

高钛多主元合金研究进展

于佳琦 秦刚 陈瑞润

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要 高熵合金因其颠覆传统合金设计理念的“鸡尾酒效应”、固溶强化效应和缓慢扩散效应等显著特征,在材料科学与工程领域引起广泛关注。与传统合金不同,高熵合金通过多种主要金属元素的协同作用,展现出优异的力学性能、热稳定性、耐腐蚀性及抗辐照能力,使其在极端服役环境下具备广阔的应用前景。高钛多主元合金(MPEAs)作为高熵合金家族中的一个新兴分支,通过引入高比例的Ti元素(摩尔分数 $\geq 20\%$),不仅继承了高熵合金的多性能协同优势,还因钛本身密度低、比强度高及耐腐蚀性强等特性,使合金在实现高性能的同时显著降低了整体密度,满足了航空航天、海洋工程及核能等领域对轻质高强结构材料日益增长的需求。此外,高钛多主元合金在高温下展现出良好的组织稳定性和抗氧化能力,尤其适用于航空发动机热端部件、核反应堆结构材料等对高温力学性能和耐蚀性要求极高的应用环境。系统综述了高钛多主元合金的制备方法、相结构、力学性能以及抗氧化性能的研究进展,总结了关键见解,并对未来的发展作出展望。

关键词 高钛多主元合金;相结构;力学性能;抗氧化性能

中图分类号 G353.11;TG146.23 文献标志码 A DOI:10.15980/j.tzsz.Y20250015

Research Progress in High Titanium Multi-principal-element Alloys

YU Jiaqi, QIN Gang, CHEN Ruirun

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: High-entropy alloys (HEAs) have attracted considerable attention in materials science and engineering due to distinctive cocktail that subverts traditional alloy design concept, solid-solution strengthening, and sluggish-diffusion effects. Contrast to traditional alloys, HEAs exhibit excellent mechanical properties, thermal stability, corrosion resistance, and irradiation resistance owing to the synergistic interactions among multiple principal elements, which display promising application for extreme service environments. As an important sub-class of HEAs, Ti-rich multi-principal-element alloys (MPEAs, molar fraction $\geq 20\%$) have emerged by introducing high proportion of titanium, which inherit the multifunctional advantages of HEAs. Meanwhile, high performance is achieved while significantly reducing the overall density by virtue of low density, high specific strength, and strong corrosion resistance, addressing the growing demand for lightweight, high-strength structural materials in aerospace, ocean engineering, and nuclear energy. Moreover, Ti-rich MPEAs possess excellent microstructural stability and oxidation resistance at elevated temperatures, which are particularly suitable for aero-engine hot-end components, nuclear reactor structural materials, and other applications requiring superior high-temperature mechanical properties and corrosion resistance. Recent progress in processing routes, phase constitution, mechanical properties, and oxidation resistance of Ti-rich MPEAs was systematically reviewed. Key insights were concluded and future development was prospected.

Key Words: Ti-rich Multi-principal-element Alloy, Phase Structure, Mechanical Properties, Oxidation Resistance

在现代工业及高科技产业迅猛发展的背景下,材料性能的优劣在很大程度上决定了装备制造、能源发展、航空航天及国防安全等领域的进步速度^[1-2]。因此,开发新型高性能材料,尤其是满足极端服役环境要求

的结构材料,是材料科学研究的核心目标之一^[3]。随着科学技术的不断发展与应用需求的持续提升,传统合金材料在强度、耐蚀性及高温稳定性等方面逐渐暴露出性能瓶颈,愈加难以满足现代工程对轻质、高强及多

收稿日期:2025-06-24;修订日期:2025-12-30

基金项目:国家杰出青年科学基金(延续资助)项目(52425401)

第一作者:于佳琦,女,2002年出生,硕士研究生,E-mail:yujiaqi927@163.com

通信作者:秦刚,男,1989年出生,教授,E-mail:gangqin@hit.edu.cn

陈瑞润,男,1975年出生,教授,E-mail:ruiunchen@hit.edu.cn

引用格式:于佳琦,秦刚,陈瑞润.高钛多主元合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2026,46(6):808-814.

YU J Q, QIN G, CHEN R R. Research progress in high titanium multi-principal-element alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6):808-814.

功能材料的综合性能需求^[4]。在此背景下,新型合金体系的探索成为研究热点。本世纪初, YEH J W等^[1]和 CANTOR B等^[2]几乎同时提出并系统研究了一种全新的合金设计理念——高熵合金,也称多主元合金,其采用5种及以上主要元素的等摩尔或近等摩尔比组合(一般每种元素的摩尔分数在5%~35%之间)。高熵合金的提出不仅极大地拓展了合金设计的自由度,也为新材料的研发开辟了全新的方向。与传统合金相比,高熵合金具有更丰富的成分组合、更复杂的微观结构及更优异的综合性能,包括高强度、高硬度、高耐腐蚀性、高温稳定性、优异的抗辐照性能及良好的热力学稳定性等^[5-9],自提出以来便迅速成为材料科学研究的热点,广泛应用于航空航天、核能、海洋工程及深空探测等高端装备制造领域。

在高熵合金家族中,高钛多主元合金作为一个新兴而极具潜力的分支,因其兼具高熵合金与钛合金的优异特性而受到广泛关注^[10-11]。钛及其合金因低密度、高比强度、良好的耐蚀性和生物相容性,长期被用于航空航天、海洋船舶及医疗器械等领域。然而,传统钛合金在高温性能、强度-塑性协同等方面仍存在一定局限。通过引入高比例的钛元素(摩尔分数 $\geq 20\%$)并结合多主元合金设计理念,不仅可以保持高熵合金在力学性能与热稳定性方面的优势,还能显著降低密度,提高轻质化水平,拓展其在极端环境中的应用范围^[12-14]。

研究表明,高钛多主元合金在显微组织、力学性能、热稳定性及抗氧化性能等方面均展现出优异性能^[15-17]。部分高钛多主元合金能够在1 000 °C以上保持良好的强度和塑性,具备抗高温氧化和抗蠕变能力,显示出在航空发动机热端、核反应堆结构部件及超高温催化材料等领域的巨大应用潜力。此外,Ti的引入有助于改善合金的耐蚀性,使其在海洋深潜器、舰艇及海底管道等海洋工程领域具有广阔的应用前景^[18-20]。高钛多主元合金的发展不仅具有重要的科研价值,也具有显著的经济效益和战略意义。

因此,围绕高钛多主元合金展开系统综述,包括制备工艺、相结构演化、力学性能及高温抗氧化性能等。在此基础上,梳理当前研究进展与存在的问题,归纳其性能优势与应用潜力,并对未来高钛多主元合金的发展方向进行展望,旨在为新型高性能轻质合金材料的研究提供参考。

1 高钛多主元合金的制备方法

目前,高钛多主元合金最常用的制备方法是电弧熔炼法^[7-8],其是最早用于加工高钛多主元合金的方法,

也是开发新型系列高钛多主元合金最成熟的方法。随着新系列合金体系的不断开发,其制备方法也逐渐丰富。此外,粉末冶金法制备的高钛多主元合金成分均匀、综合性能优异,逐渐被大量的研究者采用^[21-22]。增材制造技术是近年来发展迅速的一种先进的智能制造技术,在航空航天、汽车模具及船舶制造等领域得到了广泛应用^[23-25]。

电弧熔炼作为高钛多主元合金的传统制备方法^[26-27],在实验室研发中占据重要地位。该工艺在真空或惰性气氛保护下,通过电弧加热使金属原料熔化并混合均匀,最终在水冷铜坩锅中凝固成形。为改善成分均匀性,通常需要多次重熔(3~4次),其主要优势在于设备投入相对较低,适合小批量合金开发,且能保持较高的致密度。然而,其冷却速率有限,易导致晶粒粗大和成分偏析,特别是高熔点元素(如W、Ta)的枝晶偏析问题较为突出。在性能表现上,电弧熔炼制备的合金通常具有中等强度但塑性较差,这主要归因于粗大的晶粒组织和不可避免的微观偏析。

粉末冶金技术通过高能球磨和后续烧结制备高钛多主元合金,展现出独特的优势^[26-27]。该工艺能实现原子级的成分混合,有效抑制宏观偏析,同时快速凝固的粉末可形成细小的晶粒组织。这使得粉末冶金法制备的合金在强度上具有显著优势,同时保持适中的塑性。然而,该工艺也存在一些固有缺陷,如烧结不完全导致的残余孔隙,以及球磨过程中可能引入的氧/氮污染。此外,高纯金属粉末和专用设备的投入使得该方法的成本显著高于电弧熔炼。

近年来,增材制造技术以其缺陷少、精度高、效率高及能方便地制造复杂形状零件等特点受到广泛关注^[28-30]。增材制造技术主要包括激光金属沉积、电子束熔化以及选区激光熔化等。电子束熔化通过电子束熔化金属粉末来获得特定的零件^[31]。STEPANOV N D等^[32]采用电子束熔炼工艺制备了具有BCC结构的单相TiVZrNbTa难熔高熵合金,并研究了合成材料的氢化行为。SENKOV O N等^[33]采用EBM方法分析了一种BCC基 $Al_{0.5}CrMoNbTa_{0.5}$ 高熵合金,并评估了温度与组织的相关性。YURCHENKO N Y等^[34]通过选区激光熔化(SLM)成功制备了具有BCC相和少量HCP相的WMoTaTi系难熔高熵合金,显微硬度(HV)达到621,优于传统制备工艺制备的合金。

在实际应用中,工艺选择需综合考虑成本、性能要求和构件特征。电弧熔炼适合基础研发和小批量试制,粉末冶金适用于高均匀性要求的应用场景,而增材制造则是高性能复杂构件的最佳选择。未来发展方向为优化多工艺协同,以及建立更完善的工艺-性能数据

库。值得注意的是,随着计算材料学的发展,通过机器学习辅助的工艺参数优化有望进一步提升各类制备方法的稳定性和可靠性。

2 高钛多主元合金的相结构

高钛多主元合金最显著的结构特征是其简单的相组成,这为合金的微观结构分析和成分设计提供了重要便利。然而,由于其包含多种主要元素且缺乏完整的相图指导,通过合理的成分设计获得预期相结构成为关键科学问题。相组成对合金性能具有决定性影响,以固溶体相为主的合金通常表现出良好的强度-塑性匹配,而金属间化合物为主的合金通常呈现明显的脆性特征。因此,准确预测和控制合金的相组成是推动该类材料发展的基础性课题。

相预测方法可使用高熵合金的物理化学参数的相结构预测方法^[35-36],参数包括混合熵(ΔS_{mix})、原子尺寸差异(δ)、混合焓(ΔH_{mix})、价电子浓度(C_{EV})以及电负性差异($\Delta\chi$)等。通过系统研究,研究者已经确定了各类相结构(如固溶体相、金属间化合物等)形成的参数范围界限,为合金的成分设计提供了理论依据。各参数的具体计算公式如下:

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R \sum_{i=1}^n c_i \ln c_i \quad (1)$$

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i \left(1 - \frac{r_i}{\bar{r}}\right)^2}, \text{ 其中 } \bar{r} = \sum_{i=1}^n c_i r_i \quad (2)$$

$$\Delta H_{\text{mix}} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4H_{ij}^{\text{mix}} c_i c_j \quad (3)$$

$$C_{\text{VE}} = \sum_{i=1}^n c_i (C_{\text{VE}})_i \quad (4)$$

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{\text{mix}}}{|\Delta H_{\text{mix}}|} \quad (5)$$

式中, c_i 为元素*i*的摩尔比; r_i 为元素*i*的原子半径; \bar{r} 为平均原子半径; R 为气体常数。当 $\Omega \geq 1.1$ 且 $\delta \leq 6.6\%$ 时,合金倾向于形成固溶体相; $1.1 \leq \Omega \leq 10$ 且 $3.6\% \leq \delta \leq 6.6\%$ 时,合金倾向于形成金属间化合物和固溶体的混合相;当 $1.1 \leq \Omega \leq 2$ 且 $\delta > 6.6\%$ 时,合金中更易形成金属间化合物。使用该预测体系可为开发新型高性能合金提供重要指导。

高钛多主元合金虽然包含多种主元,但仍可形成单相的固溶体结构。现有合金的典型体系主要为单相固溶体结构和少量的多相结构。合金大多是在单相合金的基础上进行设计和改造的。高钛多主元合金按照微观相结构可分为单相、双相和多相合金。常见合金的相组成见表1。目前报道的大部分合金为单BCC结

构,因为组成合金的主要元素在室温和高温下均为BCC结构。单相BCC结构呈现出典型的树枝晶结构,密度小、总能量较低,具有较高的热力学稳定性,可以容纳较大的溶质原子,有利于间隙固溶强化。传统的BCC或FCC单一固溶体结构的高钛多主元合金通常难以同时兼顾强度和塑性,双相组织的高钛多主元合金的力学性能会明显优于单相合金的力学性能,尤其是在高温条件下具有较高的强度,有望成为一种具有工程实用价值的新型高温合金。

表1 不同高钛多主元合金的相组成^[30-34]

Tab.1 Phase compositions of different high titanium multi-elemental-alloys^[30-34]

合金成分	相数	相组成
AlNbTiV	单相	BCC_A ₂
NbTiVZr	单相	BCC_A ₂
AlCrNbTiV	单相	BCC_A ₂
NbTiVZrTa	单相	BCC_A ₂
AlNbTiVZr _{0.1}	双相	BCC_B ₂ +Zr ₅ Al ₃
CrNbTiZr	双相	BCC_A ₂ +Laves
NbTiVZrCr	双相	BCC_A ₂ +Laves
NbTiVZrMo	多相	BCC_A ₂ +bcc_B ₂ +Laves

3 高钛多主元合金的力学性能

目前的高温结构材料,多存在高温强度不足、抗氧化/腐蚀能力差及高温脆性等问题。高钛多主元合金的研发,为解决这些问题带来了希望。目前,虽然大部分高钛多主元合金的强度较高,但由于难熔元素(W、Mo、Ta、Nb等)易形成BCC结构,其滑移系较少且价电子浓度(C_{VE})通常低于4.5,因此脆性非常高^[37-39]。WEI S L等^[39]研究了HfNbTiZr体系合金的性能,见图1。针对高钛多主元合金表现出明显的脆性和氧化敏感性的问题,利用元素间的自然混合特性,用相成分追踪设计了一种Ti₁₃₈V₁₅Nb₂₃Hf₂₄高钛多主元合金,其在铸态下表现出>20%的延展性,且具有高温稳定性。MASAKI T等^[40]研究了不同温度下HfNbTaTiZr的力学性能,见图2。可以看出,除了750 K外,屈服应力均随温度升高而降低。由于加工硬化受位错交滑移的强烈影响,不同温度下加工硬化的差异应归因于550 K以上和550 K以下滑移频率随温度的变化。在650 K时,试样在加工硬化过程中发生断裂,同时由于动态应变时效导致塑性降低。650 K和750 K下应变硬化的增加归因于动态应变时效,在高温下表现出良好的变形能力,这归因于其抑制了沿晶断裂。此外,屈服强度随着温度的升高而不断降低。YURCHENKO N Y等^[41]制备了AlNbTiVZr_x($x=0, 0.1, 0.25, 0.5, 1$ 和 1.5)合金,

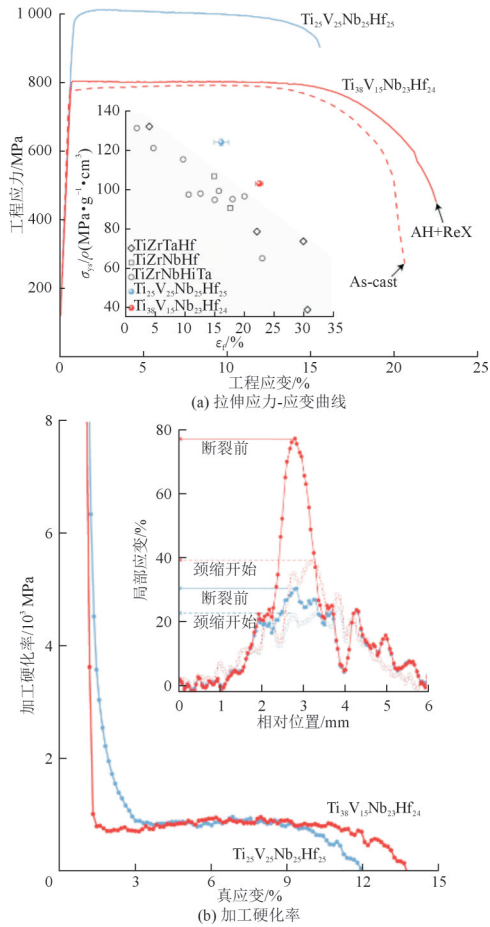


图1 $Ti_{38}V_{15}Nb_{23}Hf_{24}$ 及其等摩尔变体的力学性能^[39]

Fig.1 Mechanical properties of $Ti_{38}V_{15}Nb_{23}Hf_{24}$ and its isoatomic variants^[39]

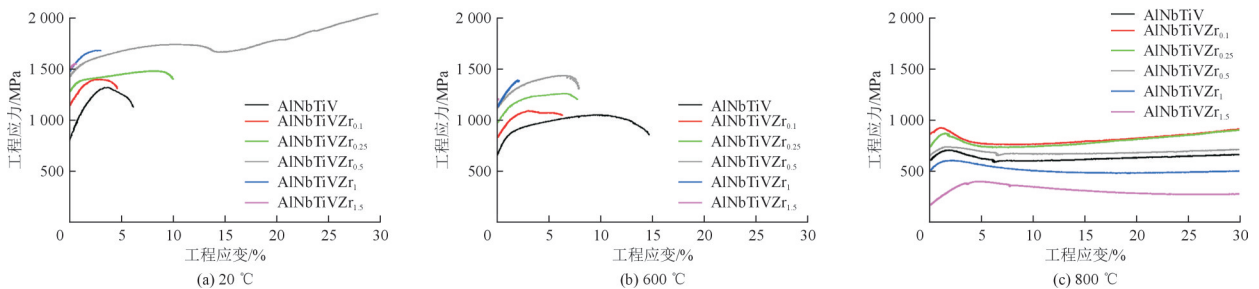


图3 不同温度下的AlNbTiVZr_x合金压缩应力-应变曲线^[41]

Fig.3 Compressive stress-strain curves of AlNbTiVZr_x alloys at different temperatures^[41]

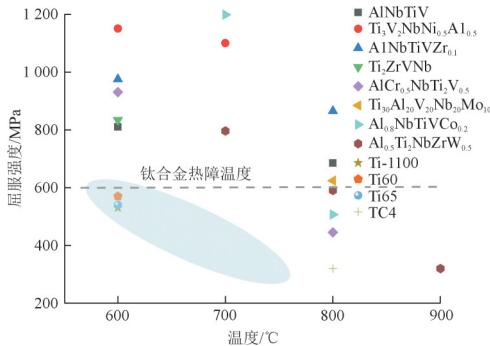


图4 高钛多主元合金与钛合金高温性能对比图^[44-52]

Fig.4 Comparison of high-temperature properties of Ti-rich MPEAs and titanium alloy^[44-52]

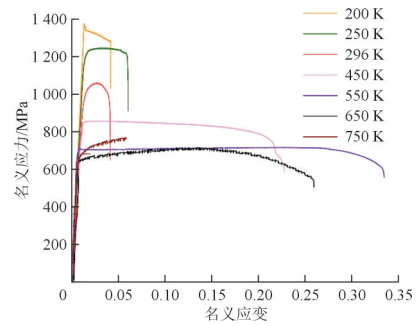


图2 HfNbTaTiZr合金在不同温度下的名义应力-名义应变曲线^[40]

Fig.2 Stress-strain curves of HfNbTaTiZr alloy at different temperatures^[40]

见图3。发现室温压缩屈服强度随着Zr含量的增加而增加,从AlNbTiV合金的1000 MPa增加到AlNbTiVZr_{1.5}合金的1535 MPa,塑性从AlNbTiV合金的6%提高到AlNbTiVZr_{0.5}合金的50%,然后降至AlNbTiVZr_{1.5}合金的0.4%。在600 °C时AlNbTiVZr_{1.5}合金的强度最高,而在800 °C时,AlNbTiVZr_{0.1}合金的强度最高。在600 °C时,AlNbTiV合金的塑性增加了14.3%,而含Zr合金的塑性较低。800 °C时,所有AlNbTiVZr_x合金都能发生塑性变形,最大变形量为应变的50%,未发生断裂。

传统钛合金的热障温度通常被限制在600 °C左右,这是其高温应用的核心瓶颈^[42-43]。相较于传统钛合金,高钛多主元合金在高温条件下展现出更加优越的力学性能。图4为部分高钛多主元合金在不同温度下与钛合金经典牌号的性能对比^[44-52]。

4 高钛多主元合金的抗氧化性能

ELAF A等^[51]研究了Al添加对HfNbTaTiZr抗氧化性能的影响,见图5。探索了向HfNbTaTiZr中添加Al作为改善合金中保护性氧化膜形成手段的作用。结果表明,在不同氧化温度和氧化时间下,Al₂O₃具有较小的负形成能,总是在表面附近形成,对基体起到保护作用。Al的添加阻止了合金中的严重氧化,因此,加入Al可以作为改善合金氧化性的有效手段。

LI Z等^[52]通过在TiNbMo_{0.5}Al_{0.225}合金中加入不同

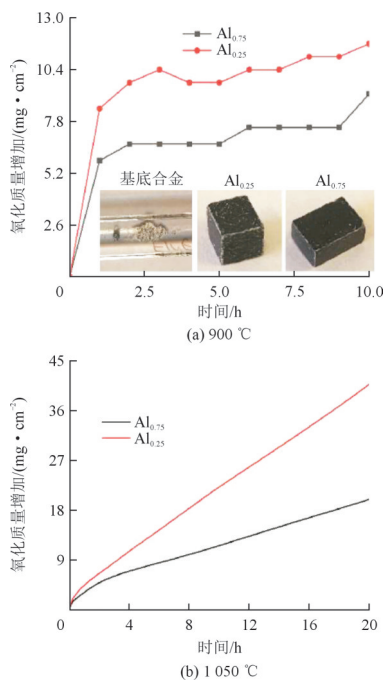


图5 Al_{0.25}HfNbTaTiZr和Al_{0.75}HfNbTaTiZr不同条件下的氧化质量增加情况^[51]

Fig.5 Weight gain of Al_{0.25}HfNbTaTiZr and Al_{0.75}HfNbTaTiZr under different conditions^[51]

含量的Si以研究其抗氧化性能变化,见图6。通过系统分析TiNbMo_{0.5}Al_{0.225}Si_y难熔多元合金在1000 °C下的氧化行为,揭示了Si合金化对提升抗氧化性的关键作用。研究发现,未添加Si的TiNbMo_{0.5}Al_{0.225}合金在氧化过程中普遍出现质量损失,见图7。主要归因于

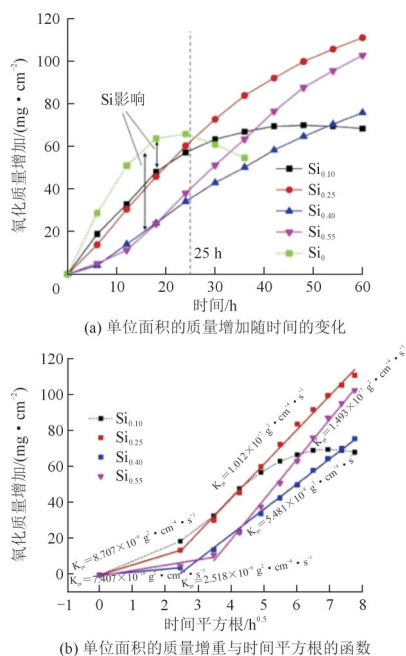


图6 TiNbMo_{0.5}Al_{0.225}Si_y高熵合金在1000 °C下60 h的氧化动力学曲线^[52]

Fig.6 Oxidation kinetics curves of TiNbMo_{0.5}Al_{0.225}Si_y alloy at 1000 °C for 60 h^[52]

MoO₃氧化产物的挥发以及Nb₂O₅形成引发的氧化膜开裂。尽管Al含量增加可能促进保护性Al₂O₃层的生成,但MoO₃挥发破坏了Al₂O₃层使得抗氧化性能不佳。通过引入不同含量的Si,合金的抗氧化性能显著改善。适量Si促使氧化动力学曲线符合抛物线规律,表明形成了具有保护性的氧化层,有效抑制了氧的持续侵入。Si的添加增强了氧化皮与基体的附着力,减少剥落。XU Q等^[53]研究了Cr含量对Cr_xMoNbTiV(x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0)难熔高熵合金在800 °C高温氧化行为的影响,见图8。发现随Cr含量增加,合金在氧化100 h后的质量增加从59.2 mg/cm²大幅降至8.8 mg/cm²,氧化层厚度同步减薄,从310 μm降至65 μm,而氧化表面形貌逐渐平滑,裂纹和疏松氧化物减少。Cr含量较低时,氧化层含多孔疏松易剥落且保护性差。高Cr含量时,多孔氧化物消失,形成致密的复合氧化物层,即Cr

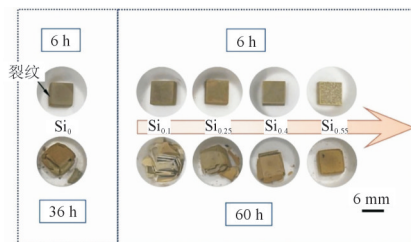


图7 Si₀、Si_{0.1}、Si_{0.25}、Si_{0.4}和Si_{0.55}在6、36、60 h后的宏观形貌
Fig.7 Macro morphologies of Si₀、Si_{0.1}、Si_{0.25}、Si_{0.4}and Si_{0.55} after 6, 36, and 60 h

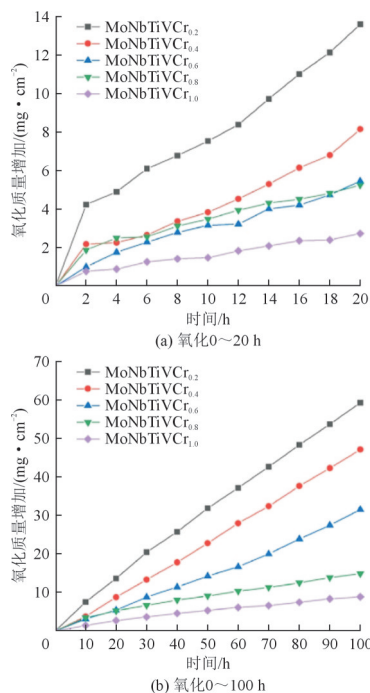


图8 Cr_xMoNbTiV难熔高熵合金在800 °C下的氧化动力学曲线^[53]

Fig.8 Oxidation kinetics curves of Cr_xMoNbTiV alloy at 800 °C^[53]

可以促进致密氧化物生成。增加Cr含量可显著优化 $\text{Cr}_x\text{MoNbTiV}$ 合金的氧化层成分与结构,减少有害多孔氧化物,促进致密保护性复合氧化物形成,从而大幅提升其800℃的长期抗氧化能力。

5 结论与展望

围绕高钛多主元合金这一领域,从相组成调控、力学性能表现以高温抗氧化性能等方面,系统地总结了当前的研究进展。作为一类极具潜力的新型轻质高温结构材料,高钛多主元合金凭借其低密度、高比强度、出色的耐腐蚀性及生物相容性,在航空航天、生物医疗及化工等领域展现出巨大的应用前景。然而,高钛多主元合金作为一个新兴的材料体系,仍存在诸多亟待解决的挑战与不足。首先,合金的“成分-相结构-性能”之间的内在关联机制仍不够清晰。现有的相预测理论(如CALPHAD方法)在面对复杂的多元体系时,其热力学数据库尚不完备,预测精度有待提升,这限制了合金成分的精准设计与优化。其次,在制备与加工方面,由于合金中各组元物理化学性质(如熔点、密度)差异较大,铸造过程中易引发严重的元素偏析,导致组织和性能不均匀,影响材料的可靠性。此外,在性能评价上,目前的研究多集中于准静态力学性能,而对于其在实际服役环境下的长期性能演变,如高温蠕变、疲劳断裂行为以及复杂环境下的腐蚀机制等相关的系统性研究数据仍然匮乏。

未来的研究应加强对高钛多主元合金成分优化、相结构调控以及服役性能机制的系统研究。突破高熵合金瓶颈需融合“计算设计-制备-性能”三位一体策略。深化多步相变和间隙原子有序化机制研究;推广激光增材制造与粉末冶金技术,开发氧/氮间隙协同强化等特色体系;构建涵盖动态力学、高温疲劳及环境腐蚀的多维度服役数据库。同时,围绕实际应用需求,开发更加高效的制备与加工工艺,实现高性能合金材料的产业化应用。

参 考 文 献

- [1] 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, 6(5):299-303.
- [2] CANTOR B, CHANG I T H, KNIGHT P, et al. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, A(375-377):213-218.
- [3] JIANG S, HUANG L J, GAO X, et al. Interstitial carbon induced FCC-Ti exhibiting ultrahigh strength in a $\text{Ti}_{137}\text{Nb}_{28}\text{Mo}_{28}\text{C}_7$ complex concentrated alloy[J]. *Acta Materialia*, 2021, 203:116-156.
- [4] LI Z, WANG L, WANG B B, et al. Strength-ductility synergy of Al-bearing low-density refractory $\text{TiNbMo}_{0.5}\text{Al}_x$ medium entropy alloys via precipitation [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A844:143-172.
- [5] LI T X, WANG S D, FAN W X, et al. CALPHAD-aided design for superior thermal stability and mechanical behavior in a TiZrHfNb refractory high-entropy alloy [J]. *Acta Materialia*, 2023, 246:118-128.
- [6] WANG S B, WU M X, SHU D, et al. Kinking in a refractory TiZrHfNb_{0.7} medium-entropy alloy [J]. *Materials Letters*, 2020, 264:127-136.
- [7] SHI Y Z, YANG B, XIE X, et al. Corrosion of $\text{Al}_2\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys: Al-content and potential scan-rate dependent pitting behavior [J]. *Corrosion Science*, 2017, 119:33-45.
- [8] ZHANG M D, SHI X L, LI Z Y, et al. Corrosion behaviors and mechanism of CrFeNi₂ based high-entropy alloys [J]. *Corrosion Science*, 2022, 207:110-126.
- [9] WANG Z C, CHEN S Y, YANG S L, et al. Light-weight refractory high-entropy alloys: A comprehensive review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 151:41-65.
- [10] JIA Y F, WANG G, WU S W, et al. A lightweight refractory complex concentrated alloy with high strength and uniform ductility [J]. *Applied Materials Today*, 2022, 27:101-112.
- [11] YANG T, ZHAO Y L, TONG Y, et al. Multicomponent intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys [J]. *Science*, 2018, 362(6417):933-937.
- [12] LU Y P, HUANG H F, GAO X Z, et al. A promising new class of irradiation tolerant materials: $\text{Ti}_2\text{ZrHfV}_{0.5}\text{Mo}_{0.2}$ high-entropy alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(3):369-373.
- [13] 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.
- [14] WU Y D, CAI Y H, WANG T, et al. A refractory $\text{Hf}_{25}\text{Nb}_{25}\text{Ti}_{25}\text{Zr}_{25}$ high-entropy alloy with excellent structural stability and tensile properties [J]. *Materials Letters*, 2014, 130:277-280.
- [15] PANG J Y, ZHANG H W, ZHANG L, et al. Ductile $\text{Ti}_{1.5}\text{ZrNbAl}_{0.3}$ refractory high entropy alloy with high specific strength [J]. *Materials Letters*, 2021, 290:129-132.
- [16] ZENG S, ZHOU Y K, GAO H Q, et al. Novel as-cast Ti-rich refractory complex concentrated alloys with superior tensile properties [J]. *Science China Materials*, 2024, 67(1):311-320.
- [17] XU Z Q, MA Z L, TAN Y, et al. Designing TiVNbTaSi refractory high-entropy alloys with ambient tensile ductility [J]. *Scripta Materialia*, 2022, 206:114-120.
- [18] CUI D C, GUO B J, YANG Z S, et al. Unraveling microstructure and mechanical response of an additively manufactured refractory TiVHfNbMo high-entropy alloy [J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 84:104-116.
- [19] ZHOU Y H, ZHANG J Y, ZHANG J, et al. A strong-yet-ductile high-entropy alloy in a broad temperature range from cryogenic to elevated temperatures [J]. *Acta Materialia*, 2024, 268:119-130.
- [20] JIA Y H, WANG Z J, WU Q F, et al. Boron microalloying for high-temperature eutectic high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2024, 262:119-127.
- [21] COUZINIE J, DIRRAS G, PERRIERE L, et al. Microstructure of a near-equimolar refractory high-entropy alloy [J]. *Materials Letters*, 2014, 126:285-287.

- [22] SENKOV O, SCOTT J, SENKOVA S, et al. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509: 6 043-6 048.
- [23] KANG B, LEE J, RYU H J, et al. Microstructure, mechanical property and Hall-Petch relationship of a light-weight refractory $Al_{0.1}CrNbVMo$ high entropy alloy fabricated by powder metallurgical process [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 767: 1 012-1 021.
- [24] KANG B, KONG T, RYU H J, et al. Superior mechanical properties and strengthening mechanisms of lightweight $Al_xCrNbVMo$ refractory high-entropy alloys ($x=0, 0.5, 1.0$) fabricated by the powder metallurgy process [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 69: 32-41.
- [25] DOBBELSTEIN H, GEORGE E P, GUREVICH E L, et al. Laser metal deposition of refractory high-entropy alloys for high-throughput synthesis and structure-property characterization [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3 (1) : 015 201.
- [26] GALATI M, IULIANO L. A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations [J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19: 1-20.
- [27] ZADOROZHNYI V, TOMILIN I, BERDONOSOVA E, et al. Composition design, synthesis and hydrogen storage ability of multi-principal-component alloy TiVZrNbTa [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 901: 163 638.
- [28] KATZ D, GORBACHEV I, ESHED E, et al. High entropy $Al_{0.5}CrMoNbTa_{0.5}$ alloy: Additive manufacturing vs. casting vs. CALPHAD approval calculations [J]. *Materials Characterization*, 2020, 167: 110 505.
- [29] LIU C, ZHU K Y, DING W W, et al. Additive manufacturing of WMoTaTi refractory high-entropy alloy by employing fluidised powders [J]. *Powder Metallurgy*, 2022, 65(5):413-425.
- [30] OSTOVARIM A, SHABUROVA, N A, SAMODUROVA M N, et al. Additive manufacturing of high entropy alloys: A practical review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 77: 131-162.
- [31] 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*, 2013, A565:51-62.
- [32] 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.
- [33] SENKOV O N, RAO S, CHAPUT K J, et al. Compositional effect on microstructure and properties of NbTiZr-based complex concentrated alloys [J]. *Acta Mater.*, 2018, 151:201-215.
- [34] 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*, 2017, A704: 82-90.
- [35] GAO K, WANG J Z, MENG Y H, et al. Phase stability and compressive properties of low-density ($Zr_{50}Ti_{35}Nb_{15}$) $_{100-x}Al_x$ high entropy alloys [J]. *Intermetallics*, 2022, 148:107 622.
- [36] WEI S, KIM S J, KANG J, et al. Natural-mixing guided design of refractory high-entropy alloys with as-cast tensile ductility [J]. *Nature Materials*, 2020, 19(11):1 175-1 181.
- [37] FENG R, FENG B, GAO M C, et al. Superior high-temperature strength in a supersaturated refractory high-entropy alloy [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(48):2 102 401.
- [38] ZENG S, ZHOU Y K, LI H, et al. Microstructure and mechanical properties of lightweight $Ti_3Zr_{1.5}NbVAl_x$ ($x=0, 0.25, 0.5$ and 0.75) refractory complex concentrated alloys [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 130:64-74.
- [39] WEI S L, CEMAL C T, SANG J K, et al. Natural-mixing guided design of refractory high-entropy alloys with as-cast tensile ductility [J]. *Nature Materials*, 2020, 19:1 175-1 181.
- [40] MASAKI T, SHIGETO Y, MORIKAWA A, et al. Temperature dependence of the yield stress in TiZrNbHfTa body-centred cubic high-entropy alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2023, A871:144 917.
- [41] YURCHENKO N Y, PANINA E, SHAYSULTANOV D, et al. Refractory high entropy alloy with ductile intermetallic B2 matrix / hard bcc particles and exceptional strain hardening capacity [J]. *Materialia*, 2021, 20:101 225.
- [42] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, SALISHCHEV G A, et al. Structure and mechanical properties of a light-weight AlNbTiV high entropy alloy [J]. *Materials Letters*, 2015, 142:153-155.
- [43] LIU X W, BAI Z C, DING X F, et al. A novel light-weight refractory high-entropy alloy with high specific strength and intrinsic deformability [J]. *Materials Letters*, 2021, 287:129 255.
- [44] YAO H W, LIU Y M, SUN X H, et al. Microstructure and mechanical properties of $Ti_3V_2NbAl_xNi_y$ low-density refractory multi-element alloys [J]. *Intermetallics*, 2021, 133:107 187.
- [45] HUANG T D, WU S Y, JIANG H, et al. Effect of Ti content on microstructure and properties of $Ti_xZrV Nb$ refractory high-entropy alloys [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020, 27:1 318-1 325.
- [46] STEPANOV N D, YURCHENKO N Y, PANINA E, et al. Precipitation-strengthened refractory $Al_{0.5}CrNbTi_2V_{0.5}$ high entropy alloy [J]. *Materials Letters*, 2017, 188:162-164.
- [47] XU Z Q, MA Z L, WANG M, et al. Design of novel low-density refractory high entropy alloys for high-temperature applications [J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, A755:318-322.
- [48] LEE K, JUNG Y, HAN J, et al. Development of precipitation-strengthened $Al_{0.8}NbTiVM$ ($M=Co, Ni$) Light-weight refractory high-entropy alloys [J]. *Materials*, 2021, 14:2 085.
- [49] 朱晓亮, 欧梅桂, 张松, 等. TC4钛合金热变形行为研究 [J]. *现代机械*, 2019(2):88-92.
- [50] 王冰, 相志磊, 周宗熠, 等. 耐 600 °C 及以上高温钛合金研究进展 [J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(2):42-50, 71.
- [51] ELAF A, DAVID B, CHARLIE B, et al. Oxidation resistance of Al-containing refractory high-entropy alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2024, 244:115 997.
- [52] LI Z, WANG L, WANG B B, et al. Oxidation behavior of Ti-Nb-Mo-Al-Si_x refractory high entropy alloy at 1 000 °C [J]. *Corrosion Science*, 2022, 206:110 504.
- [53] XU Q, WANG J T, GUO C Y, et al. Oxidation properties and microstructure evolution of oxidation layer for $Cr_xNbMoTiV$ refractory high entropy alloys at elevated temperature [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36:5 050-5 062.

(编辑:彭瑾)