

# 不同时效温度结合深冷处理工艺对 AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> 共晶高熵合金微观组织及力学性能的影响

柳成昊<sup>1, 2</sup>, 李广龙<sup>1, 2</sup>, 张斯若<sup>1, 2</sup>, 刘子墨<sup>1, 2</sup>, 武皓恺<sup>1, 2</sup>, 曲迎东<sup>2, 3</sup>

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870;  
2. 辽宁省高校轻金属材料与工程重点实验室, 辽宁沈阳 110870;  
3. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110136)

**摘要:** 以AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金为研究对象, 系统探究了时效与深冷复合热处理工艺对合金相组成、微观组织及力学性能的影响, 阐明了三种热处理工艺下合金的强化机制。结果表明: 700 °C时效处理或700 °C时效和深冷双重处理下, 合金均呈现FCC相与B2相交替的层片状共晶组织; 深冷处理能促使FCC相中产生位错, B2相中析出BCC共格纳米相, 合金强度和塑性同时得到提升; 经900 °C时效和深冷处理后, B2相向FCC相转变, 且BCC纳米相异常长大, 合金伸长率达到最高, 为27.2%, 但抗拉强度下降。深冷处理产生的共格纳米析出相可作为位错开动的源头, 显著增加可动位错数量, 有效均匀分散合金内部的应力集中, 进而改善其塑性变形能力。

**关键词:** 共晶高熵合金; 时效处理; 深冷处理; 共格析出相; 力学性能

**中图分类号:** TG113.12; TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0646-07

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0083

## Effect of Different Aging Temperatures Combined with Deep Cryogenic Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> Eutectic High Entropy Alloy

LIU Cheng-hao<sup>1,2</sup>, LI Guang-long<sup>1,2</sup>, ZHANG Si-ruo<sup>1,2</sup>, LIU Zi-mo<sup>1,2</sup>, WU Hao-kai<sup>1,2</sup>, QU Ying-dong<sup>2,3</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China;  
2. Key Laboratory of Light Metal Materials and Engineering at Universities of Liaoning Province, Shenyang 110870, Liaoning, China;  
3. College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

**Abstract:** Taking the AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy as the subject investigated, the effects of aging and deep cryogenic composite heat treatment on the phase compositions, the microstructures and the mechanical properties were systematically explored. The strengthening mechanisms for the alloys under three different heat treatment processes were elucidated. The results show that after aging at 700 °C alone or aging at 700 °C followed by cryogenic treatments, the alloys all present lamellar eutectic structures of FCC phases alternating with B2 phases. Deep cryogenic treatment promotes the generation of dislocations in FCC phases and the precipitation of BCC coherent nanophases in B2 phases, which improves the strength and plasticity of the alloy simultaneously. After aging at 900 °C and deep cryogenic treatment, the B2 phase transforms to FCC phase, and BCC nanophases grow abnormally, and the alloy elongation reaching the highest value of 27.2%, but the tensile strength decreasing. The coherent nano precipitates generated after deep cryogenic treatment can act as the sources for the dislocation activation, significantly increasing the number of mobile dislocations and effectively dispersing internal stress concentrations within the alloy, in turn improving the plastic deformation capacity of the alloy.

**Key words:** eutectic high entropy alloy; aging treatment; deep cryogenic treatment; coherent precipitate phase; mechanical property

**基金项目:** 辽宁省沈阳市科技人才专项项目 (RC230930); 兴辽人才计划项目 (XLYC2403071)。

**收稿日期:** 2025-12-30 收到初稿, 2026-01-17 收到修订稿。

**作者简介:** 柳成昊 (1998-), 男, 博士, 主要研究方向为共晶高熵合金的成分设计与热处理工艺调控。E-mail: liuchenghaosut@163.com

**通信作者:** 李广龙, 男, 副教授, 博士生导师。E-mail: liguanglong1990@163.com

**引用格式:** 柳成昊, 李广龙, 张斯若, 等. 不同时效温度结合深冷处理工艺对 AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> 共晶高熵合金微观组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 646-652.

LIU Chenghao, LI Guanglong, ZHANG Siruo, et al. Effect of different aging temperatures combined with deep cryogenic treatment on the microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 646-652.

