

微量 Sr 和 Er 对铸造 Al-Si-Cu 合金组织和性能的影响

周鹏飞 顾 琪

(盐城工业职业技术学院智能制造学院, 盐城 224005)

摘 要 铸造 Al-9Si-3Cu 合金强度的提高可以满足汽车制造业日益增长的要求。通过添加微量的 Sr 和 Er, 开发了一种抗拉强度和伸长率分别高达 287.7 MPa 和 3.8% 的新型高强高韧性铸造 Al-9Si-3Cu 合金。结果表明, Sr 和 Er 原子吸附在共晶 Si 表面, 并促使孪晶在 70.5° 和 39° 方向上分支, Sr 和 Er 原子的协同效应使得共晶 Si 尺寸减小至 500~800 nm。此外, 合金中形成了细小 Al₃Er 颗粒, 位错线通过 Al₃Er 颗粒时被拉伸并最终形成位错环, 对合金强度的提升有积极作用。此外, 还讨论了 Sr 和 Er 对共晶 Si 的变质机制以及合金的强化机制。

关键词 Al-9Si-3Cu; 共晶 Si; 孪晶; 位错环; 机制

中图分类号 TG146.21; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250135

Effects of Trace Sr and Er on Microstructure and Properties of Cast AlSiCu Alloys

ZHOU Pengfei, GU Qi

(School of Intelligent manufacturing, Yancheng Polytechnic College, Yancheng 224005)

Abstract: The improvement in the strength of cast Al-9Si-3Cu alloys can meet the growing demands for automotive industry. A novel high-strength and high-toughness cast Al-9Si-3Cu alloy was developed by adding trace amounts of Sr and Er, which exhibits a tensile strength of 287.7 MPa and elongation of 3.8%. The results indicate that Sr and Er atoms are adsorbed on the surface of eutectic Si, promoting the branching of twins along 70.5° and 39° directions. The size of eutectic Si is reduced to approximately 500~800 nm through synergistic effect of Sr and Er atoms. In addition, small Al₃Er particles are formed within the alloy, and dislocation lines are tensile when passing through Al₃Er particles to generate dislocation loops, which has a positive effect on strength enhancement of alloys. Furthermore, the modification mechanism of eutectic Si by Sr and Er, as well as strengthening mechanisms of the alloy were discussed.

Key Words: Al-9Si-3Cu, Eutectic Si, Twin, Dislocation Loop, Mechanism

铸造 Al-9Si-3Cu 合金具有高的比强度、良好的流动性以及易回收性而广泛应用于轻量化零部件的制造^[1-3]。Al-Si 系合金正常凝固的组织包含粗大的 α -Al 枝晶和针状共晶 Si, 这会引起应力集中, 降低合金的力学性能, 特别是塑性^[4-6]。因此, 细化和变质共晶 Si 对于提高 Al-Si 系合金强韧性至关重要^[7-8]。

近年来, 微合金化对 Al-Si 系合金具有显著的变质效果而被广泛研究和应用^[9-10]。ZHENG Q J 等^[4]用 La 改变了亚共晶 Al-Si 合金的形貌, 提高了合金的力学性能, La 含量为 0.006% 时, 合金力学性能最佳。COLOMBO M 等^[8]发现 Er 可以使共晶 Si 分裂和球化, 显著提高合金的力学性能。HU Z 等^[9]发现 Yb 有助于孪晶的形成, 有效减小共晶 Si 的尺寸。LI J H 等^[10]在

Sr 变质的 Al-5Si 合金中发现共晶 Si 孪晶以 70.5° 方向分支。TANG P 等^[11]在 Er 变质的 Al-10Si 中, 发现在基体和共晶 Si 中形成了细小的 Al₃Er 颗粒, 细化了共晶 Si 并提高了强度。

ZENG L Y 等^[5]通过添加 Ce 和 Sr, 使得 A356 合金的铸态抗拉强度和伸长率分别达到了 202 MPa 和 11.4%。AMER S M 等^[6]用 Cr 替代 Mn 提高了 Al-Cu-Er-Mg-Zr-Fe-Si-Ti 合金的抗拉强度和伸长率, 分别达 372 MPa 和 6%。LIU W Y 等^[7]发现, 复合添加 Gd 和 Zr 后 A356 合金的强度和伸长率明显改善, 添加质量分 0.4% (质量分数, 下同) 的 Gd 和 0.5% 的 Zr 时合金力学性能最佳。此外, SHI Z P 等^[12]利用 APT 技术揭示了 Sr 存在于共晶 Si 和 Al 基体中, 而 Sc 仅存在于共晶 Si

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-04-22

基金项目: 2025 年江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究资助项目(25KJA430016); 2025 年江苏高校“青蓝工程”资助项目(5020066); 2024 年盐城市自然科学基金面上项目(YCBK2024057); 2025 年校级科技创新团队资助项目(YGKJ202501); 2025 年博士基金资助项目(YGQD2025006)

第一作者: 周鹏飞, 男, 1988 年出生, 副教授, E-mail: zpfjsyc@126.com

引用格式: 周鹏飞, 顾琪. 微量 Sr 和 Er 对铸造 Al-Si-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 589-595.

ZHOU P F, GU Q. Effects of trace Sr and Er on microstructure and properties of cast AlSiCu alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 589-595.

