

La 和 Ce 对铸造 Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金组织及性能的影响

吴顺意^{1,2} 葛富彪^{1,2} 甘培原² 胡振光^{1,2} 黎永生³ 谭海军¹

(1.桂林理工大学化学与生物工程学院;2.南宁市桂工教育科技有限公司;3.中国科技开发院广西分院)

摘 要 采用光学显微镜、扫描电镜和激光导热等手段,研究了单独或复合添加 La、Ce 对铸造 Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金微观组织、力学性能和热导率的影响。结果表明,添加 0.3% 的(La+Ce)后,合金中 α -Al 相得到了较大程度的细化,二次枝晶臂间距(SADS)达到较小值(13.1 μm),共晶 Si 形貌转化为细小的颗粒状且均匀地分布于晶界处,富 Fe 相长度降低了 57.51%,其合金的热导率为 159.68 W/(m·K)、抗拉强度为 231.3 MPa、伸长率为 6.89%,与未添加稀土合金相比,分别提高了 13.79%、24.96% 和 118.73%。

关键词 Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金;La 和 Ce;热导率;微观组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.04.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of La and Ce on the Microstructure and Properties of Cast Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe Alloy

Wu Shunyi^{1,2}, Ge Fubiao^{1,2}, Gan Peiyuan², Hu Zhengguang^{1,2}, Li Yongsheng³, Tan Haijun¹

(1.College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology; 2.Nanning Gult Education Technology Co., Ltd.; 3.Guangxi Branch of Chinese Science and Technology Development Institute)

Abstract: The effects of microstructure, mechanical properties and thermal conductivity of cast Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe alloy were investigated with single or compound addition of La and Ce by means of optical microscope, scanning electron microscope and laser flash apparatus. The results indicate that the alloy with 0.3% (La+Ce) addition, the α -Al phase is refined to a greater extent, and the secondary dendrite arm spacing(SDAS) achieves a minimum value of 13.1 μm . In additon, the morphology of eutectic Si is transformed into fine particles and uniformly distributed at the grain boundaries, and the length of Fe-rich phase is reduced by 57.51%. Where the thermal conductivity is 159.68 W/(m·K), tensile strength is 231.3 MPa, and elongation is 6.89%, which are increased by 13.79%, 24.96% and 118.73%, respectively compared with the alloy without rare earth addition.

Key Words: Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe Alloy, La and Ce, Thermal Conductivity, Microstructure, Mechanical Properties

随着 5G 通讯和新能源汽车等行业的快速发展,用于 5G 通讯基站密封腔体外壳和新能源汽车电池组冷却模块所用的散热材料受到了广泛的关注^[1-2]。Al-Si 系合金具有密度小、强度高、热导率高、耐腐蚀性好等特

收稿日期:2022-06-17;修改稿收到日期:2023-01-05
基金项目:广西电磁化学功能物质重点实验室开放课题资助项目(RZ2100001194)
第一作者简介:吴顺意,男,1986 年出生,学士,南宁(530004),E-mail:568627761@qq.com
通信作者:胡振光,男,1975 年出生,高级工程师,广西桂林(541006),E-mail:huzg2008@163.com
通信作者:黎永生,男,1986 年出生,高级工程师,南宁(530015),E-mail:gxcdmlys@foxmail.com
引用格式:吴顺意,葛富彪,甘培原,等. La 和 Ce 对铸造 Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(4):529-535.
WU S Y,GE F B,GAN P Y, et al. Effects of La and Ce on the microstructure and properties of cast Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4):529-535.

[23] TANG Z, GAO M C, DIAO H, et al. Aluminum alloying effects on lattice types, microstructures, and mechanical behavior of high-entropy alloys systems[J]. JOM, 2013, 65(12): 1 848-1 858.

[24] EASTON M, DAVIDSON C, ST JOHN D. Effect of alloy composition on the dendrite arm spacing of multicomponent aluminum alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, A41(6): 1 528-1 538.

[25] GAO S, KONG T, ZHANG M, et al. Effects of titanium addition on microstructure and mechanical properties of CrFeNiTi_x ($x = 0.2\sim 0.6$) compositionally complex alloys[J]. Journal of Materials Research, 2019, 34(5): 819-828.

[26] GE S, FU H, ZHANG L, et al. Effects of Al addition on the microstructures and properties of MoNbTaTiV refractory high entropy alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A784: 139 275.

[27] SENKOV O N, GORSSE S, MIRACLE D B. High temperature strength of refractory complex concentrated alloys[J]. Acta Materialia, 2019, 175: 394-405.

