

铸造 CrCoNi 中熵合金碳化物析出行为及力学性能

缪良田^{1,2} 杜 辉^{1,2,3} 胡光武^{1,2}

(1.武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室; 2.武汉科技大学机械传动与制造工程
湖北省重点实验室; 3.华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘 要 针对铸造 CrCoNi 中熵合金室温强度低的问题, 添加了 3% (摩尔分数, 下同) 的 Mo 和 0.5% 的 C, 研究了碳化物的析出行为及其对合金的相结构、微观组织、硬度和室温压缩性能的影响。制备工艺采用传统的电弧熔炼、滴铸、固溶 (1 250 ℃×6 h) 和时效 (950 ℃×1 h) 处理, 制备的铸造合金中析出了弥散分布的 $M_{23}C_6$ 碳化物。细小的碳化物均匀分布在晶粒内部, 粗大的碳化物分布在晶界。经碳化物强化后, CrCoNi 合金的硬度 (HV) 由 157 增加到 250, 屈服强度由 223 MPa 提高到 342 MPa, 强化效果主要归因于碳化物的析出强化。

关键词 中熵合金; 碳化物; 微观组织; 硬度; 压缩性能

中图分类号 TG139; TG146.4⁺12 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.06.016

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Carbide Precipitation Behavior and Mechanical Properties of the Casting CrCoNi Medium-entropy Alloy

Miao Liangtian^{1,2}, Du Hui^{1,2,3}, Hu Guangwu^{1,2}

(1.Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology; 2.Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology; 3.State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: In order to enhance the room-temperature strength of a casting CrCoNi medium-entropy alloy, 3% Mo and 0.5% C were added into the alloy. The carbide precipitation behavior and its effects on phase structure, microstructure, hardness and compressive properties at room temperature of the CrCoNi alloy were investigated. Traditional processes including arc melting, drop-casting, solid solution treatment at 1 250 ℃ for 6 h and aging at 950 ℃ for 1 h were adopted. The dispersed carbides are precipitated from the alloy after aging. Fine carbides are evenly distributed in the intragranular regions, and coarse carbides are distributed on the grain boundaries. The hardness of the (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} alloy is increased from 157 HV of the CrCoNi alloy to 250 HV, and the yield strength at room temperature is increased from 223 MPa to 342 MPa, which is attributed to the precipitation strengthening of carbide.

Key Words: Medium-entropy Alloy, Carbide, Microstructure, Hardness, Compressive Property

金属材料的强化一直是科学研究和工程应用中所关注的重要问题。传统合金通常由一种元素作为基体 (溶剂), 或由两种元素形成化合物, 并有目的地添加适当比例的合金元素, 以改善基体的显微组织获得所期望的性能。但传统合金经过长期发展, 可开发的空間越来越小, 急需新的合金设计理念。CANTOR B 等^[1]首次提出了多组元合金的概念, 发现等摩尔比 CrMnFe-

CoNi 为单相面心立方 (FCC) 结构。YEH J W 等^[2,3]首次提出了高熵合金的概念, 随后其含义得到了进一步拓展, 将构型熵大于等于 1.5R [R 为气体摩尔常数, 为 8.314 J/(mol·K)] 的合金称为高熵合金, 构型熵大于等于 1R 且小于 1.5R 的合金称为中熵合金。其中, CrCoNi 中熵合金表现出优异的性能: 室温下, 其抗拉强度接近 1 GPa、断裂应变为 70%、断裂韧度为 200

收稿日期: 2020-12-13; 修改稿收到日期: 2021-01-06
基金项目: 材料成形与模具技术国家重点实验室开放基金资助项目 (P2019-005)
第一作者简介: 缪良田, 男, 1994 年出生, 硕士研究生, 武汉 (430081), E-mail: 1069208486@qq.com
通信作者: 杜辉, 女, 1979 年出生, 副教授, 武汉 (430081), E-mail: duhui79@wust.edu.cn
引用格式: 缪良田, 杜辉, 胡光武. 铸造 CrCoNi 中熵合金碳化物析出行为及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 738-742.
MIAO L T, DU H, HU G W. Carbide precipitation behavior and mechanical properties of the casting CrCoNi medium-entropy alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6): 738-742.