中, Sr 和 Sc 原子的不同分布是共晶 Si 变质的关键因素。此外, 经 Al-6Sr-7La 变质的 A356.2 合金力学性能也显著提高^[13]。然而, 混合添加变质元素对 Al-Si 合金的变质和强化机制尚未有明确的结论。

本研究在 Al-9Si-3Cu 合金中加入总量少于 0.1% 的 Sr 和 Er。通过透射电镜 (TEM) 对变质合金的微观组织变化进行表征, 观察第二相颗粒的分布和尺寸, 重点研究 Sr 和 Er 对共晶 Si 的变质和强化机制, 为 Al-9Si-3Cu 合金的低成本微合金化技术提供新思路, 有望拓展 Al-9Si-3Cu 合金的应用领域。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验主要原料为纯 Al (99.9%)、纯 Cu (99.9%)、Al-20Si、Al-10Sr 和 Al-10Er 中间合金。将配置好的 Al-9Si-3Cu 合金放置在石墨坩埚中, 调整电阻炉温度至 780 °C, 待合金全部熔化, 搅拌并静置 30 min。待熔液温度下降至 730 °C, 加入 Al-10Sr 和 Al-10Er, 保温 30 min, 再升温至 750 °C 加入 1% 的 C_2Cl_6 , 除气扒渣, 静置 15 min, 待熔液温度降至 730 °C 时, 将其浇入 200 mm×20 mm×300 mm 的水冷铜模中。本研究的 6 种合金化学成分见表 1。

表 1 试验合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of experimental alloys %

合金	w_B					
	Si	Cu	Fe	Sr	Er	Al
E00	8.96	3.01	0.012	—	—	余量
E40	9.04	3.02	0.013	0.032	—	余量
E41	9.02	2.96	0.018	0.036	0.009	余量
E43	9.05	3.05	0.009	0.016	0.026	余量
E45	8.89	2.97	0.011	0.039	0.047	余量
E03	8.95	3.02	0.012	—	0.029	余量

1.2 组织分析

使用奥林巴斯 GX53 型光学显微镜 (OM) 观察合金的低倍微观组织。使用飞纳 Phenom XL 型扫描电镜 (SEM-EDS) 观察微观组织并分析其成分组成。使用体积分数为 0.5% HF 溶液对 OM 试样进行 3~5 s 的腐蚀; 使用 Keller 试剂 (2.5 mL 的 HNO_3 +1.5 mL 的 HCl +1 mL 的 HF +95 mL 的 H_2O) 对 SEM 分析试样进行 20 s 深腐蚀。利用 Image Pro Plus6.0 统计合金二次枝晶臂间距 (SDAS)。使用 100~2 000 目 SiC 砂纸将试样打磨至约 500 μm , 然后冲压成直径约为 3 μm 的薄片。薄片经过离子减薄, 减薄角度为 3°, 时间约为 4 h。合金薄区中析出物的微观结构特征和成分通过 JEOL-2100F 型透射电镜检测分析, 工作电压为 200 kV。

1.3 力学性能

拉伸试样在电子万能材料试验机 (Agx-10KNVD) 上进行, 拉伸速度为 1 mm/min, 拉伸试样取至铸锭中间部位, 其直径为 6 mm, 标距为 25 mm, 测试在室温下进行。每种合金测试 3 根试样, 测试结果取平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 组织观察

图 1 为不同合金的低倍微观组织。E00 合金中主要包含针状共晶 Si 和枝晶状 α -Al。单独加入 Sr 后, 共晶 Si 尺寸明显下降, α -Al 仍呈枝晶状, 见图 1b。加入 Sr 和 Er 变质后, 共晶 Si 分布变得更加均匀和细小, 枝晶组织也明显细化, 见图 1c~图 1e。在仅添加 Er 的合金中可以发现共晶 Si 尺寸比未加 Er 和 Sr 的合金 (E00) 有所下降, 但比含 Sr 合金要粗大, 见图 1f, 这说明单独添加 Er 对共晶 Si 的变质效果没有单独添加 Sr 或者 Sr、Er 复合变质好。图 2 为不同合金的二次枝晶臂间距 (SDAS)。可以看出, 其 SDAS 值分别为 47.5、47.1、28.3、19.8、24.1 和 24.6 μm , 其中 E43 合金的 SDAS 最小, 这表明添加 0.04% 的 Sr 和 0.03% 的 Er 对合金枝晶的细化最佳。E45 合金的 SDAS 高于 E43 合金, 这表明进一步增加 Er 含量并没有提高凝固组织中枝晶的细化效果。E03 合金的 SDAS 和 E43 相近, 这说明 Er 含量相同情况下, 其对枝晶细化效果相近。从以上结果可知, Sr 主要起变质共晶 Si 作用, 而 Er 的加入可以进一步细化共晶 Si, 并主要起细化枝晶的作用。

