

前 言

(一)

上海地区电力工业以燃煤为主体结构, 1982年排放的粉煤灰总量约 100 万吨左右。今后还将扩建和新建大中型燃煤电厂, 粉煤灰产量将会成倍增加。为发展电力工业、治理环境污染, 必须处置好大量灰渣。另一方面上海地区缺乏天然矿物资源, 利用粉煤灰, 就地取材, 发展新型地方建材工业以及直接在工程建设中取代水泥和砂石资源, 有利于调整和发展国民经济, 加快城市建设, 改善人民生活。

目前, 上海地区推广利用粉煤灰制造墙体材料、筑路以及在水泥和混凝土中用作混合材料, 是综合利用粉煤灰的三个主要方面; 1982 年全市粉煤灰利用率 约达 60%。其中, 粉煤灰筑路主要推广于道路承重基层; 粉煤灰在水泥工业中主要推广于矿渣粉煤灰两掺水泥; 粉煤灰混凝土则已推广于地下工程、市政排水工程、水利工程、预拌混凝土、混凝土制品、建筑砂浆以及一些现浇混凝土工程中。近五年来, 取得了一定的经济效益和使用经验。

为了总结推广这些经验, 在 1982 年第四季度, 由上海市硅酸盐学会、建筑学会、土木工程学会、水利学会、电机学会和中国电机学会等六个学会联合举办了“粉煤灰水泥和混凝土实用技术报告会”。上海市建委付主任罗白桦、市科委付主任沈志农、市科协付主任 戈悦宽等同志出席了开幕式。罗白桦同志在大会上作了重要讲话, 他对各学会和各部门通力协作, 推广粉煤灰水泥和混凝土取得的成绩表示赞同和支持。他指出, 这次报告会不是一般的学术讨论, 而要强调一个“用”字。要总结上海地区粉煤灰水泥和混凝土技术的实践经验, 再回到实践中去积极应用, 改进提高; 要依靠党的政策和科学技术发展, 把上海市综合利用粉煤灰的工作推向前进。同时指出, 当务之急是节约水泥。因为, 上海远离水泥原燃材料矿山基地, 石灰石、石膏、高炉矿渣、煤炭等运距至少数百公里甚至上千公里。由于运费较大, 上海水泥成本比全国一般水泥厂成本约高 50% 以上。上海水泥需要量逐年增加, 1982 年增至 233 万吨。水泥缺口还逐年扩大, 1982 年由兄弟省市物资协作水泥 20.6 万吨, 高价进口水泥数万吨。1983 年如以协作 20 万吨小水泥、进口 5 万吨水泥计, 差价损失共约 1100 万元, 接近新建一个年产 10 万吨水泥厂的投资。因此, 在上海每使用 1 吨取代水泥的粉煤灰, 不包括节约粉煤灰处置和矿石开采、运输的资金和能源, 还可节约资金 30 至 140 元, 节约标准煤 100~200 公斤。不言而喻, 在上海利用粉煤灰取代水泥, 比之其他用途, 具有更大更明显的经济效益。至于利用粉煤灰取代黄砂, 其经济效益也甚可观。

(二)

回顾五十年代初期, 上海地区就开始研究和推广在水泥和混凝土中应用粉煤灰。至 1966 年已由上海水泥厂批量生产粉煤灰硅酸盐水泥。1978 年起, 电力部门积极创造了提供干排灰的有利条件, 作出了很大贡献。在市建委的组织、领导下, 电力、建材、建工、市政工程等部门重新开始共同开发利用粉煤灰增产节约水泥的新途径, 在保证水泥和混凝土产品和工

程质量的前提下，充分利用粉煤灰节约水泥、黄砂等资源及能源。

五年来，由于没有建立起专业的开发机构，给开发新技术带来一定困难，在初始阶段，尽管部门和个人的利益不太显著，但是实际上各部门都能以国家利益为重，围绕利用粉煤灰节约水泥协同做了大量的、必要的研究和开发工作，又试行了一些适当的奖励措施，有关部门对粉煤灰在水泥和混凝土应用的资源开发、产品开发、技术开发、市场开发等方面各尽其能、众擎易举，终于取得了综合的效果，又一次体现了社会主义制度的优越性。

(三)

虽然粉煤灰利用取得了一定成效，但是仍有不少同志对于粉煤灰水泥和混凝土近年中发展的新技术和新动态还了解不够，有些同志从“保护企业心理”出发，对一些成熟的新技术和实用经验提出种种质疑。因此必须做好科学技术普及工作，依靠知识力量去开发智力。在有关管理、生产、设计、科研、高校等部门的积极支持下，由学会组织了这次以交流粉煤灰水泥和混凝土应用技术为主要内容的报告会，进行广泛的技术交流。

报告会内容共分粉煤灰水泥和混凝土的基本知识，应用技术和实践经验，科研、设计、标准、规程等科技情报三个单元。

报告会每周举行一次活动，历时三个月，共有二十多个讲题，听讲人数约四千多人次，大家反映较好，报告会后，许多单位的利用粉煤灰节约水泥和建材资源的工作有了新的进展，粉煤灰在混凝土工程中的使用范围进一步扩大，利用量又有较大增长，特别是筑路材料，收效较大，表明了科学技术迅速转化为生产力获得了预期效果。报告会结束后，根据大家的要求，决定编印这本汇编。我们请作者对原稿内容重新补充和整理，并要求加强实用性，更利于生产部门的同志参考使用。

汇编中还删去了一些重复的内容，对于尚未达到实用阶段的技术，一般从略，准备今后随着科学技术的发展，再组织新的技术讲座。

当然，利用粉煤灰的技术涉及面较广，存在着许多可变因素。因此任何经验不能照搬照套，必须考虑因材施教和因地制宜。我们还希望在推广时要加强科学管理，严格遵守现行的各种标准和规程。不断扩大使用范围，确保工程质量，提高经济效益和社会效益。

这次报告会得到华东电业管理局的赞助。由六个学会联合举办，充分发挥了群众学术团体联系不同学科和广大会员的长处，团结了有关部门的技术人员，并得到不少非会员同志大力支持，在此一并致谢。

