

原永涛 等著

火力发电厂电除尘技术



Chemical Industry Press

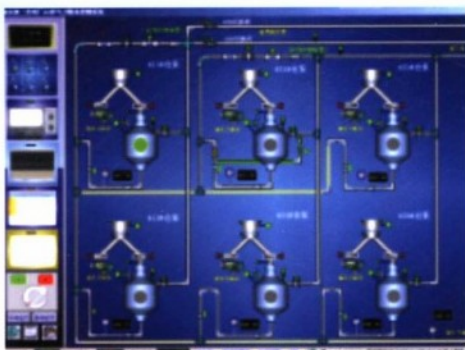
化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

国电南京自动化股份有限公司

环保事业部

国电南京自动化股份有限公司是中国华电集团所属的高科技上市企业，始建于1940年。公司于20世纪90年代成立环保事业部，进军环保领域。

主要从事静电除尘器电源控制系统的研发、生产，机电一体化环保工程的设计、制造、安装、调试及烟气在线监测、除灰渣控制系统集成。



■ QCK2000气力输灰、除渣控制系统

- 采用模块化及双机冗余设计，确保控制系统稳定可靠。
- 具有良好的可维护性和再开发能力。
- 人机界面友好，操作简单。
- 自动化程度高，可实现无人值守。

地址：南京市新模范马路38号

邮编：210003

电话：025-83421394-3630, 3632

传真：025-83478839

Email: fqwen@sac-china.com

网址: www.sac-china.com

ISBN 7-5025-6012-2



9 787502 560126 >



■ DKZ-2电除尘器电源及控制系统

- 国内率先采用多处理器并行处理设计，构建高起点、大资源硬件平台。
- 高、低压合一控制，有效改善电除尘器振打清灰效果。
- 脉冲供电方式，有效克服电除尘器反电晕工况，节约收尘电耗20%~80%。
- 闭环控制及专家在线诊断系统，确保系统工作在最佳状态，实现无人或少人值守。



PFM97烟尘测量仪

YLJ2000烟气排放连续监测系统(CEMS)

- 可测量烟尘浓度、SO₂和NO_x等多项烟气参数，数据存储时间长达五年以上。
- 采用PFM97烟尘测量仪，可直接测量烟气中粉尘的浓度(mg/m³)及温度、流速。
- 具备自动校准、自动清洁及自我诊断功能，有效降低维护费用和运行成本。

ISBN 7-5025-6012-2/TQ · 2055 定价：38.00元

销售分类建议：化工/能源技术
能源/能源技术

火力发电厂电除尘技术

原永涛 林国鑫 宣伟桥 卢泽锋 著



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·



(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

火力发电厂电除尘技术/原永涛等著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 8
ISBN 7-5025-6012-2

I. 火… II. 原… III. 火电厂-静电除尘器
IV. TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 075016 号

火力发电厂电除尘技术

原永涛 林国鑫 宣伟桥 卢泽锋 著
责任编辑: 任文斗
文字编辑: 闫 敏
责任校对: 李 林
封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982530
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{1}{4}$ 字数 419 千字

2004 年 10 月第 1 版 2004 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6012-2/TQ·2055

