

形变热处理对 C19210 合金组织与性能的影响

李欣洋¹, 张梦飞¹, 赵宇宏¹, 顾 涛¹, 景 洁², 兰嘉祺², 苏 鹏², 黄家亮³

(1. 中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051; 2. 太原晋西春雷铜业有限公司, 山西 太原 030008; 3. 运城康道合金科技有限公司, 山西 河津 043399)

摘要: C19210 合金 Cu-Fe-P 系合金, 主要应用于电子工业领域。为提高 C19210 合金的综合性能(强度和电导率), 对其进行形变热处理, 研究形变热处理对合金力学性能、电导率以及显微组织的影响规律。结果表明, C19210 合金经 900 °C × 120 min 固溶处理后, 采用一次冷轧(80% 变形)+450 °C × 240 min 时效, 再经二次冷轧(50% 变形)+450 °C × 60 min 时效工艺处理, 综合性能达到最佳, 其维氏硬度为 134HV, 抗拉强度为 445 MPa, 电导率为 88.4% IACS, 伸长率为 16.3%。显微组织分析发现, 经过形变热处理, 合金可获得细小再结晶组织和大量弥散分布的细小析出相, 析出强化与细晶强化两者共同作用, 使合金具有良好的电导率和强度。本研究为 Cu-Fe-P 系合金的性能优化与工程应用提供了理论依据和工艺指导。

关键词: Cu-Fe-P 合金; 形变热处理; 固溶处理; 时效; 显微组织; 力学性能

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.007

中图分类号: TG166; TU512.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)03-0059-08

C19210 合金是一种低铁含量的 Cu-Fe-P 合金, 常作为电路引线框架、电连接器等关键部件的优选材料^[1-2]。Cu-Fe-P 合金经固溶处理后, 在时效过程中, Fe 和 P 元素会形成 Fe₃P、Fe₂P 等强化相, 能有效钉扎位错, 提升合金的强度与硬度。此外, 由于这些析出相对电子迁移的散射作用较小, 使得合金在具备高强度的同时, 还具有良好的电导率^[3-8]。形变热处理(冷轧+时效)是调控铜合金微观结构与性能的关键手段, 对 Cu-Fe-P 系合金综合的性能提升有显著效果。冷轧可有效细化晶粒并增加位错密度, 为强化相的析出提供充足形核位点; 随后的时效处理可促使纳米级析出相均匀分布, 提高合金强度和电导率。曹兴民等^[9]研究了 Cu-2.3Fe-0.03P-0.1Zn-Mg-Cr-Re 合金在形变热处理过程中的组织变化及工艺参数对性能的影响, 发现冷轧变形配合“高温+低温”分级时效能够促进纳米级析出相形成, 提高合金的强度和导电性能。郑济森等^[10]发现双级形变时效热处理更能促进强化相的析出, 提升合金的综合性能。Zhang 等^[11]通过调控形变热处理的时效温度和时间, 获得了均匀弥散分布的纳米级析出相, 大幅度提高了 Cu-3.19Fe-0.024P-0.077Zn 合金的强

度与电导率。Cui 等^[12]在 Cu-Ni-Fe-P 合金研究报道中指出, 经过形变热处理后, 可获得弥散分布的纳米级(Ni, Fe)₂P 析出相, 使合金具有 69.1% IACS 电导率和 658.7 MPa 拉伸强度的综合性能。

上述研究表明, 在形变热处理过程中, 冷轧变形与时效工艺的匹配关系对 Cu-Fe-P 系合金的析出行为和综合性能具有重要影响。通过合理设计形变热处理参数, 可有效调控析出相的尺寸、形貌及分布, 从而实现强度与电导率的协同优化。目前, 有关形变热处理对 Cu-Fe-P 系合金综合性能的优化仍在不断研究中, 在保证低成本的前提下, 提升 Cu-Fe-P 合金的性能具有重要意义。为此, 本研究以 C19210 合金为研究对象, 研究形变热处理工艺对合金组织和性能的影响规律, 为高性能 C19210 带材制备的工艺优化与工程应用提供理论依据。

1 实 验

实验用合金为 C19210 合金, 其化学成分见表 1。图 1 为 C19210 合金板带加工流程图。合金铸锭采用中频感应炉熔炼制备, 所得铸锭经热轧开坯, 随后对试样进行 900 °C × 120 min 固溶处理(水淬至室

收稿日期: 2025-10-14; 修订日期: 2025-12-29

基金项目: 太原市“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0113); 天津市科学基金(202401, 202403); 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX 2024C009); 浙江省博士后科研项目(ZJ2024127)

作者简介: 李欣洋(2002—), 男, 吉林吉林人, 硕士研究生, 研究方向: 有色金属, E-mail: Lixinyang020919@126.com; 通信作者: 赵宇宏, 教授, E-mail: 2335927093@qq.com

