

# 铝工业危废铝灰的高效处置新技术

余剑<sup>1</sup> 闫飞飞<sup>1</sup> 潘锋<sup>2</sup> 杜占<sup>1</sup>

(1. 中铝环保节能集团有限公司, 河北 雄安 071700; 2. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100089)

**[摘要]** 针对当前铝工业中危废铝灰处置所面临的能耗高、效率低等突出问题,通过工艺和技术创新,在热力学分析的基础上提出采用磨细、微波场、惰性大颗粒辅助强化等新型处置技术,分别以氯气、氯化硅、氯气-氯化硅为氯化剂,研发了5条铝灰高效氯化加工新工艺(以氯气为氯化剂的铝灰高效利用方法,以氯气为氯化剂的二次铝灰高值化利用方法,以氯气为氯化剂的铝灰高效制备氮化铝方法,以氯化硅为氯化剂的铝灰高效制备氟化铝方法,以氯气-氯化硅为氯化剂的铝灰制备氟化铝方法)。这5种工艺可有效提升了铝灰的资源利用率、处置效率,实现铝灰深度高值化利用(制备氮化铝、氟化铝),具有显著的经济效益和社会效益。

**[关键词]** 铝灰资源化; 铝灰无害化; 氯化; 氯气; 氯化硅; 高效处置; 氮化铝; 氟化铝

**[中图分类号]** TF821; X75

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0025-09

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.004

## 0 前言

铝灰,作为电解铝、铸造铝生产和废铝再生流程中的工业副产物,在我国每年的产量超过300万t。因铝灰包含氮化铝、可溶性氟盐、氯盐等有害物质,已被列入《国家危险废物名录》。因此,铝灰的无害化处理及高值化利用,对推动铝工业的绿色、高质量发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。

## 1 铝灰资源化和无害化处理现状

### 1.1 铝灰资源化

铝灰的资源化利用涵盖多个重要领域,包括铝元素的提取、净水剂的制备、耐火材料、建筑材料与炼钢精炼剂的生产等。

在铝元素提取方面,常用的方法包括酸浸出、碱浸出和碱焙烧。酸浸出方法虽能有效提升铝的回收率,但在操作过程中,铝灰中的杂质金属离子,如 $Mg^{2+}$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$ 等,会与 $Al^{3+}$ 一同进入浸出液中,增加了后续分离除杂的难度。同时,铝灰中盐类的溶解也会引入大量 $Na^+$ 和 $K^+$ 离子,导致浸出液中这些离子的富集<sup>[2-3]</sup>。碱浸出方法则主要依赖氧化铝两性氧化物的特性,通过常压和高压碱浸过程,将铝灰中的铝元素提取出来,形成铝酸钠溶液。在此过程中,其他金属氧化物由于不与碱发生反应,会留在渣相中。因此,碱浸出能够获得较高纯度的铝液。然而,铝灰中存在大量性质稳定、难溶的 $\alpha-Al_2O_3$ 和 $MgAl_2O_4$ 相,使得铝的回收率受到一定限制<sup>[4-5]</sup>。碱焙烧方法则是通过高温下铝灰中含铝组分与碱添加剂的反应,生成易溶的铝酸钠熟料,随后通过水或稀碱浸出,从而实现铝元素的分离与回收。尽管碱焙烧能有效处理难溶组分,但其能耗远高于酸浸出和碱浸出<sup>[6]</sup>。

铝灰作为原料,可以制备两种重要的净水剂:聚合氯化铝(PAC)和硫酸铝<sup>[7]</sup>。其中,苏晓梅等<sup>[8]</sup>采用了一种酸碱法来制备聚合氯化铝,首先将铝灰与碳酸钠按照5:1的比例进行混合,然后在930℃的高温下保温80min进行焙烧处理;焙烧完成后,将所得的焙烧料置于盐酸溶液中,并在95℃的条件下浸出30min,铝灰的最佳浸出率可以达到95%。康文通等<sup>[9]</sup>采用硫酸浸出法,成功利用铝灰制备出硫酸铝絮凝剂,首先对铝灰进行水洗预处理,有效脱除

**[收稿日期]** 2024-06-13

**[基金项目]** 国家自然科学基金面上项目(编号22078326)。

**[作者简介]** 余剑(1971—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为节能环保。

**[通信作者]** 杜占(1987—),男,博士,副研究员,主要研究方向为资源绿色低碳高值化利用。

**[引用格式]** 余剑,闫飞飞,潘锋,等. 铝工业危废铝灰的高效处置新技术[J]. 绿色矿冶,2024,40(5):25-33.

YU Jian, YAN Feifei, PAN Feng, et al. New technology of efficient disposal of aluminum ash in aluminum industry[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 25-33.

