

Al-5Ti-1B/Al-10Ce复合添加对再生铝富铁相的变质作用

黄小玻¹, 伊家飞^{1,2}, 曹阿林^{1,2}, 孙敬会^{1,2*}, 侯洪坤¹, 陈娜丽¹, 邓桂勇¹, 黄湘豫¹

¹百色学院材料科学与工程学院, 广西 百色

²广西老区振兴发展研究基地(培育), 广西 百色

收稿日期: 2026年5月16日; 录用日期: 2026年6月16日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

本文以A356.2合金和Al-10Fe中间合金为原料, 采用复合添加Al-5Ti-1B和Al-10Ce的方法对再生铝进行细化变质处理。通过金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜结合拉伸、硬度等力学实验, 研究了Al-10Ce不同添加量对再生铝金相组织及力学性能的影响规律。结果表明: 当Al-5Ti-1B添加量为0.65 wt%、Al-10Ce添加量为0.5 wt%时, 富铁相晶粒尺寸减小53.87%, 合金综合力学性能达到最优, 其硬度为54.11 kgf/mm², 抗拉强度为167 MPa, 伸长率为5.57%。研究证实复合添加Al-5Ti-1B和Al-10Ce能有效细化变质富铁相, 但过量Al-10Ce会降低细化效果, 该工艺参数为再生铝降铁处理提供了重要工艺参考。

关键词

再生铝, 富铁相, Al-5Ti-1B, Al-10Ce力学性能

Modification Effect of Combined Al-5Ti-1B and Al-10Ce Additions on Iron-Rich Phases in Recycled Aluminum

Xiaobo Huang¹, Jiawei Yi^{1,2}, Alin Cao^{1,2}, Jinghui Sun^{1,2*}, Hongkun Hou¹, Nali Chen¹, Guiyong Deng¹, Xiangyu Huang¹

¹School of Materials Science and Engineering, Baise University, Baise Guangxi

²Guangxi Research Base for Revitalization and Development of Old Revolutionary Base Areas (Cultivation), Baise Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 黄小玻, 伊家飞, 曹阿林, 孙敬会, 侯洪坤, 陈娜丽, 邓桂勇, 黄湘豫. Al-5Ti-1B/Al-10Ce 复合添加对再生铝富铁相的变质作用[J]. 材料科学, 2026, 16(6): 152-161. DOI: 10.12677/ms.2026.166147

Abstract

This study utilized A356.2 alloy and Al-10Fe master alloy as raw materials, employing a composite addition of Al-5Ti-1B and Al-10Ce to refine and modify recycled aluminum. Metallographic microscopy, X-ray diffractometry (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) coupled with tensile and hardness tests were systematically employed to investigate the influence of varying Al-10Ce additions on the microstructure and mechanical properties of recycled aluminum. The results indicated that when Al-5Ti-1B and Al-10Ce were added at 0.65 wt% and 0.5 wt%, respectively, the grain size of iron-rich phases was reduced by 53.87%, achieving optimal comprehensive mechanical properties. The alloy exhibited a hardness of 54.11 kgf/mm², an ultimate tensile strength (UTS) of 167 MPa, and an elongation of 5.57%. The findings demonstrated that the synergistic addition of Al-5Ti-1B and Al-10Ce effectively refined and modified iron-rich phases; however, excessive Al-10Ce additions diminished the refining efficiency. This optimized process parameter provides critical guidance for iron reduction in recycled aluminum alloys.

Keywords

Recycled Aluminum, Iron-Rich Phase, Al-5Ti-1B, Al-10Ce, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铝作为地壳中含量最丰富的金属元素之一，广泛应用于建筑、交通及航空航天等领域[1]。然而，电解铝生产存在高能耗、高碳排放问题，其 CO₂ 排放量占全球总量 3% (中国超 5%)，与“双碳”目标形成尖锐矛盾[1]。再生铝以废铝为原料，通过熔炼循环利用，能耗仅为电解铝的 5%，碳排放降低 90%，兼具经济与环保优势[2][3]。但中国铝土矿资源匮乏(储量仅占全球 3.5%)，原铝产能虽占全球 58% 却高度依赖进口，发展再生铝成为突破资源瓶颈的关键路径[3]。然而，再生铝中 Fe、Na 等杂质(尤其是 Fe)严重制约其性能：当 Fe 含量超过 0.5% 时，会形成脆性 β -Fe 相(如 β -Al₃FeSi)，破坏基体连续性，引发应力集中并恶化加工性能，导致力学性能劣化与铸件缺陷[4]。当前主流降铁方法(如重力沉降、电磁分离)效率低且工业化难度大，而添加变质剂(如 Sr、Ce 等)则可通过调控富铁相形态实现高效降铁，因此成为研究热点[5]-[7]。