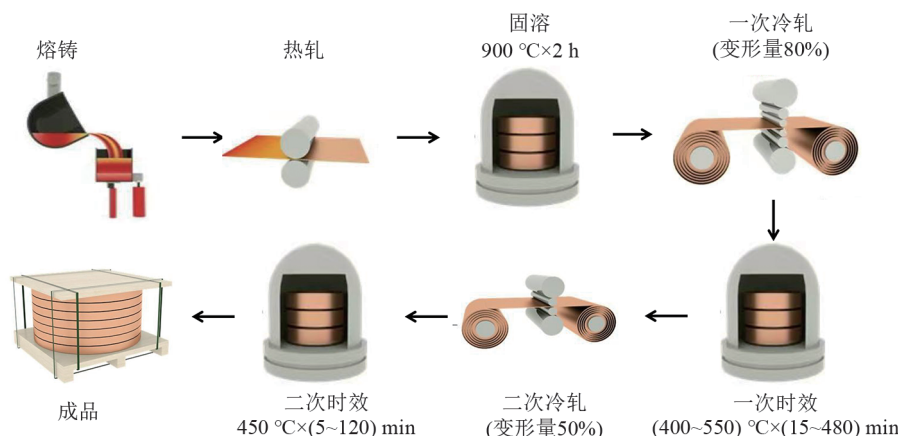


图1 C19210合金板带加工示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of processing paths for C19210 alloy strip

表1 C19210合金成分

Table 1 Chemical composition of C19210 alloy (% , mass fraction)

合金成分	Fe	P	Cu
质量分数	0.12	0.03	Bal

温)。固溶处理后，对试样进行形变热处理，具体工艺如下：第一次冷轧的总变形量为80%(试样厚度由原始的20.0 mm经多道次冷轧降低至4.0 mm)，随后在450、500和550 °C下进行时效处理，时效时间为15~480 min。之后进行第二次冷轧，总变形量为50%(厚度由4.0 mm降至2.0 mm，同样采用多道次轧制)，并在450 °C下进行第二次时效处理，保温时间为5~120 min。

采用维氏硬度计测定试样的显微硬度，载荷为0.5 kgf，保压时间为15 s。采用涡流导电仪(Sigma2008A)测试试样的电导率。每个数据点均测

量5次，取平均值及标准偏差。按照GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》，采用电子万能试验机测试合金的力学性能，拉伸试样尺寸为30 mm×11 mm×2 mm，试样标距为15 mm，拉伸速率为1 mm/min。采用Bruker D8型X射线衍射仪进行物相分析，扫描速度为2 (°)/min，扫描范围为20°~110°。再对试样进行磨抛处理，制备出金相试样，然后采用腐蚀液(2 g FeCl₃+3 mL HCl+50 mL H₂O)腐蚀试样并进行金相组织分析。采用JSM-IT800型扫描电子显微镜观察微观组织、析出相形貌和断口形貌，并结合能谱分析析出相的元素分布情况。

2 结果与讨论

2.1 合金固溶处理后的组织

如图2(a)所示，C19210合金在900 °C×120 min

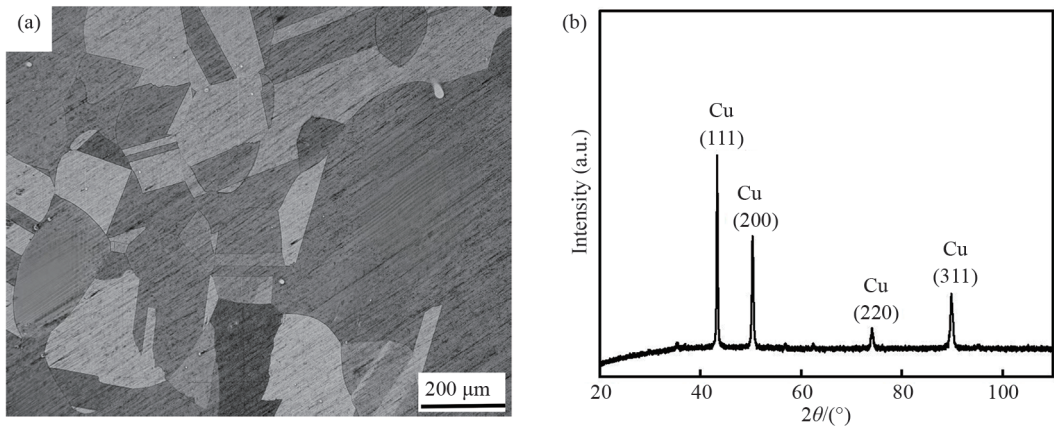


图2 C19210合金经900 °C×2 h固溶处理：(a)金相组织；(b)XRD图

Fig. 2 (a) Optical microstructure and (b) XRD result of C19210 alloy after solution treatment at 900 °C for 2 h

