

热处理温度对 CoCrFeNiSn 高熵合金组织及性能的影响

郝雪卉¹ 王可馨¹ 陈丽燕¹ 王光宇¹ 王子玥¹ 郝宪磊²
(1.聊城大学材料科学与工程学院; 2.山东鲁宇新能源科技有限公司)

摘 要 采用真空电弧熔炼制备了 CoCrFeNiSn 高熵合金,并分别在 650、750 和 850 ℃ 下进行热处理。采用扫描电镜、显微硬度计和电化学测试系统等研究了热处理温度对 CoCrFeNiSn 高熵合金的组织、硬度和耐腐蚀性能的影响。结果表明,经热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的组织形态仍为典型的枝晶结构,但组织随热处理温度的升高而不断细化,导致其硬度明显升高,经 850 ℃ 热处理后其硬度(HV)达到最大值 392.4。而随着温度升高,CoCrFeNiSn 高熵合金的耐腐蚀性能却呈下降趋势,经 650 ℃ 热处理后其耐腐蚀性最佳。

关键词 热处理;CoCrFeNiSn 高熵合金;显微组织;性能

中图分类号 TG156.3;TG139+.8 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Heat-treatment Temperature on Microstructure and Properties of CoCrFeNiSn High Entropy Alloys

Hao Xuehui¹, Wang Kexin¹, Chen Liyan¹, Wang Guangyu¹, Wang Ziyue¹, Hao Xianlei²
(1.School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University;
2.Shandong Luyu New Energy Technology Co., Ltd.)

Abstract: The effects of heat treatment temperature on the microstructure, hardness and corrosion resistance of CoCrFeNiSn alloys fabricated by vacuum arc melting and heat treated at 650, 750 and 850 ℃ were investigated by scanning electron microscopy, micro-hardness tester and electrochemical testing system. The results indicate that the morphology of CoCrFeNiSn alloys after heat treatment is characterized by typical dendrite, which is gradually refined with the increase in the temperature, thereby significantly enhancing the hardness. The hardness of the CoCrFeNiSn alloy at 850 ℃ reaches the maximum value of 392.4 HV. Meanwhile, the corrosion resistance of CoCrFeNiSn alloys shows an contrary trend with temperature increase, which is desirable after heat treatment at 650 ℃.

Key Words: Heat Treatment, CoCrFeNiSn High Entropy Alloys, Microstructure, Properties

近年来,新型高性能多主元高熵合金成为材料领域研究的新热点。高熵合金是由 $n(n \geq 5)$ 种元素等摩尔比或近似等摩尔比组成的多组元合金。其具有较高的混合熵,凝固后易形成简单的体心立方(BCC)、面心立方(FCC)或密排六方(HCP)结构,甚至形成非晶态^[1-3]。高熵合金具有高强度、高硬度、优异的抗氧化、抗摩擦性能和软磁性能等,从而使其具有广阔的应用前景^[4-5]。目前,高熵合金多通过真空熔炼获得,该方法熔炼温度高^[6],铸造过程中容易出现内应力大、成分偏析、空隙以及缩孔等缺陷,从而对高熵合金的性能造成一定的影响^[7-8]。另外,大多数铸态高熵合金的塑韧性较差,这极

大地限制了其应用。

合适的热处理工艺可以在不改变合金化学成分的前提下消除其内部的结构缺陷,获得组织和性能更加优异的材料。班煜峰等^[9]研究发现,经退火处理后 Al-FeCrCoNiMo 高熵合金中的 FCC 相减少且析出新的金属间化合物,从而导致其硬度随退火温度的升高发生变化。LU Y P 等^[10]发现淬火后的 CoFeNi₂V_{0.5}Nb_{0.75} 高熵合金中有 NbNi₄ 相不断析出,而共晶区域不断减少。在 800 ℃ 淬火时,该合金呈现最优良的综合力学性能,其屈服强度和伸长率分别为 2 075 MPa 和 16.73%。LIN C M 等^[11]研究发现,Cu_{0.5}CoCrFeNi 高熵合金中