图 3 为不同合金的 SEM 形貌。可以看出, E00 合金中存在大量粗大的 α -Al 相和针状共晶 Si。仅加入 Sr 变质后, 共晶 Si 显著细化, 见图 3b。当合金中加入 0.04% 的 Sr 和 0.01% 的 Er 时, 共晶 Si 从针状向纤维状转变, 枝晶被细化, 呈近似椭球状, 见图 3c。随着 Er 含量增加, 共晶 Si 进一步细化, α -Al 转变为近球形, 见图 3d 和图 3e。从仅加 Er 的合金 E03 也可观察到枝晶组织和 E43 合金类似, 这与图 1 中的低倍微观组织演变规律一致。图 4 为 E45 合金中不同元素的分布。可以看出合金中 Al、Si 和 Cu 元素的分布, 而由于添加量较小, 未观察到 Sr 和 Er 元素。

图 5 为 E43 合金的 TEM 图及其相应元素的分布。值得注意的是, 在图 5a 和图 5f 中观察到合金中形成了大量细小的共晶 Si 颗粒, 尺寸为 500~800 nm。同时, 在 α -Al 基体中形成的一些纳米颗粒 (见图 5a 中黄色圆圈) 中观察到 Cu 与 Er 元素聚集 (见图 5b~图 5e), 而 Er 元素单独富集在较小的不规则颗粒中 (见图 5e 中蓝色

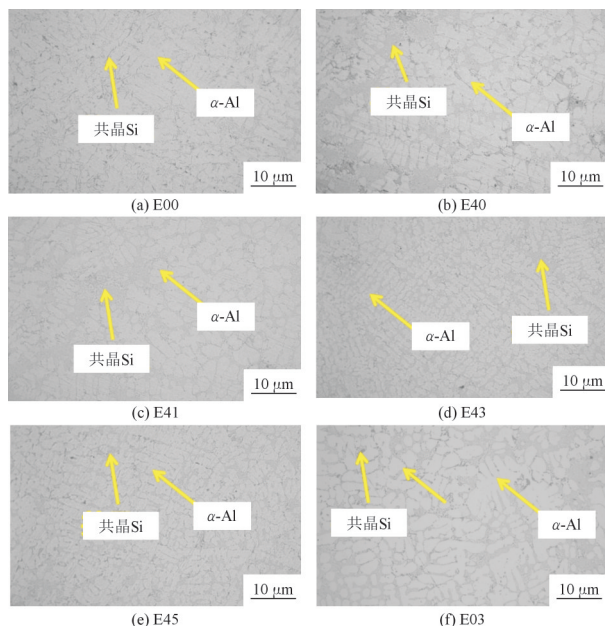


图1 不同Sr、Er含量合金低倍微观组织

Fig.1 Low magnification microstructure of alloys with different Sr and Er contents

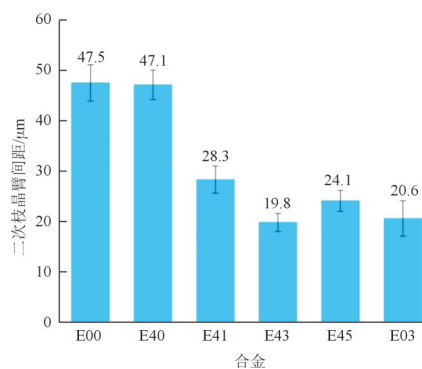


图2 不同Sr、Er含量合金二次枝晶臂间距

Fig.2 SDAS of alloys with different Sr and Er contents

方框),长度约为500 nm,宽度约为10 nm。从图5f中观察到较大的白色颗粒生长在共晶Si的边界上,从图5g~图5j元素分布可知,Er元素的分布与较大的白色颗粒中的Al和Cu的分布密切相关,可以从Er元素的分布推断出,在Sr和Er变质时形成了AlCuEr和AlEr相。尽管在E43合金中观察到了Er元素,但未检测到

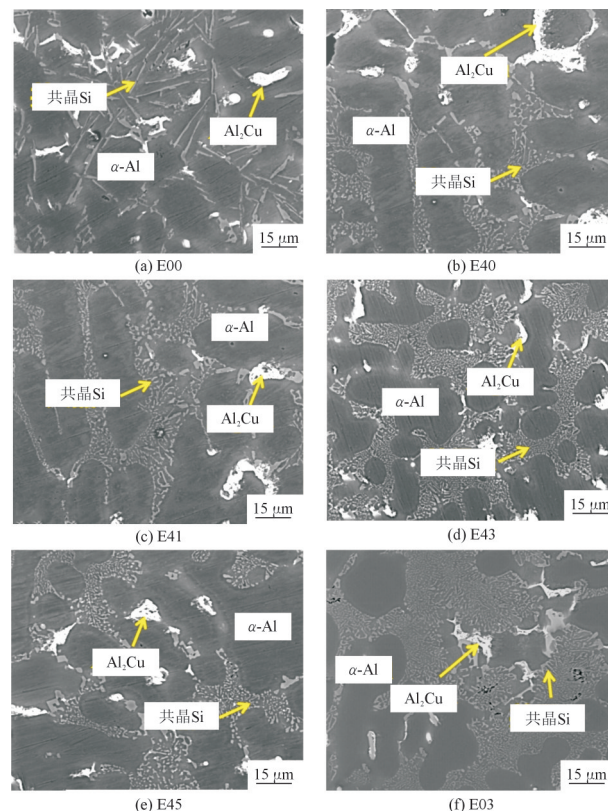


图3 不同Sr、Er含量铸态合金SEM形貌

Fig.3 SEM morphologies of as-cast alloys with different Sr and Er contents

Sr,这主要是因为E43合金中Sr元素的实际含量很低($1.6 \times 10^{-2} \%$),并且Sr元素仅存在于共晶Si中,与Al元素一起富集,这在文献[13]中得到证实。