条件下固溶处理后,其微观组织特征为均匀的等轴晶组织。值得注意的是,固溶态组织中几乎未观察到明显的大尺寸颗粒析出相,表明在此条件下,大部分第二相已固溶到基体中,实现了组织的均匀化。图2(b)为固溶态试样对应的XRD结果,图中仅检测到Cu基体的特征衍射峰,并未出现析出相特征峰。这一结果进一步表明:在此条件下,主要强化相已经充分溶入固溶体中。

2.2 多级形变热处理对合金组织与性能的影响

2.2.1 一次冷轧与时效处理对硬度和电导率的影响

图3(a)为C19210试样经过一次冷轧与一次时效后的硬度曲线,合金硬度呈现先升高,随后缓慢下降的变化规律。这主要归因于时效过程中,发生了冷轧变形回复与再结晶过程,导致位错密度降低,从而削弱了位错强化作用。同时,文献[13]证明,该阶段合金的性能提升主要源于第二相析出强化与再结晶导致的细晶强化的协同作用,二者的综合作用使得合金硬度达到峰值。随着时效

时间延长,合金进入过时效,该阶段会发生晶粒长大以及析出相粗化现象,导致强化效果减弱,硬度下降。在450、500和550℃条件下,合金硬度分别在10、10和5 min时达到峰值,对应的硬度分别为153HV、149HV和141HV。随着时效温度升高,达到峰值硬度的时间缩短。这主要是由于较高的温度增强了溶质元素的扩散能力,促进了溶质元素的析出,从而在较短时间内形成大量析出相,起到强化效果^[14]。图3(b)展示了C19210合金时效后的电导率变化规律。可以看出,在各温度条件下,电导率均在初始阶段(0~1 h)迅速提高,随后进入相对稳定区间。最终在400、450和500℃下,电导率分别稳定在84.9%、82.4%和81.9% IACS。相关研究报道表明,Cu合金的电阻率与固溶在基体中的元素含量密切相关,其关系如公式(1)所示

$$\rho = c \times \varepsilon \quad \text{式(1)}$$

式中: ρ 是固溶在基体中的元素含量, ε 是Cu基体中单位溶质元素电阻率, c 是Cu基体溶质浓度。

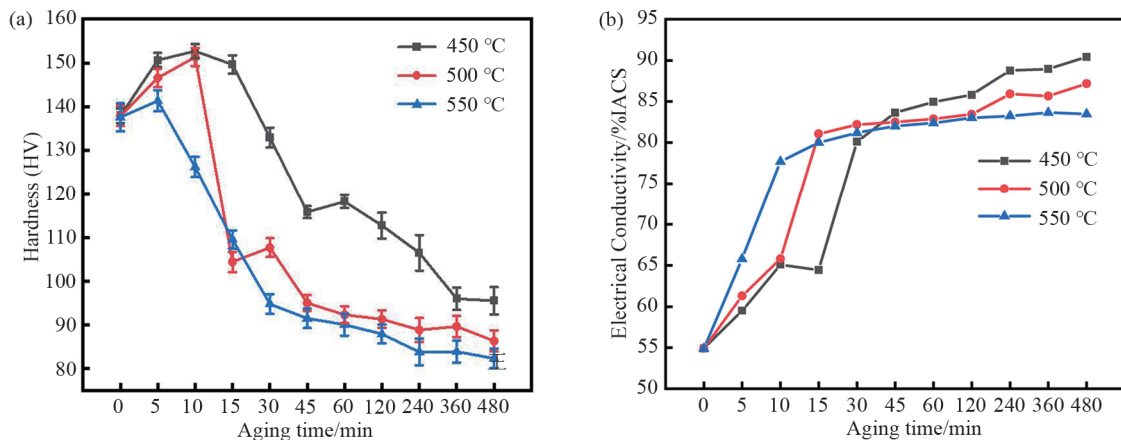


图3 C19210合金经一次冷轧+一次时效处理:(a)硬度;(b)电导率

Fig. 3 (a) Hardness and (b) conductivity of C19210 alloy after primary cold rolling and primary aging treatment

在时效早期,部分溶质原子从基体中析出,固溶原子含量降低,使电导率升高。随着时效进行,缺陷逐步回复且溶质浓度降低,析出动力随之减弱,电导率增幅减小并最终趋于稳定^[15]。结合硬度与电导率的变化规律可知,在450℃时效条件下合金表现出较佳的综合性能,即硬度达到峰值的同时电导率亦处于较高水平。因此,本研究选定450℃作为代表性时效温度,并根据曲线特征,分别将450℃×5 min、450℃×30 min和450℃×240 min

