

# 高温中熵合金的研究进展

谢增 季亚奇 刘学

(中国工程物理研究院材料研究所, 绵阳 621908)

**摘要** 航空航天、燃气轮机等领域的迅速发展,对相关部件在高温环境下的服役性能提出了更为严苛的要求。以高熔点金属元素为主要组元的高温中熵合金,在高温环境中仍能维持良好的强度与耐腐蚀性能,展现出作为高温结构功能材料的巨大应用潜力,其成分设计、加工成形以及性能优化已成为该领域的研究焦点。从高温中熵合金的新型制备方法、成分开发现状以及性能强化途径等3个方面系统阐述了高温中熵合金的发展现状以及有效的强化手段。此外,针对高温中熵合金所面临的主要问题与挑战,对其发展和应用前景进行了展望。

**关键词** 高温中熵合金;成分开发;制备工艺;性能强化

**中图分类号** G353.11;TG135

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.Z20250012

## Research Progress in High-temperature Medium-entropy Alloy

XIE Zeng, JI Yaqi, LIU Xue

(Institute of Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621908)

**Abstract:** Rapid growth in aerospace and gas turbine industries has raised stricter demands on service performance of components under high temperatures. High-temperature medium-entropy alloys with high-melting-point elements as main components maintain desirable strength and corrosion resistance in high temperature environments, which display great application potential as high-temperature structural materials. The composition design, processing, and property optimization have become reaserch focus. The latest progress in high-temperature medium-entropy alloys and effective strengthening strategies were reviewed in aspects of novel preparation methods, current composition development, and strengthening routes. Moreover, the problems and main challenges for alloys were discussed, and the future development as well as application prospects were forecast.

**Key Words:** High-temperature Medium-entropy Alloys, Composition Development, Preparation Routes, Property Strengthening

航空航天、燃气轮机等领域呈快速发展态势,其设备需在高温环境下长期服役,且难以进行频繁的保养与维护。这种极端的服役环境对结构件的选材提出了极为严苛的要求,需要具备更高稳定性和耐腐蚀性的高强材料。目前,传统高温合金的性能表现较为单一,难以良好地适配工艺变革。为了协同提升结构件在室温及高温环境下的综合力学性能与抗腐蚀性能,迫切需要研发新型合金以替代传统材料<sup>[1]</sup>。大量研究表明,高温中熵合金具备良好的综合性能,有望在多种严苛环境中服役,为应对高温工程部件的技术升级提供了新思路。

YE H J W 等<sup>[2]</sup>研究发现,在一定范围内增加合金

的组元数量能够提高合金的混合熵,并抑制金属间化合物的形成,该方法为合金成分设计及性能优化提供了新的思路。此后,研究者依据合金的名义成分,将含有5种及以上组元的合金定义为高熵合金,将含有3~4种组元的合金定义为中熵合金<sup>[3-4]</sup>。然而,OTTO F 等<sup>[5]</sup>发现,许多名义上的高熵合金构型熵较低,实际上属于多相合金,仅有少数等摩尔比的多主元合金能够形成单相固溶体。因此,盲目增加合金组元数量并不能提升合金性能<sup>[6]</sup>,中熵合金在多种体系中往往也会表现出比高熵合金更优的结构稳定性<sup>[7]</sup>。目前,常用的高温中熵合金是以Ni为主元的合金,其熔点接近1350℃。然而,随着相关领域技术的发展,服役温度持

收稿日期:2025-08-10;修订日期:2025-10-02

基金项目:国防科工局国防基础科研计划资助项目(JCKYS2023120204)

第一作者:谢增,男,2001年出生,硕士研究生,E-mail:zengxiethu@126.com

通信作者:刘学,男,1987年出生,副研究员,E-mail:xueliuthu@126.com

引用格式:谢增,季亚奇,刘学.高温中熵合金的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2026,46(6):835-847.

XIE Z, JI Y Q, LIU X. Research progress in high-temperature medium-entropy alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 835-847.

续升高,下一代材料需要在1300℃及更高温度环境下服役,并保持各项性能的稳定<sup>[8]</sup>。

高熔点金属的制备通常面临较大挑战。采用熔炼铸造、定向凝固等传统工艺时,极易导致合金元素烧损、产生严重偏析,并可能引入S等杂质元素<sup>[9-10]</sup>。研究者不断尝试新的制备工艺来减少高熔点合金的组织缺陷,进一步优化高温中熵合金的制备加工工艺窗口。高温中熵合金的成分设计及开发也是当前的研究热点与难点。实际生产中,经济因素极大程度上制约着合金的成分选择。在诸多高熔点金属元素中,仅IV族(Ti、Zr和Hf)、V族(V、Nb、Ta)和VI族(Cr、Mo和W)等被广泛应用于航空航天等领域。为了在有限的金属元素选择中开发出综合性能更好的高温合金,研究者致力于通过调节合金成分及制备工艺优化合金组织与结构。HAN Z H等<sup>[11]</sup>发现大多数体心立方(BCC)结构合金由于具有更高的固溶效应,在强度方面优于面心立方(FCC)结构合金<sup>[12-13]</sup>。此外,部分研究也报道了BCC高温中熵合金的耐腐蚀性高于FCC高温中熵合金,因而如何将合金调控出BCC结构成为合金设计的主流方向。高温中熵合金也可以通过加入其他强化元素、进行热处理等后续强化工艺进一步提升性能,研究者也需进一步研究完善此类工艺窗口。

高温中熵合金在能源、化工等领域展现出广阔的应用前景。近年来,此类行业发展迅速,市场规模持续扩大,高温合金迎来了前所未有的发展机遇。数据显示,我国高温合金市场规模近5年年均复合增长率为17.55%,预计在未来几年继续保持快速增长。具有高强度、良好耐蚀性等特点的高温中熵合金有望为突破高温工业领域的材料瓶颈提供新的解决方案<sup>[14]</sup>。

## 1 高温中熵合金的新型制备方式

高温中熵合金普遍具有熔点高、组元熔点差异大等特性,经熔炼等传统工艺制备,易出现严重偏析、疏松缩孔等缺陷。以粉材或丝材为加工原料可增大合金对能量的吸收率,从而有效克服高熔点及组元熔点差异对成形过程造成的困难。

### 1.1 粉末冶金

粉末冶金工艺以金属粉末为原料,经过混粉、成形及烧结过程成形合金零部件<sup>[15]</sup>,其制备出的合金结构均匀,无明显偏析,致密度可控,适用于高温合金多孔结构件的制备。目前,广泛应用的粉末冶金工艺包括

等离子烧结(SPS)、热等静压(HIP)等。

#### 1.1.1 等离子烧结

等离子烧结是以脉冲电流为热源,为压力模具中的粉末提供热量,在短时间内可实现粉末致密化<sup>[16]</sup>。MORAVCIK I等<sup>[17]</sup>采用该方法与机械合金化(MA)方法快速成形CoCrNi合金,发现两种工艺因冷却速度不同,使合金具有两相的微观结构(主要为FCC)而非铸造合金的单相结构,此多相细晶粒结构有助于提高合金的力学性能,合金的抗拉强度达到1024 MPa,伸长率达25.9%。LONG Y等<sup>[18]</sup>采用SPS与MA方法成形CoFeMnNi合金,发现该合金在900℃下的抗拉强度高达1059 MPa,适用于高温机械等领域。合金的SEM背散射电子图像见图1。可以看出,其微观结构均匀,无明显偏析。MA P C等<sup>[19]</sup>制备的CoCrNi合金在5 N载荷下的磨损率为 $3.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ ,受磨表面形变均匀且未发生大颗粒脱落。该合金在质量分数为3.5%的NaCl溶液中的腐蚀电位和电流密度分别为-0.5 V和 $2.7 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ,耐磨性与耐腐蚀性均强于316 L不锈钢等常规耐蚀合金,性能显著高于应用要求。

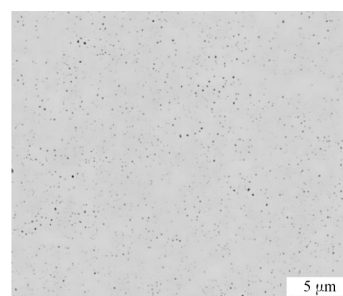


图1 MA及SPS工艺结合制备CoFeMnNi合金的背散射电子图<sup>[18]</sup>

Fig.1 BSE image of CoFeMnNi alloy prepared by MA + SPS

#### 1.1.2 热等静压

热等静压过程中气体原子在高温高压下的运动速率极大,持续碰撞零部件表面,极大提高烧结件致密度。该工艺不同于其他传统单向压力加工技术,气体原子的运动方向杂乱无章,可对部件所有的表面同时进行锻造而不受限于部件的形状<sup>[20-21]</sup>。CAI C等<sup>[22]</sup>探究了同步加载与异步加载技术对HIP成形Ti-6Al-4V合金性能的影响,发现合金粉未经两种工艺成形后均能达到接近完全致密。合金的微观结构主要由等轴晶粒和层状结构组成,见图2。同步加载过程中,压缩变形使得合金发生动态再结晶,形成围绕先前晶粒边界(PPBs)的等轴晶,见图2a和图2c。合金粉末随压力增加重新排列,出现变形、压平和破

碎现象,发生显著的塑性变形。氧化层在此过程中也充分破裂,等轴晶粒分布较为随机,PPBs消失。异步加载工艺制备出的Ti-6Al-4V合金综合性能更好,致密度为99.75%,抗拉强度为980 MPa,伸长率为17.2%,超过了Ti-6Al-4V合金平均水平,证明HIP工艺制备的零部件可以直接用于生产。吴杰等<sup>[23]</sup>制备

的Ti<sub>2</sub>AlNb合金在650℃下具有650 MPa以上的抗拉强度,无明显缺陷,满足先进航空发动机结构件需求。结合有限元模拟分析,认为较宽的合金粉末粒度分布有助于提升成品致密度,且在HIP工艺中设计合理的包套结构有助于提升成品的表面精度并降低合金内部缺陷。

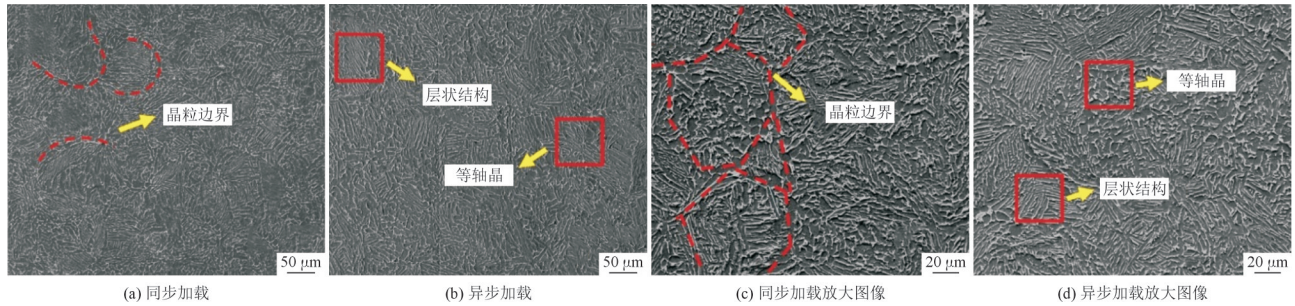


图2 不同HIP工艺制备Ti-6Al-4V试样的SEM图<sup>[22]</sup>

Fig.2 SEM images of Ti-6Al-4V specimens prepared by different HIP processes

### 1.1.3 真空感应熔炼

真空感应熔炼依靠磁场直接加热金属,相比传统熔炼技术,感应熔炼的坩埚温度较低,减少了熔融态金属与坩埚的相互作用,可有效降低杂质含量<sup>[24-25]</sup>,对非金属元素含量的抑制效果尤为显著。ASAHINA M等<sup>[26]</sup>以冷铜坩埚为容器,采用高频感应熔炼方式制备成形了质量分数高达99.98%的Cr-30Fe合金,合金气相杂质含量见表1。合金室温抗拉强度为1 473 MPa,高温抗拉强度仍达181 MPa,气相杂质(C、N、O)含量相比于原材料显著降低。

CHANG J H等<sup>[27]</sup>采用感应熔炼技术精确控制富Ni合金的成分及微观结构,合金在1 180℃下的硬度(HV)高达800,且耐腐蚀性良好。熔炼过程时间短且温度分布均匀,保证合金各组元均匀分布。ZHANG L等<sup>[28]</sup>在熔炼过程中加入电磁搅拌(EMS)辅助,发现未经EMS处理的试样中存在大量柱状晶,其生长方向平行于热流方向。经EMS制备的试样中仅有等轴晶,晶

表1 Cr-30Fe合金及原料中气相杂质含量( $\times 10^{-6}$ )<sup>[26]</sup>

Tab.1 Gaseous impurities in Cr-30Fe alloy and raw materials<sup>[26]</sup>

气相杂质	原料中气相杂质元素含量		成品中气相杂质元素含量理论值	成品中气相杂质元素含量实际测量值
	Cr	Fe		
C	60	2.8	42.8	21.1
N	10	0.2	7.1	16.1
O	40	14.1	32.2	23.3
S	<10	0.5	7.2	8.8
总计	120	17.6	89.3	69.3

粒较柱状晶更加细小,且几乎没有偏析情况,形貌见图3。卢百平等<sup>[29]</sup>采用电弧熔炼及感应熔炼两种工艺制备Cu-11Ni-2W合金,发现感应熔炼法冷却速度更快,所得合金的晶粒相较电弧熔炼法更加细小,且为单相组织。WANG G Q等<sup>[30]</sup>采用真空感应熔炼和SF<sub>6</sub>屏蔽熔炼两种工艺制备Mg<sub>67</sub>Zn<sub>28</sub>Ca<sub>5</sub>合金块体,发现感应熔炼法制备的试样成分分布更加均匀,在SBF溶液中的腐蚀速率仅为后者的25%。该试样在模拟体液中均匀腐蚀,试样表面无明显的局部腐蚀或点蚀现象。

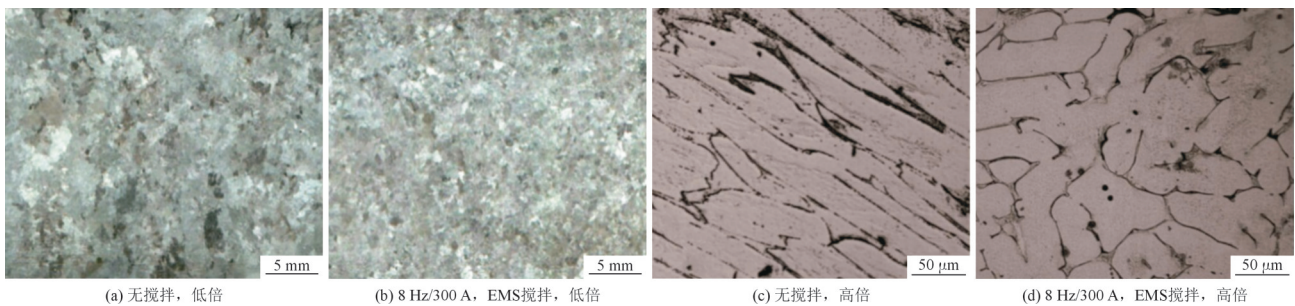


图3 有无电磁搅拌下Fe-Cr-Co微观组织形貌<sup>[28]</sup>

Fig.3 Microstructure of Fe-Cr-Co before and after EMS

### 1.2 增材制造

增材制造技术(AM)具有高精度、灵活的工艺流程以及强大的产品适应性等特点,能够根据用户的个性化需求调整产品的形状、尺寸与力学性能<sup>[31-34]</sup>。随着AM技术的不断发展,材料的性能越来越高,制备技术越来越完善,该技术已被广泛应用于汽车工业、医疗工业、航空航天、建筑、军事以及个性化制造等领域<sup>[35-36]</sup>。金属材料AM技术的常规能量源通常分为电子束和激光。电子束技术具有能量高、生产效率高和真空环境保护等优势。当前国内外常规的电子束熔丝设备普遍采用热阴极电子枪作为熔丝热源,而这类电子枪常处于较高的工作温度,使用寿命较短<sup>[37]</sup>。相比之下,激光技术的使用成本通常更低,且使用寿命不受自身因素影响,具有高能量密度、高加工精度、广泛的材料适用

性和灵活的使用方式,因此当前高温金属材料多用激光增材制造方式制备<sup>[38]</sup>。常见的金属激光AM制造分为激光熔化沉积(LMD)和激光粉床熔融(LPBF)。

#### 1.2.1 激光熔化沉积

激光熔化沉积工艺具有沉积速率高、热影响区小、能量沉积低以及可控性强等特点,可以代替传统加工工艺修复复杂表面结构件而不损坏底层部件。LMD制备的部件纹理紧凑,材料性能良好,通常不需热处理即可正常服役,可有效缩短加工周期<sup>[39]</sup>。DENG H等<sup>[40]</sup>依靠该工艺成形Ti-55531合金,合金在成形过程中不同阶段的过冷度不同,晶粒为柱状晶或等轴晶,见图4。柱状晶主要出现在层间和熔合线附近,这是高的温度梯度以及当前熔池对已凝固层局部重熔所引发的外延生长共同作用的结果。等轴晶粒倾向于在熔池的

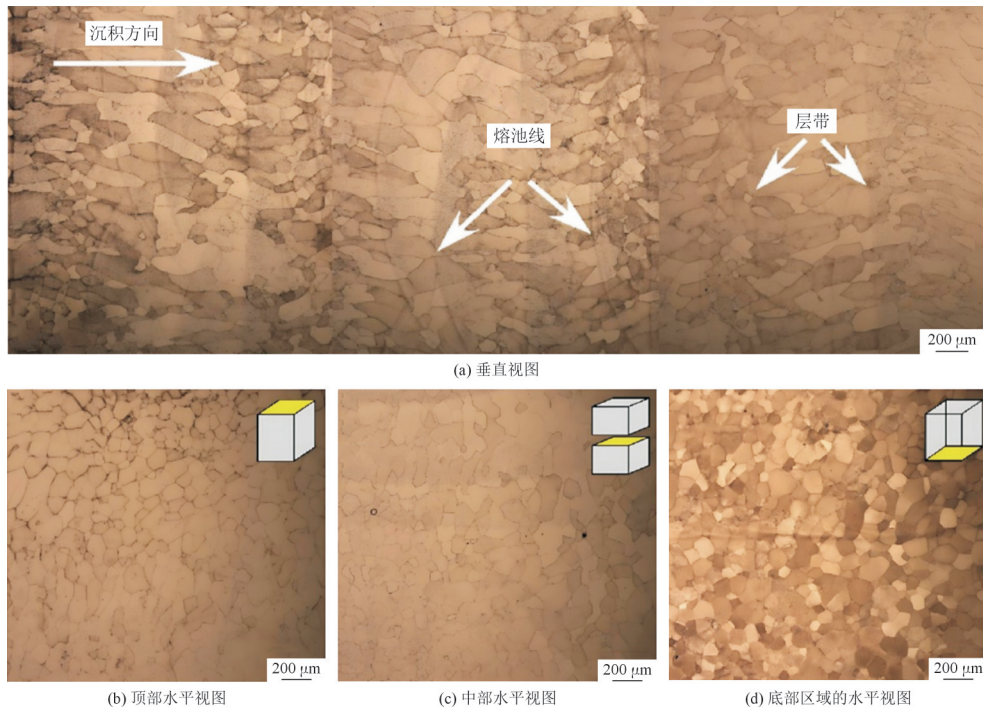


图4 沉积试样的OM图像<sup>[40]</sup>

Fig.4 OM images of as-deposited specimens<sup>[40]</sup>

中部或顶部区域形成,熔池顶部区域等轴晶粒的形成机制是熔池表面不完全熔化的粉末提供了异质形核位点,促进了等轴晶粒的形成。而熔池中部区域的等轴晶粒可能与湍流马兰戈尼对流有关,柱状晶粒的尖端或臂部会熔化为液态,成为等轴晶粒的成核点,从而诱导形核。WENG F等<sup>[41]</sup>制备的CoCrNi合金的室温抗拉强度为873.5 MPa,伸长率为44.8%。LMD工艺相比其他制备加工方式更加高效且冷却速度快,易细化合金晶粒。所制备的合金在保持良好塑性的同时,强度也得到显著提升,其强塑积高于其他工艺制备出的同种合金,见表2。

表2 不同工艺制备的CoCrNi MEA的力学性能比较<sup>[41]</sup>

Tab.2 Mechanical properties of CoCrNi MEAs prepared by different processes<sup>[41]</sup>

制备方式	硬度	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
激光增材制造	313 HV <sub>0.2</sub>	620.5	873.5	44.8
铸造	—	230	~620	~52
再结晶	—	242	727	77.3
再结晶	—	360	870	38
部分再结晶	约465 HV <sub>0.1</sub>	1 100	约1 270	23
再结晶	233 HV <sub>0.3</sub>	380	900	69
再结晶+HPTc	565 HV <sub>0.3</sub>	1 880	2 170	9
等离子烧结	195.3 HV <sub>5</sub>	352	799	53.6
机械合金化+等离子烧结	309 HV <sub>0.3</sub>	652	1 024	25.9

### 1.2.2 激光粉末床熔融

激光粉末床熔融技术依靠激光在粉末床上逐层熔化粉末实现结构件成形,其层厚通常在几十  $\mu\text{m}$  到几百  $\mu\text{m}$  之间,能够制造出具有复杂的几何形状和精细结构的零部件,并可实现传统加工方法难以制造的内部中空通道及复杂三维结构<sup>[42]</sup>,被广泛应用于制造航空航天涡轮叶片等复杂构型产品<sup>[43-44]</sup>。激光粉末床熔融技术可有效避免成分偏析,提高材料的均匀性,制备的合金普遍具有较高的电阻率,在特殊电子元件领域也有广泛应用<sup>[45]</sup>。目前,该技术已被广泛应用于镍合金、钢和钛合金等制备<sup>[46-47]</sup>。ZHANG Y L 等<sup>[48]</sup>利用该工艺制备出的 FCC 结构 CoCrFeNi/TiC 纳米复合材料见图 5。合金的微观结构呈现出典型的“鱼鳞”状,半椭圆形的熔池边界清晰可见,见图 5a。图 5b 显示出熔池中形成了胞晶、胞状柱状树枝晶和长

胞晶状的亚结构晶粒,熔池边界的晶粒尺寸较小,柱状晶分布在熔池内部。图 5c 进一步表明,柱状晶沿打印构建方向定向生长。该复合材料具有 1 015 MPa 的高抗拉强度和良好的塑性,在现有增材制造技术制备的合金中较为出色。HAN T Y 等<sup>[49]</sup>采用 LPBF 技术制备出微观结构为有序 B2 单相的 AlCrFe<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub> 合金,其抗压强度高达 1 856 MPa,显微硬度(HV)为 581,有望作为大型机械的结构材料。HUANG J 等<sup>[50]</sup>利用该技术成形高致密度的 Co<sub>42</sub>Cr<sub>20</sub>Ni<sub>30</sub>Ti<sub>4</sub>Al<sub>4</sub> 合金块体,其微观结构见图 6,可以看出,合金中的晶粒横截面为均匀的亚晶粒蜂窝状结构,纵向截面呈现为长条矩形,整体为柱状晶。合金室温抗拉强度约为 1 586 MPa,伸长率为 22.7%。得益于 LPBF 技术的冷却速度较快,导致了较大的过冷度,促使合金内部形成了非平衡态的单相固溶体。因而该合金在 873 K 下仍能保持 926 MPa 的抗拉强度。

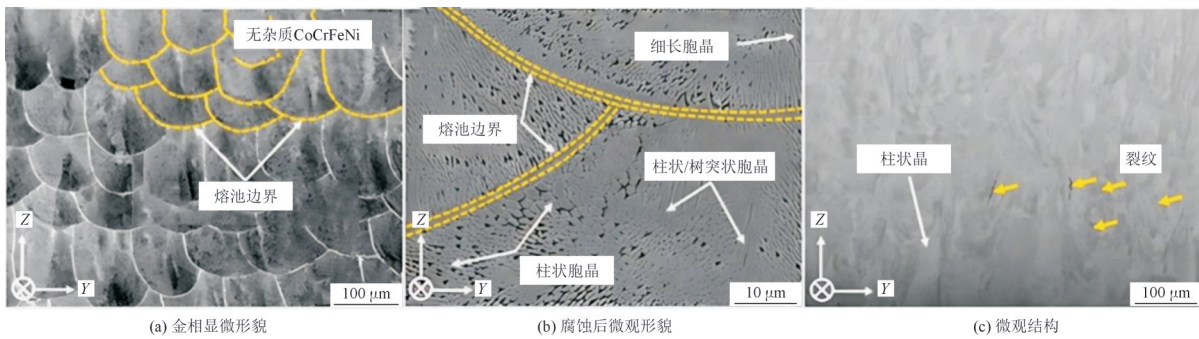


图 5 LPBF 制备 CoCrFeNi 合金的微观组织结构<sup>[48]</sup>

Fig.5 Microstructure of CoCrFeNi alloy fabricated by LPBF<sup>[48]</sup>

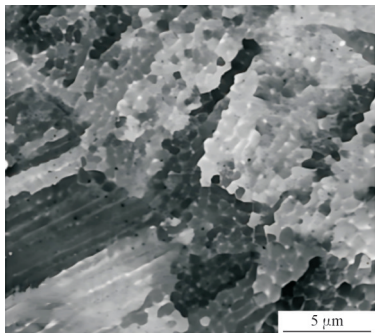


图 6 LPBF 成形 Co<sub>42</sub>Cr<sub>20</sub>Ni<sub>30</sub>Ti<sub>4</sub>Al<sub>4</sub> 合金微观组织<sup>[50]</sup>

Fig.6 Microstructure of LPBF formed Co<sub>42</sub>Cr<sub>20</sub>Ni<sub>30</sub>Ti<sub>4</sub>Al<sub>4</sub> alloy<sup>[50]</sup>

## 2 高温中熵合金成分开发现状

高温合金成分开发及其成形技术的研究和产业化已有 80 多年历史。20 世纪 40~50 年代,变形钴基和镍基高温合金成为涡轮叶片主要用材;20 世纪 50 年代中期,真空冶炼技术商业化,铸造镍基合金广泛应用;20 世纪 60 年代,精密铸造技术成熟,为复杂结构及冷却通

道提供制备方案。同时,通过添加合金元素改善了材料的组织结构,大幅提高铸造合金的高温力学性能;20 世纪 70 年代,定向凝固技术用于航空发动机叶片研发;20 世纪 90 年代后期,定向凝固柱晶和单晶高温合金理论成熟,用于重型燃气轮机动叶片研发。随着材料科学进步,高温材料研发加快,多种富 Mo、富 Nb 等合金在高温领域展现良好性能<sup>[51-52]</sup>。

富 Ni 高温中熵合金通常具有优异的力学性能、抗氧化性和高温稳定性,可与多种元素形成有形状记忆效应的合金,被广泛用于制造涡轮叶片、发动机部件和其他在极端条件下工作的关键部件。目前,国内研发用于该部件的高温合金牌号主要为 GH2984G 镍铁基合金和 GH750 镍钴基合金。GH2984G 合金具有良好的力学性能和耐蚀性能,但其在高温条件下的持久性能较低;GH750 则因为 Co 含量高,导致材料成本较高<sup>[53-54]</sup>。其他富 Ni 合金也已被证实在室温及高温环境下都有较高的抗拉强度,见图 7。

以 Ti、Ni 为主元的合金通常具有一定的形状记忆

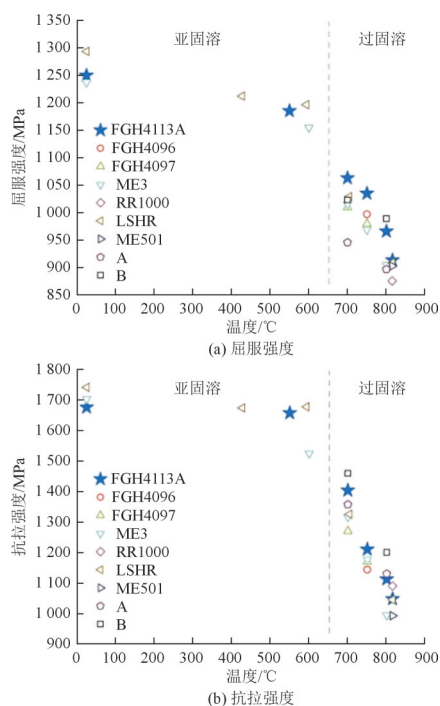
图7 富Ni合金的力学性能<sup>[55]</sup>

Fig.7 Mechanical properties of Ni-rich alloys

效应且熔点较高,合金形状在一定温度下可自动复原,适用于航空结构件。该类合金价格相对低廉,有广阔的应用前景。FIRSTOV G S等<sup>[56]</sup>研发的TiNi<sub>48.78</sub>Zr<sub>18.2</sub>合金室温抗压强度可达到1.8 GPa。丁振等<sup>[57]</sup>制备的Ti<sub>50</sub>Ni<sub>48</sub>Mo<sub>2</sub>合金在室温下有799 MPa的抗拉强度,且具有良好的形状记忆效应。

CoCrNi高温中熵合金具有优异的低温和高温性能、良好的耐腐蚀性和耐磨性,在机械制造、航空航天、化工设备等领域具有广泛的应用前景<sup>[58-60]</sup>。邓景泉等<sup>[61]</sup>采用冷坩埚磁悬浮熔炼方式制备CrCoNi合金,该合金呈单相FCC结构,在700 °C环境中可保持300 MPa的抗压强度。WANG J Y等<sup>[62]</sup>采用新型涂层方法和SPS相结合的方法制备了等质量比的CoCrNi合金,该合金室温屈服强度为352 MPa,伸长率为53.6%。添加5% (摩尔分数)的Mo元素后,合金的屈服强度提升到815 MPa,且硬度提升了一倍以上。CrNi主元合金相比CoCrNi主元合金的成本及密度更低,但仍可保持轻质、稳定、优良的高温强度等综合性能,进一步提高了市场竞争力<sup>[63]</sup>。HWANG Y J等<sup>[64]</sup>制备了轻质Fe-Cr-Ni-Al合金,发现该合金受热后易在金属表面形成致密的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜,在800 °C大气环境中的氧化质量增加仅为0.08 mg/cm<sup>2</sup>。在1 100 °C×500 h连续称重试验中,该合金的氧化质量增加为同类高温耐氧化合金中最低,且成本仅为其他合金的1/9,具有超高的经济效益。QIAO L等<sup>[65]</sup>认为CrNi合金普遍具有较低的热导率,设计出的FeCrNiAl<sub>0.5</sub>合金在1 173 K温度下的热

导率约为28 W/(m·K),略低于市面上广泛使用的GH3536镍基合金,该特性使其在需要兼顾结构强度与一定隔热性能的热端部件上具有应用潜力。GAO J B等<sup>[66]</sup>认为FeCrNi合金是下一代化石发电厂和核电站所需的高蠕变阻力材料,对该合金进行700 °C高温时效处理,发现随时效时间增加,合金的硬度先升高后降低,而蠕变应变率敏感性指数先增加后减小。时效时间为485 h时,合金硬度最高且蠕变应变率敏感性指数最低,表明其具有最佳的蠕变抗力。图8对典型富CrCoNi中熵合金的室温力学性能进行了总结,可见通过成分调控和工艺控制,可实现合金性能的宽幅调控。

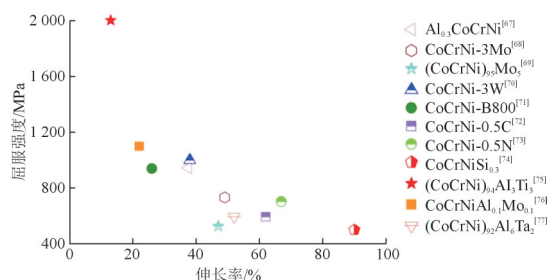
图8 富CrCoNi中熵合金室温拉伸屈服强度<sup>[67-77]</sup>

Fig.8 Tensile yield strength of CrCoNi-rich medium-entropy alloy at room temperature

富Mo高温中熵合金在高温下具有良好的热学性能(较高的电导率和较低的热膨胀系数)和力学性能,可应用于高温电子类设备<sup>[78]</sup>。W是Mo合金中最常见的超高温组元,Mo-W合金兼具W的高强度、耐高温性和Mo的耐腐蚀性和抗烧蚀性<sup>[79]</sup>,被广泛应用于高温炉、电子管等领域<sup>[80]</sup>。Mo还可与B、Si、Nb等元素结合,ITO K等<sup>[81]</sup>制备的(Mo<sub>0.5</sub>Nb<sub>0.5</sub>)-19.5Si-3B合金在1 100 °C环境下的抗压强度超过2 GPa。MoNbVTi合金室温抗压强度也超过2 GPa,极限压缩应变高达33%<sup>[82]</sup>。

富Nb高温中熵合金具有熔点高,延展性、导热性好,强度和比强度高,以及其特殊的室温韧性和在1 200 °C以上高温强度等特点,受到研究者重视。Nb的熔点显著高于Ni,密度小于其他耐火金属材料,具有抗自氧化等特点<sup>[83]</sup>,成为了替代镍基高温合金的理想选择<sup>[84]</sup>。当前,提升富Nb合金抗氧化性主要依赖于合金化改性及表面制备致密抗氧化涂层两种途径。在已验证的方法中,富Nb合金中添加Ti、Al等元素的方法兼具经济性与实用性,可使富Nb合金在高温应用时自主生成氧化物保护膜<sup>[85-86]</sup>。Nb与Ti组成的高温耐火合金通常韧性良好,已研发的TiVNbTa合金室温抗拉强度近1 100 MPa,伸长率近30%<sup>[87]</sup>。NGUYEN V T等<sup>[88]</sup>制备了等摩尔比的Ti-Zr-Nb-Ta合金,其室温压缩率为48%,约为等摩尔比Ti-Zr-Nb-Ta-Mo( $\delta=5.5\%$ )合金的4倍。Nb与Si构成的合金具有极好的高

温强度,电弧熔炼的 Nb-16Si-10Mo-15W 合金在 1 600 °C 下的抗压屈服强度达到 500 MPa<sup>[89]</sup>,可应对大部分高温结构件的承载需求。Nb-Ti 合金在室温及高温环境下的力学性能、抗腐蚀性在众多高温合金中较为突出,已在制备多种军用/民用飞机的特定结构件上取得了理想的效果<sup>[90]</sup>,有望成为解决高温工程领域世界难题的优质选择。

当前,对高温中熵合金力学性能的研究虽已取得进展,但其系统性仍有待深化,抗拉强度见图 9<sup>[91-97]</sup>。孟凡熙<sup>[93]</sup>以 Hf 作为合金性能强化剂,制备出的 Ni<sub>47.6</sub>Co<sub>30</sub>Cr<sub>9</sub>Al<sub>10</sub>Ti<sub>2</sub>Hf<sub>1</sub>C<sub>0.3</sub>B<sub>0.1</sub> 合金在室温环境中的抗拉强度达到 2 200 MPa 以上,在 800 °C 下的抗拉强度仍能保持 743 MPa,可以满足大部分高温领域的工业需求。安宁<sup>[92]</sup>制备的 (CoCrNi)<sub>95</sub>Al<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>Ta<sub>1</sub> 合金在 700 °C 环境中的抗拉强度可达 939 MPa,而经 850 °C 热暴露 500 h 后,其 700 °C 高温抗拉强度仍可达 710 MPa,证明此合金在高温环境中有良好的力学稳定性。此外,众多研究者也通过多元的强化策略,持续提升着不同成分体系中熵合金的力学性能,为高温中熵合金的成分开发及工艺窗口优化提供参考。

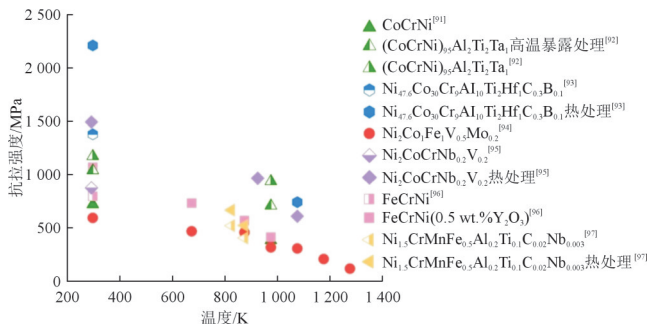


图 9 高温中熵合金在不同温度下的抗拉强度<sup>[91-97]</sup>

Fig.9 Tensile strength of high-temperature medium-entropy alloys at various temperatures

### 3 高温中熵合金性能强化方式

高温中熵合金在不同温度下均可表现出良好的力学性能,主要得益于其多种强化方式,如固溶强化、析出强化以及晶界强化等<sup>[98]</sup>。研究者通过引入强化元素、强化相等方式调节合金中的强化作用,旨在进一步提升高温中熵合金的结合性能。

#### 3.1 金属元素强化

研究表明,向合金中引入低密度金属元素 Al、Ti 可提高合金的强度及塑性。ZENG S 等<sup>[99]</sup>设计了一种高比强度的新型硬质合金 Ti<sub>3</sub>Zr<sub>1.5</sub>NbVAl<sub>x</sub>。发现随着 Al 含量(摩尔分数,下同)的增加,合金相组成由单一无序体心立方相转变为连续无序体心立方和有序 B2 相的

纳米级混合物,显著提高了强度和塑性。ZHANG Y G 等<sup>[100]</sup>将 Al 引入 ZrTiNb 固溶体调节纳米沉淀和不同的位错行为,发现合金由  $\alpha + \beta$  双相结构转变为单相  $\beta$  结构。随着 Al 含量的增加,合金晶粒尺寸先减小后增大,加入 13% 的 Al 的合金平均晶粒尺寸最小,且 Al13 合金结构中的化学短程有序区域(CSRO)含量最高,在位错运动时需要额外的应力,其抗拉强度为 1 180 MPa,较原始合金的抗拉强度提升约 620 MPa,从而实现了强度与塑性的良好匹配。LIB 等<sup>[101]</sup>构建了一系列 TiAlNbZr<sub>x</sub> 合金。结果表明,Zr 的加入导致了固溶强化。随着 Zr 含量的增加,合金中依次析出  $\alpha'$ 、 $\beta$ 、 $\alpha''$  相,合金的抗拉强度逐渐增大。GUO S L 等<sup>[102]</sup>在 NbZrTi 合金中加入 Al,合金屈服强度达到 1 130 MPa,拉伸应变提高到 14%,即使采用冷轧方法将合金轧成金属箔也不会出现裂纹。XING Z Q 等<sup>[103]</sup>探究了 Ti 对 Fe-Ni-Cr-Al 合金的影响,其中 Fe<sub>45</sub>Ni<sub>25</sub>Cr<sub>15</sub>Al<sub>10</sub>Ti<sub>5</sub> 的抗拉强度较 Fe<sub>45</sub>Ni<sub>30</sub>Cr<sub>15</sub>Al<sub>10</sub> 提高了约 750 MPa。此外还发现,当  $w(\text{Ti}) < 5\%$  时,随着 Ti 含量的增加,合金中 BCC 相的体积分数逐渐增加,且在 BCC 相中析出了有序的 B2 和 L21 相,合金的抗拉强度因沉淀强化效果的增强而提高。

加入部分金属元素还可以提升合金的高温抗氧化性能,KAI W 等<sup>[104]</sup>测量了 700~900 °C 下 FeCoNiCr 合金的抗氧化能力,发现合金高温抗氧化能力由低到高分别为 FeCoNiCrMn、FeCoNiCrSi、FeCoNiCrAl。其中,FeCoNiCrMn 合金的氧化物生成速度远大于其他 2 种合金,且这 3 种合金的高温抗氧化能力与金属氧化物的高温吉布斯自由能呈正相关(见表 3),因而 Al、Mn 被认为是提升合金高温抗氧化性的理想添加元素。

表 3 金属氧化物在 700~900 °C 间的自由能<sup>[104]</sup>

Tab.3 Gibbs free energies of metal oxides at 700~900 °C<sup>[104]</sup>

氧化物	$\Delta G_{700\text{ }^\circ\text{C}}$	$\Delta G_{800\text{ }^\circ\text{C}}$	$\Delta G_{900\text{ }^\circ\text{C}}$
FeO	-417.3	-404.8	-392.1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-378.2	-361.7	-345.2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-400.0	-385.1	-370.2
CoO	-330.8	-316.9	-303.1
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-268.0	-249.1	-230.5
NiO	-303.1	-286.0	-268.9
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-588.7	-571.9	-555.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-913.4	-891.4	-869.3
MnO	-627.6	-612.8	-597.9
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-525.4	-508.2	-490.9
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	-472.1	-455.1	-438.1
SiO <sub>2</sub>	-735.0	-717.5	-700.3

#### 3.2 非金属元素强化

合金中加入 C 可显著提升固溶强化效果,增加合

金的位错密度,同时减缓变形孪晶的形成。WU Z等<sup>[105]</sup>探究了C元素在FeNiCoCrMn合金中的作用,发现掺杂0.5%的C元素后,合金的室温抗拉强度提高了135 MPa。STEPANOV N D等<sup>[106]</sup>在CoCrFeNiMn合金中添加1%的C,显著提升了合金内部的堆垛层错,使晶格位错之间的相互作用增大,提高位错滑移所需的应力,从而激活机械孪晶,使合金的室温强度增大了300 MPa。该合金经700~1100℃高温退火后,屈服强度仍有720 MPa,抗拉强度为980 MPa,这在具有重结晶组织的近单相面心立方结构合金中,力学性能尤为突出。KIM Y K等<sup>[107]</sup>在CrMnFeCoNi合金中加入微量C元素,发现加入1.5%的C的合金在室温下的抗拉强度较0.5%的C合金高约300 MPa。CrMnFeCoNi合金中的C平衡溶解度约为0.1%,C可与Cr形成Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>纳米沉淀物分布在晶界处,阻碍位错运动,大幅提升合金的强度。Ti等元素可与C、N组成Ti(C,N)等陶瓷颗粒,具有硬度高、化学稳定性好、热学性能好以及耐磨性好等特点。其中Ti(C,N)在室温下抗弯强度为1488 MPa,硬度(HV)为1939,在1000℃下仍然能保持抗弯强度为826 MPa和硬度(HV)为894<sup>[108]</sup>,是高温合金强化的理想组元。由于Ti在高温环境中易与C、N等元素结合形成固溶相,因而在高温Ti合金的制备过程中,可向其添加C、N、O等非金属元素,实现强化效果。

### 3.3 纳米强化相强化

纳米颗粒在合金中的强化机理主要为析出强化、弥散强化,可阻碍位错滑移,提升合金强度。常用的纳米颗粒通常为金属氧化物或金属碳化物,其中纳米Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的化学性质相比其他金属氧化物更为稳定,在高温环境下不易分解,可有效避免在基体中引入不稳定杂质且对材料的力学性能有一定的提升作用。PANICHKIN A V等<sup>[25]</sup>在纯Ti中加入少量的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,使合金硬度提高了20%。YE F X等<sup>[109]</sup>在15.9Cr-1.9B-4.55Si-0.78C-5.0Fe-Ni合金中添加不同含量(质量分数)的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,发现合金在加入质量分数为1%的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>时硬度、耐磨性与抗氧化性提高最大。随着Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的增加,富Ni合金中花状簇型硼铬化合物的尺寸减小,分布更加均匀。Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的自由能和熔点均较高,不易分解,并且扩散速率和相界面能较低,这在成形过程中促进了沉淀物的分散和细化,使涂层的硬度通过扩散强化提高。因此,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的小于1.0%时,涂层性能随Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量增加而变强,但当Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量超过1.0%时,工艺性能恶化,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>颗粒导致金属缺陷增加,硬度值降低。此外,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>易在合金中形成稳定的

氧化物薄膜,有效阻止氧在合金内部扩散,从而减缓合金的氧化速率<sup>[110]</sup>。TALEKAR V R等<sup>[111]</sup>分别探究了质量分数为1%的Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对W-10Ni合金高温力学性能及抗氧化性能的影响,依次将添加金属氧化物的合金标记为A、B、C合金。合金相对烧结密度及高温抗氧化能力见图10,可见1500℃烧结制备的W-10Ni-1Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金致密度最高,且在1000℃连续氧化过程中,氧化膜增长速率最小,证实Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>促进了NiWO<sub>4</sub>和Y<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>等氧化物的形成,在合金表面形成了一层致密的保护膜,有效抑制WO<sub>3</sub>的挥发和进一步氧化。

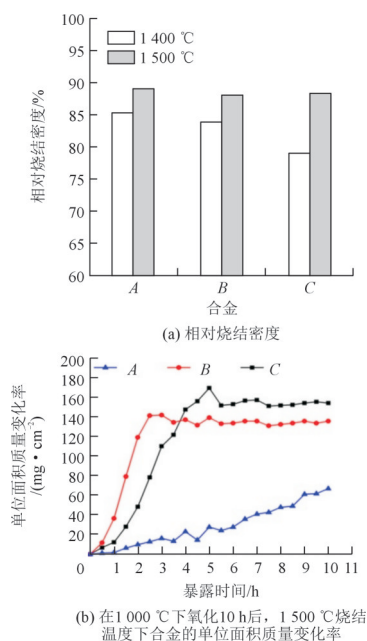


图10 W-10Ni合金的相对烧结密度及抗氧化能力<sup>[111]</sup>

Fig.10 Relative sintered density and oxidation resistance of W-10Ni alloy

TiC纳米颗粒具有极高的硬度和强度,且制备成本低,在复合材料中较易分散均匀,适用于大规模工业生产。QIU F等<sup>[112]</sup>在45钢中加入TiC纳米颗粒,凝固过程中TiC颗粒在奥氏体形核过程中作为形核位点,提高了形核速率。同时,TiC吸附在奥氏体晶界处,抑制奥氏体的生长,从而增加了初级奥氏体的数量,将平均晶粒尺寸分别从14.75 μm减小到8.77~9.51 μm。硬质的纳米TiC颗粒增加了位错数量,形成加工硬化,并作用于晶界形成分散强化,固定并阻碍裂纹和位错的发展,其强化机理见图11。此合金的屈服强度和冲击韧度分别达到624 MPa和50.21 J/cm<sup>2</sup>,较普通45钢提升了19%和38%。SHU C等<sup>[113]</sup>采用球磨法在IN738LC合金颗粒中混入TiC纳米颗粒,以激光粉末床熔融技术制备合金块体,测得加入TiC的IN738LC合金的室温拉伸屈服强度较未加入的提升了约40%。

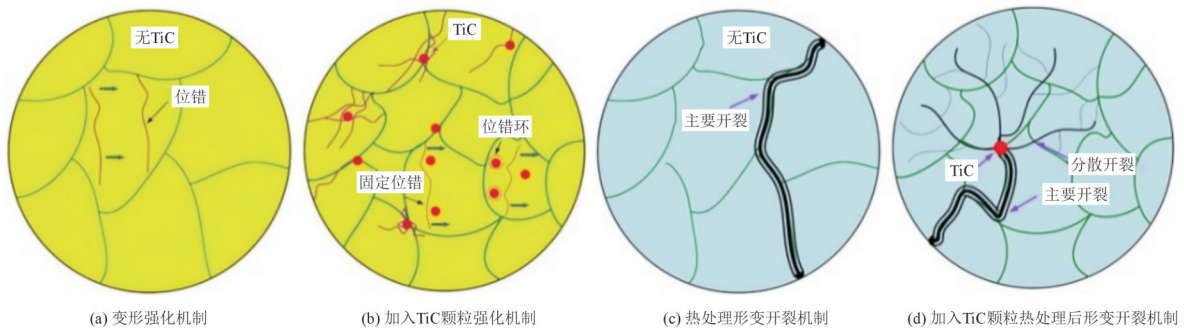


图 11 45 钢经纳米 TiC 颗粒增强及热处理后的强化机理示意图<sup>[112]</sup>

Fig.11 Schematic diagram of strengthening mechanism in TiC-reinforced 45 steel

TiC 纳米颗粒倾向于在 IN738LC 合金的晶界处聚集，从而阻碍晶界迁移过程及晶间的元素扩散，抑制晶粒生长。晶界的 TiC 还可阻碍位错运动，位错运动时纳米颗粒周围形成位错环所需的能量比在无障碍晶格中移动需要更多的能量<sup>[114]</sup>，因此引入 TiC 纳米颗粒提高了合金塑性变形所需的能量阈值，提升强度。

### 3.4 热处理强化

热处理通过元素扩散、相变和再结晶等过程，消除成分偏析，实现组织均匀化。赵燕春等<sup>[115]</sup>分别对  $Fe_{63.3}Mn_{14}Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8}$  及  $Fe_{54.3}Mn_{23}Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8}$  两种铸态合金进行了 1 100 °C 热处理。发现  $Fe_{63.3}Mn_{14}Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8}$  合金热处理后晶粒细化明显且晶粒尺寸差异减小，改善了铸态合金成分偏析及晶粒尺寸差异大等缺点。 $Fe_{54.3}Mn_{23}Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8}$  合金热处理后，其板条状马氏体消失，晶粒尺寸趋于均匀。在此加工工艺中，热处理使合金中高熔点 C 元素均匀分布，奥氏体相的尺寸更稳定，组织、成分分布更加均匀，铸造缺陷和残余应力基本消失，断裂强度和塑性均提高。两种合金的最合适保温时间均为 20 min，其断裂强度和塑性的提升率分别为 28.6%、46.7% 及 4.2%、55.5%。PARK S Y 等<sup>[116]</sup>对 NiCoCr-0.75C 合金进行 700 °C × 1 h 的热处理，发现合金的屈服强度从 823.2 MPa 提升至 872.7 MPa，抗拉强度从 1.05 GPa 提升至 1.15 GPa。热处理后，合金的位错密度从  $1.16 \times 10^{14}/m^2$  减小到  $0.63 \times 10^{14}/m^2$ ，合金晶间的富 Cr  $M_{23}C_6$  纳米析出相显著增多。合金拉伸变形的微观结构变化见图 12a~图 12d，在初始变形状态下，未热处理试样中的变形主要表现为孪晶，而热处理试样则为层错。当试样应变达到 20% 时，未热处理试样中变形孪晶更加明显，而热处理试样的局部应变区域即使高度变形，也没有出现任何变形孪晶。热处理过程中合金的显微组织演变示意图见图 12e，纳米级沉淀在晶胞边界处分离出高密度位错，而热处理过程使得这些位错逐渐减少，沉淀数量增加，形状也从球形转变为稳定的三角状。

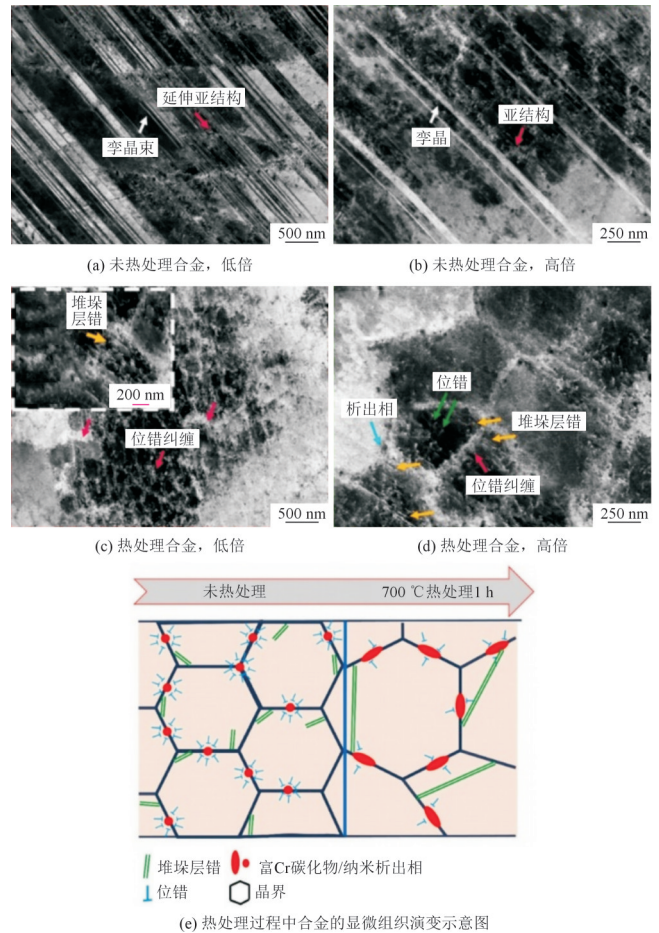


图 12 NiCoCr-0.75C 合金的显微组织及演变示意图<sup>[116]</sup>

Fig.12 Schematic diagram of microstructure and evolution of NiCoCr-0.75C alloy<sup>[116]</sup>

## 4 总结与展望

系统探讨了高温中熵合金的新型制备工艺、成分设计、性能强化方式及其在高温工程领域中的应用前景。目前，研究者已通过粉末冶金、增材制造等多种先进制备工艺制备出性能良好的高温中熵合金，这些制备方式有效抑制了传统制备工艺成形高熔点合金时易出现的结构缺陷。其中，粉末冶金等烧结工艺具有成

形速度快等特点,大大提升了合金成形效率;增材制造类工艺成形自由度高,可直接成形铸造工艺无法制备的复杂结构件。在已有80多年发展历史的传统高温合金基础上,CoCrNi基、Mo基、Nb基合金都已展现出良好的研发潜力。当前已研制出的Nb-16Si-10Mo-15W合金在1600℃环境下的抗压屈服强度可达到500MPa,为高温中熵合金组元设计提供了宝贵的思路。此外,通过在组元设计中添加强化相或结合后续热处理,可进一步优化合金性能,为性能调控提供了更多有效途径。尽管高温中熵合金已得到广泛应用,但其研究发展仍面临一些挑战。

(1)合金的成分设计仍需进一步优化,需尽可能提升合金的综合力学性能及耐腐蚀性能,降低合金成本,便于工业化发展。

(2)制备工艺的创新和优化是提高合金性能的关键,研究者需进一步探索更高效的制备技术,保证制备工艺的稳定性,避免制备工艺自身的随机性影响合金成品的性能。

(3)合金的室温、高温性能及长期服役过程中的物理、化学稳定性仍需更多的试验验证,当前研究者对合金高温性能的研究还有待深入,需要更多的试验来证明合金性能可达到航空航天、能源等领域的严苛服役要求。当前,随着机器学习等计算技术的迅猛发展,材料科学与信息科学的交叉融合已成为主流趋势。利用计算模拟与机器学习等方法,有望加速新材料的成分筛选与性能优化进程,为高温中熵合金的发展提供强大的理论工具。

#### 参 考 文 献

- [1] 彭建强,杨功显.工业燃气轮机透平叶片用铸造高温合金材料研究[J].东方汽轮机,2024(3):49-56.
- [2] 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.
- [3] 杨宏冉,邓元松,陈美欣,等.新型轻质Mg-Li-Zn中熵合金的设计、组织与腐蚀行为[J].特种铸造及有色合金,2025,45(3):358-364.
- [4] 冯月明,姚百胜,毕台飞,等.中熵合金力学性能研究进展[J].焊管,2021,44(1):25-31.
- [5] OTTO F, YANG Y, BEI H, et al. Relative effects of enthalpy and entropy on the phase stability of equiatomic high-entropy alloys [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(7): 2628-2638.
- [6] XU D F, WANG M L, LI T X, et al. A critical review of the mechanical properties of CoCrNi-based medium-entropy alloys [J]. *Microstructures*, 2022, 2(1): 32.
- [7] WANG G T, LUO S Y, GUO Y S, et al. Investigating the correlation between mechanical properties and gradient microstructures in laser shock peened CrCoNi alloy [J]. *International Journal of Plasticity*, 2025, 189: 104331.
- [8] OUYANG G Y, SINGH P, SU R R, et al. Design of refractory multi-principal-element alloys for high-temperature applications [J]. *NPJ Computational Materials*, 2023, 9(1): 141.
- [9] 杨浩,王方军,李采,等.镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J].特种钢,2023,44(3):1-9.
- [10] 任忠鸣,韩东宇,玄伟东,等.燃气轮机叶片制备技术研究进展[J].上海大学学报(自然科学版),2022,28(5):722-747.
- [11] HAN Z H, GUO C H, HUANG C H, et al. Corrosion resistant body-centered cubic VNbTa refractory medium-entropy alloy [J]. *Corrosion Science*, 2024, 229: 111885.
- [12] VIDA Á, CHINH N Q, LENDVAI J, et al. Microstructures and transition from brittle to ductile behavior of NiFeCrMoW high entropy alloys [J]. *Materials Letters*, 2017, 195: 14-17.
- [13] ARAB A, GUO Y, DILSHAD I S Z, et al. Effect of strain rate and temperature on deformation and recrystallization behaviour of BCC structure AlCoCrFeNi high entropy alloy [J]. *Intermetallics*, 2022, 147: 107601.
- [14] 李天昕,王书道,卢一平,等.高熵合金材料研究进展与展望[J].中国工程科学,2023,25(3):170-181.
- [15] 杨宇承,潘宇,路新,等.粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展[J].粉末冶金技术,2020,38(2):150-158.
- [16] 郝旭,张德印,贾宝瑞,等.粉末冶金法制备高速钢研究进展[J].粉末冶金技术,2024,42(6):665-673.
- [17] MORAVCIK I, CIZEK J, KOVACOVA Z, et al. Mechanical and microstructural characterization of powder metallurgy CoCrNi medium entropy alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2017, A701: 370-380.
- [18] LONG Y, YANG J R, PENG H Y, et al. Combination of enhanced strength and sufficient tensile ductility in a sintered ultrafine-grained CoFeMnNi medium-entropy alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A831: 142175.
- [19] MA P C, PENG Y R, HU J, et al. Microstructure, mechanical and electrochemical performance of spark plasma sintered CoCrNi medium-entropy alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1007: 176321.
- [20] 车洪艳,王铁军,秦巍,等.热等静压技术在金属材料加工领域的应用及发展趋势[J].粉末冶金工业,2022,32(4):1-7.
- [21] ATKINSON H V, DAVIES S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview [J]. *Metall.Mater.Trans.*, 2000, A31(12):2981-3000.
- [22] CAI C, SONG B, XUE P J, et al. Effect of hot isostatic pressing procedure on performance of Ti-6Al-4V: Surface qualities, microstructure and mechanical properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 686: 55-63.
- [23] 吴杰,朱旭晖,尹一峰,等. Ti<sub>2</sub>AlNb合金粉末热等静压成形的组织和性能[J].航空制造技术,2024,67(17):50-58.
- [24] 叶文成,谷宇,王岩. Inconel 601镍基高温合金真空感应熔炼脱氧工艺研究[J].铸造,2024,73(11):1529-1533.
- [25] PANICHKIN A V, IMANBAYEVA A B, IMBAROVA A T. Titanium melt interaction with the refractory oxides of some metals [J]. *Kompleks Ispol Miner. Syra*, 2019(2): 51-60.
- [26] ASAHINA M, HARIMA N, TAKAKI S, et al. High-

- temperature mechanical properties of high-purity 70 Cr-Fe alloy [J]. *Phys Status Solidi. Res.*, 2002, A189(1): 87-96.
- [27] CHANG J H, LIU T H, CHOU J M, et al. Microstructural and microhardness characteristics of induction melted nickel-based alloys [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2010, 120(2-3): 702-708.
- [28] ZHANG L, HOU Y H, GUO X, et al. Effect of electromagnetic stirring on the microstructure and properties of Fe-Cr-Co steel [J]. *Materials*, 2018, 11(8): 1 437-1 448.
- [29] 卢百平, 岑仕美, 徐辉. 制备工艺对Cu-11Ni-2W合金组织和导热性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2012, 41(3): 19-21.
- [30] WANG G Q, DING H, DING H Y, et al. Effect of melting method on the bio-corrosion resistance of Mg<sub>67</sub>Zn<sub>28</sub>Ca<sub>5</sub> cast magnesium alloy in simulated body fluid [J]. *Mater Res Express*, 2020, 7(1): 11-22.
- [31] JAVAID M, HALEEM A. Current status and challenges of Additive manufacturing in orthopaedics: An overview [J]. *Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma*, 2019, 10(2): 380-386.
- [32] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. *Composites*, 2018, B143: 172-196.
- [33] CHEN L, HE Y, YANG Y X, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 89(9-12): 3 651-3 660.
- [34] SAHEB S H, DURGAM V K, CHANDRASHEKHAR A. A review on metal powders in additive manufacturing [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Material Science Applications (ICIMA). Amer Inst Physics: Melville, 2020.
- [35] 谢隋杰, 董定平, 蔡小叶, 等. 增材制造在航空装备保障领域的应用研究综述 [J]. *安徽科技*, 2024(9): 46-50.
- [36] 魏龙翔. 基于增材制造技术的汽车复杂零部件快速成形与性能分析 [J]. *汽车维修技师*, 2024(18): 113-114.
- [37] 王明志, 胡嘉南, 辛社伟, 等. 电子束熔丝增材制造 Ti-6Al-4V 钛合金研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2024, 43(10): 912-923.
- [38] 刘冠, 赵凯, 刘德福, 等. 激光增材制造中裂纹萌生机理及抑制方法研究 [J]. *铸造技术*, 2024, 45(9): 803-821.
- [39] GONG G H, YE J J, CHI Y M, et al. Research status of laser additive manufacturing for metal: A review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 855-884.
- [40] DENG H, CHEN L Q, QIU W B, et al. Microstructure and mechanical properties of as-deposited and heat treated Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr-1Zr (Ti-55531) alloy fabricated by laser melting deposition [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810: 10-19.
- [41] WENG F, CHEW Y X, ZHU Z G, et al. Excellent combination of strength and ductility of CoCrNi medium entropy alloy fabricated by laser aided additive manufacturing [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101 202.
- [42] TSHEPHE T S, AKINWAMIDE S O, OLEVSKY E, et al. Additive manufacturing of titanium-based alloys-A review of methods, properties, challenges, and prospects [J]. *Heliyon*, 2022, 8(3): 20-39.
- [43] FU A, CAO Y K, ZHOU Z Y, et al. Corrosion behavior of FeCrNi medium-entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108 558.
- [44] 李明川, 马瑞, 常帅, 等. LPBF 制备镍基高温合金组织及显微硬度调控能力 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(12): 20-27.
- [45] CAO Z R, ZHANG P C, AN B L, et al. In situ phase engineering during additive manufacturing enables high-performance soft-magnetic medium-entropy alloys [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 9 747.
- [46] SONG B, ZHAO X, LI S, et al. Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2015, 10(2): 111-125.
- [47] YANG S Z, HAN Q Q, YIN Y Y, et al. Effects of micrometer-sized TiB<sub>2</sub> on crack mitigation, mechanical and electrochemical performance of a Ni-based alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 12-23.
- [48] ZHANG Y L, FANG Y J, KIM M K, et al. In-situ TiCxNy nanoparticle reinforced crack-free CoCrFeNi medium-entropy alloy matrix nanocomposites with high strength and ductility via laser powder bed fusion [J]. *Composites*, 2024, B273: 111 237.
- [49] HAN T Y, LIU Y, YANG D N, et al. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of AlCrFe<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub> medium entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion additive manufacturing [J]. *Materials Science and Engineering*, 2022, A839: 142 868.
- [50] HUANG J, LI W P, YANG T, et al. An additively manufactured precipitation hardening medium entropy alloy with excellent strength-ductility synergy over a wide temperature range [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2024, 197: 247-264.
- [51] 文新理, 章清泉, 李慧威, 等. 面向国家重大需求的高温合金材料-装备-技术创新及应用[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙. 江西赣州, 2024.
- [52] 张旭明, 马庆爽, 张海莲, 等. 新型钴基高温合金成分设计的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2024, 43(3): 230-237.
- [53] 浦益龙, 李亚峰, 王植栋. 一种新型 Ni-Fe 基高温合金的冷变形及再结晶退火工艺研究 [J]. *中国设备工程*, 2024(18): 70-74.
- [54] 朱强, 张自昂, 张林福, 等. 一种镍钴基高温合金热变形行为研究 [J]. *锻压技术*, 2024, 49(7): 57-63.
- [55] 马向东, 程俊义, 龙安平, 等. 新型镍基粉末高温合金的微观组织和力学性能 [J]. *粉末冶金技术*, 2023, 41(5): 434-441.
- [56] FIRSTOV G S, VAN HUMBEECK J, KOVAL Y N. Comparison of high temperature shape memory behaviour for ZrCu-based, Ti-Ni-Zr and Ti-Ni-Hf alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(2): 243-248.
- [57] 丁振, 刘福顺, 李岩, 等. TiNiMo 形状记忆合金的相变、形状记忆效应与力学性能研究 [J]. *航空学报*, 2004(6): 611-614.
- [58] 刘冉, 党鲜婷, 彭雅婷. CoCrNi 基中熵合金研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2023, 52(4): 12-17.
- [59] NIU X Y, ZHOU Y F, ZHANG T, et al. Atomic insight into residual stress and microstructure evolution of amorphous carbon heterostructured films induced by multi-stage phase transformation of high-entropy alloys [J]. *Surface Science and Technology*, 2024, 2(1): 23-35.
- [60] HE H, WANG H Y, QI J Y, et al. Review on the preparation methods and strengthening mechanisms of medium-entropy alloys with CoCrNi as the main focus [J]. *Journal of Materials Research*

- and Technology, 2023, 27: 6 275-6 307.
- [61] 邓景泉, 孟亚兴, 郭勇. 冷坩埚磁悬浮熔炼 CrCoNi 中熵合金的组织与性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2020, 38(4): 664-668.
- [62] WANG J Y, YANG H L, HUANG H, et al. In-situ Mo nanoparticles strengthened CoCrNi medium entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 798: 576-586.
- [63] LU W J, WANG Y F, LUO X, et al. A L12 precipitation strengthened Co-free medium-entropy alloy with superior high-temperature performance [J]. Intermetallics, 2023, 162: 108 031.
- [64] HWANG Y J, KIM K S, NA Y S, et al. High-temperature oxidation properties of economical and lightweight Fe-Cr-Ni-Al medium-entropy alloy [J]. Corrosion Science, 2023, 219: 12-23.
- [65] QIAO L, BAO A, WANG Y, et al. Thermophysical properties and high temperature oxidation behavior of FeCrNiAl<sub>0.5</sub> multi-component alloys [J]. Intermetallics, 2020, 126: 106 899.
- [66] GAO J B, XU Z L, FANG X D, et al. Enhancing creep resistance of aged Fe-Cr-Ni medium-entropy alloy via nano-sized Cu-rich and NbC precipitates investigated by nanoindentation [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 1 860-1 872.
- [67] SATHIYAMOORTHY P, PARK J M, MOON J, et al. Achieving high strength and high ductility in Al<sub>0.3</sub>CoCrNi medium-entropy alloy through multi-phase hierarchical microstructure [J]. Materialia, 2019, 8: 100 442.
- [68] HU G W, ZENG L C, DU H, et al. Tailoring grain growth and solid solution strengthening of single-phase CrCoNi medium-entropy alloys by solute selection [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 54: 196-205.
- [69] CHANG R B, FANG W, YAN J H, et al. Microstructure and mechanical properties of CoCrNi-Mo medium entropy alloys: Experiments and first-principle calculations [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 62: 25-33.
- [70] CHEN Y J, FANG Y, FU X Q, et al. Origin of strong solid solution strengthening in the CrCoNi-W medium entropy alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 73: 101-107.
- [71] SHI Y J, WANG Y D, LI S L, et al. Mechanical behavior in boron-microalloyed CoCrNi medium-entropy alloy studied by in situ high-energy X-ray diffraction [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A788: 139 600.
- [72] MORAVCIK I, HORNÍK V, MINÁRIK P, et al. Interstitial doping enhances the strength-ductility synergy in a CoCrNi medium entropy alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A781: 139 242.
- [73] MORAVCIK I, HADRABA H, LI L, et al. Yield strength increase of a CoCrNi medium entropy alloy by interstitial nitrogen doping at maintained ductility [J]. Scripta Materialia, 2020, 178: 391-397.
- [74] CHANG H, ZHANG T W, MA S G, et al. Novel Si-added CrCoNi medium entropy alloys achieving the breakthrough of strength-ductility trade-off [J]. Materials & Design, 2021, 197: 109 202.
- [75] DU X H, LI W P, CHANG H T, et al. Dual heterogeneous structures lead to ultrahigh strength and uniform ductility in a Co-Cr-Ni medium-entropy alloy [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 2 390-2 396.
- [76] LIU X S, ZHANG M D, MA Y M, et al. Achieving ultrahigh strength in CoCrNi-based medium-entropy alloys with synergistic strengthening effect [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A776: 139 028.
- [77] ZHANG D D, WANG H, ZHANG J Y, et al. Achieving excellent strength-ductility synergy in twinned NiCoCr medium-entropy alloy via Al/Ta Co-doping [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 87: 184-195.
- [78] SINGH P, SHARMA A, SMIRNOV A V, et al. Design of high-strength refractory complex solid-solution alloys [J]. NPJ Computational Materials, 2018, 4(1): 2-9.
- [79] 翟东, 韦昭, 冯志芳, 等. 铜钨合金高温高压性质的第一性原理研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(20): 269-276.
- [80] 郭雪琪, 申坤瑞, 郭鑫晴. 高钨含量钨钼合金板组织与性能研究 [J]. 中国铝业, 2024, 48(4): 48-53.
- [81] ITO K, KUMAGAI M, HAYASHI T, et al. Room temperature fracture toughness and high temperature strength of T2/Moss and (Mo, Nb) ss/T1/T2 eutectic alloys in the Mo-Si-B system [J]. Scripta Materialia, 2003, 49(4): 285-290.
- [82] MENG G, GAO R L, LIU F H, et al. MoNbVTi and MoNb-VTiHf multicomponent refractory alloys—Compositional modulated mechanical properties investigating [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 6-11.
- [83] TANG X H, ZHAO G, LIU J, et al. High-temperature antioxidant silicate coating of low-density Nb-Ti-Al alloy: A review [J]. High Temperature Materials and Processes, 2024, 43(1): 10-19.
- [84] TSAKIROPOULOS P. Alloys for application at ultra-high temperatures: Nb-silicide in situ composites [J]. Progress in Materials Science, 2022, 123: 42-101.
- [85] 赵群, 于永泗. 铌基合金的抗高温氧化性研究 [J]. 材料导报, 2003(2): 29-31.
- [86] JOSHI K, KUMAR P. Strength behavior of niobium-based refractory systems [J]. JOM, 2024, 76(11): 6 277-6 301.
- [87] 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, 2023, 67(1): 311-320.
- [88] NGUYEN V T, QIAN M, SHI Z, et al. A novel quaternary equiatomic Ti-Zr-Nb-Ta medium entropy alloy (MEA) [J]. Intermetallics, 2018, 101: 39-43.
- [89] BEHRANI V, THOM A J, KRAMER M J, et al. Microstructure and oxidation behavior of Nb-Mo-Si-B alloys [J]. Intermetallics, 2006, 14(1): 24-32.
- [90] 陈玮, 刘运玺, 李志强. 高强 $\beta$ 钛合金的研究现状与发展趋势 [J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 63-76.
- [91] AN N, SUN Y A, WU Y D, et al. High temperature strengthening via nanoscale precipitation in wrought CoCrNi-based medium-entropy alloys [J]. Mater. Sci. Eng., 2020, A798: 9-17.
- [92] 安宁. 沉淀强化 CoCrNi 系高温中熵合金微观组织演变及力学行为研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2024.
- [93] 孟凡熙. 析出强化 NiCo 基中熵合金的室温及高温力学性能研究 [D]. 河北秦皇岛: 燕山大学, 2024.
- [94] JIANG W, YUAN S Y, CAO Y, et al. Mechanical properties and deformation mechanisms of a Ni<sub>2</sub>Co<sub>1</sub>Fe<sub>1</sub>V<sub>0.5</sub>Mo<sub>0.2</sub> medium-entropy alloy at elevated temperatures [J]. Acta Materialia, 2021, 213:

- 116 982.
- [95] WANG F P, HUANG F, GUO Y X, et al. Strengthening and deformation mechanisms of laser additively manufactured  $\text{Ni}_2\text{CoCrNb}_{0.2}\text{V}_{0.2}$  medium-entropy alloy: Cryogenic to elevated temperatures [J]. Additive Manufacturing, 2024, 93: 104 444
- [96] WANG J, LIU B, ZHOU H, et al. Additive manufactured oxide-dispersion strengthened FeCrNi medium entropy alloy with superior mechanical properties [J]. Intermetallics, 2024, 175: 108 532.
- [97] 王方圆, 甘章华, 邱鹏云, 等. 固溶时效处理对 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrMn-Fe}_{0.5}\text{Al}_{0.2}\text{Ti}_{0.1}\text{C}_{0.02}\text{Nb}_{0.003}$ 高熵合金组织及高温拉伸性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2025, 54(7): 35-39.
- [98] 杨素媛, 周朗, 马兆龙, 等. 高熵高温合金的研究进展 [J]. 金属功能材料, 2025, 32(3): 1-7.
- [99] ZENG S, ZHOU Y K, LI H, et al. Microstructure and mechanical properties of lightweight  $\text{Ti}_3\text{Zr}_{1.5}\text{NbVAI}_x$  ( $x= 0, 0.25, 0.5$  and  $0.75$ ) refractory complex concentrated alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 130: 64-74.
- [100] ZHANG Y G, BU Z Q, YAO T T, et al. Novel BCC Ti-Al-Nb-Zr medium-entropy alloys with ultrahigh specific strength and ductility [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 936: 7-13.
- [101] LI B, JI P F, CHEN B H, et al. The effect of Zr addition on the microstructure evolution and mechanical properties of hot-rolled TiAlNbZr alloy [J]. Mater. Sci. Eng., 2021, A828: 13-25.
- [102] GUO S L, ZHANG W, YAN X H, et al. Developing novel ultrathin refractory medium-entropy foils with excellent strength-ductility synergy [J]. Rare Metals, 2024: 12-23.
- [103] XING Z Q, PANG J Y, ZHANG H W, et al. Optimizing the microstructure and mechanical performance of Fe-Ni-Cr-Al high entropy alloys via Ti addition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 943: 169 149.
- [104] KAI W, LI C C, CHENG F P, et al. Air-oxidation of FeCoNiCr-based quinary high-entropy alloys at 700-900 °C [J]. Corrosion Science, 2017, 121: 116-125.
- [105] WU Z, PARISH C M, BEI H. Nano-twin mediated plasticity in carbon-containing FeNiCoCrMn high entropy alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 815-822.
- [106] STEPANOV N D, SHAYSULTANOV D G, CHERNICHENKO R S, et al. Effect of thermomechanical processing on microstructure and mechanical properties of the carbon-containing CoCrFeNiMn high entropy alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 693: 394-405.
- [107] KIM Y K, LEE K A. Influence of carbon contents on the cryogenic mechanical properties of precipitation-hardened CrMnFeCoNi high-entropy alloys manufactured by laser powder bed fusion [J]. Materials Science and Engineering, 2023, A873: 145 042.
- [108] FANG Y H, CHEN N, DU G P, et al. High-temperature oxidation resistance, mechanical and wear resistance properties of Ti(C, N)-based cermets with  $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$  high-entropy alloy as a metal binder [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 10.
- [109] YE F X, JIAO Z P, ZHAO L Y. Effect of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  addition on the microstructure and properties of Ni60 additives by micro-plasma cladding [J]. Mater Res Express, 2019, 6(2): 13-25.
- [110] WANG Z P, SHEN Z, ZHAO Y H, et al. Insights into the design of oxidation-resistant Mg alloy by alloying with rare-earth elements [J]. Materials Today Advances, 2023, 20: 100 446.
- [111] TALEKAR V R, PATRA A, SAHOO S K. Oxidation behavior of oxide dispersion-strengthened W-Ni alloys [J]. Oxid. Met., 2020, 93(1-2): 17-28.
- [112] QIU F, ZHANG H, LI C L, et al. Simultaneously enhanced strength and toughness of cast medium carbon steels matrix composites by trace nano-sized TiC particles [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A819: 141 485.
- [113] SHU C, CHEN S Y, ZHENG Z Y, et al. Fabrication and strengthening mechanism of crack-free nano-TiC reinforced IN738LC with enhanced mechanical properties by laser powder bed fusion [J]. J. Mater. Res. Technol., 2023, 27: 3 835-3 848.
- [114] COAKLEY J, LASS E A, MA D, et al. Lattice parameter misfit evolution during creep of a cobalt-based superalloy single crystal with cuboidal and rafted gamma-prime microstructures [J]. Acta Materialia, 2017, 136: 118-125.
- [115] 赵燕春, 李暑, 李春玲, 等. 热处理对铁基中熵合金微观结构及力学性能的影响 [J]. 材料导报, 2022, 36(1): 121-125.
- [116] PARK S Y, AHN J E, KIM Y K, et al. Substructure boundary's enhancing strain hardening ability in additively manufactured 0.75C doping NiCoCr medium entropy alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 1 087-1 096.

(编辑:刘晨辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵,文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造  
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界  
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂  
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志  
(文章动态时刻关注)