

高纯度铜线拉伸过程中的组织演变与性能控制研究

张萱 张旺 陈仁聪 杨卫良 刘逸坤

江西康成特导新材股份有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18496

[摘要] 高纯度铜线在进行拉拔变形的时候其内部组织会有显著变化,位错密度快速上升并且形成特殊的亚结构,晶粒沿着受力方向被拉长同时发生碎化现象,组织从无序取向逐渐转变为择优取向状态。这些结构变化会直接对材料力学强度与导电能力产生影响,通过深入研究位错行为、晶粒细化规律以及组织演变规律,阐明了组织演变和性能变化之间的内在联系。基于此构建了工艺参数的优化方案,明确了拉拔速度和压缩率之间的合理配比,优化了中间退火温度和保温时间的控制策略,实现了导电率和抗拉强度的同步提高。成果为高性能铜线的工业化生产提供理论依据与技术支持。

[关键词] 高纯度铜线; 拉伸变形; 组织演变; 位错结构; 组织转变; 性能控制

引言

高纯度铜线因为具备出色导电和机械特性,所以普遍应用于电力传输、电子信息及精密仪器等领域,拉伸加工属于核心工艺,它通过塑性变形来缩减线材直径并让其获得理想性能。拉伸过程中微观组织会发生显著变化,位错大量增殖形成复杂亚结构且晶粒形态明显转变,晶体学取向也趋向特定方向。这些组织演变直接影响铜线强度、塑性和导电性,怎样通过工艺调控来有效控制组织结构,从而实现力学与导电性能的最佳平衡,成了高性能铜线制造方面的关键难题。深入探究拉伸过程里的组织演化机制和性能控制技术,有着重大理论意义与应用价值。

1 高纯度铜线拉伸过程中的组织演变机制

1.1 位错结构的动态演变规律

高纯度铜线在拉伸变形的初期阶段主要依靠位错滑移来达成塑性变形,位错密度从最初的 10^{10} m^{-2} 快速增长到应变量为 0.3 时的 10^{13} m^{-2} 量级。位错在滑移的过程当中由于晶界以及其他位错的阻碍而产生交互缠结,形成位错缠结区和位错贫乏区交替排布的形貌特征^[1]。当应变超过 0.6 的时候,大量位错墙开始形成并且逐渐发展成为位错胞结构,胞壁处

位错密度达到 10^{14} m^{-2} 而胞内位错密度相对较低。电子背散射衍射分析结果显示小角度晶界数量随变形有显著增加,这些亚晶界把原始晶粒分割成细小的胞状亚结构。如图 1 所示,位错密度升高让抗拉强度从退火态的 220 MPa 提升到 380 MPa 以上,不过高密度位错加剧了电子散射,使得电导率从 101% IACS 下降到大约 95% IACS。

