

废铝回收、分离和分选的发展现状及挑战

王 飞 罗旭东 张峰峰 于洪臣
(天津忠旺铝业有限公司)

摘 要 废铝的回收、分离和分选、再生应用对解决资源紧张、能源短缺和降低环境污染具有积极意义。分别介绍了国内外废铝回收和资源配置等领域的发展现状。概述了近年来废铝分离和分选技术的应用和研究,并基于成本、效率以及环境影响等因素,简要分析了这些技术在实际应用中的优缺点。最后,分析总结了废铝回收、分离和分选领域面临的挑战和相关对策,以期对相关领域的科学研究、工程应用和发展规划提供参考。

关键词 废铝;回收;分离;分选;再生铝

中图分类号 TF805.2;TG146.21

文献标志码 A

DOI 10.15980/j.tzzz.2023.09.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development Status and Challenges of Recycle, Separation and Sorting of Aluminum Scrap

Wang Fei, Luo Xudong, Zhang Fengfeng, Yu Hongchen
(Tianjin Zhongwang Aluminium Co., Ltd.)

Abstract: The recovery, separation, sorting and recycling of aluminum scrap is of practical significance to solve resource shortage, energy shortage and reduce environmental pollution. The development status of aluminum scrap recycles and resource allocation in domestic and overseas was introduced. The application and investigation of waste aluminum separation and sorting technologies in recent years were reviewed, and the advantages and disadvantages of these technologies in practical applications based on cost, efficiency and environmental impact were briefly summarized. Finally, the challenges and related countermeasures in the field of waste aluminum recycle, separation and sorting were analyzed, aiming to provide reference for scientific research, engineering application and development in related fields.

Key Words: Aluminum Scrap, Recycle, Separation, Sorting, Recycled Aluminum

资源与环境是制约经济发展的两大瓶颈,发展循环经济是可持续发展的必然选择。石油、煤炭和木材等自然资源消耗得多,导致地球变暖的元凶 CO₂ 也制造得多,带来越来越多的挑战,目前“双碳”目标已经纳入国家总体发展战略。铝是现代工业的基础原材料,主要来源于电解铝和再生铝,而再生铝单位产品能耗、碳排放分别为电解铝的 5%、2%^[1]。

发展再生铝产业不仅对补充铝原材料供给、提高资源利用效率具有积极意义,还是铝工业可持续发展的重要途径。在“双碳”背景下,再生铝产业发展面临着历史性的发展机遇与挑战,有着巨大的发展潜力和空间。废铝的回收、分离和分选承担着将分散的废铝进行“汇聚”和预处理加工的任务,是再生铝应用的前提和基础。本研究介绍了国内外在废铝回收和资源配置等领域的发展

现状,概述了近年来废铝分离和分选技术的应用和研究,简要分析了这些技术在实际应用中的优缺点,以及废铝回收、分离和分选领域面临的挑战和相关对策。

1 废铝回收的发展现状

1.1 旧废铝和新废铝

国际上通常根据来源不同,将废铝分为旧废料(Old Scrap)和新废料(New Scrap)。旧废料也被称为消费后废料(Post-consumer Scrap),是产品的最终用户(包括销售端)使用后的、无法再用于原用途的材料,如从报废的汽车零部件、房屋改造过程中拆换下来的铝合金门窗和废旧铝易拉罐等。新废料也被称为工艺废料(Process Scrap)或消费前废料(Pre-consumer Scrap),

收稿日期:2022-11-08;修改稿收到日期:2022-12-09

第一作者简介:王飞,男,1986 年出生,硕士,天津(301700),E-mail:wangf@zhongwangtj.com

通信作者:罗旭东,男,1979 年出生,高级工程师,天津(301700),E-mail:luo_xudong@126.com

引用格式:王飞,罗旭东,张峰峰,等. 废铝回收、分离和分选的发展现状及挑战[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 194-1 199.

WANG F, LUO X D, ZHANG F F, et al. Development status and challenges of recycle, separation and sorting of aluminum scrap[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 194-1 199.