相较于传统 Al-Ti-B 细化剂存在的 TiB₂ 沉降与“中毒现象”，稀土元素 Ce、Y 等兼具熔体净化与富铁相变质双重功能，且无吸气缺陷，在再生铝保级再利用中潜力显著[8]。复合添加微量元素可产生协同效应：Al-5Ti-1B 与 Ce 协同促进 β -Fe 相向汉字状 α -AlSiFeCeMg 相转变，且 Al-5Ti-1B/Y 组合变质效果优于单一添加 Al-5Ti-1B [9]-[12]，证实多元素协同调控是优化再生铝组织性能的有效路径。本研究利用 A356.2 合金与 Al-10Fe 中间合金模拟制备 0.65% Fe 富铁再生铝合金，采用 Al-5Ti-1B 合金进行铁变质处理，并系统研究 Al-10Ce 中间合金的添加对富铁相形态、晶粒尺寸及物相组成的影响机制，旨在揭示稀土 Ce 与 TiB₂/ α -Al 晶粒的协同作用规律，为再生铝高效降铁与性能提升提供理论依据与工艺指导。

2. 实验原理及方法

2.1. 实验原理

Al-Ti-B 合金的晶粒细化机制以包晶反应与硼化物协同作用为核心：包晶反应理论表明，当熔体温度 $\geq 665^{\circ}\text{C}$ 且 Ti 浓度 $> 0.15\%$ 时， TiAl_3 与液态铝发生包晶反应($\text{TiAl}_3 + \text{L} \rightarrow \alpha\text{-Al}$)，生成的 TiAl_3 作为异质形核核心促进 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒细化[13] [14]；硼化物理论则指出， TiB_2 颗粒(熔点 $> 3000^{\circ}\text{C}$)凭借半共格界面特性降低 $\alpha\text{-Al}$ 形核势垒，进一步细化晶粒[15]。两种机制协同作用不仅缩小枝晶间区域、限制富铁相生长，未溶解的 TiAl_3 和部分 TiB_2 粒子还可作为富铁相的异质形核位点，优化其尺寸与分布[17]。稀土 Ce 的加入则通过晶格畸变调控富铁相形态：Ce 与 Fe 因原子半径差异大，在共晶温度下固溶度极低(Ce、Fe 在 $\alpha\text{-Al}$ 中均 $< 0.05\%$)，倾向于富集于晶界并进入富铁相，通过表面吸附或生成抑制膜阻碍富铁相长大，同时改变其成分与分布[16] [17]。Al-Ti-B 与 Ce 的复合作用可实现晶粒细化与富铁相调控的协同增效，为再生铝高效降铁提供理论依据。

2.2. 实验方法

本研究采用 A356.2 合金与 Al-10Fe 中间合金模拟制备含铁量为 0.65% 的再生铝合金，通过复合添加 Al-5Ti-1B 细化剂(0.65 wt%)和不同比例的 Al-10Ce 中间合金(0~2.5 wt%)进行细化变质处理。实验流程包括原料预处理、熔炼、变质处理、浇铸及性能检测。首先将 A356.2 合金、Al-10Fe、Al-5Ti-1B 和 Al-10Ce 置于电热恒温鼓风干燥箱中烘干，预热去除表面水分及氧化物。熔炼在电阻丝熔炼炉中进行，设定初始温度为 600°C ，待合金完全熔化后升温至 800°C 并保温 30 分钟，随后降温至 750°C 加入变质剂，搅拌熔炼 5 分钟后扒渣，最后将铝液浇铸至预热 370°C 保温了 30 分钟的 45 钢模具中成型。金相组织分析采用 CX40M 光学显微镜，通过抛光和化学腐蚀观察富铁相形貌；X 射线衍射(XRD)分析物相组成，扫描电镜(SEM)结合能谱(EDS)表征断口形貌及微区成分；力学性能测试包括布氏硬度(HB-3000C)和室温拉伸试验(WDW-100 万能试验机)，拉伸试样尺寸按标准加工，加载速率为 1 mm/min。实验所用设备如表 1 所示。

Table 1. List of experimental equipment

表 1. 实验设备表

设备名称	型号	生产厂家
电阻炉	SK-5-13	湘潭市三星仪器有限公司
电热恒温鼓风干燥箱	GZX-70-3	南京环科实验设备有限公司
扫描电子显微镜(SEM)	SU5000	日立高新技术公司
X 射线衍射仪(XRD)	智能型 SmartLab	日本理学株式会社
万能试验机	WDW-100	深圳市君瑞仪器设备有限公司
布氏硬度计	HB-3000C	上海隆拓仪器设备有限公司
金相显微镜	金相组织观察与晶粒尺寸测量	舜宇光学科技有限公司

