

## 综合利用与环保

引文格式:李若宇,王耀武,郭不拘,等. 废铝回收再利用的研究现状[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(4): 84-93.

LI Ruoyu, WANG Yaowu, GUO Bujun, et al. Research status of scrap aluminum recycling[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(4): 84-93.

# 废铝回收再利用的研究现状

李若宇<sup>1</sup>, 王耀武<sup>1</sup>, 郭不拘<sup>1</sup>, 潘生进<sup>2</sup>, 王 昌<sup>2</sup>, 王 柯<sup>2</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 邹平县宏正新材料科技有限公司, 山东 邹平 256299)

[摘要] 铝及铝合金的抗腐蚀性强, 在使用过程中损耗程度极低, 具有极高的再生利用价值, 促进废铝回收可显著降低铝行业的能耗和碳排放。本论文主要对废铝的重熔降级回收、保级回收及越级回收工艺进行了总结, 对各工艺的优缺点进行分析。采用传统的废铝重熔降级再生工艺无法完全去除铝中的合金元素与金属杂质, 再生铝只能降级利用, 但随着再生铝量的增加, 传统的降级利用技术将无法消纳过量再生铝。保级回收可实现废铝资源价值最大化, 但是只有极少量的优质废旧铝合金能实现其固有价值, 大部分废铝资源难以实现。废铝越级回收技术能够将铝合金中铝与合金元素进行有效分离, 使回收的铝达到原铝的质量水平, 可实现废铝的彻底再生, 是废铝再生的最佳途径之一。熔盐电解法是最具发展前景的废铝提铝再生技术。

[关键词] 废铝回收; 再生铝品质; 降级利用; 保级回收; 越级回收; 熔盐电解法

[中图分类号] TF821; TF805.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)04-0084-10

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.04.010

金属铝是产量仅次于钢铁的第二大金属, 且其用量逐年增加, 据国际铝业协会估算, 2050 年全球铝的需求将在 2022 年的基础上增长 80% 以上。中国是世界第一大铝生产国, 2022 年我国原铝产量达到 4 020 万 t, 近年来原铝产量一直维持在世界原铝产量的 55% 以上<sup>[1-2]</sup>。尽管我国是铝产量大国, 但相较于发达国家, 人均铝消费量仍有一定的差距, 受可再生能源发电、新能源汽车等行业发展的影响, 我国铝消费还有很大的增长空间。根据 2022 年编写的《我国关键矿产及其材料产业供应链高质量发展

战略研究》预测, 2035 年, 我国铝需求量将达到 5 738 万 t, 较现有产量增长 50%。截至 2023 年, 氟化物熔盐电解氧化铝, 即霍尔-埃鲁法仍然是工业生产原铝的唯一方法。电解铝是高耗能、高碳排放行业, 2022 年, 我国电解铝行业消耗电能超过 5 000 亿 kWh, 约占全社会用电总量 6.8%, 二氧化碳总排放量达 4.5 亿 t, 约占全国二氧化碳净排放量的 5%, 占有色金属行业碳排放总量的 80% 以上。

铝及铝合金的抗腐蚀性强, 在使用过程中损耗程度极低, 且在多次重复循环利用后仍保持其基本特性, 具有极高的再生利用价值<sup>[3]</sup>。废铝再生的能耗和温室气体排放量较原铝生产大幅度降低, 按现有废铝回收技术, 其再生能耗仅为新铝生产的 3%~5%<sup>[4]</sup>, 再生铝的温室气体排放量仅为原铝的 3%~5% 左右<sup>[5-6]</sup>, 促进废铝回收可显著降低铝行业的能耗和碳排放。

因此发展再生铝产业不仅可实现铝行业的节能

[收稿日期] 2023-12-29

[第一作者] 李若宇(1997—), 男, 河北石家庄人, 硕士在读, 研究方向为熔盐电解电化学。

[通信作者] 王耀武(1980—), 男, 河北安国人, 副教授, 研究方向为铝电解与真空冶金。

[基金项目] 国家自然科学基金项目“废铝可溶阳极电解提取纯铝的基础研究”(52374352)。

减排<sup>[6]</sup>,还可保障日益增长的铝需求,是我国未来铝行业发展的主要趋势之一。

## 1 废铝回收利用情况

根据国际铝业协会的统计,2021年全球铝供应量(包括原铝与再生铝)接近1亿t,其中约三分之一为再生铝产量。虽然近年来我国再生铝行业发展较快,2016—2021年废铝回收量年均复合增长率超过12%,2022年,中国再生铝产量达到了865万t<sup>[7-8]</sup>,但整体上与国外发达国家相比仍有较大差距<sup>[9]</sup>。2020年,欧洲铝业协会宣布启动《再生铝行动计划》,计划到2050年将再生铝占比从2020年的36%提高到50%,以替代高碳排放强度的进口原铝,在降低进口铝依赖度的同时,达到降低碳排放46%的目的。美国再生铝占比已达81%、日本占比近100%。很多知名的国际铝业企业,早就布局再生铝市场,加大了再生铝生产水平和回收利用水平<sup>[10]</sup>。发达国家的再生铝产量已经普遍超过原铝产量,而我国再生铝产量仅占原铝产量的21.52%<sup>[11]</sup>(我国与世界废铝回收量如图1所示),远远落后于发达国家,也落后于世界平均水平<sup>[12]</sup>。

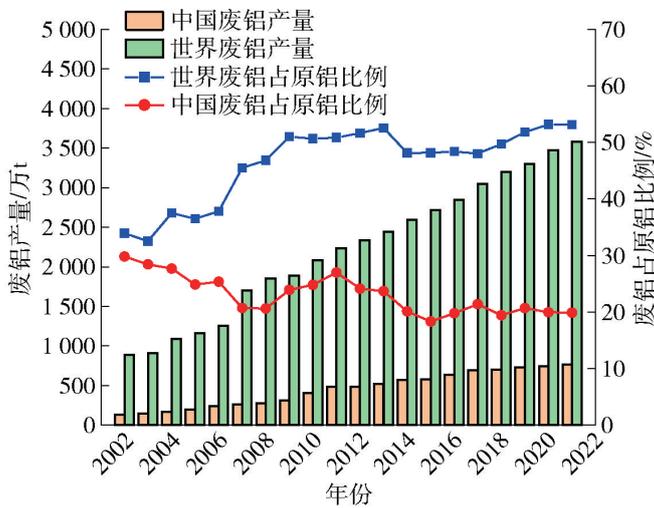


图1 世界与中国再生铝产量及再生铝占原铝比例

Fig. 1 Recycled aluminum production and proportion of recycled aluminum in primary aluminum in China and the world

