

# 高强高导铜银合金线材制备工艺研究

李永弟<sup>1</sup>, 吴镇宇<sup>1</sup>, 潘 凯<sup>1,2\*</sup>, 张鹏鹏<sup>1,2</sup>, 韦 毅<sup>1,2</sup>, 陆泰榕<sup>1</sup>

<sup>1</sup>广西产研院新型功能材料研究所有限公司, 广西 南宁

<sup>2</sup>广西零到壹科技有限责任公司, 广西 南宁

收稿日期: 2025年8月1日; 录用日期: 2025年8月27日; 发布日期: 2025年9月3日

## 摘 要

采用真空熔炼、下引连铸、自动冷轧和连续拉拔相结合的工艺制备了直径0.9 mm、1 wt%银含量的高强度高导铜银合金线材, 通过元素分析、金相显微镜、扫描电镜、拉伸试验以及导电率等测试手段, 表明在熔炼炉真空度10~50 Pa、熔炼温度1200℃、保温时间1小时、牵引速度80 mm/min、冷轧速度20 m/min、拉拔速度230 m/min等工艺条件下, 铜银合金线材具有较优异的综合性能, 其氧含量、抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和导电率分别为0.52 ppm、529 MPa、498 Mpa、1%和91% IACS。与市售同类产品相比, 氧含量低92.4%、抗拉强度、屈服强度和导电率分别高5.6%、10.2%和3%。

## 关键词

铜银合金, 高强高导, 微观组织, 线材

# Research on the Preparation Process of High Strength and High Conductivity Copper-Silver Alloy Wires

Yongdi Li<sup>1</sup>, Zhenyu Wu<sup>1</sup>, Kai Pan<sup>1,2\*</sup>, Pengpeng Zhang<sup>1,2</sup>, Yi Wei<sup>1,2</sup>, Tairong Lu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of New Functional Materials Co., Ltd., Guangxi Institute of Industrial Technology, Nanning Guangxi

<sup>2</sup>Guangxi Zero to One Technology Co., Ltd., Nanning Guangxi

Received: Aug. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2025

## Abstract

A high-strength and high-conductivity copper-silver alloy wire with a diameter of 0.9 mm and 1 wt%

\*通讯作者。

文章引用: 李永弟, 吴镇宇, 潘凯, 张鹏鹏, 韦毅, 陆泰榕. 高强高导铜银合金线材制备工艺研究[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 117-123. DOI: 10.12677/meng.2025.123015

silver content was prepared using a process combining vacuum melting, downward continuous casting, automatic cold rolling, and continuous drawing. Tests such as elemental analysis, metallographic microscopy, scanning electron microscopy, tensile test and conductivity measurement showed that under the process conditions of a melting furnace vacuum degree of 10~50 Pa, melting temperature of 1200°C, holding time of 1 hour, traction speed of 80 mm/min, cold rolling speed of 20 m/min and drawing speed of 230 m/min, the copper-silver alloy wires had excellent comprehensive properties. Its oxygen content, tensile strength, yield strength, elongation after fracture and conductivity were 0.52 ppm, 529 MPa, 498 MPa, 1%, and 91% IACS, respectively. Compared with similar commercially available products, its oxygen content was 92.4% lower, and its tensile strength, yield strength and conductivity were 5.6%, 10.2% and 3% higher respectively.

## Keywords

Copper-Silver Alloy, High Strength and High Conductivity, Microstructure, Wire

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

高强高导铜合金是一种具有优良综合性能的有色金属材料,广泛应用于电子信息、新能源汽车、航空航天、高速铁路及工程机械等领域[1][2]。随着当代工业的迅速进步,对这类材料的机械性能和电子性能提出了更严苛的需求。但是,铜合金的硬度与导电性之间存在相互限制的联系,怎样解决两者之间的制约关系这一难题依然是目前研究的核心和焦点。为最大程度地提升铜合金的硬度和导电性,除了加入适当的合金元素外,工艺的改善和优化也极为关键。