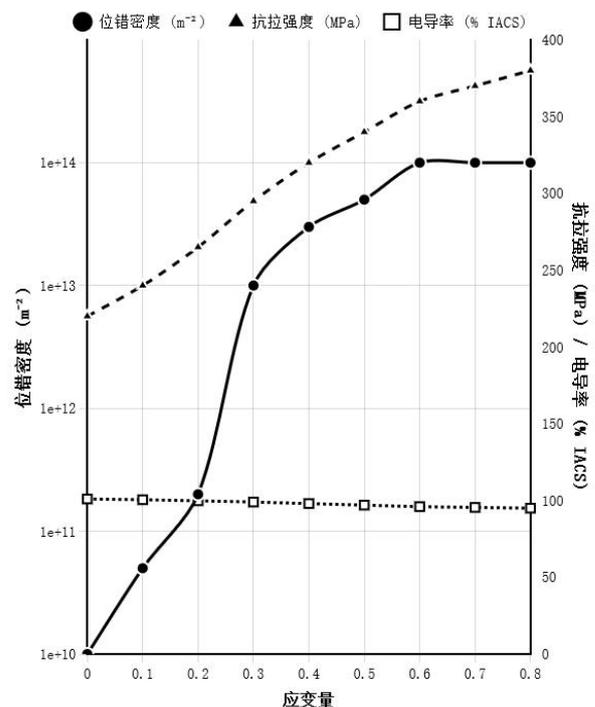


图1 位错密度与性能参数随应变量的演变关系图

1.2 晶粒形态的渐进变化特征

拉伸作用会让初始等轴晶粒顺着受力方向伸长, 晶粒长宽比随总应变变量呈指数增加。如图 2 所示, 透射电镜分析显示, 当累积应变达到 2.0 的时候, 晶粒已变成长宽比超过 5:1 的纤维形态, 其厚度从初始 50 微米缩减到不足 10 微米。大变形条件下晶粒内部会生成密集剪切带, 这些剪切带以大约 35 度角贯穿晶粒, 把晶粒再分割成纳米级条状亚结构, 局部晶粒尺寸能够细化到 200 纳米级别。晶界面积随着变形量增加而显著扩大, 单位体积内的晶界密度提升接近 3 倍, 晶界对位错移动的阻碍效应明显增强。依据 Hall - Petch 强化机制, 晶粒细化让屈服强度提高大约 80 MPa。不过晶粒过细化会增大晶界电子散射从而使电导率降低约 3%, 而且细小晶粒在后续热处理中容易出现异常生长, 进而破坏组织均匀性。

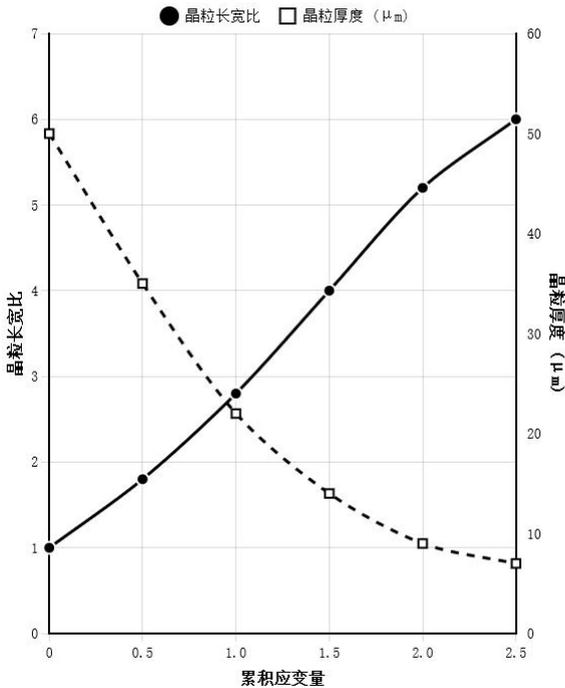


图 2 晶粒长宽比与厚度随累积应变的变化图

1.3 织构类型的形成与转变

X 射线衍射的结果显示出铜线拉伸初期织构特征不太明显, 晶体取向分布基本接近随机状态, 当应变增加到 0.5 的时候, <111>取向开始在拉伸轴方向集中起来, 织构强度增加

到随机值的 2.8 倍^[2]。应变超过 1.5 之后, <111>和<100>双组分纤维织构完全形成了, 其中<111>织构占据主导地位, 强度达到 4.5 倍随机值, <100>织构强度大约为 2.2 倍。电子背散射衍射的取向分布函数分析表明超过 60%的晶粒取向处在<111>方向 15 度范围之内, 形成了高度择优取向^[3]。这种织构结构让材料拉伸方向的施密特因子有所增大, 有利于位错进行协调滑移, 表现为拉伸方向屈服强度提升大约 12%, 而横向强度保持稳定, 呈现出明显各向异性, 织构演变受到应变路径和应变速率的影响, 当应变速率从 0.01 s⁻¹增加到 1 s⁻¹时, <100>织构组分相对强度增加约 30%。

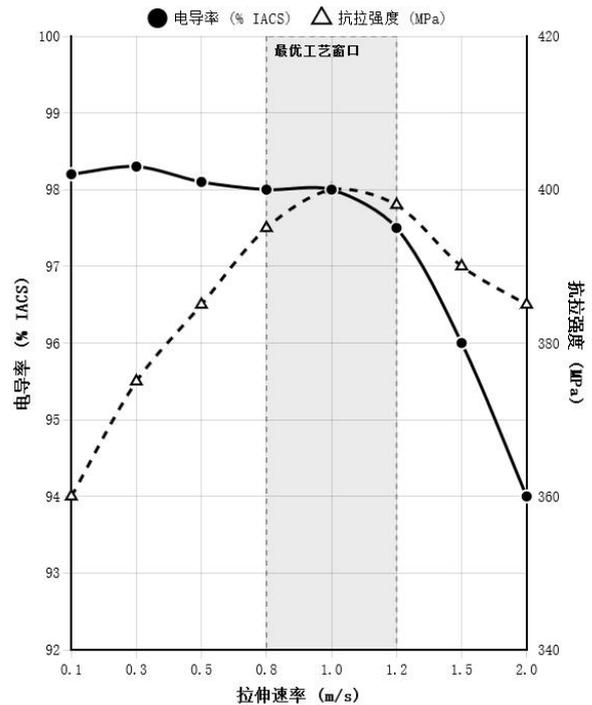


图 3 拉伸速率对电导率和抗拉强度的影响

2 高纯度铜线性能控制关键技术

2.1 拉伸工艺参数的优化设计

拉伸速率能够调控位错运动和动态回复之间的平衡, 在低速也就是 0.1 到 0.5 米每秒的情况下位错可充分进行攀移和交滑移, 动态回复能充分减少位错堆积让电导率保持高于 98%IACS。如图 3 所示, 在高速也就是大于 2 米每秒时局部温度会升高 15 到 25 摄氏度, 虽能促进动态再结晶但会引入大

