

# Al-3B对A356.2再生铝合金熔体净化的影响研究

李青杰<sup>1</sup>, 伊家飞<sup>1,2</sup>, 孙敬会<sup>1\*</sup>, 梁业天<sup>1</sup>, 陈国铨<sup>1</sup>, 杨承志<sup>1</sup>, 何钊贤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>百色学院材料科学与工程学院, 广西 百色  
<sup>2</sup>广西老区振兴发展研究基地(培育), 广西 百色

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年6月28日; 发布日期: 2026年7月8日

## 摘要

文章研究了A356.2再生铝合金在770°C浇铸温度、90 min保温时间条件下, 向A356.2再生铝合金熔体中添加不同质量分数(1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt%)的Al3B中间合金对熔体净化效果的影响。采用金相显微镜、X射线衍射仪、扫描电镜、拉伸试验机、布氏硬度计及直读光谱仪开展测试表征。结果表明, Al-3B可通过硼化反应与熔体中Fe生成稳定的Fe<sub>2</sub>B相并沉降除铁, 同时显著细化晶粒、改善脆性富铁相形貌。随着Al-3B添加量的增加, 合金抗拉强度与伸长率先升后降, 2 wt%添加量时综合力学性能最优, 抗拉强度达161.1 MPa、伸长率为3.71%, 除铁率在2 wt%时达到峰值7.71%。

## 关键词

再生铝合金, 熔体净化, 除铁技术, A356.2, Al-3B, 力学性能

# Research on the Effect of Al-3B on Melt Purification of Recycled A356.2 Aluminum Alloy

Qingjie Li<sup>1</sup>, Jiawei Yi<sup>1,2</sup>, Jinghui Sun<sup>1\*</sup>, Yetian Liang<sup>1</sup>, Guoquan Chen<sup>1</sup>, Chengzhi Yang<sup>1</sup>, Zhaoxian He<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Baise University, Baise Guangxi  
<sup>2</sup>Research Base for the Revitalization and Development of Old Revolutionary Base Areas in Guangxi (Cultivation Base), Baise Guangxi

Received: June 3, 2026; accepted: June 28, 2026; published: July 8, 2026

## Abstract

This study investigated the effect of different mass fractions (1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, and 4 wt%) of

\*通讯作者。

文章引用: 李青杰, 伊家飞, 孙敬会, 梁业天, 陈国铨, 杨承志, 何钊贤. Al-3B 对 A356.2 再生铝合金熔体净化的影响研究[J]. 材料科学, 2026, 16(7): 11-20. DOI: 10.12677/ms.2026.167151

**Al-3B master alloy on the melt purification of recycled A356.2 aluminum alloy, under the conditions of a casting temperature of 770°C and a holding time of 90 min. Metallographic microscopy, X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM), tensile testing, Brinell hardness testing, and direct-reading spectrometry were employed for comprehensive characterization. The results show that Al-3B reacts with Fe in the melt via boronization to form stable Fe<sub>2</sub>B phase, which is then removed by sedimentation. Meanwhile, the addition of Al-3B significantly refines the grain structure and modifies the morphology of brittle iron-rich phases. With increasing Al-3B addition, the tensile strength and elongation of the alloy first increase and then decrease. The optimal comprehensive mechanical properties are achieved at 2 wt% Al-3B addition, with a tensile strength of 161.1 MPa and an elongation of 3.71%. Additionally, the iron removal efficiency reaches a peak of 7.71% at the same 2 wt% addition level.**

## Keywords

**Recycled Aluminum Alloy, Melt Purification, Iron Removal Technology, A356.2, Al-3B, Mechanical Property**

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

铝合金凭借密度小、比强度及比刚度、抗腐蚀性强等优异性能[1]，在工业领域应用广泛。目前，我国虽已成为全球最大的铝生产国[2]，但每年氧化铝的进口依存度仍高达 30% 至 50%。这种资源对外依赖导致的原铝产量结构性短缺，已对国民经济发展形成显著制约[3]。因此，大力发展再生铝合金产业在我国具有极其重要的战略意义。再生铝是指以各类废铝为核心原料，通过熔炼工艺处理后生产出的铝及铝合金材料[4]。近年来，其生产规模不断扩大，同时以废杂铝为原料生产的铝合金产品质量明显提高[5]。然而，废铝来源复杂，常夹带油污、油漆、塑料、泥土、铁钉等潮湿夹杂物，这些物质在熔化时会进入再生铝合金熔体，导致熔体中气体和夹杂物含量升高，进而形成气孔、疏松等缺陷及有害化合物，严重降低再生铝合金品质与性能[6]。因此，研究再生铝合金熔体净化技术对提升再生铝合金的品质、性能具有十分重要的意义[7]。再生铝合金熔体净化技术主要有气泡浮游法[8] [9]、熔剂法[10]、过滤法等[11]。熔剂法是指在铝合金熔炼时，将熔剂添加至熔体内部，借助物理化学作用实现除气除杂的工艺方法。本研究在 A356.2 铝合金熔体中加入铝硼合金以添加硼元素，重点探查不同添加量的铝硼合金对再生铝的组织结构、力学性能、除铁效果的影响。