包括在铝产品出售给最终用户之前,铝制半成品和成品的生产制造过程中产生的废料、边角料和不良品等^[2-3]。

从资源回收的角度来看,新废铝的产出量与铝产品总产量的比率相对稳定,化学成分明确,因此新废铝比旧废铝能更好地进行分类。旧废铝的来源高度分散且不易预测,常常附着其他金属、非金属及杂物,污染比较严重,通常需要进行拆解、破碎、分选和加工等预处理^[3]。

从再生和应用的角度来看,新废铝和旧废铝再生时所消耗的能源均明显少于电解铝,但含有旧废铝的再生铝产品更具低碳环保的属性。通常在工厂内部产生并直接循环利用的新废铝,如成分已知的铸造头尾料、轧制切边料和冲压挤压余料等,在计算铝产品中回收含量(Recycled Content)时不计入在内。在评价一种再生铝产品时,不仅要关注其原料中包含了多少回收成分,更应该关注其使用的是新废料还是旧废料,是来自于其本身废料还是来自于更容易被回收的废料。

1.2 欧美废铝回收和再生现状

发达国家对废铝资源的开发和研究起步较早,废铝资源也比较丰富,再生铝产量已经普遍超过电解铝产量。数据表明,欧洲的再生铝产量占铝产品总量的60%,美国的已达到80%^[4-5]。

在废铝资源回收端,欧美发达国家不断完善回收体系和法规,中小型家族企业面临着越来越高的监管和环境成本,被大型公司收购或合并已成趋势,行业集中度不断提高。欧洲通过改进回收和分选技术、限制优质废料资源出口等措施不断提高再生铝的用量和应用范围。2020年4月欧洲铝业协会发布了《再生铝行动计划》,目标是到2030年确保所有报废铝产品在欧洲得到有效收集、回收和利用,以减少对进口资源的依赖^[6]。

德国是欧洲铝回收行业的领跑者之一,其电气工程、建筑施工、机械工程用铝接近100%被回收,机动车辆用铝的这一比例约为95%,包装用铝约为76%^[7]。根据美国地质调查局的数据,美国再生铝的原料中新废料约占53%,旧废料约占47%,主要来源于交通、包装和建筑等行业^[5]。

在废铝再生和应用端,为追求废铝资源价值最大化,欧美很多大型铝回收公司和铝加工厂联合开展闭环回收,不断提高深加工能力、向终端产品靠拢,从而实现废铝的保级使用。全球最大的铝回收商Novelis公司公布的数据显示其2020-2021财年使用的原材料中再生铝占61%以上,产品广泛应用于包装容器、汽车和建筑装饰行业。Novelis公司每年回收超过740亿个饮料罐,还分别与捷豹路虎和日产建立了汽车用铝板闭环回

收系统以回收汽车制造过程中产生的冲压废料。生产的汽车用铝板中的再生铝含量可达75%以上,建筑装饰用铝材产品中的再生铝含量可高达80%~90%。美国Arconic公司生产的罐体料卷材含有约70%的再生成分,而工装和夹具铝合金产品中包含的再生铝几乎达到100%^[8]。Constellium公司的再生铝占原材料投入的40%以上(其中18%是旧废料,22%是新废料),其在法国、美国、捷克和瑞士均建有再生铝工厂^[9-10]。

1.3 我国的废铝回收的发展现状

我国再生铝产业起步较晚,20世纪70年代后期才开始。在计划经济时期,废铝的回收主要由供销合作社系统的物资回收公司和物资系统的金属回收公司承担,但当时社会面废铝储量很小,再生铝生产规模不大。20世纪80年代末至90年代初,政府对废旧物资的回收经营权逐渐放开,民营企业不断介入,成为主要的回收力量。从20世纪90年代中期开始,我国再生铝产业进入快速发展期,产量持续增长。虽然近10年我国再生铝产量显著增长,但同期的电解铝产量的增幅更大,所以再生铝产量的占比一直不足20%(见图1)。国家进行供给侧结构性改革以来,国内电解铝总产能上限已基本确定在4500万t/a,目前产能已逐渐逼近上限。再生铝产业的发展可以减少对矿产资源的依赖,具有节能减排的优势,在“双碳”背景下,我国再生铝产业存在巨大的发展潜力和空间。

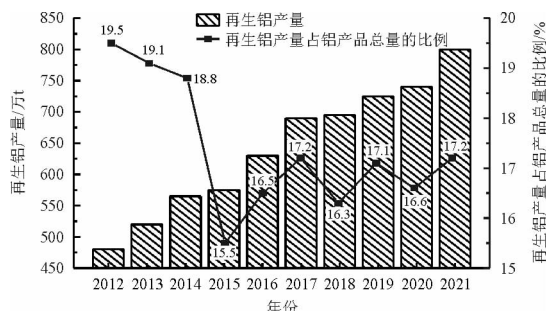


图1 国内再生铝产量及其占铝产品总量的比例(2012~2021年)
Fig.1 Domestic output of recycled aluminum and proportion in total aluminum products