3. 实验结果与分析

3.1. 物相检测结果分析

对经变质处理前后的 A356.2-0.65%Fe 合金金相 XRD 分析，X 射线衍射图如图 1 所示。由图 1 可知，变质前后的再生铝合金物象组成一致，都只存在明显的 Al 相、Si 相和 $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 相的衍射峰。经过变质处理的再生铝合金中未检测出含有 Ce、Ti、B 的化合物，是因为再生铝中的这些物质元素含量太少，导

致生成的化合物难以被检测到。

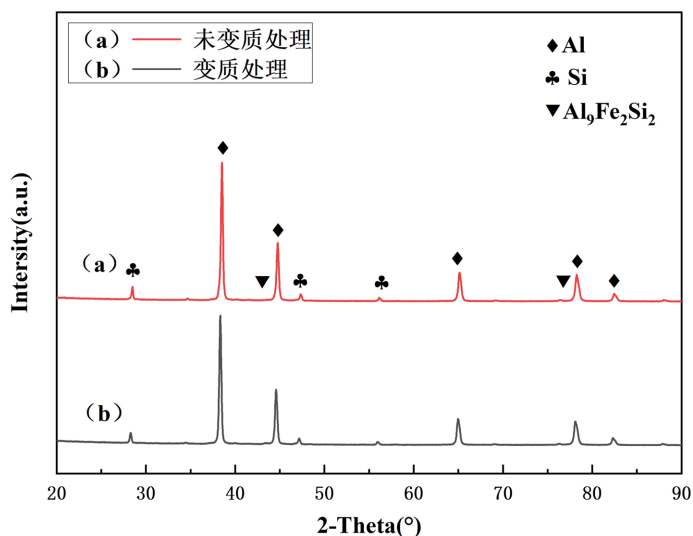


Figure 1. Comparison of XRD patterns

图 1. XRD 图谱对比

变质前后的 Fe 基本上以 $\text{Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 的化合物形式存在, 属于富铁相 $\beta\text{-Fe}$ 的一种。为进一步研究再生铝中的各物象形貌分布, 对再生铝合金的金相样品进行能谱分析如图 2 所示。

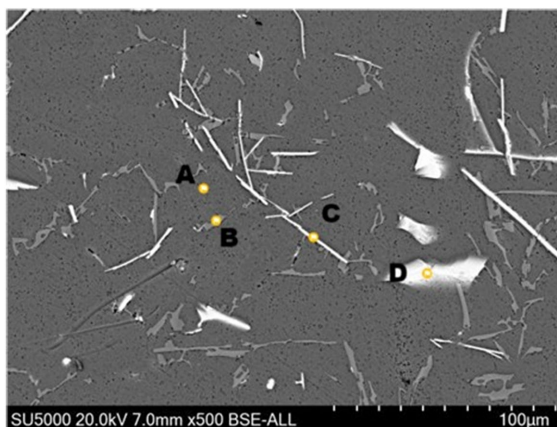


Figure 2. Energy Spectrum (EDS) analysis of metallographic samples

图 2. 金相样品能谱分析图

由图 2 可见与基体不同的几种物质形态, 选取 4 个点进行能谱点扫描分析, 结果如表 2 所示。点 A 元素组成为 Al 和 Si, Al 含量高达 98.79 wt%, 可确认其为 Al 基体组织。点 B 的元素组成为 Al 和 Si, Si 元素含量较高, 可确认其为共晶硅组织, 表现为长条状。点 C 和点 D 的元素组成为 Al、Fe、Al, 原子比都约为 9:2:2, 为典型的 $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 富铁相, 表现为长针状和片状。

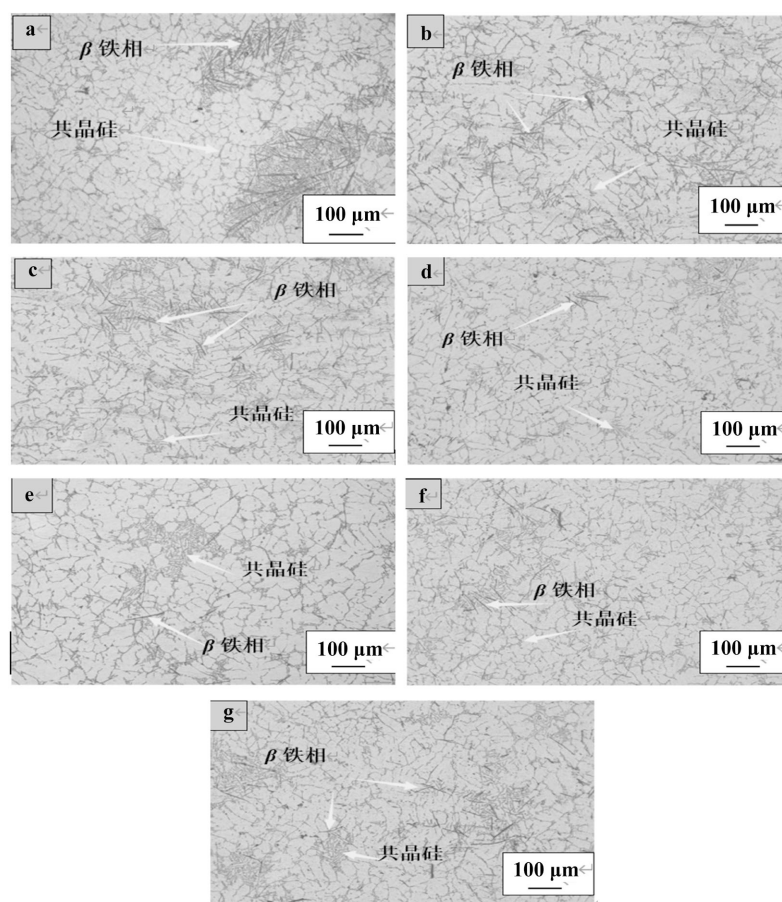
未变质处理的合金中, $\beta\text{-Al}_9\text{Fe}_2\text{Si}_2$ 富铁相以粗大长针状和片状为主, 穿插割裂铝基体; 经复合变质处理后, 未检测到新的物相生成, 但富铁相的长径比显著降低, 说明变质作用主要通过调控富铁相形貌而非生成新相实现。

