

粉煤灰砌筑抹灰水泥 的 生产与应用

宋存义 / 著

中国建材工业出版社

TQ172.71

3044

粉煤灰砌筑抹灰水泥 的生产与应用

宋存义 著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

粉煤灰砌筑抹灰水泥的生产与应用/宋存义著. 北京:
中国建材工业出版社, 1999
ISBN 7-80090-917-4

I. 粉… II. ①宋… III. ①粉煤灰水泥-生产 ②粉煤
灰水泥-应用 IV. TQ172.71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 2562 号

粉煤灰砌筑抹灰水泥的生产与应用

宋存义 著

*

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路1号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云红光印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 5.5 字数: 141 千字

1999 年 6 月第一版 1999 年 6 月第一次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 10.00 元

ISBN 7-80090-917-4/TU · 214



序

人口膨胀、资源短缺、环境恶化是当今社会持续发展面临的三大问题。人们在创造社会物质文明的同时，也在不断地破坏人类赖以生存的环境空间，而且日趋严重。我国政府已将可持续发展作为 21 世纪的重要议题，并公诸于世。

自然资源的耗竭和贫化，已逐渐成为阻碍国民经济稳定高速发展的主要因素，针对这种现象，大力开展工业固体废物的再利用就成了各国政府重要的国策之一。

本书以物质成分为基础，利用 CaO 消化吸收的同时产生相对的高温，使粉煤灰脱水干燥的原理来生产低标号粉煤灰水泥，实际上是无熟料低标号粉煤灰水泥，创造了预均化湿法工艺，而且在几个地方成功生产，是一项对火电厂粉煤灰利用具有推广意义的研究成果。

这种产品不仅可作建筑砌筑抹灰砂浆，而且解决了我国低标号水泥很少、必须用高标号水泥配制低标号砂浆的这种不合理的浪费现象，并且它也可用于地基、公路、预制构件、建筑砌块和水泥加气混凝土中，对解决广大城乡的墙体材料具有重要意义。

低标号粉煤灰水泥的生产和使用，具有消纳粉煤灰量大、用途广、成本低、性能好等特点，而且实践证明有显著的经济效益和社会效益，更主要的是有明显的环境效益。应大力推广，并要求科研设计单位尽快推出一套不同规模的标准化设计。

本书还采用近代分析仪器，对产品的各种性能以及水泥硬化机理和物质结构进行了研究，特别是对其产品的水化硬化机理进行了研究，指出了这种产品和传统的水泥产品所不同的特性，这里作为普遍中提出的特殊规律——多阶段多层次水化硬化模型，它对该产品的使用、开发和应用具有深刻的指导意义，这一点是

可贵的。正如辩证法指出的那样：“感觉到的东西不一定理解它，只有理解的东西才能深刻地感觉它”。

本书总量大、应用面广，对于大电厂粉煤灰综合利用具有重要的促进作用。相信有更多这样的书出版问世，我国的环境保护工作定能取得全面的胜利。

赵万智

1999年1月于北京

符 号 说 明

LFC	Low strength Flyash Cement	低标号粉煤灰水泥
PC	Portland Cement	硅酸盐水泥 (波特兰水泥)
OPC	Ordinary Portland Cement	普通硅酸盐水泥
FC	Flyash Cement	粉煤灰水泥
SEM	Scanning Electron Microscope	扫描电子显微镜
AEM	Analysis Electron Microscope	分析电子显微镜
TEM	Transmissive Electron Microscope	透射电子显微镜
XRD	X-Ray Diffractometer	X-射线衍射仪
EDA	Energy Dispersive Analysis	能谱分析
DT	Differential Thermal Analysis	差热分析
TG	Thermo Gravimetric Analysis	热重分析
C-S-H	Calcium silicate Hydrate	水化硅酸盐胶凝体
C	CaCO_3 Calcite	碳酸钙 (方解石)
L (C)	CaO Lime	石灰 氧化钙
S	SiO_2 Quartz	二氧化硅 (石英)
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ Portlandite	氢氧化钙
T-CSH	$\text{XCao} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{yH}_2\text{O}$	Tobermorite 托勃莫来石
M	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ Mullite	莫来石
F	Fe_2O_3 Hematite	赤铁矿
E (AFt)	Ettringite	钙矾石

