

Cr 含量及热处理对 NbMoZrAl 基高熵合金微观组织与力学性能的影响

王 涛¹, 时 洁¹, 潘虎成¹, 商洪宇¹, 滕常青², 张 伟^{1, 2}, 杨吉军³, 吴 璐²

(1. 东北大学, 材料科学与工程学院, 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819;

2. 中国核动力研究设计院第一研究所, 四川成都 610041;

3. 四川大学辐射物理与技术教育部重点实验室, 四川成都 610064)

摘要: 采用真空电弧熔炼的方法制备了高熵合金 $(\text{Nb}_{70}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_{10})_{100-x}\text{Cr}_x$ ($x=5, 10, 15$ at.%), 通过X射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM)、能谱仪 (EDS) 和电子万能试验机研究了Cr含量和高温热处理对该合金微观组织和力学性能的影响。结果表明, 随着Cr元素的添加, 合金中析出了 Cr_2 (Nb, Zr) 型第二相, 随着Cr元素含量的增加, 第二相的体积分数增加且枝晶细化; 经过1 200 °C、24 h的高温热处理后, 更多的Cr元素扩散析出到枝晶间形成Laves相, 并与Al-Zr相交错分布。NbMoZrAl-Cr合金压缩屈服强度逐渐从0Cr合金的945 MPa提升到5Cr合金的1 153 MPa、10Cr合金的1 212 MPa以及15Cr合金的1 305 MPa, 第二相强化及细晶强化是屈服强度提升的主要原因。相关结果将为新型难熔高熵合金的设计提供一定的参考和依据。

作者简介:

王 涛 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为核用难熔高熵合金的设计与制备。E-mail: 1664511030@qq.com

通讯作者:

潘虎成, 男, 教授, 博士, 博士生导师。电话: 024-83687746, E-mail: panhc@atm.neu.edu.cn

中图分类号: TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2024)

09-1210-08

基金项目:

国家自然科学基金 (U2067218, U2167213, U2241235); 四川省科技厅项目 (21MZGC0400, 2022JDJQ0021); 中国核工业集团有限公司青年英才菁英项目 (CNNC-2021-31); 反应堆燃料与材料国家重点实验室项目 (6142A06190510); 中央高校基本业务费项目 (N2202020)。

收稿日期:

2024-03-11 收到初稿,

2024-04-02 收到修订稿。

关键词: 难熔高熵合金; 高温热处理; 力学性能; 热稳定性; 第二相

随着第四代航空技术的发展, 燃烧室、叶片和涡轮等发动机热端构件, 需要在高达1 400~1 650 °C的高温环境下进行工作, 迫切需要可在极端环境下服役的新材料, 以实现更好的性能更高的发动机效率和更低的温室气体排放。在众多的候选材料中, 高熵合金逐渐引起广泛的关注^[1-4]。高熵合金是指至少5种元素以等摩尔比或近等摩尔比形成的合金, 最初是由中国台湾省学者叶均蔚教授在20世纪90年代提出^[5-6]。高熵合金具有四大核心效应, 即高熵效应、迟滞扩散效应、晶格畸变效应及鸡尾酒效应^[7-9]。四大效应和独特的成分设计使得高熵合金具有优异的强度^[10]、硬度^[11]、耐腐蚀性^[12]、耐磨性^[13]和热稳定性^[14], 成为近年来金属材料研究的热点。

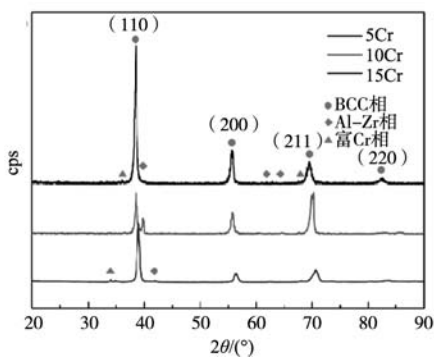
目前, 对高熵合金的研究主要集中于3D过渡族元素, 如钴 (Co)、铜 (Cu)、铁 (Fe)、镍 (Ni)、锰 (Mn) 等元素, 这些元素具有相近电负性和原子半径, 容易形成简单的固溶体结构^[15-17]。如Deng^[16]等人研究制备了单相均匀固溶体 $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ 合金, 具有约55%的伸长率, 但屈服强度仅500 MPa, 难以满足工程实际应用。而Senkov^[18]等在2010年提出的难熔高熵合金 (RHEAs) 在高温下具有优异的力学性能和热稳定性, 在高温领域表现出良好的应用前景。难熔高熵合金由至少五种难熔元素组成, 如钼 (Mo)、钨 (W)、铌 (Nb)、铪 (Hf)、钽 (Ta)、钛 (Ti)、钒 (V) 和锆 (Zr) 等, 这类合金也被称为难熔多主元合金 (RMPEA) 或难熔浓缩合金^[19-20] (RCCA)。难熔高熵合金作为特种高温合金具有诸多优异的性能, 如高温力学性能、耐磨性、耐腐蚀性、抗高温氧化以及抗辐照等^[21-23]。

最新研究表明, 尽管在难熔高熵合金中添加其他金属元素 (Cr、Al、Sc等) 或非金属元素 (C、N、Si等), 可获得多相的高熵合金, 但合金体系中的主相仍为BCC固溶体相, 新相的形成取决于新加入的合金元素和基体合金元素的结合能^[24-27]。譬如, Fan^[28]等人研究发现Laves相 (C14或C15) 通常存在于含有 Cr、Mo和Zr或Al、

