DOI:10.20038/j.cnki.mra.2025.000310

Cr含量对WMoNbCrTi高熵合金力学和抗氧化性能的影响

黄星鑫,胡斌梁

(湖南吉利汽车职业技术学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:WMoNbTiCr难熔高熵合金具有优越的力学性能,是一种具有应用潜力的高温结构材料。在粉末冶 金烧结制备过程中,WMoNbTiCr高熵合金中Cr与其他元素会发生反应形成Lave相,而Laves相对 WMoNbTiCr高熵合金的力学和抗氧化性能有重大的影响。然而,Cr含量对WMoNbTiCr高熵合金力学 性能和高温抗氧化性能的影响规律及其作用机理尚不清楚,待进一步研究。以W、Nb、Mo、Cr和Ti单质粉 末为原材料,通过机械合金化对粉末进行高能球磨,采用放电等离子烧结技术制备了4种不同Cr含量的 WMoNbCrTi高熵合金,同时探讨了Cr含量对WMoNbCrTi高熵合金物相组成、微观组织、室温力学性能 及800℃高温抗氧化性能的影响。研究结果表明,随着Cr含量的增加,WMoNbTiCr合金维氏硬度、压缩断 裂强度和压缩应变相应增加,其中20W20Mo20Nb20Ti20Cr高熵合金的硬度、断裂强度和应变均达到最大 值,分别为9.73 GPa、2116 MPa和5.1%。随着Cr含量的增加,WMoNbTiCr高熵合金的晶粒尺寸越来越 小,合金压缩应变的增加主要归因于高熵合金晶粒细化效果。WMoNbTiCr高熵合金的晶粒尺寸越来越 小,合金压缩应变的增加主要归因于高熵合金晶粒细化效果。WMoNbTiCr高熵合金的固溶强化、Laves第二 相强化和组织细化的综合效应,提高了合金的硬度和压缩断裂强度。另外,4种不同Cr含量的WMoNbCrTi 高熵合金在800℃下氧化40 h后,合金表面均形成疏松多孔的氧化膜,并且该氧化膜容易脱落,说明Cr含量 的增加只能稍微改善WMoNbCrTi高熵合金在800℃下的抗氧化性能。Cr含量对WMoNbTiCr高熵合金力 学性能和高温抗氧化性能的影响研究,为难熔高熵合金的发展提供了实验基础和理论指导。(专精特新·特 殊环境材料服役行为专辑十五之十)

关键词: WMoNbCrTi;高熵合金;放电等离子烧结;硬度;压缩断裂强度;压缩应变;强化机制;抗氧化性能 中图分类号:TG146 **文献标志码:** A **文章编号:**1673-9981(2025)03-0490-07

引文格式:黄星鑫,胡斌梁.Cr含量对WMoNbCrTi高熵合金力学和抗氧化性能的影响[J].材料研究与应用,2025,19(3): 490-496.

HUANG Xingxin, HU Binliang. Effect of Cr Content on Mechanical Properties and Oxidation Resistance of WMoNbCrTi Hing-Entropy Alloy[J]. Materials Research and Application, 2025, 19(3): 490-496.

0 引言

高熵合金(HEAs)是由5种或5种以上等量或 大约等量金属形成的合金,由于高熵合金具有许多 优异的性能,因此在材料科学及工程应用方面受到 学者们的高度重视^[1-3]。自从HEA概念引入以来, 由于单相固溶体(BCC或FCC)的优异性能可以通 过选择元素来控制,因此高熵合金微观组织和性能 的调控成为研究的热点之一^[4-6]。随着航空航天领 域的迅速发展,对具有优越力学性能的耐热高温合 金的需求越来越迫切。与传统的高温结构材料 (Haynes 230或 Inconel 718)相比,单一BCC结构的 难熔高熵合金具有更优异的高温力学性能^[7-9]。 NbMoTaW和NbMoTaWV高熵合金的维氏硬度在 室 温 下 分 别 达 到 4 455 和 5 250MPa^[2]。 HfMoxNbTaTiZr难熔体系具有典型的BCC固溶体 枝晶结构^[10],HfMoNbTaTiZr合金在室温和1200℃ 下压缩屈服强度分别为1719和556 MPa^[9]。由此 可见,难熔高熵合金具有较大的发展应用前景。