## 2. 实验

### 2.1. 实验原理

向铝合金中添加含硼熔剂是实现除铁的有效途径。研究表明，添加硼酸钠可显著降低合金中的铁含量。其除铁机制在于：熔剂中的硼元素与杂质铁发生化学反应，生成铁硼化合物。由于该化合物极易被熔剂捕捉并溶解进入熔渣，从而实现铁元素的分离与去除，这也是硼化法除铁的核心原理[12]。

本实验向铝熔体中加入实验所用量的 Al-3B 中间合金，分别为铝熔体质量的 1%、2%、3%、4%，得到 Fe<sub>2</sub>B，根据冶金热力学原理，可能发生的化学反应有：



反应温度 770℃ (1043K), 通过观察、分析生成物和反应物, 发现该反应式的吉布斯自由能可直接由公式  $\Delta G_{1043K} = \Delta H_{298K} - T \cdot \Delta \Phi_{1043K}$  得出, 其中  $\Delta \Phi_{1043K}$  为物质吉布斯自由能函数,  $\Delta H_{298K}$  为标准摩尔焓。Cp.m (摩尔恒压热容) B = 12.24 J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, 则  $\Delta \Phi_{1043K}(B) = C_{p,m} \ln(T_2/T_1) = 15.338 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

相关数据如表 1 所示[13]:

**Table 1.** Thermodynamic properties of various substances

**表 1.** 各物质的热力学数据

T/K	B	Fe	Fe <sub>2</sub> B
$\Delta \Phi_{1043K}/\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	15.338	42.160	92.226
$\Delta H_{298K}^0$	0	0	71128

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_{1043K} &= \sum \text{生成物}(\Delta \Phi_{1043K}) - \sum \text{反应物}(\Delta \Phi_{1043K}) \\ &= 96.226 - (2 \cdot 42.16 + 15.338) = -3.432 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{298K} &= \sum \text{生成物}(\Delta H_{298K}) - \sum \text{反应物}(\Delta H_{298K}) \\ &= 0 - 71128 = -71128 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\Delta G_{1043K} = \Delta H_{298K} - T \cdot \Delta \Phi_{1043K} = -67559.158 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$\Delta G_{1043K} < 0$ , 所以计算结果表明, 在 770℃ (1043K)下, B 能和再生铝 A356.2 中的杂质铁反应生成 Fe<sub>2</sub>B 化合物, 为除去再生铝 A356.2 中的杂质铁提供了理论依据。

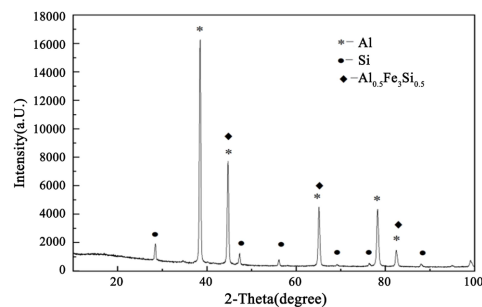
## 2.2. 实验原料

本实验所用原料为: A356.2 铝锭、Al-10Fe 中间合金、Al-3B 中间合金。A356.2 合金是一个典型的 Al-Si-Mg 系三元合金, 具有较好的流动性, 线收缩小, 无热裂倾向, 可铸造薄壁和形状复杂的铸件。A356.2 的具体成分如表 2 所示。Al-10Fe 中间合金铁含量为 10%, Al-3B 中间合金 B 含量为 3%。图 1 是含铁量 0.6% 再生铝的 X 射线衍射图谱, 从图谱中可以清晰识别出  $\alpha$ -Al 基体、共晶硅以及富铁金属间化合物 Al<sub>0.5</sub>Fe<sub>3</sub>Si<sub>0.5</sub> (即  $\beta$ -AlFeSi 相) 的特征衍射峰。Al<sub>0.5</sub>Fe<sub>3</sub>Si<sub>0.5</sub> 的衍射峰则直接证明了高 Fe 含量再生铝中脆性富铁相的存在。这类针片状富铁相在铝熔体凝固过程中形成, 会严重割裂铝基体的连续性, 在拉伸过程中成为应力集中源, 显著降低合金的塑性与韧性。

