DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3259

稀土 La 对铸造 Al–Si 合金组织与性能的影响

谷立东[1],王乐耘[1],应　韬[1],杨剑英[2],李德江[1]
(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200240; 2. 上海交通大学 包头材料研究院,内蒙古 包头 014000)

摘　要:研究了不同含量的稀土 La 对铸造铝硅二元合金的显微组织与性能的影响。结果表明,少量 La 的加入可使共晶硅组织聚集情况改善,对基体割裂减弱,当 La 含量为 0.15%(质量分数)时,可使铝基体具有细化的近非枝晶组织,同时微观上共晶硅的尺寸显著减小。随着 La 含量的增加,铝硅合金的屈服强度与伸长率呈现先增加后稳定的趋势,电导率递增。共晶硅的细化有利于降低 Si 对电子散射的阻挡,从而使合金电导率提升。综合来看,当选用 0.15%的 La 加入时,铸造铝硅合金具有综合最优的显微组织、力学性能和导电性能。

关键词:铝硅合金;稀土;共晶硅;力学性能

中图分类号: TG146.2+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)05-0475-04

Effect of Rare Earth La on the Microstructure and Properties of Cast Al–Si Alloy

GU Lidong[1], WANG Leyun[1], YING Tao[1], YANG Jianying[2], LI Dejiang[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Baotou Institute of Material Research, Shanghai Jiao Tong University , Baotou 014000, China)

Abstract: The effects of different contents of rare earth La on the microstructure and properties of cast Al-Si binary alloys were investigated. The results indicate that the addition of a small amount of La can improve the aggregation of eutectic silicon, weaken the cleavage of the matrix, and refine the nearly nondendritic microstructure of the aluminium matrix when the La content is 0.15 wt. %. Moreover, the size of eutectic silicon is significantly reduced. As the La content increases, the yield strength and elongation of the Al-Si alloy initially increase and then stabilize, while the electrical conductivity gradually increases. The refinement of eutectic silicon reduces the hindrance of Si to electron scattering, thereby enhancing the electrical conductivity of the alloy. Overall, when 0.15 wt. % La is added, the cast Al-Si alloy has the best overall microstructure, mechanical properties and conductivity.

Key words: Al-Si alloy; rare earth; eutectic silicon; mechanical property

轻量化是提高新能源汽车续航里程的重要手段,铝合金作为优异的轻量化材料在汽车零部件上的应用前景广阔。在车用铸造铝合金中,典型如 A356 合金属于亚共晶铝硅系合金,具有中等强度,优良的铸造成型性能和机械加工性能,在轮毂、控制臂、一体化车身等多种零件上都有广泛应用。但是面对日益发展的高性能构件需求,铸造铝硅合金的强度、塑性和导电性有所不足,相比锻造铝合金一般要低 10%~40%[1],导致其应用受到限制。这主要是由于铸造态铝硅合金中的共晶硅往往呈现为粗大的针状或片状[2],对基体产生割裂,从而易导致断裂的发生,而且共晶硅对电子散射的阻挡会导致合金的导电导热性差[3]。因此,细化共晶硅组织是提高铸造铝合金综合性能,实现扩大应用的有效解决途径。

目前已发展出多种细化剂和变质剂来进行铝合金的组织细化研究,包括 Ti、B、P、Sr、Zr、Sc 等元素。工业上比较常用的细化剂是 Al-Ti-B[4],其作用主要是细化 α-Al 晶粒,研究人员希望进一步添加其他元素来提高对共晶硅的同步细化,但 Liao 等[5]发现当同时添加 Sr 和 B 到一定含量时会产生中毒效应,即

