

Cr-Ni-Co-Fe-V 系共晶高熵合金微观组织和力学性能研究

袁 伟, 季佳衡, 薛 赞, 李 阳, 晋 玺

(太原理工大学材料科学与工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 系统研究了四种Cr-Ni基多元共晶高熵合金体系 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(33+x)}\text{Co}_8\text{Fe}_8\text{V}_8$ ($x=5, 4, 3, 1$) 和 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 中, Cr/Ni含量对微观组织与力学性能的影响规律。通过电弧熔炼制备系列合金, 结合组织、相分数统计及硬度与拉伸测试, 分析了成分、组织和性能的关联机制。结果表明, 四种体系合金均为面心立方 (FCC) 和体心立方 (BCC) 组成的双相组织, 且所有体系均呈现经典的共晶凝固行为: 随Cr含量增加 (Ni含量减少), 组织由亚共晶的初生FCC枝晶+枝晶间 (FCC+BCC) 共晶, 转变为完全的FCC+BCC层片状共晶组织, 再转变为过共晶的初生BCC枝晶+共晶组织。随Cr含量的增加, BCC相体积分数线性上升, FCC相体积分数线性下降。由于BCC相固有硬度较高, 合金的宏观硬度及拉伸强度随Cr/Ni比增加而单调提升。通过精确调整Cr/Ni比例可实现相组成的线性调控, 进而设计合金的力学性能, 为共晶高熵合金的成分优化与强塑性协同提升提供了理论和试验依据。

关键词: Cr-Ni基合金; 多元共晶高熵合金; Cr/Ni配比; 微观组织; 相演变; 力学性能; FCC/BCC 双相; 凝固行为

中图分类号: TG132.3⁺2; TG136 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0724-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0093

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Cr-Ni-Co-Fe-V Based Eutectic High-Entropy Alloys

YUAN Wei, JI Jia-heng, XUE Zan, LI Yang, JIN Xi

(School of Materials Science and Engineering, Tai Yuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: The influences of Cr/Ni contents on the microstructure and properties of four kinds of Cr-Ni-based multi-component eutectic high-entropy alloy systems including $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$), $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$), $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(33+x)}\text{Co}_8\text{Fe}_8\text{V}_8$ ($x=5, 4, 3, 1$), and $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) were systematically investigated. A series of alloys were prepared via arc melting, and the correlation mechanisms between compositions, microstructures and properties were analyzed combining with the microstructures, the phase fraction statistics, and the hardness and tensile tests. The results indicate that all of the four alloy systems exhibit a two-phase microstructure composed of face-centred cubic (FCC) and body-centred cubic (BCC) phases, and all systems demonstrate classical eutectic solidification behaviours: with increasing Cr content (the Ni content decreasing), the microstructure firstly evolves from hypoeutectic primary FCC dendrites+interdendritic (FCC+BCC) eutectics to a complete FCC+BCC lamellar eutectic structure, and then to hypereutectic primary BCC dendrites+eutectic structure; with increasing Cr content, the volume fraction of the BCC phase increases linearly while that of the FCC phase decreases linearly; owing to the inherently higher hardness of the BCC phase, the macroscopic hardness and tensile strength of the alloy monotonically increase with increasing Cr/Ni ratio. Precise adjustment of the Cr/Ni ratio enables linear control of the phase composition, and then designing the alloy's mechanical properties, and providing both theoretical and experimental foundations for optimizing the composition of eutectic high-entropy alloys and synergistically enhancing strength and ductility.

Key words: Cr-Ni based alloy; multi-component eutectic high-entropy alloy; Cr/Ni ratio; microstructure; phase evolution; mechanical property; FCC/BCC dual-phase; solidification behavior

基金项目: 国家自然科学基金 (52301217); 山西省应用基础研究计划项目 (20210302124427)。

收稿日期: 2025-12-29 收到初稿, 2026-01-14 收到修订稿。

作者简介: 袁伟 (2000-), 男, 硕士, 主要研究方向为共晶高熵合金材料的制备与强化。E-mail: 18735203458@163.com

通信作者: 晋玺, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。电话: 18834848821, E-mail: jinxi@tyut.edu.cn

引用格式: 袁伟, 季佳衡, 薛赞, 等. Cr-Ni-Co-Fe-V 系共晶高熵合金微观组织和力学性能研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 724-732.

Yuan Wei, Ji Jiaheng, Xue Zan, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Cr-Ni-Co-Fe-V based eutectic high-entropy alloys [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 724-732.

2004年Cantor与叶均蔚分别提出了多组元合金 (MCAs) 与高熵合金 (HEAs) 的概念, 为探索具备卓越性能的新型合金提供了广阔的空间^[1-2]。研究表明, 许多HEAs具有高强度、高度硬, 以及优良的断裂韧性、耐腐蚀和耐磨性能^[3-8]。通常, 包含五种或更多主要元素的HEAs具有较高的混合熵, 这有助于稳定固溶相并抑制脆性金属间化合物的形成。然而, 单一固溶体结构往往难以实现强度与塑性的良好匹配, 且合金熔体的流动性较差, 限制了工程应用。相比之下, 共晶高熵合金表现出优异的铸造性能和综合力学性能, 为开发易浇注、高强度、高塑性的结构材料提供了可行途径^[9]。

共晶高熵合金的力学性能主要由其组成相决定。研究发现, 具有FCC+B2 (有序体心立方) 结构的Al-Co-Cr-Fe-Ni系和FCC+BCC结构的Cr-Ni-Co-Fe-V系共晶高熵合金具有最佳强度和塑性组合^[10-11]。本研究在无序FCC+BCC结构的Cr-Ni-Co-Fe-V系共晶高熵合金基础上, 通过改变Cr和Ni元素的相对含量, 将原有的四个共晶成分扩展为四个共晶体系: $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(33+x)}\text{Co}_8\text{Fe}_8\text{V}_8$ ($x=5, 4, 3, 1$) 和 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$), 旨在深入研究Cr/Ni比对共晶高熵合金微观组织演变及力学性能的影响机制。

1 试验方法

本研究所有合金均采用真空电弧熔炼设备制备, 以纯度大于99.95wt.%的块状Cr、Ni、Co、Fe、V元素为原料。电解后的钒提前熔化到块体中, 避免熔化时溅出。每一个25 g的铸锭都经过6次以上的重熔, 每次持续2 min, 以确保组织均匀、无成分偏析, 然后通过重力滴铸到60 mm × 10 mm × 3 mm的铜模中。

