

化工过程集成视角下铝灰协同处置与多联产系统构建的经济性

徐 晶 宋建南(聊城市英伦环保科技有限公司, 山东 聊城 252000)

摘要:铝灰的合理处理和高效利用是化工工业可持续发展的重要方向,本文基于化工过程集成的视角,对铝灰协同处置及多联产系统构建的经济性进行深入研究。通过分析铝灰的特点和现有处置技术,说明利用化工流程进行铝灰处理,可以降低成本,最大限度利用资源。研究表明,铝灰协同处置及多联产系统的构建,可以解决铝灰污染环境问题,又可多联产多种高值化产品。从投资成本、运行成本和收入预测等方面可见,该系统在目前的市场环境下的经济可行性和潜在巨大价值。

关键词:化工过程集成;铝灰协同处置;多联产系统;经济性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)017-0047-03

The economics of aluminum ash collaborative disposal and multi-generation system construction from the perspective of chemical process integration

Xu Jing, Song Jianman(Liaocheng Yinglun Environmental Protection Technology Co., Ltd Liaocheng Shandong 252000, China)

Abstract: Rational treatment and efficient utilization of aluminum ash is an important direction for the sustainable development of chemical industry. Based on the perspective of chemical process integration, this paper analyzes the economy of aluminum ash collaborative disposal and multi-generation system construction. The characteristics of aluminum ash and the existing disposal technology are analyzed, and the cost can be reduced and resources can be utilized to the maximum extent by using chemical process to treat aluminum ash. The research shows that the collaborative disposal of aluminum ash and the construction of multi-generation system can solve the environmental pollution problem of aluminum ash, and can produce multiple high-value products. From the aspects of investment cost, operating cost and revenue forecast, we can see the economic feasibility and potential huge value of the system in the current market environment.

Key words: chemical process integration; Collaborative disposal of aluminum ash; Multigeneration system; economy

随着铝业的迅速发展,产生了大量的铝灰衍生物,铝灰是铝冶炼过程产生的固体废物,不仅占用大量的土地资源,而且含有氟化物和重金属等有害物质,对环境构成了潜在的威胁。传统的铝灰处置方式,如填埋或简单堆放,无法有效利用资源,又存在环境污染的风险。近年来,化工过程集成技术在资源综合利用方面显示出巨大的发展潜力,铝灰化工处理构建铝灰协同处置及多联产体系,可以最大限度利用资源、减少环境影响,实现铝灰无害化、减量化和资源化。

1 铝灰的特性及现有处置技术分析

1.1 铝灰的来源与成分

铝灰是电解铝、铸造铝、再生铝冶金熔融过程中漂浮在铝液上层的浮渣、撇渣,包括后续炒灰、球磨等处理过程后剩余的残渣。铝电解生产过程中,铝灰主要通过定期清洗、换极等工序产生;在再生铝生产过程中,对废铝进行熔炼、精炼,生成铝灰。铝灰成分比较复杂,主要有金属铝、氧化铝、氮化铝、氟化物、重金属等。其中,金属铝含量随生产工艺及原材料不同而有差别,一般为10%~50%^[1]。氧化铝是铝灰的

主要组分,一般为30%~60%。氮化铝是铝灰的重要组分之一,其含量一般为5%~20%。氟化物主要以氟化钠、氟化铝等形式存在,含量约为5%~15%。另外,铝灰中还含有铅、锌、镉等重金属,若不加以妥善处理,将严重污染环境。

1.2 铝灰的特性

铝灰的性质随生产工艺和原材料的不同而变化,如铝电解后生成的铝灰,其金属铝含量高,有一定的金属光泽、导电性能,然而,再生铝灰中含Fe、Si、Cu等杂质较多,物理化学性质较为复杂。在物理性能方面,铝灰粒径分布较广,一般为0.01~10mm,密度很高,通常为2.5~3.5g/m³。铝灰具有很强的吸湿性,在空气中极易吸湿,从而改变其化学组成。铝灰中的金属铝在化学性质上具有很强的还原性,易与空气中的水、氧等反应生成氢气。氮化铝遇水后发生水解,生成氢氧化铝、氨等物质。氟化物是一种腐蚀性很强的物质,对设备及环境都会产生危害。

1.3 现有铝灰处置技术

现有的铝灰处理技术有火法、湿法和物理法三种,

其中，火法处理是利用高温冶炼技术从铝灰中回收金属铝，并除去其中的一些杂质，常用的火法处理方法有回转窑法、反射炉法和电炉法。火法工艺具有回收金属铝、提高处理效率的优势，其缺点是能耗高，排放大量废气和废渣，污染环境。湿法处理是利用化学药剂对铝灰中有用成分进行溶解，从而达到分离回收金属的目的，常用的湿法处理方法有酸浸法和碱浸法。湿法处理具有对环境污染小，能有效分离、回收金属的优势，其缺点是化学试剂消耗量大、费用高，且产生大量废水。物理处理为铝灰预处理，采用筛分、磁选等方法，以提高后续处理效率。物理处理具有操作简便、费用低廉的优点，缺点是仅能除去部分杂质，对金属的回收作用十分有限。

