

# 稀土元素铈镧添加对铝合金微观组织与力学性能的影响

## Effect of Ce and La Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys

供稿|闫洪 / YAN Hong

### 内容导读

铝合金因其优异的铸造性能和轻质特性，在航空航天、汽车制造等领域具有广泛应用。然而，其显微组织中粗大的针片状共晶硅往往成为性能瓶颈，限制了合金的强度与塑性。本研究通过在 Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.23Fe 合金中添加质量分数为 0.20% 的铈 (Ce) 和 0.10% 的镧 (La)，系统探讨了稀土元素对合金显微组织及力学性能的改性作用。结果表明，铈镧混合稀土的加入显著细化了共晶硅，使其平均尺寸由 6.57  $\mu\text{m}$  降至 2.31  $\mu\text{m}$ ，形貌由针片状转变为颗粒状，长径比由 3.06 下降至 1.35。微观结构的优化直接带来了力学性能的提升：合金的抗拉强度从 126.48 MPa 提高至 157.31 MPa，断后伸长率从 1.6% 增至 2.1%，分别提升 24.38% 和 31.25%。此外，稀土化合物质点在基体中均匀分布，起到了弥散强化的作用。

铝合金具有优异的铸造流动性、较宽的固液并存区、低密度及良好的成型性与加工性，在航天、航空和汽车等技术领域起到十分重要的作用<sup>[1-2]</sup>。但铝合金的显微组织中存在粗大的针片状共晶硅，其尖端棱角处易引起应力集中，破坏铝基体的连续性，从而严重降低铝合金的力学性能，极大限制了其应用范围。因此，改善共晶硅的形状和尺寸是提高铝合金性能的重要途径。随着现代工业的发展，合金化是提升铝合金性能的关键手段<sup>[3]</sup>。变质处理是指在铝合金中加入部分合金元素，以协同改善组织与性能的工艺方法，是提高合金性能的重要手段。

传统变质剂存在诸多缺陷：钠盐变质存在时效期短和失效快的问题；锶变质存在吸气倾向；磷虽能细化初晶硅，但反应过程中会产生有毒气体，造成严重的环境污染。稀土作为变质剂具有无污染、变质效果长效稳定等优势，能够克服传统变质剂的不足，具有广阔的应用前景。此外，在铝合金中加入稀土元素，可改善显微组织、细化晶粒、减少裂纹源，同步提升合金的强度、韧性、加工性和耐热性。稀土合金化技术已推动铝合金发展成为性能优异的结构材料，其应用也从单一稀土合金化发展为复合合金化，未来将对材料领域的发展起到重要作用。

作者单位：昆明冶金研究院有限公司，云南 昆明 650031

长期以来,稀土在冶金领域的应用主要集中于钢铁材料;其在铝合金中的应用虽起步较晚,但发展较快,已取得诸多成果。铝合金是除钢铁外应用最广泛的基础结构材料<sup>[4]</sup>,随着电子产品集成度的提高,设备发热量持续增加,对合金的导热性提出了更高要求。例如,ADC12铝合金的导热系数仅为96 W/(m·K),很大程度上制约了其进一步发展;而采用La、Ce混合稀土对铝合金进行变质处理后,其导热系数提升至107.8 W/(m·K),散热能力得到显著增强,且共晶硅发生明显钝化,展现出良好的变质效果<sup>[5-6]</sup>。对于铸造Al-8Si合金,加入La可提高组织均匀性,有利于降低硅对电子散射的阻碍,进而提升铝合金的电导率<sup>[7]</sup>。稀土元素在铝合金中可发挥显著的合金化作用:一方面,稀土与多种元素具有较强的亲和力,能生成高溶点的稀土化合物,有效提升铝合金的性能;另一方面,稀土的化学活性较强,可吸附于晶粒界面,阻碍晶粒长大,导致晶粒细化<sup>[8]</sup>。在铝合金中加入La元素,可使共晶硅尺寸显著减小,弥散分布程度大幅提升<sup>[9]</sup>;稀土Ce、La的加入可细化 $\alpha$ -Al枝晶,提高工业纯铝的导电性、抗拉强度和延伸率<sup>[10-11]</sup>。由此可见,稀土不仅能改善共晶硅的形状和尺寸,还能提高铝合金的性能<sup>[12-13]</sup>。在耐腐蚀方面,未添加稀土的铝合金中 $\alpha$ -Al相发生了严重腐蚀;加入Ce元素后,铝合金的晶粒变得细小均匀,腐蚀速度显著降低,抗晶间腐蚀能力得到有效提升<sup>[14]</sup>。因此,深入研究稀土在铝合金中的作用,进一步推动稀土在铝合金领域的应用,对于我国将资源优势转换为经济优势具有重要意义。与单一稀土相比,混合稀土对铝合金具有更好的优化效果。基于此,本文通过在铝合金中添加Ce和La混合稀土,系统观察合金的显微组织特征,研究显微组织变化带来的合金力学性能的规律,以期开发高强韧铝合金提供理论参考,满足实际应用的需求。