根据有色金属工业协会再生金属分会的测算,铝产品预期寿命为15~18年。2022年起,2007年前消费的铝产品已经开始进入报废期,根据历史资料统计,我国1981—2007年原铝表观消费量累计达

7 471.4万t。《有色金属行业碳达峰行动方案》预计到2025年,我国废铝资源量将达到1 150万t/a,成为废铝资源大国。此外,自2017年以来,国家为了控制电解铝产能的无序扩张,设定了4 500万的产能天花板<sup>[11,13-14]</sup>,原铝生产未来发展空间基本确定。在电解铝产能严控的前提下,未来我国铝业的供应缺口将主要依靠再生铝<sup>[6]</sup>。

因此发展再生铝产业不仅可实现铝行业的节能减排<sup>[6,15-16]</sup>,还可保障日益增长的铝需求,是我国未来铝行业发展的主要趋势之一。废铝回收的方法很多,本文对这些方法的特点、研究现状以及废铝回收未来的发展方向进行了简要的分析。

## 2 废铝回收技术分类方法

尽管铝是一种回收利用率很高的金属,但90%以上的铝是以铝合金的形式被利用,废铝回收利用不可避免会降低再生铝质量<sup>[17-18]</sup>。根据再生铝品质可以将回收方法分为三大类:降级回收<sup>[19-20]</sup>、保级回收<sup>[21]</sup>和越级回收(纯铝回收)。

降级回收一般指的是废铝经过预处理与重熔熔炼后进行再利用。因采用的预处理与重熔工艺不能去除废铝中的合金元素及杂质,再生铝中残留的合金元素及杂质含量无法控制,性能变差,其应用受到很大限制。再生铝的成分难以符合锻造铝材料的要求,再生铝只能降级使用,大部分的回收铝被用于生产铸造铝合金,汽车工业是这些铸造合金的最大用户,占再生铝消费量60%以上<sup>[22-23]</sup>。

闭环回收与保级利用已经成为再生铝发展的重要方向<sup>[24-25]</sup>。闭环回收作为一种更高级的回收方式,是将下游客户制造产生的特定铝合金单独收集和重熔,从而避免合金间污染,重新生产相应牌号的产品<sup>[22]</sup>。由于闭环回收前后废铝与产品的化学成分相同或接近,可大幅降低原铝的添加需求。这是一种更为高级的回收模式,也是目前最理想的回收方式。

尽管保级回收已经可以将部分行业的原铝消耗量降至25%以下<sup>[26]</sup>,但由于铝合金牌号较多,用途广泛,来源复杂,废铝的闭环回收与保级利用难以完全实现,再生铝中合金元素累积与杂质含量升高不可避免。因此,越来越多的学者倾向于开发从废铝合金中提取原铝的回收工艺,即越级回收。

### 2.1 废铝的降级回收工艺

目前,废铝一般经过预处理、重熔熔炼、合金调配后制备再生铝<sup>[20, 27]</sup>。废铝的预处理目的有4个:①除去废杂铝中夹杂的其他金属和杂质<sup>[28]</sup>;②把废杂铝按成分分类,使其中合金成分得到最大程度利用;③将废杂铝表面的油污、氧化物及涂料等处理掉;④使含铝废料中的铝得到最经济、最合理的利用。经过预处理后便得到较为干净的铝及铝合金原

料,然后需要进行熔炼以获得铝合金熔液。熔炼后得到的铝液往往含有一些金属熔渣、氧化物、合金化合物、甚至重金属元素等杂质,需要进行进一步的熔体净化处理。净化后的合金熔体还需根据要制备的合金牌号,向液态铝合金加铝稀释并添加合金元素,使熔炼后的铝合金符合产品标准。该工艺的主要工艺流程如图2所示,其中分选技术以及精炼除杂是决定重熔铝产品质量最为关键的两个环节。

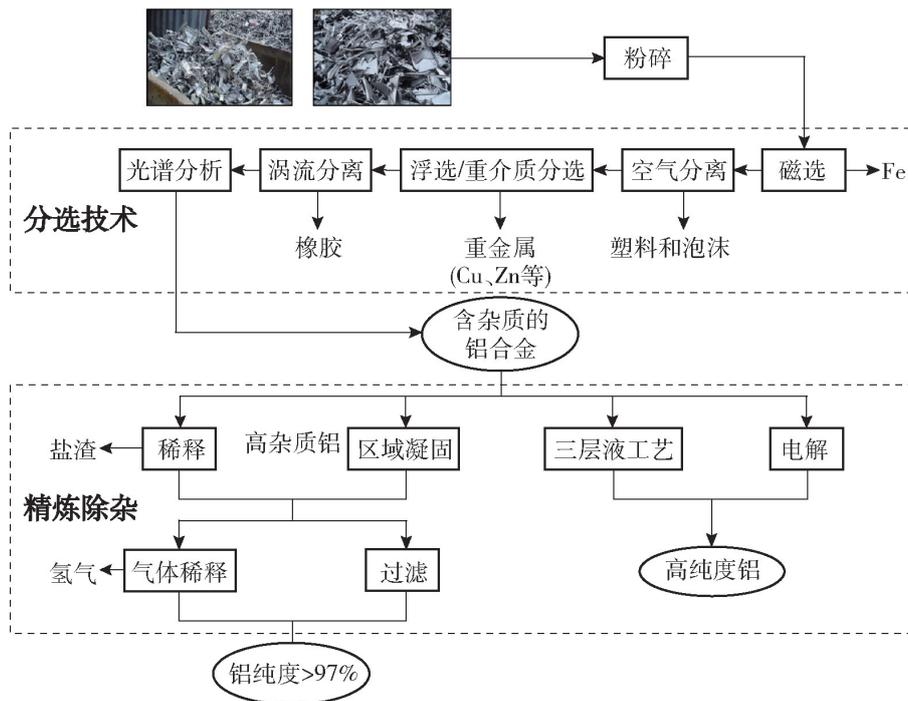


图2 废铝重熔工艺流程图

Fig. 2 Remelting process flow chart of recycled aluminum

#### 2.1.1 分选技术

废铝的分选多为物理分离,旨在重熔前尽可能的去除废铝合金中的金属杂质(如 Fe、Cu、Zn 等)和非金属杂质(如橡胶、塑料、玻璃等)。常用的分选技术主要有以下几种。

1) 磁选:根据磁性差去除磁性废物,适用于含有较多铁、钢等磁性杂质的废铝。

2) 气流分选:利用不同材料的密度差异,采用高压空气对轻质杂质(废纸、塑料、砂子等)进行分离,工艺简单,分离效率高。

3) 浮选/重介质分选:该方法利用不同合金的密度差异进行分选,以水或水基泥浆为介质,分离不同种类的有色金属,可以有效将废铝按照合金类型进行分类,从而实现不同合金的再利用和加工。分选介质可重复使用,可操作性高,但工艺复杂且不适用于中空材料。

