



煤基固废资源化 利用技术原理及工艺

程芳琴 主 编

廖洪强 郭彦霞 副主编



科学出版社

煤基固废资源化利用 技术原理及工艺

程芳琴 主 编
廖洪强 郭彦霞 副主编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在低碳环保和资源循环利用的时代背景下,为满足广大读者的需要编著而成。全书系统总结了前人研究成果和作者多年来的科研积累,侧重从基本原理和工业生产技术与设备等方面进行系统编著。内容主要包括:煤基固废的产生、分类与理化特性分析,煤矸石制备煅烧高岭土技术原理与工艺,粉煤灰建材化利用原理及工艺,煤矸石/粉煤灰化工提取技术原理及工艺,粉煤灰在农业领域的利用以及煤基固废资源化利用新技术发展趋势等。

本书围绕煤基固废(煤矸石、粉煤灰)的利用途径,系统阐述了其资源化利用的技术原理和工艺设备,收集了大量试验数据和生产运行数据,附有基本原理图、工艺流程图、设备装置图,以科学性、实用性为原则,深入浅出,可供大专院校相关专业师生科研指导和学习使用,以及化工、电力、冶金、建材、环保以及资源综合利用等行业领域内从事科学研究、技术开发、工程设计、生产管理等方面的人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

煤基固废资源化利用技术原理及工艺/程芳琴主编. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-050383-1

I. ①煤… II. ①程… III. ①煤炭工业—废物综合利用 IV. ①X752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 261958 号

责任编辑:霍志国 李 洁/责任校对:张小霞

责任印制:张 伟/封面设计:东方人华

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第一版 开本:720×1000 B5

2016年11月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:406 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

循环经济研究在中国正方兴未艾。近十年来，我国循环经济从理论到实践都取得了重大进展，特别是在重点行业和领域取得了较好的经济和环境效益，在缓解资源约束、保护生态环境、应对气候变化、扩大就业范围、促进绿色转型、建设生态文明等方面发挥了重要作用。

《煤基固废资源化利用技术原理及工艺》一书体现了资源的综合利用，符合循环经济的发展方向。该书通过分离科学与工程、化学工程、环境科学与工程、热能工程、材料科学与工程等多学科的交叉，针对粉煤灰和煤矸石等煤基固废凸显的区域性产出量大与消耗量小的不平衡矛盾问题，在系统阐述粉煤灰和煤矸石的理化特性基础上，从规模化消纳角度出发，总结了煤基固废建材化利用技术原理及其工艺，包括煤基固废制备建筑墙体材料、复合水泥、地面材料、保温材料等；从高值化利用角度出发，提出了煤基固废化学提取及超微粉化利用技术原理及其工艺，包括煤基固废提取氧化铝、氧化硅等化工原料，煤基固废超微粉化制备橡塑填料、粉末涂料等。相关工作属于学科交叉创新的典范，具有重要的理论意义和现实意义。

山西大学程芳琴教授科研团队长期致力于煤炭废弃物资源化综合利用科学研究和技术开发，先后与北京大学、清华大学、中国科学院过程工程研究所、北京科技大学、中国矿业大学等高校和科研院所及相关企业进行协同创新，相关成果得到了国内外同行的肯定。编写组成员在程芳琴教授的带领下，对国家“863”计划项目、国家自然科学基金项目、山西省科技计划（重大）项目、山西省煤基重点科技攻关项目的研究成果进行了总结与凝练，这本著作正是该团队众多科研人员的智慧结晶。

该书内容丰富，体系完整，结构紧凑，逻辑严密，图文并茂，理论与实践相结合，原理与工艺相匹配，不仅是学科交叉最新科研成果的展示，更是近年来煤基固废高值化利用领域不可多得的集成之作、创新之作。