第二相的引入是强化高熵合金的方法之一,高 熵合金在高温下的强度取决于第二相的数量和分 布^[6]。第二 Laves 相是在高熵合金粉末冶金烧结过 程中形成的,原位产生和析出的 Laves 相对合金力 学性能有显著的影响。当温度为1273 K时,由两个 无序 BCC 相组成的 NbTiV2Zr 合金的屈服强度值 为72 MPa,而由 BCC 固溶相和 Laves 相组成的 CrNbTiVZr 合金的屈服强度值可达 259 MPa^[11-12]。 据报道^[12],AlNbTiV 合金由单一的 BCC 相组成,该 合金在室温和 800 ℃的屈服强度分别为1000 和 560 MPa。然而,添加 Cr后,AlCr1.5NbTiV 合金中 包含 BCC 固溶体和 Laves 相,该合金的室温屈服强

收稿日期:2024-09-26

作者简介:黄星鑫,本科,讲师,研究方向为金属材料的制备与性能研究。E-mail: 4870397@qq.com。

度为1700 MPa,而800℃的屈服强度为970 MPa^[13]。因此,在制备过程中产生Laves相是开发高性能难熔高熵合金的有效途径。据文献[14]报道,等摩尔WMoNbTiCr高熵合金中由于存在Laves相,因此具有优越的力学性能。然而,Cr含量对高熵合金力学性能和高温抗氧化性能的影响规律及作用机制尚不清楚,这需有待进一步研究。本研究采用粉末冶金方法制备了不同Cr含量的WMoNbCrTi高熵合金,并系统地研究了Cr对WMoNbCrTi高熵合金室温力学性能和高温抗氧化性能的影响,为高熵合金的发展提供理论和实验研究基础。

1 实验部分

1.1 高熵合金粉末制备

高熵合金粉末的制备,以W(粒度1-3μm,质 量分数 99.9%)、Nb(粒度 20-45 µm,质量分数 99.5%)、Mo(粒度1-3 µm,质量分数99.9%)、Cr (粒度 20-38 µm,质量分数 99.9%)和 Ti(粒度 10-25 µm,质量分数 99.9%)单质粉末为原材料, 按 照 23.75W23.75Mo23.75Nb23.75Ti5Cr 22. 5W22. 5Mo22. 5Nb22. 5Ti10Cr, 21. 25W21. 25-Mo21. 25Nbr21. 25T15Ci和 20W20Mo20Nb20Ti20Cr 的元素摩尔比进行4种高熵合金成分设计,试样分 别简称为5Cr、10Cr、15Cr和20Cr高熵合金。将上 述系列粉末置入氩气保护性气氛的硬质合金球磨罐 中(型号QM-3SP4),采用硬质合金球高能球磨法得 到高熵合金粉末。其中,球磨工艺参数为球料比 10:1、转速 300 r·min⁻¹、球磨时间 40 h。

1.2 高熵合金 SPS 烧结

将装有上述球磨粉末的石墨模具置入放电等离子烧结炉(型号 SPS-20T-10)中,在烧结温度1400℃、压力30 MPa、保温时间6 min、真空度为1×10⁻³Pa条件下进行放电等离子烧结。待烧结结束后,用SiC砂纸打磨试样表面,以去除烧结过程中在高熵合金表面产生的污染物。

1.3 力学性能测试

以水为浸泡介质,采用阿基米德浸泡法测定样 品的真实密度。利用维氏硬度计测试WMoNbCrTi 合金的硬度,测试载荷为98N、加载时间为10s、保 载时间为15s。压缩试样尺寸为直径4mm、长度6 mm,以1×10⁻³s⁻¹压缩速率测量合金在室温下的 压缩性能。密度、硬度和压缩性能均进行5次测量, 测试的平均值用来表征试样的最终性能。

1.4 高温抗氧化性能测试

采用循环氧化法对高熵合金在800℃的抗氧化 性能进行测试。将高熵合金试样置于高纯氧化铝坩 埚,随后在马弗炉中进行氧化处理,累计的氧化时间 为40h,每隔一定的时间从炉中取出样品,待样品自 然冷却后,用分析天平(感应量1×10⁻⁴g)称其质 量。采用样品单位面积的质量变化来表征材料的抗 高温氧化性能。

