

再生铝合金组织性能调控研究进展

蔡会生¹ 李纪元¹ 杨思琪¹ 王渠东² 康 裕¹ 刘 亮¹ 苏 娟¹ 郭 锋¹

(1. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古自治区新材料与表面工程重点实验室, 呼和浩特 010051; 2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240)

摘 要 再生铝合金在我国铝工业占比越来越大, 由于废铝来源复杂, 再生铝合金的微观组织和力学性能较难得到良好的控制。而再生铝合金的微观组织和力学性能, 直接影响再生铝合金的应用。为此, 系统总结和分析了近年来再生铝合金微观组织和力学性能的研究现状, 重点介绍了其发展现状, 制备过程热裂行为的影响因素和应对措施, 除铁技术, 熔炼工艺、合金化处理以及热处理工艺对再生铝合金微观组织和力学性能的影响规律等。并对如何高效改善再生铝合金微观组织和力学性能的方法和途径进行了展望。

关键词 再生铝合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A **DOI**: 10.15980/j.tzzz.T20250120

Regulation of Microstructure and Properties of Recycled Aluminum Alloy: A Review

CAI Huisheng¹, LI Jiyuan¹, YANG Siqi¹, WANG Qudong², KANG Yu¹, LIU Liang¹, SU Juan¹, GUO Feng¹

(1. Key Laboratory of New Materials and Surface Engineering in Inner Mongolia Autonomous Region, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051; 2. National Engineering Research Center for Precision Forming of Light Alloys, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The proportion of recycled aluminum alloy in aluminum industry is increasing, and the microstructure and mechanical properties are difficult to be controlled due to the complex source of scrap aluminum, which directly affects the application of recycled aluminum alloy. Therefore, the research status of microstructure and mechanical properties of recycled aluminum alloy in recent years were systematically summarized and analyzed. The development status, affecting factors and countermeasures of hot tearing behavior during the preparation process, iron-removal technology, influence laws of melting process, alloying treatment, and heat treatment process on microstructure and mechanical properties of recycled aluminum alloy were emphasized. Meanwhile, the approaches to effectively improve the microstructure and mechanical properties of recycled aluminum alloy were prospected.

Key Words: Recycled Aluminum Alloy, Microstructure, Mechanical Property

铝合金是国民经济行业中应用最广泛的轻质结构材料之一, 其具有低密度(2.63~2.85 g/cm³), 较高的比强度和比刚度, 良好的铸造性能和塑性加工性能, 优异的导电、导热性能, 良好的耐蚀性和可焊性, 在航空、航天、交通运输、建筑和日用品等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。

铝合金的来源主要包括原铝和再生铝, 原铝是指以铝土矿为原料, 将氧化铝通过电解的形式生成电解铝, 之后可以铸造成纯铝锭, 也可以添加合金元素制造成不同牌号的铝合金产品。再生铝是指以回收铝为主

要原料, 经过一系列再加工生产提炼而得到的铝合金产品。再生铝合金的生产主要通过对回收的废铝进行预处理、熔炼、合金化处理等工艺制备成铝合金锭。由于废铝的来源复杂, 废铝中往往存在多种杂质元素, 因而再生铝合金的成分较复杂。目前, 再生铝合金面临着诸多问题, 如在铸造过程中容易发生热裂; 再生铝合金的复杂成分会影响合金的晶粒尺寸、合金中化合物的含量形貌尺寸分布以及凝固行为, 这些因素直接影响合金的热裂行为, 进而影响再生铝合金产品的质量。再生铝合金通过熔体净化处理及除气等工艺, 可以显

收稿日期: 2025-03-17; 修订日期: 2025-05-07

基金项目: 科技兴蒙上海交通大学行动计划专项项目(2023XYJG0001-01-04); 内蒙古自然科学基金项目(2024MS05009); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(JY20250091); 一流学科科研专项项目(YLXKZX-NGD-002)

第一作者: 蔡会生, 男, 1988年出生, 高级实验师, E-mail: caihuisheng@imut.edu.cn

引用格式: 蔡会生, 李纪元, 杨思琪, 等. 再生铝合金组织性能调控研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 541-551.

CAI H S, LI J Y, YANG S Q, et al. Regulation of microstructure and properties of recycled aluminum alloy: A review[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 541-551.

著减少铸锭微观组织中夹杂、气孔等缺陷,有利于提高再生铝合金的性能。同时,再生铝合金中危害最大的杂质元素为Fe,在制备前需要对废铝进行预处理,去除废铝中的含铁杂质,之后再通过稀释、重力沉降、离心去除、电磁分离等方法进一步去除合金熔体中的杂质Fe的含量^[2-3]。经过上述处理,可有效降低再生铝合金中杂质Fe的含量,但是还会存在少量的Fe以富Fe相的形式存在于再生铝合金中,较大尺寸的富Fe相会对铝基体起到严重的割裂作用,恶合金的强度和塑性^[4-6],直接影响再生铝合金产品的合格率。

目前,对再生铝合金进行合金成分调控,抑制富Fe相的形成,优化富Fe相的形貌尺寸分布,已经进行了大量的研究工作,并取得了较好的效果。研究发现^[6],通过合金化的方式向再生铝合金中添加适宜的合金化元素,可以有效细化变质再生铝合金中的富Fe相、初生Si、共晶Si等较大尺寸的脆性第二相,改善再生铝合金的组织均匀性,进而提高再生铝合金的力学性能和耐腐蚀性能。此外,对再生铝合金进行适宜的热处理,也可以有效改善再生铝合金的微观组织和力学性能。基于此,本研究对近年来再生铝合金组织性能调控的现状进行归纳总结,主要对再生铝合金的发展现状,再生铝合金热裂行为及影响和控制因素,再生铝合金除铁技术,再生铝合金熔炼工艺、熔体净化、添加合金元素进行合金化、热处理工艺对再生铝合金的组织性能的影响等内容进行系统性的总结和分析,并对如何高效优化再生铝合金的组织、性能的方法和途径进行展望。

1 再生铝合金发展现状

再生铝合金主要通过对回收的废铝进行分类预处理,之后通过重新熔化和合金成分的调整制备得到再生铝合金。废铝的主要来源是新废铝和旧废铝,新废铝主要是指铝材加工厂生产过程中产生的废屑和切料等工艺废料、铝合金铸造生产过程中产生的冒口等铸造废料,以及性能不合格的铸件等。新废铝的来源比较明确,成分可控制度较高,由其经过重熔制备的再生铝合金性能较好。旧废铝主要是指从社会上回收的废铝产品,比如废旧的铝合金门窗、铝合金生活用品、报废的汽车零部件等。旧废铝来源比较复杂,制备再生铝合金过程中需要对其进行严格的预处理,其成分也需要经过严格的调整。

铝在空气中容易与氧气发生化学反应形成氧化膜,能够对铝合金起到保护作用,并且铝合金的耐腐蚀性较强,因此铝回收过程的损失较少,一般情况下废铝的回收率可达到95%以上。同时,再生铝生产过程中

的能耗仅为原铝生产过程中能耗的3%~5%,引起的温室效应也仅为原铝生产的4%左右。在“双碳”政策以及节能减排等政策实施,以及资源日益紧张背景下,再生铝合金产业得到了迅猛的发展。随着汽车行业电动化转型以及轻量化的快速发展,汽车用铝合金板材是所有铝加工行业中需求增速最高的下游领域。根据《节能与新能源汽车发展路线图》,我国未来单车用铝量将不断提高,预计2025年单车用铝量达250 kg,2030年单车用铝量达350 kg。因此,再生铝合金在国民经济行业中具有大量的应用市场需求。

