

Y对WTaCrVTi高熵合金的组织结构与力学性能的影响

陈时杰 张世荣 薛丽红 严有为 张五星

Effect of Y on the microstructure and mechanical properties of WTaCrVTi high-entropy alloys

CHEN Shijie, ZHANG Shirong, XUE Lihong, YAN Youwei, ZHANG Wuxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240912.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳化物陶瓷颗粒对双相高熵合金基复合材料微观组织和力学性能的影响

Effect of carbide ceramic particles on the microstructure and mechanical properties of dual-phase high-entropy alloy matrix composites

复合材料学报. 2023, 40(5): 3047–3059 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220617.001>

球磨时间对自钝化钨合金的组织结构和抗氧化性能的影响

Effect of ball milling time on microstructure and oxidation resistance of self-passivating W alloys

复合材料学报. 2023, 40(8): 4531–4538 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221115.001>

激光熔覆(CrFeNiAl)_{100x}Mo_x高熵合金涂层的组织及耐磨耐蚀性能

Microstructure, wear and corrosion resistance of (CrFeNiAl)_{100x}Mo_x high-entropy alloy coatings by laser cladding

复合材料学报. 2023, 40(11): 6311–6323 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230222.008>

电子束重熔对机械合金化法制备TiC/Ti复合涂层组织及摩擦性能的影响

Effect of electron beam remelting on microstructure and tribological properties of TiC/Ti composite coating prepared by mechanical alloying

复合材料学报. 2019, 36(1): 167–177 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180511.001>

(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Ti_{0.2}Me_{0.2})B₂(Me=V, W)高熵硼化物陶瓷的制备与性能

Preparation and properties of (Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Ti_{0.2}Me_{0.2})B₂(Me=V, W) high entropy boride ceramics

复合材料学报. 2022, 39(5): 2405–2411 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210805.004>

异质层状钛合金增材构件微观组织与力学性能

Microstructure and mechanical properties of heterogeneous layered titanium alloy components fabricated via additive manufacturing

复合材料学报. 2022, 39(12): 6017–6027 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220711.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

Y 对 WTaCrVTi 高熵合金的组织结构与力学性能的影响



分享本文

陈时杰, 张世荣, 薛丽红*, 严有为, 张五星

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: WTaCrVTi 高熵合金具有良好的力学性能和抗辐照性能, 且各组元具有低中子活化特性, 可用于核聚变堆的中子辐照环境中, 因此, 该合金在核聚变堆中具有潜在的应用前景。但该合金在制备过程中易发生元素偏析和富集, 造成组织结构不均匀, 为了提高组织结构的均匀性, 采用机械合金化法结合放电等离子体烧结技术制备了 WTaCrVTi₆Y_x 高熵合金, 研究了 Y 对合金的组织结构和力学性能的影响。结果表明: 未添加 Y 的合金包含固溶体、TiO₂、Laves 相和富 Ta 相。具有 BCC 结构的固溶体为基体, 其中 W、Ta、Cr、V 的原子比趋于等原子比; TiO₂ 颗粒的平均尺寸为 (1.08±0.38) μm, 均匀分布在基体中; Laves 相和富 Ta 相零星分布在基体中。而添加了 6at% Y 的合金主要包含 BCC 结构的固溶体和 Y₂O₃ 颗粒, Y₂O₃ 颗粒的平均尺寸约为 (1.25±0.85) μm, 固溶体的 W、Ta、Cr、V 的原子比趋于 1, 该合金的室温压缩屈服强度和硬度分别为 2 674 MPa 和 HV (848.6±9.3)。

关键词: 高熵合金; 机械合金化; 放电等离子体烧结; 微观结构; 均匀性; 力学性能

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)02-1100-08

Effect of Y on the microstructure and mechanical properties of WTaCrVTi high-entropy alloys

CHEN Shijie, ZHANG Shirong, XUE Lihong*, YAN Youwei, ZHANG Wuxing

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: WTaCrVTi high entropy alloys have excellent mechanical properties and irradiation resistance, and the individual components have low neutron activity, which can be used in the neutron irradiation environment of nuclear fusion reactors. Thus, they have potential applications in nuclear fusion reactors. However, elemental segregation and enrichment exist in the alloys during the preparation process, resulting in an inhomogeneous microstructure. In order to improve the homogeneity of the microstructures, mechanical alloying combined with spark plasma sintering was adopted to prepare WTaCrVTi₆Y_x high entropy alloys. The effects of Y content on the microstructure and mechanical properties of high-entropy alloys were explored. It is found that the alloys without Y addition include the solid solution, TiO₂ particles, laves phases and Ta-rich phases. The solid solution with BCC structure is the matrix, and the atomic ratios of W, Ta, Cr and V are close to be equal. The TiO₂ particles are uniformly distributed in the matrix with an average particle size of (1.08±0.38) μm. The laves and the Ta-rich phases are sporadically distributed in the matrix. While, the alloys with the addition of 6at% Y is mainly composed of the solid solution with BCC structure and Y₂O₃ particles. The average size of Y₂O₃ particles is about (1.25 ± 0.85) μm. And the atomic ratios of W, Ta, Cr, and V in the BCC phase tend to be 1. The room-temperature compressive yield

收稿日期: 2024-06-19; 修回日期: 2024-08-27; 录用日期: 2024-08-28; 网络首发时间: 2024-09-12 15:23:06

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240912.001>

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项 (2018YFE0306104); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题基金 (P2023-024)

National Research Project on the Development of Magnetic Confinement Nuclear Fusion Energy (2018YFE0306104); Open Research Fund of the State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology (P2023-024)

通信作者: 薛丽红, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为功能/结构复合材料 E-mail: xuelh@hust.edu.cn

引用格式: 陈时杰, 张世荣, 薛丽红, 等. Y 对 WTaCrVTi 高熵合金的组织结构与力学性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 1100-1107.

