

粉煤灰的试验研究 及其工程应用

(英) R.K. 德海尔著
陈义初译 阎育恒校

人民交通出版社

86.16892

4290830

粉煤灰的试验研究及其 工程应用

Fenmeihui De Shiyan Yanjiu Ji
Qi Gongcheng Yingyong

[英] R.K. 德海尔 著

陈义初 译 阎育恒 校

人民交通出版社

(京)新登字091字

**Chapter VII Pulverised Fuel Ash
Cement Replacement Materials
Concrete Technology and Design, Vol. 3**

Ravindra K. Dhir

Surrey University Press, London, 1986

粉煤灰的试验研究及其工程应用

[英] R.K. 德海尔 著

陈义初 译 阎育恒 校

人民交通出版社出版发行

(100013北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京市燕山联营印刷厂印刷

开本: 850×1168 $\frac{1}{32}$; 印张: 2.875 字数: 67千

1992年1月 第1版

1992年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001-2000册 定价: 1.50元

ISBN 7-114-01272-1

TU · 00022

前 言

近几年,由于地球环境的日益恶化,在世界各国已掀起了人类自身抗争的环保浪潮,不论是在工业发达的国家,还是在第三世界,环境保护工作都纳入了国家政府的议事日程。对于人类来说,环境问题是一个生存问题,不是一个选择问题。目前,我国面临着十大生态问题,其中之一就是大气污染严重,酸雨态势扩大,废渣排放量增加,仅我国由于环境污染造成明显危害的农田面积已达1亿亩,每年全国损失粮食约1000万t,经济损失约100亿元,这一问题已引起我国各级政府的高度重视。

近几年来,我国能源工业稳步发展,“七五”期间全国新增原煤开采能力达6315万t,为“六五”期间的近3倍;火电在整个“七五”期间新增发电能力4187万kW,与“六五”期间相比增长了一倍,年增长率约7.3%,由于煤炭和火电工业的迅速发展,相应引起粉煤灰排放量的同步增加。1986年我国粉煤灰排放量为4288万t,1988年达6399万t,1990年达8000万t,预测2000年将达到1.2亿—1.5亿t。粉煤灰排放量增加的速度相当惊人。粉煤灰的排放不仅占用土地资源,造成资金浪费,更重要的是造成严重的大气污染、土壤污染和水资源的污染,危害人类的健康。

我国50年代开始粉煤灰综合开发利用的研究,前后经历了30多年的时间,利用水平还较低,尤其是近几年,我国火电工业成倍地增长,粉煤灰的排放量与粉煤灰的利用量之间的差距日益扩大,粉煤灰这个“包袱”在不远的将来,将会制约我国电力工业的发展,因此,粉煤灰的综合利用是社会发展的需要,是人类生存的需要,势在必行。

由英国Surrey大学出版社1986年出版的《混凝土工艺与设计》

丛书第3卷《水泥代用材料》第7篇“粉煤灰”是一篇综述性的文章，反映了世界范围特别是英美对粉煤灰的应用及试验研究进展，从基础理论、成分分析、各种成分对水泥的影响，各国标准等方面进行阐述，对于加强粉煤灰的研究、应用，特别是理论的指导具有一定的意义。但由于篇幅有限，对有些问题未作深入阐述，但作者附有详细的参考文献附录，可供有兴趣的读者作深入研究时检索使用，故也将其全部录出。

本文译者从事粉煤灰综合利用的科研、生产的组织领导工作，在工作中也深感此方面资料的缺乏，故推荐给读者，“他山之石，可以攻玉”，希望此书能为我国粉煤灰的综合利用事业提供一些帮助。

河南省科学技术委员会主任 许广光

译 者 的 话

本书译自英国萨里大学出版社1986年出版的《混凝土技术与设计》丛书第3卷《水泥代用材料》一书中第7章‘粉煤灰’。本书综述地介绍了粉煤灰的试验、研究及其在混凝土中的应用，为了避免同一出版社书名上的重复，在这个中译本中将书名改为《粉煤灰的试验研究及其工程应用》。

