

谢功园,陈宇强,刘文辉,等.微量 Mg 元素添加对铜晶粒尺寸热稳定性的影响[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(2):117-124. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.016

XIE G Y, CHEN Y Q, LIU W H, et al. Effect of Trace Mg Addition on Grain Size Thermal Stability of Copper[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2): 117-124. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102. 2023.02.016

微量 Mg 元素添加对铜晶粒尺寸 热稳定性的影响

谢功园¹, 陈宇强^{1*}, 刘文辉¹, 潘素平², 宋宇峰¹, 刘阳¹, 谭欣荣¹

(1.湖南科技大学 新能源储存与转换先进材料湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201;2.中南大学 高等研究中心,湖南 长沙 410083)

摘要:作为重要的导电导热材料,铜在高温下的晶粒尺寸热稳定性是目前新能源、电子通信等领域的研究热点.利用电子背散射衍射、透射电子显微镜以及高角度环形暗场扫描透射进行分析,研究微量 Mg 元素添加对铜在高温热暴露下的晶粒长大行为及织构演变的影响规律.结果表明:0.12%(质量分数,下同)的 Mg 元素添加可以明显地提高铜在高温下的晶粒尺寸热稳定性.纯铜经 650 °C/10 min 和 950 °C/10 min 热暴露后的平均晶粒尺寸为 58.2, 198.0 μm,添加 0.12%的 Mg 元素后,铜合金经 650 °C/10 min 和 950 °C/10 min 热暴露后的平均晶粒尺寸为 23.5, 82.5 μm.此外,0.12%的 Mg 元素添加明显弱化了铜合金在高温热暴露后的立方织构(Cube) {001} <100>,提高了合金中黄铜织构(Brass) {110} <112>和铜型织构(Copper) {112} <111>的体积分数. Mg 元素添加使铜合金形成了 10~20 nm 的细小 γ(Cu₂Mg)相,这些 γ 相对晶界具有明显的钉扎作用,可以抑制晶粒的生长,使铜合金具有较好的晶粒尺寸热稳定性,并且对合金电导率的影响较小.

关键词: Mg 元素;铜合金;晶粒尺寸;织构

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)02-0117-08

Effect of Trace Mg Addition on Grain Size Thermal Stability of Copper

XIE Gongyuan¹, CHEN Yuqiang¹, LIU Wenhui¹, PAN Suping², SONG Yufeng¹, LIU Yang¹, TAN Xinrong¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of New Energy Storage and Conversion of Advanced Materials, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Advanced Research Center, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: As a main thermal-conductivity material, the grain size thermal stability of copper at high temperature has been a current hotspot in the fields of new energy resource and electronic communication. In this study, electron backscatter diffraction, transmission electron microscopy and high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy are used to study the influence of trace Mg element addition on the grain growth behaviour and texture evolution of copper alloy during high-temperature exposing. Results show that the addition of 0.12% (mass fraction, below the same) Mg element can significantly improve the grain size thermal stability of copper at high temperatures. The average grain sizes of pure copper after 650 °C/10 min and 950 °C/10 min exposure are 58.2 μm and 198.0 μm, respectively. After adding 0.12% Mg element, the average grain sizes of copper alloy exposed at 650 °C and 950 °C for 10 min are 23.5 μm and 82.5 μm, respectively. Besides, the addition of 0.12% Mg significantly weakens the Cube texture {001} <100> of copper suffering high temperature,

收稿日期: 2021-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075166)

* 通信作者, E-mail: yqchen1984@163.com

and increases the Brass texture $\{110\} \langle 112 \rangle$ and Copper texture $\{112\} \langle 111 \rangle$. The Mg element addition leads to the formation of fine γ (Cu_2Mg) phase with the size of 10~20 nm in copper alloy. At high temperatures, γ phase particles exert an obvious pinning effect on grain boundaries, which thereby hinders the growth of grains, and attributes to the great grain size thermal stability of copper at high temperatures with a minor effect on the conductivity of alloy.

Keywords: Magnesium element; Cu alloy; grain size; texture

铜具有优良的导电性、导热性、耐蚀性和延展性^[1-3],在电子通信、交通运输以及航空航天等领域中具有广泛的应用.近年来,电子信息以及新能源汽车领域的快速发展,对功率模块的导电导热性提出了越来越高的要求.作为重要的导线及构件材料^[4],铜及其合金所承受的电、热负荷会急剧增大.然而,受电阻热效应的影响,铜在服役过程中可能承受短时高温,在 600 °C 以上发生急剧的晶粒长大^[5]并发生应力松弛现象,严重危害构件的服役安全^[6].研究人员发现^[7-8],将铜和陶瓷在 800~900 °C 进行短时烧结,所制备的复合材料能够显著地提高构件的高温服役性能.但是,同样要求铜具有良好的晶粒尺寸热稳定性,以保证烧结过程中铜和陶瓷具有良好的界面结合强度.为此,如何提高纯铜及其合金在高温下的晶粒尺寸热稳定性逐步成为近年来研究的热点和难点^[9].

