# 高熵合金和非晶合金成形

# 退火对 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi 高熵合金微观组织 及力学性能的影响

秦绪伟<sup>1</sup>,王守武<sup>2</sup>,陈玉华<sup>1</sup>,张世一<sup>1\*</sup>,张体明<sup>1</sup>,吴烨斌<sup>1</sup>,曾卓<sup>1</sup>

(1.南昌航空大学 航空制造工程学院,南昌 330000; 2.空装驻遵义地区 军事代表室,贵州 遵义 563000)

摘要:目的研究再结晶温度附近 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi 高熵合金的微观组织演变,分析高熵合金的强化机制转变。 方法 利用拉伸机对材料的拉伸性能进行测试;采用 X 射线衍射、电子扫描显微镜、电子背散射衍射及透射 电镜等分析表征方法,对高熵合金材料的微观组织及断口形貌进行分析。结果 固溶态、轧制态及退火态试 样相组成均为单相 FCC 固溶体结构,退火温度不低于 600 ℃的试样通过再结晶形成了具有新随机取向的新 晶粒。固溶态试样的晶粒由再结晶晶粒掺杂少量亚晶组成,并形成部分形变孪晶;轧制态试样内部主要由 变形组织组成,累积有高密度位错;而随着退火温度的升高,其主要晶粒类型由变形晶粒转变为再结晶晶 粒,试样内位错密度大幅度降低,并伴随有退火孪晶的形成。不同热处理工艺下的高熵合金试样均具有良 好的拉伸性能,其中低于再结晶温度的热处理试样表现出高强度低塑性的特征,屈服强度及抗拉强度分别 最高可达到 1 290 MPa 和 1 415 MPa,且 700 ℃-1 h 试样同时具有 825 MPa 的抗拉强度与 44.58%的断裂延伸 率,表现出良好的强塑性匹配性能。轧制态试样、500 ℃-1 h 试样和 600 ℃-1 h 试样的拉伸断口表现为以韧 性断裂为主的混合断裂,700 ℃-1 h 试样的拉伸断口表现为良好的韧性断裂形貌。结论 退火温度高于 600 ℃、 退火时间为 1 h 的退火工艺参数将使材料强化机制由以变形强化为主转变为以细晶强化为主,强度降低塑性 提高,强塑性匹配关系更加良好。

关键词:高熵合金;热处理;微观组织;拉伸性能;强化机理 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.11.018 中图分类号:TG166.7 文献标志码:A 文章编号: 1674-6457(2024)11-0151-09

## Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi High Entropy Alloy

QIN Xuwei<sup>1</sup>, WANG Shouwu<sup>2</sup>, CHEN Yuhua<sup>1</sup>, ZHANG Shiyi<sup>1\*</sup>, ZHANG Timing<sup>1</sup>, WU Yebin<sup>1</sup>, ZENG Zhuo<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330000, China; 2. Office of the Military Representative of the Air Force in Zunyi Region, Guizhou Zunyi 563000, China)

收稿日期: 2024-04-17

**Received:** 2024-04-17

**基金项目:** 江西省自然科学基金(青年)基金(20224BAB214047); 江西省杰出青年基金(20224ACB218005); 国家自然科 学基金(52165049, 52175326)

**Fund**: Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (20224BAB214047); Jiangxi Distinguished Young Scholars (20224ACB218005); National Natural Science Foundation of China (52165049, 52175326)

**引文格式:**秦绪伟,王守武,陈玉华,等. 退火对 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi 高熵合金微观组织及力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2024, 16(11): 151-159.

QIN Xuwei, WANG Shouwu, CHEN Yuhua, et al. Effect of Annealing on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi High Entropy Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(11): 151-159. \*通信作者 (Corresponding author)

