



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

废物资源综合利用技术丛书

FENMEIHUI ZIYUAN ZONGHE LIYONG

粉煤灰资源 综合利用

毕进红 刘明华 等编著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

❖ 废物资源综合利用技术丛书

FENMEIHUI ZIYUAN ZONGHE LIYONG

粉煤灰资源 综合利用

毕进红 刘明华 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共 10 章, 主要介绍了粉煤灰的特征和危害, 综合利用的重要意义及概况; 粉煤灰的来源、收集和排放, 粉煤灰的储存、运输及优化加工; 粉煤灰的成分和性能; 粉煤灰在房建材料中的应用; 粉煤灰在农业方面的应用; 粉煤灰在环境保护方面的应用; 粉煤灰在工程填筑中的应用; 从粉煤灰中回收有用物质; 利用粉煤灰生产功能性新材料方面的应用; 粉煤灰综合利用标准。

本书内容丰富, 实用性强, 可供再生资源科学与技术、环境工程、煤化工等相关领域的研究人员、工程技术人员和管理人员参考, 也可供高等学校资源循环科学与工程、环境科学与工程及相关专业师生参阅。

图书在版编目 (CIP) 数据

粉煤灰资源综合利用/毕进红等编著. —北京:
化学工业出版社, 2018. 1
(废物资源综合利用技术丛书)
ISBN 978-7-122-30669-2

I. ①粉… II. ①毕… III. ①粉煤灰-废物综合利用 IV. ①X773. 05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 234698 号

责任编辑: 刘 婧 刘兴春
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 孙凤英
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 三河市延风印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 380 千字 2018 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

《废物资源综合利用技术丛书》 编委会

主任：岑可法

副主任：刘明华 陈冠益 汪 苹

编委成员（以汉语拼音排序）：

程洁红	冯旭东	高华林	龚林林	郭利杰	黄建辉
蒋自力	金宜英	梁文俊	廖永红	刘 佳	刘以凡
潘 荔	宋 云	王 纯	王志轩	肖 春	杨 帆
杨小聪	张长森	张殿印	张 辉	赵由才	周连碧
周全法	祝怡斌				

《粉煤灰资源综合利用》 编著人员

编著者：毕进红 刘明华 陈梦莹 刘银琴 江倩倩 孙 龙
李晓芬 张 鹏

近年来,我国粉煤灰产生量巨大。随着煤电装机容量的不断增长,2014年和2015年我国粉煤灰产生量也在相应增长,粉煤灰产生量估计超过 6.0×10^8 t,稳居世界第一。大量的粉煤灰若不妥善处理处置,不仅会占用大片农田耕地,产生的扬尘严重污染大气,而且在堆放地也会由于淋滤作用浸污地下水,其灰浆排放到江河湖泊,污染阻塞河道,破坏生态平衡。为消除粉煤灰的环境污染、提高其资源性再生利用率,世界各国政府和专家学者投入了大量的人力、物力,在粉煤灰资源化利用方面,已相继开发出诸多技术。对工业废渣中排放量最大的粉煤灰进行资源综合利用,实现可持续发展,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

为了促进粉煤灰资源利用的推广和应用,推动我国循环经济的发展,通过查阅历年来的相关研究成果,综合编著者在粉煤灰资源利用领域的科研成果和经验总结,编著了《粉煤灰资源综合利用》一书。希望本书的出版能够给相关技术人员在从事粉煤灰资源利用工作时提供一定指导作用,给科研、生产、教育等领域的人员提供帮助。

本书共10章,对粉煤灰资源利用的相关知识做了较全面的介绍。第1章介绍了粉煤灰的特征和危害、综合利用的重要意义及概况;第2章介绍了粉煤灰的来源、集运和加工,主要包括粉煤灰的来源、收集和排放,粉煤灰的储存、运输及优化加工;第3章介绍了粉煤灰的成分和性能;第4章介绍粉煤灰在房建材料中的应用;第5章介绍了粉煤灰在农业方面的应用;第6章介绍了粉煤灰在环境保护方面的应用;第7章介绍了粉煤灰在工程填筑中的应用;第8章介绍了从粉煤灰中回收有用物质;第9章介绍了利用粉煤灰生产功能性新材料方面的应用。第10章介绍了粉煤灰综合利用标准。书中介绍的概况及再生技术内容丰富,实用性强。

本书由毕进红、刘明华、陈梦莹、刘银琴、江倩倩、孙龙、李晓芬、张鹏等编著。全书最后由毕进红和刘明华统稿、定稿。另外,在本书编著过程中参考了该领域部分图书、期刊等相关内容,在此向其作者表示衷心的感谢!

