

DOI:10.20176/j.cnki.nxdz.20251204

再生 ADC12 铝合金的 Y-Sr-T6 热处理协同改性

李婉秋¹, 陈思宇², 夏明许^{1*}

(1. 宁夏大学 材料与新能源学院, 宁夏 银川 750021; 2. 果下科技股份有限公司, 江苏 无锡 214100)

摘要: 添加不同质量分数稀土钇(Y)、锶(Sr)元素, 结合 T6 热处理(固溶处理-淬火-人工时效)的策略(Y-Sr-T6), 对再生 ADC12 铝合金微观组织和力学性能的影响进行了研究。结果表明, Y-Sr-T6 策略, 能显著细化铝合金的显微组织结构, 进而提高铝合金的力学性能。当 $w(Y) = 0.2\%$, $w(Sr) = 0.03\%$ 时, T6 热处理对铝合金组织的细化效果最好, 其中, 共晶硅相由粗大板条状细化为均匀圆整颗粒状, 针状 $\beta-Al_5FeSi$ 相向圆整化小鱼骨状-块状转变; 组织中超大晶粒(粒径大于 $95\mu m$)的体积分数大幅度降低, 且较原始合金降低 94.7% ; 二次枝晶臂间距(secondary dendrite arm spacing, SDAS)减小 82.1% ; 铝合金的抗拉强度和延伸率分别提升至 370.61 MPa , 4.34% , 较原始合金分别提高 29.0% , 226.3% 。该协同改性策略为再生铝合金性能提升提供了新思路, 也为提高再生铝合金的利用率、降低铝合金产业的碳排放提供了可能。

关键词: 再生 ADC12 铝合金; Y-Sr-T6 热处理协同改性; 力学性能; 显微组织

分类号: (中图)TG146.21; TG292

文献标志码: A

随着全球工业化进程加速, ADC12 铝合金因优异的铸造与压铸性能, 成为汽车、机械及电子等领域实现轻量化的关键材料。然而, ADC12 铝合金的生产长期依赖原生铝, 且我国铝土矿资源严重短缺(储量仅占全球总储量的 1.8% , 进口依赖度达 74%)^[1], 因此推动铝合金产业向再生铝方向转型势在必行。再生铝具有显著的低碳优势(能耗仅为原生铝的 5%)^[2-3] 和成本效益(成本较原生铝降低 $30\% \sim 50\%$)^[4], 是实现资源可持续利用与“双碳”目标的重要路径。但是, 铝合金再生过程中形成的针状 $\beta-Al_5FeSi$ 相和粗大片状共晶硅相, 严重割裂基体并引发应力集中, 导致铝合金的力学性能下降, 进而制约再生铝合金在储能产业等对性能有高要求场景中的应用。例如, 再生 ADC12 铝合金的性能劣化主要源于两大微观结构^[5-7]: 其一, 粗大的片状共晶硅相, 像微观裂纹一样严重割裂 $\alpha-Al$ 基体, 并成为应力集中源, 进而急剧恶化铝合金的塑性; 其二, 源自废料再生过程中引入的针状或长条状的 $\beta-Al_5FeSi$ 富铁相, 具有硬而脆的特性, 同样对

$\alpha-Al$ 基体产生强烈的割裂效应, 并在受力时易成为裂纹萌生和扩展的通道。因此, 要提升再生 ADC12 铝合金的力学性能, 尤其是塑性和韧性, 必须同步解决“共晶硅相变质”与“富铁相细化”这两个核心难题。针对上述问题, 传统的性能提升手段, 虽具有一定的针对性, 但也存在相应的局限性。首先, 熔体净化技术^[8-9], 主要侧重去除熔体中的气体和夹杂物, 虽然能够有效减少气孔与氧化夹渣的产生, 但难以改变共晶硅与富铁相所固有的有害形貌。其次, 热处理优化工艺(如 T6)^[10-12], 通过固溶与时效过程, 使共晶硅相球化、钝化, 并伴随着强化相析出, 同步改善合金的强度与塑性。然而, 该工艺对针状 $\beta-Al_5FeSi$ 相的形貌改性作用有限, 难以彻底消除其尖锐形态带来的应力集中效应。此外, 被广泛采用的单一元素微合金化改性技术^[13-14], 通常难以解决上述两类核心问题。例如, Sr 作为共晶硅的高效变质剂, 可调控共晶硅的组织结构形貌, 使其由片状转变为纤维状或颗粒状, 从而显著提升共晶硅的塑性, 但对富铁相的优化作用较弱^[15]; 稀土 Y 通过诱导

收稿日期: 2025-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U24A2006); 国家重点研发计划国际合作项目(2022YFE0138000)

作者简介: 李婉秋(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事结构优化仿真及材料改性研究, (电子信箱)19955706865@163.com。

* 通信联系人: 夏明许(1976—), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事单晶叶片智能制造与金属凝固原位分析方法与理论研究, (电子信箱)mingxu.xia@sju.edu.cn。

引用格式: 李婉秋, 陈思宇, 夏明许. 再生 ADC12 铝合金的 Y-Sr-T6 热处理协同改性[J]. 宁夏大学学报(自然科学版中英文), 2025, 46(4): 367-376.

β -Al₅FeSi相转变为 Fe₁₅Si₂Y₂等稳定相,实现有效细化富铁相,进而促使其从针状转变为更圆整的汉字状或块状^[16-17],然而对共晶硅的变质效果远不如 Sr。由此可见,上述传统方法难以同时对共晶硅与富铁相形貌的协同调控。

文中提出 Y-Sr 微合金化与 T6 协同改性新策略(Y-Sr-T6):通过添加 Y、Sr,实现对铝合金铸态组织结构的优化,并形成两个元素的互补效应;再通过 T6 热处理(固溶处理-淬火-人工时效),进一步调控铝合金第二相的形貌与分布,从而同时实现共晶硅相球化与富铁相细化。Y-Sr-T6 突破单一工艺瓶颈,显著提升了铝合金的综合力学性能。通过全因子实验设计,探究 Y、Sr 的最佳配比及其与 T6 热处理的协同作用机制,以期实现再生 ADC12 铝合金微观组织结构与综合力学性能同步跃升,从而推动再生铝合金在高端领域的应用,助力资源循环与低碳发展。

1 实验部分

1.1 材料

文中所用基体材料为再生 ADC12 铝合金,其化学成分见表 1。改性元素 Y、Sr 分别通过加入 Al-10 Y($w(Y)=10\%$)、Al-10 Sr($w(Sr)=10\%$)中间合金引入,所有原料在装炉前均经过充分干燥处理。

表 1 再生 ADC12 铝合金的主要化学成分

元素	$w/\%$
Al	余量
Si	10.80
Cu	2.20
Zn	0.70
Ni	<0.50
Mn	0.45
Fe	0.20
Mg	0.20

1.2 方法

添加不同质量分数的 Y、Sr,对再生 ADC12 铝合金进行成分调控,再辅以 T6 热处理(固溶处理,即 500 °C 下保温 2 h,水淬冷却;人工时效处理,175 °C 下保温 8 h,空气下冷却),进而提升铝合金的综合性能。采用全因子实验设计方法设置 9 组改性合金成分(表 2,因素为 $w(Y)$ 、 $w(Sr)$,各 3 个水平),以原始再生 ADC12 铝合金为对照组(样品 10),制备并分析 10 组试样(表 2)。除对照组外,对 9 组改性试样进行相同的 T6 热处理。

