

混凝土现代技术丛书

粉 煤 灰 混 凝 土

沈旦申 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1989年 北京

混凝土现代技术丛书

粉 煤 灰 混 凝 土

沈旦申 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1989年 北京

内 容 简 介

粉煤灰是热电厂的废渣, 将其应用于混凝土中, 可节约大量水泥, 并可改善混凝土的性能。作者根据世界各国发表的有关文献, 结合自己三十余年的研究、生产经验, 总结出一套适合我国国情的应用粉煤灰的方法。本书共分十一章, 主要内容包括: 粉煤灰在混凝土中的应用情况, 粉煤灰的组成, 粉煤灰的物理性质, 粉煤灰在混凝土中的行为和作用, 粉煤灰效应, 粉煤灰混凝土的性能, 粉煤灰混凝土配合比设计, 粉煤灰混凝土制备工艺以及高效粉煤灰资源的开发技术, 高粉煤灰用量混凝土的应用技术, 高功能粉煤灰混凝土的制备技术等。

混凝土现代技术丛书

粉煤灰混凝土

沈旦申 编著

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 傅希刚 封面设计 安 宏

各地新华书店经售

北京顺义燕华营印刷厂印

开本: 787×1092mm 1/32 印张: 13.25 字数: 301 千

1989年2月第1版第1次印刷

印数: 1~3500 册 定价: 4.65元

序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料，广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界混凝土年产量已达60亿吨左右，不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进，形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土现代技术，分期分批出版专册（著）。近期内将陆续出版的有：

1. 新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》，《流态混凝土》，《三向应力混凝土》，《沸石岩为气体载体的多孔混凝土》，《粉煤灰混凝土》，《轻骨料混凝土》，《聚合物浸渍混凝土》，《高强度混凝土》，《防腐蚀混凝土》，《硫铝酸盐水泥混凝土的性质和应用》等，

2. 新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》，《真空混凝土工艺及设备》，《混凝土中钢筋腐蚀与防护》，《混凝土冬季施工》，《混凝土快速硬化》等。

3. 性能与测试技术方面

《混凝土力学性能与测定》，《混凝土强度综合法测试技术》等。

4. 应用理论方面

《混凝土材料科学》，《数理统计在混凝土试验中的应用》，《混凝土的徐变》，《混凝土的收缩》，《混凝土的耐久性》，《混凝土力学》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进步很快，混凝土工程数量庞大，混凝土构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还落后于发达的工业国家，因此，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国在混凝土科研与生产经验的积累，本丛书的选题范围将继续扩大；希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九八八年元月

编委会名单

顾问：黄蕴元

主任委员：吴中伟

副主任委员：姚明初

编委会委员（以姓氏笔划为序）：

冯乃谦	吴中伟	沈旦申	洪定海
姚明初	龚洛书	蒋家奋	甄永严
蔡正咏			

前 言

粉煤灰混凝土技术已有数十年的发展历史。由于水泥混凝土技术已经给世人留下粗技术和低水平的印象，因此，多年来对掺加工业废渣粉煤灰的混凝土就更不屑一顾了。随着时代的进展，近年间，国内外许多学者和专家纷纷致力于粉煤灰混凝土技术的研究和开发。到了80年代，终于使粉煤灰成为现代混凝土基本材料中的珍品，一些有关粉煤灰混凝土的新概念和新观点也就应运而生。可是，随之也出现了一些新问题，主要是由于各国发展粉煤灰混凝土新技术的背景、条件和水平不同，“百川汇集”，难免发生“混流”现象，需要澄清和察辨。特别是对国内广大混凝土工作者来说，即使有几篇粉煤灰混凝土的“技术发展水平综述”可供参考，也还是不能解决“学以致用”的问题。作者虽然从50年代初期开始，就从事粉煤灰在水泥和混凝土中应用的研究和开发等学术活动，为此奔波了三十余载，可是面对一大堆有关粉煤灰混凝土科学技术的文献，也曾感到茫茫然无所适从。

目前，我国为实现四个现代化正进行着大规模的工程建设，按理说，粉煤灰混凝土应当大有用武之地，而实际情况是：在“六五”计划期间，国内粉煤灰混凝土新技术的发展，虽然已经有了一个良好的开端，但是目前尚处于试点推广阶段，进展的步伐还是跟不上建设的需要。究其原因，就技术上来说，主要是一些工程技术人员还受着传统的“粗技术、低水平”看法的影响，有少数人甚至认为，推广粉煤灰混凝土只不过是少数科研人员出于对所从事的学术领域的偏

