

原位碳化物增强 CoCrFeMnNi 高熵合金的组织与性能

杨 慧

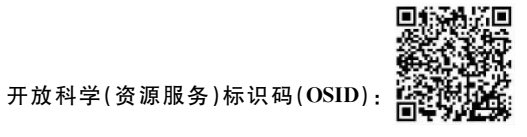
(郑州商学院建筑工程学院)

摘 要 采用热压烧结制备了不同石墨含量的 CoCrFeMnNi 高熵合金,研究了石墨对合金组织和力学性能的影响。结果表明,加入石墨后,烧结体中原位生成了 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物,并弥散分布于基体中。随石墨含量增加,碳化物尺寸保持不变,面积分数呈抛物线状增加,烧结体屈服强度随之增加。合金屈服强度增量满足 $\Delta\sigma = 31.5 + 762(f^{1/2}/r)$,其主要强化机制为碳化物的弥散强化。当石墨含量为 1% 时,合金具有优异的综合力学性能,其屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 338 MPa、672 MPa 和 20.9%。

关键词 高熵合金;强化;烧结;力学性能

中图分类号 TG139;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Microstructure and Properties of In-situ Carbide Enhanced CoCrFeMnNi High-entropy Alloy

Yang Hui

(School of Architectural Engineering, Zhengzhou Business University)

Abstract: CoCrFeMnNi- x C alloys were fabricated via hot-pressing sintering, and effects of graphite on the microstructure and mechanical properties of the alloys were mainly investigated. The results indicate that a $M_{23}C_6$ type Cr-rich carbide is in-situ formed in sintered bulks and dispersedly distributed in the matrix. With graphite content increase, the size of carbide is stable, while the area fraction is increased in a parabola, resulting in an increase in yield strength of the sintered bulks. The increase of yield strength conforms $\Delta\sigma = 31.5 + 762(f^{1/2}/r)$, and the main strengthening mechanism is attributed to dispersion strengthening of the carbide. The alloy exhibits excellent comprehensive mechanical properties as $x = 1\%$, where the yield strength, tensile strength and elongation are 338 MPa, 672 MPa, and 20.9%, respectively.

Key Words: High Entropy Alloy, Strengthening, Sintering, Mechanical Property

高熵合金由于多主元之间的性质差异(原子尺寸、相互作用等)和高混合熵效应,具有显著的晶格畸变、化学短程有序结构(CSRO)和多元固溶体(溶质种类多、含量高)相等特性^[1-5],具有优异的力学、电学、磁学和耐腐蚀性能,是实现材料结构-功能一体化的理想解决方案之一,得到研究者广泛关注。

面心立方(FCC)结构的高熵合金具有简单的物相组成、稳定的热力学性能和优异的塑性(伸长率大于 40%)^[6-8]。但是,该类高熵合金的强度较低^[6-7]。冷加工强化是面心立方结构高熵合金的主要强化手段之一,但冷加工后合金塑性显著降低。此外,冷加工合金经再结晶退火后,强度又恢复到较低水平^[9-10]。这些特点制约了该类材料在工程领域(特别是中高温领域)中的应用。因此,寻求更有效的强化手段,提高该类合金的综

合力学性能和再结晶抗力,已成为进一步拓展其工程应用的主要挑战,也是亟待解决的关键科学问题之一。

弥散强化技术在传统材料中已被证实为有效的强化手段,近年来也被应用于高熵合金领域。ZHANG G P 等^[11]采用机械合金化和热压烧结制备了碳化物增强 CoCrFeNi 高熵合金,发现制备过程形成的 TiC 和 Cr_7C_3 碳化物提高了 CoCrFeNi 高熵合金的硬度(HV)和屈服强度,分别达到 671 和 1 440 MPa。RO-GAL L 等^[12-13]将纳米级的 SiC 和 Al_2O_3 颗粒加入到 CoCrFeMnNi 合金中,发现合金的屈服强度呈上升趋势,但压缩强度和塑性均下降。此外,对烧结体进行微观分析,发现其组织中有一定数量的孔洞存在,分析表明这是基体与添加物间润湿性较差导致的。综上,弥散相的尺寸和均匀分布程度以及与基体间的界面润湿性

