

微量稀土 Y 对 $\text{AlCrMo}_{0.5}\text{NbV}$ 体系难熔高熵合金组织和性能的影响

汪天天¹, 蒋文韬¹, 姜 博¹, 王 晔¹, 朱冬冬², 许红雨¹, 胡茂良¹

(1. 哈尔滨理工大学材料科学与化学工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040;

2. 台州学院材料科学与工程学院, 浙江台州 318000)

摘要: 采用真空电弧熔炼的方法制备了一系列含微量稀土Y的 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 难熔高熵合金, 系统研究了Y元素对 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 所有合金均呈现单一体心立方(BCC)结构, Y含量变化不改变相组成。Y含量较低($\leq 0.3\text{at.}\%$)时, 各元素分布均匀; 当Y含量增加至 $0.45\text{at.}\%$ 时, 因超出固溶极限, Y元素发生偏聚析出。1 273 K下的高温压缩试验表明, Y含量为 $0.15\text{at.}\%$ 时, 合金的屈服强度和峰值强度达到最大值(632 MPa、716 MPa), 较未添加Y的合金分别提升30.4%和10.8%, 但其断裂应变从 $>50\%$ 降至45.8%。分析表明, 适量的Y可通过晶格畸变产生的固溶强化来提升合金强度, 但会抑制位错滑移, 导致塑性下降; 过量Y则会偏聚形成脆性析出相, 削弱强化效果, 导致塑性降低。

关键词: 难熔高熵合金; AlCrMoNbV ; 稀土元素Y; 微观组织; 压缩性能; 真空电弧熔炼

中图分类号: TG146.2; TG132.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0835-06

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0107

The Influence of Trace Rare Earth Y on the Microstructure and Properties of Refractory High-Entropy Alloy $\text{AlCrMo}_{0.5}\text{NbV}$ System

WANG Tian-tian¹, JIANG Wen-tao¹, JIANG Bo¹, WANG Ye¹,

ZHU Dong-dong², XU Hong-yu¹, HU Mao-liang¹

(1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: A series of refractory high-entropy alloys $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ containing trace rare earth Y were prepared via vacuum arc melting, and the effects of Y on the microstructure and properties of $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ alloys were systematically investigated. The results show that all of the alloys have a single body-centered cubic (BCC) structure, and the variation of Y content does not affect the phase composition of the $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ alloys. When the Y content is relatively low ($\leq 0.3\text{at.}\%$), each element distributes uniformly; when the Y content increases to $0.45\text{at.}\%$, the element Y generates segregation and precipitation because it exceeds the solid solubility limit of the alloy. The high-temperature compression test under 1 273 K shows that when the Y content is $0.15\text{at.}\%$, the yield strength and peak strength of the alloy reach the maximum values (632 MPa, 716 MPa), which are 30.4% and 10.8% higher than those of the alloy without Y, respectively, however, the fracture strain decreases from $>50\%$ to 45.8%. Analysis shows that an appropriate amount of Y enhances the strength through solid solution strengthening caused by lattice distortion, but it inhibits the dislocation slip, resulting in the plasticity decrease; excessive Y content will lead to segregation of Y and form brittle phases, weakening the strengthening effect and resulting in the plasticity decrease.

Key words: refractory high-entropy alloy; AlCrMoNbV ; rare earth element Y; microstructure; compressive properties; vacuum arc melting

高效率与长续航一直是航空航天、能源化工以及重工业领域的核心发展目标。无论是航空发动机、工业燃气轮机还是重型装备动力系统, 在面对愈加严峻

的高温、高压和强腐蚀服役环境时, 传统镍基高温合金由于自身熔点的固有制约, 其高温强度、抗蠕变性能与组织稳定性的提升已接近材料本身的极限^[1-2]。而

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52071188)。

收稿日期: 2025-12-22 收到初稿, 2026-03-03 收到修订稿。

作者简介: 汪天天(1999-), 女, 博士生, 主要从事高熵合金成分设计及高温性能的研究工作。E-mail: 1172323830@qq.com

通信作者: 王晔, 男, 教授。E-mail: wangye1984@hrbust.edu.cn; 姜博, 男, 副教授。E-mail: jiangbo@hrbust.edu.cn

引用格式: 汪天天, 蒋文韬, 姜博, 等. 微量稀土 Y 对 $\text{AlCrMo}_{0.5}\text{NbV}$ 体系难熔高熵合金组织和性能的影响[J]. 铸造, 2026, 75(8): 835-840.