其中的氮和盐分,为后续工艺打下了良好的基础;接着,使用浓硫酸对预处理后的铝灰进行浸出,通过精确控制反应条件,在硫酸浓度为30%、液固比为1.05 mL/g以及pH值为3的条件下,成功制备出了符合标准一级产品的硫酸铝絮凝剂,铝元素的回收率高达93.2%。

铝灰中的铝含量达到35%~45%,同时铝硅比为7~20,因此具有替代铝土矿制备耐火材料的潜力。刘大强等<sup>[10]</sup>首先对铝灰进行酸洗除杂和水洗烘干处理,清除其中的杂质;随后,利用无烟煤作为还原剂,以铁屑作为沉淀剂,通过电弧熔炼的方式将铝灰中的二氧化硅和氧化铁还原为金属,形成硅铁合金。由于硅铁合金的密度较大,会沉积在炉底,便于后续的磁选分离,从而实现产品的提纯,所得棕刚玉达到二级品的指标,氧化铝含量大于88%。李远兵等<sup>[11]</sup>提出了一种铝灰制备电熔复合耐火材料的方法,首先对铝灰进行脱氮除盐处理,然后将处理后的铝灰与铝矾土熟料粉或菱镁矿粉按一定比例混合均匀并成型;随后在1800~3000℃的高温下进行电熔处理,制备出电熔刚玉或镁铝尖晶石等耐火材料。然而,需要注意的是,制备这些高质量的耐火材料对铝灰的成分要求较高,只有铝元素含量较高的铝灰才能满足生产需求。同时,由于不同来源的铝灰成分波动较大,其中的杂质组分可能会留存在产品中,影响耐火材料的质量和性能,因此目前该方法还无法实现大规模推广应用。

徐晓虹等<sup>[12]</sup>成功以铝灰为主要原料,通过配合适当比例的黏土和石英,经过充分混合后压制成型,并在约1000℃的温度下煅烧,制备出了陶瓷清水砖,铝灰的含量占比高达60%以上,使得铝灰的资源化利用达到了新的高度。清水砖的主要物相包括 $\alpha$ -氧化铝和钙长石,经过测试,砖体的气孔率达到了30%~50%,在保证通气性的同时还拥有较好的保温性和隔热性能。

铝灰在高温烧结条件下可以制备成炼钢精炼剂。铝灰含有一定量的金属铝和丰富的三氧化二铝成分,这些氧化铝与铝矾土中的氧化铝有所不同,其处于临界状态,具有高度的活性,易于与CaO结合,形成铝酸钙渣系。这一特性使得铝灰非常适合作为钢水脱氧、脱硫、除渣的材料。经过压制成型后,铝灰球可以作为钢水脱氧剂、脱硫剂以及净化剂,应用在转炉、电炉等钢包精炼工艺中。其脱氧效果主要得益于铝灰中的金属铝和高活性氧化铝成分。在钢

水中,这些成分首先与氧发生反应,形成强烈的还原氛围,同时,氧化铝与氧化钙结合,形成铝酸钙渣系。该渣系的熔点大约在1300℃,并具有较高的硫容量,有助于有效地从钢液中去硫。李燕龙等<sup>[13]</sup>进行了铝灰作为造渣脱硫剂的实验研究,发现当铝灰、石灰和萤石按4:6:1的比例混合使用时,钢包渣中的总氧含量从 $480 \times 10^{-6}$ 显著降低到 $17 \times 10^{-6}$ ,钢中的硫含量也从 $190 \times 10^{-6}$ 降低到 $75 \times 10^{-6}$ 。然而,铝灰中的氮化铝在反应过程中可能导致钢液中氮含量增加,进而影响钢材的性能。王德永等<sup>[14]</sup>探究了铝灰替代氧化铝制备精炼渣的可能性,其研究结果表明,使用铝灰制备的精炼渣展现出了出色的脱硫性能。此外,铝电解灰中的少量氟化钙还可以降低萤石的消耗。

