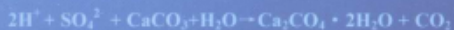
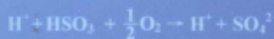
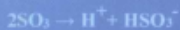
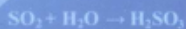
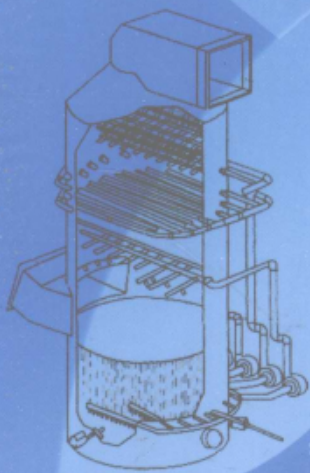


烟气脱硫

YAN QI TUO LIU
SHI YONG JI SHU

实用技术

李继莲 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

ISBN 978-7-5083-7870-1



9 787508 378701 >

定价：43.00 元

上架建议：电力工程/火力发电

X701.3
L-423

烟气脱硫实用技术

李继莲 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了烟气脱硫基本知识、湿法烟气脱硫工艺系统及设备、湿法烟气脱硫系统的运行、半干法烟气脱硫工艺系统及设备、干法烟气脱硫技术、烟气脱硫工艺过程控制与检测、脱硫产物的处置与综合利用、火电厂脱硝技术、烟气脱硫脱硝技术经济分析等内容。

本书可供相关专业大、中专院校师生使用，也可供电力生产一线的相关专业人员阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

烟气脱硫实用技术/李继莲编. —北京: 中国电力出版社, 2008
ISBN 978 - 7 - 5083 - 7870 - 1

I. 烟… II. 李… III. 烟气脱硫 IV. X701.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 145645 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008年12月第一版 2008年12月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 21.75印张 442千字

印数0001—3000册 定价43.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着全球经济的飞速发展，世界各国对能源的需求越来越大，能源利用后产生的大量“三废”（废水、废气、废渣）对环境造成了很大污染。随着环保压力的加大，各国纷纷制定相应法规，来保护我们赖以生存的家園。

煤炭作为发展中国家经济发展第一大能源，为全球经济发展作贡献的同时，也将一个最严重的问题留给了人们，那就是环境污染——二氧化硫（ SO_2 ）的超标排放。在 SO_2 的总排放量中，火电机组燃煤 SO_2 排放占一半以上。截至目前，我国 SO_2 排放量已居全球第一，仅2005年 SO_2 排放量达3000万t，而环境容纳量为1200万t。由此可见，环境保护面临的挑战是非常严峻的，其中电力工业责任重大，烟气脱硫脱硝工作，义不容辞、责无旁贷，环保工作任重道远、刻不容缓。

编者根据脱硫市场对本专业学习及培训的需要，结合脱硫设备及运行的情况，编撰了本书。本着便于学习及有利于培训教学的宗旨，书中设置了烟气湿法脱硫、干法脱硫、半干法脱硫及脱硝等知识，并根据实际运行的需求，设置了湿法脱硫运行与维护、脱硫工艺控制与检测及脱硫产品——石膏的综合利用等方面的内容。这是一部较为完整的烟气脱硫方面的培训教材，也可供技术工作人员学习和工作使用。

本书由大同电力高级技工学校高级讲师李继莲担任主编，并编写书中第二章、第四章、第八章、第九章，大同电力高级技工学校高级讲师霍宁编写第一章，河北灵达环保能源有限责任公司工程师母刚编写第三章，国网能源山西神头第二发电厂高级工程师谭贵生编写第五章，国网能源山西神头第二发电厂高级工程师李辉编写第六章，太原车辆段大同运用车间助理政工师李继东编写第七章。

本书由山西大唐国际运城发电有限责任公司高级工程师孟庆文、大同电力高级技工学校高级讲师柏学恭主审。在编写过程中，得到了同学们和同事的大力支持，他们提出了很多建设性意见和建议，编者深表感谢。由于编者水平和经验所限，书中难免存在缺点和疏漏，敬请读者批评指正。