能否获取供应稳定和成本低廉的废铝资源决定了再生铝企业的盈利水平,也成为再生铝企业生存和发展的关键问题。除了几家在海外自营收购公司或有固定供料渠道的企业,我国大部分再生铝企业不能获得稳定的废铝供货渠道。我国含铝废料进口量在2010年和2011年达到峰值285万t/a,随着环境保护力度的加大,废铝进口政策趋严,含铝废料进口量近十年来呈下降趋势,2020年降至82万t/a(见图2)。国家为推动再生铝产业发展,扩大再生铝资源供给,明确提出符合GB/T 38472的再生铝原料不属于固体废物,可以合法

合规地进口,因此 2021 年含铝废料进口量略有回升。近年来,随着铝制品报废周期逐步到来,国内废铝的供应量不断增加(见图 2),已成为再生铝生产企业的资源供应的主渠道。

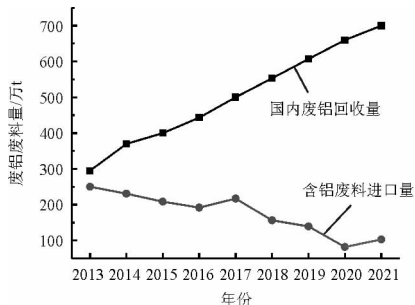


图 2 国内废铝回收量和含铝废料进口量(2013~2021 年)

Fig.2 Amount of domestic recycled aluminum and import of aluminum scrap

受原料供应、精废价差和产品同质化等因素影响,单纯的再生铝企业难以获得理想的收益,部分再生铝企业不断向上、下游扩展业务范围,创建回收-分拣-冶炼-加工一体化的产业链。目前国内再生铝企业中产能较大的企业(如立中集团、新格集团、怡球金属和顺博合金)均以生产再生铸造铝合金为主。随着明泰铝业和南山铝业等铝加工企业进入再生铝领域,再生变形铝合金产品有望成为主要的增长点,这些企业回收下游客户的加工废料,在建立闭环回收体系和保级利用上更有优势。

2 废铝分离、分选技术的现状与发展

利用废铝(特别是旧废铝)为原料生产再生铝合金的主要难度在于化学成分的控制,首先需要对废铝原料进行有效地分选处理,目的是去除废铝中夹杂的其他金属及非金属杂质,或将不同牌号和等级的铝合金废料分开,从而使废料中的合金元素得到最大程度的利用,并获得成分合格的再生铝产品。对于旧废铝,通常需要先进行拆解、破碎或剪切等处理,然后根据材料的物理、化学、机械性质和冶金成分的不同,采用一种或者几种方法对废铝进行分离、分选处理^[11-12],为生产高品质再生铝合金打下良好基础。

2.1 其他金属和非金属杂质的分离

2.1.1 风选分离(Air Separation)

风选分离是根据材料密度的不同,利用一定压力的风将废铝料中的橡胶、塑料、木头、废纸和尘土等密度较小或粉末状的杂质吹走,从而达到分离的目的。风选分离法的工艺简单、操作方便,其主要缺点是可能造成饮料罐等质量较轻或尺寸较小的废铝的损失。另外,风选

分离还必须配备较好的除尘系统和一个相对密闭的工作区域,以避免造成环境污染和人体伤害。

2.1.2 涡流分离(Eddy Current Separation)

涡流分离法是根据金属材料处在交变磁场中时,其内部会形成涡电流,而磁场对携带涡电流的具有不同电导率的金属材料产生不同的排斥力,将金属材料抛出不同的距离,从而达到分离的目的。涡流分离法可以将铝废料与非金属如塑料、玻璃和橡胶等材料进行分离,也能将铝和其他有色金属如 Cu、Mg 和 Zn 等进行分离,但其投资较大,对于小颗粒分离效率不高。

2.1.3 浮选分离(Sink/Float Method)

浮选分离是利用水或重液体为介质对密度不同的材料进行分离的方法,常用于废铝与塑料、木头和其他不同密度的有色金属的分离。该方法需要较大的分离容器及较好的封闭回路净化系统来保证介质密度不变,对于一些空心或船形的金属部件的分离效果不理想,且经过浮选分离处理的废料需要进行干燥和清洁,这意味着额外成本和更长的时间^[13-14]。

2.1.4 磁选分离(Magnetic Separation)

Fe 很难从铝液中去除,通常会形成脆性金属间化合物,影响铝制品的最终力学性能,是再生铝中最主要的有害元素,严重影响铝废料的回收性。磁选分离方法工艺简单、投资成本低,是用于分离有色金属和磁性材料的常见和有效的方法。由于废钢铁通常以机械紧固件,连接螺钉或镶嵌件的形式与废铝连接或组装在一起,因此铝废料通常要先进行拆解或破碎处理才能进入磁选分离工序。