MPa $\cdot$ m^{0.5};低温下,其抗拉强度接近 1.3 GPa、断裂应变为 90%、断裂韧度为 275 MPa $\cdot$ m^{0.5}[4],因而在结构工程领域中表现出良好的应用前景[3,5]。然而单相 CrCoNi 中熵合金的屈服强度相对较低,平均晶粒尺寸为 58.6 μ m 的合金室温屈服强度仅为 272 MPa[6]。此外,铸造 CrCoNi 合金由于晶粒粗大导致其强度更低[7],难以满足工程应用的需求,因此需要结合各种强化方法以提高其屈服强度。

在常用的强化手段中,第二相强化具有较为显著的强化效果,在 CrCoNi 中熵合金中也表现出突出的优势。MIAO J 等[8]研究了 Mo 合金化对 CrCoNi 中熵合金力学性能的影响,发现当添加 1% 的 Mo 后,室温下合金的硬度(HV)由 244 提高到 656,压缩屈服强度由 518 MPa 提高到 1 973 MPa,强化机理为 Mo 诱导了合金中金属间化合物 σ 相和 μ 相的形成,从而产生第二相强化。MORAVCIK I 等[9]通过向 CrCoNi 中熵合金中添加 0.5% 的 C 并进行再结晶退火处理,发现合金的室温屈服强度由 335 MPa 提高到 595 MPa,抗拉强度由 862 MPa 提高到 1 180 MPa,其强化机理是由于合金中析出了大量的纳米级 M₂₃C₆ 型碳化物而产生第二相强化。综合考虑,C 和 Mo 均产生了显著的强化作用,本课题在 CrCoNi 中熵合金中添加了 3% 的 Mo 和 0.5% 的 C,采用滴铸、固溶和时效处理工艺,探究了该铸造合金中碳化物的析出行为和相结构、微观组织的演化规律,并研究了碳化物析出对合金力学性能的影响,进而讨论了相应的强化机理。

1 试验材料与方法

1.1 合金制备

原材料均采用质量分数大于 99.9% 的 Cr、Co、Ni、Mo 块以及 Cr₃C₂ 粉末(质量分数大于 99%),合金的名义成分为 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5},将配好的原料按照熔点由低到高的顺序放入电弧炉的水冷铜坩埚中,将 Cr₂C₃ 粉末放在其他金属中间防止在熔炼过程中被气流吹飞。随后在氩气保护下反复翻转熔炼 5 次,以确保合金成分的均匀。最后经重熔并滴铸到铜模中,得到尺寸为 78 mm $\times$ 17 mm $\times$ 10 mm 的铸锭。

将合金铸锭清洗干净后封装在真空石英管内,并进行 1 250 $^{\circ}$ C $\times$ 6 h 的固溶处理,随后立即水淬。真空封管的目的是防止合金在高温热处理过程中被氧化;固溶的目的是为了消除合金在凝固过程中的成分偏析,使材料内部成分均匀,并且使析出相完全固溶在 CrCoNi 基体中。固溶后的试样在大气环境中进行不同温度和时间的时效处理,处理完成后立即水淬。

1.2 试验方案

试样首先用 SiC 砂纸打磨,随后进行电化学抛光(工作电压为 32 V,抛光时间为 15 s),抛光液是体积分数为 10% 的高氯酸乙醇溶液。利用 Nova 400 NanoSEM 场发射扫描电镜(SEM)观察合金的微观组织,加速电压为 20 kV;成分分析采用附带的能量色散 X 射线光谱仪(EDS)。采用 FEI Tecnai G² F30 场发射透射电镜(TEM)观察合金的显微组织,制备的透射电镜试样为 ϕ 3 mm $\times$ 60 μ m 的圆片,随后通过电解双喷进行减薄(工作电压为 25 V,温度为 -15 $^{\circ}$ C),电解液成分与抛光液相同。

采用 SHIMADZU XRD-7000 型 X 射线衍射仪对合金的相结构进行分析,工作电压为 40 kV,电流为 20 mA,扫描角度范围为 20 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$,扫描速度为 3 $^{\circ}$ /min。采用 200 HV-5 小负荷维氏硬度计测试合金的硬度,试验载荷为 10 N,加载时间为 10 s。采用电火花线切割机从铸锭上切割出 22 个尺寸为 ϕ 6 mm $\times$ 9 mm 的试样。利用 SHIMADZU AG-100kN 材料性能试验机对合金进行室温压缩试验,应变速率为 10⁻³ s⁻¹。