Wang Tiantian, Jiang Wentao, Jiang Bo, et al. The influence of trace rare earth Y on the microstructure and properties of refractory high-entropy alloy $\text{AlCrMo}_{0.5}\text{NbV}$ system [J]. Foundry, 2026, 75(8): 835-840.

传统合金“以单一主元为核心、辅以少量合金元素掺杂”的设计策略,也逐渐暴露出成分调控空间狭窄、性能优化维度单一的短板,不仅难以突破自身的性能瓶颈,更无法满足航空航天、能源化工、重工业等领域对高效率、长续航装备的跨越式发展需求,因此开发兼具强韧性与抗腐蚀性的新型高温材料迫在眉睫。难熔高熵合金(RHEAs)在高熵合金本身固有的四大效应加持下,难熔元素的存在更使其在高温环境下具有出色的表现,如优异的高温强度、抗蠕变性、组织稳定性等^[3-6]。而包含五种或五种以上主元的设计理念也赋予其广阔的设计空间,因此难熔高熵合金也被视为有望替代传统高温合金的新一代高温合金。

研究表明,Kang等人采用电火花烧结(SPS)制得的 $\text{Al}_{0.1}\text{CrNbVMo}$ 合金不仅具备低于一些传统镍基高温合金的密度(7.96 g/cm^3),在室温以及 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温环境下,其压缩强度分别可达 $2\,863\text{ MPa}$ 、 1405 MPa ,展现出优异的高温力学性能^[7]。此外,被称为“工业维生素”的稀土元素,不仅可以优化合金的强度、抗蠕变性,对耐腐蚀性也有显著的改善效果,近年来被积极地应用于钢铁、铝合金等传统合金的改性中^[8]。而难熔高熵合金普遍存在室温变形能力不足以及高温抗氧化性欠佳等问题,基于此,一些研究人员也聚焦于探索稀土元素对难熔高熵合金的影响。我国稀土资源储量在全球位居前列,更为未来的研究提供了有力支撑。相关研究表明,适量的Y元素除了可以提升难熔高熵合金的强度以外,还具备细化晶粒的能力,以此达到提升合金韧性的目的^[9-10]。Du等人更是发现向 CrMoTaTi 难熔高熵合金中添加Y元素可以降低Cr在表面形成 Cr_2O_3 的临界浓度,并促进 Cr_2O_3 和 Ta_2O_5 反应生成致密且连续的 CrTaO_4 保护层,使得合金在 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温下持续氧化 100 h 也具有有良好的抗氧化性^[11]。

对于不同的合金体系来说,Y元素带来的影响并不绝对,对一些新型难熔高熵合金具体的影响机制尚未清晰。因此本研究在具有高强度以及较低密度的 $\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V}$ 合金体系基础上,添加微量稀土元素Y,探究Y含量对 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0$ 、 $0.15\text{at.}\%$ 、 $0.3\text{at.}\%$ 和 $0.45\text{at.}\%$)合金的微观结构以及力学性能的影响,为未来深入解析稀土元素Y在难熔高熵合金中的作用机制、丰富难熔高熵合金的强化理论体系提供参考。为了便于后续讨论,按照Y含量将四种合金分别定义为 Y_0 、 $\text{Y}_{0.15}$ 、 $\text{Y}_{0.3}$ 和 $\text{Y}_{0.45}$ 合金。

1 试验方法

本研究设计的一系列 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金均选用DHL-500 II型非自耗真空电弧熔炼炉进行制备,所有金属原料的纯度均 $>99.9\text{wt.}\%$,按照熔点由低

