

Al/Ti/Ta 合金化对 CoCrNi 中熵合金结构与性能的影响

龚祖荣, 李 栋, 张 锐, 李 傲, 王晓红, 苏云婷, 梁 骁, 马腾飞

(全省空气动力装备智能制造重点实验室, 浙江衢州 324000)

摘要: 通过向CoCrNi中熵合金中引入Al/Ti/Ta三种元素, 结合真空电弧熔炼, 制备了一系列 $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 中熵合金, 用以研究Al(原子分数, at.%) (1、3、5、7)、Ti(原子分数, at.%) (1、3、5、7)、Ta(0.5at.%)三种元素共掺杂对CoCrNi中熵合金微观结构演变以及力学性能的影响。结果表明, Al/Ti/Ta的引入能够促使在塑性的CoCrNi基体中生成脆性析出相。硬质第二相的析出能够在不明显降低CoCrNi中熵合金断裂应变的前提下显著提高其室温压缩强度和硬度。其中, $(\text{AlTi})_7\text{Ta}_{0.5}$ 合金表现出了良好的强塑性平衡, 压缩屈服强度和硬度分别达到了1.0 GPa和HV470左右, 但仍保持23.6%的断裂应变。微观结构表征表明, 析出强化和固溶强化是屈服强度和硬度增加的主要原因。

关键词: 中熵合金; 析出相; 微观组织; 力学性能; 共合金化; 析出强化; 抗压屈服强度; 强塑性平衡

中图分类号: TG113; TG146.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0841-08

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0108

Effects of Al/Ti/Ta Alloying on the Microstructure and Properties of CoCrNi Medium-Entropy Alloys

GONG Zu-rong, LI Dong, ZHANG Rui, LI Ao, WANG Xiao-hong, SU Yun-ting, LIANG Xiao, MA Teng-fei
(Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Aerodynamic Equipment, Quzhou 324000, Zhejiang, China)

Abstract: Through introducing three kinds of Al/Ti/Ta elements into the CoCrNi medium-entropy alloy, and combining with vacuum arc melting, a series of $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ medium-entropy alloys (MEAs) have been fabricated to investigate the effects of codoping with Al(atomic fraction, at.%) (1, 3, 5, 7), Ti(atomic fraction, at.%) (1, 3, 5, 7), and Ta(0.5at.%) on microstructural evolution and mechanical properties of the CoCrNi medium-entropy alloys. The results indicate that the inducing of Al/Ti/Ta can prompt brittle precipitate phases to generate within the ductile CoCrNi matrix. The precipitation of secondary hard phases can significantly enhance the room-temperature compressive strength and hardness without significantly decreasing the fracture strain of the CoCrNi medium-entropy alloy. Specifically, the $(\text{AlTi})_7\text{Ta}_{0.5}$ alloy exhibits an excellent strength-ductility balance, achieving a compressive yield strength of approximate 1.0 GPa and a hardness of HV470, respectively, while maintaining a high fracture strain of 23.6%. Microstructural characterizations reveal that the precipitation strengthening and solid solution strengthening are primary causes of the increment in yield strength and hardness.

Key words: medium-entropy alloy; precipitated phase; microstructure; mechanical property; co-alloying; precipitation strengthening; compressive yield strength; strength-ductility balance

具有优异综合性能的合金材料一直是人类科技进步的关键。然而, 随着人类开始涉足深空、深地和深海等极端环境, 目前的传统合金材料性能越来越难以满足这些特种领域的应用, 这引发了对新型高性能合金材料的迫切需求。2004年, Jien-Wei Yeh和Cantor以熵(entropy)作为核心设计原则所开发的高熵合金(High-entropy alloys, HEAs)在材料科学界引发了广

泛关注和深入探讨^[1-3]。与传统合金不同, 高熵合金通常由四到五种元素组成, 且原子比例近乎均等, 通常具有高熵、原子扩散缓慢、晶格畸变和“鸡尾酒”效应的特征^[4-5]。这些特性赋予了高熵合金优于传统合金的性能, 例如优异的低温韧性^[6-7]、催化性能^[8-9]和抗腐蚀性能^[10-12]。作为高熵合金设计理念的延伸, 近些年提出的中熵合金(Medium-entropy alloys, MEAs)也表

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目—全省空气动力装备智能制造重点实验室建设(No. 2025ZY01027)。

收稿日期: 2025-12-26 收到初稿, 2026-01-14 收到修订稿。

作者简介: 龚祖荣(2003-), 男, 研究方向为中熵合金力学性能调控。E-mail: gg3179811161@163.com

引用格式: 龚祖荣, 李栋, 张锐, 等. Al/Ti/Ta 合金化对 CoCrNi 中熵合金结构与性能的影响[J]. 铸造, 2026, 75(8): 841-848.

Gong Zurong, Li Dong, Zhang Rui, et al. Effects of Al/Ti/Ta alloying on the microstructure and properties of CoCrNi medium-entropy alloys[J]. Foundry, 2026, 75(8): 841-848.