朱明益等^[10-11]发现添加某些微量合金元素可在铜中形成高熔点的第二相粒子,这些粒子对铜晶界的钉扎作用,能够在一定程度上抑制高温下晶界的迁移速率,从而提高合金的热稳定性^[12-15]; ANDERSON 等^[16]发现在 Cu-8Cr-4Nb 合金中,Cr, Nb 元素可以起到明显的晶界析出强化,所形成的 Cr_2Nb 粒子能抑制铜合金在高温下的晶粒长大,使得合金在接近 700 °C 时仍能保持较小的晶粒尺寸;ZHANG 等^[17]发现 Cr 元素通过析出第二相的形式钉扎在铜合金的晶界处,使合金在高温下具有较好的晶粒尺寸热稳定性;ZHOU 等^[18]的研究表明添加 0.92% (质量分数,下同)的 Ag 元素能提高铜基复合材料在 500 °C 时的热稳定性;EGUCHI 等^[19]提出添加 0.27% 的 Ag 元素能够抑制 Cu-Zr-Cr 在 900 °C 退火时的晶粒长大.然而,添加 Cr, Ag 等元素通常会对铜合金的导电率造成较大影响,还会导致生产成本的大幅提高.因此,如何兼顾高温热稳定性与导电性是目前铜合金领域急需解决的突出问题^[20].

有学者^[21-22]发现:添加微量 Mg 元素也能提高铜合金在 300~500 °C 的耐热性能,且微量 Mg 元素的添加对合金导电率的影响较小.然而,目前针对添加 Mg 元素对铜在 600 °C 以上高温的晶粒长大行为的研究较少.因此,本文通过添加微量 Mg 元素,对铜在 650 和 950 °C 下的晶粒尺寸的热稳定性进行研究,并结合电子背散射衍射(EBSD)、透射电子显微镜(TEM)以及高角度环形暗场扫描透射(HAADF-STEM)分析微量 Mg 元素添加对铜在高温下的晶粒长大行为和织构演变规律的影响.

1 试验材料与方法

试验原材料为大冶有色金属有限责任公司提供的 A 级纯铜厚板,添加元素所采用的中间合金为 Cu-15Mg (质量分数,下同).试验设置了 2 组试样:一组是未添加微量元素的纯铜,另一组是在纯铜中添加 0.12% 的 Mg 元素的铜合金(Cu-0.12Mg).

纯铜与 Cu-0.12Mg 合金的制备过程如图 1 所示.首先,将纯铜厚板线切割成均匀的小块,采用真空感应电炉分别将 2 组试样重熔成 $\Phi 55 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的铸锭(图 1a),经 950 °C/2 h 退火后在四柱万能液压机中挤压成 $53 \text{ mm} \times 43 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 的铜板(图 1b).将铜板在双辊式冷轧机中进行轧制,每次道压下量控制在 10%~20%,最终轧制成 0.4 mm (95%变形量)的铜箔(图 1c).表 1 为纯铜和所制备的 Cu-0.12Mg 合金的化学成分.

为研究 2 组试样高温晶粒尺寸的热稳定性和导电性,将 95% 变形量的纯铜和 Cu-0.12Mg 合金置于箱式加热炉中,分别在 650 和 950 °C 进行 10 min 的热暴露处理,随后进行金相组织观察和电导率测试.

采用数字电导率仪 Sigma 2008A 对纯铜和 Cu-0.12Mg 合金试样的导电率进行检测.金相显微组织观察通过机械抛光后进行电解腐蚀,利用 MR5000 倒置金相显微镜在偏光模式下对试样进行观察,并采用截线法统计平均晶粒尺寸.电解抛光液中水和磷酸的体积比为 6:4,电解抛光仪器为 APS3005S-3D,工作电压

为 1.2~1.5 V, 电流为 0.13 A, 时间为 25 s.

