

# “双碳”目标下粉煤灰综合利用研究

韦菲飞 杜旭升 王 凯

西安建筑科技大学设计研究总院有限公司 陕西 西安 710055

**摘要:** 粉煤灰是燃煤电厂主要固体废弃物,年排放量大,长期堆存占用土地且破坏生态。在碳达峰、碳中和目标下,其综合利用已向资源化、高值化、低碳化转型。本文阐述了粉煤灰理化特性与资源属性,分析其产生利用现状,从建材、农业、元素提取、环保材料及二氧化碳矿化封存等维度探讨低碳利用路径。研究表明,粉煤灰综合利用可消纳固废、减轻环境压力,还能通过多种方式助力双碳目标,并从全生命周期评估了低碳效益。

**关键词:** 双碳目标;粉煤灰;综合利用

**引言:** 燃煤发电是我国电力供应主力,燃煤产生大量粉煤灰,长期堆存不仅占用土地,其细颗粒物还会造成大气污染,有害物质渗滤更会污染土壤与地下水,带来严重环境风险。不过,建材生产、农业改良等领域对粉煤灰有巨大需求潜力。在双碳目标引领下,工业固废资源化利用有了新使命,粉煤灰替代水泥熟料可减少碳排放,碱土金属组分还能矿化封存二氧化碳。系统评估其低碳效益,对推动资源化利用和实现双碳目标意义重大。

## 1 粉煤灰概述与“双碳”背景分析

### 1.1 粉煤灰的来源与理化特性

粉煤灰是燃煤电厂煤粉燃烧后从烟气中收集的细颗粒固体废弃物,其形成过程包括煤粉燃烧、熔融、急冷凝固三个阶段。高温下煤粉中矿物组分熔融形成微小球状玻璃体,随烟气冷却凝固后经除尘设备捕集即得粉煤灰。粉煤灰的理化特性因煤源、燃烧方式和收集工艺不同而存在差异。物理特性方面,粉煤灰呈灰白至灰黑色,颗粒细度通常在45微米筛余量5%~25%之间,真密度每立方厘米2.0~2.3克,堆积密度每立方厘米0.8~1.2克,比表面积每千克250~600平方米。化学组成以硅、铝、铁氧化物为主,二氧化硅含量40%~60%,三氧化二铝15%~35%,三氧化二铁5%~15%,此外还含有钙、镁、硫及未燃尽碳。矿物相主要为玻璃体,占50%~80%,其次为石英、莫来石、赤铁矿等晶相矿物。粉煤灰的火山灰活性使其可与氢氧化钙反应生成水硬性胶凝材料,这是其在建材领域应用的基础。

### 1.2 我国粉煤灰产生与利用现状

我国燃煤发电装机容量世界第一,粉煤灰产生量长期居高不下。近年来全国粉煤灰年产生量稳定在6亿吨左右,主要分布在内蒙古、山西、陕西、新疆等煤炭主产区和东部沿海电力负荷中心。受煤质、燃烧技术和除尘设备影响,粉煤灰品质区域差异显著,高铝粉煤灰主要

分布于内蒙古中西部和山西北部,高钙粉煤灰多见于褐煤产区。粉煤灰综合利用经历了从简单填埋到资源化利用的发展历程,目前综合利用率约75%,年利用量4.5亿吨左右。利用途径以建材领域为主,水泥混合材和混凝土掺合料占总利用量的45%,粉煤灰砖和砌块占20%,筑路和回填占15%。农业领域土壤改良和肥料生产利用量约8%,有价元素提取和精细化工利用占比不足3%。尽管综合利用率较高,但区域间不平衡问题突出,中西部产灰大省利用率普遍低于60%,大量粉煤灰仍以堆存方式处置,现有灰场库容压力持续增大,新建灰场选址困难,环境风险日益凸显<sup>[1]</sup>。