2 试验结果及讨论

图 1 为 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金经 1 250 $^{\circ}$ C $\times$ 6 h 固溶和 950 $^{\circ}$ C $\times$ 1 h 时效后的 XRD 图谱。可以看出,固溶态合金中包含 3 个衍射峰,经分析可知,这 3 个峰均属于面心立方结构相,分别对应 (111)、(200) 和 (220) 晶面,对应的 2 θ 角分别约为 43.6 $^{\circ}$ 、50.7 $^{\circ}$ 和 74.7 $^{\circ}$ 。对于时效态的 (CrCoNi)-3Mo-0.5C 中熵合金而言,并未观察到其他相对应的峰,这可能是因为合金中碳化物的含量较低所致。CrCoNi 中熵合金的相结构已有报道[10,11],这里不再呈现。

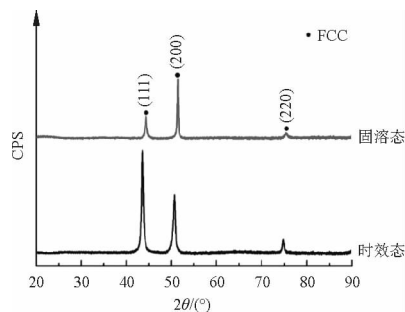


图 1 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金在固溶态和时效态的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} medium-entropy alloys in solid-solution state and aging state

图 2 为固溶态 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金的 SEM-BSE 图。可以看出,经固溶处理后该合金由粗大的晶粒组成,此外还能观察到一些黑色的孔洞(见图

2a),可能是在铸造过程中产生的孔隙或是在电解抛光过程中颗粒脱落留下的,以往研究中也观察到类似现象^[12]。由于第二相易于在晶界处析出,通过进一步观察晶界处的微观组织(见图 2b),未发现第二相析出,由此可以推断,铸态 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金经过 $1\,250\,^{\circ}\text{C}\times 6\,\text{h}$ 固溶处理后形成了单相合金。

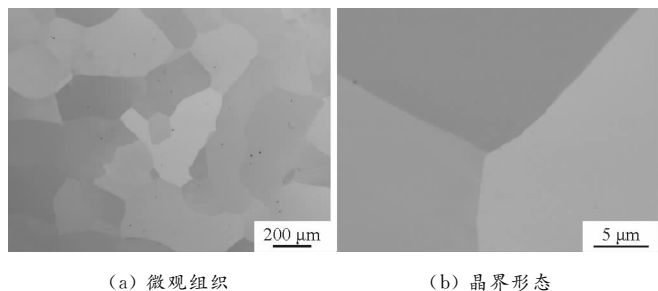


图 2 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金固溶态的 SEM-BSE 图
Fig.2 SEM-BSE images of $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ medium-entropy alloy in solid-solution state

图 3 为 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金经不同时效工艺处理后的 SEM-BSE 图。可以看出,时效后,均有