640 ℃时,Er在铝合金中的固溶度为0.046 1%(摩尔分数),且随着温度下降,固溶度会下降^[14-15],这意味着在固-液界面处Er元素的浓度将相应增加,随着凝固的进行会析出含Er的金属间化合物^[16]。根据Al-Cu-Er的三元相图,在平衡条件下会发生三元共晶反应($L \rightarrow \alpha\text{-Al} + \tau_1\text{-Al}_8\text{Cu}_4\text{Er} + \text{Al}_3\text{Er}$)^[17-20]。PATEL D N等^[21]指出,Al₈Cu₄Er形成于α-Al相和枝晶间共晶相的界面上,并朝液相方向生长。在Al-Cu-Er和Al-Si-Cu-Er合金中观察到了Al₈Cu₄Er相,这可进一步推断本研

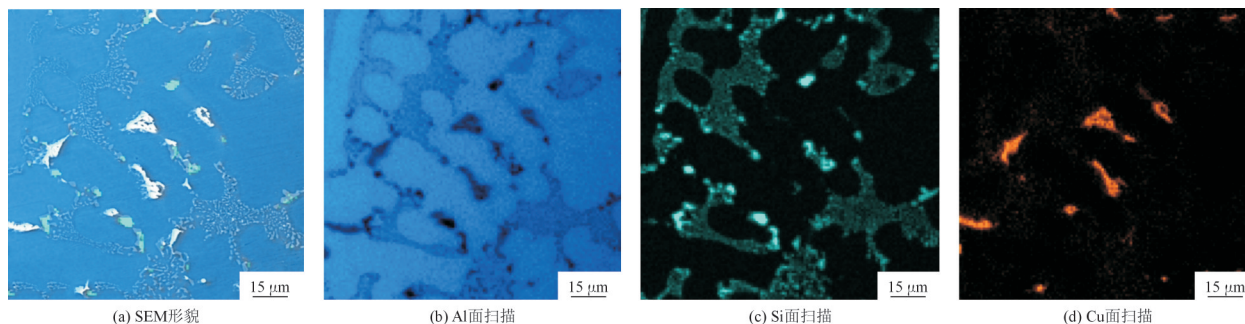


图4 E45合金的SEM形貌及EDS元素面扫描

Fig.4 SEM morphologies and EDS mapping of E45 alloy

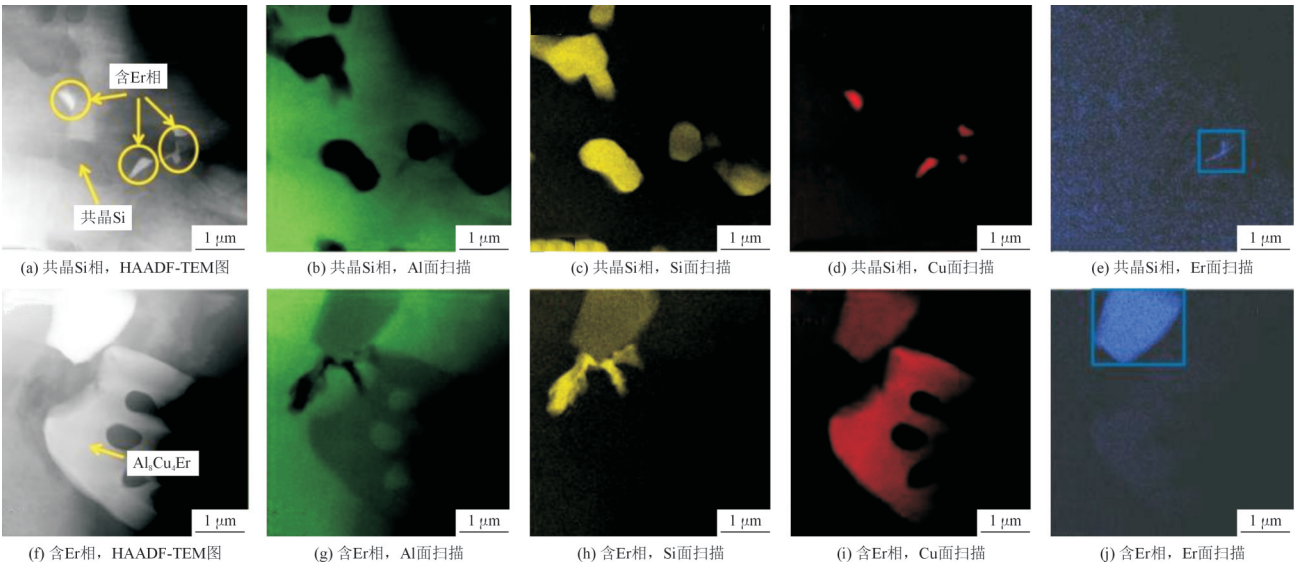


图5 E43合金的TEM图及其相应元素的分布
Fig.5 TEM images and element distribution of E43 alloy

究中的 Al-Cu-Er 相是 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 相^[22]。PANDEE P 等^[23]指出,添加 Er 元素会形成 Al_3Er 纳米相。值得注意的是,图 5a 和图 5f 中 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Er}$ 相的尺寸大多在 $0.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 之间,而 Al_3Er 相是纳米颗粒,其长度约为 $500\ \text{nm}$,宽度约为 $10\ \text{nm}$ 。