目 录

第一章 绪论	1
第一节 粉煤灰混凝土技术的历史渊源	1
第二节 从火山灰到粉煤灰的应用	2
第三节 现代粉煤灰混凝土技术进步的背景	7
第四节 推广粉煤灰混凝土的社会、技术和 经济效果	12
第五节 我国粉煤灰混凝土技术发展概况	18
第二章 当代灰渣及其利用概况	23
第一节 世界各国灰渣产量和利用问题	23
第二节 世界粉煤灰利用概况	29
第三节 我国粉煤灰资源及其在 混凝土中的应用	32
第三章 粉煤灰的来源、集运和制备	38
第一节 粉煤灰的来源	38
第二节 粉煤灰的收集和排放	43
第三节 灰渣的贮存	48
第四节 粉煤灰的运输	50
第五节 粉煤灰的制备	51
第四章 粉煤灰的组成及其成分要求	55
第一节 粉煤灰的化学成分	56
第二节 粉煤灰的矿物组成	64
第三节 粉煤灰的颗粒组成	68
第五章 粉煤灰的物理性质和特征研究	89
第一节 粉煤灰的物理性质及品质指标	90

第二节	粉煤灰的特征研究和分类	105
第三节	粉煤灰对环境的危害	111
第六章	粉煤灰在混凝土中的行为和作用	120
第一节	粉煤灰的活性行为和胶凝作用	121
第二节	粉煤灰的需水行为和减水作用	128
第三节	粉煤灰的充填行为和致密作用	131
第四节	粉煤灰的稳定行为和益化作用	134
第五节	国产粉煤灰主导行为的特点	133
第六节	保证粉煤灰有效行为和作用的简易措施	144
第七章	粉煤灰效应	149
第一节	粉煤灰基本效应和效率	149
第二节	粉煤灰强度效应和效率	155
第三节	粉煤灰和易性效应和效率	165
第四节	粉煤灰耐久性效应和效率	175
第八章	粉煤灰混凝土的性能	192
第一节	新拌粉煤灰混凝土的性能	192
第二节	硬化中粉煤灰混凝土的性能	198
第三节	硬化粉煤灰混凝土的力学性能和 变形性能	202
第四节	粉煤灰混凝土的耐久性	212
第五节	粉煤灰混凝土的真实性能	240
第九章	粉煤灰混凝土的配合比设计	251
第一节	早期的矿物质粉料混凝土的配合比 设计法	252
第二节	粉煤灰混凝土配合比设计原理的发展	256
第三节	理性法的原则和步骤	277
第四节	按经济原则(最佳化)的粉煤灰混凝土 配合比设计	288

第五节	粉煤灰混凝土简易配合比设计法	296
第六节	粉煤灰混凝土配合比设计方法评述	314
第十章	粉煤灰混凝土制备工艺	327
第一节	粉煤灰硅酸盐水泥制备工艺及预混合 技术	327
第二节	粉煤灰混凝土的制备和施工	333
第三节	预拌粉煤灰混凝土(商品混凝土)的 生产	342
第四节	泵送粉煤灰混凝土技术	348
第五节	粉煤灰混凝土预制品的生产	354
第六节	大体积粉煤灰混凝土的施工	360
第十一章	粉煤灰混凝土技术发展的若干趋向	369
第一节	高效应粉煤灰资源开发技术	369
第二节	高粉煤灰用量混凝土的应用技术	378
第三节	高功能粉煤灰混凝土的制备	398
第四节	粉煤灰与混凝土组分的效应配伍	406
后 记		412

第一章 绪 论

粉煤灰是从烧煤粉的锅炉烟气中收集的粉状灰粒，国外把它叫做“飞灰”或者“磨细燃料灰”。凡是掺有粉煤灰的混凝土，都可叫做“粉煤灰混凝土”。

近年间，粉煤灰混凝土技术越来越引起国内外工程界的瞩目，因为它是在现代混凝土技术的新潮流中发展起来的一种经济的改性的混凝土。它不仅可以与普通混凝土并存，而且还可以扩展到特种混凝土的范围。