1.5 微观组织结构表征

利用 X 射线衍射仪(XRD, D8 Advanced, Cu 靶)分析高熵合金的物相,参数为管压 20 kV、扫描 角度 2θ =10°—80°、扫描速度4(°)·min⁻¹。使用电子 扫描电镜(SEM, JSM-5610L)分析高熵合金的微观 组织形貌,其中加速电压为 20 kV。另外,通过高熵 合金断口形貌 SEM 照片计算合金晶粒大小,从而得 到合金的近似晶粒大小。

2 结果与讨论

不同 Cr 含量 WMoNbCrTi 高 熵 合 金 的 微 观 组织

图1为不同 Cr含量高熵合金烧结体的 XRD 图 谱。从图1可见,不同 Cr含量的 WMoNbCrTi高熵 合金均包含 BCC 固溶体相,高 Cr含量(15Cr和 20Cr)的 WMoNbCrTi高熵合金可检测到 Laves 相。 随着 Cr含量增加,Laves 相衍射峰强度增加,表明 Laves 相的数量增加。由于 WMoNbCrTi中 Cr原子 半径最小,随着 Cr含量增加,Cr取代合金中其他元 素的位置增多,晶格畸变程度增加。根据布拉格定 律 2d·sin $\theta = \lambda$ 可知,d变小、 λ 不变时,会导致 θ 变大, 这使得 WMoNbCrTi合金 BCC 固溶体衍射峰稍微 向右偏移。



Figure 1 XRD patterns of the WMoNbCrTi HEAs with different content of Cr

图 2 为不同 Cr 含量 WMoNbCrTi 高熵合金的 SEM 图像,图 2 中不同区域的能谱结果列于表 1。 从图 2 和表 1 可知:5Cr 和 10Cr 的高熵合金包含 BCC1 固溶体基体相和析出的富 Ti-BCC2 固溶体 (图中黑色所示),并未发现明显的 Laves 相;在 15Cr 和 20Cr合金中,除能观察到 BCC1 和富 Ti-BCC2 固 溶体外,还可以观察到 Laves 相(富 Cr 和 Nb,贫 W、 Mo、Ti)。



(a)—5Cr; (b)—10Cr; (c)—15Cr; (d)—20Cr。 图 2 WMoNbCrTi高熵合金 SEM 图像

Figure 2 SEM images of the WMoNbCrTi HEAs alloys



表1 图2中不同区域 EDS 结果

Table	ə 1	EDS	results	of	different	zones	in	figure	2
-------	-----	-----	---------	----	-----------	-------	----	--------	---

口草	含量(原子百分数)/%						
区域	W	Мо	Nb	Cr	Ti		
А	7.51	7.08	7.08	1.87	76.46		
В	23.71	23.19	27.89	5.74	17.71		
С	5.75	3.91	4.85	2.42	83.07		
D	24.30	23.47	23.73	11.24	17.26		
Е	6.26	5.19	24.54	49.87	14.14		
F	4.97	4.77	27.16	52.42	10.69		

2.2 Cr含量对高熵合金密度的影响

根据混合物理论计算规则,5Cr、10Cr、15Cr和20Cr高熵合金的理论密度分别为10.30、10.17、10.05和9.92g·cm⁻³。图3为WMoNbCrTi高熵合金的实际密度和相对密度。从图3可见,随着Cr含量的增加,合金的实际密度和相对密度均逐渐减小,相对密度由98.90%降到98.02%。相对密度减小的主要原因:随着高熵合金中Cr含量的增加,引起高熵合金晶格畸变程度增加,致使合金内的点缺陷增多;随着Cr含量的增加,合金中析出的Laves相的相对含量增多,使烧结难度增加,进而导致合金中的微孔增多^[15]。



图 3 不同 Cr含量 WMoNbCrTi 高熵合金的密度 Figure 3 Densities of the HEAs with different content of Cr

