掺钇对熔盐电解制备 CoCrFeNi 高熵合金组织和力学性能的影响

胡蒙均[1], 杨　皓[1], 罗翔宇[2], 温良英[2], 扈玫珑[2]

(1. 重庆工业职业技术学院机械设计及其自动化学院, 重庆 401120; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘　要: 采用熔盐电解混合氧化物直接固相脱氧制备 CoCrFeNi 高熵合金, 并对稀土元素钇(Y)掺杂对 CoCrFeNi 高熵合金的物相、组织及力学性能的影响进行了系统研究。结果表明, 可通过电解混合金属氧化物直接固相脱氧制备 CoCrFeNi 高熵合金, Y 元素掺杂可直接以 Y_2O_3 的形态与主体氧化物混合后脱氧并实现元素掺杂, 但该工艺制备过程会形成一定量 Cr_7C_3 相。适量 Y 掺杂可有效提升 CoCrFeNi 高熵合金的力学性能, 当 Y 添加量达到 5% 后, 高熵合金的显微硬度(HV)为 399, 比未添加 Y 的 CoCrFeNi 高熵合金的硬度提升了 58.3%。当 Y 添加量为 1% 时 CoCrFeNi 高熵合金的抗拉强度提升 10.7 %, 断裂伸长率增加了 5 倍。

关键词: CoCrFeNi; 高熵合金; 钇; 熔盐电解法; 热压烧结

中图分类号: TF111.52, TG139　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1004−7638(2025)03−0174−06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.024　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Effect of yttrium doping on microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy prepared by molten salt electrolysis

HU Mengjun[1], YANG Hao[1], LUO Xiangyu[2], WEN Liangying[2], HU Meilong[2]

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: High-entropy alloys of CoCrFeNi had been prepared by electrolysis process using the mixed oxides as the raw materials, and the effects of rare earth element of Yttrium doping on the phase, microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high-entropy alloys were also studied. The results show that CoCrFeNi high-entropy alloy can be directly prepared by electrolysis from the mixed oxides of CoO, Cr_2O_3, NiO, Fe_2O_3, and Y doping can be directly mixed with the main oxide in the form of Y_2O_3 and deoxidized to achieve Y doping. The second phase of Cr_7C_3 appears in CoCrFeNi high-entropy alloy when using electrolysis process. The appropriate amount of Y can effectively improve the mechanical properties of CoCrFeNi high-entropy alloy. When the addition amount of Y reaches 5%, the hardness of the high-entropy alloy is 399 HV, which is 58.3% higher than that of the CoCrFeNi high-entropy alloy without Y addition. When the addition of Y is 1%, the tensile strength of CoCrFeNi high-entropy alloy increases by 10.7 % and the elongation increases by 5 times.

Key words: CoCrFeNi, high entropy alloys, Y, electrochemical process, hot press sintering

收稿日期: 2024−04−08

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ QN202203215)。

作者简介: 胡蒙均, 1977 年出生, 男 , 重庆大足人 , 博士, 讲师, 长期从事熔盐电化学冶金方面研究工作, E-mail: humj@cqipc.edu.cn。

0　引言

高熵合金制备工艺分为液相工艺、固相工艺、气相工艺和电化学工艺。其中液相工艺由于熔炼温度高, 容易造成低沸点金属蒸发, 熔体凝固过程中容易发生明显的元素偏析。固相工艺能耗高, 生产成本高, 且易发生二次氧化, 影响产物纯度。气相工艺设备昂贵复杂, 难以实现高熵合金的大量制备。2017 年, JAGADEESH 等[1] 采用熔盐电解混合金属氧化物成功制备出了等原子比 TiNbTaZr 和 TiNbTaZrHf 难熔高熵合金。WANG 等[2] 采用该方法成功制备出了等原子比的 FeCoNiCrMn 高熵合金粉末。JIAO 等[3] 采用同样的方法制备出 AlCrNbTaTi 高熵合金, 工艺电流效率约 46.7%。