2 化工过程集成在铝灰处置中的优势

2.1 资源的最大化利用

将化工过程集成到铝灰处理中，可以最大限度地利用资源，通过对不同处理工艺的整合，可实现铝灰多组分的综合回收。采用火法冶炼和湿法处理相结合的方法，先采用火法冶炼回收金属铝，然后采用湿法回收其他有用组分，如氧化铝，这样既能充分利用铝灰中各种资源，又能提高资源利用效率。另外，化工过程集成也能实现废物的最小排放，铝灰处理过程中所产生的废渣、废水等，经过适当的处理与利用，可使其成为一种可利用的资源，如从铝灰中浸出氟化物，制得氟化盐产品；对废水进行处理，使其能在生产工艺中进行冷却和净化。

2.2 成本的有效降低

化工过程的集成能够有效地降低成本，首先，对不同处理工艺进行整合，可降低设备投资及占用空间，如火法工艺与湿法工艺相结合，可使反应器、过滤设备等部分设备共用，降低设备投资费用。其次，化工过程的集成能够最大限度地利用能源，减少能耗。铝灰处理过程中产生的余热可用于原料预热或其他工序，降低系统能耗，如利用火法冶炼产生的高温烟气对湿法处理原料进行预热，或利用湿法处理产生的余热进行溶液蒸发等。最后，化工过程集成技术还能优化生产流程、提高生产效率、降低劳动力成本。采用自动控制、在线监控等技术，可以对生产过程进行智能化管理，减少人工干预提高生产效率。

2.3 环境友好性

将化工过程集成到铝灰处理中是一种绿色环保的方法，通过优化物质流与能量流，可以实现废物减量排放，减少环境污染，如采用吸附、吸收、催化氧化等先进废气处理技术，可有效去除含氟、硫等有害物质，进而达到达标排放的目的。化工过程一体化还能实现污水处理与资源化，降低水资源浪费，如对湿法

处理产生的废水进行处理，再用在生产工艺的冷却和清洗中，达到水的回收利用。同时，利用化工过程集成技术，实现废渣的综合利用，降低废渣的堆放量，如将铝灰渣经处理后可制成建材、耐火材料等，使废渣实现资源化利用。

3 铝灰协同处置与多联产系统的构建

3.1 系统构建的原则与目标

铝灰协同处置及多联产系统的构建应从铝灰特性、市场需求和目前技术水平等方面进行综合考虑，该系统的建设原则是：最大限度地利用资源，最大限度地减少成本，最小化对环境的影响。系统的目标是通过集成不同的处置工艺和技术实现铝灰中多种成分的有效分离和回收，并将回收的成分加工成高附加值的产品，并考虑能量的回收利用和废弃物的处理，实现系统的可持续运行。

3.2 系统的主要环节

3.2.1 铝灰预处理环节

在铝灰前处理过程中，采用物理法（如筛分、磁选等）将大块杂质及金属铝除去，以提高后续处理效率。筛分可除去铝灰中较大的杂质，如石头、砖等；磁选法可从铝灰中分离出铁屑和铁针等铁磁物质。另外，也可以通过浮选、重选等方法进一步脱除铝灰中的杂质，提高其纯度。经预处理后的铝灰中金属铝含量及杂质含量均得到有效控制，可为后续核心处理过程提供优质原料。

3.2.2 核心处置工艺环节

核心处置流程可将火法冶炼与湿法浸出耦合，实现铝灰多组分高效分离与回收。火法冶炼是将预处理过的铝灰在高温条件下熔化，使其与其他杂质分离开来，冶炼过程产生的高温烟气可经余热回收装置回收，作为原料预热或其他生产工序使用。在湿法浸出工艺中，采用化学药剂对火法冶炼后的残渣进行浸出，使有用成分如氧化铝、氮化铝等溶于液中。在此基础上，通过控制浸出条件（温度、时间、试剂浓度等），实现金属的高效分离与回收。而浸出液再经过滤、蒸发和结晶，可获得高纯度的氧化铝和氟化盐。

3.2.3 产品联产环节

在产品联产环节，可根据市场需求，对再生组分进行加工，生产铝、氧化铝、氟化盐等高附加值产品。铝制品可直接销售，也可经加工制成铝型材和铝片。氧化铝可用来制造陶瓷制品、耐火材料、催化剂等。氟化盐在铝电解过程中可作助熔剂使用，也可在其他化学品中使用，同时，根据市场需求，开发铝基复合材料和铝基催化剂等高附加值产品^[2]。