由于编著者的专业水平和知识范围有限,虽已尽力,但疏漏和不足之处仍在所难免,恳请广大读者和同仁不吝指正。

编著者

2017年5月

第 1 章 概述

1.1 粉煤灰的特性	1
1.2 粉煤灰的危害	3
1.3 粉煤灰综合利用的重要意义	4
参考文献	5

第 2 章 粉煤灰的来源及处理

2.1 粉煤灰的产生	6
2.2 粉煤灰的收集	7
2.2.1 静电除尘器	7
2.2.2 湿式除尘器	8
2.2.3 袋式除尘器	8
2.2.4 干式旋风类除尘器	8
2.3 粉煤灰的储存	8
2.3.1 湿法储存	8
2.3.2 干法储存	8
2.4 粉煤灰的运输	9
2.5 粉煤灰的排放方式	9
2.5.1 水力除灰	9
2.5.2 气力除灰	10
2.5.3 联合除灰系统	12
参考文献	15

第 3 章 粉煤灰的成分和性能

3.1 粉煤灰的化学成分	16
3.2 粉煤灰的矿物成分	17
3.2.1 粉煤灰的矿物来源	17
3.2.2 粉煤灰的主要矿物组分	18
3.2.3 粉煤灰中主要矿物的形成	19
3.2.4 粉煤灰中的矿物相	20

3.2.5	粉煤灰中的晶体矿物相	21
3.3	粉煤灰的颗粒组成与结构	22
3.3.1	粉煤灰的颗粒组成	22
3.3.2	粉煤灰颗粒的结构	24
3.4	粉煤灰的物理性能和工艺性能	25
3.4.1	粉煤灰的物理性能	26
3.4.2	粉煤灰的工艺性能	28
3.4.3	粉煤灰的活性	30
3.5	粉煤灰的分类和分级	32
3.5.1	粉煤灰的分类	32
3.5.2	粉煤灰的分级	33
3.6	粉煤灰对人体健康与安全的影响	34
3.6.1	粉煤灰的放射性	34
3.6.2	国家关于建筑材料放射性的标准	34
3.7	粉煤灰的质量控制	35
3.7.1	“双质”粉煤灰	35
3.7.2	“脉搏系统”的应用	36
	参考文献	37

第4章 粉煤灰在房建材料中的应用

4.1	粉煤灰水泥	38
4.1.1	生产粉煤灰水泥的经济效益和社会效益	38
4.1.2	粉煤灰水泥的生产工艺	39
4.1.3	粉煤灰水泥生产质量控制	40
4.1.4	制成粉煤灰水泥的种类	42
4.1.5	粉煤灰水泥生产工艺中应注意的问题	46
4.1.6	推广粉煤灰水泥存在的问题	47
4.2	粉煤灰混凝土	48
4.2.1	掺用机理	48
4.2.2	掺混方式分类及优缺点	48
4.2.3	粉煤灰混凝土的应用范围	49
4.2.4	粉煤灰性状对混凝土性能的影响	49
4.2.5	指导和推进粉煤灰混凝土技术进步的三个理论	51
4.2.6	粉煤灰混凝土的生产工艺和应用技术	53
4.3	粉煤灰砖	60