有研究表明适量 Al 添加可显著改善 CoCrFeNi 高熵合金硬度[4-6]。Cr、Ti、Fe、Nb、B 等元素的添加也有类似的提升 CoCrFeNi 高熵合金强硬度的作用[7-11]。MO 添加或替代一种金属元素 $Al_{0.5}CoCrFeMo_xNi$、$FeCoNiCrAl_{0.3}$, 富 Mo 相的出现可有效改善硬度和抗压强度[12-13]。稀土元素钇(Y)在有色金属、能源、功能材料、电子信息等领域具有广泛的应用, 可以作为镁、钛、铝等有色金属的改性添加剂和优良的净化剂。Y 作为合金元素在脱氧、除气、去夹杂, 细化共晶碳化物晶粒, 净化晶界, 改善碳化物的形态、大小、数量与分布, 提高材料综合性能, 特别是冲击韧性方面的效果十分明显。Y 的添加可以增强 FeCr 合金的抗氧化性和延展性。Y 也可以明显改善 MB26 合金的综合性能, 还可以替代部分中强铝合金受力构件。 随着高熵合金的不断研究, 研究者也开始关注 Y 对高熵合金性能的影响作用。有研究表明, 稀土 Y 添加到 $CoCrFeNiY_x$ 合金, 其硬度和屈服强度同时增加, 而断裂强度和塑性应变减小, 合金由塑性断裂转变为脆性断裂[14]。Cu 可有效改善其耐腐蚀性能 $AlFeCrCoTiCu_x$[15]。V 与其他合金元素相容性差, 导致 FCC 固溶体发生明显畸变, 从而促进新相的形成, 硬度大幅提升, 塑性大幅下降, 合金变得十分硬脆。耐摩擦性能大幅提升。Si 的添加使 $FeMoCrVTiSi_x$ 和 CoCrFeNiMn 抗拉强度提升, 塑性降低[16-17]。HU 等[18]、YANG 等[19] 采用熔盐电解法研究了 V 对 CoCrFeNi 高熵合金力学性能的影响, 并对熔盐电解和热压烧结工艺联合制备的块状高熵合金进行了研究, 标明 V 的添加能显著改善 Cr 的偏析, V 具有细化晶粒的作用, 同时 V 的添加可显著提高合金硬度。

笔者首先采用熔盐电解固体混合氧化物直接制备 CoCrFeNi 高熵合金, 并就稀土元素 Y 对 CoCrFeNi 高熵合金的物相、组织及力学性能的影响进行系统研究。为熔盐电解制备直接掺杂的高熵合金提供理论基础和研究借鉴。

1　试验与表征

1.1　试验方法

室温下, 先将干燥处理后的无水 $CaCl_2$ 1 000 g 装入石墨坩埚, 将电解炉密封通氩气洗涤三次。再以 10 ℃/min 的速率升温至 900 ℃, 该温度下保温 30 min 后将镍片作为阴极放入熔盐中, 与石墨坩埚组成的阳极在 2.8 V 的电压下预电解, 6 h 后取出镍片阴极。然后将 CoO、Cr_2O_3、Fe_2O_3、NiO 和 Y_2O_3 混合粉末压制的块状阴极放入熔盐, 根据 $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$(x=0,1,2,3,4,5) 原子比计算出各合金氧化物的具体含量, 如表 1 所示。在 3.1 V 的恒定电解电压下电解脱氧制备稀土 Y 掺杂的 CoCrFeNi 高熵合金, 电解结束后, 样品在电解炉内氩气气氛下随炉冷却, 待炉内温度降至室温, 取出石墨坩埚与样品。

表 1　$(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ 高熵合金混合氧化物粉末的组成
Table 1　Compositions of mixed oxide powder $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ of high entropy alloy　g

x	CoO	Cr_2O_3	Fe_2O_3	NiO	Y_2O_3	总质量
0	3.68	3.73	3.92	3.68	0	15
1	3.62	3.67	3.86	3.62	0.22	15
2	3.57	3.62	3.81	3.57	0.44	15
3	3.51	3.57	3.75	3.51	0.66	15
4	3.46	3.51	3.69	3.46	0.87	15
5	3.41	3.46	3.64	3.41	1.08	15