收稿日期:2023-03-03;修改稿收到日期:2023-03-27
基金项目:2023 年郑州市高等教育教改项目(2023KCSZ015)
作者简介:杨慧,女,1989 年出生,讲师,郑州(451200),E-mail:550483302@qq.com
引用格式:杨慧. 原位碳化物增强 CoCrFeMnNi 高熵合金的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(6):841-846.
YANG H. Microstructure and properties of in-situ carbide enhanced CoCrFeMnNi high-entropy alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):841-846.

对 CoCrFeNi 高熵合金的力学性能影响显著。

采用原位合成技术制备复合材料,可实现增强体表面无污染,以及基体和增强体间较高的界面结合强度,是制备高性能弥散强化复合材料的有效途径^[14]。因此,本研究拟在气雾化 CoCrFeMnNi 高熵合金粉末的基础上引入石墨,采用热压烧结技术制备不同石墨含量的 CoCrFeMnNi-*x*C 高熵合金,重点研究了石墨含量对 CoCrFeMnNi 高熵合金组织和室温力学性能的影响。通过石墨与合金中亲碳元素间的原位反应所形成的碳化物来提高合金的强度,同时还有望提高合金的再结晶抗力,可为 CoCrFeNi 高熵合金在高温领域的推广应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用的高熵合金粉末为气雾化法制备的等摩尔比 CoCrFeMnNi 高熵合金粉末,粉末的平均粒度为 53 μm。合金粉末中 Co、Cr、Fe、Mn 和 Ni 元素的摩尔分数分别为 20.77%、19.41%、20.26%、20.26% 和 19.29%,接近设计成分。将质量分数高于 99.5%、直径小于 200 目的石墨粉与 CoCrFeMnNi 高熵合金粉末在 QM-WX4 球磨机上进行球磨,球料比为 10:1,转速设为 100 r/min,球磨时间为 2 h,石墨粉含量(质量分数)分别为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%。将球磨后的复合粉末置于 60 °C 真空干燥箱中干燥 10 h 并过筛。将一定量过筛后的复合粉末放入内径为 12.5 mm、高度为 80 mm 的内套石墨型中,在压力为 50 MPa,烧结温度为 1 100 °C,型号为 CXZT-65-207 的真空热压炉中进行热压烧结,保温时间为 1 h,获取不同石墨含量 CoCrFeMnNi 烧结试样。

采用 X'Pert PROX 型 X 射线衍射仪分析试样的物相组成,具体参数为:Cu-Kα 射线(波长为 0.154 06 nm),管电压、电流分别为 35 kV、30 mA,2θ 范围为 20°~80°,扫描速度为 10(°)/min,扫描步长为 0.02°。

