

Mg-4Al-xNd 铸造合金的组织与性能研究

雷 宇^{1,2} 黄正华¹ 李 潇^{1,2} 刘思琦^{1,2} 张忠明² 徐春杰² 赵 虎¹ 卢枣伦³ 叶荣群³ 李卫荣⁴
[1.广东省科学院新材料研究所广东省金属强韧化技术与应用重点实验室,粤港轻合金先进制造技术联合研发中心; 2.西安理工大学材料科学与工程学院; 3.嘉瑞科技(惠州)有限公司; 4.东莞宜安科技股份有限公司]

摘 要 采用金属型重力铸造获得 Mg-4Al-xNd($x=0,1,2,3$,质量分数,%)合金试样,采用光学金相显微镜、扫描电镜和 X 射线衍射仪分析了合金的显微组织和相组成,并测试了其拉伸力学性能、硬度和导热性能。结果表明,Mg-4Al 铸造合金的微观组织主要由 α -Mg 和 β -Mg₁₇Al₁₂ 组成;添加 1% 的 Nd 后,形成针状和树突状 Al₁₁Nd₃ 新相;添加 2%~3% 的 Nd 后,出现另一颗粒状新相 Al₂Nd, β -Mg₁₇Al₁₂ 数量减少至完全消失。添加 Nd 可以有效提高合金的力学性能和导热性能,其中 Mg-4Al-2Nd 合金表现出最佳的综合性能,室温抗拉强度、伸长率、硬度(HV)和导热系数分别为 209 MPa、15.0%、48.8 和 69.5 W/(m·K),与 Mg-4Al 合金相比分别提高了 9%、30%、6% 和 13%。

关键词 Mg-4Al-xNd 铸造合金;显微组织;力学性能;导热性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.015 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Microstructures and Properties of Mg-4Al-xNd Cast Alloys

Lei Yu^{1,2}, Huang Zhenghua¹, Li Xiao^{1,2}, Liu Siqi^{1,2}, Zhang Zhongming²,
Xu Chunjie², Zhao Hu¹, Lu Zaolun³, Ye Rongqun³, Li Weirong⁴
[1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Metal Toughening Technology and Application, Guangdong-Hongkong Joint Research and Development Center on Advanced Manufacturing Technology for Light Alloys, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences;
2.School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology;
3.KaShui Technology (Huizhou) Co., Ltd.; 4.Dongguan EONTEC Co., Ltd.]

Abstract: Mg-4Al-xNd ($x=0, 1, 2, 3$) alloy samples were prepared by permanent mold casting. The microstructures and phase compositions were analyzed by optical metallographic microscope, scanning electron microscope and X-ray diffraction. Meanwhile, the tensile properties, hardness and thermal conductivity of the alloy prepared were tested. The results reveal that as-cast microstructure of Mg-4Al alloy is mainly composed of α -Mg and β -Mg₁₇Al₁₂. After adding 1% Nd, acicular and dendritic Al₁₁Nd₃ phase can be obserevd. After adding 2%~3% Nd, another granular new phase Al₂Nd appears, meanwhile the amount of β -Mg₁₇Al₁₂ phase is decreased to completely disappear. Addition of Nd can effectively improve the mechanical properties and thermal properties of Mg-4Al alloy. Mg-4Al-2Nd alloy exhibits the acceptable comprehensive performance, whose tensile strength, elongation, vickers hardness and thermal conductivity reach up to 209 MPa, 15.0% and 48.8 and 69.5 W/(m·K) at room temperature, with an increase by 9%, 30%, 6% and 13%, respectively, compared with those of Mg-4Al alloy.

Key Words: Mg-4Al-xNd Cast Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Thermal Conductivity

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、导热性好、尺寸稳定性高等特点,在汽车、通讯电子、航空航天等领域得到广泛应用^[1]。新能源汽车和 5G 通讯关键部件的轻量化对镁合金的性能提出了更高的要求,现有镁合金材料不能完全满足其需求,因此有必要开展高强、高导热稀土镁合金的相关研究。Mg-Al 系合金是最常用的商用镁合金体系,但其存在室温及高温力学性能不足、耐蚀性和导热性能差等缺点^[2,3],使其应用受到限