近年来我国的原铝产量和再生铝产量持续增加,同时我国也是铝消费大国。据统计2023年我国原铝产量和再生铝产量分别为4 166万吨和950万吨,较上年分别增长3.3%、9.8%;2023年我国原铝和再生铝消费量分别为4 284万吨和989万吨,增幅分别为4.3%和8.7%。目前我国的再生铝产量已达到我国铝产量的20%左右,并且我国的再生铝产能也在持续上升,在未来的一段时间内,我国的再生铝产量会稳步增加,再生铝也将成为我国铝产能的重要组成部分。

2 再生铝合金的热裂行为

再生铝合金在熔炼制备过程中容易产生热裂缺陷,直接影响铸锭的质量和产品的合格率。研究发现,再生铝合金中的合金元素会对合金的微观组织以及凝固参数产生影响,进而影响合金的热裂行为,针对合金热裂的研究前后出现了液膜理论^[7]、强度理论、晶间搭桥理论^[8]和凝固收缩补偿理论^[9]等。对于6061铝合金,合理控制合金中的Mg元素含量可以有效降低合金的热裂倾向。CLYNE T W等^[10-11]将固相分数 f_s 在90%~99%所对应的区域称为合金的脆性区域,脆性区域越大合金的热裂敏感性越大。增加合金中的Mg含量可以缩短合金凝固温度区间(即脆性区域),当Mg含量由0.9%增加到1.7%时,合金凝固温度区间由71℃降低到36℃,凝固温度区间的收缩会降低合金的热裂敏感性^[12]。同时,合金凝固末期的共晶反应也是影响合金热裂敏感性的重要因素,合金凝固末期的共晶反应较快,由液相快速转变为固相的过程中会产生较大的收缩,而当合金中Mg含量较低时,即共晶产物 Mg_2Si 的含量较低时,共晶反应引起的收缩量较小,可由已凝固的晶粒发生少量的应变来补偿共晶反应引起的收缩。但是当合金中Mg含量较高时,即共晶产物 Mg_2Si 的含量较高,共晶反应引起的收缩应力会增加,当收缩量超过已凝固晶粒可产生的最大应变时,脆性的共晶产物 Mg_2Si 会发生破裂,并且会使裂纹沿晶界扩

展,增加合金的热裂敏感性。因而6061再生铝合金的热裂敏感性受到凝固温度区间和共晶反应收缩的共同影响。增加合金中的Mg含量会使合金中的 Mg_2Si 含量增加,在凝固末期易脆温度区间变小和共晶反应收缩的共同作用下,热裂倾向先降低后增加,当Mg含量达到1.2%时合金的热裂倾向最小,并具有较好的力学性能^[13]。合金凝固末期共晶反应对热裂的影响示意图,见图1。

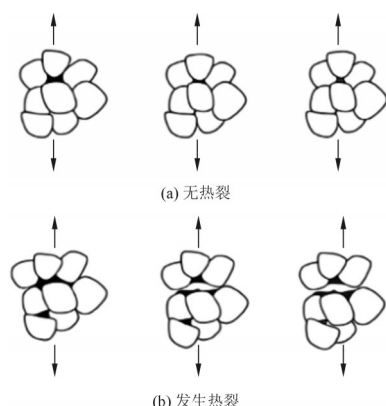


图1 凝固末期共晶反应对热裂的影响示意图^[13]

Fig.1 Influence of eutectic reaction on hot cracking at the end of solidification^[13]

对于6061再生铝合金,不可避免还可能存在Fe、Cu等合金元素,Fe含量增加会在合金中形成 $Al_{13}Fe_4$ 、 $AlFeSi$ 等富Fe相,随着Fe含量的增加, $Al_{13}Fe_4$ 和 $AlFeSi$ 富Fe相的形核温度逐渐提高,含量逐渐增加,将促进凝固过程中枝晶的形成,阻碍液相流动补缩,从而增加合金的热裂倾向。过多的Cu元素会在合金凝固后期形成 $Al_5Cu_2Mg_8Si_6$ 等低熔点的富铜杂质相,将会显著降低凝固区间的温度下限,增加凝固温度区间,使固相附近糊状区的强度降低,容易在应力作用下产生裂纹,从而增加合金的热裂倾向。富Fe相主要形成于合金的凝固前期,富Cu相主要形成于合金的凝固后期,因而Fe元素对合金热裂行为的影响主要发生在合金凝固前期,而Cu元素对合金热裂行为的影响主要发生在合金凝固后期^[14-15]。7075铝合金中添加Al-5Ti-B,可以细化合金的晶粒,使组织变得更均匀,从而降低合金的热裂敏感性^[16]。通过向再生铝合金中添加Al-5Ti-0.3B-0.2C/Al-10Sr复合细化变质剂,也有利于提升合金的抗热裂性能。

铸造温度过高、铸造速度过快、冷却强度过大或冷却强度不均匀、铸件结构设计不合理等会增加7A06铝合金的热裂倾向^[17]。半连续铸造生成AA5182铝合金通过对浇注温度和拉坯速度的调整,也可以有效降低合金的热裂敏感性^[18]。Al-Cu-Zr合金随着Cu含量的增加,可以改善微观组织,提高液相的补缩能力,降低

合金的热裂敏感性。此外,稀土元素同样可以达到缩短补缩通道,提高补缩能力的目的,进而降低合金的热裂倾向^[19]。对于低硅Al-Si合金,随着Si含量的增加,合金流动性随之增强,补缩能力增加,合金的热裂倾向也会降低^[20]。

再生铝合金在铸造凝固后期,已凝固固相之间相互桥接时,存在一个脆性温度区间,此时合金的脆性较大,当应力超过临界应力时,就会导致裂纹的萌生。因此,合金在凝固过程中的脆性温度区间越大,则合金的热裂倾向越大^[21]。因此,在再生铝合金制备过程中,通过对铸造工艺参数、合金成分、铸件结构等因素进行优化,可以显著降低再生铝合金的热裂倾向。

3 再生铝合金除铁技术

再生铝合金生产过程中的废铝来源复杂,废铝中可能存在其他金属、非金属、油污和涂层等多种杂质,其中杂质Fe对再生铝合金的组织性能影响最大,Fe含量过高会在再生铝合金中形成 α -Fe、 β -Fe、 δ -Fe和 π -Fe等富铁金属间化合物,这些富Fe相的形成会严重割裂铝基体,引起合金力学性能、耐腐蚀性能等性能的恶化。再生铝合金由于其循环特性,废铝中会不断混入Fe杂质,使Fe杂质不断在废铝中富集。如何高效去除废铝中的Fe杂质对提高再生铝合金的组织性能至关重要。因此,开发高效除铁技术对废铝循环利用和再生铝产业的快速发展具有重要的意义。目前,Fe杂质在废铝中的去除技术主要包括稀释法、重力沉降法、离心去除法、电磁分离法、过滤法和熔剂去除法等。

3.1 稀释法

对于Fe含量较高的再生铝,加入纯铝或Fe含量较低的铝锭,通过增加铝在再生铝中的含量,可以降低Fe在再生铝合金中的含量。这虽然也可以达到降低再生铝合金中的Fe含量,但是需要添加新铝,成本较高,未能充分发挥再生铝的优势和特点,目前应用受限^[22]。

3.2 重力沉降法

重力沉降法是再生铝合金除铁方法中最简单的分离富Fe相的方法,其利用富Fe相的密度比铝熔体中其他化合物的密度大这一特点,将铝熔体在液相线温度以上某一温度下保温静置一段时间,使密度大的富Fe相在重力作用下沉降到熔体底部,从而实现上层铝液的净化作用,降低铁在铝液中的含量。UNUVAR C等^[23]提出铝合金重力沉降除铁与熔体中的固相分数密切相关,沉降一般发生在固相分数在20%~60%之间的熔体中,固相分数较高时会显著抑制沉降作用,且沉

