



中国有色金属学报  
*The Chinese Journal of Nonferrous Metals*  
ISSN 1004-0609, CN 43-1238/TG

## 《中国有色金属学报》网络首发论文

题目： 冷轧和退火工艺对异质结构 Cu-1Cr-0.1Zr 合金软化行为的影响  
作者： 储著奇，周伟明，魏伟，魏坤霞，Igor V.Alexandrov  
网络首发日期： 2026-06-08  
引用格式： 储著奇，周伟明，魏伟，魏坤霞，Igor V.Alexandrov. 冷轧和退火工艺对异质结构 Cu-1Cr-0.1Zr 合金软化行为的影响[J/OL]. 中国有色金属学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/43.1238.TG.20260608.1312.001>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2026-46209

# 冷轧和退火工艺对异质结构 Cu-1Cr-0.1Zr 合金软化行为的影响

储著奇<sup>1,2,3</sup>, 周伟明<sup>1,3</sup>, 魏伟<sup>1,3</sup>, 魏坤霞<sup>1,3</sup>, Igor V. Alexandrov<sup>3,4</sup>

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 常州 213164;

2. 安庆师范大学 智能制造与机器人学院, 安庆 246011;

3. 先进功能材料江苏省国际合作联合实验室, 常州 213164;

4. 乌法科技大学 材料科学与金属物理学院, 乌法 450008)

**摘要:** 异质结构设计为铜合金的强度导电性能协同优化提供了有效路径, 但高温软化行为的系统研究不足, 制约了其在高温环境中的应用。本文采用冷轧和退火工艺制备出异质结构 Cu-1Cr-0.1Zr 合金, 结合微观组织表征、力学性能测试、导电率测试及软化温度测定, 系统探究冷轧和退火工艺对异质结构 Cu-1Cr-0.1Zr 合金软化行为和组织的影响, 阐明其高温抗软化机制。结果表明, 该异质结构合金实现性能协同提升, 抗拉强度达 695 MPa、导电率为 71.2% IACS、断裂伸长率为 12.5%, 且具备优异抗软化能力, 软化温度达 535 °C, 其抗软化性能源于高密度异质界面与纳米析出相的协同作用, 二者共同抑制位错运动与再结晶过程, 有效延缓了软化动力学。该工作为开发兼具高强度、高导电与高热稳定性的铜合金提供了新策略。

**关键词:** 冷轧; 退火; 异质结构; Cu-Cr-Zr 合金; 软化行为

**中图分类号:** TG146.1

铜合金凭借其优异的导电性、导热性和耐蚀性, 在电子器件、交通运输、核能工程和热沉材料等领域占据着不可替代的地位<sup>[1-4]</sup>。随着装备向高功率密度、极端工况升级, 铜合金的综合服役要求愈发严苛<sup>[5-6]</sup>。尤其在核聚变偏滤器热沉、电阻焊电极等高温场景中, 材料既需优异的室温强度与导电性能, 也要求长期热暴露下的组织与性能稳定性, 即良好的抗高温软化能力<sup>[7]</sup>。Cu-Cr-Zr 系合金作为一种典型的析出强化型铜基材料, 因其兼具高导电、高强度和优异的热稳定性, 受到越来越多的关注<sup>[8-10]</sup>。然而, 当服役温度超过再结晶温度时, Cu-Cr-Zr 合金内部会相继发生回复、再结晶及析出相粗化等, 导致强度急剧下降<sup>[11-14]</sup>, 这

**基金项目:** 云南省科技计划资助项目 (202401BN070001-012); 先进功能材料江苏省国际合作联合实验室资助项目 (25AFMI002); 安庆师范大学重点资助项目 (ZK202409ZD)

**通讯作者:** 魏伟, 教授, 博士; E-mail: benjamin.wwei@163.com

制约了其在高温领域的推广与应用。

目前,提升铜合金抗软化能力的研究主要集中于微合金化调控析出相热稳定性<sup>[15-17]</sup>。研究表明,添加微量 Zn、Si 等元素富集于析出相与基体界面,抑制原子扩散,可以延缓析出相粗化动力学<sup>[18-19]</sup>。然而,微合金化策略主要作用于析出相的热稳定性,对于再结晶的抑制作用相对有限。近年来,异质结构材料概念的提出为突破材料性能权衡关系提供了新视角<sup>[20-24]</sup>。异质结构材料内部软、硬区域交替分布,其高密度异质界面不仅能产生异质变形诱导强化效应,还可作为阻碍位错运动和原子扩散的有效屏障。Oyarzábal 等<sup>[25]</sup>在低碳钢中发现,初始异质结构导致储存能分布不均匀,使再结晶优先发生于高储存能区域,而低储存能区域保持未再结晶状态,从而延缓整体软化进程。这表明,通过异质结构设计来调控再结晶行为,有望成为提升材料抗软化能力的新策略。异质结构可显著改善合金热稳定性,异质界面与析出相的协同作用能有效延缓高温软化进程<sup>[26-28]</sup>。

本工作通过微观组织表征、力学性能测试、导电率测试及软化温度测定,系统探究冷轧及退火工艺对 Cu-1Cr-0.1Zr 合金软化行为及组织的影响,揭示高密度异质界面与纳米析出相的协同软化抑制机制,为开发兼具高强度、高导电与优异热稳定性的 Cu-1Cr-0.1Zr 合金提供理论依据与工艺参考。

## 1 实验

本研究选用的是 Cu-Cr-Zr 合金作为实验材料, Cu-Cr-Zr 合金分为棒材(直径 20 mm)和轧制态板材(厚度 1 mm),其主要成分为 1.0 wt.% Cr、0.1 wt.% Zr,杂质元素包括 Zn (<0.01 wt.%)、Fe (<0.005 wt.%)、P (<0.002 wt.%)、Co (<0.001 wt.%) 等,其余为 Cu,棒材通过线切割加工为 12 mm×12 mm×80 mm 的长方体试样,用于后续轧制实验。