ABSTRACT: The work aims to study the evolution of microstructure of Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi high entropy alloy around recrystallisation temperature and analyze the transformation of strengthening mechanism of high entropy alloy. The tensile properties of the materials were tested by tensile machine. The microstructure and fracture morphology of the high entropy alloy materials were analyzed by X-ray diffraction, electron scanning microscopy, electron backscattering diffraction and transmission electron microscopy. The phase composition of the solid-solution, rolled and annealed specimens consisted of a single-phase FCC solid-solution structure. The specimen with the annealing temperature of not less than 600 °C formed a new random orientation of the new grains through the recrystallisation. The grains in the solid-solution state were composed of recrystallised grains mixed with a small amount of subcrystals, and some deformation twins were formed. In the rolled state, the specimens were mainly composed of deformation tissues, with accumulated high density of dislocations. With the increase of the annealing temperature, the composition of the grains was transformed from deformation grains to recrystallised grains, and the density of dislocations in the specimens was greatly reduced, accompanied by the formation of annealing twins. The high entropy alloy specimens under different heat treatment processes had good tensile properties, in which the heat treatment specimens below the recrystallisation temperature showed the characteristics of high strength and low plasticity, and the yield strength and tensile strength could reach up to 1 290 MPa and 1 415 MPa, respectively, and the 700 °C-1 h specimens also had a tensile strength of 825 MPa and a fracture elongation of 44.58%, which showed good strong plasticity matching performance. The tensile fracture of the rolled specimen, 500 °C-1 h specimen and 600 °C-1 h specimen showed a mixed fracture dominated by ductile fracture, and the tensile fracture of the 700 °C-1 h specimen showed a good ductile fracture pattern. The annealing process parameters with annealing temperature higher than 600 °C and annealing time of 1 h will make the material strengthening mechanism from the deformation-based strengthening to the fine-grained strengthening, lower the strength, increase the plasticity increase and provide a more favorable strength-plasticity matching relationship.

KEY WORDS: high entropy alloys; heat treatment; microstructure; tensile properties; strengthening mechanism

随着现代工业的发展,汽车制造、矿山机械等领 域对合金材料的力学性能提出了更高的要求,传统的 合金材料,如镍基合金,已经难以满足尖端制造领域 的需求<sup>[1-4]</sup>。高熵合金(High-entropy Alloys, HEAs) 是由叶均蔚教授及其团队于 2004 年首次提出的<sup>[5]</sup>。 相比于以1种或2种元素为主组元的传统合金,高熵 合金独特的原子结构带来了高熵效应、晶格畸变效 应、迟缓扩散效应及鸡尾酒效应,表现出高强度、高 硬度、高塑性、耐氧化及优秀热稳定性等特点,具有 重要的学术研究价值与工业应用前景<sup>[6-10]</sup>。

目前多采用真空熔炼技术制备高熵合金块体材 料<sup>[11-13]</sup>。但由于熔铸式制造方式的缺陷,制备出的块 体材料往往组织晶粒粗大,且容易产生成分偏析、缩 孔、缩松等缺陷<sup>[14]</sup>,需要对其进行进一步加工。机 械热处理作为传统合金材料组织均质化的常用手 段,目前是国内外学界研究的热点。Jiang 等<sup>[15]</sup>通过 铸造、冷轧及热处理等多道工艺制备了 C-N 共掺杂 Fe<sub>485</sub>Mn<sub>30</sub>Co<sub>10</sub>Cr<sub>10</sub>C<sub>05</sub>N<sub>10</sub>高熵合金,对其显微组织进 行了调控。冷轧后的高熵合金具有高强度及高硬度, 退火后显示出退火诱导硬化效应。高温退火后,组织 发生回复与再结晶,强度下降塑性提升,650 ℃-1 h 的试样显示出 984 MPa 屈服强度与 20%均匀延伸率 的优秀力学性能。温立哲等[16]利用真空熔炼技术制备 Al<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>TiCoCrCu<sub>0.5</sub>FeMo 高熵合金并进行了 773 K 的退 火处理。试验结果表明,该高熵合金由 2 种 BCC 相组 成,退火后晶格常数由 0.291 6 nm 下降至 0.290 3 nm,

且硬度由 664.7HV 下降至 650.9HV。Gludovatz 等<sup>[17]</sup> 制备了晶粒尺寸约为 6 µm 的退火态 CoCrFeMnNi 高 熵合金,室温下屈服强度为 410 MPa,抗拉强度为 753 MPa,断裂延伸率约为 57%。Gangireddy 等<sup>[18]</sup>研 究了铸态、部分退火态与完全退火态的 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi 高熵合金的室温拉伸性能,试验结果表明,铸态的屈 服强度为 175 MPa,抗拉强度为 880 MPa,断裂延伸 率约为 64%;完全退火态屈服强度为 552 MPa,抗拉 强度为 802 MPa,断裂延伸率约为 42%;部分退火态 的屈服强度为 360 MPa,抗拉强度为 790 MPa,断裂 延伸率约为 39%。