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换
京朝工商广临字 [2004] 年第 007 号

PDG

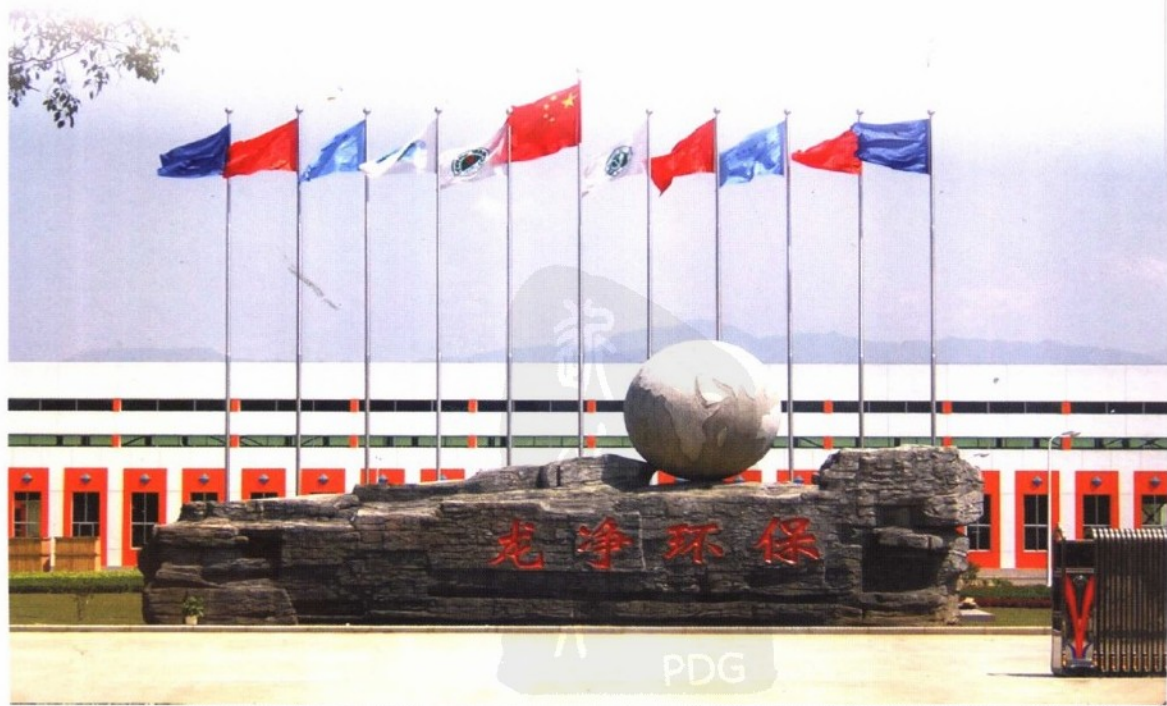
创一流上市公司 建百年龙净环保



地址：福建龙岩市陵园路81号
电话：0597-2206688 2293416
传真：0597-2290903 2229388
Http://www.longking.com.cn
E-mail:longking@public.lyptt.fj.cn
服务热线：0597-2884488

福建龙净环保股份有限公司是我国环境保护除尘行业的首家上市公司(股票代码600388)，是全国专业从事除尘装置、气力输送系统、烟气脱硫装置等大气污染治理设备的大型企业之一，企业综合实力、技术水平和产销量各列同行业之首。公司先后引进美国通用电气(GE)公司全套电除尘器技术、引进德国鲁奇能捷斯·比晓夫(LLB)公司的石灰石石膏湿法和烟气循环流化床干法脱硫技术以及澳大利亚国家散料研究中心气力输送技术。成为目前国内少数具备从除尘脱硫一体化到物料输送全过程工程配套和系统集成能力的企业。

龙净环保现有总资产14亿元，总占地面积三十多万平方米，员工近2000名，产品销往全国34个省市自治区，并出口日本、泰国、菲律宾、越南、印度尼西亚和伊朗等十多个国家和地区。





系列声波清灰器

有效利用声能 解决积灰问题 最新专利产品 领先除灰领域



企业简介:

辽宁中鑫自动化仪表有限公司是东北地区较大的工业自动化仪表与声波清灰器等环保配套设备的专业生产基地, 系省高新技术企业, 中国环保产业协会电除尘委员会的成员单位。1999年通过ISO9001国际质量体系标准认证。公司主导产品有: 声波清灰器、射频导纳物位计、超声波流量计及粉尘浓度计等, 其中声波清灰器已获得国家专利。

声波清灰器工作原理:

声波清灰器是以压缩空气为动力源, 膜片在谐振腔体内振动, 产生特定低频、高能声波, 使积灰产生声致疲劳而剥落, 达到清灰目的。

声波为点声源球面波, 全方向全方位清除沉积物聚集, 防止和延缓积灰板结。

声波清灰器应用范围:

- 用于电除尘器极板、极线清灰, 弥补原振打力不足的缺陷, 解决了由于板线积灰所造成的电场电压、电流下降, 除尘效率降低的问题。
- 用于袋式除尘器、辅助脉冲反吹清灰。
- 用于电除尘器灰斗出口清灰, 清除架桥、膨料、堵塞, 疏通出口料流。
- 用于锅炉系统空气预热器、过热器、省煤器清灰。