点,常被用于通讯行业、航天航空、汽车零件、照明和电子设备等领域^[3-5]。对于普遍应用于生产散热器材料的 ADC12 和 A356 合金,具有良好的铸造性能和力学性能,但热导率较低,限制了其使用范围^[6-7]。因此,许多研究者致力于协同提高铸造 Al-Si 系合金的力学性能和导热性能。GAN J Q 等^[8]在亚共晶 Al-Si 合金中加入微量 Sr,从而改善合金的微观组织并提高热导率。热导率主要与共晶 Si 的形貌变化有关,加入一定量的 Sr 后,共晶 Si 的形貌转变为纤维状和薄片状。王剑等^[9]在 Al-Si 合金中添加 0.02% 的 B+0.03% 的 Sr 复合变质后,共晶 Si 由片状转变为纤维状,合金的热导率为 159 W/(m·K),较未变质合金提高了 31.2%。JIANG W M 等^[10]发现,RE 的加入可以大大减小 α -Al 相和共晶 Si 的尺寸,而共晶 Si 的形貌对合金的导热性能至关重要,经 0.2% 的 RE 改性后 A357 合金的导热性能得到提高。黄学锋等^[11]研究了 Er 对合金热导率的影响,发现 Er 的添加改善了 6063 铝合金中 Si 的存在方式和分布,Er 和 Si 优先形成了 Er₅Si₃相析出,部分 Er 和 Al 形成 Al₃Er 相析出,由固溶态转变为析出态,降低了电阻率,从而提高合金的热导率。铸造铝合金不仅可以通过变质元素来提高热导率,而且可以通过热处理方式来改善合金的热导率。LUMLEY N 等^[12]采用 T7×0.5 h 和 T7×1 h 两种热处理工艺,发现 Al-10.5Si 系压铸合金的热导率分别提高了 40% 和 62%,经 T7×1 h 热处理后,合金的力学性能和导热性能同时得到了提升。CHEN J K 等^[13]研究了热处理对 Al-10Si-0.6Cu-0.9Fe-0.7Zn 合金热导率的影响,发现铸态下合金的热导率仅为 110.8~126.8 W/(m·K),对合金进行固溶(T4)和时效处理(T6)后,共晶 Si 相被细化,降低了电子的散射作用,增加了电子的平均自由程,合金的热导率提高到 151.6 W/(m·K)。

常规浇注 Al-Si 系合金的微观组织大部分由 α -Al 相和共晶 Si 相组成,共晶 Si 相形貌为块状或板条状且沿枝晶间分布,不但会严重割裂合金基体,降低力学性能,而且会增大自由电子散射,降低铝合金的电导率。根据 Weizmann-Frantz 定律可知^[14],合金的电导率通常与热导率成正比,因此共晶 Si 相对铝合金电导率的影响与对热导率的影响相同。研究表明,Y^[15]、Sc^[16]、La^[17]、Sm^[18]和 Ce^[19]等稀土元素对铸造 Al-Si 系合金中的共晶 Si 相、 α -Al 相有显著的变质和细化效果。La 和 Ce 是铸造 Al-Si 系合金常用的稀土变质元素,其与 Si 的原子半径比接近最佳原子半径比(1.646)^[20]。本研究分析单独或复合添加稀土 La、Ce 对铸造 Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金的微观组织、力学性能和热导率的影响,以期为其应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 合金制造

试验原材料采用质量分数为 99.7% 的纯铝、Al-10Si、Al-10Fe、Al-10Cu、Al-10La 和 Al-10Ce 中间合金。将纯铝放入带有高纯石墨坩埚的井式硅碳棒电阻炉中加热,待纯铝熔化后,依次放入 Al-10Si、Al-10Fe 和 Al-10Cu 中间合金,完全熔化后降温至 740~760 ℃,加入 Al-10La 和 Al-10Ce 中间合金,保温 15~20 min,将 C₂Cl₆精炼剂压入熔体中,使用高纯氩气喷吹 5~10 min,熔体静置 10~15 min,待熔体降温至 730 ℃,将合金液浇注至预热的金属型中,得到 1~4 号合金(分别为无 RE,0.3% 的 La,0.3% 的 Ce,0.15% 的 La+0.15% 的 Ce)。

1.2 微观结构和性能表征

铝合金的实际成分通过电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)和直读发射光谱仪(PDA-7000)测定,结果见表 1。从铝合金上线切割 10 mm×10 mm×10 mm 的试样,经过镶样、机械研磨、抛光后,采用 Keller 腐蚀剂(2.5 mL 的 HNO₃+1 mL 的 HF+1.5 mL 的 HCl+95 mL H₂O)进行腐蚀,利用 Zeiss Axio 光学显微镜进行观察,并利用计算机辅助定量金相检测软件观察 Si 相形貌并测定高倍率金相(采集 100 个 Si 颗粒)下 Si 相的面积,取其平均值,可获得共晶 Si 相的平均面积(Mean area)。通过 Gemini 300 扫描电镜进行组织观察和能谱分析。通过 Image Pro Plus 6.0 图像分析仪测量共晶 Si 相的长径比和 α -Al 相的二次枝晶臂间距(SDAS),富 Fe 相按相同方法可测得平均长度。采用 DX-2700BH 型 X 射线衍射仪对合金进行物相分析。拉伸试验采用 Zwick/Roell-20kN 型万用拉伸机,拉伸试样按照 GB/T16865-2013 进行加工,尺寸见图 1,测试方法按照 GB/T228.1-2010 进行,拉伸速率为 1 mm/min。合金的热导率通过 NETZSCH LFA 457 型