目前,关于高熵合金热处理前后微观组织及力学性能的研究主要集中在高温条件下高熵合金的微观 组织及力学性能变形机制方面<sup>[19-24]</sup>,而对高熵合金在 再结晶温度附近的微观组织演变及其对力学性能影 响的研究较少。本文通过固溶、轧制处理以及随后的 不同温度梯度的退火处理对 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi 高熵合金 进行了处理,研究再结晶温度附近热处理温度对高熵 合金组织和拉伸性能的影响规律,并通过 X 射线衍 射(XRD)、电子扫描显微镜(SEM)、电子背散射衍 射(EBSD)及透射电镜(TEM)等测试手段揭示不 同温度梯度下的微观组织演变规律。

### 1 实验

本实验采用感应熔炼法将商业金属(纯度>

99.95%)制备成块状 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi(原子比)HEA 铸锭,并将其再熔融至少4次以确保其化学均匀性。 使用真空管式炉在氩气气氛下将 HEA 铸锭在 1 200 ℃下固溶6h。将固溶态试样切割成板,然后在 室温下进行轧制,厚度由 10 mm 轧制至1 mm,下压 量约为 90%(称为轧制态样品)。将轧制后的样品在 氩气保护下于 500~700 ℃温度下退火1h。基于不同 的退火条件,将退火态样品分别标记为 500 ℃-1h、 550 ℃-1h、600 ℃-1h和 700 ℃-1h样品。

拉伸试验使用 Instron 5540 试验机在室温下以 1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup> 的恒定应变速率进行,每条拉伸曲线至少 重复3次,确保结果的可重复性和可靠性。对冷轧和 退火后的试样进行线切割加工,得到 2.5 mm×1 mm、 标距段长 10 mm 的扁平狗骨形拉伸试样, 拉伸试样轴 平行于轧制方向。采用 SEM 和 EBSD 对 Alu1CoCrFeNi HEA 固溶态试样及轧制态试样在部分再结晶退火后 的组织演变和元素分布进行了分析。首先采用 360~ 3000 目砂纸对 EDS 和 EBSD 试样进行机械打磨,然 后使用乙酸高氯酸混合溶液在室温下进行电解抛光 (体积分数 90%乙酸+10%高氯酸),电解电压为 35 V, 时间为 45~60 s。在 Oxford Instruments Aztec 系统上进行 EBSD 测量,所有样品的扫描步长均选择 为0.5 µm,并采用 Commercial Channel 5 软件对 EBSD 数据进行分析。采用 JEM-2010 F 透射电子显微镜在 200 kV 电压下对轧制和退火试样拉伸前的显微组织 进行表征。从轧制和退火板上切下直径约为3mm的 TEM 样品,用金刚石锯切割靠近断裂试样断口的标 距区域,并采用 360~3000 目砂纸机械研磨至约 30 µm 厚度,并使用电解双喷仪减薄至穿孔。电解液为体积 分数 90%乙醇+10%高氯酸混合溶液,温度为-30 ℃, 电压为 30 V, 电流为 30 mA。拍摄明场像和衍射斑 点的 TEM 电镜型号为 FEI-Tecnai G<sup>2</sup> 20S-TWIN, 操 作电压为 200 kV。使用 D8ADVANCE-A25 X 射线衍 射仪以 4 (°)/min 的扫描速度对所有样品进行 X 射线

衍射测量。采用 Jade 6.0 软件对 XRD 数据进行统计。 采用 SEM (Phenom XL,加速电压 15 kV)观察拉伸 试样断口,研究其断裂机理。

## 2 结果与分析

## 2.1 固溶态微观组织

图 1a 为固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 试样的 XRD 结果,其衍射峰的分布表明该试样为 FCC 结构,其 晶格参数 *a*<sub>0</sub>=3.576 Å,且未观测到峰分裂现象。通过 SEM-EDS 测试,对固溶态试样进行成分分析,结果 表明,固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 中元素均匀分布 (Al、Co、Cr、Fe、Ni),无明显的元素偏聚,表明 该 HEA 为单相固溶体结构(图 1b)。EDS 数据测得 的化学成分如表 1 所示,与设计的 HEA 原子比基本 一致,因此下文将采用 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 指代本文 研究的高熵合金。

