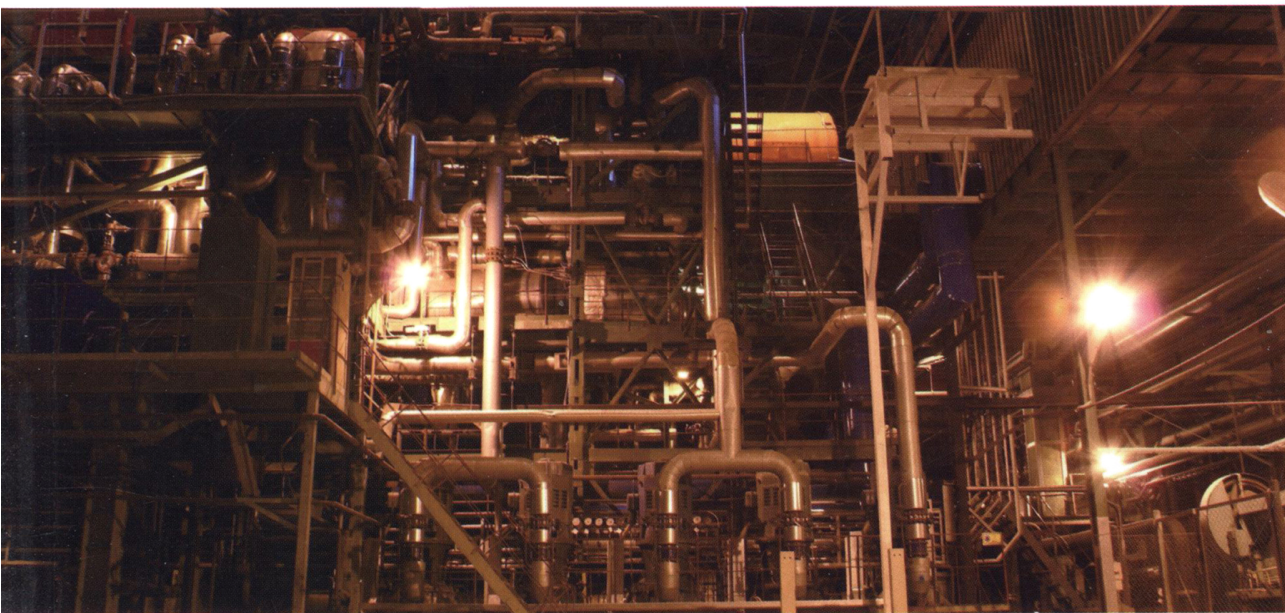




节能减排技术丛书

J I E N E N G J I A N P A I



工业锅炉烟气湿法 脱硫实用技术设计

吴安 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



吴安 环境工程、热能动力工程教授级高级工程师。曾任中国兵器工业专家委员会委员、中国兵工环保劳保学会副主任委员、中国兵器工业环境保护研究所所长、总工程师、五环环境工程技术公司总经理等职。

1960年毕业于清华大学动力机械系燃气轮机专业，后在中国兵器工业第五设计研究院和环境保护研究所从事热能动力工程设计、大气污染控制工程设计和科学研究工作。

获奖项目有：“PW型平面旋风除尘器研制”获全国科学大会奖状、“火炸药厂稀硫酸浓缩尾气净化研究”获国防科工委重大科技进步奖、“锅炉烟气喷雾干燥脱硫技术研究”获兵器部科技进步奖、“工业锅炉烟气气流喷雾干燥脱硫技术”获环境保护部最佳实用技术奖。

曾编著出版“工业锅炉房设计”部分章节、“火炸药厂稀硫酸浓缩尾气的热力学性质”“纤维除雾器”“粉尘浓度的连续监测”“锅炉 烟气喷雾干燥脱硫技术研究”“兵器工业环境保护设计手册”“锅炉烟气氧化镁湿法脱硫工业试验研究”“氧化镁湿法同石灰石湿法脱硫技术比选”等书刊论文。

作者邮箱:wuan1@263.net
mobile:13701067419

节能减排技术丛书

工业锅炉烟气湿法脱硫 实用技术设计

吴 安 编著



机械工业出版社

本书在收集参考国内、外脱硫技术新资料的基础上,结合作者20多年从事大气污染控制科研设计的经验,简明、扼要地阐述了煤的燃烧和大气污染,锅炉烟气脱硫设计条件的确定,气体吸收概论等有关锅炉烟气脱硫设计的技术基础性知识;比较系统全面地从脱硫设计角度阐述了工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计。

