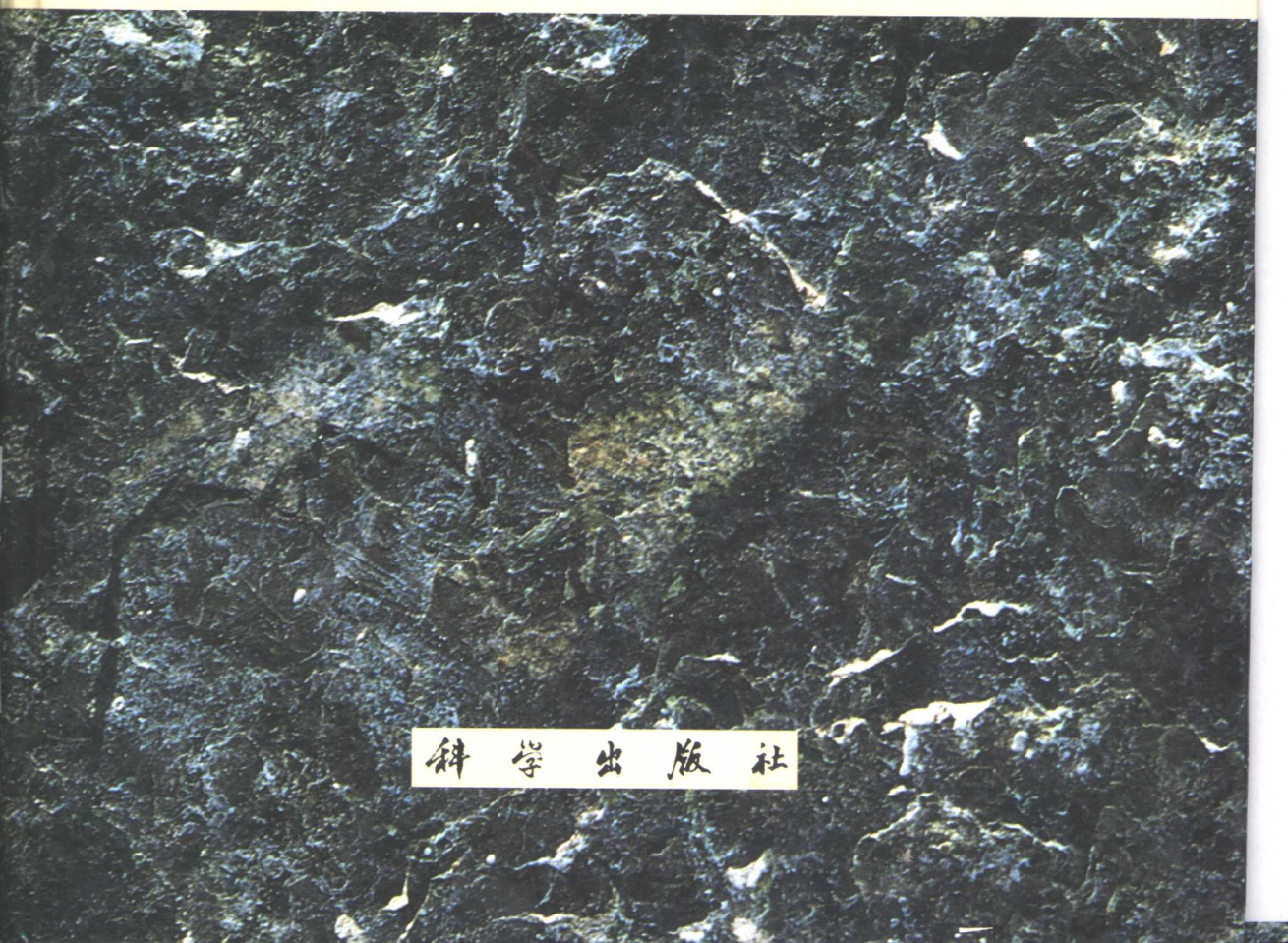


粉煤灰特性 与 粉煤灰混凝土

钱觉时 著



科学出版社

705.7-2
Q-432

粉煤灰特性与粉煤灰混凝土

钱觉时 著

科学出版社

2002

B373 | J6

内 容 简 介

本书分为两大部分。第一部分有五章,主要介绍粉煤灰的特性,包括粉煤灰的形成、分类和物理特性、化学特性,并以较大篇幅论述粉煤灰的矿物组成,最后特别讨论粉煤灰的环境特性。第二部分分四章,着重介绍粉煤灰对新拌混凝土和硬化混凝土主要性能的改善作用,讨论了粉煤灰对混凝土可能的不利影响及其对策,特别从粉煤灰排放、处理角度论述了提高粉煤灰品质的途径,以及粉煤灰混凝土在一些特殊工程中应用的优势与最新研究成果。