降符合斯托克定律。重力沉降法充分利用了化合物的密度偏析,对于密度较大的富Fe相可以起到较好的去除作用,但是对于密度相对较小的 β -Fe,沉降效率较差,往往需要向熔体中添加Mn、Cr、Co等重金属元素与铁形成密度更大的富Fe相,才能提高铁的去除效率^[24]。SONG D F等^[25]研究发现,Al-7Si-2.4Fe合金中添加Mn元素,会促进初生富Fe相的形成和沉降,有效降低合金熔体中的Fe含量,当Mn、Fe质量比为0.7时,合金熔体中的除铁率可以达到70%,并且Mn元素的添加可以改善富Fe相的形貌。DHINAKAR A等^[26]研究发现,向A356再生铝合金中添加Mn和Cr将会在合金中形成含Mn和Cr的富Fe相,当添加1%的Mn和1%的Cr后,可以去除A356再生铝合金中73.8%的铁。ASHTARI P等^[27]也发现,向Al-Si合金中添加Mn元素也可以有效去除合金中的Fe。因此重力沉降法可以通过在一定温度下保温静置一定时间去除密度较大的富Fe相,实现降低合金中Fe含量的作用。该方法的除铁效果与富Fe相的密度密切相关,对于密度较小的富Fe相去除效果较差,虽然可以向再生铝熔体中添加重金属元素,如Mn和Cr等,以增加富Fe相的密度,提升除铁效率,但是既增加了成本,又容易引入其他杂质元素,并且单纯靠富Fe相的重力作用沉降,除铁效率较低。

3.3 离心去除法

为了提高重力沉降法对铝合金熔体的除铁效率,开发了同样利用密度差异,实现除铁作用的离心去除法,通过离心力的作用,使密度更大的固相被分离到离心机边缘,从而实现富Fe相与熔体之间的分离,达到除铁的目的。根据Stokes定律^[28],离心除铁的过程富Fe相的分离速度满足如下公式:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{D^2}{18\eta r} (\rho_s v_{\theta,s}^2 - \rho_l v_{\theta,l}^2) \quad (1)$$

式中, D 为富Fe相的直径; r 为径向坐标; η 为铝熔体的黏度; ρ_s 和 ρ_l 分别为富Fe相和铝熔体的密度; $v_{\theta,s}$ 和 $v_{\theta,l}$ 分别为富Fe相和铝熔体的切线速度,在离心力的作用下 $v_{\theta,s}=v_{\theta,l}$,因此富Fe相的分离速度取决于富Fe相和铝熔体之间的相对密度,密度越大,富Fe相的分离速度越大。离心法除铁技术可以通过改变转速,提高除铁的效率,因而该方法的除铁效率高于重力沉降法的。研究发现,通过离心除铁方法可以使铝合金中的Fe含量从2%左右降低到0.3%以下^[22]。ZHAO L X等^[29]研究发现,在超重力的作用下Fe和Si会以富Fe相的形式在超重力场方向的底部聚集。KIM S W等^[30]设计了一种立式离心机(见图2),发现在40 g的离心力作用

下,可以有效去除Al-12Si-1.7Fe合金中的铁,除铁率可达67%,Al-12Si-3.4Fe合金的除铁率可达82%。此外,KRÄUTLEIN C等^[31]提出了一种浸没式离心除铁技术,也可以有效去除铝合金中的铁。但是离心除铁工艺不能实现连续处理,操作不便,且容易造成浪费,在实际应用过程中还需要进一步改进^[32]。

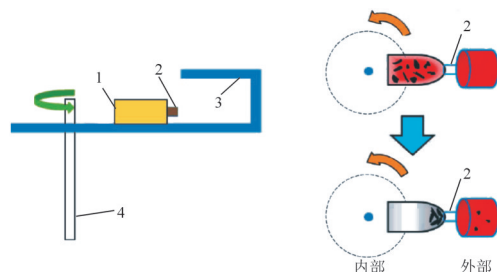


图2 离心分离器^[30]

Fig.2 Centrifugal separator^[30]

1.坩埚 2.斜槽 3.收集器 4.旋转轴

3.4 电磁分离法

铁具有磁性而铝不具有磁性,因此研究人员开发了一种新型的除铁技术,即电磁分离除铁方法。铝熔体施加一定的电磁场后,熔体中先形成的富Fe相会受到电磁力的作用与铝熔体之间发生定向移动,从而可以实现富Fe相的分离与去除。图3为Al-Si合金中富Fe相在电磁场作用下的受力和迁移行为示意图^[33]。

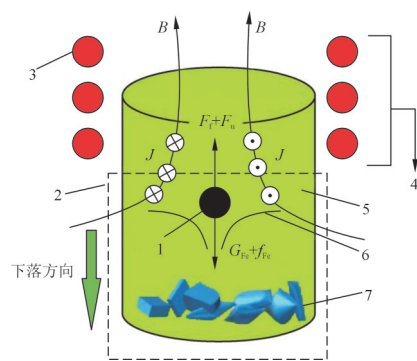


图3 Al-Si合金中富Fe相在电磁场作用下的受力和迁移行为示意图^[33]

Fig.3 Schematic diagram of force and migration behavior of Fe-rich phase in Al-Si alloy under action of electromagnetic field^[33]

1.富铁颗粒 2.低温区 3.铜线圈 4.高温区 5.Al-Si熔体
6.电磁搅拌 7.金属间化合物

电磁分离除铁技术往往与除铁剂联合使用,以期达到更好的除铁效果。电磁分离技术与Mn除铁剂复合使用时,当Mn、Fe的摩尔比1.5时,富Fe相的形貌会得到较好的改善,并且除铁率可达90%^[34]。赵世民等^[35]研究了交变电磁场和除铁剂Mn复合使用时对Al-Si合金的除铁效率,Mn与富Fe相会形成化合物在电磁力作用下富集在Al-Si合金底部,当Mn、Fe的摩尔

比为1.2时,除铁率可达91.8%。同时,研究发现在适宜的Mn添加量、下落速度、电流强度的作用下,Mn元素的添加可以优化富Fe相的形貌,综合除铁率可达到90%左右^[36]。XU Z M等^[37]研究发现,通过电磁过滤,可以有效去除Al-Si合金中的富Fe相,当熔体处于水平流动时,可将Al-Si合金中的Fe含量从1.2%降低到0.41%。

电磁分离法去除合金中的Fe是一种新型环保的除铁技术,但是为了提高除铁效率需要添加适宜的除铁剂,这无疑又引入了新的杂质,同时电磁除铁设备较昂贵,对大量铝合金熔体进行除铁时效果较差,只适用于少量铝合金熔体的除铁,因此也限制了其在工业领域的推广和应用。

3.5 过滤法

过滤法除铁是将较大尺寸的富Fe相通过多孔过滤器从合金熔体中过滤出来,从而达到除铁效果的一种除铁技术。除铁效率直接取决于富Fe相的尺寸和多孔过滤器的孔径,富Fe相的尺寸越小,多孔过滤器的孔径越大,则过滤法除铁效果越差,反之则可以达到较好的除铁效果。目前常用的多孔过滤器为 Al_2O_3 和SiC基泡沫陶瓷过滤器^[38],见图4。为了提高过滤法的除铁效率,过滤法往往也和除铁剂配合使用,除铁剂的添加可以使富Fe相长大,从而使过滤除铁效率增加。当通过过滤法去除铝合金熔体中的铁时,向熔体中添加Mn、Cr、Ni和Zr等除铁剂,熔体中将会形成较大尺寸的多元富Fe相,多元富Fe相沉降后可以达到除铁作用,之后再通过泡沫陶瓷过滤器过滤可以进一步分离熔体中的铁,从而达到较好的除铁效率^[39]。Al-Si-Cu系合金中除铁时,添加Cr,可使 Al_5FeSi 转变为 $\text{Al}_3(\text{Fe},\text{Cr})_4\text{Si}_4\text{Cu}$ 块状富Fe相,富Fe相在沉降过程中通过陶瓷泡沫过滤器过滤可以达到较好的除铁效果^[40]。DE MORAES H L等^[41]研究发现通过过滤法去除AA308和AA356合金中铁时,在605℃下,添加足量的Mn,过滤器尺寸为20 ppi时,除铁率可达82%。