到高的顺序依次放入炉内。为了保证熔炼完全以及成分均匀,熔炼过程中开启磁搅拌功能,并反复熔炼至少5次。采用配备了Cu靶($\lambda=1.540\,6\text{ \AA}$)的德国布鲁克(BRUKER)公司的D8 Advance型X射线衍射仪在 $20^\circ\sim 100^\circ$ 范围内对合金进行扫描,管电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA 。 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的显微组织表征选用HITACHI公司SU8010冷场发射扫描电子显微镜,该设备配备背散射电子(BSE)及能量散射谱仪(EDS)探头。试样依次用 $400^\#$ 、 $600^\#$ 、 $800^\#$ 、 $1\,200^\#$ 、 $1\,500^\#$ 和 $2\,000^\#$ 的砂纸进行打磨,最后,采用BUEHLER公司的VibroMet2型振动抛光机对待测试样品进行抛光处理。高温压缩试验使用日本的Thermecmastor型力学试验机,压缩试样为尺寸 $\Phi 6\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的圆柱,依次用由低到高目数的砂纸进行打磨,直至上下表面平行且无明显划痕,以降低应力对室温压缩性能试验的影响。为减少随机误差的影响,每组试样需进行3到5次重复测试。

2 试验结果与分析

2.1 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的相预测

一般来说,当元素含量存在差异时,同一体系的高熵合金在相组成上也会呈现出不同的特点^[12]。高熵合金除了能够形成固溶体相之外,还有生成金属间化合物相的可能。相关研究表明,仅由单一固溶体相构成的高熵合金,常常因为强度方面的不足,难以契合工程结构材料的性能标准^[13-14]。而金属间化合物虽然有助于提升合金整体的强度,但是含量过多时,伴随而来的脆性也会使高熵合金的实际生产应用大打折扣^[13]。基于上述原因,在开展新型高熵合金体系的研究工作之前,很有必要对合金的相组成进行预测。根据经典的相形成预测公式计算了 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的混合焓(ΔH_{mix})、混合熵(ΔS_{mix})、熔点(T_m)、价电子浓度(VEC)及原子尺寸差异(δ)等参数,在成分设计时简单地评估了Y元素增加对合金固溶相的影响,公式如下^[15-16]:

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4c_i c_j \Delta H_{ij}^{\text{mix}} \quad (1)$$

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \quad (2)$$

$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i (T_m)_i \quad (3)$$

$$Q = \frac{T_m \Delta S_{\text{mix}}}{|\Delta H_{\text{mix}}|} \quad (4)$$

$$\delta = 100\% \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(\left(1 - r_i \left(\sum_{i=1}^n c_i r_i \right) \right)^2 \right)} \quad (5)$$

$$\text{VEC} = \sum_{i=1}^n c_i (\text{VEC})_i \quad (6)$$

计算得到了一系列的相关参数分别列于表1。根据固溶体形成准则 ($\Omega \geq 1.1$, $\delta \leq 6.6\%$, $-20 < \Delta H_{\text{mix}} < 5 \text{ kJ/mol}$)^[15-16], 可以得出 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金均满足以上判据, 都容易形成稳定的固溶体。四组不同Y含量的 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的VEC值均 < 6.87 , 易形成BCC相。另外, 由分析数据可知, 随Y含量增加, $-\Delta H_{\text{mix}}$ 逐渐减小, 表明Y的加入降低了体系能量, 从11.75 kJ/mol减小到11.52 kJ/mol, 可能影响合金的形成与稳定性。随Y含量增加, ΔS_{mix} 逐渐增大, 从13.14 kJ/mol增加到13.33 kJ/mol, 体现了熵稳定效应, 符合高熵合金的特征。 T_m 随Y含量增加逐渐降低, 从2 215 K降低到2 113 K, 说明Y的加入可能弱化原子间结合力, 影响合金的高温性能。 Ω 值和VEC值整体波动较小和几乎保持不变。说明Y含量对该参数影响不显著, 对合金影响较小。

表1 计算得到的参数 ΔH_{mix} , ΔS_{mix} , T_m , Ω , δ 和 VEC
Tab. 1 Parameters ΔH_{mix} , ΔS_{mix} , T_m , Ω , δ and VEC obtained by calculation