定义为欠时效、峰时效和过时效的典型状态,用于后续二次冷轧-时效匹配行为的研究。

2.2.2 一次冷轧与时效处理合金微观组织特征

一次冷轧变形后经450℃×5 min(欠时效)、450℃×30 min(峰时效)和450℃×240 min(过时效)处理的C19210合金试样组织如图4(a~c)所示。由图4(a)可见,欠时效状态下组织中仍保留明显的变形带结构,位错密度较高,相关文献报道这些形变带有利于Cu-Fe-P合金在时效过程中Fe₂P、

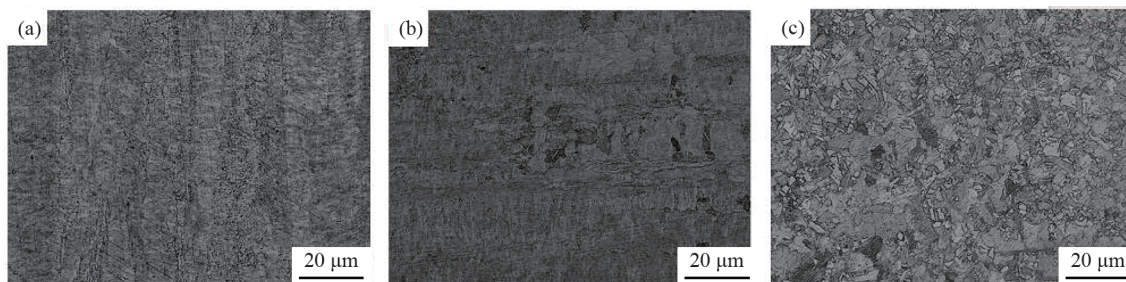


图4 C19210合金经过不同时效处理的微观组织:(a)欠时效;(b)峰时效;(c)过时效

Fig. 4 Microstructures of C19210 alloy after different aging treatments: (a) Under-aged; (b) Peak-aged; (c) Over-aged

Fe_3P 的析出^[16]。如图4(b)所示,时效时间延长至30 min,此时变形带附近发生回复与部分再结晶,降低了位错密度与残余内应力,提高了电导率。图4(c)表明,时效时间延长至240 min,合金组织发生完全再结晶,原先的变形带基本消失,晶粒细小且均匀,并且此过程中析出相显著增加,此时析出强化与细晶强化成为主导机制,表现出优异的综合性能^[17]。

2.2.3 二次冷轧及二次时效处理对硬度和电导率的影响

图5(a)表明,二次冷轧显著提高了C19210合金的初始硬度,主要原因是变形带增多引发位错塞积和加工硬化。在硬度测量过程中,每个数据点均取自至少5个随机位置,在相同测试条件下进行测量,并计算平均值及标准偏差。0~5 min内,位错在高温下发生回溶和再结晶启动,导致硬度快速下降^[18];之后在10 min(141HV)与30 min(136HV)硬度达到峰值;随后因晶粒粗化和析出相聚集进入过时效阶段,硬度降低^[19]。如图5(b)所示,电导率随

二次时效时间延长,表现出上升趋势。根据文献[20]可知,随着固溶原子的析出,基体中溶质浓度下降,电子散射减弱,电导率提升。一次时效状态显著影响电导率提升幅度:欠时效态($450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 3\text{ min}$)样品初始电导率最低(58.2%IACS),二次时效后升至约86.4%IACS;峰时效态($450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 10\text{ min}$)样品初期电导率较高,5 min内升至71.9%IACS后趋稳;过时效态($450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ min}$)样品初始电导率最高(88.4%IACS)且基本保持不变,表明溶质原子已充分析出,二次时效对导电性能影响有限。综上所述,一次时效过时效处理+ $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 的工艺实现了硬度与电导率的较优匹配。

2.2.4 二次冷轧及二次时效后合金微观组织

如图6(a)所示,C19210经过一次冷轧(80%变形量)和 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ min}$ 时效后,再经二次冷轧(50%变形量)和 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 时效处理后,析出相形貌中球形析出相颗粒在晶内呈弥散分布。根据图6(b~d)可知,A区域析出相富含Fe、P等元素,表明其主要为Fe-P析出相。结合微观组织特征,对