4.3.1	烧结粉煤灰砖	60
4.3.2	蒸制粉煤灰砖	65
4.3.3	免烧免蒸粉煤灰砖	72
4.3.4	其他粉煤灰砖	75
4.4	粉煤灰砌块	78
4.4.1	概述	78
4.4.2	蒸养粉煤灰硅酸盐砌块	79
4.4.3	蒸压粉煤灰加气混凝土砌块	85
4.4.4	粉煤灰混凝土小型空心砌块	87
4.4.5	粉煤灰泡沫混凝土砌块	89
4.4.6	粉煤灰空心砌块	90
4.5	粉煤灰陶粒	94
4.5.1	概述	94
4.5.2	生产粉煤灰陶粒的原材料质量	95
4.5.3	粉煤灰陶粒生产的工艺要求	96
4.5.4	粉煤灰陶粒砂生产线设备简介	98
4.5.5	粉煤灰陶粒的应用	99
4.6	粉煤灰砂浆	100
4.6.1	概述	100
4.6.2	粉煤灰砂浆对原材料性能的要求	101
4.6.3	粉煤灰砂浆的配合比设计	102
4.6.4	原材料对粉煤灰砂浆性能的影响	104
4.6.5	粉煤灰砂浆的商品化发展	106
4.6.6	粉煤灰砂浆施工注意事项	107
4.7	粉煤灰人工轻质板材	108
4.7.1	粉煤灰硅钙板的生产	108
4.7.2	粉煤灰纤维棉板材	110
4.7.3	粉煤灰轻质隔声内墙板的制备和性能	113
4.7.4	粉煤灰炉底渣轻质屋面板	114
4.7.5	其他粉煤灰轻质板材	115
4.8	粉煤灰瓦	117
4.8.1	混凝土瓦和普通烧结黏土瓦的比较	117
4.8.2	生产工艺	117
4.9	粉煤灰功能材料	119
4.9.1	粉煤灰绝热材料	119

4.9.2	粉煤灰防水材料	131
4.9.3	粉煤灰吸声、防火、耐火材料	134
4.9.4	粉煤灰防腐材料	136
4.9.5	粉煤灰饰面板	139
	参考文献	141

第5章 粉煤灰在农业中的应用

5.1	粉煤灰农业利用基础	143
5.1.1	粉煤灰对土壤的影响	144
5.1.2	粉煤灰对土壤的改良及效果	145
5.1.3	粉煤灰调节土壤温度	145
5.1.4	粉煤灰增加土壤养分元素	146
5.2	粉煤灰利用途径	146
5.2.1	覆土造田	146
5.2.2	纯灰种植	146
5.2.3	粉煤灰改良土壤	147
5.2.4	粉煤灰制化肥	147
5.2.5	粉煤灰的间接农用	151
5.3	粉煤灰改良土壤的注意事项	151
5.3.1	粉煤灰的施用量	151
5.3.2	粉煤灰的施用方法	152
5.3.3	粉煤灰的施用年限和效用	152
5.4	粉煤灰在农业上的施用效果	152
5.4.1	促进农作物增产增收	152
5.4.2	抗农作物病虫害	152
5.4.3	其他作用	152
5.5	淤地造田及储灰场的开发利用	153
5.5.1	粉煤灰淤地造田	153
5.5.2	储灰场开发利用	154
5.6	粉煤灰中有害物质对农田和作物的影响	154
5.6.1	有毒微量元素对土壤环境及农作物、饲草等的影响	155
5.6.2	放射性元素对土壤环境和粮食的影响	156
5.6.3	苯并芘 (BaP) 对土壤环境和粮食的影响	157
5.7	粉煤灰的农业利用现状	157
5.7.1	直接用于造地还田	157

5.7.2 作土壤改良剂	157
5.8 粉煤灰农业利用存在的问题和展望	158
参考文献	158

第6章 粉煤灰在环境保护中的应用

6.1 粉煤灰在污水处理中的应用	160
6.1.1 粉煤灰处理生活污水	160
6.1.2 粉煤灰处理城市污水	163
6.1.3 粉煤灰处理印染废水	164
6.1.4 粉煤灰处理化纤和棉浆造纸废水	167
6.1.5 粉煤灰处理其他工业废水	168
6.2 粉煤灰在烟气脱硫中的应用	172
6.3 粉煤灰在噪声防治方面的应用	172
6.3.1 粉煤灰泡沫玻璃	172
6.3.2 GRC 隔墙板	172
6.3.3 粉煤灰轻质隔声内墙板的制备和性能	173
6.3.4 粉煤灰纤维棉防火吸声吊顶板	173
参考文献	175