材料科学的进步始终是高端装备升级与极端环境应用突破的核心驱动力,传统单主元合金设计理念已难以满足航空航天、深海装备和极地工程等领域对材料综合性能的严苛要求<sup>[1-5]</sup>。高熵合金的问世打破了传统合金的设计困境,凭借多主元协同效应展现出高强度、高耐腐蚀性等优异性能,却受限于铸造成形性差、成分偏析严重等瓶颈<sup>[6-8]</sup>。在此背景下,共晶高熵合金作为高熵合金领域的重要分支应运而生,其创新性融合了共晶合金优异的铸造流动性与高熵合金的多元性能优势,无需热机械处理即可获得超细均匀凝固组织,实现了高强度与良好塑性的平衡,克服了难熔高熵合金工程化应用的关键障碍<sup>[9-13]</sup>。本课题选取AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金为试验对象,系统研究了不同时效温度结合深冷处理工艺对AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金微观组织及力学性能的影响,并探究了合金强化机理,为进一步研究共晶高熵合金的热处理工艺提供一定的指导。

## 1 试验材料与方法

采用配备水冷铜坩埚的非自耗电弧熔炼炉制备AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金铸锭。熔炼原料为纯度

99.95%的Al颗粒、Co颗粒、Cr块体、Fe颗粒和Ni块体。在开始熔炼合金前,将纯Zr锭熔化2次以充分吸收残留在炉内的氧气。在熔炼过程中,将合金锭正反面翻转熔炼4次,每次熔炼时间控制在3~4 min,并在合金锭完全熔化后,开启电磁搅拌直至该合金锭单面熔炼结束,以确保获得成分均匀的铸锭。待合金锭在水冷铜坩埚内完全冷却之后,取出备用。

通过真空高温热处理炉对铸态(AC)试样进行700℃保温18 h的热处理,得到700℃时效态试样,标记为AC-700,热处理工艺曲线如图1(a)所示;类似的,通过真空高温热处理炉对铸态试样分别进行700℃和900℃保温18 h的热处理,水淬后放入液氮中(-196℃)进行12 h深冷处理(DCT),标记为DCT-700和DCT-900,热处理工艺曲线如图1(b)和图1(c)所示。

在三种合金上截取拉伸试样(图2),通过万能电子试验机进行室温拉伸试验,每种热处理态的合金试样重复测试三次,对试验数据取平均值,以保证数据的准确性。使用维氏硬度计进行硬度测定,每个试样测量10个点,计算平均值得到最终硬度值。

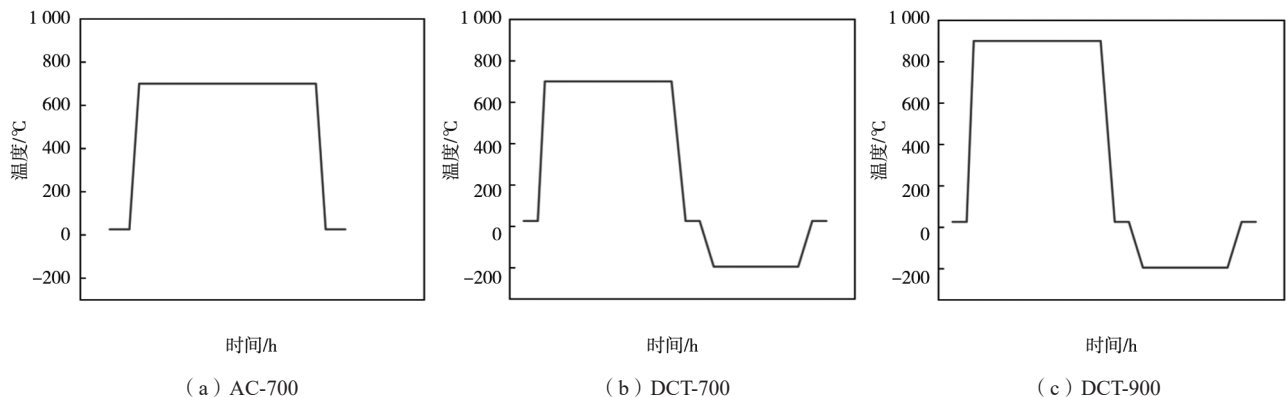


图1 热处理流程图

Fig. 1 Heat treatment flowchart

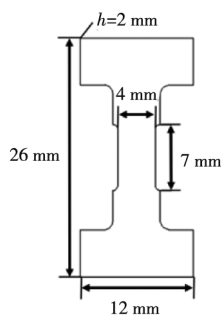


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the tensile test specimen

通过配备铜靶材的Shimadzu-7000型X射线衍射仪对高熵合金的晶体结构及相组成进行鉴定,采用Cu-K $\alpha$ 射线( $\lambda=0.154$  nm),扫描速度设置为 $4$  ( $^{\circ}$ ) $\cdot$ min<sup>-1</sup>,扫描角度 $2\theta$ 范围为 $20^{\circ}$ ~ $100^{\circ}$ 。通过配备能谱分析仪的Gemini SEM 300型蔡司场发射扫描电子显微镜对不同热处理态的高熵合金锭及拉伸试样断面形貌进行观察,并通过能谱仪分析元素分布。采用JEM-2100型透射电子显微镜在明场成像条件下观察试样,并进行选区电子衍射分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 合金相结构