合金	$-\Delta H_{\text{mix}}/$ (kJ·mol ⁻¹)	ΔS_{mix} (kJ·mol ⁻¹)	T_m/K	Ω	$\delta/\%$	VEC
Y ₀	11.75	13.14	2 215	2.48	2.24	4.88
Y _{0.15}	11.67	13.21	2 115	2.39	2.38	4.88
Y _{0.3}	11.60	13.28	2 114	2.42	2.53	4.88
Y _{0.45}	11.52	13.33	2 113	2.44	2.68	4.88

2.2 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的相组成

图1给出了 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ ($x=0$ 、0.15at.%、0.3at.%和0.45at.%) 合金的XRD图谱。结果

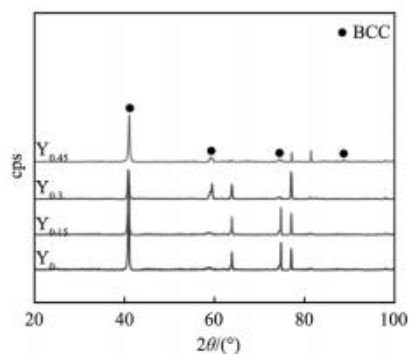


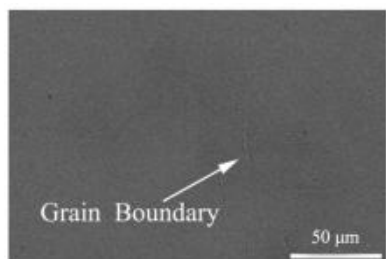
图1 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 难熔高熵合金XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of the $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ refractory high-entropy alloys

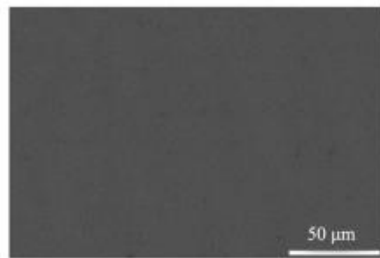
表明, 所有合金均呈现出单一BCC结构, Y的添加并未对合金的相结构产生影响, 这与相预测的结果一致。根据布拉格方程计算了四种合金的实际晶格常数, 分别为0.310 83、0.310 38、0.211 72、0.312 19 nm, 呈现先降低后上升的趋势。这可能由于Y具有比其他元素较大的原子半径, 当Y含量处于较低的范围时, 晶格常数随着Y含量的增加而减小, 衍射峰向小角度偏移。但是当Y含量增至0.45at.%时, 超出合金本身的固溶极限, 部分Y原子无法融入基体晶格, 引发晶格畸变加剧, 导致晶格常数显著增大, 因此可以认为Y元素含量的变化在该合金体系中对相结构有调控作用。然而, 由于Y的添加量较小, XRD中并未直接检测到含Y化合物衍射峰的存在。

2.3 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金的微观组织

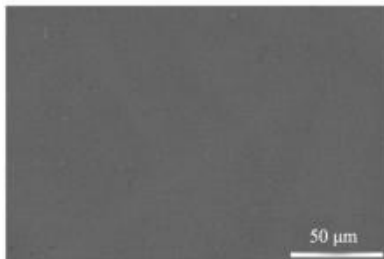
$(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 的SEM图像和EDS面扫描结果分别如图2、图3所示, 结果表明Y元素添加对合金



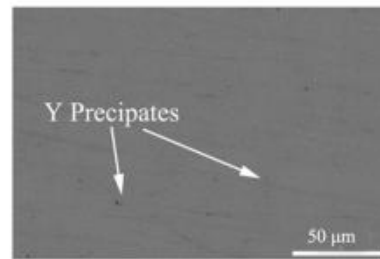
(a) Y₀合金



(b) Y_{0.15}合金



(c) Y_{0.3}合金



(d) Y_{0.45}合金

图2 铸态 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 难熔高熵合金背散射电子 (BSE) 图像

Fig. 2 BSE images of the as-cast $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ refractory high-entropy alloys