本书可供从事土木建筑施工的工程技术人员阅读,还可供相关专业的高校师生、研究人员、粉煤灰开发人员以及建材生产厂家的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉煤灰特性与粉煤灰混凝土/钱觉时著. -北京:科学出版社,2002
ISBN 7-03-010053-0

I. 粉... II. 钱... III. ①粉煤灰-特性②粉煤灰水泥-混凝土
N. TU528.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 005038 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年5月第 一 版	开本:720×1000 B5
2002年5月第一次印刷	印张:18 1/4
印数:1—2 500	字数:363 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

序

粉煤灰作为排放量最大的工业废料,在我国目前的排放量每年已超过亿吨,虽然其利用率与国际一些发达国家相比我国仍处于前列,但利用水平较低。因此,任何提高粉煤灰利用率和利用水平的途径与技术都有重大的环保意义和巨大的经济效益。我国众多的人口、资源相对匮乏的国情使得这项工作更为迫切。粉煤灰作为混凝土掺合料用于土木、水利和海洋等工程领域是目前粉煤灰利用的主要途径,不仅经济效益明显,还具有其它材料无法替代的技术优势,特别是其使用量大、对环境无不利影响,也是解决粉煤灰对环境影响最为根本的途径。

粉煤灰毕竟是一种工业副产品,其性能波动很大,影响其品质的因素也非常多,不充分了解其特性,在工程应用中可能会对它提出过高或不必要的要求,这将增加工程造价,难以充分发挥它在混凝土中的作用,最终将妨碍它在混凝土中的应用。不充分了解粉煤灰的特性,同样可能会造成不恰当的使用,这样不但不利于改善混凝土性能甚至还会降低混凝土的一些性能。大量的研究与应用结果表明,在混凝土中正确使用粉煤灰,将能明显改善混凝土一些性能。但是,如何正确使用粉煤灰?粉煤灰究竟能改善混凝土哪些性能?改善的程度如何?这些问题又是很多工程技术人员最想知道的。钱觉时教授在《粉煤灰特性与粉煤灰混凝土》这本书中,将粉煤灰的特性与粉煤灰在混凝土中应用两方面内容非常好地融合在一起,这是该书与国内外现有同类论著相比所具有的显著特点之一。此外,该书还以比较大的篇幅来介绍粉煤灰的环境特性和提高粉煤灰品质的途径,这是国内外现有同类论著所没有的。该书综合国内外的最新研究成果,再加上作者及合作者近年来在粉煤灰方面的研究成果,是一本非常系统的有关粉煤灰特性和粉煤灰混凝土的专著,不仅在粉煤灰混凝土的工程应用方面具有重要的参考价值,而且对于充分认识粉煤灰、加强粉煤灰的基础研究也有重要的理论价值。该书内容丰富,资料翔实,各章节衔接流畅,是水泥混凝土领域很有价值的科技资料。我深信该书的出版将能促进我国粉煤灰在混凝土中的应用。特为之序。

中国工程院院士 唐明述

2001年11月26日

前 言

粉煤灰是我国目前排放量最大的燃煤副产品之一,也是利用程度和利用水平最高的工业废渣之一。煤的利用不仅要排放 CO_2 、 SO_2 等气体,造成大气污染,还将产生大量的灰渣。但是,煤作为一种最基本、最重要的能源普遍用于各个行业,在相当长的时间内仍是其它能源无法代替的;特别是我国在煤的资源相对比较丰富的情况下,煤将长时间作为我国主要的初级能源。因此我国巨大的粉煤灰排放量将维持比较长的时间。近年来,我国粉煤灰的利用率有了巨大的增长,这与国家有关部门的重视和科学研究的促进是密不可分的,这也与我国现阶段大规模的基础建设有关,一旦基础建设的高峰期过去,粉煤灰的利用率还有可能降低。我国目前粉煤灰利用率只有 40% 左右,大部分的粉煤灰仍未被利用,这些粉煤灰不仅污染环境,还要占用土地堆放,因此,粉煤灰的利用仍将是非常艰巨的任务。

粉煤灰实际上是一种非常有用的土木建筑材料。粉煤灰已广泛作为混凝土、水泥掺合料,作为主要原材料用于生产水泥、烧结砖以及其它新型建筑材料制品,取得了很多成果。但另一方面,粉煤灰在土木建筑材料中的应用还有很多基础性的问题有待突破,特别是我国有关粉煤灰的基础性研究方面显得非常薄弱。