1) 熔化与均质化。将再生 ADC12 铝合金锭加入石墨坩埚,然后置于电阻炉中升温至(720±5)°C。

表 2 全因子实验样品中 Y、Sr 的质量分数

样品号	$w(Y)/\%$	$w(Sr)/\%$
1	0.1	0.02
2	0.1	0.03
3	0.1	0.04
4	0.2	0.02
5	0.2	0.03
6	0.2	0.04
7	0.3	0.02
8	0.3	0.03
9	0.3	0.04
10	0	0

熔体完全液化后保温 10 min,以确保熔体成分均匀。然后添加 Y、Sr,再将熔体温度降低并稳定至(710±5)°C。把预定质量的 Al-10Y($w(Y)=10\%$)中间合金(预先用铝箔紧密包裹以防氧化)加入熔体,立即使用石墨钟罩将其压入熔体底部,静置 3 min,使其初步熔化。随后,低速机械搅拌 5 min,以保证 Y 及合金成分均匀分布,再保温 10 min。然后,同步添加 Sr。上述采用先静置后搅拌工艺的原因:首先,通过压入操作将合金送入熔体底部,以隔绝空气,并实现初步的物理防氧化。随后,静置一段时间,底部高温使合金块平稳熔化,形成一个局部的成分过渡区。最后,低速搅拌,使熔体成分均匀,进而提高 Y、Sr 的回收率。由于 Y、Sr 化学性质活泼,极易发生氧化反应,若将其压入后立即搅拌,会将未熔化的中间合金碎片搅至熔体表面,导致严重的氧化烧损现象。

2) 熔体净化。向熔体中加入适量精炼剂,使用石墨钟罩将精炼剂压入熔体底部,静置 5 min,再充分搅拌 3~5 min,以促进气体和夹杂物上浮。然后,使用预热的不锈钢扒渣勺彻底清除熔体表面浮渣。该过程重复 3 次,直至获得洁净熔体。最后,将经精炼工艺净化后的熔体(温度控制在 700 °C),注入预热至(250±10)°C 的石墨模具中(空腔尺寸为 45 mm×24 mm×10 mm,外部尺寸为 55 mm×37 mm×20 mm),使其凝固成形。

3) 铸件脱模与 T6 热处理。首先,对样品进行固溶处理。将铸态试样放入已升温至(500±5)°C 的箱式电阻炉,保温 2 h。保温结束,将试样取出再淬入(60±5)°C 的流动水槽。然后,将试样立即烘干进行人工时效处理。将淬火烘干后的试样放入已升温至(175±3)°C 的箱式电阻炉,保温 8 h。保温结束,取出试样,在静态空气中冷却至室温。

4) 力学性能测试。将拉伸试样采用线切割工

艺加工成厚度为 1 mm 的哑铃形试样。再依次采用 300~2 000 目的碳化硅(SiC)金相砂纸打磨、粒径为 0.5 μm 金刚石抛光液抛光,直至获得镜面状态且表面无明显划痕的样品。室温下,使用电子万能试验机进行拉伸实验,实验中应变速率恒定为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。每种铝合金制备 3 个平行试样,拉伸试样尺寸见图 1。采用 TMHV-1000Z 型显微硬度计测定硬度,设定载荷为 200 g 并持续 10 s,每种条件下,以 5 次独立压痕测量的平均值为最终的显微硬度值。

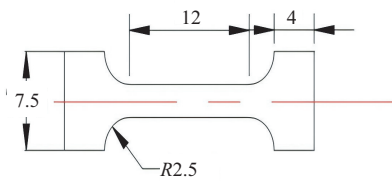


图 1 拉伸试样尺寸(mm)

5) 显微结构表征。使用碳化硅砂纸对样品粗磨与细磨,然后采用粒径为 3 μm 的金刚石悬浮液初步抛光,再使用粒径约为 50 nm 的二氧化硅悬浮液作精细抛光处理。抛光完成后,用乙醇清洗样品

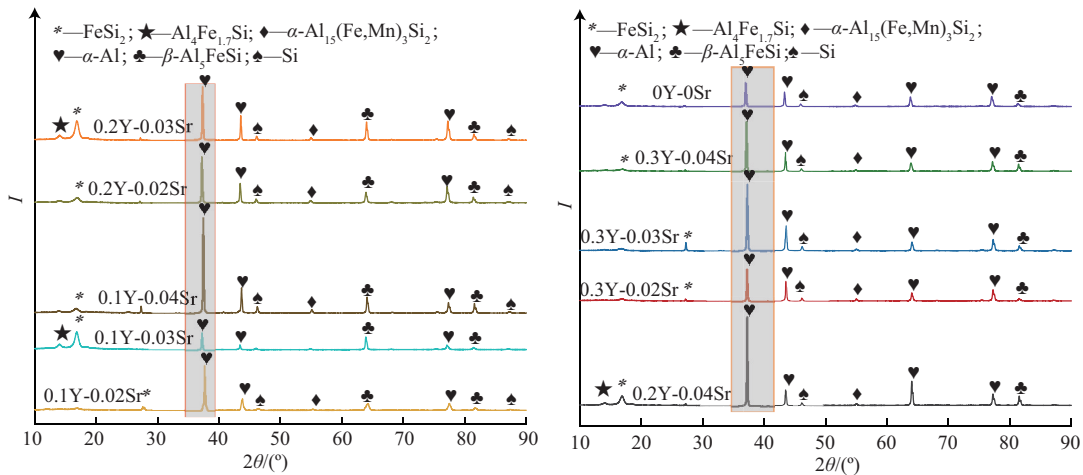


图 2 经 Y-Sr 微合金化再生 ADC12 铝合金的 XRD 图谱

为明确区分 Y,S 微合金化与 T6 热处理在物相演变中的各自作用,文中对比分析仅添加 Y(Sr)的铸态样品(图 2)与经 Y-Sr-T6 协同改性样品的 XRD 图谱(图 3)。由图 2 可知,α-Al 的衍射峰位移,随着 ω(Y)、ω(Sr)的增加呈现系统性偏移,证实添加的 Y、Sr 可固溶于 α-Al 基体或引发晶格畸变,这也是诱发晶格应变的主要原因;能清晰识别出 FeSi₂、Al₄Fe_{1.7}Si 等亚稳富铁相;随着 ω(Y)增加,有害 β-Al₅FeSi 相的 X-射线衍射强度逐渐减弱,而 α-Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相的 X-射线衍射强度相应增强。而 Sr 的添加,促进了有害 β-Al₅FeSi 相向有益