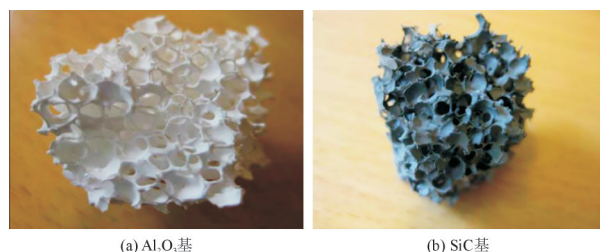


图4 Al_2O_3 和SiC基泡沫陶瓷过滤器^[38]

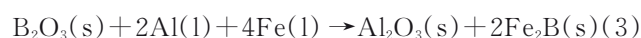
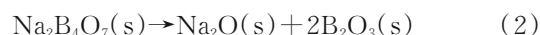
Fig.4 Al_2O_3 - and SiC-based ceramic foam filter^[38]

过滤法除铁也是一种绿色环保的除铁技术,但是除铁效率与富Fe相的尺寸密切相关,引入除铁剂,增加富Fe相的尺寸,除铁效果会显著增加,但易引入新的杂

质。此外,泡沫多孔过滤器使用后较难清洗,重复使用性差,成本较高,这也一定程度上限制了其应用。

3.6 熔剂去除法

熔剂法除铁是利用熔剂与熔体中的铁发生化学反应生成不同密度的富Fe相,或上浮至熔体表面的熔渣中,或沉降至熔体底部,从而达到除铁的效果。目前,熔剂法除铁最常用的方法是向铝合金熔体中添加硼化物。高建卫^[42]提出向铝熔体中添加 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 熔剂除铁的思路,并揭示了除铁机制,除铁过程的主要化学反应为:



$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 除铁剂添加到铝熔体中后会形成 Fe_2B , Fe_2B 被熔剂捕获进入熔渣,从而实现除铁的目的。此外,葛维燕^[43]研究了向铝熔体中添加由硼砂和氧化硼组成的熔剂对除铁效果的影响,发现经过一定时间的处理,除铁率可达60%。同时,硼化物的添加也会改善合金中富Fe相的形貌^[44]。谭喜平等^[45-46]研究发现,向铝合金中添加 B_2O_3 -KCl-NaCl、Al-3B进行除铁时,除铁率可达30%左右。向Al-Si再生铝合金中添加硼化物(KBF_4)和Mn元素,可以促进 α -Fe向的形核和长大,使之快速沉淀到坩埚底部,并获得较好的除铁效率^[47]。与其他除铁工艺相比,熔剂去除法除铁效率较差,而且硼化物等除铁剂的添加,会向再生铝合金中引入新的杂质,所以该方法在工业生产中的应用也受限。

综上所述,目前再生铝合金的除铁技术,主要利用了富Fe相形成时间较早,且密度大或尺寸大等特点,通过沉降、过滤等方式去除再生铝合金中的富Fe相,降低再生铝合金中的Fe含量。再生铝合金除铁面临的难题是除铁效率较低的技术容易实现且成本较低、除铁效率高的技术成本较高且容易引入其他杂质。因此,充分利用富Fe相的特点,开发出一种高效低成本的除铁技术迫在眉睫。

4 熔炼工艺对再生铝合金微观组织和力学性能的影响

切削铝屑废料是一类重要的再生铝合金来源,切削铝屑废料呈螺旋状、蓬松且表面有油和乳化液,在重熔前需要对其进行预处理。不同的预处理方式对再生铝的回收率以及微观组织和力学性能至关重要。研究发现对6061切削铝屑废料进行除油+烘干+压实后,回收率可达73.3%,相较于只烘干或者烘干+压实回收率得到显著提高。除油处理可显著减少再生铝合金

中的非金属夹杂,压实处理可以有效减少重熔的时间。重熔过程Fe含量增加,Mg含量烧损最严重,经过除油+烘干+压实后得到的再生铝合金微观组织良好,力学性能更优^[48]。

PUGA H等^[49-50]提出了一种切削铝屑废料的回收熔炼方法,在不适用助熔剂的情况下,在850℃下熔炼切削铝屑废料,并在730℃下进行超声脱气,成功制备了组织均匀、化学成分与原始成分接近的再生Al-Si-Cu合金,该方法熔渣少,回收率可达90%左右。通过选择合理的超声频率和搅拌速度,可以对铝合金熔体起到优异的除气效果,从而也提高再生铝合金的力学性能。超声除气机^[51-52]作为一种有效的合金熔体除气手段,通过向合金熔体中通入惰性气体,在超声的作用下,利用超声波的“空化”效应,将惰性气体打散成细小的气泡,在小气泡上浮过程中可将熔体中的氢气、夹杂物等带出熔体。从而达到有效除气、除渣、净化熔体的作用,在近年来得到了广泛的推广和使用。

4.1 夹杂物

再生铝合金中的有害杂质主要包括H、Fe、非金属夹杂和碱(土)金属。废铝来源复杂表面可能有油污、油漆、涂料等,重熔前未完全烘干时还会带有大量水汽,导致在熔炼时熔体存在严重的吸氢现象,熔体中的氢含量较高,容易导致铝合金铸锭产生氢气孔等缺陷,需要对其进行除气处理^[53]。再生铝合金中的Fe是合金中危害最大的杂质元素之一,在合金中会与Al、Si、Mn等合金元素形成富铁化合物,割裂铝基体,引起应力集中,是合金的主要裂纹源和裂纹扩展路径上的重要节点,从而降低合金的强度、塑性等力学性能^[54]。非金属夹杂主要包括氧化物、碳化物、氯化物、氟化物等,其中以氧化物为主,如 Al_2O_3 、 MgO 、 AlN 和 Al_4C_3 等^[55]。非金属夹杂的存在会使合金微观组织中出现孔洞、疏松等缺陷,并且其与铝基体的结合较差,容易脱落,不利于合金力学性能、导电性能、耐腐蚀性能的改善。碱(土)金属主要来源于合金熔炼过程中由氯盐、氟盐和氧化性盐构成的精炼剂、覆盖剂、除渣剂等熔剂,其存在会增加熔体的黏度,降低流动性,不利于合金凝固过程的补缩,从而容易导致形成疏松、缩孔等缺陷。Na含量过高,会在晶界附近形成低熔点相,使合金在铸造、挤压、轧制过程容易出现开裂现象,即“钠脆”^[56]。

近年来铝熔体精炼、净化技术得到了快速发展,由原来的炉内精炼向炉外精炼发展,由单一精炼向复合精炼转变,目前典型的在线炉外精炼技术主要有英国铝业公司的FILD法(Fumeless in-line degassing)即无烟连续除气法、美国铝业公司的Alcoa469法、美国联合

碳化物公司的SNIF法、法国普基工业公司的ALPUR法、美国联合铝公司的MINT法等^[57-59]。随着计算机技术的快速发展,利用模拟方法模拟合金熔体的精炼过程,可以大大缩短新型精炼处理工艺的开发周期。李杰华^[60]通过数值模拟对旋转喷吹除气净化方法的喷吹组件进行优化设计,优化了进气孔分布及大小,解决了高温下喷头易堵塞问题,并对温度场和流场进行模拟分析,揭示了影响精炼效果的因素,确定了工艺参数。