中国工程院院士、清华大学教授



2016年9月

前 言

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，在煤炭开采、加工及利用过程中产生了大量的煤基固体废弃物，2014年我国煤炭洗选过程产生煤矸石3.73亿吨，火力发电产生粉煤灰约4.59亿吨，但综合利用率不到50%，未利用的煤基固废大量堆存，造成了严重的环境污染与生态破坏。另外，我国人均资源匮乏，资源短缺已成为制约我国经济社会可持续发展的主要瓶颈。煤炭中蕴藏十分丰富的铝、锂、镓、锗、钒等伴生元素，其中锂、镓分别被称为“能源金属”、“电子工业的粮食”，广泛应用于航天、电子、能源等领域，潜在经济价值巨大。煤炭加工利用过程中，上述伴生元素在废弃物中进一步富集，已具备资源化提取的基本条件。固废资源化已成为继原生矿产开发、国际市场进口之后的“第三种资源供给渠道”。

山西是我国重要的能源化工基地，煤基产业是山西的主要经济支柱之一，在经济新格局不断调整的形势下，煤基产业面临严峻的生产方式转变与效益增长压力，寻求新兴产业经济增长点迫在眉睫。煤基固废资源化高效利用作为发展循环经济的重要载体和有效支撑，是解决可持续发展中资源短缺和污染防治这两个关键问题的根本途径，也是调结构、惠民生的战略性新兴产业的重要组成部分。因此，发展煤基固废资源化利用技术是山西乃至我国可持续发展的重要途径。实现煤基固废资源化利用是煤基产业可持续发展的必然选择。

目前，在煤基固废资源化利用方面无论是技术还是人才均极度匮乏，缺乏全面、系统的参考书和教科书以供研发人员、工程技术人员以及创新型人才的培养学习和参考。近年来，山西大学与中国科学院过程工程研究所、清华大学、北京科技大学、山西平朔煤矸石发电公司、朔州市固废综合利用工业园区等国内诸多高校、科研院所和企业协同攻关，在煤炭废弃物资源化利用方面开展了大量的研究，在煤基固废制备保温材料、类沸石、功能涂料、有价元素梯级提取等方面积累了一定的研究成果，为煤基固废资源化利用技术的开发及工业化实施提供了支撑，也为本书的编写提供了思想源泉。

《煤基固废资源化利用技术原理及工艺》系统阐述了煤基固废在建材化、化工提取、农业领域等利用方面的技术原理、工艺及设备，总结了各种利用途径的技术工艺现状及发展趋势，可供相关领域的科研人员及生产和管理人员参考使用，也可作为高等学校环境科学与工程、资源循环科学与工程等专业的本科生、研究生的参考书。

本书由程芳琴组织编写，各章编写分工为：第1章由马志斌编著；第2章由

程芳琴、高峰编著；第3章由廖洪强、宋慧平编著；第4章由郭彦霞、高建明、程芳琴编著；第5章由程芳琴编著；第6章由廖洪强编著。统稿由程芳琴、廖洪强、郭彦霞完成。

本书编写过程中，受到了各方大力支持，得到山西国际能源集团公司（格盟国际）首席专家张培华教授级高工、太原理工大学高峰教授、中国矿业大学王栋民教授的支持和建议，并参与进行了补充修改。在资料收集、文字整理等方面，得到了中国科学院过程工程研究所李会泉研究员、清华大学向兰教授、北京科技大学张梅教授等的大力支持。由张金才、张丽宏、崔莉、曹丽琼、燕可州、柳丹丹等老师和相关研究生对文字进行修改校对。在此，一并表示感谢。

本书承清华大学金涌院士指导并作序，对书稿进行了认真、细致的审阅，并提出了很多宝贵的意见和建议，在此深表谢意！

本书在编写过程中参考和引用了众多参考文献，对相关期刊和作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。



