



铜基丝线材制备和组织性能研究进展

宋克兴^{1,2}, 周延军^{1,2}, 米绪军³, 肖柱⁴, 曹军⁵, 丁雨田⁶, 吴保安⁷, 封存利⁸, 李周⁴,
陈鼎彪⁹, 吕长春¹⁰, 胡勇⁶, 丁勇¹¹

- (1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023;
2. 有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 洛阳 471023;
3. 有研工程技术研究院有限公司, 北京 100088;
4. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
5. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 焦作 454000;
6. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050;
7. 重庆材料研究院有限公司, 重庆 400700;
8. 河南森格材料科技有限公司, 焦作 454010;
9. 常州恒丰特导股份有限公司, 常州 213000;
10. 河南优克电子材料有限公司, 济源 454650;
11. 浙江东尼电子股份有限公司, 湖州 313008)

摘要: 铜基丝线材广泛应用于集成电路键合线、音视频传输线缆、医疗器械有源线束以及各种电子元器件, 是保障系统电流和信号稳定传输的关键导体材料。本文围绕铜基丝线材制备工艺流程, 综述热型水平连铸、冷型竖引连铸制备铜基杆坯的工艺特点及其与定向凝固组织之间的关系, 阐述超细超精连续拉拔、热处理、表面涂镀等工艺参数对晶粒、析出相、表面镀层以及键合特征的影响规律, 最后叙述了“新基建”背景下铜基丝线材应用领域和装备技术方面的发展趋势。

关键词: 铜基材料; 丝线材; 热型水平连铸; 冷型竖引连铸; 连续拉拔; 表面涂镀

文章编号: 1004-0609(2020)-12-2845-30

中图分类号: TF11.31

文献标志码: A

数字和模拟信号传输几乎覆盖了航空航天、国防军工、电子信息、互联网、移动通讯、物联网、智能制造等现代国民经济的各个领域。高性能铜基丝线材因具有优异的传导性能(导电/导热)和良好的力学性能(强度、韧性), 常作为数字和模拟信号传输的重要导体材料, 广泛应用于集成电路键合线、音视频传输线缆、医疗器械有源线束及各种电子元器件^[1-3]。

随着上述领域用关键部件向高度集成化和微型化方向发展, 信号传输密度和安全性要求越来越高, 对铜基丝线材综合性能提出更高要求: 使用性能要求高导电、高伸长率; 工艺性能要求超细、超长、超精密。例如, 集成电路封装键合线间距 $\leq 50 \mu\text{m}$, 要求丝线材线径 $\leq 20 \mu\text{m}$ 、公差 $\pm 0.3 \mu\text{m}$ ^[4-5]; 高端音视频传

输领域, 中央电视台、国家大剧院等重点建设工程以及高端消费类影音设备, 要求音视频线缆实现高保真信号传输, 导体材料要求单晶铜加工线, 线径 $20\sim 100 \mu\text{m}$ 。

上述领域用铜基丝线材制备加工工艺主要包括: 连铸制备铸态杆坯 \rightarrow 多道次连续拉拔(粗拉、中拉、微拉) \rightarrow 表面涂镀^[6]。在丝线材热处理方面主要包括: 拉拔过程中线材在线退火工艺, 以保障连续拉拔稳定性; 终端线材在线退火工艺, 以保证获得优良组织和表面质量, 实现丝线材伸长率精确控制, 降低残余应力; 杆坯形变热处理技术, 提高力学性能和传导性能。铜基微细丝线材制备加工过程, 涉及铸态杆坯定向凝固组织和缺陷控制、超细超精连续拉拔工艺控制、表面

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0301400); 国家自然科学基金资助项目(52071133、51904090); 河南省自然科学基金资助项目(202300410139); 河南省创新型科技团队资助项目(C20150014); 河南省高等学校重点科研项目(19A430012)

收稿日期: 2020-08-19; **修订日期:** 2020-11-18

通信作者: 宋克兴, 教授, 博士; 电话: 13707697980; E-mail: kxsong@haust.edu.cn

镀覆稀贵金属膜控制, 以及使用性能和工艺性能调控等关键问题。

针对上述关键问题, 本文围绕高性能键合线、高保真音视频线缆、高可靠连接器等产品用高性能铜基丝线材的制备加工流程, 分别从热型水平连铸、冷型竖引连铸、连续拉拔、表面涂镀等方面阐述了铜基丝线材的国内外研究现状和相关成果, 探讨了铜基丝线材制备加工过程凝固组织定向生长规律和变形组织调控机制, 最后展望了铜基丝线材新领域应用和装备技术方面的发展趋势。

1 热型水平连铸制备铜基杆坯

1.1 热型水平连铸工艺特点

连铸制备高质量杆坯是开发高性能铜基丝线材的首要关键环节。对于高端音视频线领域用铜基丝线材, 坯杆具有单晶或平行于轴向柱状晶组织, 有利于后续微细变形加工和保障信号传输保真度。热传导方式决定了固-液界面形状和位置、晶粒数量和方向, 常规冷型连铸技术晶粒优先在结晶器内壁形核, 由于径向热传导效率远高于轴向, 晶粒沿径向生长形成垂直于轴向的晶粒组织(见图1), 固-液界面为深V型, 易在心头产生孔洞等铸造缺陷, 如图2(a)所示^[7]。

20世纪80年代, 日本千叶工业大学的大野笃美教授首次公开提出了将连续铸造和定向凝固结合起来的热型连铸技术(Ohno continuous casting, 简称OCC)。该技术采用加热结晶器铸型代替常规冷却铸型^[8-9], 金属熔体通过结晶器时温度仍在熔点之上, 固-液界面位于结晶器末端, 通过热型结晶器+铸坯强制冷却, 消除了晶粒在结晶器内壁生成, 改变了热传导路径, 轴向热传导效率远高于径向热传导效率, 实现轴向柱状晶组织形成^[7, 10-11]。同时, 固-液界面形状由深V型变为凸向金属液方向的C型, 如图2(b)所示, 消除了孔洞等缺陷。

热型连铸技术主要有两个工艺参数: GL 为固-液界面前沿液相中的温度梯度, R 为界面凝固速率(晶体生长速率)。温度梯度和凝固速率两者相对独立变化, 任一参数的变动都会影响合金凝固组织。凝固速率主要通过连铸速度调控, 温度梯度主要与铸型温度和冷却水流量有关。因此, 可以通过改变热型连铸设备的连铸速度、铸型温度和冷却水流量等参数, 调控铸态杆坯凝固组织。研究发现, GL/R 控制晶体长大形态, 而 $GL \cdot R$ 则影响晶粒大小。 GL/R 减小时, 晶体形态演变规律为: 低速生长的平面晶→胞晶→枝晶→细晶→

高速生长平面晶; $GL \cdot R$ 增大, 晶体尺寸、间距减小。连铸工艺参数控制的关键是在保持较高、稳定的温度梯度前提下, 提高凝固速率, 使组织得到细化, 并形成具有单晶或轴向柱状晶组织的高质量杆坯^[12-14]。

1990年, 西安交通大学邢建东翻译大野笃美的《金属的凝固理论、实践及应用》^[7], 将热型连铸技术(OCC)介绍到国内。自热型连铸技术提出以来, 国内外研究人员基于OCC原理不断对连铸工艺进行改进和开发, 逐步开发出热型下引式连续铸造、热型虹吸下引式连续铸造、热型上引式连续铸造、热型水平式连续铸造等工艺和装备, 如图3所示^[7, 15-17]。

西北工业大学凝固技术国家重点实验室傅恒志、范新会等^[18-20]自20世纪90年代初开始研究热型水平连铸技术在制备单晶组织方面的应用, 在实验室内研发出基于OCC原理的单晶连铸设备, 制备出直径为8 mm的单晶铝、铜线材。单晶连铸技术是OCC技术的进一步发展, 其理论依据是晶体生长过程中的竞争机制, 即优先生长方向与热流方向相一致, 处于最有利条件的晶体将优先生长, 逐步淘汰其余晶体。通过工艺参数优化, 控制凝固界面形态及铸锭的热流场分布, 促进竞争生长, 可实现单晶连铸。

1.2 热型水平连铸制备单晶铜

热型水平连铸工艺参数决定了固-液界面形状和位置, 并影响晶粒竞争生长行为。其中, 固-液界面形状影响杆坯内部凝固组织缺陷情况, 固-液界面位置影响杆坯表面质量, 晶粒竞争生长行为影响单晶或轴向柱状晶凝固组织的形成趋势。国内外学者针对热型水平连铸制备单晶铜的研究, 主要集中在: 采用微观组织模拟手段研究连铸工艺参数对固-液界面形状、晶粒生长行为以及单晶形成机制的影响; 采用实验手段研究连铸工艺参数对导电性能、力学性能、枝晶间距、断裂机制的影响规律。

1.2.1 热型水平连铸过程微观组织模拟

采用微观组织模拟可跟踪显示晶体形核、生长和组织形态转变过程, 定量预测枝晶形貌和晶粒度, 进而通过优化工艺参数获得理想的显微组织。丁雨田等^[21-25]构建了基于直接差分-元胞自动控制(CA-DD模型)的凝固过程微观组织演化宏-微观统一模型; 研究了连铸速度、冷却水温度和流量、铸型温度、熔体温度、冷却距离等热型连铸工艺参数对固-液界面、晶粒演化的影响规律, 探明了连铸工艺参数对固-液界面形状、位置以及晶粒竞争生长行为的作用机制; 揭示了单晶组织形成规律: 晶粒迅速淘汰阶段→柱状晶竞争生长阶段→单晶生长阶段。



图 1 常规冷型连铸技术制备的垂直于轴向的晶粒组织

Fig. 1 Grain structure perpendicular to axial direction prepared by conventional cold mould continuous casting

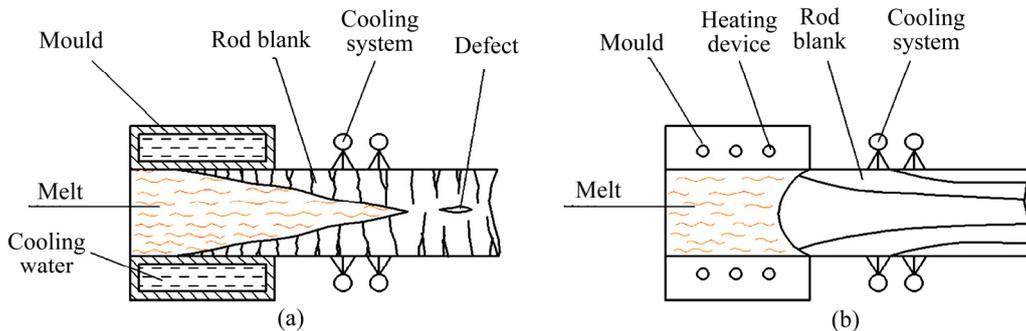


图 2 常规冷型连铸深 V 型固-液界面形状和热型水平连铸 C 型固-液界面形状^[7]

Fig. 2 Solid-liquid interface of deep V-shape in conventional cold mould continuous casting(a) and solid-liquid interface of C-type shape in hot mould horizontal continuous casting(b)^[7]

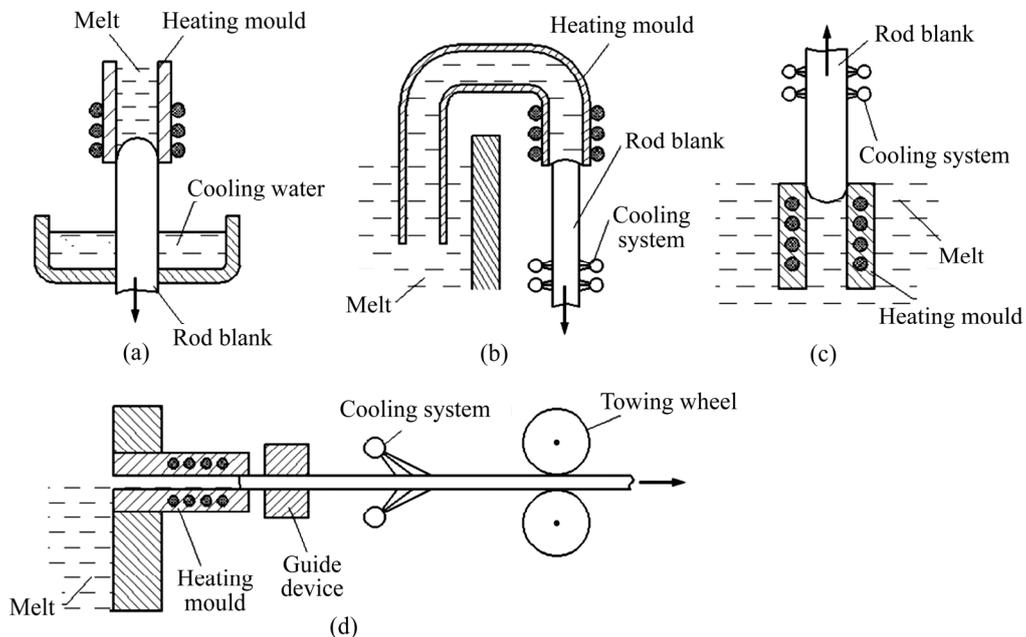


图 3 应用 OCC 原理的杆坯热型连铸方法^[7, 15-17]

Fig. 3 Hot mould continuous casting method based on OCC principle^[7, 15-17]: (a) Down drawing continuous casting; (b) Siphon down drawing continuous casting; (c) Up drawing continuous casting; (d) Horizontal continuous casting

图 4 和图 5 所示分别为连铸速度对固-液界面特征和晶粒组织的影响。连铸速度分别为 20、40 和 60 mm/min, 其他工艺参数为: 铸型温度 1090 °C、熔体

温度 1150 °C、冷却水温度 20 °C、冷却水流量 400 mL/min、冷却距离 30 mm。从图中可以看出, 随着连铸速度的增大, 固-液界面的凸起趋势逐渐减小, 固-

液界面的位置从铸型内部逐渐向铸型外移动, 晶粒的淘汰趋势减弱。连铸速度对固-液界面形状、位置和晶粒淘汰的影响较大, 是单晶铜热型水平连铸过程中影响晶粒组织演化的主要因素; 冷却强度对晶粒淘汰趋势影响不大, 但采用较高铸型温度和较高冷却强度可以保证杆坯表面质量和连铸过程不拉漏。

热型水平连铸制备单晶铜的晶粒组织演化过程如图6所示(连铸速度 30 mm/min)。在单晶连铸过程中, 连铸刚刚开始时, 靠近引锭处金属液由于过冷度较大, 形成了较多取向各异的晶粒, 此时由于晶粒数量较多, 而且取向差异比较大, 晶粒淘汰较快; 当淘汰掉一定数目的晶粒后, 由于所剩的晶粒取向较好且相差不大, 晶粒淘汰速率较慢; 在最后阶段, 晶粒数目越来越少,

但趋向非常接近, 以至于最后淘汰至一个晶粒所用的时间明显加长。

图7所示为不同连铸速度下微观组织模拟结果与实际试验结果的对比。由图7可知, 模拟结果和实际结果基本吻合, 与连铸速度为 30 mm/min 相比, 当连铸速度提高到 80 mm/min 时, 铜单晶的组织演化较为困难。

1.2.2 热型水平连铸工艺参数对单晶铜组织性能影响

国内热型连铸工艺制备单晶铜的相关研究单位主要有西北工业大学、西安交通大学、兰州理工大学、西安工业大学、北京科技大学、河南科技大学、江西理工大学、广东工业大学等^[26-34], 研究方向主要集中在单晶热型连铸技术的原理、技术特点, 以及连铸工

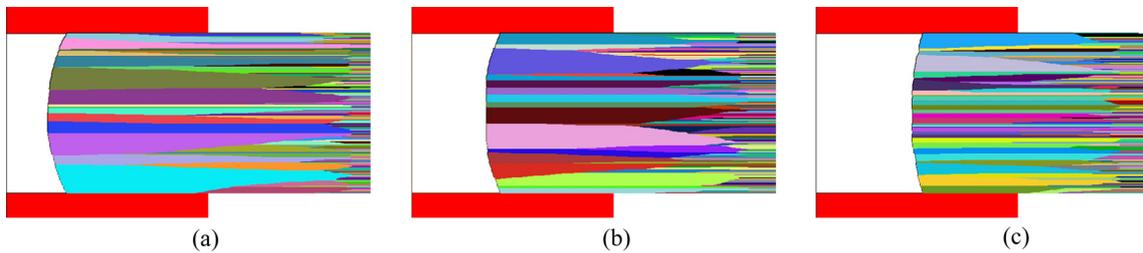


图4 连铸速度对固-液界面的影响^[21-22]

Fig. 4 Effect of continuous casting speed on solid-liquid interface^[21-22]: (a) 20 mm/min; (b) 40 mm/min; (c) 60 mm/min

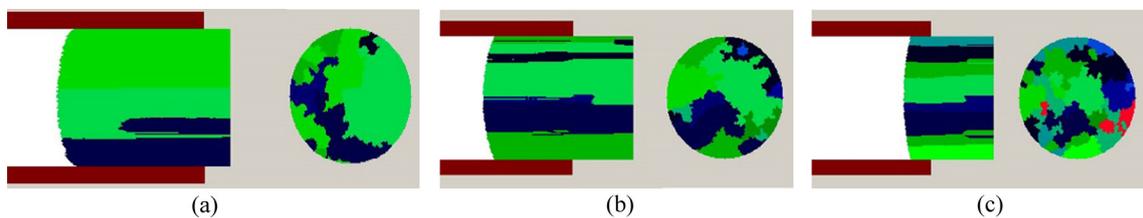


图5 连铸速度对晶粒淘汰的影响^[21]

Fig. 5 Effect of continuous casting speed on grain elimination^[21]: (a) 20 mm/min; (b) 40 mm/min; (c) 60 mm/min

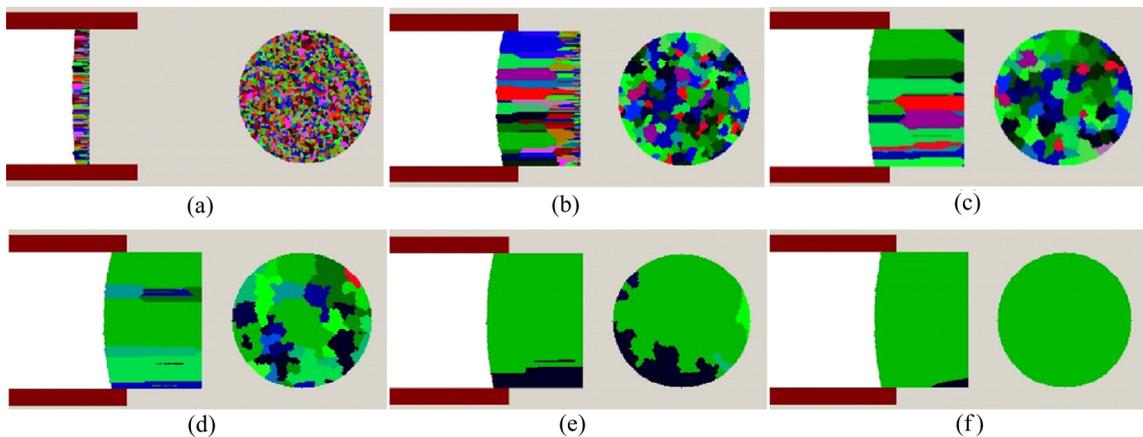


图6 铜单晶组织演化模拟图^[21]