根据脱硫设计需要,适当介绍了脱硫装置腐蚀环境和防腐蚀设计,阐述了锅炉烟气脱硫技术及工艺比较选择,介绍了工业锅炉烟气脱硫自控设计方案,阐述了工业锅炉湿法脱硫主要设备和湿法脱硫系统调试。为了对工业及供热锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计有更具体、更清楚的了解,本书对每种实用脱硫工艺都以220t/h热电锅炉湿法脱硫设计方案和投资估算进行了示例。为了脱硫设计方便,本书摘录了有关脱硫设计中常用的主要设备及脱硫设计和运行中相关的技术规定标准规范。

本书对工业及供热锅炉湿法脱硫技术的论述,从基础理论到生产实践、从国外到国内、从技术到经济、从定性到定量、从生产经验数据到数理分析计算、从设计方法到设计示例,内容丰富、层次分明、重点突出、实用性强。本书既可供从事工业及供热锅炉房设计及运行人员、大气污染控制科研及设计人员、环境保护管理人员、环境监测人员、环境保护工程技术公司专业人员参考阅读,也可供高等院校环境工程、热能工程师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术设计/吴安编著. —北京:机械工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-111-43981-3

I. ①工… II. ①吴… III. ①工业锅炉—煤烟污染—湿法脱硫—烟气脱硫 IV. ①X701.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第212217号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:曲彩云 庞晖

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:赵颖喆 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2014年2月第1版第1次印刷

169mm×239mm·28.5印张·2插页·637千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-43981-3

定价:86.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

对于人类，具有如此美好的生存环境和丰富资源的地球只有一个。地球环境需要人类珍惜和保护。否则，破坏了地球的生态平衡也就是破坏了人类自己健康生活的要素。

保护环境维持地球的生态平衡是人类生存的需要和持续发展的需要，是人类高度文明与智慧的表现，也是人类的共同愿望和义不容辞的责任。可是随着经济的发展，大量燃料燃烧后的烟气排向大气，产生了严重的大气污染和环境问题。当前迫切需要解决和改善的重要环境问题是：

1. 全球气候变暖

由于 CO_2 的大量排放，导致全球气候变暖。在过去的一个世纪里全球表面平均温度已上升 $0.3 \sim 0.6^\circ\text{C}$ ，全球海平面上升了 $10 \sim 25\text{cm}$ 。目前在地球大气中的二氧化碳含量已由工业革命（1750 年）之前的 $280\text{ppm}^\ominus$ 增加到近 360ppm 。1996 年政府间气候变化小组发表的评估报告表明：如果世界能源消费的格局不发生根本变化，那么到 21 世纪中叶，大气中的二氧化碳含量将达到 560ppm ，全球平均温度可能上升 $1.5 \sim 4^\circ\text{C}$ 。同时可能出现的影响和危害有：一是海平面上升；二是影响农业和自然生态系统；三是加剧洪涝、干旱及其他气象灾害；四是影响人类健康。

2. 臭氧层破坏和损耗

自 1985 年南极上空出现臭氧层空洞以来，地球上空臭氧层被损耗的现象一直有增无减。到 1994 年，南极上空的破坏面积已达 2400万 km^2 。大气中的臭氧含量仅一亿分之一，分布在离地面 $20 \sim 30\text{km}$ 的平流层中，它可以有效地挡住来自太阳的紫外线侵袭。有害紫外线的增加会使皮肤癌和白内障患者增加，损坏人的免疫力，使传染病增加；其次是破坏生态系统。

3. 酸雨污染

酸雨，也被称为空中的死神。其是指酸性物质以湿沉降或酸性颗粒物的形式，从大气转移到地面上。酸雨中绝大部分是硫酸和硝酸，主要来源于人类使用化石燃料，向大气排放了大量的二氧化硫和氮氧化物。欧洲是世界上一大酸雨区，美国和加拿大东部也是一大酸雨区。亚洲的酸雨区主要集中在东亚，其中我国南方是酸雨严重的地区。

$\ominus 1\text{ppm} = 10^{-6}$ 。

酸雨,通常指 pH 低于 5.6 的降水。其危害主要表现为损害生物和自然生态系统,腐蚀建筑材料及金属结构。2008 年,我国二氧化硫排放量为 2321 万 t。我国目前每年因酸雨和二氧化硫污染,对生态环境损害和人体健康影响造成的经济损失在 1100 亿元人民币左右。即每吨二氧化硫造成的经济损失约 4740 元。