2.2 不同系列铝合金的分选

分选不同系列铝合金比分离其他金属和非金属杂质困难得多,目前受到关注的分选方法包括颜色分选、光谱学方法和热机械方法。

颜色分选是基于不同系列的铝合金废料的颜色差异进行分选。一般来说,较高的 Si 和 Mn 含量会使废料外观变灰,而 Zn 和 Cu 会使其变暗。该方法可以通过对废料进行预先化学腐蚀使不同合金之间的颜色差别更加明显。分选处理是一个计算机图形分析过程,需要配备特殊的光源系统和强大数据处理能力的单元,受表面粗糙度、清洁程度和腐蚀时间等因素影响较大,另外该方法在处理同一系列颜色相差不大的合金时易出现误判^[13,15]。

光谱学方法常用于分析各种合金的元素组成,近年来激光诱导击穿光谱(LIBS)和 X 射线荧光(XRF)方法通过与机械分离装置紧密结合应用于废铝的分选^[16]。

激光诱导击穿光谱(LIBS)技术是通过激光脉冲聚

焦于待测金属表面形成等离子体,进而对等离子体发射光谱进行分析以确定金属元素成分以及含量的方法。X 射线荧光(XRF)技术是利用 X 射线来激发待测金属,金属中的原子受到激发会放射出包含特定的能量特性或波长信息的荧光(次级 X 射线),探测系统收集到这些信息后将转换成待测金属中所含元素的种类及含量。LIBS 和 XRF 可以用于变形铝合金和铸造铝合金的分选,并按合金系别分选变形铝合金,该方法对废铝表面清洁程度有较高要求,废铝表面的油污、涂层和氧化物等都可能设备无法做出准确判断^[17-18]。

热机械方法也称为热破碎技术(Hot-crush technique)。铸造铝合金含有较多的合金元素,其共晶温度比变形铝合金低,将两者混合加热到某一较高温度,可使铸造铝合金部分熔化,而此时变形铝合金仍是固体。将高温混合废料进行破碎处理,铸造铝合金很容易被破碎为细小的碎片,而变形铝合金只发生塑性变形,从而通过筛分将铸造铝合金和变形铝合金分离^[19-20]。

2.3 其他分离、分选方法

铝合金在许多产品应用中与其他材料结合使用,对某些具有难以分离的组合件、镶嵌件、包覆层和涂层的废料,可以采用一些特定的方式来处理^[21-22],如带有其他金属件的铝和铝合金可以放在专用的熔化炉里加热,分段控制加热温度和时间,利用不同材料熔点和密度的差异进行分离;对于废铝线外部包裹的橡胶或塑料,可采用加热或冷冻与机械剥离相结合的方法,先通过加热使其软化或冷冻使其失去塑性,然后再通过机械的方式进行剥离;对于铝纸、铝塑等复合材料,无法通过传统工艺回收,可采用搅拌制浆和热解炭化等方法,分别回收纸浆和铝箔;对于表面有油污和漆料等污染物的废铝可采用溶剂清洗,若不便清洗,可采用回转炉、双室炉等专用设备进行预处理。

尽管可以使用各种方法来分离和分选废铝,但目前每年仍有大量的废铝流向垃圾填埋场和焚烧炉。在焚烧过程中,除一部分薄铝箔和复合箔燃烧氧化外,还有很大一部分铝未被氧化。欧美先进的焚烧处理工厂通常配备焚烧炉底灰分拣装置,但由于底灰的组成复杂而且铝含量较低等因素,从焚烧炉底灰中回收废铝的效率和经济性还有待提高^[23]。

3 废铝回收和应用所面临的挑战 and 对策

欧美发达国家在废铝回收、分离和分选、再生铝应用等领域具有领先优势,但同样也面临着一些挑战。由于受到各地方政府的回收系统和政策缺乏统一性、现有的回收基础设施和技术无法满足进一步提高铝回收质量和闭环回收的需求等因素的影响,美国近年来铝易拉

罐消费者回收率有所下降^[24](见表 1)。

表 1 美国铝饮料罐的消费者回收率(2012~2020 年)

Tab.1 Consumer recycling rate of aluminum beverage cans in USA

年份	消费者回收率/%
2012	54.2
2013	54.9
2014	56.1
2015	54.1
2016	50.4
2017	45.1
2018	48.7
2019	46.1
2020	45.2