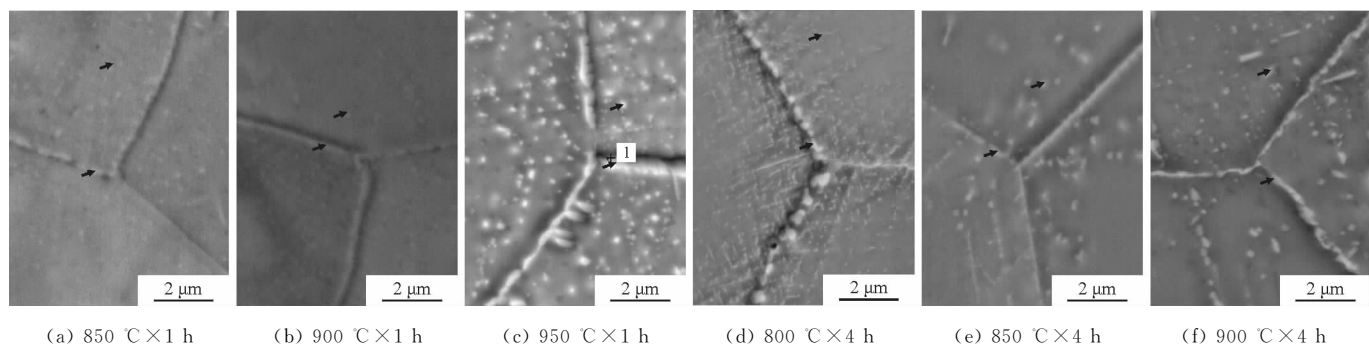


图 3 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金经不同时效处理后的 SEM-BSE 图

Fig.3 SEM-BSE images of the $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ medium-entropy alloy aged under different conditions

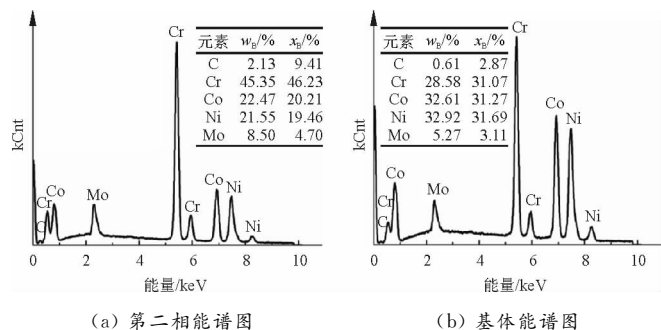


图 4 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金经 $950\,^{\circ}\text{C}\times 1\,\text{h}$ 时效后的第二相及基体的能谱图

Fig.4 EDS patterns of the second phase and matrix of the $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ medium-entropy alloy after aging at $950\,^{\circ}\text{C}$ for $1\,\text{h}$

为了进一步确定析出相的特征,对时效态($950\,^{\circ}\text{C}\times 1\,\text{h}$)的 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金进行 TEM 分析,见图 5。从图 5a 可以看出,合金中析出较多的亚微米级第二相,第二相的明场高倍像和暗场像分别见图

第二相析出(见图 3 中箭头处)。通过对 $950\,^{\circ}\text{C}\times 1\,\text{h}$ 时效处理后析出物(点 1)进行能谱分析,并与基体进行比较,发现第二相中富含 Cr、Mo 和 C 元素(见图 4)。从晶界和晶内析出物的形态和分布情况可以看出, $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金在时效过程中发生了局部沉淀,即析出相优先在晶界处形核长大。这是因为晶界处原子呈无序排列,易于扩散;同时晶界处存在很多空位等缺陷,能量较高,有利于析出相形核长大^[13];另外, Cr、Mo 和 C 元素在基体中的溶解度相对较低,固溶处理后 Cr、Mo 和 C 原子在晶界处的吸附趋势增大,导致晶界处的过饱和度增加^[14]。在时效初期,析出相主要沿晶界分布,晶内析出相的数量较少;随着时效温度升高,晶粒内部也达到了析出相形核长大的条件,从而在晶粒内部析出碳化物。此外,随着时效温度升高和时效时间延长,碳化物的数量逐渐增多,尺寸也逐渐增大,这是因为较高的时效温度加快了合金中原子的扩散速率,同时延长有利于析出相的长大。综合分析,经 $950\,^{\circ}\text{C}\times 1\,\text{h}$ 时效处理后获得的析出物形态相对较好。

5b 和图 5c,第二相的选区衍射(SAD)图谱见图 5d。通过对衍射斑点进行标定,确定第二相为 M_{23}C_6 碳化物。为了进一步确认第二相的成分,对其进行 TEM-EDS 面扫描分析(见图 6)。可见,第二相中富含 Cr、Mo 和 C 元素,与扫描电镜的 EDS 分析结果一致。