4) 涡流分离:利用电导率和密度的差异分离非

金属和其他有色金属杂质,不适合颗粒状杂质。

5) 颜色分类:利用废料之间的颜色差异,将有色金属废料流中的锌、铜、黄铜和不锈钢与铝分离。

6) 光谱分析分选:用 XRD 法测定废物的种类,可以做到合金牌号的精确分类,但流程复杂且投资较高。

7) 人工分选:通过人工操作根据合金废料的形貌进行分选。

在以上分选技术中,人工分选因其低成本、高回报的优势,被广泛应用于劳动力成本低的发展中国家,如中国、印度和巴西等<sup>[29]</sup>。但在自动化高速发展的今天,光谱分析法才是解决分选问题的未来发展方向。其中激光诱导击穿光谱(LIBS)是近年来快速发展的一项原子光谱分析技术,其凭借无需复杂样品预处理、能实现多元素同步在线分析和远程原位测量等独特优势,受到了铝回收领域的广泛关注<sup>[30]</sup>。

### 2.1.2 精炼除杂工艺

经过分选和预处理后,获得的废铝经重熔熔炼和调整成分后再利用。重熔熔炼过程中,可采用精炼去除部分杂质来净化熔体。废铝重熔熔体中的杂质主要为固体夹杂和一些有害的金属杂质,废铝含有的除铝以外的其他元素有 Cu、Mn、Si、Zn、Cr、Fe、Co 及 Ni 等近 20 种,根据后期再生铝的用途,可采用不同的精炼方法降低某些金属元素含量。废铝熔体中各金属杂质去除方法及原理如表 1 所示。

表 1 金属杂质的去除方法和基本原理

Table 1 The methods and basic principles of removing metal impurities

方法	待去除金属元素	原理
氮化法	Na、Li、Ti	产生稳定的氮化物并被去除
氧化法	Zn、Ca、Mg、Zr	选择性氧化
氯化法	Mg、Zn	镁和锌比铝对氯有更强的亲和力,向铝熔体中加入氯化铝或通入氯气去除
沉降法	Fe、Zn、Pb	利用密度差沉降分离
溶剂法	Mg、Fe	加入助熔剂形成稳定相去除
蒸馏法	Mg、Na、Ca、Zn	真空蒸馏可将饱和蒸气压较高的杂质蒸馏分离
过滤法	非金属夹杂、Fe	低温可使铝合金熔体中的富铁相成固相,采用机械过滤的方法将富铁相和非金属夹杂去除
溶析结晶法	非铝金属夹杂物	冷却时非铝金属夹杂物在铝液中的溶解度发生变化

在铝合金中,Fe 会与 Al、Mn 等元素形成硬而脆的难熔化合物,从而降低合金塑性、热处理强化效果及抗腐蚀性,因而 Fe 是再生铝合金中最有害的杂质元素,也是较难去除的杂质元素<sup>[31-34]</sup>。

除铁方法主要有以下 3 种:①加锰除铁法<sup>[35]</sup>,即在铝液中加入锰,锰与富铁相形成高熔点相,然后通过沉降法、过滤法、离心分离法、电磁分离法等方式实现铁的去除<sup>[36]</sup>;②电磁除铁法,首先通过降温使铝中的富铁相成固相析出,然后加入磁场使富铁相长大,从而沉降去除<sup>[37]</sup>;③加硼除铁法,即利用硼和熔体中的铁反应形成铁硼化合物,并通过溶剂的吸附作用加以捕获去除。

除上述方法外,赵静蕊等<sup>[38]</sup>探索了使用硼和稀土元素钕去除铝合金熔体中的杂质铁,结果表明,加入硼和稀土元素钕可生成高密度的 B-Fe-Nd 三元化合物,该物质密度大,易沉降到铝熔体底部,有利

于含铁相的沉降分离。Yamin Sun 等<sup>[39]</sup>对通过脉冲电流法从熔融再生铝中去除铁的工艺进行研究,在脉冲电流的作用下,杂质铁富集在样品的底部和阴极,可有效实现二次铝熔体中杂质铁分离。

无论采用哪一种方法去除铝及铝合金熔体中的非铝金属夹杂物及金属杂质,都会产生大量的渣,造成再生铝的损失,增加再生铝的生产成本。

## 2.2 保级回收法

降级回收的再生铝一般只能用于铸造铝硅合金,而且由于再生铝中杂质含量较高,其应用受到一定的限制。相对于降级回收,保级回收的再生铝及铝合金在很大程度上与原铝生产的铝合金具有相近或相同的化学成分和质量级别<sup>[40]</sup>,可回收再利用。目前,保级回收是废铝回收的主要发展方向,主要有闭环回收及固态回收两种方法。

### 2.2.1 闭环回收

闭环回收被认为是保级回收的最理想的方式,其目的是将下游客户产生的废铝或消费后回收的废铝,重新生产相应牌号的产品,进而供应下游客户或终端消费,形成铝资源循环利用的闭环,这是一种更为高级的保级回收模式。

西方国家很早已经意识到废铝的保级利用问题,在保级利用方面经验丰富。国外铝行业的龙头企业通过与下游客户开展闭环回收合作,在不增加再生铝合金组分和含量的情况下,实现废铝的保级使用,使废铝资源价值最大化。目前,国外废旧易拉罐闭环回收保级利用体系已非常成熟,日本的废旧易拉罐回收率已经达到了 97.9%<sup>[26]</sup>,欧洲国家的回收率也超过 90%,且回收的废旧易拉罐也主要用于罐料的生产;此外,欧美国家汽车废铝与航空航天废铝闭环回收系统也已建立。中国的废铝闭环回收体系还处于起步发展阶段,再生铝处理能力有待提高,我国再生铝很少保级利用。

### 2.2.2 固态回收

固态回收,即在低于固相线的温度下回收废铝,与传统的重熔回收相比,可以在一定程度上降低能耗,减少碳排放,且回收步骤少,回收效率高,在一定程度上保证原材料的性能,达到保级回收的目的。

早在 1945 年,Stern 就发明了热挤压技术直接回收加工产生的切屑。近几年,Tekkaya 等对该法进行了优化,即利用冷预压实步骤将铝合金坯片成型为坯料,成功地将这些切屑基坯料直接热挤压成

型材,与传统的回收路线相比,优化后方法潜在节能近 90%<sup>[41]</sup>。

尽管保级利用可实现废铝资源价值最大化,但是只有极少量的优质废旧铝合金,如废旧饮料罐、重熔再生汽车板、飞机用大规格铝合金等能实现其固有价值<sup>[3]</sup>,而对于大部分用铝量较少的行业,闭环回收与保级利用难以实现。