对固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 试样进行 EBSD 测试,如图 2 所示。测试结果表明,固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 试样由大粗晶与夹杂其中的退火孪晶组成(图 2a),平均粒径为 440 µm(图 2b),且 EBSD 的图像显示固溶态试样中夹杂有大量孪晶界,表明在固溶过程中发生了孪生变形。图 2c 的核平均取向差(KAM)映射分析则反映出由于持续的热积累引发的残余应力,导致固溶态试样内部的位错密度较高,平均 KAM 值达到 0.32°(图 2c);而晶粒种类分布图(图 2d)则表明经过长时间固溶处理后,晶粒主要由再结晶晶粒组成,掺杂有少量尚未长大完全的亚晶,几乎没有变形晶粒存在。

## 2.2 轧制及退火过程中的微观组织演变

Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 经过 1 200 ℃-6 h 的高温固 溶处理后,在消除了铸态试样内部可能存在的成分偏 析等缺陷的同时,也导致高熵合金内部组织晶粒粗



图 1 固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的 XRD 图谱(a)与 SEM-EDS 图像(b) Fig.1 XRD pattern (a) and SEM-EDS image (b) of solid-solution Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA

表 1 固溶态 Ala CoCrFeNi HEA 的化学成分 Tab.1 Chemical composition of Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA in the solid-solution state at.%

Al	Co	Cr	Fe	Ni
2.48	24.22	24.39	24.63	24.28

大,进而影响到力学性能。因此,对固溶态试样进行 轧制处理,以达到细化晶粒的效果;同时,为解决轧 制工艺带来的应力集中等问题,对轧制态试样进行了 一系列温度梯度的退火处理。

图 3 为轧制态样品与随后在 500~700 ℃温度范围 内退火1h的退火态样品的 XRD 图谱。可知,退火 前后样品的物相组成均为单相 FCC 固溶体。随着退 火温度的升高,在600℃之前,退火态样品相较于轧 制态样品,除(200)晶面衍射峰强度下降之外,没 有新的衍射峰形成,表明在 600 ℃之前 Al<sub>01</sub>CoCrFeNi HEA 以晶粒长大为主,未形成具有新取向的再结晶 晶粒;而当退火温度提高到 600 ℃以上时,(111)、 (220)与(200)衍射峰变得更加尖锐,(311)衍射 峰逐渐形成,表明试样通过再结晶形成了具有随机晶 粒取向和低位错密度的新晶粒。因此,判断轧制态试 样的再结晶温度约为 600 ℃。

为了进一步对轧制态样品的微观组织进行表征, 对轧制态试样进行了透射电镜观察测试,测试面选择 平行于轧制方向的水平面,如图4所示。由明场(BF) TEM 图可以得到,由于轧制带来的剧烈变形,轧制 态试样内部主要由变形组织组成,其中累积了高密度 位错。而由相应的选取电子衍射(SAED)图像可知, 轧制态样品相组成为单相 FCC 固溶体结构,且在变 形组织中并未产生形变孪晶。

图 5 为轧制态试样在 600 ℃与 700 ℃下退火 1 h 后的组织演变。如图 5a 与图 5c 所示, 600 ℃-1 h 的 退火态试样大部分仍然保持变形组织,且变形组织中 仍包含有高密度位错;然而,试样局部发生了再结晶, 形成晶粒尺寸细小且具有低密度位错的再结晶晶粒 (图 5c)。在试样再结晶的同时发生了孪生现象,因 此在再结晶晶粒中能够观察到退火孪晶的存在。而在 700 ℃-1 h 的退火态试样中,几乎全部变形组织都发 生了再结晶,晶粒组织主要为细小的再结晶晶粒,其 平均晶粒尺寸为 2.3 μm, 变形组织数量大幅度降低 (图 5d)。这可能是因为在再结晶过程中, 亚晶发生 旋转,导致晶界取向角差增大,高能量的小角度晶界 转化为低能量的大角度晶界,释放出的能量促进了变 形晶粒向再结晶晶粒的转化<sup>[25-26]</sup>。

图 6 为轧制态试样在 600 ℃与 700 ℃下退火 1 h 后的核平均取向差分布图。如图 6a 所示,由于在 600 ℃-1 h 的退火条件下,试样的再结晶并不完全, 试样内大部分仍为变形组织,试样内部的残余应力并 未得到充分释放,因此试样内部的位错密度依旧很