图3 (a) 为不同热处理工艺下AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的XRD图谱。可以看出, AC-700、DCT-700和DCT-900均由两种晶体结构(FCC相、B2/BCC相)组成。时效温度为700 °C时, AC-700和DCT-700的衍

射峰峰值没有明显变化。图3 (b) 显示, 与AC-700相比, DCT-700试样的FCC相(111)、(200)晶面及B2/BCC相(110)晶面衍射峰均向高角度方向偏移。根据布拉格方程 $2d\sin\theta = \lambda$ ,  $2\theta$ 增大对应晶面间距 $d$ 减小, 表明两种相的晶格常数发生改变。需注意的是, XRD峰位偏移是多因素共同作用的结果, 包括微观内应力与相组成的变化等。为验证相成分变化是否为峰位偏移的主因, 后续将结合SEM-EDS结果进一步分析。

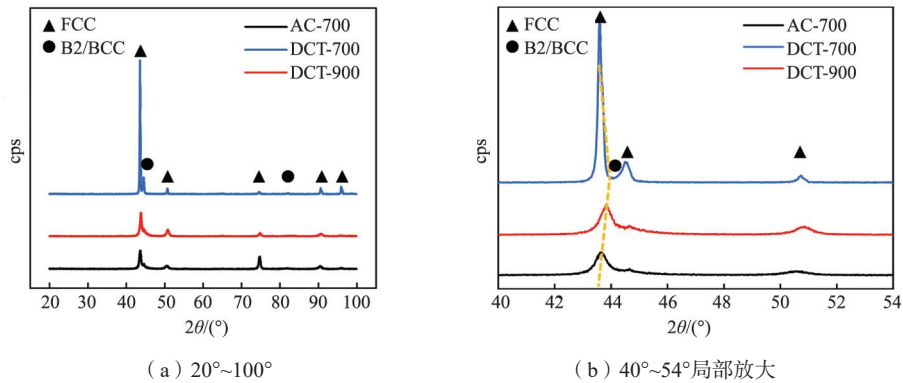


图3 三种热处理工艺下AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的XRD图谱  
Fig. 3 XRD patterns of the AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloys under three different heat treatment processes

当深冷处理时间保持12 h不变, 时效温度由700 °C提升为900 °C时, DCT-900的FCC相(111)晶面衍射峰显著升高, 同时B2/BCC相(110)晶面衍射峰降低, 表明DCT-900发生B2相向FCC相的转变。FCC相较软, 可以承受更大的变形而不发生断裂, 有利于提升合金的塑性。

### 2.2 合金微观组织和元素分布

图4 (a) 为AC-700的SEM图像, 合金呈现典型的共晶组织, 包括层片状共晶区和非层片状非共晶区。

共晶区中浅灰色衬度的宽FCC相与深灰色衬度的B2交替生长。非共晶区形成于共晶区周围, 该区域B2相枝晶分布在FCC相基体中。由图4 (b-f)可知, FCC相富含Co、Cr、Fe元素, B2相富含Al和Ni元素。

图5 (a) 为DCT-700的SEM图像, 深冷处理12 h后, 共晶组织没有明显变化, 层片无破碎现象。图5 (b-f)显示宽层FCC相富含Co、Cr、Fe元素, 窄层B2相富含Al和Ni元素, 说明深冷处理不会造成元素偏聚。图6 (a) 为DCT-900的SEM图像, 其共晶组织中

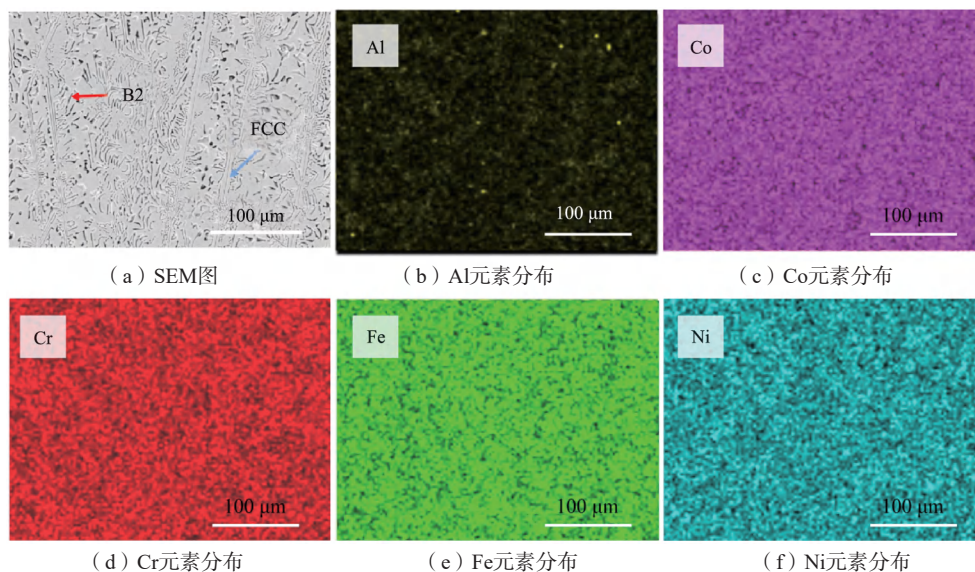


图4 AC-700试样的SEM-EDS元素分布  
Fig. 4 SEM-EDS element distributions of the AC-700 specimen