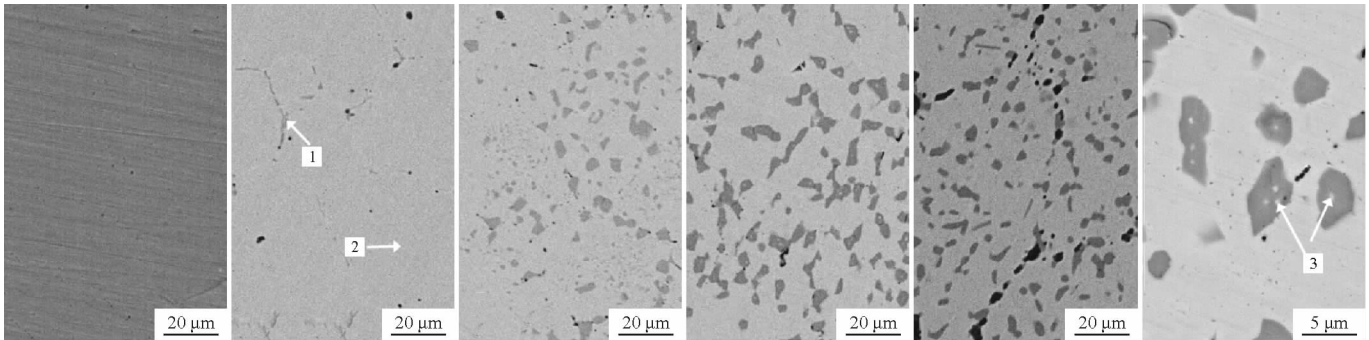


图 2 不同石墨含量下热压烧结态 CoCrFeMnNi 高熵合金的 SEM-BSE 照片

Fig.2 SEM-BSE images of hot pressing sintered CoCrFeMnNi-*x*C HEAs with different graphite contents

采用 JSM-6700F 型扫描电镜与 JEM-2100 型透射电镜对试样的微观形貌进行观察,并利用 SEM、TEM 上配带的 EDS 对试样物相成分进行测试分析。试样硬度测试采用 HVS-50 型维氏数显显微硬度计,载荷为 9.8 N,加载时间为 15 s。采用 MTS-CMT 5105 型万能电子拉伸试验机测试试样的力学性能,拉伸速率为 10⁻³ mm/s。

2 试验结果与讨论

2.1 CoCrFeMnNi-*x*C 高熵合金的微观组织分析

图 1 为 1.0% 石墨掺杂 CoCrFeMnNi 高熵合金球磨态粉末及 1 100 °C 烧结 2 h 后块体合金的 XRD 图谱。可以看出,球磨态粉末和烧结体具有相同的特征衍射峰,为 FCC 结构 CoCrFeMnNi 固溶体相的 (111)、(002) 及 (022) 的衍射峰,未观察到石墨及碳化物等第二相的衍射峰。其原因可能是石墨在球磨过程发生了无定型转变或烧结体中碳化物第二相含量较低,导致无法检测到。

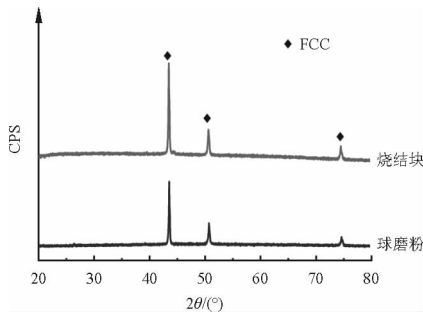


图 1 石墨含量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 高熵合金复合粉体经机械球磨和热压烧结后的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of CoCrFeMnNi HEAs composite powders with 1% graphite after mechanical milling and hot pressing sintering

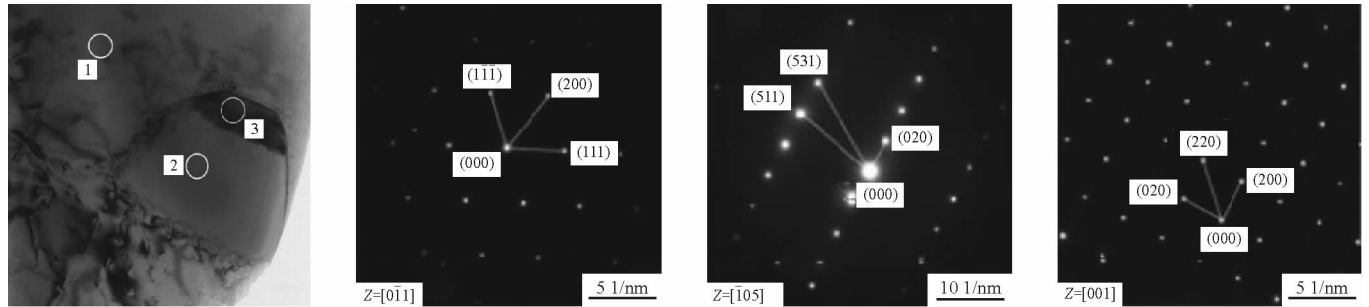
图 2 为不同石墨含量的 CoCrFeMnNi 高熵合金经 1 100 °C 热压烧结 2 h 后的 SEM 组织。整体而言,烧结体没有明显的孔洞,说明合金经热压烧结后基本完成了