CHEN Shijie, ZHANG Shirong, XUE Lihong, et al. Effect of Y on the microstructure and mechanical properties of WTaCrVTi high-entropy alloys[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 1100-1107(in Chinese).

strength and hardness of this alloy reach 2 674 MPa and HV (848.6 ± 9.3), respectively.

Keywords: refractory high-entropy alloy; mechanical alloying; spark plasma sintering; microstructure; homogeneous; mechanical properties

钨被认为是核聚变堆中面向等离子体第一壁的候选材料^[1-3],但其存在韧脆转变温度高、再结晶温度低、抗高温氧化性能差、辐照脆化、高热负荷开裂熔化、等离子刻蚀严重等缺点。这些缺点导致纯 W 无法完全满足未来核聚变堆服役的环境需求,因此,探索开发新型 W 基材料是推进核聚变反应堆应用的关键之一。

难熔高熵合金 (Refractory high-entropy alloys, RHEAs)^[4]是以等摩尔比或近等摩尔比混合多种高熔点元素,如 Hf、Nb、Ta、Mo、W 等前过渡族金属元素,具有一些传统合金无法比拟的优异性能,如高强度、高硬度、高耐磨性能、高温稳定性、抗氧化性能及抗辐照性能等^[5-10]。因此,难熔高熵合金在核聚变堆中具有潜在的应用前景。

2019 年,El-Atwani 等^[11]采用磁控溅射法制备了纳米晶 WTaCrV 高熵合金薄膜,该合金薄膜具有高硬度和杰出的抗辐照性能。Waseem 等^[12]采用机械混粉和放电等离子体烧结技术制备出块体 WTaCrVTi_x 高熵合金,研究了 Ti 对高熵合金组织结构的影响,发现 Ti 有助于 BCC 固溶体的形成,当 Ti 含量为 7at% 时,合金的压缩强度和硬度分别为 2 069 MPa 和 HV 714。由于 W、Ta、V、Cr 和 Ti 元素具有低中子活化特性,可用于核聚变堆的中子辐照环境中,因此,WTaCrVTi 系高熵合金开始引起研究者的关注。WTaCrVTi 合金的制备一般采用磁控溅射^[11,13-14]、电弧熔炼法^[15-18]和粉末冶金法^[19-21]。由于合金含有多种组元,制备过程中易发生元素偏析和富集,不仅造成合金中固溶体的各组元比例偏离等原子比,而且存在大量富 Ta 相、富 Cr 相、Laves 相和氧化物等,合金的组织结构不均匀。

Y 是一种常用的合金元素,烧结过程中它能促使其他高熔点金属元素的扩散,改善钨合金的组织结构^[22]。另外,Y 与 O 有更高的反应活性,可形成 Y₂O₃ 颗粒,Y₂O₃ 弥散分布在基体中,钉扎在晶界处,可抑制晶粒长大^[23]。

因此,为了进一步改善 WTaCrVTi 合金的组织结构,本文采用机械合金化 (Mechanical alloying, MA) 结合放电等离子体烧结 (Spark plasma sintering, SPS) 制备了 WTaCrVTi₆Y_x 高熵

合金,研究了 Y 含量对合金的组织结构和力学性能的影响。

1 实验材料及方法

实验原材料为 W 粉 (纯度 99.98%, 1~5 μm), Ta 粉 (纯度 99.9%, ~325 目), Cr 粉 (纯度 99.5%, ≥ 325 目), V 粉 (纯度 99.5%, ≥325 目), Ti 粉 (纯度 99.99%, ≥300 目) 和 Y 粉 (纯度 99.9%)。采用文献^[3]的 MA 和 SPS 工艺制备高熵合金。按照 W_{23.5-x/4}Ta_{23.5-x/4}Cr_{23.5-x/4}V_{23.5-x/4}Ti₆Y_x (x=0at%、2at%、4at%、6at%) 计量比称量,在 QM-3 SP4 型 (南京南大仪器有限公司) 行星球磨机上进行球磨,转速为 250 r/min,球磨时间为 40 h。将球磨后的粉末在日本 SinterLand 的 LABOX-1575 型放电等离子体烧结炉中进行烧结,以 100℃/min 的速率升温至 1 500℃,在 50 MPa 压力下保温 10 min,然后随炉冷却。最终获得圆柱形烧结试样,直径为 20 mm,厚度为 4 mm。为了便于叙述,不同 Y 含量的粉末或合金记为 Y_x (x 表示 Y 元素原子比)

将圆柱体试样的上下两面依次采用 600、800 目金刚石砂纸打磨,然后采用线切割技术将烧结样品切割为直径 4 mm、高 6 mm 的圆柱形压缩试样。

采用 X 射线衍射仪 (XRD, X'pert PRO, 荷兰) 分析材料的物相组成,管电压 40 kV,管电流 30 mA,射线源为 Cu-Kα;采用扫描电子显微镜 (SEM, Nova NanoSEM 450, 荷兰)、能谱仪 (EDS) 及电子探针 X 射线显微分析仪 (EPMA, JXA-8530F PLUS, 日本) 分别检测材料的显微结构和成分。