编者

2008年6月



前言

第一章 烟气脱硫基本知识	1
第一节 国内外脱硫概况	1
第二节 燃料中的硫分	7
第三节 烟气脱硫的方法及应用	14
第四节 石灰石—石膏湿法脱硫工艺的基本原理	27
第二章 湿法烟气脱硫工艺系统及设备	38
第一节 概述	38
第二节 石灰石浆液制备系统及设备	41
第三节 吸收系统及设备	50
第四节 烟气系统及设备	67
第五节 石膏脱水系统及设备	89
第六节 FGD 工艺的其他系统	100
第七节 FGD 典型工艺系统介绍	101
第三章 湿法烟气脱硫系统的运行	116
第一节 FGD 系统启动前的准备工作	116
第二节 FGD 系统启动、停止与正常运行的规定	117
第三节 FGD 烟气系统的启动、停止	119
第四节 脱硫装置运行中的防腐与防垢	121
第五节 FGD 装置运行中的检查和维护	123
第六节 FGD 运行中的控制参数	126
第七节 脱硫装置事故处理	135
第四章 半干法烟气脱硫工艺系统及设备	147
第一节 喷雾干燥烟气脱硫工艺	147
第二节 喷雾干燥烟气脱硫灰渣的处置	164

第三节	循环流化床烟气脱硫技术	168
第五章	干法烟气脱硫技术	180
第一节	炉内喷钙烟气脱硫技术	180
第二节	炉内喷钙尾部烟气增湿活化脱硫技术	187
第三节	管道喷射烟气脱硫技术	194
第四节	荷电干式吸收剂喷射脱硫技术	201
第五节	电子束照射烟气脱硫技术	204
第六节	工程案例：某电厂 LIFAC 脱硫工程	212
第六章	烟气脱硫工艺过程控制与检测	216
第一节	脱硫工艺运行参数检测与测点布置	216
第二节	脱硫装置的控制系統	227
第三节	脱硫装置的顺序控制、保护与联锁	233
第四节	脱硫装置主要测量仪表的选择和使用	235
第七章	脱硫产物的处置与综合利用	251
第一节	脱硫石膏成分分析	251
第二节	脱硫石膏的特性	254
第三节	脱硫石膏的综合利用	256
第四节	FGD 废水处理设备	262
第五节	脱硫固体副产物处理设备	264
第八章	火电厂脱硝技术	277
第一节	控制 NO_x 燃烧技术	278
第二节	烟气脱硝技术	293
第三节	烟气同时脱硫脱硝技术	313
第九章	烟气脱硫脱硝技术经济分析	329
第一节	概述	329
第二节	FGD 技术投资分析	332
第三节	技术经济运行成本分析	334
参考文献	341

亡,酸性湖水或河水会降低水中钙的含量,使鱼类生长受到抑制,损坏水生动物的脊椎和骨骼,造成畸形,如使水生动物佝偻或身体短小等。此外,酸性水还会使河底沉积物释放出有毒物质,当 pH 值小于 4.5 时,各种鱼类、两栖动物和大部分昆虫会消失,水草会死亡。酸雨还会浸渍土壤,侵蚀矿物,使铝元素和重金属元素沿着基岩裂缝流入附近水体,影响水生生物生长或使其死亡。

我国酸雨的化学特征是 pH 值低,硫酸根、铵和钙离子浓度高于欧美国家,而硝酸根浓度比欧美国家低,在我国酸性降水中,硫酸根和硝酸根浓度比在 6.4:1 左右,属于硫酸型酸雨,这种情况表明,降水呈酸性的主要原因之一是大量 SO_2 的排放,因此,就我国情况而言,控制 SO_2 排放是控制酸雨污染的主要途径。

二、我国二氧化硫 (SO_2) 排放及控制情况

我国是世界上经济发展最快的国家之一,在已探明的一次能源中,煤炭占总量的 90%。在我国一次能源的生产和消费中,煤炭约占 2/3,是我国经济长期快速发展的可靠保障,这种能源格局在今后相当长的一段时间内不会改变。我国的大气污染属煤烟型污染,据权威机构报告显示,我国 SO_2 和 CO_2 排放量的 85%、烟尘的 70% 均来自于燃煤。据统计,大气污染造成的经济损失占 GDP 的 3%~7%,如不能得到有效控制,到 2020 年,我国仅因燃煤污染导致的疾病需付出的经济代价将达 3 900 亿美元。