目 录

序言

第一章 综述	1
第一节 粉煤灰的产生和排放	1
第二节 粉煤灰的利用现状	3
第三节 研制生产粉煤灰砌筑抹灰水泥的意义	5
第二章 粉煤灰砌筑抹灰水泥的原材料分析	8
第一节 粉煤灰 Fly Ash (FA)	8
第二节 石灰	20
第三节 熟料和水泥	25
第四节 石膏等外加剂	30
第三章 粉煤灰砌筑抹灰水泥生产工艺	33
第一节 预均化湿法工艺原理	33
第二节 粉磨工艺	44
第三节 粒度分析	64
第四章 粉煤灰砌筑抹灰水泥的基本性能	72
第一节 基本性质	72
第二节 其他性能	80
第五章 粉煤灰砌筑抹灰水泥水化反应机理和 硬化结构研究	86
第一节 粉煤灰砌筑抹灰水泥热力学分析	86
第二节 粉煤灰砌筑抹灰水泥化学组分的影响	90
第三节 粉煤灰砌筑抹灰水泥水化反应模型	93
第四节 粉煤灰砌筑抹灰水泥硬化体微观结构分析	107
第六章 粉煤灰砌筑抹灰水泥的工程应用	121
第一节 砌筑砂浆的应用	121

第二节 抹灰砂浆的应用.....	122
第三节 粉煤灰砌筑抹灰水泥技术标准编制说明.....	123
〈参考资料〉	127
附录.....	132
1 科学技术成果鉴定证书 (摘要)	132
2 砂浆水泥冀 Q/石燕建 01—89	137
3 DB13 (J) 11—97 砌筑抹面灰应用技术规程	142
4 GB1596-91 用于水泥和混凝土中的粉煤灰	153
5 GB177-85 水泥胶砂强度检验方法.....	162

第一章 综 述

顾名思义，粉煤灰砌筑抹灰水泥就是以粉煤灰为原料，加入适量硅酸盐水泥熟料、石膏、碱性激发剂以及外加剂，经细磨而制成的广泛用于工业与民用建筑的砌筑抹灰工程的低标号水泥。因为它以工业废渣为主要原料，既可以变废为宝，减少粉煤灰对环境的污染，同时又能降低水泥成本和施工造价，因此生产和应用粉煤灰砌筑抹灰水泥是一项具有多重效益的项目。

第一节 粉煤灰的产生和排放

粉煤灰是火力发电厂排出的一种工业废物，它是由磨成一定细度的煤粉在粉煤炉中经过 $1100\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 的高温悬浮燃烧之后，由原煤中所含不燃的粘土质矿物发生分解、氧化、熔融等变化，在表面张力的作用下形成细小的液滴，在排出炉外时，经急速冷却形成粒径为 $1\sim 50\mu\text{m}$ 的微细球形颗粒，然后连同未被燃烧的可燃物一起由除尘器所收集，或者由水流管道排放到储灰场。

因此，粉煤灰在 GB 1596—79 和 GB 5947—86 中被定义为“从煤粉烟道气体中收集的粉末状集合体”，通常也称烟灰，国外称为飞灰 (Flyash)。

煤是自然界最普遍的能源之一，它是植物遗体在自然界经历了复杂的生物化学和物理化学变化而形成的。它大部分用作火力发电用的燃料。电厂所用的煤，90%以上是烟煤，其次是褐煤和无烟煤。烟煤的矿化程度中等，呈灰黑色，是由多种高分子化合物和矿物质组成的复杂混合物，化学成分有碳、氢、氧、氮、硫等。以碳和氢有机化合物的形式存在的，称为可燃物，一般着火温度是 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ ，挥发物含量占可燃物的 10%~40%，热值在 4776