量缺陷。最优的速率是 0.8 到 1.2 米每秒可兼顾效率和组织质量, 道次压缩率需要协调单道次变形量和总道次数, 若超过 25% 会使表层流动速度显著高于芯部进而形成加工硬化梯度和表面微裂纹^[4]。采用 15% 到 20% 的递减式压缩率也就是前期从 18% 降至后期 15%, 能够制备出组织均匀的铜线且在抗拉强度达到 400MPa 时延伸率仍可保持 8% 以上。

2.2 中间退火制度的精确控制

中间退火的目的是消除加工硬化造成的塑性损失, 其实际效果依赖于退火温度和保温时间的精确配合^[5]。高纯度铜线在 300 至 400 摄氏度低温退火的时候, 位错会通过重排让密度从 10^{14} m^{-2} 降至 $5 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 此过程不会引发晶界迁移所以晶粒尺寸能保持稳定, 既降低了变形抗力又维持了细晶强化作用。完全再结晶退火在 500 至 600 摄氏度的条件下进行, 保温 30 至 60 分钟后变形组织会被新的等轴晶取代, 晶粒尺寸大约为 25 至 40 微米, 材料延伸率可达到 35% 以上但抗拉强度会降至 220 MPa 左右。快速退火借助升温速率超过 100 摄氏度/分钟以及将保温时间控制在 5 分钟以内, 有效抑制了晶粒异常长大并获得平均 18 微米且分布均匀的再结晶组织, 氢气保护气氛能够防止表面发生氧化。

2.3 力学与导电性能协同调控

力学强度和导电性能之间存在着固有的矛盾, 像位错强化、细晶强化这类强化机制会让电导率降低, 可以通过调控微观组织的方式来实现两者的平衡。在高导电性应用场景中可控制变形量小于或等于 8%, 经过 350°C 退火 15 分钟, 把位错密度降低至 $3 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 左右, 从而获得 102% IACS 的电导率与 320 MPa 的抗拉强度。高强度应用采用大变形即累积变形量大于 1.5, 配合 300°C 的低温退火, 让位错密度保持大于 $8 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$, 以此实现 400 MPa 的抗拉强度与 95% IACS 的电导率。梯度组织设计通过控制终变形量大约为 10%, 使材料表层形成低密度位错层来提高导电性, 芯部保持高密度位错

层以保障强度, 综合性能得到显著提升, 电率达到 100% IACS 且抗拉强度大于 380 MPa。

结语

铜线在拉伸过程当中微观结构变化呈现明显阶段性, 位错密度升高会引起较为明显的加工硬化现象, 晶粒细化和织构形成共同影响材料的整体性能。借助对拉伸速率、道次变形量以及热处理条件精确设定, 能够实现对材料结构进行定向调控的目标。工艺优化让铜线在维持高导电性同时具备足够力学强度, 可适应各类应用场景对于材料性能的实际需求。该研究阐明金属在塑性变形情况下的组织演变机制, 构建起工艺、组织与性能三者之间的量化关联, 为铜线以及其他金属丝材的高效生产提供理论支撑。后续可深入开展超细晶组织稳定性机理及创新热处理工艺对性能改善效果的研究。

[参考文献]

- [1] 贾虹锋, 胡宝佳, 肖广耀, 等. 回火温度对舰船用含 Cu 高强度组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(08): 215-220.
- [2] 倪增磊, 马江松, 王星星, 等. 纯铜表面梯度结构层的微观组织演化及力学行为[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(06): 2022-2036.
- [3] 魏秋云, 刘欢, 甘佰辉, 等. 基于原位同步辐射 X 射线的铝合金凝固组织与变形机制研究进展[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(03): 385-410.
- [4] 郑涛, 施瀚超, 陈冰清, 等. 冷拉变形和退火温度对 Al-Si-Sc-Zr 合金丝材组织及拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2025, 53(04): 91-97.
- [5] 李鑫, 周延军, 宋克兴, 等. 冷拉拔变形对热型水平连铸单晶铜组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(07): 46-52.