前些年,由于经济发展的特殊规律及相应法律法规制定落后等原因,我国 SO_2 的排放一直难以控制,排放量逐年上升,酸雨面积逐年扩大。据权威部门统计,我国近年煤炭消耗与 SO_2 、 NO_x 排放关系如图 1-1 所示,2000 年,全国煤炭消耗量为 12.45 亿 t, SO_2 排放 1 995 万 t, NO_x 排放 1 200 万 t,其中,火电机组燃烧用煤 6 亿 t,占煤炭消耗总量 48%, SO_2 排放量为 1 200 万 t,占 SO_2 总排放量的 60%;2005 年,全国煤炭消耗量达到 18 亿 t, SO_2 排放量 3 000 万 t, NO_x 排放量为 1 800 万 t,全国发电装机容量约 5 亿 kW,其中火电装机容量约 3.4 亿 kW,耗煤约 10 亿 t,占总煤耗 56%,排放 1 800 万 t,占 SO_2 总排放量 60%,已建成脱硫装置 2 000 万 kW,在建脱硫装置 3 000 万 kW;到 2010 年,全国发电装机容量将达到 6.5 亿 kW,其中火电装机容量约 4.8 亿 kW,耗煤量约为 14 亿 t,排放 SO_2 可达 2 300 万 t;预计到 2020 年,全国发电装机容量可达 10 亿 kW,其中火电装机容量约 6 亿 kW,耗煤量约为 15 亿 t, SO_2 排放量将达 2 500 万 t。截至目前,我国 SO_2 排放量已居全球第一,而我国每年 SO_2 的环境容量为 1 200 万 t。“十一·五”期间,我国能源消费结构中 52% 以上为燃煤,将新建大型煤炭基地 13 个,生产能力达 25 亿 t,其中火电总装机容量 5 亿 kW,耗煤量 14 亿 t,需上脱硫装置 3 亿 kW。由此可见,环境保护面临的挑战是非常严峻的,其中电力工业责任重大,烟气脱硫脱硝工作,义不容辞、责无旁贷,环保工作任重道远、刻不容缓。

1982 年国务院颁布了《征收排污费暂行办法》,其中包括 SO_2 超标排放的收费内容。1987 年 9 月颁布了《大气污染防治法》,2000 年 4 月 29 日通过了修正的《大气污

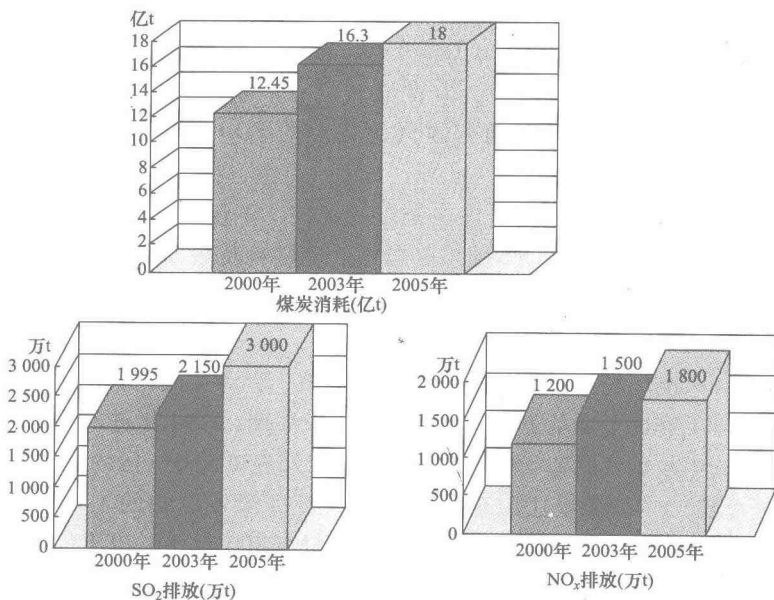


图 1-1 我国近年煤炭消耗与 SO₂、NO_x 排放的关系

染防治法》，2002 年 11 月编制了《“两控区”酸雨和 SO₂ 污染防治“十五”计划》，2003 年 1 月 1 日，我国开始实施《清洁生产促进法》。我国虽从 20 世纪 60 年代初开始研究火电厂烟气脱硫技术，但由于技术、经济等多方面的原因，至今还不完全具备 20 万 kW 以上机组烟气脱硫的设计和成套能力。随着我国环境保护法律、法规和标准的日趋严格及执法力度的加大，2007 年上半年，我国 SO₂ 排放量为 1 200 万 t，同比下降 0.8%。在未来 10 年内至少有 4 000 万 kW 以上的火电装机容量需安装烟气脱硫装置。因此，必须加快实现火电厂烟气脱硫技术和设备的国产化，以适应 SO₂ 治理的需要。到 2020 年，火电厂 SO₂ 排放将得到有效控制，年排放量可控制在 900 万 t 以内。