在所有粉煤灰的应用中,它用在混凝土中不仅用量巨大,而且应用水平也比较高,已成为混凝土必不可少的成分,一些研究者甚至认为不掺粉煤灰的混凝土将进博物馆。但是有相当数量从事土木建筑的工程技术人员对粉煤灰的特性和粉煤灰混凝土了解甚少,不少情况下粉煤灰在混凝土中的应用非但没有发挥应有的技术优势,反而引起了一些施工问题和混凝土质量问题。本书将粉煤灰特性与其在混凝土中的利用这两方面内容有机结合起来,突出应用,供从事土木建筑工程和建材产品开发的科技人员和管理工作者参考。

本书脱稿之际,作者才深感“世界的难知”,“已知”的东西扩大一点,“未知”的东西也就扩大一点。由于本书涉及比较多的研究领域,也由于作者的水平有限,书中定有不少欠妥乃至错误之处,衷心希望读者给予指正。

本书的主要内容是笔者在美国宾夕法尼亚州立大学材料研究实验室作访问教授期间完成的。美国工程院院士、“Cement and Concrete Research”杂志的主编 D. M. Roy 教授给予很大的鼓励和帮助,B. E. Scheetz 教授和程吉平博士也给予很多支持和帮助,特别是他们提供了大量的非常珍贵的研究报告和资料;美国纽约州立大学 Buffalo 分校的史才军教授也为作者提供了非常有价值的资料,并在本书的写作过程中提出了很多具体的意见和建议;本书的完成还得到很多博士和硕士研究生的协助,他们是王智、孟志良、卢浩、肖保怀、郑洪伟、罗晖、黄煜镔、汪宏涛、

谷林涛、杨再富、彭朝晖、吴传明、熊出华等。本书初稿曾请唐明述院士审阅,得到他的肯定和具体的建议。本书的出版还得到重庆大学党委书记祝家麟教授的关心和支持。我的妻子袁江和女儿钱敏思在本书写作过程中自始至终给予鼓励 and 关注,正是她们在美国期间给予的鼓励,我才坚定了完成本书的信念,我的妻子还做了大量的资料整理和外文资料翻译工作。总之,本书的完成离不开大家的关心、支持和鼓励,特在这里一并表示诚挚的谢意。

目 录

序

前言

1 粉煤灰的形成与分类	1
1.1 引言	1
1.2 煤的种类和性质	2
1.3 粉煤灰的形成	5
1.4 粉煤灰的类型	8
1.4.1 根据粉煤灰的物理性质分类	8
1.4.2 根据粉煤灰的化学性质分类	9
1.4.3 根据粉煤灰的应用要求分类	10
2 粉煤灰的物理特性	12
2.1 粉煤灰的密度、堆积密度和颗粒密度	12
2.1.1 密度	12
2.1.2 堆积密度	13
2.1.3 颗粒密度	14
2.2 粉煤灰的细度	15
2.3 粉煤灰的颗粒形貌	18
2.3.1 粉煤灰的颜色	18
2.3.2 粉煤灰的颗粒形貌	19
2.4 粉煤灰的其它物理性质	24
2.4.1 需水性	24
2.4.2 抗压强度比	24
2.4.3 磁性	25
2.4.4 体积安定性	26
2.4.5 均匀性	27
2.4.6 热学性质	27
2.4.7 高温性质	27
2.4.8 电导率	28
2.4.9 土工特性	28
2.4.10 吸附性能	29
3 粉煤灰的化学性质	30

3.1	化学组成	30
3.1.1	主要元素	30
3.1.2	微量元素	32
3.1.3	残留碳份	34
3.1.4	粉煤灰化学组成的主要特点	37
3.2	粉煤灰火山灰活性	45
3.2.1	粉煤灰火山灰活性的表示与测定	45
3.2.2	粉煤灰火山灰活性的表现与影响因素	47
3.3	粉煤灰的化学反应性	51
3.3.1	pH 值变化	51
3.3.2	粉煤灰的水化	51
3.3.3	与水泥的反应	52
4	粉煤灰的矿物组成	55
4.1	煤的矿物成分	55
4.1.1	煤的矿物来源	55
4.1.2	煤中矿物的主要种类	55
4.1.3	煤的加工对煤中矿物的影响	57
4.2	煤中无机物的转化	57
4.2.1	煤中主要矿物的热分解	57
4.2.2	煤中的矿物相图	58
4.2.3	煤中一些元素对煤灰中矿物形成的影响	59
4.3	粉煤灰的晶体矿物	60
4.3.1	粉煤灰中晶体矿物类型	60
4.3.2	粉煤灰中晶体矿物的形成与来源	61
4.3.3	粉煤灰中晶体矿物含量范围	62
4.3.4	粉煤灰中晶体矿物相特征	63
4.4	粉煤灰中玻璃体的形成与特点	65
4.4.1	玻璃体结构	65
4.4.2	粉煤灰玻璃体的来源	67
4.4.3	粉煤灰玻璃体的变异	68
4.5	一些测试技术用于分析粉煤灰玻璃体的研究结果	70
4.5.1	显微镜	71
4.5.2	X 射线衍射	72
4.5.3	光谱	75
4.5.4	热分析	77
4.5.5	酸溶解	78