收稿日期:2021-01-25;修改稿收到日期:2021-03-12
基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010186002);广东省科学院发展专项资金资助项目(2019GDASYL-0203002,2020GDASYL-20200103137);东莞市核心技术攻关重点资助项目(2019622134013);西安市重大科技成果转化及产业化资助项目(20GXSF0003)
第一作者简介:雷宇,男,1995 年出生,硕士研究生,西安(710048),E-mail:leiyuol@yeah.net
通信作者:黄正华,男,1978 年出生,教授级高级工程师,广州(510650),E-mail:zhhuang@gimp.gd.cn
引用格式:雷宇,黄正华,李潇,等. Mg-4Al-xNd 铸造合金的组织与性能研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 133-1 137.
LEI Y, HUANG Z H, LI X, et al. Microstructures and properties of Mg-4Al-xNd cast alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 133-1 137.

制。在镁合金中添加稀土可以净化熔体,提高合金的力学性能、耐腐蚀性能、摩擦磨损性能^[4,5]。Mg-4Al-*x*RE 合金是常用的 Mg-Al 系镁合金,对其组织及性能已有大量研究^[6~10],但大多集中于混合稀土或单一 La、Ce 对其组织、力学性能和耐蚀性能的影响,而对单一稀土元素 Nd 和导热相关的研究报道较少。为此,本课题采用金属型重力铸造获得 Mg-4Al-*x*Nd(*x*=0、1、2、3,质量分数,%)合金,研究不同 Nd 含量对合金组织、力学性能和导热性能的影响,为高强高导热镁合金的开发提供参考。

1 试样制备与方法

试验原料采用工业纯 Mg(质量分数为 99.99%)、纯 Al(质量分数为 99.99%)和 Mg-30Nd(质量分数,下同)中间合金。首先在镁合金熔炼炉中加入 Mg 锭,并通入 CO₂+0.2% 的 SF₆(体积分数)混合气体保护,升温至 700 ℃。待 Mg 锭完全熔化后,依次加入 Al 锭和 Mg-30Nd 中间合金锭,完全熔化后升温至 720 ℃,在 1.5 h 内搅拌两次,以保证成分均匀。随后添加精炼剂进行精炼,升温至 740 ℃并静置 20 min。随后降温至 700 ℃,将熔体浇入预热至 200 ℃的楔形金属型模具中。待熔体冷却成形后,开模取出铸件并水淬。

采用等离子体原子发射光谱仪(ICP)测得 4 个合金试样的成分见表 1。金相试样、拉伸试样和导热试样皆从铸件中下部切取,腐蚀剂选用体积分数为 5%的硝

酸酒精溶液,然后使用 Leica DMI 3000M 型光学金相显微镜(OM)和 JEOL HXA-8100 型扫描电镜(SEM)进行显微组织和 EDS 分析;使用 ImageJ 软件估测合金的第二相面积分数;在采用铜靶的 SmartLab 型 X 射线衍射仪(XRD)上进行物相分析。使用 DNS200 型万能材料试验机进行室温和高温(150 ℃)拉伸试验,进行高温拉伸试验前试样在该温度保温 10 min,拉伸速度为 2 mm/min;采用 MH-5L 型显微硬度仪进行维氏硬度(HV)测试,载荷为 9.8 N,加载时间为 20 s;采用 DR-PL-2C 型导热系数测试仪测试合金导热性能。

表 1 Mg-4Al-*x*Nd 铸造合金实测的化学成分

合金	w _B		
	Al	Nd	Mg
Mg-4Al	4.00	—	余量
Mg-4Al-1Nd	3.93	0.99	余量
Mg-4Al-2Nd	3.74	2.03	余量
Mg-4Al-3Nd	3.89	2.97	余量

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 和图 2 分别为 Mg-4Al-*x*Nd 合金第二相显微组织及其面积分数。从图 2 可以看出,Mg-4Al 二元合金中第二相很少,第二相面积分数仅为 1.9%。添加 Nd 后,第二相数量随着 Nd 含量的增加而增加。Mg-4Al-3Nd 合金第二相最多,第二相面积分数达到 12.3%。另