表面 2~3 min,去除表面残留的纳米二氧化硅颗粒。

采用光学显微镜(optical microscope, OM)观察合金的晶粒形貌,并使用 Image Pro-plus 软件对多幅 OM 图像进行统计分析,进而测定 α-Al 的平均晶粒尺寸(average grain size, AGS)和二次枝晶臂间距(secondary dendrite arm spacing, SDAS);采用 X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)方法分析物相组成;采用电子能谱(energy dispersive spectroscopy, EDS)仪表征合金元素的分布状态;采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析拉伸断口的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 微观组织结构

不同质量分数 Y、Sr 微合金化后再生 ADC12 铝合金的 XRD 谱图见图 2。经 Y-Sr-T6 改性的再生 ADC12 铝合金的 XRD 谱图见图 3。由图 2~图 3 可知,再生 ADC12 合金主要由基体 α-Al、共晶硅相、α-Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相和 β-Al₅FeSi 相组成,其中,β-Al₅FeSi 相为含铁杂质相,其硬脆特性对铝合金的力学性能危害显著。

α-Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相的转变过程。例如,样品 5 的 X-射线衍射峰强度分布更趋均匀。尽管仅在部分高 ω(Y)样品的 XRD 中,能看到 Al₂Si₂Y 相的微弱信号,但佐证了 Y 参与形成稳定金属间化合物并影响富铁相析出路径的可能性。

由上述分析可知,主要物相的 XRD 特征峰,随着铝合金成分与处理工艺,呈现明确的协同演变趋势(图 3)。α-Al 基体的 XRD 峰发生位移,是 Y、Sr 微合金化与 T6 热处理共同作用的结果,且 Y-Sr 微合金化为晶格畸变的基础。该现象主要源于两方面:其一, T6 热处理使 Si、Cu、Mg 等熔入 α-Al 基

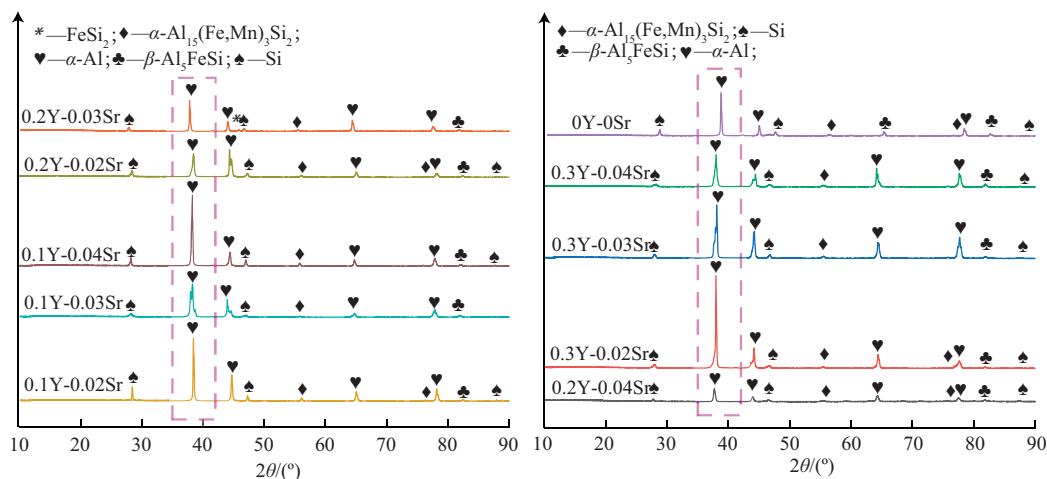


图3 经Y-Sr-T6改性再生ADC12铝合金的XRD图谱

体,引起晶格膨胀;其二,Y、Sr微合金化产生的附加晶格应变,与后续铝合金抗拉强度的提升效果相呼应。同时,经T6热处理,FeSi₂、Al₄Fe_{1.7}Si等亚稳富铁相的X-射线衍射峰基本消失,且共晶硅等第二相的尺寸与分布得到进一步优化。综上所述,XRD分析结果从物相层面证实,Y-Sr-T6协同改性策略,通过调控基体固溶度、促进富铁相转化及优化共晶硅形貌,实现对再生ADC12铝合金显微组织结构的系统性优化。

原始再生ADC12铝合金的微观组织结构形貌、 α -Al晶粒尺寸分布见图4。由图4可知,铝合金

显微组织主要由初生 α -Al相、共晶硅相及富铁相组成,其中, α -Al相呈粗大树枝晶结构,共晶硅相呈连续针片状分布,富铁相存在长针状 β -Al₅FeSi相和鱼骨状 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂相。长针状富铁相和针片状共晶硅相会割裂 α -Al基体,成为裂纹萌生源,进而主导裂纹扩展路径,导致铝合金强度和塑性显著降低。测量初生 α -Al相晶粒尺寸,发现粒径 $D \leq 35$, $>35 \sim 65$, $>65 \sim 95$, $>95 \mu\text{m}$ 晶粒的体积分数分别为0%,15.2%,32.65%,47.79%,表明原始铝合金中以粗晶粒为主($D > 95 \mu\text{m}$ 晶粒的体积分数约为50%),综合性能较差。

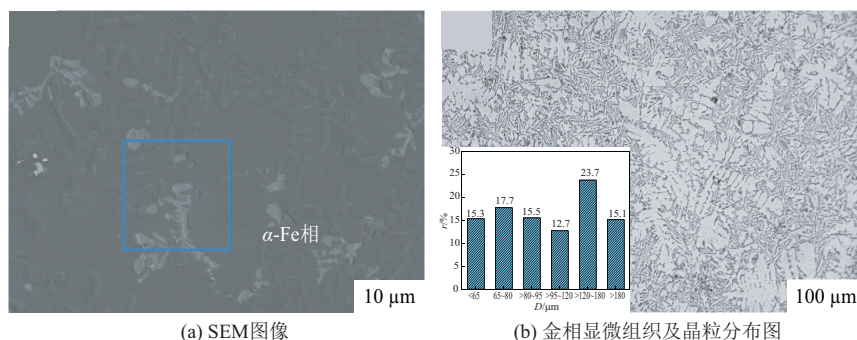


图4 再生ADC12铝合金(样品10)的微观组织图像

原始再生ADC12铝合金中存在鱼骨状(或骨骼状)的 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂相、长针状的 β -Al₅FeSi相以及板条状共晶硅相(图5)。研究结果显示,长针状 β -Al₅FeSi相,在二维形貌上呈狭长片状或细长针状,在合金凝固过程中会显著阻碍铝熔体流动,进而形成大量孔隙、缩松等缺陷^[18]。这些缺陷增加了再生铝合金在拉伸载荷下的裂纹萌生倾向。此外,长针状 β -Fe相、板条状共晶硅相及其他富铁相,具有尖锐的几何形态,极易成为应力集中源,对再生铝基体产生严重的割裂作用,导致再生铝合金的力学性能恶化^[19]。

