

$\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 轻质难熔高熵合金 组织性能表征

赵佳雨, 陈子瑞, 高卓, 王李垣, 崔冠华, 范智渊, 石晓辉

太原理工大学材料科学与工程学院 山西太原 030024

摘要: 难熔高熵合金 (RHEA) 由于其优异的高温力学性能, 近年来备受关注。然而, 室温延展性差和密度高仍然是限制其工业应用的主要因素。通过机械合金化和放电等离子烧结组合工艺, 制备出理论密度仅为 7.708g/cm^3 的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金。研究了烧结温度对合金组织和力学性能的影响。结果表明: 合金相结构由 BCC 相 (BCC1 相和 BCC2 相) 和极少量 FCC 析出相组成。在室温条件下, 经 1600°C 烧结的合金获得最高的压缩峰值应力和最佳塑性 (2542MPa 和 9.8%), 同时该合金在 1000°C 压缩时仍保持较高压缩性能, 最高峰值应力可达到 419MPa 。本研究将为 RHEA 的制备、表征及进一步的工业应用提供参考。

关键词: 难熔高熵合金; 显微组织; 力学性能; 低密度

Characterization of microstructure and properties for $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ lightweight refractory high entropy alloy

ZHAO Jiayu, CHEN Zirui, GAO Zhuo, WANG Liyuan, CUI Guanhua, FAN Zhiyuan, SHI Xiaohui

School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China

Abstract: Refractory high-entropy alloys (RHEA) have attracted much attention in recent years due to their excellent high-temperature mechanical properties. However, poor room-temperature ductility and high density are still the main factors that limit its industrial applications. A $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ refractory high-entropy alloy with a theoretical density of only 7.708g/cm^3 is prepared by a combination of mechanical alloying and discharge plasma sintering. The effects of sintering temperature on the microstructure and mechanical properties of the alloy are studied. The results show that the alloy phase structure is composed of BCC phase (BCC1 phase and BCC2 phase) and a very small amount of FCC precipitated phase. At room temperature, the alloy sintered at 1600°C obtains the highest compressive peak stress and the best plasticity (2542MPa and 9.8%), while the alloy still maintains high compressive performance at 1000°C , and the highest peak stress can reach 419MPa . This study will provide some reference for the preparation, characterization, and further industrial application of RHEA.

Keywords: refractory high-entropy alloy; microstructure; mechanical properties; low density

基金项目: 山西省高等学校教学改革创新项目 (J20240312); 山西省大学生创新创业训练计划项目 (20220119)。

第一作者: 赵佳雨, 学士, 硕士研究生, 主要研究方向为钛合金、高熵合金、车轮钢等金属材料, E-mail: 2077659005@qq.com。

通信作者: 石晓辉, 副教授、硕士研究生导师, 主要从事钛合金、高熵合金、车轮钢等方面的研究工作, E-mail: sxhtough@126.com。

1 序言

先进发动机的相关部件通常需要承受超高温、超高压的综合作用，特别是发动机燃烧室和涡轮的工作温度甚至可达到2000℃以上^[1]。然而，由于基体元素的熔点较低，因此传统镍基高温合金的使用温度一般不超过1100℃。随着飞行速度的不断突破，对高温结构材料的高温强度、高温稳定性和抗氧化性的要求越来越高^[2, 3]。

难熔高熵合金 (Refractory High-Entropy Alloys, RHEA)^[4]于2010年被首次研发出来。由于添加了多种高熔点元素作为主元素，因此难熔高熵合金在高温下表现出比传统高温合金更高的强度^[5]。例如，典型的WNbMoTa和WNbMoTaV难熔高熵合金^[6]在1600℃时的屈服强度分别可达到405MPa和477MPa，远高于传统的镍基高温合金Inconel718和Haynes230^[7]。

密度高和室温塑性差是限制难熔高熵合金工程应用的两大关键因素^[8]。例如，WNbMoTa合金^[6]在室温下的压缩塑性<2%，而其理论密度可达到13.723g/cm³。近年来，研究人员利用低密度元素 (Al、Cr、Ti、Zr等) 代替高密度元素 (W、Mo、Hf等) 制备了多种轻量化的难熔高熵合金^[9]。如Al_{0.3}NbTa_{0.8}Ti_{1.5}V_{0.2}Zr合金的密度为7.64g/cm³^[10]。AlNbTiVZr合金的密度为5.79g/cm³，在1073K时仍具有550MPa的屈服强度^[11]。CrNbTiVZr合金的密度为6.57g/cm³，1073K时屈服强度可达615MPa^[12]。Ti是一种被最常添加的轻元素，除可显著降低密度外，HAN等^[13]研究发现，Ti元素的添加可使WNbMoTa合金的压缩塑性提高约20%。由此可见，含Ti难熔高熵合金的设计、制备及表征研究兼具理论价值和工程应用前景。

当前，机械合金化 (Mechanical Alloying, MA) + 放电等离子烧结 (Spark Plasma Sintering, SPS) 工艺^[14]被广泛用于制备难熔高熵合金。PAN等^[15]通过MA + SPS法制备了Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅和Ti₈Nb₂₃Mo₂₃Ta₂₃W₂₃难熔高熵合金。制备的Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅合金的压缩屈服强度和断裂应变分别为2460MPa和16.8%，明显优于传统真空电弧熔炼法 (Vacuum Arc Melting, VAM) 所制备的同类型合金。