Cr含量对WMoNbCrTi高熵合金的压缩性能 的影响

图 4 为不同 Cr含量高熵合金的室温压缩应力-应变曲线、压缩强度和压缩应变曲线。从图 4(a)应 力-应变曲线可见,4组高熵合金均表现为一定的脆 性断裂。从图 4(b)可见,随着 Cr含量的增加,压缩 断裂强度增加,20Cr合金增加非常明显,其压缩强 度高达 2 116 MPa,约为 5Cr合金 2.6 倍。这是因为 随着 Cr含量的增加,高熵合金基体 BCC 固溶体中 产生的晶格畸变和固溶强化协同作用提高了合金的 强度^[16]。另外,弥散分布的 Laves 相对提高压缩强 度有促进作用^[17]。从图 4(c)可以看出,随 Cr含量的 增加,合金的最大压缩应变逐渐增加。其中,5Cr合 金断裂应变为 3.4%,而 20Cr 合金的断裂应变达 5.1%,20Cr 合金压缩应变比 5Cr 合金提高了约 50%。



图 4 高熵合金的压缩性能 Figure 4 Compressive properties of HEAs

不同 Cr含量的 WMoNbCrTi 高熵合金室温压 缩断口形貌如图 5 所示。从图 5 可见,4 种合金的断 口均具有晶粒状和小平面特征,以及"冰糖块"状花 样的晶界,断裂形式呈现典型的脆性断裂。在晶界 处存在一定的孔洞,主要是由于烧结过程中发生相 变时,析出的富 Ti-BCC 相和 Laves 相与基体 BCC 固溶体的比体积不同产生的^[14]。另外,当Cr含量从 5%增加到20%时,合金断口平均晶粒尺寸分别为 2.64、2.32、2.06和0.50μm,Cr含量的增加对 WMoNbCrTi合金具有明显的晶粒细化效果。20Cr 合金压缩应变优于5Cr合金,主要归因于合金晶粒 的细化,使塑性有一定程度的提高。



(a)-5Cr; (b)-10Cr; (c)-15Cr; (d)-20Cr_o

图 5 高熵合金的断口形貌: Figure 5 Fracture morphologies of HEAs

2.4 Cr含量对WMoNbCrTi高熵合金硬度的影响

图 6 为不同 Cr 含量 WMoNbCrTi高熵合金的维 氏硬度。从图 6 可见,随着 Cr 含量的增加,高熵合 金的维氏硬度增大,最大值高达 9.73 GPa。硬度逐 渐增加的原因主要有 3 方面:(1)在 WMoNbCrTi高



图 6 不同 Cr 含量 WMoNbCrTi 高熵合金维氏硬度 Figure 6 Vicker hardness of the HEAs with different content of Cr

熵合金中,Cr元素半径最小,随着Cr含量增加,晶格 畸变程度加剧,导致合金硬度增加^[16];(2)Cr含量的 增加,导致合金晶粒细化,对合金的硬度有强化作 用;(3)15Cr和20Cr高熵合金析出了Laves相,第二 相的颗粒弥散强化使得合金的硬度增加。

Cr含量对 WMoNbCrTi 高熵合金氧化性能的 影响

图 7 为 4 种高熵合金 800 ℃的氧化动力学曲线。 从图 7(a)氧化增重曲线可以看出,随着氧化时间延 长,4 种合金均表现为氧化增重。其中,5Cr、10Cr、 15Cr、20Cr合金氧化 40 h后分别增重 41.12、13.21、 16.58 和 21.75 mg·cm⁻²。从图 7(b)合金氧化质量 增重的平方与时间的关系曲线可见,4 种合金试样 氧化增重的平方与时间呈近线性关系。其中,5Cr、 10Cr、15Cr和 20Cr高熵合金的氧化速率常数 k_p 分别 为 54.18、5.13、8.04 和 13.98 mg²·cm⁻⁴·h⁻¹。对比 4 种合金的氧化速率常数可知,适量增加 Cr的含量 能改善WMoNbCrTi高熵合金在 800 ℃的高温抗氧 化性能。

40

(a)₄₀-(b)₁₆₀₀ 1 400 35 mo. 20Ci1 200 1 200 1 000 800 400 200 200 1.200 30 15Cr 10Cr 20Cr E 25 15Cr 5Cr Mass gain/(mg. 20-15-10-10Cr **-**5Cr 600 400 200 40 16 202432 36 24 32 36 12 16 20 28 Oxidation time/ h Oxidation time/ h (a)一氧化增重曲线:(b)一增重平方与时间的关系曲线。 (a)-oxidation weight gain; (b)-square of weight gain versus time. 图7 高熵合金800℃的氧化曲线