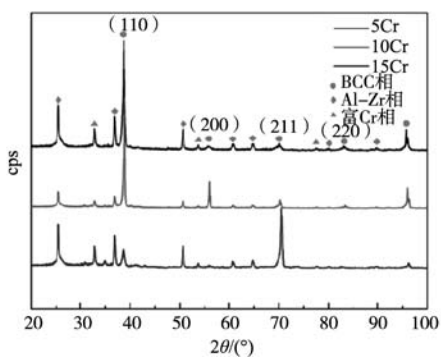
V和Zr的高熵合金中,由于Zr和Cr、V或Mo之间存在较大的原子尺寸差,这有利于Laves相的形成,而增加Nb和Ti则抑制Laves相的形成。因此,本文通过真空电弧熔炼法制备了NbMoZrAl基难熔合金,系统研究了Cr合金化及高温热处理对合金相、显微组织和力学性能的影响,并探究其强化机理,为进一步研究性能优异的难熔高熵合金提供理论指导和科学依据。

1 试验方法

本文采用水冷铜坩埚的电弧熔炼法制备 $(\text{Nb}_{70}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_{10})_{100-x}\text{Cr}_x$ ($x=0, 5, 10, 15, \text{at.}\%$)合金铸锭,以下分别简称为0Cr、5Cr、10Cr和15Cr合金。采用的原料为高纯度Nb颗粒、Mo颗粒、Cr颗粒、Al颗粒和海绵Zr,且在开始熔炼合金铸锭前,熔化2~3次纯Ti锭以充分吸收残留在炉内的氧气。在熔炼过程中,将合金锭翻转6次且每次熔炼时间控制在5 min,以确保获得成分均匀的铸锭。通过X射线衍射分析测试合金晶体结构及晶格畸变,扫描速度设置为5 deg/min, 2θ 范围为 $20^\circ\sim 100^\circ$ 。通过高温热处理炉对铸态样品进行1 200 $^\circ\text{C}$ 、保温24 h的热处理,水淬后得到固溶态试样。通过背散射电子模式的扫描电子显微镜对组织形貌、第二相分布和数量进行表征,并通过能谱仪分析合金的元素分布。采用岛津AG-X Plus 100 kN台式电子万能试验机进行室温压缩试验,压缩试样尺寸为 $\Phi 4\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,压缩应变速率设置为 10^{-3} s^{-1} ,每次重复三次试验。



(a) 铸态



(b) 固溶态

图2 铸态和固溶态 $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ 合金的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of as cast and solid solution $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ alloy

过高温热处理后合金中的Laves相衍射峰强度增强,表明合金内第二相的体积分数逐渐增加。

2.2 NbMoZrAl-(Cr)合金微观组织

图3示出了铸态0Cr高熵合金的SEM组织结果。表1列出了铸态和固溶态NbMoZrAl合金中枝晶和枝晶间区

2 结果与讨论

2.1 NbMoZrAl-(Cr)合金相结构

图1为铸态和固溶态0Cr高熵合金的XRD结果。由图1可知,铸态和固溶态0Cr合金都表现为双相结构,经衍射峰标定可确定为BCC+Laves相。通过与标准PDF卡片对比,可知这些Laves相为高硬度Al-Zr相。图2a为铸态 $(\text{Nb}_{70}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_{10})_{100-x}\text{Cr}_x$ ($x=5, 10, 15$)高熵合金的XRD图。由图2a可知,三种含Cr合金中出现了新衍射峰,经对比后可确定新生成的相为 MgCu_2 型Laves_C15相,该Laves相结构属于Fd-3m (227)的空间晶格群。随着Cr含量增加,BCC (110)衍射峰逐渐右移,这是由于Cr原子半径小于Nb、Mo、Zr原子,而新生成的Laves相使部分溶质元素从基体中分离,即导致晶格常数变小,衍射峰向右偏移。由图2b可知,经

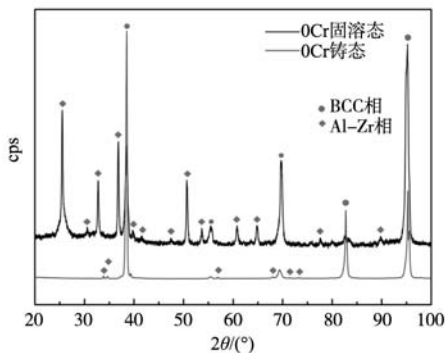


图1 铸态及固溶态0Cr合金的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of as cast and solid solution 0Cr alloy

域的化学组成。由图3可知,铸态NbMoZrAl合金表现为典型的枝晶组织,而固溶态合金枝晶已完全消除。在背散射模式下(BSE),原子序数越高则衬度会越亮,结合XRD可知,亮色的枝晶区域富含Nb、Mo元素,而深灰色的枝晶间区域富含Al、Zr元素(图3c、f)。图4和图5分别为不同Cr含量NbMoZrAlCr铸态合金