目前我国在用的工业锅炉有 60 万台左右,工业炉窑有 12 万台左右。年耗煤 4 亿 t 左右,约占全国煤炭消耗量的 1/4。年排放二氧化硫 1000 万 t,约占全国二氧化硫排放总量的 45%。

目前,我国对电站锅炉、工业锅炉和炉窑都发布了烟气脱硫除尘排放标准,有 GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》,GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》。此外,还有一些地方标准,如北京市发布的北京市地方标准,DB 11/139—2007《锅炉污染物综合排放标准》。这表明我国已经严格按相关国家排放标准来控制电站锅炉与工业锅炉和工业炉窑烟气污染物排放。凡新建锅炉或在用锅炉和改建扩建锅炉都必须安装脱硫装置,这对控制 SO_2 污染起到了强制性作用,并推动锅炉烟气脱硫进入一个新阶段。自 2001 年,我国开展电站脱硫和工业锅炉脱硫以来,上了一大批脱硫项目。这对削减 SO_2 排放量收到了明显效果。在 2009 年,我国政府工作报告中明确公布了 2008 年 SO_2 排放量比 2007 年下降了 5.95%。

2009 年 3 月 6 日国家环境保护部发布了《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范》(HJ 462—2009),更好地规范了工业锅炉脱硫工程设计。该规范适用于蒸发量 $\geq 20\text{t/h}$ (14MW) 或蒸发量 $< 400\text{t/h}$ 的燃煤热电锅炉及相当烟气量的炉窑脱硫工程。这个适用范围涵盖锅炉吨位跨度较宽,从一般的 20t/h 工业锅炉至相当于 10 万 kW 火力发电厂锅炉 (410t/h 电站锅炉)。所以在设计脱硫系统的工艺流程和自控水平时,应该区别对待。对于 ≤ 35 (40) t/h 的锅炉,采用相对简化的脱硫系统;对于接近 410t/h 的锅炉采用较完备的脱硫系统。

为了更好地促进工业锅炉与工业炉窑烟气脱硫,作者在总结以往工业锅炉烟气脱硫设计工作基础上,广泛收集国内外资料,编写了本书。

本书较系统地阐述了烟气脱硫技术设计中用到的基础理论及计算方法,锅炉烟气湿法脱硫实用技术,烟气脱硫工艺参数及自动控制,烟气脱硫防腐材料,烟气脱硫常用脱硫塔,烟气脱硫系统主要设备。此外,介绍了烟气脱硫系统的调试和脱硫工艺技术经济比较与选择。

作者希望能使读者比较系统地了解工业锅炉烟气湿法脱硫实用技术,了解烟气湿法脱硫工艺和自控设计,为做好工业及供热锅炉脱硫技术的经济比

较与选择，做好烟气脱硫技术设计提供一些必要、实用的技术资料。并希望
对工业及供热锅炉烟气脱硫工作能有所帮助。

本书摘编了部分对于脱硫设计常用的资料，在此向这些资料的编著者表
示感谢。

本书中有关自控方面设计摘编了李国祥、周晴同志在某个项目设计中的
部分说明。在此表示深谢！

由于水平所限，书中存在的缺失和不足之处恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第 1 章 煤的燃烧与大气污染	1
1.1 煤的组成、成分分析及其分类	1
1.1.1 煤的元素分析	1
1.1.2 煤的工业分析	1
1.1.3 煤的成分基准及换算	2
1.2 煤燃烧产生的污染物	4
1.3 煤的燃烧和烟气组成成分	5
1.3.1 碳的燃烧	5
1.3.2 氢的燃烧	6
1.3.3 硫的燃烧	6
1.3.4 煤燃烧的理论空气量	6
1.3.5 煤燃烧产生的烟气量	7
1.3.6 空气和烟气的焓	9
1.4 工业及热水锅炉烟尘原始排放浓度	10
第 2 章 锅炉烟气脱硫设计条件	12
2.1 脱硫设计常用的标准及规范	12
2.2 脱硫设计的原始资料	12
2.3 脱硫装置设计要求	13
2.4 脱硫装置设计条件	13
2.5 锅炉排烟的 SO_2 含量	15
2.6 锅炉排烟的 NO_x 含量	15
2.7 脱硫装置的设计脱硫效率	16
2.8 烟气含湿量	16
2.9 烟气露点	16
2.10 烟气的升温 and 降温	17
第 3 章 气体吸收概论	20
3.1 气体扩散	20
3.1.1 扩散速率方程式	20
3.1.2 扩散系数	21
3.2 气体吸收原理	21
3.2.1 亨利定律	22
3.2.2 双膜理论	22
3.2.3 传质速率方程式	23
3.2.4 脱硫塔传质单元数	24