1.2　表征及性能测试

电解得到的高熵合金粉末洗涤干燥后做 XRD 检测, 使用的 X 射线衍射仪型号为日本 Rigaku 公司生产的 D/max 2500PC。高熵合金粉末压块后磨平用于 SEM 检测, 形貌及元素测试采用自带的能谱仪 TESCAN VEGA II 配备 Oxford INCA Energy 350 型钨灯丝电镜。

力学性能测试前先将高熵合金粉末真空热压烧结成块状, 真空度为 20 Pa, 热压烧结温度为 1 200 ℃, 保温 1 h 后冷却至室温待检测。采用 WDW-100 型电子万能材料试验机对高熵合金的室温强度进行测试。拉伸应变速率为 $1\times10^{-4}\ s^{-1}$。试验前工字型试样各个表面由砂纸 600# 打磨至 3000#, 确保试样表面无明显划痕。每个合金成分的样品测试 3 次以保证结果的准确性。采用日本 Kanagawa 公司生产的 Model HV-115 维氏硬度仪对合金硬度进行测定, 显微硬度测试载荷为 1 N。样品首先由砂纸打磨至

3000#, 然后抛光。载荷保压时间 10 s, 样品硬度测试时在表面均匀选取 10 个位置测得硬度数据后计算平均值。

2　结果与讨论

2.1　制备的 CoCrFeNi 高熵合金

图 1 为制备 CoCrFeNi 高熵合金粉末压块后扫描电镜及 EDS 元素面扫描结果。从图 1 SEM 结果可以看出, 熔盐电脱氧制备的高熵合金与传统工艺金属混合粉末直接熔融制备的高熵合金不同, 熔盐电解工艺固相脱氧形成的高熵合金出现了第二相。对扫描电镜图 SEM 进行 EDS 面扫描, 可得到不同元素分布情况, 从 EDS 面扫描图像中可以看出, Cr 和 C 富集在第二相区域, 另外三种元素在第二相的区域含量相对较低。在基体中, Co、Cr、Fe、Ni 四种的分布较为均匀。

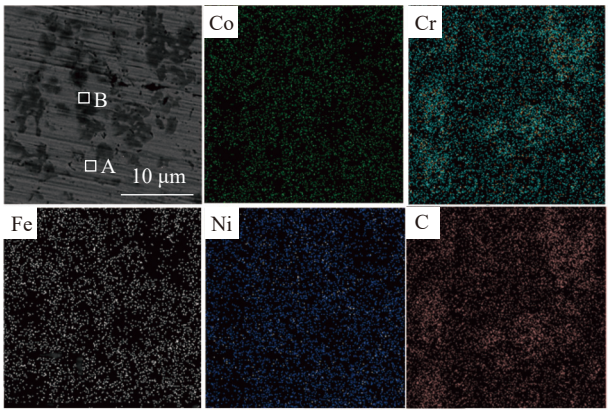


图 1　电解样品背散射图像及元素分布

Fig. 1　Backscattering image and elements distribution of the electrolyzed sample

表 2 为图 1 中 A、B 两个区域的元素 EDS 定量分析结果。在基体(区域 A)中主要含 Co、Cr、Fe、Ni 四种元素, 由于第二相区域中富含 C 与 Cr, 使得基体中 Cr 含量低于另外三种元素, Co、Fe、Ni 这三种元素原子百分数相差不大。在析出的第二相中发现 C 和 Cr 化合物, Co、Fe、Ni 这三种元素含量极少。

表 2　图 1 中样品 A、B 区域的元素组成及其体积含量

Table 2　Compositions and contents in region A and B of CoCrFeNi high entropy alloy　　%