致密化。由图 2a 可知,CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中不存在明显的衬度差异,佐证了 CoCrFeMnNi 合金为成分均匀的单相固溶体,与 ZHANG G P 等^[11]的研究一致。由图 2b 可知,添加了 0.5% 石墨的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中除了高熵合金基体相以外,还观察到了一些深灰色衬度的条片状结构和少量的黑色孔洞。石墨添加量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中还观察到了深灰色衬度的无规则块状组织,尺寸为亚微米和微米级。结果表明,随石墨含量增加,深灰色衬度的无规则块状组织数量也随之增多,见图 2c~图 2e。

表 1 为烧结体背散射 SEM 照片中不同衬度组织的化学成分。可以看出,谱图 2 可能为 CoCrFeMnNi

表 1 不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中代表性区域的能谱结果

谱图	x_B						%
	C	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	
1	32.91	6.89	40.94	6.14	6.55	6.57	
2	-	21.09	14.16	21.41	20.61	22.73	
3	35.22	5.76	42.52	5.61	4.74	6.15	



(a) TEM 明场照片 (b) CoCrFeMnNi[011]方向的 SAED 照片 (c) $M_{23}C_6$ [105]SAED 方向的照片 (d) $M_{23}C_6$ [001]方向的 SAED 照片

图 3 石墨含量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体的 TEM 和选区电子衍射照片

Fig.3 TEM and SAED images of CoCrFeMnNi sintered bulk with 1% graphite

表 2 图 3 中代表性区域的能谱结果

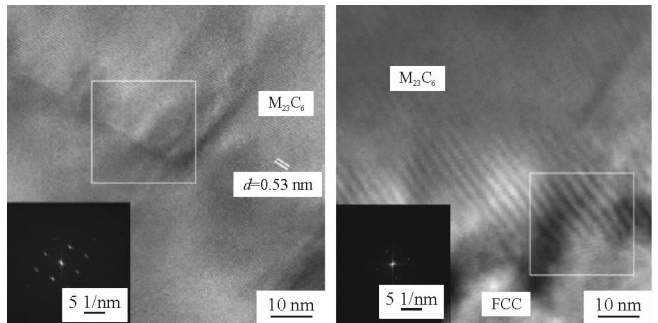
区域	x_B						%
	C	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	
1	-	20.21	14.69	20.68	19.68	24.79	
2	20.42	4.52	55.46	6.79	8.87	3.96	

实了不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体是由简单 FCC 结构的 CoCrFeMnNi 固溶体相和复杂 FCC 结构的 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物构成。

图 4 是石墨含量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中各物相间界面的高分辨率透射电镜照片。由图 4a 右上方和下方分别可以看到一个晶面间距为 0.53 nm 的晶粒,其晶面特性与 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物(200)吻合,图 4a 左下图为两个晶粒的快速傅里叶变换

高熵合金基体。谱图 1 和谱图 3 成分相近,可能为富 Cr 碳化物,这可能是石墨与合金中 Cr 在烧结过程中的原位反应所致。

为了进一步分析烧结体中的物相组成和特征,对石墨含量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体进行了 TEM 观察和选区电子衍射(SAED)分析,结果见图 3。由图 3a 可见,在烧结体的右边中间位置观察到衬度明显的 3 个晶粒,分别是尺寸为 $0.6\sim1\ \mu\text{m}$ (区域 1)和 650 nm(区域 2)的浅灰色衬度晶粒,以及约 180 nm(区域 3)的黑色衬度晶粒。结合图 3b~图 3d 可知,区域 1 为具有简单 FCC 结构的 CoCrFeMnNi 高熵合金固溶体相。区域 2 和区域 3 均为 $M_{23}C_6$ 型碳化物晶粒,该碳化物晶粒晶体取向差小,且为复杂 FCC 结构($a=10.6\text{ nm}$)。为了确定各物相的具体组成成分,对图 3a 中的区域 1 和区域 2 进行能谱分析,见表 2。可以看出,区域 1 为 FCC 结构的 CoCrFeMnNi 高熵合金固溶体相,区域 2 为 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物,这与表 1 一致。值得注意的是,CoCrFeMnNi 高熵合金固溶体相中 Cr 含量显著低于粉末态,这与 Cr-C 原子对间较高的亲和力,烧结过程形成的富 Cr 碳化物有关。上述结果证



(a) $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物界面 (b) 碳化物-基体界面

图 4 石墨含量为 1.0% 的 CoCrFeMnNi 烧结体中 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物间和碳化物-基体界面处的 HRTEM 照片

Fig.4 HRTEM images of interface between $M_{23}C_6$ type Cr-rich carbide and carbide-matrix in CoCrFeMnNi sintered bulk with 1% graphite

结果,可看出上述两晶粒均为 $M_{23}C_6$ 结构富 Cr 碳化物晶粒,且角度差很小。在图 4b 上方可以发现 $M_{23}C_6$ 结构富 Cr 碳化物晶粒,下方则为具有单一面心结构的 CoCrFeMnNi 合金基体相,由于二者的晶面间距差别大,其形成的界面很大可能是非共格界面。除此之外,在合金基体与碳化物界面处并未发现其他化合物。

2.2 CoCrFeMnNi-xC 高熵合金的力学性能

图 5 为经 $1\,100\,^{\circ}\text{C}\times 60\,\text{MPa}$ 热压烧结 2 h 后不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金的硬度。可以看出,不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金的硬度随石墨含量的增加而增大,当石墨含量从 0.5% 提高至 1.0% 时,合金硬度提升幅度最大,达 28.2%。之后,随着石墨含量继续增加,合金硬度增速减缓。不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金的硬度变化与合金中第二相的数量和分布有紧密关系。在石墨含量较低(0.5%)的合金烧结体中,只观察到很少的对合金硬度有提升作用的富 Cr 碳化物,而当石墨含量增至 1.0% 时,烧结体中亚微米或微米级的富 Cr 碳化物数量迅速增加,且均匀分散在烧结体中,因此其对合金的弥散强化效果更好。但随着石墨含量的进一步提高,富 Cr 碳化物的含量提高,而碳化物的尺寸和形态无明显变化,合金的硬度提高变缓。

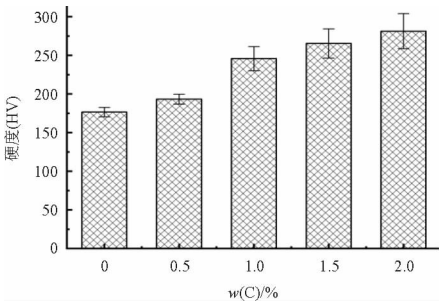


图 5 不同石墨含量下 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体的维氏硬度

Fig.5 Vickers hardness of CoCrFeMnNi sintered bulk with various graphite contents

图 6 为不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体在室温下的拉伸应力-应变曲线。表 3 为不同石墨含量的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体的力学性能。由表 3 可看出,随石墨含量增加,烧结体的屈服强度($\sigma_{0.2}$)呈上升趋势,伸长率(δ)呈降低趋势,而抗拉强度(σ_b)则是先增后降。当石墨含量为 1.5% 时,烧结体的抗拉强度最高。这可能是由于石墨含量过高时原位生成了高含量的碳化物,在变形过程中碳化物-基体界面处引起大量的位错塞积,提高了合金的屈服强度,但界面处显著的位错塞积为初始裂纹的萌生提供了条件,从而降低了合金的均匀塑性变形能力及加工硬化效果,材料发生提前失稳断裂。

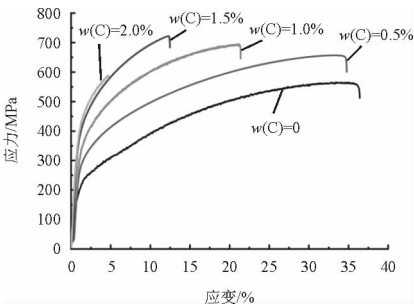


图 6 不同石墨含量下 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体的室温拉伸应力-应变曲线

Fig.6 Tensile stress-strain curves of CoCrFeMnNi sintered bulk with various graphite contents

表 3 不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of CoCrFeMnNi HEAs with various graphite contents

<i>x</i>	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\delta/\%$
0	217	556	35.1
0.5	268	642	32.3
1.0	338	672	20.3
1.5	363	701	11.9
2.0	380	578	4.5

由图 2 可以看出,随石墨含量增加,CoCrFeMnNi 高熵合金中富 Cr 碳化物则变成无规则形状,尺寸也基本无变化,平均粒径均在 $2.3\sim 2.4\,\mu\text{m}$ 之间。对不同石墨含量下,烧结体中富 Cr 碳化物的面积做了统计,见图 7。可以看出,随石墨含量增加,富 Cr 碳化物的面积分数增大。石墨含量为 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 时,其对应的富 Cr 碳化物的面积分数分别为 3.4%、10.6%、14.2% 和 15.7%。

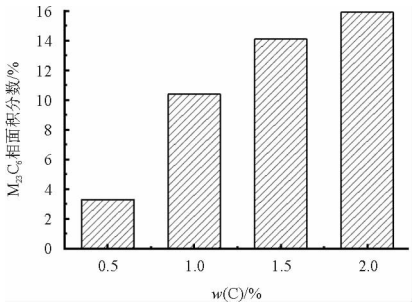


图 7 不同石墨含量 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物的面积分数

Fig.7 Area fraction of $M_{23}C_6$ type Cr-rich carbide in CoCrFeMnNi sintered bulk with various graphite contents

对于弥散强化合金而言,弥散分布的第二相一般为硬质相,该硬质相基本不发生塑性变形,位错无法通过切割第二相而继续运动,而是以绕过第二相的方式运动进而产生强化,此时,弥散分布的第二相的强化效果可描述为^[15]:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = \alpha f^{\frac{1}{2}} r^{-1} \tag{1}$$

式中, $\Delta\sigma$ 为烧结体的屈服强度增量,MPa; σ 为含第二

相时合金的屈服强度,MPa; σ_0 为不含第二时合金的屈服强度,MPa; α 为和位错性质相关的系数,单位为 Pa·m; f 为粒子的体积分数; r 为粒子的半径, μm 。

由式(1)可知,烧结体的强度与所形成的第二相的粒子半径和体积分数有关。因此,构建了石墨含量与富 Cr 碳化物的几何特征 $f^{1/2}$ 和 $1/r$ 间的关系,见图 8。可以看出,不同石墨含量下,碳化物的 $1/r$ 变化很小,可见,碳化物的粒子尺寸对其强度提升作用不明显。但随着石墨含量增加,碳化物的 $f^{1/2}$ 呈上升趋势,当石墨含量从 0.5% 增至 1.0% 时, $f^{1/2}$ 的增长尤为显著,此后,石墨含量继续增加,碳化物的 $f^{1/2}$ 继续增长,但增长速率变缓。

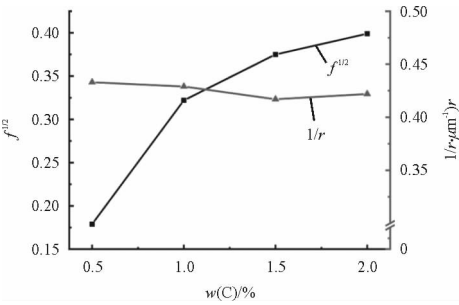


图 8 石墨含量对 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物 $f^{1/2}$ 和 $1/r$ 的影响
Fig.8 Effects of C contents on $f^{1/2}$ and $1/r$ of $M_{23}C_6$ type Cr-rich carbide in CoCrFeMnNi sintered bulks

不同石墨含量的 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体屈服强度的增量 $\Delta\sigma$ 与 $M_{23}C_6$ 结构富 Cr 碳化物 $f^{1/2}/r$ 之间的关系见图 9。可以看出,随碳化物 $f^{1/2}/r$ 的增大,烧结体的强度增量 $\Delta\sigma$ 呈上升趋势,由拟合结果可知,二者的线性回归系数为 0.986。由此可见,烧结体的强度增量 $\Delta\sigma$ 与碳化物的 $f^{1/2}/r$ 基本满足线性关系: $\Delta\sigma = 31.5 + 762(f^{1/2}/r)$ 。综上,不同石墨含量下 CoCrFeMnNi 高熵合金的主要强化机制是富 Cr 碳化物的弥散强化。

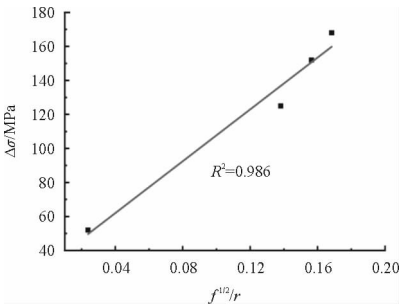


图 9 不同石墨含量下 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体屈服强度增量 $\Delta\sigma$ 与碳化物 $f^{1/2}/r$ 之间的关系
Fig.9 Relationship between yield strength increment $\Delta\sigma$ of CoCrFeMnNi sintered bulks and $f^{1/2}/r$ of carbide with various graphite contents

3 结 论

- (1)不同石墨含量下 CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体主要由简单 FCC 结构的 CoCrFeMnNi 固溶体相和复杂 FCC 结构的 $M_{23}C_6$ 型富 Cr 碳化物构成。
- (2)随着石墨含量增加,CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体中碳化物的尺寸几乎不发生变化,面积分数呈抛物线状增加。
- (3)随着石墨含量增加,CoCrFeMnNi 高熵合金烧结体屈服强度逐渐增加,伸长率逐渐下降,而抗拉强度则先增加后下降,在石墨含量为 1.5% 时,烧结体的抗拉强度最高。合金的强化机制为弥散强化,烧结体屈服强度的增量 $\Delta\sigma$ 与碳化物的 $f^{1/2}/r$ 之间满足 $\Delta\sigma = 1.5 + 762(f^{1/2}/r)$ 。

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] ZHANG Y L, WANG X G, LI J G, et al. Deformation mechanism during high-temperature tensile test in an eutectic high-entropy alloy AlCoCrFeNi_{2.1} [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A724: 148-155.

[4] 郭富强, 任波. CuCrFeNiMn 高熵合金的耐腐蚀性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(2): 202-206.

[5] 陈冲, 李红菊. Ni 含量对 AlCrCuNi₄Ti 高熵合金微观组织和硬度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(6): 643-646.

[6] VAIDYA M, KARATI A, MARSHAL A, et al. Phase evolution and stability of nanocrystalline CoCrFeNi and CoCrFeMnNi high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 770: 1 004-1 015.

[7] WU Z, BEI H, PHARR G M, et al. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures[J]. Acta Materialia, 2014, 81: 428-441.

[8] JIN X, ZHOU Y, ZHANG L, et al. A novel Fe₂₀Co₂₀Ni₄₁Al₁₉ eutectic high entropy alloy with excellent tensile properties[J]. Materials Letters, 2018, 216: 144-146.

[9] SCHUH B, MENDEZ-MARTIN F, VÖLKER B, et al. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation[J]. Acta Materialia, 2015, 96: 258-268.

[10] DIAO H Y, FENG R, DAHMEN K A, et al. Fundamental deformation behavior in high-entropy alloys: An overview[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2017, 21 (5): 252-266.

逆偏析对 ZL205A 合金铸件微观组织及力学性能的影响

刘润芳 樊秀臣 王晓萌 于 森 李 明
(北京新风航天装备有限公司)

摘 要 以 ZL205A 合金壳体铸件为对象,通过研究其逆偏析区域的宏观、微观形貌及力学性能,发现此类逆偏析易产生于缝隙浇道两侧,呈线性分布,其偏析区域中 Cu 含量偏低,平均约为 4.2%;热处理后逆偏析区域硬度(HV)与其他区域相当,约为 137;抗拉强度和伸长率相比其他区域略有提升,分别为 425.3 MPa 和 7.0%。结果表明,逆偏析对 ZL205A 合金铸件本体力学性能未产生负面影响,反而有少量提升作用。

关键词 逆偏析;线性偏析;ZL205A 合金

中图分类号 TG146.21;TG249.2

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Inverse Segregation on Microstructure and Mechanical Properties of ZL205A Alloy Castings

Liu Runfang, Fan Xiuchen, Wang Xiaomeng, Yu Miao, Li Ming
(Beijing Xinfeng Aerospace Equipment Co., Ltd.)

Abstract: The macro and micro morphologies as well as mechanical properties of ZL205A alloy shell castings in inverse segregation region were investigated. The results indicate that the inverse segregation is easily generated on both sides of the gap gate, which presents linear distribution with lower Cu content of 4.2%. After heat treatment, the hardness of alloy in the inverse segregation region is about 137 HV, which is similar to that in other regions. The tensile strength and elongation of the alloy are slightly increased compared with other regions, which are 425.3 MPa and 7.0%, respectively. The results reveal that the inverse segregation has no adverse effect on ZL205A alloy castings. Instead, mechanical properties are slightly enhanced.

Key Words: Inverse Segregation, Linear Segregation, ZL205A Alloy

ZL205A 高强度铸造铝合金在航空、航天、汽车、船舶等领域具有广泛的应用^[1-2]。由于铸造熔炼和铸造过程中存在差异,该合金易产生缩孔、缩松、夹杂、偏析等缺陷问题,影响铸件的品质,从而影响铸件的性能以及成品率。

偏析是 ZL205A 铸件中常见的缺陷,影响铸件的组织及力学性能^[3-6]。在 ZL205A 合金壳体类铸件生产中,发现了一种线性偏析缺陷,且该缺陷为逆偏析。由于此类偏析产生有较明显的规律性,因此,本研究将探讨其形成机理,并分析其对 ZL205A 合金宏观、微观形

收稿日期:2022-11-05;**修改稿收到日期:**2022-12-17

第一作者简介:刘润芳,女,1993 年出生,工程师,北京(100854),E-mail:1103073010@qq.com

引用格式:刘润芳,樊秀臣,王晓萌,等.逆偏析对 ZL205A 合金铸件微观组织及力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(6):846-849.

LIU R F, FAN X C, WANG X M, et al. Effects of inverse segregation on microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy castings [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6):846-849.

[11] ZHANG G P, WANG G F, YANG T H, et al. Synthesis and characterisation of TiC reinforced CoCrFeNi composite by hot-pressing sintering[J]. Materials Science and Technology, 2020, 36 (4): 409-416.

[12] ROGAL L, KALITA D, TARASEK A, et al. Effect of SiC nanoparticles on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 344-352.

[13] ROGAL L, KALITA D, LITYNSKA D L. CoCrFeMnNi high entropy alloy matrix nanocomposite with addition of Al₂O₃[J]. Inter-metallics, 2017, 86: 104-109.

[14] WEI R, SUN H, CHEN C, et al. Formation of soft magnetic high entropy amorphous alloys composites containing in situ solid solution phase[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 449: 63-67.

[15] XU S, ZHOU Z J, LONG F, et al. Combination of back stress strengthening and Orowan strengthening in bimodal structured Fe-9Cr-Al ODS steel with high Al addition[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A739: 45-52.

(编辑:刘晨辉)