现出远优于传统合金的综合性能^[13-14]。例如,具有面心立方结构的CrCoNi中熵合金在液氮温度下表现出高达1.3 GPa的断裂强度、90%的断裂应变以及275 MPa·m^{1/2}的断裂韧性值^[7]。尽管如此,面心立方高熵/中熵合金的屈服强度通常较低,这仍然是其作为工程应用中结构材料的主要限制。

合金化一直是调控金属材料微观结构与性能的最有效方法之一。最近的多项研究通过引入能够与高熵/中熵合金基体元素反应形成硬质第二相的元素,从而显著提高了高熵/中熵合金的屈服强度^[15-18]。研究表明该方法能有效激活固溶强化、沉淀强化及细晶强化等强化机制,从而实现更优的强度-延性平衡。例如,Zhao等人通过Al和Ti合金化,成功在CoCrNi中熵合金基体中引入了L1₂-(Ni, Co, Cr)₃(Ti, Al)型纳米颗粒^[17]。结果表明CoCrNiAl₃Ti₃中熵合金的屈服强度提升了70%,抗拉强度提高了44%,同时保持了大于40%的断裂应变。这种优异的强度-韧性平衡主要源于纳米增强相所诱导的沉淀强化效应。此外,Zhang等人通过优化化学成分和热加工工艺,设计了一种新型的(CoCrNi)Al₆Ta₂中熵合金^[19-20]。研究表明Al/Ta微量合金化不仅诱导了多种强化机制,包括固溶强化和细晶强化,而且大幅增强了基体的应变硬化能力。相比于CoCrNi合金,(CoCrNi)Al₆Ta₂中熵合金的室温屈服强度和极限拉伸强度分别增强了102%和35%,同时仍保持了50%以上的断裂应变。而且,随着温度降低至液氮温度,(CoCrNi)Al₆Ta₂中熵合金屈服强度和极限拉伸强度分别增加至800 MPa和1.35 GPa左右,断裂应变增加至90%左右。这种优异的低温力学性能源于纳米孪晶和层状堆叠位错的协同效应。基于相同的思路,Ding等人将Al/Ti/Ta三种元素同时引入CoCrNi中熵合金中,结合适当的热处理工艺,发现在未完全再结晶的晶粒中出现了纳米结构层、异质且连续的析出相,最终使得合金屈服强度增强了89%^[21]。因此,在FCC型高熵/中熵合金基体中引入一种或多种元素,诱导多种强化机制,进而增强基体强度已经被证明是实现合金优异强度-韧性平衡的一种有效手段。

考虑到已有研究表明,Al、Ti、Ta三种元素中一种、两种或三种元素的引入均能实现良好的强化效果。因此,本研究同时向CoCrNi中熵合金中引入Al、Ti和Ta三种元素,通过真空电弧熔炼制备了一系列不同Al/Ti/Ta含量的CoCrNi中熵合金,并系统研究了合金的相组成,微观结构演变以及包括室温压缩、硬度在内的室温力学性能,并阐明了基于硬质析出相的强韧化机制。

1 试验材料和方法

1.1 合金制备

试验所用的合金成分为(CoCrNi)_{99.5-2x}(AlTi)_xTa_{0.5}($x=1, 3, 5, 7$, at.%)。以高纯Co、Cr、Ni、Al、Ti和Ta(纯度≥99.99%)为原料,在高纯氩保护气氛下通过电弧熔炼制备成合金锭,对应编号依次为(AlTi)₁Ta_{0.5}、(AlTi)₃Ta_{0.5}、(AlTi)₅Ta_{0.5}和(AlTi)₇Ta_{0.5}。为确保成分均匀,每个铸锭翻转并重熔不少于5次。然后,使用线切割机从合金锭上切割出直径为4 mm、高度为6 mm的圆柱形试样用于后续压缩力学试验,同时切割出尺寸为5 mm×5 mm×1 mm的板状试样用于X射线衍射(XRD)测试和显微组织观察。

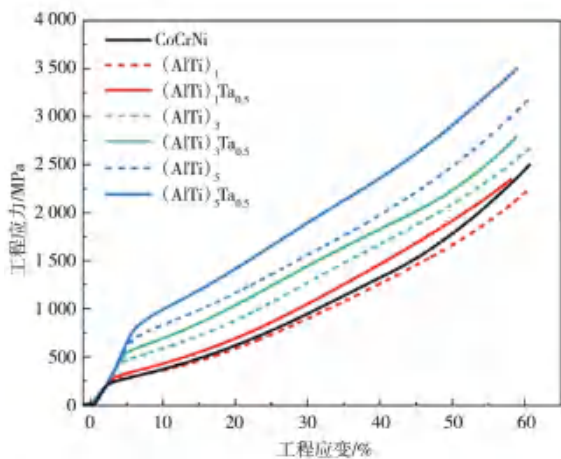
1.2 试验方法

样品相组成是通过XRD测试确定的,使用的是日本Rigaku的ULTIMA IV型X射线衍射仪。测试参数:扫描速率为5(°)/min,扫描范围为30°~90°,铜靶。使用日立SU8010扫描电子显微镜(SEM)和牛津能谱仪(EDS)对样品进行显微组织和微观结构表征。为了增强SEM表征效果,样品依次经过电解抛光,并使用高氯酸-酒精(体积比1:9)溶液进行腐蚀。室温静态压缩试验使用MTS SilentFlo 515试验台完成,应变速率为0.5 mm/min。为减少试验误差,每种成分测试3个试样。硬度测量使用的是美国HYHVS-1000T维氏硬度计,在10 N的载荷下保持15 s。对于每个样品,至少测量9个压痕以获取平均值。合金中析出相体积分数的量化采用商业软件ImageJ 1.0进行分析。