4.6	粉煤灰玻璃体的类型	79
4.7	粉煤灰的矿物相与化学组成的关系	81
5	粉煤灰的环境特性	83
5.1	粉煤灰的渗滤性质	84
5.1.1	粉煤灰中有害有毒物质渗滤对环境的影响	84
5.1.2	粉煤灰渗滤性的测定方法与手段	86
5.1.3	粉煤灰的渗滤性	89
5.2	粉煤灰的放射性与影响	96
5.2.1	粉煤灰的放射性	96
5.2.2	粉煤灰放射性对环境的可能影响	97
5.3	粉煤灰引起的其它的环境污染	100
6	粉煤灰用于混凝土的品质要求与提高途径	102
6.1	粉煤灰在混凝土中的应用状况	102
6.1.1	粉煤灰的排放与利用方式	102
6.1.2	粉煤灰在混凝土中应用的历史回顾	104
6.1.3	粉煤灰在混凝土中的应用现状	105
6.2	用于混凝土的粉煤灰品质要求	106
6.2.1	用于混凝土的粉煤灰主要品质指标	106
6.2.2	有关国家标准规定	112
6.3	影响粉煤灰品质的因素	114
6.3.1	煤的品种和品质	114
6.3.2	煤粉的制备	115
6.3.3	燃烧条件	115
6.3.4	污染控制系统	117
6.3.5	储存	117
6.4	粉煤灰品质的提高途径	118
6.4.1	粉煤灰的分类排放与储存	119
6.4.2	粉煤灰细度的提高	121
6.4.3	粉煤灰烧失量的控制	125
6.4.4	粉煤灰火山灰活性的提高与激发	128
6.4.5	其它方法	132
7	粉煤灰混凝土的早期性能	136
7.1	粉煤灰混凝土的工作性能	136
7.1.1	需水量与坍落度	136
7.1.2	泌水与离析	139
7.1.3	坍落度损失	139

7.2	对混凝土外加剂的适应性	140
7.2.1	减水剂	140
7.2.2	引气剂	143
7.3	粉煤灰混凝土的凝结性能	145
7.4	粉煤灰混凝土的水化	146
7.4.1	对水泥水化的影响	147
7.4.2	粉煤灰混凝土的水化过程与水化产物	150
7.4.3	水化热与混凝土温度升高	155
7.5	粉煤灰混凝土的养护	158
7.5.1	养护温度	158
7.5.2	养护湿度	160
7.5.3	蒸压养护	160
8	硬化粉煤灰混凝土性能	164
8.1	粉煤灰混凝土的微观结构	164
8.2	力学性能	167
8.2.1	强度	167
8.2.2	弹性模量	169
8.2.3	变形能力	170
8.3	抗渗性能	173
8.3.1	粉煤灰对水泥净浆和砂浆孔结构的改善	173
8.3.2	粉煤灰掺量和种类对混凝土抗渗性的影响	175
8.3.3	养护条件对粉煤灰混凝土抗渗性的影响	176
8.3.4	粉煤灰混凝土抗渗性的一般规律	177
8.4	粉煤灰混凝土的抗化学侵蚀性能	178
8.4.1	抗硫酸盐侵蚀	178
8.4.2	抗海水侵蚀	181
8.4.3	抗酸侵蚀	184
8.4.4	抗氯化物侵蚀	184
8.4.5	对混凝土碱集料反应的抑制作用	185
8.5	粉煤灰混凝土的抗碳化性能	188
8.5.1	有关粉煤灰混凝土碳化的部分研究结果	189
8.5.2	粉煤灰混凝土抗碳化性能的改善	190
8.6	粉煤灰混凝土的钢筋耐锈蚀性能	194
8.7	粉煤灰混凝土的抗冻性能	196
8.7.1	粉煤灰品质对粉煤灰混凝土抗冻性能的影响	196
8.7.2	养护与配合比对粉煤灰混凝土抗冻性能的影响	198