2016年9月

目 录

序	
前言	
第 1 章 煤基固废的产生、分类与理化特性分析	1
1.1 煤基固废的产生与分类	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 煤矸石的产生及分类	1
1.1.3 粉煤灰的产生及分类	2
1.2 煤基固废的组成及理化特性	6
1.2.1 煤矸石的组成及理化特性	6
1.2.2 粉煤灰的组成及理化特性	12
1.3 煤基固废的分析方法	19
1.3.1 煤矸石的工业分析	19
1.3.2 煤矸石中有机质的元素组成	23
1.3.3 煤矸石的发热量测定	26
1.3.4 粉煤灰的化学组成	26
1.3.5 粉煤灰的烧失量	28
1.3.6 粉煤灰的物相分析	28
1.3.7 粉煤灰的高温熔融特性	29
1.3.8 粉煤灰的粒度分布测定	31
参考文献	32
第 2 章 煤矸石制备煅烧高岭土技术原理与工艺	35
2.1 概述	35
2.2 高岭石质煤矸石煅烧技术原理	36
2.2.1 高岭石质煤矸石煅烧处理的意义	37
2.2.2 煅烧反应的分类	37
2.2.3 高岭石质煤矸石煅烧的技术原理	37
2.3 影响煤矸石煅烧产品质量的因素及其控制	49
2.3.1 原料品质的影响及其控制	49
2.3.2 粒度的影响及其控制	49
2.3.3 煅烧工艺条件的的影响及其控制	50

2.4	煅烧煤系高岭土温度区域的划分	56
2.5	煤系高岭土的煅烧工艺及选择	58
2.6	煅烧设备分类及选型	61
	参考文献	71
第3章	粉煤灰建材化利用原理及工艺	72
3.1	粉煤灰活性及活性激发原理与方法	72
3.1.1	粉煤灰活性	72
3.1.2	粉煤灰活性的影响因素	74
3.1.3	粉煤灰活性的测定方法	75
3.1.4	粉煤灰活性的激发方法	77
3.2	粉煤灰制备高强砖和砌块技术原理及工艺	84
3.2.1	蒸压粉煤灰砖	84
3.2.2	蒸压粉煤灰多孔砖	93
3.2.3	烧结多孔砖和多孔砌块	94
3.2.4	彩色透水路面砖	99
3.3	粉煤灰制备高性能水泥、混凝土和砂浆的技术原理及工艺	103
3.3.1	粉煤灰硅酸盐水泥	103
3.3.2	高性能粉煤灰混凝土	110
3.3.3	高性能粉煤灰砂浆	129
3.4	粉煤灰制备多孔保温建筑材料技术原理及工艺	140
3.4.1	泡沫混凝土	140
3.4.2	蒸压加气混凝土砌块	163
3.4.3	蒸压泡沫混凝土与蒸压加气混凝土的区别	172
3.4.4	保温板	174
3.4.5	保温隔热涂料	187
3.5	粉煤灰制备矿棉技术原理及工艺	199
3.5.1	概述	199
3.5.2	粉煤灰矿物纤维棉的基本原理及其影响因素	201
3.5.3	粉煤灰矿棉的制备工艺及设备系统	214
3.5.4	粉煤灰矿棉生产技术的发展趋势——无焦熔制技术	235
3.5.5	粉煤灰矿棉制品简介	236
	参考文献	238
第4章	煤矸石/粉煤灰提取氧化铝	242
4.1	概述	242
4.1.1	煤矸石/粉煤灰提取氧化铝政策支持	242

4.1.2	煤矸石/粉煤灰提取氧化铝国内外现状	243
4.1.3	煤矸石/粉煤灰提取氧化铝存在问题及展望	244
4.2	粉煤灰/煤矸石提取氧化铝基本原理	245
4.2.1	粉煤灰、煤矸石物相结构及其活性激发	245
4.2.2	氧化铝提取	254
4.2.3	铝盐分离和除杂	256
4.2.4	除铁	260
4.3	粉煤灰/煤矸石提取氧化铝工艺	266
4.3.1	碱烧法提取氧化铝	267
4.3.2	酸法提取氧化铝	281
4.3.3	硫酸铵烧法	285
4.4	常用设备	287
4.4.1	破碎设备	287
4.4.2	煅烧设备——回转窑	292
4.4.3	溶出设备	293
4.4.4	过滤设备	296
	参考文献	300
第 5 章	粉煤灰在农业领域的利用	303
5.1	粉煤灰用作土壤改良剂	303
5.2	粉煤灰用作农用肥料	304
5.2.1	粉煤灰中化学元素对植物生长发育的功效和作用	304
5.2.2	粉煤灰肥料的种类和施用效果	305
5.2.3	粉煤灰磁化复合肥的制备原理	307
5.2.4	粉煤灰磁化复合肥的制备工艺	308
5.3	粉煤灰在农业领域应用的注意事项	310
	参考文献	311
第 6 章	煤基固废资源化利用新技术趋势	312
6.1	煤基固废超微粉化新技术	312
6.1.1	超音速蒸汽粉碎技术原理	312
6.1.2	超音速蒸汽粉碎技术工艺流程	313
6.1.3	超音速蒸汽粉碎技术特点及优势	313
6.1.4	超音速蒸汽粉碎技术粉碎效果及其影响因素	314
6.1.5	超音速蒸汽粉碎技术发展趋势及应用前景	314
6.2	粉煤灰超微粉制备塑化复合生态木板材	315
6.2.1	技术背景与发展趋势	315