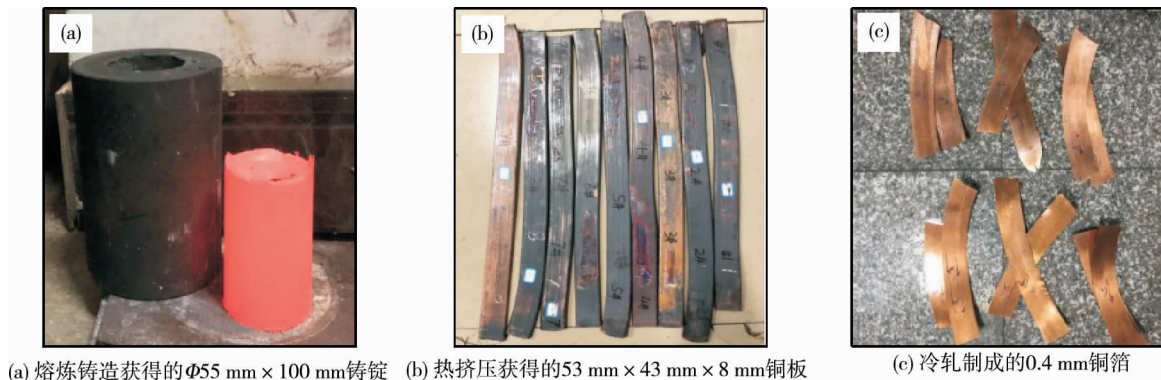


图1 纯铜与 Cu-0.12Mg 合金制备过程

表1 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金的化学成分(质量分数)

试样名称	Mg	Fe	Cu
纯铜	0.001 2	≤0.001	Bal.
Cu-0.12Mg	0.12	≤0.001	Bal.

注: Bal. 为余量

EBSD 样品首先采用机械减薄至 0.1 mm 后, 利用 MTP-1A 磁力驱动双喷电解减薄器进行去应力腐蚀. 电解液中硝酸和甲醇的体积比为 3 : 7, 工作电压为 20~25 V, 电流为 50 mA, 时间为 40 s, 用液氮将电解液冷却至 -20 °C 以下. 最后, 利用 ZEISS EVO MA10 扫描电子显微镜结合 EBSD 探测系统进行数据采集, 并通过 Channel 5 软件统计各取向晶粒的体积分数.

TEM, 高分辨透射电子显微分析 (HRTEM) 以及 HAADF-STEM 样品通过机械减薄至 0.1 mm 后, 冲出 $\Phi 3$ mm 的圆片, 采用 MTP-1A 电解减薄器进行双喷化学减薄. 双喷时的工作电压为 20~25 V, 电流控制在 50~80 mA, 电解液中硝酸和甲醇的体积比为 3 : 7, 用液氮冷却至 -20 °C 以下. 最后, 利用 Titan G2 60-300 物镜球差校正场发射透射电子显微镜以及能量色散 X 射线光谱 (EDX) 对高温保温后的试样进行观察, 工作加速电压为 300 kV.

2 结果分析

2.1 微量 Mg 元素添加对导电率的影响

表 2 为纯铜和 Cu-0.12Mg 合金经不同高温热暴露后的导电率. 由表 2 可以看出: 在室温条件下, 纯铜的导电率为 99.9% IACS, 而 Cu-0.12Mg 合金的导电率为 96.7% IACS, 导电率仅降低了 3.2% IACS; 随着热暴露温度的升高, 纯铜和 Cu-0.12Mg 合金的导电率都有所下降, 经 650 °C / 10 min 热暴露后, 纯铜的导电率为 98.7% IACS, 而 Cu-0.12Mg 合金的导电率为 94.5% IACS, 经 950 °C / 10 min 热暴露后, 纯铜和 Cu-0.12Mg 合金的导电率分别为 97.8% IACS 和 91.8% IACS. 总体上看, 添加 0.12% 的 Mg 元素对铜合金导电性能的影响较小.

表2 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露后的导电率

试样名称	保温条件	导电率/% IACS
纯铜	室温	99.9
	650 °C / 10 min	98.7
	950 °C / 10 min	97.8
Cu-0.12Mg	室温	96.7
	650 °C / 10 min	94.5
	950 °C / 10 min	91.8

2.2 微量 Mg 元素添加对晶粒尺寸热稳定性的影响

为研究 Mg 元素添加对纯铜晶粒尺寸热稳定性的影响,将纯铜和 Cu-0.12Mg 合金分别在 650 °C/10 min 和 950 °C/10 min 条件下进行热暴露处理.图 2 为纯铜与 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露条件下的金相显微组织.图 2a 和图 2b 分别为纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在 650 °C 热暴露 10 min 后的显微组织.由图 2a 和图 2b 可以看出:纯铜晶粒在再结晶过程中出现了晶粒异常长大现象,而 Cu-0.12Mg 合金的晶粒尺寸较为细小,且分布均匀.随着温度从 650 °C 升高到 950 °C 时,纯铜晶粒的长大现象更为显著,且晶粒中存在较多的退火孪晶(图 2c).与纯铜相比,Cu-0.12Mg 合金的晶粒尺寸相对细小,显示出较好的晶粒尺寸热稳定性(图 2d).