2.2 力学性能

图 6 为不同合金的应力-应变曲线,表 2 为合金的力学性能。可以看出,E43 合金的综合力学性能更佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 $287.7\ \text{MPa}$ 、 $248.6\ \text{MPa}$ 和 3.8% 。与有关研究中开发的铸态 Al-Si 合金性能相比(ADC12-Sr-Sc ^[12]、 ADC12-Y ^[24]、 A380-La-Y ^[25]、 A380-Ce ^[26] 和 Al-11Si-Bi-Sr ^[27]),E43 合金的抗拉强度和伸长率更高。

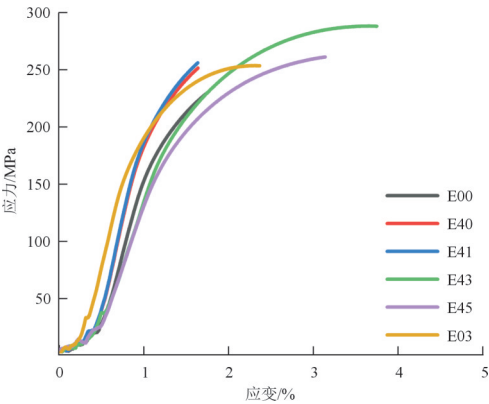


图6 不同合金的应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves of alloys

图 7 为不同合金的拉伸断口形貌。在 E00 合金中可观察到一些撕裂棱和多个解理面,其断裂特征为韧性-脆性混合模式。加入 Sr 后解理面尺寸减小,见图

表 2 不同合金的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of alloys

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
E00	230.9 ± 1.8	184.3 ± 1.5	1.4 ± 0.16
E40	249.8 ± 2.5	188.0 ± 1.7	1.5 ± 0.12
E41	256.1 ± 2.2	192.1 ± 1.9	1.6 ± 0.14
E43	287.7 ± 2.7	248.6 ± 2.4	3.8 ± 0.17
E45	259.4 ± 3.1	214.5 ± 2.6	3.2 ± 0.11
E03	251.9 ± 2.9	209.4 ± 2.1	2.3 ± 0.13

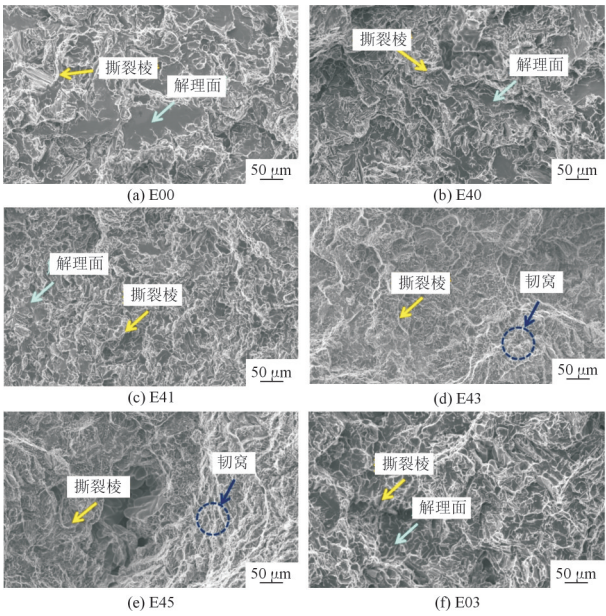


图7 不同 Sr 和 Er 含量变质合金铸态断口形貌
Fig.7 Fracture morphologies of as-cast alloys with different Sr and Er contents

7b。当添加 Sr 和 Er 变质时,解理面的尺寸进一步减小,撕裂棱的数量增加,见图 7c。随着 Er 含量的进一步增加,在 E43 和 E45 合金中明显形成了不均匀的韧窝,同时撕裂棱进一步增加,见图 7d 和图 7e。韧窝是韧性

断裂机制的特征,表明添加Sr和Er变质提高了合金的塑性,这与表2中伸长率的结果一致。断裂机制的变化以及合金伸长率的增加与共晶Si形貌的变化直接相关。共晶Si形貌从针状转变为纤维状,减少了应力集中,有助于提高合金的塑性。此外,添加Sr和Er后,细化了枝晶也促进了基体变形更加均匀,因此E43和E45合金表现出韧性断裂机制。当仅添加Er时(E03合金),断口中仍有解理面和撕裂棱存在,没有观察到韧窝,见图7f。从断口形貌分析也可以得出,Sr加入使共晶Si尺寸下降,提高了合金韧性;单独加Er细化了枝晶,虽然也有变质共晶Si的效果,但效果不如Sr。在Sr变质的基础上添加Er可进一步细化共晶Si,并结合其枝晶细化作用,进一步提高了合金的强度和韧性。