经Y-Sr-T6热处理的再生ADC12铝合金的光学显微组织及 α -Al晶粒尺寸分布见图6。由图6可知,经Y-Sr-T6热处理, α -Al相逐渐转变为短棒状等轴晶,粒径明显减小;共晶硅相则由针片状向圆整、均匀的近球形颗粒转变,发生明显的变质,其形貌得到明显细化; β -Al₅FeSi相由长针状向鱼骨状 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂相转变,显著削弱了有害富Fe相对铝合金的危害。同时,随着 $w(\text{Y})$ 、 $w(\text{Sr})$ 增加, $D \leq 35 \mu\text{m}$ 细晶的体积分数升高,而 $D > 95 \mu\text{m}$ 粗晶的体积分数显著下降。例如,样品5的细化效果最好, $D \leq 35 \mu\text{m}$ 细晶的体积分数达27.1%, $D =$

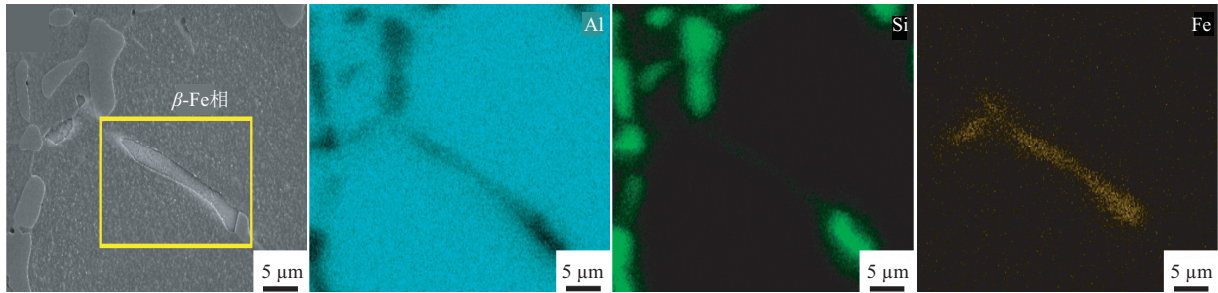
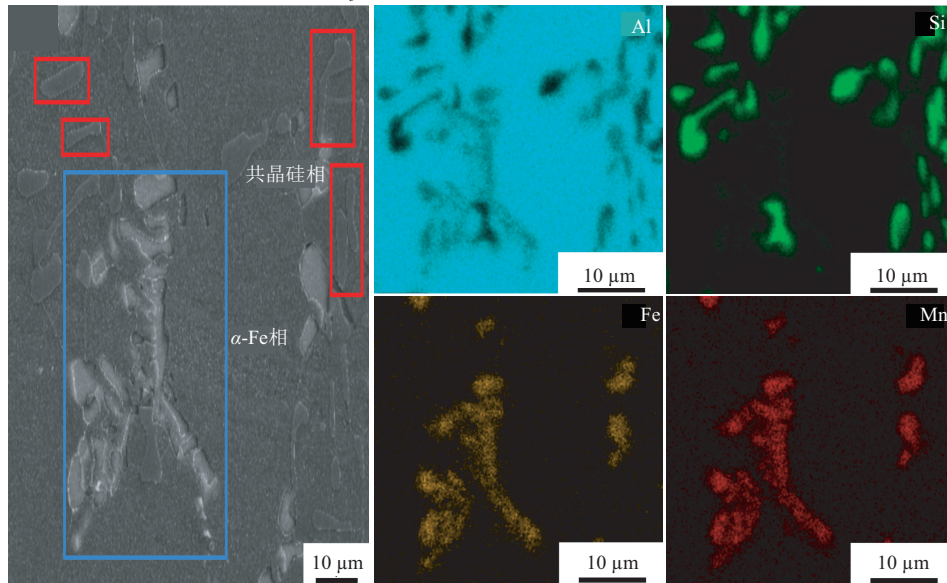
(a) 长针状 β - Al_5FeSi 相形貌及区域的 EDS 面扫描元素分布图像(b) 鱼骨状 α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 相及板条状共晶硅相形貌及区域的 EDS 面扫描元素分布图像

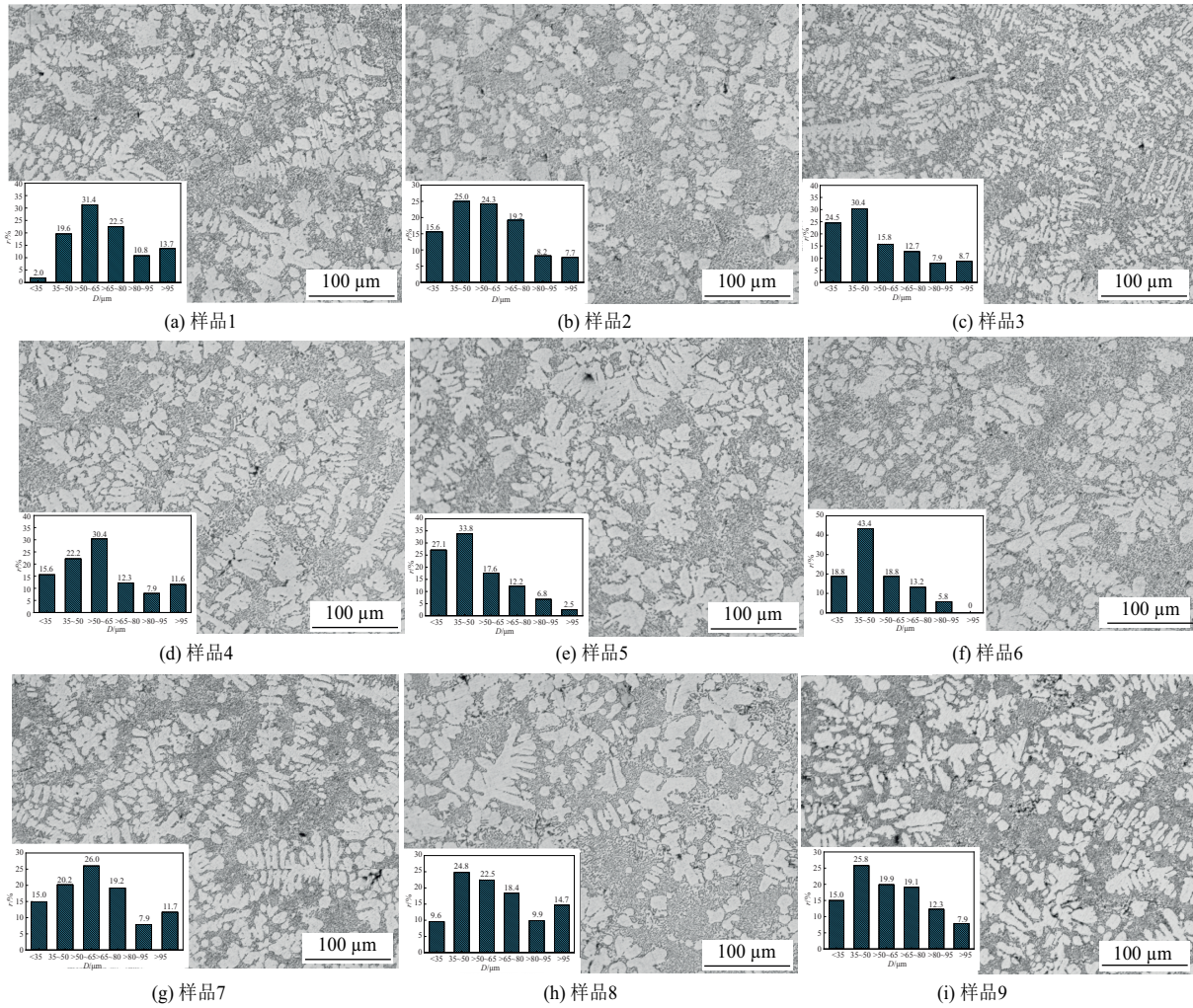
图 5 再生 ADC12 铝合金(样品 10)深腐蚀的微观组织结构和 EDS 面扫描元素分布图像

