

# 粉煤灰的综合利用研究现状及发展前景

季英杰, 罗冰\*

西南科技大学城市学院, 四川 绵阳  
Email: \*1697164210@qq.com

收稿日期: 2020年11月25日; 录用日期: 2020年12月22日; 发布日期: 2020年12月29日

## 摘要

粉煤灰一般指飞灰,由燃料(煤)燃烧过程中排出的微小灰粒,其粒径一般在1~100  $\mu\text{m}$ 之间,属于危险废物。粉煤灰是煤粉进入1300~1500摄氏度的炉膛后,在悬浮燃烧条件下经受热面吸热后冷却而形成的。大量的粉煤灰如不加以控制或处理,将会造成大气污染,进入水体会污染水质,淤塞河道,粉煤灰中的一些化学物质对生物和人体造成危害,而我国又是产煤和用煤的大国,主要以煤炭作为电力生产的基本原料,每年的粉煤灰排放量巨大,给我国的国民经济建设及生态环境造成巨大的压力。如何将粉煤灰综合利用,变废为宝,实现资源的再利用,是解决我国电力生产环境污染与资源的再利用切实可行的手段,通过酸,碱,盐,表面活性剂和混合改性等方法进行粉煤灰改性处理,从而能将其应用于不同的行业中,实现价值的再创造。

## 关键词

粉煤灰, 综合利用, 三大效应, 应用工艺

# Research Status and Development Prospect of Comprehensive Utilization of Fly Ash

Yingjie Ji, Bing Luo\*

City College, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan  
Email: \*1697164210@qq.com

Received: Nov. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2020; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Fly ash generally refers to fly ash, which is a kind of hazardous waste. The particle size of fly ash is between 1 and 100  $\mu\text{m}$ . Fly ash is formed when pulverized coal enters the furnace of 1300°C~1500°C and is cooled after absorbing heat on the hot surface under the condition of suspension combustion. If a large amount of fly ash is not controlled or treated, it will cause air pollution. If it enters the water body, it will pollute the water quality and block the river course. Some chemical sub-

\*通讯作者。

stances in the fly ash will do harm to biology and human body. China is a big country that produces and uses coal. Coal is the basic raw material of electric power production, and the annual emission of fly ash is huge, which will give rise to China's national economic construction. The ecological environment causes great pressure. How to make comprehensive utilization of fly ash, turn waste into treasure, and realize the reuse of resources, is a practical and feasible means to solve the environmental pollution and resource reuse of electric power production in our country. Through the methods of acid, alkali, salt, surfactant and mixed modification, fly ash is modified, so that it can be used in different industries and realizes value recreation.

## Keywords

Fly Ash, Comprehensive Utilization, Three Effects and Application Technology

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济的不断发展,对电力的需求也日益加强。而我国电力工业的发展,仍然是以燃煤的火力发电为主。火电厂排放的废渣中排放量最大的便是粉煤灰[1],而燃煤的增加导致粉煤灰的排放量急剧增加[2]。我国又是一个粉煤灰排放大国,如果粉煤灰不加以利用,不仅会占用大量的耕地,还会污染环境,危害到我们生存的环境。

国家经贸委、电力工业部、财政部、建设部、交通部、国家税务总局等六部委于1994年以“国经贸节[1994]14号”文,颁布了《粉煤灰综合利用管理办法》。该办法中第三条指出:“粉煤灰综合利用是指粉煤灰用于建材生产、建筑工程、筑路、肥料生产、改良土壤、回填和其它产品制作等,以及从粉煤灰中提取有用物质。”该办法的第一条同时指出:“稳定运行,治理环境,促进经济发展。”粉煤灰的综合利用是实现粉煤灰的大规模消耗的同时,提取出有用的组分,并且从中创造出经济效益。

## 2. 粉煤灰概述

### 2.1. 粉煤灰的基本性质

粉煤灰的成分差异导致其色泽也呈现出很大差别。低钙粉煤灰的色泽通常会随着其中碳含量的增加而由乳白色向灰黑色渐变,而高钙粉煤灰通常则呈浅黄色,因此可通过色泽粗略判断粉煤灰的成分。粉煤灰的粒径范围大约在0.5~300 μm,这一范围与水泥接近但多数粉煤灰颗粒要细于水泥。