表 1 4 种合金实测的化学成分

Table.1 Chemical composition of the alloys		w _B						%
编号	合金	Si	Cu	Fe	La	Ce	Al	
1	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe	7.103	0.597	0.812	—	—	余量	
2	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.3La	7.121	0.631	0.795	0.327	—	余量	
3	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.3Ce	6.903	0.603	0.811	—	0.319	余量	
4	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.15La-0.15Ce	7.148	0.618	0.809	0.151	0.156	余量	

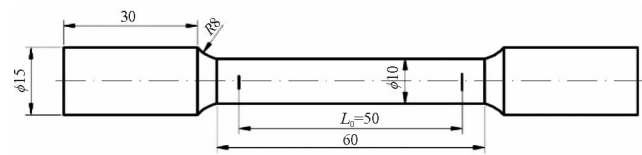


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimension of tensile specimen

激光热导率测试仪测量。

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织

图 2 为 1~4 号合金的显微组织。可以看出,1 号合金显微组织主要由 α -Al、共晶 Si 和少量富 Fe 相组成,其中 α -Al 相的枝晶粗大,枝晶轮廓不清晰,且形状

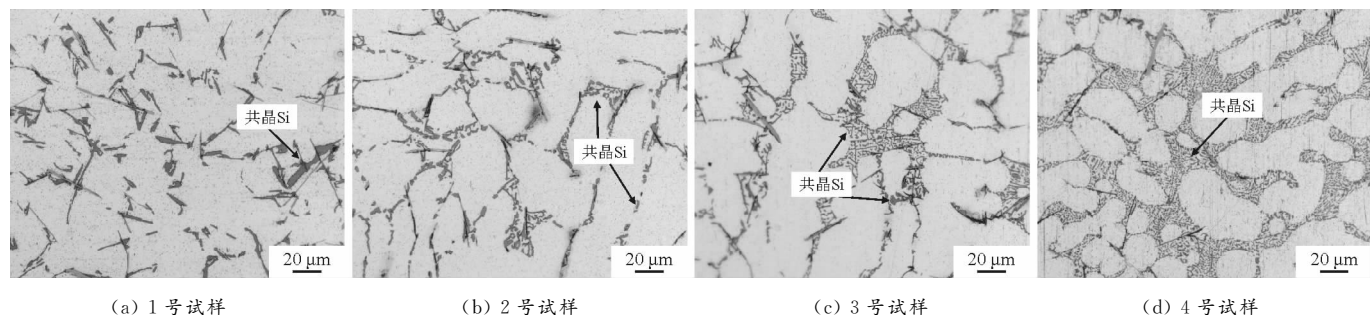


图 2 添加 La 和 Ce 后铝合金的显微组织

Fig.2 Microstructure of alloys after La and Ce addition

晶减少。

另外,对 1~4 号合金显微组织中共晶 Si 进行分析,从图 2a 可知,组织中存在较大的块状、板条状共晶 Si,在基体中分布不均匀。合金在受到外力时,这些形状的共晶 Si 会割裂基体,降低合金的力学性能。添加 0.3% 的 La 后,组织出现了颗粒状共晶 Si,块状和板条状共晶 Si 数量和尺寸均有所减小,见图 2b。添加 0.3% 的 Ce 后,共晶 Si 进一步细化,颗粒状共晶 Si 数量有所增加,且分布在合金晶界处,见图 2c。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,共晶 Si 形貌发生了较大的变化,由块状和板条状变为细小的颗粒状且均匀地分布于晶界处,见图 2d。

为了进一步研究 La 和 Ce 的添加对合金组织的影响,利用 IPP 6.0 图像分析软件对 1~4 号合金的 SDAS 进行测量,结果见图 3。可以看出,添加 RE 的合金都表现出更好的细化效果。1 号合金的 SDAS 较大,达到 33.6 μm 。添加 0.3% 的 La 后,合金的 SDAS 有所减小,为 21.1 μm ,较 1 号合金减小了 37.20%。添加 0.3%

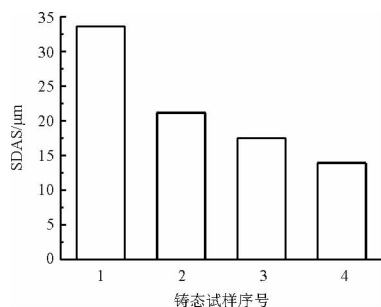


图 3 稀土元素对铝合金 SDAS 的影响

Fig.3 Effects of La and Ce addition on SDAS of aluminum alloy

不规则。加入 0.3% 的 La 后, α -Al 晶粒尺寸有所减小且轮廓变得清晰,均匀地分布在基体中,同时可以看见较为明显的树枝晶,见图 2b。添加 0.3% 的 Ce 后, α -Al 晶粒尺寸进一步减小,组织中出现胞状 α -Al 晶粒,排列的位置和方向都较为整齐,具有一定的规律性,见图 2c。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,合金组织中的胞状 α -Al 晶粒数目进一步增加, α -Al 晶粒尺寸减小,胞状 α -Al 晶粒轮廓清晰,且排列整齐,粗大的树枝