Table 2. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) analysis of metallographic samples
表 2. 金相样品能谱分析表

元素	A		B		C		D	
	wt%	wt% Sigma	wt%	wt% Sigma	wt%	wt% Sigma	wt%	wt% Sigma
Al	98.79	0.1	20.06	0.13	60.01	0.22	57.8	0.21
Si	1.21	0.1	79.94	0.13	13.26	0.17	14.26	0.16
Fe					26.73	0.21	27.94	0.22

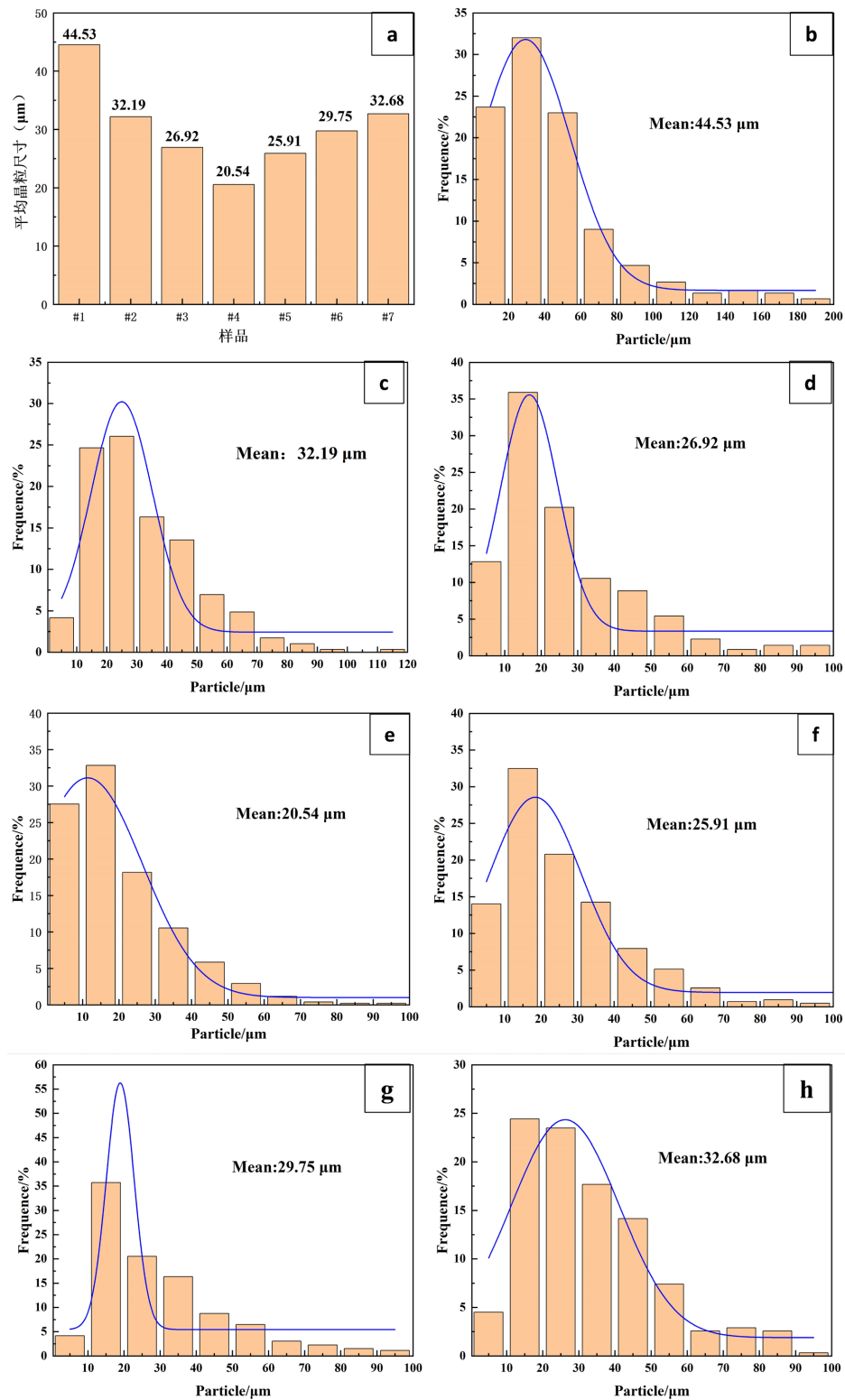
3.2. 金相检测结果分析

图 3 为 A356.2-0.65% Fe 合金和不同 Al-10Ce 合金添加量再生 A356.2 合金的显微组织, 由图可见白色铝基体, 浅灰色条状为共晶 Si 相, 黑褐色针状为 β 铁相, β 铁相在共晶 Si 相之间不规则分布。Si 在铝基体中广泛分布, 未细化变质的合金中存在大片 Si 相富集区, 加入细化变质剂后共晶 Si 相的富集区明显减少, 且随着 Al-10Ce 合金添加量的增加, 共晶 Si 相尺寸明显减小, 且分布逐渐均匀化, 当添加量为 0.5 wt% 时共晶 Si 相尺寸最小, 分布最均匀。



(a) A356.2-0.65% Fe 合金; (b) 0 wt%; (c) 0.1 wt%; (d) 0.5 wt%; (e) 1 wt%; (f) 1.5 wt%; (g) 2.5 wt%。

Figure 3. Effect of different Al-10Ce additions on the metallographic microstructure of recycled iron-rich aluminum alloy
图 3. 不同 Al-10Ce 添加量对再生富铁铝合金的金相显微组织的影响



(a) 富铁相平均晶粒尺寸分布; (b) A356.2-0.65% Fe 合金; (c) 0 wt%; (d) 0.1 wt%; (e) 0.5 wt%; (f) 1 wt%; (g) 1.5 wt%; (h) 2.5 wt%。