采用万能材料试验机 (Universal Material Tester, Zwick Z020, 德国) 测试合金的压缩强度;采用维氏硬度计 (Wilson Hardness, 430SVD, 美国) 测定合金的硬度,负载为 15 kg,保压时间 10 s,测量 5 次后取平均值。

合金块体使用 ZY-300Z 型密度天平测量样品的实际密度 ρ_a,其原理是通过阿基米德排水法测量。利用无序固溶体的理论密度公式 (1) 计算 HEAs 的理论密度 ρ_{theor},公式如下:

$$\rho_{\text{theor}} = \frac{\sum C_i A_i}{\sum C_i A_i / \rho_i}$$

(1)

式中： ρ_i 为组元的密度； A_i 为组元的原子质量； C_i 为组元的含量。

根据下式计算合金的相对密度 R_c ：

$$R_c = \frac{\rho_a}{\rho_{theor}} \times 100\%$$

(2)

2 结果与讨论

2.1 不同 Y 含量的合金粉末的显微结构

图 1 是不同 Y 含量的合金粉末的 XRD 图谱。从图谱中可观测到 W、Ta、Cr、V、Ti 各组元的衍射峰，在添加 Y 的粉末中还观察到了 Y_2O_3 的衍射峰。相较 Ti、Cr 等元素，Y 对 O 元素的亲和力最大。因此，在球磨过程中，Y 会与粉末中残留的 O_2 优先反应形成稳定的 Y_2O_3 ，并随着 Y 含量的增加， Y_2O_3 衍射峰的强度明显增加。

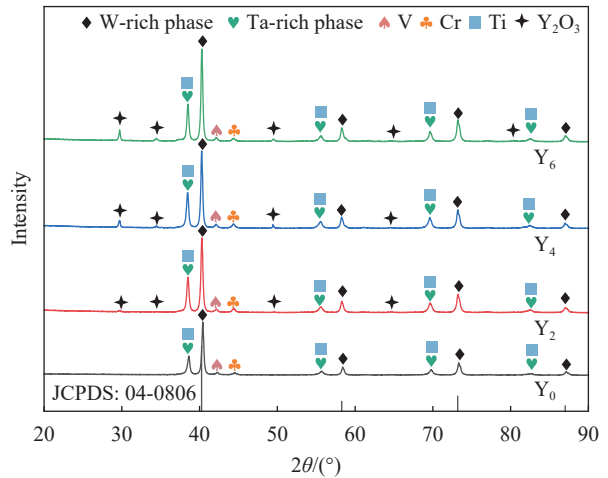


图 1 WTaCrVTi₆Y_x 合金粉末的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the WTaCrVTi₆Y_x alloy powders

图 2 为合金粉末的背散射 SEM 图像。随着 Y 含量的增加，合金粉末的形态由不规则片状逐渐变为小尺寸的等轴颗粒，形态和尺寸趋于均匀。这表明 Y 的添加可促进合金粉末颗粒的细化。这是由于 Y 在高能球磨过程中，可与各元素固溶，从而引起粉末颗粒硬化，降低粉末的塑性变形能力，使粉末破碎为小尺寸的细颗粒。添加的 Y 含量越多，Y 固溶的越多，粉末细化效果越显著^[24]。合金粉末颗粒的细化使其具有更大的表面积和更高的反应活性，可以促进烧结组织的致密化和均匀化。

2.2 不同 Y 含量的合金的组织结构

将不同 Y 含量的合金粉末在 1 500℃ 进行 SPS 烧结，得到块体合金。图 3 是不同 Y 含量的 WTaCrVTi₆Y_x 高熵合金的 XRD 图谱。所有合金均

包含 BCC 相和 FCC 相，Y₀、Y₂ 和 Y₄ 合金中还观察到 Laves 相。随着 Y 含量的增加，合金中的 FCC 相和 Laves 相的衍射峰的数量和强度逐渐下降。另外，添加 Y 的 Y₂、Y₄ 和 Y₆ 合金中观察到了 Y_2O_3 衍射峰。

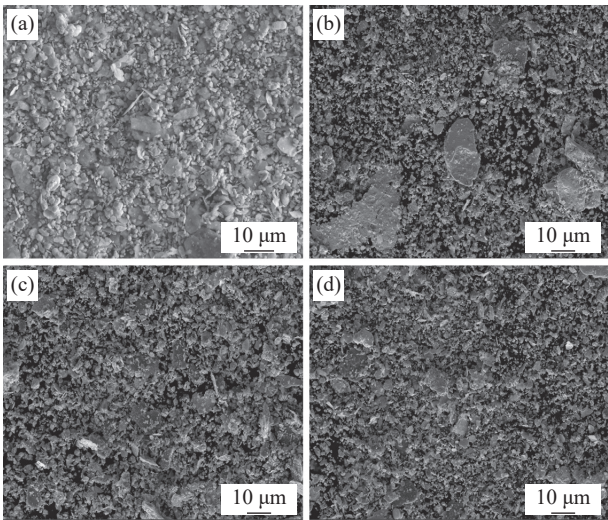


图 2 WTaCrVTi₆Y_x 合金粉末的 SEM 图像: (a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