如以工业锅炉改进为煤粉炉，发现粉煤灰火山灰性质的年代算起^[1,2]，粉煤灰混凝土技术进步相当缓慢。直到本世纪70年代，能源危机、环境污染以及矿物资源枯竭等问题的发现才强烈地激发了粉煤灰混凝土新技术的研究和开发。到今天，粉煤灰混凝土技术已是构成现代混凝土技术的重要支柱之一。试看国内外近年所发表的数量惊人的有关文献资料和连年举行学术交流，就可以充分说明，人们正对这项技术拭目相看。

第一节 粉煤灰混凝土技术的历史渊源

有些学者一提起粉煤灰混凝土，总要追溯到2000多年前的罗马混凝土，其目的是要论证粉煤灰是一种人工火山灰。大多数的文献是按胶凝材料发展的历史来研究火山灰混凝土的，终于作出了如下的结论：归根结蒂是取决于混凝土的均匀拌和以及充分捣实^[3]。试看欧洲的输水故道、君士坦丁的巴西利卡会堂建筑、罗马的万神殿以及那不勒斯等地海岸上

的罗马混凝土工程，尽管有的已被海浪磨光了表面，有的长满了青苔，而混凝土却仍能保持完好。这些实例为混凝土耐久性研究留下了历史的遗产^[3]。著名古代建筑师威特鲁维斯（Vitruvius）指出，火山灰是一种奇异的材料。瑞典的R. 马林诺夫斯基（Malinowski）对古代砂浆和混凝土性能坚持了近三十年的研究，他发现这些现存的地中海地区的砂浆和混凝土的耐久性比在同一构筑物中的天然石料或烧制的粘土砖更经得起考验；在有的情况下，其耐久性甚至比暴露在相似环境中的用现代硅酸盐水泥浇筑的混凝土的耐久性还要好^[4,5]。他的现场观察还表明，在数百米长的石灰火山灰混凝土墙体上，几乎找不到一条裂缝。他在研究工作中还发现了罗马混凝土技术的一些特点，如截断毛细孔的措施，有机物质外加剂的复合使用等，正是现代混凝土技术中提高耐久性的一些有效措施。由此可见，罗马混凝土和粉煤灰混凝土之间的历史渊源，并非只有火山灰质胶凝材料的联系，还有混凝土技术方面的重要因素。

马林诺夫斯基的研究结论认为，古代工匠尽管无法对罗马混凝土的原理作出科学的解释，可是他们凭借长期积累的经验 and 知识，创造了罗马文化的奇迹。

这类研究说明，在罗马混凝土技术的历史渊源里所作的“古史钩沉”，进一步解释了火山灰物质在混凝土中的作用，也进一步揭示了失传已久的所谓古代混凝土技术的秘密和诀窍。现代粉煤灰混凝土技术还是可以从罗马混凝土中，获得不少有益的经验，受到一定的启发。

第二节 从火山灰到粉煤灰的应用

人们根据优质天然火山灰的产地是那不勒斯附近的波佐利，将火山灰命名为“波佐拉那”。明代徐光启留下的关于

西方国家工程技术的著作中，已经提到了波佐拉那在工程中的应用^[6]。在国外，把“波佐拉那”或者“波佐琅”，作为广义的火山灰材料总称，它既包括天然火山灰，也包括人工火山灰。现有的商品粉煤灰，便有直接叫做波佐琅的。

近代火山灰应用技术的研究是从18世纪中叶，英国的J. 斯梅顿（Smeaton）用石灰火山灰砂浆修筑爱迪司顿灯塔开始的。爱迪司顿海滨终年遭受海浪的袭击，环境条件恶劣。斯梅顿从英国境内古代罗马混凝土建筑遗迹上得到启发，就应用石灰火山灰砂浆修筑了这座灯塔。意外成功地修建成耐海水侵蚀的灯塔工程，唤起了后来的学者们对水硬性胶凝材料的深入探索，终于导致在数十年之后出现了波特兰水泥（硅酸盐水泥）^[9]。所以，为了纪念斯梅顿的贡献，在西方的一些水泥著作的扉页里，都印上屹立在风浪中的爱迪司顿灯塔的画面。可是，还应当指出，斯梅顿打算发扬罗马混凝土技术的原意却没有引起后人的注意，只被当作一类有很大局限性的地方材料。

进入20世纪以后，世界上混凝土大坝工程建设项目逐渐增多。根据30年代召开的第二届国际大坝会议的资料^[7]介绍，当时美国垦务局研制大体积混凝土必需的特种水泥，实际上就是今天的火山灰质硅酸盐水泥，也就是在普通水泥中掺加各种火山灰材料。大量试验研究证明，这类水泥能够减少水化热，降低混凝土内部的温升，并且还有改善和易性等优点。