三、其他国家 SO₂ 排放及控制情况

随着对 SO₂ 污染成因和危害的深入了解和研究，各国人民和政府已认识到大气污染的严重性和控制大气污染的紧迫性。20 世纪 70 年代初，日本和美国率先实施控制 SO₂ 排放的战略，许多国家也相继制定了严格的 SO₂ 排放标准和中长期控制战略，加速了控制 SO₂ 排放的步伐。

1990 年 1 月 15 日，美国国会通过了《清洁大气法》的修正案，明确指出要通过控制 SO₂ 的排放，来达到控制酸雨的形成目的。由于 SO₂ 的排放主要来自火力发电厂，该方案对火电厂 SO₂ 的排放制定了消减目标。1970~1974 年，美国 SO₂ 的排放总量下降了 10%，1975~1987 年，SO₂ 的排放总量又下降了 19%，到 2000 年，美国全国

SO₂ 的排放总量仅为 1 000 万 t, 酸雨区范围及酸雨强度也大幅度下降。

日本是应用烟气脱硫 (Flue Gas Desulfurization, 简称 FGD) 技术最早的国家。欧洲的 FGD 技术以德国发展最为迅速。20 世纪 70 年代后期, 德国“黑森”大面积受害, 不得不开展 SO₂ 的防治工作。目前德国 90% 以上的 FGD 装置采用石灰石—石膏法, 75% 的工业用石膏来自于脱硫石膏。此外, 丹麦、芬兰、挪威、奥地利等国对 FGD 技术也开展了大规模的研究, 开发出许多先进的工艺, 不仅在本国安装了许多 FGD 装置, 还向境外出口技术和装备。英国主张燃用低硫燃料及高烟囱稀释排放, 而法国以核电为主, 因此两国对 FGD 技术的研究和应用不多。

四、目前国内外脱硫概况

目前, 我国火电厂脱硫行业总体呈较快速发展。2002 年底, 我国火电厂烟气脱硫在政策上和技术上完成了准备工作, 2003 年进入发展期, 2004 年进入快速发展期。

目前国内火电厂烟气脱硫工程绝大多数是从国外进口设备, 国内负责土建和安装。以石灰石 (石灰) —石膏湿法脱硫工艺为例, 引进国外设备的工程静态投资高达 1 000 ~ 1 200 元/kW, 若实现国产化, 造价可控制在 700 元/kW 以下。一台 30 万 kW 机组石灰石 (石灰) —石膏湿法脱硫工艺若实现国产化, 可节约投资约 9 000 万元。实现火电厂烟气脱硫设备的国产化, 不仅可以降低工程造价, 还可推进机电行业技术进步和产业升级, 提高我国机电制造企业的竞争能力。2003 年末, 我国已具备独立完成火电厂湿法烟气脱硫工艺设计的能力, 湿法烟气脱硫设备国产化率达 90% 以上; 2005 年末, 湿法烟气脱硫设备国产化率达 95% 以上。至 2010 年, 湿法烟气脱硫设备国产化率将达 100%。其他若干种烟气脱硫工艺的设备国产化率达到 95% 以上。

然而, 我国火电厂脱硫行业虽然发展比较迅速, 仍然存在不少问题, 例如: 国产脱硫技术难以在火电厂烟气脱硫行业中应用和推广; 国内新建脱硫公司重复引进国外技术; 缺乏拥有自主知识产权的烟气脱硫工艺技术; 市场竞争不规范等。

目前, 国内外已开发了数百种烟气脱硫 (FGD) 技术, 其中石灰石—石膏湿法 FGD 技术最为成熟, 运行可靠、应用最广, 占世界上投入运行的 FGD 系统的 85% 左右。目前, 我国已有石灰石—石膏湿法、旋转喷雾干法、常压循环流化床法、海水脱硫法、炉内喷钙尾部烟气增湿活化法、电子束法、烟气循环流化床法等十多种工艺的脱硫装置, 但火力发电厂中采用最多的脱硫技术还是石灰石—石膏湿法。国内开发的烟气脱硫技术发展及应用情况见表 1-1, 国外 FGD 技术在国内的应用情况见表 1-2。