Figure 4. Effect of different Al-10Ce additions on the grain size of iron-rich phases in recycled iron-rich aluminum alloy
图 4. 不同 Al-10Ce 添加量对再生富铁铝合金的富铁相晶粒尺寸的影响

未添加任何变质剂的样品中,存在大片 Si 相富集区, β 铁相呈粗大长针状无序分布,贯穿多个晶粒;仅添加 0.65 wt% Al-5Ti-1B 的样品, Si 富集区有所减少,富铁相虽有一定细化,但仍存在较多针状相;而复合添加 Al-10Ce 后, Si 相尺寸进一步减小且分布逐渐均匀,富铁相的粗化趋势得到显著抑制。由图 3 可知复合添加 Al-5Ti-1B 和 Al-10Ce 对富铁铝合金变质后富铁相尺寸明显变小,为得到更准确数据,每个试样采集多个不同区域的金相组织图,利用 ImageJ 软件对富铁相尺寸进行测量,得出 A356.2-0.65% Fe 合金和不同 Al-10Ce 添加量再生 A356.2 合金的富铁相晶粒尺寸图,如图 4 所示。由图可知,未进行细化变质处理的再生铝合金粗大富铁相分布较多,晶粒尺寸平均值为 44.53 μm ,而经过复合添加 Al-5Ti-1B 和 Al-10Ce 细化变质处理后的再生铝合金的粗大富铁相分布明显减少,晶粒产生细化,随着 Al-10Ce 中间合金的添加量增加,细化效果越好,当添加量达到 0.5 wt% 时,合金中的粗大富铁相分布最少,晶粒尺寸平均值为 20.54 μm ,这一尺寸仅为未变质处理组的 46.13%,较仅添加 Al-5Ti-1B 的样品(32.68 μm)再减小 37.15%,且富铁相从晶界偏聚转变为均匀弥散分布,有效减少了基体的应力集中位点。较未细化变质处理的再生 A356.2-0.65% Fe 合金晶粒尺寸减小 53.87%,细化效果最强。当 Al-10Ce 中间合金的添加量高于 0.5 wt% 时,合金中富铁相的细化效果将出现下降趋势。

3.3. 力学性能检测结果分析

表 3 为对 A356.2-0.65% Fe 合金和不同 Al-10Ce 添加量复合变质处理再生 A356.2-0.65% Fe 合金进行硬度以及拉伸测试的结果,由表可知,变质处理使得再生铝合金的硬度下降,提升了合金的抗拉强度和伸长率,影响了再生铝合金的力学性能。

