

# 热处理对高熵合金组织及性能的影响研究进展

谭 义

山东同新检测工程有限公司 山东 淄博 255088

**摘要:** 高熵合金凭借多主元、高混合熵特性,具备优异力学与耐腐蚀性能,在极端环境装备领域前景广阔。但铸态合金存在成分偏析、晶粒粗大等问题,制约性能发挥。热处理作为调控材料组织与性能的关键技术,能通过改变原子扩散、相转变及析出相特征,精准调控微观结构。本文系统梳理热处理对高熵合金相结构、晶粒及析出相的影响规律,分析其对性能的作用机制,总结性能演变特征,并探讨精准化、智能化发展趋势,为工程应用提供理论参考。

**关键词:** 高熵合金; 热处理; 微观组织; 力学性能; 耐腐蚀性

引言: 高熵合金的诞生颠覆了传统合金的设计思路,其独特的多元体系赋予材料一系列优异特性,成为材料科学领域的研究热点。当前学界对热处理的研究虽已取得一定进展,但缺乏对工艺-组织-性能关联的系统梳理。本文以此为切入点,全面剖析热处理的调控作用,为高熵合金的产业化发展提供有力支撑。

## 1 热处理在高熵合金开发中的重要性

高熵合金凭借“高熵效应”“迟缓扩散效应”等独特机制,突破传统合金设计理念,但其铸态组织常存在成分偏析、晶粒粗大及性能不均等问题,限制工程应用。热处理通过控制加热温度、保温时间及冷却速率,可精准调控合金内部原子扩散与组织重构,成为解决上述问题的核心手段。铸态高熵合金经热处理后,不仅能消除内部应力、均匀化学成分,还可优化相组成与微观结构,为性能提升奠定基础。在高熵合金从实验室研发走向工业化生产的过程中,热处理技术是实现性能定制化的关键环节<sup>[1]</sup>。不同应用场景对合金性能需求差异显著,如结构材料需高强度韧性,耐蚀材料需优异抗腐蚀能力,而热处理可通过工艺调整满足多样化需求,极大拓展高熵合金的应用范围,因此在其开发进程中具有不可替代的重要性。

## 2 热处理工艺对高熵合金微观组织的影响

### 2.1 相结构演变

热处理温度与保温时间是调控高熵合金相结构演变的核心参数,其本质是通过改变原子扩散动能与扩散路径,影响相形成热力学与动力学条件。对于典型的AlCoCrFeNi系高熵合金,铸态下常存在FCC固溶体与少量BCC相的混合组织,经800℃低温长时间保温处理后,BCC相因原子扩散充分而逐渐溶解,形成单一FCC相结构;当升温至1100℃并短时保温,部分区域因元素重新富集,会析出细小的金属间化合物相。冷却速率对相结

构影响显著,水淬等快速冷却方式可抑制脆性金属间化合物的析出,保留高温下的亚稳态固溶体相;而随炉冷却等缓慢冷却过程则为相转变提供充足时间,易形成稳定的多相组织。这种相结构的可控演变,为后续性能调控提供结构基础。

### 2.2 晶粒形态调控

热处理工艺通过调控再结晶与晶粒长大过程,实现高熵合金晶粒形态的精准控制。加热温度直接决定再结晶驱动力,当温度低于再结晶温度时,仅能消除部分内应力,晶粒形态无明显变化;达到再结晶温度后,新的等轴晶粒开始形核并长大,随温度升高,形核率与晶粒长大速率均提升。保温时间方面,短时保温可获得细小的再结晶晶粒,因形核后晶粒尚未充分长大;延长保温时间,晶粒会因晶界迁移而逐渐粗化,且晶粒尺寸分布更均匀。冷却速率则影响晶粒细化效果,快速冷却可抑制高温下晶粒的过度长大,同时细化亚晶尺寸;而缓慢冷却易导致晶粒粗化,但可减少晶内缺陷。

### 2.3 析出相控制

析出相的种类、数量、尺寸及分布对高熵合金性能起决定性作用,热处理通过调控析出动力学过程实现对析出相的有效控制。对于沉淀强化型高熵合金,时效处理是控制析出相的关键工艺,低温时效(如450℃)时,析出相形核率高但生长缓慢,易形成尺寸细小、分布均匀的纳米级析出相;升高时效温度,析出相生长速率加快,尺寸增大,数量减少,且易出现聚集现象。保温时间不足时,析出相形核不充分,强化效果有限;保温时间过长则可能导致析出相粗化,反而降低合金性能。此外,预处理工艺也会影响析出行为,固溶处理可使析出相充分溶解,为后续时效过程中析出相的均匀析出创造条件<sup>[2]</sup>。

## 3 热处理对高熵合金性能的影响机制

### 3.1 力学性能优化

热处理通过多种强化机制协同作用,实现高熵合金力学性能的优化。细晶强化是最直接的机制,细化后的晶粒使晶界数量增加,晶界对位错运动的阻碍作用增强,从而提升强度与硬度,同时细化晶粒还可改善韧性,符合Hall-Petch关系。析出强化通过均匀分布的析出相与位错的交互作用实现,纳米级析出相可有效钉扎位错,限制位错滑移,显著提升合金强度。固溶强化则通过热处理使合金元素充分固溶,增大晶格畸变,增强对运动位错的阻碍。以Al<sub>0.5</sub>CoCrFeNi高熵合金为例,铸态下抗拉强度为650MPa,延伸率为30%;经900°C固溶+500°C时效处理后,抗拉强度提升至1020MPa,延伸率保持在22%,实现强度与韧性的良好匹配,其核心是细晶强化与析出强化的协同作用。

### 3.2 耐腐蚀性能提升

热处理通过优化高熵合金的表面与内部组织结构,提升其耐腐蚀性能,核心机制包括改善成分均匀性、形成稳定钝化膜及调控相组成。铸态合金的成分偏析易导致微电偶腐蚀,热处理可消除偏析,使合金成分均匀化,减少腐蚀原电池的形成。同时,热处理可促进合金表面形成更致密、稳定的氧化钝化膜,如Cr元素在热处理过程中向表面富集,形成Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>钝化膜,阻碍腐蚀介质的渗透。此外,热处理可抑制易腐蚀相的析出,保留稳定的固溶体相,提升整体耐腐蚀性。在3.5%NaCl溶液中,CoCrFeMnNi高熵合金经800°C保温2h处理后,腐蚀电流密度从铸态的 $1.2 \times 10^{-6}$ A/cm<sup>2</sup>降至 $3.5 \times 10^{-7}$ A/cm<sup>2</sup>,耐蚀性能显著提升。

### 3.3 功能性能拓展

热处理不仅优化高熵合金的力学与耐蚀性能,还能拓展其功能性能,为在电磁、热管理等领域的应用提供可能。在电磁性能方面,通过控制热处理工艺调控合金的相结构与晶粒尺寸,可改变其磁导率与矫顽力,如FeCoNiSiAl高熵合金经600°C时效处理后,因析出磁性金属间化合物,饱和磁化强度从铸态的120emu/g提升至160emu/g。在热学性能方面,热处理可调整合金的晶格振动与缺陷密度,改变热导率与热膨胀系数,HfNbTaTiZr合金经退火处理后,热导率从铸态的10W/(m·K)降至8W/(m·K),适用于高温隔热场景。此外,热处理还可改善高熵合金的电学性能,通过调控载流子浓度与迁移率,实现电导率的精准控制,拓展其在电子器件领域的应用。

## 4 热处理诱导的高熵合金性能演变规律

### 4.1 力学性能的调控规律

高熵合金力学性能随热处理工艺的演变呈现明确规

律,核心关联参数为温度、时间与冷却速率。强度与硬度随热处理温度的变化呈“先升后降”趋势,低温阶段(低于再结晶温度),随温度升高,内应力释放使硬度略有下降;达到再结晶温度后,细晶强化与析出强化作用凸显,强度硬度快速提升;温度过高时,晶粒粗化与析出相聚集导致强度硬度下降。保温时间方面,在最佳时效时间前,随时间延长,析出相数量增加、分布更均匀,强度持续提升;超过最佳时间后,析出相粗化使强度下降。冷却速率越快,晶粒越细小,亚晶结构越丰富,强度越高,但韧性可能略有降低,而缓慢冷却则使韧性提升,强度下降,呈现强度与韧性的权衡关系<sup>[3]</sup>。

### 4.2 耐腐蚀与抗氧化性能调控

热处理对高熵合金耐腐蚀与抗氧化性能的调控规律与其组织演变密切相关,且不同处理工艺对性能的影响存在显著差异。在耐腐蚀性能方面,固溶处理通过消除成分偏析、形成单一固溶体相,可显著提升材料的耐蚀性。保温时间越长、温度越高,成分均匀性越好,耐蚀性提升越明显;但过度加热可能导致晶粒粗化,增加晶界腐蚀风险。时效处理对耐蚀性的影响则取决于析出相的类型:若析出耐蚀性优异的相(如Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等),则耐蚀性提升;若析出易腐蚀相(如σ相、Laves相),则耐蚀性下降。抗氧化性能方面,热处理可促进表面形成致密氧化膜,其稳定性与热处理温度正相关。适当高温处理(如950°C)形成的氧化膜与基体结合力更强,可显著降低氧化速率(如CoCrAlFeNi合金经950°C保温处理后,氧化速率较铸态降低60%);但温度过高会导致氧化膜剥落,降低抗氧化性能。此外,冷却速率对氧化膜结构也有影响:快速冷却可抑制氧化膜开裂,而缓慢冷却可能导致氧化膜疏松。因此,通过优化热处理参数,可实现耐腐蚀与抗氧化性能的协同提升。

### 4.3 其他功能性能的调控

热处理对高熵合金其他功能性能的调控规律因性能类型而异,但均与微观结构演变直接关联。在磁性能方面,ferromagnetic高熵合金的饱和磁化强度随热处理温度升高呈先增后减趋势:低温热处理(如500-700°C)促进磁性相(如BCC相)析出,提升磁化强度;高温处理(>900°C)导致相结构转变为顺磁相(如FCC相),磁化强度下降。矫顽力则与晶粒尺寸密切相关:晶粒细化增加晶界密度,阻碍磁畴壁移动,导致矫顽力增大;而粗晶结构则降低矫顽力。在热膨胀性能方面,热处理可通过降低合金内部缺陷密度、减少晶格畸变,使热膨胀系数趋于稳定。其中,缓慢冷却处理(如炉冷)可促进晶粒均匀生长,使热膨胀系数分布更均匀;而快速冷却(如

水淬)可能导致局部应力集中,影响热膨胀稳定性。在电学性能方面,固溶处理通过增加晶格畸变,增强载流子散射,降低电导率;时效处理则因析出相的形成改变载流子迁移率,实现电导率的可控调节(如析出导电相可提升电导率,而析出绝缘相则降低电导率)。这种多性能协同调控机制为高熵合金在功能器件(如磁传感器、热膨胀补偿元件、导电涂层等)中的广泛应用提供了设计自由度。

## 5 热处理技术发展趋势

### 5.1 精准化与智能化热处理

精准化与智能化是高熵合金热处理技术的核心发展方向,依托先进检测技术与智能控制算法实现工艺参数的精准匹配。精准化体现在对加热温度、保温时间等参数的精确控制,通过原位X射线衍射、透射电子显微镜等实时检测手段,动态监测热处理过程中的组织演变,建立工艺-组织的定量关系,实现目标组织的精准调控。智能化则借助机器学习与大数据分析,整合大量热处理实验数据,构建工艺优化模型,可根据目标性能快速预测最优工艺参数。同时,智能传感器与自动控制系统的应用,实现热处理过程的实时反馈与闭环控制,减少人为误差,提升工艺稳定性。如基于神经网络模型的热处理系统,可将高熵合金性能预测误差控制在5%以内,显著提升研发与生产效率。

### 5.2 高性能导向的工艺创新

以高性能为导向的工艺创新聚焦于开发新型热处理技术,突破传统工艺的性能瓶颈。多步复合热处理工艺成为研究热点,通过固溶、时效、深冷处理等工艺的组合,实现多种强化机制的协同作用,如固溶+时效+深冷处理可同时细化晶粒与析出相,大幅提升合金强度与韧性。另外,低温等离子体辅助热处理、激光表面热处理等新型技术应运而生,激光表面热处理可实现合金表面与心部的组织梯度调控,使表面形成高强度硬化层,心部保持良好韧性,满足特殊工况需求。这些工艺创新不再局限于

单一性能提升,而是追求强度、韧性、耐蚀性等多性能的协同优化,推动高熵合金向高性能化方向发展<sup>[4]</sup>。

### 5.3 多学科交叉融合

多学科交叉融合为高熵合金热处理技术的发展提供新动力,实现材料科学、计算机科学、物理学等学科的深度融合。材料基因组工程理念的引入,通过高通量计算与实验相结合,加速热处理工艺的筛选与优化,缩短研发周期。计算机模拟技术的应用愈发广泛,借助第一性原理计算、分子动力学模拟等方法,从原子尺度揭示热处理过程中的原子扩散与相转变机制,为工艺设计提供理论指导。同时,自动化技术与智能制造的融合,实现热处理生产过程的规模化与高效化,推动高熵合金从实验室研发走向工业化应用。多学科的交叉不仅丰富了热处理技术的理论体系,还拓展了技术应用边界,为高性能高熵合金的开发提供全方位支撑。

### 结束语

热处理是调控高熵合金组织与性能的核心技术,对其发展意义重大。研究表明,合理热处理工艺能调控相结构、晶粒及析出相,全面优化合金的力学、耐腐蚀和功能性能,且工艺参数与性能间有明确规律。当下,热处理技术正朝精准化、智能化及多学科融合发展,为高性能合金开发提供新路径。未来需深化热处理与组织演变的定量关系,完善预测模型,加强新技术研发与工业化应用,充分释放高熵合金性能潜力,推动其广泛应用。

### 参考文献

- [1]秦红敏,张琪,丁红瑜,等.热处理对高熵合金组织及性能的影响研究进展[J].材料热处理学报,2025,46(7):24-38.
- [2]关杰仁,单悦晴,徐龙,等.高熵合金增材制造技术及组织性能研究进展[J].中国有色金属学报,2025,35(9):2993-3013.
- [3]思芳,艾根根,姜凤阳,等.工艺条件对高熵合金耐蚀性能影响的研究进展[J].材料开发与应用,2025,40(3):51-63.
- [4]李可然,王东亮,邓磊,等.高熵合金低温性能及低温处理研究进展[J].中国有色金属学报,2022,32(5):1237-1253.