3.2.5 脱硫塔吸收区高度	26
第4章 锅炉烟气湿法脱硫实用工艺设计	28
4.1 湿式石灰法脱硫	28
4.1.1 基本原理与化学反应式	28
4.1.2 湿式石灰法脱硫工艺流程	30
4.1.3 脱硫工艺流程说明	32
4.1.4 湿式石灰法脱硫工艺参数	34
4.1.5 脱硫产物的用途	37
4.1.6 脱硫过程水平衡	37
4.1.7 湿式石灰法脱硫废水处理	42
4.1.8 湿式石灰法脱硫特点	43
4.1.9 湿式石灰法脱硫设计注意事项	44
4.1.10 湿式石灰法烟气脱硫设计方案及投资估算	46
4.2 湿式石灰石法脱硫	55
4.2.1 基本原理与化学反应式	56
4.2.2 湿式石灰石法脱硫工艺流程	57
4.2.3 湿式石灰石法脱硫工艺参数	59
4.2.4 脱硫产物的用途	60
4.2.5 湿式石灰石法脱硫特点	60
4.2.6 湿式石灰石法脱硫设计注意事项	60
4.2.7 湿式石灰石法烟气脱硫设计方案及工程投资估算	61
4.3 湿式氧化镁法脱硫	67
4.3.1 基本原理与化学反应式	67
4.3.2 湿式氧化镁法脱硫工艺流程	68
4.3.3 脱硫系统组成	68
4.3.4 湿式氧化镁法脱硫工艺参数	70
4.3.5 湿式氧化镁法脱硫废水及处理方案	72
4.3.6 湿式氧化镁法脱硫技术特点	74
4.3.7 湿式氧化镁法脱硫设计注意事项	74
4.3.8 湿式氧化镁法烟气脱硫除尘方案及工程投资估算	76
4.4 钠碱法脱硫	81
4.4.1 基本原理与化学反应式	82
4.4.2 钠碱法脱硫工艺流程	83
4.4.3 亚硫酸钠法	84
4.4.4 钠碱法脱硫工艺参数	85
4.4.5 钠碱法脱硫废水量及处理方案	85
4.4.6 钠碱法脱硫技术特点	88
4.4.7 钠碱法脱硫设计注意事项	89
4.4.8 钠碱法锅炉烟气脱硫方案及投资估算	89
4.5 双碱法脱硫	95

4.5.1	基本原理与化学反应式	96
4.5.2	双碱法工艺流程	96
4.5.3	双碱法脱硫工艺参数	97
4.5.4	双碱法中钠碱的再生回用	98
4.5.5	双碱法中钠碱的损耗	98
4.5.6	双碱法脱硫废水处理	99
4.5.7	双碱法脱硫技术特点	101
4.5.8	双碱法脱硫设计注意事项	102
4.5.9	双碱法烟气脱硫方案及投资估算	103
4.6	湿式氨法脱硫工艺	110
4.6.1	基本原理与化学反应式	110
4.6.2	湿式氨法脱硫工艺流程及参数	111
4.6.3	湿式氨法脱硫的 pH 值控制	115
4.6.4	湿式氨法脱硫产物的用途	115
4.6.5	湿式氨法脱硫工艺技术特点	116
4.6.6	湿式氨法脱硫设计注意事项	116
4.6.7	湿式氨法烟气脱硫设计方案及投资估算（氨—亚硫酸铵法脱硫工艺）	118
4.7	工业锅炉简易湿法脱硫	125
4.8	工业及供热锅炉湿法烟气脱硫设计实例	128
4.8.1	2×40t/h 锅炉湿式氧化镁法烟气脱硫设计	128
4.8.2	2×35t/h 锅炉烟气钠碱法脱硫设计	138
第5章	锅炉烟气脱硫技术简介及工艺比较和选择	144
5.1	烟气脱硫技术简介	144
5.1.1	煤燃烧前脱硫技术	144
5.1.2	煤燃烧中脱硫技术	144
5.1.3	煤燃烧后烟气脱硫技术	144
5.1.4	常用脱硫工艺和性能	152
5.2	锅炉烟气脱硫工艺的比较和选择	153
5.2.1	湿式石灰石法脱硫工艺	153
5.2.2	双碱法脱硫工艺	154
5.2.3	湿式氧化镁法脱硫工艺	154
5.2.4	循环流化床烟气脱硫方案	156
5.2.5	双碱法、石灰石法、氧化镁法经济指标对比	156
5.3	脱硫工艺方案比选意见	158
第6章	脱硫剂选择和浆液制备	159
6.1	脱硫剂的选择	159
6.1.1	脱硫剂价格和比价	159
6.1.2	脱硫剂产地	159
6.1.3	脱硫剂的脱硫工艺特性	159
6.2	脱硫剂制备流程	161