**Table 2.** Chemical composition of A356.2 aluminum ingot

**表 2.** A356.2 铝锭化学成分

元素	Al	Si	Mg	Fe	Cu	Zn	其他
含量(wt%)	92.398	6.53	0.427	0.272	0.217	0.0547	0.1018



**Figure 1.** XRD composition analysis of recycled aluminum with 0.6% iron content

**图 1.** 含铁量 0.6% 再生铝 XRD 成分分析

### 2.3. 实验仪器

实验仪器如表 3 所示:

**Table 3.** Experimental apparatus

**表 3.** 实验仪器

仪器名称	型号	生产厂家
K4 型电加热倾斜式熔化炉	K 4/13	德国博热纳工业有限公司
金相显微镜	IE200M	南京麒麟科学仪器集团有限公司
拉伸试验机	WDW-100	深圳市君瑞仪器有限公司
布氏硬度计	HB-3000C	上海精密仪器仪表有限公司
直读光谱仪	PDA-5500S	日本岛津
X 射线衍射仪	STAMRT LAB 9	日本理学株式会社
扫描电镜	SU5000	日立高新技术公司

### 2.4. 实验分析方法

1) 金相分析: 采用 180 目、400 目、800 目、1200 目、1500 目、2000 目的砂纸进行粗磨, 随后利用金刚石磨砂膏进行抛光, 最后使用浓度 0.5% 的氢氟酸水溶液对试样进行腐蚀(时长控制在 15~30 s), 待观察到表面浑浊变色后, 立即用清水冲洗并用酒精擦拭、吹干。将制备好的金相试样置于金相显微镜下观察, 分别在 50、100 和 500 倍放大倍数下进行图像采集与记录; 若需观察细微组织特征, 则进一步在 1000 倍下进行记录。

2) XRD 分析: 利用 X 射线衍射仪对金相试样进行物相成分分析, 以确定样品的物相。测试条件为实验采用 Cu-K $\alpha$  衍射, 使用波长为  $\lambda = 0.154157$ , 测试时所采用电压为 100 kv, 电流 100 mA, 扫描的范围为  $0^{\circ}$ ~ $100^{\circ}$ 。最后将得到的数据利用 MDI Jade 9.0、Origin 等软件进行分析画图。

3) SEM-EDS 分析: 利用电子束打在试样表面从而发生一系列作用, 包括二次电子、背散射电子等。这些电子信号通过系统分析处理从而转化为放大的视频信号, 以反映试样的形貌特点。将拉伸试验后的拉伸试样进行拉伸断口分析, 观察拉伸断口形貌, 分析富铁相的存在是否是降低试样力学性能的因素。

4) 力学分析: 包括拉伸试验和布氏硬度试验。将浇铸好的试样切割成等长的拉伸试验棒, 根据 GB/T28.1-2010(金属材料室温拉伸试验方法)标准进行, 得到材料的屈服强度、抗拉强度、延伸率和断面收缩率、布氏硬度等力学指标, 以此来分析试样除铁前后力学性能的变化。

5) 光电直读光谱仪分析: 光电直读光谱仪采用光电转换技术接收并记录各元素的特征谱线强度, 进而将其转换为元素的质量分数。该仪器常用于多元素同时分析, 具有分析速度快、检测范围广、误差小等显著特点。在本次实验中, 主要利用该仪器测定试样在除铁处理前后的铁元素质量分数, 以评估除铁效果。