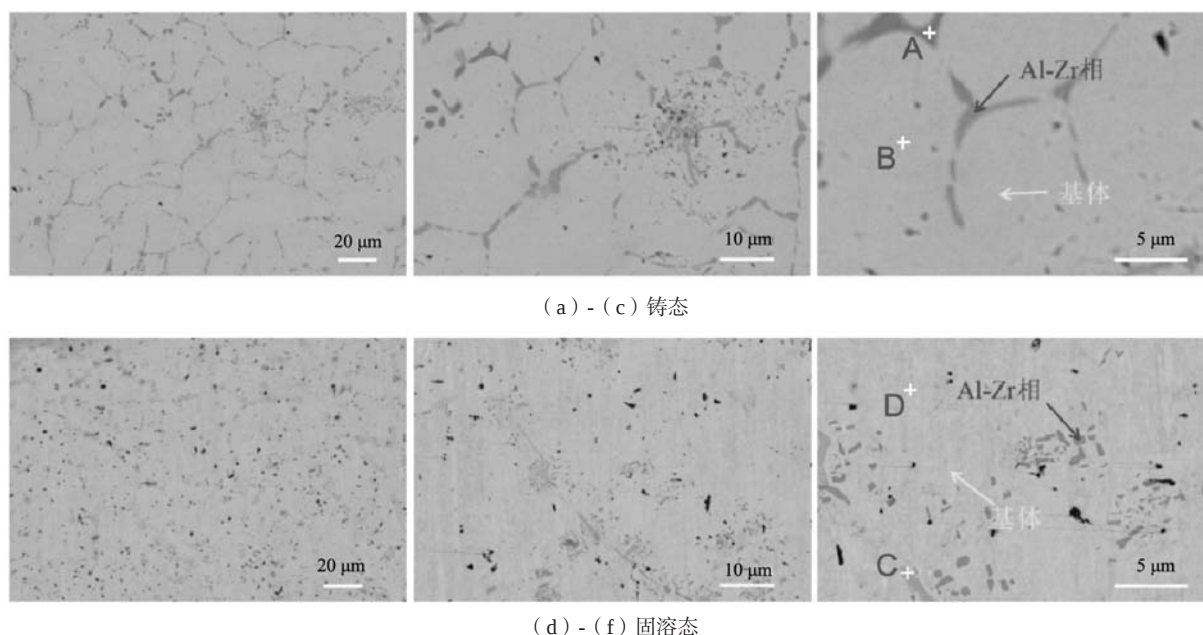


图3 0Cr难熔高熵合金SEM图像

Fig. 3 0Cr refractory high entropy alloy SEM image

表1 铸态及固溶态0Cr合金的SEM-EDS点扫描结果

Table 1 SEM-EDS point scanning results of as cast and solid solution 0Cr alloys

合金	区域	Nb	Mo	Zr	Al
铸态	A区: Al-Zr	52.33	5.10	26.19	16.38
	B区: BCC	80.84	8.38	6.87	3.91
固溶态	C区: Al-Zr	49.08	4.90	28.32	17.71
	D区: BCC	76.77	8.21	11.19	3.83

的SEM结果及对应的EDS面扫结果, 5Cr、10Cr和15Cr合金均表现为典型的枝晶组织。图5表明三种含Cr合金的亮色枝晶区富含Mo、Nb元素(红色箭头所示), 而Al、Zr、Cr三种原子序数偏小的元素富集在灰色的枝晶间区域(蓝色箭头所示), 深区域则主要由 α -Zr相(Zr元素所占原子百分比高达90%)组成(绿色箭头所示)。

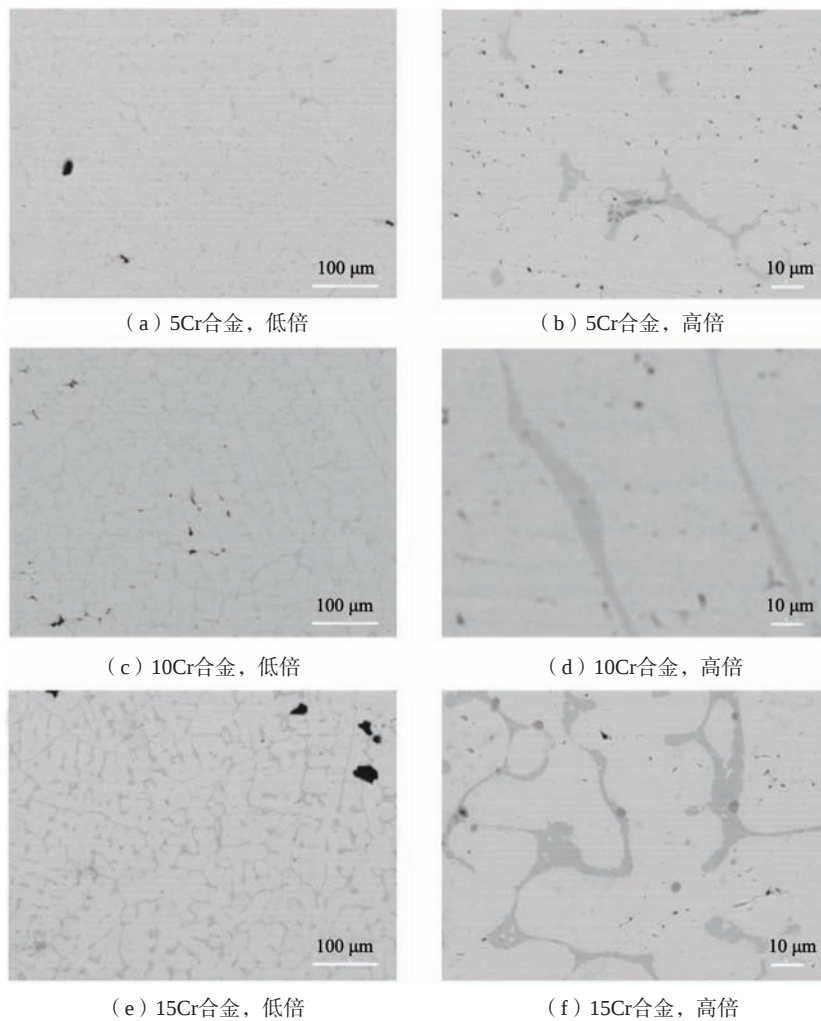
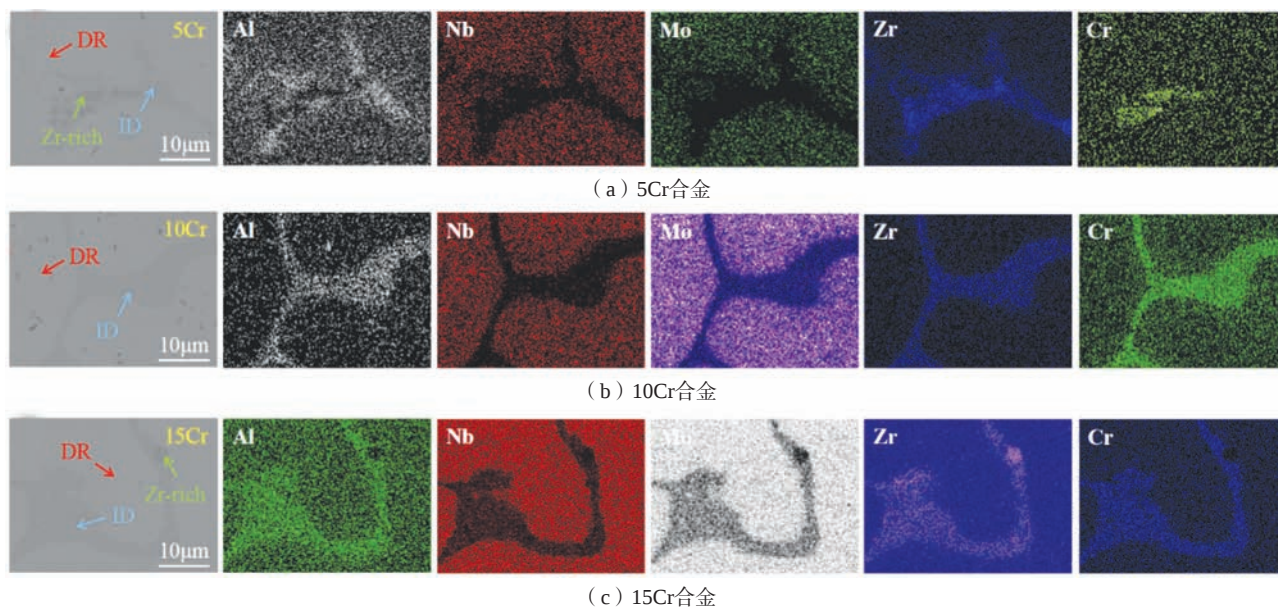
由图4可知, 随着Cr含量的增加, Laves相的体积分数增加且枝晶发生细化, 枝晶细化是由于第二相的增加使晶粒长大受阻, 且Laves相逐渐贯穿枝晶间导致基体的不连续。表2列出了三种含Cr合金中枝晶和枝晶间区域的化学组成。由于Nb、Mo元素的熔点高优先凝固成枝晶, 而熔点较低的Al、Cr、Zr元素凝固于枝晶间, 导致元素偏析的发生。对三种含Cr合金进行面扫和EDS点扫来确定合金中新Laves相的元素组成, 如图5和表2所示。从表2中可以看出, 随着Cr含量的逐渐增加, 枝晶基体中固溶的Cr也随之增加。一般元素之间的混合焓越负越容易形成化合物, Nb、Zr元素和Cr元

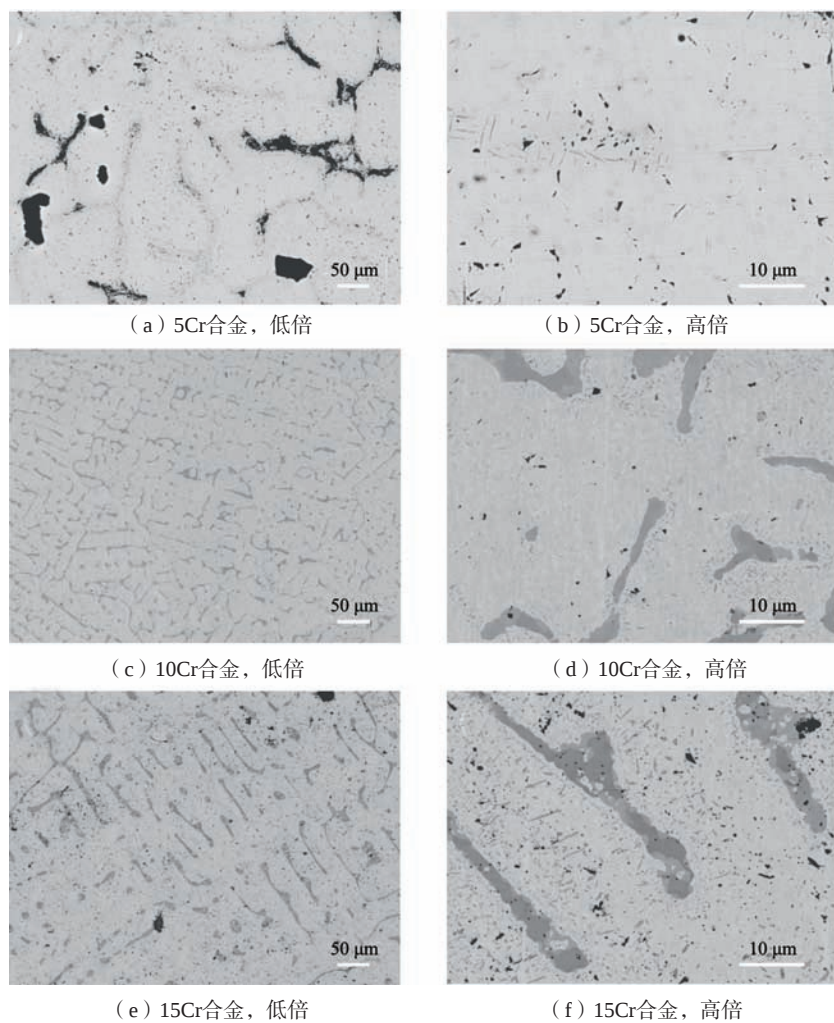
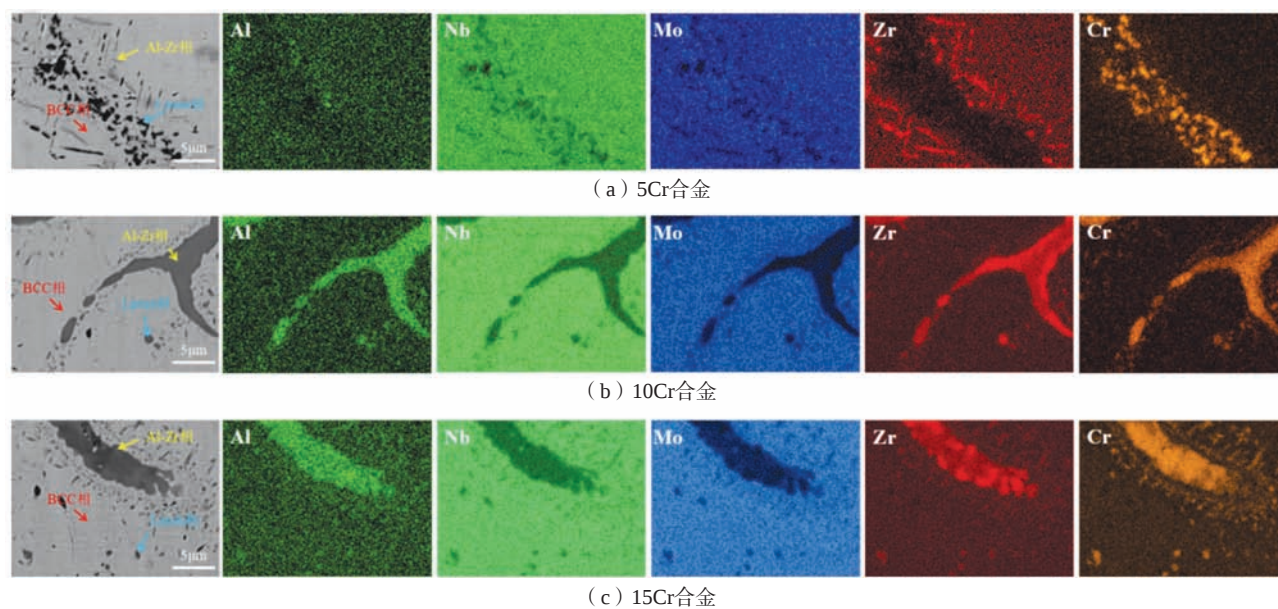
表2 铸态NbMoZrAlCr_x系合金的化学成分Table 2 Chemical composition of the as cast NbMoZrAlCr_x alloys

合金	区域	Nb	Mo	Zr	Cr	Al
5Cr	DR	80.98	9.15	5.28	2.02	2.57
	ID	21.56	2.70	48.46	12.33	14.95
	α -Zr	3.38	0.48	95.43	0.45	0.26
10Cr	DR	78.29	9.27	4.54	4.93	2.97
	ID	24.36	0.98	40.97	20.11	13.58
15Cr	DR	76.94	8.42	4.02	7.81	2.81
	ID	25.97	1.20	29.10	33.44	10.30
	α -Zr	3.17	0.77	93.22	2.84	—

素之间的混合焓为 $-12 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $-7 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 而Mo和Cr之间的混合焓为零, 因此Cr元素可以和Nb、Zr结合形成 Cr_2Nb 、 Cr_2Zr 。由此可推断新生成Laves相为Nb、Zr、Cr元素组成的 $\text{Cr}_2(\text{Zr}, \text{Nb})$ 相。

经过 1200°C 保温24 h后水淬得到的固溶态含Cr合金的显微形貌和元素分布如图6、7所示。在背散射模式下, 三种合金的组织都呈现出白、黑、灰三种衬度, 即证明该合金存在三种相结构, 其中晶内主要被白色衬度的相占据, 黑色和灰色的相组织互相交错, 主要存在于晶间区域。由图7a-c面扫结果可知, 白色衬度的组织主要由Nb、Mo两种元素富集组成(红色箭头所示), 而Al、Cr、Zr三种原子序数较小的元素主要富集在黑、灰色衬度组织区域(黄色和蓝色箭头所示)。为进一步确定各衬度区域的化学成分组成, 对

图4 铸态NbMoZrAlCr_x系合金的SEM图像Fig. 4 SEM images of as cast NbMoZrAlCr_x alloys图5 铸态NbMoZrAlCr_x合金的SEM-EDS元素分布图Fig. 5 SEM-EDS element distribution of as cast NbMoZrAlCr_x alloy

图6 固溶态 $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ 系合金的SEM显微组织Fig. 6 SEM microstructure of solid solution $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ alloy图7 固溶态 $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ 合金的SEM-EDS面扫描结果Fig. 7 SEM-EDS mapping scanning results of solid solution $\text{Nb}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}\text{Al}_5\text{Cr}_x$ alloys

其进行点扫,结果如表3所示。可以推断出晶内白色区域为富Nb、Mo元素的BCC相,而灰黑区域组成的晶间主要由Al、Zr、Cr、Nb组成,因此该区域由Al-Zr相和富集Cr元素Laves相交叉组成,与图2b的XRD图谱一致。同时,经过热处理后Zr含量超过90%的 α -Zr相并未被发现,说明大多数的Zr颗粒已固溶于基体。

表3 固溶态Nb₈₀Mo₁₀Zr₁₀Al₅Cr_x合金的SEM-EDS点扫描结果
Table 3 SEM-EDS point scanning results of solid solution Nb₈₀Mo₁₀Zr₁₀Al₅Cr_x alloy at.%

合金	区域	Nb	Mo	Zr	Cr	Al
5Cr	Al-Zr	18.90	3.76	44.69	22.89	9.76
	Laves	40.22	3.49	2.32	51.69	2.29
	DR	78.43	8.45	5.51	5.33	2.28
10Cr	Al-Zr	14.49	2.64	46.31	5.33	10.85
	Laves	19.79	4.23	28.35	34.95	12.69
	DR	76.75	10.89	3.95	6.25	2.15
15Cr	Al-Zr	19.07	1.34	44.60	23.61	11.37
	Laves	19.64	2.30	19.08	50.43	8.55
	DR	79.78	8.95	6.14	2.78	2.35

2.3 NbMoZrAl-(Cr)合金力学性能

室温下对铸态和固溶态0Cr合金进行压缩试验,结果如图8所示。其中铸态0Cr合金的屈服强度为945 MPa,

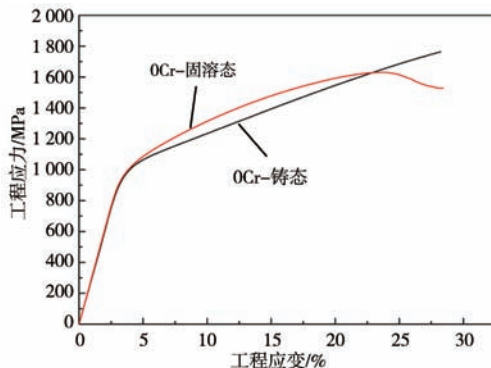
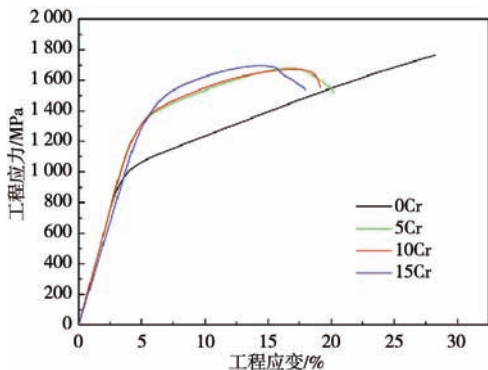


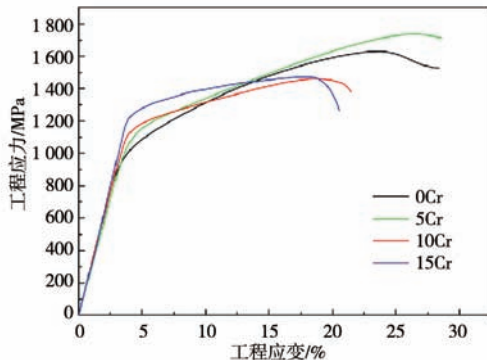
图8 铸态及固溶态0Cr合金的压缩应力-应变曲线

Fig. 8 Compressive stress-strain curves of cast and solid solution 0Cr alloys

塑性大于25%,热处理后屈服强度提高至948 MPa,塑性却下降到20%。图9a为铸态NbMoZrAlCr_x合金的压缩应力-应变曲线。随着Cr元素的添加,5Cr、10Cr和15Cr合金屈服强度逐渐提升至~1 153 MPa、~1 212 MPa和~1 305 MPa,但合金塑性先下降后上升再下降,其中10Cr合金塑性最高为13.4%,具体数据如表4所示。NbMoZrAlCr_x合金屈服强度提高主要归因于第二相强化和细晶强化。随着Cr元素含量的增加,合金的枝晶间区域形成了更高密度的Laves第二相,Laves相会阻碍位错运动从而强化合金。当Cr元素含量越高时,Laves第二相体积分数越大,强化效果越好。从图4可以看出,



(a) 铸态



(b) 固溶态

图9 NbMoZrAlCr_x合金的压缩应力-应变曲线

Fig. 9 Compressive stress-strain curves of NbMoZrAlCr_x alloy

表4 铸态NbMoZrAlCr_x合金的屈服强度、断裂强度及压缩塑性

Table 4 Yield strength, fracture strength and compressive plasticity of as cast NbMoZrAlCr_x alloy

合金样品	屈服强度/MPa	断裂强度/MPa	压缩塑性/%
0Cr	945	-	-
5Cr	1 153	1 682	12.7
10Cr	1 212	1 671	13.4
15Cr	1305	1 693	11.7

添加Cr元素后合金的枝晶发生细化,从而增加了合金的相界面数,使得形变过程中产生位错更容易在界面处堆积,抑制了新位错的运动而产生强化效应。

图9b为固溶态NbMoZrAlCr_x合金的压缩应力-应变曲线。可以看出,高温热处理后5Cr合金的塑性从12.7%提高到22.1%,屈服强度下降了约101 MPa;10Cr、15Cr合金的塑性分别提高了约3%,屈服强度下降了约92~103 MPa。屈服强度、断裂强度及压缩塑性数据均列于表5。结合XRD图谱分析,经过高温热处理

表5 固溶态NbMoZrAlCr_x合金的屈服强度、断裂强度及压缩塑性Table 5 Yield strength, fracture strength and compressive plasticity of solution treated NbMoZrAlCr_x alloy

合金样品	屈服强度/MPa	断裂强度/MPa	压缩塑性/%
0Cr	948	1 613	19.4
5Cr	1 052	1 720	22.1
10Cr	1 109	1 431	16.2
15Cr	1 213	1 410	14.6

后更多Cr元素扩散析出形成Laves相, 固溶强化效果的减弱导致屈服强度的下降。同时, NbMoZrAlCr_x合金内富Cr相体积分数增加, 晶格畸变减小, 对位错运动的抑制减小从而塑性增加。

3 结论

本文系统研究了添加不同含量Cr元素和高温热处理对NbMoZrAl系高熵合金微观组织和力学性能的影响, 制备出了一种具备优异强度与塑性的新型难熔高熵合金, 并对该体系合金的相结构、显微组织、力学性能和强化机制进行了探讨研究, 获得如下研究结果。

(1) NbMoZrAl铸态试样主要由富Mo、Nb元素的

BCC基体相和富含Al、Zr的Al-Zr枝晶间相组成, Cr元素添加后析出Cr₂(Nb, Zr)型Laves相。随着Cr含量的增加, 第二相体积分数增加且枝晶细化。

(2) NbMoZrAl-Cr合金经过高温热处理(1 200 ℃)后, 更多的Cr元素扩散析出到枝晶间形成Laves相, 并与Al-Zr相互相交错。而晶内主要由Nb、Mo元素构成, 几乎不含Al、Zr元素, 且α-Zr相在高温固溶后基本消失。

(3) 当Cr元素含量逐渐增加, 铸态NbMoZrAl-Cr合金的压缩屈服强度从945 MPa逐渐提升到5Cr合金的1 153 MPa、10Cr合金的1 212 MPa和15Cr合金的1 305 MPa, NbMoZrAl-Cr合金的屈服强度提升的主要机制是第二相强化以及细晶强化。

(4) 随着Cr元素含量的增加, 固溶态NbMoZr合金的压缩屈服强度从948 MPa逐渐提升至5Cr合金的1 052 MPa、10Cr合金的1 109 MPa和15Cr合金的1 213 MPa; 高温热处理后固溶强化效果减弱, 合金的屈服强度略有下降, 塑性提升。

本文通过添加Cr元素和高温热处理来调控NbMoZrAl难熔高熵合金的相结构, 研究不同相之间的强化机理来增强合金的性能, 为今后开发强塑性匹配的难熔高熵合金提供新的发展思路。

参考文献:

- [1] 贾宇浩, 王志军, 吴庆峰, 等. 高熵合金高温性能研究进展 [J]. 铸造技术, 2022, 43 (11): 935-947.
- [2] 秦瑞来, 黄文军, 王雪姣, 等. 多主元难熔高熵合金的研究进展 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (12): 31-40.
- [3] 张文毓. 高熵合金的研究与应用进展 [J]. 装备机械, 2022 (3): 76-82.
- [4] 曲明洋, 李廷取, 颜丙辉, 等. Al_xCoFeNiMo高熵合金的结构演变及力学性能 [J]. 铸造, 2020, 69 (1): 11-15.
- [5] YE H 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 (5): 299-303.
- [6] 刘源, 李言祥, 陈祥, 等. 多主元高熵合金研究进展 [J]. 材料导报, 2006, 20 (4): 4-6.
- [7] ZHANG Y. Science and technology in high-entropy alloys [J]. Science China Materials, 2018, 61 (1): 2-22.
- [8] 高炜, 余竹焕, 阎亚雯, 等. Cr对FeCoNiAlCr_x高熵合金组织与力学性能的影响 [J]. 材料工程, 2023, 51 (2): 91-7.
- [9] 刘帅宾, 翟秋亚, 刘洋, 等. Ti₁(Fe₁₅Co₃₅Ni₃₅Cr₁₅)_{100-x}高熵合金的微结构与力学性能 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 200-205.
- [10] 郭景平, 肖逸锋, 吴靓, 等. Cr含量Cr_xMoNbTiZr系高熵合金组织与性能的影响 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (1): 18-23.
- [11] 王晓军, 周旭, 王强, 等. Cr含量对FeCr_xNiMnCu_{0.5}系高熵合金的组织及性能影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (8): 1089-94.
- [12] 刘佳, 安旭光, 孔清泉, 等. FeCoNiCrMn高熵合金的力学性能及耐腐蚀性能分析 [J]. 成都大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (4): 404-409.
- [13] 许金亮, 汪涛, 张陕南, 等. 铸态Cr_xNbTiZr高熵合金的组织与性能研究 [J]. 稀有金属与硬质合金, 2020, 48 (4): 53-58.
- [14] 许桐, 陈庆军, 郑作栋, 等. 高熵合金成分设计与性能研究进展 [J]. 材料研究与应用, 2023, 17 (6): 1039-1050.
- [15] HE L, ZHANG M, WANG D, et al. Microstructure and mechanical properties of in-situ dual ceramic phase synergistic strengthened CoCrMoNbTi (B4C)_x high entropy alloy coating [J]. Optics Laser Technology, 2023, (161): 109172.
- [16] RAABE, D, TASAN, et al. Design of a twinning-induced plasticity high entropy alloy [J]. Acta Materialia, 2015 (94): 124-133.
- [17] 唐群华, 蔡建宾, 吴桂芬, 等. 热处理对Al_{0.5}CoCrFeNiB_{0.2}高熵合金组织结构及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (1): 24-27.
- [18] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys [J]. Intermetallics, 2010, 18 (9): 1758-1765.
- [19] 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.

- [20] 张平, 蒋丽, 杨金学, 等. 核用难熔高熵合金的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (14) : 5-26.
- [21] SENKOV O, RAO S, BUTLER T, et al. Microstructure and properties of Nb-Mo-Zr based refractory alloys [J]. International Journal of Refractory Metals Hard Materials, 2020, 92 (1) : 105321.
- [22] 邵旭, 庞景宇, 纪宇, 等. 热加工工艺对Nb₃₇Ti₂₀Al₁₅Zr₁₅Hf₅Ta₃Mo₂W₁难熔高熵合金组织与性能影响 [J]. 金属热处理, 2023, 48 (9) : 42-48.
- [23] 滕常青, 潘虎成, 商洪宇, 等. 高温热处理对AlZrNbMo核用高熵合金微观组织及力学性能的影响 [J]. 原子能科学技术, 2022 (S01) : 056.
- [24] 王晔, 汪天天, 蒋文韬, 等. Al对Al (x) Mo (0.5) NbTiVSi (0.2) 高熵合金组织和性能影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (7) : 871-875.
- [25] 要玉宏, 梁霄羽, 金耀华, 等. 新型NbMoCrTiAl-1Si-xB (x=0, 1) 难熔高熵合金的微观组织及高温氧化行为研究 [J]. 表面技术, 2020, 49 (6) : 224-235.
- [26] 赵森林, 陈希章. Al_{1.2}Co₂CrFeNi高熵合金的相形成规律及其力学性能 [J]. 材料工程, 2023, 51 (5) : 104-111.
- [27] 齐兆鑫, 梁卉, 赵延周, 等. Al含量对CoFeNi₂V_{0.5}高熵合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (9) : 1047-1053.
- [28] FAN A C, LI J H, TSAI M H J M C. On the phase constituents of three CoCrFeNi_x (x=Cr, Mo, W) high-entropy alloys after prolonged annealing [J]. Materials Chemistry Physics, 2022 (276) : 125431.

Effects of Cr Addition and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of NbMoZrAl Based High Entropy Alloys

WANG Tao¹, SHI Jie¹, PAN Hu-cheng¹, SHANG Hong-yu¹, TENG Chang-qing², ZHANG Wei^{1, 2}, YANG Ji-jun³, WU Lu²

(1. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials(Ministry of Education), College of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. The First Sub-Institute, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3.Key Laboratory of Radiation Physics and Technology, Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China)

Abstract:

In this work, the high entropy alloys(Nb₇₀Mo₁₀Zr₁₀Al₁₀)_{100-x}Cr_x(x=0, 5, 10, 15, at.%)were prepared by vacuum arc melting. The effects of Cr content and high temperature heat treatment on the microstructure and mechanical properties of the alloys were studied by means of X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and universal testing machine. The results show that with the addition of Cr element, the Cr₂(Nb, Zr) type second phase is precipitated in the alloy, and with the increase of Cr element content, the volume fraction of the second phase increases and the dendrites are refined. After high temperature heat treatment at 1 200 °C, more Cr elements diffuse and precipitate into the interdendritic region to form Laves phase, which is interlaced with Al-Zr phase. Therefore, with the increase of Cr content, the compressive yield strength of NbMoZrAl-Cr alloy gradually increases from 945 MPa of 0Cr alloy to 1 153 MPa of 5Cr alloy, 1 212 MPa of 10Cr alloy and 1 305 MPa of 15Cr alloy. The main mechanism of strength improvement is second phase strengthening and fine grain strengthening. The relevant results would provide reference and basis for the design of new refractory high-entropy alloys.

Key words:

refractory high entropy alloy; high temperature treatment; mechanical properties; thermal stability; second phase