SQ-75型声波清灰器用于电除尘器极板、极线清灰



SQ-75型声波清灰器在顶部电磁振打电除尘器增效改造中的应用



SQ-160G型声波清灰器用于电除尘器灰斗出口清灰、清堵



应用前



应用后

应用声波清灰器前后极板极线比较



辽宁中鑫自动化仪表有限公司

地址: 辽宁省辽阳市南环街二段 (高新技术开发区)

电话: 0419-4150091 4152422 传真: 0419-4150804 电子信箱: lzyb151@mail.lyptt.ln.cn 网址: ly-zx.com.cn 邮编: 111005

前 言

从第一台电除尘器在火力发电厂投入运行至今,中国电除尘技术研究和应用经历了近半个世纪的发展历程。目前,中国已成为世界上最重要的电除尘器大国之一。到2000年为止,全国有电除尘器总流通面积约为 $35 \times 10^4 \text{ m}^2$,处理气体量达 $1.7 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上。

中国是典型的煤炭型污染国家,烟尘污染问题过去曾经是、现在也还是、未来一段时间内恐怕仍然是制约中国可持续发展战略实施的重大环境问题之一。

火力发电厂是中国最主要的烟尘排放源,也是烟尘污染治理的重点。据有关资料介绍,截止2002年为止,中国燃煤火电装机约占电力总装机的73%,达到258 000 MW;发电用煤达到6亿吨/年,占全国总烟煤量的45%。预计2010年火电装机将达到438 530 MW,2020年达到657 780 MW,2050年达到1 167 250 MW。与此同时,电除尘器在火电厂的应用取得了高速发展,目前中国新建大中型火电机组近乎100%配置了电除尘器,装备火电机组达2亿千瓦以上,电除尘器的数量占国内市场总量的75%以上。

然而随着新的火电厂污染排放标准的颁布,中国火电厂电除尘器面临着前所未有的压力和挑战,现有的新、老电除尘器绝大多数难以满足相关时段的排放要求。这种压力和挑战从某种意义上来说也许是一种机遇。尽管中国电除尘器事业从20世纪80年代以来在技术水平和生产规模上发展迅速,但这种发展是在原有较低排放标准下取得的。新的排放标准将有助于推动中国电除尘事业在长期的技术积累基础上向更高的水平发展。

纵观中国电除尘器研究和应用现状,可以认为,要使电除尘器适应新的排放标准要求,尚需在基础理论、应用技术、制造安装工艺和运行维护等各环节加大研究力度。

本书作者在相关领域取得了一点研究成果,积累了一些经验,尽管微不足道,但还是愿意奉献给业内同仁,以求赐教;近年来国内不少专家学者在电除尘技术研究中成果卓著,令人敬佩,本书择其一二,或引用或介绍,不仅意在为本书增色,更为使之光大。

本书第一章至第六章、第十一章至第十三章由华北电力大学原永涛教授执笔,第七、八两章由福建龙净环保股份有限公司林国鑫先生执笔,第九章由国电公司南京电力自动化设备总厂卢泽锋先生执笔,第十章由浙江菲达环保科技股份有限公司宣伟桥先生执笔。

由于水平和学识所限,书中疏漏乃至不足之处料知难免,恳请广大读者批评指正。

在本书撰写过程中得到了王励前、张德轩等先生的热情支持和具体指导;黄炜、李庆先生等为本书提供了部分宝贵的技术资料,在此致以诚挚谢意。

本书部分章节汇集、整理和引用了国内外一些专家学者的宝贵经验和研究成果,对他们的卓越工作一并致以深切敬意。

著者

2004年5月

新
平
和
PDG

目 录

第一章 煤种、烟气与飞灰	1
第一节 动力煤分析	1
一、动力煤的元素组成	1
二、中国动力用煤的工业分析	2
三、不同煤化程度煤元素组成的变化规律	4
第二节 烟气成分和烟气量	5
一、烟气成分	5
二、烟气量的计算	6
第三节 飞灰的矿物成分与化学成分	8
一、飞灰的形成过程	8
二、飞灰的矿物成分	9
三、飞灰的化学成分	11
第四节 飞灰的粒径分布特征	13
一、粒径的分类	13
二、飞灰粒径分布参数	14
三、粒径分布特征径	14
四、燃煤飞灰的粒径分布函数	15
第五节 飞灰的密度和浸润性	19
一、飞灰的密度	19
二、飞灰的浸润性	20
第六节 飞灰的黏附性	21
一、粉料的黏附机理	22
二、粉料黏附性分类	22
三、飞灰黏附性的测定	23
第七节 飞灰的流态化	24
一、飞灰的似液体性	24
二、飞灰的非正常流化	24
三、粉料的结拱	25
四、颗粒的离析	26
第二章 电除尘器气流和颗粒的运动	28
第一节 飞灰颗粒的运动特性	28
一、颗粒的运动阻力	28
二、颗粒的自由沉降和悬浮运动	29
三、颗粒沉降（悬浮）速度的修正	31
四、影响电除尘器中颗粒沉降和悬浮的空气动力学因素	33