收稿日期:2022-06-07;修改稿收到日期:2022-07-23
基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE026)
第一作者简介:郝雪卉,女,1988 年出生,讲师,山东聊城(252000),E-mail:janlearn@126.com
通信作者:郝宪磊,男,1984 年出生,工程师,山东聊城(252400),E-mail:shandongluyu@163.com
引用格式:郝雪卉,王可馨,陈丽燕,等. 热处理温度对 CoCrFeNiSn 高熵合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):484-488.
HAO X H, WANG K X, CHEN L Y, et al. Effects of heat-treatment temperature on microstructure and properties of CoCrFeNiSn high entropy alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):484-488.

的富 Cu 相经 1 350℃时效处理后完全溶入 FCC 基体,从而使其耐蚀性得到改善。以上研究表明,热处理可对高熵合金的显微组织产生作用,并影响其硬度、力学性能和耐腐蚀性能等。

CoCrFeNi 系高熵合金是目前研究最为广泛的一种高熵合金,其不仅具有单一的面心立方结构,还表现出良好的塑性及伸长率,但 CoCrFeNi 系高熵合金的硬度较低。研究表明,Sn 可显著改善 CoCrFeNi 高熵合金的强度^[12-13]、硬度^[14-15]和耐腐蚀性能^[16]。然而,关于使用热处理工艺来进一步改善 CoCrFeNiSn 高熵合金性能的研究报道很少。本研究拟采用硬度试验、腐蚀试验,结合 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)和 X 射线能谱分析(EDS)等分析手段,研究热处理温度对 CoCrFeNiSn 高熵合金的显微组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响,旨在为相关研究提供参考。

1 试验方法

以高纯(质量分数>99.5%)的 Co、Cr、Fe、Ni 和 Sn 粉为原材料,在高纯氩气气氛下利用真空电弧熔炼炉制备等摩尔比的 CoCrFeNiSn 高熵合金纽扣锭。需要注意的是每个纽扣锭熔化 5 次以确保成分均匀。然后将纽扣锭分别加热至 650、750 和 850℃保温 1 h 后,在空气中冷却。采用电火花线切割机从热处理后的纽扣锭切下 10 mm×10 mm×4 mm 的块体,依次采用 80、320、600、1000 和 2000 号的 SiC 砂纸打磨试样表面,并利用 2.5 μm 金刚石研磨膏将其抛光至镜面。最后,依次利用酒精和去离子水清洗试样,冷风吹干后备用。

采用配备有 X 射线能谱分析(EDS)的 JSM-6700F 型扫描电镜(SEM)对抛光试样进行显微组织和成分分析;利用配备 Cu 靶的 D8 X 射线衍射仪(XRD)分析 CoCrFeNiSn 高熵合金的相结构,其中扫描角度为 20°~100°,扫描速度为 5°/min。采用 HVS-1000 型显微维氏硬度计测量显微硬度,加载载荷为 9.8 N,保持时间为 10 s。采用 Chi660e 电化学工作站测量 CoCrFeNiSn 高熵合金在 3.5%的 NaCl 溶液中的电化学腐蚀行为,

采用三电极体系,其中试样为工作电极,Pt 片为对电极,饱和甘汞电极为参比电极。首先,测量合金的开路电位(OCP)直至表面状态稳定。然后,在 10⁻²~10⁵ Hz 范围内测量合金的电化学阻抗谱(EIS),振幅为 10 mV。同时,在相对于开路电位±250 mV 范围内测量动电位极化曲线,其扫描速率为 20 mV/min。

2 试验结果与分析

2.1 XRD 分析

铸态 CoCrFeNiSn 高熵合金主要由具有面心立方结构 FCC 的固溶体、金属间化合物 Ni₃Sn₂相和富 Cr 相组成^[17]。图 1 为铸态以及热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的 XRD 图谱。可以看出,经热处理后的 CoCrFeNiSn 高熵合金仍具有与铸态 CoCrFeNiSn 高熵合金相似的相结构。但是,铸态合金中 FCC 固溶体的(111)衍射峰和(200)衍射峰相对强度相差不大。然而,热处理合金中(111)衍射峰远高于(200)衍射峰,表明热处理使得 CoCrFeNiSn 高熵合金中的 FCC 固溶体再结晶晶界面趋向于低能稳定的(111)晶面。