选用Phenom XL 型台式扫描电子显微镜 (SEM) 观察合金微观组织以及分析成分。观察前将样品打磨、抛光, 然后用稀盐酸进行蚀刻。使用Image-J软件来进一步挖掘SEM数据, 对每种成分合金至少处理5张来自不同位置的扫描照片。

在INSTRON 5969拉伸试验机上进行室温下的准静态单轴拉伸试验, 初始标称应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。采用电火花线切割从真空电弧熔炼的板材上切取横截面为3.0 mm × 1.0 mm、标距长度为14.0 mm的小尺寸非标狗骨状长板试样, 配备标距为12.5 mm的刀片式引伸计来实时监控应变。为确保试验数据的可靠性, 每组试验至少重复四次。

硬度测试采用洛氏硬度计 (HR-150A), 载荷为

150 kg, 为保证试验结果的准确性, 加载后需要等待大约8 s方可卸载, 每个试样选择五个不同的位置进行测量, 去除离散度较大的异常值后取平均值作为该合金的洛氏硬度值。

2 结果及讨论

2.1 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) 合金体系的组织及硬度演化规律

图1为 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) 合金系的SEM组织照片。可以看出, 四种合金均由黑色相与灰色相两相组成。前期工作已证实, $\text{Cr}_{41}\text{Ni}_{39}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ 合金为FCC (灰色相) + BCC (黑色相) 组成的双相共晶高熵合金, 其中黑色相不耐稀盐酸腐蚀, 且富含Cr元素, 而灰色相则富含Ni元素^[11]。根据Cr含量相对于共晶点的位置, 该系列合金可分为两类: 亚共晶合金 (Cr含量低于共晶点) 以初生FCC枝晶和枝晶间共晶为特征; 过共晶合金 (Cr含量高于共晶点) 则呈现初生BCC枝晶与枝晶间共晶的形貌。具体而言, 在Cr含量最低的合金 (Cr_{39}) 中, 初生相为FCC枝晶, 枝晶间区域形成了FCC+BCC双相共晶组织。当成分趋近于共晶点 (Cr_{40}) 时, 初生FCC枝晶的体积分数减少, 枝晶间共晶组织增多, BCC相的总体比例随之上升。在理想的共晶成分点 (Cr_{41}), 凝固过程发生共晶反应, 形成规则排列的FCC+BCC片层状组织。随着Cr含量进一步增加并超过共晶点 (Cr_{42}), 初生枝晶相由FCC转变为BCC相, 但枝晶间仍存在FCC+BCC共晶。若合金成分持续偏离共晶点, 组织演变将趋向于BCC相体积分数不断增长, 而共晶组织逐渐减少, 最终获得完全的BCC单相枝晶组织。

相体积分数采用二维金相法进行统计, 并通过多位置取样、多图像分析降低统计误差, 定量统计结果如图2 (a) 和表1所示。可以看出, $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) 合金系中两相的体积分数与Cr含量呈现出明确的线性依赖关系。当Cr含量从39at.%增加至42at.%时, FCC相的体积分数由约87%下降至74%, 而BCC相则从13%相应上升至26%, BCC相体积分数与Cr含量的线性表达式为:

$$V_{\text{BCC}} (\%) = 4.3\text{Cr} (\text{at.}\%) - 155.7 \quad (1)$$

式中: V_{BCC} 为BCC相体积分数。

鉴于合金中初生相尺寸相差较大且分布存在局域不均匀性, 为降低微观组织不均对测试结果的影响, 本研究采用洛氏硬度计获取合金的宏观硬度, 相关硬度数值以均值 ± 标准差形式汇总于表1。测试结果表明, 合金硬度与成分及相组成存在明确关联。如图2 (b) 和表1所示, 随着Cr含量升高, 合金的硬度值由

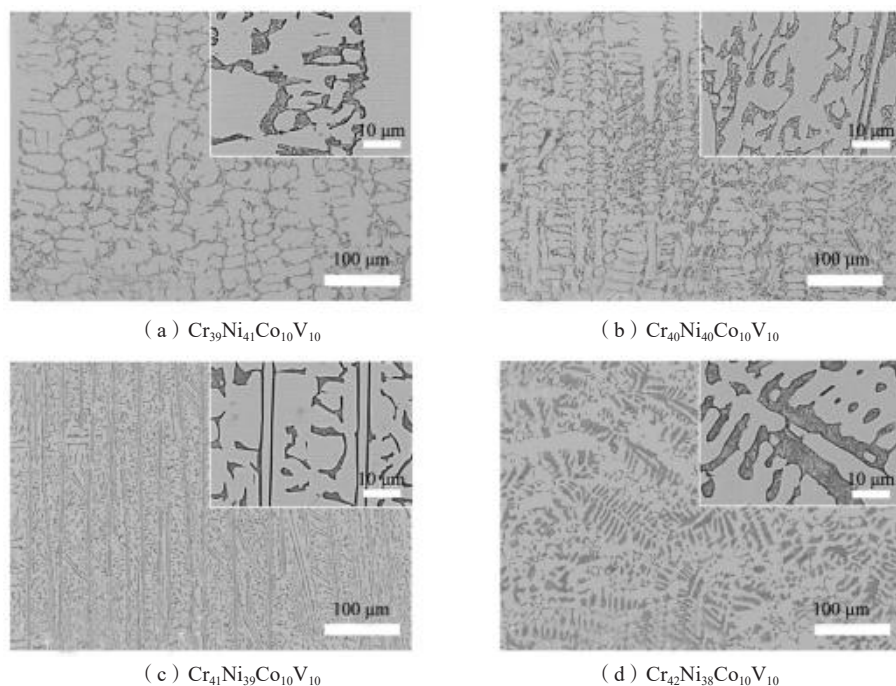


图1 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) 合金的显微组织SEM图像, 右上角插图为高倍组织图像

Fig. 1 SEM images of the micro-structures of $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) alloys, and the upper right corner illustrations are high-power tissue images