收稿日期: 2023-10-30
基金项目: 内蒙古自治区科技厅科技重大专项(zdzx2018026);云南省科技厅科技计划项目(202102AB080009)
作者简介: 谷立东,1993 年生,博士生. 研究方向为高性能轻合金及工艺. Email: lidong.gu@sjtu.edu.cn
通讯作者: 应　韬,1985 年生,副研究员. 研究方向为高性能镁合金和铝合金. Email: yingtao85@sjtu.edu.cn
引用格式: 谷立东,王乐耘,应韬,杨剑英,李德江. 稀土 La 对铸造 Al-Si 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术,2024, 45(5): 475-478.
GU L D, WANG L Y, YING T, YANG J Y, LI D J. Effect of rare earth La on the microstructure and properties of cast Al-Si alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 475-478.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

合金中铝基体和共晶硅的细化效果衰退的现象。类似地，Mao 等[6]研究发现，Sr 或 Zr 与 Al-Ti-B 同时加入铝硅合金中也会产生中毒现象，主要是由于不同添加元素相互之间可能会形成不利的金属间化合物，并对变质元素产生消耗。而稀土元素作为“工业味精”，具有稳定的活性，既能够细化铝基体晶粒，又对共晶硅组织产生变质细化[7-8]，是铝合金中比较理想的添加剂。Liu 等[9]对比研究了 P、Sr 和 Ce 3 种元素对 AlSi 合金组织与性能的影响，发现 P 对共晶硅的细化作用较弱，而 Sr 和 Ce 能够使共晶硅由链状细化为针状，尤其 Ce 可同时使得 α-Al 晶粒显著细化。近年来，国内以镧(La)、铈(Ce)等元素为主的高丰度稀土形成了大量积压，价格走低，为稀土在铝合金中应用提供了良好机会。本文选择单一稀土 La 作为变质元素，系统研究其对铝硅二元合金的组织细化、力学性能和导电性的影响。

1 实验材料与方法

实验原材料为 99.9%的纯铝、Al-20Si 中间合金和 Al-20La 中间合金。图 1 为 Al-20La 中间合金的微观组织，白色的 Al-La 相呈弥散均匀分布。通过金属型重力铸造制备了Al-8Si-xLa(x=0、0.10%、0.15%、0.30%，质量分数，下同)合金，其成分如表 1 所示。具体制备过程如下，按配比量将纯铝锭置于中频感应加热的石墨坩埚中熔化，当铝液温度为 670 ℃，加入 Al-20Si 中间合金，升温至 730 ℃进行精炼除气，除渣后静置 20 min，升温至 750 ℃加入 Al-20La 中间合金并充分搅拌，熔体除渣后再静置 40 min，700 ℃时浇注到金属型中，室温冷却制得铸锭。合金金相试样经机械抛光和 Keller 试剂腐蚀，然后利用蔡司光学显微镜观察，采用 Phenom 台式扫描电镜进行形貌鉴定和能谱测试。合金拉伸试验采用 GB6397-86 标准拉伸试样，在 Zwick/Roell Z100 万能材料试验机上进行，拉伸速率为 1 mm/min。合金电导率采用国产 Sigma 2008B 涡流金属导电仪测量，每个样品测量 7 次取平均值。

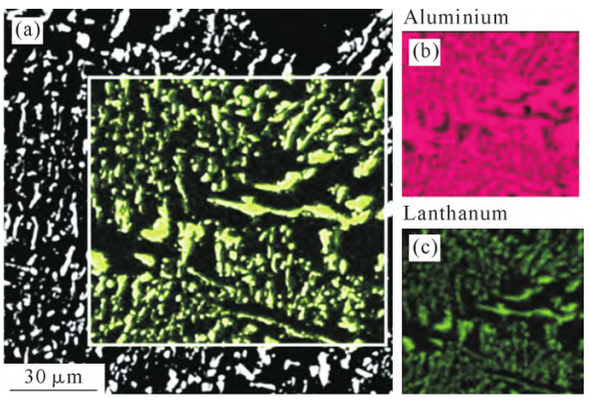

图 1 Al-20La 中间合金的 SEM-EDS 图像：(a) 选取 EDS 区域；(b) Al 元素分布；(c) La 元素分布

Fig.1 SEM-EDS images of the Al-20La master alloy: (a) selected EDS region; (b) Al distribution; (c) La distribution

表1 实验合金成分

Tab.1 Chemical compositions of the studied alloys (mass fraction/%)

Alloy	Si	La	Al
No. 1	8	0	Bal.
No. 2	8	0.1	Bal.
No. 3	8	0.15	Bal.
No. 4	8	0.3	Bal.