Table 3. Mechanical properties test results
表 3. 力学性能测试结果

样品	Al-5Ti-1B 添加量(wt%)	Al-10Ce 添加量(wt%)	硬度(HBS)	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)
#1	0.00	0.00	61.03	120	4.13
#2	0.65	0.00	60.14	157	6.78
#3	0.65	0.10	59.57	165	7.17
#4	0.65	0.50	54.11	167	7.31
#5	0.65	1.00	54.48	159	6.50
#6	0.65	1.50	56.83	159	6.01
#7	0.65	2.50	60.48	140	5.57

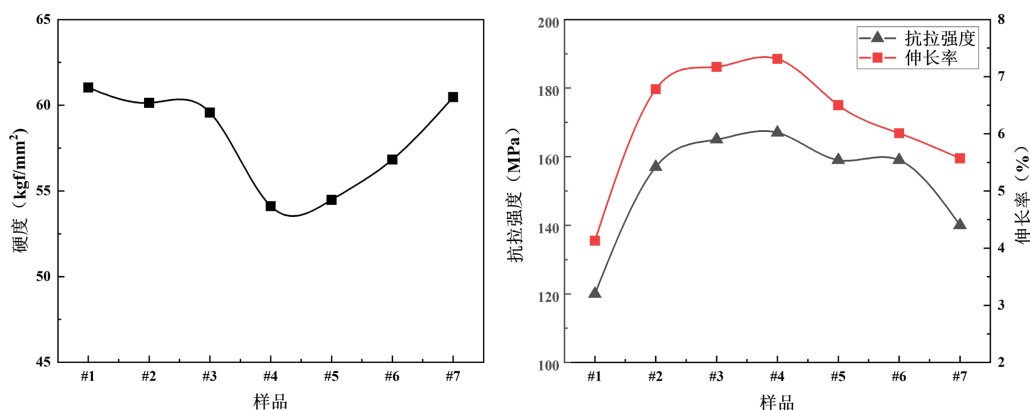
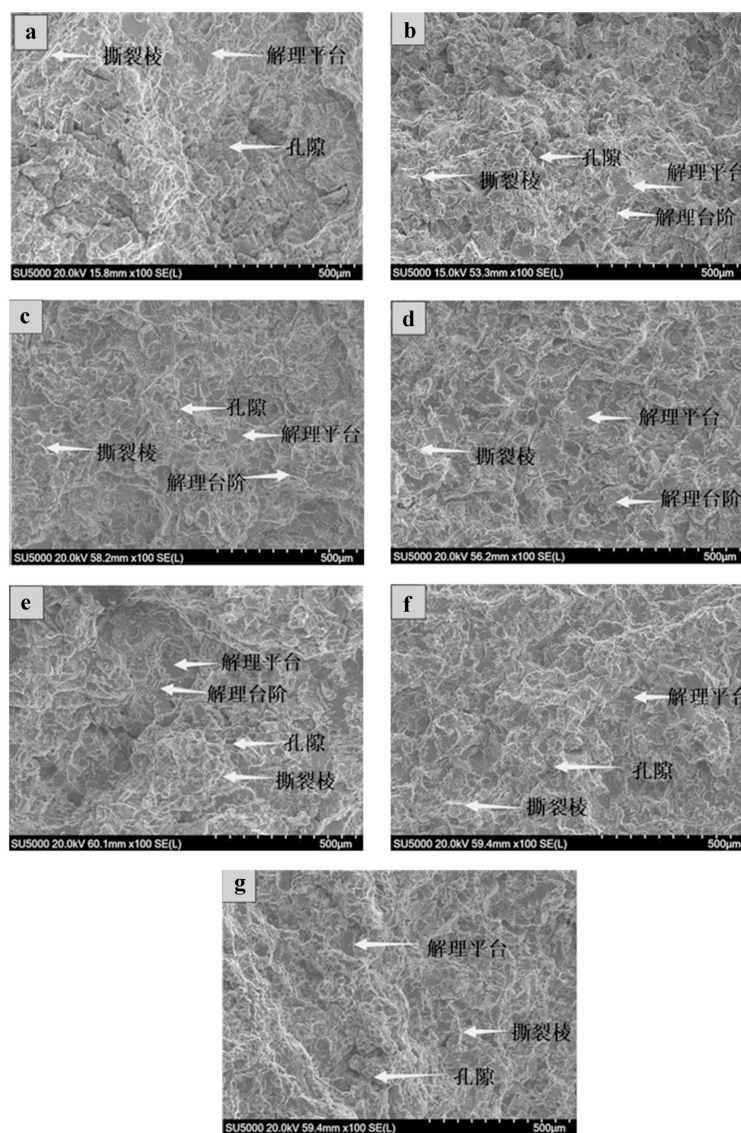


