● 工艺技术 Technology ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4124

沉降加过滤去除回收铝罐料中 Fe 杂质工艺研究

崔俊豪[1,2],肖 涌[1,2],王向杰[1,2],崔建忠[1,2],李 磊[1,2]

(1. 东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要:废铝回收再利用可极大节约能源,但由于多种原因其回收时往往会混入杂质 Fe 元素,从而极大损害铝合金力学性能。因此, 开发一种有效再生铝除 Fe 技术对于推动废铝回收行业的发展具有重要意义。本文以含 Fe 量为 1.4%(质量分数)的回收铝罐料为研究对象,通过添加 Mn、Si 元素在熔体中形成粗大 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相,进而采用沉降+过滤工艺对其进行除 Fe 研究。结果表明,当向铝熔体中添加 2.98%Mn 和 7.89%Si(质量分数),且在 630 ℃保温沉降 15 min 后进行过滤,可获得最佳除 Fe 效果,其沉降除 Fe 率和过滤除 Fe 率分别达到 64.5%、68.8%。微观组织分析表明,沉降可去除坩埚底部偏聚的大量枝晶状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相,过滤可去除熔体上部存有的少量块状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相;上部熔体经过滤后,陶瓷过滤片中残留一定量的块状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相,而熔体中则含有少量的鱼骨状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相。

关键词:回收铝罐料;沉降+过滤;富 Fe 相;除 Fe 率

中图分类号:TG146.2+1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2024)11-1093-06

Research on the Process of Sedimentation Add Filtration to Remove Fe Impurities from Recycled Aluminium Cans

CUI Junhao[1,2], XIAO Yong[1,2], WANG Xiangjie[1,2], CUI Jianzhong[1,2], LI Lei[1,2]

(1. Key Laboratory for Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Recycling and reusing scrap aluminium can greatly save energy. However, for a variety of reasons, the impurity Fe is often mixed during recovery, which greatly deteriorates the mechanical properties of aluminium alloys. Therefore, developing an effective Fe removal technology for recycled aluminium is highly important for promoting the development of the scrap aluminium recycling industry. In this study, recycled aluminium cans with an Fe content of 1.4 wt.% were taken as the research object. By adding Mn and Si, a coarse $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ phase was formed in the melt, and then, Fe removal was investigated via a sedimentation+filtration process. The results show that the best Fe removal effect is obtained by adding 2.98 wt.% Mn and 7.89 wt.% Si to the aluminium melt and then filtering after being kept at 630 ℃ for 15 min. The Fe removal rates by sedimentation and filtration can reach 64.5% and 68.8%, respectively. Microstructure analysis reveals that sedimentation removes a large amount of the dendritic $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ phase segregated at the bottom of the crucible, and filtration removes a small amount of the block-like $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ phase in the upper part of the melt. After the upper melt is filtered, a certain amount of the block-like $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ phase remains in the ceramic filter, whereas a small amount of the fishbone-shaped $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si$ phase is contained in the melt.

Key words: recycled aluminium cans; sedimentation+filtration; Fe-rich phase; iron removal rate

废铝回收再利用可极大地节约能源,减少碳含量排放[1-3],因此近年来我国开始大力发展再生铝产业[4-7]。然而,由于回收时分拣不清或重熔过程中与铁质器具接触等多种原因, 废铝再利用时往往会混入杂质 Fe 元素[8-10]。该元素在铝合金中固溶度低,过量时会形成粗大的硬脆富 Fe 相, 如汉字状 α-Fe

收稿日期:2024-06-17

基金项目:辽宁省应用基础研究计划(2023JH2/101300156)

作者简介:崔俊豪,1999 年生,硕士生.研究方向为再生铝合金除 Fe 工艺.Email:xcccnnnn@163.com

通讯作者:李 磊,1979 年生,教授.研究方向为铝合金材料制备及开发.Email:lilei@epm.neu.edu.cn

引用格式:崔俊豪,肖涌,王向杰,崔建忠,李磊.沉降加过滤去除回收铝罐料中 Fe 杂质工艺研究[J].铸造技术,2024,45(11):1093-1098.

CUI J H, XIAO Y, WANG X J, CUI J Z, LI L. Research on the process of sedimentation add filtration to remove Fe impurities from recycled aluminium cans[J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1093-1098.