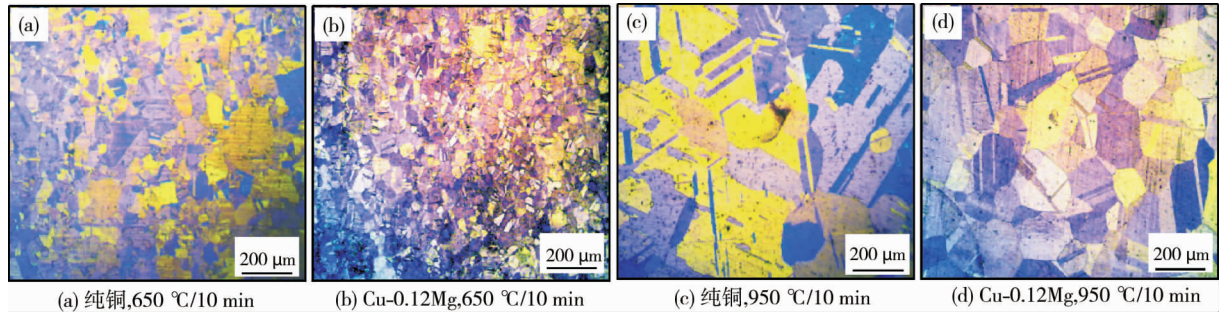


图 2 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露条件下的金相显微组织

通过金相显微组织观察,采用截线法统计纯铜及 Cu-0.12Mg 合金的平均晶粒尺寸.图 3 为纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在 650 和 950 °C 热暴露 10 min 后的平均晶粒尺寸.由图 3 可以看出:纯铜在 650 °C 热暴露 10 min 后的平均晶粒尺寸为 58.2 μm ;随着温度的升高,其晶粒尺寸持续增大,在 950 °C 热暴露 10 min 后,纯铜的平均晶粒尺寸增长至 198.0 μm ;添加 0.12% 的 Mg 元素明显细化了铜在高温下的晶粒尺寸,Cu-0.12Mg 合金在 650 和 950 °C 热暴露 10 min 后的平均晶粒尺寸分别为 23.5, 82.5 μm .

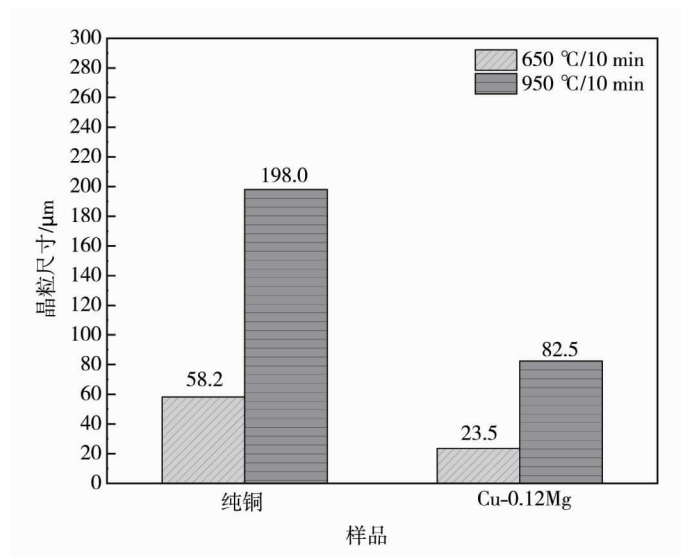


图 3 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露条件下的平均晶粒尺寸

2.3 微量 Mg 元素添加对织构演变的影响

图 4 为纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在 650 和 950 °C 热暴露 10 min 后的 EBSD 图.由图 4a 可以看出:经 650 °C 热暴露 10 min 后,纯铜存在大量的 Cube 取向晶粒,且晶粒较为粗大.由图 4b 可以看出:经 650 °C 热暴露 10 min 后,Cu-0.12Mg 合金的晶粒尺寸相比纯铜的晶粒尺寸明显细化,表现出较好的晶粒尺寸热稳定性.从晶体取向分布来看,Cu-0.12Mg 合金中 Cube 取向的晶粒较少且分布均匀,而 Brass 和 Copper 取向的晶粒较多.随着温度从 650 °C 升高到 950 °C,纯铜主要存在 Cube 和 S 取向的晶粒,晶粒尺寸增大非常显著

(图 4c).Cu-0.12Mg 合金在 950 °C 保温 10 min 后的晶粒仍然较为细小,虽然具有较多的 Cube 取向晶粒,但晶粒周围存在大量分布均匀的 Brass, Copper 以及 S 取向晶粒(图 4d).