第7章 粉煤灰在工程填筑中的应用

7.1 粉煤灰在城建工程回填中的应用	177
7.1.1 概述	177
7.1.2 工程填筑基本程序	178
7.1.3 应用实例	178
7.2 粉煤灰在道路工程填筑中的应用	180
7.2.1 概述	180
7.2.2 固化粉煤灰台背回填	180
7.2.3 液态粉煤灰回填桥头台背	183
7.2.4 粉煤灰在公路路基工程中的应用	184
参考文献	186

第8章 从粉煤灰中回收有用物质

8.1 粉煤灰中分选空心微珠	187
8.1.1 概述	187
8.1.2 微珠分选原理	188

8.1.3	微珠的分选	196
8.1.4	微珠的综合利用	197
8.2	粉煤灰中炭的回收和利用	200
8.2.1	电选技术	200
8.2.2	浮选技术	207
8.2.3	炭粒的综合利用	215
8.3	粉煤灰中磁珠的回收和利用	217
8.3.1	磁选原理	218
8.3.2	磁选机的磁场	218
8.3.3	磁选工艺	219
8.3.4	磁珠的综合利用	219
	参考文献	221

第9章 粉煤灰功能性新材料

9.1	粉煤灰在高分子材料中的应用	223
9.1.1	粉煤灰资源综合利用的思考和展望	223
9.1.2	粉煤灰在高分子材料中的应用效果	224
9.2	粉煤灰吸附剂	225
9.2.1	粉煤灰及其改性产品的吸附性能研究	225
9.2.2	粉煤灰制备颗粒吸附剂	226
9.2.3	粉煤灰合成沸石	227
	参考文献	228

第10章 粉煤灰综合利用标准

10.1	粉煤灰陶粒和陶砂	229
10.1.1	粉煤灰陶粒和陶砂的技术要求	229
10.1.2	试验方法	231
10.1.3	检验规则	231
10.1.4	堆放和运输	231
10.1.5	粉煤灰陶粒的强度标号	231
10.2	粉煤灰砖	232
10.2.1	分类	232
10.2.2	原材料	232
10.2.3	技术要求	233
10.2.4	试验方法	234

10.2.5	检验规则	234
10.3	粉煤灰用于水泥和混凝土	235
10.4	硅酸盐建筑制品用粉煤灰	236
10.5	粉煤灰在混凝土和砂浆中的应用	236
10.5.1	一般性规定	236
10.5.2	在普通混凝土中的应用	237
10.5.3	在泵送混凝土中的应用	238
10.5.4	在轻骨料混凝土中的应用	238
10.5.5	在砂浆方面的应用	238
10.6	粉煤灰的其他应用	239
10.6.1	在机场场道中的应用	239
10.6.2	在公路路堤中的应用	239
10.6.3	在道路基层中的应用	240
10.6.4	在水利工程中的应用	240
10.6.5	农用粉煤灰中污染物控制标准	240
10.7	粉煤灰综合利用管理办法	241
10.7.1	总则	241
10.7.2	综合管理	242
10.7.3	鼓励措施	243
10.7.4	法律责任	243
10.7.5	附则	244
	参考文献	244