### 试验材料和方法

在铝合金的基础上添加质量分数为0.20%的Ce和0.10%的La制备试验所用合金,原材料包括纯铝、工业硅和铈镧混合稀土(含65.36%Ce和33.79%La(质量分数))。合金的具体制备过程如

下:首先将纯铝放入坩埚,升温至740℃,待完全熔化后保温15 min,经扒渣处理后加入Si,继续保温15 min;待Si熔化后,依次搅拌、扒渣、静置1.5 min,随后升温至760℃并保温15 min;向熔体中加入铈镧混合稀土,再次搅拌、扒渣、静置15 min,随炉冷却至600℃时浇铸于室温模具中,冷却成型后取出得到铝合金试棒。未添加稀土的合金与含有铈镧混合稀土的合金的化学成分见表1。

表1 合金的化学成分(质量分数)

| 合金      | Si   | Ce   | La   | Mg   | Ti   | Fe   | Al |
|---------|------|------|------|------|------|------|----|
| 添加稀土元素前 | 7.01 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 0.15 | 0.23 | 余量 |
| 添加稀土元素后 | 7.01 | 0.20 | 0.10 | 0.18 | 0.15 | 0.23 | 余量 |

试样取自铝合金铸锭,经镶样、机械研磨与抛光处理后,采用质量分数为0.5%的HF溶液进行腐蚀,清洗烘干后,通过金相显微镜观察合金的显微组织;利用图相分析仪观察共晶硅形貌,并测定其尺寸和长径比;借助扫描电子显微镜和能谱分析仪对稀土化合物相进行分析;拉伸试验采用电子万能试验机,拉伸速度为10 mm/min,试样标距为60 mm,直径为6 mm。

### 试验结果和分析

#### 显微组织中共晶硅的形貌

图1为铸态铝合金的显微组织照片,其组织主要由 $\alpha$ -Al相和共晶硅相组成,其中白色相为 $\alpha$ -Al基体,黑色相为共晶硅相。在未加入稀土的Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.23Fe合金中,共晶硅呈现粗大的针片状,见图1(a);加入Ce和La混合稀土后,合金的共晶硅转变为细小的颗粒状,其显微组织得到较大改善,共晶硅颗粒的尺寸和圆整度相比未加稀土的合金均实现不同程度的优化,如图1(b)所示。这是由于吸附在硅相表面及固-液界面前沿的稀土原子,不仅抑制了共晶硅的生长速度,改变了其生长方向,还通过改变共晶硅的生长机制,使其由粗大的针片状转变为细小的颗粒状<sup>[15]</sup>;此外,凝固界面前沿稀土Ce和La的富集,进一步阻碍了共晶硅的生长,从而限制了共晶硅的长大并改变其形状,最终表现为稀土元素对共晶硅的细化作用,显著降低了共晶硅的尺寸与长径比。由金相组织的变化可

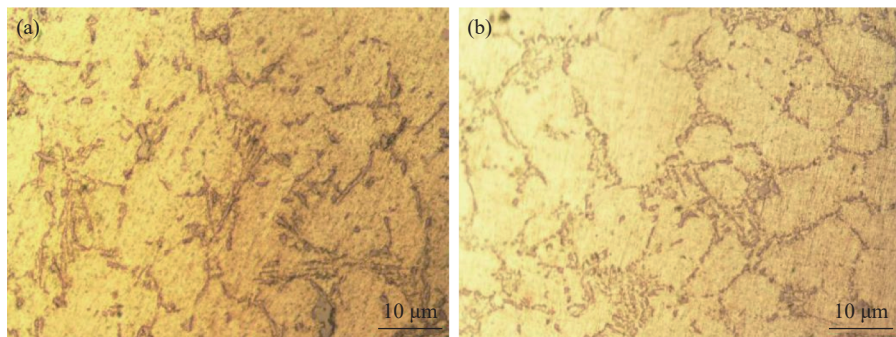


图1 铸态合金显微组织中的共晶硅相: (a) Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.23Fe, (b) Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.20Ce-0.10La-0.23Fe