国外处理二次铝灰的主流技术是采用湿法处理,核心是铝灰湿法反应脱除有害气体并回收可溶盐,对排放气体进行无害化处理。目前爱励铝业、美铝、鲁玛克斯、德国钾肥公司、雷诺兹铝业均采用湿法工艺处理铝灰,不同之处在于最终产生的氧化物利用方式。根据过滤后的氧化物中氧化铝含量和当地市场需求,最终被资源化成不同的商品,包括水泥、陶瓷、矿棉、耐火材料、炼钢改质剂、发热剂等。

## 1.2 铝灰无害化处理

无害化处理是铝灰资源化利用的前提,主要目的是脱氮除盐,最常用的脱氮方法是将铝灰在空气中进行高温焙烧,使氮化铝转化为氮气和氧化铝,然而在氧化焙烧过程中氮化铝颗粒表面容易形成一层致密的氧化铝膜,阻碍脱氮反应的进一步进行,导致脱氮效率较低。针对此问题,刘万超等<sup>[15]</sup>提出了一种二次铝灰资源综合利用的新方法,利用粘结剂将二次铝灰和钠碱制成30~200mm的球团,并在高温窑炉中焙烧;通过钠碱的作用,氮化铝氧化生成的氧化铝被转化为铝酸钠,有效地缓解了氧化铝膜对反应的阻隔效应,从而增强了脱氮效果。然而,这种方法虽然提高了脱氮效率,但碱的添加量较大,导致生产成本较高;同时,由于球团直径较大,受热不均匀,所需的固相反应温度较高,反应时间延长,进而增加了能耗。张廷安等<sup>[16]</sup>研发了一种利用铝灰制备聚合氯化铝的方法,首先将铝灰和焦炭制成5~20mm的球团,并在移动床700~1100℃温度下氯气中焙烧,使氮化铝转化为氮气和氯化铝。这种方法虽然可以得到高附加值的氯化铝,但由于使用较大粒径的球团,同样存在受热不均匀和扩散阻力大

的问题,导致反应速率和效率受限,能耗也相对较高。为了充分利用铝灰中的全组分有价元素,张廷安等<sup>[17]</sup>又开发了一种铝灰球团氯化-氧压转化制备氧化铝及全组分利用的方法,通过将铝灰和焦煤混合制成球团,在移动床 1 000 ℃ 下氯气中焙烧,得到氮气和多种高附加值产品,如氯化铝、氯化硅、氯化镁等。虽然此方法实现了铝灰的无害化处理和元素的高值化利用,但同样面临着气相扩散阻力大、反应速率慢、效率低和能耗高等挑战。

综上,虽然当前铝灰处置技术已取得了显著进展,但普遍存在能耗高、反应效率低等问题。鉴于此,亟需通过持续的工艺和技术创新,优化脱氮除盐过程,提高反应效率,同时降低整体能耗。此外,进一步探索利用铝灰中的铝资源制备高附加值产品,是实现铝灰大规模、高效、清洁以及高值化利用的关键所在。

## 2 热力学分析

铝灰中含铝物相丰富,包括氧化铝、金属铝、氯化铝以及镁铝尖晶石等,而硅、铁、镁等元素则主要以石英、赤铁矿和镁铝尖晶石的形式存在。此外,钠、钾、钙等元素则多以氯化盐和氟化盐的形态存在于铝灰中,如铝电解灰中氟化盐含量较高,而铝合金灰中氯化盐含量则相对较高,并含有少量合金元素<sup>[18]</sup>。这些元素在铝灰中的存在形态和分布特性,对于铝灰的资源化利用具有重要的指导意义。铝灰中的铝、镁、硅、铁等元素的氯化物,在生成难易程度和物理性质上存在显著差异。基于这些特性,张廷安等<sup>[16-17]</sup>通过氯化法成功实现了铝灰中有价元素的充分利用。然而,传统的氯化过程中常使用氯气作为氯化剂,在处理多金属物质时会导致氯化产物种类繁多,后续的分选过程变得复杂,且氯气耗气量增大,生产成本升高。

为了克服这些问题,本文创新性采用了氯气、氯化硅、氯气-氯化硅多种氯化策略对铝灰进行氯化加工,实现对铝灰中多金属元素的高效提取和分离,同时降低氯化过程的复杂性和能耗。