6.2.2	技术原理及工艺流程	316
6.2.3	配方设计	316
6.2.4	技术发展趋势及产品应用前景	317
6.3	煤基固废超微粉制备粉末涂料新技术	317
6.3.1	技术背景	317
6.3.2	粉末涂料的原材料	318
6.3.3	生产原理及工艺过程	318
6.3.4	主要生产设备	320
6.3.5	粉末涂料质量控制	320
	参考文献	321

第 1 章 煤基固废的产生、分类与理化特性分析

1.1 煤基固废的产生与分类

1.1.1 概述

煤基固废主要包括在煤炭开采与加工利用过程中产生的煤矸石、粉煤灰、煤气化灰渣和煤液化残渣等固体废弃物。我国富煤、贫油、少气的能源特点决定了未来相当长的时期内以煤炭为主的能源格局将不会改变。据统计,在煤炭开采与加工利用过程中产生的煤矸石等煤基固废的年排放量超过 10 亿吨,占我国工业固体废弃物年排放总量的 50% 以上。这些煤基固废的大量堆存不仅占用了大量土地,而且其淋溶水渗透到地下,污染了土壤和地下水,而其地表径流则严重污染了地表水体。另外,煤矸石自燃时释放出大量的 SO_2 、 NO_x 和 CO 等有害气体,造成了严重的环境污染,给人类造成了严重危害。本章主要介绍典型的煤基固体废弃物煤矸石和粉煤灰的产生及特性。

1.1.2 煤矸石的产生及分类

煤矸石又称为矸石,从狭义上讲,煤矸石是指煤炭开采过程中夹带的碳质泥岩和碳质砂岩;从广义上讲,煤矸石是指在煤矿建井和生产过程中排出的混杂岩体,主要包括在煤矿井巷掘进时排出的矸石、露天煤矿开采时剥离的矸石和洗选加工过程中排出的矸石。按照来源划分,煤矸石大致可以分为三类:第一类为在正常生产阶段,由井筒、大巷、井下车场及矿井等掘进过程中所排出的掘进矸石,大概占煤矸石总量的 70% 左右;第二类为在采煤过程中产生的采煤矸石,大概占煤矸石总量的 20% 左右;第三类为在煤炭洗选加工期间所产生的洗选矸石,大约占煤矸石总量的 10% 左右。目前我国规模较大的煤矸石山约有 1600 座,占用土地约 1.5 万公顷,目前煤矸石堆存量约 45 亿吨,而且每年以 1.5 亿吨的速度增加。

煤矸石的岩石种类主要包括砂岩类、黏土岩类、铝质岩类和碳酸岩类。煤矸石中的主要矿物成分有高岭石、绿泥石、伊利石、蒙脱石和多水高岭石等。

1.1.3 粉煤灰的产生及分类

1.1.3.1 粉煤灰的来源及形成过程

粉煤灰是从燃煤烟气中收捕下来的细灰，是燃煤电厂中排出的主要固体废弃物(粉煤灰在燃烧器内的形成经过见图 1-1)；主要来源于以煤粉为燃料的火电厂和城市集中供热的燃煤锅炉。随着电力工业的快速发展，燃煤电厂粉煤灰的排放量逐年增加，大量粉煤灰如不加处理，就会产生扬尘，污染环境；若将其排入水系则会造成河流淤塞，而且其中的有毒有害化学物质还会对人体及其他生物造成严重危害。因此，为了更好地保护环境，并使粉煤灰可以被高效综合利用，干灰收集已逐步取代湿排灰成为今后粉煤灰收集的发展趋势。