晶的 Ce 后,合金的 SDAS 进一步减小至 17.4 μm ,较 1 号合金减小了 48.21%。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,SDAS 达到最小值 13.1 μm 。结果表明,复合添加 La 和 Ce 对 α -Al 的细化效果比单独添加 La 或 Ce 更好。

相关研究表明^[21],SDAS 可通过下式进行计算:

$$\lambda = 5.5 (M t_f)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$M = \frac{\Gamma D \ln(C_f^m / C_0)}{m(1-K)(C_0 - C_f^m)} \quad (2)$$

$$K = \frac{C_s}{C_l} \quad (3)$$

式中, λ 为 SDAS, μm ; M 为粗化系数; t_f 为局部凝固时间, s; Γ 为 Gibbs-Thompson 系数; D 为熔体扩散系数, m^2/s^{-1} ; m 为液相线斜率, $\text{K}/\%$; $C_f^m = C_e$ 为共晶浓度, %; K 为分配系数; C_s 为固相平衡溶解度; C_l 为液相平衡溶解度。

由式(1)可以得出,SDAS 的大小受到 M 和局部凝固时间的影响。根据 Hume-Rothery 准则^[22],当溶质原子半径与溶剂原子半径相对差大于 15% 时,合金体系易形成较低固溶度的固溶体。经计算,La 和 Ce 与 Al 原子半径相对差分别为 23.53% 和 27.27%,因此 La 和 Ce 进入 α -Al 晶格内的概率较低,即 La 和 Ce 在合金熔体中的溶解度较小。在合金熔体凝固过程中易富集在固液界面前沿,阻碍合金熔体中溶质原子的扩散,提高了液相平衡溶解度,从而降低了分配系数,导致 M 值降低,由式(1)可知, M 值越小,SDAS 也会越小。

为了进一步研究 La 和 Ce 对共晶 Si 相形貌及尺寸的影响,采用 IPP6.0 图像分析软件对 1~4 号合金中共晶 Si 相的平均面积和长宽比进行了测量,结果见图 4。

可以看出,1 号的合金中共晶 Si 相尺寸粗大,测得共晶 Si 相的平均面积和长宽比分别为 $30.4\ \mu\text{m}^2$ 和 8.1。2 号合金中共晶 Si 相部分转变为细小的颗粒状,共晶 Si 变质效果并不完全,合金中仍存在小块状和短棒状共晶 Si 相,其平均面积和长宽比分别降至 $10.6\ \mu\text{m}^2$ 和 3.4。3 号合金中共晶 Si 的平均面积和长宽比分别为 $5.1\ \mu\text{m}^2$ 和 2.2。4 号合金中共晶 Si 变质效果较好,共晶 Si 相呈现细小的颗粒状,其平均面积和长宽比分别达到最小值,为 $3.0\ \mu\text{m}^2$ 和 1.5,说明经 RE 变质后,共晶 Si 相的平均面积和长宽比均有所下降。

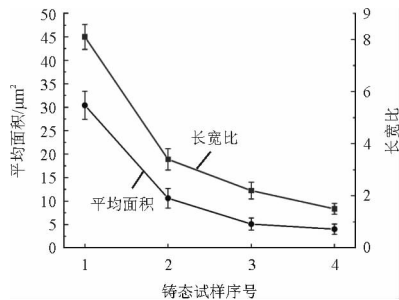


图 4 La、Ce 对共晶 Si 相平均面积和长宽比的影响
Fig.4 The effect of La and Ce addition on mean area

