

工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究及经济性分析

孟红杰 张玉合 崔金峰 王有桥 邢恩典 (山东鲁北企业集团总公司, 山东 滨州 251909)

摘要: 通过开展工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究, 将工业硫酸生产过程中产生的废弃物实现高附加值利用, 不仅能够降低废弃物对环境的污染程度, 还能使工业硫酸生产企业获取较好的经济效益。本文从工业硫酸行业副产物产生现状、工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究、工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究、工业硫酸副产物资源化利用的经济性分析等方面进行了论文, 为广大工业硫酸生产企业及回收企业开展化工废弃物资源化利用提供了借鉴和参考。

关键词: 工业硫酸; 化工; 资源化利用; 循环经济; 经济性分析

中图分类号: TQ111.16; X781 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0097-03

Research on Key Technologies for Resource Utilization of Industrial Sulfuric Acid By-products and Economic Analysis

Meng Hongjie, Zhang Yuhe, Cui Jinfeng, Wang Youqiao, Xing Endian (Shandong Lubei Enterprise Group General Company, Binzhou Shandong 251909, China)

Abstract: By conducting research on key technologies for the resource utilization of industrial sulfuric acid by-products, the waste generated during the production of industrial sulfuric acid can be transformed into high-value applications. This not only reduces the environmental pollution caused by waste but also provides industrial sulfuric acid manufacturers with better economic benefits. This paper discusses the current status of by-product generation in the industrial sulfuric acid sector, key technologies for resource utilization of industrial sulfuric acid by-products, and economic analysis of these technologies. It aims to provide reference and guidance for industrial sulfuric acid producers and recycling enterprises in carrying out chemical waste resource utilization.

Keywords: Industrial sulfuric acid; Chemical industry; Resource utilization; Circular economy; Economic analysis

工业硫酸是一种常见的无机化合物, 能与多种物质进行反应, 是一种重要的化工原料, 有“工业之母”之称。工业硫酸被广泛应用于有色金属冶炼、钢铁冶炼、钛白粉、有机合成、电镀、制药等行业。^[1]新中国成立以来, 我国开始重视工业硫酸产业的发展。70余年来, 随着中国工业经济的快速发展, 我国逐渐发展成为产品品种齐全、技术装备领先、工艺水平成熟的硫酸工业强国, 产业规模位居世界首位。

但是, 在工业硫酸生产过程中, 也产生了废硫酸、硫酸渣、含硫废液等大量含硫化工副产物。大量含硫化工副产物如果处理不当, 会给生态环境和人类生命健康造成巨大的危害。工业硫酸作为重要的基础化工原料, 对碳达峰碳中和目标实现具有重要意义。^[2]因此, 近年来, 人们对含硫化工副产物的关注度越来越高。

1 工业硫酸行业副产物产生现状

2020年以来, 我国硫酸产量持续增长。据有关部门统计, 2024年我国硫酸产量为10369.9万t。我国工业硫酸副产物的产生量跟工业硫酸生产聚集地密切相关, 主要分布在长江流域和黄河流域。其中, 山东省的东营市、滨州市、日照市、潍坊市等地区每年都会产生较大量的工业硫酸副产物。废硫酸、硫酸渣、

含硫废液等工业硫酸副产物危害大、处理费用高, 一直是困扰工业硫酸生产企业的重大难题。

大量工业硫酸副产物的产生不仅会对环境造成潜在威胁, 也会造成大量资源的浪费。为了实现工业硫酸行业的可持续发展, 加强工业硫酸副产物高附加值资源化利用技术研发, 提高工业硫酸副产物的综合利用率势在必行。

与此同时, 国家有关部委也陆续出台了相关引导政策, 指导化工废弃物资源化利用工作的开展。2021年7月1日, 国家发展改革委印发的《“十四五”循环经济发展规划》中提出, 到2025年大宗工业固废综合利用率达到60%。其中, 含硫副产物资源化率被列为关键考核指标。