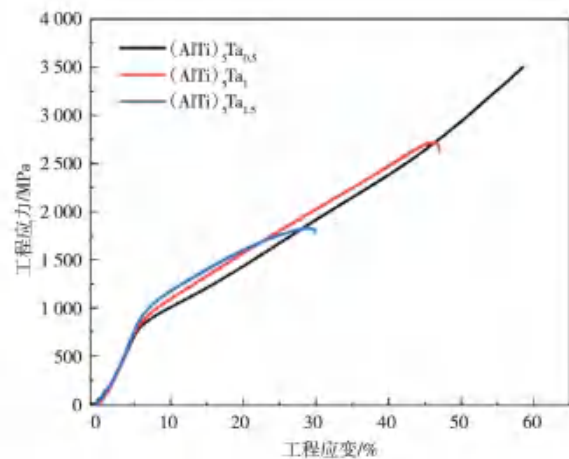
2 结果与分析

2.1 (CoCrNi)_{100-y-2x}(AlTi)_xTa_y中熵合金力学性能

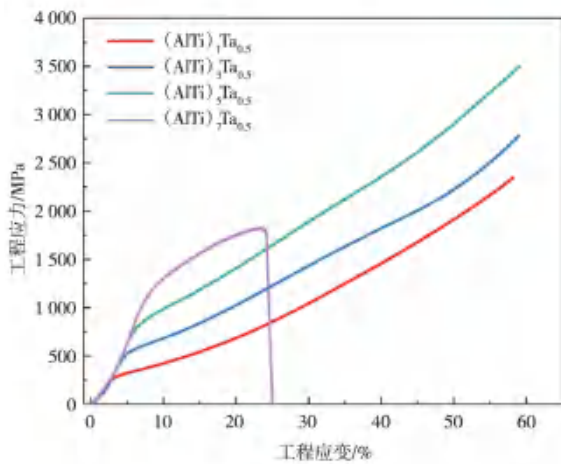
为了确定Al、Ti和Ta元素最佳配比,先进行了一系列(CoCrNi)_{100-y-2x}(AlTi)_xTa_y中熵合金室温压缩试验,用于对比不同元素对力学性能的增强效应。首先,对比了(AlTi)_x($x=1, 2, 3$)和(AlTi)_xTa_{0.5}($x=1, 2, 3$)的应力-应变曲线,并将对应的屈服强度和断裂应变整理在表1中。如图1(a)所示,所有合金在室温压缩变形阶段,均未出现明显的屈服行为,整个过程可以分为屈服前的弹性变形阶段和屈服后的塑性变形阶段。如图1(a)中虚线所示,当不引入Ta元素时,随着Al/Ti含量增加,合金屈服强度明显增加,由CoCrNi的199 MPa增加至(AlTi)₅的659 MPa。而且,塑性未发生恶化,应变大于50%仍未断裂。当掺



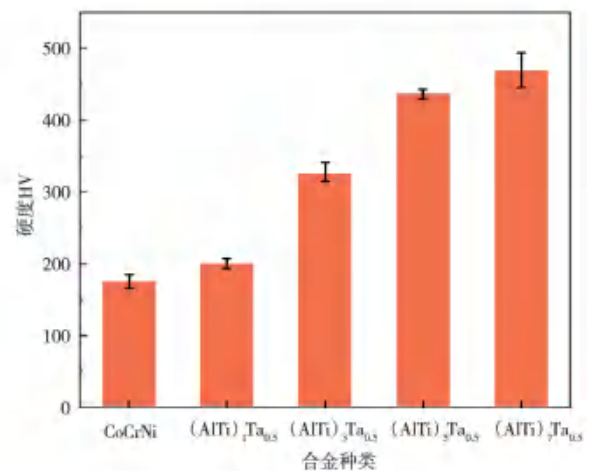
(a) $(\text{CoCrNi})_{100-2x-y}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_y$ ($x=1, 3, 5$; $y=0, 0.5$)
室温压缩应力-应变曲线



(b) $(\text{CoCrNi})_{90-y}(\text{AlTi})_5\text{Ta}_y$ ($y=0.5, 1, 1.5$)
室温压缩应力-应变曲线



(c) $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$)
室温压缩应力-应变曲线



(d) $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$) 的硬度

图1 $(\text{CoCrNi})_{100-y-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_y$ ($x=1, 3, 5, 7$; $y=0, 0.5$) 中熵合金的室温压缩曲线和硬度

Fig. 1 Room-temperature compressive curves and hardnesses of $(\text{CoCrNi})_{100-y-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_y$ ($x=1, 3, 5, 7$; $y=0, 0.5$) MEAs

表1 $(\text{CoCrNi})_{100-y-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_y$ ($x=1, 3, 5, 7$; $y=0, 0.5$) 中熵合金的屈服强度和断裂应变
Tab. 1 Yield strengths and fracture strains of $(\text{CoCrNi})_{100-y-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_y$ ($x=1, 3, 5, 7$; $y=0, 0.5$) MEAs

组分	屈服强度/MPa	断裂应变/%
CoCrNi	199	>50
$(\text{AlTi})_1$	235	>50
$(\text{AlTi})_1\text{Ta}_{0.5}$	258	>50
$(\text{AlTi})_3$	433	>50
$(\text{AlTi})_3\text{Ta}_{0.5}$	486	>50
$(\text{AlTi})_5$	659	>50
$(\text{AlTi})_5\text{Ta}_{0.5}$	742	>50
$(\text{AlTi})_7\text{Ta}_{0.5}$	1 006	23.6
$(\text{AlTi})_5\text{Ta}_1$	786	45.8
$(\text{AlTi})_5\text{Ta}_{1.5}$	902	29.5