编 者

1983年9月

目 录

1. 前 言	
2. 粉煤灰水泥和混凝土应用技术	
.....	上海市建筑科学研究所 沈旦申(1)
3. 粉煤灰的来源	
.....	华东电力管理局 周兴国(12)
4. 粉煤灰的性质及其活性评定	
.....	上海市建筑科学研究所 乐美龙(18)
5. 粉煤灰效应	
.....	上海市建筑科学研究所 张荫济(25)
6. 掺磨细粉煤灰混凝土的配合比设计	
.....	上海市市政工程管理局 陈敏江(29)
7. 粉煤灰混凝土配合比设计方法的综述	
.....	上海市建筑科学研究所 沈旦申(36)
8. 粉煤灰水泥的水化作用	
.....	同济大学 沈 威(43)
9. 矿渣粉煤灰水泥的生产和应用	
.....	上海水泥厂 俞锡润(51)
10. 几种新型粉煤灰水泥的介绍	
.....	同济大学 魏金照(55)
11. 粉煤灰在建筑工程中的应用	
.....	上海市建筑工程局科技处 卞忠林(60)
12. 粉煤灰在建筑砂浆中的应用	
.....	上海市第一建筑工程公司 倪寿民(64)
13. 掺粉煤灰的商品混凝土	
.....	上海市建筑科学研究所 张荫济(73)
14. 磨细粉煤灰在地下工程中的应用	
.....	上海市隧道建设公司 张易谦(79)

15. 掺磨细粉煤灰混凝土在排水工程中的应用
..... 上海市市政工程研究所 章汉民 钱尚玟(88)
16. 掺磨细灰泵送混凝土的配合比设计及应用
..... 上海电力建筑工程公司 杨大明 宋鸿尧(95)
17. 磨细灰混凝土在挤压管工艺中的应用
..... 上海市市政工程局供应处水泥制管厂 沈纯智执笔(100)
18. 粉煤灰三渣修筑道路
..... 上海市市政工程研究所 李元干(106)
19. 磨细灰混凝土在三林塘水闸工程中的应用
..... 上海市水利局基建处 林永安(111)
20. 粉煤灰在水利工程中应用
..... 上海市建筑科学研究所 胡申生(117)
21. 粉煤灰混凝土的性能
..... 上海市建筑科学研究所 范本善(125)
22. 粉煤灰混凝土的结构性能
..... 上海市建筑科学研究所 武珂璘(131)

23. 附 录 I 有关标准和规定

- 矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥与粉煤灰硅酸盐水泥.....(136)
- 用于水泥和混凝土中的粉煤灰.....(139)
- 用于水泥中的火山灰质混合材料.....(142)
- 上海市磨细粉煤灰作混凝土和砂浆外掺料暂行规定.....(146)
- 建筑工程混凝土和砂浆中掺用粉煤灰的技术规定.....(148)
- 掺磨细粉煤灰混凝土的施工技术要求.....(151)

24. 附 录 II 有关国外资料简介

- “粉煤灰在混凝土中的应用”.....上海市建筑科学研究所 平炳华摘录(160)
- 用于混凝土的粉煤灰质量评定和生产控制的技术.....(165)
- 掺有粉煤灰和超塑化剂的混凝土与时间有关的性质.....(168)
- 英国优质粉煤灰对工程设计和结构混凝土的影响.....(171)
- 粉煤灰对结构混凝土性质的影响.....(176)

粉煤灰水泥和混凝土的应用技术

上海市建筑科学研究所 沈旦申

一、引言

五十年代初期,上海市就对粉煤灰进行试验研究,并建议将它用作混合材料的新资源在水泥和混凝土中应用⁽¹⁾。以后三十余年来,上海地区粉煤灰的利用,固然取得不少成绩,但是利用粉煤灰直接取代水泥的增产节约效果,并不够理想。但就全国范围来看,冶金部门和水利部门早在五十年代中期,已在工业建筑结构及水工结构中应用。而国外粉煤灰的各项用途中,在水泥和混凝土中的应用,历史最悠久,利用量最多,利用率最高,有关的科学技术的发展一直占领先地位。特别是在四十年代起粉煤灰在混凝土工程中大量应用,目前全世界每年大约有1500万吨粉煤灰在水泥和混凝土中应用,这方面的利用率占总利用量的三分之一以上,并且是占首位。近年来国际上连年举行粉煤灰水泥和混凝土的学术会议,主要动向是有关的应用技术有明显的进展,并预测今后几年中还将加速发展。

1978年起,上海市在市建委组织领导下,电力、建材、建工、市政、水利以及宝钢工程等部门,主要为了达到节约水泥这一目的,共同开发粉煤灰资源和发展粉煤灰水泥和混凝土新技术,在近五年时间里,曾做了大量工作,使三十余年来上海地区粉煤灰在水泥和混凝土的应用,不但重见起色,而且打开了一些新局面。

1978年起,上海地区基本建设中水泥缺口逐年扩大,而电厂粉煤灰的产量却逐年增长。1978年水泥缺口数万吨,粉煤灰排放量为54万吨,1982年从外省和国外引进水泥约25万吨,粉煤灰排放量已近100万吨。按理说,利用粉煤灰取代部分水泥,既是大宗利用,又是有效利用;对水泥生产,既省了能源,又省了矿石;对混凝土生产,既节约水泥和降低成本,又改进性能和发展品种;还有减少了污染,变废为宝等许多社会效益。理论上尽管如此,实际上一项新技术,如果只有科研而没有开发它决不会不脛而走向生产的。而粉煤灰在水泥和混凝土中应用的开发,涉及面广,涉及的问题多,开发过程中的困难,此起彼伏,连连不断,实在是一根难啃的硬骨头,这些就是过去开发工作收效不大的原因。

回顾最近的四、五年间,在市建委领导下和各部门大力支持下,虽然动用的资金、人力、物力都很有限,但是还是有不少同志结合本岗位工作积极承担起这项艰巨的开发任务,正因为他们以国家的利益为重,携手协作,群策群力,终于显示出社会主义大协作的优越性。

众所周知,开发工作应有许多方面,其中技术开发必须先行。

这次技术开发的特点是:审时度势,从产品开发和应用技术开发这两个环节着手,走出了一些路子。本文将借这次学术讲座的机会,主要介绍一些开发中的技术关键问题,看来都有一定的实用参考价值。

二、产品和应用技术的开发

首先说明一下粉煤灰产品开发和在水泥和混凝土中应用技术开发为什么是两个主要环节,以及它们之间的相互关系。

近年人们对粉煤灰确认为“第二胶凝材料”或“副胶凝材料”,这不仅是在国际学术会议上学者们的建议,而且有些国家标准中已经明确地把产品粉煤灰从“混合材料”修改为“胶凝组分”。这个变化并不是偶然的发现,而正是多年来对粉煤灰产品开发的结果。

过去利用工业废渣的习惯认为,反正是处理废渣,不必讲究资源化和产品化。对于早期的粉煤灰在水泥和混凝土中的应用也是如此,因此效果往往不佳。国外最早的粉煤灰资源化和产品化大体上是从五十年代开始的,自此以后,许多国家都制订了适用于水泥和混凝土中粉煤灰的国家标准,其中有些国家标准已经过多次修订。我国在1979年也颁发了GB 1596-79《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》这个国家标准。现将国内外粉煤灰国家标准列于表1中。