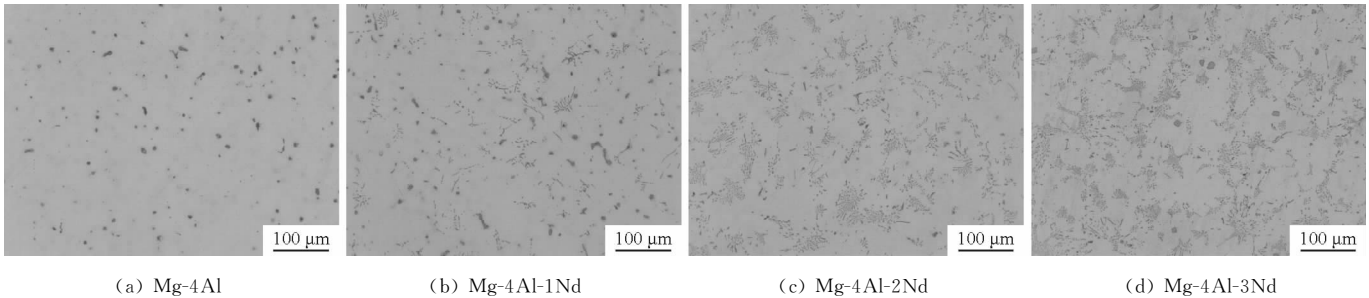


图 1 Mg-4Al-*x*Nd 铸造合金的金相组织
Fig.1 OM of Mg-4Al-*x*Nd cast alloys

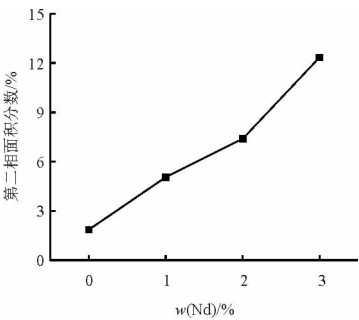


图 2 Mg-4Al-*x*Nd 铸造合金的第二相面积分数
Fig.2 Proportion of second phase area in Mg-4Al-*x*Nd cast alloys

外从图 1 可以看出,添加合金晶粒尺寸随着 Nd 含量的增加逐渐减小。

图 3 为 Mg-4Al-*x*Nd 合金试样的 XRD 图。可见,Mg-4Al 合金的 XRD 图谱主要由 α -Mg 和 β -Mg₁₇Al₁₂ 两种相组成;添加 1% 的 Nd 后,除上述两种相外,还观察到 Al₁₁Nd₃ 相;添加 2% 的 Nd 后,同时出现 Al₂Nd 相;添加 3% 的 Nd 后, β -Mg₁₇Al₁₂ 相消失,合金主要由 α -Mg、Al₂Nd、Al₁₁Nd₃ 3 种相组成。XRD 结果表明,在 Mg-4Al 合金中添加 Nd 后没有形成 Mg-Nd 二元相或 Mg-Al-Nd 三元相。

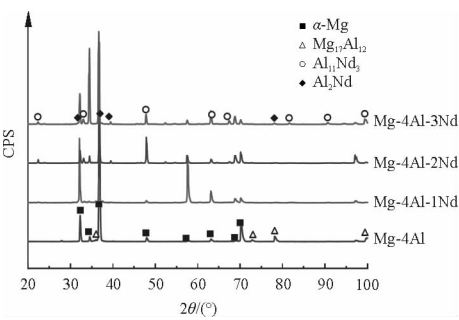


图 3 Mg-4Al-xNd 铸造合金的 XRD 谱

Fig.3 XRD patterns of Mg-4Al-xNd cast alloys

图 4 为 Mg-4Al-xNd 合金在扫描电镜下的第二相形貌。通过 EDS 在图 4 标记了合金中的点以分析第二相,结果见表 2,*a* 为灰色的形状不规则相,*b* 为亮色的针状相,*c* 为亮色的颗粒状相。结合 XRD 分析结果及文献[10,11]可知,图 4 中 *a* 处为 β -Mg₁₇Al₁₂,*b* 处为 Al₁₁Nd₃相,*c* 处为 Al₂Nd 相。可以认为,Mg-4Al 二元