注:消费者回收率是一年内美国国内回收的铝罐废品量占美国可回收铝罐的百分比,分子为装入熔炉的干净粉碎废料的数量,不包括流入垃圾填埋场、库存中和其他不在美国铝业协会统计系统内的废料。

为了提高铝饮料罐的消费者回收率,美国金属罐制造商协会(CMI)的饮料罐制造商和铝材供应商成员提出了到 2030、2040 和 2050 年,美国铝饮料罐消费者回收率分别达到 70%、80% 和 90% 的目标,并制定了一系列行动方案,包括设计押金制度并推动其在州和联邦政府层面的通过和实施、增加回收中心的分拣设施确保正确分类更多的铝罐、提高消费者对铝罐回收重要性的认识等^[25]。

由于铸造铝合金较变形铝合金可以允许更多的杂质元素,大部分回收的消费后废料被用于生产再生铸造铝合金。如果只利用合金元素含量较低或更方便化学成分控制的含铝废料,固然容易生产出高回收含量的产品,但这是不可持续的。资料表明,整个北美地区使用的变形铝合金汽车板材中含有约 25% 的再生铝,其中大部分来自消费前废料;相比之下,铸造铝合金汽车零部件中含有的再生铝可达 95%。由于消耗大量消费后废铝的铸造铝合金产品(如汽车发动机和变速器)的需求可能会出现下降,北美铝行业设立了加强收集、分类和再利用废铝所需的基础设施的建设,提高按照合金系别和牌号进行分类的能力等近期目标,预计汽车用变形铝合金中消费后废料的含量每年增加 1%^[26]。

20 世纪 90 年代以来,我国在计划经济体制下建立的回收体系已经逐步淡化,目前缺少全国性的回收机构和网络,存在废铝回收企业规模小、预处理能力低的问题。同时大量旧废铝未得到有效的分类回收,混杂程度较高,资源配置效率较低,如废铝易拉罐虽已具有接近 100% 的回收率,但其回收多是自发且分散的,致使“Can to Can”闭环循环再生模式难以实行。随着发展循环经济和“双碳”政策的不断深入,我国废铝分类回收体系将会进一步完善,应尽快推动一部分用量大、生命周期短或便于集中回收的铝产品的专项分类回收,如废旧铝易拉罐、废旧铝合金模板、铝合金车轮、汽车板工艺

废料等,建立闭环循环体系。

现有的各种废铝分离和分选技术,各具利弊,每一种方法都需要在处理成本、效率和提高废铝利用率之间进行权衡。尽管废铝分选技术和铝合金熔体处理技术越来越先进,一些元素在再生铝中的积累仍然是不可避免的,如 Fe、Si 和 Ti 等元素含量在每次铝合金熔铸过程中都会有所增长^[27],这可能会阻碍废铝在闭环循环系统中的应用,促使人们不断寻求更有效的杂质处理方法。

相关研究表明,通过电解精炼^[28-30]、区域熔炼^[31-32]和真空蒸馏^[33]等方法对废铝进行提纯在技术上是可行

的,但从生产效率和加工成本的角度考虑,暂时还无法实现大规模的工业应用。为充分发挥科技创新对实现“双碳”目标的关键支撑作用,我国科技部等部门在 2022 年 8 月发布了《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022-2030 年)》,方案包括开展有色金属和合金再生料高效提纯及保级利用技术的研发以满足绿色低碳的行业发展需求。除此之外,近两年我国还发布了多项支持再生铝产业发展的政策(见表 2)。为引导废铝资源的合理利用、对废铝的进口进行合理管控、促进再生铝产量及消费占比稳步增长,我国 2019 年以来还发布并实施了一系列相关标准和文件(见表 3)。

表 2 2021 年以来中国发布的支持废铝回收和利用的政策(部分)

Tab.2 Policies to support recovery and utilization of aluminum scrap issued in China since 2021