以氯气、氯化硅为氯化剂,铝灰氯化过程中发生的主要反应见式(1)~(14)。其热力学反应如图 1 所示。

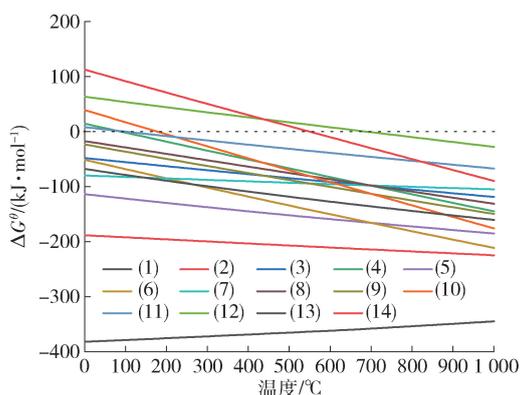
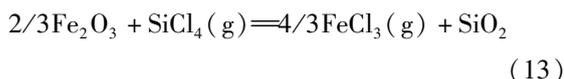
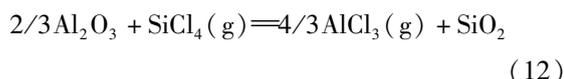
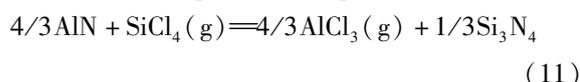
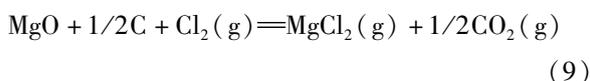
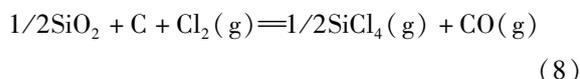
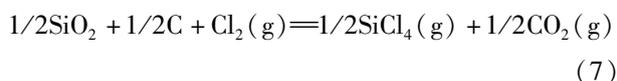
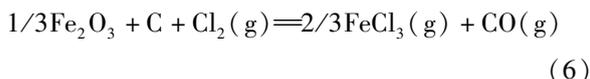
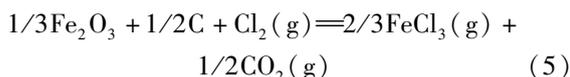
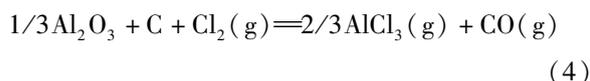
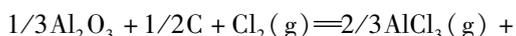
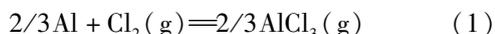


图 1 铝灰中主要物质的氯化反应热力学分析

由图 1 的热力学分析可知,反应(1)(2)(3)(5)(6)(7)(8)(9)(13)在 0~1 000 ℃ 均可以发生。温度升高,不利于反应(1)的发生,但是可以促进反应(2)~(13)的发生;温度高于 90 ℃ 时,反应(4)可以发生;温度高于 100 ℃ 时,反应(11)可以发生;温度高于 180 ℃ 时,反应(10)可以发生;温度高于 550 ℃ 时,反应(14)可以发生;温度高于 690 ℃ 时,反应(12)可以发生。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  采用氯气配碳氯化时,若反应温度低于 700 ℃,产物中的碳氧化物为  $\text{CO}_2$ ,反之则为  $\text{CO}$ 。

### 3 铝灰高效氯化处置新技术

基于前述热力学分析,分别研发了以氯气、氯化硅、氯气-氯化硅为氯化剂的铝灰高效处置新技术。

#### 3.1 以氯气为氯化剂

##### 3.1.1 一种铝灰高效利用方法

过程描述:将铝灰磨细、预热后加入流化床中,在大颗粒吸波材料辅助下进行微波加热氧化脱氮,

铝灰中的铝、氯化铝转化为氧化铝、氮气,脱氮渣经换热后进行微波真空蒸馏除去氟化物、氯化物等盐类,脱盐渣经筛分回收吸波材料后进行微波流态氯化脱氧,铝灰中的氧化铝、氧化硅和氧化镁等转化为氯化铝、氯化硅和氯化镁,氯化镁进入尾渣,氯化铝和氯化硅经多级冷凝分别回收,未反应的氯气和一氧化碳经多级分离循环利用<sup>[19]</sup>。工艺流程如图2所示。