中国知网 https://www.cnki.net

相、针状 β-Fe 相[11]。在合金受力时,这些相易成为裂纹源(尤其是针状 β-Fe 相,会严重割裂基体),大大降低了铝合金的综合力学性能[12-15]。因此,Fe 杂质的去除已成为再生铝领域的重点研究课题。

目前,国内外采用的除 Fe 方法主要包括电磁分离法[16]、离心法[16]、硼化法[16]、重力沉降法[16]等。Li 等[17]采用电磁分离法对 Al-Si 合金进行了除 Fe 实验,获得较高的除 Fe 率。但该方法受熔体中富 Fe 相形貌的影响,很难去除针片状富 Fe 相。Matsubara 等[18]采用离心法对 Al-Si 合金进行了除 Fe 实验,结果表明该方法可有效去除汉字状、块状富 Fe 相。但在实验过程中需施加巨大离心力使富铁相与熔体分析,操作时难度大、成本高,不能作为一种低成本、环保的除 Fe 方法。高建卫[19]采用硼化法对 Al-Si 合金进行了除 Fe 实验。向熔体中加入含硼化物的除 Fe 熔剂后,其与杂质 Fe 元素反应生成高熔点的 Fe_2B 相,随后通过扒渣去除。但硼化物在熔体中黏度较大,不易分散,因此除 Fe 效果较差。

除上述方法外,重力沉降法[16]也是一种十分重要的除 Fe 手段,其主要应用于压铸铝合金行业,过程主要为向熔体中添加 Mn、Cr 等元素形成高熔点、高密度的 Al(FeMn)Si、Al(FeMnCr)Si 中间相;保温静置后,大尺寸中间相在重力作用下克服黏滞阻力而沉降至铝熔体底部,上部熔体则实现回收再利用。但经该法处理后,上部熔体仍含有大量小尺寸富 Fe 相,这导致单纯的重力沉降法除 Fe 率受限。国外有学者在沉降法基础上做出改进[20]:将充分沉降后的上部熔体再经滤片过滤,从而进一步去除小尺寸富 Fe 相。实验结果表明,上部熔体的除 Fe 率有所增加。

迄今为止,再生铝除 Fe 的研究主要集中在Al-Si 系铸造铝合金上,而对应用更为广泛的变形铝合金除 Fe 鲜有报道。基于这一背景,本文以耗费量巨大的回收铝合金罐料为研究对象,拟通过添加Mn、Si 元素调控富 Fe 中间相的形成,进而研究沉降+过滤工艺对除 Fe 率和中间相形貌的影响,为变形铝合金的回收再利用提供数据支持和实践参考。

1 实验材料与方法

实验用材料主要包括回收铝合金罐料,其初始成分 Mn 0.73%、Si 0.26%、Fe 0.41%、Mg 1.26%、Cu 0.2%(如无特殊说明,本文涉及的成分均为质量分数)、铁剂、锰剂和速熔硅,Al 为余量。首先,利用铁剂将回收铝合金罐料熔配成 Fe 名义含量为 1.4%的合金。之后,将 1.0 kg 重新熔配的铝合金置于石墨坩埚中,并于电阻炉内升温至 750 ℃。待合金完全熔化后,添加不同量和配比的锰剂和速溶硅。熔体经搅拌后扒渣,然后冷却至设定温度。保温静置后,坩埚上部熔体通过 20 目陶瓷过滤片过滤(过滤温度即为保温温度),底部熔体保留在坩埚中。具体实验参数见表 1。

表 1 实验参数
Tab.1 Experimental parameters

Sample	Nominal contents of Fe, Mn and Si elements in the melt/wt.%			Holding (filtration) temperature/℃	Holding time/min
	Fe	Mn	Si		
1	1.4	1.5	8.0	630	15
2	1.4	2.0	8.0	630	15
3	1.4	3.0	8.0	630	15
4	1.4	2.0	10.0	615	15