### 2.3 废铝的越级回收方法

根据国际铝业协会统计,目前全球有超过 15 亿 t 铝产品仍处于使用状态,在不久的将来这些铝产品会逐渐进入报废期,废铝的产量会大幅度增加。随着废铝再回收的循环,铝中合金元素的积累不可避免,且随着再生铝量的增加,在不久的将来,采用传统的降级利用技术与保级回收技术已无法消纳这些再生铝,再生铝的产量将超过其用量,越来越多的再生铝合金将不再适合应用,变为“无用金属”,但其主体元素仍为铝。开发新的废铝回收技术,实现铝合金中铝与合金元素的分离,使回收的铝达到原铝的质量水平,即越级回收将实现废铝的彻底再生,是避免铝经过多次循环回收后变为“无用金属”的最好途径。截止 2023 年,越级回收的主要方法有三层液电解精炼法<sup>[42-43]</sup>、偏析法<sup>[42-43]</sup>、离子液体精炼法<sup>[44]</sup>、歧化法、熔析法和熔盐电解法<sup>[45]</sup>等。

#### 2.3.1 三层液电解法

三层液电解法最早于 1901 年由美国铝业的 Hoopes 提出<sup>[43]</sup>,经多年改进,目前已被广泛应用于工业生产高纯铝,该方法也可以用于废铝中铝的回收。三层液电解槽内从下而上分别由合金液层(阳极)、电解质层和精铝层(阴极)组成。应用该电解槽进行铝的提纯时,阳极中的 Al 电化学溶解进入中间的电解质层并穿过电解质层在阴极被电化学还原变成 Al。而阳极中比铝更正电性的杂质(如 Fe、Cu、Si 等)不发生电化学溶解,仍然留在阳极合金中,比铝更负电性的杂质(如 Na、Mg、Ca 等)则会发生电化学溶解进入电解质中,但由于这些杂质阳离子(如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等)的分解电压比铝高,在铝析出时,这些杂质离子不会在阴极放电析出,这样在阴极上就得到纯铝<sup>[46]</sup>。

三层液电解法工艺成熟且适用于大规模生产,但该工艺存在生产成本高、能耗大等问题。

#### 2.3.2 偏析法

偏析法的原理为利用铝结晶在熔融状态下对固

态和熔体中铝含量的偏析现象进行提纯。其本质是利用不同元素在铝熔体中的平衡分配系数的不同来实现铝的提纯。通过多次的偏析操作可以得到极高纯度的金属铝<sup>[46]</sup>。

与三层液电解法相比,偏析法具有能耗成本低,产品极限纯度高的优点,目前主要应用于原铝提取制备高纯铝。偏析法是目前高纯铝企业提纯的发展方向,也可以应用于废铝的提纯。

#### 2.3.3 熔析法(选择性溶解法)

某些金属在一定温度下可以对铝进行选择性溶解,而对其他物质不溶解或溶解度极小,这种可以对铝进行选择性溶解的金属称为提取剂,使用这种方式使金属铝和其他杂质分离的方法称为选择性溶解法。溶解铝后的合金通过其他分离方式将提取剂分离,最终可以得到金属铝。通常用于提取铝的提取剂主要有镁、锌和汞,该方法对于分离铝与硅、铁等有较好的效果<sup>[47-49]</sup>。利用选择性溶解法从废铝合金中提取铝难以获得原铝级别的纯铝,提取的铝中往往含有一定量的硅和其他元素,且处理过程中会导致提取剂有一定的消耗,提取效率低,成本高<sup>[49]</sup>。

#### 2.3.4 离子液体电解法

离子液体又称为室温熔盐,与传统熔盐相比具有熔点低、蒸气压低等特点,广泛用于电化学、有机合成等领域。近年来,离子液体电解铝的方法受到了广泛关注。研究人员采用  $\text{AlCl}_3$ -BMIC、BPC- $\text{AlCl}_3$ 、EMIC- $\text{AlCl}_3$ 、TMPAC- $\text{AlCl}_3$ 、 $\text{AlCl}_3$ - $\text{Et}_3\text{NHCl}$ 、 $\text{AlCl}_3$ -[BMIM] $\text{TF}_2\text{N}$  等离子液体成功电解出铝<sup>[50-59]</sup>。离子液体电解法不仅用于电解生产铝,还可用于从废铝合金中提取纯铝。国外研究学者对 BMIC- $\text{AlCl}_3$  离子液体电解精炼铝合金进行了研究,研究表明,回收公斤纯铝能耗约 3.0 kWh/kg<sup>[54]</sup>。Kamavaram<sup>[54]</sup>使用 BMIC- $\text{AlCl}_3$  离子液体电解铝合金最终得到纯度为 99.89% 的纯铝。离子液体炼铝的方法发展迅速,电能消耗低,并且可以防止气体污染和固体废弃物的产生。裴启飞等<sup>[55]</sup>在  $\text{AlCl}_3$ -BMIC 室温离子液体中,以铝质量比为 75.33% 的废铝合金为可溶阳极,以铜片为阴极,在温度为 80 °C 时获得了纯度超过 99.8% 的纯铝。Kamavaram 等<sup>[44-54]</sup>利用低温  $\text{AlCl}_3$ -BMIC 离子液体作为电解质对铝质量分数为 65%~71% 的铝合金进行电解精炼,得到纯度为 99% 的工业铝,实现污染物零排放。

采用离子液体电解法从废铝中提取铝具有温度低、能耗小、操作成本低等优势,但该方法也存在生产效率低、离子液体成本高、电导率低等问题,限制了其大规模推广应用。

### 2.3.5 无机熔盐电解法

相比于水溶液体系和离子液体,熔盐电解质具有更高的电导率和处置效率,大部分的金属都可采用无机熔盐进行电解。熔盐电解法也可以用于从废铝合金中提取纯铝,其基本原理是以废铝为可溶阳极,以纯铝或碳为阴极,以氯化盐或氯盐与氟化盐混合熔盐为电解质体系进行电解,电解过程中阳极铝溶解到电解质中并在阴极重新析出为纯铝。在该方法中所用的熔盐体系主要有  $\text{NaCl}-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{NaCl}-\text{KCl}$ 、 $\text{NaCl}-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlF}_3$ 、 $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{AlF}_3$ 、 $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{Na}_3\text{AlF}_6$  等。按照电解温度可分为低温熔盐电解、中温熔盐电解和高温熔盐电解。

#### 2.3.5.1 低温熔盐电解

废铝低温熔盐电解提铝一般在  $200\text{ }^\circ\text{C}$  以下的温度进行,所应用的熔盐体系主要为  $\text{AlCl}_3-\text{NaCl}$  和  $\text{AlCl}_3-\text{NaCl}-\text{KCl}$  体系。

