

粉煤灰利用的回顾与展望

潘 钟, 罗津晶, 薛姗姗, 罗锦英

(厦门大学 环境科学研究中心, 福建 厦门 361005

摘 要: 介绍了粉煤灰的物理化学性质和结构, 从不同角度分析了粉煤灰的应用情况及存在的问题, 并对粉煤灰潜在的综合利用途径进行了探讨和展望, 以期对粉煤灰的合理有效利用提供可行依据。

关键词: 粉煤灰; 应用; 综合利用

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1005-8206(2008)01-0019-04

Retrospect and Outlook on Utilization of Fly Ash

Pan Zhong, Luo Jinjing, Xue Shanshan, Luo Jinying

(Environmental Science Research Center, Xiamen University, Fujian Xiamen 361005

Abstract: Physical and chemical characteristics and structure of fly ash were introduced. Utilization situation and existing problems of fly ash were analyzed from different perspectives. And potential approaches of integrated utilization of fly ash were discussed to provide feasible basis for reasonable and effective application of fly ash.

Key words: fly ash; application; integrated utilization

粉煤灰是煤粉经过燃烧后, 从锅炉烟气中排放出的细灰状残留物, 80%左右为飞灰 (Fly Ash), 20%左右为底灰 (Bottom Ash), 是一种人工火山灰质。世界各国的粉煤灰排放量都呈逐年增加的趋势, 但是粉煤灰的利用率却保持在较低水平。我国每年排放的粉煤灰约 1.8 亿t, 利用率约为 30%^[1]。欧洲煤炭燃烧产物协会 (ECOBA) 所属会员国家排放的粉煤灰达 3 714 万 t, 也只利用了其中的 48%^[2]。印度每年排放超过 1 亿 t 粉煤灰, 其利用率低于 20%^[3]。大量粉煤灰的堆放, 不仅占用了宝贵的土地资源, 而且其中的有害成分, 如重金属离子通过挥发、渗滤严重污染了大气和水体环境, 甚至通过食物链对人体健康产生威胁。因此, 如何合理利用粉煤灰, 提高粉煤灰的利用率成为当今研究的热点。

1 粉煤灰的分类、结构和性能

1.1 分类

根据 GB/T 1596—2005 用于水泥和混凝土中的粉煤灰的规定, 粉煤灰可依据其化学组分中 CaO 的含量划分为 F 类和 C 类。F 类粉煤灰, 也称低钙粉煤灰, 主要是由无烟煤或烟煤煅烧收集的粉煤灰。C 类粉煤灰, 也称高钙粉煤灰, 主要是由褐煤或次烟煤煅烧收集的粉煤灰, 其 CaO 含量一般大于 10%。用于拌制混凝土和砂浆的粉煤灰可以分为 3 个等级, 见表 1。

美国 1968 年和 1977 年的 ASTM C618 规定:

表 1 我国粉煤灰分类

	级粉煤灰	级粉煤灰	级粉煤灰
0.045 mm 方孔筛余/%	<12	<20	<45
烧失量/%	<5	<8	<15

应用于工业 (主要用于生产混凝土和水泥) 的粉煤灰可以分为 F 级和 C 级。F 级粉煤灰 $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 70%, 是优级生煤和无烟煤燃烧而成, 具有凝硬性; C 级粉煤灰 $w(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 50%~70%, 是低级褐煤和次生煤燃烧而成, 具有水泥黏性和凝硬性^[4]。

加拿大 CAN/CSA A23.5-M86 和 ASTM C618 规定相似, 但前者对于 CaO 和 LOI 含量另有规定, 基于 CaO 和 LOI 含量的粉煤灰分类见表 2^[4]。

表 2 加拿大粉煤灰分类

	F 类粉煤灰	C 类粉煤灰	Cl 类粉煤灰	CH 类粉煤灰
CaO 含量/%	<8		8~20	>20
LOI 含量/%	8 或达 12			6

联合国粉煤灰利用小组委员会根据粉煤灰的物理化学性质将其分为 4 组^[4], 见表 3。

表 3 联合国粉煤灰分类

	第 I 组硅铝酸盐粉煤灰	第 II 组铝硅酸盐粉煤灰	第 III 组石灰硫酸盐粉煤灰	第 IV 组基本粉煤灰
$\text{SO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	2	<2		
CaO/%	<15	<15	>15	>15
SO_2 /%		<3	>3	<3

