

文章编号: 1008-8857(2022)03-0150-05

DOI: 10.13259/j.cnki.eri.2022.03.004

# “无废城市”背景下粉煤灰资源化利用 途径研究进展

高 佼, 刘 娜, 王 浩

(青岛工学院 机电工程学院, 山东 青岛 266300)

**摘 要:** 随着“无废城市”建设工作的推进, 粉煤灰造成的土地和环境的污染问题急需解决。粉煤灰由于物理和化学性质特殊, 可当作一种潜在的资源, 因此如何合理利用粉煤灰成为众多企业的研究重点。介绍了粉煤灰的性质、分类和成分, 并探讨了粉煤灰在多个领域的应用。比较了粉煤灰主要利用途径的优缺点和应用前景, 并通过分析得出: 附加值较高的利用途径, 其处理成本也较高, 粉煤灰的消纳量较少, 存在的问题也较多, 而且大多数研究尚处于实验室阶段, 还未实现工业化利用。最后, 针对如何提高粉煤灰的资源化利用率提出了相应的措施和建议。

**关键词:** 无废城市; 粉煤灰; 资源化; 综合利用

**中图分类号:** X705

**文献标志码:** A

## Research process on resource utilization of coal fly ash under the context of zero-waste city

GAO Jiao, LIU Na, WANG Hao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Institute of Technology, Qingdao 266300, China)

**Abstract:** With the advance of “zero-waste city” construction, it was urgent to deal with the land and environment pollution caused by coal fly ash. Meanwhile it was a potential resource in terms of physical and chemical properties of coal fly ash. However, its reasonable utilization has become a research focus for multiple enterprises. The properties, classification, and composition of coal fly ash were introduced firstly. Its various applications were discussed. And their merits and demerits were compared. Their application prospects were proposed. A conclusion was drawn that high value-added utilization of coal fly ash required high treatment cost along with lower consumption. Some problems existed simultaneously. Most of them stayed in a lab scale without industrial applications. Some suggestions and measures for improving resource utilization of coal fly ash have been put forward.

**Keywords:** zero-waste city; coal fly ash; resource utilization; comprehensive utilization

收稿日期: 2022-01-18

第一作者: 高佼(1988—), 女, 硕士, 讲师。研究方向: 固体废弃物资源化利用。E-mail: 292960615@qq.com

2021年11月,在《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》中提出要稳步地推进“无废城市”的建设工作。“无废城市”的要求不是“零”固体废弃物的产生,也不象征着固体废物能够全部被资源化利用,而是一种城市管理理念,它的终极目标是:达到整个城市固体废物源头产量最小、资源化利用较充分和无害化处置<sup>[1]</sup>。“无废城市”的建设不仅使城市生活垃圾的处理成为热点,而且将大宗固体废物的综合利用推到台前。在《“无废城市”建设试点工作方案》中明确对大宗固体废物提出要求,鼓励推动其资源化利用。提高粉煤灰、工业副产石膏、煤泥和煤矸石等常见的工业固废的资源利用率再次成为热点。

虽然2021年世界能源结构都在加速向绿色低碳方向转型,但是煤炭依然是主要能源。国家统计局2月28日发布的数据显示,2021年末全国发电装机容量为237692万kW,其中火电装机容量为129678万kW,占比54.6%<sup>[2]</sup>。粉煤灰是利用煤炭发电时产生的一种工业副产品,产量巨大,年产量高达6.86亿t,而且在未来很长一段时间内产量将居高不下。然而,我国粉煤灰的平均综合利用率与发达国家相比偏低,仅为70%<sup>[3]</sup>。粉煤灰如不及时处理,不仅会浪费大量的土地资源,而且会引起环境问题。近年来,许多学者发现,粉煤灰具有很好的利用价值,为此,很多企业开始研究粉煤灰的再生利用,昔日的“废渣

”成为如今的“香饽饽”。

本文在“无废城市”的背景下,简述了粉煤灰的来源、性质和分类,综述了粉煤灰资源利用的几种途径,分析了粉煤灰再利用存在的问题并展望了粉煤灰再利用的未来趋势。

## 1 粉煤灰来源、分类及性质

粉煤灰是燃煤发电过程中,煤中各种无机成分与有机成分在高温燃烧后形成的一种工业碎末。燃煤发电时,煤粉在反应炉中,经过燃烧、灰渣烧结、破裂、颗粒的融入及快速冷却成珠这一系列的反应过程形成粉煤灰。不同种类的粉煤灰物理和化学性质差异巨大,与燃烧方式、煤种、煤中成分和收集方式均相关。一般情况下,粉煤灰主要由莫来石矿物颗粒、未燃尽的碳颗粒和非晶质球形颗粒组成,粒径在0.005~0.2mm之间,具有密度较小且比表面积较大的特点。粉煤灰大多数呈碱性,pH范围为1.2~12.5。粉煤灰可以呈现灰色、深红色、棕色或黄色等多种颜色,具体颜色的变换与未燃尽的碳和氧化铁的含量有关。燃煤发电时,煤的性质很大程度上决定了粉煤灰的化学成分,显然全国不同地区粉煤灰的化学成分也存在着巨大的差别,但主要成分都是SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。表1为我国几个典型地区火电厂粉煤灰的主要化学成分<sup>[4]</sup>。