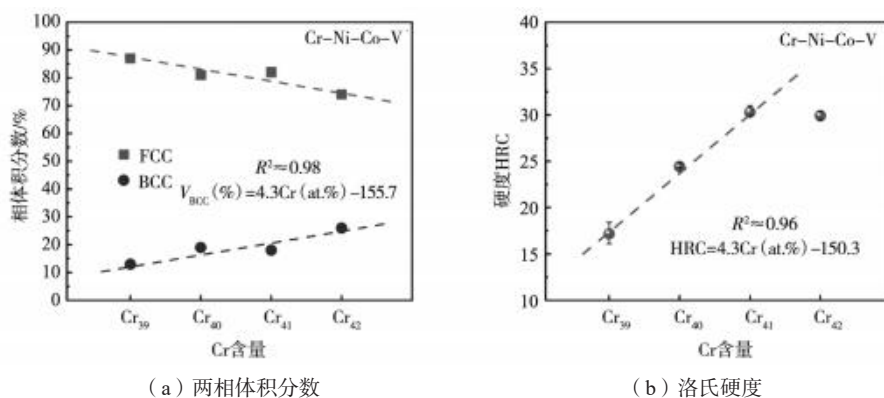


图2 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) 合金两相体积分数和洛氏硬度变化

Fig. 2 Duplex phase volume fraction and Rockwell hardness variations of the $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$) alloys

表1 Cr-Ni-Co-V系合金的相体积分数和硬度
Tab. 1 Phase volume fractions and hardnesses of the Cr-Ni-Co-V based alloys

合金系	合金成分	相体积分数/%		硬度HRC
		FCC	BCC	
Cr-Ni-Co-V	$\text{Cr}_{39}\text{Ni}_{41}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	87 ± 3	13 ± 3	17.2 ± 1.3
	$\text{Cr}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	81 ± 5	19 ± 5	24.4 ± 0.4
	$\text{Cr}_{41}\text{Ni}_{39}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	82 ± 2	18 ± 2	30.3 ± 1.2
	$\text{Cr}_{42}\text{Ni}_{38}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	74 ± 4	26 ± 4	29.9 ± 0.6

HRC17.2 线性增加至HRC29.9, 结合图2(a)可知, 合金硬度的提升主要来自于BCC相体积分数的增加, 且硬度值与BCC相体积分数呈线性关系。前期工作分别测量了两相的纳米压痕硬度值, 结果显示BCC相本征硬度 (~12.5 GPa) 显著高于FCC相 (~3.2 GPa) [11]。由

此可得出, 合金宏观硬度的提升是硬质BCC相体积分数提高与软质FCC相体积分数降低共同作用的结果。

2.2 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) 合金体系的组织及硬度演化规律

图3为 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) 合金系的SEM组织照片, 可以看出, 四种合金均由黑色相与灰色相两相组成。经验证 $\text{Cr}_{37}\text{Ni}_{43}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ 合金灰色相为FCC相, 黑色相为BCC相[11]。该合金系中显微组织随成分演变呈现规律性变化, 在亚共晶合金 (Cr_{35} 与 Cr_{36} 合金) 中初生相为FCC树枝晶。随着Cr含量升高, 初生FCC枝晶的体积分数减少, 且枝晶间组织相应增多。该细化机制可归因于: 越接近共晶点, 初生FCC相析出后可供生长的时间越短, 随后迅速形成的枝晶

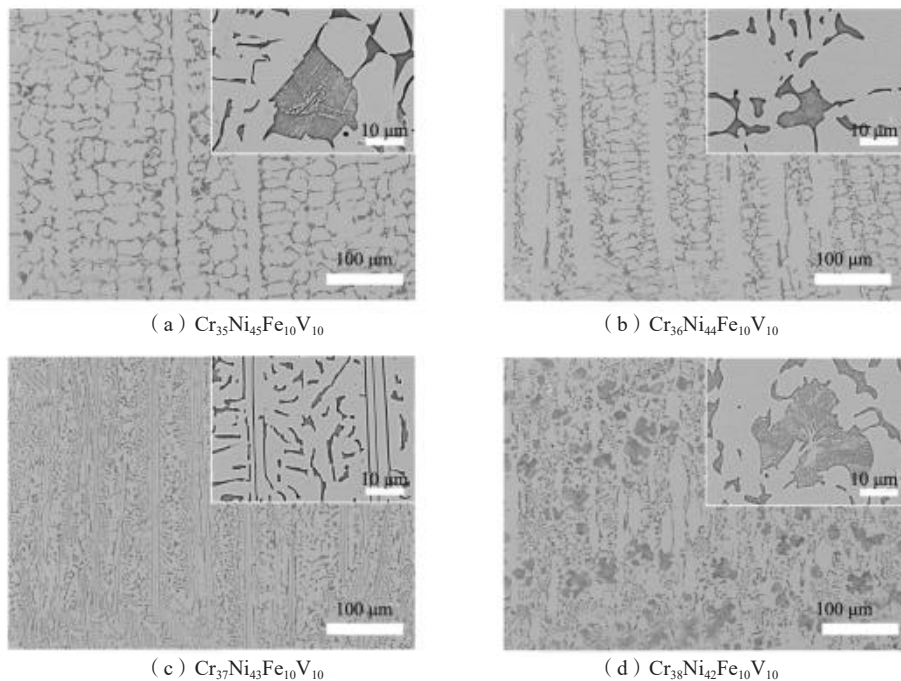


图3 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) 合金的显微组织SEM图像, 右上角插图为高倍组织图像

Fig. 3 SEM images of the micro-structures of $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) alloys, and the upper right corner illustrations are high-power tissue images

间共晶组织与初生枝晶产生生长竞争, 从而限制了FCC晶粒的进一步长大^[12]。当合金达到共晶成分 (Cr_{37}) 时, 组织完全由FCC+BCC两相片层状共晶构成。Cr含量继续增加至过共晶成分 (Cr_{38}), 初生相转变为BCC相。值得注意的是, 其形貌并非枝晶状, 而是呈现独特的“梅花状”。在这些梅花状BCC相周围, 分布着大量板条状FCC相, 两者之间存在少量共晶组织。这种特殊形貌的形成与快速凝固条件下的溶质截留效应密切相关, 即在较高的冷却速率下, 固液界面迁移速度加快, 溶质原子 (尤其是Cr) 在固液相中无法充分扩散, 导致界面处偏离平衡凝固条件^[12]。更多的Cr原子被截留在固相中, 使得局部熔体实际成分向富Ni (γ -Ni) 方向偏移, 从而促使板条状FCC相优先析出。最终, 在梅花状BCC相与板条状FCC相的间隙中, 形成剩