高强度高导电铜合金主要包括铜银系列、铜铬(锆)系列、铜铁(磷)系列、铜铌系列、铜镍(硅)系列、铜镁系列以及弥散强化铜合金等。其中,铜银合金作为一种典型的高强度高导铜合金,展现出较为优异的综合性能以及良好的变形加工能力[3][4]。在铜基体中添加银元素进行合金化处理,能够显著提高材料的强度,并且与其他添加金属(如 Zr、Fe、Ni、Cd 等)相比,对导电率的影响较小[2]。研究显示,Ag 元素的加入能明显提升铜合金的强度,但随着 Ag 含量的增加,导电率会大幅降低[5]-[7],特别是当 Ag 含量超过 4 wt%时,经后续加工后的 Cu-Ag 合金导电率通常降低至 80% IACS 左右[8]-[10]。为进一步增强高强高导电铜合金的总体性能,研究人员探究了多种铜合金的制备方式。Hanjiang Wu 等[11]研究了真空连续铸造技术结合冷拉和中间退火工艺制备了铜银合金线材,随着线径减小或银含量增加,合金线的拉伸强度逐渐升高,而导电性降低。王树森等[12]研究了真空熔炼和固溶及时效处理后加工的合金其抗拉强度先升高而后趋于稳定,导电率则缓慢下降;李冬俊等[13]研究水平连铸杆坯为连续挤压 + 轧制 + 拉拔工艺制备铜银合金线材,可消除部分铸造缺陷,提升合金线材的抗拉强度。上述加工工艺虽然可以在一定程度上改善 Cu-Ag 合金的一些性能,但综合性能仍不够理想。因此,为提高高强高导铜合金的整体性能,找到一种更简单通用并适合大规模生产的工艺至关重要。

本文针对常用的 1 wt%银含量的铜银合金,采用真空熔炼下引连铸技术制备合金杆坯,随后通过自动冷轧和连续拉拔工艺,将其加工成 0.9 mm 的铜合金线材,采用元素分析、金相显微镜、扫描电镜、拉伸试验以及导电率测试等手段,研究加工工艺和合金的组织与性能,并与从日本进口的市售同类产品(线径 0.9 mm、1 wt%银含量的铜银合,未知具体牌号、标准及可能的工艺路线)进行对比,以期为高强高导

铜合金加工技术的开发与应用提供参考依据。

## 2. 试样制备与试验方法

### 2.1. 试样制备

以纯度为 99.95% 的电解铜和纯度为 99.99% 的纯银为原材料, 采用真空熔炼 - 下引连铸 - 自动冷轧 - 连续拉拔的工艺制备铜银合金线材, 具体步骤如下:

(1) 真空熔炼: 依据合金的既定成分精确配料, 然后将配好的原料置于真空熔炼炉中进行熔炼, 熔炼温度 1180℃~1220℃, 到达设定温度后保温 0.5~1.5 小时, 同时将熔炼炉真空度维持在 10~50 Pa。在熔炼过程中, 借助电磁搅拌使合金成分均匀。

(2) 下引连铸: 保温结束后, 打开伺服牵引系统开关将铜合金杆引出, 铜杆牵引速度 60~100 mm/min, 控制冷却水温为 25℃, 得到直径 8 mm 的铜合金杆。

