

冷轧压下率分配对无氧铜带组织织构与性能的影响

胡铜生^{1,3}, 秦 镜^{2,3}, 付婷婷^{1,3}, 周 晨^{1,3}

(1. 铜陵有色金属集团股份有限公司 金威铜业分公司, 安徽 铜陵 244000; 2. 铜陵学院 材料科学与工程学院, 安徽 铜陵 244000; 3. 高端铜基新材料关键技术安徽省联合共建学科重点实验室, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 无氧铜带是高端电子元器件和电力传输系统的核心导体材料。随着应用场景的拓展, 市场对其综合性能提出了更高要求。在冷轧制备过程中, 压下率分配策略的差异会通过晶粒取向、位错密度、织构演变等微观机制显著影响无氧铜带的综合性能。为此, 在总变形量相同的前提下, 研究了不同冷轧压下率分配制度对无氧铜带组织、织构与性能的影响。结果表明: 减少轧程数量可减少中间退火次数, 同时增大单次压下率, 这有助于提高储存能、创造更多形核位点, 提高再结晶形核率, 进而细化最终晶粒尺寸; 提高单次压下率可增加各形变织构占比, 提升材料组织均匀性。单次压下率超过80%, 可显著增强{112}<111>(铜型)、{110}<112>(黄铜)及{123}<634>(S)形变织构的取向密度, 促进再结晶退火过程中强立方织构{001}<100>的形成。立方织构占比越高, 无氧铜带的显微硬度越低, 导电率略有提升。本研究结果为无氧铜带产品性能优化与生产工艺调整提供了理论依据。

关键词: 无氧铜带; 组织; 织构; 冷轧; 压下率

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.014

中图分类号: TB31 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)04-0118-08

随着新能源汽车、航空航天、高速铁路等高端装备制造领域的快速发展, 以及引线框架、家用电器等电子电气行业的技术迭代, 市场对铜板带的综合性能提出了更高要求。铜板带不仅需兼具高强度、优异的导电导热性, 还要具备优良的冲压、弯曲、拉伸等成型性能^[1-2]。铜板带成型性主要取决于显微组织和晶体织构。例如, 强立方织构{001}<100>会显著劣化无氧铜板带的深冲性能, 原因是其0°、45°方向的 r 值差异显著, 而{123}<634>(S)、{112}<111>(铜型)和{110}<112>(黄铜)等形变织构组分的协同共存, 可有效提升材料的平均 r 值, 优化成型效果^[3]。提高无氧铜管中高斯织构占比, 可提高组织均匀性和弯折加工性能^[4]。{001}<uv0>取向具有良好的折弯性能和较差的拉深性能, 而{111}<uvw>取向具有较差的折弯性能和良好的拉深性能^[5]。因此, 针对不同应用场景的服役需求, 精准调控无氧铜带的织构类型与组分占比, 开发定制化产品, 是适应高端领域发展、提升铜加工产品竞争力的关键方向, 具有重要的工程应用价值。

铜及铜合金的织构演变受化学成分、晶粒尺

寸、第二相析出、变形量、变形方式及退火温度等因素的影响^[6-8]。在纯铜中, 铜型织构组分在轧制后会变得更强, 而在层错能(SFE)较低的黄铜中, 黄铜织构的形成会因孪晶旋转而得到促进^[9]。合金元素的加入会改变SFE并促进第二相析出, 从而影响织构的形成和发展。初始晶粒尺寸也会影响形变织构的类型。例如, 轧制压下率达97%时, 粗晶粒(24 μm)的样品呈现典型的铜型织构, 而超细晶粒(0.36 μm)的样品则呈现黄铜织构^[10]。在沉淀强化铜合金中, 织构演变与第二相粒子的尺寸、分布和体积分数相关^[11-12]。随着时效温度的升高, Cu-Ni-Si合金中第二相析出, 铜型和高斯织构组分会逐渐减少, 而立方织构组分会逐渐增加^[13]。变形方式也是影响织构类型和分布的关键因素。面心立方(FCC)金属的变形机制主要是位错滑移, 在变形过程中, 铜型和黄铜织构相对稳定。随着孪晶的增加, 铜型织构逐渐减弱, 而黄铜织构会增强(剪切变形对黄铜织构有增强效应)。轧制压下率也是控制变形显微组织的关键工艺参数, 多数变形织构会随着变形程度的增加而增强。对于Cu-Ni-Si合金, 随