#### 2.1.1. 粉煤灰的概念

粉煤灰又称飞灰,是一种颗粒非常细以至于能在空气中流动并能被特殊设备收集的粉状物质。粉煤灰呈灰褐色,通常呈酸性,比表面积在2500~7000 cm<sup>2</sup>/g,尺寸从几百微米(\*10的-6次方 m)到几微米,通常为球状颗粒,主要成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,有些时候还含有比较高的CaO [3]。粉煤灰是一种典型的非均质性物质,含有未燃尽的碳、未发生变化的矿物(如石英等)和碎片等,而相当大比例(通常大于50%),是粒径小于10 μm的球状铝硅颗粒[4]。

#### 2.1.2. 粉煤灰的物理性质

粉煤灰的物理性质包括密度、堆积密度、细度、比表面积、需水量等其物理性质数据如下所示:

密度/(g/cm): 1.9~2.9  
堆积密度/(g/cm): 0.531~1.261  
比表面积(cm<sup>2</sup>/g): 氮吸附法 800~19500  
透气法: 1180~6530  
原灰标准稠度/%: 27.3~66.7  
吸水量/%: 89~130  
28d 抗压强度比/%: 37~85

### 2.1.3. 粉煤灰的化学性质

是种人工火山灰质混合材料, 它本身略有或没有水硬胶凝性能, 但当以粉状及水存在时, 能在常温, 特别是在水热处理(蒸汽养护)条件下, 与氢氧化钙或其他碱土金属氢氧化物发生化学反应, 生成具有水硬胶凝性能的化合物, 成为一种增加强度和耐久性的材料。

## 2.2. 粉煤灰的来源

粉煤灰是从煤燃烧后的烟气中收捕下来的细灰, 燃煤电厂排出的主要固体废物。热电厂为了提高煤炭的燃烧效率, 不会将整块整块的煤直接燃烧。首先需要把煤炭研磨成粉状。煤粉在炉膛中呈悬浮状态燃烧, 燃煤中的绝大部分可燃物都能在炉内烧尽, 而煤粉中的不燃物(主要为灰分)大量混杂在高温烟气中。这些不燃物因受到高温作用而部分熔融, 同时由于其表面张力的作用, 形成大量细小的球形颗粒。在锅炉尾部引风机的抽气作用下, 含有大量灰分的烟气流向炉尾。随着烟气温度的降低, 一部分熔融的细颗粒急冷后呈玻璃体状态, 这些玻璃体具有较高的潜在活性。在引风机将烟气排入大气之前, 上述这些细小的球形颗粒, 经过除尘器被分离收集起来, 即为粉煤灰。

## 2.3. 我国粉煤灰应用技术的历史演变

中国的粉煤灰研究和应用技术早在上世纪 50 年代就开始了, 当时国家进行大规模经济建设, 水泥属国拨物资, 供应十分紧张。施工用的墙体材料以烧结粘土砖为主, 这就为粉煤灰在砌筑砂浆和抹灰砂浆中的应用打开了局面, 后来又发展了蒸养粉煤灰硅酸盐砌块(不用水泥)。现以上世纪 80 年代末为基准点, 分前 30 年和后 30 年做一简述:

1950~1960 年, 利用原状粉煤灰以节约水泥为目的在砂浆中应用, 可节约水泥 20%~30%。

1960~1970 年, 砂浆、蒸养标砖、蒸养中型砌块(不用水泥)。

1970~1980 年, “用于水泥和混凝土中的粉煤灰” GB1596-1979 国家标准出台, 粉煤灰在混凝土中应用试验、试点。

1980~1990 年, 混凝土中用粉煤灰, 行业规范出台, 技术人员走出国门, 外国技术人员走进国门, 进行专业交流。亚运会混凝土工程大量应用粉煤灰。粉煤灰管理办法、经济政策相继出台。