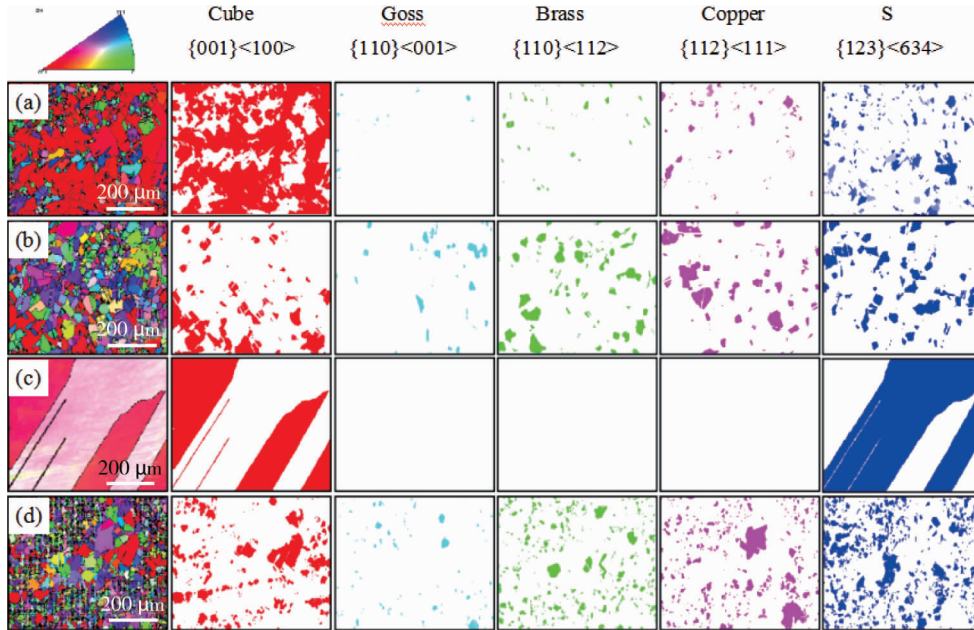


图 4 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露条件下的织构分布

图 5 为通过 EBSD 分析计算获得的纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同热暴露条件下的织构体积分数.由图 5 可以看出:在 650 °C 热暴露 10 min 后,纯铜中主要存在 Cube 和 S 织构,其体积分数分别为 63.5% 和 11.5%,而 Cu-0.12Mg 合金在相同条件下的 Cube 织构的体积分数仅为 15.0%,其 Brass 和 Copper 织构的体积分数与纯铜相比分别提高了 8.1%, 14.9%;随着温度从 650 °C 升高到 950 °C,纯铜中 Cube 和 S 织构的体积分数分别为 38.3%, 61.2%,而 Cu-0.12Mg 合金的 Cube 和 S 织构的体积分数仅比 650 °C 时分别提高 1.2%, 7.1%,而 Brass 和 Copper 织构的体积分数分别减少了 0.7%, 5.8%.总的来说,添加 0.12% 的 Mg 元素明显弱化了合金中的 Cube 织构,并提高了 Brass 和 Copper 织构的体积分数.

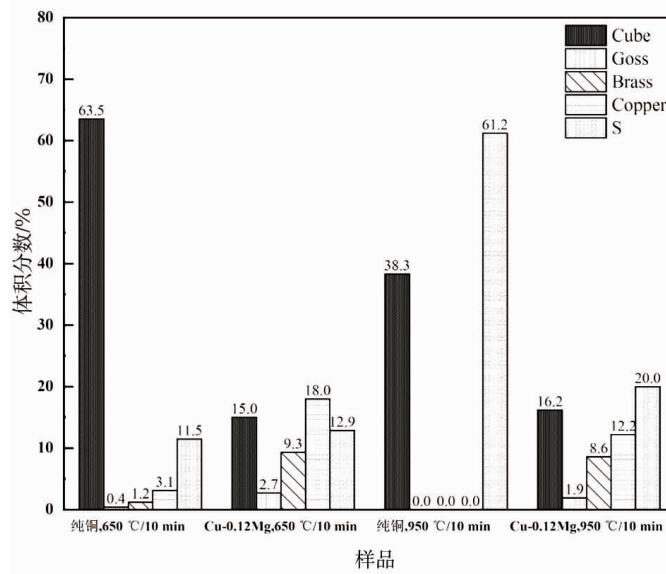


图 5 纯铜及 Cu-0.12Mg 合金在不同保温条件下的织构体积分数

2.4 微量 Mg 元素添加对第二相的影响

图 6 为 Cu-0.12Mg 合金在 950 °C/10 min 热暴露条件下的 HAADF-STEM 图像及 EDX 元素面分析结果.由图 6a 可以看出:合金中分布着许多尺寸在 10~20 nm 左右的椭球状第二相粒子.图 6c 和 图 6 d 的