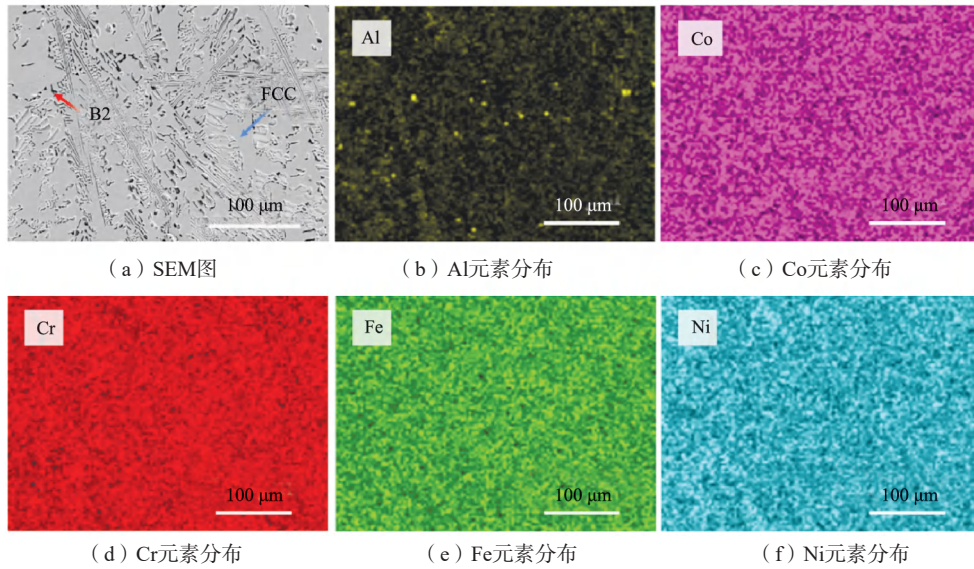


图5 DCT-700试样的SEM-EDS元素分布

Fig. 5 SEM-EDS element distributions of the DCT-700 specimen

层片状结构逐渐分解、减少。与AC-700和DCT-700相比,热处理温度提升到900 ℃时,试样层片状共晶区被破坏,长条形B2相分解为球状或短棒状,FCC相及B2相的元素分布未发生改变。

结合AC-700与DCT-700的元素分布及定量分析结果可知,FCC相在两种状态下均稳定富集Co、Cr和Fe元素,无局部富集或贫化区域,B2相均主要由Al、Ni元素组成,同样未观察到明显元素偏聚。可推测峰位偏移及晶格常数改变的主要原因在于时效和深冷处理诱导的微观内应力与晶格畸变,具体机制为热收缩不均引发的微观内应力。深冷处理工艺中,试样经700 ℃时效后先水淬至室温,再骤冷至-196 ℃,温差较大。由于FCC相塑性优异,其与B2相的热膨胀系数存在差

异,骤冷过程中两相的热收缩量不同,导致界面处产生约束应力——FCC相因收缩量更大而受到B2相的压应力,B2相则受到FCC相的拉应力。这种微观内应力会导致晶格常数的变化,因此FCC相衍射峰向高角度偏移。

通过透射电子显微镜对AC-700、DCT-700和DCT-900的微观组织进行深入分析。如图7所示,AC-700中宽层片和窄层片结构交替生长的明场像中几乎观察不到位错。图7(b)、(c)中的衍射斑进一步证实了宽层片为FCC相结构(沿[011]方向),窄层片为B2相结构(沿[001]方向)。这表明仅进行时效处理的AC-700不会产生位错。此外,在图7(a)的窄层片状B2相中可以观察到具有BCC相结构(沿[111]方向)的纳米析出相,根据析出相和基体晶格条纹高度一致的关系,