8.8 其它性能	198
8.8.1 耐热性能	198
8.8.2 耐磨蚀性能	199
9 特种粉煤灰混凝土	201
9.1 海洋混凝土	201
9.1.1 海洋环境对混凝土的要求	201
9.1.2 海洋混凝土耐久性的状况	202
9.1.3 粉煤灰混凝土用于海洋工程的技术要求	204
9.2 碾压混凝土	207
9.2.1 碾压混凝土的要求	207
9.2.2 应用情况	210
9.3 高性能混凝土	213
9.3.1 粉煤灰在高性能混凝土中的作用	213
9.3.2 用于高性能混凝土的粉煤灰品质要求	215
9.4 大掺量粉煤灰混凝土	217
9.4.1 大掺量粉煤灰混凝土的应用	217
9.4.2 大掺量粉煤灰混凝土性能改善	219
9.5 无水泥粉煤灰混凝土	223
9.6 特细砂混凝土	226
附录 I 中华人民共和国国家标准 用于水泥和混凝土中的粉煤灰 (GB1596-91)	229
附录 II 中华人民共和国国家标准 粉煤灰混凝土应用技术规范 (GBJ146-90)	235
附录 III 中华人民共和国城乡建设环境保护部标准 粉煤灰在混凝土和砂 浆中应用技术规程(JGJ 28-86)	247
参考文献	261

1 粉煤灰的形成与分类

1.1 引言

能源在现代社会的日常生活和社会发展中所起的作用越来越重要。相对于石油、天然气,煤被视为比较脏的能源。但随储藏量有限的石油和天然气在不久的将来将被消耗完,而煤以目前的消耗速度还可以维持好几个世纪,故煤理所当然地成为非常重要的能源。煤在所有能源中所占比例也非常大,并且在相当长的时期内仍将保持这一高比例。表 1.1 是世界各大洲能源的比例情况。

表 1.1 1991 世界各大洲初级能源比例(以百万吨油计)[Tallboys(1993)]

国家或地区	油	天然气	煤炭	核能	水能	总计
北美	849	565	503	188	53	2154
西欧	631	245	302	172	34	1384
前苏联和东欧	487	620	406	69	25	1607
亚洲	609	110	793	72	35	1619
澳洲	36	21	41		3	101
总计(包括中东和南美洲)	3141	1770	2185	514	196	7808

煤作为主要的初级能源,主要用于发电、冶金、水泥、铁路、化肥、制砖和其它,如化工、造纸及家庭日常生活。从比例上看煤用于热电厂在很多国家所占比例都非常高,表 1.2 是世界上一些国家煤炭用于发电的比例情况。

表 1.2 世界一些国家燃煤电厂电力占总电力的比例[Tallboys(1993)]

国 家	比 例/%	国 家	比 例/%
丹麦	92	韩国	20
澳大利亚	78	印度尼西亚	18
中国	72	马来西亚	16
印度	65	日本	14
美国	55	巴西	1
泰国	25		

在上述煤的几种用途中除用于生产水泥和制砖外,煤的利用将会产生大量的灰渣残留物(或称为燃煤副产品),其中火力发电厂的粉煤灰在所有燃煤副产品中数量上占绝对地位。根据 Manz(1995)的统计,1992 年全世界粉煤灰及炉底灰、渣

排放量为 $4.59 \times 10^8 \text{t}$ 。我国 1995 年的粉煤灰排放量已达到 $1.15 \times 10^8 \text{t}$ [国家建材局科技司(1997)、赵鹏高(1997)], 成为排放量的最大几种工业废渣之一。

1.2 煤的种类和性质

煤的形成可分为两个阶段。

成煤的第一阶段, 是由植物遗体在地表湖沼或在海湾中经过一系列复杂的化学变化, 形成泥炭或腐泥。在沼泽环境中, 植物死亡后被水淹没或浸泡, 其有机物中的纤维素 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ 及木质素 $(\text{C}_{50}\text{H}_{49}\text{O}_{11})$ 等物质在厌氧菌的作用下经过一系列复杂的生物化学过程, 转化为新的物质如腐植酸、腐植酸盐及沥青等, 这些物质与尚未分解或部分分解的植物遗体及沼泽中的泥砂和水中溶解的矿物混合在一起就成为泥炭。泥炭受进一步的地质作用而转变成的煤, 称为腐植煤。在比较平静的湖泊、海湾等环境中, 低等植物如藻类繁殖很快, 这些藻类死亡后遗体随泥砂一起沉积, 在缺氧的条件下经过细菌的分解和化学合成等系列复杂的生物化学作用, 逐渐转化为富含沥青质的胶冻状物质, 这种物质就是腐泥; 腐泥经过进一步地质作用就成为腐泥煤。目前开采的煤层绝大多数是由高等植物遗体转化而来的腐植煤。

腐植煤是由泥炭转变而成的, 但并不是所有泥炭层都能转化为煤层, 只有随着地壳沉降, 泥炭层下降到比较深的地方, 由于上覆地层的静压力和构造作用的侧压力, 还有来自地热和岩浆热量的作用, 泥炭层有机物成分和结构都将发生变化, 其中 H、O、N 等元素含量逐渐减少, 而 C 含量相对富集, 有机物分子的聚合程度也逐渐增大, 泥炭层才能转变成煤层, 这就是成煤的第二阶段。