各国应用于水泥和混凝土中粉煤灰的国家标准

表 1

国 别	标 准 编 号 和 名 称	颁发年份
中 国	GB 1596《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》	1979
英 国	BS 3892《用于混凝土中的粉煤灰》 BS 3892《用作结构混凝土中胶凝组分的粉煤灰》(草案)	1965 1982修订
美 国	ASTM C618《波特兰水泥混凝土中用作矿物质混合材料的粉煤灰和生料或煅烧的天然火山灰》	1980修订
日 本	JIS A6201《粉煤灰》	1977修订
苏 联	ГОСТ 6269《胶凝材料中的活性混合材料》	1963
澳大利亚	AS 1129《用于混凝土中的粉煤灰》	1971
奥 地 利	ÖNORM B3319《制造水泥用水硬性粉状混合材料的粉煤灰》	1962
印 度	IS 第一部分《用作火山灰材料的粉煤灰》 第二部分《用作混凝土混合材料的粉煤灰》 第三部分《用作砂浆和混凝土细集料的粉煤灰》	1962 1966 1966
土 耳 其	TS 639《用于波特兰水泥熟料和波特兰水泥混凝土的粉煤灰》	1968

国家标准的制订为粉煤灰产品开发提供了重要依据。这样,所开发的粉煤灰就可从矿产资源发展为一次加工产品,也就是使粉煤灰作为“第二胶凝材料”或“副胶凝材料”成为与水泥(包括粉煤灰水泥)同等层次的产品。至于粉煤灰混凝土则是二次加工的产品,因此推广粉煤灰混凝土实际上也是属于产品的开发。

这里所指的应用技术开发包括发展粉煤灰转化成产品的技术以及粉煤灰在水泥和混凝土中应用的技术,后者也就是生产粉煤灰水泥产品和混凝土产品的技术。此外,还须说明一下,这里所介绍的应用技术大都是已经付诸实施的,而且其特点是与我国国情和当地资源、

技术、经济和社会发展相适应的，或许有人认为不过是“适用技术”或“中间技术”，但是实践证明行之有效，确能节约水泥的，而且有时能起改善水泥、混凝土的性能的作用。与此同时，照顾到这些应用技术发展的系统性，不免也提到一些早年的应用技术、或正在开发以及待开发的有关应用技术。

三、关于粉煤灰产品

三十多年间上海地区在水泥和混凝土中使用过各种粉煤灰，直到1978年起，才把它当作产品来开发，现将各种粉煤灰和有关问题简述如下：

1. 原状湿灰和干灰

最早，上海地区只有湿法收尘和水力除灰装置排放的湿粉煤灰。在排灰过程中粉煤灰的均匀性起了很大的变化。表2列举苏联电厂沉灰池中不同部位粉煤灰的实测结果⁽²⁾。

苏联电厂沉灰池中粉煤灰变异情况的实测结果 表 2

厂别	取样部位	化 学 成 份 (%)							颗 粒 筛 分 析 (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量	900 孔/cm ² 个别 筛余	4900 孔/cm ² 个别 筛余	10000 孔/cm ² 个别 筛余	10000 孔/cm ² 通 过
某烧无烟煤的电厂	近进灰口	63.31	16.2	13.4	0.8	7.9	2.1	0.47	12.3	20.2	19.2	48.3
	中 部	32	29	19.5	1.23	6.5	2	8.7	3.6	18.4	16.3	58.7
	近溢流口 (端部)	28.4	32	17.4	0.9	5.9	1.1	17.1	5.44	15.8	9.7	68.4
某烧烟煤电厂	近进灰口	70.3	5.7	4.07	7.07	3.9	2.4	10.8	—	—	—	—
	近溢流口 (端部)	27.8	18.4	4.1	7.4	3.1	0.15	38.4	—	—	—	—

注：1，取样部位的近进灰口是离进灰管口18米处，近溢流口是离沉灰池端边10米处。

2，取样深度为0.5~0.8米。

此例表明从沉灰池中挖取的湿粉煤灰中化学成分和颗粒级配变异极大。又如上海吴泾电厂沉灰池是粉煤灰与炉底渣合排，实测结果近进灰口样细度为4900孔/厘米²筛筛余为70%，而端部为5%，可见混排灰渣的性质差异更为悬殊。

1960年前后，上海的一些混凝土工程中采用了选定地点、专挖端部细灰的办法，实践效果尚好。当时粉煤灰用量不多，象采取这样的措施作为权宜之计，并加强粉煤灰质量控制，还是可行的。又如近几年施工部门在粗灰区和中灰区挖灰，在砂浆中取代部分砂子，发现效果反而比细灰好。可是，如果盲目挖用，势必会严重降低混凝土质量。

六十年代上海水泥厂曾用沉灰池灰生产粉煤灰硅酸盐水泥，发现湿灰烘干是个严重问题，烘干时煤耗至少36公斤标准煤/吨灰，烘后的含水率仍在5~8%之间，因而水泥磨机产量与粉磨普通水泥比较，由12.5吨/小时下降到8.5吨/小时，每吨水泥电耗则从31度增

加到 46 度。车间扬尘变大, 粉尘浓度达 1500 毫克/米³以上。近年该厂开始用干粉煤灰作混合材料, 厂内生产过程中每吨粉煤灰能耗降至 1.5 公斤标准煤, 扬尘情况有根本好转。

杨树浦电厂从 1978 年起积极与科研、生产、使用等部门配合, 利用原有的灰库, 提供干粉煤灰, 可认为这是上海粉煤灰资源开发的新起点。原状干粉煤灰除用于水泥生产外, 已用于低标号素混凝土以及砂浆中取代部分水泥、石灰和砂子, 也取得了相当显著的技术经济效益。虽然上海的原状干灰往往不符合 GB1596-79 的规定, 特别是细度 0.08 毫米筛余量波动在 15~40% 之间, 但它在混凝土和砂浆中仍有一定的“粉煤灰效应”。在 GB 1596-79 中也注明: 对于不符合规定要求的非成品原状粉煤灰, 其技术指标可由供需双方经试验协商确定。因此虽是按质降级使用, 由于原状灰价格较低, 也是有实用意义的。