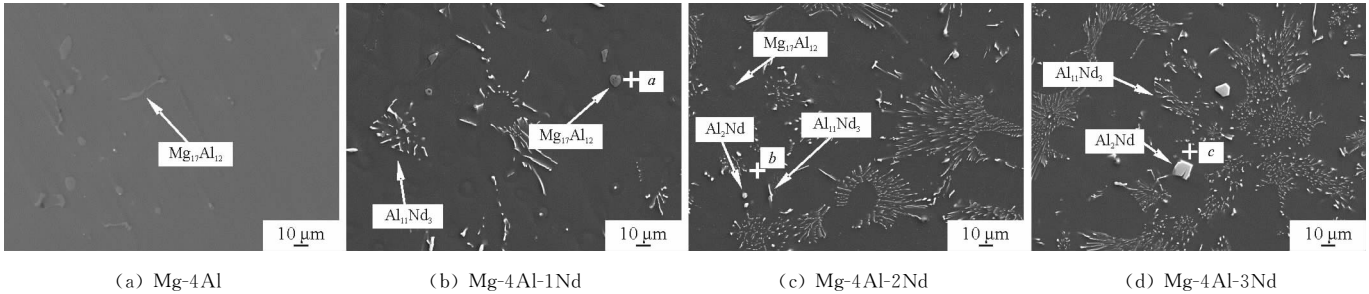


图 4 Mg-4Al-xNd 铸造合金的第二相形貌及 EDS 取点

Fig.4 Second phase morphologies and EDS point analysis of Mg-4Al-xNd cast alloys

表 2 Mg-4Al-xNd 铸造合金的 EDS 结果

Tab.2 EDS results of Mg-4Al-xNd cast alloys %

点位置	x B		
	Mg	Al	Nd
<i>a</i>	72.73	27.25	0.02
<i>b</i>	71.95	22.41	5.64
<i>c</i>	13.98	57.55	28.47

2.2 力学性能

图 5 为 Mg-4Al-xNd 合金的力学性能。可以看出。室温下 Mg-4Al 合金的抗拉强度(σ_b)和伸长率(δ)分别为 191 MPa 和 11.5%,添加 Nd 后抗拉强度提高,随着 Nd 含量增加,合金的室温抗拉强度先上升然后趋于平缓,伸长率逐步上升,其中 Mg-4Al-2Nd 合金的抗拉强度最高,为 209 MPa,与 Mg-4Al 二元合金相比提高了 9%;Mg-4Al-3Nd 合金的伸长率为 17.5%,与 Mg-4Al 二元合金相比提高了 52%。说明 Nd 含量从 2%到 3%时,对合金的抗拉强度影响不大,但是仍会明显提高其伸长率。合金晶粒细化和弥散分布的细小第二相可以提高其强度,同时晶粒尺寸的减少也会提高合金的塑性^[12]。随着 Nd 含量提高,Mg-4Al-xNd 合金晶粒尺寸

合金组织主要由 α -Mg 基体和形状不规则的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相组成;添加 Nd 后,Mg-4Al-1Nd 合金组织中形状不规则的 β -Mg₁₇Al₁₂ 减少,可观察到弥散分布的针状 Al₁₁Nd₃相;当 Nd 添加量为 2%时,组织中仍有极少的 β -Mg₁₇Al₁₂相,Al₁₁Nd₃相数量增加并且首次出现颗粒状的 Al₂Nd 相;Mg-4Al-3Nd 合金组织中 β -Mg₁₇Al₁₂ 相完全消失,Al₁₁Nd₃相和 Al₂Nd 相数量进一步增多且呈网状弥散分布。形成金属间相的难易程度与元素之间的电负性差有关,电负性差越大,越易形成金属间相^[10]。Mg、Al 和 Nd 的电负性分别为 -1.31、-1.61 和 -1.14,Al-Nd 之间的电负性差更大;另外,Al-Nd 相的熔点高于 Mg₁₇Al₁₂^[11],在凝固过程中 Al-Nd 相先于 Mg₁₇Al₁₂析出。因此 Nd 的添加可以抑制 Mg₁₇Al₁₂析出,因此随着 Nd 含量的增加,Mg-4Al-xNd 合金中 β -Mg₁₇Al₁₂相减少直至完全消失,Al₁₁Nd₃和 Al₂Nd 相增多。

越来越小,单位体积的晶界越多,对位错运动的阻碍增加,提高了合金的强度和塑性。同时随着 Nd 含量增加,合金中的第二相数量增多,尤其是呈网状弥散分布的 Al₁₁Nd₃,起到了阻碍晶界滑移和钉扎位错的作用,也会提高合金强度。Nd 含量为 3%时,合金中第二相数量增多,但同时粗大的 Al₂Nd 相增多,不能起到钉扎位错的作用,并且易成为合金断裂的裂纹源,所以 Mg-4Al-3Nd合金的抗拉强度与 Mg-4Al-2Nd 合金相比没有提升。