用于成分和组织分析的样品共 20 个,具体取样方案如下:①添加锰剂和速溶硅后熔体取样(用于成分分析,样品数 4 个);②保温静置后上部熔体取样(用于成分分析和组织观察,样品数 4 个);③过滤后熔体取样(用于成分分析和组织观察,样品数 4 个);④坩埚底部熔体完全凝固后取样(用于组织观察,样品数 4 个);⑤陶瓷过滤片中渣滓取样(用于组织观察,样品数 4 个)。采用直读光谱仪(SPECTRO-MAX)检测样品中的 Fe、Mn、Si 元素含量。使用砂纸对样品进行研磨,并利用金刚石抛光膏以及二氧化硅抛光液对其进行精抛。之后,采用扫描电镜(APREO 2C)分析样品组织形貌。为了展示过滤效果,分别计算沉降后除 Fe 率 δ_{sed} 和过滤后除 Fe 率 δ_{fil}。

$$\delta_{sed}(\%)=\frac{C_{ori}-C_{sed}}{C_{on}}\times100\% \quad (1)$$

$$\delta_{fil}(\%)=\frac{C_{ori}-C_{fil}}{C_{on}}\times100\% \quad (2)$$

式中,C_{ori} 为添加锰剂和速溶硅后的熔体取样 Fe 含量;C_{sed} 为保温静置后上部熔体取样 Fe 含量;C_{fil} 为上部熔体过滤后取样 Fe 含量。

2 实验结果及讨论

2.1 除 Fe 效率

添加锰剂和速溶硅后合金 Fe、Mn、Si 含量及除 Fe 率如表 2 所示。为了更直观地观察除 Fe 率的变化,图 1 给出了不同样品的 δ_{sed} 和 δ_{fil} 的柱状图。对比样品 1 与 3 可知,在过滤温度和 Si 添加量保持不变时,随 Mn 添加量从 1.51%增加至 2.98%,δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别从 46.8%、51.8%上升至 64.5%、68.8%。对比样品 2 与 4 可知,在 Mn 添加量保持不变时,随 Si 添加量从 7.97%增加至 9.77%,δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别从 59.7%、60.4%上升至 64.6%、67.4%。这些结果表明,添加

中国知网 https://www.cnki.net

表 2 不同 Mn、Si 添加量样品除 Fe 率

Tab.2 Fe removal rates of samples with different amounts of added Mn and Si

Sample	Actual contents of Fe, Mn and Si elements in the melt/wt.%			C_{sed}/wt.%	δ_{sed}/%	C_{fil}/wt.%	δ_{fil}/%
	Fe	Mn	Si				
1	1.41	1.51	7.98	0.75	46.8	0.68	51.8
2	1.34	2.15	7.97	0.54	59.7	0.53	60.4
3	1.38	2.98	7.89	0.49	64.5	0.43	68.9
4	1.44	2.12	9.77	0.51	64.6	0.47	67.4

Mn、Si 元素后经沉降可有效去除 Fe 杂质，同时过滤可在一定程度上进一步提高除 Fe 率。

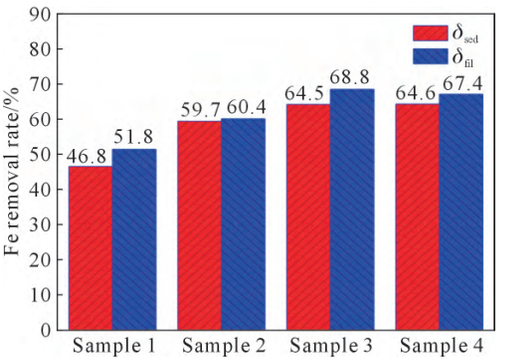

图 1 不同 Mn、Si 添加量样品除 Fe 率

Fig.1 Fe removal rates after adding different amounts of Mn and Si

2.2 微观组织

为明晰沉降过滤法对合金微观组织的影响，以 3 号样品为例，分别对沉降后坩埚底部样品、上部熔体凝固样品、过滤片处样品及过滤后熔体凝固样品的组织进行了表征和分析。图 2 为经沉降后坩埚底部样品的 SEM 形貌图。图 2b 为对应形貌图的 EDS 面扫描图。在图中可看到尺寸约为 200 μm 的枝晶状中间相，该相面积分数为 72%。对其进行 EDS 能谱分析后发现，该相为 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$(见图 2a 中插入的表格)。

为显示沉降效果，图 3a 给出了上部熔体凝固后的 SEM 图。与熔体底部的枝晶状中间相不同，该处中间相呈规则的块状，且尺寸仅约 20 μm。图 3b 为对应形貌图的 EDS 面扫描图，可以发现这些块状相也是富 Fe 相，该相面积分数为 14%。表明沉降后熔体中富 Fe 相数量大大减少。对其进行 EDS 能谱分