(3) 自动冷轧: 将铜合金杆经过自动冷轧机轧制成直径为 3 mm 以下的铜合金线, 冷轧道次为 8 次, 冷轧速度为 25~30 m/min。

(4) 连续拉拔: 将上述铜合金线坯拉拔成直径为 0.9 的铜合金线, 拉拔次数为 12 次, 拉拔速率 210~250 m/min。

### 2.1. 试验方法

通过设计正交实验, 优化确定熔炼温度、保温时间、牵引速度、冷轧速度和拉拔速度这五大关键工艺参数, 最佳的关键工艺参数为: 熔炼温度 1200℃、保温时间 1 小时、牵引速度 80 mm/min、冷轧速度 20 m/min 和拉拔速度 230 m/min。利用 ICAP 7400 电感耦合等离子体发射光谱仪和 ELEMENTRAC ONHp 氧氮氢分析仪对铜合金的化学成分进行分析; 将铜合金样品依次经过镶嵌、磨光、抛光、腐蚀等工序制备金相试样, 腐蚀液按照 15 mL HCl + 5g FeCl<sub>3</sub> + 100 mL H<sub>2</sub>O 的比例进行配制, 侵蚀时刻控制在 5~8 秒, 使用 Olympus DSX510 观察样本的显微结构; 采用 Oxford C-nano 电子背散射衍射(EBSD)获得微观织构, 并通过 Channel5 软件分析择优取向等信息; 使用 30 kN 材料测试机(HY-3080), 依照 GB/T 228.1-2021《金属材料拉伸测试第 1 部分: 室温测试方法》对样本执行拉伸测试; 使用 Hitachi S4800 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断裂形态; 运用 DQ-1 电桥夹具和 ZY9987 数字微欧计在 20℃ 的测试温度下对线材的导电性进行测试。

## 3. 实验结果与讨论

### 3.1. 化学成分

铜合金生产的主要原材料包括电解铜及其添加的金属单质, 由于电解铜在生产过程中不可避免地会引入一些微量杂质元素, 这些元素主要包括氧(O)、硫(S)、磷(P)、硅(Si)、砷(As)、硒(Se)、铁(Fe)等。尽管这些微量杂质元素的含量不高, 通常单个元素的比重小于 0.01%, 但它们对铜合金的整体性能具有明显影响。除了电解铜带入的杂质外, 熔炼铸造工艺也会引入一部分杂质元素。在铜杆加工过程中, 尤其是在拉丝阶段, 这些微量杂质元素的影响尤为显著, 可能导致材料加工困难或降低加工后材料的性能, 特别是显著降低铜合金的导电率。因此, 在制备高性能铜合金材料的过程中, 排除微量杂质元素的影响是至关重要的实验环节。在本研究中, 铜银合金的成分设计为铜(Cu)含量不少于 98.98%, 银(Ag)含量为 1%, 氧(O)含量不超过  $2 \times 10^{-6}$ , 其他杂质元素的总量小于  $30 \times 10^{-6}$ 。本实验铜银合金与市场上某同类产品的化学成分对比见表 1。从表中可看出, 两种合金的银含量基本一致。本实验制备的铜银合金铜含量为 98.997%, 氧含量仅为 0.000052% (即 0.52 ppm), 而市场上某同类产品的铜含量为 98.991%, 氧含量为

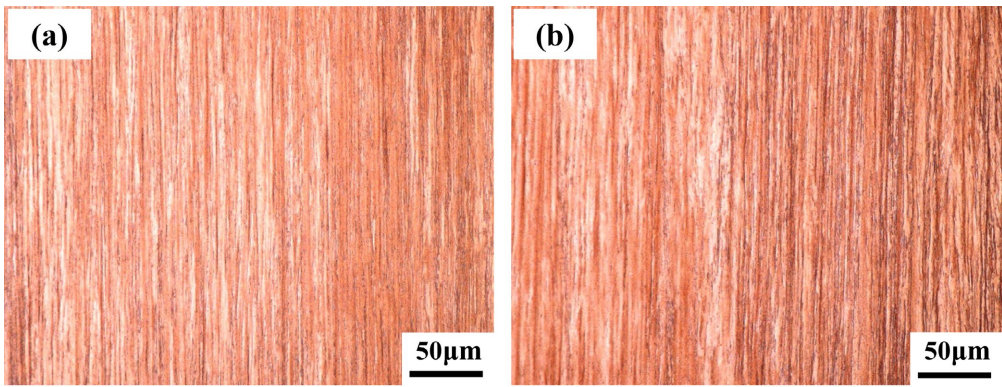
0.000687% (即 6.87 ppm), 本研究的铜银合金的氧含量低 92.4%。其他杂质元素含量方面, 差别较大的有硫(S)、硅(Si)、铁(Fe)等元素。