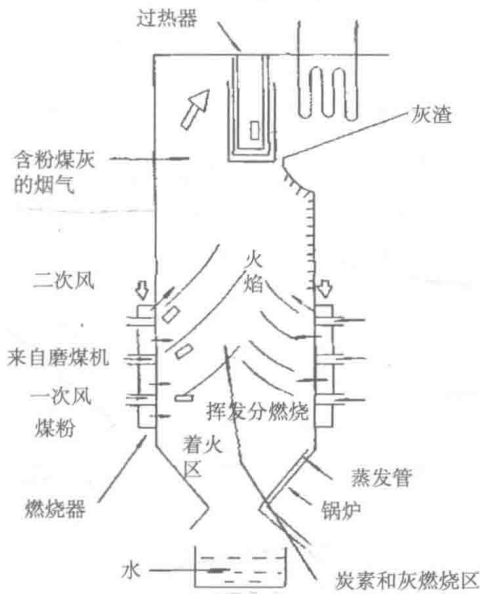


图 1-1 粉煤灰在燃烧器内的形成经过示意图

粉煤灰的形成过程主要分为如下三个阶段，如图 1-2 所示。

第一阶段：煤开始燃烧阶段，易挥发组分首先从矿物质与固定碳连接的缝隙间不断逸出，使煤颗粒变成多孔型炭颗粒。此时的煤炭颗粒状态基本保持原煤粉的不规则碎屑状，但因其具有多孔性，所以其表面积比较大。

第二阶段：随着燃烧温度继续升高，煤炭颗粒中的有机质完全燃烧，其中的矿物质也将脱水、分解、氧化成为无机氧化物，此时的煤粉颗粒变成多孔烧结体，尽管其形态大体上仍维持与第一阶段中的多孔炭粒相同，但比表面积却明显地小于多孔炭粒。

第三阶段：随着燃烧进一步进行，多孔玻璃体逐渐熔融收缩而形成球体，粒径不断变小，孔隙率不断降低，最终变为密度较高、粒径较小的密实球体，颗粒比表面积下降为最小并随气流逸出，收集形成了粉煤灰。粉煤灰粒子的构成和沉积机理如图 1-3 所示。