 $\bar{d}=(440\pm42) \,\mu\text{m}$ 







KAM 5°

d 晶粒类型分布图

图 2 固溶态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的 EBSD 图像

Fig.2 EBSD images of Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA in the solid-solution state: a) grain distribution map; b) histogram of grain size; c) local misorientation angle distribution map; d) grain type distribution map



图 3 轧制态与退火态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的 XRD 图谱 Fig.3 XRD pattern of the rolled and annealed Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA



图 4 轧制态 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的 TEM 明场像形貌 及衍射斑点图 Fig.4 Bright field TEM image and SAED image of the rolled Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA







d 700 ℃-1 h



高,KAM 值达到 1.77°,且位错基本集中分布于变形 组织内部;而在 700 ℃-1 h 试样中,试样已经发生完 全再结晶,试样内部的残余应力已基本释放完毕,而 1 h 的退火时间则使试样内部未能积累起因热输入导 致的应力集中,因此试样内部的位错基本作为形核源发 生再结晶,位错密度大幅下降,KAM 值下降至 0.30°。

## 2.3 拉伸性能

不同退火温度下的 Alo.1CoCrFeNi HEA 的工程应

力-应变曲线如图 7 所示。轧制态试样的屈服强度、 抗拉强度及断裂延伸率分别为 995 MPa、1 302 MPa 和 10.27%,然后随着热处理温度的升高,材料的强 度不断提升,塑性略微下滑,550 ℃-1 h试样的屈服 强度、抗拉强度及断裂延伸率分别为 1 290 MPa、 1 415 MPa 和 7.13%;当热处理温度超过 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的再结晶温度时,材料的强度开始下滑,而塑 性得到大幅提升,700 ℃-1 h试样的屈服强度、抗拉 强度及断裂延伸率分别为 580 MPa、825 MPa 和



图 6 退火态样品的局部取向差分布图(a-b)以及其对应的 KAM 统计分布图(c-d) Fig.6 Distribution of localized orientation differences of the specimens in the annealed state (a-b) and their corresponding KAM statistics (c-d)



图 7 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的工程应力-应变曲线 Fig.7 Engineering stress-strain curves for Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA

44.58%。通过上述数据可知, Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 的 轧制态试样及 500 ℃-1 h、550 ℃-1 h 与 600 ℃-1 h 试 样均表现出高强度低塑性的特点,且几乎没有屈服平 台;而 700 ℃-1 h 试样则表现出良好的强塑性匹配现 象,在损失了 47.27%的屈服强度与 31.59%的抗拉强 度的前提下,断裂延伸率提高了 346.69%,表现出良 好的加工硬化能力;同时可以观察到,屈服强度与抗 拉强度在再结晶温度前后呈先增大后减小的趋势,与 断裂延伸率趋势相反。

#### 2.4 强化机理

由图 4~6 的微观组织转变及图 7 的力学性能变化 可以得到 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 在再结晶温度上下经历 了强化机理的转变。在低于再结晶温度的热处理工艺 下,如图 4 与图 5a 所示,材料主要由变形组织构成, 材料的强化机制主要由变形强化主导,随着热处理温 度的升高,变形强化得到增强,材料的强度提高而塑 性降低,如图 7 所示;但在高于再结晶温度的热处理 工艺条件下,材料发生完全再结晶(图 5b),材料的 强化机制由变形强化变为细晶强化,再结晶产生的细 小晶粒一方面拥有比变形晶粒更大的晶粒内部空间, 为位错与孪晶界的增殖与长大提供了空间;另一方 面,高密度的晶界与孪晶界使位错滑移路径较短,容 易发生位错的钉扎。因此,在高于再结晶温度的热处 理工艺下,强度下降有限而塑性大幅度提高,实现了 材料的良好强塑性匹配。

为进一步验证再结晶温度上下强化机理的转变, 对不同热处理温度下的试样进行了断口形貌分析,如 图 8 所示。可以看出,轧制态试样、500 ℃-1 h 试样 和 600 ℃-1 h 试样的拉伸断口韧窝较浅,撕裂棱较为 尖锐,且存在部分准解理台阶,表现出以韧性断裂为





主的混合断裂;而 700 ℃-1 h 试样的拉伸断口形貌呈 现出大量的小韧窝与厚撕裂棱,准解理台阶较少,表 现出良好的韧性断裂形貌。Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 断裂 方式的改变从侧面证明了强化机理的演变。