余的共晶组织^[13]。

图4 (a) 定量展示了 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) 系合金中两相体积分数随成分的演变规律。该体系与前述合金具有直接可比性: 两者均包含两个亚共晶、一个共晶及一个过共晶成分。如图4 (a) 与表2所示, 当Cr含量从35at.%增加至38at.%时, FCC相的体积分数由89%线性下降至76%, 而BCC相则由11%相应上升至24%, BCC相体积分数与Cr含量的线性表达式为:

$$V_{\text{BCC}} (\%) = 4.3\text{Cr} (\text{at.}\%) - 138.3 \quad (2)$$

式中: V_{BCC} 为BCC相体积分数。这种相分数的连续线性调整, 根本上是合金中Ni与Cr元素含量此消彼长的结果。

合金的宏观硬度演变规律与其相组成密切相关。如图4 (b) 与表2所示, 随着Cr含量从35at.%

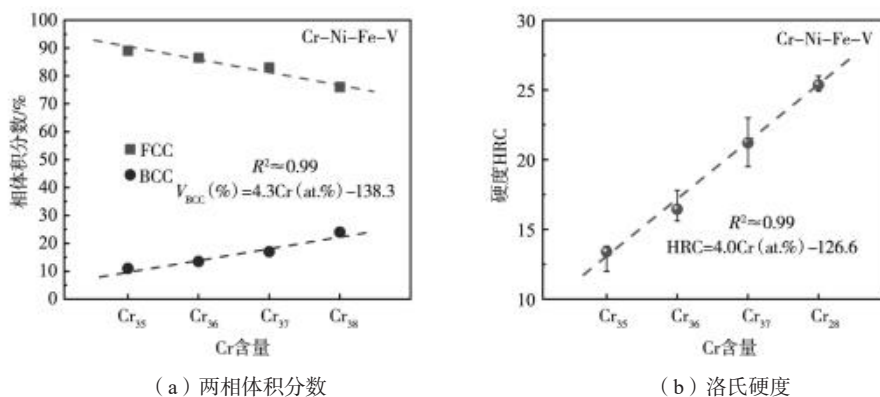


图4 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) 合金两相体积分数和洛氏硬度变化。

Fig. 4 Duplex phase volume fraction and Rockwell hardness variations of the $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$) alloys

表2 Cr-Ni-Fe-V系合金的相体积分数和硬度
Tab. 2 Phase volume fractions and hardnesses of the Cr-Ni-Fe-V based alloys

合金系	合金成分	相体积分数/%		硬度HRC
		FCC	BCC	
Cr-Ni-Fe-V	Cr ₃₅ Ni ₄₅ Fe ₁₀ V ₁₀	89 ± 2	11 ± 2	13.4 ± 0.3
	Cr ₃₆ Ni ₄₄ Fe ₁₀ V ₁₀	86 ± 4	14 ± 4	16.4 ± 1.4
	Cr ₃₇ Ni ₄₃ Fe ₁₀ V ₁₀	83 ± 2	17 ± 2	21.2 ± 1.8
	Cr ₃₈ Ni ₄₂ Fe ₁₀ V ₁₀	76 ± 5	24 ± 5	25.4 ± 0.7

增至38at.%, 合金硬度从HRC13.4线性上升至HRC25.4。这一趋势表明, 合金硬度主要受硬质BCC相体积分数的支配, 受相形貌改变的影响较小。与此前研究的Cr_(46-x)Ni_(34+x)Co₁₀Fe₈V₁₀ (x=7, 6, 5, 4) 合金系相比, 尽管绝对硬度值不同, 但硬度随Cr含量增加的线性变化斜率高度一致。

2.3 Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) 合金体系的组织及硬度演化规律

图5为Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) 合金系的SEM组织照片。可以看出, 四种合金均由黑色相与灰色相两相组成。前期工作已证实了Cr₃₉Ni₃₇Co₈Fe₈V₈合金是由FCC (灰色相)+BCC (黑色相) 组成的双相共晶高熵合金^[11]。在合金体系中当成分为亚共晶 (Cr₃₈) 时, 组织由初生FCC树枝晶及枝晶间的FCC+BCC两相构成。当合金达到共晶点 (Cr₃₉), 组织完全由FCC与BCC两相交替生长的片层

状共晶构成。在过共晶 (Cr₄₀) 时, 初生相转变为与Cr_(43-x)Ni_(37+x)Fe₁₀V₁₀ (x=8, 7, 6, 5) 系合金中类似的梅花状BCC枝晶, 其周围伴有板条状FCC相及少量枝晶间共晶组织。随着Cr含量进一步增加至42at.%, 成分更加偏离共晶点。此时, 初生梅花状BCC枝晶显著粗化, 而伴生的板条状FCC相发生细化, 同时枝晶间共晶组织的体积分数减少。上述组织演变与凝固路径密切相关, 随着成分向富Cr (α-Cr) 方向偏移, 初生BCC相拥有更宽的结晶温度范围, 导致其尺寸粗大。在快速凝固条件下, 溶质截留效应促使局部成分偏离平衡, 从而析出板条状FCC相。然而, 在与占主导的BCC相生长竞争中, 这些FCC相的生长受到限制而发生细化。同时, 剩余液体总量减少, 导致最终析出的枝晶间共晶组织量也随之降低^[12]。

图6 (a) 定量展示了Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) 合金系中两相体积分数随成分的演变, 随着Cr含量从38at.%增至42at.%, FCC相的体积分数从89%下降至58%, 而BCC相则从11%相应上升至42%, 详细的成分和相体积分数对应数据列于表3中, BCC相体积分数与Cr含量的线性表达式为:

$$V_{\text{BCC}} (\%) = 10.3\text{Cr} (\text{at.}\%) - 381.3 \quad (3)$$

式中: V_{BCC} 为BCC相体积分数。

宏观硬度的演变规律在Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) 合金系中得到了延续。如图6 (b) 和表3所示, 合金的洛氏硬度随Cr含量增加呈线性递增, 从Cr₃₈成分的HRC16.1 显著提升至Cr₄₂成分的