3 讨论

3.1 组织演变对性能的影响

铸造Al-Si合金中 α -Al枝晶的SDAS和共晶Si形貌直接影响合金的力学性能^[13]。本研究中,添加Sr和Er后细化了枝晶,合金的SDAS从47.5 μm 降低到19.8 μm 。根据LIU W Y等^[7]理论,SDAS与以下因素相关:

$$\lambda_2 = 5.5(Mt_f)^{1/3} \quad (1)$$

$$M = \frac{FD \ln(C_1^m/C_0)}{m(1-k)/(C_0 - C_1^m)} \quad (2)$$

$$K = C_s/C_l \quad (3)$$

式中, λ_2 为SDAS的值, μm ; t_f 为局部凝固时间,s; F 为吉布斯-汤姆森系数; D 为液相中的扩散系数, m^2/s ; m 为液相斜率, $\text{K}/\%$; C_0 为初始合金浓度, $\%$; C_1^m 为共晶浓度; k 为分配系数; C_s 和 C_l 分别为固相和液相的平衡溶

解度。从式(1)可知,SDAS的值取决于 M 和局部凝固时间 t_f ,在本研究中,合金的铸造条件相同,因此局部凝固时间对SDAS的影响并不显著。然而,Er元素在铝合金中的固溶度低,这意味着在凝固过程中,Er元素会富集在固-液界面前沿,阻碍Si的扩散和 α -Al枝晶的生长,导致液相平衡溶解度 C_l 增加。因此,分配系数 k 减小,相应的 M 值减小。因此,添加Er降低SDAS值。SDAS的减小意味着合金组织更加细化,内部的晶界数量增加,有利于提高合金的强度和塑性。因此,E43合金表现出最低的SDAS以及最佳的抗拉强度和伸长率,见图2和表2。

共晶Si形貌是影响铸造Al-Si合金力学性能的另一个重要因素。在外部应力一致的情况下,共晶Si越细小圆润,对合金基体的割裂效应越小,导致伸长率更优异。本研究中,添加Sr和Er变质使共晶Si的尺寸从几十微米减小到500~800 nm,见图5a。共晶Si颗粒的细化不仅减少了合金的应力集中,防止了合金在变形过程中的过早开裂,提高了合金的伸长率。E40、E41、E43、E45和E03合金的伸长率分别为1.5%、1.6%、3.8%、3.2%和2.3%,均高于E00合金的1.4%。

为进一步研究共晶Si的变质机制,观察了E43合金中纳米级共晶Si颗粒的微观结构,见图8。可以看出,多个高密度共晶Si孪晶存在于内部共晶Si中,孪晶在不同方向上分支,如70.5°和39°。根据ZENG L Y等^[5]研究,Si原子在共晶Si生长过程中倾向于通过共价键形成Si四面体。高密度共晶Si孪晶的形成主要是Si四面体的附着,而不是单个Si原子的堆叠,这说明共晶Si更可能在70.5°方向上形成孪晶分支。此外,研究还提出了共晶Si孪晶的生长机制,指出70.5°和39°是共晶Si孪晶生长的可能分支方向,这与文献[9-10]的研究一致。

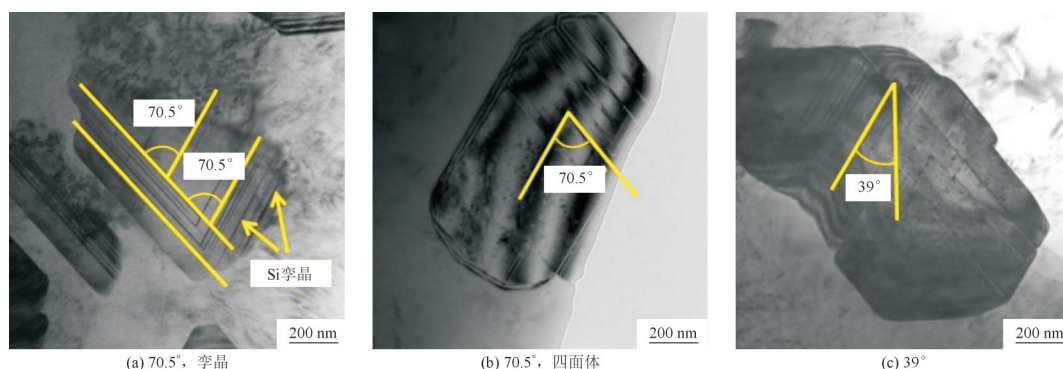


图8 E43合金中共晶Si及其孪晶近似生长方向的TEM明场相

Fig.8 TEM bright field image of eutectic Si and twins in E43 alloy along approximate growth directions

共晶Si变质主要有孪晶凹角机制(TPRE)和杂质诱导孪晶机制(IIT)^[12-13]。图9为在Sr和Er变质合金中共晶Si孪晶的生长机制。通常情况下,由于凝固过

程中的不同过冷条件或杂质的影响,未变质合金中的共晶Si沿 $\langle 112 \rangle_{\text{Si}}$ 方向生长,在单一方向上存在多个平行孪晶^[10,21],见图9a。在变质合金中,Sr和Er原子吸

附在共晶 Si 的固-液界面上,促进共晶 Si 在一定程度上沿 $\langle 112 \rangle_{\text{Si}}$ 方向生长平行孪晶,更多地诱导共晶 Si 在 IIT 机制下生长,并形成沿分支方向 I 生长的孪晶,角度为 70.5° ,见图 9b。随着共晶 Si 的进一步形核和生长, Sr 和 Er 原子继续吸附在分支孪晶的固-液界面上,导致形成沿分支方向 II 生长的孪晶,角度为 70.5° ,从分