第二节 电除尘器空气动力场分布特征	34
一、气流分布不均匀的一般原因及影响	34
二、入口烟道及烟箱对电除尘器流场的影响	35
三、改善气流均匀性的措施	36
第三节 荷电颗粒的驱进运动	39
第四节 极板通道内微细颗粒的运动	42
第五节 电风	44
第三章 粉尘的介电性质	47
第一节 粉尘的比电阻及伏安特性	47
一、粉尘比电阻	47
二、粉尘的伏安特性	48
第二节 粉尘的导电和击穿	50
一、粉尘的导电机理	50
二、粉尘的电阻性和电容性	52
三、粉尘的电击穿	53
第三节 气体的导电和击穿	55
一、气体的电离、导电和击穿	55
二、气体亲和性	57
第四节 飞灰颗粒的荷电机理	58
一、电场荷电	58
二、扩散荷电	60
三、电场荷电和扩散荷电的综合作用	61
第五节 粉尘比电阻对驱进速度的影响	62
第四章 飞灰性质与电除尘	64
第一节 飞灰的粒径对电除尘的影响	64
一、燃煤飞灰粒径分布特征	64
二、飞灰粒径对比电阻的影响	67
三、电除尘器分电场飞灰的比电阻	69
四、粒径对驱进速度的影响	71
第二节 飞灰的化学成分与比电阻	72
一、燃煤飞灰化学成分分布	72
二、飞灰中铁含量的影响	75
三、飞灰中锂、钠等元素含量的影响	79
第三节 飞灰黏附性对电除尘的影响	80
一、电极的积灰	80
二、极板的振打清灰	82
三、极板上黏附力的分布规律和振动加速度的合理分布	83
第五章 煤质对电除尘的影响	85
第一节 中国发电动力用煤	85
一、发电动力用煤的分类	85

二、不同煤种的外观特征	86
第二节 碳对飞灰比电阻的影响	88
一、煤的比电阻特性	88
二、煤的介电常数	89
三、飞灰含碳量对比电阻的影响	89
四、煤化程度对飞灰比电阻的影响	92
第三节 燃煤硫分对电除尘的影响	94
一、中国动力用煤硫分赋存特点与分布	94
二、燃煤含硫量对飞灰比电阻的影响	97
三、燃煤含硫量与飞灰驱进速度的关系	98
第四节 煤质的影响	99
一、煤质对烟气中飞灰浓度的影响	99
二、煤质对烟气量的影响	100
三、灰分对燃煤量的影响	101
第六章 烟气工况对电除尘器运行的影响	103
第一节 烟气温度对电除尘的影响	103
一、烟气温度对飞灰比电阻的影响	103
二、烟气温度对伏安特性的影响	104
三、烟气温度对烟气量的影响	105
第二节 烟气湿度的影响	105
第三节 烟气含尘浓度的影响	107
第四节 现场飞灰比电阻与实验室比电阻对比分析	109
一、关于固有比电阻和工况比电阻	109
二、中国燃煤电厂飞灰的实验室比电阻	109
三、中国燃煤电厂飞灰的现场比电阻	111
四、飞灰实验室比电阻与现场比电阻的对比分析	113
五、关于飞灰高比电阻界定的认识	114
第五节 烟气性质对电除尘影响实例分析	115
一、设备及烟气参数	115
二、烟气温度和湿度的影响	116
三、烟气量的影响	117
第七章 BE 型电除尘器	119
第一节 BE 型电除尘器的技术特点	119
一、顶部电磁锤振打清灰	119
二、小分区供电	121
三、吊打分开式刚性阴极系统	122
第二节 BE 型电除尘器的选型设计	127
一、电除尘器型号规格的确定	128
二、进出气方式的确定	129
三、极配形式的确定	129