为丰富轻质难熔高熵合金的研究成果，

本课题组曾采用MA + SPS法制备出高Ti含量Ti₆₂Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₂^[16]难熔高熵合金。本研究则以Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄难熔高熵合金为研究对象，对其相组成及力学性能展开研究。

2 材料与方法

原始粉末为Ti (粒度<100μm)、Nb (粒度<100μm)、Mo (粒度<1μm)、Ta (粒度<5μm)、W (粒度<1μm) 5种高纯度 (≥99.9%) 粉末。将上述粉末按比例混合后放入MSK-SFM-I行星球磨机中进行机械合金化。球料比为10:1，设置转速为300r/min，每运行30min停转15min，共100次循环。最终制得Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄难熔高熵合金粉末。

在SPS-20T-10-III放电等离子烧结系统中进行难熔高熵合金粉末的烧结。称取30g左右的合金粉末装入内径20mm的高强度石墨模具中，压实后放入炉内，关闭炉门，抽真空至10⁻³Pa。预先以100℃/min的升温速度加热至650℃并保温10min，再以100℃/min的升温速度加热至低于烧结温度100℃的温度点，之后以50℃/min的升温速度加热，用时2min达到烧结温度，保温10min后完成烧结。烧结过程如图1所示。650℃保温前烧结压力较小，650℃保温后将烧结压力提高至50MPa，并保持至烧结结束。

难熔高熵合金理论熔点 T_m 的计算公式为

$$T_m = \sum_{i=1}^n c_i T_{mi} \quad (1)$$

式中 c_i ——第*i*组元元素的原子分数 (%)；

T_{mi} ——第*i*组元元素的理论熔点^[17] (℃)。

Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄难熔高熵合金组元元素的基本参数见表1。

由式 (1) 计算出Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄难熔高熵合金的理论熔点 T_m 为2110℃。参考Ti₆₂Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₂的烧结温度^[16] (0.7~0.8) T_m 确定Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄

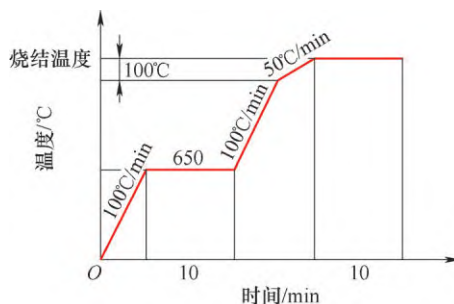


图1 烧结过程的温度-时间

难熔高熵合金的烧结温度分别为1550℃、1600℃、1650℃和1680℃。烧结后，将样品冷却至100℃再从炉中取出。磨除表面石墨后，得到尺寸约为 $\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的圆柱形样品。

表1 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金组元元素的基本参数^[17-19]

元素	Ti	Nb	Mo	Ta	W
c_i (%)	60	12	12	12	4
$T_{\text{m}}/^\circ\text{C}$	1666	2475	2621	3015	3420
A_i (g/mol)	47.867	92.906	95.940	180.948	183.840
ρ_i (g/cm ³)	4.540	8.570	10.220	16.654	19.350

用X射线衍射仪(XRD, AERIS, PANalytical)测定相组成。辐射源为单色 $\text{CuK}\alpha$ ，其波长为 $1.5406\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)，扫描速度为 $1.25^\circ/\text{min}$ ，扫描角度为 $30^\circ \sim 100^\circ$ ，工作电压为40kV，工作电流为20mA。利用扫描电子显微镜(SEM, Phenom XL)和能谱仪(EDS)对合金进行了微观结构和化学成分表征。

采用万能力学试验机Instron5969和热力模拟试验机Gleeble3800分别在1000℃和1200℃时，测试合金的室温及高温压缩性能。压缩试样规格尺寸分别为 $\phi 3\text{mm} \times 4.5\text{mm}$ 和 $\phi 6\text{mm} \times 9\text{mm}$ 。应变率均为 $1 \times 10^{-3}/\text{s}$ 。

3 密度分析

根据混合原则，单相固溶体高熵合金的理论密度可由式(2)计算，即

$$\rho_{\text{mix}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i A_i}{\rho_i}} \quad (2)$$

式中 c_i ——第*i*组元元素的原子分数(%)；

A_i ——第*i*组元元素的摩尔质量(g/mol)；

ρ_i ——第*i*组元元素的密度(g/cm³)。

根据表1的参数，计算出 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的理论密度为 7.708g/cm^3 。而传统镍基高温合金^[20]Inconel718和Haynes230的理论密度分别为 8.24g/cm^3 和 8.97g/cm^3 ，可见所制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的理论密度相较于传统镍基高温合金降低了约10%。

采用阿基米德原理测定烧结试样的密度。样品经研磨抛光后，测量5次密度，得到平均密度值。图

2所示为不同温度下烧结的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的理论密度与实测密度对比。从图2可看出，试样的实测密度低于理论密度，这是由于烧结不能达到100%的致密化。