Fig. 6 Microstructure evolution simulation of copper single crystal^[21]: (a) $t=1$ s; (b) $t=10$ s; (c) $t=20$ s; (d) $t=60$ s; (e) $t=400$ s; (f) $t=1100$ s

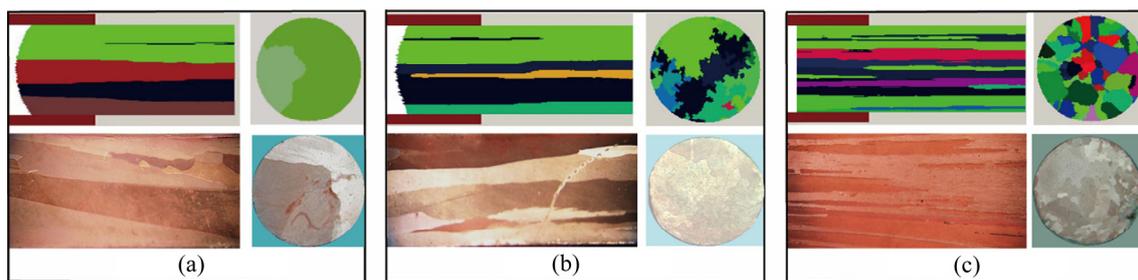


图7 不同连铸速度下铜杆坯纵/横截面模拟图与实际微观组织^[21]

Fig. 7 Simulation diagram and actual microstructure of copper rod prepared by different casting speeds^[21]: (a) 300 mm/min; (b) 40 mm/min; (c) 80 mm/min

艺参数对单晶铜性能和微观组织的影响规律。例如:采用全流程保护热型水平连铸技术制备出单晶铜杆坯,重点研究了连铸工艺参数对单晶铜杆坯表面质量、内部微观组织及力学性能和导电性能的影响规律,连铸速度、冷却水量、冷却距离的改变会影响固-液界面位置,进而影响铸态杆坯的表面质量。当连铸工艺参数控制不当,杆坯表面易出现竹节状缺陷,甚至造成拉漏现象。

对热型水平连铸工艺制备的单晶铜杆坯进行了室温拉伸实验,研究了单晶铜杆坯断口形貌和断裂机制。发现单晶铜铸态杆坯断口呈扁铲状,同时存在明显的断裂带,该断裂带与断口长轴方向相平行,断裂带两侧初窝分布致密均匀。进一步观察发现,断裂带两侧初窝形状和生长方向明显不同,其断裂机理为微孔长大型断裂^[35-36]。

1.3 热型水平连铸制备铜合金杆坯组织性能

在热型水平连铸制备单晶铜基础上,国内外学者进一步开展了热型水平连铸制备单晶 Sn 带材^[37]、纯铜带材^[38]、Cu-Ag 合金^[39]、Cu-Ag-Y 合金^[40]、Cu-Cr 合金^[11]、Cu-Al-Ni 合金^[41]、Al-Fe-Cu 合金^[42]的组织性能研究。

本团队采用热型水平连铸工艺制备了 Cu-Ag 合金、Cu-Ag-Cr 合金,重点研究了连铸速度 (20、30、40、50、60 mm/min)对铸态杆坯溶质扩散、纵/横截面枝晶形态与分布特征的影响^[39, 43-44]。图 8~12 所示分别为连铸速度为 20、30、40、50 和 60 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金铸态显微组织。从图 8~12 的研究发现:垂直于连铸方向的微观组织(横向组织)以交错排布的“纺布”形枝晶形态为主,且随着连铸速度增加,枝晶逐渐细化;进一步分析表明横向组织主要由初生 α 相和($\alpha+\beta$)共晶相组成,铸态合金的力学性能与“纺

布”形枝晶数量和大小有关;平行于连铸方向的微观组织(纵向组织)以规则排布的“鱼骨”状枝晶形态为主,且随着连铸速度增加,“鱼骨”状枝晶逐渐增多,铸态合金的导电性能变化主要与“鱼骨”状枝晶数量和分布有关。

进一步研究发现,枝晶间隙存在的白点为非平衡 Ag 共晶相颗粒,主要原因是由于非平衡凝固过程溶质分配系数不同,使得凝固时溶质原子 Ag 被先凝固的初生 α 相排出至液相,形成溶质富集层,温度降低时,则发生共晶反应。连铸速度对 Ag 共晶相颗粒的大小影响不显著,而通过影响枝晶排列方式显著影响 Ag 共晶相颗粒在枝晶间隙的分布状态。随着连铸速度增加,枝晶间距变小,横向“纺布”形枝晶组织和纵向“鱼骨”状组织均变细密,枝晶间隙的非平衡 Ag 共晶相颗粒沿连铸方向的分布更加均匀弥散。

2 冷型竖引连铸制备铜基杆坯

2.1 三室真空冷型竖引连铸工艺特点

热型水平连铸难以控制固-液界面位置刚好在结晶器出口处,连铸工艺控制不当易导致杆坯表面竹节状缺陷,甚至合金液泄露。常规冷型竖引连铸熔体过冷度小,固-液界面为深 V 型(见图 2(a)),易产生铸造缺陷。因此,开展新型冷型连铸工艺制备高质量铜基合金杆坯的研究,对于保障后续拉拔具有重要意义。

北京科技大学谢建新院士团队开发出真空熔炼+气体保护下拉式连续定向凝固工艺,并制备出具有定向柱状晶特征的 Cu-12Al 合金线材、B10 合金管材等^[45]。以采用该工艺制备的 Cu-12Al(质量分数)合金线材为例,其团队研究了工艺参数对凝固成形过程的影响规律,发现熔体温度对线材表面质量影响较大,提

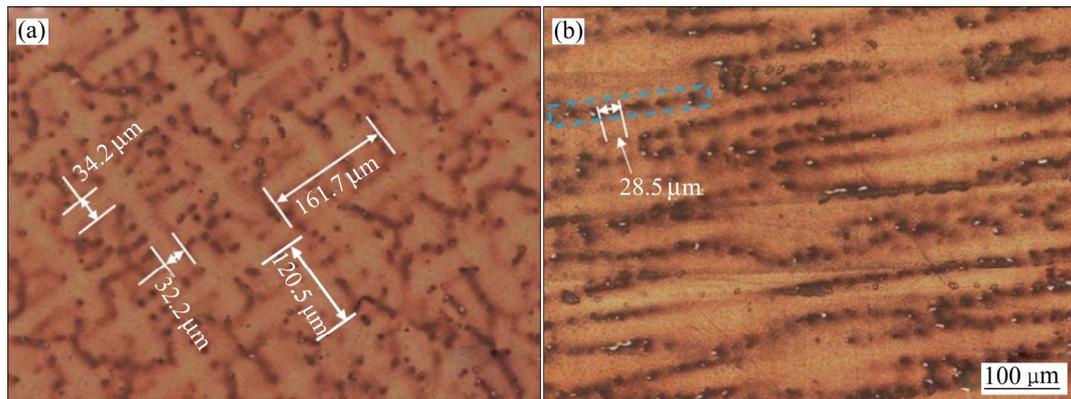


图 8 连铸速度 20 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金杆坯铸态组织^[39]

Fig. 8 As-cast microstructures of Cu-3.5Ag alloy prepared at continuous casting speed of 20 mm/min^[39]: (a) Section perpendicular to continuous casting direction; (b) Section parallel to continuous casting direction

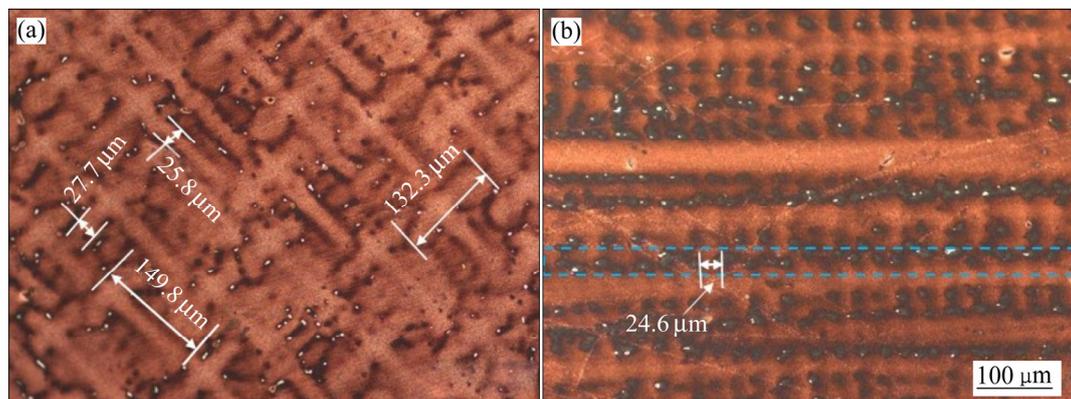


图 9 连铸速度 30 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金杆坯铸态组织^[39]

Fig. 9 As-cast microstructures of Cu-3.5Ag alloy prepared at continuous casting speed of 30 mm/min^[39]: (a) Section perpendicular to continuous casting direction; (b) Section parallel to continuous casting direction

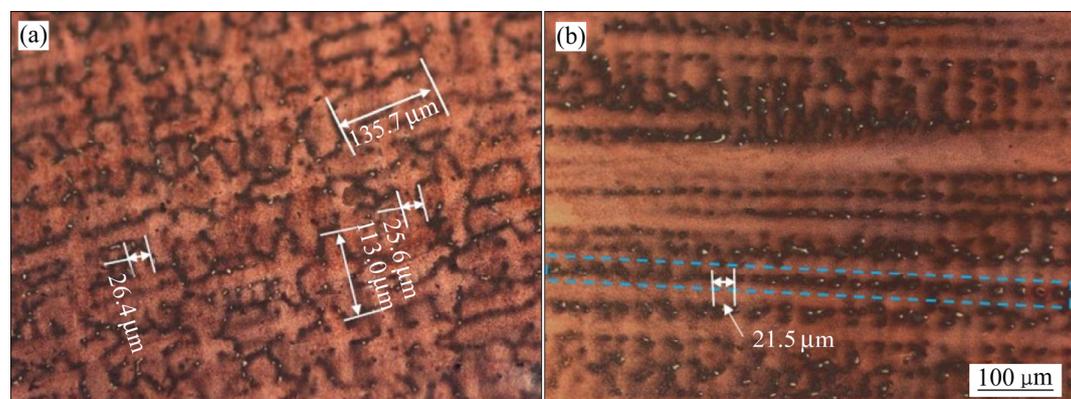


图 10 连铸速度 40 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金杆坯铸态组织^[39]

Fig. 10 As-cast microstructures of Cu-3.5Ag alloy prepared at continuous casting speed of 40 mm/min^[39]: (a) Section perpendicular to continuous casting direction; (b) Section parallel to continuous casting direction

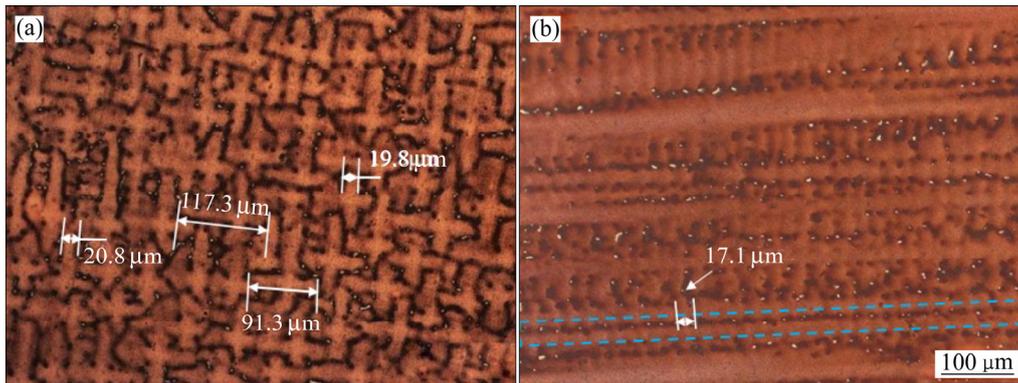


图 11 连铸速度 50 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金杆坯铸态组织^[39]

Fig. 11 As-cast microstructures of Cu-3.5Ag alloy prepared at continuous casting speed of 50 mm/min^[39]: (a) Section perpendicular to continuous casting direction; (b) Section parallel to continuous casting direction

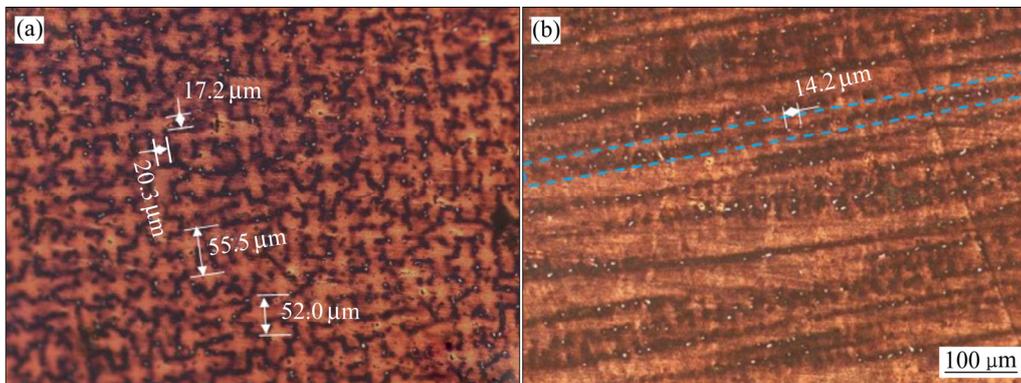


图 12 连铸速度 60 mm/min 时 Cu-3.5Ag 合金杆坯铸态组织^[39]

Fig. 12 As-cast microstructures of Cu-3.5Ag alloy prepared at continuous casting speed of 60 mm/min^[39]: (a) Section perpendicular to continuous casting direction; (b) Section parallel to continuous casting direction

高熔体温度可以改善线材表面质量; 分析了连续定向凝固线材的组织性能, 当熔体温度 1250 °C、下拉速度 9 mm/min、冷却水量 900 L/h 时, 可以连续稳定成形直径 6 mm、表面较光滑、具有单晶组织的 Cu-12Al 合金线材; ZHAO 等^[46]和于朝清等^[47]分别采用立式定向凝固连铸技术制备了 Cu-Ag 系列合金; SHEN 等^[48]研究了不同制备工艺对连铸 Cu-8%Ag 合金力学性能和导电率的影响。

在常规冷型竖引连铸的基础上, 本团队研究人员发明了三室真空熔炼气体保护冷型竖引连铸技术和成套装备^[49] (见图 13)。

1) 发明的三室真空+气氛保护快速转换技术, 可实现高真空/气氛条件下连续加料、连续熔炼、连续铸造, 大幅降低贵金属元素烧损, 保障杆坯连续生产过程中成分一致性。

2) 优化了结晶器和冷却水套结构, 研究了熔体温

度、连铸速度、冷却水温度对固-液界面形状、位置、柱状晶凝固组织特征的影响规律, 其中温度梯度对固-液界面形状的影响如图 14 所示; 制备的铜银合金杆坯组织致密均匀, 以近似平行于轴向的柱状晶为主 (见图 15)。

2.2 三室真空冷型竖引连铸制备铜银合金杆坯

以 Cu-Ag 合金为例, 图 16 所示为 Cu-Ag 合金二元相图, 该合金为典型的共晶合金, 共晶温度为 779 °C。

当 Ag 含量小于 0.1% 时, 大部分 Ag 以弥散颗粒的形式析出分布在铜基体上, 对导电性能影响较小; 当 Ag 含量由 0.1% 增加到 1.0% 时, 其电导率由 53.94 MS/m 降至 52.20 MS/m。同时研究发现, Ag 含量低于 6% 时, Cu-Ag 合金铸态组织由单一富 Cu(α)相构成; 当 Ag 含量在 6%~15% 时, Cu-Ag 铸态组织主要由富

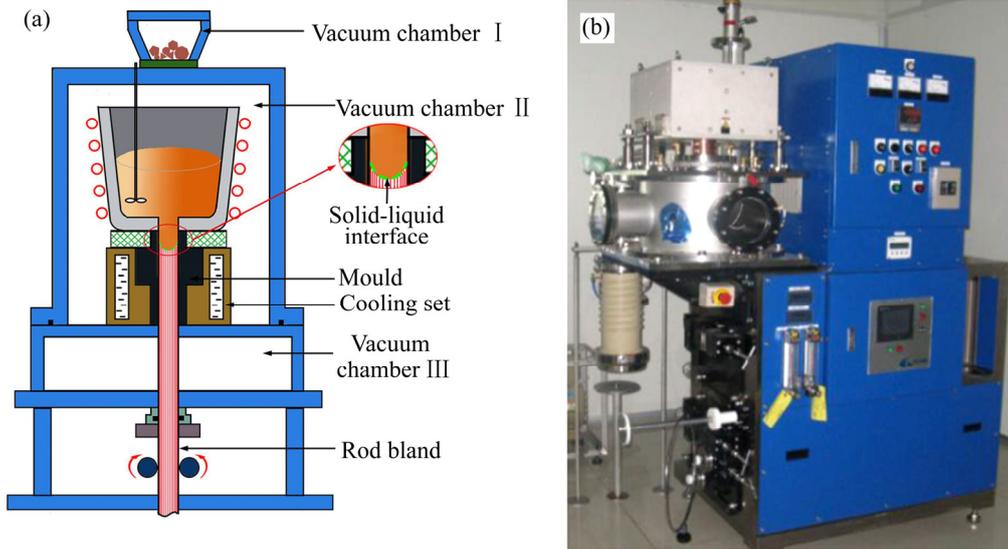


图 13 三室真空冷型竖引连铸装置^[49]

Fig. 13 Device of three chamber vacuum cold mould vertical drawing continuous casting^[49]: (a) Schematic diagram; (b) Photo

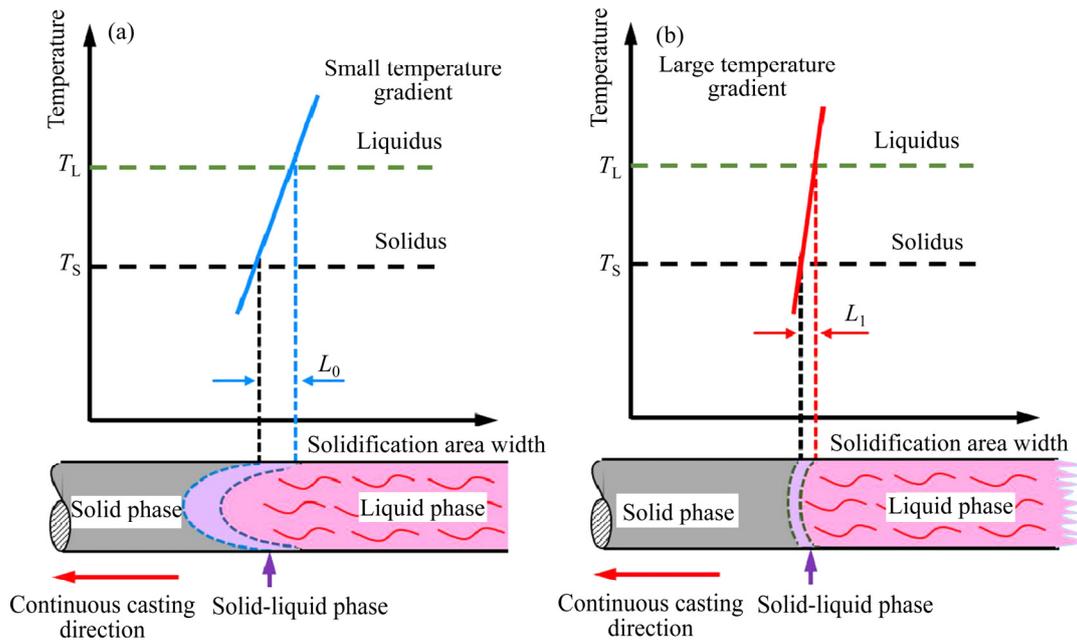


图 14 温度梯度对固-液界面形状影响

Fig. 14 Influence of temperature gradient on shape of solid-liquid interface (a) Small temperature gradient; (b) Large temperature gradient