### 1.3 “双碳”目标对粉煤灰利用的新要求

碳达峰、碳中和目标的提出为粉煤灰综合利用指明了新的发展方向。传统建材行业是碳排放大户,水泥生产过程中石灰石分解和燃料燃烧产生的二氧化碳排放约占全国总量的13%。粉煤灰替代水泥熟料可直接减少石灰石用量和煅烧能耗,每替代一吨熟料可减少二氧化碳排放约0.9吨。双碳目标对建材行业碳减排形成刚性约束,粉煤灰作为低碳替代原料的战略价值日益凸显。与此同时,碳捕集利用与封存技术被认为是实现碳中和的关键手段,粉煤灰富含钙、镁等碱土金属,可与二氧化碳反应生成稳定的碳酸盐矿物,为工业源二氧化碳的矿化封存提供潜在途径。双碳目标还要求构建绿色低碳循环经济体系,粉煤灰综合利用不再仅仅是固废处置问题,而是纳入资源循环利用和碳减排的整体框架。

## 2 粉煤灰综合利用的主要技术路径

### 2.1 建材生产领域的高值化利用

建材生产是粉煤灰规模化利用的主要途径,技术成熟且消纳量大。作为水泥混合材,粉煤灰与熟料、石膏共同粉磨可生产火山灰质硅酸盐水泥,掺加量通常为20%~40%。粉煤灰中活性二氧化硅和三氧化二铝与水泥

水化产生的氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙,改善水泥后期强度和耐久性。作为混凝土掺合料,粉煤灰等量替代部分水泥可改善混凝土和易性,降低水化热,提高抗渗性和抗硫酸盐侵蚀能力。高性能混凝土中粉煤灰掺量可达30%~50%,大体积混凝土工程中应用尤为广泛。粉煤灰砖和砌块是墙体材料的重要品种,通过粉煤灰与石灰、石膏或水泥混合,经压制成型、蒸压养护制成蒸压粉煤灰砖,或经发泡、养护制成加气混凝土砌块,产品容重轻、保温隔热性能好。轻质骨料方面,粉煤灰经成球、烧结制成陶粒,可用于生产轻质混凝土和保温砂浆。水泥熟料生产中,粉煤灰可作为硅铝质原料替代粘土,每吨熟料可利用粉煤灰100~150公斤,同时降低熟料烧成热耗。建材利用途径对粉煤灰品质有一定要求,碳含量和细度是关键控制指标。

## 2.2 农业领域的资源化利用

粉煤灰在农业领域的应用基于其物理性质和化学组成。作为土壤改良剂,粉煤灰可改善土壤质地,增加土壤孔隙度,降低容重,提高保水保肥能力。粘重土壤中施入粉煤灰可改善通透性,砂质土壤中可提高保水性。粉煤灰中富含硅、钙、镁、硫等中量元素以及硼、钼、锌等微量元素,对作物生长具有营养作用。酸性土壤中,粉煤灰的碱性可中和土壤酸度,提高土壤pH值,改善土壤化学性质。粉煤灰复合肥是将粉煤灰与氮、磷、钾肥按一定比例混合造粒制成,粉煤灰作为载体和调理剂,可延缓养分释放,提高肥料利用率。水稻田中施用粉煤灰可促进硅素吸收,增强抗倒伏能力和抗病虫害能力<sup>[2]</sup>。粉煤灰还可用作保水材料,与高分子吸水树脂复合制成保水剂,应用于干旱半干旱地区农业生产。农业利用需严格控制粉煤灰中有害元素含量,避免重金属等污染物通过食物链传递。粉煤灰农业利用消纳量大但附加值相对较低,是有利于大规模处置的补充途径。

## 2.3 有价元素提取与高值利用

粉煤灰中含有多种有价元素,提取利用是实现高值化的重要方向。氧化铝提取是当前研究最为深入的技术领域,我国内蒙古中西部和山西北部蕴藏丰富的高铝粉煤灰资源,三氧化二铝含量高达40%~50%,相当于中低品位铝土矿。碱法提取采用石灰石烧结或碱石灰烧结工艺,将粉煤灰中莫来石和刚玉相转化为可溶性铝酸钠,经溶出、脱硅、碳分得到氢氧化铝,再煅烧制得氧化铝。酸法提取采用盐酸或硫酸直接浸出,铝浸出率高,但设备腐蚀和废液处理问题突出。目前高铝粉煤灰提取氧化铝已建成多个示范工程,但经济性和废渣利用仍需优化。硅的提取利用主要包括制备白炭黑和硅肥,粉煤灰脱铝