支方向 II 到主要 Si 方向的角度变化为 39° ,见图 9c。Sr 和 Er 原子吸附在 $(111)_{\text{Si}}$ 表面导致共晶 Si 连续产生在 70.5° 和 39° 方向上分支的孪晶,最终使共晶 Si 的形貌从针状转变为纳米颗粒状,细化了共晶 Si。共晶 Si 的细化有效减少了共晶 Si 对 Al 基体的分离效应,从而提高合金的力学性能。

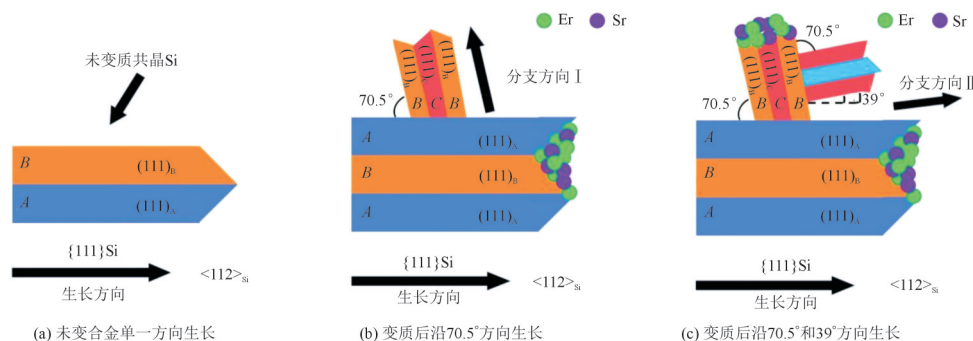


图 9 共晶 Si 孪晶分支生长机制

Fig.9 Branching growth mechanism of eutectic Si twins

3.2 析出相对强度提升的影响

析出相对位错运动的钉扎作用,阻碍位错的滑移,形成位错环,提高合金强度。图 10 为 E43 合金在拉伸变形后的位错形貌。可以清晰地观察到大量分布密集的位错环,同时,在位错环的内部以及周围伴随着尺寸较小且分布均匀的 Al_3Er 。这些析出相作为强有效的钉扎点,与位错的相互作用导致了位错的积聚和弯曲,从而诱导形成了位错环。

图 11 为 Al_3Er 颗粒对经过 Sr 和 Er 变质合金中位错

的阻碍效果的示意图。在拉伸过程中,当位错接触到 Al_3Er 颗粒时,位错受到阻挡而弯曲。为了绕过 Al_3Er 颗粒,位错线逐渐在 Al_3Er 颗粒周围形成一个位错环。在外力的持续作用下,部分位错线被拉伸并远离 Al_3Er 颗粒。随着塑性变形的增加,越来越多的位错聚集在 Al_3Er 颗粒周围,位错线互相缠绕在一起,增大了位错运动的阻力。 Al_3Er 颗粒强烈阻碍位错运动,使位错线弯曲并形成位错环,进一步阻碍位错的运动,对合金的强度提高有积极作用。

4 结 论

(1) 添加 Sr 和 Er 变质剂显著提高了铸态 Al-9Si-3Cu 合金的力学性能。当添加 0.04% 的 Sr 和 0.03% 的 Er 时,合金力学性能最佳,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 287.7 MPa、248.6 MPa 和 3.8%。

(2) TEM 分析结果表明, Sr 和 Er 原子在共晶 Si 表面的共吸附促进了晶体在 70.5° 和 39° 晶向的孪晶生长,显著减小了共晶 Si 的尺寸至 500~800 nm。

(3) 通过添加微量 Sr 和 Er 变质,共晶 Si 显著球化和细化,并且合金中形成了细小的 Al_3Er 颗粒,通过阻碍位错运动,这对合金强度的提高有积极作用。

参 考 文 献

- [1] 张鸣鹤,王东涛,长海博文,等. Al-Si 系铸造合金时效强化研究进展[J]. 热加工工艺, 2024, 53(24): 11-16, 21.
- [2] 陈彦宏,王维裔,韩梦霞,等. Al-Si 系合金晶粒细化技术研究进展与展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(12): 1585-1595.
- [3] 夏琳燕,史湘琴,刘逸卿,等. 时效对铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金力学性能和耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(9): 152-157.

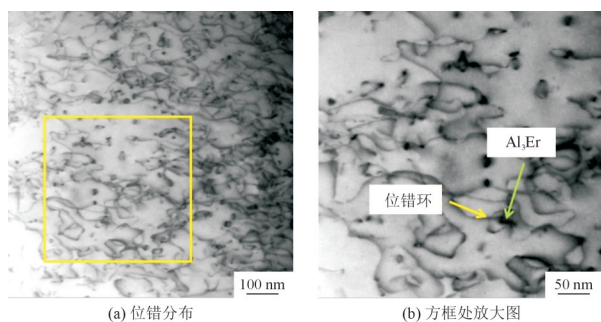


图 10 E43 合金拉伸后位错 TEM 形貌

Fig.10 TEM images of dislocations in E43 alloy after tensile

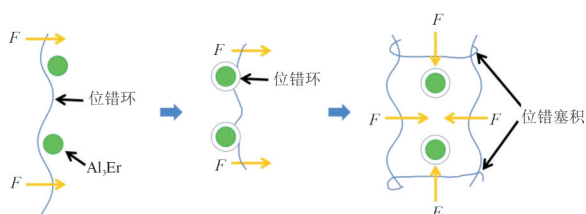


图 11 Sr 和 Er 变质合金中 Al_3Er 颗粒阻碍位错运动示意图

Fig.11 Schematic diagram of Al_3Er particles hindering dislocation in Sr and Er modified alloys