当泥炭层下降到地表下一定深度时, 由于压力越来越大, 原来疏松、多水的泥炭受到紧压、脱水、胶结和聚合, 体积大大缩小, 结果变成比较致密的褐煤; 如果泥炭转变成褐煤后, 地壳仍然继续沉降, 那么在更高温度和压力的作用下, 褐煤中的有机物分子经过变化, C 含量相对增多, 就形成了烟煤; 如果由于更强的地壳运动或岩浆的活动, 烟煤层受到更高的温度和压力的作用, 烟煤就转变成无烟煤。

图 1.1 是煤层在地壳中的示意图。由于地壳的运动, 煤层都处于地表下比较深的岩层中。

在我国煤的大类可分为无烟煤、烟煤和褐煤。无烟煤又可分为无烟煤一号、二号、三号; 褐煤分为褐煤一号、二号; 烟煤的划分比较细, 可分为贫煤、贫瘦煤、瘦煤、焦煤、1/3 焦煤、肥煤、气肥煤、气煤、1/2 中粘煤、弱粘煤、不粘煤及长焰煤 [《煤矿总工程师工作指南》编委会(1988)]。

国际上通常根据煤的性质将煤分成五大类: 无烟煤、烟煤、亚烟煤、褐煤和泥煤。

泥煤是煤形成时的初级阶段当高热和压力使得泥煤中水分和碳氢化合物产生分离然后逐渐形成的, 一般呈黄褐色和黑褐色, 无光泽, 质地疏松。烟煤为一种在加热时产生大量沥青质挥发物的煤, 也称软煤。亚烟煤为介于褐煤与烟煤之间的黑色

煤,比褐煤含有较多的炭和较少的水分。无烟煤则是变质程度最高的煤种,含有最少水分和含有最高碳分,颜色呈带银白或古铜色彩的灰黑色、似金属光泽,燃烧时无烟,火力耐久,硬度和密度在所有煤种中最大。煤的等级按泥煤-褐煤-亚烟煤-烟煤-无烟煤的顺序增高。

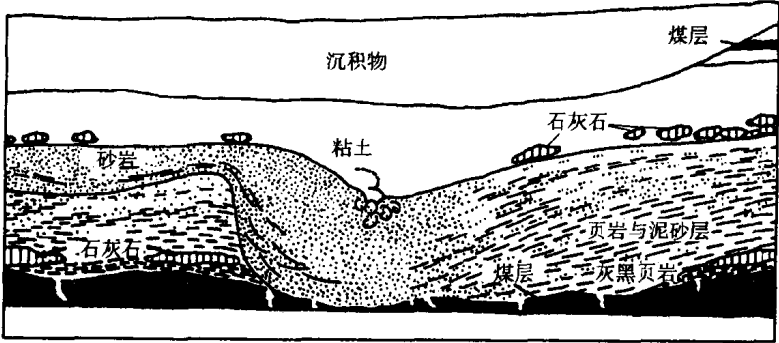


图 1.1 地壳中煤层的示意图

煤的性质包括碳的含量、含水率、灰分和挥发性以及煤中其它矿物含量。

煤中碳含量越高,其热值越大,利用价值也越高。

煤中的水分由两部分组成,一是煤中的自由水,是指吸附在煤颗粒表面或煤的缝隙中,而另一部分为煤内部的水分,常温常压下这部分水分是不能从煤中除去的。煤的含水率越小,煤的品质越好。

从煤的利用和环境保护角度都希望煤的灰分和挥发性物质越低越好。

煤中含有的其它矿物,从煤的利用角度讲也希望它越低越好,但因为一般情况下这些矿物含量都比较低,对煤的燃烧影响不是很大。不过有些矿物的成分则希望比较低,如煤中的放射性物质含量过高将不利于燃煤副产品的利用,又如煤中硫的含量近年来要求也越来越严格。煤中的硫含量过高在燃烧时生成的 SO_2 将使大气污染。美国规定每产生 10^6Btu ($1\text{Btu}=1.06\text{kJ}$) 的热值 SO_2 排放量不能超过 1.2lb ($1\text{lb}=0.453592\text{kg}$),要满足这样的条件即热值在 10000Btu/lb 的煤中硫的含量应低于 0.6% ,再每增加 1000Btu/lb 的热值,硫的含量增加也应低于 0.06% 。