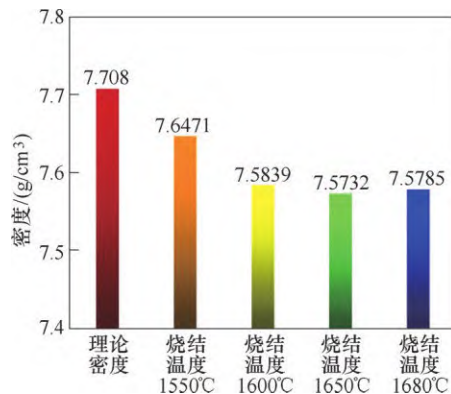
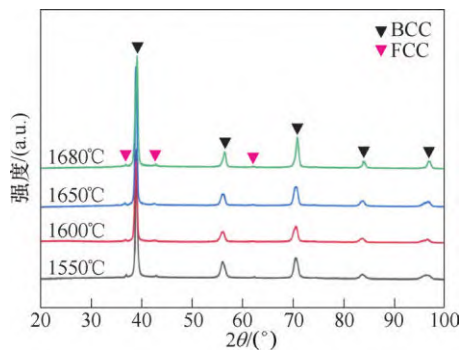


图2 不同温度烧结 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金理论密度和实测密度

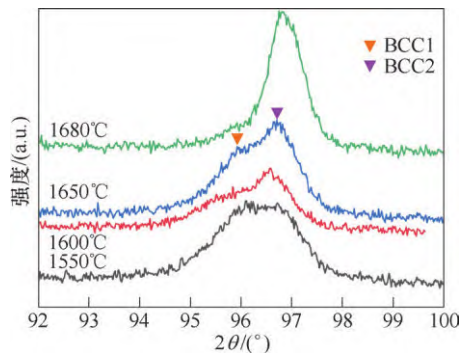
4 显微组织分析

4.1 XRD结果分析

不同烧结温度下制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的X射线衍射XRD图如图3a所示。从图3a可看出，在不同温度下烧结的合金均含有极多的



a) 不同温度烧结合金的XRD图谱



b) XRD图谱局部放大

图3 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的XRD图谱

BCC相和极少量的FCC相。各衍射峰的强度和形状随烧结温度的变化而变化。对于衍射角 2θ 在 $95^\circ \sim 100^\circ$ 的BCC特征峰, 1680℃烧结试样中呈单峰状, 而1550℃、1600℃和1650℃烧结试样中存在微分叉现象, 这说明可能同时存在BCC1和BCC2两相。

图3b所示为XRD图谱局部放大。由图3b可见, 随着烧结温度的升高, 合金趋向于形成单一BCC相。 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ RHEA的XRD图谱^[16]与之相似, 也存在BCC峰分叉, 且相比之下分叉现象更明显。

根据立方晶系中晶面间距 d , 以及晶面指数 h 、 k 、 l 与晶格常数 a 之间的关系^[21], 即

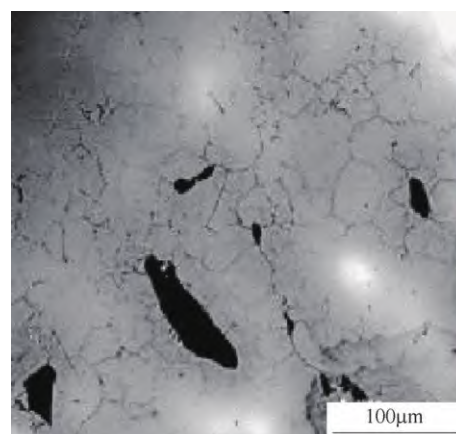
$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3)$$

结合XRD结果计算了FCC特征衍射峰(111)、(200)、(220)对应的晶格常数, 取平均值即为不同烧结温度下 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金中FCC相的晶格常数。经计算可得, 1550~1680℃烧结温度下FCC相的晶格常数分别为4.228Å、4.202Å、4.237Å和4.221Å。其晶格常数与TiC(4.327Å)、TiN(4.241Å)和TiO(4.180Å)相近^[22]。由于Ti在合金化和烧结过程中容易与环境中的C、O、N元素结合而形成FCC析出相, 这在含Ti的难熔高熵合金中较为常见^[23], 因此可认为本文FCC相是TiC、TiN、与TiO的复合相。

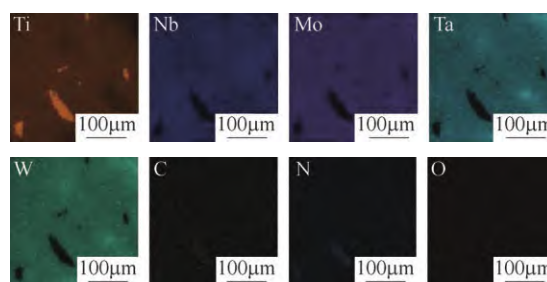
4.2 SEM-EDS结果分析

图4~图7所示分别为1550℃、1600℃、1650℃和1680℃制备 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的SEM-BSE和EDS面扫谱图。图8所示为1600℃烧结合金的SEM图像。 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的EDS结果见表2。从表2可看出, 合金的烧结组织包含4种: 基体等轴晶(equiaxed grain phase)、黑色块状组织(black block phase)、亮色组织(bright phase)及针状析出物(needle-like precipitates)。