35~65 μm 晶粒的体积分数达 51.4%, 而 $D > 95 \mu\text{m}$ 粗晶的体积分数急剧下降至 2.8%。与之相比, 样品 6 的晶粒粒径无明显变化; 当 $w(\text{Y})$ 、 $w(\text{Sr})$ 进一步增加, 样品 7~样品 9 中晶粒呈现粗化趋势, 细晶的体积分数下降。

不同质量分数 Y、Sr 微合金化再生 ADC12 铝合金的二次枝晶臂间距(SDAS, $d(\text{DAS})/\mu\text{m}$)见图 7。由图 7 可知, 与原始再生 ADC12 铝合金相比, 经 Y-Sr-T6 热处理, 铝合金的 $d(\text{DAS})$ 显著减小。为量化评估 Y、Sr 对 $d(\text{DAS})$ 的独立与交互影响, 对全因子实验结果进行分析。分析 Y 的影响(固定 $w(\text{Sr})$ 与 T6 热处理参数), 对比样品组为表 2 中 (1, 4, 7)、(2, 5, 8)、(3, 6, 9); 当添加 $w(\text{Y}) = 0.1\%$ 时, $d(\text{DAS})$ 较原始再生 ADC12 合金明显降低; 当添加 $w(\text{Y}) = 0.2\%$ 时, $d(\text{DAS})$ 最小; 当添加 $w(\text{Y}) = 0.3\%$ 时, $d(\text{DAS})$ 出现小幅回升。分析 Sr 元素的影响(固定 $w(\text{Y})$ 与 T6 热处理参数), 对比样品组为表 2 中 (1, 2, 3)、(4, 5, 6)、(7, 8, 9); 当添加 $w(\text{Sr}) = 0.02\%$ 时, $d(\text{DAS})$ 显著降低; 当添加 $w(\text{Sr}) = 0.03\%$ 时, $d(\text{DAS})$ 进一步减小至最低

值; 当继续增加 $w(\text{Sr})$ 至 0.04%, $d(\text{DAS})$ 略有增大。实验结果显示, Y-Sr-T6 协同优化策略, 对样品 5、样品 6 的 SDAS 细化效果最好, 这与前述 α -Al 晶粒的细化结果一致。因此, 适量复合添加 Y、Sr, 可有效抑制 α -Al 枝晶生长, 进而实现晶粒细化。

为深入解析 Y、Sr 对再生 ADC12 铝合金的协同改性机制, 对改性后样品 5 的深腐蚀试样进行 SEM、EDS 分析(图 8)。再将该结果与图 5 进行对比, 系统分析 Sr、Y 对再生 ADC12 铝合金微观组织结构的改性作用: (1) Sr 微合金化改性作用。分析 EDS 元素面扫描图像, 发现 Sr、Si 的元素分布区域高度重合。加入 Sr, 有效促进了共晶硅相变质, 使其形貌由粗大的针片状转变为细小、圆整且分布均匀的颗粒状。共晶硅相变质细化, 显著降低了其对铝基体的割裂效应, 从而提升了铝合金的塑性和韧性^[20]。(2) Y 微合金化改性作用。 α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ 相的形貌由原始的鱼骨状(或骨骼状)趋于圆整化; β - Al_5FeSi 相则由原始的长针状转变为形态更为圆整的小鱼骨状或短棒状, 且 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Y}$ 相主要分布于富铁相周围或附着于富铁相基体, 表明 Y 显著



注:每个样品随机选取 5 个以上视场,统计晶粒总数超过 300 个。图中数据基于该统计方法的统计结果。

图 6 Y-Sr-T6 改性再生 ADC12 铝合金的光学显微组织结构及 α -Al 晶粒尺寸图像

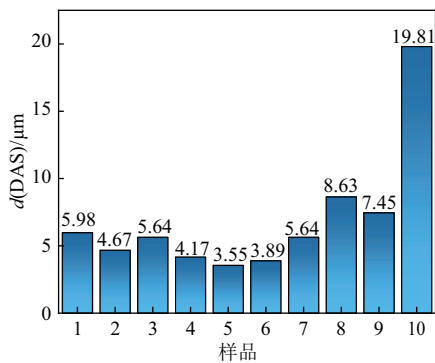
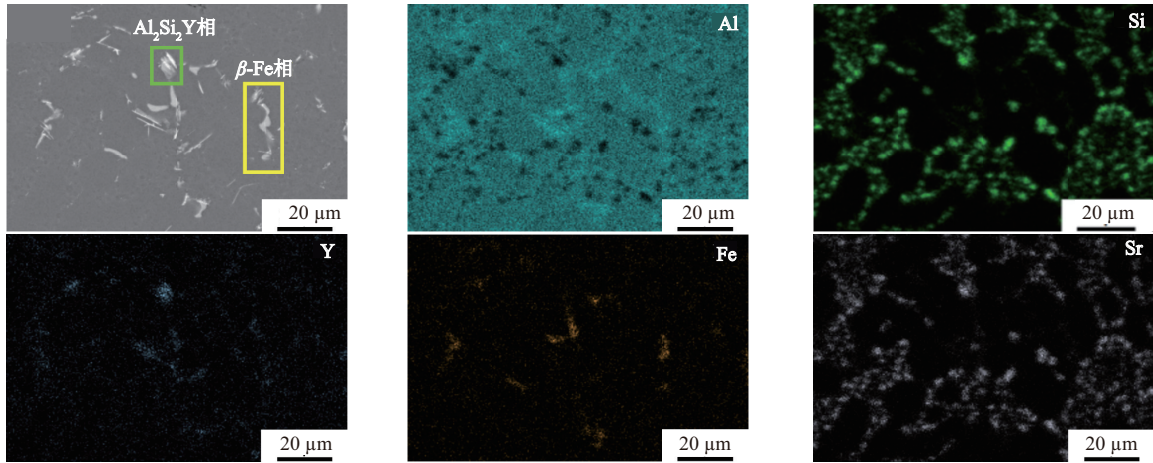