1990~2000 年, 混凝土中掺入粉煤灰, GB1596 国标二次修定。

2000~2010 年, 商品混凝土大发展, GB1596 国标三次修定。奥运工程、世博会工程、地铁工程等混凝土中均掺入粉煤灰。

2010~2017 年, 水泥活性复合材料用粉煤灰不分等级, GB1596 国标四次修定。

## 2.4. 粉煤灰利用过程中的三大效应

我国著名学者沈旦申、张荫济先生早在上世纪 80 年代总结国内外大量研究成果, 提出粉煤灰《三大效应》理论, 科学全面的阐述了粉煤灰在混凝土及粉煤灰制品中的作用和机理。对指导我国粉煤灰综合

利用起到了积极的作用。

### 2.4.1. 形态效应

在显微镜下, 粉煤灰中含有 70% 以上的玻璃微珠、粒形完整、表面光滑、质地致密。这种形态对混凝土而言无疑能起到减水致密匀质作用, 促进初期水泥水化的解絮作用, 改变拌合物的流变性质、初始结构以及硬化后的多种功能, 对泵送混凝土而言能起到良好的润滑作用。

### 2.4.2. 活性效应

粉煤灰的“活性效应”因粉煤灰系人工火山灰质材料, 所以又称之为“火山灰效应”。因粉煤灰中的化学成分含有活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 在潮湿的环境中与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等碱性物质发生化学反应生成水化  $\text{CaSiO}_3$ 、水化  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  等胶凝物质, 对混凝土起到增强作用和堵塞混凝土中的毛细组织, 提高混凝土的抗腐蚀能力。

### 2.4.3. 微集料效应

粉煤灰中粒径很小的微珠和碎屑在混凝土中相当于未水化的水泥颗粒, 极为细小的微珠相当于活泼的纳米材料, 能显著改善和增强混凝土的结构强度提高匀质性。

在上述粉煤灰的三大效应中, 形态效应是物理效应, 活性效应是化学效应, 而微集料效应既有物理效应又有化学效应。这三种效应相互关联, 互为补充。粉煤灰的品质越高, 效应越大。所以我们在应用粉煤灰时应根据水泥、混凝土、粉煤灰制品的不同要求选用适宜和定量的粉煤灰。如不恰当, 则会起到反作用。

## 3. 粉煤灰综合利用的工艺

资源的综合利用程度是衡量人们文明程度及科学技术发展水平的重要指标[5]。粉煤灰综合利用是实现“化害为利, 变废为宝”[6], 从而实现资源的可持续发展。粉煤灰在建筑方面的筑品主要有: 粉煤灰水泥、粉煤灰砌砖、粉煤灰混凝土、烧结陶粒等。此外, 粉煤灰在农业、环保等方面也应用比较广泛。

### 3.1. 粉煤灰水泥

粉煤灰水泥, 全称粉煤灰硅酸盐水泥。凡由硅酸盐水泥熟料、粉煤灰、适量石膏共同磨细而制成的水硬性胶凝材料称为粉煤灰水泥。在生产水泥方面, 粉煤灰主要用作掺合料[6], 有的粉煤灰水泥粉煤灰掺量可高达 75% [7]。

#### 3.1.1. 粉煤灰胶凝材料制成水泥的工艺流程

粉煤灰胶凝材料制成水泥的工艺图(见图 1), 粉煤灰水泥早期强度低, 但是后期强度发展高。粉煤灰的活性比较低, 粉煤灰水泥随着粉煤灰掺量的增加[8], 会降低水泥的硬度。但是粉煤灰水泥耐腐蚀性好, 水化热少。