第 1 章



概述

当前，许多国家都已从历史的发展进程中认识到必须重视“工业废渣”资源的开发利用，它可以起到有效缓解自然资源、能源危机的作用，同时带来较大的环境效益^[1]。尤其是 20 世纪 70 年代中期世界性能源危机后，许多国家发电厂的燃料结构发生了变化，都加快转向以煤炭为主要燃料的进程。据资料介绍，1979 年各国电力系统用煤量占全国煤耗总量比例为：苏联 50%、英国 45%、美国 70%。随着燃料油以及天然气效率的降低和核动力的缓慢发展，用于电力系统的煤炭量逐年增长，1985 年，美国电力系统用煤量在 $7.0 \times 10^8 \text{t}$ 以上。由于科技进步，1974 年美国首先在内政部编辑的矿物年报中，将粉煤灰作为一种矿物资源，并列为国家最丰富的第七位固体矿物。1982 年中华人民共和国国务院有关领导批示要重视粉煤灰资源化的研究。特别是 1987 年 9 月作为国家经委负责资源利用的朱镕基同志，提出了要把粉煤灰作为资源综合利用的突破口，在此指导下，国内粉煤灰的利用又掀起了一个高潮^[2]。近年来，我国的发电能力连年增长，电力工业的迅速发展，带来了粉煤灰排放量的急剧增加，燃煤热电厂每年所排放的粉煤灰总量也在逐年增加，2009 年我国粉煤灰的产量达到了 $3.75 \times 10^8 \text{t}$ ，相当于当年中国城市生活垃圾总量的两倍多，2010 年 9 月 15 日，国际环保组织绿色和平在北京发布《煤炭的真实成本——2010 中国粉煤灰调查报告》指出，固体废弃污染物粉煤灰的综合利用率普遍遭到电力行业的夸大，中国电力企业粉煤灰的综合利用率实际只有 30% 左右，而我国当时国家政策要求的综合利用率应达到 60% 以上。2015 年，我国煤炭消费达 $3.698 \times 10^9 \text{t}$ ，其中电力行业用煤 $1.839 \times 10^9 \text{t}$ ，粉煤灰排放达 $6 \times 10^8 \text{t}$ 左右。火力发电产生的粉煤灰排放已经成为当时中国工业固体废物的最大单一污染源，但这种对环境和公众健康损害巨大的污染物却长期被忽视，因而不断提高粉煤灰的综合利用率使其变废为宝在节约土地和环境保护方面意义深远。在很长一段时间内粉煤灰仍然会源源不断地排放，利用粉煤灰仍然是人类的一个重要任务^[3]。

1.1 粉煤灰的特性

粉煤灰是现代燃煤电厂的副产品，它是在燃煤供热、发电过程中磨成一定细度的粉煤在粉煤炉中经过高温燃烧后，由烟道气带出并经除尘器收集的粉尘。粉煤灰是一种固体废物，如果不合理处理粉煤灰，不仅会占用耕地，造成土壤、大气、水体等污染，而且危害人体的

健康和生态环境^[4]。

火力发电厂的锅炉是以磨细的煤粉作为燃料的，当煤粉喷入炉膛中，就以细颗粒火团的形式进行燃烧，充分释放热能。燃烧后的灰渣，因原煤灰分含量不同，一般占原煤质量的15%~40%。普通煤粉锅炉的灰渣有两种形态：一种是从排烟系统中用除尘设施收集下来的细粒灰尘，叫作粉煤灰或飞灰，为灰渣总质量的70%~85%，其中包括一些极细的颗粒，这些颗粒经烟囱口排入大气中，集尘设备效率越低，飞逸的极细颗粒越多；另一种是在炉膛黏结起来的粒状灰渣，叫作炉底灰或灰渣，这些灰渣落入锅炉底部，有的结成大块，经破碎从炉底排出，占灰渣总质量的15%~30%。此外，还有一些燃烧煤粉的锅炉，如液态排渣炉，由于其炉膛燃烧温度较高，部分灰渣熔融成液体状态的熔渣，下落到炉底，被水骤冷，结成玻璃态的渣粒，叫作液态渣。液态炉的液态渣和粉煤灰分别为40%、60%。另外，还有一种“旋风炉”，其炉膛燃烧温度比液态炉设计要高，所以熔融的液态渣的比例可以高达75%~85%，而粉煤灰仅有15%~25%。火电厂的粉煤灰、炉底灰、液态渣，再加上老式锅炉如链条炉等炉排上收集下来的煤渣，统称为“电厂灰渣”，如果再包括其他工厂的煤炭灰渣，则统称为“燃煤灰渣”，其中粉煤灰是一种自然界所不存在的而由人工过程产生的粉状矿物质资源。

在锅炉操作时，煤粉与高速气流混合在一起，喷入炉膛的燃烧带中，使煤粉颗粒里的有机物质得到充分的燃烧，但燃烧的完全程度取决于锅炉效率和操作水平。运行良好的现代化电厂的煤粉炉炉膛最高温度可以达到或超过1600℃。在这样的温度下，足以使灰分中除了少量石英(细粒的结晶)以外的所有矿物全部熔融。可是多数旧电厂锅炉的实际燃烧温度要比上述温度低得多，在较低的温度下，只能熔融一小部分的无机物质。而且炉膛温度并不是十分均匀的，也就是说，即使在同一台锅炉中，粉煤灰烧成的条件也不完全相同，更不必说不同的锅炉了。