6.2.1 全封闭脱硫剂制备系统	162
6.2.2 半封闭脱硫剂制备系统	162
6.2.3 简易脱硫剂制备系统	163
6.3 脱硫剂浆液制备设计条件	164
6.3.1 脱硫剂用量	164
6.3.2 脱硫剂储仓	164
6.3.3 搅拌槽（池）	165
6.4 脱硫剂浆液制备设计示例	167
第7章 锅炉烟气湿法脱硫常用脱硫塔	170
7.1 空心喷雾脱硫塔（洗涤塔、吸收塔）	170
7.2 多孔板塔（无溢流多孔板塔、泡沫塔）	172
7.3 文丘里洗涤塔	172
7.4 喷雾、多孔板塔	175
7.5 旋流板塔	175
7.6 液柱塔	176
7.7 其他脱硫塔	177
7.8 常用脱硫塔性能	178
第8章 锅炉烟气湿法脱硫自动控制设计	179
8.1 控制系统概述	179
8.2 自控设计采用的标准及规范	180
8.3 自控设计范围和内容	180
8.4 自动控制回路	180
8.5 测量仪表选型	181
8.6 烟气排放连续监测系统（CEMS）	181
8.7 工业锅炉脱硫自动控制设计技术方案示例	181
8.7.1 130t/h 供热锅炉脱硫自控和电气方案设计	181
8.7.2 锅炉烟气脱硫浆液制备自控设计	183
第9章 工业锅炉烟气湿法脱硫主要设备	187
9.1 脱硫增压风机	187
9.2 脱硫循环泵	189
9.3 罗茨鼓风机	191
9.4 喷雾喷嘴	191
9.4.1 喷嘴的性能	192
9.4.2 喷雾的覆盖率 f_p	195
9.4.3 喷嘴的固定方法	195
9.4.4 喷嘴的材料	196
9.5 除雾器	196
9.6 水力旋流器	206
9.7 真空带式过滤机	209
9.8 板框压滤机	210

9.9 离心分离机	212
9.10 烟气加热器	213
9.11 烟气挡板	216
9.12 烟道	218
9.13 管道和阀门	220
第10章 脱硫系统烟道设计及烟气升温	222
10.1 烟道设计	222
10.2 阻力计算	224
10.3 脱硫系统增压风机设计示例	227
10.4 增压风机风压 H_{zy} (Pa) 和风量 Q_{zy} (m^3/h) 的确定	231
10.5 脱硫排烟加热方案	231
第11章 烟气脱硫防腐设计及其材料	236
11.1 烟气脱硫装置的腐蚀	236
11.2 腐蚀环境划分和材料选用	237
11.3 常用非金属防腐材料	238
11.4 常用金属防腐材料	242
第12章 锅炉烟气湿法脱硫系统调试	247
12.1 脱硫系统调试任务与目的	247
12.2 系统调试的一般规定	247
12.3 调试运行组织工作	248
12.4 系统调试	255
12.5 脱硫系统运行与性能测试	257
第13章 常用设计资料	259
13.1 锅炉燃煤资料及燃烧数据	259
13.2 蒸汽及热水、烟气的热力性质	262
13.3 常用化合物及脱硫剂	272
13.4 常用物理单位换算	275
13.5 烟风道异径管局部阻力系数	283
13.6 各国不锈钢耐酸钢牌号对照	292
13.7 常用数据	295
13.7.1 常用钢材的许用应力	295
13.7.2 常用材料的力学性能、物理性能	303
13.8 常用材料	307
13.8.1 型材	307
13.8.2 管材	319
13.8.3 钢塑复合管	344
13.8.4 ABS 塑料管	345
13.8.5 板材	346
13.9 常用设备	347
参考文献	443