2 实验结果及讨论

2.1 添加不同 La 含量的铝硅二元合金显微组织

图 1 为不同 La 含量的 4 种铸造铝硅合金的金相显微组织。可以看到，未加入 La 的铝硅二元合金组织中 α-Al 晶粒呈粗大枝晶状，聚集的共晶硅也对基体割裂严重。当加入 0.1%La 后，共晶硅的聚集情况显著改善，但 α-Al 枝晶组织仍然存在。当 La 含量增加到 0.15%，铝硅合金显微组织得到比较理想的变质和细化，不但共晶硅呈现均匀分布，基体铝的枝晶成熟度也显著降低，晶粒细化与第二相细化可使得力学性能提高，同时也有助于降低热裂倾向[10]，使铸造成型性能提高。而继续提高 La 含量到 0.3%后组织细化效果没有增加。稀土的加入使铝合金晶粒显著细化，其作用机理普遍认为是由于 Al 原子与稀土原子的共晶反应所生成的金属间化合物能够作为合金中初生 α-Al 的异质形核基底[11]。

图 2 和 3 为加入与未加入 La 的铝硅合金在 SEM-EDS 面扫下的硅形态照片。可以看到，未加入La 的铸造组织中 Si 呈粗大片层状或棒状，对基体的割裂较严重，不利于合金的强塑性[12]；而加入 0.15%La 后共晶硅则显著被细化，呈针状或短片状，其与基体间的协调变形能力更好，可提高合金的延展性。稀土 La 细化共晶硅的机理目前普遍认为是通过改变 Si 相的长大行为来影响共晶 Si 的形貌[13]，稀土原子能够吸附在共晶 Si 生长界面前沿，同时引起晶格畸变，诱发高密度交错孪晶的形成，使共晶 Si 从片状结构转变为纤维状结构。因此当采用稀土中间合金作为变质剂时，需要足够的高温静置时间使高熔点稀土相被充分熔解，以发挥稀土原子对共晶硅的细化作用。

2.2 不同 La 含量的铝硅二元合金的力学性能

图 4 比较了重力铸造状态下 Al-Si 二元合金与添加不同含量稀土 La 后的拉伸力学性能。随着 La 含量的增高，Al-Si 二元合金的屈服强度和伸长率都呈先增加后降低的趋势，在 La 含量为 0.15%时，合