表 1-1 国内开发的烟气脱硫技术发展及应用情况

开发时间	脱硫技术	地点	备注
1974 ~ 1976 年	石灰石—石膏湿法 [烟气量 2 500 m ³ /h (标准状态下)]	上海闸北电厂	因结垢、腐蚀等问题试运行 后即停运

续表

开发时间	脱硫技术	地点	备注
1974~1976年	铁离子液相催化脱硫回收法〔烟气量2 500m ³ /h(标准状态下)〕	上海市电厂	因动力消耗大、体积大和腐蚀严重等问题而停运
1974~1976年	亚钠循环法〔烟气量10 000m ³ /h(标准状态下)〕	湖南300电厂	因动力消耗大、运行费用和腐蚀严重等问题而停运
1976~1981年	水洗再生活性炭脱硫法〔烟气量5 000m ³ /h(标准状态下)〕	湖北松木坪电厂	因设备庞大、电耗大、操作复杂和腐蚀严重等问题而停运
1984~1990年	旋转喷雾干燥烟气脱硫工艺〔烟气量5 000~70 000m ³ /h(标准状态下)〕	四川白马电厂	钙硫比为1.4~1.7时,脱硫效率达80%,完成中试,目前已停运
20世纪80年代	磷酸肥法〔烟气量5 000m ³ /h(标准状态下)〕	四川豆坝电厂	中试脱硫率可达95%,已停运
20世纪90年代	文丘里水膜除尘简易脱硫	贵阳发电厂、江西贵溪铜厂	南京电力环保所研制,脱硫率为60%~70%
20世纪90年代后	湿式除尘脱硫技术(湍流塔、旋流板塔、NID等)	全国各地	多家单位研制,脱硫效率60%~85%
	新型液柱湿法	沈阳化肥总厂、广西南宁冶炼厂	清华大学研制,脱硫效率90%~95%
	新型干法、半干法,如CFB—FGD、DCL固硫剂等技术	全国各地	脱硫效率50%~90%,在推广

表1-2

国外FGD技术在国内的应用情况

FGD技术	用户	机组容量(MW)/ 烟气量(m ³ /h, 标准状态下)	设计脱硫率 (%)	投运时间	FGD技术来源
石灰石— 石膏湿法	重庆华能珞璜电厂 I、II期	2×(2×360)/ 4×1 087 200	95/80	1992~ 1993年	日本三菱重工
	山东潍坊化工厂	2×35t/h/100 000	82	1995年	日本三菱重工
	南宁化工集团	35t/h/50 000	70	1995年	日本川崎重工
	重庆长寿化工厂	35t/h/61 000	70	1995年	日本千代田
	太原第一热电厂	200/600 000	80	1996年3月	日本日立
	杭州半山电厂	2×125t/1 230 000	95.7	2001年3月	德国Steinmüller