2. 磨细粉煤灰

用磨细来提高粉煤灰品位的理论基础, 早在五十年代就已奠定, 工程中也早已推广⁽³⁾。从全国范围的各种原状粉煤灰来看, 大部分粉煤灰细度 0.08 毫米筛余量不符 GB1596-79 的规定(不超过 8%), 烧失量也往往不符合规定(不超过 8%)。世界各国标准, 尽管对细度和烧失量的技术指标的规定并不雷同, 但是对“低碳、细灰”的质量要求都是一致明确的。上海磨细灰是推广北京市的先进经验, 同时也根据上海具体条件, 以杨树浦电厂粉煤灰为产品开发的试点。

上海磨细粉煤灰技术的重点并非在于“磨细”, 而是着眼于“益化”。上海一般粉煤灰的主要特征是玻璃微珠的含量不高(约占体积的 35~40%), 而形状不规则的多孔玻璃体较多, 其含量接近微珠, 有的甚至略多于微珠, 并且颗粒偏粗, 内含相当数量的粘连体, 这样的粉煤灰需水量就高, 不利于混凝土生产。磨细过程利用原有的 $\phi 1.5 \times 5.7$ 米小型球磨机, 两仓内研磨体全装钢段, 而总装载量比磨水泥时减少 2~2.5 吨。大家都知道, 这样研磨对绝大部分微珠是打不碎的。而且微珠外层是致密熔壳, 活性发挥较慢, 但微珠表面经过研磨后对界面水化反应的积极性是有利的。多孔玻璃体的结构松散, 容易碾碎, 碾细的碎屑要比原来粗粒密实。强度较弱的薄壁空心微珠也容易破碎成细小碎屑, 粘连体打散后则微珠得到解放, 使单个微珠的数量有所增加。因此用扫描电子显微镜可以观察到, 磨细粉煤灰与原状粉煤灰对比, 颗粒的形状、结构、级配、表面都起了很大的变化。试举一次显微镜实测结果为例, 磨细粉煤灰中小于 45 微米颗粒含量, 从原来的 47% 提高到 83%, 其中小于 10 微米颗粒从原来的 10% 以下, 提高到 30% 以上, 单个微珠增多, 多孔体都成碎屑。这样的变化, 导致粉煤灰的性质明显益化, 以致加强“粉煤灰效应”⁽⁴⁾⁽⁵⁾。此外, 证实磨细还对改善粉煤灰均匀性有利。试生产一个月内磨细粉煤灰质量波动范围测定结果是 0.08 毫米筛余为 3.0~4.8%, 烧失量为 6.1~7.2%, 这表明是有匀化效果的。均匀性的益化, 是不容忽视的。

3. 电收尘细灰和粗灰

上海杨树浦电厂为改善环境污染和积极支持综合利用, 从 1980 年开始在本地区最先装置静电收尘设备收集粉煤灰, 以后又将一些锅炉改装电收尘。现在闵行电厂、宝钢电厂都已有电收尘粉煤灰。杨树浦、闵行两电厂的电收尘效率可达 95%, 宝钢电厂效率更高。上海现有的电收尘装置是两个串联的电场, 一电场收集的粉煤灰较粗, 二电场较细。二电场粉煤灰约占粉煤灰总收集量的 15~25%, 这类粉煤灰现通称“二场灰”, 严格地说, 由静电收尘设备和

串联方式有不同的装置, 所谓“一场灰”、“二场灰”的命名在科学技术上应以电收尘“细灰”和“粗灰”代替为宜。

1980年初上海市开始研究开发电收尘细灰资源, 根据连续取样测试的结果, 部分细灰的细度尚未符合 GB1596-79 的要求, 且波动范围也较大。国外电厂的电收尘灰波动也得大。图 1、2 是国内外两个实例。图 1 所示英国某电厂电收尘粉煤灰细度波动情况, 但他们的收尘设备设有三电场和四电场, 应用于混凝土中的粉煤灰产品主要是均匀混合的三场灰和四场灰。图 2 表明上海某电厂一段时间内二场灰的波动情况, 现建议用质量控制的办法, 收集合格的二场灰, 提供在混凝土中试用。

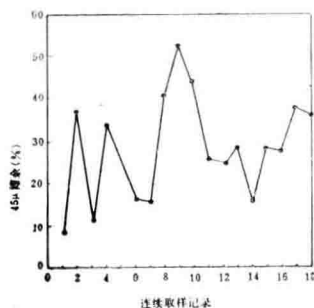


图 1 英国某电厂电收尘灰细度波动图

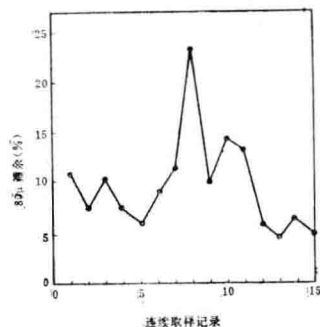


图 2 上海某电厂电收尘灰细度波动图

虽然上海的电收尘细灰有些施工部门已在一些混凝土工程中试用, 而正规产品尚在开发和进行试点工程阶段, 它正象沉灰池的细灰相似, 已经粗细分级, 但按照国外产品要求, 尚须经过匀化和精选。

上海对电收尘粗灰的应用尚无实践经验, 根据国外经验则对电收尘粗灰进行磨细, 仍适用于在水泥用混凝土中取代部分水泥。若将电收尘粗灰拌制砂浆取代部分砂子, 也是适用的。

4. 碳份问题

高碳份的粉煤灰通常只用作水泥原料, 可充分利用内含碳份, 以节约部份燃料。然而对混凝土来说, 粉煤灰中的碳份一向被认为是有害物质, 理由是碳份增多导致粉煤灰的活性成份比例降低、新拌混凝土需水量增加、硬化混凝土密度降低、还严重影响引气剂的掺量和混凝土外观的颜色。上海粉煤灰中的碳粒形状多半近似球形, 我们叫它“碳珠”, 粒径大都在45微米以上。这种多孔的“碳珠”平均比重只有1.55, 如以体积计算, 粉煤灰中碳份比值要比重量计算大得多。烧失量较高的粉煤灰, 它的净浆标准稠度需水量一般高达40~60%。但是“碳珠”很容易碾碎, 试验证明磨细粉煤灰中碾碎的碳屑有微填料作用。原来没有减水效果的粉煤灰磨细以后需水量降低, 并能产生一定的减水效果。这些情况也表明了在目前粉煤灰“脱碳”技术尚难解决之际, 磨细益化是比较现实的措施。