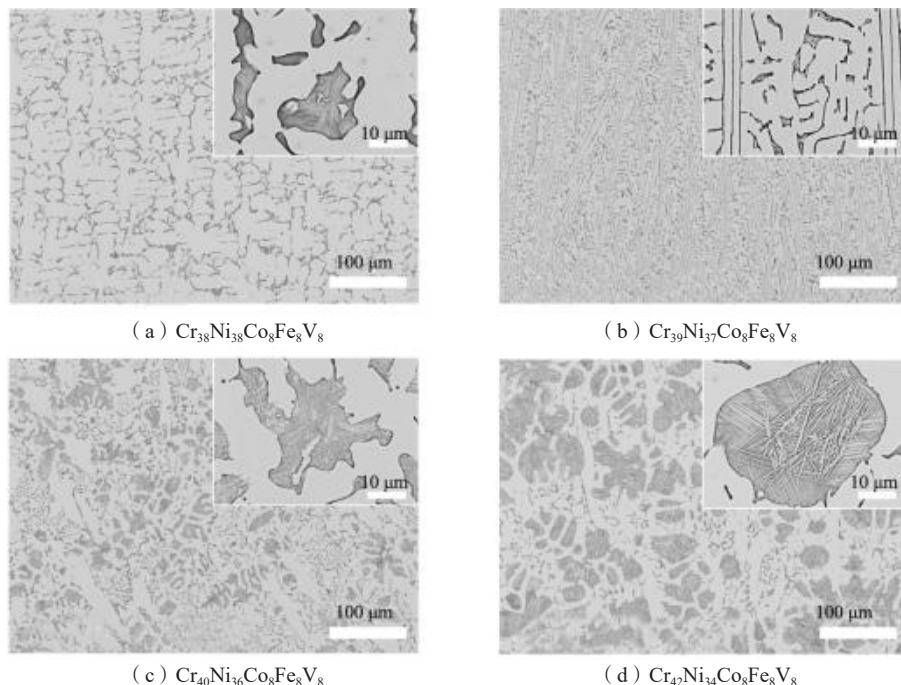


图5 Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) 合金的显微组织SEM图像, 右上角插图为高倍组织图像

Fig. 5 SEM images of the micro-structures of Cr_(43-x)Ni_(33+x)Co₈Fe₈V₈ (x=5, 4, 3, 1) alloys, and the upper right corner illustrations are high-power tissue images

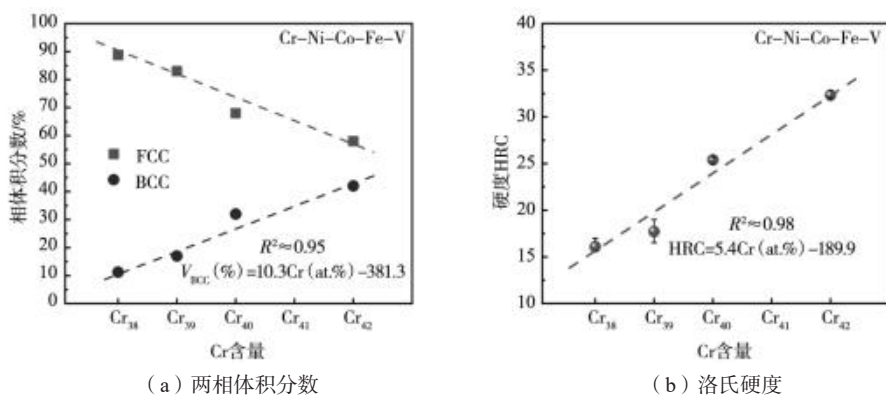
图6 $Cr_{(43-x)}Ni_{(33+x)}Co_8Fe_8V_8$ ($x=5, 4, 3, 1$) 合金两相体积分数和洛氏硬度变化Fig. 6 Duplex phase volume fraction and Rockwell hardness variations of the $Cr_{(43-x)}Ni_{(33+x)}Co_8Fe_8V_8$ ($x=5, 4, 3, 1$) alloys

表3 Cr-Ni-Co-Fe-V系合金的相体积分数和硬度
Tab. 3 Phase volume fractions and hardnesses of the Cr-Ni-Co-Fe-V based alloys

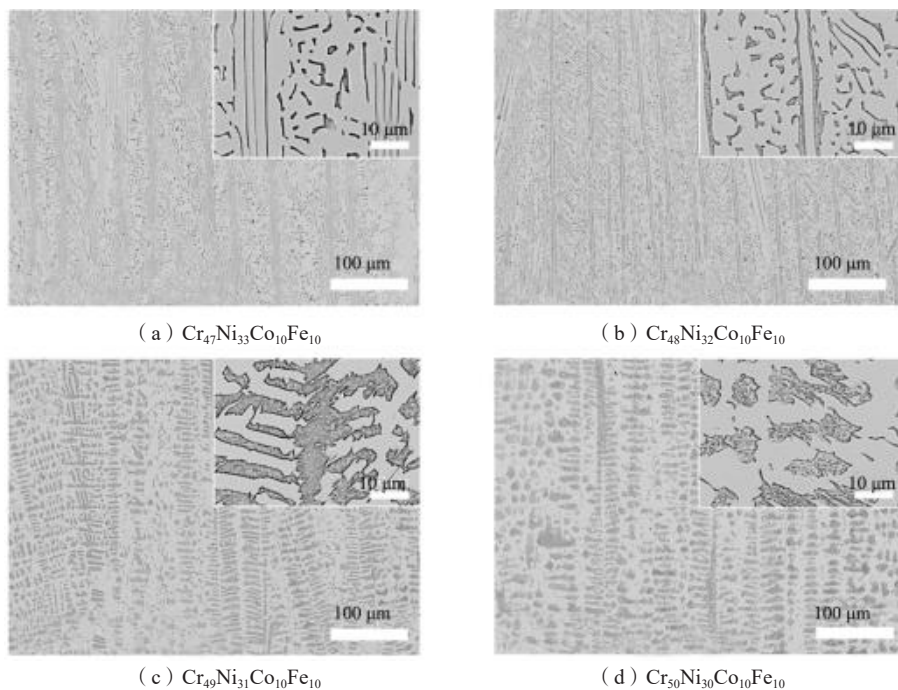
合金系	合金成分	相体积分数/%		硬度HRC
		FCC	BCC	
Cr-Ni-Co-Fe-V	$Cr_{38}Ni_{38}Co_8Fe_8V_8$	89 ± 3	11 ± 3	16.1 ± 1.1
	$Cr_{39}Ni_{37}Co_8Fe_8V_8$	83 ± 1	17 ± 1	17.7 ± 1.3
	$Cr_{40}Ni_{36}Co_8Fe_8V_8$	68 ± 4	32 ± 4	25.4 ± 0.7
	$Cr_{42}Ni_{34}Co_8Fe_8V_8$	58 ± 2	42 ± 2	32.3 ± 0.6

HRC32.3。

2.4 $Cr_{(47+x)}Ni_{(33-x)}Co_{10}Fe_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 合金体系的组织及硬度演化规律

图7为 $Cr_{(47+x)}Ni_{(33-x)}Co_{10}Fe_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 合