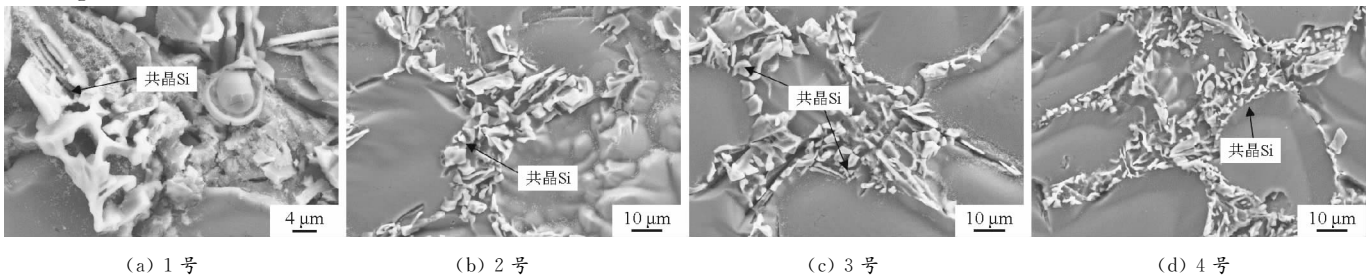


图 5 4 种合金试样扫描电镜下共晶 Si 相的形貌
Fig.5 SEM of eutectic Si in the four kinds of alloy

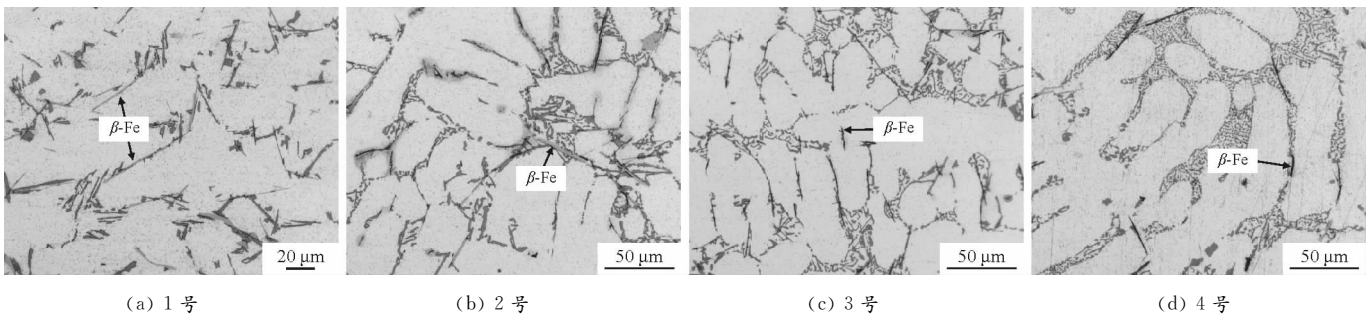


图 6 La 和 Ce 对 4 种合金试样富 Fe 相的影响
Fig.6 The effect of La and Ce addition on Fe-rich phase in the four kinds of alloy

1~4 号合金组织中富 Fe 相形貌。由图 6a 可见,1 号合金中富 Fe 相主要以尺寸较长的针状存在,该形状会严重割裂基体并降低合金的力学性能。当合金中加入 0.3% 的 La 或 0.3% 的 Ce 后,富 Fe 相形状得到改善,长针状富 Fe 相开始变为短棒状,见图 6b 和图 6c。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,富 Fe 相得到进一步改善,尺寸变小,见图 6d。

对 1~4 号合金中富 Fe 相尺寸进行测量,结果见图

对 1~4 号合金进行深度腐蚀并利用 SEM 进行观测,见图 5。可以看出,1 号合金中的共晶 Si 相呈粗大的板条状和不规则的块状,见图 5a。2 号合金中共晶 Si 的尺寸明显减小,形貌转变为小块状和颗粒状,见图 5b。3 号合金中共晶 Si 进一步细化,细小的颗粒状共晶 Si 数量增加。4 号合金中共晶 Si 变质为珊瑚状和细颗粒状且均匀地分布于晶界处(见图 5d)。

综上,添加 La 或 Ce 对共晶 Si 具有变质作用,复合添加 La 和 Ce 比单独添加具有更高的变质作用。关于共晶 Si 相的变质作用,其中杂质诱导孪晶机制被广泛接受^[23],其认为稀土变质后的共晶 Si 比未变质的孪晶数量多,且 Si 相表面粗糙。在熔体凝固过程中,共晶 Si 表面的每个缺陷点都是一个潜在的分支,因此变质后的 Si 相可以任意弯曲和分裂。LU S Z 等^[20]提出变质剂原子半径与 Si 原子半径理想比值为 1.646,La 和 Ce 与 Si 的原子半径比都接近理想值(分别为 1.598 和 1.556),因此 La 和 Ce 是改善共晶 Si 的良好变质剂。

Fe 在铝合金中的溶解度较低,凝固过程中与 Al、Si 等元素反应形成多种富铁金属间化合物^[24]。图 6 为

7。可以看出,1 号合金中富 Fe 相尺寸最大,为 $42.6\ \mu\text{m}$ 。当添加 0.3% 的 La 或 0.3% 的 Ce 后,富 Fe 相得到了一定的细化,尺寸分别下降至 $30.2\ \mu\text{m}$ 和 $25.7\ \mu\text{m}$,较 1 号合金分别降低了 29.11% 和 39.67%。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,富 Fe 相尺寸下降至 $18.1\ \mu\text{m}$,较 1 号合金降低了 57.51%。结合图 6 可知,在复合添加稀土的情况下,合金中富 Fe 相得到了较好的细化效果。