5. 活性问题

粉煤灰的活性研究至今还有发展, 但从实用来说, 多年沿用的化学方法: 石灰吸收法和

物理方法：消石灰砂浆强度试验法以及必要时采用的水泥砂浆强度试验法还都是有用的基本方法，各国的国家标准中一直还是采用这类方法。现在的工作尚未能对这些传统方法提出根本的改革。比如就石灰吸收法来说，按试验方法规定，过筛的通过 0.08 毫米筛的上海原状粉煤灰三十天石灰吸收值仅 34.25 毫克/克，磨细到通过 45 微米筛颗粒则可达 112.56 毫克/克，而在试验中还可以从石灰溶液中试样沉淀物的体积变化观察火山灰反应的过程。虽然石灰吸收法用作评定活性指标不够理想，试验的周期较长，操作也比较繁琐，可是能够用来观察粉煤灰在常温下的化学活性。即使是同一种粉煤灰也可以用这种方法进行化学活性效应的对比，例如原状灰和磨细灰的对比，电收尘细灰、粗灰和统灰的对比，沉灰池中不同部位粉煤灰的对比。并且也可以观察在提高温度或延长令期条件下对化学活性的影响。过去我们粉煤灰研究就曾采用了提高温度和延长令期的办法，从而得到了对粉煤灰化学活性效应比较明确的概念。近年我国 GB2847-81 规定采用火山灰性试验法，测定掺 30% 活性混合材料的水泥制成的混浊液养护 7 天或 14 天($40 \pm 2^\circ\text{C}$)后滤液中石灰量和总碱量，也就是测定这种混合材料能够吸收熟料水化析出的氢氧化钙的数量，当然这比传统的石灰吸收法有了改进，也是一种较好的测定化学活性的方法，但是众所周知，这些方法单是测定化学活性，总不如用强度试验法，能直接反映粉煤灰的对强度的贡献。因此 GB2847-81 还规定了“水泥胶砂 28 天抗压强度比试验方法”，用以评定活性混合材料的质量。至于 GB1596-79 所规定的粉煤灰与磨细标准砂对比的“抗压强度比”试验方法，比较适应粉煤灰的特点，但固定水灰比并不合理。又如，美国 1980 年新修订的 ASTM C 618-80 标准中规定火山灰活性指数测定方法则是改良的水泥或消石灰砂浆强度试验方法。因此对某种粉煤灰资源开发中采用这些传统的或改良的方法评定活性，既不复杂而且有一定可靠性。如果要更多地了解这种粉煤灰的活性效应，只须加上一些综合研究。但是对于粉煤灰在混凝土中的应用技术来说，不能单是测定活性，而是还须要充分运用粉煤灰活性效应和发挥粉煤灰特有的潜在活性效应。ASTM C 618-80 标准中明确指出，根据水泥或消石灰砂浆强度测定的火山灰活性指数都不能作为一种指标来衡量掺矿物质混合材料混凝土的抗压强度，任何一项工程的混合材料最佳掺量应由所需混凝土性能和其它混凝土组份所决定；还应考虑到粉煤灰与水泥的反应由于粉煤灰与水泥两者来源不同而是有较大变化的。

6. 省资源、省能源问题

对于在水泥和混凝土中应用粉煤灰省资源、省能源的效益，大家都已有一般概念，比如，应用一吨粉煤灰产品，可抵 0.6~0.8 吨水泥，可节约 1.05~1.75 吨石灰石和粘土矿物，节省包括燃料和电力两方面的总能耗 0.2~0.24 吨标准煤等等。这里还要提一下一般概念以外的若干问题。在国外，粉煤灰产品价格最高可达水泥价格的一半，应用时仍可取得较好的经济效益。在国内水泥是短线产品，能耗特高，以粉煤灰取代部分水泥，与大量发展“小水泥”相比，省资源、省能源的效益高得多了，可是目前把粉煤灰当作垃圾的处境不改变，产品不发展，效益就不能正确体现。与水泥相比，粉煤灰产品的能耗是很低的，按照上海的情况计算，以硅酸盐水泥的能耗为 100%，原状干粉的能耗则为 1.5%，原状湿灰烘干为 15%，磨细粉煤灰也只有 3~4%，精选电收尘细灰为 2~3%，磨细电收尘粗灰也是 3~4%。因此省能源的效益除湿灰烘干外，都有以一抵数十的效益。

四、关于粉煤灰水泥

粉煤灰在水泥工业中的应用五十年代在国外已经开发,当时,法国和日本较早地生产粉煤灰波特兰水泥,以后又将粉煤灰用作原料,配入生料,烧成波特兰水泥熟料。国内上海市在六十年代最先生产粉煤灰硅酸盐水泥。到现在只有法国的水泥工业较多地应用粉煤灰作为“次要组份”(Constituants Secondaires),生产各种复合水泥,如混合波特兰水泥(CPJ)、矿渣粉煤灰水泥(CLC)等,并用一部分粉煤灰作为波特兰水泥原料。在美国、西欧、日本等国家由于波特兰水泥独占市场,混合水泥发展比较缓慢,近年为节约能源,稍有转机。苏联和东欧国家比较重视生产混合水泥,但较多地应用粒化高炉矿渣,粉煤灰应用不多。我国水泥工业大量生产矿渣硅酸盐水泥,粉煤灰在水泥工业中的利用率还很低。因此不论国内外,粉煤灰要在水泥工业中扩大应用,尚须作出很大努力。

近年来,上海市由于高炉矿渣供不应求,电力部门又积极创造了供应干灰的条件,每年在水泥中的利用量现在增加到十万多吨,取得了很好的效果。以下几项应用技术,比较引人注意:

1. 两掺水泥

八十年代开始,上海水泥厂按照国标 GB1344-77 有关矿渣硅酸盐水泥的规定,生产矿渣掺量为 28%、粉煤灰掺量为 12% 的两掺水泥,标号为 425 号,是一项技术和经济效果都很良好的实用技术,特别能解决一些上海矿渣供应缺口问题。这种水泥实际上是熟料、矿渣、粉煤灰的三成分混合波特兰水泥,它可以做到改善单掺矿渣的矿渣硅酸盐水泥的性质。

作者认为根据上海水泥厂的经验,矿渣和粉煤灰掺量适当控制,标号控制在 425 以上,并进一步改进粉磨和混合工艺,这样的两掺水泥产品是值得在全国范围内推广的。这对现阶段我国改进矿渣硅酸盐水泥产品性能,提高粉煤灰在水泥工业中的利用率有重要意义。同时也解决了目前大家认为粉煤灰与高炉矿渣对比,总是相形见绌,在水泥工业中无法竞争的问题。

至于粉煤灰硅酸盐水泥,由于目前存在着粉煤灰掺量超过 30% 以上,不适宜用于钢筋混凝土工程的想法。这就要对掺 30% 以上的粉煤灰硅酸盐水泥的产品进一步研究,并须提高这样的产品的使用技术,以确保稳妥地在钢筋混凝土工程中应用。