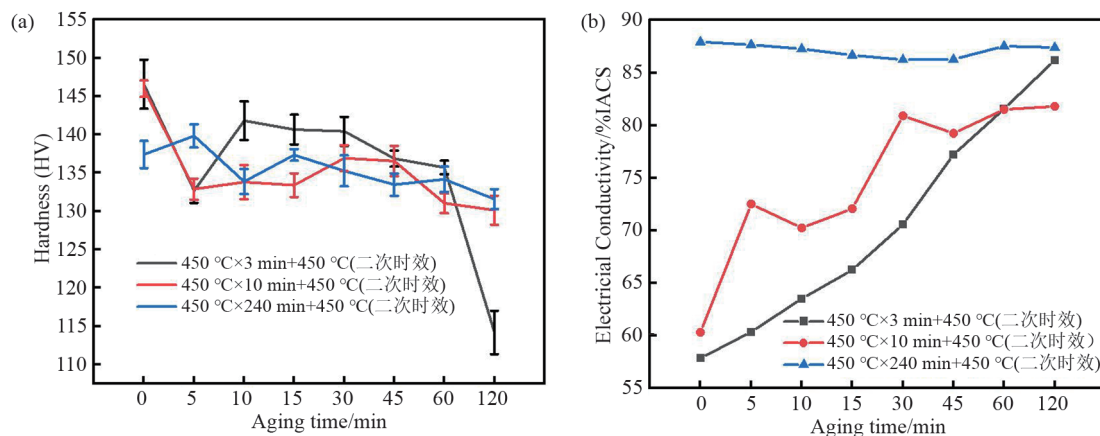


图5 C19210合金经二次时效后:(a)硬度;(b)电导率

Fig. 5 (a) Hardness and (b) conductivity of C19210 alloy after secondary aging treatment

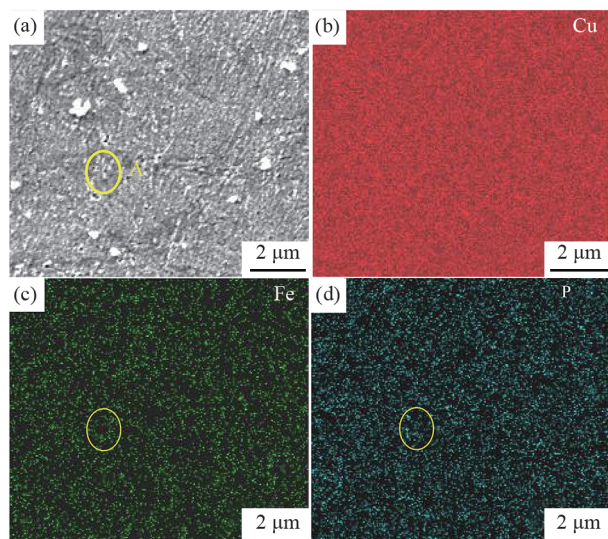


图6 C19210合金二次时效(a)析出相形貌与元素(b)Cu、(c)Fe、(d)P分布结果

Fig. 6 SEM microstructure and elemental distribution of precipitates in C19210 alloy after secondary aging treatment: (a) Precipitate morphology; (b) Cu; (c) Fe; (d) P

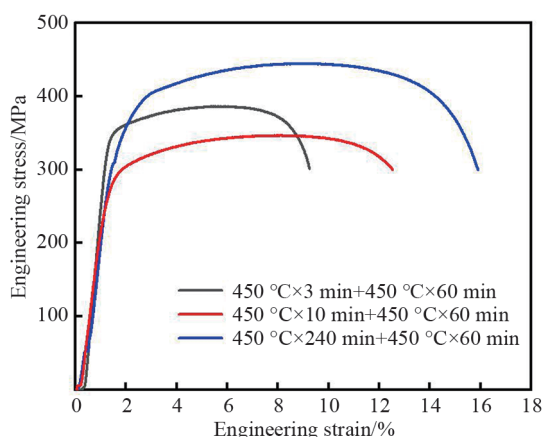


图7 C19210合金经二次时效处理后的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of C19210 alloy after secondary aging treatment

材料经形变热处理后的强度和电导率进行分析发现: 1) 二次冷轧引入高密度位错, 起到一定的加工硬化效果, 在时效过程中发生了回复再结晶, 发生了细晶强化; 2) 时效过程中 $\text{Fe}_2\text{P}/\text{Fe}_3\text{P}$ 纳米析出相弥散分布于晶内, 对位错起到钉扎作用, 提供析出强化; 3) Fe、P元素从基体中析出后降低了溶质浓度和残余应力, 减弱了电子散射, 从而提高了电导率。三者协同作用使C19210合金在强度保持445 MPa的同时电导率达到88.4%IACS。类似现象已在Cu-Fe-P合金研究中被多次报道和证实^[21-22]。