Fig. 2 SEM images of WTaCrVTi₆Y_x alloy powders:

(a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

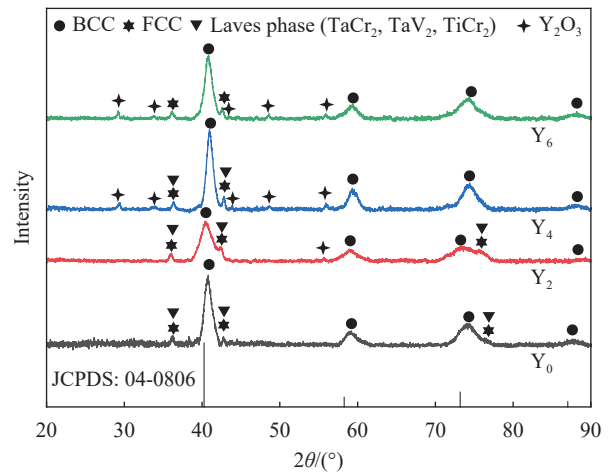


图 3 WTaCrVTi₆Y_x 高熵合金的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD patterns of WTaCrVTi₆Y_x high-entropy alloys

根据公式 (3)^[25] 计算出各合金中 BCC 相的平均晶粒尺寸，如图 4 所示。可见，随着 Y 含量增加，BCC 相的平均晶粒尺寸降低，表明 Y 元素可细化合金的组织结构。

$$d = \frac{0.89\lambda}{W_{2\theta}\cos\theta_{(hkl)}}$$

(3)

式中： d 为平均晶粒尺寸； λ 为 X 射线衍射束波长 (Cu 靶，0.15406 nm)； θ 为衍射角； $W_{2\theta}$ 为半峰宽。

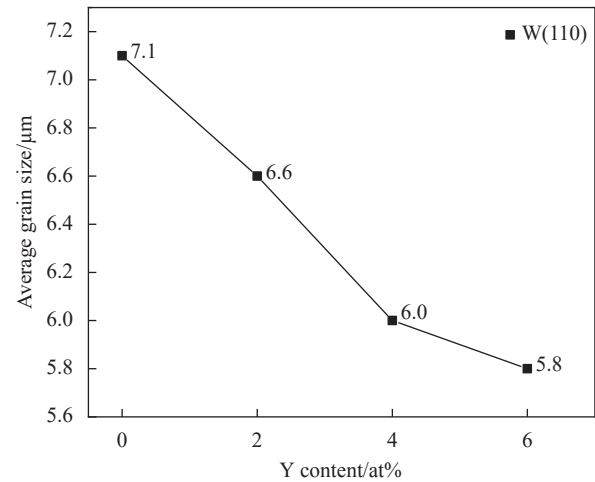


图4 不同Y含量合金中BCC相的平均晶粒尺寸

Fig. 4 Average grain size of BCC phase in the alloys with different Y contents

图5是不同Y含量的WTaCrVTi₆Y_x高熵合金的背散射SEM图像。Y₀合金包含A、B、C、D相；Y₂和Y₄合金包含A、B、C相，未观察到D相；Y₆合金主要包含A和C相。对不同Y含量的合金的各个相进行EDS分析，结果如表1所示。结合

XRD，可知A为BCC结构的WTaCrVTi固溶体；B为Laves相，富含Ta、Cr、V元素；C为TiO或Ti/Y混合氧化物或Y₂O₃；D为富Ta相。

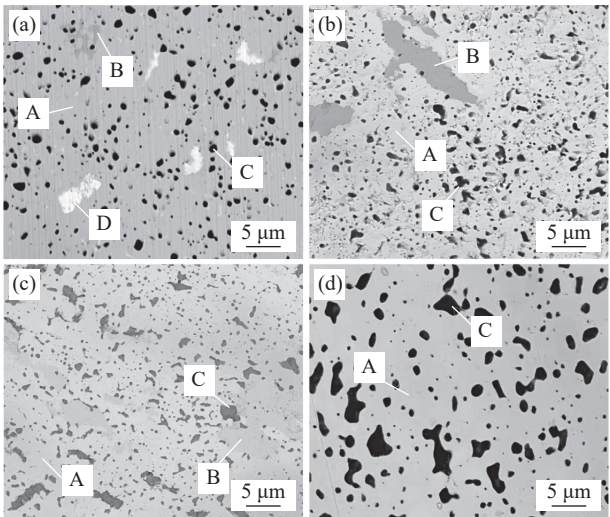


图5 WTaCrVTi₆Y_x高熵合金的背散射SEM图像：

(a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

Fig. 5 BSE-SEM images of WTaCrVTi₆Y_x high entropy alloys:

(a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

表1 WTaCrVTi₆Y_x高熵合金中各个相的元素含量

Table 1 Elemental content of individual phases in WTaCrVTi₆Y_x high-entropy alloys