续表

FGD 技术	用户	机组容量 (MW) / 烟气量 (m^3/h , 标准状态下)	设计脱硫率 (%)	投运时间	FGD 技术来源
石灰石 (石灰) - 石膏湿法	国华北京第一热电厂 I 期	$2 \times 410\text{t}/\text{h}/1\ 100\ 000$	95	2001 年	德国 Steinmüller
	重庆电厂	$2 \times 200/1\ 960\ 000$	95.7	2001 年	德国 Steinmüller
	广东连州电厂	$2 \times 125/1\ 090\ 000$	81	2000 年 12 月	奥地利 AE 公司
	江苏扬州发电厂	$200/975\ 000$	80	2002 年	日本川崎重工
	北京京能热电厂	$200/919\ 523$	95	2002 年	国电龙源 (FBE 技术)
	贵州安顺电厂	$2 \times 300/2 \times 1\ 256\ 682$	90	2003 年	日本川崎重工
	浙江钱清电厂	$125/550\ 000$	90	2003 年 7 月	浙江省电力设计院 (美国 B&W 技术)
	国华北京第一热电厂 II 期	$2 \times 410\text{t}/\text{h}/1\ 100\ 000$	95	2003 年 7 月	国电龙源 (FBE 技术)
	山东黄台电厂	$2 \times 300/-$	95	2003 ~ 2004 年	国电龙源 (FBE 技术)
	江苏夏港电厂	$2 \times 135/-$	95	2003 ~ 2004 年	国电龙源 (FBE 技术)
电子束	广东瑞明电厂	$2 \times 125/1\ 081\ 000$	90	2003 年 10 月	广东省电力设计院 (AE 公司技术)
	太原第二热电厂	$1 \times 200/806\ 059$	90	2003 年底	武汉凯迪 (AE 技术)
	江苏镇江电厂	$2 \times 135/-$	95	2004 年初	武汉凯迪 (美国 B&W 技术)
	四川成都热电厂	$200/300\ 000$	80	1996 年 10 月	日本荻原
	杭州协联热电厂	$3 \times 130\text{t}/\text{h}/305\ 400$	85	2002 年 11 月	国华 (日本) 荻原
荷电干式喷射脱硫	杭州钢铁集团	$35\text{t}/\text{h}/60\ 000$	70	1997 年	美国 AIANCO
	山东德州电厂	$75\text{t}/\text{h}/100\ 000$	70	1995 年	
	广州造纸厂	$2 \times 50/2 \times 230\ 000$	75	2000 年	

续表

FGD 技术	用 户	机组容量 (MW) / 烟气量 (m ³ /h, 标准状态下)	设计脱硫率 (%)	投运时间	FGD 技术来源
海水脱硫	深圳西部电力公司	300/1 100 000	90	1998 年	挪威 ABB 公司
	福建后石电厂	2×600/2×1 915 900	90	1999 ~ 2000 年	日本富士化水株式会社
LIFAC 法	南京下关电厂	2×125/2×543 600	75	1998 ~ 1999 年	芬兰 Tempella 公司
	浙江钱清电厂	125/550 000	65	2000 年	芬兰 Tempella 公司
烟气循环流化床	广州恒运电厂	210/783 400	85	2002 年 10 月	武汉凯迪 (德国 WULFF 公司技术)
	云南小龙潭电厂	100/487 000	90	2001 年	丹麦 Smith-müller
氨-硫铵法	胜利油田化工厂	—/210 000	90	1979 年	日本东洋公司
碱式硫酸铝法	南京钢铁厂	—/51 800	95	1981 年	日本同和公司
旋转喷雾干燥	沈阳黎明发动机制造公司	35t/h/50 000	80	1990 年	丹麦 Niro 公司
	山东黄岛电厂	200/300 000	70	1994 年	日本三菱重工

第二节 燃料中的硫分

一、煤的组成成分

煤的成分变化很大, 具体百分含量大致为: 碳 (C) 65%~95%、氢 (H) 2%~7%、氧 (O) 25%、硫 (S) 1%~10%、氮 (N) 1%~2%, 水分一般在 2%~20% 之间变化, 最高可达 70%。

煤的组成成分根据试验方法和使用范围可分为元素分析成分和工业分析成分两种。

(一) 燃煤试验项目和煤成分的代表方法

煤的物化试验项目很多, 为表述和使用方便, 燃煤中常用试验项目的符号采用相应英文名词的第一个字母或缩写表示。燃煤试验项目代表符号见表 1-3, 燃煤试验项目下角标的含义代表符号见表 1-4。



表 1-3 燃煤试验项目代表符号

试验项目	代表符号	试验项目	代表符号
水分	M	视(相对)密度	ARD
固体碳	FC	哈氏可磨指数	HGI
真(相对)密度	TRD	前苏联热工研究院可磨指数	VTI
变形温度	DT	挥发分	V
软化温度	ST	碳	C
流动温度	FT	氢	H
矿物质	MM	氧	O
最高内在水分	M_{MAX}	硫	S
灰分	A	氮	N

表 1-4 燃煤试验项目下角标的含义代表符号

下角标含义	代表符号	下角标含义	代表符号
全(水分、硫…)	t	低位(发热量)	net
外在(水分)	f	收到基	ar
内在(水分)	inh	空气干燥基	ad
有机(硫)	o	干燥基	d
硫酸盐(硫)	s	干燥无灰基	daf
硫铁矿(硫)	p	恒湿无灰基	maf
弹筒(发热量)	b	干燥无矿物基	drumf
高位(发热量)	gr	折算成分	zs