Figure 5. Hardness test results (left) and tensile property test results (right)
图 5. 硬度测试结果(左)及拉伸性能测试结果(右)

另对硬度测试结果和拉伸性能测试结果图 5 可知, 未变质处理的再生铝硬度为 61.03 kgf/mm^2 , 添加 Al-5Ti-1B 和 Al-10Ce 进行变质处理后, 再生铝的硬度下降, 当 Al-10Ce 的添加量为 $0.5 \text{ wt}\%$ 时, 合金硬度达到最低, 为 54.11 kgf/mm^2 , 较未变质处理的铝合金降低了 11.34% , 当添加量大于 $0.5 \text{ wt}\%$ 时, 合金的硬度呈上升趋势。由拉伸性能测试结果可知, 再生铝合金的抗拉强度越高, 伸长率便越大, 未变质处理的再生铝抗拉强度和伸长率最低, 变质处理后能大幅度提高其抗拉强度和伸长率。随着 Al-10Ce 的添加量的提高, 再生铝的抗拉强度和伸长率呈先上升后下降的趋势, 在 Al-10Ce 的添加量为 $0.5 \text{ wt}\%$ 时达到峰值, 抗拉强度为 167 MPa , 伸长率为 5.57% , 较未变质处理的再生铝合金分别增加了 39.17% 和 78.29% , 当添加量大于 $0.5 \text{ wt}\%$ 时, 抗拉强度和伸长率逐渐降低。

3.4. 断口形貌分析



(a) A356.2-0.65% Fe 合金; (b) 0 wt%; (c) 0.1 wt%; (d) 0.5 wt%; (e) 1 wt%; (f) 1.5 wt%; (g) 2.5 wt%。

Figure 6. Effect of different Al-10Ce additions on the tensile fracture morphology of recycled iron-rich aluminum alloy
图 6. 不同 Al-10Ce 添加量对再生富铁铝合金的拉伸断口形貌的影响

拉伸试样拉断后, 利用扫描电镜进行断口微观形貌观察及能谱分析, 放大 100 倍下的断口形貌组织如图 6 所示。在 SEM 断口形貌观察中, 所有样品均呈现典型脆性断裂特征, 表现为大面积解理面、清晰解理台阶及显著撕裂棱。未添加变质剂的 A356.2-0.65% Fe 合金断口显示异质化形貌特征: 解理平面尺寸分布离散, 晶界偏析现象明显, 撕裂棱呈现多级分叉结构。经 Al-5Ti-1B/Al-10Ce 复合变质处理后, 断口形貌发生显著改善: 解理面尺寸趋于均匀化, 晶界偏析程度降低, 撕裂棱连续性显著增强。当 Al-10Ce 添加量为 0.5 wt% 时, 解理面表现出最佳平整度, 其微观组织中 α -Al 相晶粒尺寸分布均匀性指数较未处理组显著下降, 表明此时合金晶体结构有序度显著提高。

微观组织分析表明, 隙缺陷对合金力学性能具有决定性影响。未变质处理的基体中存在大量弥散分布的球形孔隙, 这些孔隙通过应力集中效应显著降低材料连续性。经复合变质处理后, 孔隙数量减少, 尺寸缩小。当 Al-10Ce 添加量为 0.5 wt% 时, 孔隙体积分数达到最小值; 继续增加 Ce 含量至 1.0 wt% 及以上时, 孔隙数量出现反弹趋势, 这与稀土元素的过量团聚行为密切相关。这种孔隙演化规律与富铁相形态转变的实验观测结果相吻合, 表明 Ce 元素在优化相变过程的同时需严格控制添加量以避免负面效应。

为进一步观察断口处的物质形貌组成, 对合金断口放大 500 倍的微观组织进行分析, 如图 7 所示。该图揭示了断口处的相组成特征: 基体区域(A 点)扫描结果显示 Al 含量为 98.57 wt%, Si 含量为 1.43 wt%, 证实其为 Al 基体组织; 而富铁相区域(B 点)的点扫描表明该区域由 Al、Si、Fe 元素组成, 含量分别为 60.51 wt%、14.26 wt%、25.23 wt%, 原子比约为 9:2:2, 与 β -Al₉Fe₂Si₂ 相的标准成分(Al₉Fe₂Si₂)高度吻合。该针片状富铁相通过应力集中效应显著降低合金塑性, 成为裂纹扩展的主要路径。