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

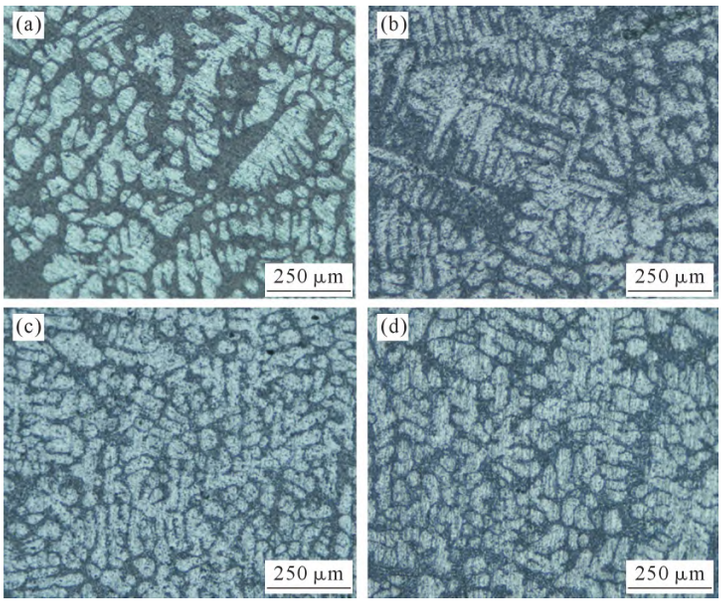

图 2 加入不同 La 含量的铸造铝硅合金的金相组织：(a) Al-8Si; (b) Al-8Si-0.1La; (c) Al-8Si-0.15La; (d) Al-8Si-0.3La
Fig.2 Microstructure of Al-Si casting alloys with different La contents: (a) Al-8Si; (b) Al-8Si-0.1La; (c) Al-8Si-0.15La; (d) Al-8Si-0.3La

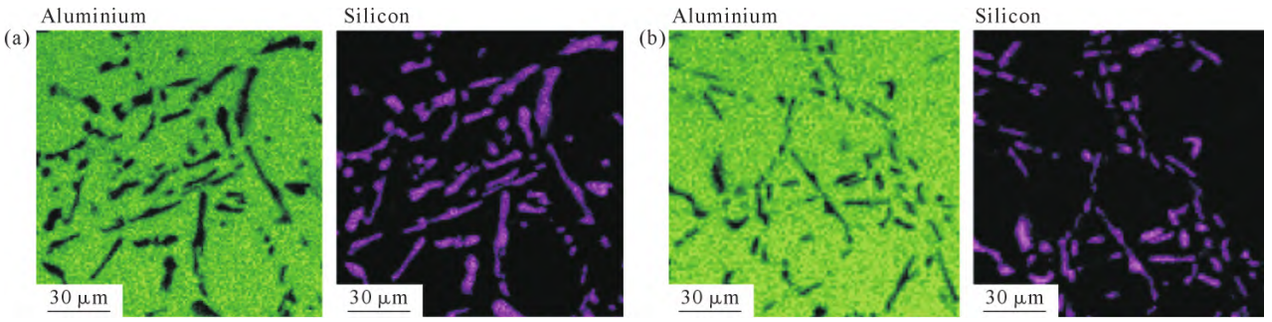

图 3 加入 La 前后的铸造铝硅合金的 SEM-EDS 图像：(a) Al-8Si; (b) Al-8Si-0.15La
Fig.3 SEM-EDS images of the Al-Si casting alloy with and without La: (a) Al-8Si; (b) Al-8Si-0.15La

金的强塑性最好，尤其是伸长率显著提升了 1/3，这与组织改性相对应，α-Al 晶粒的非枝晶和共晶硅的细化都有效减弱了对基体的割裂，使铝合金在拉伸变形过程中不易于产生微观应力集中，降低裂纹产生倾向，从而有利于伸长率显著提升。即使加入 0.1 %的 La，也能够使共晶硅组织改善，从而提升伸长率(图 4)。因此，微量稀土 La 是克服铸造铝硅合金塑性低的一个有效元素，对 AlSi 二元合金强度提高作用不明显。在高塑性基础上，进一步提升铸造铝硅合金强度可

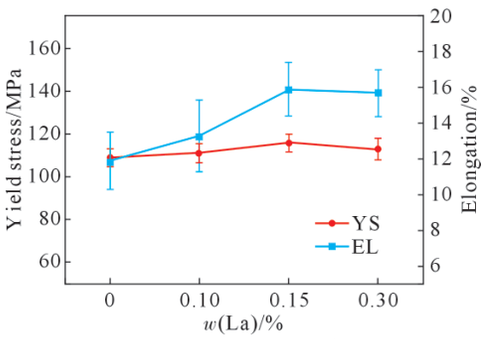

图 4 加入不同含量稀土 La 的 Al-8Si 合金的力学性能对比
Fig.4 Comparison of the mechanical properties of Al-8Si casting alloys under different conditions