图 7 Y-Sr-T6 改性再生 ADC12 铝合金的 SDAS

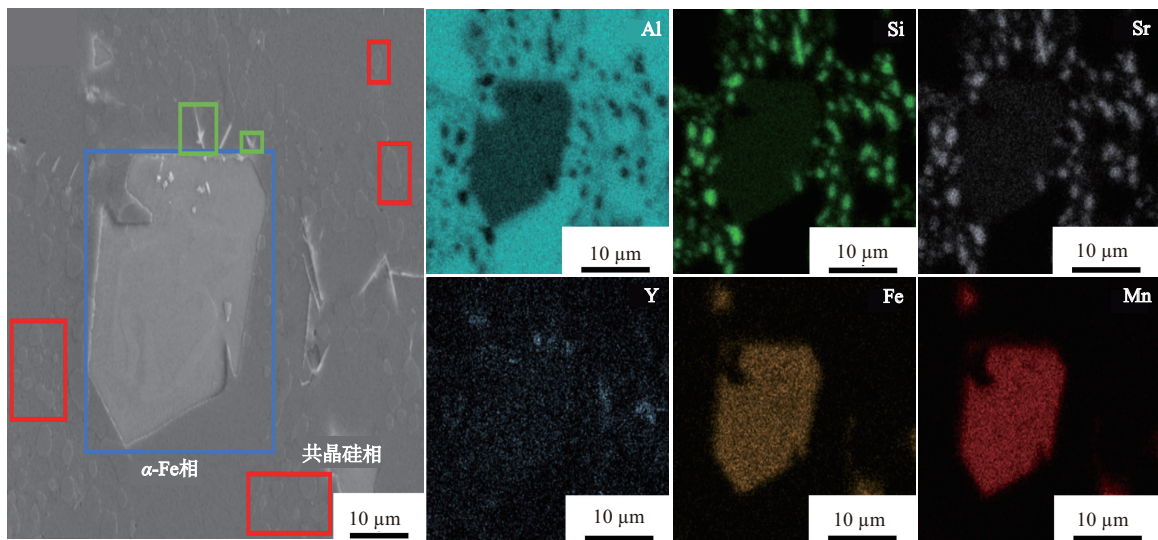
细化了 α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相。而且新形成的三元 Al₂Si₂Y 相,通过影响富铁相的成核与长大过程,进一步优化了 α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相的尺寸与形貌^[21]。值得注意的是, Y-Sr 微合金化呈现显著的协同改性效果:一方面, Sr 主要作用于共晶硅相的变质,而 Y 则侧重于富铁相的细化,两者作用互补,共同优化多元相的组织结构;另一方面, Y 可能通过形成高熔点的 Al₂Si₂Y 相,减少 Sr 的损耗,进而提高 Sr 的变质

效率与稳定性。这种协同作用,使共晶硅相和富铁相同时得到充分细化与圆整化,显著提升了铝基体的连续性。同时,这种协同作用在提升铝合金强度的同时,大幅度改善了其塑性与韧性,从而展现出单一元素改性所不具备的综合强化效果。

上述微观组织结构的系统性演变,揭示了 Y-Sr-T6 热处理协同改性的内在作用机制。Sr 通过吸附于共晶硅的生长前沿,有效抑制其各向异性生长,这是实现共晶硅由粗大片状向细小颗粒状转变的关键。而 Y 则是主要通过影响富铁相的析出过程发挥作用:一方面, Y 在凝固前沿偏聚,抑制针状 β -Al₅FeSi 相形核与长大;另一方面,通过形成稳定的 Al₃Si₂Y 相,改变局域溶质分布与相平衡,促进圆整 α -Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂ 相生成。Y-Sr 微合金化,可产生积极的交互效应:Y 通过形成稳定化合物减少 Sr 的损耗,而 Sr 为共晶硅的有效变质及 Y 优化富铁相,创造了更为均匀的基体环境。随后的 T6 热处理,在上述优化的铸态组织结构基础上,通过固溶



(a) 合金显微组织图及区域的EDS面扫描元素分布图像



(b) 圆整 α -Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂相及颗粒状共晶硅相形貌及区域的EDS面扫描元素分布图像

图 8 再生 ADC12 铝合金(样品 5)深腐蚀的微观组织结构和 EDS 面扫描元素分布图像

过程使第二相进一步球化、钝化;再经时效析出强化相,最终实现对显微组织的全面调控。Y-Sr 微合金化带来的组织结构细化,与 T6 引发的析出强化产生协同作用,使铝合金的组织结构得到优化,这预示着铝合金的力学性能将显著提升。

2.2 力学性能

10 组实验样品的拉伸应力(ϵ)-应变(σ)曲线、硬度分布及力学性能测定结果见图 9~图 10、表 3。基于全因子试验的极差分析见表 4,表 4 中, K_1, K_2, K_3 分别为对应因素(Y 或 Sr)在水平 1,2,3 下所有试验结果的平均值。极差 ΔR 为某因素下 K 的最大值与最小值的差值,可衡量因素对指标的影响程度, ΔR 越大,表示某因素的影响越显著。因素 A、B 分别对应 Y 与 Sr 成分变量:A1、A2、A3 表示因素 A 的 3 个不同水平;B1、B2、B3 表示因素 B 的 3 个不同水平。Y 对再生 ADC12 铝合金抗拉强度(R_m)的影响大于 Sr: $R_Y(22.15 \text{ MPa}) > R_{Sr}(20.11 \text{ MPa})$,最

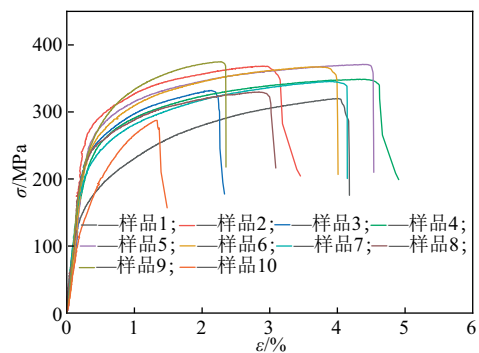


图 9 Y-Sr-T6 改性再生 ADC12 铝合金的拉伸应力

优成分为 $w(Y)=0.2\%、w(Sr)=0.04\%$ 。Sr 对再生 ADC12 铝合金延伸率(A)的影响大于 Y: $A_{Sr}(1.31\%) > A_Y(1.11\%)$,最优成分为 $w(Y)=0.2\%、w(Sr)=0.02\%$ 。样品 5 的综合强度与塑性协同效果在 9 组试样中最好, $R_m=370.61 \text{ MPa}、A=4.34\%$ 。实验中,样品的力学性能显著提升,且与前述微观组织结构演化规律高度吻合:经 Y-Sr

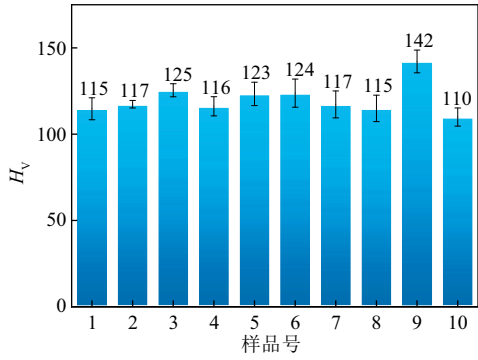


图 10 Y-Sr-T6 改性再生 ADC12 铝合金的硬度

表 3 Y-Sr-T6 改性再生 ADC12 铝合金的力学性能

样品号	R_m /MPa	A /%	E /GPa
1	320.00	4.01	70.6
2	368.07	2.96	69.7
3	331.95	2.10	71.1
4	348.50	4.21	70.7
5	370.61	4.34	70.1
6	367.36	3.73	69.3
7	345.26	3.85	71.0
8	329.45	2.82	68.4
9	374.79	2.29	70.6
10	287.37	1.33	70.2