图 15 近似平行于轴向的柱状晶组织

Fig. 15 Columnar crystal structure with approximately parallel to axial direction

Cu 相固溶体(α)和共晶组织($\alpha+\beta$) 组成, 两相共晶组织离散地分布于枝晶间隙处, 形成了岛屿状结构^[50-51]。SAKAI 等^[52-54]发现 Cu-24Ag 铸态组织主要由富 Cu 相和网状共晶组织组成, 并指出网状共晶体结构是 Cu-Ag 合金强度提高的重要因素。李贵茂等^[55]发现随着 Ag 含量增加, Cu-Ag 合金共晶纤维束增加、间距变小, 合金强度升高; Cu-Ag 合金溶质固溶和析出相增加, 析出相和基体间的界面密度升高, 导电率降低。

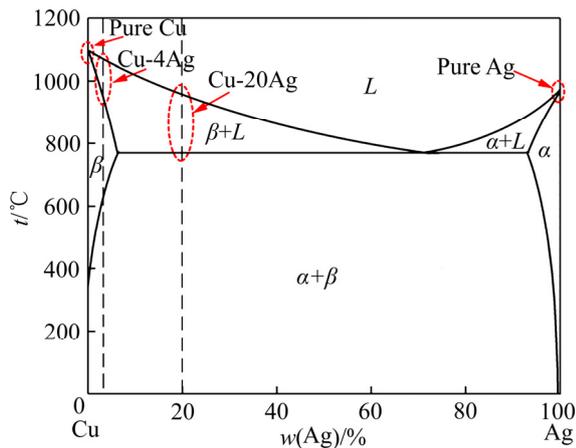


图 16 Cu-Ag 合金二元相图
 Fig. 16 Phase diagram of Cu-Ag binary system

本团队采用三室真空冷型竖引连铸方法制备了不同 Ag 含量(1%、2%、4%和 20%)的 Cu-Ag 合金杆坯, 研究了 Ag 含量对 Cu-Ag 合金铸态杆坯导电性能、力学性能以及径向和轴向微观组织的影响, 揭示了冷型竖引连铸过程中微观组织演化规律, 以及连铸末端组织异常变化规律^[56]。

图 17 和 18 所示分别为不同 Ag 含量的 Cu-Ag 合

金铸态杆坯径向和轴向截面微观组织。从图 17 和 18 可以看出, Ag 含量对 Cu-Ag 合金显微组织和性能具有显著影响。Cu-Ag 合金铸态杆坯组织主要由 α -Cu 基体和 Ag 颗粒组成, Ag 颗粒在 Cu 基体中分布均匀。其中, Cu-1Ag 合金铸态组织基本由初生 α 相构成, 未见明显共晶组织; Cu-2Ag 合金铸态组织主要由枝晶组成, 小共晶团均匀分散在枝晶臂间; Cu-4Ag 合金铸态组织出现扩展分枝; Cu-20Ag 合金铸态组织出现连续网状结构。

由于三室真空冷型竖引连铸末端金属的特殊性, 进一步研究了连铸杆坯末端组织性能一致性和元素偏析行为。图 19 所示为采用冷型竖引连铸制备的 Cu-20Ag 合金杆坯末端 SEM 像和 EDS 元素分析图。从图 19 可以看出, Cu-20Ag 合金杆坯显微组织主要由初生相 α -Cu 和 Cu-Ag 共晶组织构成, 共晶组织呈现典型网状结构; 随着远离末端表面, 单位面积内网状结构的数量逐渐增多, 初生相 α -Cu 尺寸增大, 选区内 Ag 元素含量增加, 而 Cu 元素含量降低, 靠近连铸末端处 Cu 和 Ag 元素的偏析较为严重, 该试验结果与靠近连铸杆坯末端距离越近其显微硬度越低的结论一致。

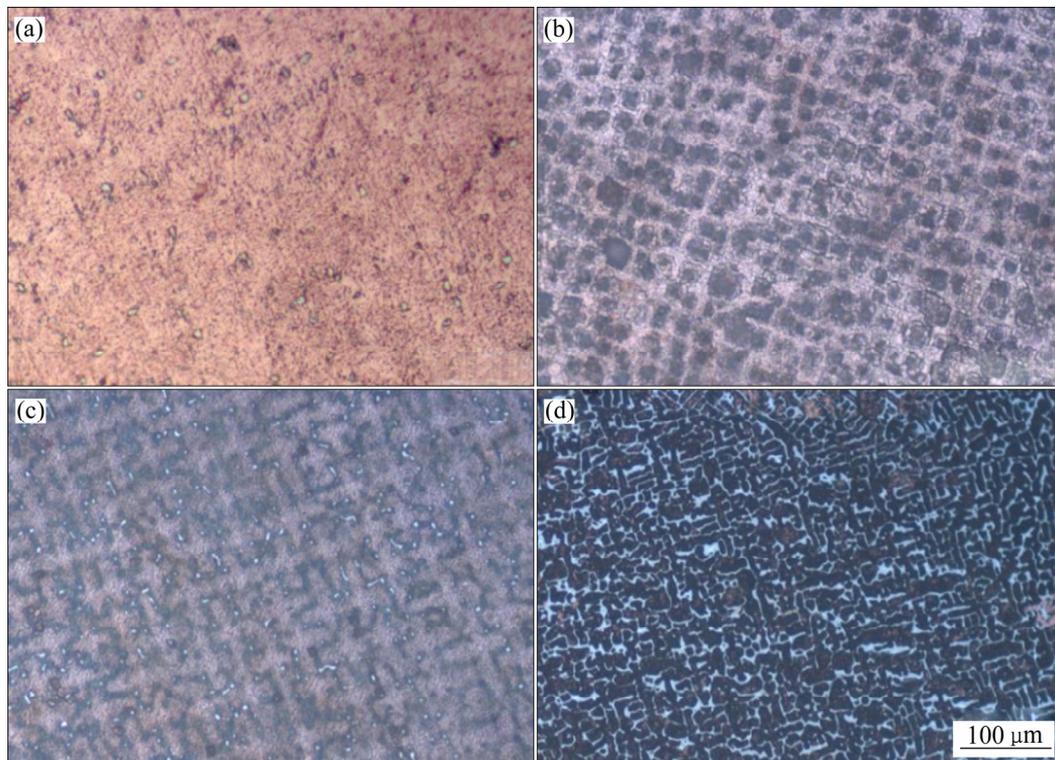


图 17 Cu-Ag 合金铸态杆坯径向截面微观组织^[56]

Fig. 17 Microstructures of radial section of Cu-Ag alloy^[56]: (a) Cu-1Ag; (b) Cu-2Ag; (c) Cu-4Ag; (d) Cu-20Ag

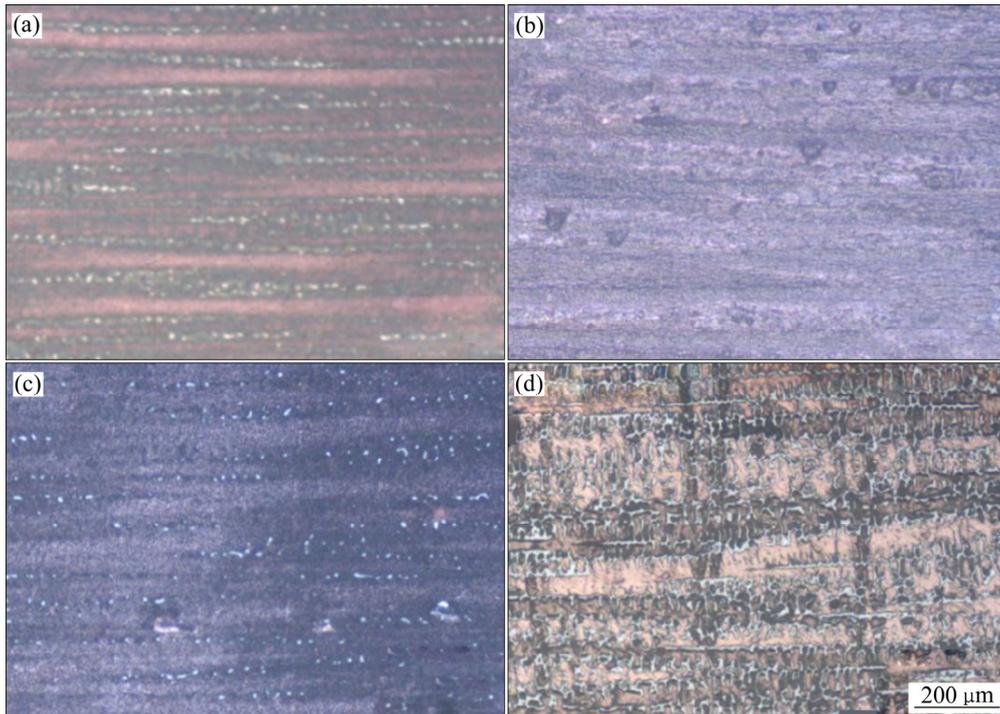


图 18 Cu-Ag 合金铸态杆坯轴向截面微观组织^[56]

Fig. 18 Microstructures of axial section of Cu-Ag alloy^[56]: (a) Cu-1Ag; (b) Cu-2Ag; (c) Cu-4Ag; (d) Cu-20Ag

3 铜基微细丝线材连续拉拔

采用热型水平连铸和冷型竖引连铸制备的铜基杆坯，需要进行粗拉、中拉、微拉等多道次连续拉拔，由于微细丝线径细、技术指标要求高，从杆坯到成品拉拔工艺流程长，涉及坯料、模具、张力控制、润滑等，杆坯杂质元素偏聚、表面和内部缺陷，以及拉拔力、变形量、拉丝速度等工艺参量均有可能造成拉拔过程表面缺陷甚至断线。与常规铜杆坯拉拔相比，微细丝线材拉拔过程处于高速变形阶段，在此条件下的材料本构关系发生变化；由于微细丝线材直径细、加工硬化严重，拉拔过程存在显著尺寸效应。同时，拉拔工艺流程道次多、影响因素复杂，工艺参数调控困难。

3.1 微细丝线材连续拉拔本构关系

微细丝线材拉拔生产中，从铸态杆坯拉拔到直径 0.02 mm 以下的微细丝线材，道次应变速率最高达 $1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。在高应变速率 ($1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$) 下丝线材内部组织发生变化，探明高应变速率下材料的动力学响应、微观结构演化是微细丝线材拉拔工艺开发

要解决的首要基础问题。

目前，John-Cook 模型是综合考虑大应变、高塑性应变速率和高温影响的本构关系模型，常用来构建高应变速率下金属材料动态冲击性能。目前，国内外学者建立了基于 John-Cook 模型的纯铁、超高强钢、铝合金等材料的动态力学本构关系模型^[57-59]，该模型综合考虑了大应变、高塑性应变速率和高温等影响因素^[60]。吴尚霖等^[61]、马继山等^[62]建立了 T2 细晶铜和 QCr0.8 铜合金动态力学本构关系，该本构关系考虑了屈服时的应变速率，而关于后继屈服阶段应力对高应变速率的敏感度研究较少。

本团队基于微细丝线材拉拔用无氧铜霍普金森压杆冲击试验，分析了高应变速率状态下后继屈服应力与应变关系，建立了修正的高应变速率 John-Cook 本构关系模型，分析了高应变速率下材料微观组织和动力学行为的形成机制^[63]，为后续微细丝拉拔工艺优化和微观组织调控提供理论支撑。

3.2 微细丝线材连续拉拔组织性能演变

影响铜基微细丝线材拉拔态组织性能的因素包括：铸态杆坯质量，与杆坯连铸工艺相关；拉拔道次、变形量、线径等，与拉拔工艺参数相关；入模角、定径区长度、出模角、润滑等，与模具结构参数相关。

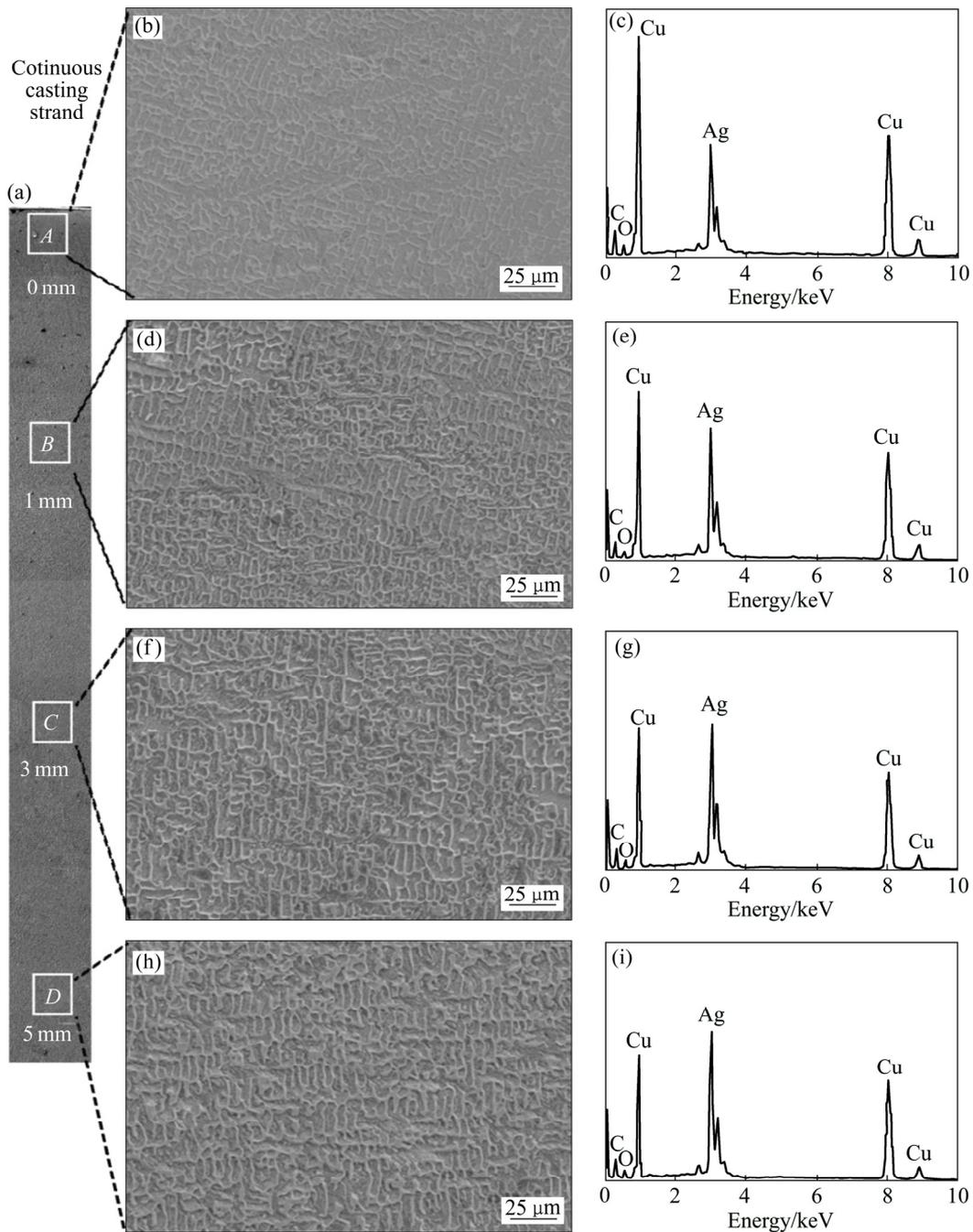


图 19 Cu-20Ag 合金连铸末端 5 mm 杆坯 SEM 像和元素 EDS 能谱

Fig. 19 SEM images and EDS spectra of 5 mm rod blank at end of continuous casting of Cu-20Ag alloy

目前,国内外研究人员对纯铜和 Cu-Ag 合金杆坯状态、拉拔工艺参数、模具结构等因素对丝线材力学性能、导电性能和微观组织的影响开展了系统研究。

SAKAI 等^[64]指出低 Ag 含量时合金抗拉强度增加明显,且合金导电率较高。刘嘉斌等^[65]研究了不同 Ag 含量 Cu-Ag 微相复合材料的微观组织演化,研究发现,随着 Ag 含量增高,共晶纤维束增多并呈连续网状分布时,高 Ag 含量对导电率的损害程度高于对

强度的贡献;随着变形量增加,合金抗拉强度增大,而导电率降低;Cu-24Ag 合金共晶组织形态比体积分数对合金强度和导电率的影响较大。宁远涛等^[66]采用大变形工艺制备了 Cu-10Ag 原位纳米纤维复合材料,抗拉强度达 1190 MPa、导电率 68.7%IACS。ZUO 等^[67]、ZHAO 等^[68]研究了 Cu-28Ag 复合材料在强磁场下凝固后再进行冷拔的微观组织,发现电磁场凝固获得的铜银合金材料因细化了 Ag 共晶组织间距,强度

明显提高。

王青等^[69]通过多道次连续拉拔变形试验,对比研究了 Cu-0.88Cr 合金和纯铜拉拔过程中抗拉强度和伸长率的变化规律。结果表明: Cu-0.88Cr 合金抗拉强度随着变形量的增大呈现先升高后降低的趋势,当应变变为 0.7 时,抗拉强度达到最大值 475 MPa。未变形时,第二相与铜基体界面关系为共格界面;随着变形量增大,第二相与基体界面关系由共格向非共格发生转变,从而导致 Cu-0.88Cr 合金抗拉强度在应变大于 0.7 时呈下降趋势。张雷等^[70]研究发现:当共晶纤维束间距大于 150 nm 时,Cu-Ag 合金抗拉强度随共晶纤维束间距的变化类似于 Hall-Petch 关系,强化效应与位错塞积机制有关;当共晶纤维束间距小于 150 nm 时,合金强化速率降低并偏离 Hall-Petch 关系,强化效应可认为与界面障碍机制有关。较低 Ag 含量合金铸态组织中仅有少量第二相分布于枝晶间隙且经冷拔后纤维组织排列松散,而高 Ag 含量合金组织中第二相则以网状连续共晶层形式存在,经冷拔后纤维排列平直细密。