EDX 元素面分析的结果表明:该第二相粒子的 Cu 元素含量明显低于基体,并且富含 Mg 元素.通过对该第二相粒子进一步进行定量的元素线扫描分析(图 7),可以发现:在第二相的中心区域,Cu 元素的质量分数降至 46.9%,而 Mg 元素的质量分数高达 11.67%.

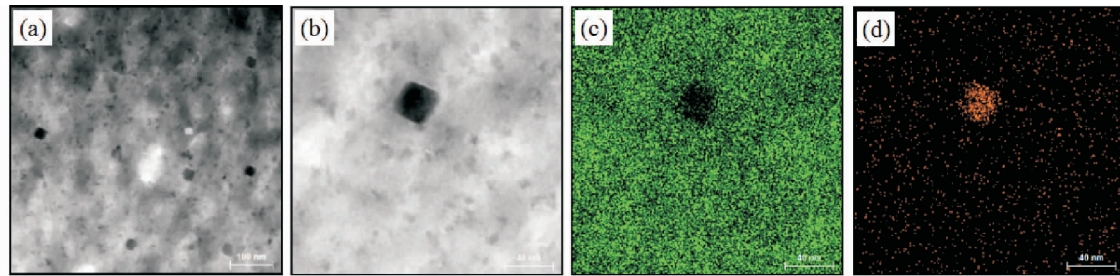


图 6 Cu-0.12Mg 合金经 950 °C/10 min 热暴露后的 HAADF-STEM 图像及 EDX 元素面分析

图 6 Cu-0.12Mg 合金经 950 °C/10 min 热暴露后的 HAADF-STEM 图像及 EDX 元素面分析

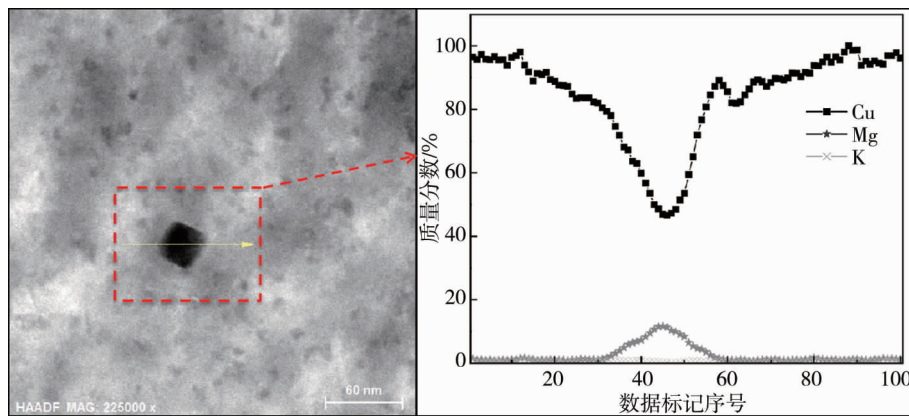


图 7 Cu-0.12Mg 合金第二相粒子附近区域的元素线扫描分析

根据 Cu-Mg 二元相图,Cu-Mg 二元系合金可能存在 β (CuMg₂)相和 γ (Cu₂Mg)相这 2 种稳定的化合物^[23-24].为进一步判定合金中的第二相类型,从 $\langle 011 \rangle_{Cu}$ 入射方向对 Cu-0.12Mg 合金进行 HRTEM 观察.图 8 为 Cu-0.12Mg 合金在 950 °C/10 min 热暴露后的 HRTEM 图像及其对应的傅里叶变换(FFT)图谱.通过测量发现的(200)_{Cu}晶面间距为 0.179 nm,而第二相粒子的(200)晶面间距为 0.210 nm,并且该第二相与铜基体具有相同的面心立方晶体结构,因此,可推断该第二相粒子为 γ 相.此外,由图 8b 和图 8c 的观察结果可知:铜基体与该第二相存在 $(200)_{Cu} // (200)_{\gamma}$, $\langle 011 \rangle_{Cu} // \langle 011 \rangle_{\gamma}$ 的取向关系.这也进一步证实该第二相粒子为 γ 相粒子.