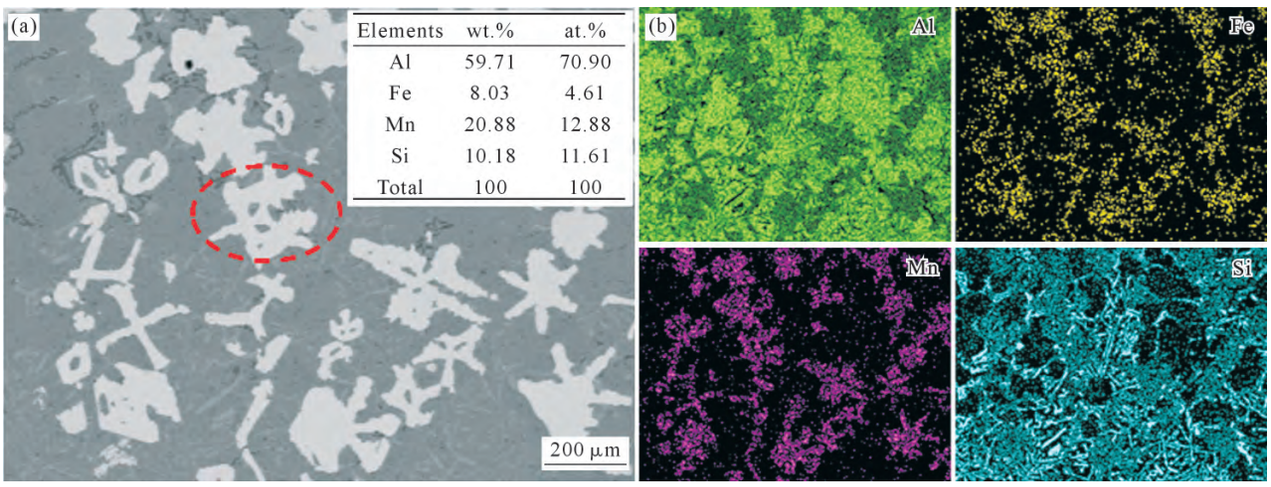

图 2 沉降后坩埚底部样品的 SEM 图：(a) SEM；(b) EDS 面扫描

Fig.2 SEM images at the bottom of the crucible after sedimentation: (a) SEM image; (b) EDS surface scanning

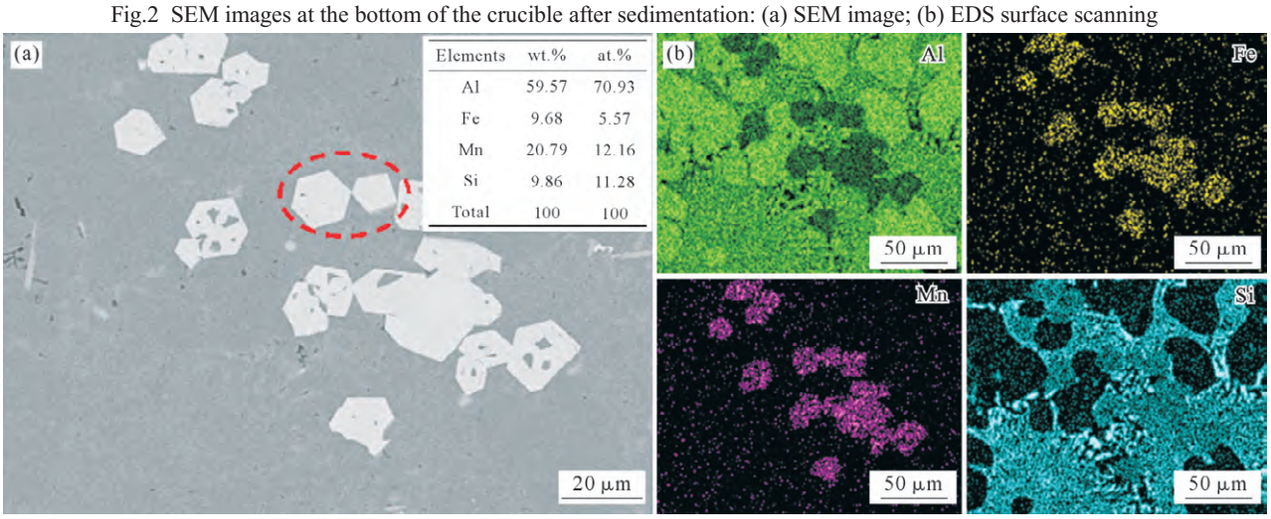

图 3 沉降后上部熔体凝固组织：(a) SEM；(b) EDS 面扫描

Fig.3 Solidification structure of the upper melt after sedimentation: (a) SEM image; (b) EDS surface scanning