图 8 为 1~4 号合金的 XRD 图谱。图 9 为 3 号合

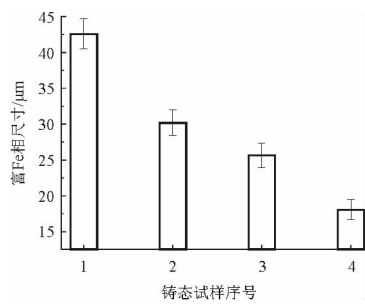


图 7 4 种合金试样中富 Fe 相尺寸

Fig.7 The effect of La or Ce addition on size of Fe-rich phase in the alloy

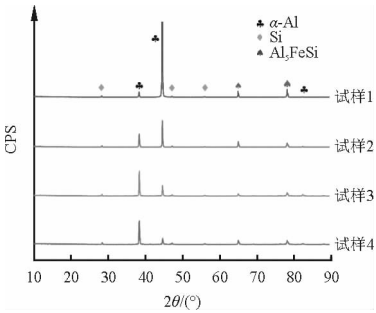


图 8 1~4 号合金 XRD 图谱

Fig.8 XRD pattern of alloy 1~4

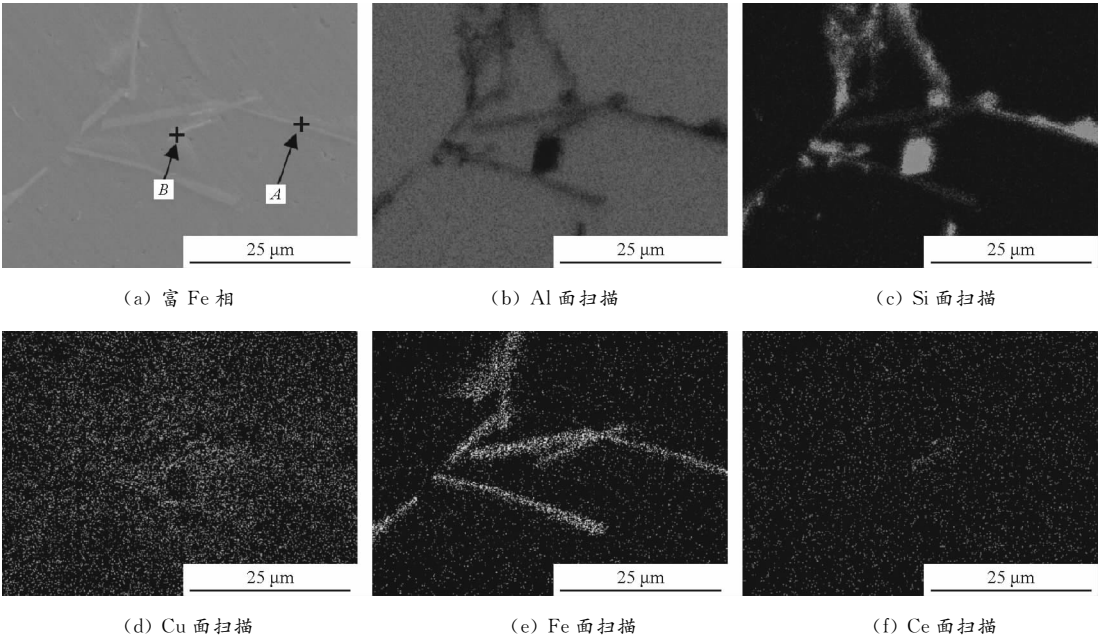


图 9 3 号合金富 Fe 相背散射 SEM 图像和面扫描分析

Fig.9 Backscattered SEM images and surface scanning results of Fe-rich phase in alloys 3

金的 SEM 以及 EDS 结果。从面扫结果可以看出,富 Fe 相为长针状存在于基体中(点 A),从背散射图可以测量出富 Fe 相尺寸约为 25 μm,该形状的富 Fe 相对合金基体起割裂作用,影响合金的力学性能。对图 9a 中检测点进行了能谱分析,结果见图 10,其中 A 点的 Al、Fe 和 Si 的摩尔比为 70.86 : 15.17 : 13.97,接近 5 : 1 : 1,根据 XRD 测试结果(见图 8),可确定该点相为 β-Al₅FeSi 相。

对图 9a 中 B 点进行了能谱分析,结果见图 10b,从各元素的摩尔比可以判断该处为富 RE 金属间化合物。根据 Hume-Rothery 原则可知,Ce 与 Al 原子相对半径差以及原子电负性差,达不到形成固溶体所需要求,因此 Ce 难以进入 Al 基体中形成固溶体,在熔体凝固过程中 Ce 会集中在固液界面前沿。由于 Ce 的化学活性较高,因此 Ce 容易与其他合金元素结合,形成稀土金属间化合物附着在富 Fe 相上,从而改善富 Fe 相的形貌^[25]。

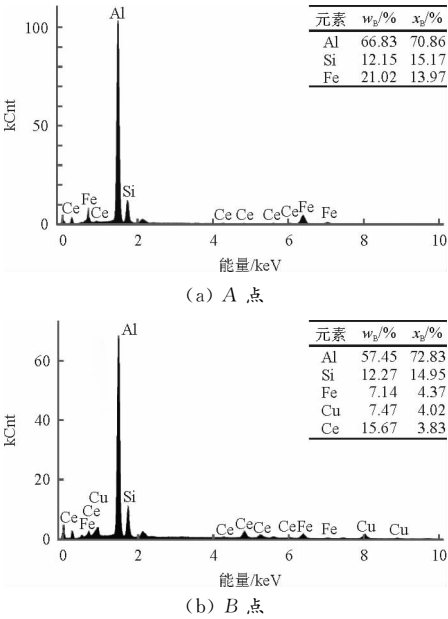


图 10 图 9 中对应各处的 EDS 能谱图
Fig.10 EDS energy spectrum of corresponding points in Fig.9