表 1.3 是对煤类别比较细的划分情况,所给出的各种类煤的热值等性质是对一些有代表性煤的测试结果。表 1.4 是 Singer(1984)给出不同等级煤一些性质的范围。表 1.5 是我国按煤的一些性质对煤的分级情况。

通常煤的含水率和挥发性是随煤等级提高而降低的,高挥发性的烟煤具有成团特征,而低级别的煤如亚烟煤和褐煤则无成团现象。

任何级别的煤都可以在锅炉中燃烧,但是煤的一些特性如煤的热值、煤灰的熔融特性在锅炉设计或选用时应该予以考虑,煤以及所包含的矿物硬度可能影响煤粉的粉磨,煤的化学组成可能影响锅炉的腐蚀和堵塞等。

表 1.3 煤的种类及其性质[The congress of the United States(1979)]

煤的等级		性 质					
		平衡含水率 /%	挥发物质 /%	碳分 /%	灰分 /%	硫 /%	最大热值 /(Btu/lb)
无烟煤	变形无烟煤	4.5	1.7	84.1	9.7	0.77	12745
	无烟煤	2.5	6.2	79.4	11.9	0.60	12975
	半无烟煤	2.0	10.6	67.2	20.2	0.62	11925
烟煤	低挥发性	1.0	16.6	77.3	5.1	0.74	14715
	中挥发性	1.5	20.8	67.5	10.2	1.68	13720
	A类高挥发性	1.5	30.7	56.6	11.2	1.82	13325
	B类高挥发性	5.8	36.2	46.3	11.7	2.72	11910
	C类高挥发性	12.2	38.8	40.0	9.0	3.20	11340
亚烟煤	A类	14.1	32.2	46.7	7.0	0.43	11140
	B类	25.0	30.5	40.8	3.7	0.30	9345
	C类	31.0	31.4	32.8	4.8	0.55	8320
褐煤		37.0	26.6	32.2	4.2	0.40	7255

表 1.4 不同等级煤的性质范围

煤的等级	性 质					
	分子式	密度 /(g/cm ³)	挥发物质 /%	碳分 /%	含水率 /%	最大热值 /(Btu/lb)
泥煤	C ₁₀₀ H ₁₁₆ O ₃₉	0.4	50~70	25~30	20~95	4000~5000
褐煤	C ₁₀₀ H ₉₀ O ₂₅ NS	1.2	40~70	40~60	30~40	6300~8300
亚烟煤	C ₁₀₀ H ₈₀ O ₁₅ NS	1.3	46~52	45~60	10~30	8300~11500
高挥发性烟煤	C ₁₀₀ H ₈₀ O ₁₀ NS	1.4	31~46	45~65	1~10	11500~15000
高挥发性烟煤	C ₁₀₀ H ₇₀ O ₆ NS	1.4	22~31	69~78	2	15000~15500
高挥发性烟煤	C ₁₀₀ H ₆₀ O ₅ NS	1.4	12~22	78~86	2	15500~16000
无烟煤	C ₁₀₀ H ₄₀ O ₃ NS	1.7	2~14	86~98	0~5	14200~15200

煤中除碳、硫以及水分外,还有很多其它种类的物质。表 1.6 是美国不同地区 601 种煤中 36 种微量元素测试结果的平均值。

表 1.5 我国煤的分级情况[《煤矿总工程师工作指南》编委会(1988)]

按灰分产率	级别	特低灰	低灰	中灰	富灰	高灰
	原煤灰分/%	<10	10~15	15~25	25~40	>40
全硫含量	级别	特低硫	低硫	中硫	富硫	高硫
	原煤全硫/%	≤1.0	1.0~1.5	1.5~2.5	2.5~4.0	>4.0
磷含量	级别	特低磷	低磷	中磷灰	高磷	
	原煤磷含量/%	<10	10~15	15~25	25~40	
煤灰熔融性	级别	难熔	高熔	低熔	易熔	
	软化温度/℃	>1500	1250~1500	1100~1250	<1100	
抗碎指标	级别	高强度	中强度	低强度	特低强度	
	落下试验法<25mm/%	>65	50~65	30~50	≤30	
褐煤及风化 煤腐植酸含量	级别	高腐植酸	富腐植酸	中腐植酸	低腐植酸	
	腐植酸含量/%	>60	40~60	20~40	≤20	
理论精煤回收率	级别	优等	良	中	低	
	回收率/%	>70	50~70	40~50	<40	
煤的焦油产率	级别	高油		中油	低油	
	煤焦油产率/%	>12		7~12	<7	

表 1.6 煤中微量元素的含量[The congress of the United States(1979)]