第 1 章 煤的燃烧与大气污染

1.1 煤的组成、成分分析及其分类

煤是由有机物和无机物组成的复杂碳氢固体燃料。煤是远古植物因地壳变动被埋入深层地下，长期处在温度和压力较高的环境下，植物中纤维木质素脱水，含氧量减少，碳质增加，逐渐形成化学稳定、含碳量高的固体化合物。由于埋入地下的深度和时间不同，以及地质作用的强弱不同，形成褐煤、烟煤和无烟煤三大类。

根据用途，将用于炼焦、锻造和化工的燃料称为工艺燃料，用于锅炉的燃料称为动力燃料。

1.1.1 煤的元素分析

全面测定煤中全部化学成分的分析叫做元素分析。煤中所含化学元素达 30 多种，一般将煤中不可燃烧的物质计入灰分，所以煤的元素分析成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分，各化学元素成分用质量分数表示，即

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

碳是煤中含量最多的可燃元素，发热量大，纯碳的发热量为 $32.7 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ 。煤中的碳一部分与氢、氧、氮和硫结合成挥发性有机物，其燃点较低。而对于呈单质状态的碳，其燃点较高，不易着火和燃尽。

氢在煤中含量较少，一般为 3% ~ 6%（质量分数），氢的发热量最高为 $120 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$ ，氢的燃点低，容易着火。

煤中的氧和氮是不可燃物质，其含量较少。但氮在高温时易生成氮氧化物 NO_x ，它是污染大气的酸性气体，也是形成酸雨的有害物质。

硫在煤中含量也很少，通常以有机硫、硫化铁、硫酸盐形式存在。前两种硫化物可燃，称为可燃硫；后一种硫酸盐则归入灰分，称为固定硫。计算烟气中的硫氧化合物 SO_x 时，可近似采用全硫分来代替可燃硫。硫的燃烧产物 SO_2 和 SO_3 是酸性气体，有害于人体健康，也是产生酸雨的元凶，能腐蚀金属设备和建筑物，也会破坏树木、植被和农作物，是当前大气污染控制的主要污染物之一。

1.1.2 煤的工业分析

在实验室中对煤样进行分析，得出水分、挥发分、固定碳和灰分这四种成分的质量分数，称为工业分析。

将自然干燥后的煤样取 1g 左右放入预先加热至 $(145 \pm 5)^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥 1h 后，

试样质量减轻的量占原质量的百分数即为空气干燥基水分的质量分数。

将失去水分的煤样在隔绝空气的条件下放入 920℃ 电炉中加热 7min，放入干燥器内冷却至室温后称重，可得出空气干燥基挥发分的质量分数，即

$$V_{\text{ad}} = \frac{G - G_1}{G} \times 100\% - M_{\text{ad}} \quad (1-2)$$

式中 G ——原煤样质量 (g)；

G_1 ——加热后剩余质量 (g)；

M_{ad} ——空气干燥基水分的质量分数 (%)。

在加热过程中，煤中有机物质分解而析出的气体物质是挥发分，它主要是由各种碳氢化合物、氢、一氧化碳、硫化氢等可燃气体组成，另外还有少量的氧、二氧化碳、氮等不可燃气体。

由于煤的碳化程度不同，其挥发分的析出温度不相同，挥发分的成分及含量也不同。由于挥发分燃点低，容易着火，因此对锅炉运行影响较大，是煤的重要特性，挥发分的含量常作为煤分类的重要依据。

煤在失去水分和挥发分后就成为了焦炭，它包括固定碳和灰分。将煤样放在高温炉中，按规定升温到 $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，并加热 1h，冷却至室温后称重，剩余质量占原煤样质量的百分数即为空气干燥基灰分的质量分数。将原煤样中水分、灰分、挥发分扣除后，即为空气干燥基固定碳的质量分数。

1.1.3 煤的成分基准及换算

由于煤中的水分和灰分易受外界条件的影响而变化，单位质量的煤中其他可燃物质的质量百分数也随之而变。因此，根据煤存在的条件或根据需要而规定的“成分组合”称为基准。

1. 常用基准

(1) 收到基 (原应用基) 以收到状态的煤为基准，计算煤中全部组成成分的组合称为收到基，其中包括全部水分，收到基以下角标 ar 表示。它相当于原来的应用基 y。

$$C_{\text{ar}} + H_{\text{ar}} + O_{\text{ar}} + N_{\text{ar}} + S_{\text{ar}} + A_{\text{ar}} + M_{\text{ar}} = 100\% \quad (1-3)$$