~7165kcal/kg。煤中的无机组分(灰分),称为不燃物,主要有伊里石、高岭土、水云母、蒙脱石、石英、方解石等,这些不燃物在煤燃烧后就成了灰分。

电厂煤粉炉中部分烧结粘连成块、从炉底排出的外观表面粗糙、多孔、成不规则玻璃态炉渣,称炉底灰或炉渣。它大约占灰渣总量的15%左右,炉渣中富集了较高的钙、钠、钾等元素,其性质与粉煤灰并无本质上的区别。

粉煤灰外观呈灰白色,含碳量高时呈灰色。一吨煤燃烧后,大约产生250kg的粉煤灰,也就是说每发10度电,将产生1kg左右的粉煤灰,每个10万千瓦装机容量的火力发电厂,一年要排出粉煤灰10万吨。粉煤灰分干排灰和湿排灰两种。

目前全世界用于发电的煤炭占总量的60%,粉煤灰总排放量每年达8亿多吨,且以每年5000万吨的速度递增。我国火力发电量占总发电量的80%,1995年全国公共电厂产生粉煤灰1亿多吨,其中只有30%左右得到了综合利用,其余大部分排入储灰场中,还有一部分排入江河湖海。至今我国已累计堆存粉煤灰7亿多吨,占地28多万亩。今后为保证国民经济年均增长8%~9%的速度,我国电力装机总量还将大幅度增加,据预测,到2000年我国火电发电量将达1.6亿千瓦以上,与此相适应粉煤灰年排放量也将达到1.6亿吨,占地面积将增至50多万亩,相当于挤掉供应两个西藏人口的粮食耕地。

大量堆存的粉煤灰,不仅占用耕地,而且由于二次扬尘和有害元素浸出对周围生态环境造成严重危害。这些年来世界酸雨成灾,与火电厂的废气、飞灰等有关。60年代,我国马头电厂粉煤灰排入釜阳河滩,堵塞河道,造成了河水泛滥。石家庄电厂年排灰35万吨,储灰场位于近郊浮沱河畔,占地1000多亩,每年干旱多风季节,灰尘四处飞扬,周围几公里的蔬菜、庄稼以及居民住宅都落上一层飞灰,直接影响人民的的生活和健康以及农业发展。

我国其他许多地方多以围地挖池筑高水坝方式储灰,随着逐年增加的粉煤灰,灰坝多次加高,有的已成为空中灰场,曾出现

过灰坝倒塌和堤坡渗水事故，造成经济上的重大损失，同时对电厂的安全运行和周围地区安全构成威胁。

因此加强粉煤灰废物的开发和综合利用，化害为利，改善环境，是一项利国利民的大事，而且势在必行。

第二节 粉煤灰的利用现状

从 70 年代开始，许多国家就把粉煤灰利用作为国策之一。我国从 1985 年开始，将资源的综合利用提高到重要的意识日程上来，相继制定颁布了一系列加强粉煤灰开发和综合利用的法规及相关经济政策，从根本上保证了粉煤灰综合利用率的逐年提高。

近几年来，我国粉煤灰开发和利用进展很快，综合利用粉煤灰的技术已超过一百多种，技术水平有的已赶上或超过世界先进水平。在 1995 年，我国粉煤灰综合利用量超过 3400 万吨，利用量居世界前列，利用率达 33%，取得了一定的经济、社会和环境效益。但是，由于管理措施不严、经济政策得不到很好落实以及地区发展的不平衡等多种因素，粉煤灰综合利用与客观形势要求还有很大差距。

粉煤灰综合利用的根本出路在于技术进步，今后技术的重点应放在开发和推广掺量大、低成本、高效益的粉煤灰综合利用新技术、新工艺、新设备和投资少、用量大、直接利用粉煤灰的技术上。坚持“以用为主”，因地制宜，多种途径，不断扩大利用面，增加利用量，提高利用率，促进粉煤灰推广利用有一个重大突破。

粉煤灰主要用于生产建材、建筑工程、筑路、工程回填、农（种植）业等方面，并可从中提取漂珠、炭、铁等物质，其中建材工业和建筑工程占综合利用量的 70%。较大宗的利用情况如下：