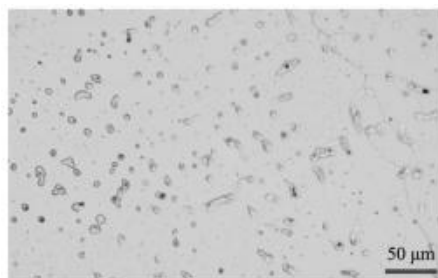
入0.5at.%Ta元素后,发现当Al/Ti含量相同时,在不损害塑性的前提下,引入Ta元素能够进一步提升屈服强度,如图1(a)中实线所示。为了确认Ta元素的最佳掺杂量,进一步增加了Ta含量,如图1(b)所示。可以发现,随着Ta含量的增加,屈服强度并没有明显增强,但塑性却明显恶化。综上所述,考虑到强塑性平衡,Al、Ti元素含量可以继续增加,但Ta元素添加必须要限制低含量(0.5at.%左右)。在固定Ta元素含量的前提下,对比了不同Al/Ti含量CoCrNiTa_{0.5}中熵合金的应力-应变曲线,如图1(c)所示。结合表1中数据,可以发现随着Al/Ti含量的增加,屈服强度显著增强,由CoCrNi的199 MPa增加至 $(\text{AlTi})_7\text{Ta}_{0.5}$ 的1 006 MPa。在塑性方面, $x=5$ 时,合金均表现出优异的塑性,当工程应变大于55%时,依然未发生断裂; $x=7$ 时,合金塑性显著降低,断裂应变约为23.6%。图1(d)是 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 系列合金的维氏硬度。如图所

示,随着AlTi含量的增加,硬度逐渐增大,由CoCrNi的HV175增加至HV469。

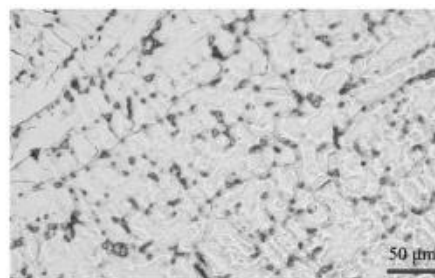
2.2 (CoCrNi)_{99.5-2x}(AlTi)_xTa_{0.5}中熵合金组织与结构

图2为真空电弧熔炼的铸态 (AlTi)_xTa_{0.5} ($x=1, 3, 5, 7$) 中熵合金腐蚀后的OM显微组织图片。CoCrNi中熵合金的微观结构在先前研究中已被详细报道过,可参考文献[22]。如图2(a)所示,当加入少量Al/Ti/Ta时,相比于CoCrNi,合金微观组织变化并不

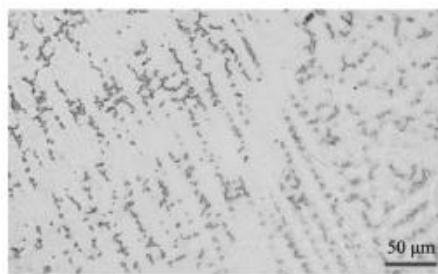
明显,除了少量分布在基体上的颗粒($\sim 1\ \mu\text{m}$),推测应该是金属间化合物的析出相。随着Al/Ti含量增加至3at.%,可以观察到典型的亚共晶结构,主要由FCC的枝晶和枝晶间区域组成,如图2(b)所示。在枝晶间区域,可以观察到大量颗粒状的析出相,尺寸在3~4 μm 。随着Al/Ti含量进一步增加至5at.%,可以发现枝晶间区域内的析出相含量明显提高。分布形态由原来的零散颗粒转变为互相连接状。当Al/Ti含量增加至7at.%时,析出相含量显著增加,尺寸也增加至>50 μm 。



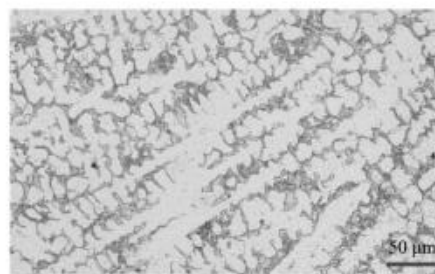
(a) (AlTi)₁Ta_{0.5}



(b) (AlTi)₃Ta_{0.5}



(c) (AlTi)₅Ta_{0.5}



(d) (AlTi)₇Ta_{0.5}

图2 (AlTi)_xTa_{0.5} ($x=1, 3, 5, 7$) 中熵合金组织的金相图

Fig. 2 Metallographs of (AlTi)_xTa_{0.5} ($x=1, 3, 5, 7$) MEAs

为了进一步研究 (AlTi)_xTa_{0.5} ($x=1, 3, 5, 7$) 中熵合金的微观结构,获得了更高分辨率的SEM图片及对应的EDS面扫元素分布,如图3所示。同时,将EDS面扫的各元素含量以及BCC相的体积分数汇总在表2中。如图3(a)所示, (AlTi)₁Ta_{0.5}合金腐蚀之后仅有少量析出相颗粒存在,体积分数仅为0.14%。随着Al/Ti含量增加到3at.%和5at.%,析出相的尺寸明显增大,如图3(b)和(c)所示,体积分数也分别增加到了6.23%和16.62%。当Al/Ti含量进一步增加至7at.%时,析出相形态由之前分散的条状或块状转变成互相连接的网状,且析出相的体积分数进一步增加至34.69%。结合EDS结果,可以发现,对于 (AlTi)₁Ta_{0.5}合金,枝晶和枝晶间区域元素分布几乎相同,未发现明显的元素偏聚,说明Al/Ti/Ta主要溶解在晶格中。当Al/Ti含量增加至3at.%及更高时,析出相富含Al、Ti和Ni元素,Cr含量显著降低,这与已有研究结果相符合^[21-23]。

