则降低至11.77 MS/m。CR试样强度的大幅上升归因于冷轧过程中引入的高密度位错,以及产生交替排布的双相纳米片层 β -Cu₄Ti相和Cu基体,强化来源主要为位错强化和细晶强化。根据位错强化机制,高密度位错的累积导致加工硬化,提升材料流变应力。而根据Hall-Petch关系可知^[27],晶粒尺寸细化会引入高密度晶界,有效阻碍位错运动从而提高合金的强度。冷轧后试样的晶粒尺寸由过时效态的 $(336.8 \pm 6.1) \text{ nm}$ 细化至 $(38.4 \pm 7.4) \text{ nm}$,同时片层相的层间距与片层厚度大幅减小,界面密度显著提高,对位错的运动均起到阻碍作用,多种机制共同作用,实现对强度的协同提升。此外,铜合金的电导率受晶界、析出物、缺陷和固溶原子等各种因素的影响。CR试样的电导率相较OA试样下降,这是因为首先,冷轧诱发铜基体与 β -Cu₄Ti片层纳米化,大幅增加晶界和相界面的密度,加剧电子散射从而导致电导率大幅下降;其次,变形诱发机械合金化效应导致部分纳米级 β' -Cu₄Ti与

β -Cu₄Ti片层发生回溶,加剧铜基体晶格畸变从而降低电导率;最后,高密度位错的引入进一步降低电导率。

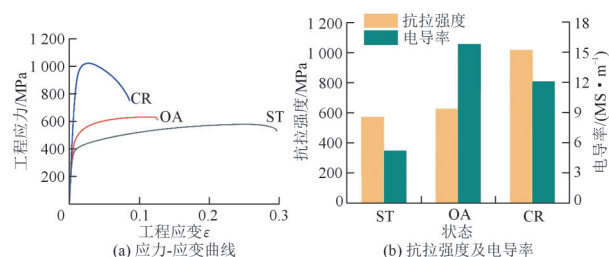


图6 ST,OA和CR试样的力学和电学性能

Fig.6 Mechanical and electrical properties of ST, OA and CR specimens

将CR试样与其他成分相近的Cu-Ti合金综合性能进行比较,结果见图7。可以看出,大部分Cu-Ti合金的抗拉强度在800~1 200 MPa之间,电导率则通常低于7 MS/m。与之相比,本研究制备出的CR试样在保留1 020 MPa高强度的同时,表现出11.77 MS/m的超高电导率,这远超过大部分已报道的相近成分Cu-Ti合金。综上,本研究开发的过时效与轧制工艺可以协同提升强度和电导率。同时,可保障塑性加工的顺利进行,获得综合性能和表面质量优异的板带材。

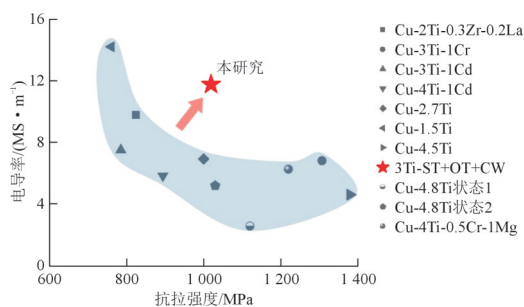

 图7 Cu-Ti合金的综合性能对比^[28-33]

 Fig.7 Comprehensive property comparison of Cu-Ti alloys^[28-33]

3 结论

(1)开发了过时效结合冷轧变形工艺,制备出纳米结构CR试样,获得11.77 MS/m的超高电导率,同时保持1 020 MPa的抗拉强度,综合性能优异。

(2)冷轧变形使晶粒由 $(336.8 \pm 6.1) \mu\text{m}$ 细化至 $(38.4 \pm 7.4) \text{nm}$, β - Cu_4Ti 片层厚度减至 $(5.3 \pm 0.4) \text{nm}$, 片层间距减至 $(32.9 \pm 2.4) \text{nm}$ 。高强度主要源于纳米结构及高密度位错。

(3)OA试样的高电导率主要源自于过时效时期固溶Ti原子的充分析出降低铜基体晶格畸变。CR试样的电导率较OA试样略有下降,这源自于铜基体与 β - Cu_4Ti 双相界面密度增加和组织纳米化,塑性变形诱发纳米级 β' - Cu_4Ti 与 β - Cu_4Ti 片层发生部分回溶,以及高密度位错的积累。