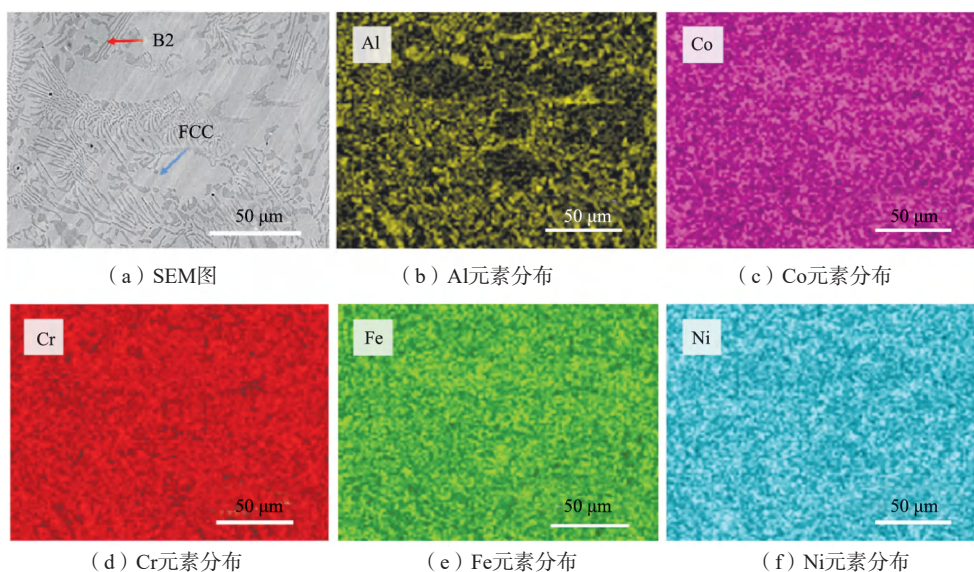
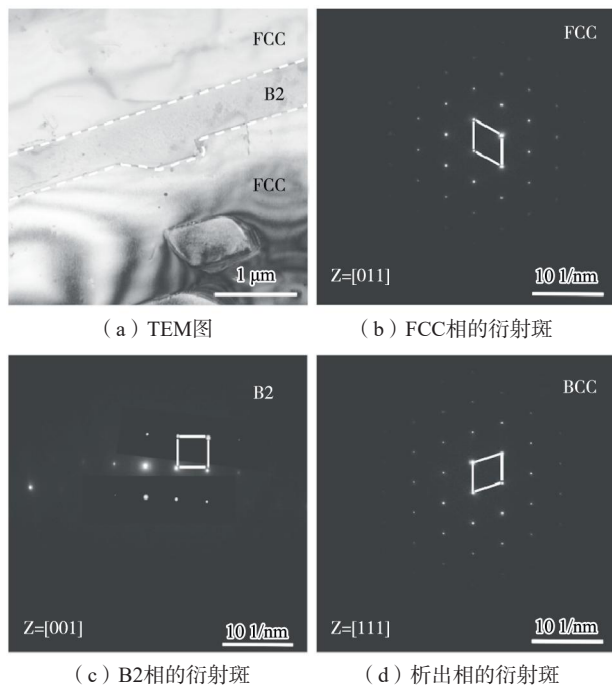