四、供电方式的选择	129
五、配套电源规格的确定	129
第三节 BE 型电除尘器的本体结构	130
一、术语	130
二、壳体	130
三、阳极系统及其振打装置	131
四、阴极系统及其振打装置	133
五、保温箱及高压进线	134
六、进口气流分布装置与出口槽型板装置	135
七、灰斗及卸输灰装置	136
八、顶部起吊及雨棚	137
第四节 BE 型电除尘器在燃煤电厂的应用	137
一、选型设计	137
二、极配形式	139
第八章 电除尘器技术改造	140
第一节 电除尘器改造的原因	140
一、烟尘排放标准提高	140
二、选型不当	142
三、烟气工况变化	142
四、设备老化	142
第二节 电除尘器改造应把握的问题	142
一、根据现行标准制定改造目标	143
二、正确把握改造选型	143
三、因地制宜合理布局	143
第三节 电除尘器改造中的几种典型布局	144
第四节 电除尘器改造的实施	146
第五节 应用实例	147
第九章 电除尘器高低压合一电源	152
第一节 电除尘器高低压合一电源的原理及特点	152
一、高、低压分开电气控制系统	152
二、电除尘器高低压合一电源的原理	152
三、电除尘器高低压合一电源的特点	153
第二节 DKZ-2 系列电除尘器电源及控制装置	154
一、DKZ-2 系列电除尘器电源及控制装置的控制功能	155
二、DKZ-2 系列电除尘器电源及控制装置的工作原理	156
三、DKZ-2 系列电除尘器电源及控制装置的常见故障及其检修方法	158
四、DCC2000 静电除尘器自动监控系统	160
第三节 高低压合一电源在工程中的应用	161
一、在老机组改造工程中的应用 (实例一)	161
二、在热电联产机组电除尘工程中的应用 (实例二)	162

三、在大型火力发电机组电除尘工程中的应用（实例三）	163
第十章 电除尘器的安装调试	165
第一节 电除尘器施工工艺流程	165
一、安装施工流程图	166
二、安装流程图说明	167
第二节 电除尘器施工准备	167
一、组织准备	168
二、技术准备	168
三、物资和材料的准备	168
四、施工现场准备	169
第三节 设备基础交验与连接	169
一、基础平面预埋钢板方式	170
二、二次灌浆浇注方式	170
第四节 钢支架的安装	171
一、固定式钢支架	171
二、铰链式钢支架	172
第五节 支承安装	172
一、支承类型及结构	172
二、支承安装	173
三、支承安装要求	173
第六节 底梁安装	173
一、底梁的结构和组成	173
二、底梁安装	174
三、底梁安装验收	174
第七节 灰斗及挡风安装	174
一、灰斗组合顺序	175
二、灰斗安装	175
三、灰斗内挡风板（阻流板）安装	175
四、灰斗上挡风板安装	175
五、灰斗安装要求	175
第八节 尘中走道安装	176
一、尘中走道安装	176
二、尘中走道安装要求	176
第九节 壳体安装	176
一、壳体的结构和组成	176
二、立柱安装	176
三、立柱安装要求	177
四、封板（墙板）安装	177
五、封板（墙板）安装要求	177
六、梁（大梁）的安装	178

七、内顶梁（大梁）安装要求·····	178
第十节 进出口封头安装·····	178
一、进出口封头安装·····	178
二、进出口封头安装要求·····	178
第十一节 阴极系统安装·····	178
一、阴极悬挂装置安装·····	179
二、阴极大框架安装·····	179
三、阴极小框架和阴极线安装·····	180
四、阴极螺旋线安装及检测·····	182
第十二节 阳极板排安装及检测·····	183
一、紧固型阳极板排·····	183
二、自由悬挂型阳极排·····	185
三、阳极板组起吊使用方法·····	186
第十三节 阴、阳极安装偏差测试标准和方法·····	187
一、阴、阳极安装偏差测试标准·····	187
二、阴、阳极安装偏差测试方法·····	187
第十四节 阴、阳极振打装置安装·····	188
一、阳极振打装置·····	188
二、阴极振打装置·····	189
第十五节 电除尘器调试·····	190
一、调试内容·····	190
二、调试前的准备工作及安全注意事项·····	190
三、电除尘器设备及元件的检查与试验·····	191
四、电除尘器安装后的检查与调整·····	192
五、电除尘器低压控制回路的检查与调试·····	192
六、电除尘器高压控制回路的检查与调试（设备出厂前完成）·····	193
七、电除尘器阴、阳极振打件的调试·····	194
八、电除尘器电加热器通电调试·····	195
九、电除尘器冷态空载调试·····	195
十、电除尘器热态负荷整机调试（72 h 联动运行）·····	197
第十一章 电除尘器常见故障分析·····	198
一、选型容量问题·····	198
二、放电极系统故障·····	199
三、收尘极板系统故障·····	201
四、气流分布板积灰·····	202
五、振打系统故障·····	202
六、灰斗及卸灰系统故障·····	205
七、卸灰、排灰设备故障·····	206
八、二次表计指示失真问题·····	207
九、绝缘件泄漏和损坏·····	207