张净等<sup>[60]</sup>以废铝为可溶阳极,采用  $\text{NaCl}-\text{AlCl}_3$  二元系进行电解提铝,在  $190\text{ }^\circ\text{C}$  的温度下,获得纯度为  $99.8\%$  的纯铝。

桓书星等<sup>[61]</sup>研究了  $66\% \text{AlCl}_3-20\% \text{NaCl}-14\% \text{KCl}$  (摩尔分数) 低温熔盐体系从粗  $\text{Al}-\text{Si}$  合金中电解提取铝的可行性,在电解温度为  $170\text{ }^\circ\text{C}$  的条件下,阴极提取的铝纯度达到  $99\%$  以上,电流效率在  $94\%$  以上。

黄钰尧等<sup>[62]</sup>研究了  $\text{AlCl}_3-\text{NaCl}-\text{KCl}$  熔盐体系中杂质元素在阴极上的电化学反应,结果表明,随着阴极电位的降低,元素在阴极上的析出顺序为  $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Si} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Mg} > \text{Ca}$ ,通过严格控制可溶阳极中  $\text{Fe}$  和  $\text{Si}$  的电化学溶解,可以提高阴极沉积铝的纯度。

Shoki 等<sup>[63]</sup>研究了  $\text{Al}-\text{Si}$  铸造合金和冷轧合金在  $61\text{AlCl}_3-26\text{NaCl}-13\text{KCl}$  (mol%) 熔盐中的溶解行为,结果表明,在  $150\text{ }^\circ\text{C}$  温度条件下,两种  $\text{Al}-\text{Si}$  合金中的铝均优先从合金中溶解,在阴极上电沉积的铝纯度高达  $99.4\%$ 。

尽管以废铝为可溶阳极,采用低温熔盐电解可在阴极上获得纯度达到原铝级别的金属铝,且能耗

低、成本小,但低温熔盐电解生产效率低,熔盐中氯化铝浓度高,氯化铝易挥发吸水,生产的铝呈细粉状不利于收集。

#### 2.3.5.2 中温熔盐电解法

在低温氯化物电解质体系中,阴极产物多为粒度细小的铝粉。由于铝粉间的结合力偏低,在长时间电解后铝粉堆积层结构不稳定,阴极上析出的铝粉容易与阴极发生脱离,其中一部分铝粉会上浮至电解质表面并被氧化,造成电流效率的降低,而另一部分弥散在电解质中的铝粉会造成阴极和阳极间的短路,进而影响电解的正常进行。因此,将电解温度提高至  $400\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$  使电解获得的铝结晶成致密铝层,可解决低温熔盐电解提取铝的大部分问题,不少学者对此进行了研究。该温度下所采用的熔盐体系主要有  $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{MgCl}_2-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlCl}_3$ 、 $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlF}_3$ 。

Lu X 等<sup>[64]</sup>对以废铝为可溶阳极,纯铝为阴极的中温电解提铝进行研究,在  $\text{LiCl}-\text{KCl}$  及  $\text{MgCl}_2-\text{NaCl}-\text{KCl}$  电解质体系中加入摩尔比  $5\% \text{AlF}_3$  (代替  $\text{AlCl}_3$  以避免挥发性问题),结果表明,在  $500\text{ }^\circ\text{C}$ 、电流密度  $100\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  条件下,两种电解质体系阴极沉积铝纯度均可达  $99.9\%$ 。

黄钰尧等<sup>[65]</sup>对废铝中温电解质体系  $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{AlCl}_3-\text{NaCl}$  的电解提铝进行了研究,在电解温度  $550\text{ }^\circ\text{C}$ 、电流密度  $0.2\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  的条件下,在阴极获得工业级纯铝。

#### 2.3.5.3 高温熔盐电解

随着电解温度提高,电解过程中阴极电流密度的提高,生产效率获得提升。低温熔盐电解阴极电流密度在  $0.01\sim 0.02\text{ A}/\text{cm}^2$ ,中温熔盐电解电流密度在  $0.05\sim 0.2\text{ A}/\text{cm}^2$ ,高温熔盐电解电流密度可达到  $0.60\text{ A}/\text{cm}^2$  以上。因此,高温熔盐电解的生产效率可获得大幅度提高。废铝的高温熔盐电解提铝一般在  $680\sim 720\text{ }^\circ\text{C}$  的温度下进行,电解获得的金属铝呈液态,阳极仍为固态。李博等<sup>[66]</sup>在  $\text{NaCl}-\text{KCl}-\text{Na}_3\text{AlF}_6$  体系中采用熔盐电解法从铝硅铁合金中提取出金属铝,结果表明,在电流密度  $0.60\text{ A}/\text{cm}^2$ 、电解温度  $690\text{ }^\circ\text{C}$ 、极距  $3\text{ cm}$  的最佳电解条件下,阴极得到的沉积铝纯度可达  $93.21\%$ ,电流效率达到  $90\%$  以上。

高温熔盐电解生产效率高,但由于电解温度高,在该温度下铝合金一般呈液态,阳极呈固态,目前只

用于高硅的铝硅系合金提铝。

### 3 废铝回收存在的主要问题及未来趋势

目前,我国废铝回收仍然以重熔熔炼降级利用为主,再生铝中合金元素不能被去除,回收铝中残留的合金元素及杂质含量无法控制,难以得到符合锻造铝要求的材料,大部分的再生铝被用于生产铸造铝合金。未来随着再生铝量的增加和降级铝合金应用市场的饱和,再生铝的产量将超过其需求量,最终变为“死金属”。据预测,到2040年,除非开发和实施创新的铝回收技术,否则360万t二次铝将成为“死金属”<sup>[64]</sup>。

随着我国大量的铝产品进入报废期,废铝回收量大幅度增加,废铝如果进一步扩大应用,就必须解决废铝循环过程中合金与杂质元素增加的问题,开发新的废铝提质技术,主要方向是废铝的保级利用和废铝中铝的再生技术。闭环回收与保级利用是目前再生铝发展的最佳方向,其不仅回收成本低,而且能够使废铝资源价值最大化。目前,国外废旧易拉罐闭环回收保级利用体系已非常成熟,汽车废铝与航空航天废铝闭环回收系统也已建立。废铝的闭环回收与保级利用对行业的集中度要求较高,对于一些较大的用铝行业 and 用户,如汽车和航空行业,废铝的闭环回收与保级利用相对容易实现,但对于大部分用铝量相对较少且比较分散的行业,闭环回收与保级利用难以实现。