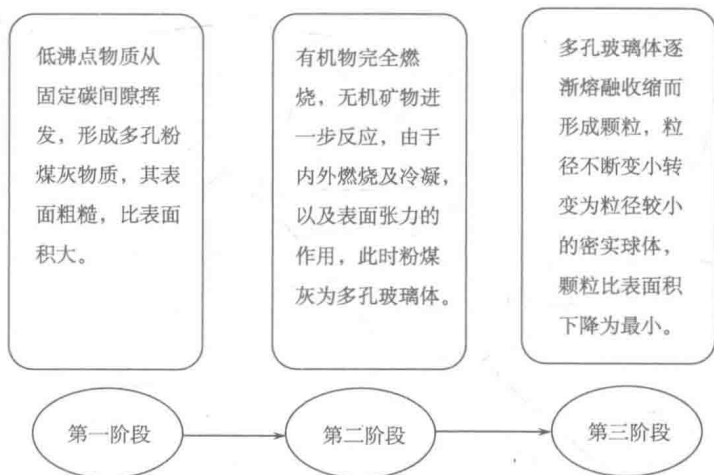


图 1-2 粉煤灰的形成过程

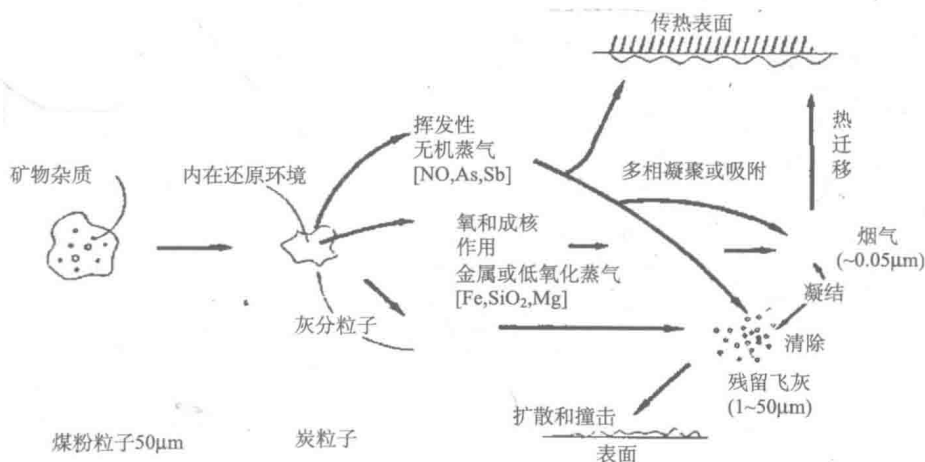


图 1-3 粉煤灰粒子的构成和沉积机理图解

1.1.3.2 粉煤灰的分类

1) 从岩石学角度对粉煤灰的显微组分进行分类

从岩石学角度，粉煤灰可分为无机组分和有机组分两类。无机组分来源于煤中赋存的矿物质，而有机组分则来源于未燃尽的煤粒（残炭）。无机组分主要包括

玻璃微珠、磁铁微珠、不定形颗粒、碎屑石英和莫来石；有机组分则主要包括未燃尽的残炭和未变化或变化不明显的煤粒两大类。

2) 按照粉煤灰的成分和微观形貌特征分类

按照粉煤灰的成分和微观形貌特征，粉煤灰可以分成低铁质玻璃微珠（空心微珠、实心微珠）、高铁质玻璃微珠（磁珠）、高钙玻璃微珠、不规则多孔玻璃体和未燃尽炭粒等颗粒类型，具体见表 1-1 所示。这些不同的颗粒是由粉煤中的不同晶型矿物燃烧而成。粉煤灰颗粒不均匀性的一般示意图如图 1-4 所示。

表 1-1 粉煤灰中颗粒的分类和特征

颗粒类别和名称	颗粒形貌和结构	粒径/ μm	
球状颗粒	漂珠	薄壁空心球状，壁厚约为直径的 10%，壁上常有孔洞	30~100
	空心沉珠	厚壁的空心球状玻璃体，壁厚约为直径的 30%	30~80
	复珠	鱼卵状空心玻璃珠，壳内有大量的微珠和碎屑	100~200
	密实微珠	实心的玻璃微珠，表面光滑、颜色差异较大	<45
	富铁微珠	暗色微珠	<45
渣状颗粒	海绵状玻璃渣	海绵状的不规则多孔颗粒	30~200
	炭粒	多孔球状	30~250
	钝角颗粒	未熔融或部分熔融颗粒，主要成分为石英	50~250
	碎屑	各种颗粒的碎屑	<30
	黏聚颗粒	各种颗粒的黏聚体	50~250