通过本书，读者可以看到，将粉煤灰掺入混凝土拌合料中，不但可以代替一部分水泥，而且在一系列方面都改善和提高了混凝土的工程性能。只要在选料、确定配比、养护条件等方面遵循一定的规则，则所制成的粉煤灰混凝土可以提高强度，降低徐变，降低干燥收缩率，减少渗透性，改善混凝土对硫酸盐侵蚀的抵抗力，减弱或消除碱—氧化硅反应，提高混凝土制品的修整性。因而，在一些方面，采用粉煤灰混凝土是特别适合的。例如，在建造水坝等大体积混凝土建筑物时，可以避免温升过高，减少渗透性，抗硫酸盐侵蚀；用于制造混凝土砌块时，可以减少干燥收缩，提高表面平整性；用于制造混凝土管道时，可以便于脱模，减少细裂纹的发展等等。由此看来，粉煤灰在混凝土中所起的作用，在某些情况下已经不仅仅是一种代用材料了。

粉煤灰是一种工业废弃物，世界各国对粉煤灰综合利用、变废为利的工作，都很重视。在诸多综合利用途径之中，用于混凝土的生产可以说是最能大量地消耗粉煤灰，最能大量地节省建材、节约能源的一条途径。

中国是一个电力生产及建材生产的大国。预计本世纪末，全国电厂每年排灰量将达1.2亿至1.5亿t。若以其10%用于混凝土，则可节省水泥1200万t以上。这是一个多么可观的数字啊！加强

科研并推广生产粉煤灰混凝土的技术，在我国是十分需要、十分迫切的事。

本书较系统地介绍了粉煤灰用于生产混凝土的理论根据，介绍了确定粉煤灰掺入比例的计算方法，概要地介绍了国外粉煤灰混凝土的应用情况。书后并附有大量参考文献。本书作者认为，目前世界上阻碍粉煤灰混凝土应用推广的，固然有某些技术上的困难问题，但可以通过试验研究加以解决，更主要的还是人们头脑中的保守思想。我们诚挚地期望，这本小册子的译出，对于促进我国粉煤灰混凝土技术的研究及应用推广，能够起到一点微薄的作用。

译者识 1991年6月

目 录

前言	1
译者的话	1
提要	1
1. 引言	2
2. 粉煤灰的产生	4
3. 粉煤灰的类型	5
4. 粉煤灰的特征	6
4.1 成分	6
4.2 物理性质	8
4.2.1 形态学	8
4.2.2 细度	10
4.2.3 密度	11
4.2.4 颜色	11
5. 粉煤灰的规格及其含义	11
5.1 烧失量	11
5.2 SO_3 含量	11
5.3 MgO 含量	13
5.4 碱金属含量	13
5.5 主要的氧化物	14
5.6 含水量	14
5.7 需水量	16
5.8 凝硬活性指数	18
5.9 细度	20
6. 粉煤灰对新浇混凝土的影响	21
7. 粉煤灰对于水化作用中的混凝土的影响	24

8. 往混凝土中掺加粉煤灰的比例	27
8.1 掺入粉煤灰的方法	28
8.1.1 置换法	29
8.1.2 设计法	29
9. 含粉煤灰混凝土的工程性能	34
9.1 强度	35
9.2 弹性模量	38
9.3 徐变	40
9.4 干燥收缩	41
9.5 热膨胀	42
10. 耐久性	43
10.1 渗透性	43
10.2 硫酸盐侵蚀	45
10.3 碱-骨料反应	46
10.4 对钢筋的腐蚀	47
10.5 霜冻侵蚀	50
10.6 磨损	52
10.7 抗海水侵蚀	53
11. 一些实用的考虑	53
11.1 储存	53
11.2 粉煤灰混凝土的生产及操作	54
11.3 模板	55
11.4 养护	55
12. 具体应用	56
12.1 大体积混凝土	56
12.2 混凝土预制件	56
12.3 混凝土管道	57
12.4 路面混凝土	58
12.5 压路机滚压混凝土	58
13. 最新发展	58
13.1 添加超级增塑剂的粉煤灰混凝土	58
13.2 钢纤维粉煤灰混凝土	59

13.3 结构性粉煤灰混凝土构件	59
14. 结论	60
参考文献	62

提 要

通常更普遍地被称为飞灰的粉煤灰是在发电时燃烧已被磨得很细的煤粉所产生的渣滓。它除了具有众所周知的凝硬特性外,它的形态学的、物理和化学的特性使它能够有效地被用作混凝土中部分硅酸盐水泥的代用品并满足严格的规范要求。这种观点正在被越来越多的人所接受,从世界范围内不断改变着的国家标准,就可以明显地看到这一点。