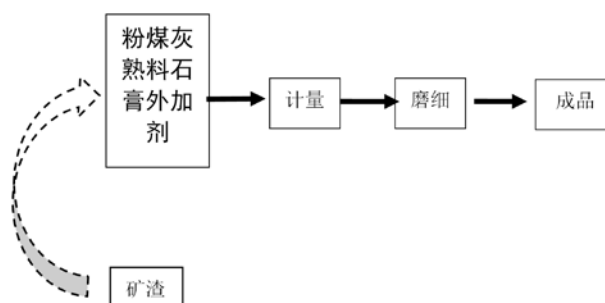


Figure 1. Process flow of cement production with fly ash cementitious materials

图 1. 粉煤灰胶凝材料制水泥工艺流程

### 3.1.2. 粉煤灰水泥的粉磨工艺流程

#### 1) 共同粉磨

共同粉磨是将熟料、石膏、粉煤灰同时混入磨机中粉磨(见图 2)。

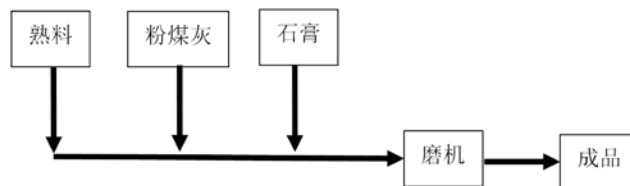


Figure 2. Schematic diagram of common grinding process

图 2. 共同粉磨流程示意图

共同粉磨流程简单, 设备少, 投资少, 操作简单, 磨制的水泥质量完全符合要求。粉煤灰对熟料有助磨作用, 并能清理研磨体表面吸附的细粉, 可使磨机产量获得适当提高, 但因入磨物料粒径相差很大, 大量入磨的细粉状粉煤灰对磨机第一仓有缓冲作用, 因而又限制了磨机产量的进一步提高。

#### 2) 分别粉磨

分别粉磨是将熟料和石膏用一台磨机(开流式圈流)粉磨至成品细度, 粉煤灰用另一台磨机(可采用开流高细磨)粉磨至成品细度, 然后将磨细的产品进行配比混合(见图 3)。混合可以在混合机内进行, 也可以在气力均化库内进行。该流程能根据不同的入磨物料粒度选择不同结构形式和规格的磨机, 选择合理的研磨体级配, 利于磨机能力的充分发挥。与共同粉磨相比, 系统产量可提高 10%~20%, 产品的单位电耗降低 5%~10%。但流程复杂, 设备多, 系统投资增加。

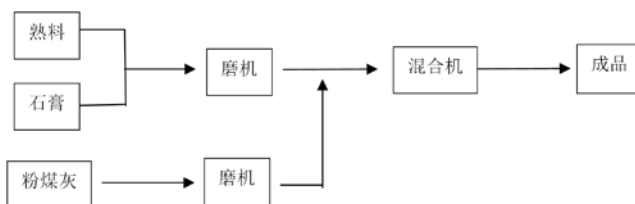


Figure 3. Schematic diagram of separate grinding process

图 3. 分别粉磨流程示意图

## 3.2. 粉煤灰砌砖

粉煤灰砌砖是一种能源回收再利用的绿色环保砖块。粉煤灰砌砖。占粉煤灰综合利用的 30%~70% [9]。粉煤灰砖是以粉煤灰、石灰为主要原料, 掺加适量石膏、外加剂和集料等, 经坯料配制、轮碾碾练、机械成型、水化和水热合成反应而制成的实心粉煤灰砖, 制作流程工艺(如图 4)。粉煤灰砌块的导温系数很小, 它阻止热流和温度波透过的能力强[10], 通过粉煤灰砌块维护结构的热流量小, 衰减倍数大, 延迟时间长, 与传统材料相比, 在相同厚度条件下, 粉煤灰砌块土内表面平均温度和波动温度均较小。粉煤灰砌块的隔热性能仍略好于传统的黏土砖及普通的混凝土等传统建材。

高掺量粉煤灰烧结砖外观尺寸、强度等级、石灰爆裂、泛霜、抗风化性能、放射性等各项指标对大气、对人体的影响均符合国家相关规定。高掺量粉煤灰烧结砖消耗了大量污染环境的粉煤灰, 保护了耕地, 是国家重点推广的新型墙体建材。冬季取暖期保温性好了相对锅炉房烧结的煤炭就少了。总的来说, 使用高掺量粉煤灰可减轻建筑物自重, 降低建筑物结构造价, 提高保温效果, 节省保温措施费, 属新型墙体材料, 做到从根基节能, 响应国家十四五节能减排计划。