十、冷、热态试验中的问题	208
十一、关于实际工况条件问题	209
十二、伏安特性曲线分析	210
十三、安装质量问题	210
十四、电除尘器影响因素简汇	212
第十二章 飞灰比电阻测量技术	215
第一节 实验室测量方法	215
一、试验台结构原理	215
二、测量方法	216
三、比电阻值的计算	218
四、操作注意事项	219
五、附表	219
第二节 BDL 型便携式飞灰比电阻现场测定仪	220
一、测量系统	221
二、结构原理	221
三、技术特点	223
四、测量方法	223
五、使用注意事项	225
第三节 梳齿形比电阻测定方法	227
第四节 表征粉尘介电性质的特征参数	228
一、峰值比电阻 ρ_m	228
二、峰阻温度 t_m	229
三、击穿电压 V_j	229
第十三章 电除尘器工程实例	231
工程实例一 华北电网 A 厂 3 号炉电除尘器技改工程 (扩容改造工程)	231
工程实例二 华北电网 B 厂 2 号炉电除尘器技改工程 (扩容改造工程)	236
工程实例三 华北电网 C 厂 6 号炉电除尘器技改工程 (气流、振打技改工程)	239
工程实例四 华北电网 D 厂 300MW 机组电除尘器设计 (极配形式技改工程)	249
工程实例五 华北电网 E 厂 4、5 号炉水膜除尘器改电除尘器工程	252
工程实例六 云南 A 电厂 8 号炉电除尘器技改工程 (烟气喷水增湿工程)	257
参考文献	262

第一章 煤种、烟气与飞灰

第一节 动力煤分析

一、动力煤的元素组成

煤是由一些可燃的有机化合物和一些不可燃的无机物质组成的。可燃的有机化合物都是一些高分子的有机物质，这些高分子的有机物质分子结构形式及其性质很复杂。在工程应用中，一般用元素的组成来表示煤的成分。

组成煤的化学元素包括碳 (C)、氢 (H)、氧 (O)、氮 (N)、硫 (S) 和一些以氧化物或盐类形式存在的金属元素。这些金属元素在煤中被称为矿物杂质。由于水分 (用 M 表示) 在煤中占有显著的地位，对煤的燃烧影响甚大，所以，为了研究和应用上的方便，常常单独把它作为煤的一个组分来考虑。此外，煤中的矿物杂质大部分不能与氧化合，经过燃烧形成固体灰。在煤的成分分析时，由于这些矿物杂质难以测量和表示出来，故用其燃烧后的灰分含量来表示它们在煤中的存在，成为煤的第七组分，用 A 表示。灰分是煤的主要燃烧产物，也是主要的大气污染物，更是电除尘器的主要收集对象。

碳、氢、氧、氮、硫、水分和灰分七种组分可表示为 (收到基)

$$(C) + (H) + (O) + (N) + (S) + (A) + (M) = 100\% \quad (1-1)$$

(1) 碳元素 (C): 燃料中的碳一般不是呈游离状态而存在，而是与氢、氧、硫等元素组成有机化合物。碳的含量在煤中占的比例最大。煤的形成过程是动植物在地壳内经过长期高温高压的作用逐步形成的。煤在地壳内的成煤年代越久，其碳含量越高。无烟煤埋藏年代最长，其碳含量可达 80% 以上。泥煤成煤年代最短，其碳的含量也能达到 40%~50%。由于碳元素是煤的最主要的成分，故它也是煤进行燃烧的最主要参加者。炉内的热量主要是由它的燃烧产生的。但另一方面，由于煤在锅炉中不可能达到百分之百燃烧，残余的碳粒进入灰中，不仅增加了飞灰产量，也影响了粉煤灰的综合利用品质。