再生铝合金熔体中存在大量氧化物夹杂,如果不进行有效去除,会恶合金的力学性能。目前主要的熔体净化方法包括真空法、超声法、过滤法、电磁搅拌法、旋转喷气法等^[61-63]。其中操作最简便、最有效的熔体净化方法是过滤法,最常用的过滤介质为陶瓷过滤器。孟雪松等^[64]研究发现,通过高频振动过滤处理后3004再生铝合金的枝晶减少、微观组织更细化、夹杂物更少,力学性能更优异。同时,还可以通过管式过滤工艺对再生铝合金熔体进行夹杂物的过滤去除,采用单板过滤+RD等级管式过滤的复合过滤方式,可阻挡大于5 μm的杂质颗粒物,熔体净化效果优异,制备的再生铝合金性能较好^[65]。

通过向再生铝合金熔体进行精炼处理也可以有效去除合金熔体中的夹杂物,研究发现向6063再生铝合金中添加0.4%由NaCl、KCl和氟盐组成的精炼剂,可以有效去除合金熔体中的夹杂物,并且对合金熔体具有较好的除气效果,制备的再生铝合金性能也更优异^[66]。乡家发等^[67]发现向ADC12再生铝合金熔体中添加合适的精炼剂,可以获得较好铝锭外观、较低含氢量和含渣量、较低针孔度的铸锭。为了更好地获得熔体净化效果,还可以将精炼剂分多次加入到铝合金熔体中,进行多次精炼处理^[68]。目前,再生铝合金的精炼剂多采用NaCl、NaF、KCl和 Na_3AlF_6 等氯盐和氟盐组成的混合物,精炼效果较好,但是精炼过程的副产物 AlCl_3 、HCl等对人体、环境和设备有害。因此,研究者也开始使用无毒或低毒的精炼剂对铝合金熔体进行精炼,比如 N_2 、Ar等,但是精炼效果较差。近年来使用稀土元素对再生铝合金熔体进行变质、细化、精炼一体化处理,也得到了较快的发展,该方法不仅简洁高效,而且可以有效改善再生铝合金的质量^[69-71]。

4.2 合金元素偏析

再生铝合金在回收制备过程中同样会发生合金元素的偏析现象,合金元素偏析直接影响再生铝合金的组织结构,并进一步影响合金的力学性能和耐腐蚀性能。凝固过程中合金元素在固相和液相中的容纳能力不同,从而引起合金元素在固液界面处产生溶质再分

配,最终导致液相和固相中合金元素的含量不均匀,进而形成合金元素偏析现象。张思织^[66]研究发现6063再生铝合金半连续铸件存在表面合金元素含量高,而内部合金元素含量低的反偏析现象,降低再生铝合金表面性能和质量。

再生铝合金在熔炼制备过程中,还会存在重力偏析现象,即重量更大的元素更容易偏析在铸件底部。为了减轻铸件的重力偏析现象,再生铝合金铸造过程中施加一定频率的超声,在细化合金晶粒的同时,可以提高组织均匀性,降低合金元素偏析,改善合金的力学性能^[72-73]。同时,超声处理还可以优化再生铝合金中富Fe相和Si相的形貌,改善再生铝合金的微观组织,从而提升合金的性能。

合金元素偏析行为受到溶质分配系数、铸件凝固速率、重力、边界层厚度等因素的共同影响。再生铝合金在制备过程中,通过合理控制凝固参数,施加外场等途径,可以有效减轻合金元素偏析现象,从而制备出性能更优的再生铝合金。

5 稀土元素对再生铝合金微观组织和力学性能的影响

5.1 稀土元素对再生铝合金富Fe相的影响

再生铝合金中废铝的循环使用过程中会不断有铁元素的积累,会导致废铝中存在较高含量的铁。虽然,目前除铁技术得到了快速发展,并起到了较好的除铁作用,但是再生铝合金中还会存在一定的铁元素。铁元素的增加会在再生铝合金中形成大尺寸脆性的富Fe相,其会割裂基体,破坏微观组织的均匀性,降低再生铝合金的力学性能。因此,对再生铝合金中的富Fe相进行有效的变质处理,优化其形貌尺寸分布,有利于提高再生铝合金的力学性能。

稀土元素作为一类有效的变质剂,被广泛应用在不同合金体系,并被证明具有较好的变质效果。章光全等^[74]研究发现稀土La添加到ZL102再生铝合金中

可以对合金中的 β -Al₅FeSi起到较好的细化变质作用。La元素的加入会在 β -Al₅FeSi相表面吸附偏聚,促进 β -Al₅FeSi相的形核,而在 β -Al₅FeSi相表面偏聚形成的La原子膜,会阻碍Fe原子的扩散,从而抑制 β -Al₅FeSi相的长大,La元素添加量为0.25%时,对 β -Al₅FeSi相的细化变质作用最好。张树玲等^[75]研究发现,稀土Y添加到再生铝合金ADC12中会对合金中的 β -Al₅FeSi相起到较好的变质作用,Y元素添加后 β -Al₅FeSi相会转变成Fe₁₅Si₂Y相,其形貌也由粗大的针状转变为细小的鱼骨状,同时枝晶偏析现象也得到有效缓解。Y元素在固液界面前沿富集引起的成分过冷,促进形核、阻碍原子扩散和界面迁移以及细化晶粒等作用的共同影响下,实现了对 β -Al₅FeSi相的较好变质效果。HU X W等^[76]也发现向ADC12铝合金中添加稀土Ce会减小合金中 β -Al₅FeSi相的尺寸,从而改善合金的力学性能。WU J Z等^[77]也发现向5005铝合金中添加稀土Ce可以减少合金中的富Fe相,提高合金的挤压性能。全翔等^[78]研究发现,稀土Y添加到6061再生铝合金中会形成Al₂Si₂Y三元化合物,其分布在 α -Fe相周围,能显著细化 α -Fe,当Y含量为0.3%时,细化效果最佳,并且能够显著改善合金的力学性能和耐腐蚀性能。稀土元素Y添加到Al-Mg-Si再生铝合金中,会显著细化富Fe相Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂,不同Y含量的Al-Mg-Si再生铝合金微观组织见图5。随着稀土Y含量的增加,富Fe相Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂由连续网状分布逐渐转变为小尺寸断续弥散分布^[79]。

除了单一添加稀土元素改善再生铝合金微观组织外,稀土元素和其他合金化元素复合添加也能够较好的改善再生铝合金的富Fe相。杨怀德等^[80]研究发现,向再生铝合金中添加S元素,由于S元素能增大Mn元素的偏析,可以使针状的 β -Fe相转变为骨骼状的 α -Fe相。稀土元素Ce虽然不能将 β -Fe相转变 α -Fe相,但是其可以控制 α -Fe的形核率和长大速度,减小 α -Fe的尺寸,二者复合添加可以对再生铝合金中的 β -Fe相起到更好的变质作用。向再生铝硅合金中添加富铈混合

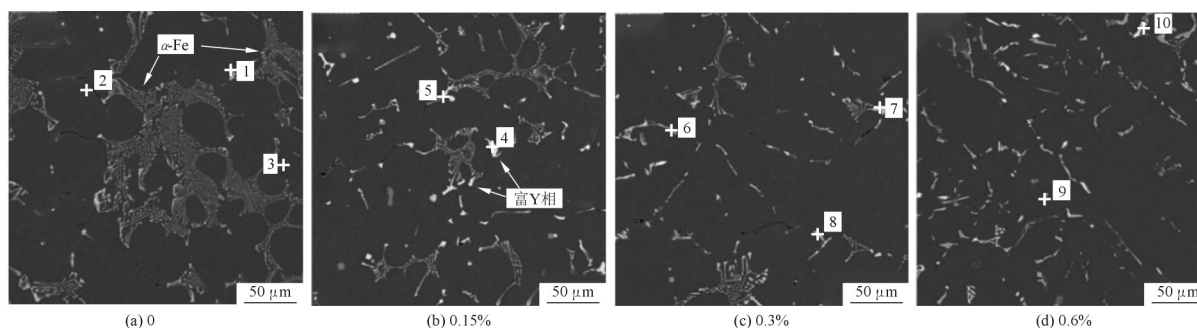


图5 不同Y含量的Al-Mg-Si再生铝合金的背散射图^[79]