**Table 1.** Main chemical composition of Cu-Ag alloy  
**表 1.** 铜银合金主要化学成分表

| 指标 | Cu (%) | Ag (%) | O (%)    | S (%)  | P (%)  | Si (%) | As (%) | Se (%) | Fe (%) | 其他杂质 (%) |
|----|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 1# | 98.997 | 0.996  | 0.000052 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0006 | 0.0006 | 0.0005 | 0.0005 | ≤0.002   |
| 2# | 98.991 | 0.997  | 0.000687 | 0.0013 | 0.0008 | 0.0012 | 0.0011 | 0.0007 | 0.0012 | ≤0.005   |

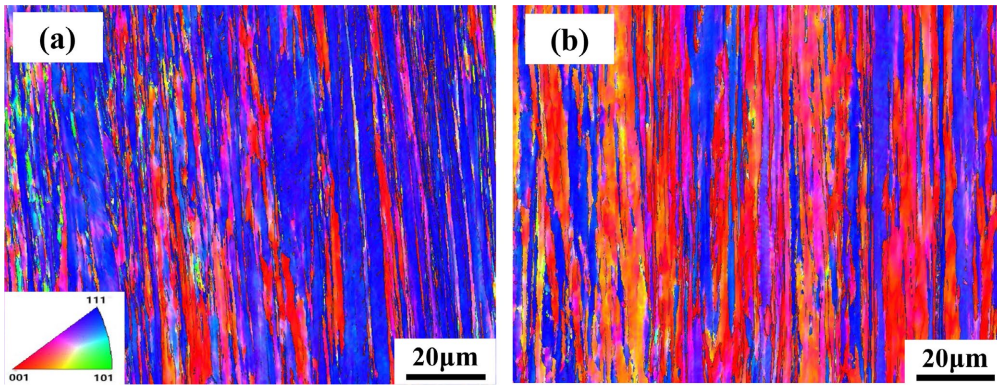
### 3.2. 微观组织

铜银合金沿拉拔方向(纵截面)的微观组织如图 1 所示。在本实验中, 铜银合金的初始坯料直径为 8.0 毫米, 经过一系列轧制与拉拔工艺处理后, 最终被制备成直径 0.9 毫米的线材, 在这一系列过程中总变形量超过 98%。在加工过程中合金材料承受了极大的拉拔力作用, 这种外力的施加使得合金内部发生了剧烈的塑性变形, 促使合金内部的晶粒沿着拉拔方向发生了显著的伸长, 形成了细小且致密的纤维状组织结构。从图 1(a)中可以观察到, 这些纤维状晶粒之间的界面呈现出连续且规则的直线状, 界面清晰且分布均匀, 整体结构显得规则和有序。这种组织结构的形成, 表明在加工过程中合金材料经历了显著的形变强化效应, 这种效应可提升合金的整体强度和力学性能。与此同时, 图 1(b)展示了市售某进口铜银合金产品的显微组织情况。通过对比分析可以发现, 与本实验制备的样品相比, 该进口产品部分区域的纤维组织呈现不连续的分布状态, 在尺寸分布上显得不够均匀, 这种显微组织上的差异, 很可能对产品的力学性能产生不利影响。



**Figure 1.** Longitudinal section microstructure of the Cu-Ag alloy (a) This experiment; (b) Commercially product  
**图 1.** Cu-Ag 合金纵截面的显微组织(a)本实验; (b)市售产品

