

新型 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金含能结构材料的组织及力学性能

魏祥赛 许鼎锋 卢一平 曹志强 王同敏 李廷举
(大连理工大学材料科学与工程学院, 辽宁省高熵合金材料工程研究中心)

摘 要 设计并使用真空电弧炉制备了 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ ($x=5, 10, 15, 20, 32, 35$) 高熵合金含能结构材料。采用 XRD、EPMA、万能试验机等手段研究了不同 Ni 含量下合金的相组成、微观组织及力学性能。结果表明,随着 Ni 含量增加,合金的微观组织由 BCC1+BCC2+ $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ +Unknown 四相结构转变为 BCC1+BCC2+ $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ +Unknown+FCC 五相结构;当 $x=20$ 时合金呈现出最佳的强塑性匹配,屈服强度为 1 653 MPa,压缩伸长率约为 19%;随着 Ni 含量增加,合金硬度先升高后降低,当 $x=20$ 时合金硬度(HV)达到最大值为 592。

关键词 高熵合金;微观结构;力学性能;硬度

中图分类号 TG113.25;TG111.5 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Microstructure and Mechanical Properties of Novel $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ High-entropy Alloy Energetic Structure Materials

Wei Xiangsai, Xu Dingfeng, Lu Yiping, Cao Zhiqiang, Wang Tongmin, Li Tingju
[Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology(Liaoning Province),
School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology]

Abstract: The $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ ($x=5, 10, 15, 20, 32, 35$) high-entropy alloys (HEAs) energetic structural material was designed and fabricated by vacuum arc furnace. The phase composition, microstructure and mechanical properties of alloys with different Ni contents were investigated by XRD, EPMA and universal testing machine. The results indicate that with the increase of Ni contents, the microstructure of the alloy is transformed from BCC1+BCC2+ $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ +Unknown to BCC1+BCC2+ $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ +Unknown+FCC phases. When $x=20$, the alloy presents desirable strength-plasticity combination, where the yield strength is 1 653 MPa, and the elongation is 19%. With the increase of Ni content, the Vickers hardness value of the alloy is firstly increased and then decreased, which reaches a maximum of 592 HV when $x=20$.

Key Words: High-entropy Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Hardness

含能结构材料(Energetic structural materials, ESMs)是将若干种金属通过特定的工艺结合而成,具有一定的力学性能的结构材料,并且能够在爆炸、高速撞击等极端环境下释放能量^[1]。含能结构材料由于其结构特性和能量特性,被广泛应用于军事毁伤技术领域。一方面,含能结构材料力学性能优异,能够满足壳体结构件的要求;另一方面,含能结构材料破片高速撞击目标时可以二次释放能量,实现高效毁伤^[2]。目前常见的含能结构材料主要包括铝热剂(铝/金属氧化物)、

金属间化合物(铝/金属)、金属聚合物化合物(铝/聚合物)和一些亚稳态金属化合物。其中,以 $\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$ 为代表的铝热剂释能特性较好,但强度通常不足^[3];以铝/聚四氟乙烯为代表的金属聚合物的强度甚至低于铝热剂的强度^[4-5];以 Al/Ni、W/Zr 为主的金属间化合物强度高、释能特性好,展现出优异的综合性能^[6-7],但也很难达到结构件的要求。传统的含能结构材料虽然释能效果较好,但是其力学性能太低,难以达到壳体结构件的力学性能要求。GILBERT C J 等^[8]发现 $\text{Zr}_{41.2}\text{Ti}_{13.8}$

收稿日期:2022-04-01;修改稿收到日期:2022-04-21
基金项目:“国家磁约束聚创新 2025”重大专项基金资助项目(2019B10086)
第一作者简介:魏祥赛,男,1997 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),E-mail:wxs_dut@163.com
通信作者:卢一平,男,1980 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail:luyiping@dlut.edu.cn
引用格式:魏祥赛,许鼎锋,卢一平,等. 新型 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金含能结构材料的组织及力学性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023, 43(2):220-225.
WEI X S, XU D F, LU Y P, et al. Microstructure and mechanical properties of novel $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ high-entropy alloy energetic structure materials[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):220-225.

$\text{Cu}_{12.5}\text{Ni}_{10}\text{Be}_{22.5}$ 非晶合金具有潜在的释能毁伤作用,但非晶合金的塑性较差且大块非晶合金件热加工成型制备困难,无法满足结构件生产加工过程中较高的力学性能要求。

因此,如何设计一种既有优异释能特性又具有良好穿甲、破甲能力的含能结构材料已成为各国研究的热点。高熵合金(Highentropy alloys, HEAs)打破了传统合金的设计理念,在诸多方面均展现出传统合金无法比拟的优势^[9-15]。同时在含能结构材料方面展现出巨大的应用潜力。王爱民等^[16]通过研究 ZrTiAlV 高熵合金准静态和动态下的力学性能,发现准静态力学优异的合金动态下也展示出较好的力学性能,并且其屈服强度随应变率的增加而增加。ZHANG Z 等^[2]开发出一种新型 HfZrTiTa_x 高熵合金,并验证了其在毁伤方面的潜在应用空间。陈海华等^[17]通过研究不同应变率下 WFeNiMo 高熵合金动态变形行为,发现合金在冲击薄钢靶时展现出优异的浸彻特性,并且具有一定的二次释能效果。李梅等^[18]通过研究不同反应性合金的毁伤能力,发现难熔高熵合金在弹道试验下释能效果最佳。高熵合金晶格效应有助于氧原子在合金内部的扩散,加速合金与氧气反应,从而在爆冲高压下更容易与氧气发生反应,释放能量。单位摩尔高焓值元素在爆炸、高压等条件下与氧气反应所释能的能量更多,即二次释能更多,毁伤效果也更佳。本课题基于高熵合金含能结构材料设计思想设计并制备了具有高焓值且准静态力学性能优异的 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金含能结构材料,并研究了不同 Ni 含量下合金的相组成、微观组织及力学性能,为高熵合金含能结构材料的设计提供参考。

1 试验材料与方法

高焓值金属元素见表 1。采用质量分数大于 99.95% 的 Ni、Ti、Zr、Nb、Ta、Mo、W 等颗粒制备 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ ($x=5、10、15、20、32、35$, 质量分数)高熵合金。采用的金属元素物化参数见表 2。采用非自耗真空电弧炉在高纯氩气保护下进行合金熔炼。首先抽真空至 3×10^{-3} Pa 以下,再反充氩气至 0.05 Pa 后进行熔炼,反复翻转熔炼 6 次确保均匀,最终得

表 1 常用金属及其氧化物的燃烧焓值

Tab.1 Combustion enthalpies of common metals		
金属/金属氧化物	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	燃烧焓/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)
Ni/NiO	8.90	4 085
Ti/TiO ₂	4.54	19 732
Zr/ZrO ₂	6.51	12 042
Nb/NbO ₂	8.58	8 570
Ta/Ta ₂ O ₅	16.68	5 816
Mo/MoO ₃	10.22	7 766
W/WO ₂	19.26	3 208

表 2 金属元素的物化参数

Tab.2 Physicochemical parameters of metal elements						
元素	原子序号	原子半径/nm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	形态
Ni	28	0.124	8.9	1 455	2 913	颗粒
Ti	22	0.147	4.54	1 668	3 287	颗粒
Zr	40	0.160	6.5	1 855	4 409	颗粒
Nb	41	0.146	8.57	2 477	4 744	颗粒
Ta	73	0.146	16.65	3 017	5 458	颗粒
Mo	42	0.139	10.22	2 623	4 639	颗粒
W	74	0.141	19.25	3 422	5 555	颗粒

到直径约为 40 mm、厚度约为 10 mm 的纽扣状铸锭。采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪进行相结构分析,设置参数分别为:Cu 靶 $\text{K}\alpha$ (波长 $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$)、工作电压为 40 kV、工作电流为 40 mA、扫描角度范围为 $20^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 、扫描速度为 $4(^{\circ})/\text{min}$;采用 ZEISS Supra 55 型场发射扫描电镜(SEM)和 JXA-8530F PLUS 型场发射电子探针(EPMA)观察合金形貌,通过 EMPA 自带的 X 射线波谱分析仪(WDS)对试样特定区域进行点面元素分析。采用 MH-50D 维氏硬度计测试合金硬度,在 4.9 N 载荷下测量 15 s,每个试样不同位置测 10 个点取平均值。采用 DNS100 万能试验机对 $\phi 5\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的试样进行室温压缩力学性能测试,压缩应变速率为 $1\times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 系高熵合金相结构分析

图 1 为室温铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金的 XRD 图谱。由图 1a 可知, $x=5、10、15$ 时,合金由 BCC1+BCC2+ $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ +Unknown 4 相组成,当 $x=20、32、35$ 时,合金开始出现局部 FCC 固溶体峰。随着 Ni 含量提高,BCC1 相的晶格常数依次为 0.328 33、0.325 90、0.324 90、0.324 24、0.324 20、0.330 56 和 0.328 67 nm;BCC2 相的晶格常数依次为 0.326 27、0.326 39、0.325 33、0.324 93、0.324 13、0.324 92 和 0.321 64 nm。由图 1b 可知, $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$

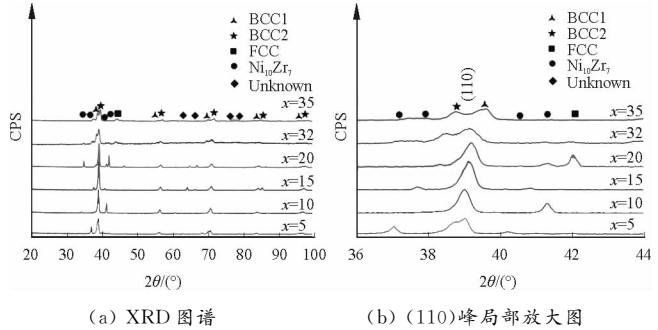


图 1 室温铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 系高熵合金的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of as-cast $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ series HEAs at room temperature

系高熵合金(110)峰发生偏移,当 $x=5$ 、10、15 和 20 时,(110)峰右移,此时固溶于 BCC 相中的 Ti、Zr 等元素开始与 Ni 元素生成金属间化合物相,晶格畸变降低,衍射峰右移,晶格常数减小;当 $x=32$ 时,随着 Ni 含量增加,Ni 元素开始部分固溶于 BCC 固溶体相中,晶格畸变提高,晶格常数增加; $x=35$ 时,固溶于 BCC 固溶体相中的 Ni 元素达到饱和,过量的 Ni 元素会促进 FCC 固溶体相的生成,使晶格畸变再次降低,衍射峰右移,晶格常数减小。

图 2 为室温铸态下 $Ni_xTi_{24}Zr_{12}Nb_{10}Ta_{12}Mo_5W_5$ 高熵合金的 EPMA-BSE 图像。可以看出,室温下铸态 $Ni_xTi_{24}Zr_{12}Nb_{10}Ta_{12}Mo_5W_5$ 高熵合金以枝晶结构为主,当 $x=5$ 、10 和 15 时,合金由 A、B、C 和 D 相组成;当 $x=20$ 、32 和 35 时,合金由 A、B、C、D 和 E 相组成。EPMA 结果与 XRD 结果相一致。为了进一步确定合金相组成和元素分布,选择 $x=32$ 的合金,采用 EPMA 面扫描技术进行进一步表征。室温下铸态 $x=32$ 时,高熵合金不同相区元素分布见图 3。可以看出, Ni、

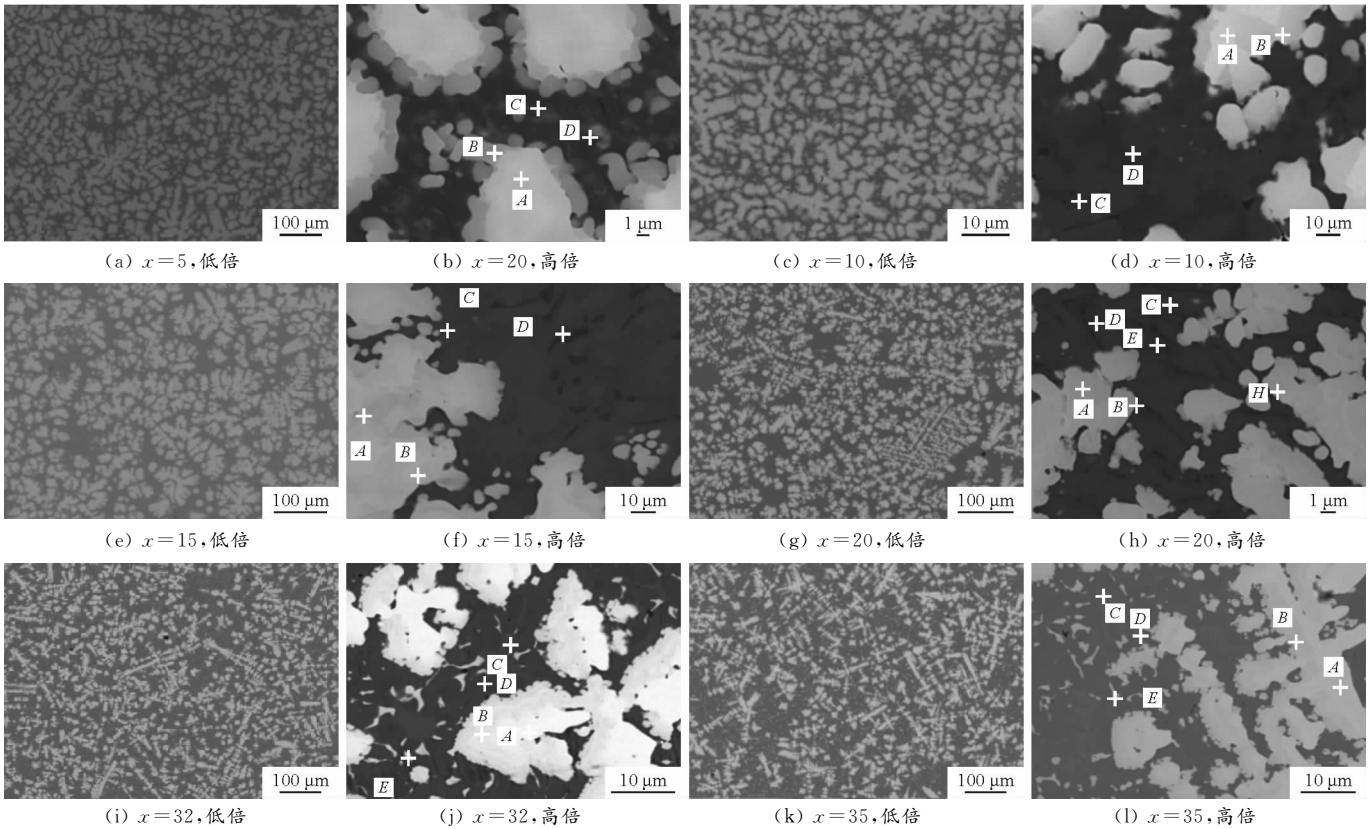


图 2 室温铸态 $Ni_xTi_{24}Zr_{12}Nb_{10}Ta_{12}Mo_5W_5$ 系高熵合金的 EPMA-BSE 图像
Fig.2 EMPA-BSE images of as-cast $Ni_xTi_{24}Zr_{12}Nb_{10}Ta_{12}Mo_5W_5$ series HEAs at room temperature

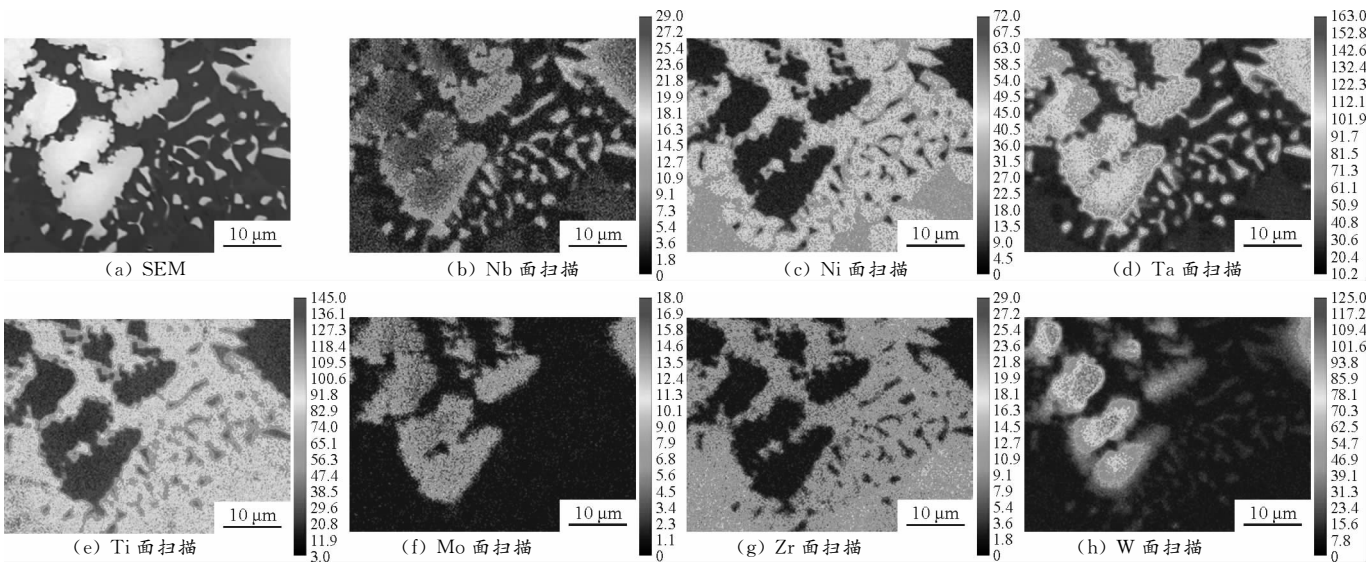


图 3 室温铸态 $x=32$ 时高熵合金元素分布图
Fig.3 Element distribution of as-cast HEA at room temperature when $x=32$

Ti 和 Zr 等元素分布于基体相中;Nb、Ta 等元素大量分布于 A 和 B 相中,少量分布于 C 和 D 相中;W、Mo 元素分布于 A 相中。亮白色相 A 富集大量的 W、Mo 元素,灰白色相 B 富集大量的 Nb、Ta 元素,灰色基体相 C 富集 Ni、Ti 和 Zr 元素,其中 Ti、Zr 含量较高;黑色基体相 D 富集大量的 Ni、Ti 和 Zr 等元素;黑色条状相 E 富集 Ni 元素。

2.2 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 系高熵合金力学性能分析

室温下铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金的准静态压缩力学性能见图 4。可以看出, $x=20$ 、32、35 时,合金表现出较好的准静态力学性能。其中 $x=5$ 、10 和 15 时,合金压缩伸长率不足 6%, $x=15$ 时,合金虽然屈服强度达到 1 540 MPa,但是压缩伸长率不足 10%,难以用作壳体结构件。 $x=20$ 时,合金表现出最佳的强塑性,屈服强度高达 1 653 MPa,抗压强度为 2 300 MPa,压缩伸长率接近 20%。 $x=32$ 时,合金的塑性最好,抗压强度高达 2 645 MPa,压缩伸长率为 29%。结合 XRD 结果以及合金的微观结构可知,当 $x=5$ 、10 和 15 时,添加的 Ni 与 Ti、Zr、Nb、Ta 等元素结合生成金属间化合物相,虽然合金的强度较高,但是生成的金属间化合物恶化了其塑性;Ni 为 FCC 相稳定化元素,Ni 增加会促进 FCC 相的形成,当 $x=20$ 时,合金中 FCC 相和金属间化合物相达到平衡,从而使合金的强塑性匹配度达到最佳;当 $x=32$ 、35 时,随着 Ni 含量继续增加,FCC 相的体积分数增加,合金塑性提高,屈服强度降低。

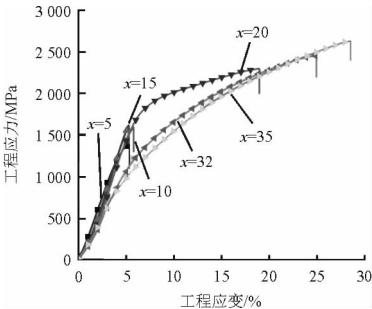


图 4 室温铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金压缩力学性能

Fig.4 Compression mechanical properties of as-cast $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ HEAs at room temperature

表 3 室温铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金压缩力学性能参数

Tab.3 Compression mechanical properties of as-cast $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ HEAs at room temperature			
x	屈服强度/MPa	抗压强度/MPa	伸长率/%
5	1 200	1 399	5.4
10	1 540	1 592	5.8
15	1 564	1 590	5.5
20	1 653	2 300	19.0
32	987	2 645	29.0
35	880	2 628	28.5

图 5 为室温下铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金的硬度分布。可以看出,随着 Ni 含量增加, $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 合金的硬度值先升高后降低,在 $x=20$ 时,合金硬度(HV)达到最大值,为 592。综上可知, $x=5$ 、10、15 和 20 时,随着 Ni 含量增加,合金中金属间化合物相的体积分数也随之增加,硬度呈上升趋势;当 Ni 含量继续增加时,FCC 固溶体相体积分数也增加,合金的硬度值下降。

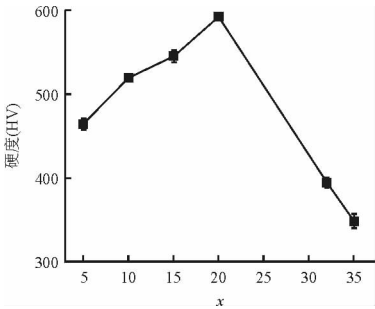


图 5 室温下铸态 $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金的硬度

Fig.5 Vickers hardness of as-cast $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ HEAs at room temperature

$\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 高熵合金压缩断口形貌见图 6。可以看出, $x=5$ 、10、15 和 20 时,合金中均存

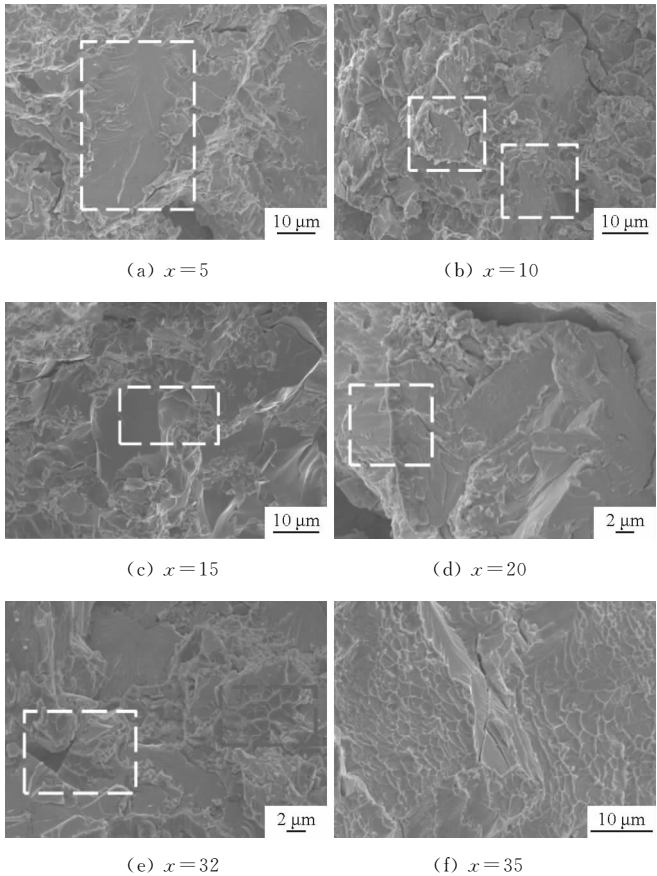


图 6 铸态 Ni_xW_5 系高熵合金室温压缩断口形貌
Fig.6 Compression fracture morphologies of as-cast Ni_xW_5 series HEAs at room temperature

在解理台阶形成的河流状花样,见图6中白色框,且存在少量微裂纹,此时合金的断裂模式为解理断裂; $x=32$ 时,合金断口除了解理台阶形成的河流状花样之外,还有少量韧窝的存在,见图6e浅色框,表明其断裂模式为脆性断裂为主导的混合断裂; $x=35$ 时,断口处出现大量韧窝,只有少量微裂纹和解理台阶,断裂模式为脆性和韧性混合断裂模式。

2.3 讨论

2.3.1 微观结构及其演化

由图1可知,由于Ni元素与其他元素之间较负的混合焓,合金中出现了多种金属间化合物相。其中Ni-Ti、Ni-Zr、Ni-Nb、Ni-Ta、Ni-Mo和Ni-W之间的混合焓分别为 -35 、 -49 、 -30 、 -29 、 -7 和 -3 kJ/mol。因为Ni-Zr之间的混合焓最小,所以二者会首先结合生成 $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ 金属间化合物相。从图3可知,黑色相D富Ni、Zr,可知D为 $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ 相。白色基体相C富集大量的Ni、Ti、Zr,结合XRD结果可知为富Ni、Ti、Zr的Unknown相。根据元素分布可知,亮白相A为富W的BCC1相,灰白相B为富Ta、Mo的BCC2相。由于组元之间熔点差别较大,合金的微观形貌呈枝晶形貌。合金从熔融态冷却到室温过程中,高熔点的W先析出形成富W的BCC1相,随后高熔点的Ta、Mo析出形成BCC2相,低熔点的 $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ 相和富Ni、Ti、Zr的Unknown相最后形成。同时,Ni为FCC固溶体稳定化元素,过量的Ni会促进FCC固溶体相的形成。当 $x=20$ 时,合金中开始出现FCC相,并且随着Ni含量的增加,FCC固溶体相的体积分数提高,合金相组成由 $\text{BCC1}+\text{BCC2}+\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{Unknown}$ 向 $\text{BCC1}+\text{BCC2}+\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{FCC}+\text{Unknown}$ 转变。

2.3.2 力学性能

由图4和图5可知,Ni含量增加,改善了合金的综合力学性能。当Ni含量较低时,Ni与Ti、Zr、Nb、Ta等元素由于之间较负的混合焓生成 $\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7$ 相和富Ni、Ti、Zr元素的Unknown相等金属间化合物,并且金属间化合物相的体积分数随Ni含量的增加而增加。一般来说,BCC相强度而高塑性较差。虽然合金中始终存在富W元素的BCC1相和富Ta、Mo元素的BCC2相,但是由于其含量较低并且由于Ta、Mo、W等高熔点元素的存在,合金的塑性较差。随着Ni含量的增加,合金的强度和硬度受金属间化合物相的影响而提高。当Ni元素进一步添加时,合金中开始出现FCC相。通常来说,FCC相塑性好强度低,因此FCC相的存在通常可以改善合金塑性。当 $x=20$ 时,合金由 $\text{BCC1}+\text{BCC2}+\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{FCC}+\text{Unknown}$ 5相组成,并且在较

软的FCC相和较硬的金属间化合物相的共同作用下,合金的强塑性匹配达到最佳,屈服强度达到最高的1 653 MPa,压缩塑性接近20%,硬度(HV)也达到592。随着Ni含量继续增加,FCC相的体积分数进一步增加,此时合金的塑性提高,硬度随之降低。

3 结论

(1)随着Ni含量增加, $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ ($x=5,10,15,20,32$ 和 35)高熵合金由 $\text{BCC1}+\text{BCC2}+\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{Unknown}$ 4相结构转变为 $\text{BCC1}+\text{BCC2}+\text{Ni}_{10}\text{Zr}_7+\text{FCC}+\text{Unknown}$ 5相结构。

(2) $x=20$ 时, $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 合金强塑性匹配最佳,屈服强度高达1 653 MPa,抗压强度为2 300 MPa,压缩伸长率接近20%,合金硬度(HV)最高为592。当Ni含量继续增加,FCC相体积分数增加, $x=32,35$ 时,合金强度和硬度降低,塑性大幅提高。其中 $x=20,32$ 和 35 时,合金综合性能有望满足含能结构材料在制备及化学释能方面的要求。

(3)当 $x=5,10,15$ 和 20 时, $\text{Ni}_x\text{Ti}_{24}\text{Zr}_{12}\text{Nb}_{10}\text{Ta}_{12}\text{Mo}_5\text{W}_5$ 合金均为解理断裂;当 $x=32$ 时,除河流状花样外出现少量韧窝,为脆性断裂为主的混合断裂方式;当 $x=35$ 时,断口处出现大量韧窝,断裂模式为韧脆混合断裂。

参考文献

- [1] 张先锋,赵晓宁.多功能含能结构材料研究进展[J].含能材料,2009,17(6):731-739.
- [2] ZHANG Z,ZHANG H,TANG Y,et al. Microstructure, mechanical properties and energetic characteristics of a novel high-entropy alloy $\text{HfZrTiTa}_{0.53}$ [J]. Materials & Design, 2017, 133(5): 435-443.
- [3] CHENG J L, HNG H H, LEE Y W, et al. Kinetic study of thermal-and impact-initiated reactions in $\text{Al-Fe}_2\text{O}_3$ nanothermite [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(12): 2 241-2 249.
- [4] WANG L, LIU J, LI S, et al. Insensitive high-energy energetic structural material of tungsten-polytetrafluoroethylene-aluminum composites [J]. Aip Advances, 2015, 5(11): 117-142.
- [5] 徐松林,阳世清,徐文涛,等. PTFE/Al反应材料的力学性能研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(5): 384-388
- [6] 张度宝,汪涛,鱼银虎,等. Ni-Al含能结构材料冲击释能行为研究[J]. 稀有金属, 2017, 41(1): 40-44.
- [7] REN H, LIU X, NING J. Microstructure and mechanical properties of W-Zr reactive materials [J]. Materials Science & Engineering, 2016, A660(13): 205-212.
- [8] GILBERT C J, AGER III J W, SCHROEDER V, et al. Light emission during fracture of a Zr-Ti-Ni-Cu-Be bulk metallic glass [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(25): 3 809-3 811.
- [9] YOUSSEF K M, ZADDACH A J, NIU C, et al. A novel low-density, high-hardness, high-entropy alloy with close-packed single-phase nanocrystalline structures [J]. Materials Research Letters, 2015, 3(2): 95-99.

Al-Cu-Mn-Ti 系耐热铸造合金高温蠕变性能研究

师可馨^{1,2} 熊艳才¹ 洪润洲^{1,2} 左 强^{1,2}

(1.中国航发北京航空材料研究院;2.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心)

摘 要 为探究新型耐热铸造铝合金 Al-Cu-Mn-Ti 的高温蠕变性能并探明合金有效热强化相,采用扫描电镜、EDS 能谱分析、JMat-Pro 材料仿真软件及蠕变持久性能测试等分析手段,对合金试样的显微组织、断口形貌和蠕变应变抗力进行了分析。结果表明,Al-Cu-Mn-Ti 合金在 250 ℃服役时合金中有效耐热相以 θ' 相为主, θ 相、 T 相为辅,300 ℃时合金有效耐热相以 T 相、 θ 相为主;合金在 300 ℃、100 MPa 服役条件下测试,持久时间不超过 40 h,且断裂方式呈塑性和脆性断裂同时发生;合金在 250 ℃的蠕变强度极限达到了 120 MPa,在 300 ℃的蠕变强度极限达到了 80 MPa。

关键词 Al-Cu-Mn-Ti 合金;高温蠕变;耐热合金

中图分类号 TG146.21;TG111.8 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High Temperature Creep Properties of Al-Cu-Mn-Ti Series Heat-resistant Casting Alloy

Shi Kexin^{1,2}, Xiong Yancai¹, Hong Runzhou^{1,2}, Zuo Qiang^{1,2}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials;

2.Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials)

Abstract: In order to investigate the creep properties of a novel heat-resistant casting Al-Cu-Mn-Ti alloy at elevated temperature and determine the effective thermal strengthening phase in the alloy, the microstructure, fracture morphology and creep strain resistance of the alloy specimens were analyzed by SEM、EDS、JMAT-Pro and creep endurance test. The results indicate that the effective heat resistant phases of Al-Cu-Mn-Ti alloy are dominated by θ' phase, supplemented by θ and T phase at 250 ℃, while those are dominated by T and θ phase at 300 ℃. After testing under the service condition of 300 ℃ and 100 MPa, duration is less than 40 h, and the fracture mode is characterized by plastic and brittle fracture simultaneously. The creep strength limit of the alloy reaches 120 MPa at 250 ℃ and 80 MPa at 300 ℃.

Key Words: Al-Cu-Mn-Ti Alloys, High-temperature Creep, Heat-resistant Alloy

Al-Cu 系铸造铝合金因具有较好的耐热性能,被广泛地应用在航空航天领域,如美国的 A201、法国的 AU5GT 以及我国的 ZL206、ZL207、ZL208 等合金^[1],这类合金在 200~250 ℃下仍然具有较高的抗拉强度。

收稿日期:2022-06-13;**修改稿收到日期:**2022-06-30
第一作者简介:师可馨,女,1998 年出生,硕士研究生,北京(100095),E-mail: skx13041060477@163.com
通信作者:熊艳才,男,1966 年出生,研究员,北京(100095),E-mail: xiongyancai621@163.com
引用格式:师可馨,熊艳才,洪润洲,等. Al-Cu-Mn-Ti 系耐热铸造合金高温蠕变性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):225-228.
SHI K X, XIONG Y C, HONG R Z, et al. High temperature creep properties of Al-Cu-Mn-Ti series heat-resistant casting alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):225-228.

[10] FANG Q, CHEN Y, LI J, et al. Probing the phase transformation and dislocation evolution in dual-phase high-entropy alloys[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 114(1): 161-173.

[11] LU Y, HUANG H, GAO X, et al. A promising new class of irradiation tolerant materials: Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} high-entropy alloy [J]. Journal of materials science & technology, 2019, 35(3): 369-373.

[12] YU Y, WANG J, LI J, et al. Tribological behavior of AlCoCrFeNi (Ti_{0.5}) high entropy alloys under oil and MACs lubrication[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(5): 470-476.

[13] 史一功,张铁邦,寇宏超,等. AlCoCrFeNiCu 高熵合金的电化学腐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(18): 1-3,7.

[14] 王睿鑫,唐宇,张虹. HfZrTiTa 难熔高熵合金的组织结构及其性能[J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 529-535.

[15] ZHANG Y, ZUO T T, CHENG Y Q, et al. High-entropy alloys with high saturation magnetization, electrical resistivity and malleability[J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 1-7.

[16] 王爱民,张海峰,龚自正. 新型 ZrTiAlV 合金力学性能及高速冲击行为研究[J]. 科技创新导报, 2016, 13(15): 176.

[17] 陈海华,张先锋,熊玮,等. WFeNiMo 高熵合金动态力学行为及侵蚀性能研究[J]. 力学学报, 2020, 52(5): 1 443-1 453.

[18] 李梅,王璐瑶,蒋建伟. 典型反应性合金冲击释能量及耦合毁伤能力对比[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1 867-1 876.

(编辑:刘晨辉)