# 3 结论

1)通过固溶、轧制处理以及退火处理实现了对 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 微观组织和力学性能的调控,所 有状态的试样相组成均为单相 FCC 固溶体结构,其 中固溶态试样的晶粒由再结晶晶粒掺杂少量亚晶组 成,并形成部分形变孪晶;而随着热处理温度的升高, 晶粒组成由轧制态的变形晶粒转变为细小的再结晶 晶粒,试样内位错密度大幅度降低,并伴随有退火孪 晶的形成。

2) 退火前后的高熵合金试样均具有良好的拉伸 性能,其中屈服强度及抗拉强度分别最高可达到 1 290 MPa 和 1 415 MPa,且 700 ℃-1 h 试样同时具有 825 MPa 的抗拉强度与 44.58%的断裂延伸率,表现 出良好的强塑性匹配性能。退火前后的高熵合金拉伸 断口微观形貌均以韧窝韧性断裂为主,其中轧制态试 样、500 ℃-1 h 试样和 600 ℃-1 h 试样微观上呈部分 准解理台阶、韧窝浅、撕裂棱尖锐等脆性断裂形貌, 判断为以韧性断裂为主的混合断裂;而 700 ℃-1 h 试 样微观上呈大量小韧窝、厚撕裂棱的韧性断裂形貌, 因此其延伸率明显升高。

3)在低于再结晶温度的条件下,短时退火处理 会提高 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 内部因热积累导致的应力 集中程度,位错密度增加,退火后的晶粒组成仍由变 形晶粒为主,随着热处理温度的升高,强度提升塑性 下降;在高于再结晶温度的条件下,短时退火处理促 进 Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi HEA 内部位错的形核与长大,位错 密度降低,退火后的晶粒组成以再结晶晶粒为主,随 着热处理温度的升高,强度下降塑性提升。

### 参考文献:

张健,王莉,谢光,等. 镍基单晶高温合金的研发进展[J]. 金属学报, 2023, 59(9): 1109-1124.
 ZHANG J, WANG L, XIE G, et al. Recent Progress in

Research and Development of Nickel-Based Single Crystal Superalloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2023, 59(9): 1109-1124.

- [2] 王盼盼,邱长军. 合金成分对镍基高温合金性能影响的研究进展[J]. 机电工程技术, 2023, 52(4): 141-145.
   WANG P P, QIU C J. Research Progress on the Influence of Alloy Composition on the Properties of Nickel-Based Superalloys[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(4): 141-145.
- [3] XU Z, LI G, ZHOU Y, et al. Tension-Compression Asymmetry of Nickel-Based Superalloys: A Focused Review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 945: 169313.
- [4] 陈德志, 王墅, 徐方东, 等. Nb-Si 基合金高温抗氧化研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(10): 1-12.
   CHEN D Z, WANG S, XU F D, et al. Research Progress on High-Temperature Oxidation Resistance of Nb-Si-Based Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(10): 1-12.
- [5] YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(5): 299-303.
- [6] ERDOGAN A, DÖLEKER K M, ZEYTIN S. Effect of Laser re-Melting on Electric Current Assistive Sintered CoCrFeNiAl<sub>x</sub>Ti<sub>y</sub> High Entropy Alloys: Formation, Micro-Hardness and Wear Behaviors[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 399: 126179.
- [7] POLETTI M G, FIORE G, GILI F, et al. Development of a New High Entropy Alloy for Wear Resistance: FeCo-CrNiW<sub>0.3</sub> and FeCoCrNiW<sub>0.3</sub> +5at.% of C[J]. Materials & Design, 2017, 115: 247-254.
- [8] SHI Y Z, COLLINS L, FENG R, et al. Homogenization of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi High-Entropy Alloys with Improved Corrosion Resistance[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 120-131.
- [9] JIANG H, QIAO D X, LU Y P, et al. Direct Solidification of Bulk Ultrafine-Microstructure Eutectic High-Entropy Alloys with Outstanding Thermal Stability[J]. Scripta Materialia, 2019, 165: 145-149.
- [10] HAN B, ZHANG S Y, ZHANG T M, et al. Hardness Enhancement Mechanism of Al<sub>x</sub>CoCrFeNiSi High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Intermetallics, 2023, 158: 107909.
- [11] ZHU Z G, MA K H, WANG Q, et al. Compositional Dependence of Phase Formation and Mechanical Properties in Three CoCrFeNi-(Mn/Al/Cu) High Entropy Alloys[J]. Intermetallics, 2016, 79: 1-11.
- [12] 刘亮,张越,赵作福,等. 热处理对 CoCrFeNiMo 高 熵合金组织与硬度的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(8): 29-32.
  LIU L, ZHANG Y, ZHAO Z F, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of CoCrFeN-iMo High Entropy Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(8): 29-32.