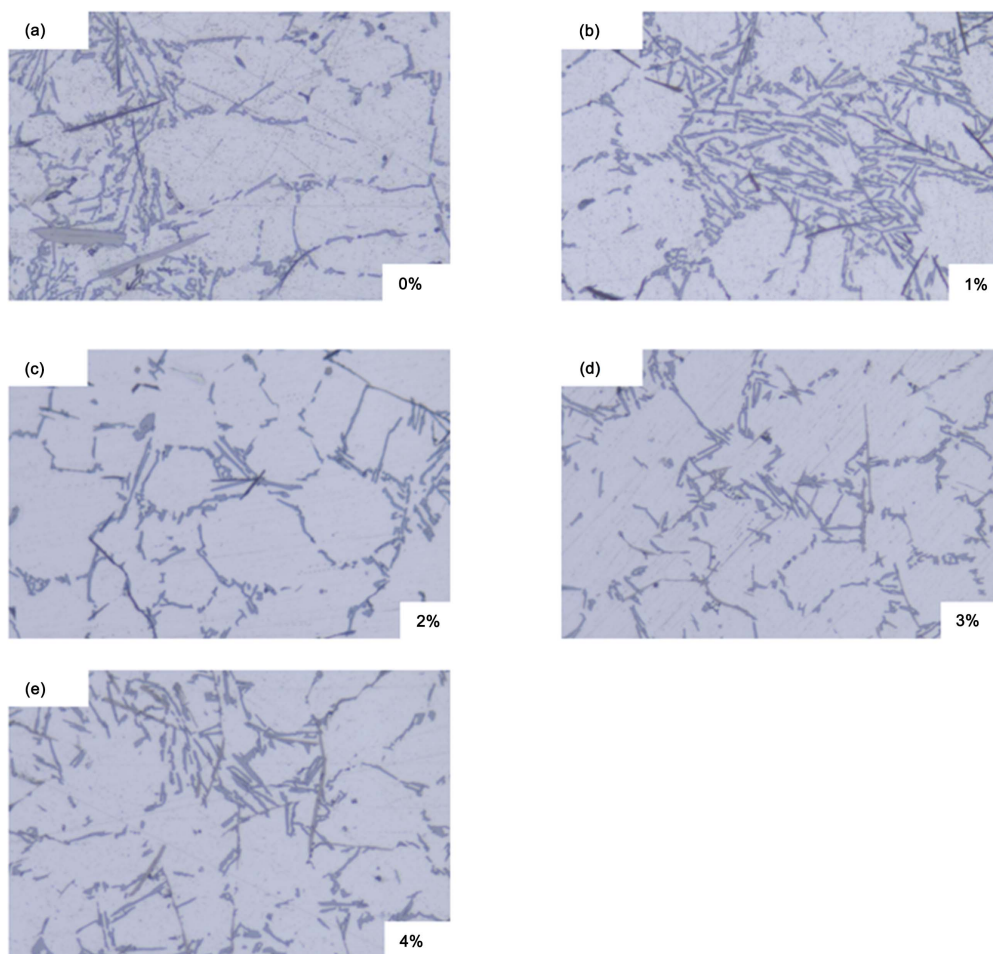
## 3. 实验结果及分析

### 3.1. 金相组织分析

图 2(a)~(e)展示了 A356.2 铝锭的金相显微组织。试样在加热至  $770^{\circ}\text{C}$  并随炉保温 1.5 h、自然冷却 12 h 的工艺条件下, Al-3B 的添加量分别为 0%、1%、2%、3% 和 4%。

当添加量为 0 wt% (见图 2(a)), 得到的富铁相呈针状和片状, 尺寸相对较大, 割裂基体严重, 破坏基体连续性和均匀性。当添加量为 1 wt% (见图 2(b)), 得到的富铁相主要呈针状, 尺寸相对较小但偏聚严

重。当添加量为 2 wt% (见图 2(c)), 得到的富铁相呈细小的针状且数量较少, 共晶硅尺寸变小, 分布相对均匀, 起到了细化晶粒的效果。当添加量从 2 wt% 增加到 4 wt% (见图 2(c)-(e)), 得到的富铁相依然呈细小针状且宽度尺寸减少, 但数量逐渐增多, 共晶硅的尺寸逐渐变小, 分布更加均匀。



**Figure 2.** Metallographic micrographs of aluminum alloys with different Al<sub>3</sub>B additions  
**图 2.** 不同 Al-3B 添加量的铝合金金相显微组织图

图 2(a)中可观察到明显的富铁相, 呈现出针状或片状形态, 分布在铝合金基体中。这些针片状富铁相尺寸相对较大, 在基体中较为突兀, 长针状铁相在共晶硅相之间不规则分布, 严重割裂基体, 破坏金相组织均匀性与基体连续性, 对力学性能产生不利影响, 可能降低合金的塑性和韧性。随着 Al-3B 中间合金添加量从 1 wt% 逐步增加到 4 wt%, 共晶硅尺寸明显变小且分布更均匀, 呈现出细化晶粒的作用。同时, 富铁相显著减少, 不再以长条状和片状的形式存在, 而是转变为细小针状, 宽度尺寸大幅减小, 极大地降低了富铁相对铝合金性能的危害。