	Co	Cr	Fe	Ni	C
A	26.84	22.27	26.81	25.19	0.03
B	2.47	21.49	2.47	2.00	71.07

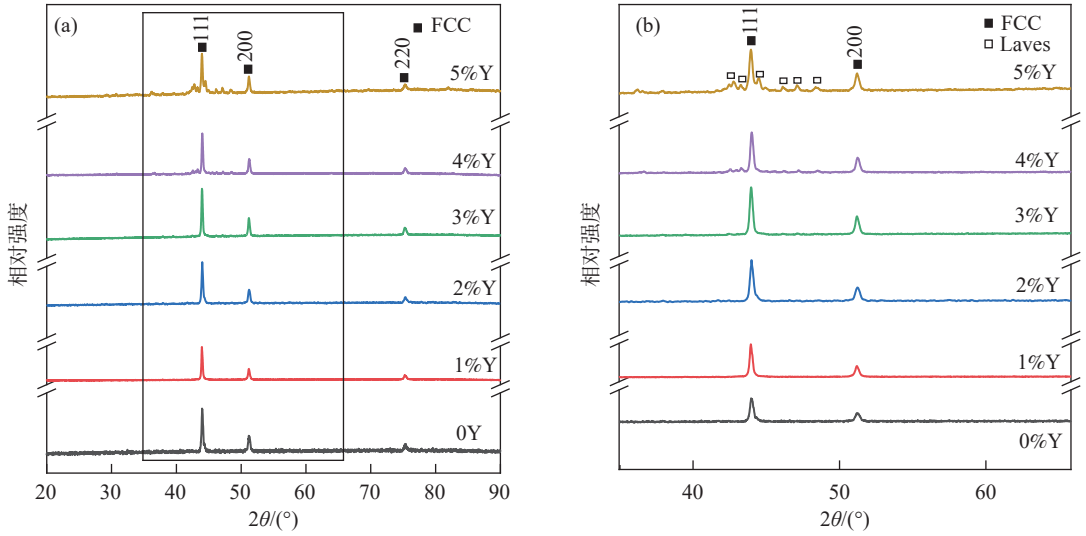
可见, 采用熔盐电解混合金属氧化物直接制备高熵合金过程中由于碳质阳极的存在, 会导致高熵合金中出现分布较均匀的碳化物第二相, 这是因为在混合金属氧化物直接电解脱氧过程中有碳的析出而导致高熵合金中有微量的 C 含量, 而 Cr 与 C 的结合能非常低, 因此很容易在合金中形成 Cr_7C_3 强化相。WANG 等[20] 研究了 C 对高熵合金微观结构和力学性能的影响, 结果表明, 碳引起的非细胞形成结构大幅提高了高熵合金应变硬化和极限抗拉强度。因此, 用此方法制备高熵合金时应注意碳化物的形成及其含量调控。

2.2　Y 对 CoCrFeNi 高熵合金物相及组织的影响

图 2 为不同 Y 含量的 XRD 图谱, 由 XRD 图谱分析可知, 当不添加稀土 Y 时, CoCrFeNi 合金以 FCC 晶体结构为主。当 Y 添加量达到 4% 后, $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ 的 XRD 图谱中逐渐有 Laves 第二相析出, 其衍射峰与 Ni_4Y 吻合, Laves 相随着 Y 含量的增加而增加。XRD 检测结果中未明确检测出 Cr_7C_3 相, 主要原因是其含量较少, 在 XRD 检测精度范围内未体现出来。电解脱氧过程碳来源于 O^{2-} 与石墨阳极反应形成的 CO_2, CO_2 在 $CaCl_2$ 中有一定的溶解度, 溶解后与熔盐中 O^{2-} 反应形成 CO_3^{2-} 后在阴极电化学析碳后, 与高熵合金表面的 Cr 反应形成 Cr_7C_3 相, 相对含量少。Laves 相也有类似的原因, 从 XRD 结果来看, 当 Y 掺杂量达到 4% 时有 Laves 相出现, 但不排除低 Y 掺杂时也有 Laves 相因为设备精度问题而未测出。

利用衍射的布拉格方程和面心立方晶体晶面间距公式, 可以计算高熵合金的晶格常数。不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的基体 FCC 相的晶格参数计算结果如图 3 所示。结合图 2 不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的 XRD 结果, 可以得出 CoCrFeNi 高熵合金在析出 Laves 相前, 作为合金基体的 FCC 结构的晶格参数 a 随着 Y 的加入量增加而变大。Y 的加入增加了 FCC 结构的晶格畸变程度, 使得 FCC 结构的晶格参数不断增大, 随着 Laves 相的析出, 原本固溶在基体中的 Y 原子随着 Ni_4Y 的析出, 使得基体的 FCC 晶格结构畸变程度下降, 晶格参数降低。