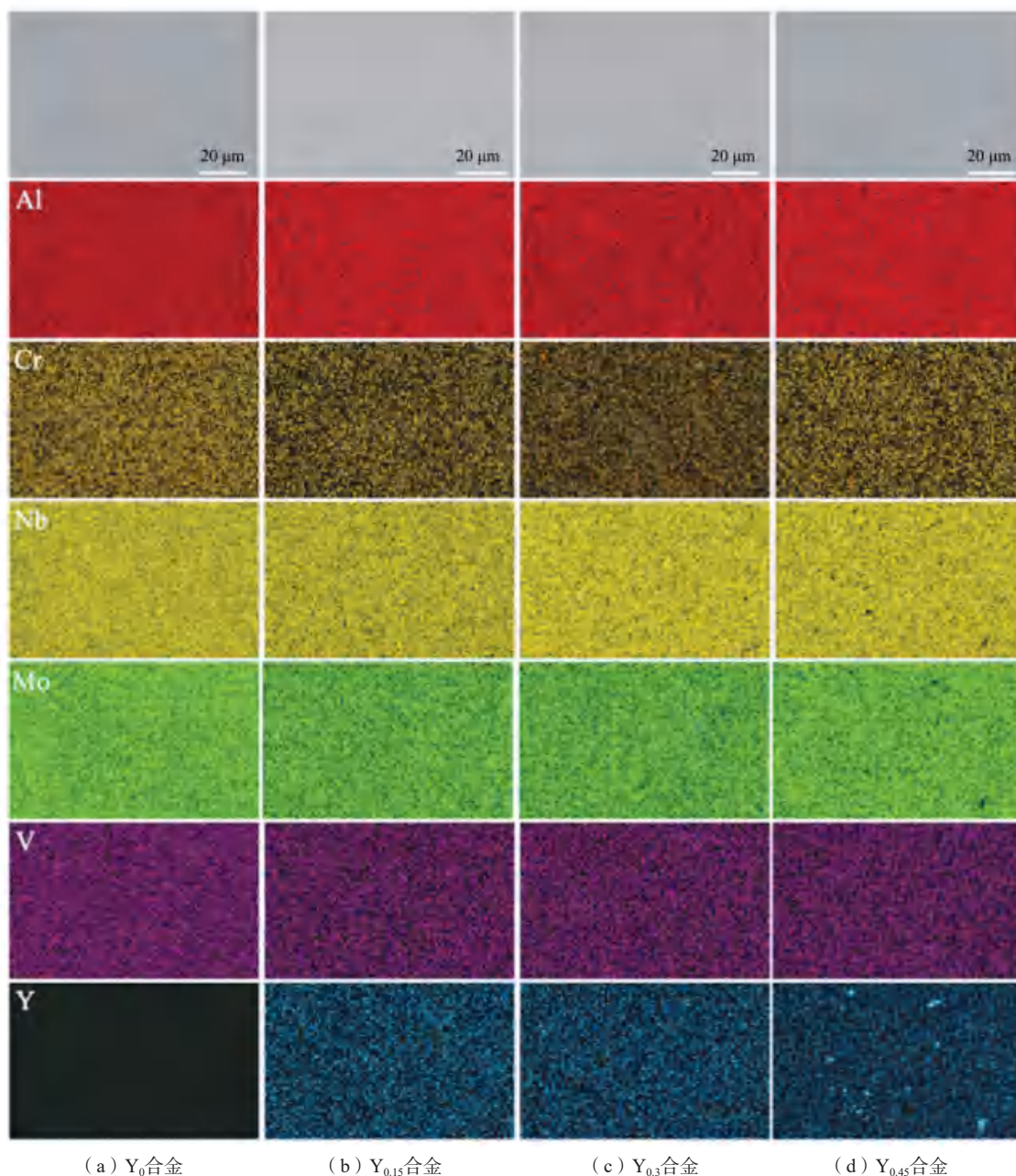


图3 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 难熔高熵合金元素分布面扫描图像

Fig. 3 The elemental distribution map scanning results of the $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ refractory high-entropy alloys