1. 作混凝土、砂浆掺合料

混凝土中加入粉煤灰，可取代部分水泥和细沙，以降低成本、改善性能。粉煤灰能吸收水泥中的游离氧化钙，减少水化热效果，提高混凝土的稳定性，增加后期强度，因此大坝、地基、地下结

构、预制构件等大体积混凝土工程中均可加入粉煤灰，其掺量可达 30%。

利用粉煤灰作细集料代替水泥、石灰或砂配制砂浆，性能好，成本低，粉煤灰用量大。

2. 生产加气混凝土

粉煤灰加气混凝土是用粉煤灰（占 60% 以上）、水泥、石灰、石膏为原料，经铝粉发泡等工艺制成的一种多孔新型建筑材料。它可根据需要制成不同容重、相应有不同强度的砌块、面板和墙板，满足不同用途的需要。它的容重在 $500\text{kg}/\text{m}^3$ 以下，抗压强度在 3.0MPa 以上，具有质轻、保温、隔热等功能。随着高层建筑的不断增加，粉煤灰加气混凝土成了迅速发展的工业。

3. 制砖工业

用粉煤灰代替部分粘土可制粉煤灰烧结砖。由于粉煤灰中含有一定量的未燃尽的碳分，采用内燃烧结制砖工艺，可以节省煤的用量。粉煤灰掺量在 20%~80% 时制成的烧结砖比粘土砖降低燃料约 20%~70%，强度可达 $7.5\sim 12.5\text{MPa}$ ，容重为 $700\sim 900\text{kg}/\text{m}^3$ ，空隙率 55%。用粉煤灰代替砂可制蒸制砖，粉煤灰加水泥或石灰还可制成非烧结混凝土砌块。掺入粉煤灰制砖，具有质轻、隔热、不易风裂的特点，用于砌筑墙体可减轻墙体重量，并具保温效果。

4. 筑路与工程回填

粉煤灰容重轻，碾压最佳含水范围大，并具有一定的水硬性，用于筑路和工程回填，可以减轻自重，降低沉降量，缩短施工周期和降低工程造价。

粉煤灰用作筑路材料和工程回填方面的利用量仅次于建材工业和建筑工程方面，居利用行业第二位。

5. 其他用途

从粉煤灰中可选取漂珠。漂珠具有较高的经济价值，可用作多种产品，如漂珠保温、耐火制品，塑料、橡胶制品的充填料，耐磨制品，建筑材料，涂料等。

粉煤灰还可用于制做优质矿棉、陶瓷制品、微晶玻璃、烧结铸石、肥料载体以及用于净化水源，甚至提炼某些金属等等。

6. 制作水泥

粉煤灰是一种优良的人工火山炭质活性材料，是适用于建材工业的宝贵资源。粉煤灰做水泥有两种方法，一是代替粘土原料，配制生料。二是粉煤灰与熟料一起混磨，做水泥混合材。采用一种方法称单掺，如果两种方法都用称双掺。粉煤灰的掺量一般在20%~40%。掺入粉煤灰后，能显著的降低水泥的水化热，是用作大坝水泥的优良品种，除此之外，可生产低热、快硬、早强、砌筑和油井等特种水泥。

利用粉煤灰生产水泥是国内外综合利用粉煤灰的主要途径。近年来，世界水泥需求一直呈上升趋势。随着我国经济建设的不断发展，水泥需求量也日益增加，除常用水泥品种外，对特高标号水泥和低标号水泥等具有专门用途的水泥需求量也将大幅度增加，而当前的生产能力，远远不能满足需求。

近十年来，科学研究工作者一方面对水泥生产的“两磨一烧”传统工艺进行机械化和电气化改造，以提高自动化程度，另一方面对原材料的种类和配比进行改进，研制出各种用途的水泥，并力求降低成本，增加经济效益。这种专用水泥也越来越多地受到人们的重视，其中就有低标号粉煤灰水泥。

第三节 研制生产粉煤灰砌筑抹灰水泥的意义

粉煤灰砌筑抹灰水泥是一种低标号水泥，主要用于建筑工程中的砌筑砂浆、抹灰砂浆、地面找平层、墙面底灰砂浆以及建筑制品等用途中。

在一般工业与民用建筑中，高标号水泥的用量费用占总投资的10%，高标号水泥中25%~40%要用于配制各种低标号的砂浆。在100平方米的建筑中，需要用3.6吨水泥、2.5吨石灰配制各种砂浆。这就是说1000万元投资的工程中，需要25~40万元