对含有粉煤灰的混凝土,有很多确定其配比的方式。用等量的粉煤灰直接取代水泥的方法特别适用于浇筑大体积混凝土,因为在浇筑大体积混凝土时,其主要目标是把温升降低到最小,从而有助于减小热开裂的风险。当掺入粉煤灰来浇筑结构性混凝土并按照通常的规定符合所要求的和易性(坍落度)及28天标准养护强度时,一般来说,在施工现场浇成的粉煤灰混凝土其工程性能及耐久性与无粉煤灰混凝土相当。实际上,如果延长湿养护的时间,粉煤灰混凝土甚至能比相应的硅酸盐水泥混凝土的性能更好,因为对于粉煤灰混凝土来说,其凝硬反应能持续更长一段时间。

在某些特定的耐久性问题上,例如在抗御硫酸盐侵蚀及碱—氧化硅反应等方面,粉煤灰具有特殊的优越性。在经过恰当设计的混凝土拌合物中,使用粉煤灰同样还有助于浇灌出更均匀,更压密的混凝土,并且混凝土表面的修整性更好,而所有这一切都有助于降低粉煤灰混凝土的渗透性。

从技术上说,粉煤灰能够用在各种类型的混凝土上,包括泵输混凝土、高强混凝土、预制混凝土砌块、预制结构性混凝土构件及混凝土管道;最近,粉煤灰已经成为在修筑水坝及路面时使

用压路机的压实混凝土的最主要的成分。不过,在使用粉煤灰时,决定性的因素往往是经济方面的考虑,而使用粉煤灰的经济性则随国家的市场价格而变化。

1. 引言

1914年6月11日美国《工程新闻》报告了首次对粉煤灰进行研究的结果,并揭示出煤灰中的氧化物组成与天然火山灰具有惊人的相似之点。这一发现立即就引起了这样的考虑:当煤灰与石灰混合时,它是否具有水硬性粘接性能;如果它具有水硬性粘接性能的话,那末,由于它价格低廉且来源广泛,它在修造房屋及路基方面将大有用武之地。然而,进一步对煤灰/石灰混合物所进行的试验却未能验证所期望的煤灰的活性。试验所得的结论是:很高的炉温及骤然的冷却是使这一含硅材料获得凝硬性或水硬性等性能的必要条件。这一观察结论,对于理解现代采用的在很高温度下燃烧粉煤所获得粉煤灰的性能,具有很大的科学重要性。

虽然早在1930年代粉煤已开始使用,产生了飞灰这个词,并对飞灰的性质进行了研究^{2,3},但直到1937年,当戴维斯等人⁴发表了他们的关于将飞灰用于混凝土的最全面的、影响深远的研究结果后,在美国才开始了飞灰混凝土的新纪元。这些研究论文指出:如果把粉煤灰和硅酸盐水泥〔硅酸盐水泥在水化反应时释放出氢氧化钙,即 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 〕一起用在混凝土中时,粉煤灰就不再是一种废物,已经变成一种具有很高价值的有用的副产物了。戴维斯等人还对如何在混凝土中使用粉煤灰规定了一些准则。这些研究成果已被广泛证实,并被认为是世界范围内粉煤灰利用的许多标准、规范提供了根据。粉煤灰用在混凝土中的头一个重要的实际应用是在美国建造的亨格利·赫斯水坝,其试验数据已在1948年发表⁵。

在此以后,由于将粉煤灰用于混凝土能获得直接的经济效

益，又由于人们对环境保护及节约能源的需要增进了了解，使得世界范围都把注意力集中于粉煤灰在混凝土中的应用。随着粉煤灰产生量的增加，对它的处理变得越来越困难，并且越来越昂贵，对这一方面的探索研究工作也就有了进展。对利用粉煤灰问题兴趣的增加，表现在大量发表了有关论文⁶⁻⁹，从1980年起就这一课题，举行了多次国际会议¹⁰⁻¹⁷，以及国际上采用了许多标准¹⁸⁻²⁷。