图 8 为 WMoNbCrTi高熵合金在 800 ℃氧化 40 h后的表层 XRD图。从图 8 可见, 合金表面氧化产 物主要是由MoO₃、Nb₂W₃O₁₄、Nb₂O₅和TiO₂组成。 图 9 为 5Cr、10Cr 和 20Cr 高熵合金在 800 ℃氧化 40 h 的表面形貌图。从图9可见,合金的氧化层都是由 多孔的氧化物组成,合金中Cr含量不同,其表面形 貌存在差异。从图 9(a)—(c)可以看出,5Cr和 20Cr 合金的氧化膜疏松多孔。这使氧气更容易通过氧化 膜孔隙进入合金内部,与基体合金元素发生氧化反 应。其中,10Cr合金的表面氧化膜与其他成分合金 相比局部比较致密,表现为抗氧化能力相对较好,这 与动力学结果相一致。结合高熵合金表面氧化物 EDS(见表2)结果可知,WMoNbCrTi高熵合金经氧 化后主要形成W、Mo、Nb、Ti的氧化物。难熔金属







图 9 在 800 ℃下氧化 40 h 的合金氧化表面形貌 Figure 9 Surface morphologies of oxidized alloy by 800 °C for 40 h

494

W和Mo在高温时容易发生氧化,由于高熵合金表 面氧化物与合金热膨胀系数不匹配,氧化膜与基体 结合较弱,氧化物体积与基体合金体积更高的比 率^[30]是导致WMoNbCrTi氧化层剥落的主要原 因^[18-19]。另外,WMoNbCrTi在800℃氧化40h后, 从合金表面氧化物的放大图(见图9(d)—(f))可以 看出,WMoNbCrTi合金表面形成的氧化膜疏松多 孔,此种氧化膜对基体合金保护能力较差。

表 2 WMoNbCrTi高熵合金表面区域 EDS Table 1 EDS of surface oxides of WMoNbCrTi HEA

区塔	含量(原子百分数)/%							
区域	W	Mo	Nb	Cr	Ti	0		
1	12.3	10.3	11.9	1.2	4.9	59.4		
2	5.9	4.5	8.6	4.2	18.2	58.6		
3	7.5	3.5	10.4	12.2	16.5	49.9		

3 结论

(1)随着 Cr 含量的增加, WMoNbTiCr 合金的 维氏硬度、压缩断裂强度和压缩应变也相应增加。 其中,20Cr 合金的维氏硬度、压缩断裂强度和压缩 应变值最大,分别为9.73 GPa、2116 MPa和5.1%。

(2)Cr含量的增加改善了WMoNbTiCr高熵合 金的微观组织,晶粒的细化使压缩应变增加,固溶强 化、Laves相强化和组织细化的综合效应提高了合 金的硬度和断裂强度。

(3)4种不同Cr含量的高熵合金在800℃下氧 化,并没有形成较好的氧化膜,合金抗氧化能力较 差,Cr含量的增加只使合金在800℃下抗氧化性能 有轻微的改善。

参考文献:

- YEH J W, CHEN S K, LIN S J, et al. Nanostructured and high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes
 [J]. Adv Eng Mater, 2004(6):299-303.
- [2] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18, 1758-1765.
- [3] 杨煜锋,杨玉婧,董勇,等.冷轧变形量对热处理后 CoCrFeMnNi高熵合金退火孪晶及力学性能的影响 [J].材料研究与应用,2024,18(5):736-741
- [4] MA D, YAO M, PRADEEP K G, et al. Phase stability of non-equiatomic CoCrFeMnNi high entropy alloys[J]. Acta Mater, 2015, 98, 288-296.
- [5] ZHANG Y, YANG X, LIAW P K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys[J]. JOM, 2012, 64, 838-930.