3.2.4 能量回收利用与废弃物处理环节

要考虑能源回收与废物处置，以达到可持续发展

的目的。在能源回收方面，除上述余热回收外，还可利用热泵、废热锅炉等高效能量转换装置，将废热转换成电能或其他能，提高能源利用率。在废物处理上，对系统所产生的废物，如废渣、废水和废气等，要采取相应的处理工艺，使其到达达标排放。如对废渣可采取固化、稳定化等处理方式，将其填埋或综合利用；对污水可通过物理化学和生物处理，使其到达达标排放或回用；采用吸附法、吸收法和催化氧化法对废气进行处理，使废气到达达标排放标准。

4 铝灰协同处置与多联产系统的经济性评估

4.1 投资成本分析

在铝灰多联产系统的经济性评估中，主要从投资成本、运行成本及效益预测三个方面对铝灰协同处置及多联产系统进行经济性评价。以某地区新建的一家铝灰协同处置及多联产企业为例，设备购置成本占投资成本的主体，该企业配备了火法熔炼设备、湿法浸出设备、过滤设备、蒸发设备、结晶设备等。其中，火法冶炼设备采用较先进的大型设备，造价较高，在1500万元左右；湿法浸出设备根据工艺要求耗资800万元；设备购置总额达3000万元，此外还包括过滤、蒸发、结晶等设备。场地建设方面，企业地处城郊，土地购置费用500万元，厂房建设费用1200万元，水电、道路等基础设施建设费用300万元，场地建设费用2000万元。并成立了一支20人的技术团队，平均年薪20万元，每年费用400万元，以实现系统高效运作及产品高附加值；购置了一些研发设备，耗资100万元，每年研发支出约100万元；每年的研发费用约600万元人民币。

4.2 运营成本分析

运营成本主要包括原材料的采购、能源的消耗、人工的费用、设备的维护等。具体来讲，在原材料采购方面，企业所采购的铝灰主要来自周边的铝材加工企业，由于原材料的来源比较集中，品质也还可以，因此平均采购价是800元/吨，年采购量5万吨，购买铝灰4000万元，其他辅助材料每年花费500万元左右，原材料采购总额每年为4500万元。从能耗角度看，该系统以电、油为主，由于工艺设计及设备选择较为合理，因此年电耗约为800万元，燃油消耗量为700万元，总能耗为1500万元。人工费用方面，该企业的操作人员、技术员和管理人员共计100名，平均年薪为15万元，每年的人工费用为1500万元。在设备维修方面，为了保证设备的正常运转，每年的设备维护费用在200万元左右，更换零件100万元，润滑油50万元，每年的维护费用为350万元。

4.3 收益预测

在收入预测方面，根据市场价格、产量等因素，

计算出系统的收益。通过铝灰协同处置和多联产系统，实现了一系列高附加值产品的生产。其中，年产铝锭20000吨，市场价18000元/吨，销售收入36000万元；年生产氧化铝10000吨，市场价3000元/吨，氧化铝销售收入3000万元；其他副产物每年的销售额在1000万元左右，产品的销售收入则达到了40000万元。另外，企业还综合利用了生产过程中产生的废物，将其中一些废料加工成建材，年收益200万元；该企业每年节约能源费用100万元，其他效益300万元。总体计算，企业的年利润达到了40300万元。

4.4 经济可行性评估

从投资成本、运行成本及效益等方面对其进行综合分析，对其经济可行性进行评价。该企业的前期投入包括3000万元的设备购置，2000万元的场地，600万元的技术研发费用（每年600万元），合计5600万元。每年的经营费用包括4500万元的原材料采购，1500万的能耗，1500万的人工费用，350万的设备维修费用，总计7850万元。该企业的总利润为40300万元，而年度净利润为 $40300 - 7850 = 32450$ 万元。在经济可行性评价中，采用了经济评价指标，并对其进行了评价。计算净现值时，假定折现率为10%，项目周期10年，经计算净现值是一个很大的正值；内部收益率的计算结果远远高于折现率；根据估算，该项目的投资回收期为1.7年。对各项指标进行计算分析，结果表明：尽管铝灰协同处置多联产系统初投资较大，但从长远看，经济效益显著，经济上可行。

5 结束语

本文从化工过程集成角度出发，构建了铝灰协同处置及多联产系统，具有重要的理论意义和实际应用价值。该项目在前期投资压力较大，但具有较好的长期效益和综合利用资源的优势，经济可行性良好，可以解决铝灰污染环境，又能有效利用资源，提高经济效益，符合可持续发展目标，促进了铝灰协同处置及多联产系统的产业化。

参考文献：

- [1] 王玉楷, 朱志领. 协同处置铝灰除尘灰对水泥窑工况及熟料质量的影响 [J]. 水泥, 2022(10):24-26.
- [2] 周金良, 张宇驰, 胡兰, 等. 工业炉窑协同处置二次灰渣的烟气洁净排放工艺研究 [J]. 中国资源综合利用, 2023, 41(11):148-152.

作者简介：

徐晶（1984—），女，汉族，山东聊城人，硕士，中级职称，研究方向：工业废物的协同再利用工业化、元素重组分离提纯工业化。

宋建南（1990—），男，汉族，山东冠县人，本科，中级职称，研究方向：化学工程。