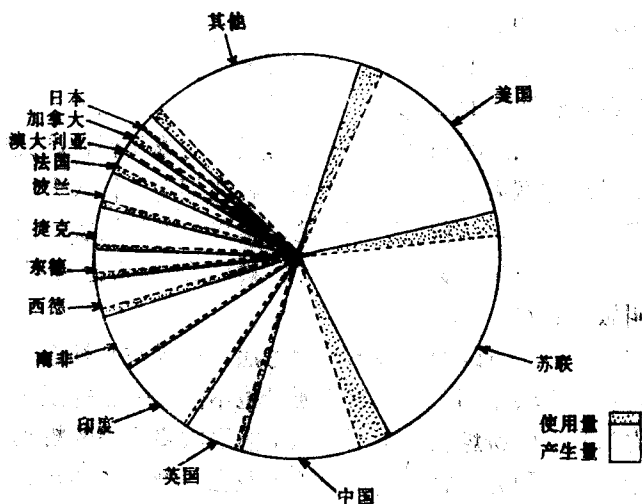


图1. 世界粉煤灰年产生总量及其在水泥及混凝土中的应用情况
(估计世界年总产生量为2.9亿吨)

图1表示，近年来粉煤灰的产生量及其在水泥和混凝土中使用量的估计数值。此图清楚地表明，当前只有很少一部分的粉煤灰被用于制造混凝土。造成这种进展缓慢的原因有：未能广泛地提供优质的粉煤灰，未能有效地形成并可转让的技术，销售方法落后，部分专业人员的思想保守，甚至还有如此简单而现实的原因——需要地方来贮存额外增加出来的这种物料。

本书试图概括地介绍粉煤灰在混凝土中的使用，希望所有读

者、特别是在建筑部门工作的读者对此会感兴趣。如果热心的读者还想知道得更多，请查阅本书所附的参考文献或其他已大量发表的有关文献。

2. 粉煤灰的产生

粉煤灰是将磨得很细并通过 $75\mu\text{m}$ 网目的筛后的煤粉，用热空气高速吹进电站的锅炉燃烧后生成的。煤粉在进入温度高达 1500°C 左右的炉子后，处于悬浮状态的煤中的含炭成分立即就被烧掉了。煤中残留的物质，诸如页岩及粘土（其主要成分为二氧化硅以及铝和铁的氧化物）在悬浮状态时被熔化了，当它们被烟道气带出并急速冷却时，就生成了很细的球状颗粒。大约80%的煤灰最终与烟道气一起被带出炉外，在烟道气排入大气之前须将此煤灰去除掉。这种去除下来的材料就叫做粉煤灰，通常又称飞灰。剩下的一部分煤灰沉入炉底，被烧结成为比较粗糙的材料，叫做炉底灰。

在电厂中，可以用许多不同的方法将粉煤灰从烟道气中收集起来，收集方法不同，粉煤灰的质量也不同。一般的规律是，用机械方法收集的粉煤灰粗于用电除尘方法收集起来的粉煤灰，通常挑选按后一种方法收集起来的粉煤灰在混凝土中使用。

为了搞清楚为什么粉煤灰能够被用来作为硅酸盐水泥的部分替代物，让我们简要地来看一下硅酸盐水泥的生产过程。水泥的原料是两种矿场，一种是石灰质类型的（通常是石灰石或白垩），另一种是粘土类型的（通常是粘土或页岩）。两种原料经过粉磨并混合在一起，然后投入倾斜的旋转炉中，在大约 1400°C 下煅烧成熟料，这些熟料冷却后，再粉碎，又加入石膏，就得到了硅酸盐水泥。

因此，无论硅酸盐水泥或者粉煤灰都是粉磨过的岩石，在大致相同的温度下被煅烧而生成的，其主要成分也都是硅、铝、钙和铁的氧化物。当然，它们的组成和物理特征有所不同，而这是

由于实际的原材料的不同以及生产方法的不同而造成的。然而，一种材料一开头就在商品市场上被冠以水凝水泥的名称，而另一种材料却长期地被认为是一种废弃物，是一种灰渣。这种根深蒂固的偏见，阻碍了把粉煤灰作为混凝土中的一种粘结性成分来加以利用。可以说，若当初给粉煤灰起一个更为恰当的名称，比如说，“火山灰”，就能够避免人们的这种偏见。

3. 粉煤灰的类型

在一般意义上，特别考虑到在混凝土中的应用，粉煤灰可以被分为两种明显不同的类型：

(i) 低氧化钙粉煤灰 具有真正的凝硬性能，也就是说，需要一种活化剂，使反应开始进行并因而形成粘结性。

(ii) 高氧化钙粉煤灰 除了只有凝硬性外，本身具有一定的粘结性能。

这种分类方法，一般与电站中所使用煤的类型相联系，并且基本上分别符合于北美 (ASTM 618) 规范²⁵中所认可的F级及C级飞灰，见表1。

表 1 粉煤灰的主要分类

低氧化钙粉煤灰	CaO含量少于10% 通常从无烟煤及烟煤得到约相当于ASTM F级粉煤灰
高氧化钙粉煤灰	CaO含量大于10% 通常从次烟煤及褐煤得到约相当于ASTM C级粉煤灰