后的富硅渣可进一步加工。铁的回收通过磁选实现,粉煤灰中磁性铁含量通常为5%~15%,磁选可获得铁精矿用于炼铁原料。未燃尽碳的分选可回收热值,降低粉煤灰碳含量以提升建材利用品质。稀土元素和稀散金属在部分粉煤灰中富集,镓、锗、铈等具有重要战略价值,提取技术处于研究阶段。有价元素提取技术复杂、成本较高,适合高值粉煤灰资源化利用。

## 2.4 环保材料制备与应用

粉煤灰因其多孔结构和化学活性,可用于制备多种环保材料。沸石分子筛是重要方向,粉煤灰中硅铝组分经碱熔融、水热晶化可转化为具有规整孔道结构的沸石,用于吸附重金属离子、氨氮和有机物。工艺流程包括碱熔活化、陈化、晶化、离子交换等步骤,可合成A型、X型、P型沸石,吸附容量与天然沸石相当。废水处理剂方面,粉煤灰可直接作为吸附剂去除废水中的重金属和染料,或经酸活化、负载功能基团提升吸附性能。粉煤灰与聚合铝、聚合铁复合可制成无机高分子絮凝剂,用于市政污水和工业废水处理。烟气脱硫领域,粉煤灰与石灰乳混合制成脱硫剂,钙基组分吸收二氧化硫生成亚硫酸钙和硫酸钙,粉煤灰提供反应表面积和孔隙结构。脱汞材料方面,粉煤灰中未燃尽碳和铁氧化物对单质汞具有氧化和吸附作用,改性后可提高脱汞效率。粉煤灰基环保材料制备技术具有以废治废的显著特点,但产品性能稳定性和工程应用验证有待加强。环保材料利用量相对有限,但附加值较高,是粉煤灰高值化的重要补充途径。

## 2.5 矿化封存二氧化碳技术

矿化封存是利用粉煤灰中碱性组分与二氧化碳反应生成稳定碳酸盐的技术,可实现二氧化碳的永久封存。反应机理为粉煤灰中氧化钙、氧化镁等碱性氧化物与水反应生成氢氧化物,进而与二氧化碳反应生成碳酸钙和碳酸镁沉淀。粉煤灰矿化反应是放热过程,热力学上自发进行,但动力学速率较慢,需通过工艺强化提升反应效率。直接矿化工艺将粉煤灰与水混合制成浆液,通入二氧化碳进行反应,工艺流程简单,但反应速率受传质控制。间接矿化工艺先通过酸或铵盐浸出提取钙镁离子,浸出液再与二氧化碳反应生成高纯度碳酸钙,产品附加值较高但流程复杂。反应条件对矿化效率影响显著,温度、压力、液固比、二氧化碳分压等参数需优化。粉煤灰钙镁含量决定理论固碳潜力,每吨粉煤灰可吸收二氧化碳50~250公斤。矿化产物主要为碳酸钙和碳酸镁沉淀,可用作建筑材料填料、土壤改良剂或直接回填灰场。矿化过程中重金属可转化为稳定性更高的碳酸盐或氢氧化物沉淀,实现协同稳定化。矿化封存技术处于中试向示