在 KSL-1200X 型井式电阻炉中进行固溶处理,以 5 °C/min 的速率升温至 1000 °C,并保温 0.5 h,随后样品迅速在 5 wt.% NaCl 溶液中水淬,并机械打磨去除表面氧化层。对固溶处理后的样品,在 NBD-O1200 经济型真空管式炉中进行时效处理,时效温度为 475 °C,时间 60 min。采用二辊冷轧机对 Cu-Cr-Zr 合金进行冷轧,每次轧制前将样品浸泡在液氮中并保温 15 min,以确保品温度与液氮温度一致,样品每次轧制下压量控制在 10%,轧辊转速为 16 r/min,最终将样品轧制到 0.8 mm。对冷轧变形后的样品进行退火处理(450 °C×15 min),与时效处理的炉子相同,样品到达设定温度后,保温一定时间后,将样品取出冷却至室温。不同工艺处理路线如表 1 所示。

表 1 不同工艺处理路线

Table 1 Different process treatment routes

Processing routes	Abbreviation	Processing parameters
Solution treatment	SS	1000 °C × 0.5 h
Solution treatment + aging treatment	SS + AT	1000 °C × 0.5 h + 475 °C × 1 h
Solution treatment + aging treatment + cold rolling	SS + AT + CR	1000 °C × 0.5 h + 475 °C × 1 h + 93.3% CR
Solution treatment + aging treatment + cold rolling + annealing treatment	SS + AT + CR + 450 °C × 15 min	1000 °C × 0.5 h + 475 °C × 1 h + 93.3% CR + 450 °C × 15 min

采用 Wilson VH1102 显微维氏硬度计进行测试，测试前需要对样品进行机械研磨和抛光，测试参数为：载荷 1.96 N，压力维持时间 15 s。每种工艺条件下测试 3 个样品，每个样品在 5 个不同点进行测试，取平均值。拉伸性能测试使用 TH-8201 伺服式万能材料试验机，拉伸试样尺寸为 3 mm × 8 mm × 0.8 mm，拉伸的应变速率为  $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。采用 Sigma 2008C 数字电导率仪测试导电性能。采用硬度变化法测定其软化温度，根据 GB/T 33370-2016 标准，在 400~700 °C 范围内进行保温 1 h，随后测定其维氏硬度，以最佳硬度值的 80% 所对应的退火温度，作为各工艺处理后样品的软化温度。

采用 JSM-IT100 型扫描电子显微镜 (SEM) 对拉伸断口形貌进行表征，测试过程中加速电压设定为 15 kV。采用 FEI Verios 5 UC 电子显微镜进行电子背散射衍射 (EBSD) 分析，测试前样品经过机械研磨，氩离子抛光至无划痕，工作电压 15~20 kV，利用 HKL Channel 5 和 OIM Analysis 软件量化晶粒尺寸、再结晶体积分数和晶粒取向等。采用 FEI Talos F200X 透射电子显微镜 (TEM) 进行微观组织表征，工作电压为 200 kV。

## 2 实验结果

### 2.1 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金的力学性能和导电性能

不同工艺处理后 Cu-Cr-Zr 合金显微硬度的变化曲线，如图 1 所示。可以看到，经固溶处理后合金显微硬度仅为 68 HV。随后时效处理、冷轧处理后，合金显微硬度显著提高，归因于时效处理促进了细小且弥散分布的析出相形成，有效地阻碍了位错运动，从而提升了材料的显微硬度。冷轧处理导致晶粒显著细化与位错密度增加，使得显微硬度进一步提高。经退火处理 (450 °C × 15 min) 后，合金显微硬度达到 237 HV，相比轧制态 (201 HV) 提升 17.9%。退火处理后，材料内部可能形成细小的析出相，这些析出相通过阻碍位错运动提高了材料的显微硬度。

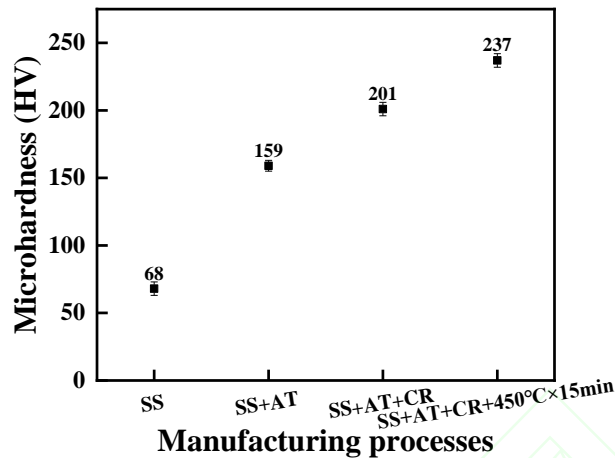


图1 不同工艺处理的 Cu-Cr-Zr 合金显微硬度

Fig.1 Microhardness of Cu-Cr-Zr alloy treated by different manufacturing processes.

图 2 呈现了不同工艺处理后 Cu-Cr-Zr 合金的抗拉强度、断裂伸长率和导电率。可以明显看出，固溶处理后合金的抗拉强度较低，难以满足工业实际应用需求，但其展现出优异的延展性，断裂伸长率高达 50.5%。通过变形结合时效处理来提升铜合金的抗拉强度是一种常见策略<sup>[9,29]</sup>。若调换冷轧和时效处理的顺序，时效过程中形成的析出相将在后续冷轧变形过程中阻碍位错运动。这种阻碍作用会促进位错发生钉扎和缠结，进而形成位错环或位错胞，最终实现强度的提升，这一现象已被 Meng 等<sup>[30]</sup>验证。在冷轧变形过程中，低温有效抑制了位错的运动和回复，促进位错积累与存储，同时提高了位错增殖的临界应力。上述效应的协同作用显著提升了合金的强度和显微硬度<sup>[31]</sup>。

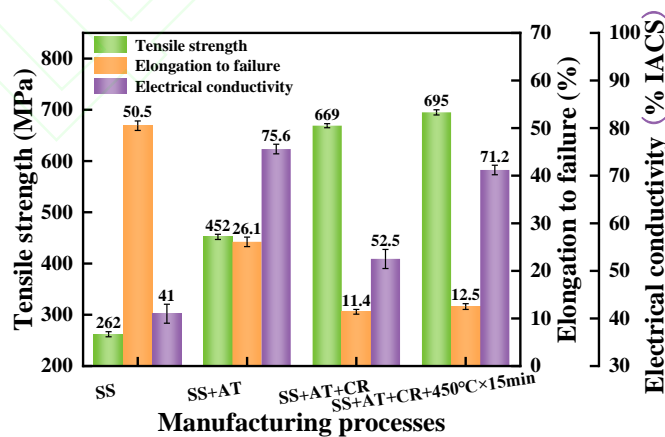


图 2 不同工艺处理后 Cu-Cr-Zr 合金的抗拉强度、断裂伸长率和导电率变化

Fig.2 Variation of tensile strength, elongation to failure and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloy treated by different manufacturing processes.