Alloy	Area	Element content/at%							Phase
		W	Ta	Cr	V	Ti	Y	O	
Y ₀	A	24.49	24.36	24.54	24.55	2.06	0	0	Solid solution
	B	9.16	26.94	41.57	17.99	0.79	0	3.55	Laves
	C	1.08	1.42	2.98	6.81	38.11	0	49.60	TiO
	D	1.95	91.68	0.89	1.91	0.47	0	3.10	Ta
Y ₂	A	43.90	25.29	14.90	12.56	3.35	0	0	Solid solution
	B	8.47	34.01	36.47	18.93	2.12	0	0	Laves
	C	0	0	0	0	17.49	17.40	65.11	(Ti/Y)-O
Y ₄	A	30.84	28.21	19.27	16.26	5.42	0	0	Solid solution
	B	8.13	33.75	39.25	15.07	3.79	0	0	Laves
	C	0	0	0	0	0	38.86	61.14	Y ₂ O ₃
Y ₆	A	25.12	24.94	22.03	23.66	4.25	0	0	Solid solution
	C	0	0	0	0	0	39.14	60.85	Y ₂ O ₃

Y₀合金中，BCC结构的固溶体连续分布，为基体，固溶体的W、Ta、Cr、V的原子比趋于等原子比，黑色TiO颗粒均匀分布在基体中，平均颗粒尺寸为(1.08±0.38) μm，Laves相和富Ta相零星分布在基体中。在含Cr的RHEAs中经常观察到Laves相的形成^[26-28]，这是由于Cr和其他元素之间的原子半径差异大，有利于AB₂型Laves相的形成，如TaCr₂。另外，Ti的添加，还可能促

进TaV₂、VTa₂和TiCr₂^[12]等Laves相的形成。因此，Laves相富含Ta、Cr、V元素。Y₂合金中，固溶体中的W、Ta、Cr、V的原子比偏离等原子比，Cr和V的含量偏少，黑色颗粒为TiO和Y₂O₃的混合颗粒，局部出现团聚现象，Laves相呈不规则形状，富Ta相消失。Y₄合金的组织结构与Y₂合金相似，但固溶体中的Cr和V的含量相对Y₂合金有所增加，黑色颗粒主要为Y₂O₃。Y₆合金主要

包含 BCC 结构的固溶体和黑色 Y_2O_3 颗粒，未观察到明显的 Laves 相，固溶体的 W、Ta、Cr、V 的原子比趋于 1。Ti 和 Y 具有良好的亲氧性，在烧结过程中，它们会与粉末中残留的 O 反应生成黑色 TiO 或 Y_2O_3 。但 Y 的亲氧能力高于 Ti，因此，有 Y 存在且充足的情况下，合金的氧化物颗粒以 Y_2O_3 为主。另外，含 Y 合金的 BCC 相中的 Ti 含量 (3.35at%~5.42at%) 均高于未含 Y 合金 (2.06at%)，表明 Y 的添加有助于各元素的互溶，从而促进 BCC 结构固溶体的形成。

图 6 是不同 Y 含量的 WTaCrVTi₆Y_x 高熵合金断口的 SEM 图像。BCC 相的平均晶粒尺寸分别为 6.96 μm、6.35 μm、5.80 μm、5.05 μm。这进一步验证了 XRD 的计算结果，表明 Y 元素可细化合金的 BCC 组织结构。这可能是由于 Y 与 O 易形成 Y_2O_3 颗粒， Y_2O_3 弥散分布在基体中，钉扎在晶界处，抑制了晶粒长大 [23]。

图 7 分别是 Y₀、Y₄ 和 Y₆ 合金的 EPMA 图像。Y₀ 和 Y₄ 图像中，Ta、Cr、V 等元素在 BCC 相中分布不均，Y₀ 中，黑色颗粒主要为 TiO，而 Y₄ 中的黑色颗粒主要为 Y_2O_3 。当 Y 的添加量达到 6at%，EPMA 图像表明 BCC 相中 W、Ta、Cr、V 和 Ti 元素分布均匀，这是由于，如前所述，Y 的添加可促进合金粉末颗粒的细化，使其具有更大的表面积和更高的反应活性，可以促进烧结组织的致密化和均匀化。另外，SPS 烧结温度为 1 500℃，但实际温度一般高于该温度 100~300℃，因此，低熔点的 Y(熔点为 1 522℃) 有可能熔化形成液相，液相可促使其他固相组分的相互扩散，有利于均匀