依靠引入其他合金化元素的手段，如添加 Mg、Cu 等元素可以生成第二相强化[14-15]。

2.3 导电性

纯铝的导电性很好，电导率为 37.1×10^6 S/m[16]，然而铝和硅的导电能力差别很大，硅是半导体，在未经变质的铝硅合金中，一旦共晶硅相呈粗大的片状，对电流有较强的阻碍作用，导致铝硅合金的电导率较低，因此电导率在一定程度上能够反映铝硅合金中共晶硅变质效果的好坏。如图 5 所示，铸造 Al-8Si 二元合金的电导率仅为 25×10^6 S/m，在加入微量 La 变质后，由于共晶硅的细化，使得对电子散射作用减弱[3]，合金电导率得到显著提升，而当 La 含量超过 0.15%后，电导率不再随着 La 含量的增加而提高，因此也可以认为，此时 0.15%的稀土 La 含量是变质铸造铝硅合金中共晶硅的最佳状态。

3 结论

(1)对于铸造 Al-8Si 二元合金，加入 La 能够对其显微组织进行改性，当 La 含量为 0.15 %时，铝硅

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

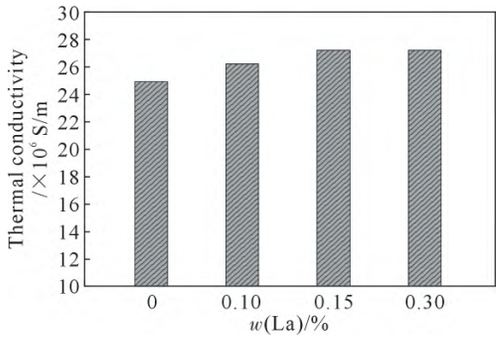

图 5 加入不同含量稀土 La 的 Al-8Si 合金的导电性能对比
Fig.5 Comparison of the electrical conductivity of Al-8Si casting alloys with different La contents

合金显微组织得到比较理想的变质和细化，可以使 α-Al 基体呈现非枝晶形态，同时显著细化共晶硅，使其由粗大棒状转变为针状或短片状，整体组织均匀性提升。

(2)微量稀土 La 能够显著提升铸造 Al-8Si 二元合金的伸长率，主要是由于组织上晶粒和共晶硅的双重细化，随着 La 含量的增加，铝硅合金的伸长率呈现先增加后稳定的趋势，而对合金的强度改善作用不明显。

(3)铸造 Al-8Si 二元合金的电导率为 25×10^6 S/m，在加入微量 La 变质后，有利于共晶硅对电子散射的影响作用减弱，合金电导率得到显著提升，当 La 含量为 0.15%时，电导率显著提高至 27.3×10^6 S/m，综合显微组织、力学性能与导电性能，0.15 %的稀土 La 能对铸造铝硅合金起到最佳变质效果。

参考文献：

[1] LI Y, JIANG Y, HU B, LI Q. Novel Al-Ti-Nb-B grain refiners with superior efficiency for Al-Si alloys[J]. Scripta Materialia, 2020, 187: 262-267.

[2] 何斌锋，米国发. 变质处理对 A356 合金性能的影响[J]. 热加工工艺，2012, 41(15): 12-15.
HE B F, MI G F. Effect of modification on properties of A356 alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(15): 12-15.

[3] MULAZIMOGLU M H, DREW R A L, GRUZLESKI J E. The electrical conductivity of cast Al-Si alloys in the range 2 to 12.6 wt pct silicon[J]. Metallurgical Transactions A, 1989, 20: 383-389.

[4] 徐佐，吴大勇，李振宇，王孝东. Mg 与稀土 Ce 混合添加对A356.2 铝合金组织与性能的影响[J]. 铸造，2016, 65(9): 855-859.
XU Z, WU D Y, LI Z Y, WANG X D. Effect of Mg and Ce mixed addition on the microstructure and tensile property of A356.2 aluminium alloy[J]. Foundry, 2016, 65(9): 855-859.