图6 DCT-900试样的SEM-EDS元素分布

Fig. 6 SEM-EDS element distributions of the DCT-900 specimen



(a) TEM图

(b) FCC相的衍射斑

(c) B2相的衍射斑

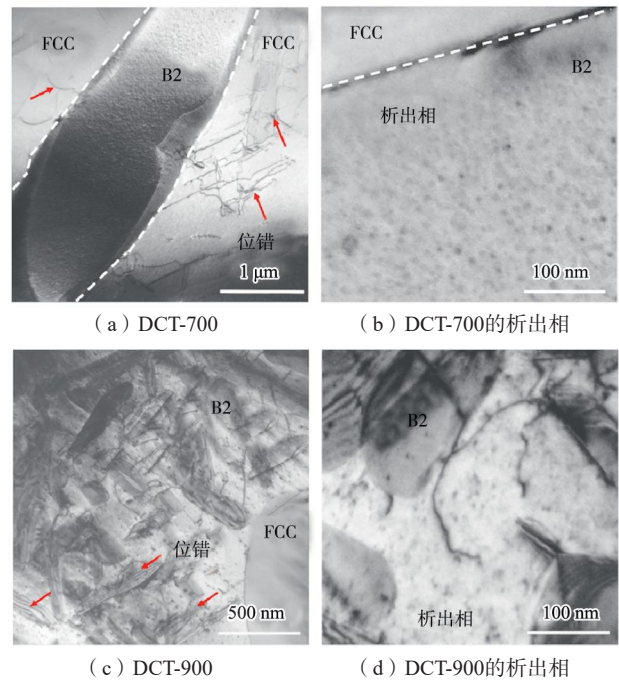
(d) 析出相的衍射斑

图7 AC-700试样的TEM图及衍射斑

Fig. 7 TEM image and diffraction spot patterns of the AC-700 specimen

证明其为共格析出相<sup>[14]</sup>。

如图8 (a) 所示, 经过深冷处理以后, DCT-700的FCC相中位错密度显著增加, 一些位错穿透相界扩展到B2相中。这一现象表明, FCC相较软, 进行深冷处理后会发生微塑性变形, 产生位错。同时, B2相中纳米析出相的数量和密度均明显提升, 且分布均匀, 见图8 (b)。共格纳米析出相可以很好地缓解FCC和B2界面上的应力集中<sup>[15]</sup>, 从而使AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金能够承受更大的塑性应变。此外, 均匀致密的析出相还有助于提升共晶高熵合金的极限抗拉强度<sup>[16]</sup>。与DCT-700相比, DCT-900的层状结构发生明显断裂, 长条形B2相在高温下分解成短棒状, 并被FCC相所包围。FCC相内部存在局部位错缠结, 这进一步证实了在共晶



(a) DCT-700

(b) DCT-700的析出相

(c) DCT-900

(d) DCT-900的析出相

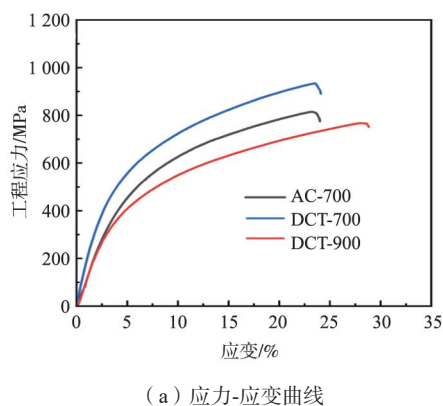
图8 DCT-700和DCT-900试样的TEM图

Fig. 8 TEM images of the DCT-700 and DCT-900 specimens

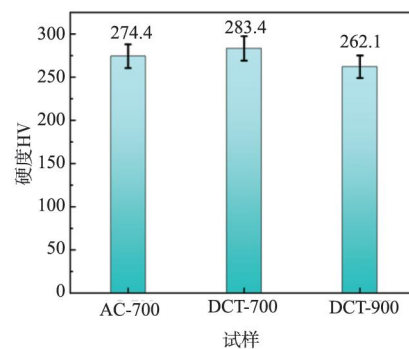
层状区域, 软FCC相和硬B2相协调变形。同时, B2相中形成了尺寸更大的球形析出相。随热处理温度升高至900 °C, 合金体系的自由能升高, 原子获得足够的动能跨越界面迁移势垒, 驱动B2相通过直接粗化的方式向尺寸更大的球形BCC析出相转变, 以降低体系的总能量。FCC相占比的明显增加可显著改善合金塑性, 但B2相中BCC析出相的异常长大, 在拉伸变形过程中容易造成B2相中的局部应力集中。

### 2.3 合金的力学性能

AC-700、DCT-700和DCT-900的室温力学性能如图9和表1所示。可以看出, 相比于AC-700, DCT-700的屈服强度、抗拉强度和伸长率均有不同程度的增加,



(a) 应力-应变曲线



(b) 维氏硬度

图9 不同热处理工艺下AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的室温拉伸应力-应变曲线和硬度值Fig. 9 Room temperature tensile stress-strain curves and hardnesses of the AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloys under different heat treatment processes

表1 不同热处理工艺下AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloys under different heat treatment processes

试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HV
AC-700	311.3	805.4	23.8	274.4
DCT-700	390.5	944.5	24.1	283.4
DCT-900	382.3	732.8	27.2	262.1

分别达到390.5 MPa、944.5 MPa和24.1%。DCT-900的抗拉强度有所下降，但伸长率明显提升。分析表明，DCT-900的微观组织中FCC相体积分数较高，该结构可以容纳较大塑性变形。由维氏硬度测试结果可知，DCT-700的硬度达到了最大值HV283.4，相比于AC-700提升了2.19%，而DCT-900的硬度最低。

经不同时效与深冷处理后AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的断口形貌如图10所示。可以看到，AC-700的断口存在明显的解理台阶（黄色区域标示）与韧窝（红色箭头标示），兼具解理断裂与韧性断裂双重特性，呈现典型的准解理断裂模式。这是因为，一方面，B2相在正应力作用下沿解理面〔110〕晶面]发生穿晶断裂，形成解理台阶与河流花样<sup>[17]</sup>；另一方面，FCC相通过微孔形核（界面处）、长大与聚合，形成韧窝，表现出韧性断裂特征。而解理台阶附近的尖锐边缘，则是B2相解理裂纹扩展至FCC相界面时的残留痕迹，反映了脆性断裂的局部主导性<sup>[18]</sup>。共晶区硬B2相与软FCC相的塑性变形能力存在显著差异：室温拉伸过程中，FCC相因滑移系丰富发生显著塑性变形，逐渐被拉长、细化，成为线条状；而B2相本征塑性较差，最终以“未变形块体”形式留存于沟槽底部，形成硬相基底与软相线条的沟槽形貌。相比之下，DCT-700的断口形貌较为粗糙，显示出典型的韧性断裂特征。可以看到，断口靠近沟槽处出现了更多均匀分布的韧窝，表明DCT-700具有更强的塑性。对于DCT-900，由于其在900℃高温下发生了B2相向FCC相的转变，韧窝数量明显提升，塑性得到了明显改善。