图 7 为 $(\text{CrCoNi})_{96.5}\text{Mo}_3\text{C}_{0.5}$ 中熵合金显微硬度与时效工艺的关系。可以看出,当时效 $1\,\text{h}$ 时,合金的硬度随时效温度的升高而增加;当时效 $4\,\text{h}$ 时,合金的硬度随时效温度的升高先增加后减少。这是因为在时效初期,固溶在基体中的原子数目较多,基体的过饱和度较大,第二相的析出动力较大;随着时效温度升高,促进了合金中第二相的析出,导致合金的硬度增加。随着时效时间延长,时效温度从 $800\,^{\circ}\text{C}$ 升高到 $850\,^{\circ}\text{C}$ 时,合金中第二相析出的数量增多,从而导致合金的硬度增加;但是随着时效温度进一步升高和时效时间延长,合金中的第二相将会更容易发生粗化长大现象,导致合金的硬

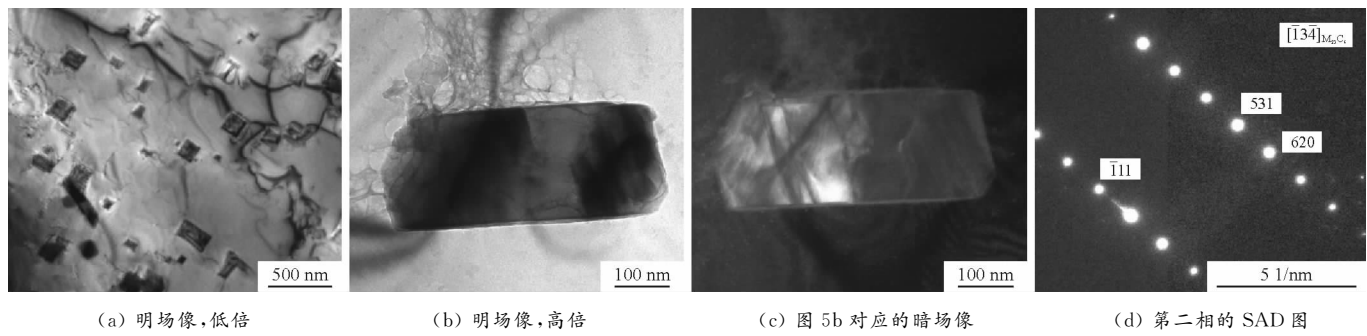


图 5 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金经 950 °C×1 h 时效后的 TEM 图及 SAD 图