表1 我国典型地区电厂粉煤灰样品的主要化学成分

Tab. 1 Chemical composition of coal fly ash from some typical power plants in China

样品来源	化学成分的质量分数/%					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O
大唐电厂	46.23	39.71	3.32	0.18	2.67	0.71
石家庄某发电厂	48.23	33.22	5.52	0.46	2.49	0.76
江油某火电厂	53.31	26.55	4.41	0.52	5.88	2.42
西夏热电厂	47.92	24.97	12.24	0.49	7.42	1.78
京能热电厂	51.39	33.58	4.72	0.83	3.97	1.58

粉煤灰的分类方式有多种:①根据粉煤灰中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量将其分为两类,

分别是C型和F型,三种氧化物质量分数大于70%的称为F型,三种氧化物质量分数在50%~

70%之间的称为C类；②根据粉煤灰pH的大小，可将其分为3类，pH在1.2~7.0之间的为酸性粉煤灰，pH在8~9之间的为弱碱性粉煤灰，pH在11~13之间的为强碱性粉煤灰；③根据粉煤灰含水量大小分为湿灰、陈灰和干灰；④根据粉煤灰中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数的不同又可以将粉煤灰分为普通型和高铝型两大类，当粉煤灰中 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的总质量分数在80%左右时， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数小于27%，称其为普通型，而 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数在45%~65%之间的称其为高铝型。

## 2 粉煤灰资源化利用技术研究进展

当前，粉煤灰在多个领域中被利用，比较成熟的是作为建筑材料，但其利用程度有限，因此我国粉煤灰的利用率依然较低。为了加快企业利用粉煤灰的脚步，国家发展与改革委员会发布了《加快推进大宗固体废弃物综合利用示范建设》等一系列的文件。

### 2.1 工程建设领域

目前粉煤灰在工程建设领域的应用主要是在建筑业。在建筑业的应用包括水泥生产、掺入混凝土、新型粉煤灰墙体制作、功能性涂料等。在水泥生产中掺入粉煤灰，不仅可以提高其透水性及抗收缩性，而且可以起到节能降耗的作用。在混凝土中加入一定量的粉煤灰，不仅可以有效减小水量的用量，而且可以改善其硬化强度和干燥收缩性能<sup>[5]</sup>。新型粉煤灰墙体中90%的原料都是粉煤灰。在宁夏银川市兴安区的锦绣丝路农业科技园，科技人员将粉煤灰微发泡技术、保温技术和相变储能技术应用到温室大棚的设计改造中，研发出了保温储热性能良好的新型相变蓄热粉煤灰墙体，在室外温度为 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时，棚内温度可达 $7\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。粉煤灰在涂料中的应用可以分为作为涂层填料应用和对其成分的利用为两种。粉煤灰可以在经过简单的改性处理后作为填料添加，从而得到功能性的涂料。可以利用粉煤灰成分中的硅铝酸盐制备性能优异的无机涂层，并应用在各种基材中提高涂层的抗腐蚀性和耐磨性。

### 2.2 采矿业

采用水力压裂法生产天然气和石油时，粉煤灰可以作为压裂支撑剂。在石油和天然气生产时，一般最后一步都是把天然砂或者人造砂泥浆用泵送入裂缝中，目的是防止裂缝在油井作业期间闭合，同时保证导水率足够大，方便油、气和水轻松通过。目前，有一种粉煤灰支撑剂被研究开发出来代替传统的压裂支撑剂，它的生产不仅可以降低压裂成本，回收大量的天然气和石油，而且可能产生更高的利润率。

### 2.3 农业领域

目前粉煤灰在农业领域也有应用，主要分为制作肥料和改良土壤两个方面。

#### 2.3.1 土壤改良

土壤掺入粉煤灰后，其保墒能力变强，而且容重降低，变得比较疏松，土壤结构得到改善；粉煤灰根据其pH的大小分为酸性和碱性，酸性土壤可以用碱性粉煤灰改良，碱性土壤可以用酸性粉煤灰改良，土壤的pH得到改善，进而提高了农作物的产量；粉煤灰添加到土壤中后，土壤中微生物活性得到改善，从而加快了农作物吸收利用土壤中养分的速率。土壤中掺入粉煤灰，不仅可以起到固化土壤中重金属的作用，而且还可以有效促进农作物对土壤中重金属的吸收<sup>[6]</sup>。