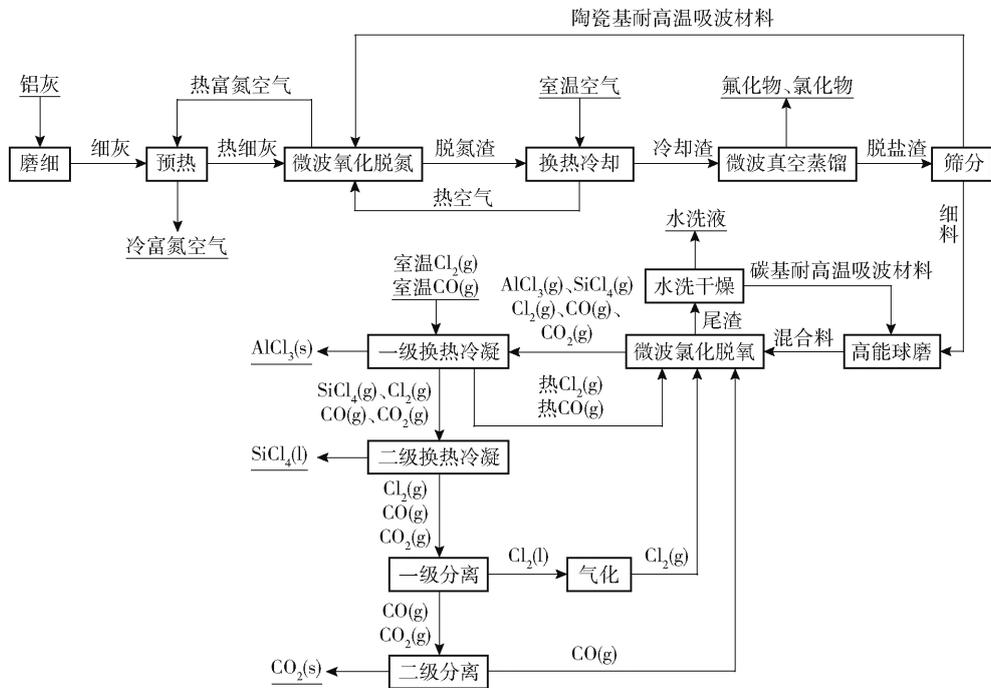


图2 一种铝灰高效利用的方法

过程重要参数:细灰的粒度 $< 1 \mu\text{m}$ 。氧化脱氮的反应温度为 $500 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,反应时间为 $0.1 \sim 0.5 \text{ h}$ ,采用的反应器为流化床反应器,陶瓷基吸波材料为SiC颗粒,其粒度为 $0.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ 。真空蒸馏的真空度为 $5 \sim 50 \text{ Pa}$ ,温度为 $600 \sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,时间为 $0.5 \sim 1.0 \text{ h}$ 。碳基吸波材料为石墨、炭黑、碳纤维、石墨烯中的一种或几种的组合。混合料的粒度 $< 1 \mu\text{m}$ 。氯化脱氧的温度为 $500 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,时间为 $0.5 \sim 1.0 \text{ h}$ ,所采用的反应器为流化床反应器。一级换热冷凝后混合气相的温度为 $70 \sim 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ;二级换热冷凝后混合气相的温度为 $20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。一级分离的温度为 $-70 \sim -40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;二级分离的温度为 $-190 \sim -80 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

与现有处理技术相比,以氯气为氯化剂的铝灰高效利用方法的显著优势:无需造球,采用空气将铝灰磨细料直接在大颗粒吸波材料辅助下进行微波加

热流态氯化氧化脱氮,气固接触面积大,反应速率快,有效避免了氯化铝氧化过程中生成氧化铝的阻隔作用,脱氮效率高;将铝灰脱氮脱盐料与碳基耐高温吸波材料高能球磨混合均匀后直接进行微波低温流态氯化脱氧,气固相间传质传热速率快,反应效率高,有效降低了能耗;铝灰的氧化脱氮、蒸馏脱盐和氯化脱氧等工序均采用微波加热,加热速率快,受热均匀,同时所用物料均为磨细混合均匀的细粉料,反应活性高,反应温度低,气相扩散阻力小,气固反应转化率高;采用的陶瓷基耐高温吸波材料和碳基耐高温吸波材料均可以在系统中循环利用,有效节约了成本;余热回收利用率高,有效提高了整体工艺系统的热效率。