- [6] MIRACLE D, MILLER J D, SENKOV O, et al. Exploration and development of high entropy alloys for structural applications[J]. Entropy, 2014, 16, 494-525.
- [7] GORR B, MUELLER F, CHRIST H J, et al. High temperature oxidation behavior of an equimolar refractory metal-based alloy 20Nb-20Mo-20Cr-20Ti-20Al with and without Si addition[J]. J Alloys Compd, 2016, 688:468-477.
- [8] CHEN H, KAUFFMANN A, GORR B, et al. Microstructure and mechanical properties at elevated temperatures of a new Al-containing refractory highentropy alloy Nb-Mo-Cr-Ti-Al [J]. J Alloys Compd, 2016, 661:206-215.
- [9] JUAN C C, TSAI M H, TSAI C W, et al. Enhanced mechanical properties of HfMoTaTiZr and HfMoNbTaTiZr refractory high-entropy alloys [J]. Intermetallics, 2015, 62:76-83.
- [10] JUAN C C, TSENG K K, HSU W L, et al. Solution strengthening of ductile refractory HfMoxNbTaTiZr high-entropy alloys [J]. Mater Lett, 2016, 175: 284-287.
- [11] SENKOV O N, SENKOVA S V, WOODWARD C, et al. Refractory multi-principal element alloys of the Cr-Nb-Ti-V-Zr system: Microstructure and phase analysis[J]. Acta Mater, 2013, 61:1545-1557.
- [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]. Mater Sci Eng A, 2013, 565:51-62.
- [13] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SKIBIN D
 V, et al. Structure and mechanical properties of the AlCr_xNbTiV (x=0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys
 [J]. J Alloys Compd, 2015, 652:266-280.
- [14] YAN J H, LI K L, WANG Y, et al. Microstructure and mechanical properties of WMoNbCrTi HEAs sintered from the powders milled for different durations [J]. JOM, 2019, 71:2489-2497.
- [15] 郭文晶.机械合金化NbMoTaW(V)高熔点高熵合金 的组织及其性能[D].广州:华南理工大学,2016.
- [16] TODA-CARABALLO I. Modelling solid solution hardening in high entropy alloys [J]. Acta Materialia, 2015, 85:14-23.
- [17] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, SKIBIN D
 V, et al. Structure and mechanical properties of the AlCr_xNbTiV (x=0, 0.5, 1, 1.5) high entropy alloys
 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 652: 266-280.
- [18] 冯兴国, 唐光泽, 马欣新, 等.(ZrTANbTiW)N薄膜 组织结构与机械性能研究[J].稀有金属材料与工程, 2013(s2):41-45.

[19] REN M, WANG G, LI B. Microstructure and properties of in-situ high entropy alloy matrix

composites for electronic packaging shell [C]. Piscataway:IEEE, 2017.

Effect of Cr Content on Mechanical Properties and Oxidation Resistance of WMoNbCrTi Hing-Entropy Alloy

HUANG Xingxin, HU Binliang

(Hunan Geely Automobile College, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The WMoNbCrTi refractory high entropy alloy, which has excellent mechanical properties, is a promising high temperature structural material. Laves phases are formed in WMoNbCrTi alloy during the preparing process. The Laves phases have a significant influence on the mechanical properties and oxidation resistance of WMoNbCrTi alloy. However, the effect of Cr content on the mechanical properties and high temperature oxidation resistance of WMoNbCrTi alloy is not yet clear, which needs to be further studied. In this paper, four kinds of high entropy alloy powders with different Cr contents were prepared by using W, Nb, Mo, Cr and Ti as raw materials. Refractory WMoNbTiCr HEAs with different Cr content were prepared by mechanical alloying followed by spark plasma sintering. The effects of chromium content on the phase composition, microstructure, room temperature mechanical properties and oxidation resistance at 800 °C of WMoNbTiCr HEAs were investigated. As the content of Cr increase, the Vickers hardness, compressive fracture strength, and compressive strain of the WMoNbTiCr HEAs also increase. The 20W20Mo20Nb20Ti20Cr alloy exhibits the corresponding maximum values of 9.73 GPa, 2 116 MPa, and 5.1% for the 20Cr alloy, respectively. With the increase of Cr content, the grain size of WMoNbTiCr alloy becomes smaller and smaller. The increasing compressive strain are mainly attributed to the grain refinement. However, the solid solution strengthening, the Laves phase strengthening, and microstructure refinement resulted in an increase in the hardness and compressive fracture strength. After oxidation at 800 °C for 40 h, porous oxide films were formed on the surface of four kinds of WMoNbCrTi high entropy alloys, and the oxide films fall off easily from substrate. The increase in Cr content has only slightly improves on the oxidation resistance at 800 °C. The results provide essential experimental data and theoretical guidance for the development of refractory high entropy alloys.

Keywords: WMoNbCrTi; HEAs; spark plasma sintering; hardness; compressive fracture strength; compressive strain; strengthening mechanisms; oxidation resistance

(学术编辑:常成)