2.2 热导率

表 2 为 1~4 号合金的热导率。可以看出,相比 1 号合金的热导率,添加 0.3% 的 La 或 0.3% 的 Ce 后,合金的热导率分别提高了 9.51% 和 10.93%。根据 WILSON R B 等^[26]建立的自由电子与共晶 Si 相碰撞模型,共晶 Si 以板条状存在于合金中,电子受到较为严重的散射作用,共晶 Si 与 Al 基体成串联关系,自由电子需要通过电阻较高的板状共晶 Si,参与传热的有效电子数量有所减少,从而降低了合金的热导率,所以 1 号合金的热导率较低。4 号合金组织中的共晶 Si 为细颗粒和细纤维状形貌,对自由电子的散射作用减弱,共晶 Si 与 Al 基体形成并联关系,增加了传热电子的数量,从而提高了合金的热导率,因此其热导率达到 159.68 W/(m·K),较 1 号合金提高了 13.79%。

表 2 4 种合金的热导率

Tab.2 Thermal conductivity of alloys		
编号	合金	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
1	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe	140.33
2	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.3La	153.68
3	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.3Ce	155.67
4	Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe-0.15La-0.15Ce	159.68

2.3 力学性能

1~4 号合金的抗拉强度和伸长率结果见图 11。可以看出,添加 La 或 Ce 后,合金的抗拉强度和伸长率均有所提高。2 号合金的抗拉强度和伸长率分别为 201.6 MPa 和 4.11%,3 号合金的抗拉强度和伸长率分别为 223.8 MPa 和 6.68%,4 号合金的抗拉强度和伸长率达到了最大值,分别为 231.3 MPa 和 6.89%,较 1 号合金分别提高了 24.96% 和 118.73%。

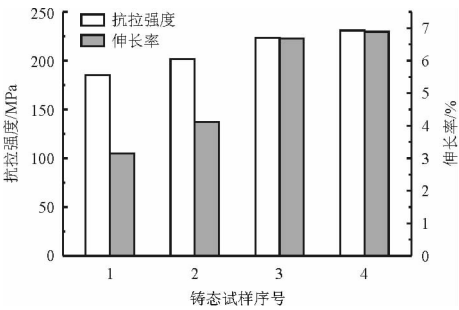


图 11 4 种合金的抗拉强度和伸长率

Fig.11 Tensile strength and elongation of alloys

由 1~4 号合金的组织分析可知,1 号合金组织中 α-Al 相尺寸较大,共晶 Si 相为粗大的板条状和块状,且富 Fe 相为长针状,这些金属间相形貌都会对合金的力学性能产生不利的影响。铝合金中脆性的富 Fe 金属间化合物作为载荷下裂纹的来源,会降低合金的力学性能^[27]。共晶 Si 相是一种脆性相,尺寸较大的板条状或块状的共晶 Si 相不仅对合金基体产生割裂作用,而且

在共晶 Si 相两端处容易产生应力集中,萌生对合金有害的微裂纹,这些裂纹通过与 α-Al 相的边界传播^[28]。2~4 号合金经稀土变质后,组织中 α-Al 相、共晶 Si 相和富 Fe 相形貌和尺寸均得到细化,经过拉伸测试可知,合金的力学性能得到了提高。另一方面,La 和 Ce 在合金熔体反应过程中可以吸附气体和去除杂质^[29],也有利于提高合金的力学性能。

3 结 论

(1) Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金的组织在添加 La、Ce 后得到细化。添加 0.3% 的 (La+Ce) 的合金组织中 α-Al 相得到改善,二次枝晶臂间距达到 13.1 μm;共晶 Si 变质效果较好,呈现细小的颗粒状,平均面积和长宽比分别达到 3.0 μm² 和 1.5;富 Fe 相尺寸为 18.1 μm。

(2) Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金的力学性能在添加 La、Ce 后得到提高。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,合金的抗拉强度和伸长率分别达到 231.3 MPa 和 6.89%,较未添加稀土的合金分别提高了 24.96% 和 118.73%

(3) Al-7Si-0.6Cu-0.8Fe 合金的热导率在添加 La、Ce 后得到提升。添加 0.3% 的 (La+Ce) 后,合金组织中共晶 Si 形貌为细颗粒状和纤维状,对自由电子的散射作用减弱,增加了传热电子数量,从而提高热导率,合金的热导率达到 159.68 W/(m·K),较未添加稀土的合金提高了 13.79%。

参 考 文 献

[1] NITIK A, ANU R, VINOD K, et al. Effect of dopant concentration and annealing temperature on electric and magnetic properties of lanthanum substituted CoFe₂O₄ nanoparticles for potential use in 5G wireless communication systems-Science Direct [J]. Ceramics International, 2021, 47(14): 20 669-20 677.