随着废铝再回收的循环,铝中合金元素的积累不可避免,对结构特性的影响将使其无法满足应用需求。开发新的废铝回收技术迫在眉睫,废铝中铝的高效分离提取将会完成废铝的彻底再生,是废铝资源化的最佳途径,也是彻底解决再生铝质量问题的核心关键。无机熔盐电解法是最具发展前景的废铝提铝再生技术。

### 4 结语及展望

1)传统的废铝重熔回收工艺仅去除部分的杂质与合金元素,生产的再生铝只能进行降级回收,附加值低。当再生铝产量远高于需求量时,废铝终将成为“无用金属”。

2)废铝的保级回收能保持废铝的价值,是目前较理想的回收方式之一,但对废铝原料品质要求高且应用面窄,因此应用局限性过高。

3)废铝的越级回收技术能够使废铝中铝与合金元素分离,使再生铝达到更高的质量水平、更高的利用价值和更广的利用途径。高效低成本的废铝越级回收方法是未来再生铝行业的主要方向。越级回收中的可溶阳极熔盐电解法可使废铝合金中的铝直接沉积在阴极,阴极获得的再生铝纯度可达到原铝的质量水平,如果能成功应用于废铝的回收,则有望解决再生铝中合金元素堆积的问题,改变全球铝循环,是最具有发展前景的废铝回收技术。

#### [参考文献]

- [1] European Aluminium. A strategy for achieving aluminium's full potential for circular economy by 2030 [R/OL]. [https://europeanaluminium.eu/media/2931/2020-05-13\\_european-aluminium\\_circular-aluminiumaction-plan\\_executive-summary.pdf](https://europeanaluminium.eu/media/2931/2020-05-13_european-aluminium_circular-aluminiumaction-plan_executive-summary.pdf), 2020.
- [2] ALUMINIUM E. European Aluminium's contribution to the Eu's mid-century low-carbon roadmap [J]. European Aluminium: Brussels, Belgium, 2019.
- [3] 韦漩,王海娟,刘春伟,等. 废旧铝合金回收利用的研究现状[J]. 过程工程学报, 2019, 19(1): 45-54.  
WEI Xuan, WANG Haijuan, LIU Chunwei, et al. A review on recycling of waste aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(1): 45-54.
- [4] PADAMATA S K, YASINSKIY A, POLYAKOV P. A review of secondary aluminum production and its byproducts [J]. JOM, 2021, 73(9): 2603-2614.
- [5] 中国再生铝行业发展概况、市场供求情况、市场容量及影响行业发展的主要因素分析[J]. 资源再生, 2020(10): 43-47.  
China secondary aluminum industry development, market supply and demand, market capacity and analysis of the main factors affecting the development of the industry [J]. Resource Recycling, 2020, (10): 43-47.
- [6] LI Y, YUE Q, HE J, et al. When will the arrival of China's secondary aluminum era? [J]. Resour Policy, 2020, 65: 101573.
- [7] 马艳. 节能减排显效 再生铝发展迈上新台阶[N]. 2023-08-22.  
MA Yan. Energy saving, emission reduction, and efficient development of recycled aluminum have reached a new level[N]. 2023-8-22.
- [8] 邓旭. 2023年再生铝产业绿色发展会议召开[N]. 2023-08-19.  
DENG Xu. 2023 Conference on Green Development of Regenerated Aluminum Industry Convened[N]. 2023-08-19.
- [9] 周飞霓. 浅谈我国再生铝产业现状及发展对策[J]. 河北企业, 2022(5): 48-50.  
ZHOU Feini. On the Current Situation and Development Strategies of China's Recycled Aluminum Industry [J]. Hebei enterprise journal, 2022(5): 48-50.
- [10] 胡妙关. 废铝再生技术分析对策[J]. 中国金属通报,

- 2021, (07): 17-18.
- HU Miaoguan. Analysis and countermeasures of waste aluminum recycling technology[J]. China Metals Bulletin, 2021, (07): 17-18.
- [11] 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.
- HAN Zhengying, CAO Ying. Analysis on application and development prospect of recycled aluminum [J]. Nonferrous Metals Processing, 2023, 52(3): 6-7.
- [12] 卢勇. 废铝资源再生研究现状[J]. 四川有色金属, 2020(2): 44-47.
- LU Yong. Research status of aluminium scrap recycling [J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2020(2): 44-47.
- [13] 王爱慧, 刘京青, 李开颜. 电解铝, 这5年[N]. 2022-04-28.
- WANG Aihui, LIU Jingqing, LI Kaiyan. Electrolytic Aluminum, this 5 years[N]. 2022-04-28.
- [14] 葛红林. 党领导下的电解铝法治化市场化改革回顾和启示[N]. 2023-04-04.
- GE Honglin. Review and enlightenment of the market-oriented reform of electrolytic aluminum under the leadership of the CPC [N]. 2023-04-04.
- [15] 薛亚洲, 张涛, 郭艳红. 我国再生铝产业发展的思考[J]. 中国矿业, 2010, 19(9): 4-7.
- XU Yazhou, ZHANG Tao, GUO Yanhong. Thoughts about recycled aluminum industry in China [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(9): 4-7.
- [16] ZHANG Y, CAI Y, LIU S, et al. Life cycle assessment of aluminum-silicon alloy production from secondary aluminum in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 392: 136214.
- [17] PARASKEVAS D, KELLENS K, RENALDI, et al. Sustainable metal management and recycling loops: life cycle assessment for aluminium recycling strategies; proceedings of the re-engineering manufacturing for sustainability[C]//Springer Singapore. 2013.
- [18] NEE A Y C, SONG B, ONG S K, et al. Re-engineering Manufacturing for Sustainability [M]. Re-engineering Manufacturing for Sustainability, 2013.
- [19] GEYER R, KUCZENSKI B, ZINK T, et al. Common misconceptions about recycling [J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(5): 1010-1017.
- [20] HELBIG C, HUETHER J, JOACHIMSTHALER C, et al. A terminology for downcycling[J]. Journal of Industrial Ecology, 2022, 26(4): 1164-1174.
- [21] 张深根. 废铝易拉罐和报废飞机铝合金保级循环利用技术[J]. 资源再生, 2017(7): 60-61.
- ZHANG Genshen. Waste aluminum cans and scrap aircraft aluminum alloy recycling technology [J]. Resource Recycling, 2017(7): 60-61.
- [22] 杨富强, 熊慧. 再生铝产业转型升级关键词——闭环回收、保级利用、铝加工与再生铝的紧密合作[J]. 资源再生, 2020(3): 16-19.
- YANG Fuqiang, XIONG Hui. Keywords for the transformation and upgrading of the recycled aluminum industry [J]. Resource Recycling, 2020(3): 16-19.
- [23] RAABE D, PONGE D, UGGOWITZER P J, et al. Making sustainable aluminum by recycling scrap: The science of “dirty” alloys[J]. Prog Mater Sci, 2022, 128: 150.
- [24] PARASKEVAS D, KELLENS K, RENALDI R, et al. Closed and open loop recycling of aluminium: a life cycle assessment perspective[C]// Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing-Innovative Solutions. Technische Universität Berlin; Berlin, Germany, 2013: 305-310.
- [25] 苏鸿英. 闭环回收再生系统成为废铝再生的捷径[J]. 有色金属再生与利用, 2005(11): 7-7.
- SU Hongying. The closed-loop recycling system is a shortcut to recycle waste aluminum [J]. Resource Recycling, 2005(11): 7-7.
- [26] 杨富强. 闭环回收助推再生铝产业跨越式发展[J]. 资源再生, 2020(10): 18-21.
- YANG Fuqiang. Closed-loop recycling boosts the leapfrog development Closed-loop recycling boosts the leapfrog development of the secondary aluminum industry [J]. Resource Recycling, 2020(10): 18-21.
- [27] 谭国寅, 孙彦华, 陈劲戈, 等. 用部分废铝为原料生产 A356.2 铝合金锭及其性能评价[J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(10): 20-22.
- TAN Guoyan, SUN Yanhua, CHEN Jingge, et al. Production and performance evaluation of A356.2 aluminum alloy ingot with partial scrap Al as the raw material [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49(10): 20-22.
- [28] CAPUZZI S, TIMELLI G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review[J]. Metals, 2018, 8(4): 24.
- [29] MODARESI R, MÜLLER D B. The role of automobiles for the future of aluminum recycling [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(16): 8587-8594.
- [30] 杨淇, 喻子彧, 马维喆, 等. 激光诱导击穿光谱应用于金属可靠性评价的研究进展[J]. 冶金分析, 2023, 43(7): 1-10.
- YANG Qi, YU Ziyu, MA Weizhe, et al. Research progress of laser-induced breakdown spectroscopy in metal reliability evaluation [J]. Metallurgical Analysis, 2023, 43(7): 1-10.
- [31] BUTNARIU I, BUTNARIU D, BUTNARIU I. Studies and researches concerning the presence of iron in secondary aluminium meltings and valorification of some aluminium waste [C]//Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2011, 690: 250-253.
- [32] CAO X, CAMPBELL J. Morphology of  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi phase in Al-Si cast alloys [J]. Materials Transactions, 2006, 47(5): 1303-1312.
- [33] TIMELLI G, FIORESE E. Methods to neutralize the effects of iron in Al-Si foundry alloys [J]. Metall Ital, 2011, 103(3): 9-23.