Fig.5 Back scattered electron images of recycled Al-Mg-Si alloy with different Y contents^[79]

稀土和硼化物,既可以抑制 α -Fe的形成,又可以抑制 α -Fe的长大^[81]。La、Ce、Nd等稀土元素^[82-84]都可作为表面活性元素吸附在 α -Fe相界面处,降低界面能,在 α -Fe相附近富集,从而抑制 α -Fe相的长大。袁来兴^[85]也发现,稀土元素添加到再生铝合金中,会形成铝稀土化合物对合金起到晶粒细化作用,同时稀土元素在富Fe相表面的富集会抑制富Fe相的长大,从而改善合金的力学性能。

5.2 稀土元素对Al-Si系再生铝合金中硅相的影响

Al-Si系再生铝除了由于Fe的存在形成富Fe相外,还会形成大量块状的初生Si以及针状或条状的共晶Si,这些较大尺寸的脆性硅相也会割裂基体,破坏组织的均匀性,进而降低再生铝合金的力学性能。稀土Y除了能改善ADC12再生铝合金中的富Fe相外,还能有效改善合金中共晶Si和初生Si的形貌尺寸分布,优化合金的微观组织,使合金的力学性能得到提升^[86-88],ADC12铝合金中添加0.2%的Y,长轴状的初生Si将转变为颗粒状^[89]。向Al-7.5Si-0.5Mg合金中添加稀土Y,可以将粗大的血小板状的共晶Si转变为均匀分布的网状和纤维状的共晶Si^[90]。杂质诱导孪晶机制是目前得到普遍认可的一种共晶Si变质机理^[91-92],添加合金化元素后,合金元素会在固液界面前富集,在共晶Si表面诱导产生更多的孪晶,微观上变质后的共晶Si表面更加粗糙,也意味着存在着更多的形核质点,在凝固过程中可以形成更多的共晶Si,因而共晶Si的尺寸会得到细化。通过混合焓的计算,Y和Si之间具有较负的混合焓,即二者可以形成化合物,消耗一部分Si,从而可以使实现对共晶Si的变质改善作用^[93]。

向ADC12再生铝合金中添加La-Ce-Al混合稀土,也能对合金中的共晶Si起到较好的变质作用,当混合稀土的添加量为0.3%时,共晶Si几乎全部转变为短棒状,其分布也更均匀,此时共晶Si长度对冷却速度的敏感性最高,冷却速度对其影响最大^[94-95]。单萍等^[96]研究发现向再生ADC12铝合金中添加Al-10La-8Ce混合稀土,当添加量为0.3%时,合金中的初晶Si消失,共晶Si尺寸减小了66.7%,合金中的硅相得到了很好的变质效果。

此外,对再生铝合金进行复合细化变质^[6],改善合金中的化合物形貌尺寸分布;向再生铝合金熔体中施加脉冲电流^[97],使合金熔体中的富Fe相与熔体有效分离,可以起到较好的除铁效率。这些改善再生铝合金微观组织的方法,都能在一定程度上提升再生铝合金的力学性能和耐腐蚀性能。

6 热处理对再生铝合金微观组织和力学性能的影响

再生铝合金中的富Fe相等微观组织除了可以通过添加合金元素对其进行变质处理改善外,还可以通过对其进行不同工艺的热处理改善。对再生铝合金进行均匀化热处理,可以使热稳定性差的化合物部分或全部溶解到铝基体中,形成弥散分布的小尺寸化合物和过饱和固溶体,增加再生铝合金的组织均匀性^[98]。焦万丽等^[99]研究发现,预先均匀化热处理可以改善合金中富Fe相的形貌。江斌^[100]研究发现,对再生铝合金进行不同温度的均匀化热处理,可以逐渐改善合金中第二相的形貌,在500℃下保温1h,合金中的第二相开始逐渐分解,由针状逐渐转变为链状,均匀化温度升高到580℃,第二相呈球化状态,尺寸变小,随着均匀化温度进一步升高,第二相将逐渐转变为颗粒状,随着均匀化的进行,合金的晶粒也逐渐转变为等轴晶,合金的硬度也逐渐增加。对再生铝合金进行固溶处理可以使再生铝合金获得过饱和固溶体,同时可以进一步改善富Fe相的形貌尺寸分布。彭聪等^[101]研究发现A356再生铝合金经过固溶时效(540℃×4h固溶,160℃×4h时效)处理后,合金中的硅相发生了明显的球化现象,热处理过程中共晶Si尖角处曲率半径小,界面能大,尖角处会优先发生分解固溶到铝基体中。与此同时,固溶和时效处理后合金中的 β -Fe相减少,Mg₂Si相分布更均匀,因而合金的力学性能得到了较好的改善。ZHOU B等^[102-103]研究发现,7075再生铝合金经过470℃×24h均匀化处理后大部分枝晶间的化合物分解,并溶解到铝基体中,枝晶偏析现象得到有效缓解。T6处理后的7075再生铝合金的晶粒更加细小,组织更加均匀,其力学性能高于ASTM对7075铝合金的要求,并且具有较好的耐腐蚀性能。

再生铝合金进行适当的固溶和时效处理^[103],可以降低再生铝合金的合金元素偏析程度,也能够改善合金中化合物的形貌尺寸分布,使合金的微观组织变得更均匀,从而提升再生铝合金的性能。

7 结论与展望

目前,我国再生铝合金的年产量约占我国铝合金年产量的1/5,随着“双碳”政策的实施,节能减排的要求越来越严格,以及不断产生的废铝资源,有效消纳废铝资源制备高质量的再生铝合金将变得越来越重要。但是,废铝来源复杂,需要进行严格的预处理,筛检混入废铝之中的有害物质,有效降低再生铝合金中的Fe

含量,对再生铝合金中的富Fe相进行有效的变质处理,根据需要进行适宜的热处理,才能改善再生铝合金的微观组织,进而提高再生铝合金的力学性能和耐腐蚀性能,增加其在铝合金市场中的竞争力。

虽然现在针对再生铝合金的除铁技术已经进行了大量的研究工作,并取得了较好的效果。但是,进一步提高除铁效率,对制备高性能再生铝合金至关重要。对熔体开展净化精炼处理,可以降低熔体中的夹杂物和气体含量,从而有效减少再生铝合金微观组织中的缺陷产生。对于再生铝合金中的富Fe相、硅相等较大尺寸的脆性相,通过添加稀土元素等合金化元素,可以对其产生一定的变质作用,但是效果有限。因此,为了推动再生铝合金的生产和应用,在以下几个方面还需要加大研发力度,进行深入研究。

(1)高效的熔体精炼净化工艺,较好的熔体精炼净化除气对于制备高质量铸件至关重要,为此需要开发高效的熔体精炼净化工艺,在获得较好熔体处理效果的同时,减少杂质的引入。

(2)充分利用富Fe相的磁性及较大密度等特点,开发一种简便高效的除铁技术,减少再生铝合金中的富Fe相含量,减小其对基体的割裂作用,提升再生铝合金产品的质量。

(3)利用合金化元素之间的协同作用,开发高效复合细化变质剂,充分变质合金中的富Fe相、Si相等较大尺寸的块状、针状的脆性第二相,改善微观组织的均匀性,提升再生铝合金的力学性能。