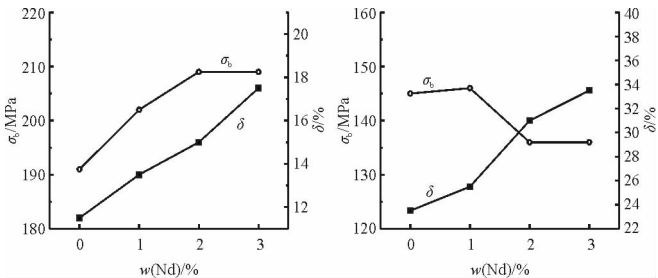


图 5 Mg-4Al-xNd 铸造合金的室温、高温力学性能

Fig.5 Mechanical properties of Mg-4Al-xNd cast alloys

高温下 Mg-4Al 合金的抗拉强度和伸长率分别为 145 MPa 和 23.5%，添加 Nd 后强度降低，塑性提高，随着 Nd 含量增多，合金的高温抗拉强度呈下降趋势，伸长率提高。伸长率变化与室温时的变化情况类似，Mg-4Al-1Nd 合金抗拉强度为 146 MPa，与 Mg-4Al 二元合金基本一致，但 Mg-4Al-2Nd 和 Mg-4Al-3Nd 合金的抗拉强度均为 136 MPa，Mg-4Al-3Nd 合金伸长率为 33.5%，较 Mg-4Al 二元合金提高 42%。高温下合金更依赖晶界强化，尽管分布于晶界的 $\text{Al}_{11}\text{Nd}_3$ 可以起到阻碍晶界滑移的作用，但晶粒越细小晶界越多，晶界越容易滑移，粗大的晶粒更有利于提高合金的高温性能^[13]。随着 Nd 含量提高，Mg-4Al- x Nd 合金晶粒细化，提高

了合金的高温塑性，但同时高温抗拉强度也随着晶粒细化而降低。

图 6 为 Mg-4Al- x Nd 合金的室温和高温拉伸断口形貌。可见，Mg-4Al 二元合金断口由河流状花样的解理面、少量的撕裂棱及韧窝组成。随着 Nd 的添加和其含量增加，Mg-4Al- x Nd 合金河流状花样减少，撕裂棱及韧窝增多，对应合金的塑性得到提高，同时可观察到 Mg-4Al-3Nd 合金个别韧窝内部有粗大的第二相，与室温拉伸试验结果一致。图 6b，图 6d，图 6f 和图 6h 可见，Mg-4Al 二元合金高温拉伸断口由浅韧窝组成。随着 Nd 含量的增加，Mg-4Al- x Nd 合金断面的韧窝变小变深，表明合金断裂前经过的塑性变形越来越大，表现