- [34] LU L, DAHLE A K. Iron-rich intermetallic phases and their role in casting defect formation in hypoeutectic Al-Si alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36: 819-835.
- [35] 王耀武, 冯乃祥, 尤晶, 等. 氯化锰去除铝硅合金中铁杂质的研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2008, 36(4): 10-13.  
WANG Yaowu, FENG Naixiang, YOU Jing, et al. Study on Fe Removal by  $MnCl_2$  from Al-Si Alloy [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2008, 36(4): 10-13.
- [36] YOU J, WANG Y W, FENG N X, et al. Preparation of casting alloy ZL101 with coarse aluminum-silicon alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(1): 116-120.
- [37] 尤晶, 王耀武, 冯乃祥, 等. 稳恒电磁场对铸造用共晶铝硅合金中铁相的影响研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2008(1): 26-30.  
YOU Jing, WANG Yaowu, FENG Naixiang, et al. Study on the Influence of Steady Electromagnetic Field on Iron Phase of the Casting Eutectic Al-Si Alloy [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2008(1): 26-30.
- [38] 赵静蕊. 硼(B)和钕(Nd)在去除再生铝合金中铁杂质的机理研究[R]. 山东省, 山东省科学院新材料研究所, 2018.  
ZHAO Jingrui. Mechanism of removal of iron impurities from regenerated aluminum alloy by boron (B) and neodymium (Nd) [R]. Shandong province, Institute of New Materials, Shandong Academy of Sciences, 2018.
- [39] SUN Y, HUANG X, LIU C, et al. Impurity iron separation from molten secondary aluminum by pulsed electric current [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 934: 167903.
- [40] 张佳虹, 邢书明, 程炳超, 等. 回收铝料成分识别与保级再生 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36: 528-532.  
ZHANG Jiahong, XING Shuming, CHENG Bingchao, et al. Component identification and former grade regeneration in recycling aluminum material process [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2016, 36: 528-532.
- [41] PARASKEVAS D, VANMEENSEL K, VLEUGELS J, et al. Spark plasma sintering as a solid-state recycling technique: The case of aluminum alloy scrap consolidation [J]. *Materials*, 2014, 7(8): 5664-5687.
- [42] KONDO M, MAEDA H, MIZUGUCHI M. The production of high-purity aluminum in Japan [J]. *JOM*, 1990, 42(11): 36-37.
- [43] CURTOLO D C, XIONG N, FRIEDRICH S, et al. High-and ultra-high-purity aluminum, a review on technical production methodologies [J]. *Metals*, 2021, 11(9): 22.
- [44] ZHANG M M, KAMAVARAM V, REDDY R G. New electrolytes for aluminum production: Ionic liquids [J]. *JOM-J Miner Met Mater Soc*, 2003, 55(11): A54-A57.
- [45] YANG Q Q. The new developments of molten salt electrochemistry [J]. *Journal of Electrochemistry*, 2001, 7(1): 14.
- [46] 楼岳, 伍志铭, 黄奎, 等. 高纯铝生产与应用的研究及发展展望 [J]. *铝加工*, 2021(2): 3-6.  
LU Yue, WU Zhiming, HUANG Kui, et al. Research progress of high purity aluminum production and application [J]. *Aluminium Fabrication*, 2021(2): 3-6.
- [47] GAO T, LI Z, ZHANG Y, et al. Evolution of Fe-rich phases in Mg melt and a novel method for separating Al and Fe from Al-Si-Fe alloys [J]. *Materials & Design*, 2017, 134: 71-80.
- [48] 姚广春, 孙挺, 张晓明, 等. 电热还原高岭土制取铝硅合金的研究 [J]. *有色金属*, 1997(4): 46-49.  
YAO Guangchun, SUN Ting, ZHANG Xiaoming, et al. Preparation of Al-Si Alloy by electro thermal process of KAOLIN [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 1997(4): 46-49.
- [49] LI B, WANG Y, GAO B. Extraction of Al from coarse Al-Si alloy by the selective liquation method [J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3680.
- [50] 单南南, 潘志云, 赵曰剑, 等. 超重力条件下  $AlCl_3$ -BMIC 离子液体电沉积铝的研究 [C]//中国化工学会年会. 2013 中国化工学会年会论文集. DOI: ConferenceArticle/5af33f7dc095d70f18b36518.
- SHAN Nannan, PAN Zhiyun, ZHAO Yuejian, et al. Study on electrodeposition of aluminum in  $AlCl_3$ -BMIC ionic liquid under supergravity conditions [C]// Annual Conference of Chinese Chemical Society. 2013. DOI: ConferenceArticle/5af33f7dc095d70f18b36518.
- [51] KARTHIKA B, MOHAN S, BERA A, et al. Structure, microstructure and electrodeposition behaviours of aluminium from  $AlCl_3$ -EMIC and  $AlCl_3$ -BMIC ionic liquid electrolytes-a comparative study [J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(9): 1012-1021.
- [52] 狄超群, 张鹏远, 徐联宾, 等. 磁力搅拌下离子液体  $AlCl_3/Et_3NHCl$  恒电流法电沉积铝 [J]. *化工进展*, 2011, 30(10): 2151-2157.  
DI Chaqun, ZHANG Pengyuan, XU Lianbin, et al. Electrodeposition of aluminum in ionic liquid  $AlCl_3/Et_3NHCl$  by constant current method under magnetic stirring [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(10): 2151-2157.
- [53] ZHENG Y, WANG Q, ZHENG Y, et al. Electrolytic recovery of aluminum from 1-Butyl-3-methylimidazolium Bis (trifluoromethanesulfonyl) imide ionic liquid containing  $AlCl_3$  [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(9): 220968.
- [54] KAMAVARAM V, MANTHA D, REDDY R G. Electrorefining of aluminum alloy in ionic liquids at low temperatures [J]. *Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy*, 2003, 39(1-2): 43-58.
- [55] 裴启飞.  $AlCl_3$ -BMIC 离子液体电解精炼铝中杂质行为研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.  
PEI Qifei. Study on impurity behavior in electrolytic refining of aluminum by  $AlCl_3$ -BMIC ionic liquid [D]. Kunming University

