

煤化工粉煤灰资源化利用经济性评价及产业化模式构建

王广阔 (内蒙古恒坤化工有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 016299)

摘要: 在“双碳”目标与循环经济战略背景下, 煤化工粉煤灰资源化利用既是破解工业固废污染的关键路径, 也是实现资源高效循环的重要抓手。本文从理论层面构建“问题诊断—理论框架—模式创新”的研究体系, 系统剖析当前资源化利用面临的技术适配性不足、成本高企、产业链割裂等核心问题, 基于全生命周期理论与产业生态理论, 提出技术经济协同评价框架与“三维联动”产业化模式。

关键词: 煤化工粉煤灰; 资源化利用; 经济性评价; 产业化模式

中图分类号: X784; F062.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 029-0013-03

Economic Evaluation and Industrialization Model Construction of Coal Chemical Engineering Fly Ash Resource Utilization

Wang Guanglang (Inner Mongolia Hengkun Chemical Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia 016299, China)

Abstract: In the context of the “dual carbon” goal and circular economy strategy, the resource utilization of coal chemical fly ash is not only a key path to solve industrial solid waste pollution, but also an important lever to achieve efficient resource recycling. This article constructs a research system of “problem diagnosis theoretical framework model innovation” from a theoretical perspective, systematically analyzing the core problems faced by current resource utilization, such as insufficient technological adaptability, high cost enterprises, and fragmented industrial chains. Based on the theory of the entire life cycle and industrial ecology, a technology economy collaborative evaluation framework and a “three-dimensional linkage” industrialization model are proposed.

Keywords: coal chemical engineering fly ash; Resource utilization; Economic evaluation; Industrialization mode

1 研究背景与战略意义

作为煤炭清洁转化的核心产物, 我国煤化工产业年产生粉煤灰超 3 亿 t, 其综合利用率长期低于燃煤电厂粉煤灰, 形成“增量堆积与存量治理”的双重压力。与电厂粉煤灰相比, 煤化工粉煤灰因高钙特性、成分复杂等特点, 在传统建材领域的适配性较差, 而在土壤改良、贵金属提取等新兴领域的技术转化不足, 导致其资源化利用陷入“低端化利用难、高端化突破慢”的困境。随着“无废城市”建设与碳达峰政策推进, 突破煤化工粉煤灰资源化的经济性瓶颈, 构建可持续发展的产业化模式, 成为落实绿色发展理念的重要课题。

2 核心问题诊断

当前煤化工粉煤灰资源化面临三大理论与实践挑战:

①技术经济性失衡: 传统利用技术(如建材制备)因预处理成本高、产品附加值低, 导致项目盈利困难; 高附加值技术(如稀散元素提取)受制于工艺不成熟, 产业化风险较大。

②产业生态割裂: 上下游企业缺乏协同, 粉煤灰分级利用体系尚未形成, 优质资源(如超细活性颗粒)与劣质组分(如杂质富集颗粒)未实现差异化利用。

③政策激励机制滞后: 现有资源综合利用政策多

针对电厂粉煤灰, 对煤化工粉煤灰的特殊性考虑不足, 税收优惠、财政补贴的精准性有待提升。

3 煤化工粉煤灰资源化利用的理论框架构建

3.1 技术经济协同评价理论

基于全生命周期理论, 煤化工粉煤灰资源化的成本链条涵盖“产生—处理—利用—废弃”四个阶段。

资源化利用阶段: 技术路线的抉择对成本结构有着深远影响。以烧结法制备陶粒为例, 其在烧制过程中需消耗大量能源用于高温烧结, 致使能耗成本显著高于免烧法。免烧法凭借特定添加剂与成型工艺, 规避了高温烧制环节, 极大降低能耗。在高附加值利用方面, 针对煤化工粉煤灰提取稀有金属、制备高性能材料等技术研发, 需投入大量人力、物力与财力用于实验、设备购置及技术攻关, 研发成本占比往往超过 20%。

环境成本内部化: 传统的粉煤灰填埋处理方式, 虽短期内看似成本低廉, 实则隐藏着高昂的隐性环境成本。长期填埋可能致使粉煤灰中的有害物质渗入土壤, 造成土壤污染, 后续土壤污染治理需耗费巨额资金用于土壤修复技术实施、污染土壤置换等。此外, 填埋还可能破坏周边生态系统, 引发植被退化、生物多样性减少等问题, 生态修复同样成本不菲。通过资

源化利用，将粉煤灰转化为有价值产品，如建筑材料、吸附剂等，实现外部环境成本内部化，成为煤化工粉煤灰经济性评价不可或缺的重要维度。

粉煤灰资源化的价值体系包括：

环境价值：煤化工粉煤灰若长期采用固废填埋的处置方式，不仅会大量占用宝贵的土地资源，还可能因渗滤液等问题导致土壤和水体污染。而对其进行有效利用，则能显著减少此类土地占用与污染排放。以粉煤灰基建材为例，经权威研究表明，在建筑行业使用该类建材，相较于传统建材可降低约 30% 的碳排放，有力地契合了当下全球碳减排的重要目标，对改善生态环境意义重大。