序号	文件名称	相关政策
1	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》	加强废旧物品回收设施规划建设,完善城市废旧物品回收分拣体系。推行生产企业“逆向回收”等模式,拓展生产者责任延伸制度覆盖范围。
2	《“十四五”循环经济发展规划》	大力发展循环经济,2025 年再生铝产量达到 1 150 万 t/a,废旧物资回收网络更加完善,覆盖全社会的资源循环利用体系基本建成。
3	《2030 年前碳达峰行动方案》	严控电解铝新增产能,加快再生有色金属产业发展,完善废弃有色金属资源回收、分选和加工网络,提高再生有色金属产量。
4	《“十四五”工业绿色发展规划》	培育有色金属循环利用龙头骨干企业,推动企业聚集化、资源循环化、产业高端化发展,力争 2025 年再生铝产量达到 1 150 万 t。
5	《资源综合利用企业所得税优惠目录(2021 年版)》	企业以列入《资源综合利用企业所得税优惠目录》的社会回收的废铝作为主要原料,生产国家非限制和禁止并符合相关标准的产品取得的收入,可享受税收优惠。
6	《“十四五”原材料工业发展规划》	开发“城市矿山”资源,支持优势企业建立大型再生铝回收基地和产业集聚区,推进再生金属回收、拆解、加工、分类、配送一体化发展。
7	《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》	促进战略性金属废碎料的高效再生利用,积极引导符合产品标准的再生原料进口。
8	《工业领域碳达峰实施方案》	坚持电解铝产能总量约束,促进铝等金属高效再生循环利用,2025 年再生铝产量将达到 1 150 万 t。
9	《有色金属行业碳达峰实施方案》	完善再生有色金属原料标准,鼓励企业进口高品质再生资源,推动资源综合利用标准化,提高保级利用水平。到 2025 年再生铜、再生铝产量分别达到 400 万 t、1 150 万 t,再生金属供应占比达 24% 以上。

表 3 2019 年以来中国实施的再生铝原料的标准(部分)

Tab.3 Standards of recycled aluminum raw materials implemented in China since 2019

序号	标准名称	适用范围
1	GB/T 38472《再生铸造铝合金原料》	适用于废旧的车辆、铝制器具、机械设备中的回收铝经分选等加工处理后得到的再生铸造铝合金用原料。
2	GB/T 40382《再生变形铝合金原料》	适用于回收铝经分选等加工处理后,获得的熔铸用变形铝合金原料。
3	GB/T 40386《再生纯铝原料》	适用于回收铝经分选等加工处理后,获得的熔铸用纯铝原料。
4	GB/T 13586《回收铝》	适用于社会及工厂回收并分类的回收铝。
5	《再生铜、铝原料标准实施指引 2.0》	针对生产、使用、贸易企业以及监管部门对相关标准实施过程中提出的疑问做出的解释。

4 结 语

在废铝资源回收端,欧美发达国家不断完善回收体系和法规,通过改进回收和分选技术、限制优质废料资源出口等措施不断提高再生铝的用量和应用范围。在废铝再生和应用端,为追求废铝资源价值最大化,欧美大型铝回收公司和铝加工厂联合开展闭环回收,从而实现废铝的保级使用。同时欧美发达国家也面临着一些挑战,包括各国地方政府的回收系统和政策缺乏统一性、现有的回收基础设施和技术无法满足进一步提高铝

回收质量和闭环回收的需求等。近年来,虽然我国废铝回收和再生应用产业发展较快,但整体上与发达国家相比仍有较大差距,主要面临着废铝资源总量不足、废铝回收体系不够完善和资源配置效率较低等问题。随着铝制品报废周期逐步到来,国内废铝的供应量不断增加,已成为再生铝生产企业原料供应的主渠道。随着发展循环经济和“双碳”目标的提出,特别是在近两年发布的多项政策、标准和文件的支持下,我国废铝分类回收体系将会进一步完善,逐渐建立闭环循环体系。废铝的分离和分选技术是再生铝高质量应用的前提和基础,部