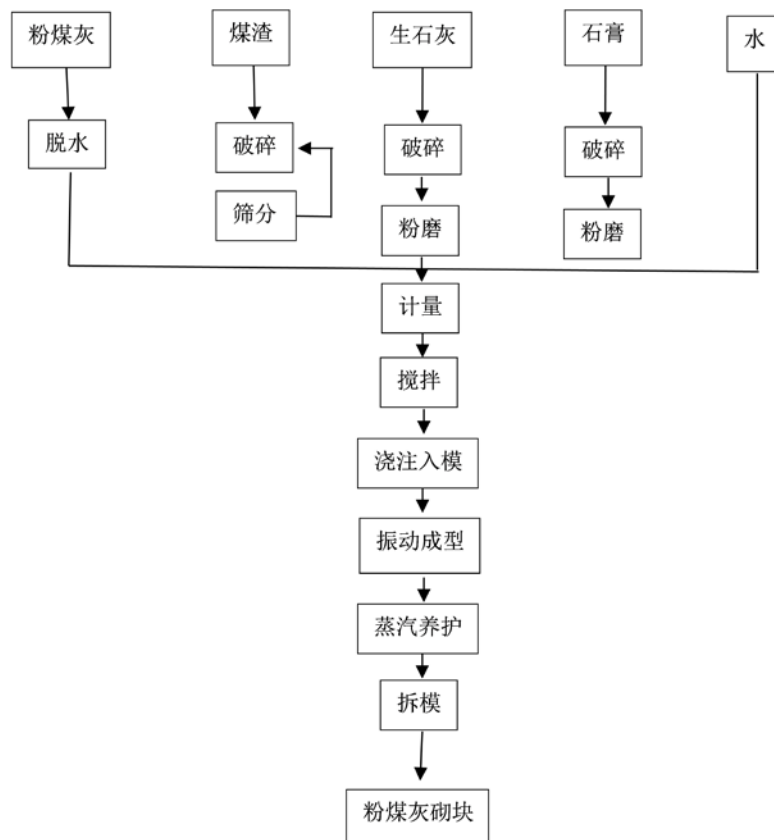


Figure 4. Production process of fly ash block  
图 4. 粉煤灰砌块生产工艺流程

## 4. 粉煤灰综合利用中产生的问题

### 4.1. 粉煤灰水泥

粉煤灰对水泥工作性能的影响主要有形态效应和填充作用, 未经粉磨的粉煤灰球形较多, 形态效应显著, 能起到减水作用, 但由于其粒度较粗, 微细集料填充作用较弱; 经磨细的粉煤灰, 球形颗粒被破坏, 减水作用减弱, 使需水量显著增加, 对工作性能不利[11]。原状灰的球形度较好, 具有形态效应, 可降低水泥的需水量, 提高工作性能, 但其活性低, 强度降低幅度较大, 且对水泥的抗侵蚀性能不利。基于性能降低幅度, 在实际生产水泥时, 如果水泥的强度及氯离子扩散系数富余系数较高, 建议可通过掺入原状粉煤灰来改善工作性能, 降低生产成本。当水泥的强度及氯离子扩散系数富余系数较低时, 建议通过掺入粒度(D50)小于  $4.3\ \mu\text{m}$  的粉煤灰来改善工作性能, 降低生产成本, 但掺量不宜超 10% [12]。

### 4.2. 粉煤灰砌砖

粉煤灰加气混凝土砌块制造过程中, 在浇注时最理想的情况是发气和稠化进程同时结束, 即稠化正好出现在再也没有体积膨胀的瞬间, 但原材料中石灰、水泥和铝粉在与水反应过程中都放热, 它们的成份与掺量的改变直接都会影响料浆的升温速度和温度的绝对值, 都会影响热膨胀值的大小, 其中, 尤以石灰的影响更为显著。料浆浇注的不稳定现象, 可能是塌模及其控制, 冒泡程度, 泌水, 坯体龟裂, 面包头竖起等几方面没有控制好引起的。

针对塌模及其控制, 建议围绕提高料浆的粘度, 抑制铝粉发气及采用稳泡措施进行。对于冒泡问题,

适量冒泡有利于获得良好的坯体, 但冒泡过量则应减少石灰用量或适当降低料浆的浇注温度。当出现泌水时, 应立即调节配合比, 增加胶结料(石灰, 水泥)的用量。如遇坯体龟裂现象时, 首先必须检查石灰性能, 及时根据石灰性能调节其用量, 若发生经常性含有过量过火石灰。则应在工艺上采取相应措施, 比如: 提前部分消解, 混磨等, 石灰的运输与储存也应进行严格把控。面包头竖起极易造成坯体的破坏, 一般可采用增加石膏等延缓石灰的消解或改用中速石灰等办法, 使稠化适应发气。