在燃烧过程中，煤炭中的无机杂质发生了一系列的反应和变化，含水的矿物如黏土、石膏等一一脱水，碳酸盐中的二氧化碳与硫化物中的二氧化硫和三氧化硫排出，还有碱在高温下挥发。其中，较细的粒子随气流掠过燃烧区，立即熔融，到了炉膛外面，受到骤冷，就将熔融时由于表面张力作用形成的圆珠的形态保持下来。成为玻璃微珠。煤粉的粒子越细，越容易成球。其中有些熔融的微珠内部，截留了炉内气体，形成了空心微珠。另有一些微珠，团聚在一起或粘连在一起，就形成鱼卵状的复珠(子母珠)和粘连体。可是也有一些来不及完全变成液态的粗灰，结果变成了渣状多孔玻璃体(海绵状玻璃)。在冷却过程中，还有一些冷却比较缓慢而再结晶的矿物以及在颗粒表面上生成的结晶矿物和化合物，还有一些独自存在的未熔融的石英矿物。此外，从化学成分来看也不是均匀的，所谓的粉煤灰化学成分分析，只能表示粉煤灰中各种颗粒混合物的化学成分平均值。换言之，按单个颗粒而言，化学成分是有很大差异的。

总之，粉煤灰实际上是一些矿物组成不同、粒径粗细不同、颗粒形态不同、各种颗粒组合的比例不同的机械混合物。粉煤灰的“先天不足”正是由于这种不均匀性、差异性和多变性造成的。从应用角度而言，受到充分燃烧最终形成的玻璃微珠含量越多越好。

1.2 粉煤灰的危害

由于多方面的原因，我国的粉煤灰利用率还比较低，大部分还是储存在灰场，仍有少量粉煤灰飘入大气之中。政策规定不允许向江河湖海排放粉煤灰，但是由于排灰设施不够完善和存在管理方面的问题，仍有少量粉煤灰连同灰水流入水体。这些都对环境构成污染源，造成多方面的危害。

(1) 储灰占地，污染土壤

土地是农业生产的重要基地和物质基础，它不仅向人类供给资源和能源，同时还接纳经过开采、加工、调配、消费后的水、气、固体物等各种废弃物。土地是人们赖以生存的最基本的元素，是极其宝贵的自然资源。

据统计到 2012 年为止，我国土地资源总面积为 144 亿亩(1 亩=666.7m²，下同)，具有如下主要特点：a. 山地多(含丘陵，占土地总面积的 2/3)，平地少(占 1/3)；b. 较难利用的沙漠、戈壁、高寒荒漠、石山和冰川以及永久积雪地的面积较广，约占土地总面积的 18%；c. 在可供农用的土地中，草地比例最大(占土地面积的 41.58%)，林地次之(占 17.95%)，耕地最少(仅占 14.21%)；d. 耕地质量不高(高产田不及 1/3)，退化严重，可耕地的后备资源少。由于电厂遍布全国各地，又多建于城市或市郊，因此不少储灰场占用了大量的可耕地，并且对周围的土壤造成了污染。

粉煤灰对土壤的污染，除了直接侵占污染外，并通过水、空气进行扩散污染。

1) 通过水体污染 我国的粉煤灰多以水冲形式输送或排放，灰中的可溶物和不溶颗粒，无论是从储灰场溢出，还是排入小溪汇入江河，最终又被灌溉进入土壤，从地表向下渗透。其中的微量元素、重金属及少量放射性元素等有害成分，随之扩散、迁移、积累，有时还有可能污染地下水。如果超过标准限量，则会转移到农作物、庄稼、蔬菜、水果等食品中，危害人们的健康。

2) 通过大气污染 在收尘设备运行过程中，粒径小于 10 μ m 的粉煤灰很难被收尘器所捕集，常常随烟道气排放至空气中，随着空气的流动飘逸扩散；储入灰场的粉煤灰在干燥状态时，若未经表面团化处理，也会随风飞扬，这些颗粒会逐渐落至地面，污染土壤表层。与粉煤灰同时生成的二氧化硫、氮氧化物等气体，随着雨、雪等落至地面，也污染土壤。