分先进技术从生产效率和加工成本等角度考虑,暂时无法实现大规模的工业应用。我国在引进和借鉴国外先进技术的同时,也提出了开展有色金属和合金再生料高效提纯及保级利用技术的研发计划,以充分发挥科技创新对实现“双碳”目标的关键支撑作用。废铝的回收、分离和分选、再生应用对解决资源紧张、能源短缺和降低环境污染,对发展循环经济和实现“双碳”目标具有重要现实意义,再生铝产业存在巨大的发展潜力和空间。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部.《有色金属行业碳达峰实施方案》解读[EB/OL]. (2022-11-15). https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcjd/art/2022/art_89855d08ccc44236b3d03970411f2048.html.
- [2] ISO 14021-2016. Environmental labels and declarations-Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)[S].
- [3] WANG J L. The environmental footprint of semi-fabricated aluminum products in North America-A life cycle assessment report[R]. Aluminum Association, 2022.
- [4] International Aluminium Institute. This visualization shows regional aluminium imports, exports, domestic production, recycling, use and losses[EB/OL]. <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/public-regional-cycle/>.
- [5] United States Geological Survey. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries[R]. January 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-aluminum.pdf>.
- [6] Circular Aluminium Action Plan- A strategy for achieving aluminium's full potential for circular economy by 2030[R]. European Aluminium, 2020.
- [7] Aluminium Deutschland. Aluminium encyclopaedia[EB/OL]. <http://www.aluinfo.de/aluminium-encyclopaedia-detail.html?id=66>.
- [8] Arconic Corporation. 2020 Sustainability and ESG Report [R]. PITTSBURGH: Arconic Corporation, 2021.
- [9] Constellium. Aluminium Recycling[EB/OL]. <https://www.constellium.com/sustainability/aluminium-recycling>. 2022-11-01.
- [10] Constellium. Business and sustainability performance report 2020 [R]. https://www.constellium.com/sites/default/files/constellium_business_sustainability_report_2020_en.pdf.
- [11] 范超,龙思远,李聪,等.废铝分类分离技术的研究进展[J].轻金属, 2012(7): 61-64.
- [12] BELLS, DAVIS B, JAVAID A, et al. Final Report on Scrap Management, Sorting and Classification of Aluminum[R]. Natural Resources Canada, 2003.
- [13] CAPUZZIS, TIMELLIG. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review[J]. Metals, 2018, 8(4): 249.
- [14] 高安江,王刚,曲信磊,等.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.
- [15] DÍAZ-ROMERO D, STERKENS W, VAN EYNDESD, et al. Deep learning computer vision for the separation of cast- and wrought-aluminum scrap[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 172: 105 685.
- [16] 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(5): 528-532.
- [17] BROOK S L, GAUSTA D G. The potential for XRF & LIBS handheld analyzers to perform material characterization in scrap yards [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021(7): 732-754.
- [18] GAUSTADG, OLIVETTIE, KIRCHAINR. Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 58: 79-87.
- [19] AMBROSE F, JR BROWNRD, MONTAGNA D, et al. Hot-crush technique for separation of cast- and wrought-aluminum alloy scrap [J]. Conservation & Recycling, 1983(1-2): 63-69.
- [20] BROWN R D, AMBROSE F, MONTAGNA D. Separation of cast and wrought aluminum alloys by thermomechanical processing[R]. US Bureau of Mines, 1985.
- [21] EGEN S, SANDAUNET K, KOLBEINSEN L, et al. Recycling of aluminium from mixed household waste[A]. Light Metal 2020[C]. Switzerland: Springer, Cham., 2020.
- [22] GÖKELMA M, DIAZ F, ÖNER I F, et al. An assessment of recyclability of used aluminum coffee capsules[A]. Light Metal 2020 [C]. Switzerland: Springer, Cham., 2020.
- [23] MARINELLOS, BALUGANIE, GAMBERINIR. Coffee capsule impacts and recovery techniques: A literature review[J]. Packaging Technology and Science, 2021, 34(3): 665-682.
- [24] The Aluminum Can Advantage: Sustainability Key Performance Indicators 2021[R]. The Aluminum Association, 2021.
- [25] Aluminum Beverage Can Recycling Primer & Roadmap[R]. Washington: Can Manufacturers Institute, 2023.
- [26] Roadmap for Automotive Aluminum[R]. The Aluminum Association, 2021.
- [27] 罗旭东,汤昌廷,靳承岗,等.铝及铝合金中杂质元素的来源及生成过程[J].特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 1 114-1 118.
- [28] KJOS O S, ROLSETH S, GUDBRANDSEN H, et al. A laboratory study of electrochemical removal of noble elements from secondary aluminium[A]. REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability[C]. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2016.
- [29] LU X, ZHANG Z Y, HIRAKI T, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap[J]. Nature, 2022, 606: 511-515.
- [30] ALCOA USA CORP. Systems and methods for purifying aluminum; US 10,407,786 B2[P]. 2019-09-10.
- [31] SILLEKENS W H, VAN W S, BRUINSMA O, et al. Refining aluminium scrap by means of fractional crystallisation: Basic experimental investigations[A]. In: Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials[C]. TMS: The Minerals, Metals, and Materials Society, 2000.
- [32] VENDITTI S, ESKIN D, JACOT A. Fractional Solidification for Purification of Recycled Aluminium Alloys[A]. Light Metal 2020 [C]. Switzerland: Springer, Cham., 2020.
- [33] OHTAKI M, ARAKAWA T, MURATA F. A new proposal of continuous agitation vacuum distillation process (CAVP) to remove Zn from aluminum scrap melt[A]. In: Fourth International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials[C]. TMS: The Minerals, Metals, and Materials Society, 2000.