(2) 空气干燥基 (原分析基) 煤样在实验室规定的温度下自然干燥失去外部水分后，其余的成分组合是空气干燥基，以下角标 ad 表示。它相当于原来的分析基 f。

$$C_{\text{ad}} + H_{\text{ad}} + O_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} + S_{\text{ad}} + M_{\text{ad}} = 100\% \quad (1-4)$$

(3) 干燥基 以假想无水状态的煤为基准，以下角标 d 表示，原表示符为 g。由于已不受水分的影响，灰分含量相对比较稳定，可以用于比较两种煤的含灰量。

$$C_{\text{d}} + H_{\text{d}} + O_{\text{d}} + N_{\text{d}} + S_{\text{d}} + A_{\text{d}} = 100\% \quad (1-5)$$

(4) 干燥无灰基 (原可燃基) 以假想无水、无灰状态的煤为基准，以下角标

daf 表示。它相当于原来的可燃基 r。由于不受水分、灰分的影响，干燥无灰基常用于比较两种煤中的碳、氢、氧、氮、硫成分含量的多少。

$$C_{\text{daf}} + H_{\text{daf}} + O_{\text{daf}} + N_{\text{daf}} + S_{\text{daf}} = 100\%$$

(1-6)

四种基准还可以用于煤的工业分析。元素分析成分和工业分析成分的关系如图 1-1 所示。

2. 煤成分分析不同基准间的换算

对于同一种煤，各基准间可进行换算，其换算关系见表 1-1，公式为

$$x = Kx_0$$

(1-7)

表 1-1 不同基准的换算系数 K

x x_0	收到基	空气干燥基	干燥基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100 - M_{\text{ad}}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}}}$	$\frac{100}{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}$
干燥基	$\frac{100 - M_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_{\text{d}}}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{\text{ar}} - A_{\text{ar}}}{100}$	$\frac{100 - M_{\text{ad}} - A_{\text{ad}}}{100}$	$\frac{100 - A_{\text{d}}}{100}$	1

表 1-1 中换算系数 K 不仅可以用于各基准间百分数的换算，也可以用于各基准的发热量之间的换算，但是，不能用于水分间的换算。水分之间换算可用下式，即

$$M_{\text{ar}} = M_{\text{f}} + M_{\text{ad}} \frac{100 - M_{\text{f}}}{100}$$

式中 M_{f} ——外部水分的质量分数（%）。

3. 煤的分类

我国煤的分类方法是采用表征煤化程度的干燥无灰基挥发分的质量分数 V_{daf} 作为分类指标，并将煤分为褐煤、烟煤和无烟煤。一般 $V_{\text{daf}} \leq 10\%$ 的煤为无烟煤， $V_{\text{daf}} \geq 37\%$ 的煤为褐煤， V_{daf} 介于两者之间的煤为贫煤和烟煤。

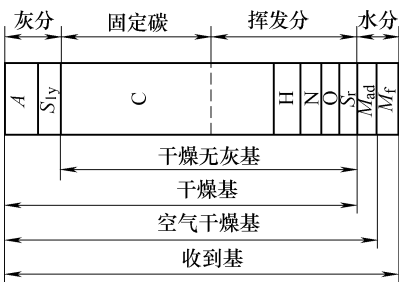


图 1-1 煤的基准划分
 M_{f} —外部水分 M_{ad} —内部水分
 S_{r} —可燃硫（或称全硫）
 S_{ly} —硫酸盐硫（已归入灰分）

1.2 煤燃烧产生的污染物

煤中的可燃成分主要为碳、氢、硫，它们燃烧后分别生成二氧化碳、水蒸气和二氧化硫（或三氧化硫，很少量）。煤中的氮和空气中的氮，在较高温度下生成氮氧化物。煤中含有少量的氟和氯，燃烧后也会在烟气中带有氯化氢和氟化氢。煤炭燃烧产生的微量元素污染物已越来越引起人们的重视。微量元素污染物主要指汞、砷等微量重金属和氟、氯等卤素。煤炭燃烧还会造成颗粒物污染。

1. 煤中碳燃烧产生的二氧化碳

大量二氧化碳排向大气，会导致地球大气层温度缓慢升高，所以把二氧化碳称为温室气体。随着气候变暖，北极冰川融化，造成海平面上升，会淹没一些岛屿，造成严重自然灾害，所以节能减排也是保持地球生态平衡的一项重要战略措施。