of Science and Technology, 2014.

- [56] 尹小梅, 徐联宾, 陈建峰. 超重力场下  $\text{AlCl}_3$ -BMIC 离子液体电沉积铝的电化学[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(08): 2316-2322.  
YIN Xiaomei, XU Lianbin, CHEN Jianfeng. Electrochemistry of electrodepositing aluminum from  $\text{AlCl}_3$ -BMIC ionic liquid in high gravity field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(08): 2316-2322.
- [57] KARTHIKA B, MOHAN S, BERA A, et al. Structure, microstructure and electrodeposition behaviours of aluminium from  $\text{AlCl}_3$ -EMIC and  $\text{AlCl}_3$ -BMIC ionic liquid electrolytes-a comparative study[J]. Surface Engineering, 2020, 36(9): 1-10.
- [58] 高丽霞, 王丽娜, 齐涛, 等. 离子液体  $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$  中电沉积法制备金属铝[J]. 物理化学学报, 2008(6): 939-944.  
GAO Lixia, WANG Lina, QI Tao, et al. Electrodeposition of aluminium from  $\text{AlCl}_3/\text{Et}_3\text{NHCl}$  ionic liquids[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2008(6): 939-944.
- [59] PRADHAN D, REDDY R G. Dendrite-free aluminum electrodeposition from  $\text{AlCl}_3$ -1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid electrolytes[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(3): 519-531.
- [60] 张净.  $\text{AlCl}_3$ -NaCl 熔盐中废旧铝合金精炼研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.  
ZHANG Jing. Study on refining of waste aluminum alloy in  $\text{AlCl}_3$ -NaCl molten salt [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [61] HUAN S, WANG Y, PENG J, et al. Recovery of aluminum from waste aluminum alloy by low-temperature molten salt electrolysis [J]. Minerals Engineering, 2020, 154: 106386.
- [62] HUANG Y, WANG Y, YANG J, et al. Study on the cathodic behavior of impurities in the process of aluminum extraction by soluble anode electrolysis [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2022, 169(6): 063505.
- [63] OYA S, NUNOMURA J, MATSUSHIMA H, et al. Dissolution characteristics of Al-Si alloys in  $\text{AlCl}_3$ -NaCl-KCl molten salt at 423 K [J]. Electrochemistry, 2022, 90(12): 127001-127001.
- [64] LU X, ZHANG Z, HIRAK T, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap [J]. Nature, 2022, 606(7914): 511-515.
- [65] 黄钰尧. 一次 Al-Si 合金电解提铝的工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2023.  
HUANG Yuyao. A process study on the electrolytic extraction of aluminum from Al-Si alloy [D]. Shenyang: Northeastern University, 2023.
- [66] 李博, 王耀武, 高炳亮, 等. 铝硅铁合金可溶阳极电解提取金属铝的研究[J]. 轻金属, 2020(3): 13-17.  
LI Bo, WANG Yaowu, GAO Bingliang, et al. Study on the extraction of aluminum from Al-Si-Fe alloy by soluble anode electrolysis [J]. Light Metals, 2020(3): 13-17.

## Research status of scrap aluminum recycling

LI Ruoyu<sup>1</sup>, WANG Yaowu<sup>1</sup>, GUO Bujun<sup>1</sup>, PAN Shengjin<sup>2</sup>, WANG Chang<sup>2</sup>, WANG Ke<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Zouping County Hongzheng New Material Technology Co. Ltd., Zouping 256299, China)

**Abstract:** Aluminum and aluminum alloys have strong corrosion resistance, very low loss and high recycling value. Promoting the recycling of spent aluminum can significantly reduce energy consumption and carbon emissions in the aluminum industry. In this paper, the process of downcycling, equivalent recycling and upcycling of spent aluminum is summarized, and the advantages and disadvantages of each process are analyzed. The traditional spent aluminum remelting degradation regeneration process can not completely remove the alloying elements and metal impurities in aluminum, recycled aluminum can only be degraded, but with the increase of recycled aluminum, the traditional degradation utilization technology will not be able to use so much recycled aluminum. Grade protection recycling can maximize the value of spent aluminum resources, but only a very small number of high-quality spent aluminum alloys can realize its inherent value, and it is difficult to achieve most of the spent aluminum resources. Spent aluminum Upcycling technology can separate aluminum and alloying elements, so that the recovered aluminum can reach the quality level of primary aluminum, and can realize the complete regeneration of spent aluminum, which is the best way to recycle waste aluminum. Molten salt electrolysis is the most promising technology for extracting aluminum from spent aluminum.

**Key words:** scrap aluminum recycling; recycled aluminum quality; downcycling; equivalent recycling; upcycling; molten salt electrolysis method