经济价值：过去，粉煤灰多作为普通建材原料，价值未得到充分挖掘。随着技术的持续升级，如今可将其转化为功能性填料等高端产品。这一转变使得粉煤灰的价值实现了 5 - 10 倍的大幅提升。通过构建“固废—资源—商品”的价值转化链条，不仅为企业创造了新的利润增长点，还推动了资源的高效循环利用，带动了相关产业的协同发展，形成了可持续发展的经济发展模式。

3.2 产业化模式的理论基础

中游专业化处理企业积极整合各类先进技术，实现粉煤灰的高效分级利用。他们通过磁选、浮选、磨细等多种手段，将粉煤灰中的不同成分精准分离，使其能够适配不同行业的应用需求。下游建材、农业、新材料等领域的企业充分挖掘粉煤灰的潜在价值，开发出多元化产品。在建材领域，粉煤灰被用于生产水泥、砖块、墙板等，有效提升产品性能并降低成本；农业方面，粉煤灰基土壤改良剂改善土壤结构、提高肥力；新材料领域，利用粉煤灰制备高性能陶瓷、吸附材料等。各领域企业紧密协作，形成跨行业耦合的产业生态，最大化发挥粉煤灰的综合效益。

政策激励是破解经济性瓶颈的关键驱动力，需综合运用：

需求侧政策：建立健全绿色采购制度，鼓励各级政府及大型企业优先采购以煤化工粉煤灰为原料生产的资源化产品，从源头上拓展市场需求。推行碳交易机制，使积极开展粉煤灰资源化利用的企业能够通过出售碳排放配额获取经济收益，从而激励更多企业投身其中，扩大资源化产品市场需求。

环境规制政策：实施阶梯式填埋收费，依据企业对煤化工粉煤灰填埋量的多少分档计费，填埋量越大收费越高，以此倒逼企业寻求更高效的综合利用途径。设立固废排放配额，为企业设定严格的粉煤灰排放上限，促使企业不断提升综合利用率，降低固废排放量。

4 经济性评价的核心维度与关键问题

水泥混合材、蒸压加气混凝土等传统技术面临两大适配性问题：

成分波动的工艺稳定性：在煤化工过程中，粉煤灰的成分深受煤种以及气化工艺的显著影响。其中，粉煤灰的活性组分，诸如 SiO_2 （二氧化硅）、 Al_2O_3 （氧化铝），其含量波动幅度可达 20%-30%。这种大幅度的波动使得生产过程中的配方需要频繁进行调整。例如，当活性组分含量偏高时，需减少其他添加剂的用量；反之，则要增加相应原料比例。频繁的配方调整不仅耗费人力、物力，还极大地降低了设备的利用率，设备无法在稳定的参数下持续高效运行，严重影响了生产效率与经济效益。

土壤改良剂、贵金属提取等技术的商业化瓶颈在于：

规模效应缺失：在煤化工粉煤灰处理领域，规模效应的影响极为显著。从行业标准来看，单条生产线要实现经济规模，年产量需达到 50 万 t 以上。这一规模能够充分摊薄设备购置、厂房建设等固定成本，使生产过程更具经济性。然而，当下多数煤化工项目所配套的粉煤灰处理设施，规模普遍仅在 20 - 30 万 t/a。相较于经济规模，这些较小规模的设施在运行时，由于无法充分利用设备产能，导致单位固定成本大幅增加，经核算，单位固定成本较经济规模下增加了 30%。这无疑给煤化工企业在粉煤灰处理环节带来了沉重的成本负担，严重制约了相关业务的盈利能力与发展潜力。

5 产业化模式创新与实施路径

5.1 “政产学研用” 协同创新模式：破解技术瓶颈

基础研究：高校与科研院所聚焦高钙粉煤灰活性激发机理、微量元素赋存形态等理论问题，为技术创新提供原理支撑。

5.1.1 应用研发

企业积极与科研机构开展深度合作，针对煤化工粉煤灰特性全力开发适用性技术。比如，研发高钙粉煤灰安定性改良剂，通过精准调配化学药剂，有效改善高钙粉煤灰在使用过程中的安定性能，使其能够更广泛地应用于建筑材料等领域；探索低温高效浸出工艺，借助新型溶剂与创新反应条件，在相对低温环境下实现粉煤灰中有价元素的高效提取，大幅缩短从实验室成果到实际产业应用的技术转化周期，加速科技成果落地。

5.1.2 示范推广

政府充分发挥引导作用，设立专项试点项目，聚焦煤化工粉煤灰相关新技术与新设备的应用。对首次

投入使用的首台(套)设备,以及采用前沿新技术的示范工程,给予专项补贴资金支持。此举旨在降低企业在尝试新技术、新设备过程中的经济风险,减少因技术不成熟或市场接受度不确定带来的试错成本,激励企业踊跃投身于煤化工粉煤灰产业化创新实践。