(2) 污染大气

洁净的空气是维持生命的重要因素，人们呼吸新鲜的空气甚至比水和食物还重要。

我国的燃煤电厂，由于除尘器的运行状态各不相同，每年都有数百万吨粉煤灰排放到大气中，造成了大气粉尘污染。粉煤灰即使储入灰场灰堆，表面因水分蒸发而干燥，若有四级以上的风力、阵风，即可剥离 1~1.5cm 厚的灰层，将粉煤灰高高吹起达 20~50m，造成局部地区的大气污染^[5]。悬浮于大气中的粉煤灰，能散射和吸收阳光，减弱太阳对空气和物体的照度，使物体与其背景反差减小，从而降低能见度。能见度的降低，不仅影响环境美观，而且对空航、船航、行车以及各种工作造成恶劣影响。

粉煤灰中的颗粒物在空气湿度较大时，对金属表面有腐蚀作用，还会侵蚀和沾污建筑物、雕塑制品、涂料表面以及衣着服装等。

弥散于空气中的粉煤灰颗粒物对动物和人类的毒害更为严重。粒径大于 10 μ m 的颗粒，

几乎都可以被鼻腔和咽喉所捕集，不进入肺泡。粒径 $10\mu\text{m}$ 以下的颗粒对人体危害大，其危害程度，除受人的呼吸次数和呼吸量影响外，还与颗粒大小有密切关系。粉煤灰颗粒物不仅使上呼吸道的慢性炎症发病率提高，还使呼吸道及肺部的各种防御功能相继破坏，人体抵抗力逐渐下降，对疾病感染的敏感性加大。这时微生物的侵袭便向细支气管和肺泡发展，继而诱发慢性阻塞性肺部疾病隐患以及继发性感染症，不断增加心肺负担，使肺泡的换气功能下降，血管的阻力增加，肺动脉压力上升，最后右心室肥大，右心功能不全而导致肺心病。

(3) 污染水体，浪费水资源

水是一切生命有机体的重要组成部分，人体中水占 70%，没有水就没有生命。水又是生态系统中使能量流动与物质循环的介质，对调节气候和净化环境起着重要作用。因此，水是人类生产、生活的重要资源，水与人类的生存与发展休戚相关。

目前我国的燃煤电厂，由于储灰设施不够完善，粉煤灰利用率又不高，尚有不少粉煤灰连同冲灰水的排放而排入水体，成为水泵中的一个重大污染源。

粉煤灰连同冲灰水一起进入水体，形成沉积物、悬浮物、可溶物，造成各种危害。实验证明如果向流量为 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的江河中排放 1000t 粉煤灰，水的浊度将增加 6 倍，流经 500km 处，水体中都能检测出粉煤灰。水浊度的增加，会减少水体中绿色植物的阳光，堵塞滤池，覆盖鱼的巢穴，妨碍鱼的产卵、觅食等，危害水生动植物的生长和繁殖。作为工业用水，由于浊度增加，会腐蚀涡轮、水泵、管道等设备。颗粒较大的粉煤灰进入水体后，逐渐沉积，会提高水体床面，影响河流、湖泊、水库的正常功能，甚至堵塞航道，造成危害。

我国大部分电厂采用湿排灰工艺，输送或排放 1t 粉煤灰，约需 2t 水，每年约消耗排灰水 $1.1 \times 10^9\text{t}$ 以上。为了排灰，不仅浪费了大量的水，而且消耗了大量的电能^[6]。

国内外无数事实证明，环境污染实质上大多数是由于资源和能源的浪费所致，大量的能源和资源，用之为宝，弃之则为害。粉煤灰同其排灰水的任意排放所造成的危害即是明显的例证。