通过固溶、时效及冷轧处理后，Cu-Cr-Zr 合金的抗拉强度达到 669 MPa，断裂伸长率为 11.4%。后续退火处理（450 °C×15 min）后，合金的抗拉强度提升至 695 MPa，断裂伸长率提高至 12.5%。冷轧及退火处理形成的异质结构 Cu-Cr-Zr 合金，在变形过程中软硬组织相互协调变形，并诱发高的背应力强化和加工硬化率，从而获得优良的强塑性匹配<sup>[32]</sup>。

固溶处理后，Cu-Cr-Zr 合金的导电率仅为 41% IACS，随后经时效处理（475 °C×60 min），导电率提升至 75.6% IACS，由于析出相的形成减少了电子散射，提高了电子迁移率。然而，冷轧处理后合金导电率下降至 52.5% IACS，这是由于冷轧过程中引入的大量位错和晶格畸变，增加了电子散射，从而降低了导电性。随后退火处理（450 °C×15 min）使导电率再次上升至 71.2% IACS，这表明退火有效地消除了部分冷轧引入的缺陷，还促进了晶粒长大和再结晶，进一步提升了导电性能。异质结构组织有助于减少晶界和晶格缺陷，降低电子在传导过程中的散射和阻碍，有利于导电率的提升，展现出了更优异的强度和导电率匹配<sup>[29]</sup>。

## 2.2 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金的软化行为

对经冷轧、退火处理制备的层状异质 Cu-Cr-Zr 合金，在不同温度下保温 1 h 后的显微硬度变化如图 3 (a) 所示。随着退火温度升高，材料硬度显著降低，尤其在温度超过 500 °C 后，下降趋势更加明显。在 500 °C 退火 1 h 后，硬度为 213.1 HV，而在 700 °C 退火 1 h 后，硬度为 98.7 HV。为深入比较合金在高温下的稳定性及软化行为，选取不同退火温度下硬度与最佳硬度的比值作为纵坐标，并绘制了其随退火温度变化的趋势图（图 3 (b)），从而定量表征材料的抗软化性能。根据 GB/T 33370-2016 标准测定，冷轧及退火处理制备的异质结构 Cu-Cr-Zr 合金的软化温度为 535 °C。

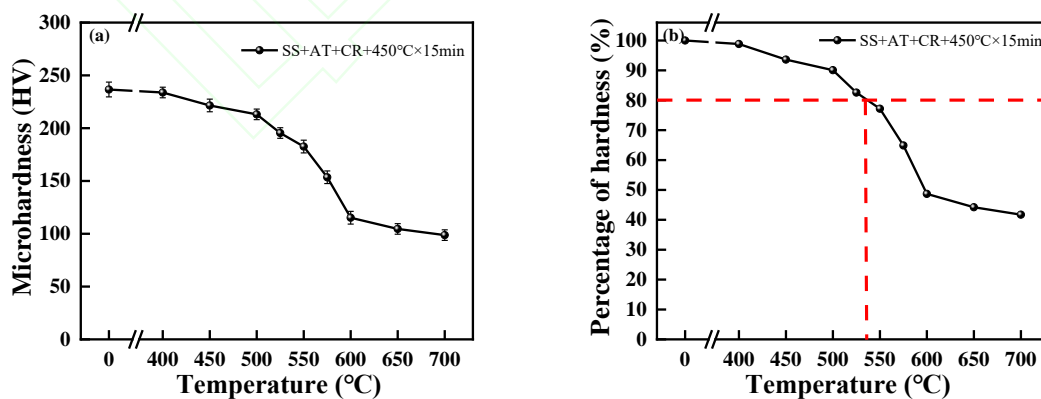


图3 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金的硬度及硬度比值随温度变化曲线

(a) 硬度变化曲线，(b) 硬度百分比变化曲线

Fig.3 Variation curves of hardness and hardness ratio of heterostructure Cu-Cr-Zr alloy with temperature. (a) Microhardness variation curve, (b) Microhardness percentage variation curve.

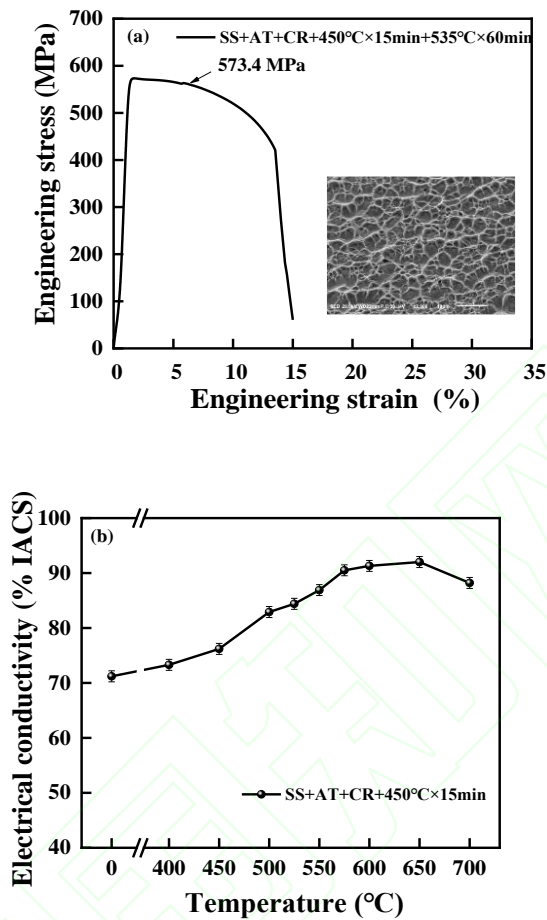


图4 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化温度下力学性能和导电性能的变化曲线

(a) 应力应变曲线, (b) 导电率变化曲线

Fig.4 Variation curves of mechanical properties and electrical conductivity of heterostructure Cu-Cr-Zr alloy at the softening temperature