### 3.2. Al-3B 的添加量对铝合金力学性能的影响

抗拉强度及伸长率如图 3 所示。

对未添加 Al-3B 的铝合金试样进行拉伸试验, 获得了其力学性能的基础数据(如表 4 所示)。将其与添加 Al-3B 处理后的铝合金拉伸试验结果进行对比分析, 得出以下结论:

1) 随着 Al-3B 浓度梯度的增加, A356.2 铝合金的抗拉强度和延伸率先升高后下降。当 Al-3B 添加量为 2 wt%时, 抗拉强度和伸长率达到峰值, 分别为 161.1 MPa、3.71%, 抗拉强度由 146.54 MPa 提高到 161.1 MPa, 提高了 10%左右, 而伸长率由 3.12%提高到 3.71%, 增加了 19%, 延展性最好, 此时 A356.2 铝合金的综合力学性能最优。

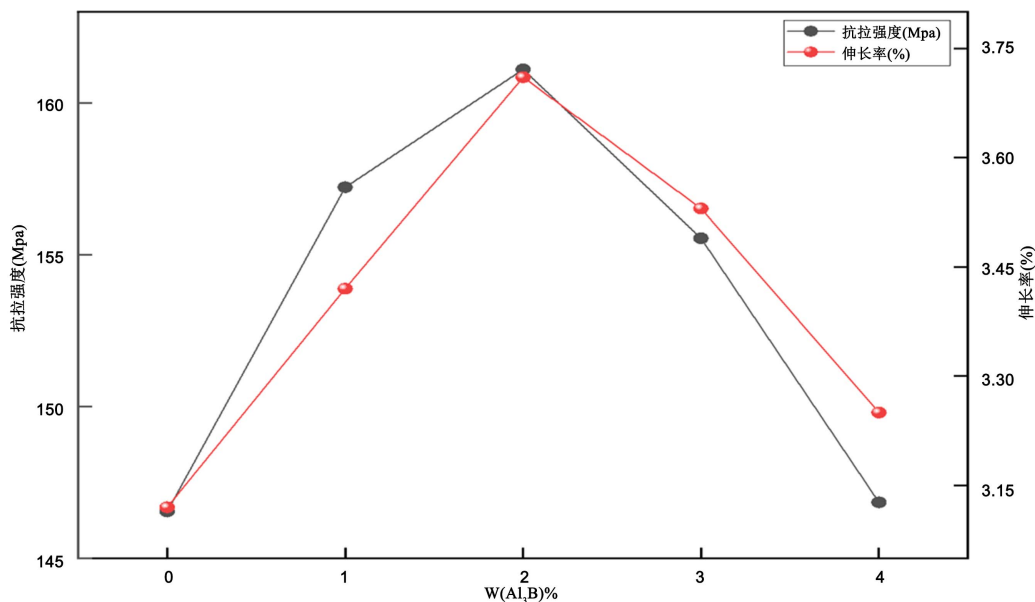


Figure 3. Effect of Al<sub>3</sub>B master alloy on tensile properties

图 3. Al-3B 中间合金对拉伸性能影响

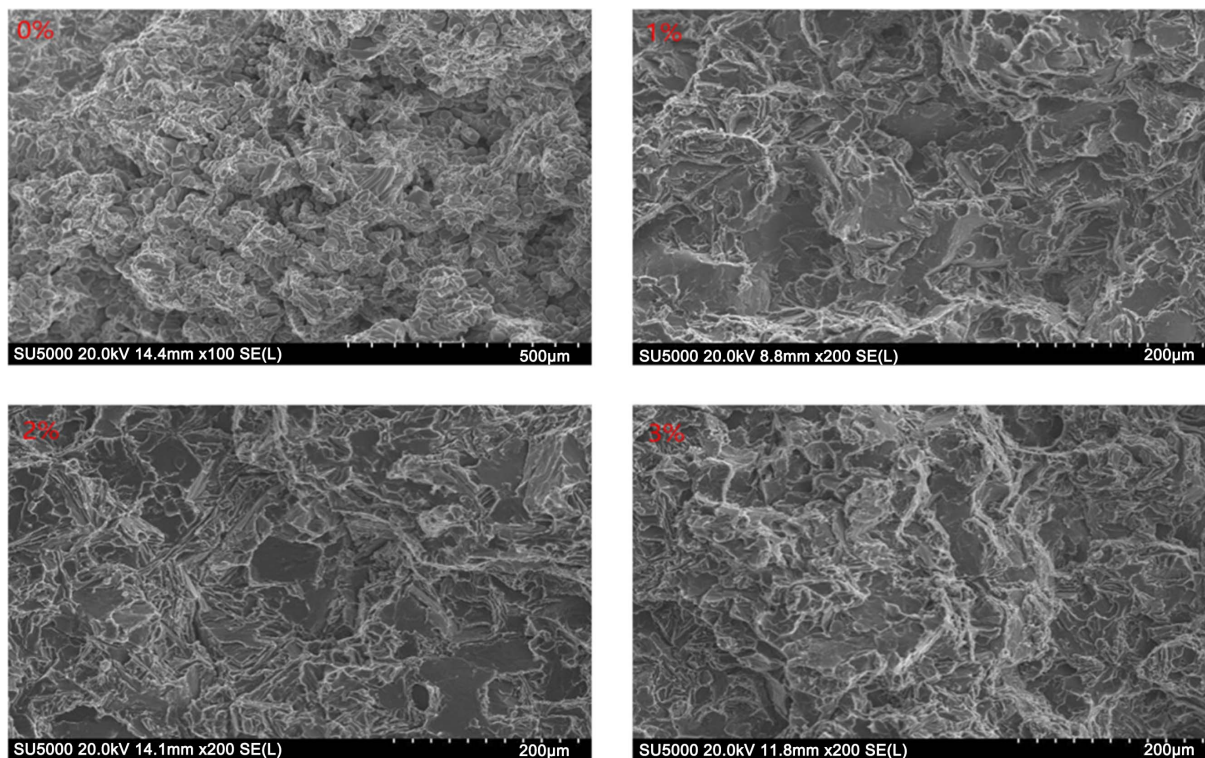
Table 4. Tensile strength and elongation

表 4. 抗拉强度与伸长率

Al-3B 添加量	抗拉强度(MPa)	伸长率(%)
0 wt% Al-3B	146.54	3.12
1 wt% Al-3B	157.22	3.42
2 wt% Al-3B	161.10	3.71
3 wt% Al-3B	155.54	3.53
4 wt% Al-3B	146.84	3.25

2) 通过添加 Al-3B 中间合金, 可明显提高铝合金的综合性能。拉伸强度、拉伸伸长率随着 Al-3B 合金添加量的增加而先上升后下降, 当加入比例为 2 wt%时, 拉伸性能最好。在此基础上, 拉伸强度由 146.54 MPa 提高到 161.1 MPa, 提高了 10%左右, 伸长率增加了 19%, 由 3.12%提高到 3.71%。在此基础上, 随其添加量的材料的各项力学性能都有所降低。