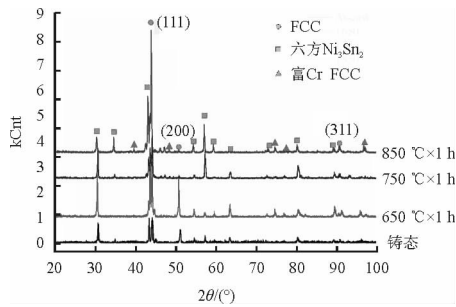


图 1 铸态以及热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的 XRD 图谱^[17]

Fig.1 XRD patterns of as-cast and heat-treated CoCrFeNiSn alloys^[17]

2.2 显微组织

图 2 为 CoCrFeNiSn 高熵合金经不同温度热处理后的显微组织。可见,铸态 CoCrFeNiSn 高熵合金由树枝晶(区域 1)、共晶组织(区域 2)和少量黑色析出相(区域 3)组成。表 1 为热处理前后 CoCrFeNiSn 高熵合金

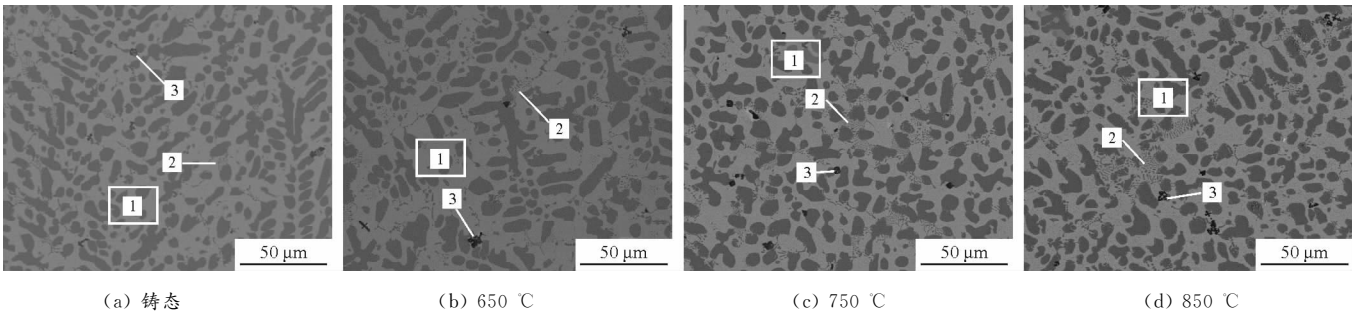


图 2 热处理前后 CoCrFeNiSn 高熵合金的显微组织

Fig.2 SEM images of CoCrFeNiSn alloys before and after heat treatment

的 EDS 分析结果。结合表 1 和图 2 可知,黑色析出相中 Cr 摩尔分数远高于其他元素。结合 XRD 图谱可判断,该相为具有 FCC 结构的富 Cr 相。结合 EDS 和 XRD 结果还可知枝晶区域为富含 Co、Cr、Fe 元素的 FCC 固溶体,枝晶间区域为 Ni、Sn 富集的 Ni_3Sn_2 相,而共晶组织由 FCC 固溶体相和 Ni_3Sn_2 相组成。热处理后,CoCrFeNiSn 高熵合金的相组成保持不变,但热处理使得合金中共晶组织的含量增加。另外,合金中枝晶组织随着热处理温度的升高逐渐断裂,转变为椭球状组织,导致晶粒不断细化。通过表 1 还可发现,热处理后枝晶区域和枝晶间区域的成分差异相对减小,表明热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金中元素分布更均匀。通过定量金相方法可发现热处理前后 CoCrFeNiSn 高熵合金中 Ni_3Sn_2 相含量相差不大。

表 1 热处理前后 CoCrFeNiSn 高熵合金的 EDS 分析结果

Tab.1 EDS analysis results of CoCrFeNiSn alloys before and after heat treatment

合金状态	区域	$x_B/\%$				
		Sn	Ni	Fe	Co	Cr
铸态	枝晶(1号)	2.8	11.2	30.6	27.4	28.0
	枝间(2号)	38.4	29.9	9.4	13.7	8.6
	富 Cr 相(3号)	2.5	1.4	3.4	1.2	91.5
$650\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	枝晶(1号)	2.1	13.2	29.6	27.5	27.6
	枝间(2号)	30.5	30.8	11.4	16.2	11.1
	富 Cr 相(3号)	2.0	2.1	6.4	3.4	86.1
$750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	枝晶(1号)	2.1	13.8	29.2	28.4	26.5
	枝间(2号)	34.8	33.8	9.5	16.3	5.6
	富 Cr 相(3号)	0.2	0.6	6.6	2.5	90.1
$850\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	枝晶(1号)	2.1	13.8	29.3	27.8	27.0
	枝间(2号)	32.1	34.0	10.1	17.0	6.8
	富 Cr 相(3号)	0.9	2.1	6.9	4.0	86.1

2.3 硬度测试

图 3 为热处理前后 CoCrFeNiSn 高熵合金的显微硬度。可见,热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金硬度(HV)高于铸态合金(338.3^[17])。随着热处理温度升高,CoCrFeNiSn 高熵合金的硬度不断增大,在 850 $^{\circ}\text{C}$ 时达到 392.4。这与热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金显微组织的变化有关。对于 CoCrFeNiSn 高熵合金,热处

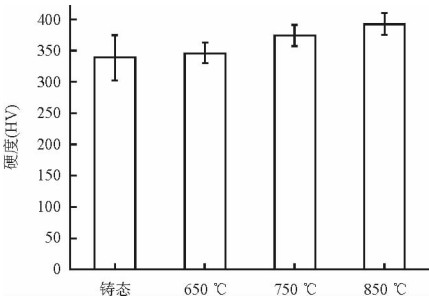


图 3 铸态和热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的显微硬度^[17]

Fig.3 Microhardness of as-cast and heat treated CoCrFeNiSn alloys^[17]

理前后 $\text{Ni}_3\text{Sn}_2/\text{FCC}$ 相占比变化不大,对合金硬度无明显影响。然而,CoCrFeNiSn 合金的组织却随着热处理温度升高而逐渐细化,导致晶界密度显著增大,进而提高其硬度^[18-19]。

2.4 电化学测量

图 4 为不同温度热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的动电位极化曲线。表 2 为 4 种 CoCrFeNiSn 高熵合金的动电位极化曲线拟合后的电化学参数(自腐蚀电位 E_{corr} 和自腐蚀电流密度 J_{corr})。可以看出,650 $^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 和 750 $^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 热处理 CoCrFeNiSn 高熵合金的 J_{corr} 小于铸态,表明热处理可明显改善 CoCrFeNiSn 高熵合金的耐蚀性。从表 2 还可以看出,热处理态 CoCrFeNiSn 高熵合金的耐蚀性随温度的升高呈下降趋势。

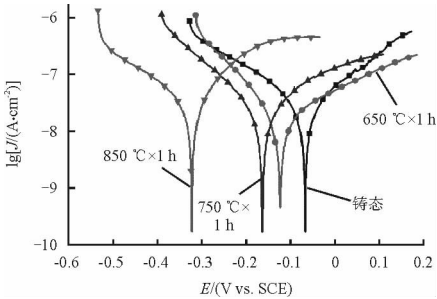


图 4 不同温度热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of CoCrFeNiSn alloys heat treated at different temperatures

表 2 不同温度热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金的电化学参数

Tab.2 Electrochemical parameters of CoCrFeNiSn alloys heat treated at different temperatures

合金	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\times 10^{-8}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2})$
铸态	-0.066	3.65
$650\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	-0.123	1.94
$750\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	-0.162	2.40
$850\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$	-0.321	3.84

图 5 为经不同温度热处理后 CoCrFeNiSn 高熵合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的 EIS 图谱。可见,容抗弧

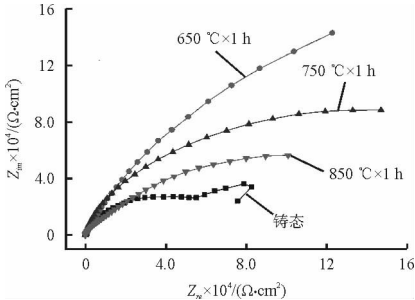


图 5 不同热处理温度下 CoCrFeNiSn 高熵合金的电化学阻抗谱

Fig.5 EIS spectrum of CoCrFeNiSn alloys heat treated at different temperatures

半径由大到小依次为 650、750、850 °C 和铸态 CoCrFeNiSn 合金。由于容抗弧的半径可表征材料腐蚀的难易程度^[20],因此热处理态合金耐蚀性优于铸态合金,但随着热处理温度的升高而不断变差。

图 6 为极化后的试样表面的 SEM 腐蚀形貌。可以看出,在 NaCl 溶液中铸态 CoCrFeNiSn 合金腐蚀的主要区域是由 FCC 固溶体组成的枝晶区域。这是因为 CoCrFeNiSn 合金中 FCC 固溶体与 Ni₃Sn₂ 相易形成腐

蚀电偶,其中 FCC 固溶体作为阳极相优先腐蚀^[16]。热处理后,CoCrFeNiSn 合金表面仍发生电偶腐蚀,但腐蚀程度减弱。这是因为 Ni₃Sn₂/FCC 相的面积比几乎不变,但 FCC 固溶体发生了(111)晶面取向生长的现象,热处理态合金比铸态合金更耐腐蚀。另外,随着热处理温度升高,合金中枝晶组织逐渐断裂转变为椭球状组织,导致 FCC 与 Ni₃Sn₂ 接触面积不断增加,电偶腐蚀更易发生,导致腐蚀不断加剧。

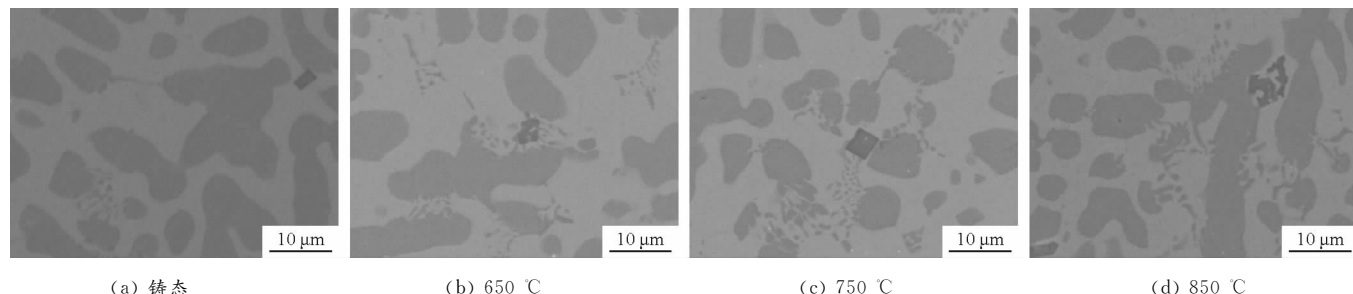


图 6 不同温度热处理的 CoCrFeNiSn 高熵合金极化后的腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphologies of CoCrFeNiSn alloys heat treated at different temperatures after polarization

3 结 论

(1)热处理后,CoCrFeNiSn 合金的相结构没有发生改变,仍由 FCC 固溶体、Ni₃Sn₂ 相和少量的富 Cr 相组成。但随着热处理温度的升高,FCC 固溶体发生了(111)晶面取向生长的现象。

(2)热处理后,CoCrFeNiSn 合金的显微组织仍为典型的树枝晶组织,且在枝晶间分布着片层状的共晶组织和少量的富 Cr 相。但随着热处理温度的升高,共晶组织逐渐增多,树枝晶逐渐断开,导致合金组织不断细化。热处理后,CoCrFeNiSn 合金的硬度明显提高且随着热处理温度的升高而不断增大。

(3)组织结构的变化也使得热处理后 CoCrFeNiSn 合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的耐腐蚀性能得到明显改善。但随着热处理温度的升高,CoCrFeNiSn 合金的腐蚀不断加剧。

参 考 文 献

- [1] YE H J W, LIN S J, CHIN T S, et al. Formation of simple crystal structures in Cu-Co-Ni-Cr-Al-Fe-Ti-V alloys with multiprincipal metallic elements[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2004, A35(8): 2 533-2 536.
- [2] TONG C J, CHEN Y L, YE H J W, et al. Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multi-principal elements[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2005, A36(4): 881-893.
- [3] HUANG P K, YE H J, SHUN T T, et al. Multi-principal-element alloys with improved oxidation and wear resistance for thermal spray coating[J]. Advanced Engineering Materials, 2004, 6(1-2): 74-78.
- [4] 李天昕, 卢一平, 曹志强, 等. 难熔高熵合金在反应堆结构材料领域的机遇与挑战[J]. 金属学报, 2021, 57(1): 42-54.
- [5] LI T X, MIAO J W, GUO E Y, et al. Tungsten-containing high-entropy alloys: A focused review of manufacturing routes, phase selection, mechanical properties, and irradiation resistance properties[J]. Tungsten, 2021(3): 181-196.
- [6] 赵丹. 高熵合金研究综述[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(3): 231-233.
- [7] 贾智轩, 褚延朋, 冯运莉, 等. 高熵合金制备及热处理工艺研究进展[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 17-23.
- [8] YANG X, ZHANG Y. Prediction of high-entropy stabilized solid solution in multi-component alloys[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 132(2-3): 233-238.
- [9] 班煜峰, 刘贵仲, 董鑫涛, 等. 热处理对 AlFeCrCoNiMo 高熵合金微观组织与硬度的影响[J]. 锻压技术, 2017, 42(7): 136-140.
- [10] LU Y P, GAO X Z, JIANG L, et al. Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 143-150.
- [11] LIN C M, TSAI H L, BOR H Y. Effect of aging treatment on microstructure and properties of high-entropy Cu_{0.5}CoCrFeNi alloy[J]. Intermetallics, 2010, 18(6): 1 244-1 250.
- [12] CORNIDE J, CALVO-DAHLBORG M, CHAMBRELAND S, et al. Combined atom probe tomography and tem investigations of CoCrFeNi, CoCrFeNi-Pd($x=0.5, 1.0, 1.5$) and CoCrFeNi-Sn[J]. Acta Physica Polonica Series, 2015, A128(4): 557-561.
- [13] GU X Y, DONG Y N, ZHUANG Y X, et al. Microstructure and mechanical properties of CoCrFeMnNiSn_x high-entropy alloys[J]. Metals and Materials International, 2020, 26: 292-301.
- [14] SUN Z Y, ZHANG J, ZHU J B, et al. Microstructure and the properties of AlFeCoNiCrSn_x high-entropy alloys[J]. Arabian Journal for Science & Engineering, 2014, 39(11): 8 247-8 251.
- [15] LIU L, ZHU J B, ZHANG C, et al. Microstructure and the properties of FeCoCuNiSn_x high entropy alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2012, A548: 64-68.

退火工艺对轧制态 Mg-Al-Ca-Mn-Zn 合金组织和力学性能影响

方德俊^{1,2} 孙有平^{1,2,3} 何江美^{1,2,3} 谢尚恒^{1,2} 朱嘉欣^{1,2}

(1.广西科技大学机械与汽车工程学院;2.广西土方机械协同创新中心;3.广西汽车零部件与整车技术重点实验室)

摘 要 采用金相显微镜(OM)、X射线衍射(XRD)、拉伸试验机 and 扫描电镜(SEM)等,研究了多道次轧制 Mg-1.2Al-0.4Ca-0.3Mn-0.3Zn 镁合金板材在不同退火工艺下的微观组织和力学性能。结果表明,轧制后板材经退火处理后晶粒明显细化,孪晶基本消失;随着退火温度上升,平均晶粒尺寸缓慢增加,并且晶粒尺寸、分布逐渐均匀,适当延长保温时间对晶粒尺寸影响有限;第二相析出物随保温时间的延长而粗化增多,但经 400 ℃退火后析出物明显变少;镁合金板材经退火处理后抗拉强度有所下降,但伸长率增加明显,在 400 ℃退火 180 min 后力学性能理想,伸长率提高至 19.86%,较轧制态提升了 314%,板材抗拉强度略有下降,为 237.2 MPa。

关键词 镁合金;退火处理;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG156

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Annealing Process on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Al-Ca-Mn-Zn Magnesium Alloy Rolled Sheet

Fang Dejun^{1,2}, Sun Youping^{1,2,3}, He Jiangmei^{1,2,3}, Xie Shangheng^{1,2}, Zhu Jiaxin^{1,2}

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology;
2.Guangxi Earthmoving Machinery Collaborative Innovation Center;
3.Guangxi Key Laboratory of Automobile Components and Vehicle Technology)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of Mg-1.2Al-0.4Ca-0.3Mn-0.3Zn magnesium alloy rolled by multi-pass rolling under different annealing temperature and holding time were investigated by optical metallography(OM), X-ray diffraction(XRD), tensile testing machine and scanning electron microscope(SEM). The results show that after annealed treatment, the grain size and the number of twins are decreased greatly. The average grain size in the rolled alloy is increased slowly with the increase of annealing temperature, and the grain size and distribution gradually become uniform, and the effects of holding time prolong on the grain size can be ignored. The second phase is coarsened and increased with increasing in holding time, however the second phase almost disappear at 400 ℃ annealed treatment. After annealing treatment for the magnesium alloy plate at 400 ℃ for 180 min, the tensile strength of the plate is decreased slightly to 237.2 MPa and the elongation is increased significantly to 19.86%, which is 314% higher than the rolled state.

Key Words: Magnesium Alloy, Annealing Process, Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2022-06-17;修改稿收到日期:2022-08-12

基金项目:广西高等学校高水平创新团队资助项目(桂教师范[2019]52号);柳州市科技计划资助项目(2021CBA0102);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2021323)

第一作者简介:方德俊,男,1996年出生,硕士研究生,广西柳州(545006),E-mail:15655362631@163.com

通信作者:孙有平,男,1979年出生,教授,广西柳州(545006),E-mail:syptaiji@126.com

引用格式:方德俊,孙有平,何江美,等.退火工艺对轧制态 Mg-Al-Ca-Mn-Zn 合金组织和力学性能影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(4):488-493.
FANG D J, SUN Y P, HE J M, et al. Effects of annealing process on microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Ca-Mn-Zn magnesium alloy rolled sheet[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):488-493.

[16] MUANGTONG P, RODCHANAROWAN A, CHAYSUWAN D, et al. The corrosion behaviour of CoCrFeNi_x (x = Cu, Al, Sn) high entropy alloy systems in chloride solution[J]. Corrosion Science, 2020, 172: 108 740.
[17] HAO X H, ZHEN J M, ZHAO X C, et al. Effect of Sn addition on the tribological behaviors of CoCrFeNi highentropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 909: 164 657.
[18] 李洪超,王军,袁睿豪,等. AlCoCrFeNi 系高熵合金的强化方法研

究[J].材料导报,2021,35(17):17 010-17 018.
[19] 卢思颖,苗军伟,卢一平.多主元高熵合金的强韧化[J].稀有金属,2021,45(5),530-540.
[20] CHUMLYAKOV Y I, KIREEVA I V, KOROTAEV A D, et al. Mechanisms of plastic deformation, hardening, and fracture in single crystals of nitrogen-containing austenitic stainless steels[J]. Russian Physics Journal, 1996, 39(3): 189-210.

(编辑:刘晨辉)