2.2.5 二次冷轧及二次时效合金力学性能影响

图7为在三种一次时效状态($450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 3\text{ min}$, $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 10\text{ min}$, $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ min}$)下, C19210经 $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 二次时效后的工程应力-应变曲线。从实验数据来看: $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ min} + 450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 样品的综合性能最优, 其抗拉强度峰值可达445 MPa, 伸长率为16.3%, 表现出优异的强塑性匹配; $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 3\text{ min} + 450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ (黑线)样品的强度略低(约390 MPa), 且塑性有所下降; 相比之下, $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 10\text{ min} + 450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 样品的强度最低(约350 MPa), 塑性有所改善。在二次时效过程中, 再结晶形成的细小晶粒结构发挥了至关重要的作用。由于晶粒细化, 材料的晶界密度增高, 有效抑制了晶粒长大, 发生细晶强化, 从而进一步增强了材料的强度; 同时, 细小的晶粒不仅提高了合金的硬度, 还对延展性产生了积极影响, 使其具有较高的强度和良好的塑性^[23-24]。

2.2.6 断口形貌分析

图8为C19210合金经 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 固溶120 min处理后, 采用一次冷轧(80%变形)+ $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 240\text{ min}$ 时效, 再经二次冷轧(50%变形)+ $450\text{ }^{\circ}\text{C} \times 60\text{ min}$ 时效工艺处理后的拉伸断口形貌。断口表面均匀分布大量等轴韧窝, 说明为韧性断裂。同时还发现形貌不规则的空洞, 这与李建国等^[25]的报道结果相似。出现该现象的原因可能是拉伸变形时, 较大的析出强化相容易从基体脱离形成微孔, 进而演变为空洞^[26]。

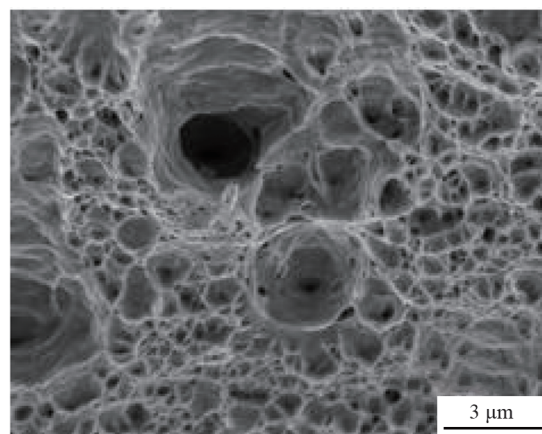


图8 C19210合金经二次时效处理后的断口SEM图

Fig. 8 Typical fracture morphology of C19210 alloy after secondary aging treatment

2.2.7 强化机制分析

C19210合金形变热处理过程中的强化源于多种强化机制的耦合,包括位错强化、析出强化以及晶界强化等。现对各强化机制的贡献进行分析。

首先,冷轧使合金获得了较高的位错密度,产生加工硬化效果,依据泰勒关系式:

$$\Delta\sigma_{\text{dis}} = \alpha M G b \sqrt{\rho} \quad \text{式(2)}$$

式中: α 为常数(取0.4), M 为切变-工程转换系数, G 为剪切模量(取48 GPa), b 为布氏位错矢量(取0.255 nm), ρ 为位错密度,单位为 m^{-2} 。

冷轧变形后,合金强化以加工硬化为主,冷轧变形越大,获得的位错密度越高,加工硬化效果越显著。

冷轧变形后,在450 °C下时效热处理,此过程中材料发生了回复再结晶和时效析出。时效初期,发生了部分回复,位错密度 ρ 有所降低,但由于回复尚不充分,位错密度仍处于较高水平,加工硬化贡献显著。同时,冷变形引入的大量位错为细小析出相的析出提供了形核位置,使得析出相弥散析出。时效初期析出相数量相对较少,析出相体积分数低、尺寸小,强化机制多以剪切型为主,整体析出强化贡献有限。此时强化仍然以加工硬化为主。随着时效时间延长,发生了回复和再结晶,这些高能位错区首先发生局部回复,形成低能位错亚结构,局部亚晶不断长大,部分区域达到临界能量条件而触发再结晶形核,形成等轴细晶,使加工硬化贡献显著下降,由于形成了细小的等轴晶(平均晶粒尺寸为4~6 μm),将起到细晶强化效果,其强化效果贡献如公式(2)所示。同时,时效进行过程中,大量弥散分布的纳米级强化相(平均尺寸约为60 nm)析出,根据公式(3)颗粒强化效果Orowan强化机制可知,有效间距 λ 减小,析出相平均半径 r 增大,使得析出强化效果增强。此时强化机制主要为析出强化和细晶强化共同作用,使得其硬度上升。并且由于析出相为非金属间化合物或微量析出金属,晶界杂质也较少,电子散射影响有限,使合金在保持较高强度的同时具有较高的电导率,合金屈服强度继续上升。

Hall-petch公式如下:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad \text{式(3)}$$