1.3 粉煤灰综合利用的重要意义

我国是一个产煤大国。以煤炭为电力生产基本燃料的国策在长时间内不会改变。近年来，我国的能源工业稳步发展，发电能力年增长率约为 7.3%。每燃烧 1t 原煤，能产生粉煤灰 250~300kg，还有 20~30kg 炉渣。无论是煤粉炉、链条炉，还是沸腾炉，灰渣排放总量约为燃煤总量的 1/3。每发 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 的电，需标准煤约 300g，产生粉煤灰约 100g。燃煤发电机组，1kW 的装机容量，年排放粉煤灰 1t 左右。电力工业的迅速发展，带来了粉煤灰排放量的急骤增加。燃煤热电厂每年所排放的粉煤灰总量逐年增加，1995 年粉煤灰排放量达 $1.25 \times 10^8\text{t}$ ，到 2000 年达到约 $1.53 \times 10^8\text{t}$ 。2009 年我国煤炭产量在 $3.01 \times 10^9\text{t}$ 左右，排灰量约为 $4.5 \times 10^8\text{t}$ 。2014 年粉煤灰产量大约为 $5.5 \times 10^8\text{t}$ 。2015 年全国粉煤灰产生量达到 $5.7 \times 10^8\text{t}$ 。国际环保组织绿色和平在北京发布《煤炭的真实成本——2010 中国粉煤灰调查报告》指出：“中国所面临的粉煤灰问题的规模在全世界都是绝无仅有的，粉煤灰是火力发电的必然产物，每消耗 4t 煤就会产生 1t 粉煤灰。中国的火电装机容量从 2002 年起呈现出爆炸式的增长，因此，粉煤灰排放也在过去 8 年内增长了 2.5 倍，绿色和平在粉煤灰样品中还

检测出 20 多种对环境和人体有害的物质,其中包括可能导致神经系统损伤、出生缺陷甚至癌症的重金属。按照报告的估算,中国每年约有 $2.5 \times 10^4 \text{t}$ 的镉、铬、砷、汞和铅这五种国家重点监控的重金属随粉煤灰的排放进入到自然环境中。绿色和平针对部分火电厂灰场附近的地表水和地下井水的检测也显示出多种有害物质的浓度超过了国家的相关标准。在调查的 14 家火电厂中,大多数灰场的选址和防扬散、防渗漏、防流失措施远不足以达到有效防治粉煤灰环境污染的目的。粉煤灰中的有害物质已不可避免地污染了周围的土壤、空气和水,不仅威胁到附近居民的身体健康,还会通过食物链危害到更大的公众群体。”^[7]由此可见,粉煤灰问题不仅造成了资金和土地资源的浪费,更重要的是造成了严重的大气污染、土壤污染和水资源污染,危害人类的健康。

粉煤灰是一种放错地方的资源,我国是一个人均占有资源储量很有限的国家,而粉煤灰可以作为一种再生资源却成为了污染环境和危害人类健康的废弃物,没有得到有效利用,这是可持续发展中必须解决的资源回收利用问题。

粉煤灰可用作水泥、砂浆、混凝土的掺合料,并成为水泥、混凝土的组分,粉煤灰可作为原料代替黏土生产水泥熟料,制造烧结砖、蒸压加气混凝土、泡沫混凝土、空心砌砖、烧结或非烧结陶粒,铺筑道路;构筑坝体,建设港口,用于农田坑洼低地、煤矿塌陷区及矿山的回填;也可以从中分选漂珠、微珠、铁精粉、碳、铝等有用物质,其中漂珠、微珠可分别用作保温材料、耐火材料、塑料、橡胶填料。因此开展粉煤灰的综合利用,变废为宝、变害为利,已成为我国经济建设中一项重要的技术经济政策,是解决我国电力生产与环境污染、资源缺乏之间矛盾的重要手段,也是电力生产所面临解决的任务之一。

参 考 文 献

- [1] 李策镛. 我国粉煤灰资源利用现状趋势及根本出路. 建筑节能, 1993 (1): 34-37.
- [2] 俞海勇. 粉煤灰颗粒群特征及其与混凝土性能关系的研究. 上海: 同济大学, 2002.
- [3] 卢国懿, 薛峰, 赵江涛. 对我国粉煤灰利用现状的思考. 中国矿业, 2011 (S1): 193-195.
- [4] 宋益庆, 张捷, 孙海峰. 粉煤灰的资源化利用. 黑龙江环境通报, 2004, 28 (3): 31-32.
- [5] 雒昆利, 张新民, 陈昌和, 等. 我国燃煤电厂砷的大气排放量初步估算. 科学通报, 2004, 49 (19): 2014-2019.
- [6] 兰青. 轻质高强高掺量粉煤灰双免砖的研制. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [7] 董金发. 粉煤灰堆场遥感信息提取研究. 北京: 中国科学院大学, 2013.