2 工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究

2.1 工业硫酸副产物废硫酸高温裂解制酸技术

通过采用独立高温裂解技术、石膏制酸联产水泥装置协同裂解技术和硫铁矿制酸装置协同裂解技术等工业硫酸副产物高温裂解制酸技术, 可对有机物含量较高的工业硫酸副产物废硫酸进行高温裂解制取硫酸。在开展工业硫酸副产物高温裂解制酸工作过程中, 需要注意高温裂解制酸装置应满足硫酸完全裂解、有机物充分燃烧所需的温度和停留时间等工艺要求。

比如,独立高温裂解技术是在高温条件下(炉温不宜低于1100℃)将废硫酸转化为含硫烟气后可制得98%以上的高纯浓硫酸,通常用于高浓度有机废硫酸(>70%)的处理^[3];石膏制酸联产水泥装置协同裂解技术回转窑的高温段窑温不宜低于1350℃,硫铁矿制酸装置协同裂解技术沸腾炉的炉温不宜低于950℃。近年来,随着石膏制硫酸联产水泥技术的日臻成熟,我国国内石膏制硫酸联产水泥装置正呈蓬勃发展之势。^[4]

2.2 工业硫酸副产物含硫废液循环再生关键技术

工业硫酸生产过程中产生的含硫废液(废酸液),尤其是冶炼烟气制酸系统产生的含砷、氟、重金属的污酸,成分复杂性且具有较强的腐蚀性和毒性。采用膜分离耦合蒸发浓缩技术、电解再生制备高纯硫酸技术和有机污染物深度氧化去除技术等循环再生关键技术,可以实现含硫废液(废酸液)的高附加值利用。

其中,膜分离耦合蒸发浓缩技术主要是通过物理分离与相变浓缩协同作用,以耐酸纳滤或反渗透膜为前端核心,优先截留砷酸根、氟离子及重金属络合物,并允许游离 H_2SO_4 与部分小分子盐类透过,从而实现酸与杂质的初步解耦;电解再生制备高纯硫酸技术通过电化学氧化还原反应,在不引入外来离子的前提下实现废酸中杂质元素的选择性去除与硫酸的原位再生,其核心在于构建稳定、高选择性的电极体系;采用有机污染物深度氧化去除技术,可将含硫废液(废酸液)中存在的焦油、润滑油、表面活性剂及微量酚类等难降解有机物进行深度氧化去除,是保障含硫废液(废酸液)全流程资源化安全性的必要前置环节。

2.3 含硫含钙废弃物协同处理与资源化关键技术

山东鲁北化工企业集团总公司和山东鲁北化工股份有限公司联合研发出了含硫含钙废弃物协同处理与资源化关键技术并成功实现产业化。项目承担单位将其自主研发的裂解炉与石膏制硫酸分解系统进行并联耦合,针对不同来源高浓度废硫酸中有机污染物组分复杂、腐蚀性强、毒害大等特征,开发出了污染物高温分解新技术,以高硫煤、脱硫废液为燃料的路线,废酸裂解率 $\geq 99.95\%$,解决了废硫酸燃烧温度场不均匀、结焦、废酸喷嘴堵塞等稳定运行的技术难题,创新形成了高浓度废酸资源化利用的整套工艺。

并且,通过对电石渣、废氧化钙等含钙废物化学分解特性的研究,优化了钙基废物分解过程中的温度、气氛、时间、杂质等因素对含钙类固废分解率的影响,形成了“以废治废、硫钙互促、能质双收”的绿色工业范式,有力支撑了磷石膏、钛石膏等大宗固废治理国家战略,推动了硫化工与钙基材料产业向低碳化、高端化、集群化跃升。