式中: σ_y 为屈服强度, σ_0 为基体固溶强化强度常数, k 为Hall-petch常数, d 为晶粒平均尺寸(平均尺寸为4~6 μm)。

析出强化(Orowan机制)公式如下:

$$\Delta\sigma_{\text{Orowan}} \approx \frac{0.4 M G b}{\lambda} \ln \left(\frac{r}{b} \right) \quad \text{式(4)}$$

式中: λ 为颗粒间有效间距, r 为平均半径, N 为体积分数密度。

随着时效时间的延长,进入过时效阶段,析出相逐渐粗化,间距 λ 增大,析出强化贡献下降,同时再结晶基本完成,晶粒趋于稳定。综合强化效果开始减弱,导致屈服强度略有降低。

综上所述,将本研究结果与已有文献的研究结果进行了对比,如图9所示。结果显示,本研究通过优化形变热处理工艺, C19210合金的电导率达到88.4%IACS,抗拉强度达到445 MPa。这表明经过优化的形变热处理工艺使得C19210在兼顾力学性能的基础上,有效改善了导电性能。

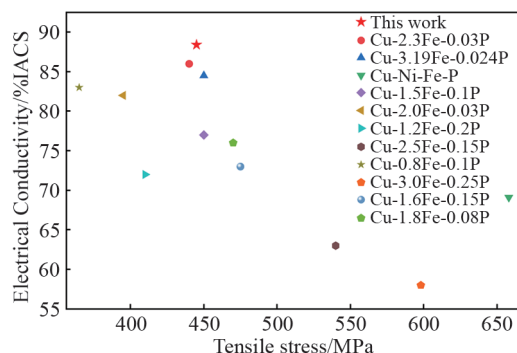


图9 Cu-Fe-P系合金性能对比

Fig. 9 Comparison of properties of Cu-Fe-P alloys

3 结 论

1) C19210合金经900 °C × 120 min固溶处理后,枝晶偏析基本消除,凝固过程中形成的Fe-P第二相充分溶解于铜基体中,显著改善了组织均匀性。

2) C19210合金经900 °C × 120 min固溶处理后,再经一次冷轧(80%变形)+450 °C × 240 min时效,以及二次冷轧(50%变形)+450 °C × 60 min时效工艺处理,可实现合金性能最佳组合,其维氏硬度达134HV,抗拉强度为445 MPa,电导率为88.4%IACS,伸长率为16.3%。

3) 经过形变热处理后, C19210合金获得平均晶

粒尺寸为4~6 μm 的细小再结晶组织,并析出大量弥散分布的纳米级强化相(平均尺寸约为60 nm)。经析出强化与细晶强化协同作用,合金表现出高强度与优异导电性能。

4)形变热处理后C19210合金断口特征为大量等轴韧窝,表明其断裂机制主要为韧性断裂。

参考文献:

- [1] Lu D P, Wang J, Zeng W J, et al. Study on high-strength and high-conductivity Cu-Fe-P alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 421(1/2): 254-259.
- [2] 李周, 肖柱, 姜雁斌, 等. 高强导电铜合金的成分设计、相变与制备[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 2009-2049.
- [3] 姜业欣, 姜花芬, 解浩峰, 等. 先进铜合金材料发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 84-92.
- [4] Hughes J, Toyama T, Gorley M, et al. Full-stage precipitation during aging of Cu-0.55Cr-0.07Zr alloy for high heat flux fusion reactor technology [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 801-810.
- [5] Goto M, Yamamoto T, Choi E A, et al. Physical background of significant increase in mechanical properties and fatigue strength of groove-rolled Cu-Ni-Si alloy with discontinuous precipitates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169569.
- [6] Li J, Huang g J, Mi X J, et al. Microstructure evolution and properties of a quaternary Cu-Ni-Co-Si alloy with high strength and conductivity [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 766: 138390.
- [7] 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: 101141.
- [8] Gorsse S, Ouvrard B, Gouné M, et al. Microstructural design of new high conductivity-high strength Cu-based alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 633: 42-47.
- [9] 曹兴民, 向朝建, 杨春秀, 等. 一种新型Cu-Fe-P系合金材料的组织性能分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(增刊3): 527-529.
- [10] 郑济森, 张峻嘉, 唐天轶, 等. 形变热处理工艺对Cu-Fe-P合金组织与性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5): 489-494.
- [11] Zhang C Z, Xiao X, Yang W D, et al. Microstructural evolution and properties of a Cu-Fe-Mn-P alloys with high strength and high conductivity[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108611.
- [12] Cui J G, Zhou R, Yang W D, et al. The microstructure and precipitation analysis of the Cu-Ni-Fe-P alloy with high property [J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 934: 148309.
- [13] Kirekawa N, Sato Y, Okamoto M, et al. Effect of cold rolling on cluster(1) dissolvability during artificial aging and formability during natural aging in Al-0.6Mg-1.0Si-0.5Cu alloy[J]. Journal of Materials Science, 2021, 57(6): 2345-2356.
- [14] 戴姣燕, 尹志民, 姜花芬, 等. 形变热处理对Cu-0.1Fe-0.03P合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2007(3): 289-292.
- [15] 赵久辉, 周涛, 肖桥平. 不同工艺加工C19210合金带材的组织与性能[J]. 铜业工程, 2023(4): 102-107.
- [16] 董琦祎, 汪明朴, 贾延琳, 等. 磷含量对Cu-Fe-P合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 75-79.
- [17] 韩宗恩, 高绪锋, 赖智博, 等. 固溶时效工艺对低Fe含量Cu-Fe合金组织性能的影响[J]. 有色金属, 2025, 15(1): 1-9.
- [18] Yang J Z, Bu K, Zhou Y J, et al. Microstructure, residual stress, and mechanical properties evolution of a Cu-Fe-P alloy under different conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 7896-7909.
- [19] 张真, 陆冰沪, 夏承东, 等. 时效状态对Cu-Cr-Zr系合金性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(2): 67-72.
- [20] Dong Q Y, Shen L N, Cao F, et al. Effect of thermomechanical processing on the microstructure and properties of a Cu-Fe-P alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(4): 1531-1539.
- [21] 马启东, 张宇博, 岳世鹏, 等. 深冷轧制及时效处理过程中Cu-Fe合金的组织性能演变[J]. 金属热处理, 2024, 49(4): 48-54.
- [22] 吕官丽, 苏娟华, 周延军, 等. 退火温度对Cu-Fe-P合金性能和第二相特征的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(9): 90-97.
- [23] Xiao X P, Xu H, Chen J S, et al. Aging properties and precipitates analysis of Cu-2.3Fe-0.03P alloy by