微观组织有着显著的影响。在未添加Y的 $\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V}$ 合金中，如图2(a)所示，所有元素分布较均匀，可以看到比较明显的晶界。当Y含量较小时($\leq 0.3\text{at.}\%$)，已经不能观察到清晰的晶界，但Y和其他元素依旧均匀地分布在合金中。这种转变可能与Y元素添加引起的晶格畸变效应和扩散动力学变化有关。随着Y含量提升至 $0.45\text{at.}\%$ ，观察到有大量Y元素析出，说明合金微观组织存在一定的成分不均匀性或凝固过程中的偏析现象，这可能由于该含量超出合金的固溶极限，超过固溶度的Y原子无法融入基体晶格，便会发生偏聚析出。

2.4 稀土Y对 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金力学性能的影响

图4所示为 $(\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V})_{100-x}\text{Y}_x$ 合金在 $1\,273\,\text{K}$ 温度下的工程应力-应变曲线，表2列出了试验获得的四组合金的屈服强度(σ_y)、峰值强度(σ_p)和压缩断裂应变(ϵ)的具体数值。加入Y后，屈服强度从 Y_0 合金的 $495\,\text{MPa}$ 提升至 $\text{Y}_{0.15}$ 合金的 $632\,\text{MPa}$ ，但是随着Y含量的进一步增加，屈服强度降至 $\text{Y}_{0.3}$ 合金的 $608\,\text{MPa}$ 和 $\text{Y}_{0.45}$ 合金的 $457\,\text{MPa}$ ，呈现先升后降趋势，这表明适量Y可显著强化屈服强度，过量则不利于合金的强度。而峰值强度的变化趋势同样先增后减， $\text{Y}_{0.15}$ 合金具有最佳的

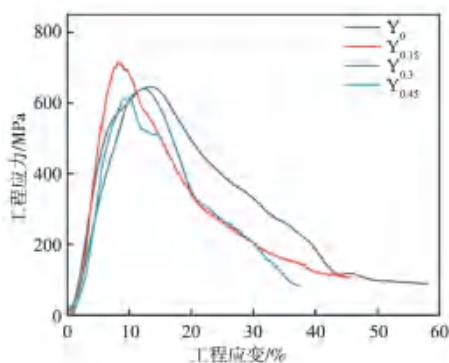


图4 (AlCrNbMo_{0.5}V)_{100-x}Y_x合金在1 273 K下的工程应力-应变曲线

Fig. 4 The engineering stress-strain curves of the (AlCrNbMo_{0.5}V)_{100-x}Y_x alloys at 1 273 K

表2 试验获得的四组不同Y含量的AlCrNbMo_{0.5}V合金的压缩力学性能

Tab. 2 The compressive mechanical properties of the AlCrNbMo_{0.5}V alloys with four different Y contents obtained experimentally

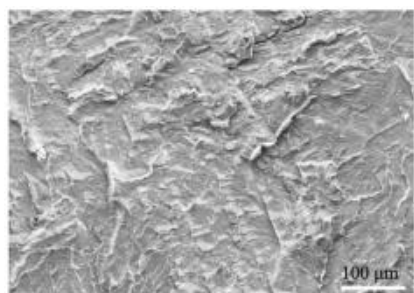
合金	屈服强度/MPa	峰值强度/MPa	断裂应变/%
Y ₀	459	646	> 50
Y _{0.15}	632	716	45.8
Y _{0.3}	608	640	37.2
Y _{0.45}	457	615	15.2

强度, 为716 MPa。此外, 断裂应变从Y₀合金的50%, 降为Y_{0.15}合金的45.8%, Y_{0.3}合金的37.2%, 到Y_{0.45}合金骤降至15.2%, 呈现持续下降态势, 表明Y的加入会降