收稿日期: 2025-12-29; 修订日期: 2026-04-21

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目(2408085ME132); 铜陵市科技计划项目重大专项(202301WT002)

作者简介: 胡铜生(1975—), 男, 安徽铜陵人, 硕士, 高级经济师, 研究方向: 铜加工, E-mail: huts@tlys.cn; 通信作者: 秦镜, 教授, E-mail: 2995153815@qq.com

着冷轧压下率的增加，铜型组织会逐渐向黄铜组织转变^[14]。不同轧制方式也会影响形变组织，如不对称轧制会导致晶粒取向围绕样品横向(TD)旋转^[15]。变形后的热处理会削弱变形组织并导致再结晶组织的形成。对晶粒取向影响最大的是晶界迁移，晶粒取向的差异和分布决定了再结晶组织的形成和发展^[16]。S形变组织常受面心立方金属中的立方再结晶组织影响，与后者存在约40°的<111>取向差关系。还有研究表明，随着立方组织的出现，铜型组织会迅速消失，而S组织会缓慢减少，铜型组织对方再结晶组织的影响大于S组织^[17]。

在冷轧过程中，压下率分配策略的差异会通过晶粒取向、位错密度、组织演变等微观机制显著影响无氧铜板带的综合性能。相较于前人聚焦单一压下率，本研究系统对比多组压下率分配策略，在总变形量相同的前提下，研究不同的冷轧压下率分配制度对无氧铜带组织组织、显微硬度及导电性能的影响，明确组织组织与显微硬度、导电性能之间的内在关联，以揭示压下率分配对材料组织性能的影响机理。本研究结果可为无氧铜带组织组织控制和性能优化提供参考。

1 实 验

实验原料为原始厚度13.0 mm的C10200无氧铜带坯，其化学成分见表1。将无氧铜带坯切割成相同尺寸的4块试样，分别采用4种不同的冷轧压下率分配方案，均轧制成0.3 mm厚度的带材，每个轧程中间退火温度和时间相同(500 ℃×2 min)。1号试样用5个轧程：厚度变化为13.0 mm→3.0 mm→1.5 mm→0.7 mm→0.4 mm→0.3 mm；冷轧压下率分别为76.9%、50%、53.3%、42.9%和25%。2号试样用4个轧程：厚度变化为13.0 mm→2.0 mm→0.8 mm→0.4 mm→0.3 mm；冷轧压下率分别为84.6%、60%、50%和25%。3号试样用3个轧程：厚度变化为13.0 mm→1.8 mm→0.4 mm→0.3 mm；冷轧压下率分别为86.2%、77.8%和25%。4号试样用3个轧程：厚度变化为13.0 mm→2.5 mm→0.4 mm→0.3 mm；冷轧压下率分别为80.8%、84%和25%。最终获得4种不同晶粒尺寸和组织占比的无氧铜带试样。实验流程图如图1所示。

利用国仪量子扫描电子显微镜(SEM5000)结合牛津仪器电子背散射衍射(EBSD)成像系统对试样进行组织和组织分析。EBSD制样采用电解抛光，

表1 C10200化学成分

Table 1 Chemical composition of C10200 (%)

元素	Cu	Zn	Ag	Fe	Sn	Pb
质量分数	99.995 0	0.000 5	0.000 5	0.000 2	0.000 4	0.000 4
元素	Bi	As	P	S	O	
质量分数	0.000 3	0.000 6	0.000 3	0.000 6	0.000 3	