2. 新品种粉煤灰水泥

近年来国内正在研究和试制几个粉煤灰水泥的新品种,如含硫铝酸钙、氟铝酸钙的粉煤灰硅酸盐水泥,低温合成粉煤灰水泥,粉煤灰砌筑水泥等,上海地区尚无大量的实际应用经验,在这次讲座中另有专题介绍。

但从国外最新趋向来看,水泥工业与混凝土工业联合发展很有前途,从而使粉煤灰出现了与此相适应的粉煤灰水泥的新品种和新技术。这样就可能把粉煤灰水泥生产和粉煤灰混凝土生产的长处合而为一,其技术和经济效果自然更是相得益彰了。

五、关于粉煤灰混凝土

关于粉煤灰在混凝土中的应用,从四十年代初开始美国在一些水利工程混凝土中积累了一定的施工经验。正式大规模应用是著名的饿马坝(Hungry Horse Dam)工程。这个工程应

用粉煤灰的经验，后来在欧美国家载入了混凝土技术的史册见(《混凝土历史的里程碑》⁽⁶⁾)，这里值得作一些简要的介绍。由美国垦务局建设的饿马坝位于蒙大拿州的凯里斯泊尔地区，1948年开工，至1953年建成，它的高度在美国最高的水坝中居第四位。饿马坝工程中共浇灌了236万多立方米的混凝土，几乎在所有部位的混凝土中都掺用了粉煤灰。所用粉煤灰是由铁路从二千公里外的支加哥运来的，每吨粉煤灰的价格在支加哥只收费1美元，送到现场共需化费18美元，而所用的Ⅱ型波特兰水泥当时的价格连运费只有每吨24.65美元。配制粉煤灰混凝土采用固定重量掺加法，即每立方米混凝土固定粉煤灰掺量为53.4公斤，如按混合胶凝材料重量百分比计，大坝内部混凝土中粉煤灰掺量为32.4%，外部混凝土中粉煤灰掺量为24.2%。整个工程总计使用粉煤灰13万吨，共节省造价167.5万美元。饿马坝工程中使用大量粉煤灰既解决了当时市场水泥供应紧张问题，又节约了一大笔建设资金，并且解决了大体积混凝土由于水化热所引起内部温度升高问题，这事实充分说明这般不远千里之外运来粉煤灰，收益还是相当大的。饿马坝建成以后，长期观察证明粉煤灰混凝土的质量至今是良好的。

今天估计世界上粉煤灰在混凝土中应用的累计数量已有上亿吨之多，尤其是在七十年代世界能源危机以后，在大量的实践经验基础上，许多国家加快了粉煤灰混凝土应用技术发展的步伐。现在发展中的粉煤灰混凝土技术简单地说三个特点，一是从研究水泥混合材料进而研究水泥—粉煤灰—集料凝聚体系，二是从研究粉煤灰的火山灰反应进而研究粉煤灰在混凝土中的综合作用，三是从研究粉煤灰在混凝土中的各种行为进而研究如何充分发挥粉煤灰在混凝土中的潜能。这些研究都与粉煤灰混凝土应用技术紧密结合，这里只是着重介绍近年在这方面取得成效的应用技术和大家关心的一些问题。

1. 粉煤灰的胶凝效率

首先把粉煤灰的火山灰活性的概念转化为在混凝土中效应的概念的是英国的I. A. 史密斯(Smith)在1967年提出的胶凝效率指数(K)⁽⁷⁾。所谓胶凝效率指数是指1公斤的粉煤灰在混凝土中能够取代多少公斤的水泥，这些概念与原来的粉煤灰活性的概念有所不同。

这个K值是由粉煤灰混凝土的实际强度和等效水灰比 $\left(\frac{W}{C+KF}\right)$ 的关系测定的，W是混凝土中的单位用水量，C是单位水泥用量，F是单位粉煤灰用量。对于不掺粉煤灰的基准混凝土来说，F=0，所以等效水灰比就是原来的水灰比。K值的实用意义是假设粉煤灰在混凝土中能够起如同水泥那样的胶凝材料的作用，不过在早期，甚至28天龄期，只能看作是一种低标号水泥，按照史密斯提出胶凝效率指数K的初期测定的结果，英国粉煤灰一般28天的K=0.25，即1公斤粉煤灰对混凝土28天强度的贡献只相当于0.25公斤所用的水泥，也即F公斤的粉煤灰可以当作KF公斤的水泥来使用。K值会随混凝土养护龄期增长而加大，到后期K值提高了，粉煤灰对强度的贡献也增加了。

粉煤灰胶凝效率指数K的概念，在一些欧洲国家和美国较早地应用，现在已经有所改进。国内也在研究适合我国具体情况的“粉煤灰效应”。

2. 粉煤灰的掺量和取代量

以往在混凝土中应用粉煤灰取代部分水泥总是按照等量(等重量或等体积)取代的办法，早期强度总是明显降低，甚至28天强度还是较低。过去国内外都习惯限制混凝土中粉煤灰

掺量,比如,不大于30%,因为等量取代30%以上,早期强度降低更为显著。按照“粉煤灰效应”这样的新概念,[也认为机械地等量取代是不合理的,掺量和取代量应当根据粉煤灰在混凝土中效应来决定;而在各种条件相同的情况下,粉煤灰掺量和取代量的变化,效应也相应地发生变化。

这里介绍一种比较实用,而概念又比较清楚的澳大利亚的方法。他们直接把粉煤灰在混凝土中的取代水泥量和掺量的比值称为有效利用系数(K_c),这一系数也能简单地反映“粉煤灰效应”的高低,如果 K_c 值高表明“粉煤灰效应”也高。 K_c 值的范围为0.2~0.95。实际上,粉煤灰掺量和取代量与效应之间关系,还要复杂得多,要受到混凝土工程所要求的强度、和易性、耐久性和经济性等因素的制约。这类方法实际上也是从较早的超量取代法的基础之上进一步发展起来的。原来对如何恰到好处的超量取代,往往只凭经验和试拌决定,缺乏理论依据,现在完全可以按照粉煤灰混凝土配合设计的原则,适当地变动混凝土中粉煤灰的掺量和对水泥和砂子的取代量,不但能够配制满足不同龄期强度的要求的混凝土以及改善混凝土的某些性质,而且可以扩大粉煤灰混凝土品种和标号的系列,而粉煤灰的掺量变动范围在国外可达15~80%,取代水泥量可达10~75%。