表 4 全因子实验协同 T6 热处理再生 ADC12 铝合金力学性能的极差分析

项目	R_m /MPa		A /%	
	Y	Sr	Y	Sr
K_1	340.01	337.92	3.02	4.02
K_2	362.16	356.04	4.09	3.37
K_3	349.83	358.03	2.98	2.71
ΔR	22.15	20.11	1.11	1.31
因素主→次	Y→Sr		Sr→Y	
优选样品	A2-B3		A2-B1	

微合金化, α -Al 枝晶得到明显细化(表现为 SDAS 显著降低), 同时, 共晶硅相形态由粗大片状向细小球状转变(图 3~图 8); 再经 T6 热处理, 合金组织有序析出细密、均匀的强化相, 这些弥散分布的析出强化相, 有效阻碍位错运动, 产生显著的析出强化效果, 进而使再生 ADC12 铝合金的力学性能显著提升。

样品 5 与原始再生 ADC12 铝合金 ($R_m=287.37$ MPa, $A=1.33\%$) 相比, 其 R_m 提高 29.0%, A 增幅 226.3%。此外, 样品 5 的 R_m , 较文献报道的再生 ADC12 铝合金典型值 (223 MPa), 提升了 66.2%^[22]。该实验结果显示, 采用 Y-Sr-T6 热处理协同调控策略, 再生铝合金的力学性能达到行业领先水平, 也凸显了 Y-Sr 微合金化策略, 在提升再生铝合金综合力学性能方面的显著优势与潜力。

经不同方法处理后, 再生 ADC12 铝合金拉伸断口的形貌见图 11。对照组铝合金(样品 10)断口, 呈现典型的准解理断裂特征, 出现大量解理平面和撕裂棱, 且在局部区域分布尺寸不一、小而浅的韧窝(初生韧窝), 属于沿晶脆性断裂模式(图 11(a))。经 Y-Sr-T6 热处理协同改性的铝合金(样品 1)断口形貌发生变化, 韧窝数量增多, 解理平面减少, 仅在局部区域残留少量相对较小的光滑准解理面(图 11(b))。样品 1、样品 5 的断口形貌呈现大量形状规整的圆形韧窝, 表明变质处理的效果良好, 属于典型的韧性断裂模式。相应的力学性能实验结果显示, 样品 1、样品 5 的 A 分别提高至 4.01%, 4.34%, 较样品 10 的 A (1.33%) 显著提升, 显示铝合金的塑性得到提升。

力学性能测试结果与微观组织结构演变规律高度吻合, 证实了 Y-Sr-T6 热处理协同改性策略的有效性。样品 5 表现出最优的综合性能, 表明其微观组织结构达到最佳协同优化状态。抗拉强度的提升, 可归因于多种强化机制的共同贡献: α -Al 晶粒细化, 产生显著的细晶强化效果; 共晶硅与富铁相的圆整化, 极大地消除了应力集中源, 使基体在承载时应力

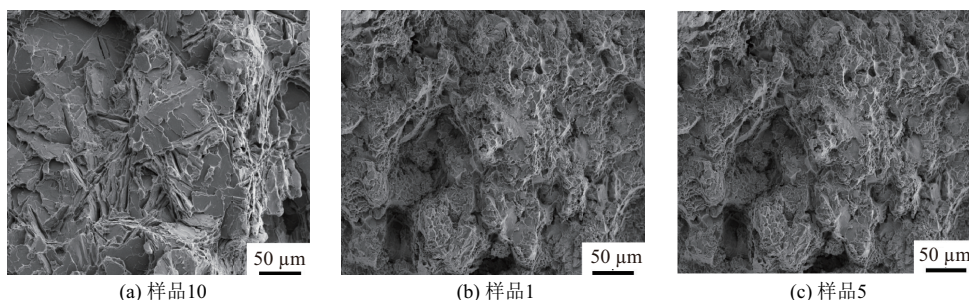


图 11 再生 ADC12 铝合金拉伸断口的 SEM 图像

分布更均匀,进而使材料的内在强度潜力得以充分发挥;而 T6 热处理实现了关键的析出强化作用。A 的显著改善,主要源于对萌生裂纹及其扩展的抑制:粗大板片状共晶硅和长针状 β -Fe 相的消除,从根本上减少了潜在的裂纹源;而细化的等轴晶与圆整化的第二相,提升了基体的连续性,促进了更为均匀的塑性变形,这在断口形貌由准解理断裂向充分韧窝状韧性断裂转变过程中也得到了验证。此外,极差分析结果显示,Y、Sr 对再生 ADC12 铝合金强度与塑性的影响有主次之分,若二者过量添加反而导致铝合金的塑性下降,表明铝合金存在最佳的 Y、Sr 成分协同窗口。该研究中,Y、Sr 采用 $w(\text{Y})=0.2\%$ 、 $w(\text{Sr})=0.03\%$,在该配比下不仅实现了组织结构细化,还避免了因形成粗大金属间化合物,而对铝合金的塑性产生负面影响,从而使铝合金的强度与塑性达到最佳平衡状态。

3 结论

针对富铁相和共晶硅相导致的再生 ADC12 铝合金性能劣化问题,提出 Y-Sr-T6 热处理协同改性策略,以优化铝合金微观组织结构和力学性能。该策略显著提升了铝合金的综合力学性能,为其在高端装备轻量化及储能等领域的应用提供了参考。

1) Y 通过晶界偏聚形成 Al_3Y 等稀土化合物,稀土化合物与 α -Al 的晶格错配度较低(约 4.55%),可作为异质形核基底,使 α -Al 的二次枝晶臂间距显著降低(从 19.81 μm 降至 3.55 μm)。Y 还吸附于 Fe 相表面,抑制 Fe 相定向生长,促使 β - Al_5FeSi 相向 α - $\text{Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$ 相转化,进而优化富铁相,使 Fe 相从有害针状相向有益圆整汉字状转变,从而降低了 Fe 相对基体的割裂效应。而 Sr 通过吸附降低 Si 相生长能,驱动共晶硅形貌从长针状、短棒状向球状转变。添加 $w(\text{Sr})=0.03\%$,可完全细化共晶硅,并形成 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ 相,进而抑制晶粒长大。

2) T6 热处理(固溶处理-淬火-人工时效),可对 Y-Sr 微合金化组织结构进行关键性优化与强化:固溶处理(500 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 2 h,水淬),使粗大共晶硅熔断、球化,提高溶质原子固溶度;人工时效(175 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 8 h,空气下冷却)促进强化相析出,使共晶硅相钝化为圆滑颗粒状,进而产生显著的析出强化效应,最终实现对显微组织结构与综合性能的协同优化。