图4(a)是CoCrNi和 (AlTi)_xTa_{0.5} ($x=1, 3, 5,$

7)系列合金的XRD曲线。在无Al/Ti/Ta添加的CoCrNi合金中,仅观察到面心立方(FCC)结构的特征衍射峰,如空心菱形所示。当添加1at.% Al/Ti和0.5at.% Ta时,XRD曲线相较于CoCrNi合金未发生明显变化,同样只存在FCC结构的特征峰。这主要是因为此时的BCC相体积分数过低(0.14%),XRD无法探测到。然而,当Al/Ti含量达到5at.%时,在44°的位置上出现了新的衍射峰。根据PDF卡片数据和已有研究^[24-25],这些峰对应于BCC相。将图4(a)中各组分(111)_{FCC}晶面对应的2 θ 提取出来并绘制随成分变化的曲线,如图4(b)所示。对于CoCrNi中熵合金,(111)_{FCC}晶面对应特征峰在43.98°。当添加1at.% Al/Ti和0.5at.% Ta时,特征峰峰位偏移至43.86°。增加Al/Ti含量至3at.%时,特征峰峰位继续缩小至43.64°。随着Al/Ti含量进一步增加至7at.%,特征峰峰位增加随后降低。根据特征峰峰位所对应的2 θ ,计算出了相应的晶格常数。如图4(b)所示,随着Al/Ti/Ta元素的引入,晶格常数开始迅速增

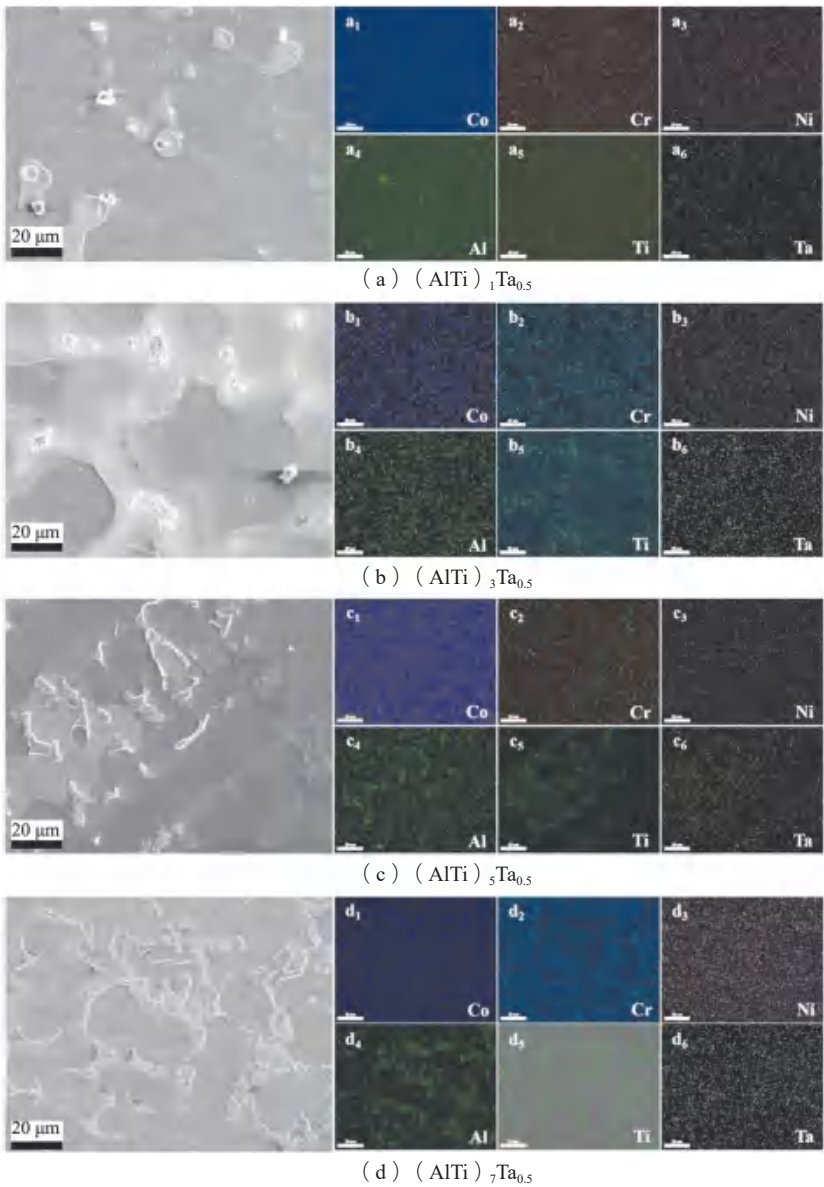


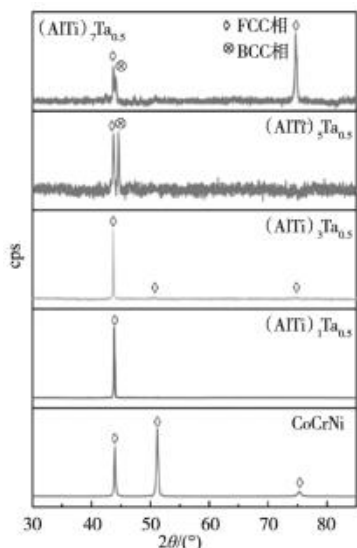
图3 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$) 中合金的SEM图及对应的EDS面扫元素分布
Fig. 3 SEM images and corresponding EDS elemental maps of the $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$) MEAs

表2 铸态 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$) 中合金的化学组分 (at.%) 和BCC相体积分数 (f_{BCC} , %)
Tab. 2 Chemical compositions (at.%) of the as-cast $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ ($x=1, 3, 5, 7$) and the volume fractions of BCC phases (f_{BCC} , %)