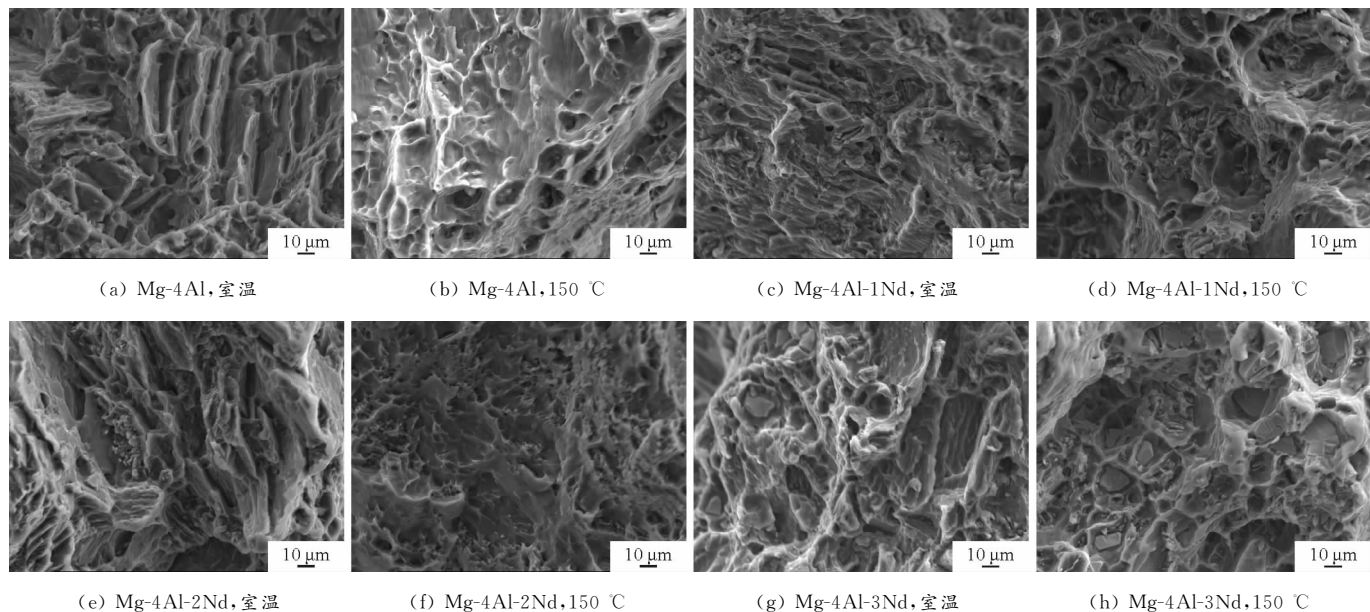


图 6 Mg-4Al- x Nd 铸造合金的室温和高温拉伸断口形貌

Fig.6 Morphologies of tensile fractures of Mg-4Al- x Nd cast alloys at room and elevated temperatures

出更好的塑性，与高温拉伸试验结果一致。

图 7 为 Mg-4Al- x Nd 合金的维氏硬度。可以看出，Mg-4Al 合金维氏硬度(HV)为 45.8，随着 Nd 的添加和其含量增加，合金的硬度值呈现先升高后下降的趋势，Mg-4Al-2Nd 合金硬度(HV)为 48.8，Mg-4Al-3Nd 合金的与其接近，为 48.1。硬度变化趋势与合金在室温下抗拉强度变化趋势基本一致，说明 Nd 含量从 2% 到

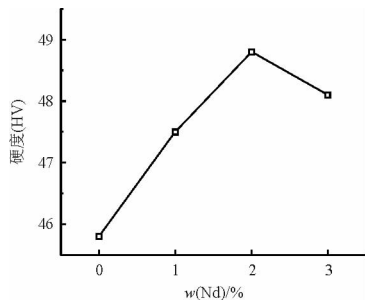


图 7 Mg-4Al- x Nd 铸造合金的维氏硬度

Fig.7 Vickers hardness of Mg-4Al- x Nd cast alloys

3%对合金的强度和硬度提升不显著。

2.3 导热性能

图 8 为 Mg-4Al- x Nd 合金的导热系数与基体中溶质含量。可以看出，Mg-4Al 合金的导热系数为 82.9 W/(m·K)，添加 Nd 后，合金基体溶质中出现极少量

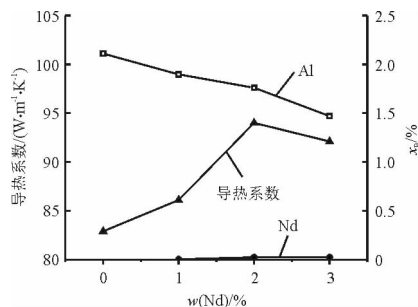


图 8 Mg-4Al- x Nd 铸造合金的导热系数与基体中溶质含量

Fig.8 Thermal conductivity and solute content in the matrix of Mg-4Al- x Nd cast alloys

的 Nd 原子, Al 原子数量减少;随着 Nd 含量增多, 导热系数先上升后稍微下降, Al 原子数量持续减少, Nd 原子数量几乎无变化。其中 Mg-4Al-2Nd 合金的导热系数最高, 为 $94.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 较 Mg-4Al 合金提高了 13%; Mg-4Al-3Nd 合金导热系数略低于 Mg-4Al-2Nd 合金, 为 $92.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