封存利等^[43]通过多道次连续拉拔工艺,将热型水平连铸制备的 Cu-Ag 合金铸态杆坯(d 16 mm)加工成微细丝线材(d 0.12 mm),研究发现随着拉拔变形量增加,柱状晶与析出 Ag 粒子被拉拔成紧密排列的纤维

组织,显著提升合金抗拉强度,而伸长率和导电率下降,Cu-1Ag 合金微细丝线材的导电率为 100%IACS、抗拉强度为 300 MPa、伸长率为 23%。秦芳莉等^[71]制备的线径 0.043 mm 的 Cu-2.0Ag 微细丝线材抗拉强度为 1062 MPa、导电率为 79.12%IACS。朱利媛等^[72]采用热型连铸工艺制备的 Cu-4.0Ag 杆坯,经连续冷拉拔成线径 0.05 mm 微细丝后,抗拉强度大于 1 GPa、导电率为 77.2 %IACS。

本团队研究人员针对三室真空冷型竖引连铸制备的 Cu-1Ag、Cu-2Ag、Cu-4Ag、Cu-20Ag 合金进行了连续拉拔,从铸态直径 7.8 mm 连续拉拔至 0.02 mm 微细丝线材,系统研究了 Ag 含量、拉拔变形量对 Cu-Ag 合金强度、导电率、枝晶间距、Ag 颗粒分布的影响规律^[73-75]。图 20 所示为不同应变条件下 Cu-1Ag 合金丝线材纵截面组织。随着拉拔变形程度增加,纵截面组织形态由平行于轴向的柱状晶被逐渐拉拔成了紧密排列的纤维组织,且纤维间距随着应变量的增大而减小。同时从图 20(b)中还可以发现,连续拉拔过程中外层金属变形不均匀,而心部(见图 20(c))变形均匀,呈纤维状。

结合 Cu-Ag 合金二元平衡相图可知,在共晶成分时(779 °C),Ag 在 Cu 中的固溶度为 7.9%,而在室温

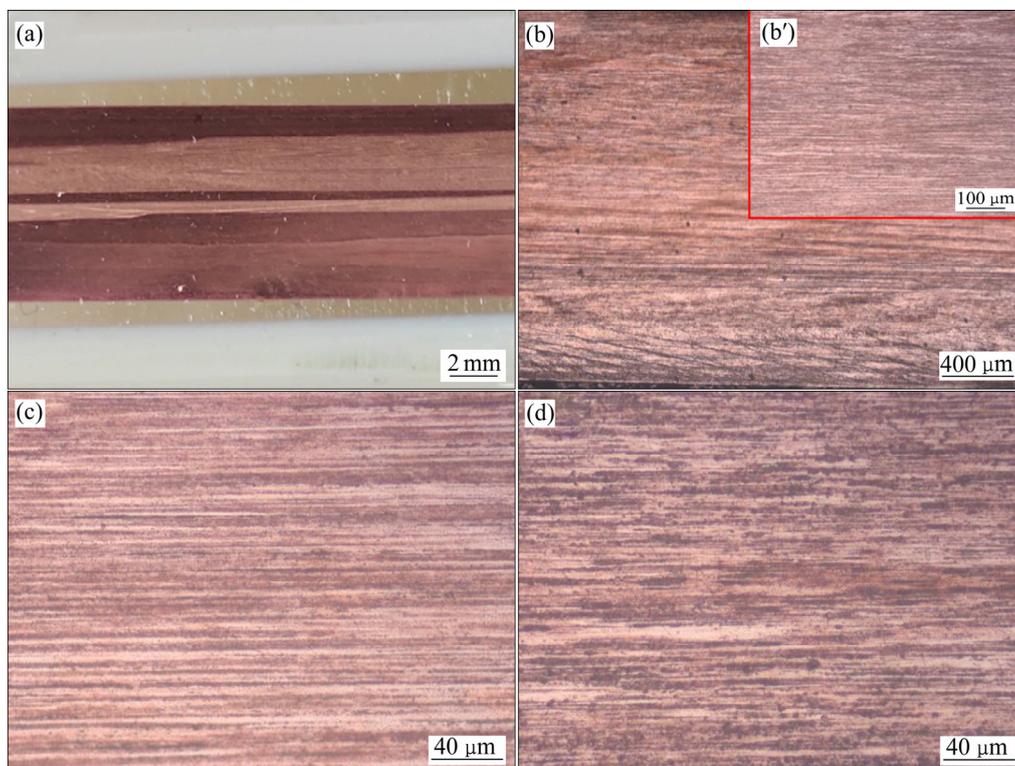


图 20 不同应变下 Cu-1Ag 合金丝线材纵截面组织^[73]

Fig. 20 Microstructures of longitudinal section of Cu-1Ag alloy wire under different strain^[73]: (a) $\epsilon=0$; (b) $\epsilon=2.6$; (c) $\epsilon=4.12$; (d) $\epsilon=6.46$

下, Ag 在 Cu 中固溶度只有 0.1%。对于高 Ag 含量(Ag 含量大于 8%)铜银合金丝线材, 由于其凝固区间宽, 固-液过渡区大, 易产生成分偏析和凝固组织缺陷, 进而导致在后续拉拔过程中易出现断线现象。本团队采用三室真空冷型竖引连铸+连续拉拔技术制备了 Cu-20Ag 微细丝线材, 研究了不同线径丝线材微结构与性能的内在关联, 为解决高银含量丝线材超细超精、连续稳定拉拔控制难题提供理论基础。

图 21 所示为不同线径 Cu-20Ag 合金微细丝线材纵截面和横截面微观组织。从图 21 可以看出, Cu-20Ag 合金铸态杆坯经多道次连续拉拔后, 连续网状的铸态共晶组织在纵向逐渐被拉成近似完全平行于轴向的长纤维, 且在拉拔过程中边部变形量明显大于心部, 纤维组织间距远小于心部, 而横截面上逐渐被拉成间距越来越小的网状组织。

同时, Cu-20Ag 铸态杆坯晶粒择优取向为 Cu(111)、Cu(311)和 Ag(311)晶面, 经过拉拔后铜晶粒择优取向为(111)晶面, 银晶粒择优取向为(111)晶面。随着线径减小, Cu-20Ag 合金微细丝线材抗拉强度提高, 而伸

长率和导电率降低。当线径由 2.13 mm 拉拔至 0.02 mm 过程中, 丝线材伸长率稳定在 1.8%~3.3%, 线径 0.02 mm 的 Cu-20Ag 合金丝线材抗拉强度为 1682 MPa、伸长率为 2.0%, 导电率为 54.4%IACS。

微细丝线材制备过程中由于铸态杆坯、拉拔工艺、模具结构等因素导致的断线, 是影响其连续稳定拉拔的主要因素^[76-78]。本团队研究人员以热型水平连铸制备的单晶铜杆坯为研究对象, 对其连续拉拔至线径 0.015 mm 微细丝线材过程中的断线原因和影响因素进行了系统研究^[79-80]。发现造成微细丝线材拉拔过程断线的原因主要有以下四种类型。

- 1) 线材中 O、S、P 等微量杂质元素形成的氧化物偏聚, 以及 Al、Ca、Si 等元素形成的金属间化合物。
- 2) 微气孔、杂质、组织不均匀等内部缺陷引起的孔洞或局部应力集中, 表现为气孔中心爆裂和气孔缺陷断线, 断口中心为深浅不一的孔洞, 孔洞边缘有金属滑移或撕裂的痕迹等。
- 3) 线材起皮、毛刺、擦伤等表面缺陷对拉拔过程中的突发性断线有显著影响。

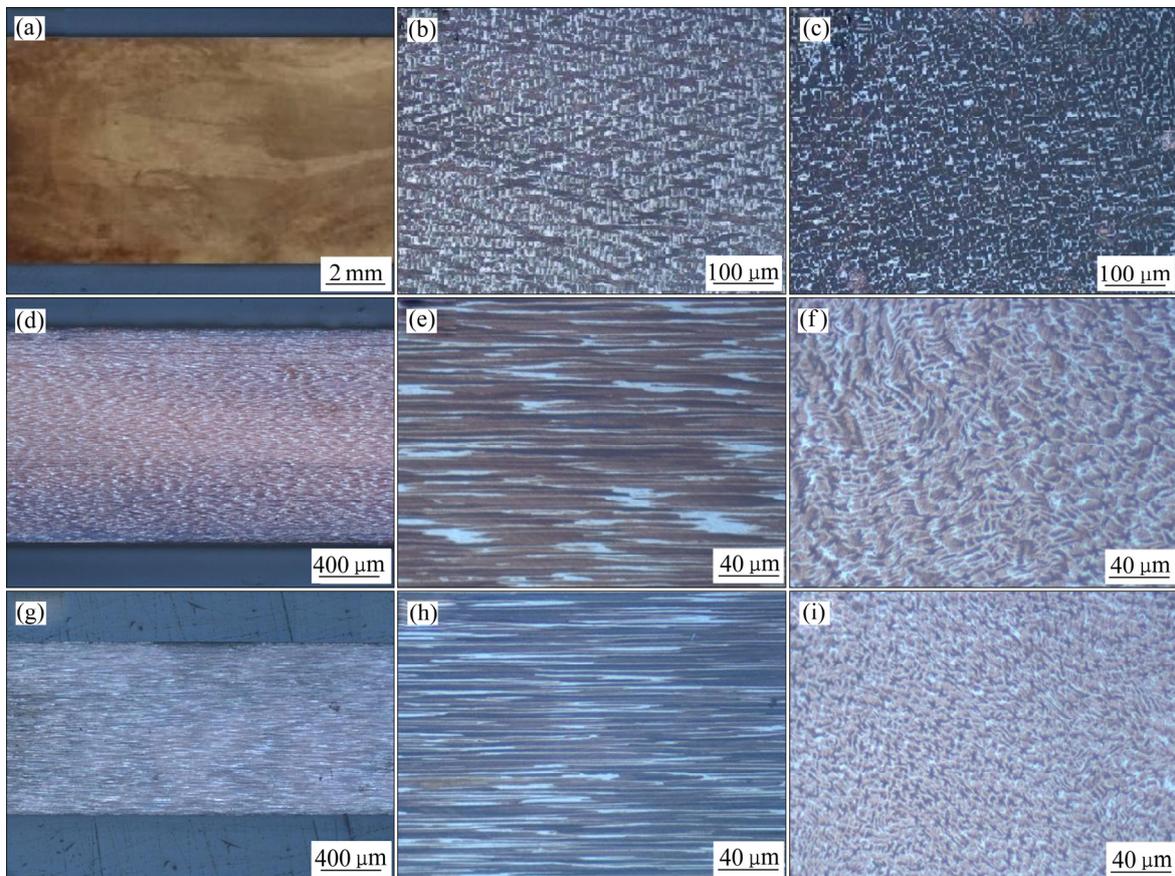


图 21 不同线径 Cu-20Ag 合金丝线材微观组织

Fig. 21 Microstructures of Cu-20Ag alloy wires with different wire diameters: (a), (b), (c) 7.83 mm; (d), (e), (f) 2.13 mm; (g), (h), (i) 1 mm

4) 由于线材拉拔过程加工硬化现象明显,拉拔张力控制不当会引起线材的局部应力变化。

在图 22(a)中可以看到杂质嵌入断裂面,由夹杂起裂最后形成长裂纹;图 22(b)中夹杂物尺寸较大,影响合金基体组织均匀性,引起早期断线;在图 22(c)中可以观察到合金线断口左侧杂质偏聚,而在图 22(d)中可以观察到抛物线状韧窝,说明材料在局部微小区域内,发生了强烈的剪切变形,并且抛物线凸向指向裂纹源。

图 23(a)所示的断线通常为突发性断线,由于线材表面缺陷具有剪形断面,且与线材成一定角度,在线材断口处不存在颈缩现象,在断面上存在微小氧化物夹杂。在图 23(b)中可以观察到线材在断裂前发生了颈缩,断口开裂处存在金属流动撕裂痕迹,断面上存在微气孔且裂纹的起裂从微气孔开始而逐渐扩展到整个断面。杆坯质量和拉拔过程磨损是表面缺陷的主要来源,杆坯制备过程中出现的微裂纹、组织不均匀、内部气孔、表面氧化等铸造缺陷,易引发早期断线;拉拔过程由于塔轮磨损导致线材表面间断或局部出现起皮、毛刺、结疤等缺陷,导致拉丝过程中断线。因此,铜杆坯在拉拔之前,可对其进行表面处理,消除表面

缺陷,降低拉拔模具和线材接触部件的粗糙度,能够降低由于表面质量造成的断线。

图 24 所示为拉拔控制力不当造成断线的典型特征。断口出现明显颈缩和扭断现象,由于急拉缠结或扭结而引起拉力剧增,引起局部应力变化不均匀,诱发断线。

3.3 热处理对铜基丝线材组织性能影响

对于铜基丝线材热处理方面的研究,主要目的是解决其使用性能和工艺性能调控难题。主要研究内容包括:研究铜基丝线材杆坯形变热处理技术,揭示温度、时间、变形量对其传导特性、力学性能和强化相特征演变的影响规律,以提高其力学性能和传导性能;开发铜基微细丝线材连续拉拔过程在线退火工艺,探明退火工艺参数对变形组织内应力的影响规律,保障连续拉拔稳定性;开发终端微细丝线材在线退火工艺,探明退火工艺参数和丝线材张力对组织结构和表面质量的影响规律,获得优良内部组织和表面质量,实现微细丝线材伸长率精确控制,降低残余应力。

3.3.1 形变热处理对铜基丝线材组织性能影响

本团队研究人员以热型水平连铸工艺制备的铜银

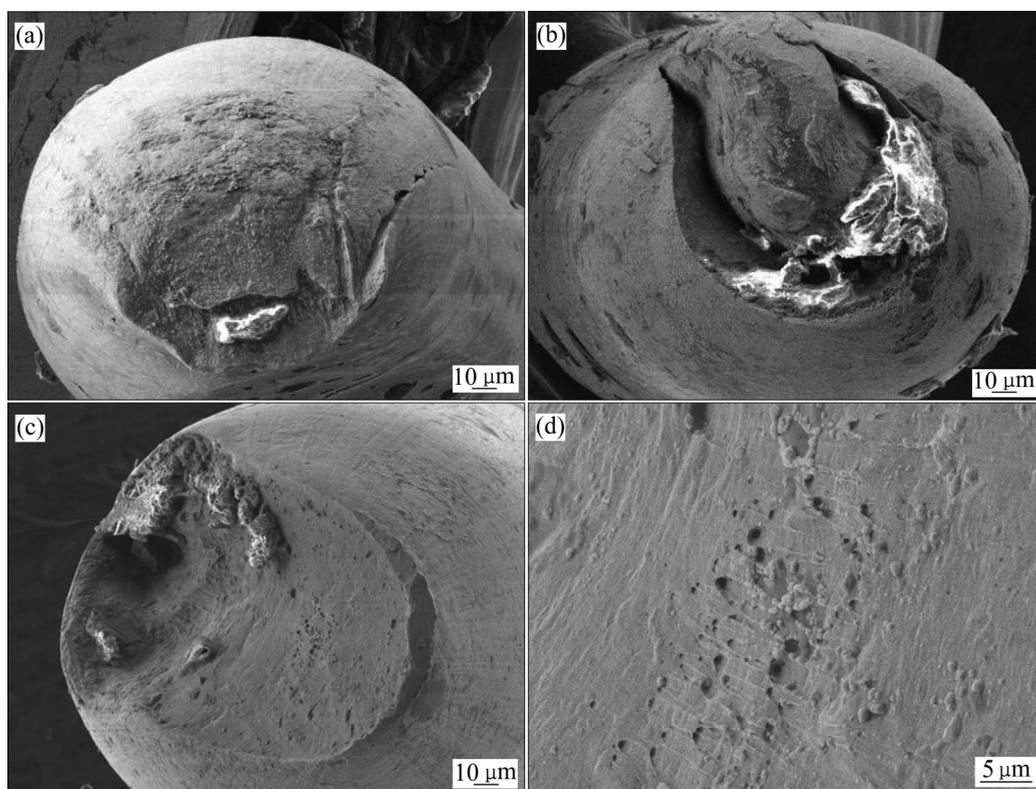


图 22 夹杂引起的断线形貌,氧化物偏聚断口形貌及抛物线韧窝^[79]

Fig. 22 Fracture morphologies caused by inclusion((a), (b)), fracture morphologies caused by oxide segregation(c) and parabolic dimple(d)^[79]

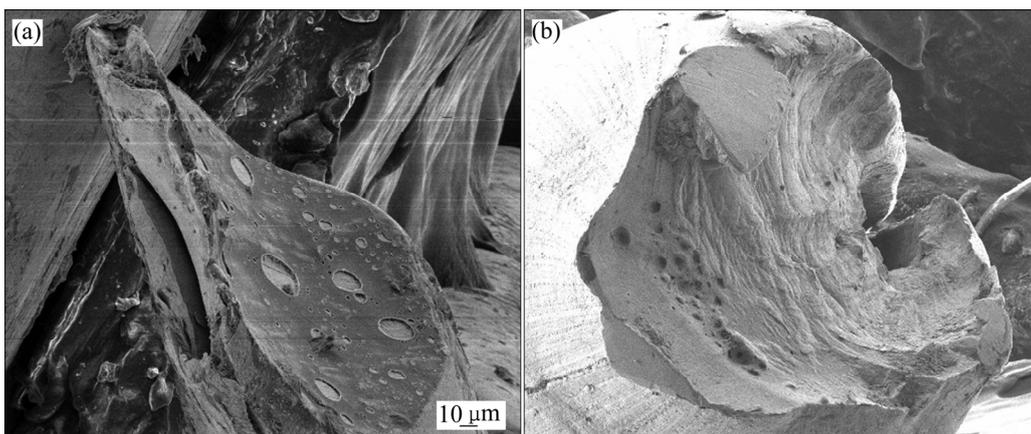


图 23 线材表面杂质断线形貌和线材表面缺陷断线形貌^[79]

Fig. 23 Fracture morphology caused by impurities on wire surface(a) and fracture morphology caused by defect on wire surface(b)^[79]

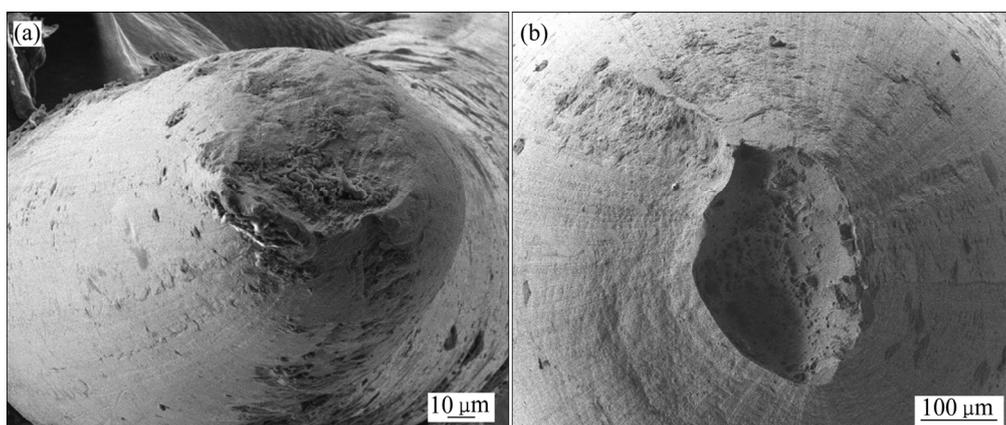


图 24 拉拔力不当造成扭断形貌和拉拔力过大造成颈缩形貌^[79]