进一步对不同 Al-3B 添加量下拉伸试样的断口进行扫描电镜(SEM)分析(如图 4 所示)。通过断口形貌可以分析出试样断裂方式为沿晶断裂。断口表面可见较为平坦的解理面及大量撕裂棱, 解理面边缘伴有微裂纹萌生; 随着应力的增加, 裂痕逐渐扩展最终断裂, 且由于针状和片状的富铁相集中在铝基体上, 加速了裂纹的扩展, 最终导致试样的断裂。



**Figure 4.** Tensile fracture SEM images at different Al-3B additions

**图 4.** Al-3B 不同添加量拉伸断口扫描电镜图

本次布氏硬度测试采用 HB-3000C 型布氏硬度计，对不同 Al-3B 添加量及初始铁含量为 0.6% 的试样进行测定。测试条件为：采用直径 10 mm 的硬质合金球作为压头，施加 1000 kgf 载荷并保持 30 s。为减小误差，在每个试样的不同区域进行多点测试，并取其算术平均值作为最终硬度值。随着 Al-3B 添加量从 0% 增加至 4%，合金的压痕直径从 4.42 mm 单调增大至 4.75 mm，布氏硬度(HBS)从 61.03 持续下降至 53.07，整体呈现显著的负相关关系。

未添加 Al-3B 时，合金中高含量的 Fe 形成大量硬脆富铁相，其第二相强化效应使合金维持较高硬度，但基体连续性被严重割裂，塑性与韧性显著恶化。随着 Al-3B 的添加，Fe 元素以  $Fe_2B$  形式沉降去除，富铁相数量大幅减少，第二相强化效应减弱；同时基体连续性改善，塑性变形能力提升，导致布氏硬度试验中压痕直径增大，测得硬度值降低。硬度测试结果详细数据见表 5：

**Table 5.** Hardness and indentation diameter

**表 5.** 硬度与压痕直径

Al-3B添加量	压痕直径(mm)	硬度(HBS)
0%	4.42	61.03
1%	4.47	60.40
2%	4.61	56.57
3%	4.74	53.31
4%	4.75	53.07