2.4 化工副产高浓度有机废硫酸资源化高值利用关键技术

2019年11月,山东鲁北化工股份有限公司与中国科学院过程工程研究所、北京中富瑞科环保科技有限公司联合研发的“化工副产高浓度有机废硫酸资源化高值利用关键技术开发与产业化示范”成果被山东省科技厅列为“2019年度山东省重点研发计划”,并于2023年6月9日,通过山东省科技厅验收。该项目获得了低成本、全资源化处理的高浓度有机废硫酸资源化高值利用关键技术集成设计工艺包及处理处置技术规范,建成了2万t高浓度有机废硫酸、1万t生物质肥料及1000t功能炭材料的产业化示范装置,实现了稳定运行。项目研发的成套装置较现有工艺能耗降低56.86%,实现酸溶有机物回收率82.3%,硫回收率99.36%,分别完成任务书约定指标的113.7%、102.9%和101.4%。项目首次实现烷基化废硫酸中酸溶有机物低温炭化并协同处置有机废弃物,将有机废弃物转化为功能炭材料,实现有机固废的固碳减排。

3 工业硫酸副产物资源化利用的经济性分析

实施工业硫酸副产物资源化利用的主要成本投入包括设备购置费用、生产运行费用、新技术研发费用和原材料采购费用等。其中,设备购置费用主要包括选矿设备、吸收塔、浓缩设备等购置和安装费用;生产运行费用主要包括水、电、天然气等能源消耗和人工费用等;新技术研发费用主要包括研发人员费用、研发仪器设备购置费用、试验费用等;原材料成本主要包括用于处理副产物的各种化学药剂和辅助材料的费用。此外,将工业硫酸副产物制成再生产品后,进行市场推广阶段也会产生一些市场推广成本费用。工业硫酸副产物资源化利用的经济收益主要来自于回收产品的销售收入。

比如,通过工业硫酸副产物资源化利用处理后回收的铁精矿可以按照市场价格销售给钢铁企业,硫酸铵可以销售给化肥企业,副产硫酸可以用于企业回用以节约企业生产成本或销售给下游企业创造经济效益。此外,积极开展工业硫酸副产物资源化利用还可以减少化工企业的废弃物处理成本,从而带来一定的间接经济效益。

整体来说,积极开展工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究工作符合我国大力发展循环经济的战略思想,能够引导工业硫酸生产企业在创造经济效益的同时合理处理自身产生的废弃物,从而最大程度的保护生态环境。并且,将自身产生的化工废弃物进行资源化利用后制成高附加值的再生产品又可以创造良好的经济效益。从短期来看,开展此项工作需要投入相

应的人力、物力、财力,使得企业运营成本增加。但由于资源化生产的产品可以替代传统原料用于企业自身生产,或作为原料、半成品销售给下游企业从而给企业带来销售收入。所以,从长远来看,工业硫酸生产企业开展工业硫酸副产物资源化利用关键技术研究能够获得较好的经济效益。

山东鲁北企业集团总公司作为我国较早的生态工业实践者,逐渐形成了结构紧密、共享共生的生态工业模式,是世界上为数不多的、具有多年成功运行经验的生态工业系统。^[5]近年来,山东鲁北企业集团总公司本着将化工废弃物“吃干榨净”的原则,不断对产业链进行延伸,打造了磷铵-硫酸-水泥及锂电池材料联产产业链(如图1所示)。拥有年产360万t铝基材料、31万t钛白粉、100万t复合肥、30万t磷铵、40万t硫酸、60万t水泥、2万t碳酸锂、3万t磷酸铁锂正极材料联产3万t磷酸铁、100万t原盐、5000t溴素、30万t甲烷氯化物等生产能力。2024年度,集团实现营业收入303亿元,同比增长60.8%;利润总额19.81亿元,同比增长405.37%;实缴税金6.21亿元,同比增长67.64%;2025年上半年,集团实现营业收入135.08亿元,同比增长2.28%;利润总额2035.60万元,同比减少95.38%;实缴税金6.41亿元,同比增长163.45%。

4 结束语

发展循环经济是推进生态文明建设、实现绿色发展的重要举措。^[6]随着科技的不断进步,工业硫酸副产物资源化利用关键技术取得了显著的进展。新型的分离提取技术、催化转化技术等不断涌现,为副产物的资源化利用提供了更多的可能性。随着技术的不断