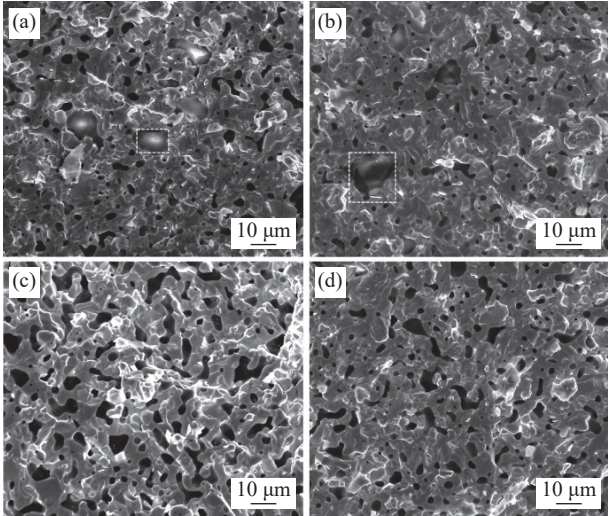


图 6 不同 Y 含量 WTaCrVTi₆Y_x 高熵合金断口的 SEM 图像：

(a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

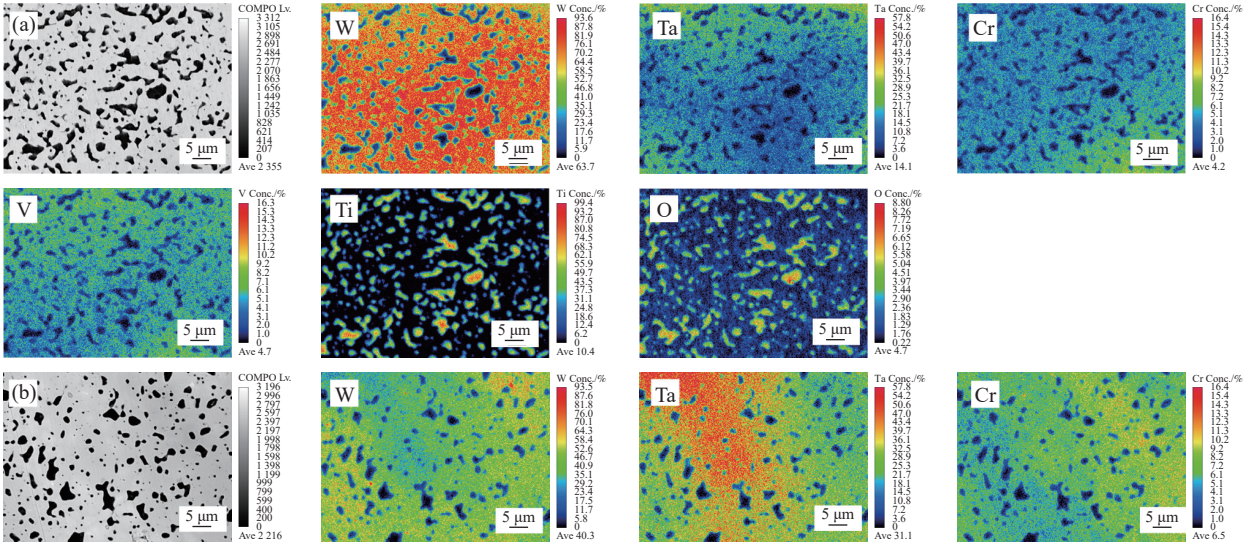
Fig. 6 SEM images of WTaCrVTi₆Y_x high entropy alloys fractures with different Y contents: (a) Y₀; (b) Y₂; (c) Y₄; (d) Y₆

BCC 相的形成。该合金中黑色颗粒主要为 Y_2O_3 ，平均尺寸约为 (1.25±0.85) μm。

2.3 合金的力学性能

表 2 为 WTaCVTi₆Y_x 合金的密度。由表可知，采用 MA 和 SPS 制备的合金致密，合金的相对密度均在 99.8%~99.9%。

图 8 分别为 WTaCVTi₆Y_x 高熵合金的室温压缩强度和显微硬度。添加 Y 的合金的室温压缩强度和显微硬度均比未添加 Y 的合金的小。这可能是由于氧化物颗粒的组成、含量和分布发生变化造成的。相对含 Y 的合金，Y₀ 合金的氧化钛颗粒细小，且均匀分布在基体中，起到了更好的强化作



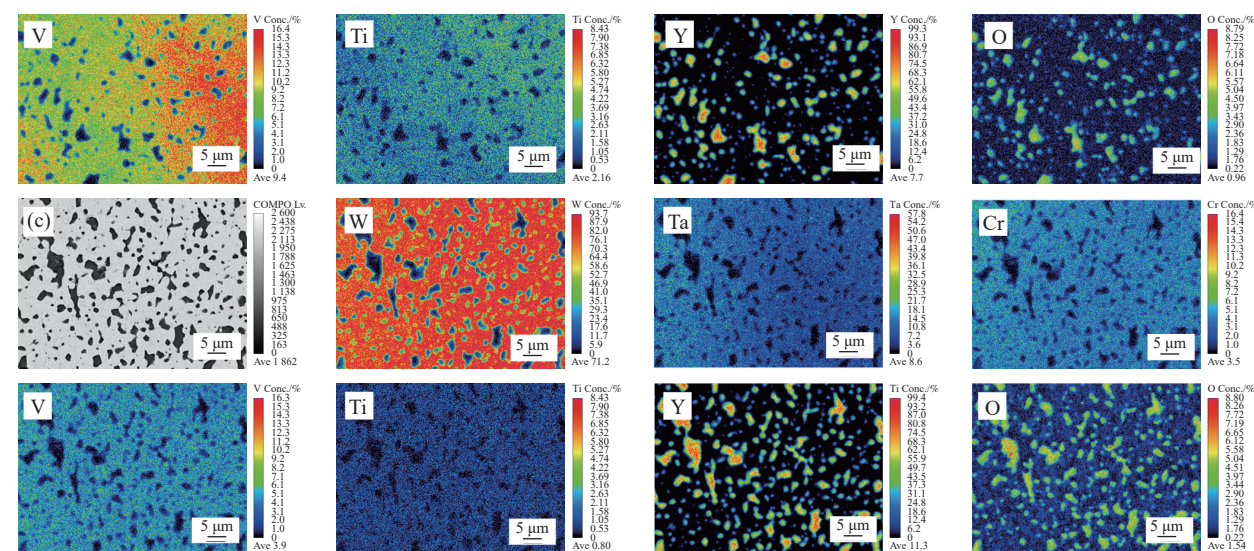


图7 WTaCrVTi₆Y_x合金的EPMA图像: (a) Y₀; (b) Y₄; (c) Y₆
Fig. 7 EPMA images of the WTaCrVTi₆Y_x alloy: (a) Y₀; (b) Y₄; (c) Y₆