范过渡阶段,成本是制约工业化应用的主要因素<sup>[3]</sup>。

### 3 粉煤灰综合利用的低碳效益分析

#### 3.1 替代高碳建材原料的碳减排贡献

粉煤灰替代水泥熟料、粘土等建材原料,碳减排效益显著。水泥熟料生产碳排放主要源于石灰石分解与燃料燃烧,每吨熟料平均排碳约0.85吨。粉煤灰作混合材替代熟料,每利用一吨可减少熟料消耗0.8-1.0吨,减排二氧化碳0.7-0.9吨。若全国水泥平均掺量提高10个百分点,年利用粉煤灰增量约2.4亿吨,可减排约2亿吨。混凝土生产中,粉煤灰替代水泥,每立方米可减排二氧化碳40-65公斤。粉煤灰砖替代粘土砖,每万块标砖可减排二氧化碳0.1-0.2吨。综合测算,建材利用每吨粉煤灰平均可减少二氧化碳排放0.6-0.8吨,是碳减排贡献最大的途径。

#### 3.2 减少堆存场地环境负荷的间接效益

粉煤灰堆存环境负荷大,综合利用可形成间接低碳效益。每万吨堆存需占地约0.2公顷,年产生量6亿吨,新占土地1.2万公顷,破坏植被与土壤碳库。综合利用每吨可节约土地0.02平方米,年利用4.5亿吨可节约9000公顷,保护土壤有机碳储量约5万吨。灰场扬尘影响空气质量,综合利用可减少排放。渗滤液污染地下水,综合利用从源头消除风险。灰场封场后维护消耗能源物料,综合利用减少库容需求,降低新建灰场扰动与碳排放。虽间接效益难精确量化,但对低碳发展贡献大。

#### 3.3 矿化封存技术的直接固碳潜力

矿化封存技术将二氧化碳转化为稳定碳酸盐,是粉煤灰利用最具潜力低碳路径。粉煤灰固碳潜力取决于钙镁含量,高钙粉煤灰理论固碳能力每吨200-350公斤,普通粉煤灰每吨50-120公斤。不同工艺实际效率差异大,优化条件下整体固碳效率70%-90%。矿化产物可用于多领域,替代天然碳酸钙开采,产生间接减排效益。粉煤灰矿化对二氧化碳浓度要求低,可直接利用电厂烟气,降低碳

捕集成本。若全国50%粉煤灰用于矿化封存,年可封存二氧化碳3000万吨,替代天然碳酸钙生产建材还可避免开采加工碳排放。

#### 3.4 全生命周期碳排放评价

全生命周期碳排放评价核算粉煤灰从产生到利用全过程的净碳减排效益。产生环节碳排放归发电过程,不计入利用阶段。收集环节每吨粉煤灰收集能耗约5-10千瓦时,碳排放3-6公斤。运输环节碳排放由运输距离决定,平均运输距离下每吨碳排放5-20公斤。加工利用环节因技术路径不同差异大,建材利用净碳减排效益最显著,每吨净减排二氧化碳0.6-0.8吨;矿化封存优化工艺后可达0.1-0.2吨;有价元素提取途径需优化工艺和能源结构。全生命周期评价为选择低碳利用路径提供科学依据<sup>[4]</sup>。

#### 结束语

双碳目标为粉煤灰综合利用赋予了新的使命和机遇。本文系统梳理了粉煤灰的理化特性和利用现状,深入分析建材生产、农业应用、有价元素提取、环保材料制备和矿化封存二氧化碳等主要技术路径,从碳减排视角评估不同利用方式的低碳效益。粉煤灰综合利用已超越固废处置的范畴,成为链接能源、建材、化工和环保产业的关键节点。未来应加强技术研发,完善政策体系,推动粉煤灰利用向低碳化、高值化、规模化方向发展,为构建绿色低碳循环经济体系和实现双碳目标贡献更大力量。

#### 参考文献

- [1]罗扬."双碳"目标下粉煤灰综合利用研究进展与展望[J].四川建材,2025,51(8):5-11.
- [2]杨文静,张永祥,林钰辉,等.粉煤灰在环境修复中的综合利用[J].能源与环境,2022(5):87-89.
- [3]湛燕.粉煤灰综合利用研究进展[J].山东化工,2024,53(17):119-122.
- [4]于小琨,崇诗佳,崔悦,等.粉煤灰综合利用商业模式探究[J].环境保护与循环经济,2023,43(1):1-7.