#### 2.3.2 肥料制作

农作物生长需要大量的钾、钙和镁等，而粉煤灰中正好含有这些元素，因此可以把粉煤灰制作成农作物生长所需要的肥料。实践证明，使用粉煤灰制作的肥料后，农作物产量增加，同时提高了其抗病虫害和抗倒伏的能力，农作物的长势良好。

### 2.4 催化领域

水、土壤和水中的有机污染物通过强氧化物、微生物或者紫外线和可见光分解掉的场景称为有机降解。光催化和非光催化等有机降解过程需要催化剂，同时有机合成过程也需要催化剂，粉煤灰可以通过改性成为催化剂，但制作成本较高，要普遍推广存在一定的难度<sup>[3]</sup>。

### 2.5 绿色环保领域

粉煤灰可以通过改性变成孔隙率高、比表面积大的多孔材料，适合作为吸附剂应用于环保领

域。它可以用于废水处理、烟气中氮氧化物、 $\text{SO}_2$ 和汞等有机物的脱除,而且还可以捕集 $\text{CO}_2$ ,为“双碳”目标作出有力贡献。张中华通过水热合成法将粉煤灰制作成沸石分子筛和固态胺类吸附剂,并对其吸附二氧化碳的容量进行了检测,实验结果表明粉煤灰合成的4A型、5A型和13X型沸石的吸附剂具有吸附量高的特点,为我国的碳减排工作做好了技术储备<sup>[7]</sup>。Xuan等<sup>[8]</sup>通过实验发现:粉煤灰经过硝酸改性后,活性增强,温度达到 $280\text{ }^\circ\text{C}$ 时,脱除烟气中 $\text{NO}_x$ 的效率高于90%。Rathnayake等<sup>[9]</sup>通过研究发现:粉煤灰经熟石灰改性后,能除去烟气中的 $\text{SO}_2$ 。在废水处理方面,废水中含有 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Zn}^{2+}$ 等离子,粉煤灰比表面积较大,孔隙发达,可吸附废水中的这些离子。同时,废水中的氟离子和氯离子被经氯化铁和氧化钙等金属盐改性后的粉煤灰去除的效果较好。在脱除无机汞方面,Yang等<sup>[10]</sup>将粉煤灰上负载6%的 $\text{CuCl}_2$ ,得到一种催化剂。该催化剂在温度为 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对汞的脱除效率可达90%以上<sup>[10]</sup>。

## 2.6 高分子复合材料

粉煤灰的化学成分和传统填料的成分比较接近,而且具有活性高的特点,对其表面进行改性比较容易,所以通过表面处理后与高分子材料的表面较易结合,从而可改善高分子材料的性能,也能降低其成本,因此在高分子材料中掺入粉煤灰有很大的发展前景。目前应用较多的是将粉煤灰填充到聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和橡胶中得到性能良好的高分子复合材料,实现变废成宝<sup>[11]</sup>。Ahmad等<sup>[12]</sup>利用双螺旋挤出机制备了粉煤灰/高密度聚乙烯复合材料。

## 2.7 有价值组分分离

粉煤灰高值化利用的障碍是其复杂的化学成分。比如,在某一领域中,粉煤灰中的某种成分可能起到积极作用,但在另一领域中,该成分反而起到消极作用。粉煤灰中的有价值组分包括:未燃尽的碳、空心微珠和磁性物质等,这些组分均可以利用分离技术得到。Vassilev<sup>[13]</sup>采用连续分离法成功地将空心微珠、未燃尽的碳和磁铁矿等有价值组分从粉煤灰中分离出来。

## 2.8 有价值金属提取

大量的有价值金属蕴藏在粉煤灰中,例如Ge、

Li、La和Ga等,通讯、军工、催化和交通多个领域均需利用这些稀有元素。神华集团有限责任公司的人员将Ga和Li元素成功地从粉煤灰中提取出来<sup>[14]</sup>。

我国粉煤灰资源化利用途径中消纳粉煤灰最多的是工程建设领域中的水泥项目,高达44%;其次是砖、墙体和混凝土项目达26%,比如北京冬奥会现场国家越野滑雪中心的技术楼,采用添加粉煤灰做成的加气混凝土砌块砖,实现节能、节地和废物利用;在农业领域的利用比例仅占比5%,其他领域更少。我国在基建领域仍然具有很大的发展空间,特别是西部地区,粉煤灰未来可以大规模的应用在我国的基建领域。随着我国对环保要求的日益严格,粉煤灰在环保领域的应用很具发展前景,但由于中西部地区正是环保的薄弱地区,而且粉煤灰制备工艺复杂,导致其在环保领域尚未实现规模化工业应用,可以采取粉煤灰分选-炭黑-制备活性炭-工业废水净化的产业链。表2为粉煤灰主要利用途径,附加值越高的利用途径,其处理成本较高,粉煤灰的消纳量较少,问题也较多,而且研究多数处于实验室阶段,尚未实现工业化利用<sup>[15]</sup>。