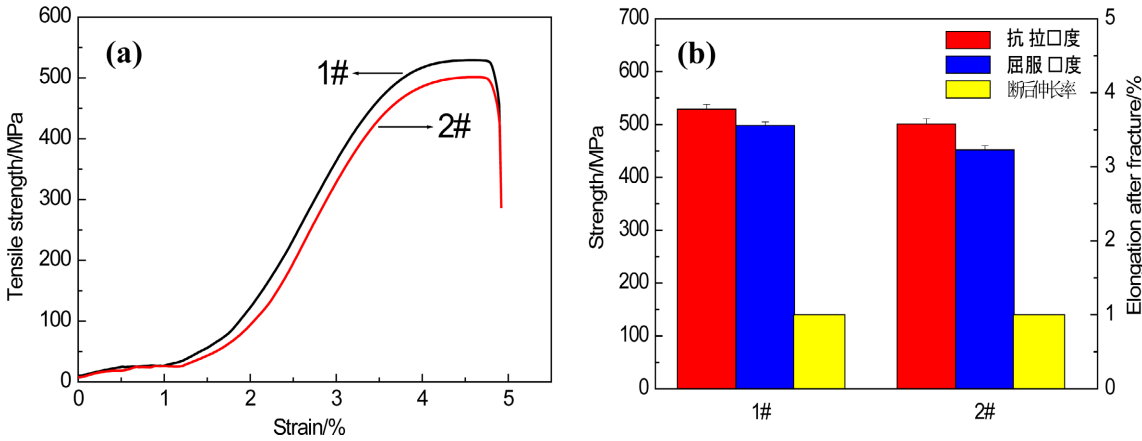
为进一步探究合金的微观结构, 对两种样品进行 EBSD 表征, 合金的取向成像图如图 2 所示。由图 2(a)可知, 本实验的合金多数晶粒取向为<111>, 部分晶粒取向为<100>和<110>, 内部晶粒呈现拉长的纤维状组织。图 2(b)展示了市售某进口铜银合金产品的显微组织情况, 该合金多数晶粒取向为<100>, 部分晶粒取向为<111>和<110>, 与本实验合金的微观织构有显著差异, 这种织构差异可能源于不同的制备工艺条件。通过软件进一步分析合金的晶粒尺寸, 本实验合金的晶粒尺寸更为细小且分布均匀, 平均晶粒尺寸为 3.2 μm, 而市售产品的晶粒尺寸分布范围较宽, 平均晶粒尺寸达到 4.7 μm。均匀细小的晶粒结构有助于提升合金的强度, 这与后续拉伸性能测试结果呈现出一定的关联性。



**Figure 2.** EBSD orientation imaging map of the Cu-Ag (a) This experiment; (b) Commercially product  
**图 2.** Cu-Ag 合金的 EBSD 取向成像图(a)本实验; (b)市售产品

### 3.3. 拉伸性能

对铜银合金进行拉伸试验，获得的典型拉伸曲线及相应的力学性能数据如图 3 所示。从图 3 能够看出，两者拉伸曲线大致相同，总延伸率均未超过 5%，整个拉伸过程中合金丝材出现屈服现象。本实验制备的铜银合金其抗拉强度达到了 529 MPa，屈服强度为 498 MPa，断后伸长率为 1%。相比之下，市场上销售的银铜合金产品，其抗拉强度为 501 MPa，屈服强度为 452 MPa，断后伸长率同样为 1%。断后伸长率这一性能指标两者无差异，下一步研究可通过优化加工工艺、后续热处理或中间热处理等方法改善其性能。通过比较可以发现，本实验制备的铜银合金在抗拉强度、屈服强度上相较于市售产品分别高 5.6%、10.2%。这一数据结果表明，通过本实验的方法，铜银合金的机械性能得到了明显提升。结合微观组织分析可知，材料内部组织的致密性及晶粒尺寸的细化是导致力学性能提升的关键因素。由于晶粒尺寸的减小导致晶界数量增加，阻碍了位错的运动，从而在材料受到外力作用时，需要更大的应力才能引发内部晶粒的塑性变形。这种微观结构的优化导致材料的强度和硬度得到增强，进而显著提升了铜银合金的力学性能。