Fig. 24 Torsion fracture caused by improper drawing force(a) and necking caused by excessive drawing force(b)^[79]

合金为原始杆坯, 通过单一固溶(950 °C, 保温 1 h)+时效(450 °C, 保温 2 h, 4 h, 6 h, 8 h)热处理, 重点研究了时效时间对铜银合金丝线材硬度、导电率的影响, 分析了不同时效时间条件下析出强化相形态、大小、分布等特征参量的演变规律^[44, 81-84]。图 25 所示为 Cu-3.5Ag 合金固溶态微观组织, 铜基体中分布有少量位错, 无富 Ag 相颗粒, Ag 原子完全固溶到铜基体内形成了过饱和固溶体。

图 26 所示为 Cu-3.5Ag 合金经 450 °C 保温 4 h 时效处理后的微观组织。大量富 Ag 相呈链状析出, 且析出相周围存在晶体缺陷及大量位错, 富 Ag 相与基体的位向关系为: $(002)_{Ag} // (002)_{Cu}$ 和 $[\bar{1}\bar{2}0]_{Ag} // [\bar{1}\bar{2}0]_{Cu}$, 析出相和基体为半共格关系。图 26(c)所示暗场像中较多富 Ag 相形貌为圆球状, 少数为排列紧密形成的短棒状, 富 Ag 相平均直径为 17~19 nm。大

量富 Ag 相不连续析出, 对位错阻碍作用大幅增加, 同时晶格畸变程度减弱, 合金硬度和导电率均有较大提升。

图 27 所示为 Cu-3.5Ag 合金经 450 °C 保温 8 h 时效处理后的微观组织。从图 27(a)可以看到富 Ag 相有三种形态: 大量圆球状或短棒状呈链状分布、长条状、颗粒较大的黑色短棒状呈散乱分布。图 27(b)所示为析出相的暗场像, 富 Ag 相排列基本平行, 平均直径 22~25 nm, 由于保温时间过长, 发生了析出相聚集和长大。图 27(c)和 27(d)所示分别为析出相高分辨 TEM 像及经傅里叶变换得到的 FFT 衍射花样图。由衍射花样分析和标定出富 Ag 相与基体的位向关系为: $\{200\}_{Ag} // \{200\}_{Cu}$ 和 $\langle 100 \rangle_{Ag} // \langle 100 \rangle_{Cu}$, 析出相和基体为半共格关系。此时固溶体脱溶完全, 析出相聚集并粗化长大, 形态发生变化, 合金硬度降低, 导电率基

本不变。

在此基础上,对比研究了固溶、时效、冷拉拔变形等组合形变热处理工艺对 Cu-3.5Ag 合金导电性能和力学性能的影响规律,探明了固溶+时效、固溶+时效+冷拉拔、固溶+冷拉拔+时效等不同工艺条件下 Ag 粒子析出相的结构、形貌、大小、分布等特征参量的影响规律,揭示了时效析出强化与形变强化的复合强化机制。研究发现:固溶+时效工艺制备的 Cu-3.5Ag 合金中,位错开始积累并缠结成位错胞亚结构,形成直径 0.85 μm 的等轴位错胞,大量位错缠结形成平均直径 0.23 μm 的位错胞壁,析出相平均直径为 18~20 nm,部分 Ag 相为由多个颗粒组成的短条状(见图 28)。固溶+时效+冷拉拔工艺制备的 Cu-3.5Ag 合金位错胞尺寸减小,但位错胞数量明显增加,胞体周围存在多条平行线和大量位错,析出物形貌有球形和圆柱形沉淀,拉拔后析出相尺寸减小,并存在弹性应变场和晶

格畸变量,导致合金力学性能显著提高(见图 29)。固溶+冷拉拔+时效工艺制备的 Cu-3.5Ag 合金析出相易在位错处形核(见图 30),析出相与基体位向关系为 $\{200\}_{\text{Cu}} // \{200\}_{\text{Ag}}$ 和 $\langle 100 \rangle_{\text{Cu}} // \langle 100 \rangle_{\text{Ag}}$,时效前的冷变形为析出提供了能量储备,提高了析出速率和析出率,降低了固溶引起的晶格畸变,使合金保持高导电率的同时,力学性能大幅提升。

采用热型水平连铸+形变热处理+多道次连续拉拔工艺,制备的 Cu-Ag 合金线材抗拉强度为 530.5 MPa、导电率为 82.3%IACS,其综合性能的提高主要与铜基体中位错的综合作用以及温度场作用下析出相的特征参量有关,如图 30 (a) 所示。

3.3.2 在线退火工艺对铜基丝线材组织性能影响

李贵茂等^[85]指出 Ag 在 Cu 中的固溶度是影响合金性能的重要因素,Ag 含量的升高导致 Cu-Ag 合金纤维增加,间距减小,合金强度升高,导电率降低,并

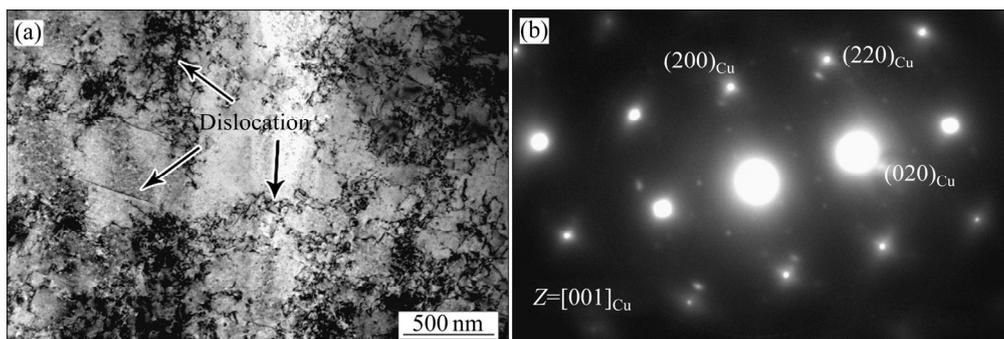


图 25 Cu-3.5Ag 合金固溶态微观组织^[83]

Fig. 25 Microstructures of Cu-3.5Ag alloy in solution state^[83]: (a) Bright-field image; (b) Selected area diffraction pattern

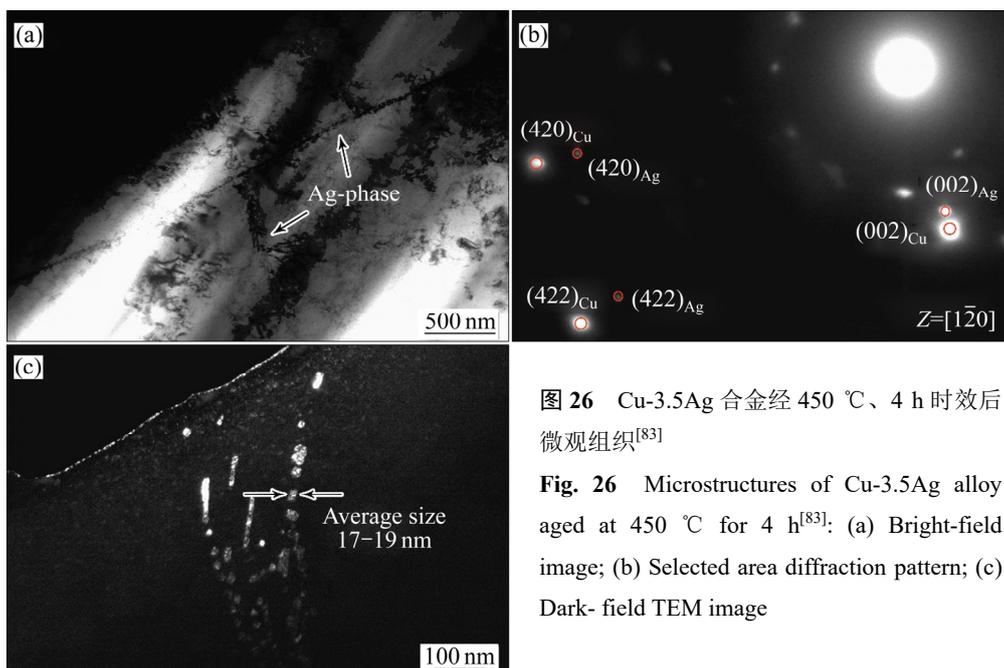


图 26 Cu-3.5Ag 合金经 450 $^{\circ}\text{C}$ 、4 h 时效后微观组织^[83]

Fig. 26 Microstructures of Cu-3.5Ag alloy aged at 450 $^{\circ}\text{C}$ for 4 h^[83]: (a) Bright-field image; (b) Selected area diffraction pattern; (c) Dark-field TEM image

说明 Cu-Ag 合金线材需要最终的退火工艺来提高综合性能。朱利媛等^[72]将 Cu-4.0Ag 合金直接从 d 8 mm 拉拔到 d 0.05 mm, 未经中间退火, 抗拉强度为 1023.12 MPa、电导率为 44.78 MS/m。何钦生等^[50]发现对于 Cu-Ag 合金, 采用低温退火有利于提升导电性能, 而

高温退火有利于提升力学性能。

本团队研究人员采用三室真空冷型竖引连铸技术制备了不同 Ag 含量 Cu-Ag 合金原始杆坯, 研究了连续拉拔过程中在线退火温度(440 °C、480 °C、520 °C)对铜银合金线材电导率、显微硬度和微观组织的影

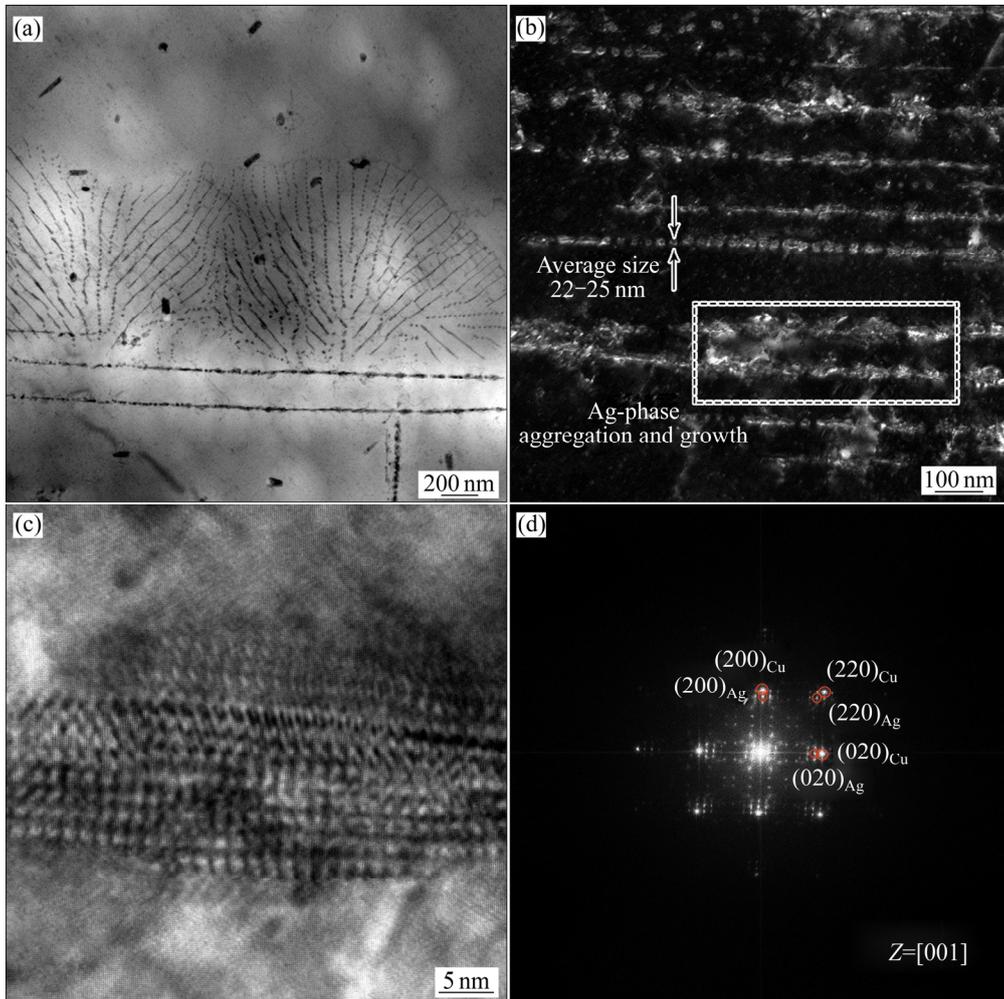


图 27 Cu-3.5Ag 合金经 450 °C、8 h 时效后微观组织^[83]

Fig. 27 Microstructures of Cu-3.5Ag alloy aged at 450 °C for 8 h^[83]: (a) Bright-field image; (b) Dark-field TEM image; (c) HRTEM image; (d) FFT image of (c)

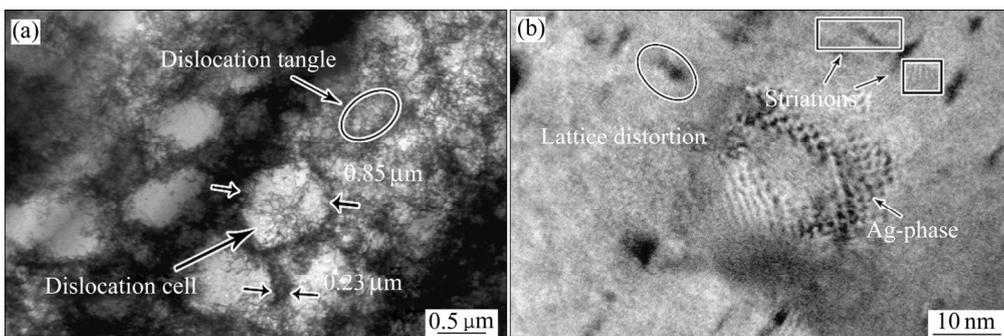


图 28 固溶+时效制备的 Cu-3.5Ag 合金微观组织^[44]

Fig. 28 Microstructures of Cu-3.5Ag alloy wire prepared by solution+aging process (a) Bright-field image; (b) HRTEM image^[44]

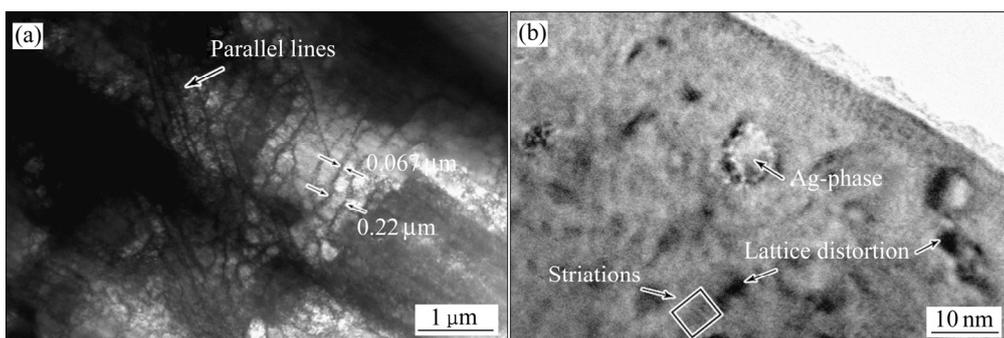


图 29 固溶+时效+冷拉拔制备的 Cu-3.5Ag 合金微观组织^[44]

Fig. 29 Microstructure of Cu-3.5Ag alloy wire prepared by solution+aging+cold drawing process: (a) Bright-field image; (b) HRTEM image^[44]

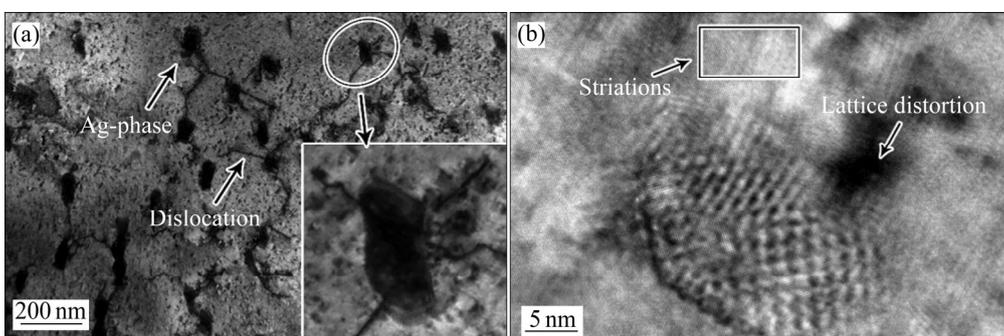


图 30 固溶+冷拉拔+时效制备的 Cu-3.5Ag 合金微观组织^[44]

Fig. 30 Microstructures of Cu-3.5Ag alloy wire prepared by solution+cold drawing+aging process (a) Bright-field image; (b) HRTEM image^[44]

响^[82, 86]。图 31 所示为 Cu-4Ag 和 Cu-20Ag 合金线材经过不同温度退火温度处理后的微观组织, Cu-4Ag 合金在退火过程中 Ag 相以颗粒状形式存在, Ag 颗粒随着退火温度升高未发生显著变化, 而 Cu-20Ag 合金中的 Ag 相形成了连续网状结构, 且在 520 °C 退火时出现了聚集现象。相比于 Cu-4Ag 合金, Cu-20Ag 合金纤维相分布更密集, 形态较长且粗。未经退火时 Cu-20Ag 和 Cu-4Ag 合金性能差别较大, 而经 480 °C 退火后合金性能接近, 此时 Cu-20Ag 合金导电率和硬度分别为 89.45 %IACS 和 157.03 HV。

4 铜基微细丝线材表面涂镀

4.1 铜基微细丝线材表面涂镀工艺特点

电子封装是集成电路芯片生产的一道关键工序, 电子封装用键合线之前主要采用金线, 成本高。作为替代金线的铜基键合线, 具有良好的力学性能、导电/导热性能, 但其服役过程中存在易氧化、存储时间短、

高温高湿条件下可靠性差等问题。

为防止铜基丝线材氧化, 进一步提高键合性能, 可在铜基丝线材表面涂镀一层熔点高、抗氧化性能好的镀层材料。铜基丝线材表面涂镀贵金属膜主要是采用电镀技术和化学镀技术。

然而, 对于线径小于 0.1 mm 的铜基微细丝线材, 若采用传统电镀技术存在以下问题: 1) 无法解决微细丝线材电镀工艺稳定性问题, 电镀液循环流动造成丝线材摆动和电流波动, 线张力加大易断线; 2) 大直径线材电镀+后续拉拔微细丝, 镀层与本体变形不均易导致镀层脱落。

本团队研究人员开发出一种绿色高效表面纳米涂镀技术, 并成功应用于铜基微细丝线材表面镀钯, 其技术原理为: 首先通过添加各种化学物质将纳米超细粉均匀分散悬浮在镀液中, 并且使镀液具有高的润湿性和稳定性, 其中镀液中的表面活性剂包覆在纳米颗粒周围, 通过空间位阻作用实现纳米颗粒之间的分散。然后, 将微细丝线材浸入到专门配制的含有纳米金属粉的溶液中, 通过烘干加热装置并优化加热沉积工艺