知, 稀土元素 Ce 和 La 不仅能细化共晶硅, 而且可有效改善共晶硅的形貌。

由图像分析仪对共晶硅的分析结果可知, 未加入稀土的合金中, 共晶硅较为粗大, 平均尺寸为  $6.57\ \mu\text{m}$ , 长径比为 3.06; 加入 Ce 和 La 混合稀土后, 共晶硅转变为细小颗粒状, 其平均尺寸和长径比分别降至  $2.31\ \mu\text{m}$  和 1.35, 相较于未加稀土的合金分别降低 64.84% 和 55.88%。这表明稀土的加入实现了共晶硅的细化和形貌优化, 原因在于熔体中的 Ce 和 La 原子吸附于共晶硅表面, 阻止了硅相的原有生长方式, 从而使其转变为颗粒状。

#### 合金物相分析

为进一步分析 Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.20Ce-0.10La-0.23Fe 合金的组织特征, 对其进行扫描电镜

和能谱分析, 结果如图 2 所示。可见该合金的显微组织由  $\alpha$ -Al 基体、共晶硅和白亮色物相组成, 其中稀土化合物主要呈白亮色, 见图 2(a)。为确定白亮色物相的化学成分, 对其进行能谱分析 (见图 2(b)), 结果显示, Mg、Al、Si、Ti、La、Ce 的质量分数分别为 0.55%、75.07%、1.77%、8.64%、3.49%、10.48%, 表明在合金中加入 Ce 和 La 可生成 AlSiTiLaCe 稀土化合物相<sup>[16]</sup>。该稀土化合物相呈点状、针状和块状形貌, 其中点状相的数量较多且尺寸较小, 约为  $1\ \mu\text{m}$ ; 这些稀土化合物质点在基体中弥散分布, 可对合金起到弥散强化的作用。共晶硅的形貌和能谱分析结果见图 3, 可见共晶硅中 Al 和 Si 的质量分数分别为 47.24% 和 52.76%。 $\alpha$ -Al 基体的形貌和能谱分析如图 4 所示, 其 Al 和 Si 的质量分数分别为 99.47% 和 0.53%。

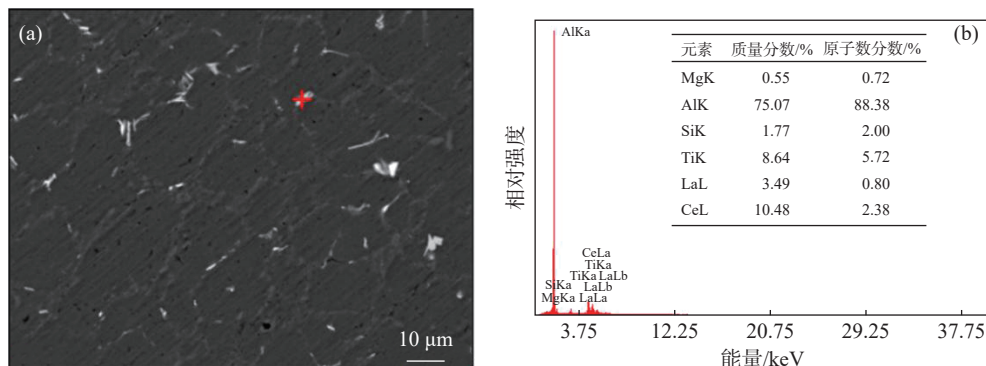


图2 稀土化合物的形貌 (a) 及对应能谱分析 (b)

#### 合金的力学性能

合金的力学性能测试结果如表 2 所示。未加稀土的铸态铝合金中, 当共晶硅平均尺寸为  $6.57\ \mu\text{m}$ 、长径比为 3.06 时, 其屈服强度为 73.00 MPa, 抗拉

强度为 126.48 MPa, 断后伸长率仅为 1.6%; 添加 Ce 和 La 混合稀土后, 铸态合金的共晶硅平均尺寸降至  $2.31\ \mu\text{m}$ , 长径比降至 1.35, 其屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别提升至 77.00 MPa、157.31 MPa