- [13] WANG Q, ZHOU Y J, DENG X T, et al. Achieving Excellent Mechanical Properties and Wear Resistance in Fe<sub>49</sub>Mn<sub>30</sub>Co<sub>10</sub>Cr<sub>10</sub>C<sub>1</sub> Interstitial High-Entropy Alloy *via* Tuning Composition and Stacking Fault Energy by Nb Doping[J]. Wear, 2023, 534: 205149.
- [14] HOU L L, HUI J T, YAO Y H, et al. Effects of Boron Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlFeCoNiB<sub>x</sub> High Entropy Alloy Prepared by Vacuum Arc Melting[J]. Vacuum, 2019, 164: 212-218.
- [15] JIANG W, WANG H, LI Z M, et al. Enhanced Mechanical Properties of a Carbon and Nitrogen Co-Doped Interstitial High-Entropy Alloy via Tuning Ultrafine-Grained Microstructures[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 144: 128-137.
- [16] 温立哲,黄元盛. Al<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>TiCoCrCu<sub>0.5</sub>FeMo 高熵合金组 织和硬度研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 992-995.
  WEN L Z, HUANG Y S. Morphology and Hardness of Al<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>TiCoCrCu<sub>0.5</sub>FeMo High-entropy Alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 41(8): 29-32.
- [17] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A Fracture-Resistant High-Entropy Alloy for Cryogenic Applications[J]. Science, 2014, 345(6201): 1153-1158.
- [18] GANGIREDDY S, LIU K M, GWALANI B, et al. Microstructural Dependence of Strain Rate Sensitivity in Thermomechanically Processed Al<sub>0.1</sub>CoCrFeNi High Entropy Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 727: 148-159.
- [19] 曹雷刚, 王帆, 侯鹏宇, 等. 高温热处理对 Al<sub>x</sub>CoCrFeNi (0.5≤x≤0.8)高熵合金微观组织及力学性能的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(1): 249-258.
  CAO L G, WANG F, HOU P Y, et al. Effect of Hightemperature Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi(0.5≤x≤0.8) Highentropy Alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(1): 249-258.
- [20] MIAO J W, YAO H W, WANG J, et al. Surface Modification for AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> Eutectic High-Entropy Alloy *via* Laser Remelting Technology and Subsequent Aging Heat Treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162380.
- [21] CAI Y C, SHAN M D, MANLADAN S M, et al. Effect of High Temperature Heat Treatment on Microstructure and Properties of FeCoCrNiAl High-Entropy Alloy Laser Cladding Layer[J]. Materials Characterization, 2022, 191: 112137.
- [22] 吴仁君, 张云义, 张方阳, 等. 热处理对 AIFeCoCrNiTi<sub>0.2</sub> 高熵合金组织与性能的影响[J]. 有色金属工程, 2023, 13(11): 41-48.
  WU R J, ZHANG Y Y, ZHANG F Y, et al. Effect of Heat Transmont on Migrostructure and Properties of Al.

Heat Treatment on Microstructure and Properties of Al-FeCoCrNiTi<sub>0.2</sub> High Entropy Alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(11): 41-48.

[23] ZHANG L, ZHANG L, WANG H, et al. Evolution of the

Microstructure and Mechanical Properties of an Sigma-Hardened High-Entropy Alloy at Different Annealing Temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 831: 142140.

- [24] YU J Y, MU R D, QU S Y, et al. The Effect of Heat Treatment at 1200 °C on Microstructure and Mechanical Properties Evolution of AlCoCrFeNiSiYHf High Entropy Alloys[J]. Vacuum, 2022, 200: 111039.
- [25] LI J, NIE J F, XU Q F, et al. Enhanced Mechanical

Properties of a Novel Heat Resistant Al-Based Composite Reinforced by the Combination of Nano-Aluminides and Submicron TiN Particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 770: 138488.

[26] WANG Y J, LIU W H, WANG D Q, et al. Simultaneously Enhanced Strength and Ductility of TIG Welds in Inconel 718 Super-Alloy *via* Ultrasonic Pulse Current[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 807: 140894.