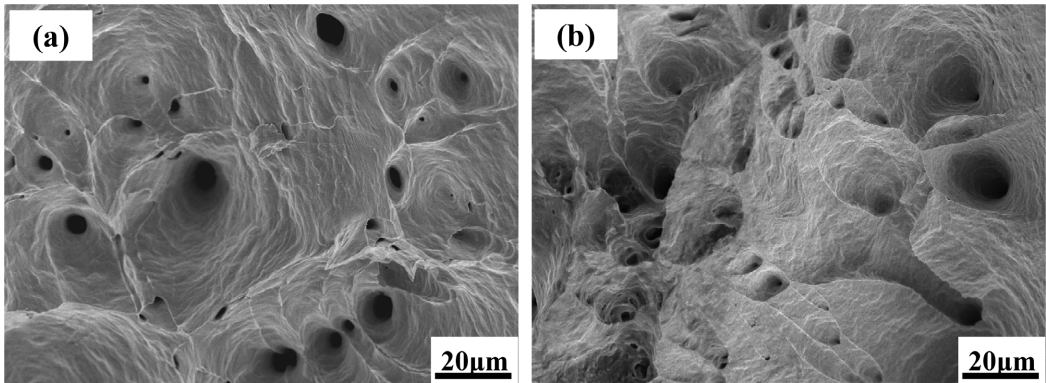


**Figure 3.** (a) Stress-strain curve of the Cu-Ag alloy and (b) mechanical properties  
**图 3.** (a) Cu-Ag 合金的应力-应变曲线和(b)力学性能

### 3.4. 断口形貌

图 4 展现了两种合金的拉伸断口形貌图像，从中能够观察到两种合金断口的特征。这些断口形貌在

一定程度上表现出相似性，均包含大量韧窝和蜂窝状平台断面，这表示它们均经历了典型的韧性断裂机制。从本实验制备的合金(图 4(a))发现，其韧窝深度较大，部分韧窝间存在相互连接现象，且韧窝周围分布着众多撕裂棱，这种微观结构使合金较高的抗拉能力。相比之下，市售产品的断口形貌(图 4(b))显示出较浅的韧窝深度和较为光滑的平台断面，撕裂棱数量亦较少，这反映出该合金的塑性变形能力较弱。结合显微组织分析，含有丰富撕裂棱的纤维组织为合金提供了显著的拉断抗力。此类组织结构使得合金在承受拉伸力时，能够更有效地抵抗断裂，从而展现出较高的抗拉强度。



**Figure 4.** Fracture morphology of the Cu-Ag alloy (a) This experiment; (b) Commercially product  
**图 4.** Cu-Ag 合金的断口形貌(a)本实验；(b)市售产品

### 3.5. 导电性能

在满足化学成分设计要求的前提下，导电性能成为评价铜合金综合性能的关键指标。对于体积较大的铸件，一般采用涡流导电仪进行导电性测量；而对于细小的线材，则更适宜使用电阻仪来测量。在本研究中，通过电阻仪对铜银合金的电阻率进行了测定，并借助科学计算将其转换为导电率，具体数据见表 2。表 2 呈现了两种不同来源的铜银合金在导电率上的明显差异。本研究的铜银合金展现出较高的导电性能，其导电率达到 91% IACS；而市售铜银合金的导电率相对较低，为 88% IACS。铜合金的电阻率主要是由声子和缺陷对电子的散射组成，缺陷包括点缺陷(杂质、空位及其他溶质原子)、线缺陷(位错)和平面缺陷(晶界和相界)。造成导电性能差异的主要原因：其一，本研究制备的铜银合金中氧含量较低，导致晶界处氧化亚铜的沉积量显著减少，有效降低了电子散射作用，从而提高了合金的导电率；其二，本研究采用的铜银合金在杂质控制上更为严格，并且本实验工艺制备的合金内部结构更为均匀致密，气孔、裂纹、夹杂等潜在的界面缺陷数量显著减少，这些缺陷对电子散射作用的控制也更为有效。综上分析，影响 Cu-Ag 合金导电性能的主要因素是杂质散射和界面散射。

**Table 2.** Conductivity of the Cu-Ag alloy  
**表 2.** 铜银合金导电性能

| 指标 | 电阻率 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ( $\mu\Omega \cdot \text{m}$ ) | 导电率(20℃) %IACS |
|----|------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1# | 0.01895                                                                | 91             |
| 2# | 0.01959                                                                | 88             |