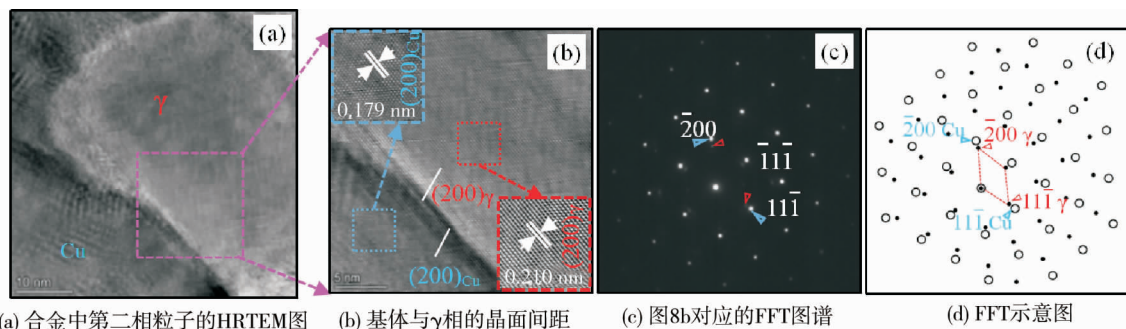


图 8 Cu-0.12Mg 合金第二相粒子的 HRTEM 图像及其对应 FFT 图谱(观察方向为 $\langle 011 \rangle_{Cu}$)

研究表明:由于内部的位错相互作用较弱,铜在高温下的 Cube 取向亚晶容易首先消除内部缺陷,从而率先形成再结晶晶核^[25-26].此外,由于高温下晶界的可动性大幅提高^[13-15],晶界的迁移速率加快,导致铜中的 Cube 取向晶粒快速增长.因此,在高温热暴露后,纯铜中通常形成明显的 Cube 织构(图 4a 和图 4c).

与纯铜不同,Cu-0.12Mg合金中弥散分布有许多 γ 相粒子.当高温下晶界发生迁移时,这些 γ 相粒子会对晶界具有显著的钉扎作用(图9),从而抑制Cube取向晶粒的生长.因此,Cu-0.12Mg合金在650℃/10min和950℃/10min热暴露后的晶粒尺寸相比纯铜明显细化,Cube织构也相对较弱.

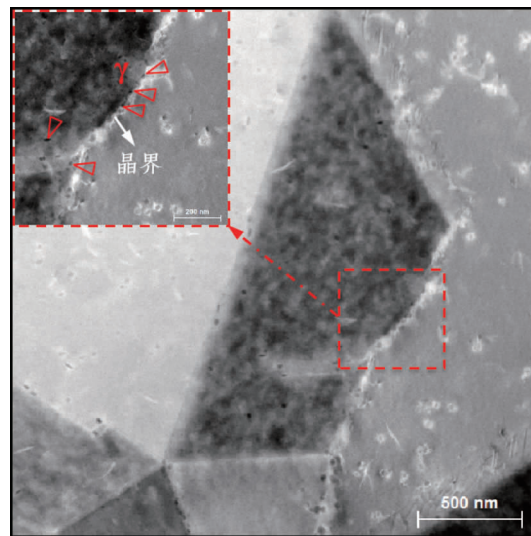


图9 γ 相在Cu-0.12Mg合金晶界处的聚集情况

3 结论

1) 纯铜经650℃/10min热暴露后的平均晶粒尺寸为58.2 μm .随着热暴露温度的升高,纯铜的晶粒尺寸显著增大,经950℃/10min热暴露后,纯铜的平均晶粒尺寸达到198.0 μm .

2) 添加0.12%的Mg元素明显细化了铜在高温下的晶粒尺寸.经650℃/10min和950℃/10min热暴露后,Cu-0.12Mg合金的平均晶粒尺寸分别为23.5, 82.5 μm .

3) 纯铜经650℃/10min和950℃/10min热暴露后形成了较强的Cube织构.添加0.12%的Mg元素可明显弱化铜合金中的Cube织构,同时提高合金中的Brass和Copper织构的体积分数.

4) 添加0.12%的Mg元素可在铜中形成尺寸为10~20 nm的 γ 相粒子. γ 相与铜基体存在 $(200)_{\text{Cu}}// (200)_{\gamma}$, $\langle 011 \rangle_{\text{Cu}} // \langle 011 \rangle_{\gamma}$ 的取向关系. γ 相粒子对铜晶界具有明显的钉扎作用,从而抑制Cube取向晶粒的生长,使Cu-0.12Mg合金在高温下具有较好的晶粒尺寸稳定性.