(a) Stress-strain curves, (b) Electrical conductivity variation curve

图4 (a) 和 (b) 分别为异质结构 Cu-Cr-Zr 合金在软化温度下的力学性能和导电性能变化曲线。可以看到, 该合金在软化温度下材料的抗拉强度为 573.4 MPa, 断裂伸长率为 15%, 导电率为 85.6% IACS。这一结果表明, 尽管材料在此温度下已进入软化阶段, 但其综合性能依旧优于传统均质 Cu-Cr-Zr 合金<sup>[22,33]</sup>。合金的高强度得益于异质结构与析出相的协同强化效应, 以及冷轧过程中积累的位错所带来的持续贡献。合金的高塑性源于异质结构与硬/软相的协同作用, 通过晶界滑移、位错积累及应变协调效应, 有效抑制裂纹扩展并延缓失稳断裂。高导电率源于析出相的弥散分布与异质结构对晶界散射的协同调控。

### 2.3 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化温度下的微观组织

图5 (a) 为 Cu-Cr-Zr 合金经固溶、时效以及冷轧处理后的 TEM 照片。冷轧变形将晶粒细化至纳米晶 (NC), 并使其沿轧制方向定向排列, 形成层状结构。同时, 高密度位错在运动过程中相互交割、缠结,

形成位错缠结区。低温冷轧环境有效抑制动态回复，有利于纳米孪晶的形成和晶粒进一步细化。图 5 (b) 为 Cu-Cr-Zr 合金经固溶、时效、冷轧以及退火处理 (450 °C×15 min) 后的 TEM 照片。观察到了微米晶 (MC)、纳米晶组成的异质结构，该结构与 Wu 等人<sup>[23]</sup>报道的层状异构纯 Ti 具有类似的结构特征。高温短时退火处理使得冷轧态组织发生部分回复与再结晶，由于冷轧形成的纳米晶内部积累了较高的变形储能，这有利于再结晶优先形核长大，形成微米晶组织。

图 6 为异质结构 Cu-Cr-Zr 合金 (SS+AT+CR+450 °C×15 min) 在软化温度下的 TEM 照片。如图 6 (a) 所示，晶粒从纳米晶和亚微米晶生长为以亚微米晶 (SC) 和微米晶为主的结构，局部残留少量位错壁，软化过程中部分位错已发生湮灭或重组。图 6 (b) 和 (c) 观察到了退火孪晶的形成及局部区域的再结晶现象，表明材料在高温下已开始发生晶界迁移和结构重排<sup>[34]</sup>。图 6 (d) 为析出相元素分布图，Cr 元素以弥散纳米颗粒形式富集，纳米 Cr 析出相可有效钉扎位错、阻碍其运动，并稳定变形组织中的亚晶界与位错胞结构，协同高密度异质界面抑制再结晶进程，是合金在软化温度下仍保持优异综合性能的关键原因之一。

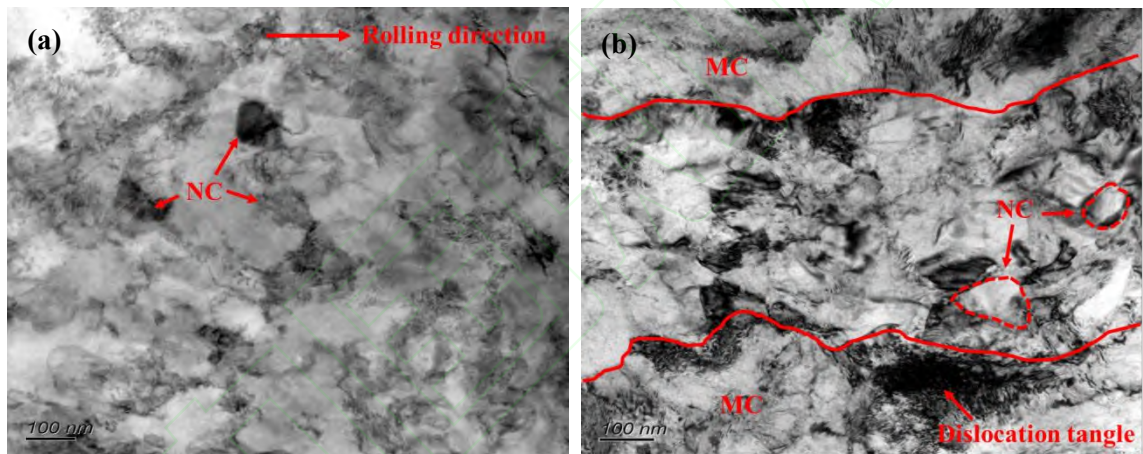


图 5 Cu-Cr-Zr 合金的 TEM 照片

(a) SS + AT + CR, (b) SS + AT + CR + 450 °C × 15 min

Fig.5 TEM micrographs of Cu-Cr-Zr alloy. (a) SS+AT+CR, (b) SS + AT + CR + 450 °C × 15 min