制定科学合理的煤化工粉煤灰分级分类标准至关重要。通过建立全面且细致的分级体系,能够精准界定不同品质粉煤灰的特性与价值。例如,高活性粉煤灰因其独特的化学活性,在胶凝材料领域展现出卓越性能,可大幅提升混凝土的强度与耐久性;而富锗粉煤灰则因其富含稀有金属锗,成为金属提取的优质原料。

借助这一标准,能够引导资源按照自身特性实现定向流动,有效避免市场中“劣币驱逐良币”的乱象,确保各类粉煤灰都能在合适的产业环节发挥最大价值,推动煤化工粉煤灰产业的健康有序发展。

5.2 园区化循环经济模式:优化产业生态

利用基地的优势大力发展建材、土壤改良剂、新材料等产业。在建材生产环节,原料混合、烧制等流程产生的废浆,通过专门的管道与运输设备,定向输送至处理中心;土壤改良剂生产中残留的废灰,经分类收集、集中打包后,也有序运往处理中心。在新材料产业中,从实验研发到工业化生产过程里,产生的各类废弃物料同样被纳入回收体系。这些废浆、废灰抵达处理中心后,经过专业的破碎、筛选、提纯等一系列复杂工艺,重新转化为可利用的原料,再度投入到相关产业的生产流程中,从而形成一套完整且高效的“零废弃”循环体系。

农业企业敏锐捕捉到粉煤灰所具备的碱性特质,以此为切入点,精心研发出土壤改良剂。这一产品精准契合酸性土壤治理的迫切需求,能够有效中和土壤酸性,改善土壤结构,提升土壤肥力,为农作物的茁壮成长创造良好的土壤环境。环保企业则另辟蹊径,将目光聚焦于粉煤灰基碳封存材料的开发。通过技术攻关,成功打造出具备高效碳封存能力的产品,与煤化工项目的碳减排目标无缝对接。

这一举措不仅实现了煤化工产业固废的有效消纳,降低了环境污染风险,还通过碳资产的创造,为企业带来额外的经济收益,达成“固废消纳+碳资产创造”的双重效益,开辟出一条环保与经济双赢的新路径。

6 结论

煤化工粉煤灰资源化进程中,核心矛盾在于其特殊的物化性质与现存技术、政策以及市场体系之间存在显著不匹配。粉煤灰成分复杂,含有多种微量元素

与矿物质,这使得传统技术难以对其进行高效处理与利用,且现有政策在支持力度、规范引导方面存在不足,市场对于粉煤灰产品的接受度和认知度也有待提升。为有效解决这一矛盾,需从技术适配、产业组织、政策激励三个维度展开系统优化,精准施策。在技术适配层面,研发针对性强、契合粉煤灰特性的处理技术,提高资源转化率;产业组织上,优化产业结构,加强上下游企业合作,形成协同效应;政策激励方面,出台优惠政策,引导企业积极参与资源化利用。

在经济性评价环节,不应局限于单一项目成本核算的狭隘视角,而需引入全生命周期价值创造理念,将项目从建设、运营到最终废弃各阶段的价值综合考量,同时将环境效益内部化纳入评价体系,充分评估项目在减少污染排放、资源节约等方面的潜在收益,构建全面、多维的评价体系,为项目投资决策提供科学依据。

产业化模式创新的本质在于构建“技术供给—产业协同—政策引导”的动态耦合机制。技术供给为产业发展提供核心驱动力,源源不断输出创新成果;产业协同促使各环节企业紧密合作,形成完整产业链条;政策引导则为产业发展营造良好环境,提供方向指引。通过理论创新与实践探索双轮驱动,破解长期以来困扰行业的“技术可行、经济不可行”的转化困境,推动煤化工粉煤灰资源化产业实现可持续、高质量发展。

参考文献:

- [1] 王双明. 煤炭工业绿色发展理论与实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-10.
- [2] 张亚涛, 段钰锋. 高钙粉煤灰特性及资源化利用瓶颈分析[J]. 化工进展, 2019, 38(3): 1234-1242.
- [3] 李金惠. 固体废物资源化的产业生态构建理论[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1721-1728.
- [4] 黄占斌. 工业固废土壤改良的理论与实践[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 1-8.
- [5] 杜根杰. 煤化工固废资源化的政策适配性研究[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(4): 1-7.
- [6] 陈健. 粉煤灰基材料的环境效益量化理论[J]. 材料导报, 2020, 34(10): 10123-10130.
- [7] 朱小军. 粉煤灰-矿渣基充填材料的物性分析及经济性评价[J]. 山西能源学院学报, 2020, 33(03): 1-3.
- [8] 史钰鹏. 碱激发矿渣粉煤灰固化淤泥力学性能和经济性研究[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(09): 27-29.

作者简介:

王广阔(1983.11-), 男, 汉族, 山东聊城人、工学学士, 工程师, 研究方向: 煤化工。