图 4 是不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的背散射图像, 合金中除了存在 Cr_7C_3 相。在 Y 含量达到 5% 后, CoCrFeNi 高熵合金的背散射图像中析出大量的新相, 对图像中含有白色新相的区域进行 EDS 元素面分布分析, 如图 5 所示。从 EDS 元素面扫描图像中可以看出, 白色相主要是 Ni 和 Y 富集区, 这也与 XRD 结果相吻合。因此随着 CoCrFeNi 高熵合金中 Y 含量的增加会析出第二相 Ni_4Y。



(a)CoCrFeNi 高熵合金物相图谱; (b)2θ 在 35°~65°的局部放大图谱

图 2　不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的 XRD 谱图

Fig. 2　XRD patterns of CoCrFeNi high entropy alloys with different yttrium contents

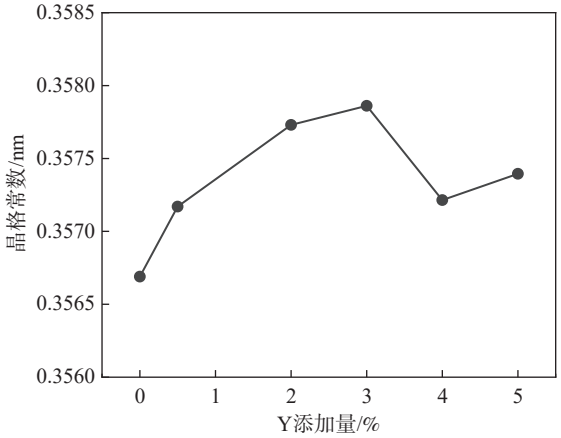
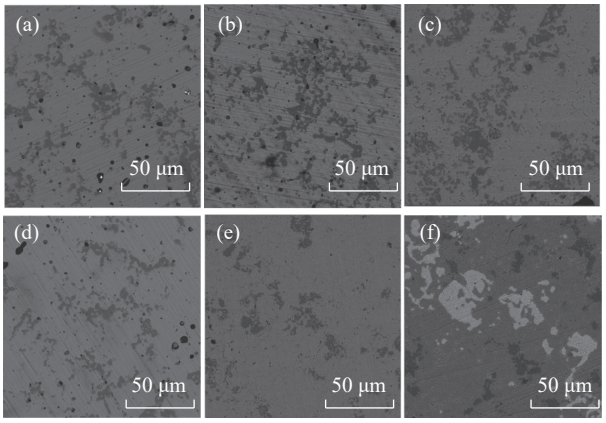


图 3　不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的基体 FCC 相的晶格参数变化

Fig. 3　Lattice parameters of FCC phase in matrix of CoCrFeNi high entropy alloy with different Y content



(a) 0; (b) 1%; (c) 2%; (d) 3%; (e) 4%; (f) 5%

图 4　不同 Y 含量下 CoCrFeNi 高熵合金的背散射图像

Fig. 4　Backscattering images of CoCrFeNi high entropy alloy with different Y contents