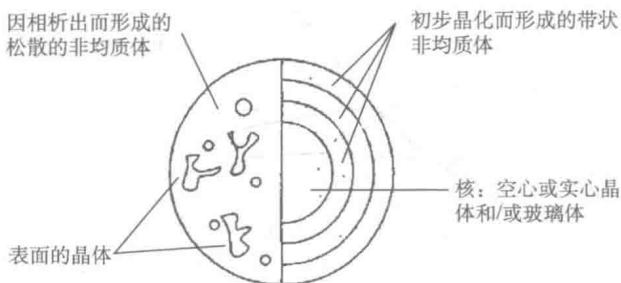


图 1-4 粉煤灰颗粒不均匀性的一般示意图

3) 按电厂锅炉的排渣形式将粉煤灰分类

(1) 普通粉煤炉固态排渣粉煤灰

沸腾炉是我国火力发电厂的主要炉型之一，也是固态排渣煤粉锅炉的代表。该类锅炉煅烧的主要燃料是煤粉，煤粉在 1000~1200℃左右燃烧后约 95%为粉

煤灰, 5%为炉渣(粗颗粒的粉煤灰)。一般情况下, 这类电厂粉煤灰的存放方式主要有干法和湿法两种方式。干法就是电除尘将粉煤灰回收后自动分级(或不分级), 然后分别存放在粉煤灰库内; 湿法则是通过管道用水将除尘器回收的粉煤灰(包括部分渣)冲到一个指定的大池子中。近几年新建的大型电厂大多采用干法存放。干法储存的粉煤灰, 尤其是1~2级灰, 活性较高, 比表面积通常 $>400\text{m}^2/\text{kg}$, 目前此类粉煤灰的利用率几乎达到100%, 该类粉煤灰主要用于配制高性能混凝土、路基材料、粉煤灰水泥和制品等。多数的中小电厂则采用湿法储存, 该方法由于粉煤灰不分级, 甚至与灰渣混合, 因此颗粒较粗, 而且由于该类粉煤灰长期浸泡于水中, 所以活性很低。

(2) 液态排渣锅炉粉煤灰

这种炉型的燃料主要也是煤粉, 煤粉在 $1200\sim 1400^\circ\text{C}$ 或更高的温度下成灰。为了降低粉煤灰的熔点, 常在煤中尤其是高硫煤中掺加少量石灰石燃烧。通常做法是在磨煤时就加入约8%~12%的石灰石。这种方法简便且不会产生第二种废渣。成灰后约50%~60%以液态水淬渣排出, 另外的约40%~50%采用电除尘回收。这部分电除尘灰颗粒很细, 比表面积 $>600\text{m}^2/\text{kg}$, 活性较高。有些电厂为了深度脱硫和进一步降低粉煤灰中未燃尽炭的含量, 还采用飞灰重熔技术, 将一部分粉煤灰甚至将电除尘捕集的粉煤灰100%地再回炉造渣, 使渣的含量大大提高。

(3) 循环流化床锅炉粉煤灰

循环流化床锅炉是近期发展的主要炉型之一, 主要针对劣质煤(灰分含量 $\geq 30\%$)和煤矸石等燃料而设计。该炉型燃烧的是颗粒状的煤, 渣形成的温度一般为 $850\sim 950^\circ\text{C}$, 温度较低。循环流化床锅炉所形成的粉煤灰颗粒较粗, 粒径多数在 $0.5\sim 2\text{mm}$, 比表面积 $\leq 300\text{m}^2/\text{kg}$, 其活性也是所有干排灰中最低的。

4) 按粉煤灰的化学组分分类

粉煤灰中所含矿物质的化学成分和含量不同, 其利用领域和所制材料性能也有很大差异。依据其中所含化学成分, 粉煤灰被分为低钙灰、中钙灰、高钙灰、高铁灰和高碱灰, 具体的技术指标见表1-2。

表1-2 粉煤灰化学成分分类技术指标

种类	化学成分	性质
低钙灰	$\text{CaO} < 5\%$	活性低
中钙灰	$\text{CaO} = 5\% \sim 15\%$	活性高
高钙灰	$\text{CaO} > 15\%$	活性高, 安定性差
高铁灰	$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10\% \sim 20\%$	密度大
高碱灰	碱 $> 1.5\%$	易发生碱集料反应

1.2 煤基固废的组成及理化特性

1.2.1 煤矸石的组成及理化特性

1.2.1.1 煤矸石的化学组成

煤矸石中包含的元素种类繁多，化学成分复杂。工业应用中关注的煤矸石化学成分通常是煤矸石灰分中的化学组成。煤矸石灰分中的主要化学成分是氧化硅、氧化钙和氧化铝，另外还包括氧化铁、氧化镁、氧化钠、氧化钾以及磷、硫的氧化物和微量稀有金属元素，如钛、钒、钴、镓等。不同类别煤矸石灰成分分析数据如表 1-3 所示。

表 1-3 煤矸石的化学组成

矸石岩石类型	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	CaO/%	MgO/%
黏土岩类	24~56	14~34	1~7	0.5~9	0.5~6
砂岩类	53~88	0.4~20	0.4~4	0.3~1	0.2~2
钙质盐类	10~40	3~10	1~10	40~80	1~4
铝质盐类	40~55	35~45	0.2~4	0.1~0.7	0.1~1