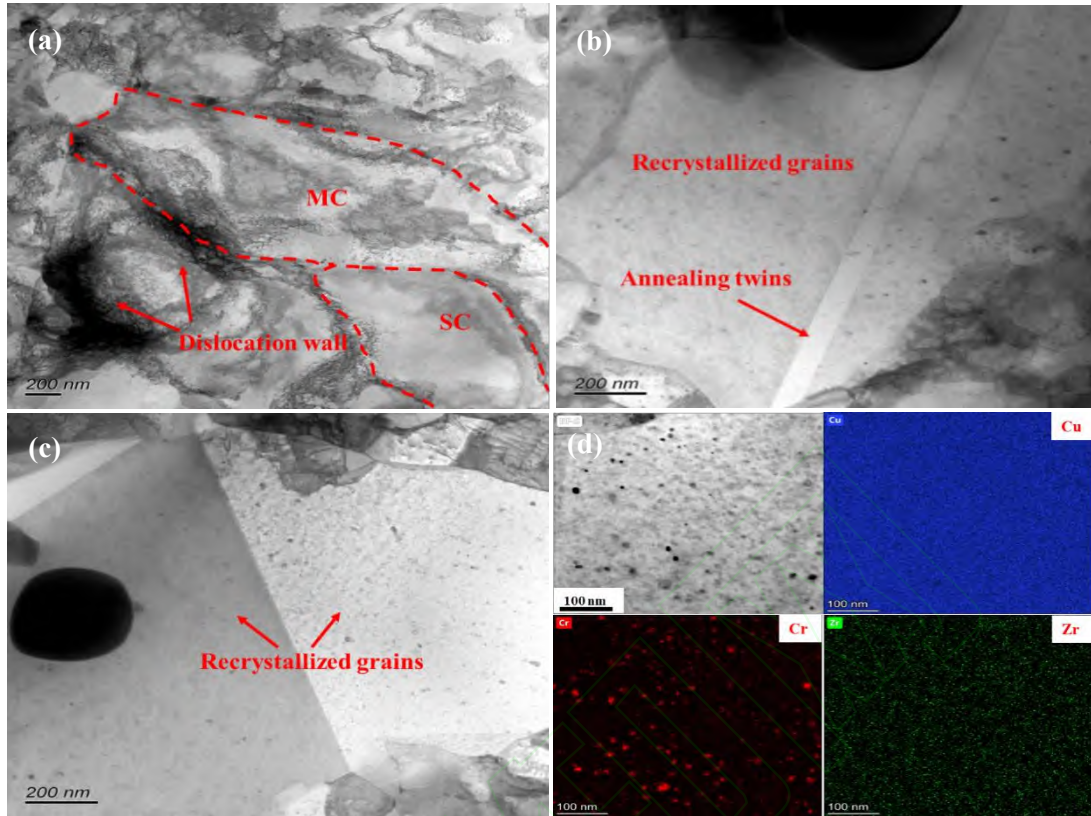


图6 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金 (SS+AT+CR+450 °C×15 min) 在软化温度下的 TEM 照片

(a) 微观组织, (b) 退火孪晶, (c) 再结晶, (d) 析出相

Fig.6 TEM images of heterostructure Cu-Cr-Zr alloy after softening. (a) Microstructure, (b) Annealing twins, (c) Recrystallization, (d) Precipitates

如图 7 所示, 亚微米级 Cr 析出相发生明显粗化 (图 7 (a)), 元素面分布结果 (图 7 (b) - (d)) 表明, Cr 相周边伴随 Zr 元素的偏聚析出, Zr 的选择性偏聚可抑制 Cr 相的过度长大, 并减缓其对位错和晶界的钉扎能力的下降, 有助于提升合金的软化温度<sup>[35]</sup>。然而, 析出相的粗化与聚集, 直接削弱了其位错和晶界的钉扎能力, 原本弥散分布的纳米析出相可通过 Orowan 机制有效阻碍位错滑移, 而粗化后其间距增大, 位错可直接绕过或切割析出相, 导致位错运动阻力显著降低。同时, 亚晶界与晶界的快速迁移进一步促进了再结晶的发生, 最终使合金的抗软化性能显著下降。

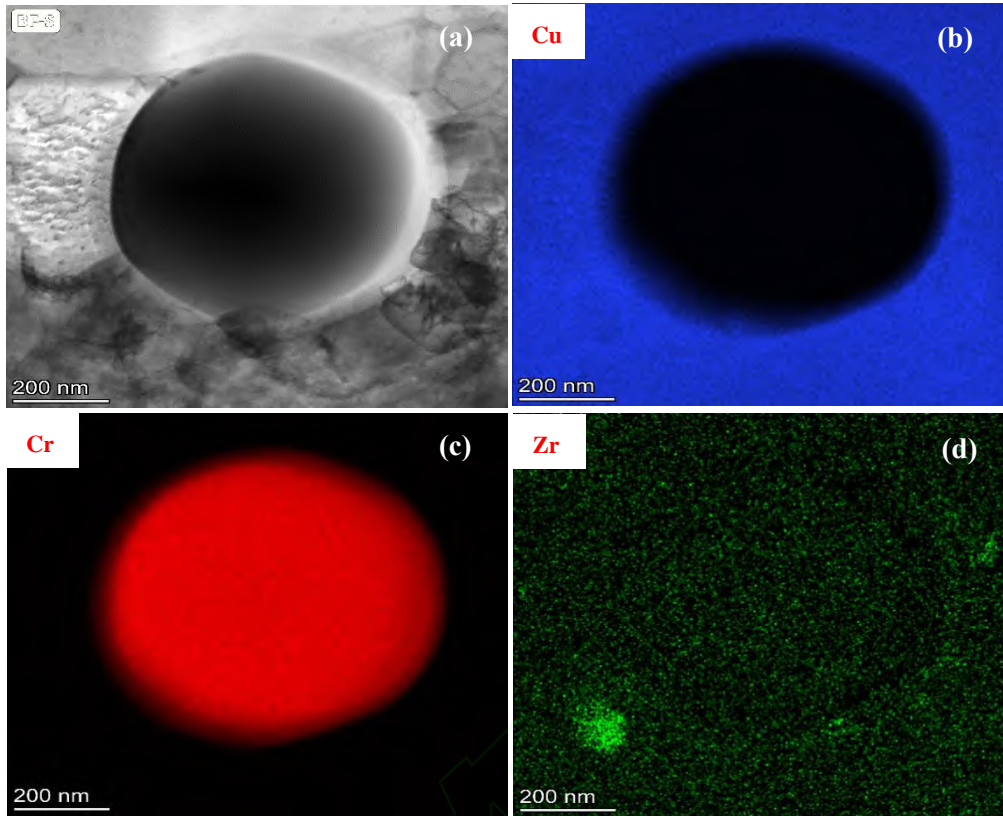
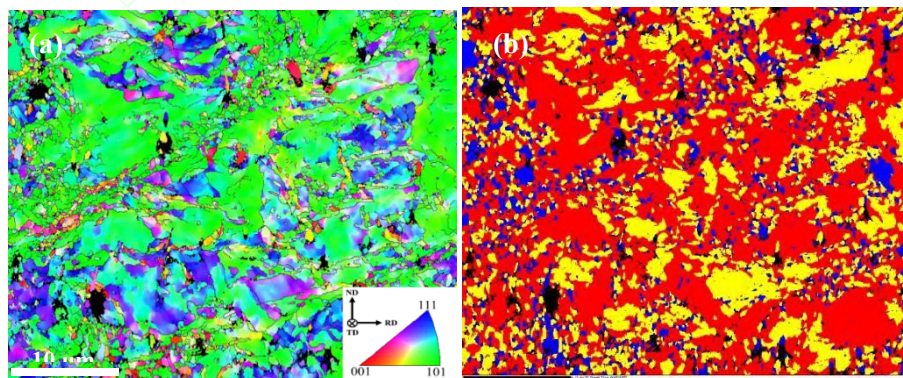