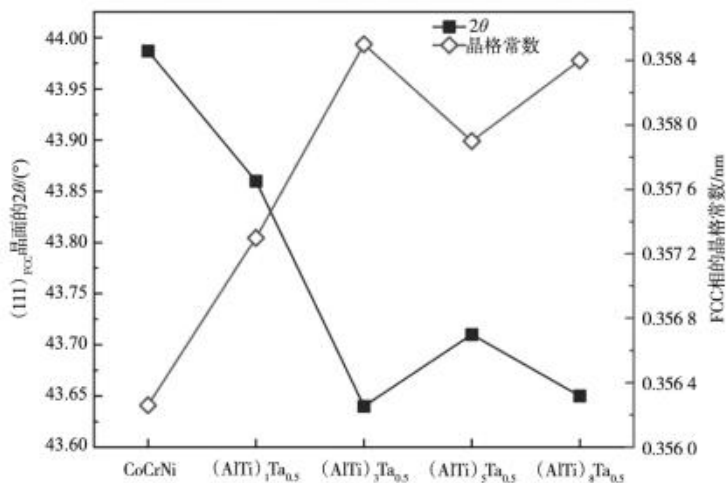
成分	区域	Co	Cr	Ni	Al	Ti	Ta	f_{BCC}
$(\text{AlTi})_1\text{Ta}_{0.5}$	名义	32.5	32.5	32.5	1	1	0.5	0.14
	枝晶干	34.66	32.6	30.47	1.16	0.98	0.14	
	枝晶间	34.44	31.71	30.26	1.39	1.85	0.34	
$(\text{AlTi})_3\text{Ta}_{0.5}$	名义	31.16	31.16	31.16	3	3	0.5	6.23
	枝晶干	34.12	30.96	30.9	1.67	2.26	0.09	
	枝晶间	28.6	12.11	38.35	3.96	15.23	1.75	
$(\text{AlTi})_5\text{Ta}_{0.5}$	名义	29.83	29.83	29.83	5	5	0.5	16.62
	枝晶干	30.88	32.33	30.4	3.27	3.04	0.07	
	枝晶间	22.61	9.35	32.14	18.96	16.14	0.8	
$(\text{AlTi})_7\text{Ta}_{0.5}$	名义	28.5	28.5	28.5	7	7	0.5	34.69
	枝晶干	30.2	31.77	26.56	7.6	3.71	0.15	
	枝晶间	26.78	21.08	27.9	13.21	10.64	0.39	

加。这是由于三种元素的原子半径均大于CoCrNi，固溶进入晶格后导致明显的晶格畸变，晶格常数增大，相应地衍射角减小。这与上述EDS面扫结果相验证，因为EDS表明前期Al/Ti/Ta元素分布均匀，未发生明显

偏聚，说明其主要溶于晶格当中。但是当Al/Ti含量进一步增加至5at.%时，晶格常数又开始减小。结合图4(a)中新相的出现，晶格常数的减小是析出相的形成使晶格间隙中固溶的Al/Ti/Ta大量减少导致的。



(a) XRD曲线



(b) (111)_{FCC}晶面 2θ 和晶格常数的变化

图4 CoCrNi和 $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 系列合金的XRD曲线和(111)_{FCC}晶面 2θ 及其晶格常数

Fig. 4 XRD patterns, 2θ values and lattice constants of (111)_{FCC} lattice plane for CoCrNi and $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ series alloys

2.3 $(\text{CoCrNi})_{99.5-2x}(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 中熵合金增强机制

为了量化析出强化和固溶强化对于合金力学性能的影响，绘制了屈服强度随析出相体积分数和原子错配度的关联图，如图5所示。对于 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 合金，其结构可以看作是硬质析出相分散在塑性的FCC基体中，近似于复合材料。合金总体强度由基体和析出相的单一强度及所占体积分数共同决定，该关系可以用如下公式表示^[26]：

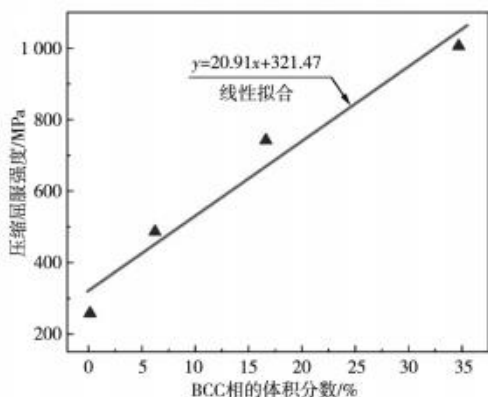
$$\sigma_{\text{Overall}} = \sigma_{\text{BCC}} \cdot V_{\text{BCC}} + \sigma_{\text{Matrix}} \cdot V_{\text{Matrix}} \quad (1)$$

其中， σ_{BCC} 和 σ_{Matrix} 分别代表析出相和基体的强度，而 V_{BCC} 和 V_{Matrix} 分别代表析出相和基体的体积分数。考虑到 $V_{\text{BCC}} + V_{\text{Matrix}} = 1$ ，因此上式又可以改写成：

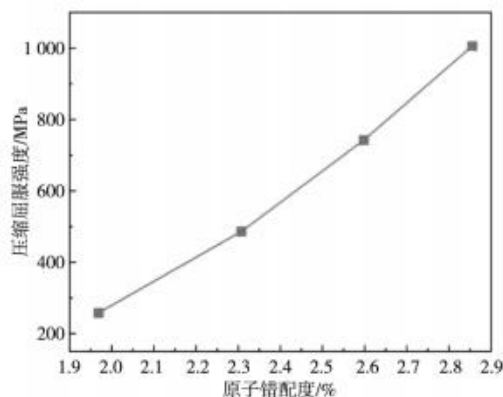
$$\sigma_{\text{Overall}} = \sigma_{\text{Matrix}} + V_{\text{BCC}} \cdot (\sigma_{\text{BCC}} - \sigma_{\text{Matrix}}) \quad (2)$$