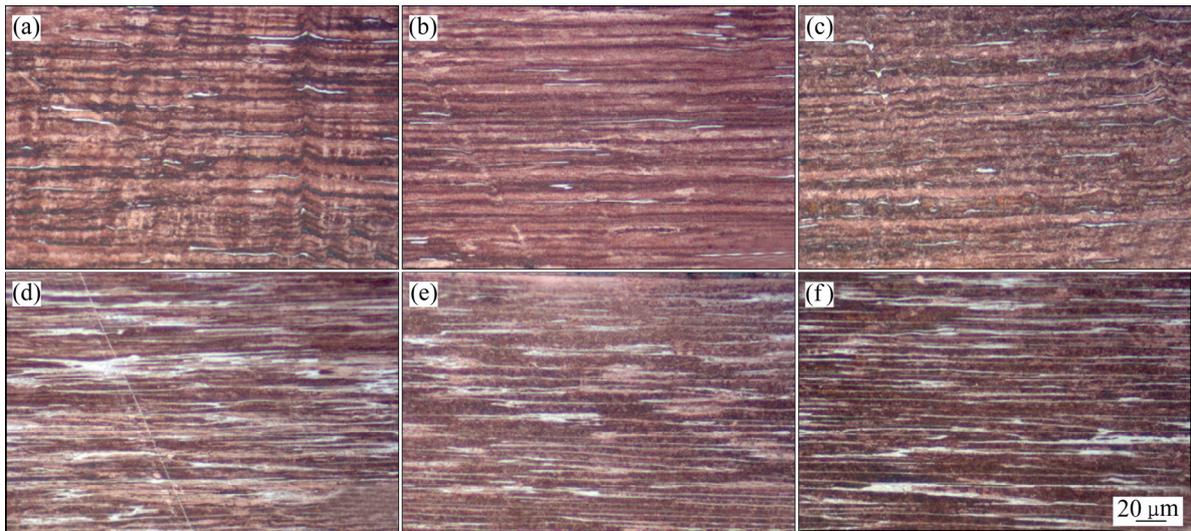


图 31 Cu-4Ag 和 Cu-20Ag 合金在不同退火温度下纵截面微观组织

Fig. 31 Longitudinal section microstructures of Cu-4Ag alloy((a), (b), (c)) and Cu-20Ag alloy((d), (e), (f)) after annealing at different temperatures: (a), (d) 440 °C; (b), (e) 480 °C; (c), (f) 520 °C

参数, 即可在铜线表面形成一层光滑平整的镀层, 烘干的作用是使溶液中的溶剂和其它有机物质挥发或者分解掉, 只留下纯镀层粘附在铜线表面, 在热处理的作用下, 镀层完成烧结过程并伴随着晶粒长大和界面扩散, 从而形成界面结合强度高并且光亮的表面纳米镀层。表面纳米涂镀原理图及装置分别如图 32 和图 33 所示。

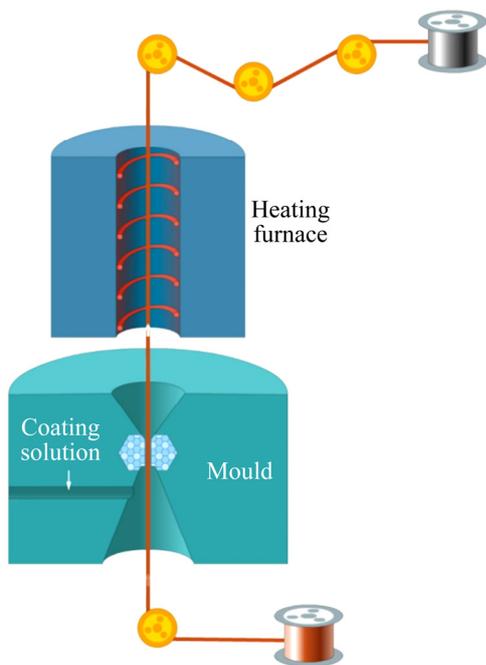


图 32 表面纳米涂镀工艺原理图

Fig. 32 Schematic diagram of surface nano immersion plating process



图 33 微细丝线材表面纳米涂镀装置

Fig. 33 Device of surface nano immersion plating for micro wire

4.2 表面纳米涂镀工艺对微细丝线材组织性能影响

影响表面纳米涂镀涂镀质量的工艺参数包括: 纳米涂镀液的分散性、模具结构、涂镀速度、热处理温度等。本团队研究人员以铜基微细丝线材表面纳米涂镀钯为例, 研究了金属纳米颗粒在涂镀液中的分散行为, 探明了模具结构对镀钯铜线钯层厚度和表面质量的影响规律; 研究了加热沉积温度对镀层厚度、镀层

与基体界面结合强度、微细丝线材拉断力、伸长率的影响规律,优化了表面纳米涂镀工艺参数,并对浸钯铜线的可靠性、成球性和键合性进行了研究^[87-92]。

4.2.1 模具结构对表面涂镀层厚度和表面质量影响

微细丝线材表面纳米涂镀过程中,模具孔径大小决定了镀层的厚度和镀钯铜线的表面质量^[87-88]。纳米有机溶液从注液孔注入到模具中心孔的过程中,由于模具中心孔很小,纳米有机溶液由于表面张力作用易聚集在模具入口区。

分别采用 0.021、0.022、0.023、0.024、0.025 和 0.026 mm 孔径模具进行表面纳米涂镀试验,图 34 所示为采用不同孔径模具进行表面纳米涂镀钯后的铜基微细丝线材表面形貌。由图 34(a)可知,对于 0.021 mm、0.022 mm 孔径模具,铜线经过涂镀后钯层没有完全覆盖铜线表面,有部分露铜现象;对于 0.023 mm 和 0.024 mm 孔径模具,涂镀钯铜线表面光洁完好,镀层均匀,如图 34(b)所示;对于 0.025 mm 和 0.026 mm 孔径模具,涂镀钯铜线表面出现颗粒状凸起,该凸起为纳米有机溶液在线材上残留较多所致,如图 34(c)所示。由此,当模具孔径尺寸大于线径尺寸 3~4 μm 时,镀层表面较好。图 34(d)所示为键合铜线镀层厚度的 FIB

(Focused Ion Beam)测试结果。由图可见,镀层厚度为 96 nm,且镀层非常均匀。

4.2.2 热处理对表面镀钯铜组织性能影响

本团队研究人员研究了加热沉积温度对镀层厚度、镀层与基体界面结合强度、微细丝线材拉断力、伸长率的影响规律,优化了表面直接镀钯工艺参数^[88-90]:热处理温度 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,钯层与铜基体之间形成了均匀致密的 Pd_3Cu_5 金属间化合物,钯层厚度 77.3~79.1 nm(见图 35)。

当热处理温度为 430 $^{\circ}\text{C}$ 和 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,镀钯铜线表面的钯原子向铜基体扩散加快,镀钯层厚度由 117 nm(430 $^{\circ}\text{C}$)减薄至 78 nm(450 $^{\circ}\text{C}$),并在界面形成部分 Pd_3Cu_5 金属间化合物层,镀钯铜线拉断力增加;进一步增加热处理温度至 500 $^{\circ}\text{C}$,镀钯铜线基体内部开始再结晶,并伴随晶粒长大,同时线材拉断力降低为 0.073 N,伸长率降低至 11.6%;热处理温度为 450 $^{\circ}\text{C}$ 时,镀钯铜线具有优良的力学性能,且钯层与基体的结合强度、钯层厚度等均满足使用要求。

图 36 所示为不同热处理温度下的 Ag-4Pd 键合线组织结构。经 250 $^{\circ}\text{C}$ 热处理 2 s 后,Ag-4Pd 键合线的拉断力下降,伸长率增加,但变化幅度较小,仍保留

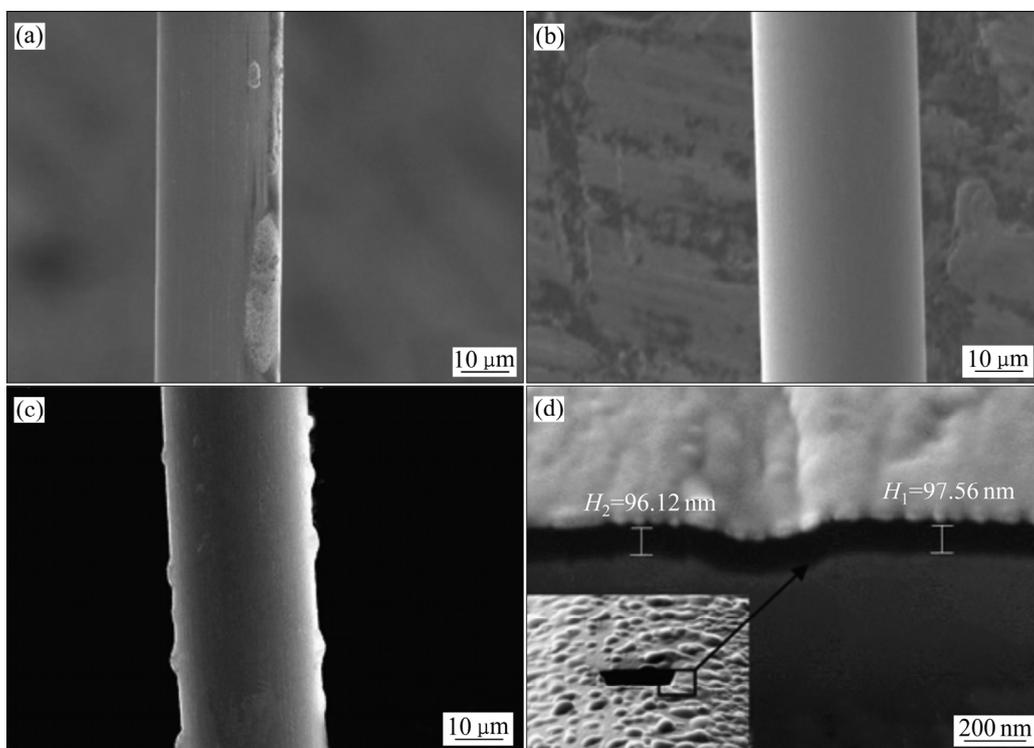


图 34 不同孔径模具进行镀钯后的铜线表面形貌^[87-88]

Fig. 34 Surface morphologies of copper wire after palladium plating with different aperture dies^[87-88]: (a) 0.021, 0.022 mm; (b) 0.023, 0.024 mm; (c) 0.025, 0.026 mm; (d) Plating thickness

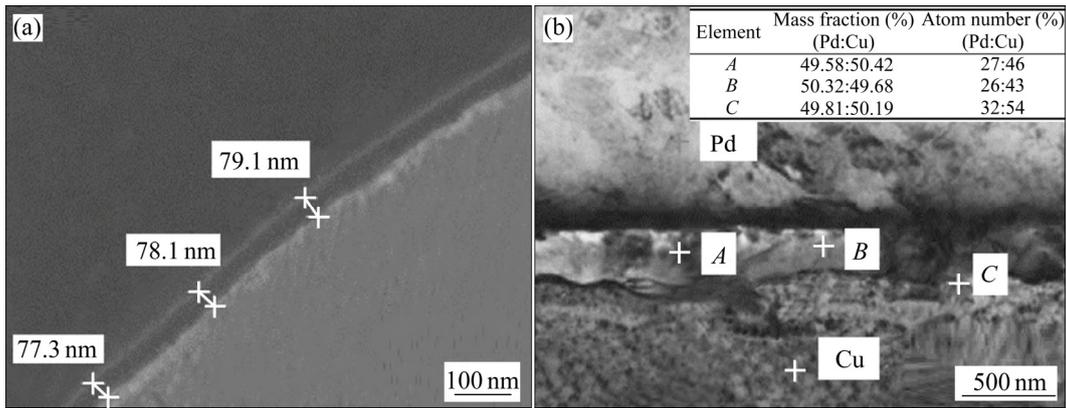


图 35 铜线表面镀钯层厚度及成分组成^[88]

Fig. 35 Plating thickness and composition of palladium coating on copper wire surface^[88]

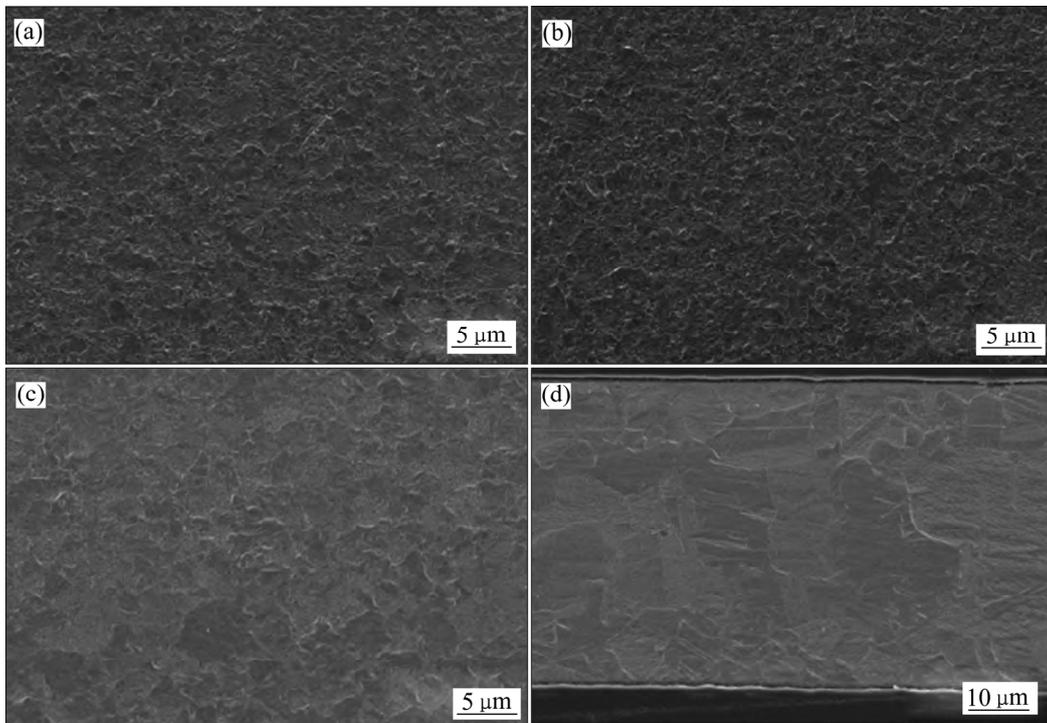


图 36 不同热处理温度下的 Ag-4Pd 键合线微观组织^[89]

Fig. 36 Microstructures of Ag-4Pd bonded alloy wire at different heat treatment temperatures^[89]: (a) 250 °C; (b) 350 °C; (c) 400 °C; (d) 550 °C

有大量的变形组织; 经 300 °C 热处理 2 s 后, Ag-4Pd 键合线仍保留有部分变形组织, 进入回复阶段; 经 350 °C 处理 2 s 后, Ag-4Pd 键合线形变组织基本消失; 经 400 °C 热处理 2 s 后, 试样组织形貌由冷拔态的纤维状组织转变为等轴晶组织, 进入再结晶阶段。

4.2.3 表面镀钯铜线键合性能研究

研究了不同镀钯铜线键合质量变化规律, 阐明了钯层厚度、伸长率和拉断力、热影响区对键合质量的

作用机制, 钯层厚度不应低于线径的 0.47%^[88, 91-92]。

图 37 所示为不同钯层厚度铜线的 FIB 图片, PdCu1、PdCu2 钯层厚度分别为 42.35 nm 和 95 nm。图 38 所示分别为 PdCu1、PdCu2 镀钯铜线经过 EFO 后的 FAB 图片, 可以看出, PdCu1 镀钯铜线经过 EFO(Electronic Flame Off)后的 FAB (Free Air Ball)成球较偏, 呈高尔夫球杆状, 如图 38(a)所示; PdCu2 镀钯铜线成球规则, 对称性较好, 如图 38(b)所示。

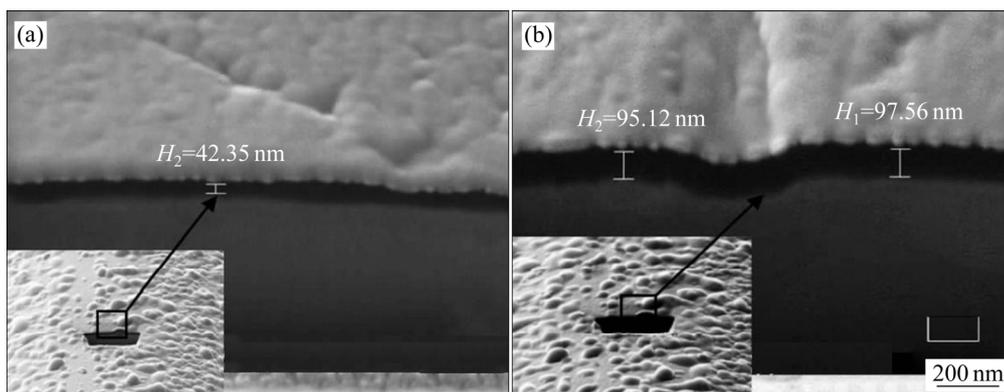


图 37 不同钯层厚度铜线的 FIB 图片^[92]

Fig. 37 Different palladium thickness of copper wires^[92]: (a) PdCu1; (b) PdCu2

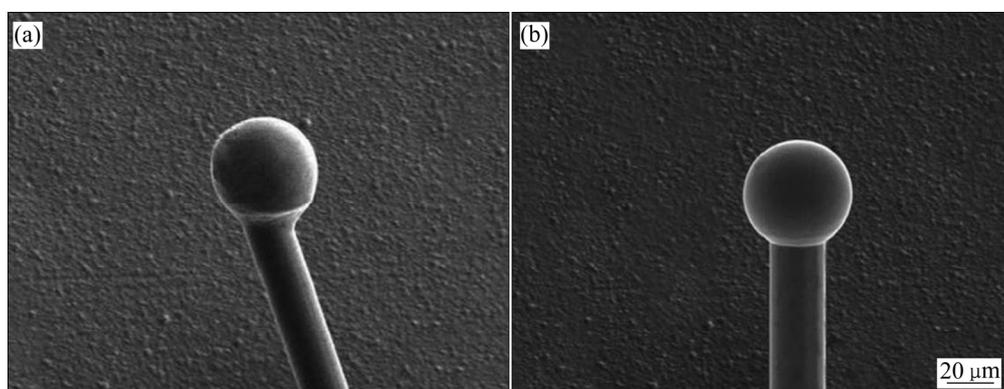


图 38 表面镀钯铜线铜球形貌^[91]

Fig. 38 Copper ball morphologies of palladium plated copper wire^[91]: (a) PdCu1; (b) PdCu2

5 发展趋势及展望

高性能铜基微细丝线材目前主要应用于集成电路封装、电子通讯、连接器、音视频传输等领域用产品。2020年5月22日,《2020年国务院政府工作报告》提出,重点支持“两新一重”建设,其中新型基础设施建设(简称:新基建),主要包括5G、特高压、城际高速铁路和城市轨道交通、新能源汽车充电桩、大数据中心、人工智能、工业互联网七大领域,涉及诸多产业链,将给铜基微细丝线材的应用带来机遇和挑战。