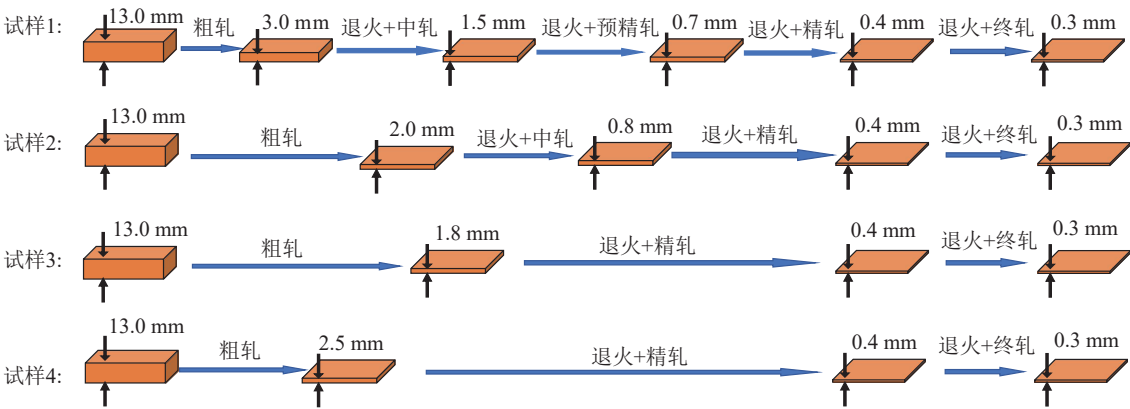


图1 实验流程图

Fig. 1 Flow chart of experiment procedures

检测面为试样轧面,涉及晶粒数量超过1 000个。EBSD数据利用AZtec软件进行分析处理,获得晶粒尺寸、取向成像图、取向分布函数(ODF)图等信息。采用HV-1000Z型显微硬度仪对样品进行显微维氏硬度测试,测试参数设置为:试验力0.98 N(100 gf),保压时间15 s。每个试样选取5个不同位置进行打点测试,去除最大值与最小值后,取算术平均值作为最终硬度值,以保证数据的准确性与代表性。使用FD101涡流导电率仪对样品进行导电率测量。

2 结果与讨论

图2为试样成品在4种不同压下率分配下的反极图(IPF)取向成像图。由图可见,经过“多次冷轧+中间退火”的无氧铜带成品,其显微组织为形变晶粒与再结晶晶粒的混合组织。利用EBSD数据处理软件进行晶粒统计分析,得到4种试样的平均晶粒尺寸分别为6.5、5.7、4.5和4.2 μm ,总体方差值 S^2 分别为76.5、43.3、28.6和24.1。方差越大,说明晶粒尺寸与均值的偏离程度越大,晶粒尺寸分布越分散;反之,方差越小,说明晶粒尺寸分布越集中。结果表明:在总压下率及中间退火工艺不变的

情况下,轧程数量越多,平均晶粒尺寸越大;轧程数量越少,平均晶粒尺寸越细小、分布越均匀。减少轧程数量可减少中间退火次数,同时增大单次压下率,这有助于提高形变储能、创造更多形核位点,从而提高再结晶形核率,进而细化最终晶粒尺寸,提高组织均匀性。

图3展示了4种试样成品的再结晶晶粒、亚结构和形变组织分布情况。再结晶、亚结构及形变组织占比统计结果见表2。根据EBSD晶粒内平均取向差(GOS)阈值法, $\text{GOS}<1^\circ$ 为再结晶晶粒, $1^\circ\leq\text{GOS}\leq 7.5^\circ$ 为亚结构(回复组织), $\text{GOS}>7.5^\circ$ 为形变组织。对比可知,试样1中再结晶占比最低(4.6%),试样3和试样4中再结晶占比较高(分别为7.9%和7.6%)。试样4的亚结构占比最高(60%),而试样1和试样2形变组织占比最高分别为78.7%和78.8%。所有试样成品再结晶比例偏低,原因是为了保证成品硬度,最终退火后又经历了一次压下率为25%的冷轧,导致亚结构占比增加。试样1和试样2的形变组织占比高于试样3和试样4,这是由于前者单次冷轧压下率偏低,形变储能相对较低,在短暂的中间退火过程中再结晶不充分,无法有效将形变组织转化为