## 4. 结论

(1) 采用真空熔炼 - 下引连铸 - 自动冷轧 - 连续拉拔的工艺制备了直径 0.9 mm、1 wt%银含量的高强

高导铜银合金线材,在熔炼炉真空度 10~50 Pa、熔炼温度 1200℃、保温时间 1 小时、牵引速度 80 mm/min、冷轧速度 20 m/min、拉拔速度 230 m/min 的关键工艺参数条件下,铜银合金线材的氧含量为 0.52 ppm、抗拉强度 529 MPa、屈服强度 498 Mpa、断后伸长率 1%、导电率 91% IACS。

(2) 本工艺生产的高强度高导铜银合金线材,与进口的同类产品相比,具有更加细小致密的纤维状组织结构,拉伸断口韧窝深度较大且韧窝周围分布大量撕裂棱,氧含量低 92.4%,抗拉强度、屈服强度和导电率分别高 5.6%、10.2%和 3%;这表明采用真空熔炼-下引连铸-自动冷轧-连续拉拔的工艺可制备综合性能优异的高强度高导铜银合金线材,这对高性能铜合金的生产具有重要的指导意义。

## 基金项目

中央引导地方科技发展资金项目(桂科 ZY22096014);南宁市江南区重点研发计划项目(20230715-05);广西产研计划项目(CYY-HT2023-JSJJ-0034)。

## 参考文献

- [1] 吴德振, 杨为良, 徐恒雷, 等. 高强度高导铜合金的应用与制备方法[J]. 热加工工艺, 2019, 48(4): 19-25.
- [2] 代雪琴, 贾淑果, 范俊玲, 等. 高强度高导铜合金的强化机理与研究热点[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(10): 18-26.
- [3] 张道琦, 张林, 郭晓, 等. Cu-Ag 高强度高导合金的研究现状与进展[J]. 材料导报, 2023, 37(13): 185-190.
- [4] 曹飞, 苟思文, 王志祥, 等. 高 Ag 含量 Cu-Ag 合金原位形变制备研究进展[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(5): 10-20.
- [5] 杨冉, 王要利, 宋克兴, 等. Ag 含量对竖引连铸 Cu-Ag 合金组织和性能影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(10): 31-37.
- [6] 李贵茂, 柳艳, 李延增, 等. Ag 含量对 Cu-Ag 合金组织及性能影响研究[J]. 铸造技术, 2018, 39(3): 530-532.
- [7] 杨文朋, 位高峰, 封存利, 等. Ag 含量对低合金化 Cu-Ag 合金拉拔线材组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(8): 2697-2707.
- [8] 朱利媛, 李雷, 冀国良, 等. Cu-4.0Ag 合金微细线制备工艺及性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1357-1360.
- [9] Zhu, X., Xiao, Z., An, J., Jiang, H., Jiang, Y. and Li, Z. (2021) Microstructure and Properties of Cu-Ag Alloy Prepared by Continuously Directional Solidification. *Journal of Alloys and Compounds*, **883**, Article ID: 160769. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160769>
- [10] Xie, M., Huang, W., Chen, H., Gong, L., Xie, W., Wang, H., et al. (2021) Microstructural Evolution and Strengthening Mechanisms in Cold-Rolled Cu-Ag Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **851**, Article ID: 156893. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156893>
- [11] Wu, H., Huang, T., Song, K., Zhou, Y., Li, S. and Zhang, Y. (2024) Effect of Large Deformation on Microstructure and Properties of Copper Alloy Wire. *Journal of Materials Research and Technology*, **29**, 5136-5148. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.02.153>
- [12] 王树森, 姚大伟, 张远望, 等. 固溶时效处理及强变形对 Cu-1wt%Ag 合金的组织 and 性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 89-92.
- [13] 李冬俊, 姚大伟, 张远望, 等. 铜银合金连续挤压微观组织与性能研究[J]. 电线电缆, 2020(5): 7-9, 21.