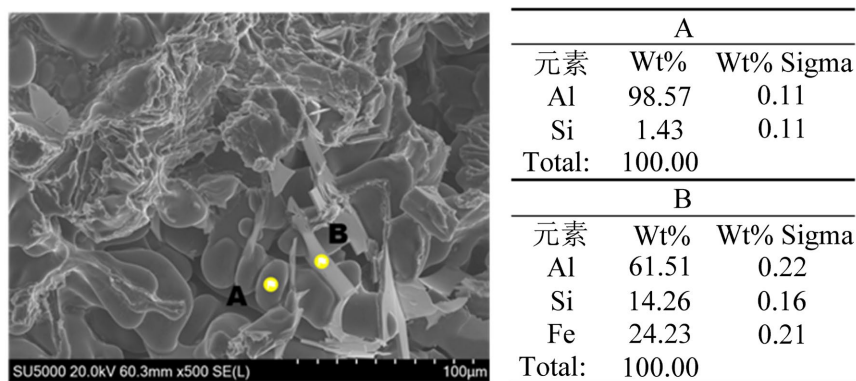


Figure 7. Micromorphology of iron-rich phase at the fracture

图 7. 断口处富铁相微观形貌

4. 结论

复合添加 Al-5Ti-1B 与 Al-10Ce 可有效细化再生铝中的 β -Al₉Fe₂Si₂ 富铁相, 同时细化共晶硅相并改善其分布均匀性, 显著提升再生铝合金的综合力学性能。

当 Al-5Ti-1B 添加量为 0.65 wt%、Al-10Ce 添加量为 0.5 wt% 时, 变质效果最优, 富铁相晶粒尺寸从 44.53 μ m 降至 20.54 μ m, 减小 53.87%; 此时合金硬度为 54.11 kgf/mm², 抗拉强度 167 MPa, 伸长率 5.57%, 较未变质处理组抗拉强度提升 39.17%, 伸长率提升 78.29%。

Al-10Ce 添加量超过 0.5 wt% 时, 富铁相细化效果下降, 合金力学性能随之劣化, 这与稀土元素过量团聚及孔隙数量反弹密切相关。

基金项目

2023 年国家级大学生创新创业计划项目: 202310609003; 2024 年度广西高等教育本科教学改革工程项目(一般项目 A 类): 2024JGA331; 2022 年中央引导地方科技发展专项资金项目: 百财教 20224504; 2023 年教育部产学研合作协同育人项目: 230822271707279。

参考文献

- [1] 崔博京, 陈其慎, 王琨, 等. 未来十年新业态下铝资源需求分析[J]. 资源与产业, 2023, 25(6): 31-40.
- [2] 韩正英, 曹樱. 再生铝应用与发展前景分析[J]. 有色金属加工, 2023, 52(3): 6-7+17.
- [3] 杨富强, 熊慧, 宋仁伯. 我国再生铝产业现状及发展方向[J]. 新材料产业, 2019(8): 10-14.
- [4] 娄照辉, 张卫文, 罗执, 等. 挤压铸造 Al-5.0Cu-0.6Mn-1.0Fe-1.0Ni 合金的高温力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1441-1449.
- [5] 王言兵, 汪丽君, 杨湘杰, 等. LSPSF 工艺对 Al-Si-2Fe 合金中富铁相的影响[J]. 铸造, 2015, 64(4): 313-316.
- [6] 张海涛, 唐威, 王东涛, 等. 铝合金中 Fe 元素的危害及其去除方法研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(7): 7-14.
- [7] 谭喜平, 郑开宏, 张新明, 等. 氧化硼对再生 A356 铝合金中杂质铁的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(22): 92-95.
- [8] 唐鹏. 富铁铝合金细化变质及沉降行为的研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [9] 刘光磊, 司乃潮, 孙少纯, 等. 多元 Al-7.5Si-4Cu 合金热疲劳裂纹萌生与扩展行为的研究[J]. 金属学报, 2013(3): 303-310.
- [10] 戴玮. Sr、Ti、Ce 对 6061 铝合金用钎料性能及组织的影响[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 王波, 刘让贤, 丁镜之, 等. Al-5Ti-1B、Ce 复合添加对铸造铝合金组织和性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2020, 43(4): 72-77.
- [12] 康文旭, 马润山, 崔泽云, 等. Al-5Ti-1B 与 Y 复合添加对铸造 Mg-5Al-5Si 合金的影响[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(3): 474-482.
- [13] Crossley, F.A. and Mondolfo, L.F. (1951) Mechanism of Grain Refinement in Aluminum Alloys. *JOM*, 3, 1143-1148. <https://doi.org/10.1007/bf03397424>
- [14] 凌思涵. 高效晶粒细化剂铝钛硼制备及细化机理研究[D]: [硕士学位论文]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.
- [15] Jones, G.P. and Pearson, J. (1976) Factors Affecting the Grain-Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives. *Metallurgical Transactions B*, 7, 223-234. <https://doi.org/10.1007/bf02654921>
- [16] 王海彬, 袁洪伟, 刘科研, 等. 富铈混合稀土对工业纯铝中富铁相形貌的影响[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(8): 23-26.
- [17] 孙常明. 利用稀土改善富铁铝合金组织和性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2007.