图 7 (a) Cr 沉淀物的明场透射电子显微镜照片, (b) 铜元素, (c) 铬元素, (d) 锆元素

Fig.7 (a) Bright field TEM micrographs of Cr precipitate, (b) Cu element, (c) Cr element, (d) Zr element

图 8 为异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化温度下的 EBSD 照片。图 8 (a) 和 (b) 分别为 IPF 图和再结晶图, 在软化温度下, 基体内析出相的粗化使其对可动位错和晶界的钉扎作用大幅减弱, 从而加速了位错与晶界的协同运动。取向差频率分布图 (图 8 (c)) 表明, 小角度晶界 (LAGB,  $<15^\circ$ ) 占比高达 79.3%, 位错的湮灭与重组使小角度晶界逐步向大角度晶界转化, 而大角度晶界的迁移能力更强, 进一步加速再结晶进程, 这与 TEM 中位错减少的现象一致。图 8 (d) 显示再结晶体积分数增至 10.9%, 这一结果验证了软化过程中再结晶行为的显著增强, 反映了材料从非平衡态向平衡态的微观结构演化。



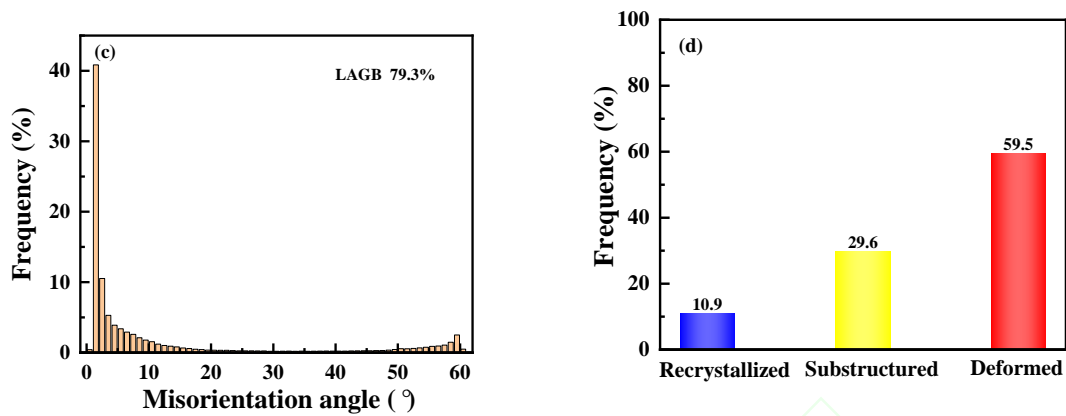


图 8 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化温度下的 EBSD 照片

(a) IPF 图, (b) 再结晶图, (c) 晶粒取向分布图, (d) 图 (b) 的频率分布图

Fig.8 EBSD images of heterostructure Cu-Cr-Zr alloy after softening. (a) IPF map, (b) Recrystallization map, (c) Grain orientation distribution map, (d) Frequency distribution map of Fig. (b)

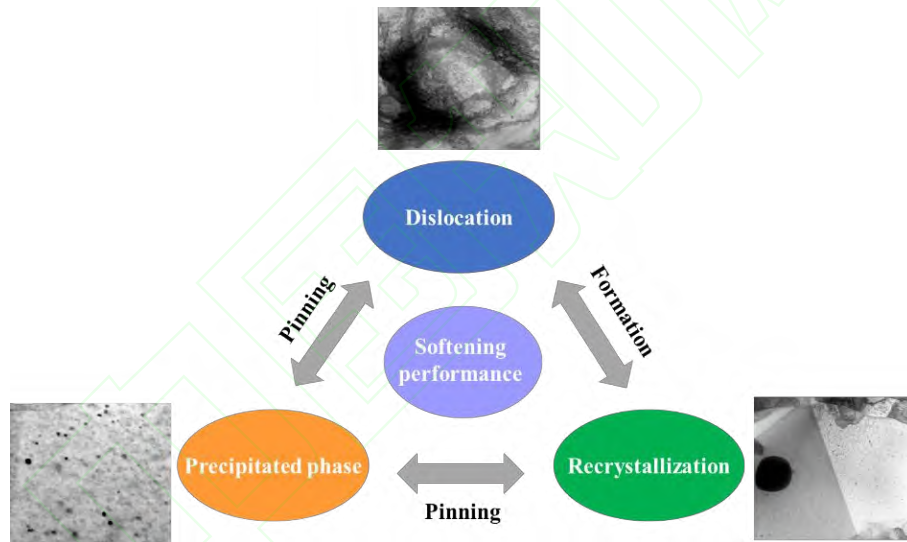


图 9 异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化性能调控机制示意图

Fig.9 Schematic diagram of heterostructure Cu-Cr-Zr alloy softening performance regulation mechanism

### 3 分析讨论

与传统室温轧制相比, 本文采用固溶、时效、冷轧和高温短时退火的复合工艺。时效析出的纳米 Cr 相在后续冷轧中钉扎位错, 促进增殖与储能积累。液氮温度下轧制抑制动态回复, 保留高位错密度并诱发纳米孪晶。高温短时退火使冷轧态变形组织发生局部再结晶, 未再结晶的变形组织与再结晶晶粒共存, 形成微米晶与纳米晶交替分布的异质结构。该工艺能够构筑高密度异质界面, 是提升强塑性与抗软化能力的关