金系的SEM组织照片，其特征仍为灰色相与黑色相构成的片层状共晶结构。在 $Cr_{47}Ni_{33}Co_{10}Fe_{10}$ 合金中组织为FCC（灰色相）+BCC（黑色相）组成的双相结构^[11]。合金系组织演变规律表现出不同于前述体系的独特之处。在名义共晶成分 $Cr_{47}Ni_{33}Co_{10}Fe_{10}$ 处，组织呈现典型的交替层状共晶形貌。然而，当成分轻微偏离至 $Cr_{48}Ni_{32}Co_{10}Fe_{10}$ 时，并未如预期出现初生枝晶，而是仍维持层状共晶组织，表现出多组元共晶体系中共晶成分的不唯一性。不过 $Cr_{48}Ni_{32}Co_{10}Fe_{10}$ 合金片层结构发生显著变化，相较于 Cr_{47} 合金时单个片层束内包含4~6个交替片层， Cr_{48} 合金中片层数量减少至2~3个。从致密片层向稀疏片层的形态转变，被认为与局部化学成分的波动有关，类似现象在 $AlCoCrFeNi_x$ 等近共晶高熵合金中亦有报道^[14]。随着Cr含量进一步增加， Cr_{49} 合金

图7 $Cr_{(47+x)}Ni_{(33-x)}Co_{10}Fe_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 合金的显微组织SEM图像，右上角插图为高倍组织图像Fig. 7 SEM images of the micro-structures of $Cr_{(47+x)}Ni_{(33-x)}Co_{10}Fe_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) alloys, and the upper right corner illustrations are high-power tissue images

开始出现树枝状BCC初生相,此形貌与 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}-\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$)合金系中的过共晶合金组织相似,当Cr含量增至50at.%时,初生BCC枝晶发生显著粗化。

图8(a)定量揭示了 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$)系合金中两相体积分数随成分的线性演变规律。随着Cr含量从47at.%增至50at.%, FCC相的体积分数由86%线性降低至61%,而BCC相则由14%同步升高至39%, BCC相体积分数与Cr含量的线性表达式为:

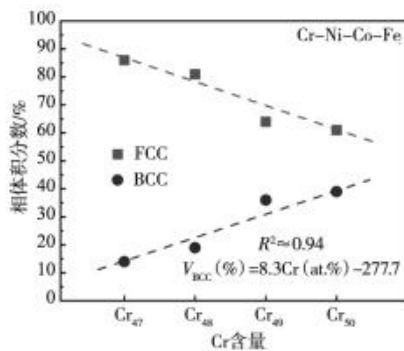
$$V_{\text{BCC}}(\%) = 8.3\text{Cr}(\text{at.}\%) - 277.7 \quad (4)$$

式中: V_{BCC} 为BCC相体积分数。相应的宏观硬度随BCC

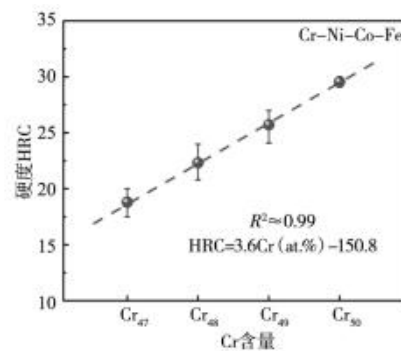
相比比例的增加呈线性增长,如图8(b)所示,随着Cr含量增加,硬度由HRC18.8提升至HRC29.6,详细数据如表4所示。

表4 Cr-Ni-Co-Fe系合金的相体积分数和硬度
Tab. 4 Phase volume fractions and hardnesses of the Cr-Ni-Co-Fe based alloys

合金系	合金成分	相体积分数/%		硬度HRC
		FCC	BCC	
Cr-Ni-Co-Fe	$\text{Cr}_{47}\text{Ni}_{33}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	86 ± 2	14 ± 2	18.8 ± 1.2
	$\text{Cr}_{48}\text{Ni}_{32}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	81 ± 2	19 ± 2	22.3 ± 1.7
	$\text{Cr}_{49}\text{Ni}_{31}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	64 ± 5	36 ± 5	25.7 ± 1.3
	$\text{Cr}_{50}\text{Ni}_{30}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	61 ± 3	39 ± 3	29.6 ± 0.4



(a) 两相体积分数



(b) 洛氏硬度

图8 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$)合金两相体积分数和洛氏硬度变化

Fig. 8 Duplex phase volume fraction and Rockwell hardness variations of the $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) alloys

综上,系统研究了四种Cr-Ni基多元共晶合金体系的组织与性能演变规律,发现其均遵循经典的共晶凝固行为,并与已报道的共晶高熵合金体系相似^[3, 7, 15]。在亚共晶成分区,组织由初生FCC枝晶及枝晶间FCC/BCC共晶组成。随着Cr含量增加,FCC枝晶体积分数减小且尺寸细化,枝晶间共晶增多,这是由于两者生长竞争所致^[12]。在共晶点成分,各体系均形成典型的FCC/BCC层状组织,这种层状组织在很多FCC+B2结构的共晶高熵合金中都有出现^[16-17]。过共晶时,初生相转变为BCC相(树枝状或梅花状),其附近伴随板条状FCC相及少量共晶,该现象归因于快速凝固中的溶质截留效应^[12]。所有体系中FCC相体积分数随Cr含量增加线性下降,BCC相体积分数线性上升,在 AlCoCrFeNi_x 等合金中亦有类似规律,主要归因于Cr和Ni元素分别对BCC相和FCC相的稳定化作用^[18]。

2.5 共晶合金体系的力学性能对比

上述四种共晶体系中,合金硬度均随Cr元素含量及BCC相体积分数线性增加,符合传统复合材料的性能演化规律,这主要归因于BCC相比FCC相具有更高的强度值。前期研究表明, $\text{Cr}_{41}\text{Ni}_{39}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ 、

$\text{Cr}_{37}\text{Ni}_{43}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ 、 $\text{Cr}_{39}\text{Ni}_{37}\text{Co}_8\text{Fe}_8\text{V}_8$ 和 $\text{Cr}_{47}\text{Ni}_{33}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ 中FCC相本征硬度分别为52 GPa、52 GPa、45 GPa、4.3 GPa, BCC相硬度分别为12.5 GPa、7.4 GPa、7.3 GPa、5 GPa^[11]。类似的性能-相分数线性变化规律在很多高熵合金体系中出现,如 $\text{Al}_x\text{Cr}_x\text{Fe}_{2-x}\text{Ni}_{3-y}$ 共晶高熵合金体系的硬度随Cr含量呈线性变化^[19], CoCrFeNiNb_i 共晶高熵合金体系的硬度随Nb含量线性变化^[20]。此外,在非共晶体系的 $\text{Al}_x\text{CoFeNi}_2\text{V}_{0.5}$ 合金中,合金硬度亦随Al含量线性变化^[21]。实际上,在绝大多数复合材料中,硬度均随相体积分数发生线性变化,无需考虑相界面结构、晶粒尺寸等因素。主要原因是同一共晶体系内,亚共晶、共晶及过共晶合金一般具有相同的相界面结构。此外,由于体系内的合金均采用相同熔炼参数制备,表明合金特征尺寸大致相当,因此可认为,合金力学性能演化规律不受相界面结构与晶粒尺寸的影响,仅依赖于相体积分数的大小。