3. 粉煤灰对混凝土的贡献

粉煤灰混凝土与不掺粉煤灰的基准混凝土对比,给予人们的印象是虽能使混凝土的一些性质得到改善,而另一些性质受到损害;但是人们的心理却往往忽视性质得到改善的这一方面,而比较顾虑性质受到损害的那一方面。长期来认为粉煤灰混凝土的性质的缺点主要是早期强度低、弹性模量低、收缩性大、徐变大、抗冻性差、泌水性差、耐磨性差、抗碳(酸)化性差、保护钢筋性能差等等。毋庸讳言,以往确实有一些工程的粉煤灰混凝土工程发生过质量问题。不过由于近年粉煤灰混凝土应用技术的进展,粉煤灰混凝土性质的得失也有了很大的变化,因为今天的粉煤灰对混凝土能作的贡献要比往年大得多了。这归根结蒂也在于是否能够充分发挥“粉煤灰效应”。

粉煤灰所起的混凝土减水效用,正象使用化学减水剂那样会带来一系列的好处。即使有些粉煤灰减水效果不明显,但仍会有一定的改善混凝土性质的作用。可是,如果使用了增加水量的粉煤灰,当然也会引起一系列的害处。有时,只要在能满足工程要求的一定范围内,容许混凝土性质上作出一些牺牲。

先进的应用技术就是要使粉煤灰作为混凝土的一种新组分,尽量作出较大的贡献(见表3)。当然,粉煤灰对有些性质也不一定能作贡献,比如,对混凝土的抗冻性,只要粉煤灰的强度和含气量与基准混凝土相同,抗冻性也不会受到损失,但提高抗冻性而使用引气剂时,剂量就要有所增加,碳份越多,增加越多。

4. 粉煤灰混凝土性质的同级评价以及抗碳(酸)化和保护钢筋性能

普通混凝土通常以28天龄期为标准依据,但粉煤灰混凝土正常温度下28天龄期时的贡献,可以说方兴未艾,因而在这时进行对比,不免导致谬误的结论。因此说,除非指定粉煤灰混凝土的性质必须在给定的龄期达到与基准混凝土等同的水平,否则就应尽量利用粉煤灰混凝土后期的优势。现在的粉煤灰混凝土应用技术做到要在给定龄期与基准混凝土等效,并无多大的困难,但是毕竟还是应当权衡一下有无必要。

至于对粉煤灰混凝土性质的评价也应如此,就是粉煤灰混凝土与基准混凝土在必须确保

粉煤灰对改善混凝土性质的贡献

表 3

混凝土性质	粉 煤 灰 能 作 的 贡 献
密 实 度	提高密实度。可比基准混凝土提高 $20\text{kg}/\text{M}^3$, 在 20°C 、相对湿度 65% 空气中, 五年后, 又增加到 $30\text{kg}/\text{M}^3$ 。
抗 压 强 度	一般是早期强度较低, 2、3 个月龄期强度可超过基准混凝土, 但现在的粉煤灰混凝土应用技术的水平, 已经可以在冷天的施工现场, 配制与普通水泥混凝土三天强度等同, 甚至可以做到一天强度也不受影响。
最高抗压强度	可配制在标准养护条件下 28 天强度 600 号以上的粉煤灰混凝土。
抗 弯 强 度	粉煤灰对混凝土抗弯强度的贡献, 大于抗压强度, 这对抗裂性能有利。
弹 性 模 量	可做到略高于基准混凝土。
抗拉应变能力	出现裂缝时混凝土的应变值可比基准混凝土约降低 10% 。
徐 变	徐变可比基准混凝土降低。
收 缩 性	混凝土收缩性主要受到单位用水量的影响, 如果粉煤灰混凝土的用水量降低, 则能使收缩性也降低, 有的资料则认为前期降低, 后期相似。
抗剪强度、握裹强度、耐磨性	随粉煤灰混凝土强度提高而提高, 如与基准混凝土强度等同, 则不受影响。
热 膨 胀 性	由于粉煤灰混凝土减少水化温升, 热膨胀值低, 可避免裂缝危险。
泌水性和离折现象	可显著改善。
抗 渗 性	可显著加强。
碳化和钢筋锈蚀	可做到改善混凝土抗碳化能力、具有足够的对钢筋保护作用。
抗硫酸盐侵蚀	有显著效果。
抑制碱—集料反应	有效果。

的主要的性质上达到相同的等级, 然后再对其它某种性质作对比评价。这样对比的原则既是平等的, 而且又是实用的。

近年来国外由于现行的混凝土材料、工艺等不利于普通水泥混凝土耐久性, 已发生不少工程事故。于是利用粉煤灰对混凝土的贡献, 改善混凝土的耐久性已被确认是经济有效的措施之一。但在国内工程界中对于由碳(酸)化作用引起混凝土中性化以致钢筋钝化膜破坏, 易遭锈蚀问题, 比较重视。实际上对于普通水泥混凝土来说, 这个中性化问题在国内外都还没有确切的定论。现在尽管国外近年已有不少有关粉煤灰混凝土碳(酸)化和钢筋锈蚀的研究工作, 提出了: “粉煤灰效应”提高了混凝土的密实性, 粉煤灰混凝土的 PH 值的降低并不象想象那样严重以及“粉煤灰效应”生成的 C—S—H 凝胶也会与碳酸气起反应从而延缓碳酸气的扩散作用是有利的等等报告, 可是对国内的争议一时也难以平息。看来尚有一段长期的验证过程和认识过程。然而, 必须指出, 今天的粉煤灰混凝土应用技术已经能够做到, 保证不致削

弱粉煤灰混凝土保护钢筋的性能，目前在钢筋混凝土中只推广少掺量粉煤灰混凝土也是为了这一目的。国内有不少专家认为，从实用的观点来看，这并不是一个束手无策的难题，对于某些必须确保抗碳(酸)化性能和增强保护钢筋能力的混凝土，可以按照评价的基准，配制粉煤灰混凝土时将品位提高一级，适当降低水灰比，改善抗水、抗气渗透性质，技术上不难，经济上也可以做到合理，也很容易实施。当然，对于一般的钢筋混凝土，就完全没有必要这样做了，因为按照基准混凝土等效配合设计，对钢筋的保护作用不会有有多大差异。

5. 激发粉煤灰的潜效

粉煤灰这种材料的特点是它的能量藏而不露，过去对“粉煤灰效应”认识不足，潜效难以发挥，粉煤灰混凝土的特点是温度、湿度、化学激发、外加剂复合等环境和外界因素的作用对它的强度增长，很是敏感。因此，除了要适当选择混凝土材料的最佳配合以外，如再采取适当的激发粉煤灰潜效的措施，还可以取得意想不到的技术和经济效果。在这方面国内外也已经发展了不少行之有效的应用技术以及特殊用途和新品种的粉煤灰混凝土，这里就不赘述了。但是必须指出，不重视粉煤灰混凝土的应用技术，不但无法利用潜数，而且会导致混凝土的质量不能达到应有的水平。