##### 3.1.2 一种二次铝灰高值化利用的方法

过程描述:将二次铝灰磨细、预热后,加入流化床中在耐高温吸波材料辅助下进行微波加热氯



的温度为 400 ~ 600 ℃, 时间为 0.1 ~ 1.0 h; 氯化脱氮的反应器为流化床反应器, 其中同样设有惰性氧化物, 用于辅助流化和蓄热。惰性氧化物为球形氧化铝颗粒和球形氧化锆颗粒中的一种或两种的组合, 粒度为 0.5 ~ 3.0 mm。冷凝温度为 20 ~ 170 ℃。热氯化镁的粒度 < 1 μm, 氯化反应温度为 450 ~ 650 ℃, 时间为 0.1 ~ 1.0 h, 氯化反应采用流化床反应器, 其中设有惰性氧化物, 用于辅助流化和蓄热, 惰性氧化物为球形氧化铝颗粒和球形氧化锆颗粒中的一种或两种的组合, 其粒度为 0.5 ~ 3.0 mm。预热均采用间接换热的方式进行。镁氯化温度为 400 ~ 600 ℃, 氯化时间为 0.1 ~ 1.0 h。晶化温度为 1 500 ~ 1 700 ℃, 晶化时间为 0.5 ~ 2.0 h。

与现有处理技术相比, 这种铝灰高效制备氟化铝方法的显著优势为: 无需造球, 磨细活化可以显著提升铝灰的氯化反应活性, 降低了反应温度, 节省了能耗; 采用氯气直接氯化铝灰中的铝和氟化铝, 无需配碳, 操作简便, 尾气中不含二氧化碳, 绿色环保, 同

时过量的氯气易于分离循环利用; 采用设有惰性大颗粒氧化物的流化床进行细铝灰的氯化脱氮, 以及细氯化镁与氯化铝的氯化反应, 可以抑制细颗粒团聚, 破碎气泡, 强化气固相间传质传热, 同时还可以起到蓄热的作用, 有效提升了反应效率和系统运行的稳定性; 通过氯化铝与氯化镁反应制备氟化铝, 与氧化铝碳热还原氟化法相比, 反应温度显著降低, 并且反应产物易于分离提纯, 产品纯度高; 采用氯化镁作为制备氟化铝的氮源, 副产物氯化镁易于分离, 并且其可以通过电解产生镁和氯气, 在系统中循环利用, 有效节约了成本。

### 3.2 以氯化硅为氯化剂的铝灰制备氟化铝方法

过程描述: 将铝灰磨细、预热后进行氧化脱氮, 采用氯化硅将氧化后铝灰中的铝、铁、镁氯化为氯化铝、氯化铁和氯化镁, 通过多级冷凝分离提纯得到高纯氯化铝, 氯化铝经气化、预热与四氟化硅反应生成氟化铝产品和氯化硅, 而氯化硅循环用于氯化过程<sup>[22]</sup>。工艺流程如图 5 所示。