### 3.3. Al-3B 的添加量对铝合金物相的影响

图 5 是 Al-3B 添加量为 1% 时的再生铝 XRD 成分分析图, 从图中可以看出主要物相包括 Al、Si、 $\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_3\text{Si}_{0.5}$  等。这表明经过 Al-3B 中间合金处理后, 再生铝基体中的主要物相并未发生明显改变。图 6 是 Al-3B 添加量为 1% 时的再生铝炉底渣 XRD 成分分析图, 可以发现含有  $\text{Fe}_2\text{B}$ , 但沉降在再生铝熔体底部的炉底渣中  $\text{Fe}_2\text{B}$  并不多, 原因可能是再生铝熔体粘度大, 部分  $\text{Fe}_2\text{B}$  并未完全沉底, 这也是除铁率较低的原因之一。这说明 Fe 元素和 B 元素能够发生反应, 生成高熔点、高密度的  $\text{Fe}_2\text{B}$  化合物, 该化合物随炉底渣排出, 从而实现了析出除铁的目的。

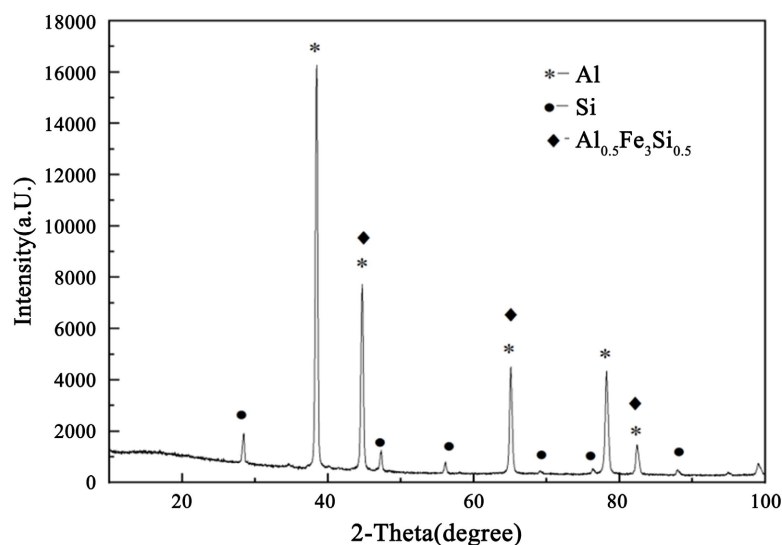


Figure 5. XRD analysis of recycled Al alloy at 1% Al-3B addition

图 5. Al-3B 添加量为 1% 时的再生铝 XRD 成分分析

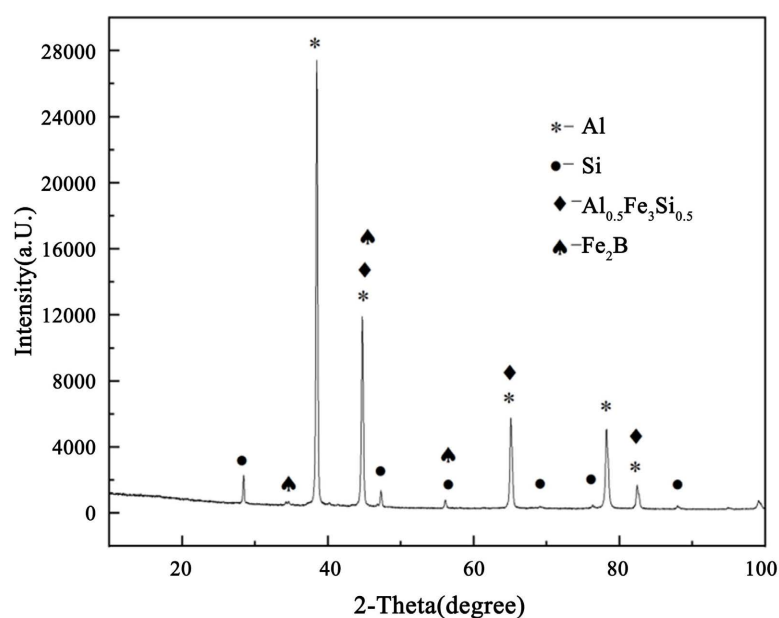


Figure 6. XRD analysis of furnace bottom slag at 1% Al-3B addition

图 6. Al-3B 添加量为 1% 时的再生铝炉底渣 XRD 成分分析

### 3.4. Al-3B 的添加量对除铁率的影响

表 6 为不同 Al-3B 添加量下 A356.2 再生铝合金的含铁量与除铁率变化。未添加 Al-3B 时, 合金初始 Fe 含量为 0.638%, 除铁率为 0。随着 Al-3B 添加量从 0 wt% 增加至 2 wt%, 合金中 Fe 含量逐渐降低, 除铁率持续提升。当添加量为 2 wt% 时, Fe 含量降至 0.592%, 除铁率达到峰值 7.71%。这一变化表明, 适量添加 Al-3B 可有效促进熔体中 Fe 元素以  $Fe_2B$  形式沉降去除, 且除铁效果随添加量的增加而增强。

**Table 6.** Effect of different dosages of Al<sub>3</sub>B on iron removal rate  
**表 6.** 不同添加量 Al-3B 对除铁率的影响

Al-3B添加量	含铁量(%)	除铁率(%)
0 wt%	0.638	0
1 wt%	0.606	5.02
2 wt%	0.592	7.71
3 wt%	0.612	4.08
4 wt%	0.618	3.13

当 Al-3B 添加量进一步增加至 3 wt% 和 4 wt% 时, 合金中 Fe 含量出现回升, 除铁率则下降至 4.08% 和 3.13%。这是由于过量添加 Al-3B 时, 熔体中游离 B 含量过高, 一方面会与基体元素反应形成新的硼化物相, 另一方面会改变熔体粘度, 抑制  $Fe_2B$  颗粒的沉降, 甚至引发  $Fe_2B$  的再溶解或偏析, 最终导致除铁效率下降。