键。

图 9 为异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化性能调控机制示意图。结合微观组织的表征结果，软化温度下的组织演变遵循“析出相粗化→钉扎作用弱化→位错与晶界运动加速→再结晶扩展→抗软化性能下降”的逻辑。析出相的粗化与聚集是初始诱因，软化温度下，部分纳米 Cr 析出相尺寸增大（图 6 (d)），其对位错的 Orowan 钉扎效应减弱，位错运动阻力大幅降低<sup>[19]</sup>。位错壁的减少与小角度晶界占比的下降，表明位错发生了明显的动态回复，部分位错通过攀移和滑移重新排列或湮灭，使变形储能逐步释放。随着回复进程加深，局部区域开始发生再结晶，标志着组织从回复阶段进入“软化一再结晶”协同阶段。TEM 与 EBSD 的表征结果高度一致，共同揭示了异质结构 Cu-Cr-Zr 合金在软化过程中析出相粗化、位错回复与再结晶相互促进、协同演化的本质特征。

在软化温度下，异质结构 Cu-Cr-Zr 合金仍保持优异的综合性能，表明异质界面与纳米析出相仍发挥协同抑制作用。高密度异质界面作为位错运动和晶界迁移的有效屏障，其稳定性的维持是关键。退火孪晶界面属于低能共格界面，其界面能远低于大角度晶界，因此在高温下具有更高的热稳定性，可继续阻碍位错滑移。同时，亚微米级 Cr 相周边出现了 Zr 元素的偏聚析出，Zr 偏聚可降低相界面能，抑制 Cr 原子的进一步扩散，从而延缓析出相的粗化动力学。Li 等<sup>[15]</sup>在 Cu-Cr-Sn 合金也观察到类似的现象，Sn 在 Cr 析出相界面的偏聚有效抑制了析出相粗化，使合金获得较高的软化温度。Huang 等<sup>[26]</sup>通过动力学分析表明，异质结构能显著降低再结晶后期的软化速率，提高高温软化性能。Zr 偏聚与高密度异质界面的协同作用，使得部分析出相在高温下仍保持较强的钉扎能力，这是合金抗软化性能未急剧下降的重要原因。

## 4 结论

(1) 采用冷轧与退火工艺制备出的异质结构 Cu-Cr-Zr 合金具有优异的综合性能，抗拉强度达 695 MPa、导电率为 71.2% IACS、断裂伸长率为 12.5%，且具备优异抗软化能力，软化温度达 535 °C。

(2) 弥散分布的纳米析出相有效钉扎位错和晶界，高密度异质界面也阻碍了位错运动和再结晶过程，二者协同抑制高温下的异质结构组织粗化和软化，提高了合金的抗软化性能。

(3) 本研究建立了异质结构 Cu-Cr-Zr 合金软化性能调控机制的模型，为开发兼具高强度、高导电与高热稳定性的铜合金提供了新策略。

## REFERENCES

[1] 姜业欣, 娄花芬, 解浩峰等. 先进铜合金材料发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22: 84-92.

JIANG Y X, LOU H F, XIE H F, et al. Development status and prospects of advanced copper alloy [J]. Chinese

Journal of Engineering Science, 2020, 22: 84-92.

- [2] 杨斌, 刘柏雄, 汪航等. 高性能铜合金 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2020.
- YANG B, LIU B X, WANG H, et al. High Performance Copper Alloys [M]. Changsha: Central South University Press, 2020.
- [3] LU L, SHEN Y F, CHEN X H, et al. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper [J]. Science, 2004, 304: 422-426.
- [4] 李周, 肖柱, 姜雁斌等. 高强导电铜合金的成分设计、相变与制备 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29: 2009-2049.
- LI Z, XIAO Z, JIANG Y B, et al. Composition design, phase transition and fabrication of copper alloys with high strength and electrical conductivity [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 2009-2049.
- [5] LI Q, LIU Y H, ZHU Q Q, et al. Study on the mechanism of microstructure and strength-ductility regulation in CuCrZr alloy via dual-gradient temperature-controlled rolling and aging treatments [J]. Materials Science and Engineering A, 2025, 937: 148360.
- [6] 叶安梁, 姜雁斌, 彭超群等. 增材制造铜及铜合金的研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2024, 34: 1071-1090.
- YE A L, JIANG Y B, PENG C Q, et al. Research progress on additive manufacturing of copper and its alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34: 1071-1090.
- [7] SUN Y Q, PENG L J, HUANG G J, et al. Effects of Mg addition on the microstructure and softening resistance of Cu-Cr alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 776: 139009.
- [8] MISHNEV R, SHAKHOVA I, BELYAKOV A, et al. Deformation microstructures, strengthening mechanisms, and electrical conductivity in a Cu-Cr-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 629: 29-40.
- [9] LI J Z, DING H, LI B M. Study on the variation of properties of Cu-Cr-Zr alloy by different rolling and aging sequence [J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 802: 140413.
- [10] LIU D H, WANG P H, SONG Y, et al. Effect of the ITER FW manufacturing process on the microstructure and properties of a CuCrZr alloy [J]. Plasma Science and Technology, 2015, 17: 887-892.
- [11] LI C, LIU K, CHEN X G. Improvement of elevated-temperature strength and recrystallization resistance via Mn-containing dispersoid strengthening in Al-Mg-Si 6082 alloys [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2020, 39: 135-143.
- [12] LIU Q, FAN G, TAN Z, et al. Precipitation of Al<sub>3</sub>Zr by two-step homogenization and its effect on the