如图5(a)所示，可以发现 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 合金屈服强度与BCC体积分数的变化呈线性关系，说明上述理论可以有效地解释 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 合金的增强机制。此外，计算了不同成分的原子错配度 δ ，计算公式如下^[27]：

$$\delta = 100 \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i (1 - r_i / \sum x_i r_i)^2} \quad (3)$$



(a) 压缩屈服强度随BCC相体积分数的变化



(b) 压缩屈服强度随原子错配度的变化

图5 $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ 中熵合金压缩屈服强度随BCC相体积分数和原子错配度的变化

Fig. 5 Compressive yield strength variations versus volume fraction of BCC phase and atomic mismatches of $(\text{AlTi})_x\text{Ta}_{0.5}$ MEAs

式中： n 、 r_i 和 x_i 分别是组成元素的总数、原子半径和浓度。

(CoCrNi)_{99.5-2x}(AlTi)_xTa_{0.5}合金的元素浓度、原子半径和原子错配度汇总在表3中。可以发现，随着AlTi含量的逐渐增加，原子错配度也在增大。如图5(b)所示，原子错配度与压缩屈服强度呈正相关，说明固溶强化也是合金力学性能增强的机制之一。综上

表3 (AlTi)_xTa_{0.5}中熵合金的元素浓度、原子半径和原子错配度

Tab. 3 Elemental concentrations, atomic radii, and atomic mismatches of (AlTi)_xTa_{0.5} MEAs

项目	原子分数/%						
	Co	Cr	Ni	Al	Ti	Ta	δ
(AlTi) ₁ Ta _{0.5}	32.5	32.5	32.5	1	1	0.5	1.968 6
(AlTi) ₃ Ta _{0.5}	31.17	31.17	31.16	3	3	0.5	2.307 5
(AlTi) ₅ Ta _{0.5}	29.84	29.83	29.83	5	5	0.5	2.598 2
(AlTi) ₇ Ta _{0.5}	28.5	28.5	28.5	7	7	0.5	2.855 5
$r_i/\text{\AA}$	1.35	1.4	1.35	1.25	1.4	1.45	

所述，随着AlTi的引入，合金力学性能的增强源于析出强化和固溶强化的协同作用。

2.4 (AlTi)₇Ta_{0.5}中熵合金断裂失效机理

在室温压缩测试中，仅(AlTi)₇Ta_{0.5}发生了断裂，因此，这里仅对(AlTi)₇Ta_{0.5}进行断裂失效机理分析。如图6所示，(AlTi)₇Ta_{0.5}中熵合金的室温压缩断裂形貌非常平滑，几乎没有塑性变形，即呈现典型的脆性断裂特征。如图6(a)和(b)所示，可以观察到裂纹沿层状结构扩展，裂纹前沿呈现锯齿状，表明在压缩断裂过程中存在局部塑性变形与脆性开裂的交替作用。考虑到(AlTi)₇Ta_{0.5}中熵合金的结构，这种交替作用主要是由塑性FCC基体和脆性析出相导致的。此外，大量的解理台阶和撕裂棱等形貌表明了典型的解理断裂特征。图6(c)和(d)是更高倍数的裂纹SEM图片，可见裂纹两侧存在少量孔洞，这是析出相在断裂过程中被拔出的特征。综上所述，相较于其他合金成分，(AlTi)₇Ta_{0.5}中熵合金塑性显著降低的主要原因在于塑性基体中大量脆性第二相的析出。

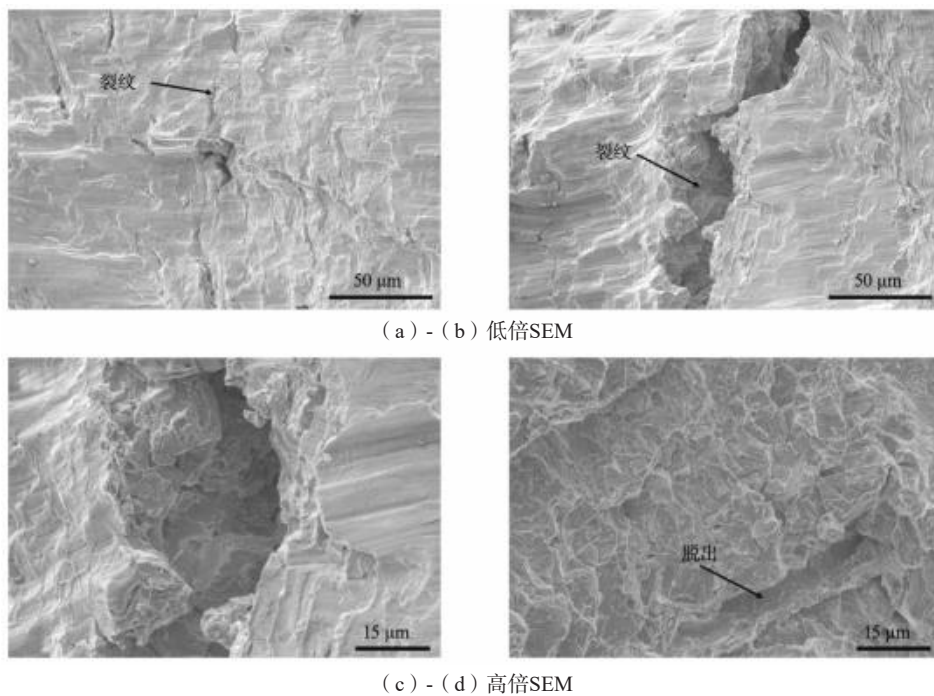


图6 (AlTi)₇Ta_{0.5}中熵合金的室温压缩断口SEM图像

Fig. 6 SEM images of the room-temperature compression fractures of (AlTi)₇Ta_{0.5} MEAs