FCC+BCC结构的Cr-Ni-Co-Fe-V系共晶高熵合金中, $\text{Cr}_{41}\text{Ni}_{39}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ 和 $\text{Cr}_{47}\text{Ni}_{33}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ 两种共晶合金的性能差异最大,CoV合金具有最高的屈服强度($\sigma_{0.2}$)和极限抗拉强度(σ_{UTS}),分别为591 MPa和1 076 MPa。而CoFe合金的屈服强度和极限抗拉强度最低,分别为

372 MPa和727 MPa^[11]。因此选取两种合金体系作为研究对象，进行准静态单轴拉伸测试。

室温下对两种体系合金 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$)、 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ ($x=0, 1, 2, 3$) 进行拉伸试验，结果如图9所示，以下分别将两种体系合金记为CoV系、CoFe系。随着Cr元素的增加，两种合金体系屈服强度逐渐增加，其中CoV系合金由446 MPa提升至601 MPa，CoFe系合金由372 MPa提升至501 MPa，具体数据如表5所示。Cr/Ni比的增加，本质上是推动合金组织从以韧性的FCC相为主，向以

硬质BCC相为主转变。从图1和图9可以看到，对于CoV系合金，在达到共晶点 (Cr_{41}) 的强度峰值后，进入过共晶区 (Cr_{42}) 抗拉强度增长停滞甚至略有下降，同时塑性急剧恶化 (伸长率从13.4%骤降至7.1%)，其过共晶组织以BCC初生相为核心，尺寸粗大且形貌不规则。从图7和图9可以看出，对于CoFe系合金，从共晶 (Cr_{47}) 到过共晶 (Cr_{50})，抗拉强度随Cr含量增加呈现持续的线性增长 (增幅达37%)，同时塑性下降平缓 (伸长率从17.2%降至11.3%)，其初生BCC相呈现尺寸细小、分布均匀的规则形态，通常为近球状或短棒

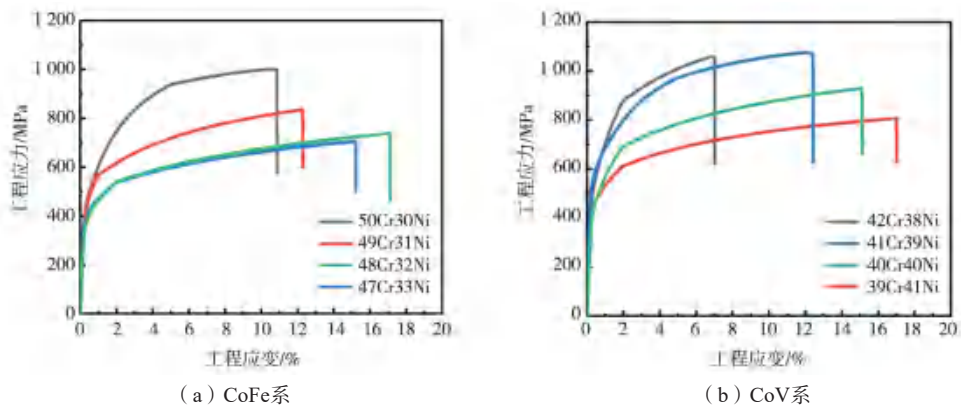


图9 两种合金体系拉伸应力应变曲线
Fig. 9 The tensile stress-strain curves of the two alloy systems

表5 两种合金体系屈服强度、抗拉强度及伸长率
Tab. 5 Yield strengths, tensile strengths and elongations of two alloy systems

合金成分	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
$\text{Cr}_{47}\text{Ni}_{33}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	372 ± 33	727 ± 42	17.2 ± 1.4
$\text{Cr}_{48}\text{Ni}_{32}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	410 ± 19	739 ± 37	15.1 ± 1.1
$\text{Cr}_{49}\text{Ni}_{31}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	450 ± 9	830 ± 16	12.4 ± 0.2
$\text{Cr}_{50}\text{Ni}_{30}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$	501 ± 20	997 ± 14	11.3 ± 0.8
$\text{Cr}_{39}\text{Ni}_{41}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	446 ± 12	811 ± 23	17.1 ± 1.4
$\text{Cr}_{40}\text{Ni}_{40}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	502 ± 24	907 ± 19	15.1 ± 1.5
$\text{Cr}_{41}\text{Ni}_{39}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	591 ± 17	$1\,076 \pm 25$	13.4 ± 0.9
$\text{Cr}_{42}\text{Ni}_{38}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$	601 ± 45	$1\,050 \pm 28$	7.1 ± 0.6

状。

图10为 $\text{Cr}_{50}\text{Ni}_{30}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$ 和 $\text{Cr}_{42}\text{Ni}_{38}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ 过共晶合金的断口扫描照片。如图10 (a) 所示，CoFe系过共晶合金断口由尺寸均匀、较深的等轴韧窝构成，呈现出典型的微孔聚集型韧性断裂特征。而CoV系过共晶合金断口形貌显著不同，呈现出准解理断裂与少量浅韧窝的混合特征。其中平坦的解理面来源于粗大BCC初生相的脆性开裂，如图10 (b) 所示。因此可以得到，CoFe系通过获得细小规则的初生相，实现了韧性的微孔聚集型断裂，而CoV系因粗大初生相的有害形貌，容易诱发大面积的脆性准解理断裂，从而导致合金加工硬化能力及塑性的