参 考 文 献

- [1] TU Y M, WANG W J, LIU X F, et al. The compositional homogenization control of Cu-Ti alloys prepared by accumulative roll bonding-deformation diffusion process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 924: 166-187.
- [2] 黄旭刚,李海龙,张健康,等. 固溶温度对铍青铜QBe2带材组织与性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43(12): 1 669-1 673.
- [3] 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.
- [4] 靖青秀,彭勇,肖翔鹏,等. Fe含量对Cu-Ti-Ni-xFe合金组织与性能的影响[J]. *金属热处理*, 2024, 49(1): 96-102.
- [5] YANG K, WANG Y H, GUO M X, et al. Recent development of advanced precipitation-strengthened Cu alloys with high strength and conductivity: A review [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 138: 101-111.
- [6] 曹军,郑磊. 高强高导铜合金的强化方法和研究热点[J]. *铸造技术*, 2018, 39(7): 1 637-1 642.
- [7] 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.
- [8] 于昊玮,胡敬源,张梁,等. 预时效工艺对Cu-Cr-Zr合金力学性能和电学性能的影响[J]. *铜业工程*, 2024(3): 163-170.
- [9] CHENG J Y, HE K Z, DENG M Q, et al. Microstructural evolution and properties of Cu-1.5Ti alloy during aging[J]. *Materials Science Forum*, 2020, 993: 183-193.
- [10] HUANG L, PENG L G, LI J, et al. Crystallography and diffraction patterns of the precipitates in Cu-3Ti alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 25: 6 503-6 510.
- [11] SEMBOSHI S, AMANO S, FU J, et al. Kinetics and equilibrium of age-induced precipitation in Cu-4Ti binary alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2017, A48: 1 501-1 511.
- [12] HUANG L, PENG L G, LI J, et al. Properties and microstructure of copper-titanium alloys with magnesium additions[J]. *Rare Metals*, 2024, 43: 2 290-2 299.
- [13] WANG X, XIAO Z, CHEN Y, et al. Suppression of discontinuous precipitation by Fe addition in Cu-Ti alloys[J]. *Rare Metals*, 2025, 44: 1 982-1 997.
- [14] WANG L J, MENG X P, JIANG Y B, et al. Electropulsing rapidly refined the microstructure and enhanced the strength and plasticity of Cu-3.5Ti alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1 005: 1 759-1 774.
- [15] LIAO Y M, GUO C G, ZHOU C Y, et al. Stability of the metastable β' - Cu_4Ti phase in Cu-Ti alloys: Role of the Ti content[J]. *Materials Characterization*, 2023, 203: 113 164.
- [16] 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.
- [17] HUANG L, PENG L J, MI K J, et al. Effect of cold working on the properties and microstructure of Cu-3.5Ti alloy[J]. *Materials*, 2022, 15(22): 1-8.
- [18] 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: 168-186.
- [19] XU B F, WANG Q J, WANG W, et al. Precipitation behavior and performance evolution of cold-rolled Cu-Ti-Fe alloy during heat treatment[J]. *Materials Characterization*, 2024, 217: 1 143-1 148.
- [20] HAN Z Y, ZHOU M, JING K, et al. Effect of Mg addition on the microstructure and mechanical properties of Cu-Ti-Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1 004: 175-189.
- [21] XIE G L, WANG Q S, MI X J, et al. The precipitation behavior and strengthening of a Cu-2.0Be alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2012, A558: 326-330.
- [22] LEI Q, LI Z, GAO Y, et al. Microstructure and mechanical properties of a high strength Cu-Ni-Si alloy treated by combined aging processes[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2 413-2 423.
- [23] 卢翰林,陈乐平,方森鹏,等. 深冷处理对C17510铍铜合金组织与性能的影响[J]. *铸造技术*, 2021, 42(4): 304-307.
- [24] SEMBOSHI S, SATO S, ISHIKURO M, et al. Investigation of precipitation behavior in age-hardenable Cu-Ti alloys by an extraction-based approach[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2019, A50: 1 389-1 396.
- [25] JIANG H W, PENG L J, MI X J, et al. Simultaneously enhancing the strength and electrical conductivity of Cu-Ni-Sn alloy through plastic deformation of an intermetallic compound[J]. *Materials & Design*, 2023, 235: 1 124-1 145.
- [26] BRAGG W L. The specular reflection of X-rays[J]. *Nature*, 1912, 90(2 250): 410.
- [27] CHEN X F, WANG Q, CHEN Z Y, et al. Direct observation of chemical short-range order in a medium-entropy alloy[J]. *Nature Internet*, 2021, 592: 712-716.
- [28] WANG N N, TIAN B H, JING K, et al. Effects of trace La on the aging properties of the Cu-Ti-Zr alloys[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2025, 34: 4 054-4 065.
- [29] MARKANDEYA R, NAGARJUNA S, SARMA D. Precipitation hardening of Cu-3Ti-1Cd alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2007, 16(5): 640-646.
- [30] MARKANDEYA R, NAGARJUNA S, SARMA D. Precipitation hardening of Cu-4Ti-1Cd alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39: 1 579-1 587.
- [31] NAGARJUNA S, BALASUBRAMANIAN K, SARMA D. Effect of prior cold work on mechanical properties, electrical conductivity and microstructure of aged Cu-Ti alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34: 2 929-2 942.
- [32] NAGARJUNA S, BALASUBRAMANIAN K, SARMA D. Effects of cold work on precipitation hardening of Cu-4.5Ti alloy[J]. *Materials Transactions*, 1995, 36(8): 1 058-1 066.
- [33] 崔振山. 超高强导电弹性钛青铜的组织与性能研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.

(编辑:刘晨辉)