## 3 结论和展望

目前,虽然我国粉煤灰的应用涉及的领域较广且综合利用率高达70%,但产业化应用主要是在工程建设领域,大多数情况下是作为掺杂物的应用。粉煤灰高值化利用技术遇到瓶颈,存在技术成本较高、受限于粉煤灰特性和引发二次污染等问题,所以其高值化研究一直处于实验室研究阶段,未能实现产业化应用。未来,为了实现粉煤灰在多个领域的商业化应用,不仅需要政府一系列的政策支持,而且需要持续完善粉煤灰资源化和一体化应用的体系。

为了提高我国粉煤灰的利用率可以采取的措施有:①我国应公开所有产灰企业的年产量和其利用率,做到信息透明和数据可查,使其接受公众监督,进而加快各产灰单位利用粉煤灰的脚步;②我国利用粉煤灰的政策大多是鼓励性的,应出台强制性利用粉煤灰的政策;③建议

表2 粉煤灰主要利用途径比较  
Tab. 2 Comparison of main utilization ways of coal fly ash

项目	优点	缺点	应用前景
工程建设领域	处理规模较大, 不需要较高的经济投入, 对粉煤灰的质量没有严格的要求	附加值较低, 受季节性影响, 运输成本可能会限制其应用	工程建设领域对粉煤灰的需求量大, 未来一段时间内仍是粉煤灰最主要的消耗途径
采矿业	附加值高, 环境效益可观, 资源化产品需求量大	制备工艺复杂, 成本较高, 处于理论研究阶段	如果技术成熟, 可以进行大规模商业化利用
农业领域	有很大的发展空间, 处理成本不高, 需求量大	每种灰应用都存在局限性, 无法广泛应用, 存在二次污染风险	未来更多仍是集中在实验室与小试研究阶段
催化领域	高附加值, 有较大发展潜力	技术还不够成熟, 成本较高, 可能造成二次污染, 尚未在工业实践中应用,	可以开发新的粉煤灰改性方法, 促进残渣的二次利用, 降低二次污染
绿色环保领域	成本较低	处理规模较小, 处理量小, 制备工艺复杂	随着“双碳”目标的提出。在二氧化碳封存、废水处理及烟气处理方面有良好的发展前景
高分子复合材料	成本较低	处理规模较小, 工业复杂不适合生产, 资源化的产品应用领域受到了限制	我国粉煤灰原料品质不稳定, 填充高分子材料的效果不理想, 将限制其发展
有价组分分离	附加值高	处理成本较高, 粉煤灰的消纳量少, 制备工艺复杂,	工艺成熟, 粉煤灰自身特性和当地市场的需求决定其可行性
有价金属提取	附加值高	处理成本较高, 粉煤灰的消纳量少, 制备工艺复杂	制备方法能耗较高, 在降低成本的同时提高资源化产品的性能仍需要研究

政府为粉煤灰的资源化利用提供更为实际的支持手段。例如, 可以采用运输费用优惠政策, 使粉煤灰产品的运输半径扩大; 也可以对粉煤灰资源化利用单位实行电价优惠政策, 使企业的耗能成本降低, 进而提高其用灰积极性。

#### 参考文献:

- [1] 裴习君. “无废城市”理念下我国城市生活垃圾处理模式探析[J]. *长沙大学学报*, 2019, 33(3): 25 - 27.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[R]. 北京: 国家统计局, 2022.
- [3] 陆强, 吴亚昌, 徐明新, 等. 粉煤灰活化及其制备多孔催化材料的研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(3): 1 - 12.
- [4] 孙红娟, 曾丽, 彭同江. 粉煤灰高值化利用研究现状与进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(3): 3010 - 3015.
- [5] 王丽萍, 李超. 粉煤灰资源化技术开发与利用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(4): 38 - 45.
- [6] 方超, 张治国, 郑永红, 等. 粉煤灰作土壤改良剂的研究进展[J]. *淮南职业技术学院学报*, 2021, 21(4): 146 - 148.
- [7] 张中华. 粉煤灰制备吸附剂捕集CO<sub>2</sub>的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1227 - 1233.
- [8] XUAN X P, YUE C T, LI S Y, et al. Selective catalytic reduction of NO by ammonia with fly ash catalyst[J]. *Fuel*, 2003, 82(5): 575 - 579.
- [9] RATHNAYAKE M, JULNIPITAWONG P, TANGTERMSIRIKUL S, et al. Utilization of coal fly ash and bottom ash as solid sorbents for sulfur dioxide reduction from coal fired power plant: life cycle assessment and applications[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 934 - 945.

(下转第160页)