- recrystallization and mechanical property in 2195 Al–Cu–Li alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 821: 141637.
- [13] ABIB K, AZZEDDINE H, TIRSATINE K, et al. Thermal stability of Cu-Cr-Zr alloy processed by equal-channel angular pressing [J]. *Materials Characterization*, 2016, 118: 527-534.
- [14] 刘劲松, 徐亚楠, 邓偲瀛等. Cu-0.96Cr-0.078Zr(-0.07La)合金的高温热变形行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35: 538-556.
- LIU J S, XU Y N, DENG S Y, et al. Hot deformation behavior of Cu-0.96Cr-0.078Zr (-0.07La) alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2025, 35: 538-556.
- [15] LI J Z, DING H, LI B M, et al. Effect of Cr and Sn additions on microstructure, mechanical-electrical properties and softening resistance of Cu–Cr–Sn alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 802: 140628.
- [16] LI Z M, LI X N, HU Y L, et al. Cuboidal  $\gamma'$  phase coherent precipitation-strengthened Cu–Ni–Al alloys with high softening temperature [J]. *Acta Materialia*, 2021, 203: 116458.
- [17] WU J, HUANG H, LI X, et al. A novel Cu-Sn-Zr alloy with core-shell structure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 895: 146230.
- [18] HUANG C Z, JIANG Y B, WU Z X, et al. Significantly enhanced high-temperature mechanical properties of Cu-Cr-Zn-Zr-Si alloy with stable second phases and grain boundaries [J]. *Materials & Design*, 2023, 233: 112292.
- [19] QU J P, ZHANG W S, YUE S P, et al. Strengthening and high-temperature softening resistance of low Si-added Cu–Cr–Zr alloy for fusion reactor application [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 861: 144328.
- [20] ZHU Y T, WU X L. Heterostructured materials [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 131: 101019.
- [21] ZHU Y T, WU X L. Perspective on hetero-deformation induced (HDI) hardening and back stress [J]. *Materials Research Letters*, 2019, 7: 393-398.
- [22] MA E, ZHU T. Towards strength-ductility synergy through the design of heterogeneous nanostructures in metals [J]. *Materials Today*, 2017, 20: 323-331.
- [23] WU X L, YANG M X, YUAN F P, et al. Heterogeneous lamella structure unites ultrafine-grain strength with coarse-grain ductility [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112: 14501-14505.
- [24] 余文凯, 万杰, 陈豫增. 异质结构金属材料制备与强韧化机制研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2025, 35: 3269-3290.

- YU W K, WAN J, CHEN Y Z. Research progress on fabrication and strengthening-toughening mechanisms of heterogeneous structural metallic materials [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35: 3269-3290.
- [25] OYARZÁBAL M, MARTÍNEZ-DE-GUERENU A, GUTIÉRREZ I. Effect of stored energy and recovery on the overall recrystallization kinetics of a cold rolled low carbon steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 485: 200-209.
- [26] HUANG C Z, JIANG Y B, WU Z X, et al. Recrystallization mechanism of Cu-Cr-Zn-Zr-Si alloy with enhanced softening resistance via initial heterogeneous structure [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2026, 250: 69-82.
- [27] LI S F, LI M H, XIAO Z, et al. Pre-aging induced concurrent enhancement of mechanical properties and softening resistance performance of Cu-Ni-Co-Si alloys [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 42: 998-1011.
- [28] LIU F X, LIU X H, XIE G L, et al. Studies on thermal stability, softening behavior and mechanism of an ADS copper alloy at elevated temperatures [J]. Journal of Materials Science and Technology, 2024, 186: 79-90.
- [29] VINOGRADOV A, PATLAN V, SUZUKI Y, et al. Structure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr-Zr alloy produced by equal-channel angular pressing [J]. Acta Materialia, 2002, 50: 1639-1651.
- [30] MENG A, NIE J F, WEI K, et al. Optimization of strength, ductility and electrical conductivity of a Cu-Cr-Zr alloy by cold rolling and aging treatment [J]. Vacuum, 2019, 167: 329-335.
- [31] LI R G, GUO E Y, CHEN Z N, et al. Optimization of the balance between high strength and high electrical conductivity in CuCrZr alloys through two-step cryorolling and aging [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 771: 1044-1051.
- [32] CHU Z Q, FAN Z, WEI W, et al. Simultaneously enhancing strength, ductility, and electrical conductivity in Cu-1Cr-0.1Zr alloy by heterogeneous microstructure [J]. Materials Science and Engineering A, 2024, 918: 147473.
- [33] HE J Y, MA Y, YAN D S, et al. Improving ductility by increasing fraction of interfacial zone in low C steel/304 SS laminates [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 726: 288-297.
- [34] HUANG M, FAN G H, GENG L, et al. Revealing extraordinary tensile plasticity in layered Ti-Al metal composite [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 38461.
- [35] WANG J F, CHEN J S, GUO C J, et al. Effect of heat treatment on low cycle fatigue properties of Cu-Cr-Zr alloy [J]. Materials Characterization, 2019, 158: 109940.

# Effects of cold rolling and annealing processes on the softening behavior of heterostructured Cu-1Cr-0.1Zr alloys

CHU Zhuqi<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Weiming<sup>1,3</sup>, WEI Wei<sup>1,3</sup>, WEI Kunxia<sup>1,3</sup>, Igor V. Alexandrov<sup>3,4</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. School of Intelligent Manufacturing and Robotics, Anqing Normal University, Anqing 246011, China;

3. Advanced Functional Materials of Jiangsu Joint Laboratory for International Cooperation, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

4. Department of Materials Science and Physics of Metals, Ufa University of Science and Technology, 12 K. Marx, 450008 Ufa, Russia)

**Abstract:** In recent years, heterostructure design has emerged as an effective approach for synergistically optimizing the strength and electrical conductivity of copper alloys. However, the lack of systematic research on their high-temperature softening behavior has restricted their application in high-temperature environments. In this work, a heterostructured Cu-1Cr-0.1Zr alloy was fabricated via cold rolling and annealing. Through combined microstructural characterization, mechanical property testing, electrical conductivity measurement, and softening temperature determination, the effects of cold rolling and annealing on the softening behavior and microstructure of the heterostructured Cu-1Cr-0.1Zr alloy were systematically investigated, and its underlying high-temperature anti-softening mechanism was elucidated. The results demonstrate that the heterostructured alloy achieves a synergistic enhancement in comprehensive properties, with a tensile strength of 695 MPa, an electrical conductivity of 71.2% IACS, and an elongation to failure of 12.5%. Moreover, it exhibits excellent softening resistance, with a softening temperature reaching 535 °C. This remarkable anti-softening capability originates from the synergistic effect of high-density hetero-interfaces and nano-precipitates, which collectively suppress dislocation motion and recrystallization, thereby effectively retarding the softening kinetics. This work provides a novel strategy for developing copper alloys that integrate high strength, high electrical conductivity, and excellent thermal stability.

**Key words:** cold rolling, annealing, heterostructure, Cu-Cr-Zr alloy, softening behavior

**Foundation item:** Project(202401BN070001-012) supported by the Science and Technology of Yunnan Province; Project(25AFMI002) supported by the Advanced Functional Materials of Jiangsu Joint Laboratory

for International Cooperation; Project(ZK202409ZD) supported by the Key Project of Anqing Normal University, China

**Correspondent author:** WEI Wei, E-mail: benjamin.wwei@163.com