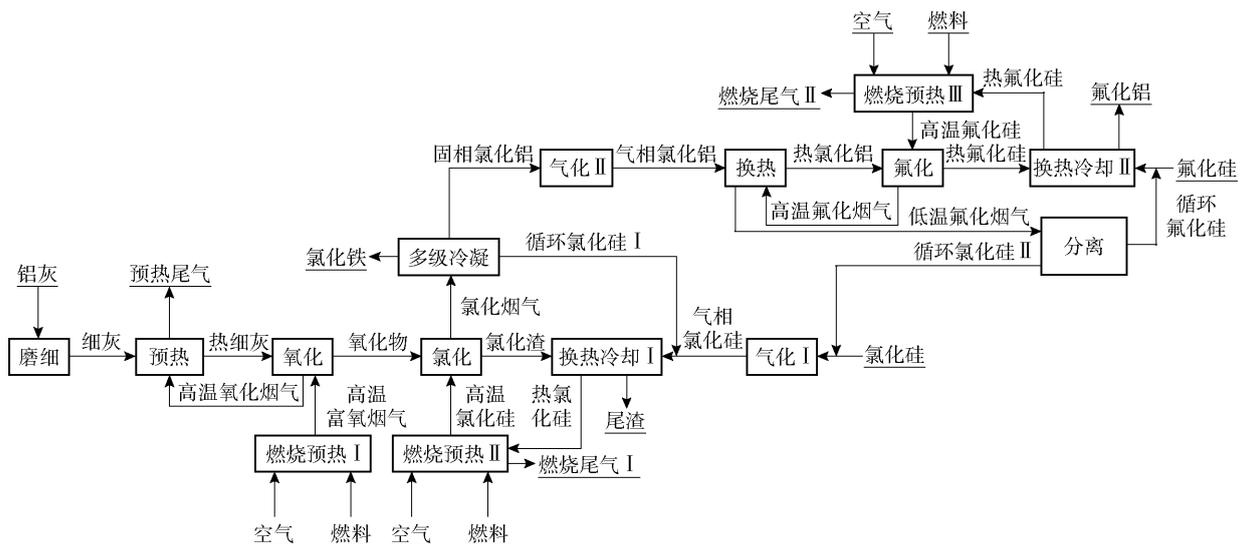


图 5 一种铝灰高效制备氟化铝的方法

过程重要参数: 细灰的粒度 < 1 μm。氧化脱氮的温度为 400 ~ 600 ℃, 时间为 0.1 ~ 0.5 h, 氧化脱氮的反应器为流化床反应器, 其中设有惰性氧化物, 用于辅助流化和蓄热, 惰性氧化物为球形氧化铝颗粒和球形氧化锆颗粒中的一种或两种组合, 其粒度为 0.5 ~ 5.0 mm。氯化反应的温度为 700 ~ 900 ℃, 时间为 0.5 ~ 1.0 h, 采用的反应器为流化床反应器, 流化床反应器中同样设有惰性氧化物, 用于辅助流化和蓄热, 惰性氧化物为球形二氧化硅颗粒, 其粒度

为 0.5 ~ 5.0 mm。在 200 ~ 290 ℃ 下冷凝得到固相氯化铁, 在 70 ~ 170 ℃ 下冷凝得到固相氯化铝。氟化反应的温度为 500 ~ 700 ℃, 时间为 0.5 ~ 1.0 h, 利用的反应器为流化床反应器, 其中设有种子粉体, 种子粉体为 0.1 ~ 0.5 mm 的氟化铝颗粒。低温氟化烟在 20 ~ 50 ℃ 下分离得到液相的循环氟化硅和气相的循环四氟化硅。

与现有处理技术相比, 上述铝灰高效制备氟化铝方法的显著优势为: 无需造球, 通过磨细活化可以



本文通过工艺和技术创新,分别以氯气、氯化硅、氯气-氯化硅为氯化剂,在热力学分析的基础上,研发了5条铝灰高效氯化处置新技术路线,可以显著提高铝灰的资源利用率,实现深度高值化利用,整体能量利用率高,具有良好的经济效益和社会效益。然而需要特别注意的是,氯化过程中氯化剂对设备的腐蚀问题一直是行业难题,在具体应用中需采用特殊耐腐蚀衬里或者其他预防措施方法。

1)以氯气为氯化剂的铝灰高效利用方法。采用微波加热,无需造球,氧化脱氮、蒸馏脱盐和氯化脱氧反应速率快、效率高,原料适用范围广,可以实现铝灰大规模清洁高效利用。

2)以氯气为氯化剂的二次铝灰高值化利用方法。采用磨细活化、微波加热可以显著降低氯化温度、提高反应效率,氯化过程无需配碳,操作简单。

3)以氯气为氯化剂的铝灰高效制备氯化铝方法。无需造球、配碳,氯化脱氮温度低、效率高,采用氯化镁将氯化铝氯化制备氯化铝,产品易于分离提纯,副产物氯化镁通过电解可为系统提供镁和氯气,循环利用率高,可以实现铝灰的无害化处理和氯化铝的大规模高效制备。

4)以氯化硅为氯化剂的铝灰高效制备氟化铝方法。通过磨细活化显著提高了铝灰的氧化脱氮效率,氯化过程以氯化硅为氯化剂,无需配碳,氯化产物易于分离,操作简便,采用四氟化硅将氯化铝氟化制备氟化铝,副产物氯化硅可在系统内循环利用,有效降低了生产成本。

5)以氯气-氯化硅为氯化剂的铝灰制备氟化铝方法。分别采用氯气、氯化硅依次将铝灰两次氯化,无需配碳,氯化产物易于分离,操作简便,采用四氟化硅将氯化铝氟化制备氟化铝,副产物氯化硅可在系统内循环利用,有效降低了生产成本,可以实现铝灰的无害化处理和氟化铝的大规模清洁制备。

### [参考文献]

[1] 唐煜晟,杨万章,陈本松,等.铝电解典型固废的清洁回收技术研究进展[J].湿法冶金,2023,42(6):551-558.

[2] 李登奇,秦庆伟,刘文科,等.从再生铝二次铝灰中浸出铝的动力学试验研究[J].湿法冶金,2020,39(5):371-375.

[3] 郭冉,刘雄章,李青达,等.铝灰高值化回收利用技术现状[J].无机盐工业,2017,49(11):12-15,25.