合金或金属的热传导受多种因素的影响, 包括溶质原子和第二相等。相比其他合金而言, 镁合金的热传导对溶质原子比第二相更为敏感。Mg-4Al 合金中的 Al 原子固溶在基体中会引起 α -Mg 基体的晶格畸变^[14], 改变晶格参数 c/a , 阻碍电子和声子的自由运动, 缩短电子和声子的平均自由程, 使合金的导热系数降低。随着 α -Mg 基体中的溶质 Al 原子持续减少, 合金的导热系数理论上应持续提高, 但是导热系数先提高后降低。这是由于析出相与基体之间的相干界面引起了晶格畸变^[15], 阻碍了电子和声子的自由运动, 缩短了电子和声子的平均自由程。此外, 晶界也对电子和声子的传播起阻碍作用^[16], 晶粒越细小、晶界越多, 对电子和声子的阻碍作用越强, 随着 Nd 含量增加, 合金的晶粒细化。这几个因素综合导致 Mg-4Al-3Nd 合金导热系数略低于 Mg-4Al-2Nd 合金。

3 结 论

(1) Mg-4Al 铸造合金主要由 α -Mg 和 β -Mg₁₇Al₁₂ 组成, 添加 Nd 后, Mg₁₇Al₁₂ 相减少, 出现针状和树突状 Al₁₁Nd₃ 相; 随着 Nd 含量增加, Mg₁₇Al₁₂ 相减少, Al₁₁Nd₃ 相增多, 出现颗粒状的 Al₂Nd 相且逐渐粗大化。

(2) 在 Mg-4Al 铸造合金中添加 Nd 可以提高合金的室温力学性能, Nd 含量为 2% 的合金室温力学性能最佳, 抗拉强度、伸长率和维氏硬度 (HV) 分别为 209 MPa、15% 和 48.8, 较 Mg-4Al 合金分别提高了 9%、30% 和 6%。

(3) 在 Mg-4Al 铸造合金中添加 Nd 可以有效提高合金的导热性能, Nd 含量为 2% 的合金导热系数最佳, 为 $94.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 与 Mg-4Al 二元合金相较提高了 13%。

参 考 文 献

- [1] SONG J F, SHE J, CHEN D L, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1-41.
- [2] 林翰. Mg-Al 基低成本铸造镁合金的研究与开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [3] 王肖英, 赵玉涛, 张松利, 等. 复合添加 Ce、Sr 和 La 对 AZ91 镁合金显微组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2015, 36(2): 276-

278.

- [4] 崔晓明, 于智磊, 白朴存, 等. Mg-Al-Zn-Nd 合金微观组织演变及稀土相强化行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 2 059-2 066.
- [5] 张金玲. Mg-Al 系合金中稀土元素的作用机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [6] ZHU S, WONG C, STYLES M J, et al. Revisiting the intermetallic phases in high-pressure die-cast Mg-4Al-4Ce and Mg-4Al-4La alloys[J]. Materials Characterization, 2019, 156: 109 839.
- [7] LIU Y F, JIA X J, QIAO X G, et al. Effect of La content on microstructure, thermal conductivity and mechanical properties of Mg-4Al magnesium alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 806: 71-78.
- [8] ZHU S, EASTON M A, ABBOTT T B, et al. The influence of individual rare earth elements (La, Ce, or Nd) on creep resistance of die-cast magnesium alloy AE44: creep resistance of die-cast magnesium alloy AE44[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18(6): 932-937.
- [9] 张亚琴, 刘海平, 樊晓泽, 等. Sm 部分替代 Ce、La 对 A(Ce, La)44 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(5): 478-481.
- [10] ZHANG J, WANG J, QIU X, et al. Effect of Nd on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of die-cast Mg-4Al-based alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 464(1-2): 556-564.
- [11] SU M L, ZHANG J H, FENG Y, et al. Al-Nd intermetallic phase stability and its effects on mechanical properties and corrosion resistance of HPDC Mg-4Al-4Nd-0.2Mn alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 691: 634-643.
- [12] LÜ S H, LÜ X L, MENG F Z, et al. Microstructures and mechanical properties in a Gd-modified high-pressure die casting Mg-4Al-3La-0.3Mn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A773: 138 725.
- [13] 陈亮, 王丽萍, 冯义成, 等. Bi 对 Mg-3Al-3Nd 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(6): 425-433.
- [14] LI S B, YANG X Y, HOU J T, et al. A review on thermal conductivity of magnesium and its alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 78-90.
- [15] ZHONG L, WANG Y, GONG M, et al. Effects of precipitates and its interface on thermal conductivity of Mg-12Gd alloy during aging treatment[J]. Materials Characterization, 2018, 138: 284-288.
- [16] 白世磊. AZ91D 镁合金导热性能的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

(编辑: 张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com