(二) 煤的元素分析成分

煤的元素分析成分也称为化学组成成分,它是锅炉燃烧计算和研究煤特性的重要依据,包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)五种元素,以及水分(M)和灰分(A),其中硫(S)的含量直接影响到烟气中SO₂的含量,而劣质煤中硫(S)含量较大,脱硫装置的工作负荷也就更大。

(三) 煤的工业分析成分

煤的工业分析是在规定的条件下将煤样进行干燥、加热和燃烧,以测定煤中的水分(M)、挥发分(V)、固定碳(FC)和灰分(A)的含量。这些成分是煤在炉内的燃烧过程中分解的产物。因此煤的工业分析成分能更直接地表明煤的某些燃烧特性,同时也是发电用煤分类的重要依据。

煤的组成成分及其关系如图 1-2 所示。

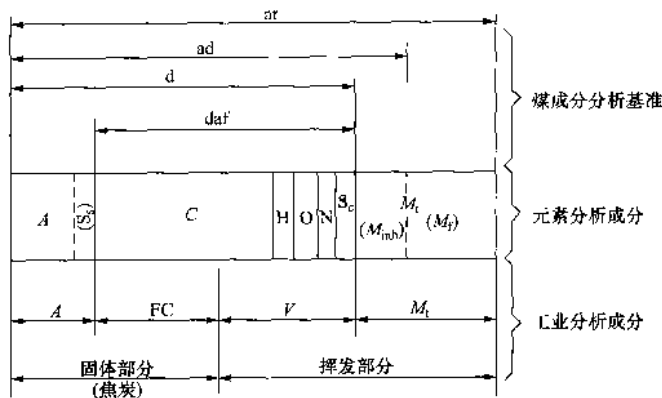


图 1-2 煤的组成成分及其关系

(四) 煤成分的分析基准

要准确地反映煤的特性，不仅要知道煤的成分，而且还需要知道分析煤成分时煤所处的状态。由于煤中的灰分和水分的含量随着开采、运输、储存及气候条件的变化而变化，所以同一种煤，当其处于不同状态时，分析得出的成分含量百分数是不同的。煤成分的分析基准就是指测定煤成分的百分含量时煤所处的状态或测试条件。目前采用的分析基准有收到基、空气干燥基、干燥基、干燥无灰基四种。

1. 收到基

收到基是指煤处于入炉前的实际应用状态，以此为基准分析得到的成分称为收到基成分，用角标“ ar ”表示。

2. 空气干燥基

以实验室内经过自然风干后与空气湿度达到平衡状态的煤为基准分析而得的成分，称为空气干燥基成分，用角标“ ad ”表示。与收到基比较，它已除掉外在水分。

3. 干燥基

以去除全水分状态的煤为基准分析而得的成分，称为干燥基成分，用角标“ d ”表示。

4. 干燥无灰基

假想的无水无灰状态的煤为基准分析而得的成分，称为干燥无灰基，用角标“ daf ”表示。

煤的组成成分及各基准间的相互关系如图 1-2 所示。

煤的各种基准成分之间可以相互换算。当由一种基准成分换算成另一种基准成分时，只需乘以一个换算系数即可。不同基准成分的换算系数见表 1-5。

表 1-5 不同基准成分的换算系数

欲求基准 已知基准	收到基 ar	空气干燥基 ad	干燥基 d	干燥无灰基 daf
收到基 ar	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基 ad	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干燥基 d	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基 daf	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

由于干燥无灰基成分既不受水分含量的影响，又不受灰分含量的影响，最为稳定，因此煤的干燥无灰基成分能更准确地反映出煤的特性。特别是干燥无灰基挥发分的含量能确切地反映煤燃烧的难易程度，所以煤中挥发分的含量就以干燥无灰基 V_{daf} 表示，从而表明煤的燃烧特性和划分煤的种类。

(五) 动力煤的分类

电厂锅炉用煤称为动力煤。动力煤通常以煤的干燥无灰基挥发分含量 V_{daf} 为主要依据进行分类，大致分为无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤等几类。