结合图3中XRD图谱可知, 基体等轴晶相中元素含量由高到低依次为Ti、Ta、Nb、Mo、W, 与合金名义成分接近, 故将其命名为BCC1相。针状析出物可分布在晶界及晶内, 从表2可看到, 1650℃烧结合金针状析出物相的元素含量同基体等轴晶相的差别很小, 故针状析出物相属于BCC1相。在晶界处

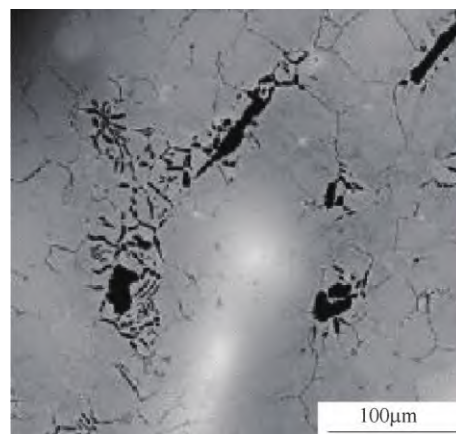


a) SEM-BSE

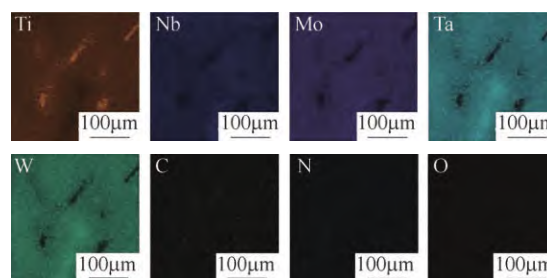


b) EDS面扫谱图

图4 1550℃制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金SEM-BSE和EDS面扫谱图



a) SEM-BSE



b) EDS面扫谱图

图5 1600℃制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的SEM-BSE和EDS面扫谱图

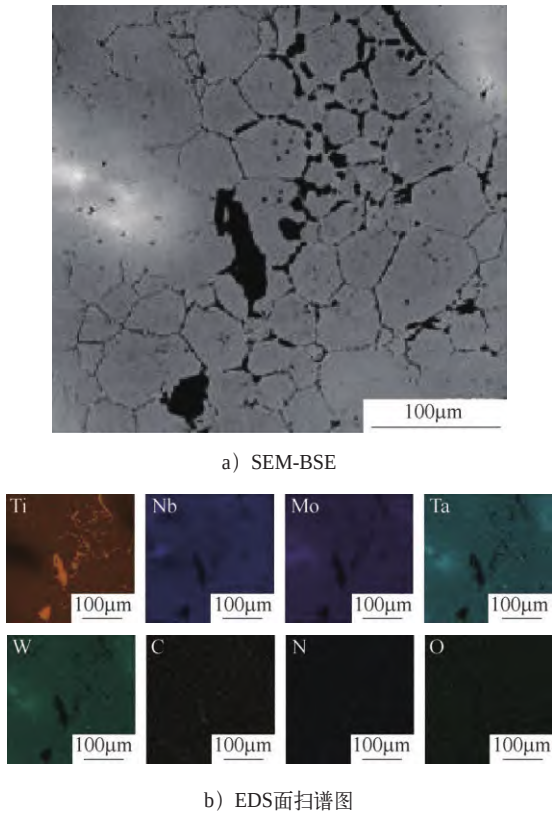


图6 1650℃制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的SEM-BSE和EDS面扫谱图

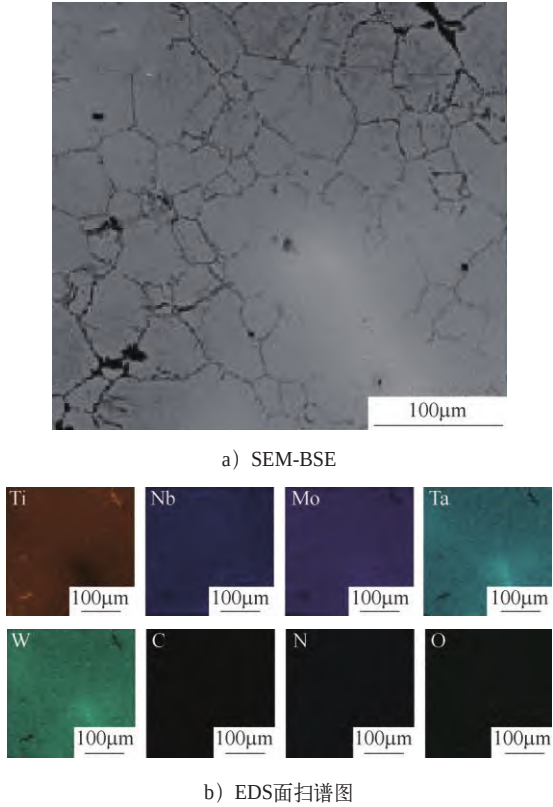


图7 1680℃制备的 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的SEM-BSE和EDS面扫谱图