对DCT-700合金强度与塑性的同时提升及其强化机制展开分析讨论：深冷处理会使FCC相中位错密度显著增加，同时在B2相中诱导BCC共格纳米析出相形成。AC-700作为常规时效的基准组，因未引入深冷处理，时效过程中缺乏晶格畸变储能的驱动，晶粒难以实现细化，B2相内纳米析出相较少。该粗化组织特征导致位错运动阻力不足，无法借助细晶强化机制提升强度，且易引发晶界处应力集中与裂纹萌生，最终表现出较低的力学性能水平。DCT-700经时效与深冷处理协同作用，深冷诱导的晶格畸变为组织优化提供充足驱动力，促使晶粒细化，同时B2相内均匀析出尺寸为15~30 nm的共格纳米析出相，且晶界处无粗大第二相。晶界可以阻碍位错滑移，实现细晶强化，更为纳米析出相提供丰富形核位点，而共格纳米析出相兼具促进位错增殖以提升变形协调性和钉扎位错运动以增强抗变形能力的双重作用，此协同强化效应赋予了DCT-700最优的力学性能。对于DCT-900，900℃高温时效促使原子扩散速率大幅提升，深冷处理破坏了纳米析出相与B2相的共格关系，晶界处组织粗化直接导致强化机制失效，且析出相钉扎位错的能力锐减，因此其强度显著下降、塑性提升。

结合图7(a)、图8(b)和图8(d)可知，深冷处理后合金中有较多纳米球状BCC相析出，由于深冷处理引起晶体中冷缩内应力的变化，合金内部发生微塑性变形<sup>[19]</sup>，合金中的自由能增加，固溶体稳定性降低，原子缓慢扩散的临界值亦有所下降，进而导致部分元素在基质上发生偏析。Al和Ni元素的混合焓是Al-Cr-Fe-Ni高熵合金所有二元体系中最底的，混合焓差大的元素容易发生偏析，更倾向于形成原子对<sup>[20]</sup>，因此B2相中析出富集Al、Ni的球状纳米颗粒。位错很容易被钉住或积聚在这些纳米析出相处，形成高密度位错。拉伸过程中，纳米析出相既作为微孔形核核心促进韧窝形成，又作为位错源使FCC相的变形更均匀，最终表现为断口处韧窝数量增多、尺寸均匀。此外，深冷处理引入高密度位错，可通过位错滑移缓解B2相的应力集中，抑制解理裂纹的萌生<sup>[21]</sup>，从而实现

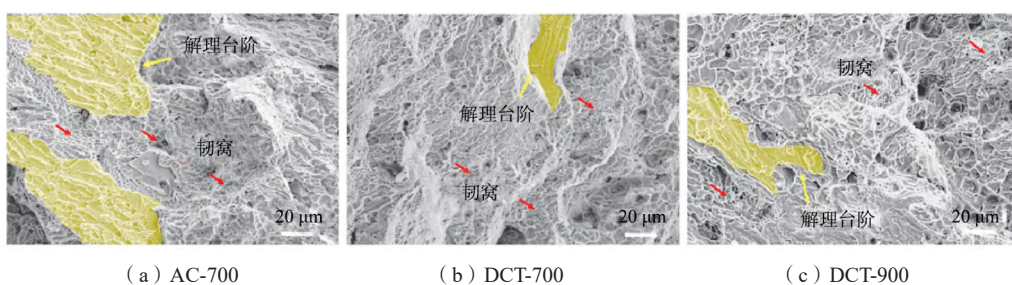


图10 不同热处理工艺下AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金的断口形貌

Fig. 10 Fracture morphologies of the AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloys under different heat treatment processes

AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金强度与塑性的协同提升。而DCT-900发生明显相变，FCC占比增加对塑性的提升效果显著，但时效温度过高导致纳米析出相严重粗化，进而诱发局部应力集中，导致抗拉强度降低。

### 3 结论

(1) 700 °C时效处理 (AC-700) 及700 °C时效和深冷双重处理 (DCT-700) 后, AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub>共晶高熵合金中均呈现层片状共晶组织。深冷处理使FCC相中产生位错, B2相中析出BCC相纳米相, 实现合金强度和塑性的同时提升。DCT-700的伸长率为24.1%, 屈服