1. 无烟煤

无烟煤 $V_{daf} < 10\%$ ，俗称白煤，表面有明亮的黑色光泽，机械强度较高，密度较大，不易研磨，无焦结性。形成年代长，碳化程度最高，杂质含量少。燃烧时有很短的蓝色火焰，由于挥发分低，故不易着火，储存时不易自燃和风化。

2. 贫煤

贫煤 $V_{daf} = 10\% \sim 19\%$ ，挥发分较低的贫煤不易点燃，燃烧时火焰短，不焦结。故其燃烧特性比较接近于无烟煤，而其碳化程度接近烟煤，碳化程度较无烟煤低，含碳量较高。

3. 烟煤

烟煤 $V_{daf} = 20\% \sim 40\%$ ，挥发分高，容易着火燃烧，火焰长，发热量较高，某些烟煤由于含氢较多，其发热量甚至超过无烟煤。但有的劣质烟煤杂质较多，灰分含量可高达 50%，故燃烧困难。外表呈灰黑色，有光泽，质地松软，大多数烟煤具有一定的焦结性，碳化程度次于无烟煤。

4. 褐煤

褐煤 $V_{daf} > 40\%$ ，挥发分含量高，碳化程度低，易点燃并容易自燃，火焰长，灰分

和水分含量都较高，发热量低，无焦结性，外表呈棕褐色，质软易碎。

除以上几类煤种外，还有洗中煤、泥煤、煤矸石、油页岩。这些燃料的发热量很低，杂质多，燃烧很困难。加强对这些燃料的开发利用是我国的一项基本能源政策。

二、煤中的硫分

(一) 煤中硫分的存在形式

硫是煤中的有害物质，煤中的硫可分为无机化合态硫和有机硫两大部分。此外，有些煤中还有少量以单质状态存在的单质硫（元素硫）。煤中硫的分类如图 1-3 所示。

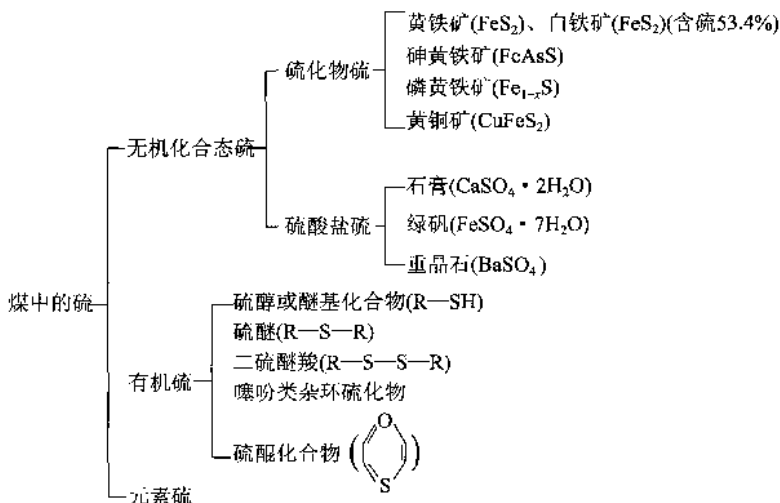


图 1-3 煤中硫的分类

1. 无机硫

煤中的无机硫来自矿物质中各种含硫化合物，包括硫铁矿硫和硫酸盐硫，其中以黄铁矿硫（ FeS_2 ）为主，还有白铁矿（ FeS_2 ）、砷黄铁矿（ FeAsS ）、黄铜矿（ CuFeS_2 ）、石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、绿矾（ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ）、方铅矿（ PbS ）、闪锌矿（ ZnS ）等。黄铁矿一般可以分为粒状、莓球状、结核状、规则和不规则状，交代植物残体，裂隙充填黄铁矿等类型，也可以将黄铁矿分为具生物结构和不具生物结构两大类。

2. 有机硫

有机硫的化学机构十分复杂。目前还无法完全了解煤中有机硫的化学成分。不过大体上可以测定煤中有机硫是以五种官能团存于煤中的：硫醇类 R-SH 、硫化物或硫醚类 R-S-R' 、含噻吩环的芳香体系、硫酞类和二硫化物 RSSR' 或硫蒺类。不同含硫黄有机物的组分与煤的煤化程度有关，一般在低煤化程度的高硫煤中含有较多低分子量的有机硫化物，而在煤化程度较高的高硫煤中则含有较多高分子量有机硫