(编辑:栗万仲)

选区激光熔化 LaB₆/ZL205A 复合材料组织与性能

游俊磊 汪志太 欧阳奇 徐志锋
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘要 通过低能球磨制备 LaB₆ 含量分别为 0.5%、1.0% 的 LaB₆/ZL205A 复合粉末,采用选区激光熔化(SLM)技术制备了 LaB₆/ZL205A 铝基复合材料。通过 XRD、EDS 和 SEM 等方法对比分析 ZL205A 铝合金和 LaB₆/ZL205A 铝基复合材料的显微组织和力学性能。结果表明,LaB₆ 含量为 0.5% 的 LaB₆/ZL205A 铝基复合粉末性能最佳,其纳米 LaB₆ 颗粒分布均匀,无明显团聚。对比 ZL205A 铝合金,复合粉末试样的晶粒尺寸明显细化,柱状晶逐渐向等轴晶转变,硬度(HV)从 91.3 提升至 96.2,抗拉强度从 279.4 MPa 提升至 320.5 MPa,伸长率从 3.9% 提升至 6.2%。

关键词 选区激光熔化;ZL205A 铝合金;纳米 LaB₆;组织性能

中图分类号 TB331;TG113

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Performance of Selective Laser Melted LaB₆/ZL205A Composites

You Junlei, Wang Zhitai, Ouyang Qi, Xu Zhifeng

(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,
Nanchang Hangkong University)

Abstract: LaB₆/ZL205A compound powder with LaB₆ content of 0.5% and 1.0% was fabricated by low-energy ball grinding, and LaB₆/ZL205A composites were prepared by SLM. The microstructure and mechanical properties of ZL205A and LaB₆/ZL205A composites were analyzed comparatively by XRD, EDS and SEM. The results indicate that the 0.5% LaB₆/ZL205A powder possesses optimal performance, where the nano LaB₆ particles are evenly distributed without obvious agglomeration. Compared with that of ZL205A, the grain size of composite powder specimens is significantly refined, and the columnar crystal is gradually transformed to isoaxial, where the hardness is increased from 91.3 HV to 96.2 HV, the tensile strength is increased from 279.4 MPa to 320.5 MPa, and elongation is increased from 3.9% to 6.2%.

Key Words: SLM, ZL205A Aluminum Alloy, Nano LaB₆, Microstructure and Performance

铝合金具有低密度、高比强度、切削加工性和热成形性好、耐腐蚀等特点,在航空航天、交通运输、食品包装、建材、船舶等领域得到广泛应用^[1]。工程制件的传统制造方法主要有铸造、轧制、锻造、挤压等,然而这些技术已经难以满足现代工业对于材料的制造要求,制备出高性能材料成为挑战。

选区激光熔化技术(SLM)^[2]具有零件的综合性能力强、制备周期短、研发效率高和制造成本低,以及材料的利用率高且对产品形状几乎没有限制等特点,特别适用于复杂零件和人工植入体的制造。国内外对于 SLM 成形 AlSi10Mg 铝合金的研究已经相当成熟,成形件致密度很高,力学性能优于传统铸件,已有部分打印零件

开始了初步的工业应用^[3]。Al-Cu 合金在 SLM 成形过程中易氧化、对激光反射率高且热裂倾向大,这极大地限制了 SLM 成形技术的发展^[4]。而 LaB₆ 颗粒对激光的反射率低,在铝合金粉末中加入纳米 LaB₆ 颗粒,可以提高铝合金对激光的吸收率^[5]。

本研究采用纳米级稀土化合物颗粒对 ZL205A 铝合金粉末进行表面改性,通过低能球磨方式制备复合粉末。通过优化 ZL205A 铝合金粉末的 SLM 成形工艺参数,重点研究纳米 LaB₆ 颗粒的添加对 SLM 成形 ZL205A 铝合金试样组织和性能的影响,确定最佳的 LaB₆ 添加量,旨在为制备具有更加理想综合性能的材料以及 SLM 成形 ZL205A 铝合金的应用提供参考。

收稿日期:2022-09-06;修改稿收到日期:2022-10-26

基金项目:江西省教育厅科技资助项目(DA202103174)

第一作者简介:游俊磊,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:983266283@qq.com

通信作者:汪志太,男,1983 年出生,讲师,南昌(330063),E-mail:wangzt@nchu.edu.cn

引用格式:游俊磊,汪志太,欧阳奇,等. 选区激光熔化 LaB₆/ZL205A 复合材料组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 200-1 204.

YOU J L, WANG Z T, OUYANG Q, et al. Microstructure and performance of selective laser melted LaB₆/ZL205A composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 200-1 204.