[5] LIAO H C, SUN G X. Mutual poisoning effect between Sr and B in Al-Si casting alloys[J]. Scripta Materialia, 2003, 48(8): 1035-1039.

[6] MAO G L, TONG G Z, GAO W L, LIU S G, ZHONG L W. The poisoning effect of Sc or Zr in grain refinement of Al-Si-Mg alloy with Al-Ti-B[J]. Materials Letters, 2021, 302: 130428.

[7] 姚丽娟，杨根仓，朱满，周尧和. 富铈混合稀土对铸造 A356 合金微观组织的影响[J].铸造技术，2009, 30(2): 185-188.
YAO L J, YANG G C, ZHU M, ZHOU Y H. Effect of cerium-rich mischmetal on microstructures of as-cast A356 alloy[J]. Foundry Technology, 2009, 30(2): 185-188.

[8] 檀廷佐. 变质及热处理对铸造铝硅合金组织及性能的影响[D]. 南京：南京航空航天大学，2012.
TAN T Z. Effect of modification and heat treatment on the microstructure and property of Al-Si cast alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[9] LIU Q, LIU M W, XU C, XIAO W L, YAMAGATA H, XIE S H, MA C L. Effects of Sr, Ce and P on the microstructure and mechanical properties of rapidly solidified Al-7Si alloys[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 290-298.

[10] 胡波，李德江，李子昕，曾小勤，丁文江. 铸造镁合金热裂行为的研究进展[J]. 精密成形工程，2020, 12(5): 1-19.
HU B, LI D J, LI Z X, ZENG X Q, DING W J. Research progress on hot tearing behavior of cast magnesium alloys[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2020, 12(5): 1-19.

[11] 权北北. 非热处理强化压铸 Al-Ce-Mg 合金的微观组织与性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2020.
QUAN B B. Investigation on microtsructure and properties of non-heat-treat strengthening HPDC Al-Ce-Mg alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[12] 陈媛媛，王社则，田博彤. 稀土 Er 对汽车轮毂用 A356 合金组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理，2019, 44(11): 39-44.
CHEN Y Y, WANG S Z, TIAN B T. Effect of rare earth Er on microstructure and mechanical properties of A356 alloy for automotive hub[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(11): 39-44.

[13] 郑秋菊，叶中飞，江鸿翔，卢明，张丽丽，赵九洲. 微合金化元素 La 对亚共晶 Al-Si 合金凝固组织与力学性能的影响[J]. 金属学报，2021, 57(1): 103-110.
ZHENG Q J, YE Z F, JIANG H X, LU M, ZHANG L L, ZHAO J Z. Effect of micro-alloying element La on solidification microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(1): 103-110.

[14] 曾强，宋东福，李文树，王顺成，李继林，张卫文. 镁含量对手机中框用压铸 Al-10.5Si-5Zn-*x*Mg 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术，2019, 40(12): 1242-1248.
ZENG Q, SONG D F, LI W S, WANG S C, LI J L, ZHANG W W. Effect of magnesium content on microstructure and mechanical properties of die cast Al-10.5Si-5Zn-*x*Mg alloy for cell phone frame[J]. Foundry Technology, 2019, 40(12): 1242-1248.

[15] 马建辉，郭鹏. Cu 含量对铝合金活塞材料组织和性能的影响[J]. 热加工工艺，2014, 43(14): 90-92.
MA J H, GUO P. Effect of Cu content on microstructure and property of Al alloy piston material[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(14): 90-92.

[16] 谷立东，应韬，杨剑英，李德江，曾小勤. 变形及热处理对 Al-Sc 二元合金力学性能与导电性能的影响[J]. 铸造技术，2020, 41(3): 197-202.
GU L D, YING T, YANG J Y, LI D J, ZENG X Q. Effect of deformation and heat treatment on mechanical and electrical properties of Al-Sc binary alloy[J]. Foundry Technology, 2020, 41(3): 197-202.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net