3 结论

研究了Al/Ti/Ta共合金化对CoCrNi中熵合金相组成、微观结构和力学性能的影响。基于以上结果，可以得到如下结论：

(1) Al/Ti/Ta合金化的方法在CoCrNi塑性基体中

引入了硬脆的析出相，说明主要富含Al/Ti/Ni元素。

(2) 富Al/Ti/Ni析出相提高了TiAl复合材料室温压缩性能和硬度，且其断裂应变没有明显降低。其中，(AlTi)₇Ta_{0.5}合金表现出了良好的强塑性平衡，压缩屈服强度和硬度分别达到了1.0 GPa和HV470左右，但仍保持23.6%的断裂应变。

参考文献:

- [1] Cantor B, Chang I, Knight P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 375: 213–218.
- [2] Yeh J W, Chen Y L, Lin S J, et al. High-entropy alloys-a new era of exploitation [J]. *Materials Science Forum*, 2007, 560: 1–9.
- [3] 梁秀兵, 魏敏, 程江波, 等. 高熵合金新材料的研究进展 [J]. *材料工程*, 2009 (12): 75–79.
- [4] George E P, Raabe D, Ritchie R O. High-entropy alloys [J]. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4 (8): 515–534.
- [5] Miracle D B, Senkov O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts [J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448–511.
- [6] Wu Z, Bei H, Pharr G M, et al. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures [J]. *Acta Materialia*, 2014, 81: 428–441.
- [7] Gludovatz B, Hohenwarter A, Thurstion K V, et al. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures [J]. *Nature Communications*, 2016, 7 (1): 10602.
- [8] Jia Z, Yang T, Sun L, et al. A novel multinary intermetallic as an active electrocatalyst for hydrogen evolution [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32 (21): 2000385.
- [9] Cui Y, Wang Y, Li B, et al. Grain boundary segregation engineering in high-entropy multiphase alloys for overall water splitting at ultra-high current density [J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2026, 383: 124567.
- [10] Wang J, Zhang Z, Dai H, et al. Enhanced corrosion resistance of CoCrFeMnNi high entropy alloy using heterogeneous structure design [J]. *Corrosion Science*, 2022, 209: 110761.
- [11] Yan X, Guo H, Yang W, et al. Al_{0.3}CrFeCoNi high-entropy alloys with high corrosion resistance and good mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 158436.
- [12] 于源, 谢发勤, 张铁邦, 等. AlCoCrFeNiTi_{0.5}高熵合金的组织控制和腐蚀性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41 (5): 862–866.
- [13] Gudovatz B, Hohenwarter A, Catoor D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications [J]. *Science*, 2014, 345 (6201): 1153–1158.
- [14] 薛雨杰, 李双元, 王正品, 等. 热轧对CoCrNi中熵合金微观组织和性能的影响 [J]. *西安工业大学学报*, 2019, 39 (2): 179–184.
- [15] Zou J P, Luo X M, Zhang B, et al. Achieving ultrahigh fatigue resistance of Al₁₅ (CoCrNi)₈₅ medium-entropy alloy with deformable multicomponent BCC phases [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 891: 145985.
- [16] Xu D, Zhang H, Wang M, et al. Enhanced strength-ductility synergy in a Ta-doped CoCrNi medium-entropy alloy with a dual heterogeneous structure [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2022, 860: 144293.
- [17] Zhao Y L, Yang T, Tong Y, et al. Heterogeneous precipitation behavior and stacking-fault-mediated deformation in a CoCrNi-based medium-entropy alloy [J]. *Acta Materialia*, 2017, 138: 72–82.
- [18] 张丽, 赵晖, 张伟强, 等. Si含量对CoCr_{0.4}NiSi₁中熵合金室温力学性能的影响研究 [J]. *铸造*, 2025, 75 (5): 602–609.
- [19] Zhang D D, Zhang J Y, Kuang J, et al. Achieving excellent strength-ductility synergy in twinned NiCoCr medium-entropy alloy via Al/Ta co-doping [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 87: 184–195.
- [20] Zhang D D, Zhang J Y, Kuang J, et al. Superior strength-ductility synergy and strain hardenability of Al/Ta co-doped NiCoCr twinned medium entropy alloy for cryogenic applications [J]. *Acta Materialia*, 2021, 220: 117234.
- [21] Ding Z, Xie J, Wang T, et al. Ta-induced strengthening of CoCrNi-AlTi medium-entropy alloys via nanoscale heterogeneous coherent precipitate [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2024, 891: 145978.
- [22] 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.
- [23] Huang X, Huang L, Peng H, et al. Enhancing strength-ductility synergy in a casting non-equiatomic NiCoCr-based high-entropy alloy by Al and Ti combination addition [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 200: 113845.
- [24] Qi W, Wang W, Yang X, et al. Effect of Zr on phase separation, mechanical and corrosion behavior of heterogeneous CoCrFeNiZr high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 109: 76–85.
- [25] Rathod B D S, Gholizadeh R, Park M H, et al. Effect of Zr micro-alloying on microstructure refinement and mechanical property of CoCrNi medium-entropy alloy processed by high-pressure torsion and subsequent annealing [J]. *Journal of Materials Science*, 2023, 59 (14): 5736–5753.
- [26] Lu W, Luo X, Yang Y, et al. Effects of Nb additions on structure and mechanical properties evolution of CoCrNi medium-entropy alloy [J]. *Materials Express*, 2019, 9: 291–298.
- [27] Jiang S, Wu B, Xu Z, et al. Effects of atomic radius mismatch and Burgers vector magnitude on tensile properties of the Ti50-ZrVNbCr medium-entropy alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1002: 175420.