可是，在美国的实际工程中，只有1938年完工的玻尼维尔坝才使用了在水泥厂中特地制造的这类特种水泥，而在其它一些混凝土大坝工程中，都不再经过水泥厂加工而直接将火山灰材料加入混凝土搅拌机内。采用这样的混凝土工艺，按当时的技术水平来说，还是相当大胆的。从此开拓了在混

凝土中掺加火山灰材料的应用技术。

当粉煤灰问世以后，世界上工业界有识之士就提出了利用粉煤灰的建议，其中包括美国的著名发明家爱迪生，他也曾呼吁把粉煤灰作为一种产品，在工业中推广应用。美国电力部门对粉煤灰在混凝土中应用的研究在1932年以前就已开始，但是系统的工作是由美国伯克利加州大学理工学院的 R. E. 戴维斯(Davis)于1933年开始的，起初他致力于混凝土和砂浆中掺加粉煤灰初期研究，1935~1940年他接受美国电力公司的委托，才进行了比较完整的试验研究，在此期间他与合作者陆续发表了国际上首批关于粉煤灰混凝土的研究报告^[2, 8]，以后又主编了最初的ASTM粉煤灰标准，为粉煤灰在美国混凝土中的应用，提供了相当完善的技术依据。由于戴维斯对粉煤灰混凝土等技术的发展作出过重要贡献，因此故世后美国学术界举行纪念活动时，总是强调指出，他生前主张的混凝土技术问题须靠混凝土技术来解决。今天，这个主张被誉为“戴维斯传统”^[9]。40代中期，美国垦务局等工程部门，通过不少水坝工程混凝土中掺加粉煤灰的成功试点，终于决定在蒙大拿州的俄马坝这一大型工程中，大规模应用粉煤灰^[10]。俄马坝拱高171.9m，底部厚97.54m，长644.65m，1948年动工至1953年完成，共浇灌混凝土236万余立方米，几乎在所有部位的混凝土中都掺加了粉煤灰。粉煤灰用量采用固定重量法，即不论内部或外部混凝土，粉煤灰用量都是 $53.4\text{kg}/\text{m}^3$ ；如按占混合胶凝材料总重量百分数计，在内部混凝土中粉煤灰掺量为32.4%，在外部混凝土中则为24.2%。整个俄马坝工程共掺用了粉煤灰约13万吨。由于附近没有适用的粉煤灰资源，于是全部采购芝加哥粉煤灰，产地价格为1美元/t，经过近2000km的铁路运输，粉煤灰成本增至18美元/t，而工程中所用的Ⅱ型波特兰水泥当时运到现场的价格

为24.65美元/t。该工程应用粉煤灰取代部分水泥*,除解决了水泥供应缺口问题外,还节省造价167.5万美元。实践证明,应用粉煤灰与应用最优质的天然火山灰相比,其功能上并不逊色。竣工后,垦务局对工程质量进行了定期观察,结果表明,粉煤灰混凝土至今保持良好状态。因此,欧美国家有关文献,将俄马坝工程中粉煤灰的应用列为粉煤灰混凝土技术发展史中的第一块里程碑^[11]。

50年代,因发展能源工业的需要,世界范围内火力发电工程建设增多,粉煤灰产量也随着增多;水力发电也得到了很大发展,世界各地的混凝土大坝工程建设,也使粉煤灰有了大宗利用的出路。粉煤灰在大体积混凝土中应用得到普遍推广,比如美国的陆军工程兵团、田纳西州水利工程管理局等重要的工程部门,也开始在大型混凝土水利工程中积极采用粉煤灰;英国、法国、联邦德国、苏联、波兰、日本、印度等国都结合粉煤灰资源的开发,在水利工程中应用了粉煤灰混凝土。特别是在有些国家里,火电和水电建设同属一个能源部门领导,用自产的粉煤灰,营建自己系统的大坝,经济效果就会显得更加优越。据第六届和第八届国际大坝会议^[12,13]等资料介绍,日本国内从1953年至1968年共计建筑27座粉煤灰混凝土水坝,取得了很大的经济效益。