六、结 语

当前，上海地区在水泥和混凝土中应用粉煤灰的主要目的是增产节约水泥，也有的为是节约石灰和砂子。这一项对国家建设和社会发展十分有利的技术措施，我们的工作做得还很浅近，鉴于上海市具备了较好的基础和条件，深信今后一定会在领导部门关怀和指导下能把各方面的力量紧密团结起来，从实际出发，开发资源、开发技术、开发智力，加速目前粉煤灰水泥和混凝土发展的步伐，再接再厉，努力作出新的贡献。

参 考 文 献

- [1] 沈旦申、吴鹏鸣，粉煤灰水泥混合材料的试验研究，《工程建设》，第四十期，1953。
- [2] Н. Г. Чукреев, Использование зол пылевидного топлива для крупноблочного строительства, 1959.
- [3] 《Transactions of 6th International Congress on Large Dams》Vol III, 1958.
- [4] 沈旦申、张荫济，磨细粉煤灰在水泥或混凝土生产中的应用，《粉煤灰在混凝土中的应用》国际学术会议论文集，英国利兹 1982。
- [5] 沈旦申、张荫济，粉煤灰效应的探讨，《硅酸盐学报》，第九卷第一期，1981。
- [6] 《Landmarks in the history of concrete》，Concrete Construction, Dec. 1981.
- [7] I. A. Smith, The Design of Fly Ash Concrete, Proc. of the Institution of Civil Engineers, April, 1967.

粉煤灰的来源

华东电力管理局环保处 周兴国

燃煤火力发电厂是以煤为燃料，在锅炉里燃烧产生蒸汽来推动汽轮发电机发电的。在发电的同时排出大量的煤灰、渣。现代大型电站锅炉并不直接燃用原煤，而是先将原煤磨成煤粉，再喷进锅炉中燃烧。因此，烧后的煤灰也极细，被称为“粉煤灰”或飞灰。这部分灰量约占总灰量的 85—90%，其余部分则粘结成较大的颗粒或块，从炉底排出，称为“炉下渣”。这二部分煤灰，通称“粉煤灰渣”。

粉煤灰是燃煤电厂的废渣，数量很大，处理不但化费巨大，而且往往污染环境。然而粉煤灰又是一种潜在的资源，具有多种用途。因此，粉煤灰的综合利用，变废为宝，就可兼收很高的经济效益和环境效益。对于资源缺乏的上海，意义更大。

对粉煤灰的综合利用，包括在建材工业和建筑工业上的应用，都与粉煤灰的理化特性、形态、供应方式有非常密切的关系，影响着利用产品的质量和成本。这一方面决定于煤种，另一方面也决定于电厂的生产过程，即燃烧、收尘、除灰和运输条件等。现分述如下，供使用单位参考。

一、煤种和煤灰的特性

粉煤灰的特性是综合利用时首先要掌握的资料，便于因材施教。大家知道，煤是由古代的植物形成的，由于形成年代和地质环境的不同，大致可分为无烟煤、贫煤、烟煤和褐煤。一般原煤除含炭和炭氢化合物外，还含有矿物性杂质——原生矿物质以及在开采时混入的土、石。因此煤灰的组份随着煤种的不同而有很大的差异。

1. 一般成分 上海电厂的燃煤锅炉都是按烧烟煤设计制造的，因此尽管上海电厂用煤靠全国各地（主要是北方）供应，基本上全是烟煤，这样，也就保证了粉煤灰组份的相对稳定，这对粉煤灰的综合利用很有利。上海电厂近年主要常用煤种和粉煤灰的化学成份如表 1、表 2 所示。

电厂锅炉燃烧温度很高，一般在 1450℃ 以上，如果煤灰熔点过低，容易造成炉膛结焦，严重威胁锅炉安全运行。因此一般要求灰的熔点 T_1 (变形) 不低于 1500℃。煤灰化学成份又与其熔点密切相关，煤灰中 SiO_2 及 Al_2O_3 含量越多，熔点也越高，而 Fe_2O_3 、 CaO 等则相反。所以，上海电厂的粉煤灰， SiO_2 及 Al_2O_3 的含量都在 70% 以上，有利于某些建材生产上的应用。

2. 放射性元素 粉煤灰中含有煤烧后留下的铀、钍等放射性物质，因为地壳中普遍含放射性物质，如岩石中的铀 (U_3O_8) 平均浓度为 1—2ppm，因此煤中也普遍存在，只是含量随煤的形成条件不同而有差异，一般都很低，少数和放射性矿物生成在一个地区的煤，可达相当高的品位。

有些科研单位曾对粉煤灰放射性物质作过测量，现摘抄如下见表3。

上海电厂主要常用煤种资料

表 1

煤种	一般分析（无水成分）			元素分析 （无水成份）	煤灰熔点℃		
	挥发物 %	固定炭 %	灰 份 %		T1 （变形）	T2 （软化）	T3 （流动）
				S _a %			
河南平顶山原煤	23.96	47.75	28.29	0.96	>1500		
山西临汾原煤	24.86	47.11	28.03	3.56	1500		
山西大同原煤	26.86	55.41	17.73	1.25	1460	1500	
河北开滦中煤	21.46	45.56	32.98	1.16	1500		
内蒙蒙石源原煤	21.75	45.41	32.84	1.04	>1500		
陕西蒲白原煤	15.43	57.21	27.36	2.55	1500		

上海粉煤灰主要化学成份 (%)

表 2

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量	SiO ₂ +Al ₂ O ₃
40-54	29-38	4-7	2-7	0.5-1.5	0.1-0.2	3-5	73-84

粉煤灰中放射性物质含量

表 3

试 样	铀 (ppm)	钍 (ppm)
山西十二个电厂	4.6—12.5	8.6—43
上海四个电厂	6.1—16.5	6.6—52.1

放射性物质能辐射各种射线照射人体，当照射强度超过一定剂量时，才对人体构成危害。根据“放射性防护规定”(GBJ8—74)：“含有天然放射性元素废物，比放射性大于 1×10^{-7} 居里/公斤者，应按放射性废物处理”。上海环保局曾对电厂粉煤灰作过抽查，没有超过这个标准。由于上海电厂用煤来自全国各地，煤种及产地经常有变化，应加强这方面的监测工作。

二、燃 烧 方 式

锅炉的类型很多，燃烧方式不一。上海电厂的燃煤锅炉，都是煤粉锅炉，所以，这里只谈煤粉锅炉的燃烧与粉煤灰特性的一些有关情况。

1. 粉煤灰的颗粒细度

在建材生产应用中，粉煤灰往往作为一种胶凝材料，越细活性越好。电厂在把原煤磨成