[4] 王宝庆,王丹,廖耀华,等.铝灰回收工艺研究进展[J].河南化工,2015,32(3):12-15.

[5] 吴龙,胡天麒,郝以党.铝灰综合利用工艺技术进展[J].有色金属工程,2016,6(6):45-49.

[6] 李菲,郑磊,冀树军,等.铝灰中铝资源回收工艺现状与展望[J].轻金属,2009(12):3-8.

[7] 冯楠.废酸及铝灰制备聚合氯化铝净水剂工艺研究[J].有色冶金节能,2022,38(5):27-30.

[8] 苏晓梅,李小忠,申秀英.铝灰渣高效利用的试验研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2010,44(2):254-258.

[9] 康文通,李小云,李建军,等.以铝灰为原料生产硫酸铝新工艺[J].四川化工,2000(5):17-19.

[10] 刘大强,刘桂媛,何云龙.铝灰生产棕刚玉的工艺[J].哈尔滨科学技术大学学报,1996(5):48-50.

[11] 李远兵,李亚伟,李楠,等.一种电熔复合耐火材料及其生产方法:200610018950.2[P].2006-10-11.

[12] 徐晓虹,熊碧玲,吴建锋,等.废铝灰制备陶瓷清水砖的研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(5):14-16.

[13] 李燕龙,张立峰,杨文,等.铝灰用于钢包渣改质剂试验[J].钢铁,2014,49(3):17-23.

[14] 王德永,刘承军,闵义,等.铝灰在管线钢脱硫中的作用[J].中国冶金,2007,17(2):13-16.

[15] 刘万超,高宇,庄凌云,等.一种二次铝灰资源综合利用的方法:202110187583.3[P].2021-02-18.

[16] 张廷安,吕国志,豆志河,等.一种利用铝灰制备聚合氯化铝的方法:201911272442.0[P].2019-12-12.

[17] 张廷安,吕国志,刘燕,等.铝灰球团氯化-氧压转化制备氧化铝及全组分利用的方法:202110216809.8[P].2021-02-26.

[18] 吕晗.铝灰高效脱毒提铝转化机理与资源化利用研究[D].北京:北京科技大学,2023.

[19] 杜占,刘万超,杜心,等.一种铝灰高效利用的方法:202311658675.0[P].2023-12-06.

[20] 杜占,刘万超,杜心,等.一种二次铝灰高值化利用的方法:202311659878.1[P].2023-12-06.

[21] 杜占,刘万超,杜心,等.一种铝灰高效制备氯化铝的方法:202311658972.5[P].2023-12-06.

[22] 杜占,刘万超,杜心,等.一种铝灰高效制备氟化铝的方法:202311659076.0[P].2023-12-06.

[23] 杜占,刘万超,杜心,等.一种铝灰制备氟化铝的方法:202311659181.4[P].2023-12-06.

# New Technology of Efficient Disposal of Aluminum Ash in Aluminum Industry

YU Jian<sup>1</sup>, YAN Feifei<sup>1</sup>, PAN Feng<sup>2</sup>, DU Zhan<sup>1</sup>

(1. Chinalco Environmental Protection and Energy Saving Group Co., Ltd., Xiongan 071700, China;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Aiming at the prominent problems of high energy consumption and low efficiency in the disposal of hazardous waste aluminum ash in the aluminum industry, through process and technological innovation, based on thermodynamic analysis, new disposal technologies such as grinding, microwave field and inert large particle assisted strengthening were proposed. Chlorine, silicon chloride and chlorine-silicon chloride were used as chlorinating agents, respectively. Five new processes for efficient chlorination of aluminum ash were developed ( a method for efficient utilization of aluminum ash with chlorine as chlorinating agent, a method for high-value utilization of secondary aluminum ash with chlorine as chlorinating agent, a method for efficient preparation of aluminum nitride with aluminum ash with chlorine as chlorinating agent, a method for efficient preparation of aluminum fluoride with aluminum ash with silicon chloride as chlorinating agent, a method for preparation of aluminum fluoride with aluminum ash with chlorine-silicon chloride as chlorinating agent ). These five processes can effectively improve the resource utilization rate and disposal efficiency of aluminum ash, and realize the deep high-value utilization of aluminum ash ( preparation of aluminum nitride and aluminum fluoride ), which has significant economic and social benefits.

**Key words:** harmless treatment of aluminum ash; resource utilization; chlorination; chlorine gas; silicon chloride; efficient disposal; aluminum nitride; aluminium fluoride