强度为390.5 MPa, 抗拉强度为944.5 MPa, 较AC-700分别提升了1.26%、25.4%和17.3%, 断裂模式由准解理断裂转变为韧性断裂。

(2) 时效温度提升到900 °C并进行深冷处理后, DCT-900的层片状共晶区发生断裂, B2相向FCC相转变, 同时B2中析出的BCC纳米相异常长大, 合金伸长率提升至27.2%, 但抗拉强度降为732.8 MPa。

(3) 深冷处理能够促使共晶高熵合金产生位错强化和第二相强化, 纳米析出相可作为位错开动的源头, 提供更多的可动位错数量, 从而均匀分散合金的应力集中, 使合金强度和塑性同步提升。

#### 参考文献:

- [1] LI W D, XIE D, LI D Y, et al. Mechanical behavior of high-entropy alloys [J]. Progress in Materials Science, 2021, 118: 100777.
- [2] ZHANG C, ZHANG F, CHEN S L, et al. Computational thermo dynamics aided high-entropy alloy design [J]. JOM, 2012, 64: 839-845.
- [3] 王涛, 时洁, 潘虎成, 等. Cr含量及热处理对NbMoZrAl基高熵合金微观组织与力学性能的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (9): 1210-1217.
- [4] DAI G X, WANG S G, CHEN R R, et al. Formation mechanism of CuCoNiFe high-entropy alloy tube walls for metallic microlattice ultralight materials [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1020: 179406.
- [5] WANG X, DIAN J H, LIU S L, et al. Nano-scratching behavior of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy [J]. Vacuum, 2025, 244: 114905.
- [6] YANG X, QIN G, FENG L, et al. Development of high-strength and high-ductility high-entropy alloys via directional solidification: a multifaceted strengthening approach [J]. International Journal of Plasticity, 2025, 191: 104403.
- [7] 陈瑞润, 张淑婧, 秦刚, 等. Y添加对CoCrFeMnNi高熵合金组织及力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (3): 286-291.
- [8] 徐琴, 王琪, 李娟, 等. B对NbMoTiVSi<sub>0.2</sub>难熔高熵合金组织与力学性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (3): 292-296.
- [9] LIU Z Y, LIU J S, ZHANG Y, et al. Study on the enhancement of strength-ductility of CoCrFeNiMn<sub>0.5</sub> high-entropy alloys by cryogenic-temperature induced nano-twinning and 9R phase formation [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1407: 184921.
- [10] PENG P, FENG X N, LI S Y, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of as-cast AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 939: 168843.
- [11] PAN W, FU P M, LI Z J, et al. Microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy synthesized by spark plasma sintering of gas-atomized powder [J]. Intermetallics, 2022, 144: 107523.
- [12] ZHANG H T, CHEN R R, QIN G, et al. Phase separation of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy during directional solidification and their effect on tensile properties [J]. Intermetallics, 2019, 113: 106569.
- [13] QI H, LV Q Y, LI G L, et al. Effect of cryogenic treatment on B2 nanophase, dislocation and mechanical properties of Al<sub>1.4</sub>CrFe<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub> (BCC) high entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 878: 145183.
- [14] 戎昊昱, 孙成, 谢晓丽, 等. 热处理对高熵合金相结构及力学性能和磨损的耦合调控 [J]. 冶金与材料, 2025, 45 (10): 154-156.
- [15] HE J Y, WANG H, HUANG H L, et al. A precipitation-hardened high-entropy alloy with outstanding tensile properties [J]. Acta Materialia, 2016, 102: 187-196.
- [16] 乔瑞威, 龙燕. 高熵合金中的化学短程有序 [J]. 铸造技术, 2025, 46 (8): 731-738.
- [17] ZHANG S R, LIU C H, QI H, et al. Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy [J]. China Foundry, 2025, 22: 352-362.
- [18] 谢思晨, 李广龙, 曲迎东, 等. 深冷处理对Al<sub>1.2</sub>CrFe<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>高熵合金组织和性能的影响 [J]. 铸造, 2024, 73 (4): 469-475.
- [19] 吴诗昶, 苏鸿宏, 李子鑫, 等. CoCrFeNi基面心立方高熵合金强韧化设计及变形机理研究 [J]. 电子显微学报, 2025, 44 (3): 279-286.
- [20] 赵森林, 陈希章. Al<sub>1.2</sub>Co<sub>3</sub>CrFeNi高熵合金的相形成规律及其力学性能 [J]. 材料工程, 2023, 51 (5): 104-111.
- [21] SHI P J, REN W L, ZHENG T X, et al. Enhanced strength-ductility synergy in ultrafine-grained eutectic high-entropy alloys by inheriting microstructural lamellae [J]. Nature Communications, 2019, 10: 489.