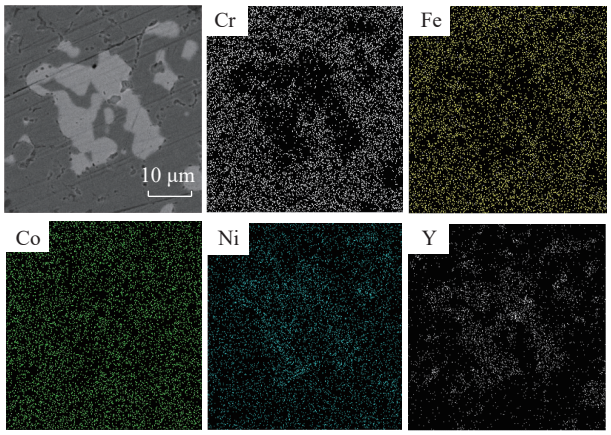


图 5　CoCrFeNi-5%Y 高熵合金的 EDS 元素面分布

Fig. 5　EDS element surface distribution of CoCrFeni-5%Y high entropy alloy

为了进一步明确 Y 掺杂对 CoCrFeNi 高熵合金相的影响, 采用 FactSage8.1 热力学软件对不同 Y 掺杂的 $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ 高熵合金中各元素之间的混合焓进行了理论计算, 结果如表 3 所示, Y 与 Ni 的亲和能力更高, 所以当 Y 含量增加到析出时, 先与 Ni 结合形成 Ni_4Y 析出。在 CoCrFeNi 合金中加入 Y 后, Cr 不再是体系中与 C 结合后混合焓最低的元素。从图 4 的背散射图像中可以发现, 随着 Y 含量的增加, 合金中 Cr_7C_3 逐渐减少。

2.3　Y 对 CoCrFeNi 高熵合金力学性能的影响

图 6 是不同 Y 含量对 CoCrFeNi 高熵合金硬度的影响, 在 Ni_4Y 析出前, 随着 Y 添加量的增加, 高熵合金 FFC 结构的晶格畸变程度加深, 晶格畸变强化了 $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ 合金的硬度, 但强化效果有限, Y 添加为 4% 时硬度与无稀土掺杂时的 CoCrFe-

Ni 高熵合金硬度相比提升了 17.8%。当 Y 的添加量增至 5% 后，析出 Ni_4Y 后极大地提升了合金的硬度，在晶格畸变和第二相强化的双重作用下，合金的硬度（HV）达到 399，提升了 58.3%，可见，适量稀土元素 Y 的添加可大幅提升高熵合金的硬度。

表 3 $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ 高熵合金中各元素的混合焓
Table 3 Enthalpy of mixing of elements in $(CoCrFeNi)_{100-x}Y_x$ high entropy alloy kJ/mol

元素	Co	Cr	Fe	Ni	Y
Co		−4	−1	0	−22
Cr			−1	−7	11
Fe				−2	−1
Ni					−31
Y					

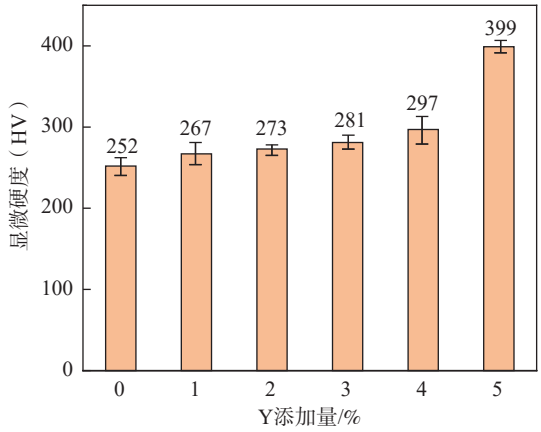


图 6 不同钇含量 CoCrFeNi 高熵合金的硬度
Fig. 6 Hardness of CoCrFeNi high entropy alloy with different Y contents

图 7 是添加不同含量 Y 对应的 CoCrFeNi 高熵合金应力应变曲线。随着 Y 含量的增加，CoCrFeNi 高熵合金的抗拉强度由 656 MPa（无掺杂）增加到 726 MPa（w(Y)=1%），再降到 593 MPa（w(Y)=4%），出现 Ni_4Y 后又增加到 696 MPa（w(Y)=5%）。随着 CoCrFeNi 高熵合金中 Y 含量增加，抗拉强度先增加后减小，结合 SEM 结果分析，Y 的添加可改善高熵合金中 Cr_7C_3 均匀分布程度（w(Y)≤2%），主要改善高熵合金的塑性；但随着 Y 含量的进一步增加，Cr_7C_3 含量明显减少且聚集（w(Y)=3%、4%），抗拉强度和塑性同时降低；而随着 Ni_4Y 强化相的析出，高熵合金强度又升高，而塑性降低。可见稀土元素 Y 添加对 CoCrFeNi 高熵合金强度和塑性的影响机理可分为三段（w(Y)≤2%），起到细化晶粒同时改善高熵合金强度和塑性的作用（3%≤w(Y)≤4%），起到促进碳化物相再次聚集的作用，强度和塑性均降低（w(Y)≥5%），形成 Ni_4Y 强化相而增加强度，降低塑性。