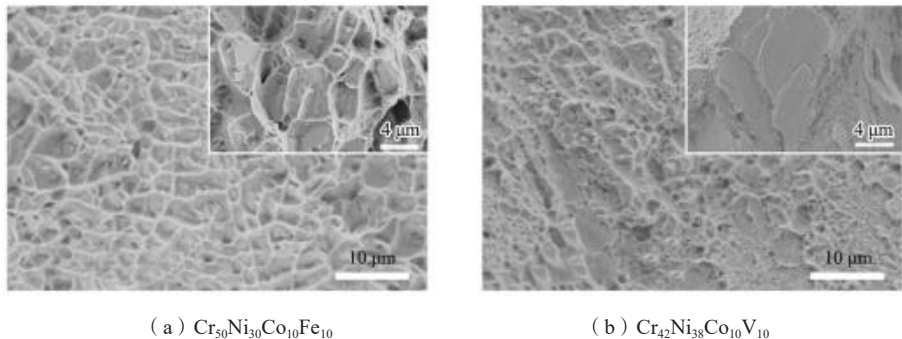


图10 两种过共晶合金的拉伸断口SEM照片

Fig. 10 Tensile fracture SEM images of two kinds of hypereutectic alloys

降低。

综上,通过调整Cr/Ni比可以系统地调控这两种合金体系的拉伸性能。CoV合金在共晶点具备优异的强塑性平衡,但其过共晶性能较差。相比之下,CoFe合金通过成分设计获得高体积分数BCC相的同时,优化初生相形貌以抑制脆性断裂路径,在过共晶方向性能会更好。这种高BCC含量与良好界面兼容性的模式,为超高强度合金的设计提供了思路。

3 结论

本研究系统探讨了四种多组元共晶合金体系 $\text{Cr}_{(46-x)}\text{Ni}_{(34+x)}\text{Co}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=7, 6, 5, 4$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(37+x)}\text{Fe}_{10}\text{V}_{10}$ ($x=8, 7, 6, 5$)、 $\text{Cr}_{(43-x)}\text{Ni}_{(33+x)}\text{Co}_8\text{Fe}_8\text{V}_8$ ($x=5, 4, 3, 1$) 和 $\text{Cr}_{(47+x)}\text{Ni}_{(33-x)}\text{Co}_{10}\text{Fe}_{10}$

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yeh J W, Lin S J, Chin T S, et al. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35: 2533-2536.
- [3] 刘帅宾, 翟秋亚, 刘洋, 等. $\text{Ti}_x(\text{Fe}_{15}\text{Co}_{35}\text{Ni}_{35}\text{Cr}_{15})_{100-x}$ 高熵合金的微结构与力学性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 200-205.
- [4] Wang M, Lu Y, Zhang G, et al. A novel high-entropy alloy composite coating with core-shell structures prepared by plasma cladding [J]. Vacuum, 2021, 184: 109905.
- [5] 郑祺风, 吕威闫, 邱克强. 铸态 $(\text{Fe}_{33}\text{Cr}_{36}\text{Co}_{15}\text{Ni}_{15}\text{Ti}_1)_{96}\text{Al}_4$ 高熵合金力学性能及腐蚀行为 [J]. 铸造, 2024, 73 (2): 143-149.
- [6] 张静, 成裕吉, 陈景润, 等. 氮间隙固溶 $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_8\text{Fe}_{32}\text{Co}_{32}\text{Ni}_8$ 高熵合金组织及性能研究 [J]. 铸造, 2025, 74 (9): 1163-1171.
- [7] Fan L, Yang T, Zhao Y, et al. Ultrahigh strength and ductility in newly developed materials with coherent nanolamellar architectures [J]. Nature Communications, 2020, 11 (1): 6240.
- [8] 李珂, 张艳, 许波, 等. 再结晶温度对 $\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{10}\text{Fe}_{30}\text{Co}_{30}\text{Ni}_{10}$ 高熵合金组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2023, 72 (2): 125-129.
- [9] 阎亚雯, 余竹焕, 高炜, 等. 共晶高熵合金力学性能的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (增刊1): 333-339.
- [10] Lu Y, Dong Y, Guo S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys [J]. Scientific Reports, 2014, 4 (1): 6200.
- [11] Jin X, Xue Z, Mao Z, et al. Exploring multi-component

($x=0, 1, 2, 3$) 的显微组织及力学性能, 得到如下结论。

(1) 四种体系均由FCC+BCC相组成, Cr含量较低时, 合金由初生FCC枝晶相和FCC+BCC共晶组织组成, 随Cr含量增大, 合金逐渐转变为FCC+BCC双相层片共晶组织, Cr含量的进一步增大则会使合金转变为BCC初生相和共晶相的混合组织。

(2) 四种体系的相体积分数及硬度均与合金中Cr含量密切相关。随Cr含量增加, BCC相的体积分数, 合金硬度和强度均线性上升。

(3) Cr-Ni-Co-V体系中共晶及亚共晶成分合金具备优异的强塑性平衡, 过共晶成分合金塑性显著降低。Cr-Ni-Co-Fe体系中共晶成分及略微偏离共晶点的过共晶合金综合力学性能最优。

- eutectic alloys along an univariant eutectic line [J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 877: 145136.
- [12] 杨尚京, 王伟丽, 魏炳波. 深过冷液态Al-Ni合金中枝晶与共晶生长机理 [J]. 物理学报, 2015, 64 (5): 341-350.
- [13] Jaderson R D S, Felipe E S, Eshan G, et al. Effect of cooling rate on AlFe primary and eutectic phase growth evolution in an Al-2Fe-1Mn alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177870.
- [14] Lozinko A, Zhang Y, Mishin O V, et al. Microstructural characterization of eutectic and near-eutectic AlCoCrFeNi high-entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 822: 153558.
- [15] Ma Y, Jiang B, Li C, et al. The BCC/B2 morphologies in $\text{Al}_x\text{NiCoFeCr}$ high-entropy alloys [J]. Metals, 2017, 7 (2): 57.
- [16] Lu Y, Dong Y, Guo S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys [J]. Scientific Reports, 2014, 4 (1): 6200.
- [17] Jin X, Bi J, Zhang L, et al. A new CrFeNi₂Al eutectic high entropy alloy system with excellent mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 655-661.
- [18] Feng S, Guan S, Liu X, et al. Lightweight Co-free eutectic high-entropy alloy with high strength and ductility by casting [J]. Materials Research Letters, 2024, 12 (1): 26-33.
- [19] Mao Z, Jin X, Xue Z, et al. Understanding the yield strength difference in dual-phase eutectic high-entropy alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2023, 867: 144725.
- [20] Feng H, Zhi J W, Peng C, et al. Designing eutectic high entropy alloys of CoCrFeNiNb_x [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 656: 284-289.
- [21] 齐兆鑫, 梁卉, 赵延周, 等. Al含量对CoFeNi₂V_{0.5}高熵合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (9): 1047-1053.