参 考 文 献

- [1] DU S, ZHANG S G, WANG J W, et al. Sustainable recycling of aluminum scraps to recycled aerospace-grade 7075 aluminum alloy sheets [J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 41, e01 100.
- [2] FREITAS B J M, KOGA G Y, MENDES M A B, et al. Ductile and corrosion-resistant aluminum alloy from recycled secondary aluminum scraps containing iron impurities[J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2023, B54:2 188-2 205.
- [3] 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.
- [4] 李鑫骥,傅定发,汤杰,等.高强韧再生Al-1.15Mg-1.02Si-0.7Cu合金组织与性能研究[J].*有色金属工程*,2024,14(6):43-52.
- [5] DE CARO D, TEDESCO M M, PUJANTE J, et al. Effect of recycling on the mechanical properties of 6000 series aluminum-alloy sheet[J]. *Materials*, 2023, 16, 6 778.
- [6] 付亚城,董晓琼,闫俊,等.复合细化变质对再生ADC10铝合金组织性能的影响[J].*世界有色金属*,2023(16):138-140.
- [7] D'ELIA F, RAVINDRAN C, SEDIKO D, et al. Hot tearing mechanisms of B206 aluminum-copper alloy [J]. *Materials and Design*, 2014, 64:44-55.
- [8] 王业双,王渠东,丁文江,等.合金的热裂机理及其研究进展[J].*特种铸造及有色合金*,2000(2):48-50.
- [9] 丁浩,傅恒志,刘忠元,等.凝固收缩补偿与合金的热裂倾向[J].*金属学报*,1997(9):921-926.
- [10] CLYNE T W, DAVIES G J. The influence of composition on solidification cracking susceptibility in binary alloy systems[J]. *The British Foundryman*, 1981, 74: 65-73.
- [11] CLYNE T W, DAVIES G J. A quantitative solidification cracking test for castings and an evaluation of cracking in aluminium-magnesium alloys [J]. *The British Foundryman*, 1975, 68: 238-244.
- [12] EMADI D, NAFISI S, GHOMASHCHI R, et al. Applications of thermal analysis in quality control of solidification processes [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005, 81 (1) : 235-242.
- [13] 史明波,李乘波,杜军,等.Mg对6061再生铝合金凝固特性和热裂行为的影响[J].*铸造*,2020,69(4):361-366.
- [14] 何健松,史明波,杜军.Fe和Cu对6061再生铝合金凝固行为和热裂倾向的影响[J].*铸造技术*,2021,42(1):1-4.
- [15] 史明波.6061再生铝合金的热裂倾向和性能改进研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [16] 白清领,缪姚军,单小龙,等.A1-5Ti-1B细化剂对7050铝合金晶粒尺寸和热裂敏感性的影响[J].*冶金与材料*,2022,42(6):4-7.
- [17] 裴长世,雷延霞.7A06铝合金空心圆铸锭裂纹产生的原因及其控制措施[J].*轻金属*,2022(5):47-52.
- [18] 于博,豆瑞锋,王一帆,等.AA5182铝合金半连续铸造过程热裂敏感性模拟研究[J].*铸造*,2022,71(12):1 529-1 536.
- [19] 岳春雨.A1-Cu-Mg-RE铸造合金热裂行为研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2024.
- [20] 员飞,李凯,周天鑫,等.低硅铝合金热裂敏感性及其机理研究[J].*铸造*,2023,72(9):1 168-1 174.
- [21] 邹国童.铸造铝合金的流动性、热裂倾向性和收缩率研究[J].*福建冶金*,2023,52(2):31-34.
- [22] 谭喜平,郑开宏,戚文军,等.再生铝合金除铁技术的研究现状与展望[J].*铸造技术*,2013,34(11):1 446-1 448.
- [23] UNUVAR C, FREDRICK D M, ANSELMINI-TAMBURINI U, et al. Gravity effects on reactive settling of transition metals in liquid aluminum under SHS conditions[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(9): 2 965-2 975.
- [24] 杨婉婷.再生AlSi10MgFe合金富Fe相沉降行为及组织调控[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2023.
- [25] SONG D F, ZHAO Y L, WANG Z, et al. Effect of Mn/Fe ratio on Fe removal efficiency and tensile ductility of an Al-7.0Si-2.4Fe alloy[J]. *Journal of Materials Research*, 2021, 36(6):1 357-1 366.
- [26] DHINAKAR A, LU P Y, CHEN J K, et al. Iron reduction in 356 secondary aluminum alloy by Mn and Cr addition for sediment separation [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15 (1) : 182-192.
- [27] ASHTARI P, TETLEY-GERARD K, SADAYAPPAN K. Removal of iron from recycled aluminum alloys[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2012, 51(1): 75-80.
- [28] YANG Y S, ZHANG Q S, HE Y L, et al. The segregation of copper and silicon in Al-Si-Cu alloy during electromagnetic centrifugal solidification [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2001, 2(1):271-275.