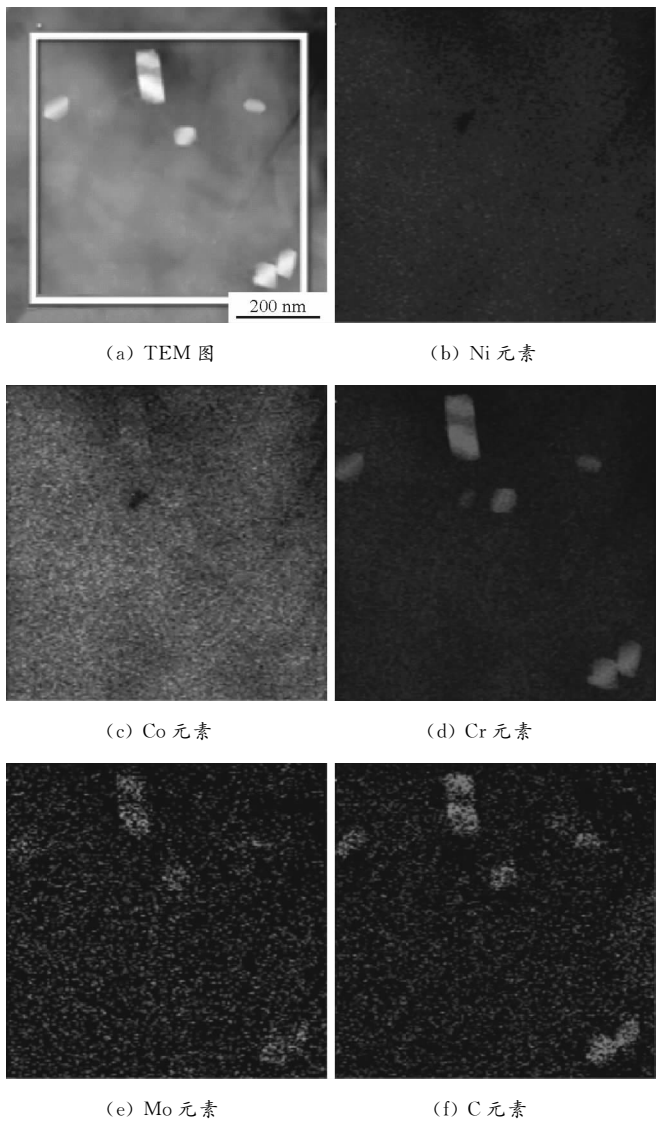


图 6 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金经 950 °C×1 h 时效后 Cr, Co, Ni, Mo 和 C 元素的 TEM-EDS 面分布图
Fig.6 TEM-EDS map for the elemental distribution of Cr, Co, Ni, Mo and C in the (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} medium-entropy alloy after aging at 950 °C for 1 h

度反而减小。在 7K01 铝合金和 Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.3} 多主元合金的研究中均发现类似现象^[15,16]。CrCoNi 中熵合金的硬度(HV)为 157,碳化物析出后合金的硬

度(HV)为 250,表明碳化物析出具有显著的强化效果。

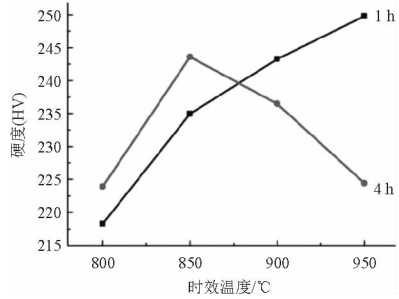


图 7 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金的硬度与时效参数的关系
Fig.7 The relationship between hardness and aging parameters of the (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} medium-entropy alloys

图 8 为 CrCoNi 和(CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金在 950 °C 时效 1 h 后的室温压缩应力-应变曲线。可以看出,添加合金化元素后,合金的屈服强度明显提高,由 CrCoNi 合金的 223 MPa 提高到 342 MPa。可见时效后析出的第二相对合金强化作用显著。LEE D 等^[17]在 CrCoNi 中熵合金中添加 7.5% 的 Al,发现其室温屈服强度由 400 MPa 提高到了 680 MPa,其原因是在 CrCoNi 基体的晶界和晶内析出的 B₂ 相阻碍了位错的运动和晶界的迁移;B₂ 相具有相对较大的尺寸^[18],位错通过 Orowan 绕过机制向前运动;同时 B₂ 相阻碍了合金在退火过程中晶界的迁移,从而提高了合金的强度。刘刚等^[19]通过向 CrCoNi 中熵合金中添加 0.3% 的 Ti,发现

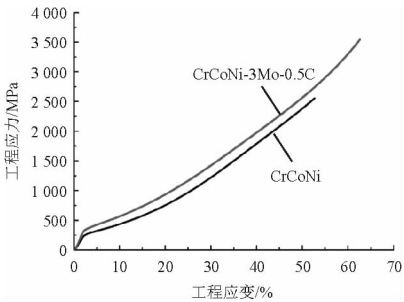


图 8 (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 和 CrCoNi 中熵合金的室温压缩工程应力-应变曲线

Fig.8 Room temperature compression engineering stress-strain curves of the (CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} and CrCoNi medium-entropy alloys

合金的室温压缩屈服强度高达 1 713 MPa,这归因于 Ni_3Ti 相析出产生第二相强化作用。

由于 Mo 对 CrCoNi 中熵合金可产生很好的强化作用^[20~22],本课题在此基础上进一步添加了 C,析出了 M_{23}C_6 碳化物,获得了较为显著的强化效果,其强化机制应为 Orowan 第二相强化(绕过机制)^[23]。当粒子的尺寸较大时,位错在运动的过程中难以切割第二相粒子,只能通过绕过粒子的方式向前运动。每当位错绕过粒子后就会在粒子周围留下位错环。由于越来越多的位错绕过第二相粒子,留下的位错环也就不断增加,导致后来的位错在运动的过程中受到更大的阻碍,从而提高了合金的强度。

3 结 论

(1)在 CrCoNi 中熵合金中添加 Mo 和 C 元素并进行固溶时效处理后,析出第二相为 M_{23}C_6 碳化物。

(2)(CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金中 M_{23}C_6 碳化物的特征取决于时效工艺。950 ℃×1 h 是较为理想的时效工艺。