[2] XU H, XIN Z, XIANG G, et al. Optimization of liquid cooling and heat dissipation system of lithium-ion battery packs of automobile [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26(1): 101 012.

[3] SHAJI M C, RAVIKUMARKK, RAVI M, et Al. Development of a high strength cast aluminum alloy for possible automotive applications[J]. Materials science Forum, 2013, 765(54): 54-58.

[4] HIRSCH J, Al-SAMMAN T. Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications[J]. Acta Materialia, 2013, 61(3): 818-843.

[5] TZOU G J, TSAO C C, LIN Y C. Improvement in the thermal conductivity of aluminum substrate for the desktop PC Central Processing Unit (CPU) by the Taguchi method[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(6): 706-710.

[6] 周嘉祀, 吴健强, 武婵, 等. Sr, B 含量对 LED 散热器用 ADC12 合金导电导热性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 911-914.

[7] 姜峰, 索忠源, 关鲜洪, 等. 热处理对混合稀土变质 A356 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(12):

- 1 414-1 417.
- [8] GAN J Q, HUANG Y J, WEN C, et al. Effect of Sr modification on microstructure and thermal conductivity of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(11): 2 879-2 890.
- [9] 王剑, 曹东, 许德英. 高导热共晶 Al-Si 合金的制备及其性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 441-445.
- [10] JIANG W M, FAN Z T, DAI Y, et al. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties, and fractography of A357 alloy[J]. Materials Science & Engineering, 2014, A597: 237-244.
- [11] 黄学锋, 高原, 刘贵仲, 等. 稀土 Er 改性 6063 铝合金导电性能研究[J]. 热加工工艺, 2010(24): 19-20.
- [12] LUMLEY N, DEEVA N, LARSEN R, et al. The role of alloy composition and T7 heat treatment in enhancing thermal conductivity of aluminum high pressure die castings[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2013, A44(2): 1 074-1 086.
- [13] CHEN J K, HUNG H Y, WANG C F, et al. Effects of casting and heat treatment processes on the thermal conductivity of an Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 105: 189-195.
- [14] POWELL R W. Correlation of metallic thermal and electrical conductivities for both solid and liquid phases[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1965, 8(7): 1 033-1 045.
- [15] DING W, ZHAO X, CHEN T, et al. Effect of rare earth Y and Al-Ti-B master alloy on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830(11): 154 685.
- [16] TZENG Y C, JIAN S Y. Effects of the addition of trace amounts of Sc on the microstructure and mechanical properties of Al-11.6Si alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2018, A723: 22-28.
- [17] XIAN C S, HONG Y, FAN H C. Impact of rare earth element la on microstructure and hot crack resistance of ADC12 alloy[J]. Journal of the Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2018, 33(1): 193-197.
- [18] 张亚琴, 刘海平, 刘德茂, 等. Sm 对 ADC12 合金组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(3): 316-319.
- [19] LI Q, XIA T, LAN Y, et al. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2013, 588: 97-102.
- [20] LU S Z, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning[J]. Metallurgical Transactions, 1987, A18(10): 1 721-1 733.
- [21] KURZ W, FISHER D J. Fundamentals of solidification[J]. Crystal Research & Technology, 2010, 21(9): 1 176-1 178.
- [22] VINCENT F, ESTHER B, JEAN-MARIE D. Study of Al-Cu Hume-Rothery alloys and their relationship to the electronic properties of quasicrystals[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 1998, 10(19): 4 231-4 244.
- [23] CESCHINI L, MORRI A. Correlation between ultimate tensile strength and solidification microstructure for the sand cast A357 aluminium alloy[J]. Materials & Design, 2009, 30(10): 4 525-4 531.
- [24] KHALIFA W, SAMUEL F H, GRUZLESKI J E. Iron intermetallic phases in the Al corner of the Al-Si-Fe system[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2003, A34(3): 807-825.
- [25] WAN J, LEE P D, HAMILTON R W, et al. The kinetics of Fe-rich intermetallic formation in aluminum alloys: In situ observation[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(7): 516-519.
- [26] WILSON R B, APGAR B A, MARTIN L W, et al. Thermoreflectance of metal transducers for optical pump-probe studies of thermal properties[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28 829-28 838.
- [27] JI S, YANG W, FENG G, et al. Effect of iron on the microstructure and mechanical property of Al-Mg-Si-Mn and Al-Mg-Si diecast alloys[J]. Materials Science & Engineering, 2013, A564: 130-139.
- [28] MAN Z, JIAN Z, YANG G, et al. Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys[J]. Materials and Design, 2012, 36: 243-249.
- [29] WANG A, ZHANG L, XIE J. Effects of cerium and phosphorus on microstructures and properties of hypereutectic Al-21Si alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(5): 522-525.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