## 4. 结论

1) 在 770°C 浇铸温度、90 min 保温条件下, Al-3B 中间合金可与熔体中的 Fe 元素发生硼化反应, 生成稳定的  $Fe_2B$  相并通过沉降去除, 实现熔体净化。随 Al-3B 添加量增加, 合金含铁量先降后升, 除铁率在添加量为 2 wt% 时达到峰值 7.71%。

2) Al-3B 的添加不仅有效去除了有害富铁相, 还显著细化了合金晶粒, 并改善了脆性富铁相的形貌, 使其由粗大针片状向细小针状转变, 大幅降低了富铁相对铝基体的割裂作用, 为力学性能提升奠定了组织基础。

3) 随着 Al-3B 添加量增加, 合金的抗拉强度与伸长率先升后降, 在 2 wt% 添加量时达到综合性能最优, 抗拉强度达 161.1 MPa、伸长率为 3.71%。

4) 综合除铁效果、微观组织改善与力学性能提升, 2 wt% 的 Al-3B 添加量为兼顾熔体净化与合金性能的最优工艺参数。

## 基金项目

2023 年国家级大学生创新创业计划项目: 202310609005; 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] 袁蔚景, 涂杰松, 李银华, 等. 回收工艺对再生铝合金性能影响述评[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(5): 18-29.
- [2] 王祝堂. 世界再生铝工业风云[J]. 世界有色金属, 2017(5): 15-20.

- [3] 高安江, 曲信磊. 废铝回收处理技术及工艺研究[J]. 再生资源与循环经济, 2014(2): 35-36.
- [4] 张树玲, 靳艺, 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.
- [5] 张希忠. 困扰再生铝工业发展的十个问题[J]. 有色金属再生与利用, 2003(9): 15-17.
- [6] 谭喜平, 宋东福, 郑开宏. 锰和硼结合振动对再生铝组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属, 2015, 39(12): 1076-1082.
- [7] 陈学文, 邝治全, 王顺成, 等. 再生铝合金熔体净化与细化变质技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(19): 4-7.
- [8] Chen, X.G. (1994) Efficiency of Impeller Degassing and Regassing Phenomena in Aluminum Melts. *AFS Transactions*, **102**, 191-196.
- [9] Bob, M. (1995) Beyond Rotary Degassing. *Foundry Trade Journal*, No. 6, 298.
- [10] King III, S. and Reynolds, J. (1995) Flux Injection/Rotary Degassing Process Provides Cleaner Aluminum. *Modern Casting*, No. 4, 37.
- [11] 张辉, 孙彦华, 岳有成, 等. 再生铝合金熔体净化技术的发展现状[J]. 铸造技术, 2020, 41(6): 573-575.
- [12] 秦鹏. 再生铝合金除铁技术探索[J]. 产业与科技论坛, 2018, 17(10): 76-77.
- [13] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.