元素	含量/×10 ⁻⁶	元素	含量/×10 ⁻⁶	元素	含量/1×10 ⁻⁶	元素	含量/%
Mn	89.2	Ni	12.5	Th	2.4	Al	1.1
Ba	137.7	Zn	27.9	Be	1.4	Si	2.0
Sr	112.5	As	7.5	Mo	1.5	Fe	1.3
F	26.2	Pb	9.2	U	1.3	K	0.1
Zr	60.0	Ga	4.7	Sb	0.7	Ca	0.5
B	19.2	Y	8.0	Yb	0.8	Ti	0.1
V	11.0	Co	4.6	Cd	0.2	Mg	0.1
Li	14.9	Se	3.1	Hg	0.1	Na	<0.1
Cu	14.9	Nb	3.2				
Cr	10.7	Sc	3.1				

1.3 粉煤灰的形成

粉煤灰又称飞灰,是一种颗粒非常细以致能在空气中流动并能被特殊设备收集的粉状物质。我们通常所指的粉煤灰是指燃煤电厂中磨细煤粉在锅炉中燃烧后从烟道排出、被收尘器收集的物质。简单地说,粉煤灰呈灰褐色,通常呈酸性,比表面积在 2500~7000cm²/g,尺寸从几百微米(×10⁻⁶m)到几微米,通常为球状颗粒,

主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ，有些时候还含有比较高的 CaO 。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 $10\mu\text{m}$ 的球状铝硅颗粒。

粉煤灰是排放量最大的一种工业废料，在所有燃煤副产品中占有绝对大的比例，并且随世界各国对环境要求的提高、收尘技术的发展和大量低级煤的使用，粉煤灰的排放量增长速度非常快。一般来说，现代化电厂如果使用低灰分的高级别煤，煤能比较充分燃烧，则 $1 \times 10^4 \text{kW}$ 装机容量的年粉煤灰排放量为 $0.1 \sim 0.2 \times 10^4 \text{t}$ ；但如果使用的是劣质煤，煤又不能充分燃烧，则粉煤灰的排放量可高达 $1 \times 10^4 \text{t}$ [按火力电厂的效率为 42%~61%，煤耗 $210 \sim 307 \text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算]。

现代化火力电厂，煤必须进行粉磨才能送入燃烧室。粉磨的细度首先要满足煤粉能悬浮在空气中，并能满足在最短时间内燃烧充分。通常煤粉颗粒越细越能满足这样的条件，但不同的煤，满足最短时间燃烧充分的最佳颗粒尺寸有一定的差异，一般来说煤粉颗粒的尺寸通常在 $30 \sim 70\mu\text{m}$ ，当然实际煤粉的尺寸可能比此范围要宽，因此一般煤粉的平均粒径在 $50\mu\text{m}$ ，小于 $10\mu\text{m}$ 和大于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒通常占总量的 10% 左右。

虽然粉煤灰绝大多数颗粒形状为球形，而煤粉颗粒形状则不是这样规则。在高温下，煤粉颗粒将发生一系列的物理化学变化。首先煤粉达到熔融状态后由于表面张力使表面能达到最小，则煤粉颗粒的棱角会收缩使颗粒成为球状，这些熔化的球状颗粒将会在煤粉燃烧过程中产生的 CO 、 CO_2 、 SO_2 和水蒸气中漂浮。这些颗粒充分燃烧后离开火焰区域后，将会迅速移动到温度较低的区域，然后淬灭成中空厚壁的球状颗粒。由于 CO 、 CO_2 、 SO_2 和水蒸气的存在，这些颗粒可能与这些气体发生二次反应进行聚合和解聚。这些形状相似的、在排出烟道过程中被收尘器收集到的粉末，我们就称为粉煤灰。

煤主要是由碳、氢、氧、氮和硫组成。比较典型的煤中，碳占 80%~90%，氢占 4%~5%，氧占 5%~10%，氮占 1.5%~2%，以及 1% 左右的有机硫，这些物质充分燃烧将全部变为气体。但实际煤中还含有其它微量元素，特别是很多煤中还含有比较多的矿物或在开采过程中混有的其它矿物，这些物质将构成粉煤灰的主要来源。

1) 煤中混杂的矿物在煤破碎时可能与煤的颗粒分离，这些矿物颗粒尺寸相对比较大，在燃烧过程中可能成为碎块，也可能部分熔融，这取决于燃烧的温度、矿物的成分以及挥发性物质的含量。

2) 煤内含有的矿物颗粒通常粒度很小，存在于煤粉颗粒之中，这些颗粒将受煤的膨胀、焦化和燃烧的影响，也会参与煤粉在燃烧过程中的破碎、挥发物质的迁移、团聚和熔融。

3) 分散在煤中等一些无机物在煤的燃烧过程中会气化成很细的颗粒，这些颗粒通常会粘附在大颗粒的表面，或团聚成非常小的颗粒。