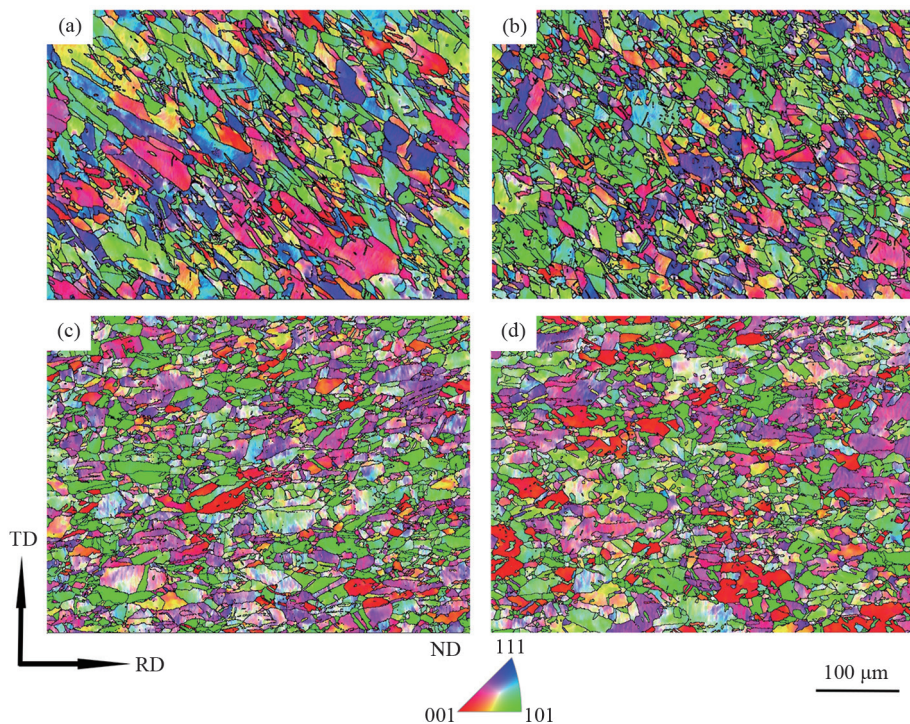


图2 不同压下率分配的试样成品 IPF取向成像图:(a)试样1;(b)试样2;(c)试样3;(d)试样4

Fig. 2 IPF orientation images of finished sheets with different reduction rate distributions: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

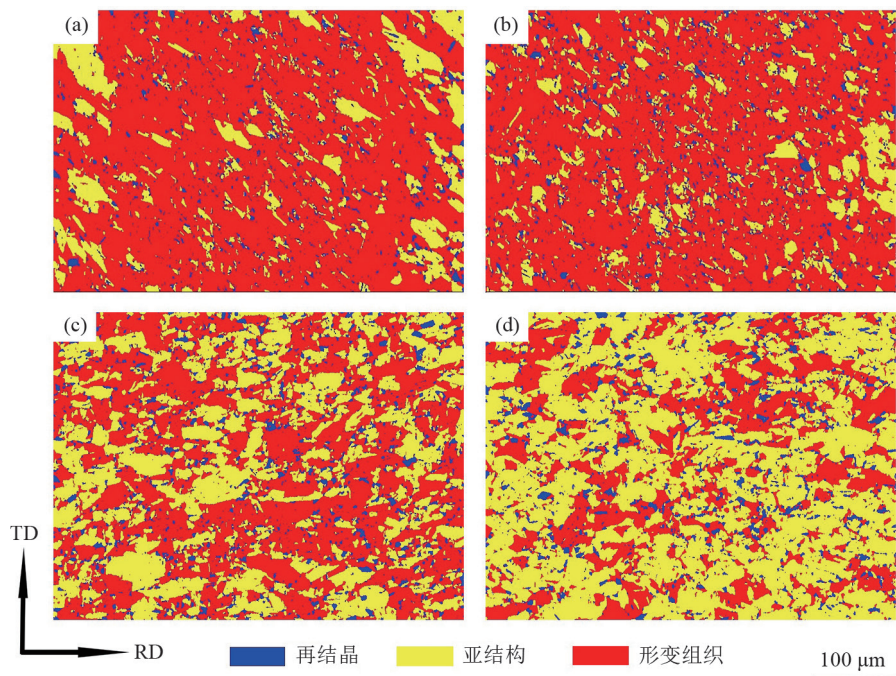


图3 不同试样成品中再结晶、亚结构和形变组织的分布: (a) 试样1; (b) 试样2; (c) 试样3; (d) 试样4
Fig. 3 Distribution of recrystallization, substructure, and deformed structure in different finished samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

表2 试样成品中再结晶、亚结构和形变组织占比

Table 2 Proportions of recrystallization, substructure, and deformed structure in finished samples (%)

试样	再结晶	亚结构	形变组织
1	4.6	16.6	78.7
2	6.2	15	78.8
3	7.9	39.6	52.5
4	7.6	60.9	31.5

再结晶晶粒或亚结构, 因此大量形变组织被保留; 而试样3和4因单次压下率大幅提高, 形变储能充足, 中间退火过程中再结晶占比有所提升, 回复过程形成大量亚结构。回复与再结晶的协同作用大幅消耗了形变组织, 最终表现为形变组织占比显著降低。