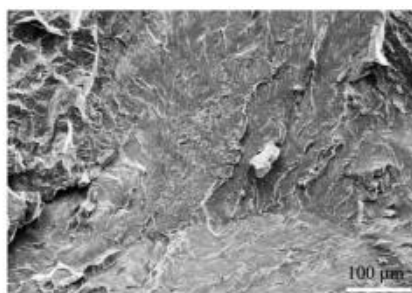
低合金塑性, 且随Y含量增加, 塑性下降更显著。

当未引入稀土Y时, AlCrNbMo_{0.5}V合金为单相固溶体, 此时的合金仅依赖固溶强化, 强度处于基础水平; 当0.15at.%的Y加入合金后, 虽然组织中未观察到明显析出相, 但少量Y原子固溶于基体中会加剧晶格畸变, 增强了对位错运动的阻碍作用, 且未破坏基体连续性, 因此使Y_{0.15}合金的强度达到峰值; Y的添加量增加至0.3at.%时, 元素分布情况与Y_{0.15}合金类似, 未形成独立析出相, 但是Y固溶在基体中引起的晶格畸变的强化效应已超过极限, 而晶格过度畸变不仅会导致晶格结构失稳, 还会产生晶格缺陷, 不但不能阻碍位错运动, 反而有助于位错进一步的扩展, 因此导致Y_{0.3}合金强度较Y_{0.15}合金略有下降; 当Y含量进一步增加至0.45at.%时, Y元素发生了明显的析出, 过量Y引发的析出相分布不均以及晶格畸变过度, 破坏了基体的连续性, 而析出相界面也容易形成应力集中, 最终导致Y_{0.45}的强度发生大幅度降低, 这也与XRD中Y_{0.45}合金晶格常数发生骤变的结果相契合。综上所述, 适量稀土元素Y的固溶是提升强度的关键, 而过量Y引发的析出相分布不均及过度的晶格畸变则会恶化力学性能。

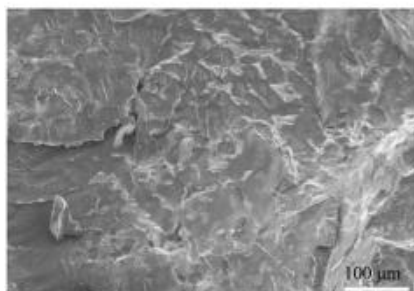
(AlCrNbMo_{0.5}V)_{100-x}Y_x合金1 273 K压缩后的断口形貌如图5所示。合金不含Y时可观察到一些解理台阶, 呈现河流花样, 为典型的脆脆混合断裂。Y_{0.15}合金的断口形貌与Y₀合金类似, 但是解理台阶分布相对密集, 对应了Y_{0.15}合金具有最佳的力学强度。随着Y含量进一步增加, 解理台阶的尺寸不断变大, 撕裂棱愈加



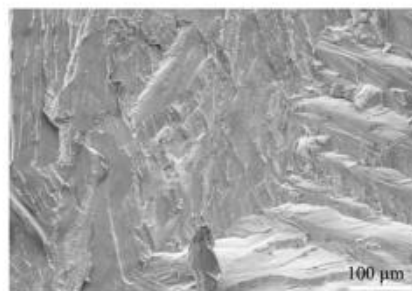
(a) Y₀合金



(b) Y_{0.15}合金



(c) Y_{0.3}合金



(d) Y_{0.45}合金

图5 (AlCrNbMo_{0.5}V)_{100-x}Y_x合金在1 273 K压缩后的断口形貌

Fig. 5 The fracture morphologies of the (AlCrNbMo_{0.5}V)_{100-x}Y_x alloys after compression at 1 273 K

明显,这也印证了合金的断裂应变随着Y含量的增加而降低。此时合金的断裂方式已转变为脆性断裂。其中Y_{0.45}合金的解理台阶最大,对应了其塑性最差的特征。

3 结论

(1) 通过固溶体判据 ($\Omega \geq 1.1$ 、 $\delta \leq 6.6\%$ 、 $-20 < \Delta H_{\text{mix}} < 5$ kJ/mol) 分析表明, ($\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V}$)_{100-x}Y_x合金均满足稳定固溶体形成条件。XRD结果显示,四种合金均为单一体心立方(BCC)结构。Y含量的增加并未改变($\text{AlCrNbMo}_{0.5}\text{V}$)_{100-x}Y_x合金体系的相组成。