煤中碳燃烧产生二氧化碳按式（1-8）计算：



燃烧 1kg C 需要 $x = 2.666\text{kgO}_2$ ，生成 $y = 3.666\text{kgCO}_2$ 。

燃烧 1kg C 需要 $1.866\text{Nm}^3\ominus\text{O}_2$ ，生成 $1.866\text{Nm}^3\text{CO}_2$ 。

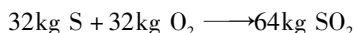
2. 煤中硫燃烧产生的 SO_2

它是大气污染物，是形成酸雨的主要原因之一，也是本书所论述烟气脱硫的对象。

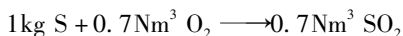
煤中硫燃烧产生二氧化硫按式（1-9）计算：



可得



即



煤在完全燃烧时，除生成 SO_2 之外，约有 0.5% ~ 2.0% 的 SO_2 将进一步氧化成 SO_3 。虽然 SO_3 含量很少，但它与烟气中的水汽结合形成硫酸雾，会在低温受热面上凝结，严重腐蚀设备。

硫酸蒸汽开始凝结的温度称为露点。露点同烟气中 SO_3 浓度有关， SO_3 浓度高，露点也高。在设计脱硫设备时，当烟气温度降低到低于露点时，会有冷凝硫酸形成，具有强腐蚀性，这时必须采用强耐腐蚀材料。

3. 煤燃烧过程中产生的 NO_x

煤中含有少量的氮（一般在 1% 左右），在煤燃烧过程中生成 NO 和 NO_2 称为燃料

⊖ 1Nm^3 表示标准状态下的 1m^3 。

NO_x 。煤燃烧时进入空气中的氮，在高温状态同氧化合生成氮的氧化物，统称热力 NO_x 。以上两项合起来就是煤燃烧生成的 NO_x 。

NO_x 的生成过程比较复杂。热力 NO_x 的生成速率依赖反应温度，同 N_2 浓度和 O_2 浓度的平方根及停留时间成正比。燃料 NO_x 的生成主要取决于过量空气系数，在缺氧状态下可以减少 NO_x 的生成。

降低 NO_x 可采用低 NO_x 燃烧技术，在炉内减少 NO_x 的形成；在炉后采用选择性催化还原脱氮或选择性非催化还原烟气脱氮技术。

我国 2012 年 1 月 1 日实施的 GB 13223—2011《火电厂大气污染排放标准》已规定了氮氧化物最高允许排放浓度限值，即对于 $V_{\text{daf}} > 20\%$ 的燃煤锅炉， NO_x 最高允许排放浓度为 $450\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

4. 煤燃烧产生的微量元素污染

煤中存在的微量元素主要有氟、氯、汞、砷、铅、镉、铬等。其中氟、氯、汞等元素主要以气体状态存在于锅炉排烟中，其他如铅、镉、铬主要存在于飞灰中。氟、氯等是设计湿法 FGD 系统需要处理的有害成分。铅、镉、铬由飞灰带入 FGD 系统浆液中，会影响脱硫排放水的水质。

煤中含氟量一般为 $0.01\% \sim 0.05\%$ ，但有时则高达 0.1% 。大多数煤中含氯量不大于 0.05% ，少数煤中可达 $0.05\% \sim 0.15\%$ 。

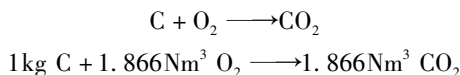
氟、氯都是易挥发元素。煤燃烧时，绝大部分氟化物和氯化物在高温下分解成 HF、HCl 气态物。它们是强酸性气体，绝大部分被碱性吸收剂吸收进入脱硫循环浆液中，含有 Cl^- 、 F^- 的循环浆液有很强的腐蚀性。这要求脱硫装置材质具有强耐蚀性，同时也必须限定脱硫循环浆液中 Cl^- 离子的浓度。脱硫排水中的 F^- 也是脱硫废水处理时要求达标的污染物。

1.3 煤的燃烧和烟气组成成分

煤燃烧是煤中碳、氢、硫等可燃元素同氧进行激烈的连锁反应，产生光和热的过程，煤中的氮和微量元素也参与反应，转化为相应元素的氧化物，所以燃煤烟气组成是 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 SO_2 、 SO_3 、 NO_x 、 N_2 、 O_2 、HCl、HF、颗粒物、微量金属氧化物、未燃尽的碳氢化合物等多种组分的混合气体。通常，烟气在热力学计算时，可以假设为理想气体。

1.3.1 碳的燃烧

完全燃烧时：



不完全燃烧时：