图4为成品试样中S、铜型、黄铜和高斯织构组分分布图, 各织构组分与理想取向偏差角 $\leq 15^\circ$ 。由图可见, 4种样品中都存在S、铜型、黄铜和高斯取向的晶粒, 并且分布相对均匀。其中铜型与S取向晶粒最多, 高斯取向晶粒最少。相比试样1和试样2, 试样3和试样4的S、铜型和黄铜取向晶粒明显增多。

图5为成品试样中立方织构组分图及取向差分布图。可见试样1和试样2中立方取向的晶粒占比

很小, 分别为0.81%和1.61%, 试样3中立方取向晶粒占比(4.04%)相较前两个试样则有明显增加, 试样4中立方取向晶粒最多, 为9.87%。根据立方晶粒取向差分布图(图5中取向差 $\leq 15^\circ$ 部分)可知, 取向差越小, 则取向一致性越高。对比分析可知, 试样4的立方取向一致性最高。结合轧制工艺分析可知, 试样3和试样4的轧程数量最少。研究表明, 单次冷轧压下率越大, 越容易形成强立方再结晶织构^[18]。相比试样3, 试样4的前两次冷轧压下率均超过了80%, 所以立方取向晶粒最多。

成品试样中S、铜型、黄铜、高斯和立方织构组分的占比见表3。4种试样中铜型织构组分最多, S织构组分次之, 高斯和黄铜织构组分最少。相对试样1和试样2, 试样3和试样4中铜型织构组分占比明显增加, 立方再结晶织构组分也逐渐增多。这是因为在总压下率一定的情况下, 随着轧程数量减少, 单次冷轧压下率增加, S、铜型和黄铜等形变织构不断增强。试样4相比试样3, 立方织构组分明显增多, 伴随着S和铜型织构的减少。这是由于存在特殊取向关系, 立方取向晶粒在S和铜型取向形变基体中长大时具有较快的晶界迁移率, 前期形成的强铜型和S织构为强立方再结晶织构的形成提供了

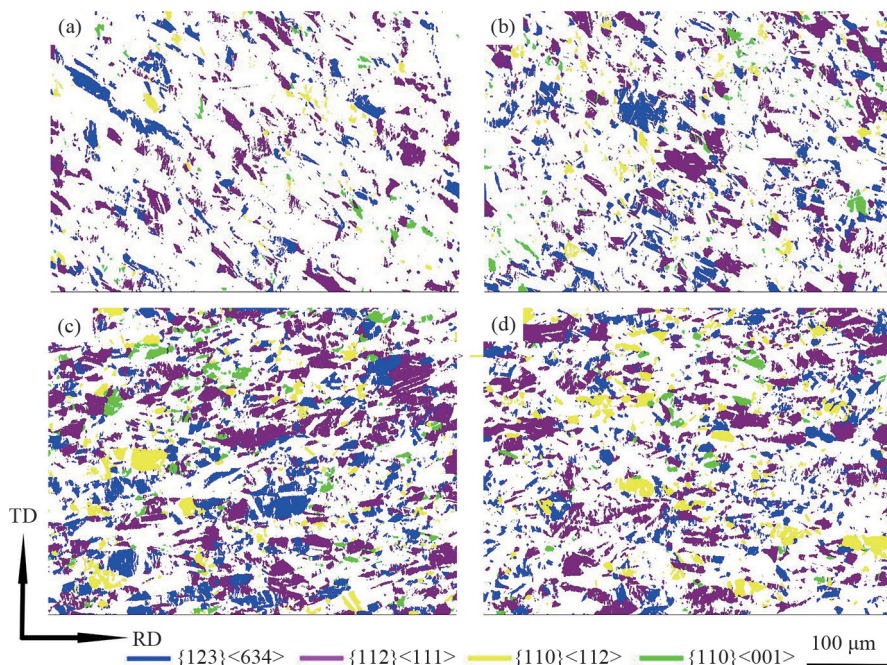


图4 成品试样中S、铜型、黄铜和高斯织构组分图: (a) 试样1; (b) 试样2; (c) 试样3; (d) 试样4

Fig. 4 S, copper, brass, and Goss texture components in finished samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2; (c) Sample 3; (d) Sample 4