- [29] ZHAO L X, GUO Z C, WANG Z, et al. Removal of low-content impurities from Al by super-gravity[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2010, B41(3): 505-508.
- [30] KIM S W, IM U H, CHA H C, et al. Removal of primary iron rich phase from aluminum-silicon melt by centrifugal separation[J]. China Foundry, 2013, 10(2): 112-117.
- [31] KRÄUTLEIN C, FRIEDRICH B. Removal of intermetallic precipitates from Al-melts by immersed centrifugation technology[C]. Proceedings of European Metallurgical Conference, 2005: 1 593-1 573.
- [32] 孙益民. 消除铁在铝合金中有害作用的途径[J]. 铸造技术, 2009, 30(4): 520-522.
- [33] XIAO T, LÜ G Q, BAO Y, et al. Electromagnetic separation of coarse Al-Si melts: The migration behavior of iron-rich phase and continuous growth of primary silicon[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 819: 153 006.
- [34] 刘雅娟, 陈东风. 电磁分离工艺对铝合金中富Fe相显微形貌的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(8): 1 791-1 793.
- [35] 赵世民, 王毅博, 鲍雨, 等. 一次铝硅合金中的硅和富Fe相电磁分离研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(11): 10-14.
- [36] BAO Y, LV G Q, WANG Y B, et al. Removal of iron-rich phases from coarse Al-Si alloy in the electromagnetic field[J]. Metallurgical and Material Transactions, 2019, B49(6): 3 413-3 423.
- [37] XU Z M, LI T X, ZHOU Y H. Elimination of Fe in Al-Si cast alloy scrap by electromagnetic filtration[J]. Journal of Materials Science, 2003, 38(22): 4 557-4 565.
- [38] BAO S, SYVERTSEN M, KVITHYLD A, et al. Wetting behavior of aluminium and filtration with Al_2O_3 and SiC ceramic foam filters[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(12): 3 922-3 928.
- [39] 杨怀德. 再生铝硅合金中富Fe相变质降除方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [40] 庞士鹏, 张林, 周成双. 再生Al-Cu-Si系铝合金除铁方法: CN107619959B[P]. 2019-04-26.
- [41] DE MORAES H L, DE OLIVEIRA J R, ESPINOSA D C R, et al. Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration[J]. Materials Transactions, 2006, 47(7): 1 731-1 736.
- [42] 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.
- [43] 葛维燕. 再生铝合金除铁研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [44] 谭力. 硼与过滤对A356铝合金铁相的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [45] 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.
- [46] 谭喜平, 郑开宏, 宋东福, 等. Al-3B中间合金添加量对再生铸造铝合金中杂质Fe含量的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(6): 1 401-1 407.
- [47] 杨怀德, 龙思远, 吴明放, 等. 硼化物、锰去除再生Al-Si合金中铁元素机理研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 621-627.
- [48] 代自莹, 王东辉, 谢方亮, 等. 废料预处理方法对6061再生铝合金组织及性能的影响[J]. 有色金属加工, 2023, 52(3): 21-24.
- [49] PUGA H, BARBOSA J, SOARES D, et al. Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209: 5 195-5 203.
- [50] PUGA H, BARBOSA J, TEIXEIRA J C, et al. A new approach to ultrasonic degassing to improve the mechanical properties of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23: 3 736-3 744.
- [51] 美国南方线材公司推出商用超声波在线净化系统[J]. 铝加工, 2021(6): 36.
- [52] 王祝堂. 美国南方线材公司推出Ultra-D~(TM)超声除气机[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(7): 39.
- [53] 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.
- [54] 钱伟涛, 宗福春, 葛素静, 等. 铸造铝合金中典型夹杂物微观特征和成分研究[J]. 铸造, 2023, 72(2): 153-159.
- [55] 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.
- [56] 罗旭东, 吴欣凤, 张真溪, 等. Na、Ca元素在铝及铝合金中的危害作用[J]. 铸造技术, 2015, 36(9): 2 310-2 314.
- [57] 唐剑, 黄平, 牟大强, 等. 铝合金熔铸技术的现状及发展趋势[J]. 铝加工, 2001(4): 5-9.
- [58] 吴锡坤. 铝型材加工实用技术手册[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- [59] 刘昕怡. 基于LARS技术的再生铝合金锭生产线设计[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [60] 李杰华. 铝合金熔体旋转喷吹除气净化技术的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [61] 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.
- [62] 李海丰, 张德恩, 卢锦德. 铸造铝合金熔体净化技术及工艺进展[J]. 河北冶金, 2011(12): 8-10.
- [63] 段瑞斌. 易拉罐用3104铝合金再生关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [64] 孟雪松, 李军文, 邵阳, 等. 高频振动过滤对再生铝合金组织和性能的影响[J]. 热处理, 2021, 36(4): 12-16.
- [65] 王国佐, 于昊川. 再生铝合金管式过滤工艺及质量控制分析[J]. 铝加工, 2021(6): 37-40.
- [66] 张思织. 6063再生铝合金熔体净化及半连铸组织性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [67] 乡家发, 韩军锋. 不同精炼剂对再生铝合金熔汤品质的影响[J]. 福建冶金, 2019, 48(4): 39-42.
- [68] 陈学文, 邝治全, 王顺成, 等. 废旧建筑铝模板的回收再生工艺与技术研究[J]. 再生资源与循环经济, 2024, 17(7): 41-44.
- [69] 聂铁安. 再生铝合金熔炼工艺探讨[J]. 有色金属加工, 2009, 38(5): 17-19.
- [70] 聂铁安. 再生铝合金熔炼工艺技术[J]. 冶金丛刊, 2009(3): 47-50.
- [71] 聂铁安, 彭继华, 李绍康, 等. 再生铝合金熔体的精炼变质处理[J]. 冶金丛刊, 2012(6): 8-11.
- [72] 孟雪松. 超声振动辅助过滤再生铝效果研究[D]. 辽宁大连: 大连交通大学, 2021.
- [73] 郭兴, 蒋日鹏, 李晓谦, 等. 超声处理铝合金熔体对半连铸铸锭组织与偏析的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(7): 25-29.
- [74] 章光全, 毛协民, 欧阳志英, 等. 稀土La细化再生铝硅合金中 β -Fe相的机理研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2003, (6): 5-7.
- [75] 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.
- [76] HU X W, CHEN W J. Microstructure evolution and microhardness of die-casting Al-12Si-2Cu-xCe aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(3): 23-26.
- [77] WU J Z, HU W X, JIA J Y, et al. Effect of cerium on microstructure and properties of 5005 aluminum alloy[J]. Chinese Rare Earths, 2017, 38(4): 81-87.
- [78] 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.
- [79] 全翔. Y 对再生 Al-Mg-Si 合金铸态组织和性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [80] 杨怀德, 龙思远, 吴星宇, 等. S 和稀土对再生铝合金富 Fe 相变质行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(9): 848-851.
- [81] 杨怀德, 龙思远, 朱姝晴, 等. 硼化物、富 Ce 混合稀土对再生 Al-Si 合金中富 Fe 相变质行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 187-191.
- [82] CHANG J Y, KIM G H, MOON I G, et al. Rare earth concentration in the primary Si crystal in rare earth added Al-21Si alloy[J]. Scripta Materialia, 1988, 39(3): 307-314.
- [83] 张金山, 许春香, 韩富银. 复合变质对过共晶高硅铝合金组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 107-110.
- [84] 张卫文, 尹志民, 赵阳, 等. 过共晶高硅铸造铝合金磷-稀土双重变质处理[J]. 中国有色金属学报, 1995(1): 59-62.
- [85] 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.
- [86] 胡凯亮, 陈炜晔, 李弘铎, 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.
- [87] FARAHANY S, OURDJINI A, IDRISI M H, et al. Evaluation of the effect of Bi, Sb, Sr and cooling condition on eutectic phases in an Al-Si-Cu alloy[J]. Thermochimica Acta, 2013, 559: 59-68.
- [88] RAO Y S, YAN H, HU Z. Modification of eutectic silicon and β -Al₅FeSi phases in as-cast ADC12 alloys by using samarium addition[J]. Journal of Rare Earths, 2013, 31(9): 916-922.
- [89] LIU J L, WU Q J, YAN H, 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, 2018, 9(1): 53.
- [90] BAO L, WANG H, JIE J, et al. Effects of yttrium and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Al-7.5Si-0.5Mg alloy[J]. Materials & Design, 2011, 32(3): 1 617-1 622.
- [91] NOGITA K, YASUDA H, YOSHIYA M, et al. The role of trace element segregation in the eutectic modification of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2010, 489(2): 415-420.
- [92] LU S Z, HELLAWEEL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning[J]. Metallurgical Transactions, 1987, A18(10): 1 721-1 733.
- [93] KANG H S, YOON W Y, KIM K H, et al. Effective parameter for the selection of modifying agent for Al-Si alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A449: 334-337.
- [94] 李厅. 混合稀土变质再生铝合金 ADC12 的组织及性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [95] 李厅, 余忠, 章凯, 等. 混合稀土镧铈对再生铝合金 ADC12 的影响[J]. 有色金属工程, 2017, 7(2): 26-29.
- [96] 单萍, 黄琦, 周龙富. 混合稀土对再生铝合金 ADC12 组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(5): 484-487.
- [97] 黄孝山, 王俊杰, 张迪, 等. 脉冲电流下再生铝合金中杂质富 Fe 相的分离机理[C]//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一), 江西赣州, 2024.
- [98] 任建平, 宋仁国, 陈小明, 等. 7xxx 系铝合金热处理工艺的研究现状及进展[J]. 热加工工艺, 2009, 38(6): 119-124.
- [99] 焦万丽, 张磊. 铝硅合金中富 Fe 相杂质的电磁分离[J]. 铸造技术, 2006, 27(3): 269-272.
- [100] 江斌. 均匀化热处理和微合金化对含铁再生铝合金组织和硬度的影响[D]. 安徽马鞍山: 安徽工业大学, 2020.
- [101] 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.
- [102] ZHOU B, LIU B, ZHANG S G, et al. Microstructure evolution of recycled 7075 aluminum alloy and its mechanical and corrosion properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 879, 160 407.
- [103] 周博. 再生航空铝合金热处理制度及腐蚀行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊, 是对国内外公开发行的中文核心期刊, 中国科技论文统计与分析用刊, INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊, 并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿, 征稿内容包括: 各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验, 此外还包括各相关学科和交叉学科, 如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址: 武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编: 430019

电话: 027-85358206, 85486024,

85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