(2) 氢元素 (H): 氢在煤中的含量较小，约占 2%~6% 左右。煤中的氢以化合氢和有效氢 (也称自由氢) 两种形式存在。化合氢与氧结合而呈水的形态，这部分氢是不能再参加燃烧的。未和氧化合的氢则称为有效氢，这部分氢同碳和硫组成了可以进行燃烧的化合物。

(3) 氧 (O) 和氮 (N): 氧在煤中的含量随不同的煤种差距较大，低的仅 1%~2%，高的可达 14%。氮的含量很少，一般在 0.5%~2.5% 的范围内，最高也只能达到 4%。

(4) 硫 (S): 燃煤中硫的含量一般为 0.4%~2%，少量高硫煤可达到 3%~4%。煤中的硫以有机硫、硫化铁硫和硫酸盐硫三种形式存在，硫化铁硫主要以黄铁矿形式存在，硫酸盐硫通常含量很少。有机硫和燃料中的碳、氢、氧结合成有机化合物，均匀分布在燃料中。黄铁矿硫是铁的硫化物，常见的是二硫化铁 (FeS_2)。因有机硫和黄铁矿硫均能与氧化合进行燃烧，故又总称挥发性硫。硫酸盐硫主要是硫酸钙 (CaSO_4)、硫酸镁 (MgSO_4) 和硫酸亚铁 (FeSO_4) 等。煤中硫的可脱除性，主要取决于硫的赋存状态和分布特征。对于煤中的有机硫部分，目前还难以找到可行的除硫工艺，可考虑采用生物脱硫技术。对含黄铁矿高的

煤，由于其形态易于解离，通过常规的重力分选即可以除掉一部分硫分，还可以利用黄铁矿与煤的磁性相反的特征，采取高梯度磁选方法脱除细粒黄铁矿。

(5) 灰分 (A)：灰分是一些不能参加燃烧的矿物杂质经过一系列化学和物理变化后的产物。主要是黏土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、沙子 (SiO_2)、铁的氧化物 (Fe_3O_4) 及钙 (Ca)、镁 (Mg)、钾 (K)、钠 (Na) 的硫酸盐和氧化物等。灰分含量较大，对于不同的煤种，其含量的变化也较大。一般灰分含量占 10%~25% 左右。灰分的含量与煤的开采、运输及储存等人为条件有很大关系。一些石煤的灰分甚至高达 60% 左右。

(6) 水分 (M)：燃煤中所含的水分分为两部分，一部分为内在水分（或称固有水分），另一部分为外在水分。内在水分即经过在大气状态下风干的煤所保持的水分，它随成煤年代的增加而减少。外在水分指煤表面及颗粒间所黏附的水分，此部分水分能在空气风干过程中逸走。外在水分随煤的开采运输、储存及气候等外界条件的变化而发生较大的变动。内在水分和外在水分之和成为燃煤的全水分。

中国煤炭资源丰富，品种齐全，尤其是适用于动力用煤的煤种，比如气煤、长焰煤、不黏煤、褐煤、无烟煤等储量较大，其特点是难选煤多，高灰、高硫煤的比例大。

二、中国动力用煤的工业分析

(一) 灰分

1. 煤中矿物质的来源

(1) 原生矿物质——即原始成煤植物含有的矿物质。它参与成煤，很难除去。一般不超过 1%~2%。

(2) 次生矿物质——在成煤过程中进入煤层的矿物质，由通过水力和风力搬运到泥炭沼泽中而沉积的碎屑矿物和从胶体溶液中沉积出来的化学成因矿物。通常这类矿物在煤中的含量也不很高，约 10% 以下。

上述原生和次生矿物质都属于煤的内在矿物质，故较难用洗选法脱除。

(3) 外来矿物质——采掘过程中混入煤中的底板、顶板和夹石层的矸石。它的含量随煤层结构的复杂程度和采掘方法而异，一般为 5%~10%，高的可达 20% 以上。这类矿物质用重力洗选法容易除去。