有利条件^[18]。

图6为4种试样的显微硬度与导电率的测试结果。试样1~4的显微维氏硬度值分别为108HV、105HV、100HV、95HV, 导电率分别为99.2%、99.4%、99.6%、99.8% IACS。由此可见: 试样1硬度最高, 试样4硬度最低; 轧程数量越少, 硬度值越低。结合EBSD分析可知, 立方再结晶织构占比越高, 硬度值越低。这是因为再结晶过程中, 立方晶粒的形成需要消耗变形基体中的高位错区域。虽然再结晶可能导致晶粒细化, 但位错密度降低通常占主导, 从而导致无氧铜带整体硬度下降。通过比较再结晶组织图(图3)中再结晶晶粒、亚结构和形变组织的分布特征与占比变化, 可以合理推断试样1~4的位错密度呈现依次降低的趋势。在冷变形与退火过程中, 形变组织保留了大量高密度位错与晶格畸变, 亚结构为位错密度中等的回复组织, 而再结晶晶粒为低位错密度的完整晶粒。试样1中再结晶占比最低, 形变组织占比高, 因此内部位错密度最高; 试样2形变组织占比仍较高, 再结晶比例略有提升, 位错密度次之; 试样3与试样4再结晶占比显著提升, 形变组织大幅减少, 位错密度进一步下降。其中, 试样4中亚结构占比最高, 形变组织最少, 位错密度在4组试样中最低。试样1~4的显微硬度变化可间

122

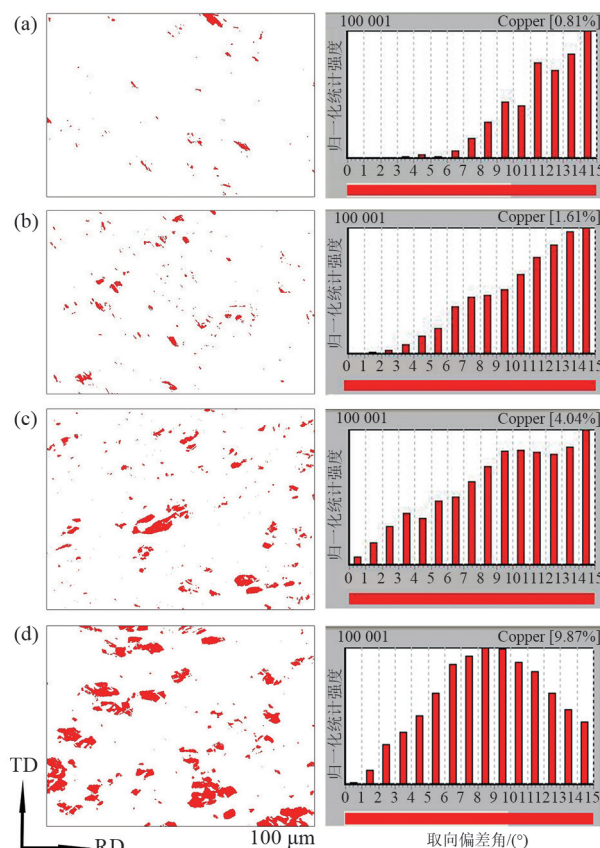


图5 成品试样中立方织构组分图及取向差分布图:

(a) 试样1; (b) 试样2; (c) 试样3; (d) 试样4

Fig. 5 Cube texture components and misorientation distributions in finished samples: (a) Sample 1; (b) Sample 2;

(c) Sample 3; (d) Sample 4

表3 成品试样中S、铜型、黄铜、高斯和立方结构组分的占比

Table 3 Proportions of S, copper, brass, Goss and cube texture components in finished samples (%)

试样	{123}<634>	{112}<111>	{110}<112>	{110}<001>	{001}<100>
1	6.23	9.74	0.94	0.65	0.81
2	9.24	13.8	1.58	1.23	1.61
3	13.7	24.1	4.13	2.66	4.04
4	9.33	19.8	5.47	1.2	9.87