1.2 结构和性能

煤粉进入 1 300~1 500 的炉膛后, 在悬浮燃烧条件下经受热面吸热后冷却形成粉煤灰。由于表面压力的作用, 粉煤灰颗粒大部分呈球形,

表面疏松多孔，比表面积大，且具有一定的活性基因和吸附特性⁵¹，其主要物理性质见表 4⁶¹。

表 4 粉煤灰的主要物理性质

密度/ (10 ⁻³ kg/m ³)	粒径/ mm	空隙度/ %	标准稠度 需水量/ %	比表 面积/ (m ² /kg)	灰分/ %	热值/ (kJ/kg)	分离度/ %
0.5~1.0	17~40	60~75	35~65	200~400	70~80	6 000~7 500	92

粉煤灰的主要化学成分有 SO₂、Al₂O₃、CaO、MgO、Fe₂O₃ 和未燃烧的碳，一些微量元素和稀有元素，可用经验公式表示： $S_{1.0}Al_{0.45}Ca_{0.51}Na_{0.047}Fe_{0.039}Mg_{0.020}K_{0.013}Ti_{0.011}$ ⁷¹。我国大多数粉煤灰的化学成分如表 5⁸¹所示，其中 SO₂ 与 Al₂O₃ 是其主化学成分和活性成分，其含量越高，粉煤灰活性就越高，吸附效果就越好。Fe₂O₃ 可以降低粉煤灰的熔点，促进粉煤灰玻璃微珠的形成，提高粉煤灰的活性。

表 5 我国大部分粉煤灰的化学成分 (%)

SO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₂	K ₂ O+Na ₂ O
40~65	5~40	2~10	3~10	0.5~2.5	0.2	0.2~3.5

粉煤灰的矿物组分有氧化硅、石英、莫来石、磁铁矿、黄铁矿、生石灰和硫酸盐等。不同地区不同类型的粉煤灰所含的矿物组分差异很大。我国一些地区粉煤灰的矿物成分如表 6⁶¹所示。

表 6 我国粉煤灰的矿物组成 (%)

	低温型 石英	莫来石	高铁 玻璃珠	低铁 玻璃珠	含碳量	玻璃态 SO ₂	玻璃态 Al ₂ O ₃
平均值	6.4	20.4	5.2	59.8	8.2	38.5	12.4
范围	1.1~ 15.9	11.3~ 29.2	0~21.1	42.2~ 70.1	1.0~ 23.5	26.3~ 45.7	4.8~ 21.5

2 粉煤灰的综合利用

2.1 粉煤灰在建设工程和建材制品中的应用

2.1.1 粉煤灰在水电大坝建设中的应用

从 1948 年起，美国就开始用粉煤灰建设水电大坝。在大坝建设中，粉煤灰主要是掺和在混凝土中浇注。在大坝碾压混凝土围堰中，粉煤灰的掺和比例已经达到 50% 以上。在三门峡大坝大体积混凝土中，浇注粉煤灰混凝土 130 万 m³，掺用粉煤灰 3.55 万 t，节约水泥 2.66 万 t，混凝土强度和耐久性都满足了设计要求⁹¹。我国长江三峡水利枢纽工程所需浇灌的混凝土量约 3 000 万 m³，其大量掺和了 I 级粉煤灰。大坝建设中利用粉煤灰，能节约大量水泥等材料，降低建设成本，且工程质量均能达到设计要求。

2.1.2 粉煤灰在道路建设中的应用

在道路施工过程中，粉煤灰可以代替一些基底材料填充路基，特别是软基路段，能减轻软土层的负荷力，避免路基发生沉降，提高路堤的稳定性。目前，我国高速公路路面所经过的软土层占了很大比例，鉴于粉煤灰质轻的特点，大量的粉煤灰被利用在高速公路建设中。

2.1.3 粉煤灰在工程回填中的应用

由于粉煤灰自身质量轻，它产生的压力比一般填筑材料黏土低很多，在工程上用其来填筑可以最大程度地提高稳定性，减少沉降，抗震性能好，且不需太高的技术条件，施工简便，吃灰量大，可以作为基础填筑、水泥填筑、砂浆填筑和混凝土填筑的填料。在大型建筑的基础填料工程、矿井、地下工程的灌浆作业中都有成功的应用。