表 2 WTaCrVTi₆Y_x 合金的密度

Table 2 Density of the WTaCrVTi₆Y_x alloys

Alloy	Actual density/ (g·cm ⁻³)	Theoretical density/ (g·cm ⁻³)	Relative density/%
Y ₀	12.398	12.407	99.9
Y ₂	12.026	12.056	99.8
Y ₄	11.706	11.722	99.8
Y ₆	11.399	11.402	99.9

用。对于含 Y 合金,随着 Y 含量的增加,合金的室温压缩强度和显微硬度也随之增强, Y₆ 合金的室温压缩屈服强度和硬度达到最高,分别为 2 674 MPa 和 HV (848.6±9.3)。这是由于,随 Y 含量增加,一方面 BCC 相的晶粒尺寸减小,起到细晶强化作用,另一方面 BCC 相的各元素含量趋于等原子比,具有更高的混合熵效应所致。

3 结论

(1) 随着 Y 含量的增加,合金的晶粒尺寸减小, FCC 相和 Laves 相的数量降低。当 Y 的添加量为 6at% 时,合金主要包含 BCC 结构固溶体和 Y₂O₃ 颗粒, Y₂O₃ 颗粒的平均尺寸约为 (1.25±0.85) μm, 均匀分布在基体中,固溶体的 W、Ta、Cr、V 的原子比趋于 1。

(2) Y₆ 合金的室温压缩屈服强度和硬度达到最高,分别为 2 674 MPa 和 HV (848.6±9.3)。这是由于,随 Y 含量增加,一方面 BCC 相的晶粒尺寸减小,另一方面 BCC 相的各元素含量趋于等原子比,合金具有更高的混合熵和晶粒细化效应。

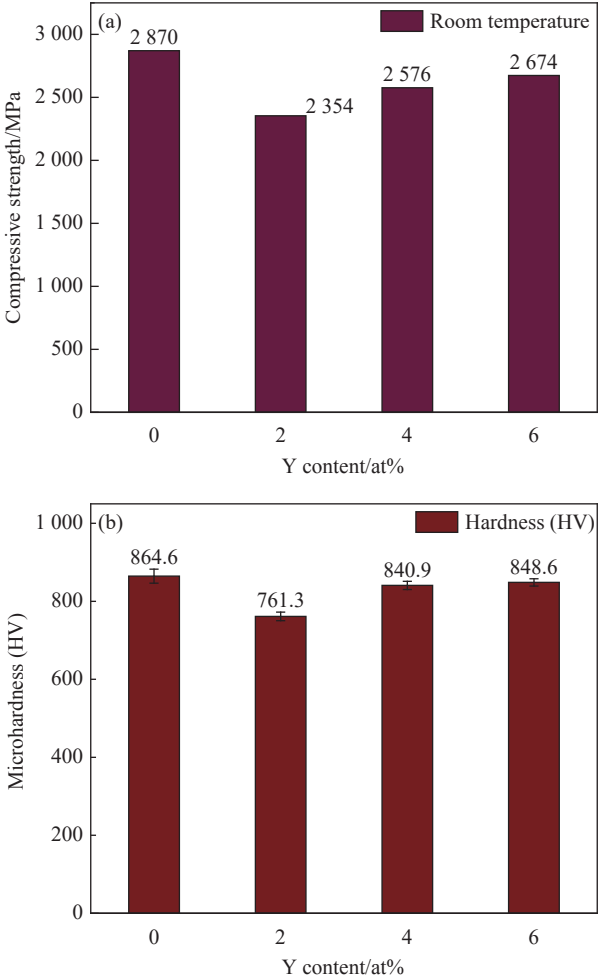


图8 WTaCrVTi₆Y_x高熵合金力学性能:
(a) 室温压缩性能; (b) 显微硬度
Fig. 8 Mechanical properties of WTaCrVTi₆Y_x high entropy alloy:
(a) Room temperature compression properties; (b) Microhardness

参考文献:

- [1] 包宏伟, 李燕, 马飞. 金属钨辐照缺陷与氢/氦作用的计算模拟研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(3): 1100-1110.
BAO Hongwei, LI Yan, MA Fei. Interaction of radiation defects in tungsten and helium/hydrogen: A review of computation and simulation[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(3): 1100-1110(in Chinese).
- [2] 赵乙楞, 雷鸣, 张旭, 等. 聚变反应堆钨基等离子体材料研究进展 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(9): 3399-3407.
ZHAO Yiluo, LEI Ming, ZHANG Xu, et al. Research progress of tungsten-based plasma materials in fusion reactors[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(9): 3399-3407(in Chinese).
- [3] 陈时杰, 叶超, 柳炜, 等. 球磨时间对自钝化钨合金的组织结构和抗氧化性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(8): 4531-4538.
CHEN Shijie, YE Chao, LIU Wei, et al. Effect of ball milling time on microstructure and oxidation resistance of self-passivating W alloys[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2023, 40(8): 4531-4538(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] ERDOGAN A, DOLEKER K M, ZEYTIN S. Effect of Al and Ti on high-temperature oxidation behavior of CoCrFeNi-based high-entropy alloys[J]. *Jom*, 2019, 71(10): 3499-3510.
- [6] CHEN M R, LIN S J, YEH J W, et al. Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrCuFeNi}$ high-entropy alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2006, 37A: 1363-1369.
- [7] CAO Y, LIU Y, LIU B, et al. Effects of Al and Mo on high temperature oxidation behavior of refractory high entropy alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(7): 1476-1483.
- [8] LI Z, FU L, PENG J, et al. Improving mechanical properties of an FCC high-entropy alloy by γ' and b2 precipitates strengthening[J]. *Materials Characterization*, 2020, 159: 109989.
- [9] SADEGHILARIDJANI M, AYYAGARI A, MUSKERI S, et al. Ion irradiation response and mechanical behavior of reduced activity high entropy alloy[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 529: 151955.
- [10] MA X N, HU Y F, WANG K, et al. Microstructure and mechanical properties of a low activation cast W-Ta-Hf-Ti-Zr refractory high-entropy alloy[J]. *China Foundry*, 2022, 19(6): 489-494.
- [11] EL-ATWANI O, LI N, LI M, et al. Outstanding radiation resistance of tungsten-based high-entropy alloys[J]. *Science Advances*, 2019, 5(3): eaav2002.
- [12] WASEEM O A, LEE J, LEE H M, et al. The effect of Ti on the sintering and mechanical properties of refractory high-entropy alloy $\text{Ti}_x\text{W-Ta-V-Cr}$ fabricated via spark plasma sintering for fusion plasma-facing materials[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 210: 87-94.
- [13] SHEN W, TSAI M H, YEH J W. Machining performance of sputter-deposited $(\text{Al}_{0.34}\text{Cr}_{0.22}\text{Nb}_{0.11}\text{Si}_{0.11}\text{Ti}_{0.22})_{50}\text{N}_{50}$ high-entropy nitride coatings[J]. *Coatings*, 2015, 5: 312-325.
- [14] 李荣斌, 黄天, 蒋春霞, 等. TaWTiVCr 高熵合金薄膜制备及微观结构、力学性能研究 [J]. *表面技术*, 2020, 49(6): 159-167.
LI Rongbin, HUANG Tian, JIANG Chunxia, et al. Study on preparation, microstructure and mechanical properties of TaWTiVCr high entropy alloy thin film[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(6): 159-167(in Chinese).
- [15] SENKOV O N, WILKS G B, SCOTT J M, et al. Mechanical properties of $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$ and $\text{V}_{20}\text{Nb}_{20}\text{Mo}_{20}\text{Ta}_{20}\text{W}_{20}$ refractory high entropy alloys[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(5): 698-706.
- [16] KIM I H, OH H S, LEE K S, et al. Optimization of conflicting properties via engineering compositional complexity in refractory high entropy alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2021, 199: 113839.
- [17] YANG T, XIA S, LIU S, et al. Precipitation behavior of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloys under ion irradiation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32146.
- [18] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. *Intermetallics*, 2010, 18(9): 1758-1765.
- [19] CHEN W, FU Z, FANG S, et al. Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a $\text{FeNiCrCo}_{0.3}\text{Al}_{0.7}$ high entropy alloy[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 854-860.
- [20] FANG S, CHEN W, FU Z. Microstructure and mechanical properties of twinned $\text{Al}_{0.5}\text{CrFeNiCo}_{0.3}\text{C}_{0.2}$ high entropy alloy processed by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. *Materials & Design*, 2014, 54: 973-979.
- [21] PAN J, DAI T, LU T, et al. Microstructure and mechanical properties of $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$ and $\text{Ti}_8\text{Nb}_{23}\text{Mo}_{23}\text{Ta}_{23}\text{W}_{23}$ high entropy alloys prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 738: 362-366.
- [22] LIU R, ZHOU Y, HAO T, et al. Microwave synthesis and properties of fine-grained oxides dispersion strengthened tungsten[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2012, 424(1-3): 171-175.
- [23] 吕永齐, 范景莲, 韩勇, 等. 微量 Y 弥散强化细晶 W 的烧结组织和性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(6): 1704-1708.

LYU Yongqi, FAN Jinglian, HAN Yong, et al. Study on sintering behavior, microstructure and property of trace yttrium enhanced fine-grained W alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2017, 46(6): 1704-1708(in Chinese).

[24] 柳炜. 面向等离子体自钝化 W-Si 合金的制备与性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

LIU Wei. Preparation and properties of self-passivating tungsten-silicon alloys for plasma facing materials [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020(in Chinese).

[25] 王晓春, 张希艳, 卢利平. 材料现代分析与测试技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

WANG Xiaochun, ZHANG Xiyan, LU Liping. Modern analysis and testing techniques for materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[26] YURCHENKO N Y, STEPANOV N D, GRIDNEVA A O, et al. Effect of Cr and Zr on phase stability of refractory Al-Cr-Nb-Ti-V-Zr high-entropy alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 757: 403-414.

[27] SHI Z, LIU S, WANG X, et al. Effects of Cr content on microstructure and mechanical properties of single crystal superalloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2015, 25(3): 776-782.

[28] STEIN F, LEINEWEBER A. Laves phases: A review of their functional and structural applications and an improved fundamental understanding of stability and properties[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(9): 5321-5427.