中国知网 https://www.cnki.net

析后发现,该相与上述沉降后的枝晶状中间相成分一致,仍为 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$(见图 3a 中插入的表格)。

图 4 给出了陶瓷过滤片处的形貌图。由图可知,过滤片孔洞内镶嵌着大量 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相(如箭头所示),表明过滤片可对上部熔体的块状相起到有效阻拦作用。

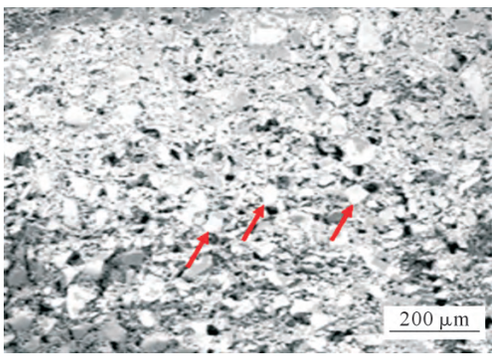

图 4 陶瓷过滤片的 SEM 图

Fig.4 SEM image of the ceramic filter

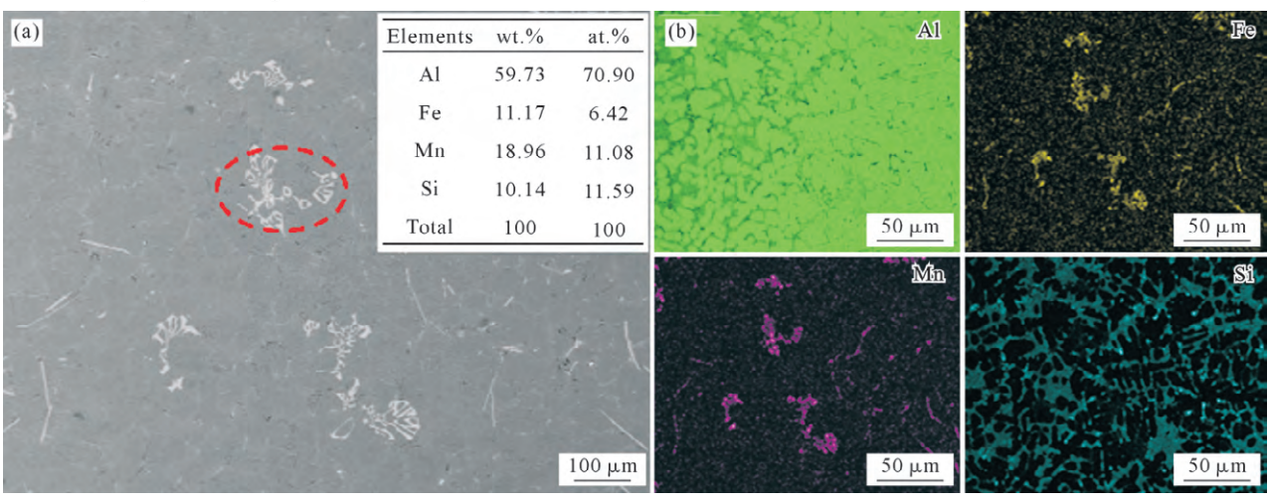

图 5 上部熔体过滤后的凝固组织:(a) SEM;(b) EDS 面扫描

Fig.5 Solidification structure of the upper melt after filtration: (a) SEM image; (b) EDS surface scanning

此,经沉降后上部熔体的 Fe 含量显著下降。随 Mn 或 Si 元素含量的增加,形成的 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相数量和尺寸均会增加,因此其沉降量也会提升,从而导致除 Fe 率不断升高(图 1)。

中间相的沉降速度实际上与其自身尺寸密切相关:假设该相为球状颗粒,其沉降速度 V 可由斯托克斯公式表示为[21]

$$V=2r^2(\rho_1-\rho_2)/9\eta \quad (3)$$

式中,r 为颗粒半径;ρ_1 和 ρ_2 分别为颗粒和熔体密度;η 为流体黏度。由式(3)可知,颗粒尺寸越大,沉降速度越快;反之,颗粒尺寸越小,沉降速度越慢。在熔体冷却过程中,后续形核的中间相受生长时间和周围 Fe、Mn 和 Si 元素含量减少的限制, 很难长成大尺寸相。同时,熔体黏度也会随温度的下降而增加。受这两个因素的影响,在上部熔体中保留了一定数量的块状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相(图 3a)。