2.1.4 粉煤灰在混凝土中的应用

在混凝土中掺和一些粉煤灰，可以改善混凝土性能，节约原料，节省成本。由于粉煤灰可提高混凝土可泵性，泵送高度为 150 m 的上海东方明珠电视塔和泵送 384 m 高的金茂大厦就是掺粉煤灰泵送混凝土施工的成功范例。由于掺粉煤灰能大大降低水化热，上海秦山核电站壁厚 1 m 的混凝土安全壳无裂缝出现。上海地铁工程用管片，由于选用了掺粉煤灰混凝土，平均掺水高度比普通混凝土要低得多¹⁰¹。另外，很多海洋工程，如跨海大桥、海底隧道等都需要在海洋环境中浇筑混凝土。但长期以来，传统混凝土在海洋中受到海水和海洋生物的侵蚀，工程基础和主体不断受到威胁，严重降低了工程寿命。用粉煤灰代替部分水泥制成的混凝土在海洋环境中可以减少氯化物渗透，具有防侵蚀的作用，并且随着粉煤灰含量的增加，氯化物对混凝土结构渗透越少，抗侵蚀能力越强¹¹¹。

2.1.5 粉煤灰在水泥生产中的应用

粉煤灰主要化学成分是具有活性的 SO₂ 和 Al₂O₃ 等硅铝酸盐材料，可以代替部分黏土作为生产水泥的原料。从 20 世纪 60 年代开始，我国就开始生产粉煤灰硅酸盐水泥。目前各种水泥如硅酸三钙水泥、低密度油井水泥、硫铝酸钙水泥等按照国家标准掺和了 20%~40% 的粉煤灰。粉煤灰水泥具有凝结时间延缓、早期强度较低、后期强度增长快、干缩性小、水化热低、耐硫酸盐性好、泌水性降低等特性¹²¹。另外，粉煤灰中含有一定比例的未燃烧碳，在水泥生产时可以通过煅烧熟

料起到节省燃料的作用。

2.1.6 粉煤灰在墙体材料中的应用

1) 粉煤灰烧结砖。普通烧结砖是以耕地中的黏土为主要原料, 以 20%~70% 的粉煤灰代替黏土制作粉煤灰烧结砖, 可以缓解环境压力, 节约土地资源。目前已开发出双免粉煤灰砖、粉煤灰彩色地面砖等品种, 具有质量轻、性能好和节能环保的特点, 更适用于大型建筑, 特别是高层建筑。

2) 粉煤灰砌块。粉煤灰砌块以粉煤灰(用灰量为 0.5~0.6 t/m³)、石灰等为胶结料, 以煤渣为骨料, 加水蒸气养护而成的。有空心砌块和实心砌块 2 种, 在砌块中加入粉煤灰, 可节约水泥, 降低成本, 粉煤灰空心砌块与黏土制品相比, 质量轻、强度高、保温性能好、耐久性好。在施工过程中, 可以减轻劳动强度^[12]。

3) 粉煤灰陶粒。粉煤灰陶粒生产原料主要为粉煤灰(占原材料的 85%~90%), 粗骨料为烟道灰、碎炉渣、焦渣等。粉煤灰陶粒可以用于水质净化、保温、阻燃等, 且可以用来生产陶粒墙和陶粒砖, 为粉煤灰利用开辟了一个新的方向^[13]。

4) 粉煤灰陶瓷制品。粉煤灰中含有一些矿物成分, 以一定比例的粉煤灰与其它原材料制成粉煤灰瓷砖, 可降低瓷砖的可塑性和异质性, 提高瓷砖的柔韧性和吸水性。同时, 可以减少对传统瓷砖矿物原料的开采, 有利于资源的保护和环境的改善^[14]。

2.2 粉煤灰在农业领域的应用

2.2.1 盖土造田

粉煤灰可以代替土壤回填在山谷低洼地区, 回填后土地可用作耕地。粉煤灰中含有很多对植物生长有用的营养矿物成分以及一些植物必需的微量元素, 因此, 用粉煤灰覆盖土壤种植经济作物和植树造林, 对土壤资源相对匮乏的山区尤为适用, 可以取得良好的经济、生态效益。

2.2.2 改良土壤

粉煤灰中的硅酸盐矿物质和炭粒具有多孔结构, 是土壤本身的硅酸盐矿物质所不具备的。将粉煤灰施入土壤, 有利于降低土壤密度, 增加孔隙, 提高地温, 缩小土壤膨胀率, 改善土壤的孔隙度和溶液在土壤内的扩散, 有利于植物根部加速对营养物质的吸收和分泌物的排出, 促进植物生长^[15]。

2.2.3 作化肥的添加剂

利用粉煤灰中含有的矿物成分和元素可以作

为化肥的添加剂, 或经磁化处理也可得到一种效果很好的复合肥。目前已开发出粉煤灰硅钙肥、粉煤灰硅钾肥、粉煤灰磁化复合肥、粉煤灰氮磷肥等, 经过在田间的使用, 作物生长状况良好, 产量增效明显。