(2) SEM结果表明,未添加Y时可观察到明显的晶界且所有元素分布均匀;当Y含量为0.15at.%~0.3at.%时,元素的分布情况并未发生改变;而Y含量增至0.45at.%

时,合金中出现较为明显的Y析出相,表明过量Y会导致Y元素发生偏聚析出,影响组织稳定性。

(3) 高温压缩试验(1 273 K)表明,稀土Y对合金强度与塑性的影响呈现显著剂量效应,屈服强度与峰值强度随Y含量增加呈先升后降趋势。Y_{0.15}合金的屈服强度(632 MPa)和峰值强度(716 MPa)达到最大值,较Y₀合金分别提升30.4%和10.8%;当Y含量增至0.45%时,强度回落至接近Y₀合金水平,表明适量Y可通过固溶强化提升强度,但过量Y会因析出相分布不均以及晶格畸变过度而削弱强化效果。断裂应变随Y含量增加持续下降,从Y₀的>50%降至Y_{0.45}合金的15.2%,表明Y的引入会降低合金塑性,且含量越高塑性恶化越明显。

参考文献:

- [1] Xu K, Jiang H, Yan J B, et al. Tensile properties and deformation mechanisms of a solution treated Ni-Fe-based alloy at high temperatures [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 221: 145418.
- [2] Li Y, Cockings H, Mignanelli P M, et al. High temperature corrosion-fatigue behavior of a shot peened nickel based superalloy [J]. Corrosion Science, 2022, 207: 110577.
- [3] Yang X, Qin G, Feng L, et al. Development of high-strength and high-ductility high-entropy alloys via directional solidification: a multifaceted strengthening approach [J]. International Journal of Plasticity, 2025, 191: 104403.
- [4] Senkov O N, Wilks G B, Miracle D B, et al. Refractory high-entropy alloys [J]. Intermetallics, 2010, 18: 1758-1765.
- [5] 吴一栋. Ti-Zr-Nb系难熔高熵合金的组织结构与强化机理 [D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [6] Li X T, Miao J W, Lu Y P, et al. Effect of Zr on the as-cast microstructure and mechanical properties of lightweight Ti₂VNbMoZr_x refractory high-entropy alloys [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 103: 105762.
- [7] Kang B C, Lee J H, Ryu H J, et al. Microstructure, mechanical property and Hall-Petch relationship of a light-weight refractory Al_{0.1}CrNbVMo high entropy alloy fabricated by powder metallurgical process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 767: 1012-1021.
- [8] 贺毅强, 钱思成, 顾航, 等. 稀土元素对高熵合金组织和性能的影响 [J]. 材料导报, 2024, 38 (增刊2): 448-456.
- [9] Cui J X, Yang M, Liu G L, et al. Work-hardening ability enhancement of lightweight high entropy alloys via adding yttrium [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 970: 172734.
- [10] 陈时杰. 机械合金化—放电等离子体烧结制备WTaCrVTi(Y)高熵合金的组织结构与性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [11] Du Y H, Ding D Y, Lai L M, et al. Effect of Y on the high-temperature oxidation behavior of CrMoTaTi refractory high entropy alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2022, 103: 105755.
- [12] Shun T T, Hung C H, Lee C F. The effects of secondary elemental Mo or Ti addition in Al_{0.3}CoCrFeNi high-entropy alloy on age hardening at 700 °C [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495: 55-58.
- [13] Senkov O N, Wilks G B, Scott J M, et al. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys [J]. Intermetallics, 2011, 19: 698-706.
- [14] Stepanov N D, Yurchenko N Y, Shaysultanov D G, et al. Effect of Al on structure and mechanical properties of Al_xNbTiVZr (x=0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys [J]. Materials Science and Technology, 2015, 31 (10): 1184-1193.
- [15] 张勇, 周云军, 陈国良. 快速发展中的高熵溶体合金 [J]. 物理, 2008 (8): 600-605.
- [16] Zhang Y, Zhou Y J, LIN J P, et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10 (6): 534-538.