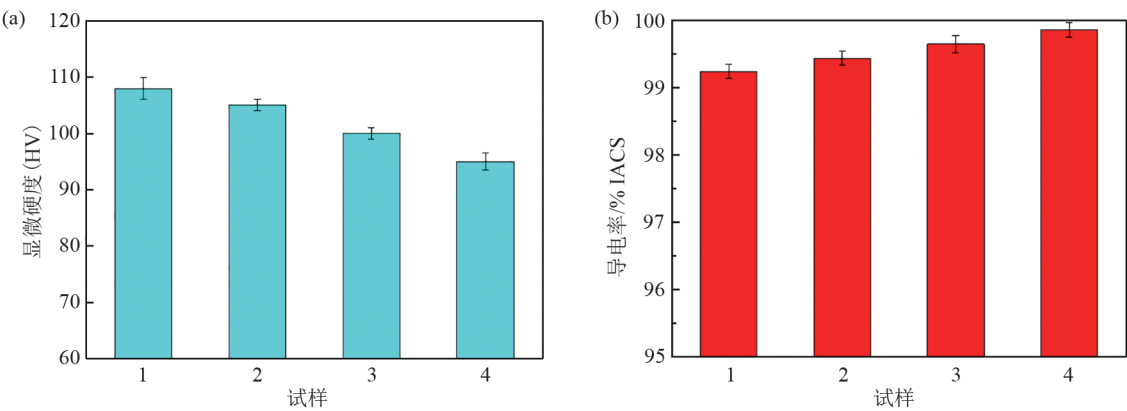


图6 试样1~4(a)显微硬度与(b)导电率
Fig. 6 (a) Microhardness and (b) conductivity of sample 1~4

接印证位错密度的变化趋势。

无氧铜带导电率影响因素有纯度、杂质、轧制及热处理工艺等^[19]。冷轧过程中产生的晶格畸变及位错缺陷会阻碍电子定向流动,降低导电率,而晶界作为电子散射中心,其数量增加也会降低导电率。有研究表明,晶界数量的减少和强立方织构的形成有利于提高电导率^[20]。结合组织织构分析可知,试样晶粒尺寸略微减小对导电率影响较小,而立方再结晶织构的比重增大,形变织构组分减小,位错密度降低才是试样1~4的导电率逐渐提高的主要原因。

3 结 论

本文主要研究了冷轧压下率分配制度对无氧铜带组织、织构与性能的影响。研究结论如下:

- 1) 减少轧程数量、增大单次压下率,可提高储存能、创造更多形核位点,从而提高再结晶形核率,进而细化最终晶粒尺寸并改善组织均匀性。
- 2) 单次压下率超过80%,可显著增强铜型、黄铜及S织构的取向密度,促进再结晶退火过程中强立方织构的形成。
- 3) 冷轧退火后,无氧铜带立方织构占比越高,

再结晶占比越高,以及形变组织越少,其显微硬度则越低,导电率则越高。

参考文献:

[1] Zhang X H, Zhang Y, Tian B H, et al. Review of nano-phase effects in high strength and conductivity copper alloys [J]. Nanotechnology Reviews, 2019, 8(1): 383-395.

[2] Geng Y F, Ban Y J, Wang B J, et al. A review of microstructure and texture evolution with nanoscale precipitates for copper alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11918-11934.

[3] Qin J, Zhou C, Wang D S, et al. Effects of microstructure and texture on the deep drawability of C10200 copper sheets [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 773-785.

[4] 曾何生, 谭懂, 马秀云, 等. 退火工艺对热管用无氧铜管组织和性能的影响 [J]. 铜业工程, 2025(4): 35-42.

[5] Inoue H. Simultaneous prediction of bendability and deep drawability based on orientation distribution function for polycrystalline cubic metal sheets [J]. Materials Science Forum, 2018, 941: 1468-1473.