1) 5G 通信领域。基于视频、音频和图像等高通传输速率、低时延的传输需求,对铜基微细丝线材导体材料的信号传输能力提出更高要求,在基础研究方面,晶界对音视频信号传输的影响机理尚不明晰,需要进一步探讨,相关标准有待进一步完善制订;在此基础

上,通过开展成分组织纯净度、高导电性能、信号传输性能之间的内在关联研究,开发出极细、极低信号衰减、高强高导电的铜基微细丝线材将成为主要发展方向。

2) 新能源领域。满足新能源汽车、光伏发电、风力发电等领域关键导体材料的极细铜合金丝线材发展迅速,2020年11月2日国务院办公厅日发布的《新能源汽车产业发展规划(2021~2035年)》,将对该领域用铜基微细丝线材带来发展机遇。

3) 航空航天领域。质量轻、柔软、耐弯曲、耐振动、抗水解、抗高温软化、电气性能和力学性能俱佳的铜合金导线将保持稳定的发展趋势。

4) 半导体封装领域。高强度、高抗氧化性能、低成本的单晶铜合金加工线将成为主要发展方向。

5) 医疗领域。高清晰影音信号传输、高强度、优异弯曲性能的铜基微细丝线缆成为发展趋势。

6) 安防监控系统。高清安防监控系统要求清晰度

高,且布线网络复杂,高保真音视频传输线用铜基微细丝线材市场空间巨大。

在铜基微细丝线材超细、超精、连续稳定拉拔技术和装备开发方面,主要表现出以下几点发展趋势:

1) 高速拉拔。目前微拉机入线线径 0.50~1.00 mm,成品线径 0.02~0.30 mm,最大线速 2500 m/min。采用高速拉拔可大幅提高生产效率,但拉丝速度过快会引起丝线材变形不均,从而导致微细丝线材性能不稳定甚至断丝。因此,应在保证丝线材质量的前提下提高拉丝速度。

2) 多头拉丝。多头拉丝束线技术将多根单线收绕在同一线盘内,可实现快速换模,减少放线盘周转时间。同时,由于多股线同时拉制同时退火,组织性能一致性好。因此,该技术具有高效、低耗等特点,可解决传统拉丝束线技术中放线盘占地面积大、张力控制不好、易于断线等问题。

3) 无滑动拉丝。传统滑动式连续拉丝技术是拉线鼓轮圆周速度大于线材拉拔速度,并由此产生的摩擦力曳引线材拉过模具完成减径,其优点是总的延伸系数高、加工率大、拉拔速度高、产量大,易于实现自动化、机械化,由于线材与鼓轮间存在滑动,拉线过程线材摩擦力大,对鼓轮表面磨损大,对配模要求严格。相较于滑动拉丝技术,无滑动式拉丝技术是拉丝过程中走线速度与卷筒线速度相等,鼓轮并联组成,各鼓轮单独驱动、独立调速。同时,开发超声拉拔技术,通过在拉拔过程中施加超声波,可大幅度降低摩擦因数,提高微细丝线材产品质量。

4) 大容量收线。线盘直径太小,生产工人需频繁更换线盘,增加工人劳动强度。开发大容量线盘收线技术,减少线盘更换次数,是未来发展趋势。

在铜基微细丝线材表面处理技术发展方面,铜基键合线处于高速发展阶段,且技术正趋于完善。需要重点关注两个问题:一是氧化问题;二是柔软性问题。在铜基微细丝线材表面涂镀贵金属(金、银、钯)是提高抗氧化性能的主要途径,新型铜基微细丝线材绿色高效表面涂镀稀贵金属处理技术开发是值得关注的趋势。

REFERENCES

[1] 崔 兰,季小娜,陈小平,丁 丽. 高强高纯铜线材及铜基材料的研究进展[J]. 稀有金属, 2004, 28(5): 917-920.
CUI Lun, JI Xiao-na, CHEN Xiao-ping, DING Li. Research and development of pure copper wires and copper-based

materials with high strength and high conductivity[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(5): 917-920.

[2] 李 周,肖 柱,姜雁斌,雷 前,谢建新. 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): 2019-2049.

LI Zhou, XIAO Zhu, JIANG Yan-bin, LEI Qian, XIE Jian-xin. Composition design, phase transition and fabrication of copper alloys with high strength and electrical conductivity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 2019-2049.

[3] 文 珊,常丽丽,尚兴军,李胜利. 铜银合金导线的显微组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1655-1661.

WEN Shan, ChANG Li-li, ShANG Xing-jun, LI Sheng-li. Microstructure and properties of Cu-Ag alloy wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1655-1661.

[4] 宋慧芳. 微电子器件封装铜线键合可行性分析[J]. 电子与封装, 2012, 12(2): 12-14.

SONG Hui-fang. Feasibility analysis of Cu wires bonding in packaging[J]. Electronics and Packaging, 2012, 12(2): 12-14.

[5] 丁雨田,曹 军,许广济,寇生中,胡 勇. 电子封装 Cu 键合丝的研究及应用[J]. 铸造技术, 2006, 27(9): 971-974.

DING Yu-tian, CAO Jun, XU Guang-ji, KOU Sheng-zhong, HU Yong. Research and application of copper bonding wire in electronic packaging[J]. Foundry Technology, 2006, 27 (9): 971-974.

[6] 吴子平,李精忠. 铜合金线材的应用及其生产工艺[J]. 上海有色金属, 2017, 29(3): 17-20.

WU Zi-ping, LI Jing-zhong. Applications of copper alloys wires and their production processes[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2017, 29(3): 17-20.

[7] 大野笃美. 金属的凝固理论、实践及应用[M]. 邢建东,译. 北京:机械工业出版社,1990.

ATSUMI O. Solidification theory, practice and application of metals[M]. XING Jian-dong, transl. Beijing: Machinery Industry Press, 1990.

[8] 大野笃美. 平滑表面铸锭的连续铸造法[J]. 高泽生,译. 轻合金加工技术, 1980, 1: 1-2.

ATSUMI O. Continuous casting of ingots with smooth surface[J]. GAO Ze-sheng, transl. Light Alloy Fabrication Technology, 1980, 1: 1-2.

[9] 大野笃美. 采用 OCC 工艺开发新产品[J]. 朱玉俭,译. 轻合金加工技术, 1991, 19(3): 20-23.

- ATSUMI O. Developing new products with OCC process[J]. ZHU Yu-jian, transl. Light Alloy Fabrication Technology, 1991, 19(3): 20-23.
- [10] 李林升. Cu-Cr 合金的热型连铸[D]. 广州: 广东工业大学, 2004: 12-18.
- LI Li-sheng. Hot mold continuous casting of Cu Cr alloy[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2004: 12-18.
- [11] 丁宗富, 丁雨田, 寇生中, 许广济, 陈宇. 热型连铸制备 Cu-Cr 合金的研究[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(1): 32-34.
- DING Zong-fu, DING Yu-tian, KOU Sheng-zhong, XU Guang-ji, CHEN Yu. Investigation of preparing Cu-Cr alloy by means of continuous casting with heated mould[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2004, 30(1): 32-34.
- [12] 李来军. 连续定向凝固技术制备 Cu-Ag、Cu-Cr 合金线材及其组织和性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004: 34-44.
- LI Lai-jun. Microstructure and properties of Cu-Ag and Cu-Cr alloy wires prepared by continuous directional solidification process[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2004: 34-44.
- [13] 安桂焕. 热型连铸单晶铜杆装置及其工艺的研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013: 43-45.
- AN Gui-huan. Study on the device and technology of single crystal copper rod for hot mold continuous casting[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2013: 43-45.
- [14] 许振明, 李金山, 李建国, 傅恒志. 连铸铜单晶工艺参数的匹配及其对铸棒表面质量和组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(S1): 221-228.
- XU Zhen-ming, LI Jin-shan, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Matching of technological parameters and its effect on surface quality and cast structure of copper single crystal rod during continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(S1): 221-228.
- [15] 封存利, 范广新, 邱胜利, 刘光林. 热型连铸单晶 Cu 设备的开发与应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(7): 737-739.
- FENG Cun-li, FAN Guang-xin, QIU Sheng-li, LIU Guang-lin. Development and application of horizontal ohno continuous casting equipment[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2015, 35(7): 737-739.
- [16] 王彦红, 肖来荣, 胡炜, 曹德露, 宋宇峰, 刘峤. 水平热型连铸定向凝固设备研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(5): 510-512.
- WANG Yan-hong, XIAO Lai-rong, HU Wei, CAO De-lu, SONG Yu-feng, LIU Qiao. Unidirectional solidification equipment for horizontal ohno continuous casting[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2014, 34(5): 510-512.
- [17] 丁雨田, 柳建, 陈卫华, 胡勇, 许广济, 寇生中. 横引式真空熔炼氩气保护热型连铸设备研究[J]. 铸造技术, 2007, 28(6): 827-830.
- DING Yu-tian, LIU Jian, CHEN Wei-hua, HU Yong, XU Guang-ji, KOU Sheng-zhong. Research on horizontal heated mold continuous casting equipment under conditions of vacuum melting and argon shield[J]. Foundry Technology, 2007, 28(6): 827-830.
- [18] 范新会, 魏朋义, 李建国, 傅恒志. 单晶连铸技术原理及试验研究[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(4): 109-112.
- FAN Xin-hui, WEI Peng-yi, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Technical principle and experimental study of single crystal continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(4): 109-112.
- [19] 范新会, 李建国, 傅恒志. 单晶连铸技术研究评述[J]. 材料导报, 1996 (3): 1-6.
- FAN Xin-hui, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Review of the studies on the continuous casting of single crystal metals[J]. Materials Review, 1996 (3): 1-6.
- [20] 范新会, 蔡英文, 魏朋义, 李建国, 傅恒志. 单晶连铸技术研究[J]. 材料研究学报, 1996, 10(3): 264-266.
- FAN Xin-hui, CAI Ying-wen, WEI Peng-yi, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Continuous casting technology of single crystal metals[J]. Chinese Journal of Materials Research, 1996, 10(3): 264-266.
- [21] 丁雨田. 热型连铸凝固过程微观组织形成的数值模拟[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- DING Yu-tian. Numerical simulation of microstructure formation in solidification process of hot mold continuous casting[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2005.
- [22] 丁雨田, 许广济, 王海南, 张琴豫. 热型连铸凝固过程微观组织形成的数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(12): 707-711, 701.
- DING Yu-tian, XU Guang-ji, WANG Hai-nan, ZHANG Qin-yu. Numerical simulation of microstructure formation during solidification process in heated mould continuous casting[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2005, 25(12): 707-711, 701.

- [23] 丁雨田, 张琴豫, 许广济, 衣冠玉, 寇生中. 纯铜热型连铸过程三维微观组织模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(9): 554-558, 532-533.
DING Yu-tian, ZHANG Qin-yu, XU Guang-ji, YI Guan-yu, KOU Sheng-zhong. 3-D simulation of microstructure of pure Cu in heated mould continuous casting[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2006, 26(9): 554-558, 532-533.
- [24] 寇生中, 丁雨田. 热型连铸固液界面位置和形状的控制分析[J]. 铸造技术, 2008, 29(1): 72-74.
KOU Sheng-zhong, DING Yu-tian. Control and analysis of location and shape of solid/liquid interface in heated mold continuous casting[J]. Foundry Technology, 2008, 29(1): 72-74.
- [25] 咎 斌, 寇生中, 丁雨田. 铸型温度梯度对热型连铸固液界面位置的影响[J]. 铸造, 2007, 56(6): 597-598.
ZAN Bin, KOU Sheng-zhong, DING Yu-tian. Effect of temperature gradient of mold on the position of solid-liquid interface in heated-mold continuous casting[J]. Foundry, 2007, 56(6): 597-598.
- [26] 丁宗富. 单晶连铸法制备铜单晶体的试验研究[D]. 甘肃: 甘肃工业大学, 2001.
DING Zong-fu. Study on producing pure copper single crystal ingot by continuous casting of single crystal metals(CCSC)[D]. Gansu: Gansu Polytechnical University, 2001.
- [27] 丁雨田, 许广济, 郭法文, 寇生中, 兰晔峰, 丁宗富, 刘广林, 封存利, 杨新山. 热型连铸单晶铜的性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1071-1076.
DING Yu-tian, XU Guang-ji, GUO Fa-wen, KOU Sheng-zhong, LAN Hua-feng, DING Zong-fu, LIU Guang-lin, FENG Cun-li, YANG Xin-shan. Properties of single crystal copper produced by heated mould continuous casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1071-1076.
- [28] 赵 干, 倪 锋, 魏世忠, 龙 锐, 李兴霞, 路凯通. 热型连铸技术在单晶铜生产中的应用状况[J]. 铸造设备研究, 2006(4): 46-51.
ZHAO Gan, NI Feng, WEI Shi-zhong, LONG Rui, LI Xing-xia, LU Kai-tong. Review of ohno continuous casting and its application for single crystal of copper[J]. Research of Foundry Equipment, 2006(4): 46-51.
- [29] 彭 孜, 李明茂. 单晶连铸技术的发展及其在单晶铜生产中的应用[J]. 上海有色金属, 2009, 30(3): 134-137.
PENG Zi, LI Ming-mao. Development of ohno continuous casting process and its applications for producing single crystalline copper[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 2009, 30(3): 134-137.
- [30] 袁 静. 水平连铸单晶铜超微细丝制备与组织性能演变研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011: 2-9.
YUAN Jing. Study on preparation and microstructure and properties evolution of single crystal copper ultrafine wire by horizontal continuous casting[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011: 2-9.
- [31] 王东岭, 苏 勇, 陈翌庆, 刘 伟, 熊小兵, 叶东皇. 热型连铸准单晶铜杆的工艺及性能[J]. 金属功能材料, 2010, 17(1): 58-61.
WANG Dong-ling, SU Yong, CHEN Yi-qing, LIU Wei, XIONG Xiao-bing, YE Dong-huang. Technology and properties of quasi-single crystal copper produced by heated mould continuous casting[J]. Metallic Functional Materials, 2010, 17(1): 58-61.
- [32] RAO L, ZHU L B, HU Q Y. Microstructure morphology evolution of single crystal copper rod by ohno continuous casting in copper manufacturing system[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 252: 360-363.
- [33] JIANG Yan-bin, ZHANG Tong-tong, LEI Yu, LIU Xin-hua, CAO Yang, XIE Jian-xin, ZHAO Bing, LI Yong-hua, JIAO Chuan-rong. Microstructure evolution and mechanical properties of Cu-0.36Be-0.46Co alloy fabricated by heating-cooling combined mold horizontal continuous casting during cold rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 958-971.
- [34] 华云筱, 宋克兴, 何季麟, 皇 涛, 周延军, 封存利, 丁雨田, 刘海涛, 胡 勇, 曹 军, 张朝民, 程 楚. 晶粒取向对单晶铜断裂机理的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1151-1155.
HUA Yun-xiao, SONG Ke-xing, HE Ji-lin, HUANG Tao, ZHOU Yan-jun, FENG Cun-li, DING Yu-tian, LIU Hai-tao, HU Yong, CAO Jun, ZHANG Chao-min, CHENG Chu. Effect of grain orientation on fracture mechanism of single crystal copper[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1151-1155.
- [35] 张 功, 张忠明, 郭学锋, 时胜利. 铜单晶的静拉伸力学性能和变形特性研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(6): 434-435, 437.
ZHANG Gong, ZHANG Zhong-ming, GUO Xue-feng, SHI Sheng-li. Research on mechanical properties and characteristics of plastic deformation of continuous casting of single crystal copper wire[J]. Foundry Technology, 2004, 25(6): 434-435, 437.

- [36] 胡锐, 何平, 李金山, 毕晓勤, 李玉龙, 傅恒志. 连铸单晶铜的力学性能及断裂特征[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(6): 716-718.
HU Rui, HE Ping, LI Jin-shan, BI Xiao-qin, LI Yu-long, FU Heng-zhi. Analysis of mechanical properties and fracture characteristic of continuous casting single crystal copper[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(6): 716-718.
- [37] 王建, 邢建东, 王德义, 姜红喜. 热型连铸单晶 Sn 带材制备工艺及其性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1610-1613.
WANG Jian, XING Jian-dong, WANG De-yi, JIANG Hong-xi. Research on the processing and performance of single crystal tin strips using a heated mould[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(9): 1610-1613.
- [38] 刘新华, 金建星, 谢建新. 制备参数对 HCCM 水平连铸纯铜板坯组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(2): 213-222.
LIU Xin-hua, JIN Jian-xin, XIE Jian-xin. Effect of preparation parameters of HCCM horizontal continuous casting on microstructure and properties of pure copper slab[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(2): 213-222.
- [39] 郭保江, 周延军, 张彦敏, 宋克兴, 孔令宝, 牛立业, 康军伟. 连铸速度对 Cu-3.5Ag 合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(7): 808-812.
GUO Bao-jiang, ZHOU Yan-jun, ZHANG Yan-min, SONG Ke-xing, KONG Ling-bao, NIU Li-ye, KANG Jun-wei. Effects of continuous casting speeds on microstructure and properties of Cu-3.5Ag alloy[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2019, 39(7): 808-812.
- [40] JING D, MING X, SONG W, ZHANG J M, WANG S H, HU J Q, LI A K. Characterization of Cu-Ag-Y alloy synthesized by the continuous casting technique[J]. Precious Metals, 2014, 35(S1): 0084-0089.
- [41] 黎沃光, 陈先朝, 余业球, 王德芳. 热型连铸法制取 CuAlNi 形状记忆合金丝[J]. 功能材料, 2000, 31(6): 605-607.
LI Wo-guang, CHEN Xian-chao, YE Yu-qiu, WANG De-fang. CuAlNi shape memory alloy wires cast with heated mold continuous casting process[J]. Journal of Functional Materials, 2000, 31(6): 605-607.
- [42] ZHANG Xiao-yuan, ZHANG Hui, KONG Xiang-xin, FU Ding-fa. Microstructure and properties of Al-0.70Fe-0.24Cu alloy conductor prepared by horizontal continuous casting and subsequent continuous extrusion forming[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1763-1769.
- [43] 封存利, 秦芳莉, 介明山, 武国旗, 刘光林, 李雷. 拉拔工艺对定向凝固 Cu-Ag 合金导线性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(8): 893-896.
FENG Cun-li, QIN Fang-li, JIE Ming-shan, WU Guo-qi, LIU Guang-lin, LI Lei. Effects of drawing process on properties of directional solidification Cu-Ag conduct wires[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2015, 35(8): 893-896.
- [44] 郭保江. 热型水平连铸制备高强高导铜银合金组织性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
GUO Bao-jiang. Microstructure and properties of Cu Ag alloy with high strength and high conductivity prepared by hot mold horizontal continuous casting[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [45] 谢建新, 王宇, 黄海友. 连续柱状晶组织铜及铜合金的超延展变形行为与塑性提高机制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2324-2336.
XIE Jian-xin, WANG Yu, HUANG HAI-you. Extreme plastic extensibility and ductility improvement mechanisms of continuous columnar-grained copper and copper alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2324-2336.
- [46] ZHAO H M, FU H D, XIE M, XIE J X. Effect of Ag content and drawing strain on microstructure and properties of directionally solidified Cu-Ag alloy[J]. Vacuum, 2018, 154: 190-199.
- [47] 于朝清, 尹霜, 任小梅, 吴达, 李联文, 赵川, 陈蓉, 郭雪梅. Cu-Ag 稀合金定向凝固制造技术的研究[J]. 电工材料, 2016(2): 10-13.
YU Chao-qing, YI Shuang, REN Xiao-mei, WU Da, LI Lian-wen, ZHAO Chuan, CHEN Rong, GUO Xue-mei. Study of Cu-Ag directional solidification technology[J]. Electrical Engineering Materials, 2016(2): 10-13.
- [48] SHEN Y, XIE M, BI J, ZHANG G Q, GUAN W M, WEN M, WANG S. Effects of different preparation techniques on mechanical property and electrical conductivity of Cu-8wt% Ag alloy by continuous casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(8): 1997-2002.
- [49] 曹军, 吕长春, 王福荣, 刘志强, 李科. 一种竖引式真空熔炼惰性气体保护连续加料连铸机: 中国, CN201410530215.4[P]. 2015-01-28.
CAO Jun, LÜ Chang-chun, WANG Fu-rong, LIU Zhi-qiang, LI Ke. A vertical drawing vacuum melting inert and gas

- protection continuous feeding continuous casting machine: China, CN201410530215.4[P]. 2015-01-28.
- [50] 何钦生, 邹兴政, 李方, 唐锐, 赵安中, 田世龙. Cu-Ag 合金原位纤维复合材料研究现状[J]. 材料导报, 2018, 32(8): 2684-2692, 2700.
- HE Qin-sheng, ZOU Xing-zheng, LI Fang, TANG Rui, ZHAO An-zhong, TIAN Shi-long. Research status of Cu-Ag alloy in-situ filamentary composites[J]. Material Report, 2018, 32(15): 2684-2692, 2700.
- [51] 张晓辉, 宁远涛, 李永年, 戴红. 凝固速率对 Cu-Ag 原位纤维复合材料性能的影响[J]. 贵金属, 2002, 23(1): 19-25.
- ZHANG Xiao-hui, NING Yuan-tao, LI Yong-nian, DAI Hong. Influence of solidification rate on properties of Cu-Ag in situ filamentary composites[J]. Precious Metals, 2002, 23(1): 19-25.
- [52] SAKAI Y, INOUE K, ASANO T, WADA H, MAEDA H. Development of high-strength, high-conductivity Cu-Ag alloys for high-field pulsed magnet use[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(23): 2965-2967.
- [53] LIU J B, ZENG Y W, MENG L. Crystal structure and morphology of a rare-earth compound in Cu-12wt%Ag[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 468(1): 73-76.
- [54] LIU J B, MENG L. Rare earth microalloying in as-cast and homogenized alloys Cu-6wt%Ag and Cu-24wt%Ag[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 425(1/2): 185-190.
- [55] 李贵茂, 王恩刚, 张林, 左小伟, 赫冀成. 形变原位 Cu-Ag 复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 80-84.
- LI Gui-mao, WANG En-gang, ZHANG Lin, ZUO Xiao-wei, HE Ji-cheng. Research development of deformed processed Cu-Ag situ composites[J]. Materials Review, 2010, 24(3): 80-84.
- [56] 杨冉, 王要利, 宋克兴, 周延军, 曹军, 吕长春, 丁雨田, 胡勇. 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.
- YAN Ran, WANG Yao-li, SONG Ke-xing, ZHOU Yan-jun, CAO Jun, LÜ Chang-chun, DING Yu-tian, HU Yong. Effect of Ag content on microstructure and properties of Cu-Ag alloy prepared by vertical continuous casting[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(10): 31-37.
- [57] 孔金星, 陈辉, 何宁, 李亮, 姜峰. 纯铁材料动态力学性能测试及本构关系模型[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 2063-2071.
- KONG Jin-xing, CHEN Hui, HE Ning, LI Liang, JIANG Feng. Dynamic mechanical property tests and constitutive model of pure iron material[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(7): 2063-2071.
- [58] 杨锋平, 罗金恒, 李鹤, 郭亚洲, 冯健. X90 超高强度输气钢管材料本构关系及断裂准则[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 112-118.
- YANG Feng-ping, LUO Jin-heng, LI He, GUO Ya-zhou, FENG Jian. Constitutive law and fracture criteria of X90 ultrahigh-strength gas-transmission steel pipe material[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 112-118.
- [59] 刘再德, 王冠, 冯银成, 李落星. 6061 铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(6): 120-123.
- LIU Zai-de, WANG Guan, FENG Yin-cheng, LI Luo-xing. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(6): 120-123.
- [60] AKSENOV O I, FUKS A A, ARONIN A S. The effect of stress distribution in the bulk of a microwire on the magnetization processes[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 836: 155472.
- [61] 吴尚霖, 鞠康, 段春争, 孔金星. 细晶 T2 纯铜动态力学性能及本构关系模型[J]. 工具技术, 2019, 53(11): 16-20.
- WU Shang-lin, JU Kang, DUAN Chun-zheng, KONG Jin-xing. Dynamic mechanical properties and constitutive model of fine grained T2 copper[J]. Tool Engineering, 2019, 53(11): 16-20.
- [62] 马继山, 孟宪国, 于海平, 刘大卫, 王手龙. QCr0.8 铜合金动态力学性能研究[J]. 火箭推进, 2016, 42(6): 57-61.
- MA Ji-shan, MENG Xian-guo, YU Hai-ping, LIU Da-wei, WANG Shou-long. Research on dynamic mechanical properties of QCr0.8 copper alloy[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(6): 57-61.
- [63] SONG Ke-xing, GENG Yong-feng, BAN Yi-jie, ZHANG Yi, LI Zhou, MI Xu-jun, CAO Jun, ZHOU Yan-jun, ZHANG Xue-bin. Effects of strain rates on dynamic deformation behavior of Cu-20Ag alloy[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.043>.
- [64] SAKAI Y, SCHNEIDER-MUNTAU H J. Ultra-high strength, high conductivity Cu-Ag alloy wires[J]. Acta Materialia, 1997, 45(3): 1017-1023.
- [65] LIU J B, MENG L, ZENG Y W. Microstructure evolution and properties of Cu-Ag microcomposites with different Ag content[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435(9): 237-244.

- [66] 宁远涛, 张晓辉, 张 婕. 大变形 Cu-Ag 合金原位纤维复合材料的稳定性[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(4): 18-24.
NING Yuan-tao, ZHANG Xiao-hui, ZHANG Jie. Stability of heavy deformed Cu-Ag alloy in situ filamentary composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(4): 18-24.
- [67] ZUO X, HAN K, ZHAO C, NIU R, WANG E. Microstructure and properties of nanostructured Cu28wt%Ag microcomposite deformed after solidifying under a high magnetic field[J]. Material Science and Engineering A, 2014, 619(11): 319-327.
- [68] ZHAO C, ZUO X, WANG E, HAN K. Strength of Cu-28wt%Ag composite solidified under high magnetic field followed by cold drawing[J]. Metals and Materials International, 2017, 23(2): 369-377.
- [69] 王 青, 梁淑华, 宋克兴, 国秀花, 周延军. 第二相对析出强化铜合金大变形量多道次连续拉拔变形组织和性能的影响[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(3): 301-305.
WANG Qing, LIANG Shu-hua, SONG Ke-xing, GUO Xiu-hua, ZHOU Yan-jun. The influence of second phase on microstructure and properties of precipitation strengthening of copper alloy during multi-pass deep wire drawing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 301-305.
- [70] 张 雷, 孟 亮. 合金元素对 Cu-Ag 合金组织、力学性能和电学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1218-1223.
ZHANG Lei, MENG Liang. Effect of alloying elements on the Microstructure, mechanical properties and electrical properties of Cu-Ag alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(6): 1218-1223.
- [71] 秦芳莉, 李 雷, 朱利媛, 冀国良, 封存利. 定向凝固 Cu-2.0Ag 合金冷拉拔时性能与组织演变[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(12): 74-79.
QIN Fang-li, LI Lei, ZHU Li-yuan, JI Guo-liang, FENG Cun-li. Properties and microstructure of directional solidification Cu-2.0Ag alloy with cold drawing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(12): 74-79.
- [72] 朱利媛, 李 雷, 冀国良, 李 强, 封博文, 刘光林. 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.
ZHU Li-yuan, LI Lei, JI Guo-liang, LI Qiang, FENG Bo-wen, LIU Guang-lin. Preparation and properties of Cu-4.0Ag alloy micro-fine wires[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2017, 37(12): 1357-1360.
- [73] 冯 江, 宋克兴, 何季麟, 程 楚, 张朝民, 周延军, 曹 军, 皇 涛, 张学宾. 多道次拉拔对 Cu-1Ag 合金微细丝线组织及性能研究[J]. 铸造技术, 2020, 41(11): 1020-1023, 1029.
FENG Jiang, SONG Ke-xing, HE Ji-lin, CHENG Chu, ZHANG Chao-min, ZHOU Yan-jun, CAO Jun, HUANG Tao, ZHANG Xue-bin. Study on microstructure and properties of Cu-1Ag alloy microwire in multi-pass drawing[J]. Foundry Technology, 2020, 41(11): 1020-1023, 1029.
- [74] 袁鹏飞, 皇 涛, 宋克兴, 苏娟华, 周延军, 曹 军, 程 楚, 张朝民, 张学宾. 拉拔变形量对 Cu-2Ag 合金丝线材组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1294-1298.
YUAN Peng-fei, HUANG Tao, SONG Ke-xing, SU Juan-hua, ZHOU Yan-jun, CAO Jun, CHENG Chu, ZHANG Chao-min, ZHANG Xue-bin. Effects of drawing deformation on microstructure and properties of Cu-2Ag alloy wire[J]. Special Casting Nonferrous Alloys, 2020, 40(11): 1294-1298.
- [75] 张朝民, 宋克兴, 程 楚, 周延军, 米绪军, 李 周, 肖 柱, 孔令宝, 康军伟, 袁鹏飞. 冷拉拔导致的大塑性变形对定向凝固 Cu-4 mass%Ag 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 49-56.
ZHANG Chao-min, SONG Ke-xing, CHENG Chu, ZHOU Yan-jun, MI Xu-jun, LI Zhou, XIAO Zhu, KONG Ling-bao, KANG Jun-wei, YUAN Peng-fei. Effect of large plastic deformation caused by cold-drawing on microstructure and properties of directional solidification Cu-4 mass%Ag alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(12): 49-56.
- [76] RYO N, KAZUNARI Y. Development of shaped copper magnet wire for hybrid motor by drawing[J]. Procedia Manufacturing, 2018(15): 209-216.
- [77] 沈 月, 杨有才, 张国全, 付作鑫, 陈永泰, 张吉明, 王塞北, 谢 明. 大变形对连铸 Cu-(2%-8%)Ag 合金力学性能及导电率的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1748-1753.
SHEN Yue, YANG You-cai, ZHANG Guo-quan, FU Zuo-xin, CHEN Yong-tai, ZHANG Ji-ming, WANG Sai-bei, XIE Ming. Effect of large deformation on mechanical property and electrical conductivity of Cu-(2%-8%)Ag alloys produced by continuous casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(7): 1748-1753.

- [78] BENGHALEM A, MORRIS D G. Microstructure and strength of wire-drawn Cu-Ag filamentary composites[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(1): 397-406.
- [79] 曹 军, 丁雨田, 曹文辉. 单晶铜键合丝制备过程中的断线研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(22): 84-89.
CAO Jun, DING Yu-tian, CAO Wen-hui. Research of break line in single crystal copper bonding wire drawing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(22): 84-89.
- [80] 丁雨田, 曹文辉, 胡 勇, 陈卫华. 单晶铜超微细丝的断线分析及制备工艺[J]. *特种铸造及有色合金*, 2008, 28(4): 261-264, 242.
DING Yu-tian, CAO Wen-hui, HU Yong, CHEN Wei-hua. Origination of wire breakage in ultra-fine single crystal copper wire drawing and its technical improvement[J]. *Special Casting Nonferrous Alloys*, 2008, 28(4): 261-264, 242.
- [81] 丁雨田, 曹 军, 胡 勇, 寇生中, 许广济. 冷变形和热处理对单晶 Cu 键合丝性能影响[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(4): 83-88.
DING Yu-tian, CAO Jun, HU Yong, KOU Sheng-zhong, XU Guang-ji. Effects of annealing and drawing on properties of single crystal copper bonding wire[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(4): 83-88.
- [82] 孔令宝, 周延军, 宋克兴, 封存利, 康军伟, 曹 军, 李 周, 牛立业, 郭慧稳. 拉拔变形和热处理对铜银合金组织性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(10): 1160-1163.
KONG Ling-bao, ZHOU Yan-jun, SONG Ke-xing, FENG Cun-li, KANG Jun-wei, CAO Jun, LI Zhou, NIU Li-ye, GUO Hui-wen. Effect of drawing deformation and heat treatment on the microstructure and properties of Cu-Ag alloy[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2020, 40(10): 1160-1163.
- [83] 郭保江, 周延军, 张彦敏, 孔令宝, 康军伟, 宋克兴, 曹 军, 周志云. 时效时间对 Cu-3.5Ag 合金性能及其纳米析出相特征的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(6): 55-61.
GUO Bao-jiang, ZHOU Yan-jun, ZHANG Yan-min, KONG Ling-bao, KANG Jun-wei, SONG Ke-xing, CAO Jun, ZHOU Zhi-yun. Effect of aging time on properties and nano precipitates characteristics of Cu-3.5Ag alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(6): 55-61.
- [84] 孔令宝, 周延军, 宋克兴, 郭保江, 康军伟, 封存利, 周志云. 热处理对 Cu-0.52Ag-0.22Cr 合金组织和性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2019, 40(12): 68-73.
KONG Ling-bao, ZHOU Yan-jun, SONG Ke-xing, GUO Bao-jiang, KANG Jun-wei, FENG Cun-li, ZHOU Zhi-yun. Effect of heat treatment on microstructure and properties of Cu-0.52Ag-0.22Cr alloy[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2019, 40(12): 68-73.
- [85] 李贵茂, 柳 艳, 李延增, 刘娟娟, 黎 涛. 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.
LI Gui-mao, LIU Yan, LI Yanzeng, LIU Juan-juan, LI Tao. Influence of Ag content on microstructure and properties of Cu-Ag alloys[J]. *Foundry Technology*, 2018, 39(3): 530-532.
- [86] 孔令宝, 周延军, 宋克兴, 曹 军, 吕长春, 李 科, 刘庆宾, 吴保安, 唐会毅, 张学宾, 皇 涛. 不同温度退火后 Cu-Ag 合金的组织性能[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(12): 29-32.
KONG Ling-bao, ZHOU Yan-jun, SONG Ke-xing, CAO Jun, LYU Chang-chun, LI Ke, LIU Qing-bin, WU Bao-an, TANG Hui-yi, ZHANG Xue-bin, HUANG Tao. Microstructure and properties of Cu-Ag alloy after annealing at different temperatures[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(12): 29-32.
- [87] 曹 军, 范俊玲, 高文斌. 不同模具参数对极细 Ag-Pd 键合合金线拉制质量的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(17): 39-42.
CAO Jun, FAN Jun-ling, GAO Wen-bin. Effects of different die parameters on fine Ag-Pd bonding wire drawing quality[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(17): 39-42.
- [88] 曹 军. 键合铜线性能及键合性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
CAO Jun. Study on properties and bonding properties of copper wire[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.
- [89] 曹 军, 吴卫星, 张 灿, 花 涵, 徐 旭. 热处理温度对 Ag-4Pd 合金线性能及组织的影响[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(8): 44-48.
CAO Jun, WU Wei-xing, ZHANG Can, HUA Han, XU Xu. Effects of heat treatment temperature on properties and microstructure of Ag-4Pd alloy bonding wire[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(8): 44-48.
- [90] 丁雨田, 胡 勇, 孔亚南, 曹 军, 李海峰. 电镀速度和烘干温度对镀银铜线表面质量的影响[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(1): 1-4.

- DING Yu-tian, HU Yong, KONG Ya-nan, CAO Jun, LI Hai-feng. Influence of temperature and speed to the surface quality of silver-coated copper wire[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(1): 1-4.
- [91] 曹 军, 范俊玲, 薛铜龙. 镀钯铜线性能对键合质量的影响研究[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(5): 48-53.
- CAO Jun, FAN Jun-ling, XUE Tong-long. Investigation of copper coating Pd wire properties and bonding quality[J]. Materials Science and Technology, 2014, 22(5): 48-53.
- [92] 曹 军, 范俊玲, 高文斌. 键合 Cu 线无卤直接镀 Pd 工艺及性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(5): 115-119.
- CAO Jun, FAN Jun-ling, GAO Wen-bin. Investigation of copper direct coating Pd technology and bonding properties[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(5): 115-119.

Preparation, microstructure and properties of copper based wire

SONG Ke-xing^{1,2}, ZHOU Yan-jun^{1,2}, MI Xu-jun³, XIAO Zhu⁴, CAO Jun⁵, DING Yu-tian⁶, WU Bao-an⁷, FENG Cun-li⁸, LI Zhou⁴, CHEN Ding-biao⁹, LYU Chang-chun¹⁰, HU Yong⁶, DING Yong¹¹

(1. School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

2. Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center of Nonferrous New Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023, China;

3. General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

5. School of Mechanical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

6. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

7. Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400700, China;

8. Henan Senger Materials Technology Co., Ltd., Jiaozuo 454010, China;

9. Changzhou Hengfeng Special Conductor Co., Ltd., Changzhou 213000, China;

10. Henan Youke Electronic Materials Co., Ltd., Jiyuan 454650, China;

11. Zhejiang Tony Electronic Co., Ltd., Huzhou 313008, China)

Abstract: The copper wires are widely used in integrated circuit bonding wire, audio and video transmission cable, active wiring harness of medical devices, and various electronic components. It is the key conductor material to ensure the stable transmission of system current and signal. Based on the preparation process of copper wire, this paper reviews the process characteristics of hot mold horizontal continuous casting and cold mold vertical continuous casting, and their relationship with the directional solidification structure of as-cast copper rod. The effects of process parameters such as continuous drawing, heat treatment, and surface coating on the characteristics of grain size, precipitated phase, surface coating, and bonding were discussed. Finally, the development trend of application field and equipment technology of copper based wire under the background of “new infrastructure construction” was prospected.

Key words: copper based materials; wire; hot mould horizontal continuous casting; cold mould vertical continuous casting; continuous drawing; surface coating

Foundation item: Project(2016YFB0301400) supported by the National Key Research and Development Program; Project(52071133, 51904090) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(202300410139) supported by the Natural Science Foundation of Henan Province, China; Project(C20150014) supported by the Innovative Science and Technology Team of Henan Province, China; Project(19A430012) supported by the Key Scientific Research Projects of Institutions of Higher Learning of Henan Province, China

Received date: 2020-08-19; **Accepted date:** 2020-11-18

Corresponding author: SONG Ke-xing; Tel: +86-13707697980; E-mail: kxsong@haust.edu.cn

(编辑 龙怀中)