成熟和完善,工业硫酸副产物资源化利用的成本将逐渐降低,经济效益将进一步提高,这将进一步推动该技术的市场应用。化工废弃物的有效处理与资源化转化是实现环境可持续发展的关键环节。^[7]积极开展化工废弃物资源化利用工作不仅能够实现资源的有效利用和环境保护,还能为企业带来较好的经济效益。工业硫酸副产物资源化利用关键技术具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] 李萍. 废硫酸回收研究进展 [J]. 广州化工, 2025, 54(18): 24-27.
- [2] 李月丽, 方雨乔, 曾伟, 吴小成. 工业硫酸企业碳排放核算及碳减排分析 [J]. 硫酸工业, 2025(06): 7-11+38.
- [3] 姚文金, 薛河南, 马航, 徐振玲, 赵彤, 万邦隆, 董芸. 废硫酸处理技术现状与进展 [J]. 云南化工, 2025, 52(12): 22-34.
- [4] 刘勇, 刘显涛, 宁爱民. 浅谈石膏制硫酸联产水泥装置中防止升华硫危害的措施 [J]. 硫酸工业, 2014(03): 42-43.
- [5] 邰轩. 发展循环经济, 建设生态文明——山东鲁北企业集团总公司绿色发展纪实 [J]. 环境教育, 2024(04): 26-29.
- [6] 范恒山. 推进循环经济发展 助力生态文明建设 [J]. 宏观经济管理, 2018(01): 10-11+25.
- [7] 申永康. 化工废弃物处理与资源化知识图谱构建研究 [D]. 淮安: 淮阴工学院, 2025.

作者简介:

孟红杰(1987-),女,汉族,山东滨州人,本科,工程师,研究方向:化学工程、检验检测、新材料等。

张玉合(1978-),男,汉族,山东滨州人,专科,毕工工程师,研究方向:化学工程、检验检测、新材料等。

崔金峰(1984-),男,汉族,山东无棣人,本科,工程师,研究方向:化学工程、检验检测、新材料等。

王有桥(1990-),男,汉族,山东滨州人,本科,助理工程师,研究方向:化学工程、检验检测、新材料等。

邢恩典(1982-),男,汉族,山东滨州人,专科,助理工程师,研究方向:化学工程、检验检测、新材料等。

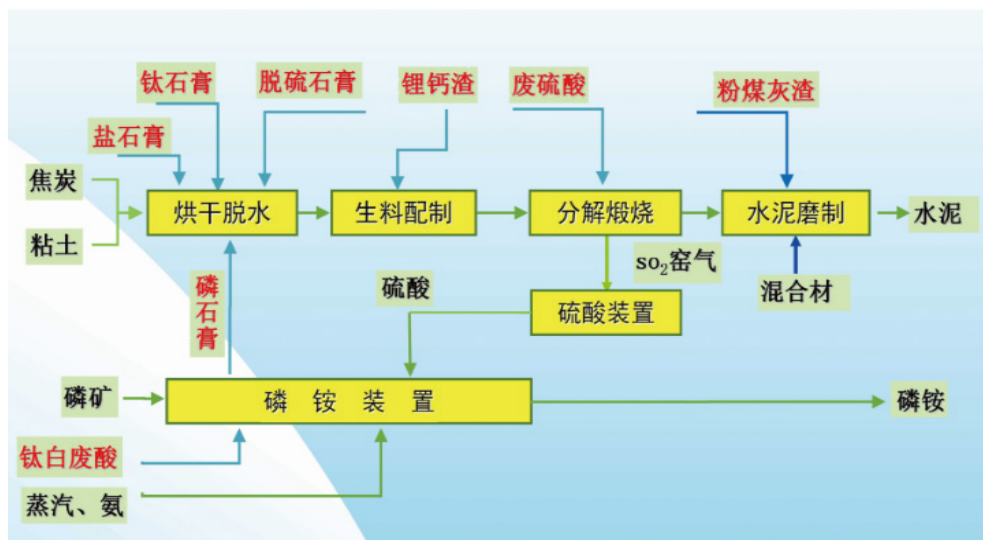


图1 磷铵-硫酸-水泥及锂电池材料联产产业链(来源:鲁北集团官网)