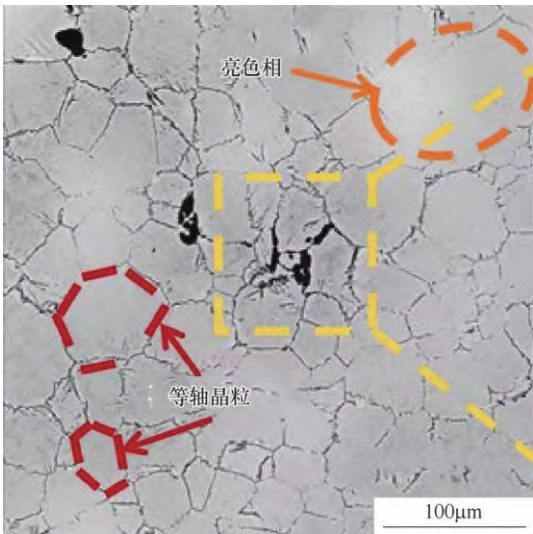
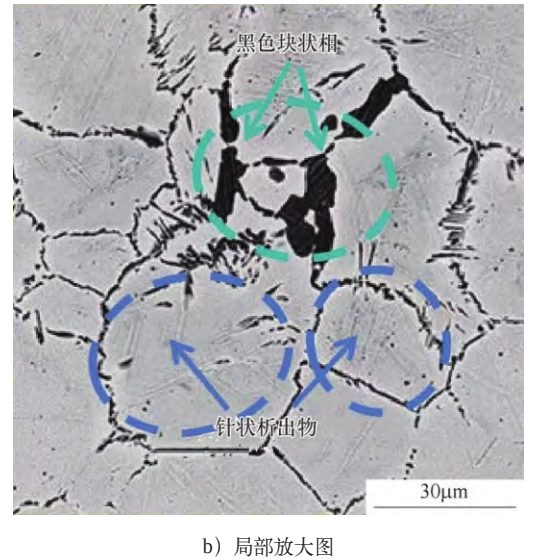


图8 1600℃烧结合金的SEM图与局部放大图

表2 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的EDS结果

T/℃	烧结组织	成分（原子分数，%）							
		Ti	Nb	Mo	Ta	W	C	N	O
1550	黑色块状	93.05	0.12	0.18	0.06	0.00	0.44	1.99	4.16
	亮色组织	40.43	11.16	13.36	26.01	3.71	0.17	0.44	4.72
1600	黑色块状	74.38	0.61	0.37	0.00	0.00	0.29	1.10	23.25
	亮色组织	46.20	11.97	13.49	18.97	4.03	0.27	0.56	4.52
1650	黑色块状	89.22	1.47	0.45	0.00	0.00	0.48	1.87	6.51
	基体等轴晶	60.89	11.32	9.45	12.57	4.09	—	—	—
	针状析出物	61.47	11.39	9.95	11.79	3.70	—	—	—
1680	亮色组织	39.56	13.44	14.99	23.36	3.63	0.32	0.47	4.23
	黑色块状	88.75	1.80	0.51	0.00	0.00	0.42	1.35	7.18

分布着形状和大小均不规则的黑色块体,大量未溶入基体等轴晶相的Ti原子在此处富集。鉴于黑色块体相与基体等轴晶相在晶格结构上均以Ti原子作为主要构成元素,据此判断其依旧归属于BCC1相的范畴。相较黑色块体,亮色相富含Ta元素,而Ti含量明显减少,因此将其命名为BCC2相。随着烧结温度的升高,黑色块体和亮色相逐渐减少,说明部分未溶解的元素开始相互溶解,当烧结温度达到1680℃时基本形成单一BCC相(见图2中BCC近似单峰)。

5 力学性能分析

5.1 室温压缩性能分析

由于无法添加引伸计,故需对室温压缩工程应力-应变曲线进行修正。万能试验机的夹具存在弹性变形,并有如下关系式,即

$$\Delta L_s = \Delta L - \Delta L_f \quad (4)$$

$$\Delta L_f = \frac{F}{k} \quad (5)$$

式中 ΔL_s ——试样的实际变形量(mm);
 ΔL ——仪器所测得的总位移(mm);
 ΔL_f ——夹具的弹性变形量(mm);
 F ——仪器所施加的载荷(N);
 k ——夹具的刚度(N/mm)。

在不加试样的情况下, k 值通过计算夹具在载荷一位移曲线直线段上的斜率而得到。

本次试验所用夹具的刚度为73624N/mm。修正后的工程应力-应变曲线如图9所示。不同烧结温度下合金的压缩性能对比如图10所示。

从图9、图10可看出,1600℃烧结的合金具有最高的压缩峰值应力(2542MPa)和最佳塑性(9.4%)。随着烧结温度的升高,合金的强度和塑性呈明显的下降趋势。根据图4~图7的SEM