此外，煤矸石中还含有硫化物、碳酸盐类混合物、溶水盐，以及硫、汞、砷、氟、氯等有害杂质和微量有害元素。煤矸石中的硫主要来源于其中所含的黄铁矿、硫铁矿、硫酸钙和闪锌矿；另外，也有部分游离状态的硫。黄铁矿有的呈层状，有的嵌在煤矸石中呈脉石状，有的呈细粉状。硫化物很容易被氧化生成二氧化硫，二氧化硫再经氧化并与空气中的水分作用后形成雾状硫酸，对煤矿周围的设备、建筑、人畜和植物造成严重危害。煤矸石中的硫酸盐主要以石膏、硬石膏和半水化合物的形式存在，属后生矿物质。

煤矸石中所含的碳酸盐类主要是方解石和菱铁矿，其次还有白云石和霞石等。这些矿物质如果研磨细度不够，熔烧后会变成石灰颗粒。吸湿后，这些颗粒的体积会膨胀，造成制品局部爆裂；但只要以很细的颗粒均匀分布在坯体中，则没有太大影响，且有利于制品的烧结。

另外，煤矸石中也包含了一些有害元素，即有毒元素、致癌元素、腐蚀性元素、放射性元素以及其他对环境有潜在危害的元素；这些元素从煤矸石向环境中迁移释放的难易程度互不相同。有害元素的环境危害性不仅与其含量有关，还与其赋存形态有关。微量元素的赋存形态决定了这些元素在其加工利用过程中释放的难易程度和毒性的大小。欧洲共同体参考物机构在 1993 年提出了 BCR 法，将

微量元素的赋存形态分为水溶态、可交换态与碳酸盐态，铁锰氧化态，有机物与硫化物三种形态。煤矸石中的微量元素既有无机结合态也有有机结合态。一般来说，当有害微量元素主要以有机结合态存在时，即微量元素参与到大分子结构中，以碳氢键结合时，微量元素一般不易淋滤出来；而当有害元素主要以无机态或吸附态结合的形式存在时，即与硫化物、硫酸盐、碳酸盐或其他化合物结合时，则在淋溶作用下，这些微量元素极易分解并进入淋溶液中。一般人们普遍认为以水溶态和可交换态形式赋存的微量元素活性较大，易被植物吸收。

1.2.1.2 煤矸石的矿物组成

表 1-4 给出了煤矸石典型的矿物组成。煤矸石在物相组成上是不均一的，在岩石的结构、构造上也各不相同。煤矸石的化学成分是依赖于岩石种类和矿物组成而变化的，因此，了解其岩石特征与矿物组成是很有必要的。

表 1-4 煤矸石中的主要矿物

矿物种类	矿物名称	化学式	说明
硅酸盐类矿物质	石英	SiO_2	
	长石类：正长石	KAlSi_3O_8	砂岩主要 矿物
	闪石类：普通角闪石	$(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+})_5[(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{11}]$	
	辉石类：普通辉石	$(\text{OH})_2\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})[(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$	
黏土主要矿物	高岭土类：高岭石	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10}) \cdot (\text{OH})_8$	黏土岩主要 矿物
	膨润土类：蒙脱石	$(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	
	水云母类：水白云母	$(\text{K}, \text{Al})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
碳酸盐主要矿物	方解石	CaCO_3	石灰石主要 矿物
	白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	
	菱铁矿	FeCO_3	
硫化物	黄铁矿	FeS_2	—
	白铁矿	FeS_2	
铝土矿	一水硬铝矿	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	铝质岩主要 矿物
	一水软铝矿	$\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$	
	三水铝矿	$\text{Al}(\text{OH})_3$	
其他矿物	石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	—
	磷灰石	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$	
	金红石	TiO_2	

煤矸石中所包含的矿物质主要有蒙脱石、石英、伊犁石、长石、石灰石、硫化铁和氧化铝等。随煤层位置不同，煤矸石中所包含的岩石主要有黏土岩石、砂