50和60年代,粉煤灰混凝土经历了广泛的实用阶段,专家们发表了不少有关粉煤灰性能和对混凝土影响的著作,其中有些被学术界认为是继戴维斯之后的重要文献,到今天仍有其一定的实用意义^[14,15,16]。虽然这些都属于早期的粉煤灰混凝土技术,但是从中还是可以发现以下一些特点:

* 习惯上,美国水泥用量以每立方码混凝土用多少袋水泥计,内部混凝土用2袋水泥,外部用3袋水泥,每袋水泥重94英磅,粉煤灰掺量固定为每立方码90英磅。

1. 首先是对粉煤灰性质的认识逐渐深化。从大量试验数据中发现,粉煤灰不但不是低活性的火山灰材料,反而是一种出类拔萃的火山灰材料。大坝混凝土中应用粉煤灰,可以有效地减少混凝土单位用水量,降低混凝土硬化初期由于水泥水化热而引起的温升,减少干缩,改善和易性,增加后期强度和抗渗性、抗硫酸盐性能,其效果可超越传统的火山灰材料。

2. 在理论上受到火山灰质硅酸盐水泥类“两成分水泥”的支配,有不少人致力于研究粉煤灰的潜在活性以及粉煤灰水泥的水化过程。这为缺乏天然火山灰资源地区,提供了制造优质的两成分水泥的基本条件。有些国家如法国、日本等在此期间开始生产粉煤灰波特兰水泥,其中法国的水泥标准正式容许于波特兰水泥中掺入粉煤灰,甚至容许掺入粒化高炉矿渣和粉煤灰来制造三成分的水泥,而对粉煤灰等混合材料,则称之为“第二组分”。对此种水泥的评价认为,它是法国水泥工业的转折点。

3. 在混凝土中直接掺加粉煤灰的大规模工程实践证明,在搅拌机中掺入粉煤灰的效果,并不比采用粉煤灰水泥逊色,因此不一定必须使用水泥厂中掺好的混合水泥。这样做,由于减少了运输、加工等中间环节,经济上就比较合理。然而更为重要的是提高了混凝土技术的水平,这一点前面已经指出。不论是古代罗马混凝土,还是斯梅顿改良的石灰火山灰砂浆,在使用时,都必须从改进混凝土技术出发,采取相适应的有效措施,以保证混凝土的质量。推广粉煤灰的过程中,也出现过一些混凝土质量事故,其原因也往往是由于没有采取那些必要的混凝土技术措施。在这期间,虽然还不能明确提出粉煤灰混凝土技术革新的关键,可是许多改革的意识已在酝酿和形成之中。

4. 粉煤灰的资源开发和混凝土生产的发展 在一些先进的工业国家中都已经进入商品化阶段,应用领先于科学技术的研究,并且反过来促进科学技术的研究。尤其是在使用中发现粉煤灰在一些条件下,可以赋予混凝土过去所不能想象的优良性能,而粉煤灰混凝土所暴露出来的一些弱点和缺点,通过科学技术研究是可能解决的,更多的问题尚须依靠混凝土技术进步来解决。因此,从那时开始,在许多国家中,都有不少混凝土专家投入了粉煤灰混凝土新技术的研究和开发工作。当时的重点是结合城市建设的需要,发展位于地下的给排水工程的混凝土中掺加粉煤灰的应用技术。比如美国芝加哥,很早就规定,该地区所有给排水工程的混凝土中,都应掺入粉煤灰,因而使外掺粉煤灰混凝土所占的比例,达混凝土总量的80%。

在本节中之所以让我们追溯一下从火山灰到粉煤灰的历史长河,主要是试图说明两个问题,第一是两者之间可认为是一脉相传,第二是粉煤灰在长河的下游已经形成了一条广阔的支流。1980年召开的第七届国际水泥化学会议上,关于火山灰和粉煤灰论文的主报告^[17]强调指出,过去粉煤灰号称为“人造火山灰”,就是为了缓和世人对粉煤灰的猜疑。如今,大家都认为粉煤灰可以成为一种优质的有特色的原材料,那么这个“古为今用”的“大号”似乎可以结束它的使命了。特别值得一提的是,粉煤灰既然已成为混凝土的基本材料之一,那么我们就象研究和应用水泥那样,去研究和应用粉煤灰这种别具一格的新资源和新材料。

第三节 现代粉煤灰混凝土技术进步的背景

粉煤灰问题影响到能源工业的发展,而且通过实践又证明,合理利用粉煤灰资源,还能节省能源,这对一些视能源为