2.3 粉煤灰在环保领域中的应用

2.3.1 治理废水

粉煤灰表面疏松多孔, 比表面积大, 含有 SO₂、Al₂O₃、CaO 等活性基团, 具有物理和化学吸附能力, 在一定条件下, 可以和废水中的有害物质发生反应, 产生絮凝沉淀。可用粉煤灰或者经过改性处理后的粉煤灰治理印染、重金属、生活、造纸、含油等废水。粉煤灰对染料中的亚甲基蓝等具有很好的吸附作用, 印染废水可以达到脱色除臭的效果, COD 和色度降低; 粉煤灰对重金属废水中的 Cu²⁺、Zn²⁺、Ni²⁺、Mn²⁺等都有很好的吸附作用, 并通过改变吸附剂的用量、调节温度、pH 等条件, 达到更理想的吸附效果; 生活污水中的有机物、色度、氮、磷等污染物, 利用粉煤灰的吸附等特性均可以有效地去除。

2.3.2 治理废气

粉煤灰在干式脱硫装置中可以作为一种很好的吸附剂来吸附废气中的 SO₂。粉煤灰中含有的未燃烧碳可以被活化吸附废气中的 NO_x 和汞蒸气, 废气中的甲苯、二甲苯、芳香烃等有机成分在一定条件下也可以用粉煤灰吸附处理^[7]。

2.4 粉煤灰在化工、汽车工业领域中的应用

2.4.1 粉煤灰在橡胶生产中的应用

当粉煤灰中的含硅量达到 30%~40% 时, 在天然橡胶混合物中可充当补强或延伸填充剂^[6]。活性粉煤灰用量增加, 橡胶表观黏度增大, 胶料挺性增大, 制品收缩减小。因为粉煤灰填充剂和胶料相容性较好, 所以在混炼胶中分散均匀, 压出、充模性能都较好, 可广泛应用于各种常用橡胶, 生产多种橡胶制品^[8]。

2.4.2 用粉煤灰制分子筛

利用粉煤灰制分子筛工艺比较简单, 可省去一般方法中的稀释、沉降、浓缩过滤等操作, 可节省投资^[7]。粉煤灰分子筛可以用于气体、液体的干燥、脱水、净化、分离回收, 还可用作催化剂^[10]。

2.4.3 提取粉煤灰中的有用物质成分

粉煤灰中含有 SO₂、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃ 等化合物以及微量元素、稀有元素、玻璃微珠、漂珠

Fe₂O₃ 等氧化物的氧去除，在一定条件下冶炼成硅、铝、镁、铁等多元合金。粉煤灰中的玻璃微珠富含活性基团，具有活性高、质量轻等优点，运用一定的工艺提取出玻璃微珠应用于塑料、橡胶、保温材料中。漂珠壁较薄、密度小、强度低、耐磨性差、粒度较大。化学成分分析表明，漂珠中 SO₂ 和 Al₂O₃ 的含量达 90%。基于以上优良的物化性质，粉煤灰在建材、冶金、涂料等行业中有着良好的应用前景。

2. 4. 4 粉煤灰在汽车工业中的应用

粉煤灰可以作为汽车制动衬面的摩擦材料之一。在美国大部分汽车制动衬面是半金属制品，由 20 或 25 种不同金属、有机物等材料制作而成，其耗材多，耗费大。而用粉煤灰制成的制动衬面性能优越，展现出良好的摩擦因数 (0. 35 -0. 40) ，磨损率低于 12%，且粉煤灰费用低，是汽车制动衬面理想的原料之一^[8]。

3 粉煤灰综合利用中存在的问题及解决方法

各国为鼓励利用粉煤灰，解决粉煤灰综合利用率低的问题，均制定相关的政策法规。我国为了更好地把粉煤灰应用于水泥和混凝土中，于 1979 年颁布和 2005 年修订了国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》，对综合利用粉煤灰的企业实施减免税等优惠政策，鼓励企业大量利用粉煤灰。日本政府在《能源供给构造改革促进财政投资的税收制度》中关于粉煤灰的再生处理设备投资给予减税和退税的优惠，凡是用于将粉煤灰转化为水泥、混凝土等建筑材料或者排烟脱硫用脱硫剂的设备投资，从所得税或者法人税中扣除相当于设备投资额 7% 的税额^[9]。