购置高标号水泥来配制低标号砂浆。

利用传统的“两磨一烧”工艺生产低标号水泥，其成本与高标号水泥相差不多，但售价却相差较大，水泥生产厂家从经济利益上考虑，只生产 425 号以上水泥，这使得低标号水泥很少，常处于空白状态。大量建筑工程中采用高标号水泥来配制各种低标号砂浆，由于砂浆中胶结材料比例很少，常造成砂浆的泌水性和分层度增大，和易性不好，给施工和工程质量带来不利。这种现象不但在经济上，而且在技术上都是不合理的，因此要满足市场对低标号水泥的需要，应从生产工艺流程和原材料选择与配比上进行低标号水泥生产与应用技术的开发研制。

利用粉煤灰生产低标号水泥，不但能满足建筑施工的需要，添补砂浆水泥的奇缺，还能大量使用废物粉煤灰和减轻环境污染。此外低标号粉煤灰水泥具有价格低、生产工艺简单、吃粉煤灰量大、产品性能好、用途广泛等特点。

我国早在 60 年代，就把粉煤灰用于混凝土和砂浆中，代替部分高标号水泥，后来又制成了石灰、火山灰低标号水泥。70 年代初制成了粉煤灰少熟料砌筑水泥，但由于工艺和价格上的问题，没有得到大量推广应用。1981 年，合肥水泥研究院掺入粉煤灰、矿渣、石灰和石膏，制成了粉煤灰矿渣无熟料水泥，强度达 27.5MPa。1984 年北京市建工所和北京市六建公司合作把原状干粉煤灰和生石灰混和磨细，制成双灰粉用于砂浆中代替部分水泥和石灰，取消施工现场淋灰，增加石灰出灰率，工程使用结果表明，双灰粉比磨细生石灰和磨细粉煤灰效果更好。

自此之后许多地区都先后发展了干法双灰粉，但是粉煤灰用作建筑材料，都具有强烈的地方色彩。当用于砂浆和混凝土掺合料时，等于多了一道施工工序，而且容易引起二次污染。制作矿渣无熟料水泥和干法工艺的双灰粉需要烘干湿粉煤灰，矿渣来源又受到限制，这些无疑又会增加成本。

1986 年北京科技大学（原北京钢铁学院）和河北省建筑研究所合作，开发研究了预均化湿法新工艺，省去了湿粉煤灰烘干工

序，并在材料中加入少量外加剂，制成了改性双灰粉。按 GB 177—85 中的测试方法进行检验，强度达 5~10MPa，而且安定性、凝结时间等技术指标满足有关要求。这种改性双灰粉前期为气硬性，后期为水硬性，按 GB 4131—84 命名原则，也可称为低标号无熟料粉煤灰水泥。1988 年这项新技术通过了河北省科委组织的专家鉴定。

为满足某些高层建筑用较高标号砂浆的要求，在原材料配比中又加入少量熟料或水泥及其他外加剂以调节标号，目前已经扩展配制出 25、50、75、100、175、225 号系列品种。在这里我们把它统称为粉煤灰砌筑抹灰水泥（Low Strength Flyash Cement），简称 LFC。粉煤灰砌筑抹灰水泥除用于砂浆外，还可以制做各种建筑制品，如砌块、预制构件等。

从实验室转入工厂，根据已建成的几个生产厂家和一些建筑工程实例证明，粉煤灰砌筑抹灰水泥的生产工艺稳定、可靠，产品质量好，对加气混凝土砌块和其他粉煤灰建筑制品的抹灰和砌筑，是优于其他砂浆材料的。1990 年 1 月预均化湿法新工艺及其产品经河北省科委再次组织专家评议鉴定，认为该项成果从生产工艺、产品到应用技术方面均属国内先进水平，具有明显经济效益、环境效益和社会效益，可以大量的推广与应用，这对缓解我国高标号水泥供应紧张的局面以及改善环境污染将产生积极的影响。