- thermomechanical treatments [J]. Materials Research Express, 2017, 4(11): 116511.
- [24] 王东锋, 康布熙, 田保红, 等.时效处理对 Cu-Fe-P 合金硬度和导电率的影响[J].洛阳工学院学报, 2002(3): 10-12.
- [25] 李建国, 黄瑞瑞, 张倩, 等.高熵合金的力学性能及变形行为研究进展[J].力学学报, 2020, 52(2): 333-359.
- [26] 张御天, 张满, 付彭怀.Mg 和 RE 对 Cu-Fe-P 合金组织性能的影响[J].铸造技术, 2009, 30(4): 523-527.

Effects of Thermo-mechanical Treatment on Microstructure and Properties of C19210 Alloy

Li Xinyang¹, Zhang Mengfei¹, Zhao Yuhong¹, Gu Tao¹, Jing Jie², Lan Jiaqi², Su Peng², Huang Jialiang³

(1. School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Taiyuan Jinxi Chunlei Copper Company Limited, Taiyuan 030008, China; 3. Yuncheng Kangdao Metal Technology Company Limited, Hejin 043399, China)

Abstract: C19210 is one of the Cu-Fe-P alloys extensively employed in the electronics industry. In order to enhance strength and electrical conductivity of the alloy, thermo-mechanical treatment was applied. In this work, the influences of deformation heat treatment on the mechanical properties, electrical conductivity, and microstructure of C19210 were investigated. Results showed that the optimal properties, including a Vickers hardness of 134HV, tensile strength of 445 MPa, electrical conductivity of 88.4%IACS, and elongation of 16.3%, can be achieved through an optimized combinatorial process: solution treatment at 900 °C for 120 min, primary cold rolling (80% reduction) with aging at 450 °C for 240 min, followed by secondary cold rolling (50% reduction) and aging at 450 °C for 60 min. Microstructural observations revealed that combined effects of precipitation strengthening from dispersed precipitates and grain refinement from fine recrystallized grains contributed to the improvement of strength and electrical conductivity. These findings provided a theoretical and practical foundation for optimizing the performance and engineering application of Cu-Fe-P alloys.

Key words: Cu-Fe-P alloy; thermo-mechanical treatment; solution treatment; aging; microstructure; mechanical property

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.007

引文格式: 李欣洋, 张梦飞, 赵宇宏, 顾涛, 景洁, 兰嘉祺, 苏鹏, 黄家亮. 形变热处理对 C19210 合金组织与性能的影响[J]. 铜业工程, 2026(3): 59-66.

Li Xinyang, Zhang Mengfei, Zhao Yuhong, Gu Tao, Jing Jie, Lan Jiaqi, Su Peng, Huang Jialiang. Effects of thermo-mechanical treatment on microstructure and properties of C19210 alloy[J]. Copper Engineering, 2026(3): 59-66.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc