

# Research Status of High Entropy Alloy Performance

Lijuan Lan, Yingying Gu, Tianjiao Pu, Heguo Zhu\*

School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu  
Email: 893196460@qq.com, 3247435389@qq.com, 1002386826@qq.com, \*zhg1200@sina.com,  
\*zhg1200@njjust.edu.cn

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 19<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Due to its high strength, high hardness, excellent wear and corrosion resistance, good thermal stability at high temperatures and high oxidation resistance properties, high-entropy alloy is a new alloy with great development potential in areas such as aerospace and electronic communication. Research status on the properties of high-entropy alloys is reviewed, including mechanical properties, corrosion resistance and high temperature oxidation resistance. Main effective factors on properties are separately discussed, with alloy elements, preparation process, plastic deformation and alloy ratio included. The deficiencies existed in high-entropy alloys' researches are summarized. The prospects of the properties of high-entropy alloys are also proposed.

## Keywords

High Entropy Alloy, Mechanical Properties, Corrosion Resistance, Oxidation Resistance

---

# 高熵合金性能的研究现状

兰利娟, 顾莹莹, 濮天姣, 朱和国\*

南京理工大学材料科学与工程学院, 江苏 南京  
Email: 893196460@qq.com, 3247435389@qq.com, 1002386826@qq.com, \*zhg1200@sina.com,  
\*zhg1200@njjust.edu.cn

收稿日期: 2018年2月22日; 录用日期: 2018年3月8日; 发布日期: 2018年3月19日

---

## 摘要

高熵合金是一种新型合金, 具有高的强度与硬度、优异的耐磨性与耐腐蚀性及强的热稳定性和抗氧化性  
\*通讯作者。

等特点, 在航空航天、电子通信等领域具有巨大的应用潜力。本文综述了高熵合金的力学性能、耐腐蚀性能及其高温氧化性能的研究现状, 分别讨论了性能的主要影响因素: 合金元素、制备工艺、塑性变形及合金配比等, 指出高熵合金性能研究中的不足, 并对高熵合金性能研究的方向提出了展望。

## 关键词

高熵合金, 力学性能, 耐腐蚀性, 氧化性

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代科学技术的蓬勃发展, 由一种或两种金属为主元的传统合金所具有的局限性越来越明显。传统合金由于主元个数的限制, 即便加入多种元素也难以显著地优化合金性能, 满足现代工业的需要。叶均蔚[1]等在 20 世纪 90 年代提出了高熵合金概念。含有多主元的高熵合金因其优越的力学性能、耐腐蚀性和抗高温氧化性[2] [3] [4] [5] [6]等特点, 且能够通过合理的元素设计和制备方法满足一些特殊工作条件下的需要, 作为一个材料研究的新兴领域, 受到了研究学者的广泛关注, 其应用前景十分广阔。

混合熵[7](Mixing entropy)是高熵合金区别于传统合金的重要热力学特征。由吉布斯自由能定律

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

( $\Delta G$  为自由能变化,  $H$  为混合焓,  $T$  为热力学温度,  $S$  为混合熵)可知, 由于高熵合金具有较高的混合熵, 能够降低系统的自由能, 很大程度上抑制了金属间化合物的形成, 使得合金在凝固时更容易形成固溶体而不是金属间化合物[8]。高熵合金通常由 5~13 种元素组成, 且每种元素的质量分数控制在 5%~35% 之间, 每种元素均可称为主元。随着合金主元数目的增加, 合金组织呈现由树枝晶向等轴晶转变的趋势[9]。研究表明[10], 高熵合金拥有简单的晶体结构(BCC, FCC 或者 BCC + FCC)以及优良的力学、物理和化学性能。

通过添加不同种类和数量的元素, 改变合金内部的混合熵大小, 可以获得具有某些特殊性质的合金。多组元高熵合金在成分方面带来的性能优化非常值得关注。此外, 不同的制备工艺, 也会对高熵合金的性能产生影响[11] [12]。

## 2. 高熵合金的性能

高熵合金的性能主要有耐腐蚀性、力学性能、高温氧化性、软磁性等, 本文主要综述其耐腐蚀性、力学性能及高温氧化性的研究现状。

### 2.1. 力学性能

#### 2.1.1. 拉伸与压缩性能

高熵合金是一种“超级固溶体”, 因此固溶强化效应会异常强烈, 在合金为结晶相时, 大量的固溶原子能够阻碍位错运动, 从而形成高强高硬固体。高熵合金组元众多, 扩散时各元素配合扩散, 使新相难以长大, 因此常有纳米相析出, 这又能进一步增强合金的强度。当高熵效应使得合金内的混乱度过高而形成非晶相时, 由于无位错存在, 则固体的强度更高。除此之外, 特定主元的高熵合金具有极高的屈

服强度、断裂强度、塑性变形和加工硬化能力,甚至超过大部分高强度合金[13],其影响的因素主要有合金配比、热处理等。

### 1) 合金配比

近年来,AlCoCrCuFeNi系高熵合金得到了深入研究。其中Al含量的不断变化对力学性能的影响研究尤为深入。刘源等[14]研究了不同Al含量的 $Al_xCoCrFeNi$ 多主元高熵合金的微观组织和力学性能。结果表明:随着Al含量的增加,合金的硬度HV从1530 MPa提高到7350 MPa,相应地,合金由塑性材料变为中低温脆性材料。温丽华等人[15]对其研究表明:随着Al含量的增加,FCC相含量减少,BCC相含量增多,从而导致 $Al_xCoCrCuFeNi$ 具有较高的屈服强度,且塑性应变超过5.8%。刘亮等[16]对其研究则发现,随Al含量的增加,组织形貌由树枝晶形貌向等轴晶形貌转变,合金的硬度也显著增加;在 $Al_xCoCuFeNi$ 合金中, $Al_1CoCuFeNi$ 合金具有最佳的室温压缩性能,抗压强度及压缩率分别为1548 MPa和8.9%。

Zhao等[17]对 $Ti_{0.5}AlCoFeNiCr_x$ 高熵合金研究发现:适量的Cr元素能显著提高合金的室温压缩力学性能,其中 $Cr_{0.5}$ 具有最好的压缩力学性能,其压缩强度和塑性变形分别达到了2692 MPa和19.39%。Cai等[18]研究了不同B含量的 $Al_{0.5}CoCrFeNiB_x$ 高熵合金,结果表明随着B含量的增加,其抗拉强度提高,而延伸率下降。当B含量增至 $X = 0.3$ 时,合金发生早期脆性断裂而使抗拉强度下降。

另外,LukaszRogal等[19]研究发现在CoCrFeMnNi高熵合金中加入5 wt%的SiC颗粒后,室温下CoCrFeMnNi高熵合金表现出非常强的硬化效果,压缩强度达2660 MPa,屈服强度达1180 MPa。而LukaszRogal等[20]在CoCrFeMnNi高熵合金中插入 $Al_2O_3$ 纳米颗粒后同样发现:CoCrFeMnNi高熵合金表现出很强的硬化效果,抗压强度为2660 MPa,屈服强度为1180 MPa。塑性高达34.5%,5%  $Al_2O_3$ 纳米颗粒添加后其屈服强度显著提高,达1600 MPa。

### 2) 热处理

对合金进行一些热处理,比如退火、淬火和时效等处理都会改变其力学性能。黄祖凤等[21]研究了退火对FeCoCrNiB高熵合金涂层组织结构与硬度的影响。900°C或1000°C退火后,块状组织硬度达1188 HV,涂层具有较好的耐高温软化性能,硬度仅分别下降约7%和9%。Tang等[22]对 $Al_{0.5}CoCrFeNiB_{0.2}$ 高熵合金组织的热处理研究表明:退火和淬火热处理均可强化合金。其中,经800°C × 10 h退火后,合金室温抗拉强度由铸态的850 MPa提高到1232 MPa;经1000°C × 10 h淬火后,合金塑性及强度均优于铸态合金,尤其是塑性显著提高。唐群华等[23]对 $Al_{0.5}CoCrFeNi$ 高熵合金经不同温度时效处理24 h后的微观组织和力学性能进行了研究,结果显示时效处理能显著提高合金的抗拉强度。

#### 2.1.2. 磨损性能

由于高熵合金具有固溶强化、沉淀强化、第二相强化等多种强化机制使高熵合金具有很高的强度和硬度。材料的耐磨性与维氏硬度有关[24][25],一般认为材料的硬度越高耐磨性越大[26],有些合金的硬度与耐磨性还呈线性关系[27]。通常高熵合金具有优异的耐磨性能[28][29]。其影响因素有多种,主要有合金元素、制备工艺、外加的陶瓷相、介质及塑性变形等。

### 1) 合金元素

加入合金元素可与高熵合金基体形成共格或非共格的析出相,改变了晶体的简单体心立方或者面心立方结构相组成,合金含量的改变可改变高熵合金的磨损机制,从而影响高熵合金的耐磨性[30]。

谢红波等[31]采用非自耗电弧熔炼炉制备了 $Al_xFeCrCoCuV$ 多组元高熵合金,当 $x = 0$ 时,合金为单一的BCC相,硬度最大,最耐磨,随着Al元素的加入, $x = 0.5$ 和1.0时,合金由单一的BCC相转变为由BCC和FCC的双相系统,硬度和耐磨性均降低。但Al元素严重的晶格畸变导致的固溶强化增强了合

金的硬度和耐磨性。随着摩擦的进行,合金的摩擦磨损机制由黏着磨损向氧化磨损机制转变。叶海梅等[30]用真空电弧熔炉制备了  $\text{CrCuFeNiVTi}_x$  高熵合金,随 Ti 含量增加,合金由 FCC + BCC 结构转变为 BCC 结构。由合金的磨损形貌可知,  $x = 0.5$  合金同时发生了较严重的颗粒磨损和黏着磨损。随着 Ti 含量的增加,  $x = 1.0$  的颗粒磨损减弱,变成以黏着磨损为主;  $x = 1.5$  和  $x = 2.0$  则主要发生黏着磨损。随着 Ti 含量的增加,  $\text{CrCuFeNiVTi}_x$  高熵合金耐磨性提高。

## 2) 制备工艺

卢易枫等[32]分别采用常规浇注和机械振动辅助浇注制备了铸态  $\text{FeCoCuNi}$  高熵合金,通过测试分析发现:机械振动辅助浇注使合金组织细化、元素偏析减少,耐磨性能明显提高。Huang Can 等[33]利用激光加热在 Ti-6Al-4V 合金基体上获得了裂纹和缩孔较少的  $\text{TiVCrAlSi}$  高熵合金涂层,且涂层与衬底结合良好,涂层组织由韧性较高的 BCC 基体和高硬度分散的  $(\text{Ti}, \text{V})_5\text{Si}_3$  析出物组成,提高了 Ti-6Al-4V 合金的耐磨性。

## 3) 陶瓷颗粒

激光熔覆目前已成为制备高熵合金的新型方法之一[34]。张琪等[35]向激光熔覆  $\text{FeCoCrNiB}$  高熵合金涂层中加入陶瓷颗粒 WC 后发现:未加 WC 时,涂层由条状  $\text{M}_3\text{B}$  相和集体 FCC 两相组成。当 WC 的含量为 5% 时,涂层中出现  $\text{M}_3\text{C}$  相,涂层由  $\text{M}_3\text{B}$  相、FCC 相和  $\text{M}_3\text{C}$  组成。当 WC 含量为 10% 时,涂层结构发生较大变化,变为枝晶结构,其中枝晶对应  $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$  相,枝晶间由网状  $\text{M}_7(\text{C}, \text{B})_3$  相和 FCC 相组成。WC 含量为 20% 时,涂层仍为枝晶组织,枝晶对应  $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$  相,枝晶间中网状组织消失,枝晶间为 FCC 相。随着 WC 含量的增加,涂层的耐磨性能提高。安旭龙等[36]在  $\text{FeSiCrCoMo}$  高熵合金涂层中添加 WC 后,发现涂层中形成了致密细小的胞状晶,同时 BCC 相增多,金属间化合物明显减少;WC 的添加使得涂层的摩擦系数减小,磨损率减小,耐磨性能提高。

## 4) 介质

史一功[37]等人研究了  $\text{AlCoCrFeNiCu}$  高熵合金/GCr15 摩擦副在  $\text{H}_2\text{O}_2$  介质及去离子水中的摩擦磨损行为。试验发现高熵合金与 GCr15 摩擦副的摩擦系数和磨损量均随  $\text{H}_2\text{O}_2$  浓度的升高而减小,且高熵合金在  $\text{H}_2\text{O}_2$  介质中的磨损量远小于纯水中的磨损量。高熵合金在去离子水中以严重的黏着磨损为主,在 30% 和 60%  $\text{H}_2\text{O}_2$  介质中,磨损机制转变为氧化磨损、颗粒磨损和黏着磨损的综合作用,在高浓度  $\text{H}_2\text{O}_2$  (90%) 中,高熵合金的磨损表面仅有很浅的犁沟,磨损程度明显降低。胡成平[38]等人研究发现在高浓度(90%)过氧化氢中高熵合金  $\text{AlCoCrFeNiCu}$  与氮化硅、碳化硅陶瓷组成滑动摩擦副具有良好的摩擦磨损性能,尤其与  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷配副时摩擦学性能最优。

## 5) 塑性变形

范太云[39]等人通过真空电弧熔炼制备了  $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$  高熵合金,采用轧制方法获得轧制变形量分别为 30%、60% 和 90% 的塑性变形合金,塑性变形后合金的枝晶相被压扁拉长,枝晶间相沿轧制方向被拉长。根据 Lim 等[40] [41]的推导可知,随着合金轧制变形量的增加,摩擦系数也随之加大,耐磨性下降。另外合金由于变形而产生的残余应力也会降低合金的磨损性能[42]。

## 6) 固体润滑剂

Aijun Zhang 等[43]以  $\text{CoCrFeNi}$  高熵合金作为基质,加入 Ag 和  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$  共晶用作固体润滑剂,当温度在室温到  $800^\circ\text{C}$  之间,其磨损率均低于  $10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ,摩擦性能高于  $\text{CoCrFeNi}$  高熵合金和常规高温自润滑材料。室温到  $400^\circ\text{C}$  时,金属 Ag 对润滑起主要作用,而在  $400^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$  时,Ag,  $\text{BaF}_2/\text{CaF}_2$  共晶以及各种高温氧化物复合在合金表面起到润滑作用。另外, Aijun Zhang 等[44]还发现,向  $\text{CoCrFeNi}$  高熵合金基体中加入镀镍石墨粉和镀镍  $\text{MoS}_2$  粉末也会增强其耐磨损性,从室温到中等温度,复合材料的摩擦系数和磨损率的降低主要归因于石墨和  $\text{MoS}_2$  的协同润滑效应。在高温条件下,在复合材料表面形

成的各种金属氧化物对提高摩擦学性能起着关键作用。

## 2.2. 耐腐蚀性

高熵合金具有“鸡尾酒效应”，当高熵合金中有 Al、Cr、Ni 等易形成致密氧化膜的元素，该合金具有良好的耐腐蚀性能[45]。添加耐腐蚀元素、对合金进行热处理也会增加合金的耐腐蚀性。另外，由于高熵合金具有较低自由能因素，也有助于提高合金耐腐蚀性。所以高熵合金通常具有优异的耐腐蚀性能。其影响因素有多种，主要有合金元素、塑性变形及热处理等。

### 2.2.1. 合金元素

合金元素的加入会使合金发生晶格畸变、生成更多晶界或抑制钝化等现象影响高熵合金的耐腐蚀性能。当高熵合金含有耐腐蚀元素 Al、Cr、Ni 等时，这些元素能够在金属表面形成氧化膜，提高合金的耐腐蚀性能。

谢红波等[46]对铸态  $\text{AlFeCrCoCuZr}_x$  ( $x = 0, 0.5, 1$ ) 高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中的耐腐蚀性能进行了研究，发现 Zr 的加入降低了合金的耐腐蚀性。一方面 Zr 使得晶粒细化，合金晶界增加，界面增多，另一方面，Zr 的原子半径很大，添加以后会发生严重的晶格畸变，使合金在凝固过程中晶界处产生了大量的空位、位错和晶界偏析等缺陷，从而降低了合金的耐腐蚀性能。徐右睿[47]的研究指出，过量 Cu 元素的添加不利于钝化发生，钝化点位区间会变小。李伟[48]等研究不同 Ti 含量的  $\text{AlFeCuCoNiCrTi}_x$  在 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液和 1 mol/L NaCl 溶液中的电化学性能，得出  $\text{Ti}_{0.5}$ 、 $\text{Ti}_{1.0}$ 、 $\text{Ti}_{1.5}$  三种合金在 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中  $\text{Ti}_{1.5}$  有最优异耐腐蚀性，在 1 mol/L NaCl 溶液中  $\text{Ti}_{0.5}$  耐腐蚀性最好。接着对  $\text{Al}_x\text{FeCoNiCrTi}$  系高熵合金的电化学性能研究[49]的极化结果表明， $\text{Al}_1$  相较于  $\text{Al}_{0.5}$ 、 $\text{Al}_{1.5}$ 、 $\text{Al}_{2.0}$  以及  $\text{AlFeCuCoNiCrTi}_{1.5}$  在 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中具有最优异的综合耐腐蚀性能。 $\text{Al}_1$  相较于  $\text{Al}_{0.5}$ 、 $\text{Al}_{1.5}$ 、 $\text{Al}_{2.0}$  以及  $\text{AlFeCuCoNiCrTi}_{0.5}$  在 1 mol/L NaCl 溶液中具有最优异的耐腐蚀性能。

### 2.2.2. 塑性变形

黄艺娜等[50]对  $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$  高熵合金进行不同形变量(30%, 60%, 90%)的轧制变形，发现随着轧制变形量的增加， $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$  高熵合金在 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能逐渐降低。说明轧制变形形变量越大，晶粒形状越扁，即晶粒长径比越大，垂直于轧制方向的应力腐蚀抗力越低[51]。

### 2.2.3. 热处理

温鑫[52]等人采用真空热压烧结技术制备了  $\text{NiCrCoTiV}$  高熵合金，并在不同温度下对其进行 18 h 保温热处理，发现随温度升高，合金的扩散系数增大，组织更加均匀，合金中先共析相与共晶组织间的应变能得到释放，减少了缺陷的产生，增强了高熵合金的耐腐蚀能力。

## 2.3. 高温氧化性能

高熵合金还表现出优异的高温氧化性能。洪丽华[53]对  $\text{Al}_x\text{Co}_y\text{Cr}_z\text{FeNi}$  ( $x, y, z$  表示元素摩尔数,  $x = 0.5, 1, 1.5$ ;  $y = 1, 1.5, 2$ ;  $z = 1, 1.5, 2$ ) 高熵合金的抗高温氧化性能进行了研究，发现该合金在 800°C、900°C、1000°C 时抗高温氧化性能较好，属于抗氧化级。在 1100°C 时氧化物脱落严重，失去抗高温氧化性能。Zhang 等[54]研究  $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiSi}_{0.2}$  和  $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiTi}_{0.5}$  高熵合金(下标均表示摩尔比)三种高熵合金的抗氧化性能表明，三种高熵合金在 900°C 下均属于抗氧化级。 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$  合金和  $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiSi}_{0.2}$  合金的氧化增重曲线相似， $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiTi}_{0.5}$  高熵合金的氧化增重速率较大。 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$ 、 $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiSi}_{0.2}$  高熵合金表面均生成  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化物，内部均生成少量 AlN 颗粒； $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNiTi}_{0.5}$  高熵合金氧化产物为  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  尖晶石氧化物及富含钛和铁的复杂氧化物，内部产生少

量氮化物颗粒。吴波等[55]研究了  $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.5}$  多主元高熵合金的高温氧化行为发现合金具有优异的抗氧化性, 在  $800^{\circ}\text{C}$ 、 $900^{\circ}\text{C}$  和  $1100^{\circ}\text{C}$  下为抗氧化级别, 而在  $1000^{\circ}\text{C}$  下为完全抗氧化级别。谢红波等[56]在  $\text{Al}_x\text{FeCrCoCuTi}$  高熵合金中添加了元素 Al, 加热到  $800^{\circ}\text{C}$  以前合金的质量几乎保持不变, Al 元素可以有效提高合金的抗高温氧化能力。郑必举等[57]研究了 Al 含量  $x$  对  $\text{Al}_x\text{CrFeCoCuNi}$  ( $x = 0.5, 2.0, 4.0$ ) 高熵合金涂层的抗氧化性能的影响规律。在  $900^{\circ}\text{C}$  大气气氛中,  $\text{Al}_x\text{CrFeCoCuNi}$  高熵合金涂层具有较好的抗氧化性能, 并随 Al 含量的增加而提高。Zhou 等[58]将  $\text{MoFeCrTiWSi}_x\text{Al}_y$  高熵合金涂层在  $800^{\circ}\text{C}$  氧化 40 h 后, 发现各涂层的高温抗氧化性能均较高, Si、Al 的添加可进一步提高其高温抗氧化性能。文献[59]运用热重分析法研究了等摩尔 Mn、V、Mo、Ti、Zr 元素对  $\text{AlFeCrCoCu}$  高熵合金的组织结构、硬度及抗高温氧化性能的影响规律。在加热到  $700^{\circ}\text{C}$  以前, 合金质量几乎保持不变, 抗高温氧化性能最好, 而第 6 元素的添加对合金的抗高温氧化能力不利。其中, V 和 Mo 元素的加入导致其产生的对应氧化物具有易挥发特性而严重地恶化合金的抗高温氧化性能。Zhang 等[60]研究发现不同 Cr 含量的  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  涂层氧化动力学曲线基本都符合抛物线规律。随着 Cr 量的增加,  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  涂层的氧化膜由富 Fe 的氧化物逐渐向富 Cr 氧化物转变, 并最终生成稳定、连续的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  氧化膜。涂层的抗氧化性能随 Cr 含量的增加而增强。当 Cr 含量超过  $X=2$  后,  $\text{FeCoCr}_x\text{NiB}$  涂层的抗氧化性能较好。

### 3. 展望

多主元高熵合金弥补了传统合金性能上的一些不足, 国内外学者在高熵合金的成分和制备工艺上已有突破, 在力学、物理、化学性能上取得了不少研究成果。然而, 高熵合金的制备工艺复杂, 能耗高, 因此改进制备工艺, 降低能耗, 最终降低生产成本, 方可使熵合金走出实验室, 投入工业生产与应用。

高熵合金的性能还有较大的研究潜力, 研究应在现有的优异性能上再寻求突破和优化。

此外, 在合金元素设计方面, 由于可以添加的元素种类多种多样, 用量也没有严格的理论指导, 单纯地研究某一元素的影响是不够全面的, 几种元素共存时可能产生人们意料之外的微观结构变化, 合金的稳定性也随之改变。因此, 多种元素合金化及其合金元素间的协调机制值得深入研究。

### 基金项目

国家本科生科研训练项目(201710288071); 国家自然科学基金资助项目(51571118; 51371098); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20141308)。

### 参考文献

- [1] Yeh, J.W., Chen, S.K., Lin, S., *et al.* (2004) Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes. *Advanced Engineering Materials*, **6**, 299-303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
- [2] Zhou, Y.J., Zhang, Y., Wang, Y.L., *et al.* (2007) Solid Solution Alloys of  $\text{AlCoCrFeNiTi}_x$  with Excellent Room-Temperature Mechanical Properties. *Applied Physics Letters*, **90**, 181 904.
- [3] 卢素华. 原位自生高熵合金基复合材料组织级性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [4] Shu, F.Y., Wu, L., Zhao, H.Y., *et al.* (2018) Microstructure and High-Temperature Wear Mechanism of Laser Cladded  $\text{CoCrBFeNiSi}$  High-Entropy Alloy Amorphous Coating. *Material Letters*, **211**, 235-238. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.09.056>
- [5] Zhang, Y., Liu, Y., Li, Y.X., *et al.* (2016) Microstructure and Mechanical Properties of a Refractory  $\text{HfNbTiVSi}_{0.5}$  High-Entropy Alloy Composite. *Material Letters*, **174**, 82-85. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.092>
- [6] Huo, W.Y., Zhou, H., Fang, F., *et al.* (2018) Microstructure and Properties of Novel  $\text{CoCrFeNiTi}_x$  Eutectic High-Entropy Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **735**, 897-904. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.075>
- [7] 张东, 张宁. 物理学中的熵理论及其应用研究[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2007, 21(1): 4-8.

- [8] 李忠丽, 孙宏飞, 高鹏, 等. 新型多主元高熵合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 62-65.
- [9] 郭娜娜, 孙宏飞, 高鹏, 等. 主元数对多主元高熵合金组织结构和性能的影响[J]. 新技术新工艺, 2011(6): 87-91.
- [10] Qiu, X.W., Zhang, Y.P., He, L. and Liu, C.G. (2013) Microstructure and Corrosion Resistance of AlCrFeCuCo High Entropy Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **549**, 195-199. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.09.091>
- [11] 罗新民, 王翔, 陈康敏, 等. 激光冲击诱导的航空铝合金表层高熵结构及其抗蚀性[J]. 金属学报, 2015(1): 57.
- [12] 郝建军, 张利, 马跃进, 等. 反应氮弧熔覆 TiCN/Fe 涂层工艺优化及耐磨性[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7): 165.
- [13] 高家诚, 李锐. 高熵合金研究的新进展[J]. 功能材料, 2008, 39(7): 1059-1061.
- [14] 刘源, 陈敏, 李言祥, 等.  $Al_xCoCrCuFeNi$  多主元高熵合金的微观结构和力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(9): 1602-1607.
- [15] 温丽华, 寇宏超, 王一川, 等.  $Al_xCoCrCuFeNi$  多主元高熵合金的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(6): 579-581.
- [16] 刘亮, 张越, 赵作福, 等.  $Al_xCoCuFeNi$  高熵合金的组织结构与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(6): 570-574.
- [17] Zhao, Y.G., Mei, H., Dai, P.Q., Bo, W.U. and Zheng, W.M. (2010) Microstructures and Mechanical Properties of Ti 0.5 AlCoFeNiCr<sub>x</sub> High-Entropy Alloys. *Journal of Materials Science and Engineering*, No. 5, 753-756.
- [18] Cai, J.B., Wu, Y.-J., Zhang, D.D. and Dai, P.Q. (2011) Microstructure and Mechanical Property of High-Entropy Alloy with Multi-Principal Elements. *Rare Metals and Cemented Carbides*, **39**, 37-40.
- [19] Rogal, L., Kalita, D., Tarasek, A., et al. (2017) Effect of SiC Nano-Particles on Microstructure and Mechanical Properties of the CoCrFeMnNi High Entropy Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, **708**, 344-352. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.274>
- [20] Rogal, L., Kalita, D. and Litynska-Dobrzynska, L. (2017) CoCrFeMnNi High Entropy Alloy Matrix Nanocomposite with Addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Intermetallics*, **86**, 104-109. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.03.019>
- [21] 黄祖凤, 张冲, 唐群华, 等. 退火对激光熔覆 FeCoCrNiB 高熵合金涂层组织结构与硬度的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 000009-13.
- [22] Tang, Q.H., Cai, J.B., Wu, G.-F. and Dai, P.Q. (2011) Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al<sub>0.5</sub>CoCrFeNiB<sub>0.2</sub> High-Entropy Alloy. *Foundry*, **60**, 24-27.
- [23] 唐群华, 赵亚光, 蔡建宾, 等. 时效处理对 Al<sub>0.5</sub>CoCrFeNi 高熵合金微观组织和力学性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(4): 47-50.
- [24] 刘宁, 张艳, 秦亮. 一种新型耐磨材料——高熵合金[J]. 材料导报, 2012, 26: 389-391.
- [25] Chuang, M.H., Tsai, M.H. and Wang, W.R. (2011) Microstructure and Wear Behavior of Al<sub>x</sub>Co<sub>1.5</sub>CrFeNi<sub>1.5</sub>Ti<sub>y</sub> High-Entropy Alloys. *Acta Materialia*, **59**, 6308-6317. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.041>
- [26] 范启超. AlFeCrNiCoCu 系高熵合金及其复合材料组织及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [27] Hsu, C.J., Yeh, J.W. and Chen, S.K. (2004) Wear Resistance and High Temperature Compression Strength of FCC CuCoNiCrAl<sub>0.5</sub>Fe Alloy with Boron Addition. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **35**, 1465-1469. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0254-x>
- [28] Wu, J.M., Lin, S.J. and Yeh, J.W. (2006) Adhesive Wear Behavior of Al<sub>x</sub>CoCrCuFeNi High-Entropy Alloys as a Function of Aluminum Content. *Wear*, **261**, 513-519. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.12.008>
- [29] Hsu, C.Y., Sheu, T.S. and Yeh, J.W. (2010) Effect of Iron Content on Wear Behavior of AlCoCrFe<sub>x</sub>Mo<sub>0.5</sub>Ni High-Entropy Alloys. *Wear*, **268**, 653-659. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.10.013>
- [30] 叶海梅, 杨文超, 庞文超, 杨剑冰, 湛永钟. Ti 元素对 CoCuFeNiVTi<sub>x</sub> 高熵合金耐磨性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(3): 1187-1911.
- [31] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰, 周敏, 刘德飘, 毛炜乾. Al 元素对 Al<sub>x</sub>FeCrCoCuV 高熵合金组织及摩擦性能的影响[J]. 材料工程, 2016(44): 65-70.
- [32] 卢易枫, 冯春丽. 机械振动对高熵合金烛台组织和性能的影响分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45(7): 63-65.
- [33] Huang, C., Zhang, Y., Vilar, R., et al. (2012) Dry Sliding Wear Behavior of Laser Clad TiVCrAlSi High Entropy Alloy Coatings on Ti-6Al-4V Substrate. *Materials & Design*, **41**, 338-343. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.049>
- [34] 杨晓宁, 邓伟林, 黄晓波, 等. 高熵合金制备方法进展[J]. 热加工工艺, 2014, 43(22): 30-33.

- [35] 张琪, 饶湖常, 沈志博, 黄祖凤, 戴品强. WC 颗粒对激光熔覆 FeCoCrNiB 高熵合金涂层组织结构与耐磨性影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(18): 147-155.
- [36] 安旭龙, 刘其斌, 郑波. 碳化钨对激光熔覆高熵合金的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(12): 129001.
- [37] 史一功, 寇宏超, 段海涛, 等. AlCoCrFeNiCu 高熵合金在过氧化氢介质中的摩擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(4): 381-387.
- [38] 胡成平, 赵亚林, 王杰鹏, 等. 高浓度过氧化氢中 AlCoCrFeNiCu 的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 31(5): 439-446.
- [39] 范太云, 唐群华, 陈文哲, 戴品强, 吴波. 塑性变形对  $Al_{0.5}FeCoCrNi$  高熵合金组织结构和性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(2): 258-263.
- [40] Xyla, A.G. and Koutsoukos, P.G. (1987) Effect of Diphosphonates on the Precipitation of Calcium Carbonate in Aqueous Solutions. *Journal of Chemical Society Faraday Translates*, **183**, 1477-1453.
- [41] 吴香发, 何杰, 邢雅丽, 杨万芳. 重制  $CaCO_3$  的表面性质及在 PVC 制品中的应用[J]. 聚氯乙烯, 2005(12): 15-17.
- [42] 钱军民, 金志浩. 我国  $CaCO_3$  填料表面改性即在塑料中的应用[J]. 合成树脂及塑料, 2002(19): 59-62.
- [43] Zhang, A., Han, J., Su, B. and Meng, J. (2017) A Novel CoCrFeNi High Entropy Alloy Matrix Self-Lubricating Composite. *Journal of Alloys and Compounds*, **725**, 700-710. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.197>
- [44] Zhang, A., Han, J., Su, B., Li, P. and Meng, J. (2017) Microstructure, Mechanical Properties and Tribological Performance of CoCrFeNi High Entropy Alloy Matrix Self-Lubricating Composite. *Materials and Design*, **114**, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.072>
- [45] 牛雪莲, 王立久, 孙丹.  $Al_xFeCoCrNiCu$  ( $x = 0.25, 0.5, 1.0$ ) 高熵合金的组织结构和电化学性能研究[J]. 功能材料, 2013(4): 532-535.
- [46] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰. Zr 元素对  $AlFeCrCoCuZr_x$  高熵合金组织及腐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2016(44): 44-49.
- [47] 徐右睿. FeCoNiCrCu<sub>x</sub> 高熵合金之抗腐蚀性研究[D]. 基隆: 海洋大学, 2004.
- [48] 李伟, 刘贵仲, 郭景杰.  $AlFeCuCoNiCrTi_x$  高熵合金的组织结构及电化学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(10): 941-944.
- [49] 李伟, 刘贵仲, 郭景杰.  $Al_xFeCoNiCrTi$  系高熵合金的组织结构及电化学性能研究[J]. 铸造, 2009(58): 431-435.
- [50] 黄艺娜, 唐群华, 戴品强. 轧制变形对  $Al_{0.3}CoCrFeNi$  高熵合金显微组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2015(38): 51-54.
- [51] 任伟才, 彭国胜, 陈康华, 等. 轧制变形对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与力学性能以及腐蚀性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(6): 807-813.
- [52] 温鑫, 金国, 庞学佳, 等. 热处理对真空热压烧结 NiCrCoTiV 高熵合金组织结构及耐腐蚀性能的影响[J]. 材料导报 B: 研究篇, 2017, 31(6): 79-83.
- [53] 洪丽华. 高熵合金高温氧化和高温腐蚀特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2014.
- [54] Zhang, H., Wang, Q.T., Tang, Q.H. and Dai, P.Q. (2013) High Temperature Oxidation Property of  $Al_{0.5}FeCoCrNi(Si_{0.2}, Ti_{0.5})$  High Entropy Alloys. *Corrosion & Protection*, **34**, 561-565.
- [55] 吴波, 赵春风, 杨上金. AlCoCrFeNiTi<sub>0.5</sub> 高熵合金的高温氧化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2015(12): 3228-3233.
- [56] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰, 等. 添加 Al 对  $Al_xFeCrCoCuTi$  高熵合金组织与高温氧化性能的影响[J]. 稀有金属, 2016, 40(4): 315-321.
- [57] 郑必举, 蒋业华, 胡文. 铝含量对  $Al_xCrFeCoCuNi$  高熵合金涂层抗氧化性能的影响[J]. 应用激光, 2016(1): 18-22.
- [58] Zhou, F., Liu, Q. and Zheng, B. (2016) Effects of Silicon and Aluminum Addition on Microstructure and Properties of MoFeCrTiW High-Entropy Alloy Coating. *Chinese Journal of Lasers*, **27**.
- [59] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰. Mn、V、Mo、Ti、Zr 元素对  $AlFeCrCoCu-X$  高熵合金组织与高温氧化性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015(1): 103-110.
- [60] Zhang, C., Huang, B. and Dai, P. (2016) Effects of Chromium Content on Oxidation Behavior of FeCoCr<sub>x</sub>NiB High-Entropy Alloy Coatings. *China Surface Engineering*, **29**, 32-38.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2373-1478，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)