粉煤灰在农业应用中存在的问题是粉煤灰作为植物的肥料和土壤的改良剂，通过长期的累积效应，其中的污染成分可能造成土壤、地下水体和生物体的污染。因此，为了避免二次污染，在农业中应用粉煤灰时应该考虑到环境容量的问题，不要过量使用粉煤灰。对于处理完废水废气的粉煤灰渣面临灰水、灰渣分离的问题，粉煤灰本身含有一些重金属等有毒成分，在应用于废水、废气治理等方面时，应注意采取必要的措施防止这些成分的渗入，以免造成二次污染。我国排放的粉煤灰 90% 以上是 Ⅰ 级粉煤灰，其活性和性能都比 Ⅱ 级粉煤灰差，不能直接利用，需要对其进行改性或活化以提高其性能。

总之，粉煤灰的综合利用前景十分广阔，虽然现在还存在着诸多问题，但是推广其合理利用，可变废为宝，化害为利，对大力发展绿色经济和循环经济起到巨大的推动作用，达到环境、社会、经济的三者统一，促进社会、经济、环境的可持续发展。

参考文献

[1] 郑宾国, 刘军坛, 崔节虎, 等. 粉煤灰在我国废水处理领域的利用研究 J. 水资源保护, 2007, 23 (3) :36-38.

[2] Snigtha Sushil, Vidya S Batra. Analysis of Fly Ash Heavy Metal Content and Disposal in Three Thermal Power Plants in India J. Fuel, 2006, 85: 2676-2679.

[3] Manjit Singh, Mridul Garg. Durability of Cementing Binders Based on Fly Ash and Other Wastes J. Construction and Building Materials, 2007, 21: 2012-2016.

[4] Stanislav V Vassilev, Christina G Vassileva. A New Approach for The Classification of Coal Fly Ashes Based on Their Origin, Composition, Properties and Behaviour J. Fuel, 2007, 86: 1490-1512.

[5] 宋子言, 刘秉钺, 王井, 等. 利用粉煤灰处理污水的研究和进展 J. 辽宁化工, 2007, 36 (5) :343-346.

[6] 王伟, 周华强. 粉煤灰对环境的危害及其综合利用 J. 建材技术与应用, 2007 (5) :4-6.

[7] Chen Jianjun, Li Yuncong. Coal Fly Ash as an Amendment to Container Substrate for Spathiphyllum Production J. Bioresource Technology, 2006, 97: 1920-1926.

[8] 黄晓军. 粉煤灰的环境危害与新技术利用 J. 广东化工, 2007, 34 (5) : 77-79.

[9] 余银玲, 慎辅健, 魏云慧. 国内粉煤灰综合利用的发展动态 J. 黑龙江环境通报, 2007, 31 (2) :85-86.

[10] 宣怀平, 董金道. 我国粉煤灰综合利用现状及若干实用技术的介绍 J. 粉煤灰, 2005 (3) :29-32.

[11] W Chalee, M Teekavanit, K Kiattikomol, et al. Effect of W/C Ratio on Covering Depth of Fly Ash Concrete in Marine Environment J. Construction and Building Materials, 2007, 21: 965-971.

[12] 陈伟. 粉煤灰在建筑中的应用研究 J. 山西建筑, 2007, 33 (21) : 180-181.

[13] 余民峰, 王世杰, 王碾子. 粉煤灰综合利用的新途径: 粉煤灰陶粒生产技术的推广与应用 J. 中国资源综合利用, 2006, 124 (11) :11-12.

[14] Zimmer A, Bergmann C P. Fly Ash of Mineral Coal as Ceramic Tiles Raw Material J. Waste Management, 2007, 27: 59-68.

[15] 靳朋勃, 吴春笃. 粉煤灰农业利用现状 J. 安徽农业科学, 2007, 35 (18) :5544-5545.

[16] T Chaowasakoo, N Sombatsompop. Mechanical and Morphological Properties of Fly Ash/epoxy Composites Using Conventional Thermal and Microwave Curing Methods J. Composites Science and Technology, 2007, 67: 2282-2291.

[17] 胡燕海. 粉煤灰制分子筛 J. 粉煤灰综合利用, 1994 (2) :61.

[18] Samrat Mohanty, Chugh Y P. Development of Fly Ash-based Automotive Brake Lining J. Tribology International, 2007, 40: 1217-1224.

[19] 黄定国, 吴玉敏, 王文华. 日本的粉煤灰综合利用 J. 洁净煤技术, 2006, 12 (2) :92-95.

作者简介: 潘钟 (1981-), 在读硕士。