- [4] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.
- [5] ZENG L Y, JIN Y C, GAO J B, et al. Achieving simultaneous improvement in strength and ductility in Al-Si-Mg-Ce alloy through synergistic morphology modification of eutectic (Si) and $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Ce}$ phases by Sr addition [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 975-981.
- [6] AMER S M, GLAVATSKIKH M V, BARKOV R Y, et al. Effect of Mn substitution on Cr in the Al-Cu-Er-Mg-Zr-Fe-Si-Ti cast alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 983: 173 958.
- [7] LIU W Y, XIAO W L, XU C, et al. Synergistic effects of Gd and Zr on grain refinement and eutectic Si modification of Al-Si cast alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2017, A693: 93-100.
- [8] COLOMBO M, GARIBOLDI E, MORRI A. Er addition to Al-Si-Mg-based casting alloy: Effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 1 234-1 244.
- [9] HU Z, DONG Z, YIN Z, et al. Solidification behavior, microstructure and silicon twinning of Al-10Si alloys with ytterbium addition [J]. Journal of Rare Earths, 2018, 36(6): 662-668.
- [10] LI J H, ALBU M, HOFER F, et al. Solute adsorption and entrapment during eutectic Si growth in Al-Si-based alloys [J]. Acta Materialia, 2015, 83: 187-202.
- [11] TANG P, LU J S, YANG Y X, et al. Effect of various Er/Al-Ti-C ratios on microstructure and tensile properties of the as-cast Al-10Si-0.8Fe alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 968: 172 237.
- [12] SHI Z P, HE R H, CHEN Y, et al. Microstructural evolution and strengthening mechanisms of a novel Al-11Si-3Cu alloy microalloyed with minor contents of Sr and Sc [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A853: 143 738.
- [13] XIA X C, ZHAO Q F, PENG Y Y, et al. Precipitation behavior and mechanical performances of A356.2 alloy treated by Al-Sr-La composite refinement/modification agent [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 818: 153 370.
- [14] DALEN M E, KARNESKY R A, CABOTAJE J R, et al. Erbium and ytterbium solubilities and diffusivities in aluminum as determined by nanoscale characterization of precipitates [J]. Acta Material, 2009, 57(14): 4 081-4 089.
- [15] ZHANG Y, GAO K, WEN S, et al. Determination of Er and Yb solubilities and trialuminide nucleation in Al-Er and Al-Yb alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 590: 526-534.
- [16] CHEN X, LIU Z, BAI S, et al. Alloying behavior of erbium in an Al-Cu-Mg alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 505(1): 201-205.
- [17] PAN S W, CHEN X H, ZHOU X L, et al. Micro-alloying effect of Er and Zr on microstructural evolution and yield strength of Al-3Cu (wt.%) binary alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A790: 139 391.
- [18] ZHANG L G, MASSET P J, CAO F Y, et al. Phase relationships in the Al-rich region of the Al-Cu-Er system [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(9): 3 822-3 831.
- [19] ZHANG L G, LIU L B, HUANG G X, et al. Thermodynamic assessment of the Al-Cu-Er system [J]. CALPHAD, 2008, 32(3): 527-534.
- [20] ZHANG X J, WANG H W, YAN B, et al. The effect of grain refinement and precipitation strengthening induced by Sc or Er alloying on the mechanical properties of cast Al-Li-Cu-Mg alloys at elevated temperatures [J]. Materials Science and Engineering, 2021, A822: 141 641.
- [21] PATEL D N, SUTARIA M P. Effect of trace rare earth Er addition on microstructure and tensile properties of 319 Al-Si-Cu alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16(4): 2 199-2 209.
- [22] COLOMBO M, GARIBOLDI E, MORRI A. Influences of different Zr additions on the microstructure, room and high temperature mechanical properties of an Al-7Si-0.4Mg alloy modified with 0.25%Er [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A713: 151-160.
- [23] PANDEE P, PATAKHAM U, LIMMANEEVICHITR C. Microstructural evolution and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg alloys with erbium additions [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 728: 844-853.
- [24] WANG B B, CHEN W P, LIU L S, et al. Effect of trace yttrium addition on the microstructure and tensile properties of recycled Al-7Si-0.3Mg-1.0Fe casting alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2016, A666: 165-175.
- [25] SHUAIL M, ZOU X L, RAO Y Q, et al. Synergistic effects of La and Y on the microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu alloys [J]. Materials, 2022, 15(20): 7 283.
- [26] AO X H, XING S M, YU B S, et al. Effect of Ce addition on microstructures and mechanical properties of A380 aluminum alloy prepared by squeeze-casting [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2018, 25(5): 554-563.
- [27] LEI J P, YU J W, CHEN J M, et al. Effect of trace Sr and Sc contents and ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of the A380 alloy [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(5): 1-9.

(编辑:栗万仲)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!