3) Y-Sr-T6 热处理策略呈现出显著的协同效应。在铸态下,Y-Sr 微合金化初步促进共晶硅变质

和细化富铁相,且二者作用互补。在此基础上,后续的 T6 热处理进一步优化了所有第二相的形貌,并实现了析出强化效应。这种协同作用,使铝合金的微观组织结构得到全面优化,在提升铝合金强度的同时,改善了其塑性与韧性。

4) 优选出提升再生 ADC12 铝合金力学性能的关键工艺参数。Y-Sr-T6 热处理协同改性策略,对样品 5 的细晶化效果最好,其中, $D \leq 65 \mu\text{m}$ 细晶的体积分数高达 78.5%,而 $D > 95 \mu\text{m}$ 粗晶的体积分数较原始合金中的大幅降低(94.7%);铝合金的 $d(\text{SDAS})$ 降低 82.1%;铝合金的 R_m 、 A 分别达 370.61 MPa,4.34%,相比原始铝合金,分别提高 29.0%,226.3%。

参考文献:

- [1] 王京,李静,张金良.全球视角下的中国铝资源供需形势分析[J].中国矿业,2024,33(12):54-62.
- [2] FLÓREZ-ORREGO D, DARDOR D, GERMANIER R, et al. A systemic study for decarbonizing secondary aluminium production via waste heat recovery, carbon management and renewable energy integration [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 341: 120021. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.120021.
- [3] 黎水宝,张丽勤,冀会向,等.电解铝企业碳排放清单开发技术体系的研究与应用[J].宁夏大学学报(自然科学版),2013,34(2):182-187.
- [4] 李振,韩维娜,王晓民,等.Y 对再生 A356 铝合金凝固组织及力学性能的影响[J].铸造,2023,72(3):275-281.
- [5] OKAYASU M, OHKURA Y, TAKEUCHI S, et al. A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu alloy (ADC12) produced by various casting processes [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 543: 185-192.
- [6] MENG Xianming, FAN Wenxue, CAO Xingfeng, et al. Effects of Al-Nb-B grain refiner on the microstructure and cast fluidity of die-casting ADC12 alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 1884-1895.
- [7] PONHAN K, JIANDON P, JUNTARACENA K, et al. Enhanced microstructures, mechanical properties, and machinability of high performance ADC12/SiC composites fabricated through the integration of a master pellet feeding approach and ultrasonication-assisted stir casting [J]. Results in Engineering, 2024, 24: 102937. DOI:10.1016/j.rineng.2024.102937.
- [8] LIU Guoyan, REN Yongsheng, MA Wenhui, et al. Recent advances and future trend of aluminum alloy

- melt purification: A review [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 28: 4647-4662.
- [9] ZHU Ze, WANG Jianhua, LIU Ya, et al. Effect of melt purification treatment on the solidified microstructure of hypereutectic Al-Si alloys [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 106000. DOI: 10.1016/j.mtcomm. 2023. 106000.
- [10] CANYOOK R, UTAKRUT R, WONGNICHAKORN C, et al. The effects of heat treatment on microstructure and mechanical properties of rheocasting ADC12 aluminum alloy [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(3): 9476-9482.
- [11] 彭聪, 蓝珊琳, 徐佐, 等. 热控制制度强化再生 A356 铝合金性能研究 [J]. *湖南有色金属*, 2023, 39(6): 62-66.
- [12] 王国峰. 铸锭均匀化处理对铝型材表面的影响 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2002, 23(2): 173-174.
- [13] 全翔, 韦启荣, 李佳斌, 等. 稀土 Y 对再生 6061 铝合金微观组织和性能的影响 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2023, 28(4): 368-378.
- [14] 姜鑫宇, 孟令刚, 史淑艳, 等. Y 对 C611 铝合金凝固组织及性能的影响 [J]. *铸造*, 2024, 73(9): 1225-1232.
- [15] 杨占寿, 陈小虎, 曹海艇, 等. Sr 对 6063 铝合金组织和性能的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2020, 40(1): 98-102.
- [16] 张树玲, 新艺, 陈炜晔, 等. 稀土 Y 对再生铝合金 ADC12 含 Fe 相演变的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49(8): 41-45.
- [17] 胡凯亮, 陈炜晔, 李弘悻, 等. ADC-12 再生铝合金稀土 Y 变质作用研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2022, 42(3): 193-200.
- [18] 于明轩. ADC12 再生铝合金富铁相形貌调控研究 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2023.
- [19] 袁来兴. 稀土微合金化再生 6061 铝合金组织与力学性能 [D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [20] KISHOR M, KAUSHIK P, RAMAVAJJALA A K, et al. Catalytic-role of Sr on the evolution of Fe-rich phases in recycled Al-Si-Fe alloys [J]. *JOM*, 2025, 77: 8309-8318.
- [21] LIU Jianlong, WU Qingjie, YAN Hong, et al. Effect of trace yttrium addition and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of as-cast ADC12 aluminum alloy [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(1): 53. DOI: 10.3390/app9010053.
- [22] GAUTAM S K, SINGH B K, SINGH R K, et al. Advancements in semi-solid metal processing of ADC12 aluminium alloy: Microstructure and mechanical properties [J]. *Results in Engineering*, 2025, 25(1): 104453. DOI: 10.1016/j.rineng. 2025. 104453.

Synergistic Modification of Recycled ADC12 Aluminum Alloy Through Y-Sr-T6 Heat Treatment

LI Wanqiu¹, CHEN Siyu², XIA Mingxu^{1*}

(1. School of Materials and New Energy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Guoxia Technology Co., Ltd, Wuxi 214100, China)

Abstract: This study investigates the effects of adding different mass fractions of rare earth elements Yttrium (Y), and Strontium (Sr), in conjunction with the T6 heat treatment process (solution treatment-artificial aging), referred to as Y-Sr-T6, on the micro-structure and mechanical properties of recycled ADC12 aluminum alloy. The results demonstrate that Y-Sr-T6 significantly refines the micro-structure of the alloy and thereby enhances its mechanical performance. When $w(Y) = 0.2\%$ and $w(Sr) = 0.03\%$, the refinement effect of T6 heat treatment on the alloy's micro-structure was most pronounced, with the eutectic silicon phase being transformed from coarse plate-like structures into homogeneous rounded particles, and the needle-like β -Al₅FeSi phase transitioning from a fishbone-like shape to a blocky form. The volume fraction of super-large grains (grain size greater than 95 μm) was substantially reduced, decreasing by 94.7% compared to the unmodified alloy; the secondary dendrite arm spacing (SDAS) was reduced by 82.1%. The tensile strength and elongation of the aluminum alloy were increased to 370.61 MPa and 4.34%, respectively, representing improvements of 29.0% and 226.3% compared to the unmodified alloy. This synergistic modification method provides a new approach for enhancing the performance of recycled aluminum alloys and offers potential for increasing the utilization rate of recycled aluminum and reducing carbon emissions in the aluminum industry.

Key words: recycled ADC12 aluminum alloy; Y-Sr-T6 synergistic modification; mechanical properties; micro-structure

(责任编辑 高继红)