2. 矿物质的赋存形态

(1) 黏土矿物——有高岭土 (石) [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$]、伊利石 [$\text{K}_{1-1.5}(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+})_4\text{Si}_{6.5-7}\text{Al}_{1-1.5}\text{O}_{20}(\text{OH})_4$]、蒙脱石 [$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{H}_3\text{O})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ti})_4(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{20}(\text{OH}, \text{F})_4$] 和水云母 (组成同蒙脱石) 等。在煤中分布很广，在陆相沉积的烟煤和无烟煤中其含量最高。

(2) 硫化物类矿物——是海陆交互相沉积煤中最常见的一种矿物，有黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等。

(3) 氧化物类矿物——主要为石英，还有 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 和 TiO_2 等。

(4) 碳酸盐类矿物——主要有方解石 (CaCO_3) 和菱铁矿 (FeCO_3)，此外还有白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] 和菱镁矿等。

除上述矿物外，还有以石膏为代表的硫酸盐、长石、锆石、贵金属矿物，稀有元素如含 Ge、Ga、V 等和放射性元素 U 和 Th 等的矿物。

(二) 水分

煤是多孔性固体, 含有或多或少的水分, 其含量随煤化程度的增加而降低, 到高煤化程度时又略有回升。水分的存在一方面可反映煤的孔隙结构的变化, 另一方面将提高烟气的含湿量。

根据水分的结合状态可分为游离水和结晶水两大类, 前者又可分为外在水分和内在水分两种。

(1) 外在水分 (M_f) 外在水分又称自由水分、表面水分或湿分。它是指附着于煤粒表面的水膜和存在于直径大于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的毛细孔中的水分。这种水分的蒸气压与纯水的蒸气压相同, 在常温下容易失去。在实验室中为制取分析煤样 (空气干燥煤样), 一般是在 $45\sim 50\ ^\circ\text{C}$ 下放置数小时, 使其与大气湿度相平衡, 以除去外在水分。

(2) 内在水分 (M_{int}) 内在水分是指吸附或凝聚在煤粒内部毛细孔 (直径小于 $0.1\ \mu\text{m}$) 中的水分。由于毛细孔的吸附作用, 这部分水的蒸气压低于纯水的蒸气压, 故较难蒸发除去, 需要在高于水的正常沸点的温度下才能除尽。当煤粒内部毛细孔吸附的水分在一定条件下达到饱和时, 内在水分达到最高值, 称为最高内在水分。它在煤化过程中的变化有一定的规律性。

(3) 结晶水分 结晶水分指矿物质所含的结晶水或化合水, 如存在于石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 和高岭土 [$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ 或 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] 中的水, 在煤的工业分析中不考虑。另外, 煤中有机质在热解中生成的水称为热解水, 与上述三种水分完全不同。

(4) 全水分 (M_t)

由于测定煤样时外在水分和内在水分所用的煤样不同, 因而计算基准不同, 故全水分不等于内、外在水分含量之和。全水分和内、外在水分的关系为

$$M_t = M_f + M_{\text{int}} \frac{100 - M_f}{100} \% \quad (1-2)$$

内在水分与煤化程度有关。不同煤种的内在水分含量见表 1-1。由表可见, 中等变质程度的烟煤, 即肥煤和焦煤的内在水分和分析基水分 (基本上为内在水分) 最低, 这与它们的孔隙率是一致的。

表 1-1 不同煤化程度煤的水分含量 M_{ad}

煤种	泥煤	褐煤	长焰煤	不黏煤	弱黏煤	气煤	肥煤	焦煤	瘦煤	贫煤	无烟煤
水分 $M_{\text{ad}}/\%$	30~50	10~28	3~12	3~15	0.5~5	1~6	0.3~2.0	0.3~1.5	0.4~1.8	0.5~2.5	0.7~9.5

注: M_{ad} ——空气干燥基水分。

(三) 挥发分和固定碳

前面讲到的水分和灰分属于煤中的无机物, 它们并不是主要成分。这里将要讨论的挥发分和固定碳是表征煤中的主要成分——有机质性质的重要指标。

1. 挥发分

当煤样在隔绝空气的条件下加热到一定温度, 并在该温度下停留一定时间, 煤中的有机质则受热分解析出一部分气态和蒸汽产物, 即挥发分。它占煤样质量的百分比, 称为挥发分产率, 简称挥发分。

过去有人把它叫做挥发分含量, 这是不妥当的。因为挥发分与水分不同, 它不是煤中的