第二章 粉煤灰砌筑抹灰 水泥的原材料分析

粉煤灰砌筑抹灰水泥的原材料包括粉煤灰、石灰、适量的熟料及少量石膏等。为了认识原材料的化学成分、物相组成及物理性能与粉煤灰砌筑抹灰水泥外在性能之间的影响关系，对原材料进行基本分析是十分必要的。本试验采用的原材料，在使用前均按要求进行了品质检验，没有检验的，取用原有关部门或有关文献提供的数据。

第一节 粉煤灰 Fly Ash (FA)

粉煤灰是粉煤灰砌筑抹灰水泥的主要原料，约占水泥总量的50%以上，因此对粉煤灰应进行重点分析。

粉煤灰的各种性质与原煤品质、粉碎细度、燃烧状况、收尘方式、排放方法及取灰部位等有很大关系。表 2-1 是本试验取用粉煤灰电厂的基本情况。

表 2-1 电厂基本情况

编号	名称	装机容量 (万千瓦)	排灰方式	储灰场 占地(亩)	年排灰量 (万吨)	煤种	灰份 (万吨)	储灰场 投资 (万元)
1	西高井电厂	35	干排	1000	35	大同	24	4000
2	微水电厂	10	湿排	207	13.6	阳泉	28	800
3	石家庄电厂	35	湿排	1000	25	阳泉	31	3000
4	下花园电厂	35	湿排	700	35	大同	22	700

一般原煤进厂后，经破碎、粉磨成 0.1mm 粒径的煤粉，由气泵送入燃烧锅炉炉膛，经 1500℃ 左右燃烧后，灰渣沉入底部，小

于 0.1mm 的颗粒被除尘器收集。干排灰是由空气流直接把粉煤灰输送到储灰仓，然后排泄或待用，干排灰的粉煤灰品质比较均匀。湿排灰是把粉煤灰与炉渣一起由水流管道输送到厂外的储灰厂或江河湖海，在输送排放过程中粉煤灰受容重、粒度及形态的影响，常常在不同部位性质不尽一致。

严格来讲，粉煤灰是指烟道下来的干排灰，而湿排灰则包括粉煤灰和炉底灰渣。本试验用灰均由用灰部门提供，样品有一定的代表性。

一、化学分析

表 2-2 是粉煤灰化学成分分析（编号同表 2-1，下同）。

表 2-2 粉煤灰化学成分分析

编号	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	烧失量	可溶硅
1	11.21	20.23	51.38	3.94	1.25	0.45	1.48	0.44	7.7	1.92
2	3.5	33.51	51.82	2.46	0.51	0.63	0.87	0.03	6.3	0.37
3	10.7	24.86	42.80	2.84	0.37	0.43	0.80	0.03	16.9	0.27
4	6.7	30.39	52.38	3.88	0.92	0.51	1.04	0.13	3.6	0.45

由表可见采用的 4 个电厂粉煤灰中 Al₂O₃ 含量在 20%~35%，属于正常范围。高铝粉煤灰常引起玻璃相降低，使活性减少。一般 Al₂O₃ 含量高于 40% 以后，粉煤灰中形成较多的莫来石，可另作耐火材料使用。

SiO₂ 的含量在 40%~55%，它是玻璃体的主要成分，也是形成水化硅酸盐胶凝体的主要来源。一般 SiO₂ 含量越多，粉煤灰的活性就越大，正是由于这一点，它可被用来作为建筑胶凝材料。

粉煤灰含钙量在 3% 左右，它的含量对胶凝体的形成是有利的。国外把 CaO 含量超过 10% 的粉煤灰称为 C 类粉煤灰，而低于 10% 的称为 F 类粉煤灰。C 类粉煤灰其本身具有一定的水硬性，可做水泥混合材。F 类粉煤灰常做混凝土掺合料，它比 C 类粉煤灰使用时水化热要小。

粉煤灰中少量的 MgO、Na₂O、K₂O、SO₃ 等生成较多玻璃