图 5a 为上部熔体经过滤后的凝固组织 SEM 图。与过滤前上部熔体的块状中间相不同,过滤后的中间相呈鱼骨状,其尺寸约为 100 μm。图 5b 为对应形貌的 EDS 面扫图,可以发现这些鱼骨状的相也是富 Fe 相,该相面积分数仅为 3.4%,表明过滤后熔体中富 Fe 相显著减少。对其进行 EDS 能谱分析后发现,该相仍为 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$(见图 5a 插入的表格)。总体来看,$Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相的数量相较于过滤前有所减少。

2.3 讨论

添加 Mn、Si 元素后,随温度的降低熔体中开始结晶出 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 中间相。随 Fe、Mn 元素的不断消耗, 该中间相逐渐长大为大尺寸枝晶状富 Fe 相。由于该相的密度大于熔体,它们会克服黏滞阻力而逐渐下沉。在随后的静置过程中,该相下沉至熔体底部,形成图 2 所示的 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相富集区。因

上部熔体在过滤时,熔体携带 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相在过滤片孔道内做变速运动。由于该相的密度和速度与熔体不同,在重力作用下会发生沉积。此外,不规则的形貌且不均匀的切变力场作用还会使之产生横向移动,从而被孔道壁卡住或吸附[22]。受这两个因素的影响,小尺寸的 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相被阻拦在过滤片内,从而使 Fe 元素含量进一步降低,而除 Fe 率进一步提高。

3 结论

(1)添加 Mn、Si 元素后经沉降可有效去除 Fe 杂质,同时过滤可在一定程度上进一步提高除 Fe 率。在过滤温度和 Si 元素含量保持不变,Mn 元素添加量为 1.51%时,δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别为 46.8%、51.8%;Mn 元素添加量上升至 2.98%时,δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别上升至 64.5%、68.8%。在 Mn 元素添加量保持不变,Si元素

中国知网 https://www.cnki.net

添加量为 7.97%时，δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别为 59.7%、60.4%；Si 元素添加量上升至 9.77%时，δ_{sed} 和 δ_{fil} 分别上升至 64.6%、67.4%。

(2)经沉降+过滤后，中间相的成分保持不变，但其形貌和尺寸会发生变化。坩埚底部熔体凝固组织中 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相呈枝晶状，尺寸约 200 μm。上部熔体凝固组织中 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相呈块状，尺寸仅约 20 μm。过滤后熔体凝固组织中 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相呈鱼骨状，尺寸约 100 μm。熔体中的大尺寸枝晶状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相可通过沉降去除，上部熔体中小尺寸的块状 $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ 相可通过过滤去除。

参考文献：

[1] 邓宇芹，夏明许. 金属材料可持续发展实施策略——以铝合金为例[J]. 铸造技术，2024, 45(3): 259-269.
DENG Y Q, XIA M X. Strategy for the sustainable development of metal materials—Taking aluminum alloys as an example [J]. Foundry Technology, 2024, 45(3): 259-269.

[2] 郭学益，田庆华，刘咏，闫红杰，李栋，王亲猛，张佳峰. 有色金属资源循环研究应用进展[J]. 中国有色金属学报，2019, 29(9): 1859-1901.
GUO X Y, TIAN Q H, LIU Y, YAN H J, LI D, WANG Q M, ZHANG J F. Progress in research and application of non-ferrous metal resources recycling [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1859-1901.

[3] 丁宁，高峰，王志宏，龚先政. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. 中国有色金属学报，2012, 22(10): 2908-2915.
DING N, GAO F, WANG Z H, GONG X Z. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2908-2915.

[4] 陈祺，曹侠. 发展我国再生铝行业有关问题探析[J]. 世界有色金属，2002(4): 14-17.
CHEN Q, CAO X. An approach to some problems relating to development of secondary aluminum industry in China [J]. World Nonferrous Metals, 2002(4): 14-17.

[5] 刘艳飞，李颖，林子芃，刘仟策，韩中奎.中国铝物质流历史变化分析和再生铝资源利用研究[J]. 地球学报，2023, 44(2): 333-340.
LIU Y F, LI Y, LIN Z P, LIU Q C, HAN Z K. Analysis of the historical changes in aluminum material flow and the utilization of secondary aluminum resources in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(2): 333-340.