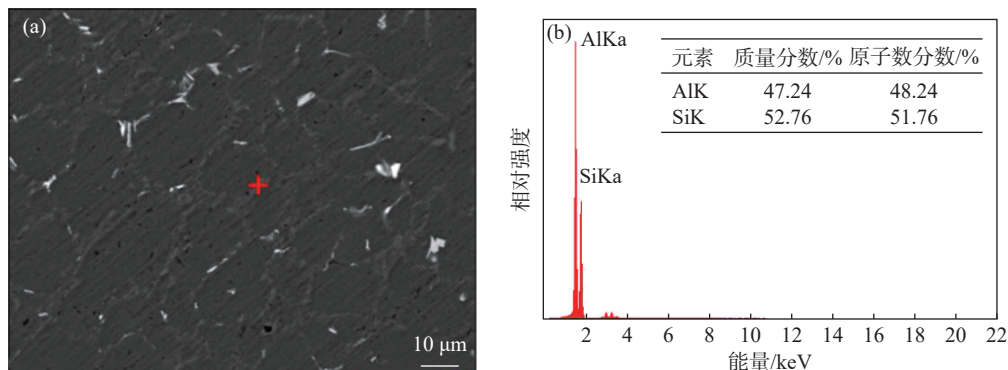


图3 共晶硅的形貌 (a) 及对应能谱分析 (b)

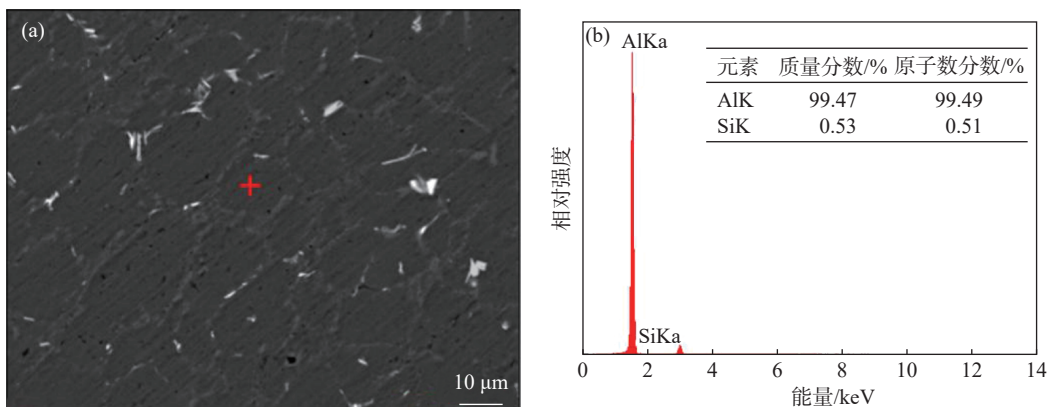


图4 α-Al基体的形貌 (a) 及对应能谱分析 (b)

和 2.1%，相较于未加稀土的合金分别提升 5.48%、24.38% 和 31.25%。合金力学性能的改善结果表明，

稀土的添加不仅实现了共晶硅的细化和圆整化，还有效提高了铝合金的强度和伸长率。

表2 合金的力学性能

| 合金      | 共晶硅平均尺寸/μm | 共晶硅长径比 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 断后伸长率/% |
|---------|------------|--------|----------|----------|---------|
| 添加稀土元素前 | 6.57       | 3.06   | 73.00    | 126.48   | 1.6     |
| 添加稀土元素后 | 2.31       | 1.35   | 77.00    | 157.31   | 2.1     |

铸态 Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.20Ce-0.10La-0.23Fe 合金的微观组织主要由 α-Al 相、共晶硅相和 AlSiTiLaCe 稀土化合物相组成，在铝合金中添加 Ce 和 La 混合稀土后，合金内部会形成细小的稀土化合物质点并弥散分布于基体，不仅抑制了共晶硅的长大，实现晶粒细化，还提高了合金的力学性能。共晶组织的细化主要源于 2 方面：一方面，稀土 Ce 和 La 原子的固溶度低，易富集于固-液界面；另一方面，稀土元素化学性质活泼，可在熔体中吸附于析出的共晶硅表面，通过阻碍其生长实现变质，促使共晶硅从针片状转变为细小颗粒状，降低应力集中，从而提高合金的强度与塑性<sup>[17]</sup>。此外，