需要指出，ASTM F级及C级飞灰是根据所用煤的类型而进行分类的，如表1所示，但是有一个限制性条件，即3种氧化物 (SiO_2 、 Al_2O_3 及 Fe_2O_3) 在F级飞灰中的含量最小值为70%，在C级飞灰中的含量最小值为50%。这一必要条件往往会引起混乱，因为有许多C级的飞灰能满足F级粉煤灰的这些条件²⁶。的确有

人建议²⁹，应将这一点判别飞灰的条款加以取消²⁹，应将飞灰中完全具有凝硬性者判定为F级，而具有某些水硬性性能者判定为C级。

4. 粉煤灰的特征

4.1 成分

虽然粉煤灰的组成物并不都是以氧化物的形式存在的，但传统上常用氧化物分析来描述粉煤灰的化学成分，表2给出了普通硅酸盐水泥、低氧化钙粉煤灰及高氧化钙粉煤灰中各种氧化物的

表2 典型的氧化物组成

氧化物	质量百分数		
	普通硅酸盐水泥	低氧化钙粉煤灰	高氧化钙粉煤灰
SiO ₂	20	50	40
Al ₂ O ₃	5	28	15
Fe ₂ O ₃	3	9	8
CaO	64	3	20
MgO	2	1	4
SO ₃	2	1	2
其他	4	8	8

含量。具体某一种粉煤灰的确切分析数据的变动取决于其母体煤的成分。在某一地区的范围内，母体煤的不同，可能意味着煤矿的不同或甚至于煤层的不同，在英国，燃烧烟煤所生成粉煤灰中各种氧化物的变化范围列示于表3。世界各地此变化范围的数据可以从当地发表的数据中找到³⁰。

表2的数据应该有助于使我们了解粉煤灰与硅酸盐水泥的主要组成上的差别。为了起到粘结性材料的作用，粉煤灰需要从硅酸盐水泥得到氧化钙组分。正因为此组分可由硅酸盐水泥在水化时所释放出来的Ca(OH)₂所提供，这意味着，将这两种材料结合

表 3 英国粉煤灰中典型的主要氧化物的分析数据

氧化物	平均含量(重量%)	变化范围(重量%)
SiO_2	48.7	41.7—52.7
Al_2O_3	27.8	20.3—35.7
Fe_2O_3	9.2	5.4—12.5
CaO	3.0	1.1—7.8
MgO	1.9	1.5—2.4
SO_3	0.9	0.1—1.2
Na_2O	1.3	0.1—6.3
K_2O	2.4	1.1—3.1
TiO_2	1.1	0.1—1.5
P_2O_5	0.3	0.1—0.7
烧失量	3.9	1.1—8.0

在一起使用是能相得益彰的。

然而,如果粉煤灰要和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 起作用,粉煤灰的相组成的性质是很重要的,即其主要的活性组分是无定形相(通常被称为玻璃相)。作为一个例子,图2表示出英国粉煤灰的主要的相组成。在低氧化钙粉煤灰中,玻璃相是由含硅化合物或硅酸铝所组成的,而在高氧化钙粉煤灰中,它是由铝酸钙所组成的,在高氧化钙粉煤灰中,其他可能存在、并赋予粉煤灰以自粘结性能的活性化合物是游离氧化钙(CaO),硫酸钙(CaSO_4),铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$),硫代铝酸钙($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_4$)以及偶而有的硅酸钙。一般的规律是,在高氧化钙粉煤灰中玻璃相的含量比低氧化钙粉煤灰中的含量低,但其活性却较高。由以上事实所得到的推论应该是,粉煤灰的活性取决于存在着的玻璃相的性能及所占比例,而对于某一指定类型及来源的煤来说,玻璃相的性能及比例一般又是由炉内的操作温度决定的,经常有文章发表以上观点。然而,这种观点对于混凝土性能发展的重要性还有待解决。在下面的章节中将进一步讨论这个问题。另外已经弄清楚的一点是,粉煤灰中玻璃相的活性也可能受到和它一起使用的水泥的特性的影响。