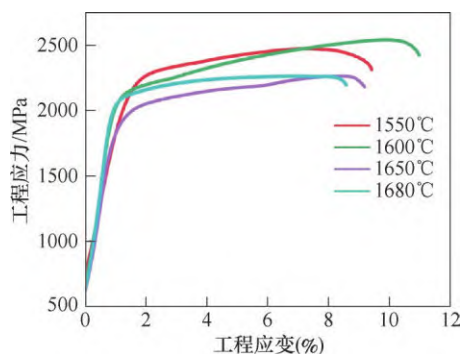


图9 室温压缩下Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄合金的工程应力-应变曲线

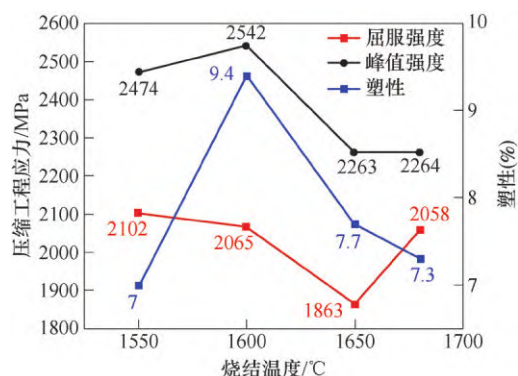


图10 Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄合金的室温压缩性能

图像,采用ImageJ软件测量出1550℃、1600℃、1650℃和1680℃烧结合金的平均晶粒尺寸分别约为32.09μm、43.62μm、54.41μm和47.12μm,可见随烧结温度升高,晶粒有变大趋势,这将导致晶界强化效应减弱,从而影响合金的力学性能。

5.2 断裂面和侧面形貌

室温压缩试样的断裂形貌(包括断口和侧面)如图11所示。试件一般断裂成高度相近的两部分。其形态主要包括主裂纹、二次裂纹、变形带、河流花样和冰糖状花样。由于韧窝不明显,所以可判断为脆性断裂(沿晶断裂和穿晶断裂混合)。

主裂纹为纵向裂纹,基本沿试样高度方向扩展(见图11a~d)。二次裂纹主要分布在侧面。可发现,随着烧结温度升高,二次裂纹数量有增加趋势(见图11e~h)。试样侧面有许多短而平行的滑移线,形成滑移变形带(图见11e~h)。河流花样的主要方向从侧面向内部延伸,其周围有突出的解理台阶(见图11i~l)。这种河流花样在具有BCC晶体结构的合金中很常见^[24, 25]。冰糖状花样少于河流花样,故断裂主要为脆性穿晶断裂(见图11i~l)。

5.3 高温压缩性能分析

对所制备的Ti₆₀Nb₁₂Mo₁₂Ta₁₂W₄难熔高熵合金进行1000℃和1200℃的高温压缩试验。需要注意的是,当真应变达到50%时,机器自动卸载,因此这些曲线的数据并不能完全反映合金的压缩塑性。由于机器扰动等因素的影响,1000~1550℃和1200~1680℃曲线存在较大误差。舍弃相应数据后,得到最终的真应力-真应变曲线,如图12所示。从图12可得,应变初期的曲线波动也是因为机器扰动等因素所致。