[6] 秦琦，卢晴晴，滕雪纯，陈肖依，房大然. 我国再生铝产业现状[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(3): 8-11.
QIN Q, LU Q Q, TENG X C, CHEN X Y, FANG D R. Current status of the secondary aluminum industry in China[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2019, 47(3): 8-11.

[7] 姜玉敬. 我国再生铝行业发展存在的问题及发展趋势[J]. 世界有色金属，2017(8): 72-73.
JIANG Y J. Problems and development trend of the development of recycled aluminum industry in China [J]. World Nonferrous Metals, 2017(8): 72-73.

[8] 高安江，王刚，曲信磊，刘璐. 废铝再生预处理过程中的杂质分离和分类分选技术研究[J]. 再生资源与循环经济，2015, 8(2): 33-36.
GAO A J, WANG G, QU X L, LIU L. The research on impurities separating and sorting technology in the pretreatment process of the aluminum scrap recycling[J]. Recyclable Resources and Circular Economy, 2015, 8(2): 33-36.

[9] 何学峰，刘波，张深根. 再生铝合金中含 Fe 杂质的控制技术现状[J]. 化工进展，2021, 40(10): 5251-5269.
HE X F, LIU B, ZHANG S G. Current status of control technology of Fe impurity in recycled aluminum alloy[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(10): 5251-5269.

[10] 陈学文，邝治全，王顺成，董晓琼，杨镇江. 废铝的预处理与熔炼再生技术研究[J]. 中国资源综合利用，2023, 41(12): 144-146, 150.
CHEN X W, KUANG Z Q, WANG S C, DONG X Q, YANG Z J. Study on pretreatment and melting regeneration technology of waste aluminum [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2023, 41(12): 144-146, 150.

[11] TAYLOR J A. Iron-containing intermetallic phase in Al-Si casting alloys[J]. Procedia Materials Science, 2012, 1: 19-33.

[12] BELMARES-PERALES S, ZALDÍVAR-CADENA A A. Addition of iron for the removal of the β-AlFeSi intermetallic by refining of α-AlFeSi phase in an Al-7.5Si-3.6Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: B, 2010, 174(1-3): 191-195.

[13] 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.
YU M X. Modulation of iron phase morphology of ADC12 secondary aluminium alloy [D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.

[14] XU Z, ZHANG X Y, WANG H B, GAO A N, MA T Y, SONG H. Effect of Mn/Fe ratio on the microstructure and properties of 6061 sheets obtained by twin-roll cast [J]. Materials Characterization, 2020, 168: 110536.

[15] CHANYATHUNYAROJ K, PATAKHAM U, KOU S, LIMMANEEVICHITR C. Mechanical properties of squeeze-cast Al-7Si-0.3Mg alloys with Sc-modified Fe-rich intermetallic compounds[J]. Rare Metals, 2018, 37: 769-777.

[16] 葛维燕，疏达，孙宝德. 再生铝合金除铁述评[J]. 资源再生，2009(3): 40-41.
GE W Y, SHU D, SUN B D. Review on iron removal from secondary aluminum alloy[J]. Resource Recycling, 2009(3): 40-41.

[17] LI T X, XU Z M, SUN B D, SHU D, ZHOU Y H. Electromagnetic separation of primary iron-rich phases from aluminum-silicon melt [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(1): 121-125.

[18] MATSUBARA H, IZAWA N, NAKANISHI M. Macroscopic segregation in Al-11 mass%Si alloy containing 2 mass%Fe solidified under centrifugal force [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1998, 48(2): 93-97.

[19] 高建卫. 硼化物对铝熔体中杂质铁的净化作用及机理[D]. 上海：上海交通大学，2010.
GAO J W. Effect and mechanism of iron removal from aluminum melt by boron compounds[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong Uni-

中国知网 https://www.cnki.net

versity, 2010.

[20] DE MORAES H L, DE OLIVEIRA J R, ESPINOSA D C R, TENÓRIO J A S. Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration[J]. Materials Transactions, 2006, 47(7): 1731-1736.

[21] 周清晓.浅谈斯托克斯定律的应用[J]. 教育现代化,2019, 6(68): 230-232.
ZHOU Q X. The application of Stokes law[J]. Education Modernization, 2019, 6(68): 230-232.

[22] 柯东杰,王祝堂. 当代铝熔体处理技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2010.
KE D J, WANG Z T. Contemporary aluminium melt treatment technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

中国知网 https://www.cnki.net