## 5. 粉煤灰综合利用的发展前景

当前, 我国资源环境面临着严峻的挑战, 其能源消耗大, 污染严重, 这迫切的要求我们寻找解决的办法, 解决的办法多种多样, 需寻找一种既经济又实惠的方法, 由此, 粉煤灰利用应运而生。目前, 粉煤灰的应用范围已经涉及到了建材、化工、农业、环保等各个方面[7], 并取得了一些成绩。虽然, 我国的粉煤灰利用效率较高, 但是相对于发达国家而言, 还任重而道远, 主要表现为我国的粉煤灰利用的途径单调, 这就要求我们必须重视创新, 注重科研的投入, 向发达国家学习其先进的利用技术[6]。除此之外, 也要继续发扬我们传统的利用方式, 结合科技创新使我们的利用方式更上一层楼。

粉煤灰的利用原则是把用灰技术作为重点, 使其综合利用效益和社会效益的有机结合, 稳步发展已有成果, 加大科研的投入, 吸收借鉴发达国家的先进技术, 提高粉煤灰利用技术[12]。当前, 我国的粉煤灰含量是非常巨大的, 每一次的科技突破都能取得非常大的成果, 若能真正的实现粉煤灰高效利用, 将在一定程度上减轻我国的资源利用压力[12]。

## 6. 结论

粉煤灰来源十分的广泛, 并且价格低廉, 根据其物理化学特性进行了资源化的利用。通过对粉煤灰综合利用的分析, 粉煤灰在建筑、农业、化工等方面得到了诸多的资源化利用, 特别是在建筑领域取得了一定的成果。随着科学技术不断发展, 在粉煤灰方面的科学研究也在不断地深入, 其能够利用的领域也在逐渐增加。粉煤灰的综合利用真正的实现了变废为宝, 减少了其他不可再生资源压力, 充分利用粉煤灰等是我国节约资源的一条重要途径。我国当前对粉煤灰使用途径比较广泛, 但仍有很大的研究空间与发展前景。

## 参考文献

- [1] Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., *et al.* (2015) A Comprehensive Review on the Applications of Coal Fly Ash. *Earth-Science Reviews*, **141**, 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.016>
- [2] Malik, A.S., Boyko, O., Atkar, N. and Young, W.F. (2001) A Comparative Study of MR Imaging Profile of Titanium Pedicle Screws. *Acta Radiologica*, **42**, 291-293. <https://doi.org/10.1080/028418501127346846>
- [3] He, Y., Luo, Q. and Hu, H. (2012) Situation Analysis and Countermeasures of China's Fly Ash Pollution Prevention and Control. *Procedia Environmental Sciences*, **16**, 690-696. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.095>
- [4] Wit, E. and McClure, J. (2004) *Statistics for Microarrays: Design, Analysis, and Inference*. 5th Edition, John Wiley & Sons, Chichester, 5-18.
- [5] 刘关宇. 粉煤灰综合利用现状及前景[J]. 图书情报导刊, 2010, 20(19): 167-170.
- [6] 刘睿. 粉煤灰综合利用现状及发展前景分析[J]. 中国建材科技, 2014(S2): 36.
- [7] 鲁晓勇, 朱小燕. 粉煤灰综合利用的现状与前景展望[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2005, 24(2): 295-298.
- [8] Pati, P.K. and Sahu, S.K. (2020) Innovative Utilization of Fly Ash in Concrete Tiles for Sustainable Construction. *Materials Today: Proceedings*.
- [9] 石如新. 我国粉煤灰综合利用技术综述[J]. 经营管理者, 2010(21): 410-410.
- [10] Guo, X. and Zhang, T. (2019) Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash to Produce Autoclaved and

Modified Wall Blocks. *Journal of Cleaner Production*, **252**, Article ID: 119759.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119759>

[11] 邓玉莲, 朱运锋, 杨义, 等. 海工硅酸盐水泥的制备方法[P]. 中国专利, CN201610117439.1. 2016-03-02.

[12] 王永庆, 史晓杰, 孙川. 粉煤灰的综合利用研究现状[J]. 广州化工, 2009, 37(7): 40-42, 47.