对比分析各曲线,可以发现在初始变形阶段流

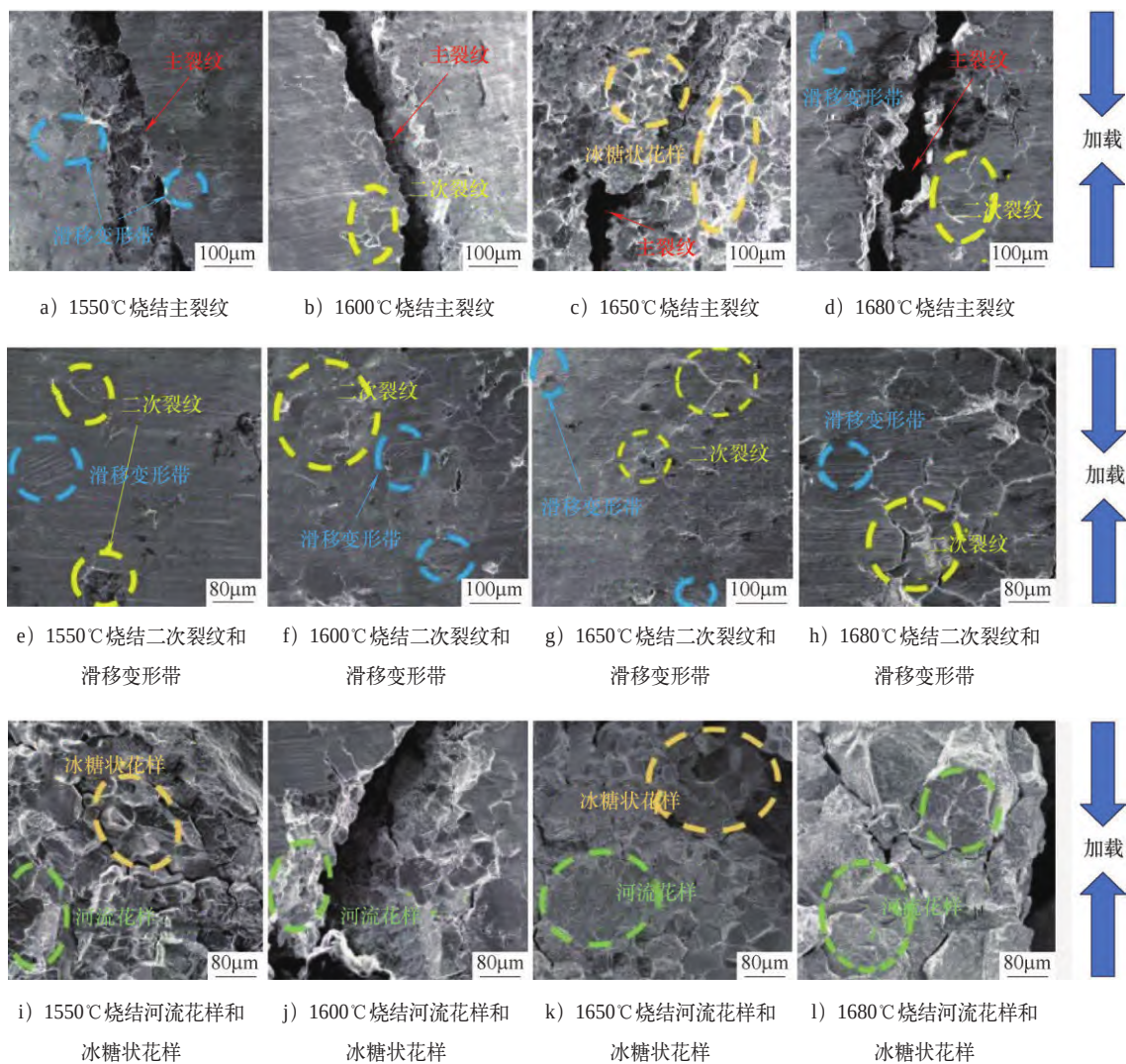


图11 室温压缩后 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的断口形貌

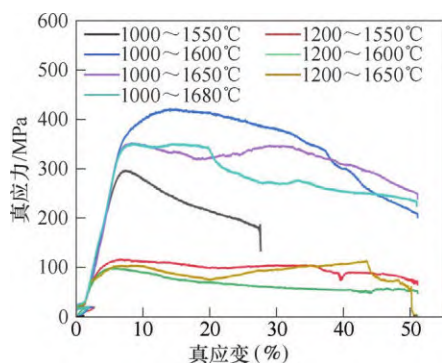


图12 高温压缩下 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ RHEA 的真应力-真应变曲线

变应力迅速增大。但由于本试验中应变速率较低，为 $10^{-3}/\text{s}$ ，即单位时间内位错增殖少，所以达到屈服应力后加工硬化现象不明显。当动态软化机制开动后，位错增殖速度进一步减慢，最终导致在均匀塑性变形阶段，流变应力增加的趋势变缓^[26]。达到峰

值应力后，动态软化机制起主导作用，表现为流变应力逐渐降低^[27]。

$\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金的高温压缩性能如图13所示。在1000℃时，材料的峰值应力为

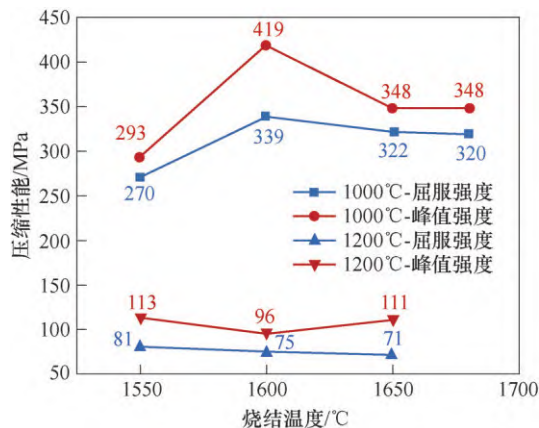


图13 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 合金的高温压缩性能

419MPa。在1200℃时,峰值应力为113MPa,表明材料在高温下仍能保持较好的强度。另外,当真应变达到50%时,试样仍未断裂,说明该合金具有良好的高温塑性。

6 结束语

采用机械合金化(MA)结合放电等离子烧结(SPS)技术成功制备了 $\text{Ti}_{60}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_4$ 难熔高熵合金,烧结温度分别设定为1550℃、1600℃、1650℃和1680℃。通过合金成分的混合规则计算,该合金的理论密度确定为 7.708g/cm^3 ,相较于传统镍基高温合金,展现出更低的密度优势。

XRD分析揭示,合金主要由BCC相(BCC1和BCC2两相)构成,并伴有极少量FCC相存在。随着烧结温度升高,元素相互溶解,所制备的合金趋向于形成单一BCC相。在室温条件下,经1600℃烧结的合金获得最高的压缩峰值应力(2542MPa)和塑性(9.4%)。1000℃压缩条件下,合金压缩峰值应力最大可达419MPa,可见合金具有较高的高温强度。本文的研究结果将对难熔高熵合金的制备、表征及进一步的工业应用提供参考。

参考文献:

- [1] SUN Y, WAN Z P, HU L X, et al. Characterization of hot processing parameters of powder metallurgy TiAl-based alloy based on the activation energy map and processing map[J]. Materials and Design, 2015, 86: 922-932.
- [2] LONG H B, MAO S C, LIU Y N, et al. Microstructural and compositional design of Ni-based single crystalline superalloys—A review[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 203-220.
- [3] 万志鹏. GH4720LI镍基合金高温变形行为及组织性能控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [4] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18 (9) : 1758-1765.
- [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] 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.
- [7] 姜萱, 陈林, 郝轩弘, 等. 难熔高熵合金制备及性能研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50 (3) : 33-42.
- [8] SENKOV O N, MIRACLE D B, CHAPUT K J, et al. Development and exploration of refractory high entropy alloys—A review[J]. Journal of materials research, 2018, 33 (19) : 3092-3128.
- [9] 贾岳飞, 王刚, 贾延东, 等. 轻质高熵合金研究现状[J]. 材料导报, 2020, 34 (17) : 17003-17017.
- [10] MORAVCIKOVA-GOUVEA L, MORAVCIK L, POUCHLY V, et al. Tailoring a refractory high entropy alloy by powder metallurgy process optimization[J]. Materials, 2021, 14 (19) : 5796.
- [11] YURCHENKO N Y, STEPANOV N D, ZHEREBTSOV S V, et al. Structure and mechanical properties of B2 ordered refractory AlNbTiVZr_x ($x=0\sim 1.5$) high-entropy alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704: 82-90.
- [12] SENKOV O N, SENKOVA S V, MIRACLE D B, et al. Mechanical properties of low-density, refractory multi-principal element alloys of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 565: 51-62.
- [13] HAN Z D, LUAN H W, LIU X H, et al. Microstructures and mechanical properties of $\text{Ti}_x\text{NbMoTaW}$ refractory high-entropy alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 380-385.
- [14] HAN J S, SU B, LU J J, et al. Preparation of MoNbTaW refractory high entropy alloy powders by pressureless spark plasma sintering: Crystal structure and phase evolution[J]. Intermetallics, 2020, 123: 106832.
- [15] PAN J Y, 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.
- [16] CHEN Z R, WANG L Y, ZHAO J Y, et al.

- Microstructure and mechanical properties of the $\text{Ti}_{62}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_{12}\text{Ta}_{12}\text{W}_2$ refractory high entropy alloy prepared through spark plasma sintering[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2024, 37 (8) : 1387-1398.
- [17] SARKAR A, SRINIVASAN A, ROBI P S. Processing and characterization of TiNbMoTaW refractory high entropy alloy by mechanical alloying[J]. Advanced Powder Technology, 2023, 34 (12) .
- [18] 刘青. 超细晶 MoNbTaTiV 难熔高熵合金的粉末冶金法制备及热变形行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [19] 贾绍川, 张程, 高丽华, 等. “能干而低调”的钨元素[J]. 化学教育 (中英文), 2019, 40 (24) : 1-7.
- [20] 武俊霞, 李培友, 董洪峰, 等. 难熔高熵合金成分设计微观组织及性能研究进展[J]. 航空材料学报, 2022, 42 (6) : 33-47.
- [21] SUN S D, ZHANG X C, CUI J, et al. Identification of the miller indices of a crystallographic plane: a tutorial and a comprehensive review on fundamental theory, universal methods based on different case studies and matters needing attention[J]. Nanoscale, 2020, 12 (32) : 16657-16677.
- [22] KANG B, LEE J, RYU H J, et al. Ultra-high strength WNbMoTaV high-entropy alloys with fine grain structure fabricated by powder metallurgical process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 712: 616-624.
- [23] GUO W M, LIU B, LIU Y, et al. Microstructures and mechanical properties of ductile NbTaTiV refractory high entropy alloy prepared by powder metallurgy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 776: 428-436.
- [24] LONG Y, LIANG X, SU K, et al. A fine-grained NbMoTaWVCr refractory high-entropy alloy with ultra-high strength: Microstructural evolution and mechanical properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 780: 607-617.
- [25] WANG M, MA Z, XU Z, et al. Microstructures and mechanical properties of HfNbTaTiZrW and HfNbTaTiZrMoW refractory high-entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 778-785.
- [26] GUO N N, WANG L, LUO L S, et al. Hot deformation characteristics and dynamic recrystallization of the MoNbHfZrTi refractory high-entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 698-707.
- [27] SUN F, LI B, CAI C, et al. Effects of TiN nanoparticles on hot deformation behavior of ultra-fine grained Al2024-TiN nanocomposites prepared by spark plasma sintering[J]. Mechanics of Materials, 2019, 138: 103152.

MW 20241215

(上接第25页)

- [22] 桑震, 苏钰, 杨丽, 等. 双重淬火对EX1和8418模具钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42 (9) : 31-35.
- [23] 冯萧萧, 苏钰, 李军, 等. 热处理工艺对DIEVAR热作模具钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44 (2) : 108-112.
- [24] 朱成林, 高秀华, 王明明, 等. S600E索氏体高强度不锈钢的开发及组织性能研究[J]. 轧钢, 2022, 39 (6) : 175-182.

MW 20241125

新闻记者证公示信息

根据国家新闻出版署颁布的《新闻记者证管理办法》《国家新闻出版署关于开展2025年度新闻记者证核验工作的通知》文件要求,我单位对《金属加工(冷加工)》新闻记者证持证人员进行了严格审核,持证人员遵纪守法且符合法定许可条件。现将拟通过新闻记者证年度核验人员名单进行公示,并接受社会监督,公示期20天(2025年4月1日至4月20日)。

姓名 张维官 工作岗位: 编辑
姓名 吴晓兰 工作岗位: 编辑
姓名 游小秀 工作岗位: 编辑

监督举报电话: 010-88379790

国家新闻出版署监督举报电话: 010-83138953