参考文献:

- [1] PAN Y, XIAO S Q, LU X, et al. Fabrication, mechanical properties and electrical conductivity of Al_2O_3 reinforced Cu/CNTs composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 782: 1015–1023.
- [2] TANG S, DAI Z, TAN G, et al. High-strength, ductility and corrosion-resistant in a novel Cu20Ni20Mn0.3Cr0.3Al alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2020, 252: 123177.
- [3] 张荣军,张天明.锡、锌对铜合金耐腐蚀性的影响[J].腐蚀与防护,2007(2):65–66.
- [4] 胡新芳,邵明星,韩潇潇,等.硼对纯铜的细化机理研究[J].精密成形工程,2018,10(6):17–21.
- [5] 范爱玲,张姗,黄浪,等.块体纯铜的多尺寸晶粒混合结构及力学性能[J].稀有金属,2013,37(5):726–731.
- [6] 赵亚永,张彦敏,宋克兴. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 弥散强化铜合金应力松弛行为[J].河南科技大学学报(自然科学版),2017,38(1):6–9.
- [7] TERASAKI N. Copper-ceramic bonded body and insulation circuit substrate: US201716312479[P].2017–06–28.
- [8] TERASAKI N, NAGATOMO Y. Cu/ceramic bonded body, method for manufacturing Cu/ceramic bonded body, and power module substrate: US201415021460[P].2014–09–25.
- [9] 刘爱奎,鲁长建,段广超.高性能铜合金带在汽车连接器中的应用[J].铜业工程,2018(2):13–16.

- [10] 朱明益,郭晓辉.纯铜抗软化性能研究[J].中国金属通报,2020(6):88-89.
- [11] 黄文学.高强高导铜合金的新型制备方法与发展趋势[J].世界有色金属,2019(10):166-167.
- [12] 闫志巧,陈峰,刘咏,等.扩散法制备 Al_2O_3 弥散强化铜-锡合金粉末及其表征[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(9):2084-2090.
- [13] ATWATER M A, ROY D, DARLING K A, et al. The thermal stability of nanocrystalline copper cryogenically milled with tungsten[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 558: 226-233.
- [14] LU T, CHEN C, LI P, et al. Enhanced mechanical and electrical properties of in situ synthesized nano-tungsten dispersion-strengthened copper alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 799: 140161.
- [15] RAJKOVIC V, BOZIC D, JOVANOVIC M T. Effects of copper and Al_2O_3 particles on characteristics of Cu- Al_2O_3 composites[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(4): 1962-1970.
- [16] ANDERSON K R, GROZA J R, DRESHFIELD R L, et al. Microstructural evolution and thermal stability of precipitation-strengthened Cu-8Cr-4Nb alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1993, 169(1/2): 167-175.
- [17] ZHANG Z Y, SUN L X, TAO N R. Raising thermal stability of nanograins in a CuCrZr alloy by precipitates on grain boundaries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 867:159016.
- [18] ZHOU X, HU Z, YI D. Enhancing the oxidation resistance and electrical conductivity of alumina reinforced copper-based composites via introducing Ag and annealing treatment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 787:786-793.
- [19] EGUCHI H, ARAI M, FUJII S, et al. Effect of Ag content on grain growth during reversion in precipitation hardened Cu-Cr-Zr-Ag alloys [C]//Proceedings of the 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing. Springer, Cham, 2013: 2277-2284.
- [20] 胡号旗,许赫,杨丽景,等.高强高导铜铬锆合金的最新研究进展[J].材料导报,2018,32(3):453-460.
- [21] MAKI K, ITO Y, MATSUNAGA H, et al. Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(10): 777-780.
- [22] 邹善江,王俊峰,钟淑伟潇,等.微量 Mg 元素添加对 Cu-Cr 合金析出行为及性能的影响[J].材料研究学报,2019,33(7):552-560.
- [23] NISHIKAWA K I, SEMBOSHI S, KONNO T J. Transmission electron microscopy observations on Cu-Mg alloy systems[C]//Designing of Interfacial Structures in Advanced Materials and Their Joints. Sakai, Osaka, 2007:599-8531.
- [24] FREDERICK M J, GOSWAMI R, RAMANATH G. Sequence of Mg segregation, grain growth, and interfacial MgO formation in Cu-Mg alloy films on SiO_2 during vacuum annealing[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(10): 5966-5972.
- [25] 刘燕声,赵骧,梁志德.工业纯铜的异步冷轧及再结晶织构研究[J].金属学报,1990(3):126-130.
- [26] RIDHA A A, HUTCHINSON W B. Recrystallisation mechanisms and the origin of cube texture in copper[J]. *Acta Metallurgica*, 1982, 30(10): 1929-1939.