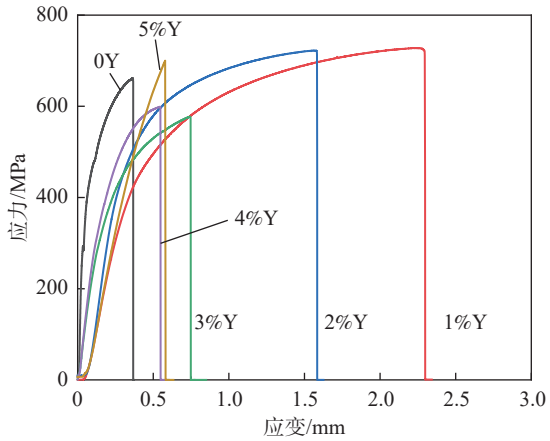


图 7 不同 Y 含量 CoCrFeNi 高熵合金的应力应变曲线
Fig. 7 Stress-strain curves of CoCrFeNi high-entropy alloys with different Y contents

3 结论

1）采用熔盐电解混合金属氧化物的方法直接制备了 Y 掺杂的 FCC 结构的 CoCrFeNi 高熵合金，由于工艺过程有碳在阴极析出，因此采用该方法制备得到的高熵合金中有一定量的 Cr_7C_3 相。稀土钇的掺杂可通过将 Y_2O_3 与金属氧化物混合电解脱氧的方式实现。具有高熵合金掺杂成本低、流程短、能耗低的优势。

2）当 CoCrFeNi 高熵合金中 Y 添加量不超过 2% 时，可提升碳化物均匀性，提高 CoCrFeNi 高熵合金的强度和塑性；当 Y 含量达到 3% 后，会降低 CoCrFeNi 高熵合金中 Cr_7C_3 相的形成，同时促使 Cr_7C_3 聚集，导致高熵合金强度和塑性同时降低；当 Y 添加量超过 4% 后，CoCrFeNi 高熵合金中析出 Ni_4Y 强化相而增加强度降低塑性。

3）当 Y 添加量达到 5% 时，CoCrFeN 高熵合金中由于出现了 Ni_4Y 强化相而使其显微硬度（HV）达到 399，比未添加 Y 的 CoCrFeNi 高熵合金的硬度提升了 58.3%。当 Y 添加量为 1% 时 CoCrFeNi 高熵合金的抗拉强度提升 10.7%，断裂伸长率增加了 5 倍。

参考文献

[1] JAGADEESH S, MAHA V S, CARSTEN S. Direct electrochemical synthesis of high-entropy alloys from metal oxides[J]. Applied Materials Today, 2017, 9: 111-121.

[2] WANG B, HUANG J, FAN J H, *et al*. Preparation of FeCoNiCrMn high entropy alloy by electrochemical reduction of solid

oxides in molten salt and its corrosion behavior in aqueous solution[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(14): E575-E579.

[3] JIAO H D, WANG M Y, TU J G, *et al*. Production of AlCrNbTaTi high entropy alloy via electro-deoxidation of metal oxides[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(11): D574-D579.

[4] WANG W R, WANG W L, WANG S C, *et al*. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $Al_xCoCrFeNi$ high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2012, 26: 15-22.

[5] LIU L, ZHANG Y, ZHAO Z F, *et al*. Microstructure and mechanical properties of $Al_xCoCuFeNi$ high entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(6): 570-574.
(刘亮, 张越, 赵作福, 等. $Al_xCoCuFeNi$ 高熵合金的组织结构与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 570-574.)

[6] XIE H B, LIU G Z, GUO J J, *et al*. Effects of Al addition on microstructure and wear properties of $Al_xFeCrCoCuV$ high-entropy alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44: 65-70.
(谢红波, 刘贵仲, 郭景杰, 等. Al 元素对 $Al_xFeCrCoCuV$ 高熵合金组织及摩擦性能的影响[J]. 材料工程, 2016, 44: 65-70.)