(3) M_{23}C_6 碳化物显著提高了(CrCoNi)_{96.5}Mo₃C_{0.5} 中熵合金的硬度和室温压缩强度,这主要归因于 M_{23}C_6 碳化物的析出强化。

参 考 文 献

- [1] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A(375-377): 213-218.
- [2] 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.
- [3] YEH J W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys[J]. JOM, 2013, 65(12): 1 759-1 771.
- [4] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, THURSTON K V, et al. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures[J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 1-8.
- [5] LIM K R, LEE K S, LEE J S, et al. Dual-phase high-entropy alloys for high-temperature structural applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 1 235-1 238.
- [6] LIU S, LIN W, ZHAO Y, et al. Effect of silicon addition on the microstructures, mechanical properties and helium irradiation resistance of NiCoCr-based medium-entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 844: 1-12.
- [7] LIU X W, LAPLANCHE G, KOSTKA A, et al. Columnar to equiaxed transition and grain refinement of cast CrCoNi medium-entropy alloy by microalloying with titanium and carbon[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 1 068-1 076.
- [8] MIAO J, GUO T, REN J, et al. Optimization of mechanical and

tribological properties of FCC CrCoNi multi-principal element alloy with Mo addition[J]. Vacuum, 2018, 149: 324-330.

- [9] MORAVCIK I, HORNIK V, MINARIK P, et al. Interstitial doping enhances the strength-ductility synergy in a CoCrNi medium entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A781: 1-14.
- [10] 邓景泉, 孟亚兴, 郭勇. 冷坩埚磁悬浮熔炼 CrCoNi 中熵合金的组织与性能[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 664-668.
- [11] LIU J P, CHEN J X, LIU T W, et al. Superior strength-ductility CoCrNi medium-entropy alloy wire[J]. Scripta Materialia, 2020, 181: 19-24.
- [12] 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.
- [13] 刘小萍, 田文怀, 杨峰, 等. 时效处理 SUS316L 不锈钢中析出相的晶体结构和化学成分[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(3): 81-85.
- [14] LIU F M, WANG J J, LIU Y J, et al. Effects of Nb and V on microstructural evolution, precipitation behavior and tensile properties in hot-rolled Mo-bearing steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(6): 559-565.
- [15] 王孝国, 李秋书, 杨光印, 等. 固溶时效对 7K01 铝合金组织和硬度及电导率的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(5): 480-482.
- [16] NANDAL V, SARVESHA R, SINGH S S, et al. Influence of pre-deformation on the precipitation characteristics of aged non-equiatomic Co_{1.5}CrFeNi_{1.5} high entropy alloys with Ti and Al additions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 855: 1-11.
- [17] LEE D, AGUSTIANINGRUM M P, PARK N, et al. Synergistic effect by Al addition in improving mechanical performance of CoCrNi medium-entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 800: 372-378.
- [18] ZHAO Y Y, CHEN H W, LU Z P, et al. Thermal stability and coarsening of coherent particles in a precipitation-hardened (NiCoFeCr)₉₄Ti₂Al₄ high-entropy alloy[J]. Acta Materialia, 2018, 147: 184-194.
- [19] 刘刚, 杨倩, 樊谦璐, 等. Ti 对 CrCoNi 中熵合金微观组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 322-326.
- [20] HE J, MAKINENI S K, LU W, et al. On the formation of hierarchical microstructure in a Mo-doped NiCoCr medium-entropy alloy with enhanced strength-ductility synergy[J]. Scripta Materialia, 2020, 175: 1-6.
- [21] WANG J, YANG H, HUANG H, et al. In-situ Mo nanoparticles strengthened CoCrNi medium entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 798: 576-586.
- [22] CHANG R, FANG W, YU H, et al. Heterogeneous banded precipitation of (CoCrNi)₉₃Mo₇ medium entropy alloys towards strength-ductility synergy utilizing compositional inhomogeneity[J]. Scripta Materialia, 2019, 172: 144-148.
- [23] PALMIERE E J, GARCIA C I, ARDO A J D. Compositional and microstructural changes which attend reheating and grain coarsening in steels containing niobium[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 1994, A25(2): 277-286.

(编辑:刘晨辉)