[6] Li X, Zhou Y J, Liu Y H, et al. Texture evolution and

- its influence mechanism on properties of single crystal copper and polycrystalline copper during cumulative deformation [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 6808-6819.
- [7] Hua Y X, Liu H T, Song K X, et al. Effect of cerium on microstructure, texture and properties of ultrahigh-purity copper [J]. *Journal of Rare Earths*, 2024, 42(1): 220-227.
- [8] Gong L K, Huang Y Q, Han Z, et al. Texture evolution and strengthening mechanism of CuCrZr alloys during cold rolling [J]. *Vacuum*, 2024, 221: 112908.
- [9] Yang J Z, Bu K, Song K X, et al. Influence of low-temperature annealing temperature on the evolution of the microstructure and mechanical properties of Cu-Cr-Ti-Si alloy strips [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 798: 140120.
- [10] Gu C F, Hoffman M, Toth L S, et al. Grain size dependent texture evolution in severely rolled pure copper [J]. *Materials Characterization*, 2015, 101: 180-188.
- [11] 汪志刚, 冯兴宇, 杨泰胜, 等. 第二相粒子与织构对高强Cu-Ni-Si系合金薄板各向异性的影响 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39(6): 867-874.
- [12] Geng Y F, Zhang Y, Song K X, et al. Effect of Ce addition on microstructure evolution and precipitation in Cu-Co-Si-Ti alloy during hot deformation [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155666.
- [13] Liu Z S, Chen Y L, Wei H, et al. Study on the distribution of texture and the second phase under different aging process of Cu-Ni-Si alloy [J]. *Materials Letters*, 2019, 236: 292-294.
- [14] Wei H, Chen Y L, Su L, et al. Study on texture evolution and deformation mechanism of the Cu-Ni-Si alloy during cold-rolling treatment [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 1111-1116.
- [15] Uniwersał A, Wroński M, Wróbel M, et al. Texture effects due to asymmetric rolling of polycrystalline copper [J]. *Acta Materialia*, 2017, 139: 30-38.
- [16] Kikuchi S, Kimura E, Koiwa M. Deformation and recrystallization textures of copper single crystals and bicrystals [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1992, 27(18): 4927-4934.
- [17] Hong S H, Lee D N. The evolution of the cube recrystallization texture in cold rolled copper sheets [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 351(1/2): 133-147.
- [18] Qin J, Li X, Wang D S, et al. Microstructure and texture evolution in cold-rolled and annealed oxygen-free copper sheets [J]. *Materials*, 2024, 17(10): 2202.
- [19] 李奥博. 均温板用高耐热稀土微合金化铜带材制备及机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2024.
- [20] Wang J J, Zhao Z Y, Jia Y L, et al. Influence of annealing texture evolution on the mechanical and electrical performance of rolled copper foils [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2025, 927: 147926.

Effects of Cold Rolling Reduction Rate Distribution on Microstructure and Properties of Oxygen-Free Copper Strip

Hu Tongsheng^{1,3}, Qin Jing^{2,3}, Fu Tingting^{1,3}, Zhou Chen^{1,3}

(1. Tongling Jinvi Copper Corporation, Tongling Nonferrous Metals Group Co., Ltd., Tongling 244000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China; 3. Anhui Joint Key Laboratory of Critical Technologies for High-End Copper-Based New Materials, Tongling 244000, China)

Abstract: As core conductor materials for high-end electronic components and power transmission systems, oxygen-free copper strips require increasingly stringent performance specifications to meet diverse application demands. During cold rolling, different reduction rate distribution significantly influences material properties through microstructure transformation including grain orientation, dislocation density, and texture evolution. Under identical total deformation conditions, this study investigated effects of different cold rolling reduction rate distribution schemes on microstructure, texture, and performance of the material. Results showed that reducing the number of rolling can reduce the number of intermediate annealing and increase reduction rate of each rolling, which enhanced energy storage and nucleation sites formation to elevate recrystallization nucleation rates, ultimately leading to smaller final grain sizes. Increasing single reduction rates improved the proportion of various deformation textures, enhancing product microstructural uniformity. When single reduction rate exceeded 80%, orientation density of {112}<111>(copper), {110}<112>(brass), and {123}<634>(S) deformation textures was significantly enhanced, promoting the formation of strong {001}<100>(cube) textures during recrystallization annealing. Higher cube texture proportions contributed to lower microhardness and slightly improved conductivity of oxygen-free copper strips. The results provided a theoretical basis for adjustment of production process and optimization of product properties of oxygen-free copper strip.

Key words: oxygen-free copper strip; microstructure; texture; cold rolling; reduction rate

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.04.014

引文格式: 胡铜生, 秦镜, 付婷婷, 周晨. 冷轧压下率分配对无氧铜带组织结构与性能的影响[J]. 铜业工程, 2026(4): 118-125.

Hu Tongsheng, Qin Jing, Fu Tingting, Zhou Chen. Effects of cold rolling reduction rate distribution on microstructure and properties of oxygen-free copper strip[J]. Copper Engineering, 2026(4): 118-125.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc