

Zn 对均匀态 Mg-4Sn 合金组织及耐蚀性能的影响

贾 征¹ 王芷苗¹ 付 丽¹ 胡文义² 胡文鑫³

(1.沈阳大学机械工程学院;2.龙岩学院化学与材料学院;3.白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室)

摘 要 研究了添加 1% 的 Zn 对均匀态 Mg-4Sn 合金微观组织及耐蚀性能的影响。利用 OM、SEM、XRD、析氢失重试验以及极化曲线来分析两种合金的耐蚀性能。结果表明,Zn 细化了 Mg-4Sn 合金的晶粒尺寸,由 179.09 μm 减小到 91.53 μm,有颗粒状和长条状的 Mg₂Sn 相弥散分布于 α-Mg 基体中,Zn 以固溶的方式存在于基体中。析氢失重测试结果表明,Zn 提高了 Mg-4Sn 合金的耐蚀性能,这主要归因于 Mg-4Sn-1Zn 合金晶粒细小,并且 Zn 的添加使 Mg₂Sn 相分布更加均匀。极化曲线测得 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 的自腐蚀电流密度分别为 2.332×10⁻⁵、3.848×10⁻⁶ μA/cm²。因此,Mg-4Sn-1Zn 合金的耐蚀性高于 Mg-4Sn 合金。

关键词 Mg-4Sn 合金;Mg-4Sn-1Zn 合金;均匀化;Mg₂Sn 相;耐蚀性能

中图分类号 TG146.22;TG133+.4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.003 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Effects of Zn Addition on Microstructure and Corrosion Properties of Homogenized Mg-4Sn Alloys

Jia Zheng¹, Wang Zhizhuo¹, Fu Li¹, Hu Wenyi², Hu Wenxin³

(1. College of Mechanical Engineering, Shenyang University;2.College of Chemistry and Materials, Longyan University;3.State Key Laboratory of Bayan Obo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization)

Abstract: The influence of 1% Zn element on microstructure and corrosion resistance of homogenized Mg-4Sn alloy was investigated.The corrosion resistance of alloys was analyzed by OM、SEM、XRD、hydrogen loss experiment and polarization curve.The results indicate that the grain of Mg-4Sn alloy is refined by Zn addition, which is reduced from 179.09 μm to 91.53 μm.The granular and long striped Mg₂Sn phase is dispersedly distributed in α-Mg matrix, and Zn exists in the matrix as a solid solution.Hydrogen loss test results reveal that the corrosion resistance of Mg-4Sn is enhanced by Zn addition, which is mainly attributed to the fine grain of Mg-4Sn-1Zn alloy, leading to the evenly distribution of Mg₂Sn phase.Polarization curves demonstrate that the self-corroded current density of Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn are 2.332×10⁻⁵ μA/cm² and 3.848×10⁻⁶ μA/cm², respectively, indicating the superior corrosion resistance of Mg-4Sn-1Zn alloy to that of Mg-4Sn.

Key Words: Mg-4Sn Alloy, Mg-4Sn-1Zn Alloy, Homogenized, Mg₂Sn Phase, Corrosion Properties

镁合金作为一种绿色环保的轻量化材料,具有极好的铸造性能、阻尼性能以及较高的比强度,因此在交通运输、航空航天、3C 电子等领域具有广阔的应用前景^[1]。但由于镁及其合金化学性质活泼、耐蚀性较差,使其应用和发展受到了限制^[2]。采用热处理、变形工艺以及合金化等方式对镁合金的微观组织进行调控可以提高其耐蚀性能^[3]。庞浩等^[4]研究了热处理工艺对 Mg-Gd-Y-Zr 合金腐蚀行为的影响,发现经过固溶与时效处理,Mg-Gd-Y-Zr 合金的耐蚀性能有所提升,其中

固溶态耐蚀性能最优,腐蚀较轻。张子延等^[5]研究了 Mg-4Sm-3Gd-0.5Zr 合金在 525 ℃×8 h+225 ℃×8 h 的固溶时效处理下合金的微观组织及耐蚀性能的变化。结果表明,经固溶处理后合金的腐蚀速率降低。于孟华等^[6]研究了轧制工艺对 AZ63 镁合金耐蚀性能的影响,发现经累计叠轧后合金的耐蚀性能得到提高。研究表明,合金化可以改善合金的微观组织并通过改变合金晶粒大小以及对第二相数量及其分布的调控从而改善镁合金的耐蚀性能^[7]。相比于其他工艺,合金化具有独特

收稿日期:2023-06-05
基金项目:内蒙古自治区科技计划资助项目(2020GG0175);包头稀土研究院开放基金资助项目(2021H2279);辽宁省教育厅重点资助项目(LJKZ1171);中国博士后基金资助项目(2020M680978);辽宁省博士启动基金资助项目(2020-BS-260);上杭奇迈基金资助项目(2020SHQM05);福建省自然科学基金资助项目(2021J05232)
第一作者简介:贾征,男,1982 年出生,教授,沈阳(110044),E-mail:jz140@163.com
引用格式:贾征,王芷苗,付丽,等. Zn 对均匀态 Mg-4Sn 合金组织及耐蚀性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 025-1 029.
JIA Z, WANG Z Z, FU L, et al. Effects of Zn addition on microstructure and corrosion properties of homogenized Mg-4Sn alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 025-1 029.

的优势,既可以改善镁合金的综合性能同时工艺过程也较为简单。

Sn 在 Mg 中的固溶度较高,有较好的固溶强化以及沉淀强化效果,且价格低廉,引起了广泛关注^[8]。研究表明,添加 Sn 可以提高镁合金的力学性能。孙昭乾等^[9]研究了 Sn 含量对铸态 Mg-Sn 二元合金微观组织及力学性能的影响。结果表明,在室温下 Sn 含量为 12%时,合金具有理想的抗拉强度,为 174 MPa。刘红梅等^[10]研究了 Sn 含量对铸态 Mg-Sn 二元合金的显微组织及力学性能的影响,发现当 Sn 含量不超过 5%时,随着 Sn 含量增加,合金的力学性能得到提高,这是 Sn 元素细晶强化以及 Mg₂Sn 第二相强化的结果。此外,添加 Sn 还可以改善镁合金的耐蚀性能。HA H Y 等^[11]研究了 Sn 对挤压态 Mg-5Sn 合金耐蚀性能的影响,并分别对 Mg 以及 Mg-5Sn 的腐蚀形貌进行观察。结果表明,两种材料均发生了点蚀,但纯 Mg 点蚀更加严重。Zn 是 Mg 合金化的常见元素,起到固溶强化和沉淀强化的作用。添加 Zn 可以减少镁合金中杂质元素引起的腐蚀从而改善镁合金的耐蚀性能,但当 Zn 含量高于 2.5%时合金的耐蚀性降低,因此 Zn 含量应该控制在 2%以下^[12]。HA H Y 等^[13]研究了 1%~4%的 Zn 对挤压态 Mg-5Sn 合金耐蚀性能的影响。发现在 20℃浸泡 25 d 的条件下,挤压态 Mg-5Sn-2Zn 合金腐蚀速率最低。

本研究采用合金化的方式,选取均匀态 Mg-4Sn 合金作为基底,通过浸泡试验、析氢试验以及极化曲线测试研究添加 1%的 Zn 对均匀态 Mg-4Sn 合金微观组织及耐蚀性能的影响,旨在为提高均匀态 Mg-4Sn 合金的耐蚀性能提供参考。

1 试验过程

采用 S62-12-9 型坩埚式电阻炉,分别熔炼名义成分为 Mg-4Sn(T4)以及 Mg-4Sn-1Zn(TZ41)的镁合金。采用工业纯 Mg(99.9%,质量分数,下同)、纯 Sn(99.9%)、纯 Zn(99.9%)为原材料,按照合金的设计成分,利用电子秤分别称量纯金属原料。对坩埚进行预热处理,将纯 Mg 放入预热后的坩埚中并升温至 750℃,待其完全熔化后,降温至 710℃,扒渣后依次加入纯 Sn 块、纯 Zn 块,搅拌 2~3 min,静置 20 min,在 CO₂与 SF₆[φ(CO₂):φ(SF₆)=100:1]混合气体的保护下浇注到尺寸为 φ65 mm×240 mm 的金属型中,冷却至室温并获得铸态镁合金试样。对铸态镁合金进行 ICP-AES 检测获得合金的化学成分,结果见表 1。利用箱式电阻炉(SX2-6-16A)加热至 400℃,保温 12 h,随后取出立即水淬,获得均匀态镁合金铸锭。

表 1 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 合金的实际化学成分

Tab.1 Actual chemical composition of Mg-4Sn and

Mg-4Sn-1Zn alloys			%
合 金	w _B		
	Sn	Zn	Mg
Mg-4Sn	3.86	0	余量
Mg-4Sn-1Zn	4.30	0.92	余量

利用线切割在均匀态镁合金铸锭的中心部位截取 10 mm×10 mm×10 mm 试样,见图 1。利用砂纸将试样打磨至 5000 号且划痕方向保持一致,利用津岛 700 型 X 射线衍射分析仪(XRD)对打磨后的合金进行物相检测;对试样表面进行机械抛光,直至表面无划痕,使用体积分数为 4%的硝酸溶液对合金腐蚀 1~2 s,直至合金表面出现明显晶界,并利用 OLYMPUS SC50 金相显微镜来观察合金的晶粒形貌;利用 S4800 型扫描电镜(SEM)观察第二相的数量、形貌以及分布,利用附带的能谱仪(EDS)来检测物相组成。

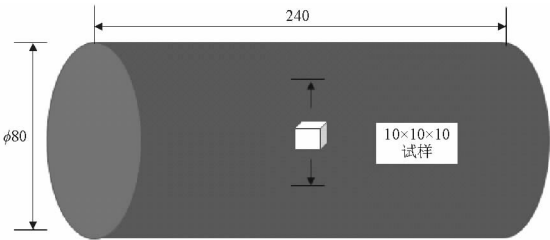


图 1 合金的取样位置

Fig.1 Sampling position of alloy

析氢失重试验具体过程为:首先利用砂纸将试样 6 个表面打磨至 5000 号程度,将打磨完成的待测试样浸入质量分数为 3.5%的 NaCl 水溶液中,浸泡时间为 24 h,同时利用滴定管收集析出的氢气,每间隔 2 h 记录一次析氢量。腐蚀结束后,将试样放入铬酸溶液中,利用超声波清洗 10 min,烘干后测量其质量。分别计算合金的失重速率 v_w 及析氢速率 v_H :

$$v_w = \frac{8.76 \times 104 \Delta g}{At\rho} \tag{1}$$

$$v_H = \frac{8.76 \times 104 \Delta VM}{At\rho} \tag{2}$$

式中,Δg 为合金腐蚀前后的质量差,g;ΔV 为腐蚀过程中氢气析出总量,mL;M 为氢气产生速率与合金质量损失之间的关系,其数值为 0.001 083 g/mL;A 为试样表面积,cm²;t 为浸泡时间,h;ρ 为试样密度,g/cm³。

利 CHI660E 型电化学工作站对合金的极化曲线进行检测,其中饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极,试样为工作电极。为保证数据的准确性,需进行 3 次平行试验,最终通过拟合数据得到合金的自腐蚀电位及自腐蚀电流密度。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图 2 和图 3 分别为均匀态 Mg-4Sn 以及 Mg-4Sn-1Zn 合金的组织及 EDS 分析。可以看出,两种合金的平均晶粒尺寸分别为 179.09 和 91.53 μm ,Mg-4Sn-1Zn 合金晶粒细化明显,比 Mg-4Sn 合金减小了 48.8%,见图 2a 和图 2c。这表明 1% 的 Zn 添加起到了晶粒细化的

的作用,使原本粗大的枝晶转变为等轴晶,这与 LU L 等^[14]的研究结果相符。图 2b 和图 2d 中可以观察到白色块状与长条状的第二相粒子,两种合金分别由黑色的 $\alpha\text{-Mg}$ 基体以及白色第二相组成。EDS 能谱分析表明在 Mg-4Sn 合金中存在颗粒状以及长条状的 Mg_2Sn 相。加入 1% 的 Zn 后,第二相分布更加均匀,第二相颗粒由长条状变成颗粒状弥散分布于 Mg-4Sn-1Zn 合金的晶界和晶内。

图 4 为均匀态 Mg-4Sn 以及 Mg-4Sn-1Zn 合金的

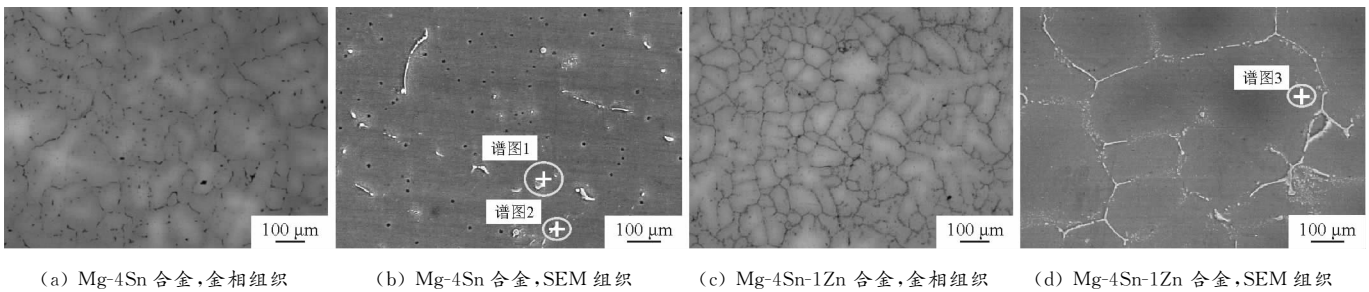


图 2 均匀态 Mg-4Sn 和 Mg-4Sn-1Zn 的金相及 SEM 组织

Fig.2 Microstructure and SEM images of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloys

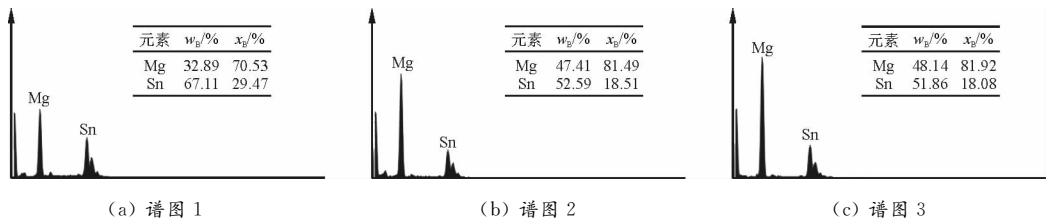


图 3 均匀态 Mg-4Sn 和 Mg-4Sn-1Zn 的 EDS 分析

Fig.3 EDS analysis of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloys

XRD 结果。在两种合金中均检测到 $\alpha\text{-Mg}$ 以及 Mg_2Sn 金属间化合物,见图 4a。在均匀态 Mg-4Sn 合金中,由于 Sn 在镁合金中的最大固溶度为 14.5%^[15],因此只有少量 Sn 与 Mg 形成金属间化合物, Mg_2Sn 数量较少,衍射峰较弱。随着 1% 的 Zn 添加,并未出现新相,这可能与 Zn 的固溶度有关。Zn 在 Mg 中的极限固溶度为 6.2%^[16],且加入的 Zn 较少,因此 Zn 主要以固溶形式存在于 Mg 合金基体中^[17]。随着 Zn 的添加, $\alpha\text{-Mg}$ 衍射峰减弱且观察到明显的 Mg_2Sn 衍射峰,见图 4b,这

说明 Zn 的添加加快了 Mg_2Sn 第二相的析出, Mg_2Sn 第二相的数量明显增加。

2.2 耐蚀性能

图 5 为室温下均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 合金在 3.5% 的 NaCl 水溶液中浸泡 24 h 后,氢气析出量随时间的变化以及两种合金的平均析氢、失重腐蚀速率。随着时间延长,Mg-4Sn 合金的氢气析出量均匀上升,见图 5a,说明每个时间间隔内 Mg-4Sn 合金的氢气析出量几乎相等。添加 1% 的 Zn 后,氢气析出量明显减

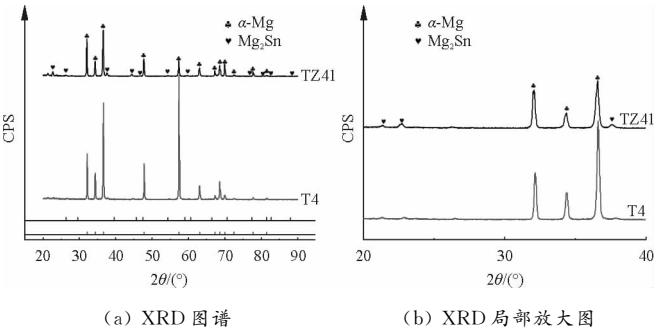


图 4 均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 的 XRD 分析

Fig.4 XRD patterns of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloy

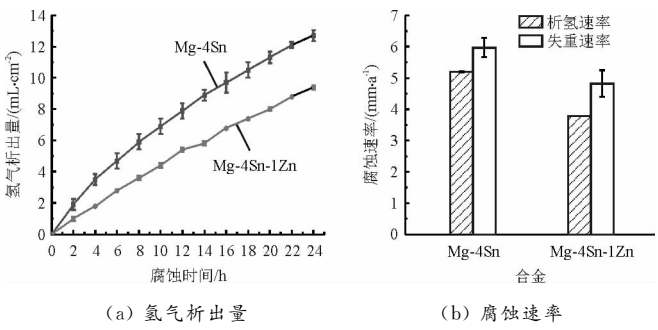


图 5 均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 的析氢失重分析

Fig.5 Weight loss and hydrogen evolution analysis of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloy

少,说明添加 Zn 改善了 Mg-4Sn 合金的耐蚀性能,这可能与 Zn 引起的晶粒细化作用有关。Zn 细化了 Mg-4Sn 合金的晶粒尺寸,导致 Mg-4Sn-1Zn 合金的晶界数量增多,而晶界对于腐蚀的扩展起到了阻碍的作用,因此 Mg-4Sn-1Zn 合金耐蚀性更佳。从图 5b 可以看出,两种合金的平均析氢及失重腐蚀速率分别为 5.194 mm/a、3.775 mm/a 和 6.398 mm/a、4.221 mm/a,随着 Zn 的添加析氢及失重腐蚀速率分别下降了 27.3%、34.1%,即 1% 的 Zn 添加提高了 Mg-4Sn 合金的耐蚀性能。

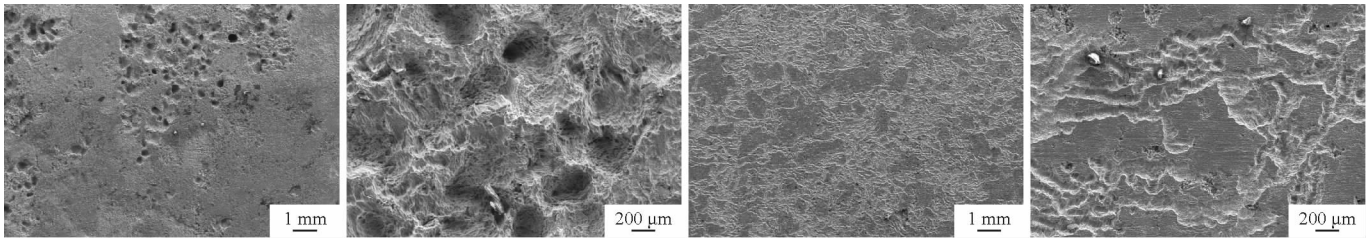


图 6 均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 合金 SEM 腐蚀形貌
Fig.6 SEM corrosion morphologies of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloy

而减少了局部电偶腐蚀状况。

图 7 为两种合金的动电位极化曲线,拟合后得出两种合金的自腐蚀电位(E_{corr})、自腐蚀电流密度(J_{corr})以及电化学腐蚀速率($P_i=22.85 J_{\text{corr}}$),见表 2。研究表明,Zn 的添加可以提高合金的自腐蚀电位,减小自腐蚀电流密度,从而改善合金的耐蚀性能^[18]。在本试验中 Zn 添加后合金的自腐蚀电流密度由 $2.332 \times 10^{-5} \mu\text{m}/\text{cm}^2$ 减小到 $3.848 \times 10^{-6} \mu\text{m}/\text{cm}^2$,自腐蚀电位由 -1.482 V 提升到 -1.454 V ,见图 7b。因此,Mg-4Sn-1Zn 合金的耐蚀性能优于 Mg-4Sn,这与宏观析氢失重试验结果相一致。

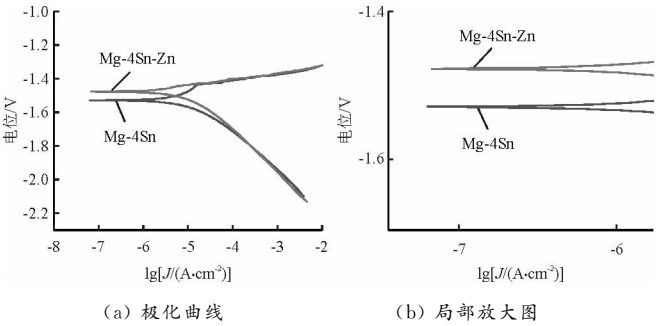


图 7 均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 动电位极化曲线
Fig.7 Dynamic potential polarization curves of homogeneous Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn alloy

表 2 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 在 3.5% 的 NaCl 溶液中的自腐蚀电流、自腐蚀电位及电化学腐蚀速率			
Tab.2 Self-corrosion current and potential as well as electrochemical corrosion rate of Mg-4Sn and Mg-4Sn-1Zn in 3.5% solution			
合金	E_{corr}/V	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$P_i/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$
Mg-4Sn	-1.482	2.332×10^{-5}	0.533
Mg-4Sn-1Zn	-1.454	3.848×10^{-6}	0.088

图 6 为均匀态 Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 浸泡 24 h 并利用超声波清洗后的表面形貌。可以看出,Mg-4Sn 合金表面均发生了严重的局部腐蚀,且延深度方向腐蚀坑较深、数量较多,见图 6a 和图 6b,这可能与合金中第二相分布不均匀造成局部的电偶腐蚀有关。添加 1% 的 Zn 后,合金的表面形貌得到改善,见图 6c 和图 6d,可见 Mg-4Sn-1Zn 合金表面只有轻微的丝状腐蚀,合金表面较为光滑,与 Mg-4Sn 相比蚀坑较少,腐蚀程度较浅,这可能是因为 Zn 的添加使第二相颗粒变得细小均匀,从

3 结 论

- (1)在均匀态 Mg-4Sn 合金中添加 1% 的 Zn 可以起到细化晶粒的作用,晶粒大小由 $179.09 \mu\text{m}$ 下降到 $91.53 \mu\text{m}$;均匀态 Mg-4Sn 以及 Mg-4Sn-1Zn 合金主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 基体与 Mg_2Sn 相构成,在 Mg-4Sn-1Zn 合金中 Zn 元素主要以固溶态的形式存在于 $\alpha\text{-Mg}$ 基体中。
- (2)添加 1% 的 Zn 提高了均匀态 Mg-4Sn 合金的耐蚀性能,Mg-4Sn、Mg-4Sn-1Zn 合金的析氢、失重速率分别为: 5.194 mm/a、3.775 mm/a 和 6.398 mm/a、4.221 mm/a。
- (3)添加 Zn 提高了 Mg-4Sn 合金的自腐蚀电位,减小了 Mg-4Sn 合金的自腐蚀电流密度,从而提高合金的耐蚀性能。

参 考 文 献

[1] ZHUO X R, ZHAO L Y, GAO W, et al.Recent progress of Mg-Sn based alloys: The relationship between aging response and mechanical performance[J].Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 186-211.

[2] 张弛,王俊升,李鑫,等.耐腐蚀镁合金的成分设计方法研究进展[J].航空制造技术, 2023, 66(6): 85-98.

[3] 师慧娜,贺俊光,刘九巴,等.添加 Zn、Zr、Dy 元素对生物镁合金耐蚀性能和力学性能的影响(英文)[J].稀有金属材料与工程, 2021, 50(11): 3 871-3 878.

[4] 庞浩,李全安,陈晓亚,等.热处理对 Mg-Gd-Y-Zr 合金组织、性能和腐蚀行为的影响[J].中国稀土学报, 2023, 41(2): 331-339.

[5] 张子延,陈君,陈晓亚,等.固溶时效处理对 Mg-4Sm-3Gd-0.5Zr 合金显微组织和耐蚀性能的影响[J].金属热处理, 2022, 47(4): 10-16.

[6] 于孟华,郭俊卿,陈拂晓,等.累积叠轧工艺对 AZ63 镁合金耐蚀性能的影响[J].塑性工程学报, 2019, 26(6): 90-97.

Co 对铸造镍基高温合金影响研究进展

靳晓磊^{1,2} 赵 菲¹ 郝宪朝² 邢炜伟² 王 旻² 马颖澈²

(1.太原科技大学材料科学与工程学院; 2.中国科学院金属研究所,中国科学院核用材料与安全评价重点实验室)

摘 要 镍基高温合金拥有优异的热强性和服役稳定性,是使用最广泛的高温合金之一。镍基合金发展初期便加入 Co 元素来改善合金性能,但目前 Co 在镍基合金中的作用仍存在争议。通过汇总分析 Co 对镍基高温合金显微组织、 γ' 相析出特征、组织稳定性及力学性能的影响,从直接作用和间接作用两个角度对 Co 作用机制进行了探讨,并讨论节 Co 和代 Co 的可能性,以期为新型镍基高温合金的研发以及含钴镍基高温合金的应用提供参考。

关键词 镍基高温合金;钴;稳定性;持久蠕变性能

中图分类号 TG132.3;TG146.1⁺5 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.08.004 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

Research Progress in Effects of Cobalt on Cast Nickel-based Alloys

Jin Xiaolei^{1,2}, Zhao Fei¹, Hao Xianchao², Xing Weiwei², Wang Min², Ma Yingche²

(1.School of Materials Science and Engineering,Taiyuan University of Science and Technology; 2.Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Institute of Metal Research)

Abstract: Nickel-based alloys possess excellent thermal strength and service stability, which are the widely used for high temperature applications.Cobalt was initially added in the development of nickel-based alloys to improve alloy properties. However, the role of Co in nickel-based alloys is still controversial.Effects of Co on microstructure, precipitation characteristics of the γ' phase, stability and mechanical properties of nickel-based alloys were investigated, and Co action mechanism was analyzed from the aspects of effects and indirect effects.Moreover,the possibility of saving Co and replacing Co was explored, aimng to provide theoretical basis for the development of novel nickel-based alloys and application of nickel-based alloy containing Co.

Key Words: Nickel-based Alloys,Cobalt,Stability,Persistent Creep Properties

为进一步提高燃烧效率、降低整机质量、减少碳排放量,先进航空发动机涡轮前进气和燃气轮机透平温度

收稿日期:2022-09-30;修改稿收到日期:2022-11-30
基金项目:国家科技重大专项资助项目(J2019-VI-0004-0118);中国科学院核用材料与安全评价重点实验室开放课题资助项目(2021NMSAKF02)
第一作者简介:靳晓磊,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:951786426@qq.com
通信作者:赵菲,女,1982 年出生,副教授,太原(030024),E-mail:2012020@tyust.edu.cn
引用格式:靳晓磊,赵菲,郝宪朝,等. Co 对铸造镍基高温合金影响研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(8):1 029-1 035.
JIN X L, ZHAO F, HAO X C, et al. Research progress in effects of cobalt on cast nickel-based alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(8):1 029-1 035.

[7] 刘玉项.合金化对镁电化学腐蚀速率影响的研究进展[J].稀有金属材料与工程, 2021, 50(1): 361-372.

[8] 刘国军,董洁,荣建. Mg-5Sn 系镁合金研究进展[J].热加工工艺, 2015, 44(14): 33-36.

[9] 孙昭乾,张奎,李兴刚,等.铸态 Mg-xSn($x=2,5,8,10,12$)合金的组织及力学性能[J].材料热处理学报, 2020, 41(9): 103-109.

[10] 刘红梅,陈云贵,唐永柏,等.铸态 Mg-Sn 二元合金的显微组织与力学性能[J].四川大学学报(工程科学版), 2006(2): 90-94.

[11] HA H Y,KANG J Y,YANG J,et al. Role of Sn in corrosion and passive behavior of extruded Mg-5Sn alloy[J]. Corrosion Science, 2015,102: 355-362.

[12] 曾荣昌,崔蓝月,柯伟.医用镁合金:成分、组织及腐蚀[J].金属学报, 2018, 54(9): 1 215-1 235.

[13] HA H Y,KANG J Y,YANG J,et al. Role of hydrogen evolution

rate in determining the corrosion rate of extruded Mg-5Sn-(1-4)Zn alloys[J]. Corrosion Science, 204, 89: 275-285.

[14] LU L,DAHLE A K, TAYLOR J A,et al. Theoretical and practical considerations of grain refinement of Mg-Al alloys[J]. Materials Science Forum, 2005, 518: 488-489.

[15] 石章智,张敏,黄雪飞等.可时效强化 Mg-Sn 基合金的研究进展[J].金属学报, 2019, 55(10): 1 231-1 242.

[16] 陈建波,冯凯,陈娟娟,等.Mg-Zn-Al 镁合金研究现状[J].中国铸造装备与技术, 2011(4): 1-5.

[17] 赖林,张奎,李兴刚,等.Zn 含量对 Mg-Mn-Zn 合金显微组织和力学性能的影响[J].稀有金属, 2016, 40(6): 552-558.

[18] 冯明明,张代东,房大庆.Zn 对 Mg-RE-Mn 合金组织和耐腐蚀性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2014, 34(12): 1 332-1 336.

(编辑:彭瑾)