[7] LI A M, ZHANG X Y. Effect of Cr on microstructure and hardness of $AlCr_xCuFeNi$ high-entropy alloys system[J]. Nonferrous Metals, 2009, 61(4): 18-20.
(李安敏, 张喜燕. Cr 对 $AlCr_xCuFeNi$ 高熵合金组织与硬度的影响[J]. 有色金属, 2009, 61(4): 18-20.)

[8] YE H M, YANG W C, PANG W C, *et al*. Effect of titanium content on wear resistance of $CoCuFeNiVTi_x$ high-entropy alloys[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2017, 42(3): 1187-1911.
(叶海梅, 杨文超, 庞文超, 等. Ti 元素对 $CoCuFeNiVTi_x$ 高熵合金耐磨性能的影响[J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2017, 42(3): 1187-1911.)

[9] HSH C Y, SHEU T S, YEH J W, *et al*. Effect of iron content on wear behavior of $AlCoCrFe_xMo0.5Ni$ high entropy alloys[J]. Wear, 2010, 268: 653-659.

[10] LIU W H, HE J Y, HUANG H L, *et al*. Effects of Nb additions on the microstructure and mechanical property of CoCrFeNi high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2015, 60: 1-8.

[11] LIN D Y, ZHANG N N, HE B, *et al*. Tribological properties of $FeCoCrNiAlB_x$ high-entropy alloys coating prepared by laser cladding[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(2): 184-189.

[12] ZHUANG Y X, ZHANG X L, GU X Y. Effect of molybdenum on phases, microstructure and mechanical properties of $Al0.5CoCrFeMo_xNi$ high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 514-522.

[13] QIAN T B, CUI H B, GUO X F. Effects of Mo and V on microstructure of FeCoNiCrAl0.3 high entropy alloys[L]. Hot Working Technology, 2017, 46(8): 54-57.
(钱天宝, 崔红保, 郭学锋. Mo 和 V 对 FeCoNiCrAl0.3 高熵合金组织的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(8): 54-57.)

[14] ZHANG L J, ZHANG M D, ZHOU Z, *et al*. Effects of rare-earth element Y additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 725: 437-446.

[15] HAO C M, LIU G Z, XIE H B, *et al*. Effects of Cu addition on the microstructure and mechanical properties of $AlFeCrCoTiCu_x$ high-entropy alloys[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2016, 41(3): 876-882.
(郝聪敏, 刘贵仲, 谢红波, 等. Cu 对 $AlFeCrCoTiCu_x$ 多组元高熵合金组织及其力学性能的影响[J]. 广西大学学报, 2016, 41(3): 876-882.)

[16] XUE Y J, WEI W C, WANG M Q, *et al*. Effects of Si on microsture and mechanical properties of $FeMoCrVTiSi_x$ high entropy alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(1): 112-116.
(薛彦均, 尉文超, 王毛球, 等. Si 对 $FeMoCrVTiSi_x$ 高熵合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(1): 112-116.)

[17] NIKOLAI K, VOLKER V, NIKITA S, *et al*. Laser beam welding of a CoCrFeNiMn-type high entropy alloy produced by self-propagating high-temperature synthesis[J]. Intermetallics, 2018, 96: 63-71.

[18] HU M J, JIANG X J, DONG M Y, *et al*. Preparation and effect of vanadium addition on the mechanical properties of $CoCrFeNiV_x$ high-entropy alloy. Journal of materials research and Technology, 2023, 27: 7705-7712.

[19] YANG Y, LUO X Y, MA T X, *et al*. Effect of Al on characterization and properties of $Al_xCoCrFeNi$ high entropy alloy prepared via electro-deoxidization of the metal oxides and vacuum hot pressing sintering process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 864: 158717.

[20] WANG Z W, BAKER I, CAI Z H, *et al*. The effect of interstitial carbon on the mechanical properties and dislocation substructure evolution in $Fe_{40.4}Ni_{11.3}Mn_{34.8}Al_{7.5}Cr_6$ high entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2016, 120: 228-239.

编辑　邓淑惠