共晶硅晶粒越细小，其晶界数量越多，而晶界对变形过程中产生的位错具有阻碍作用，表现为合金力学性能的提升。

## 结束语

未加稀土的 Al-7Si-0.18Mg-0.15Ti-0.23Fe 合金中，共晶硅较为粗大，平均尺寸为 6.57 μm，长径比为 3.06；添加 Ce 和 La 混合稀土后，合金的共晶硅转变为细小颗粒状，其平均尺寸和长径比分别降至 2.31 μm 和 1.35，相较于未加稀土的合金分别降低 64.84% 和 55.88%，圆整度也得到显著提升，表明稀土元素在合金中可实现共晶硅的细化与圆整化。共

晶硅形貌的改善,使合金的抗拉强度从 126.48 MPa 提高至 157.31 MPa,断后伸长率从 1.6% 提高至 2.1%;同时,细小的 AlSiTiLaCe 稀土化合物质点在基体中弥散分布,起到一定的弥散强化作用。

## 参考文献

- [1] 朱志华,马路路,刘华,等. Cu 对稀土 A356 合金组织及力学性能的影响. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(6): 683
- [2] 刘小梅,刘岚,刘政. 稀土 La 对半固态 A356 铝合金凝固组织的影响. 铸造, 2010, 59(7): 708
- [3] 陈志国,周娴,舒军,等. 稀土在铝合金中微合金化研究进展. 矿冶工程, 2010, 30(2): 102
- [4] 舒华记,司乃潮,孙少纯,等. AlTi<sub>5</sub>B<sub>1</sub> 对亚共晶铝硅合金的组织性能的影响. 铸造, 2011, 60(11): 1122
- [5] 黄锋,王广,赵劲锋,等. La+Ce 混合变质及热处理对 ADC12 铝合金导热性能的影响研究. 表面工程与再制造, 2023, 23(5): 24
- [6] 李文树,宋东福,周海涛,等. 细化变质处理对 A356.1 合金组织和力学性能的影响. 中国有色金属学报, 2020, 30(7): 1491
- [7] 谷立东,王乐耘,应韬,等. 稀土 La 对铸造 Al-Si 合金组织与性能的影响. 铸造技术, 2024, 45(5): 475
- [8] 周晓霞,张仁元,刘银焱. 稀土元素在铝合金中的作用和应用. 新技术新工艺, 2003(4): 43
- [9] 胥锴,刘萍. 稀土 La 对 ZL101 合金的变质研究. 热加工工艺, 2008, 37(1): 12
- [10] 方东,范晓明. Ce 对高铁 A356 合金铸态显微组织的影响. 特种铸造及有色合金, 2011(1): 87
- [11] 王丽萍,康福伟,郭二军,等. 单一稀土 Ce, La 和混合稀土在工业纯铝中的作用. 中国稀土学报, 2003(2): 218
- [12] 赖华清,徐翔,范宏训. 稀土在铸造铝合金中的作用. 热加工工艺, 2001(5): 37
- [13] 张秀梅,史志铭,刘瑞堂,等. 稀土 Ce 变质对 ZL101 合金铸态组织和性能的影响. 铸造, 2008(8): 838
- [14] 段国燧,杨湘杰,何毅. Al-Ce 中间合金对 A356 合金晶间腐蚀性能的影响. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(4): 458
- [15] 王士贺,王志峰,范学义,等. 稀土 Ce 中间合金对 A356 铝合金组织的影响. 中国铸造装备与技术, 2010(4): 7
- [16] 徐衡. 稀土元素铜对汽车轮毂用 A356 铝合金显微组织与力学性能的影响. 机械工程材料, 2017, 41(11): 68
- [17] 甘佰辉,赵愈亮,刘欢,等. 微量 Ce 添加对 Al-Si-Fe 铝合金微观组织及导热性能的影响. 铸造技术, 2024, 45(5): 466

基金项目: 云南省社会发展科技计划—科研院所技术开发研究专项资助项目 (2011CF009)。

作者简介: 闫洪 (1961—), 男, 云南省大理人, 正高级工程师, 1982 年毕业于云南大学物理系金属物理专业。主要研究方向: 金属材料研究。通信地址: 云南省昆明市五华区龙泉路 343 号云大小区 23 栋 1 单元 502 室; E-mail: yan6230196@sina.com。